
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σ' αυτή την έκδοση του βιβλίου «Συστήματα επικοινωνίας» έχουν γίνει κάποιες βασικές αναθεωρήσεις στη διάταξη και το περιεχόμενό του, όπως συνοψίζονται παρακάτω:

1. Έχει δοθεί έμφαση στις αναλογικές επικοινωνίες ως προαπαιτούμενο υπόβαθρο για την κατανόηση των ψηφιακών επικοινωνιών.
2. Η οργάνωση του βιβλίου έχει αλλάξει σημαντικά. Η συμπληρωματική ύλη που υπήρχε προηγουμένως έχει μεταφερθεί στην τοποθεσία του ιστού των συγγραφέων www.wiley.com/college/haykin. Τα δέκα κεφάλαια σε αυτή την καινούργια έκδοση μπορούν να συνοψισθούν όπως παρακάτω:
 - Στο Κεφάλαιο 1 παρέχεται μια σύντομη εισαγωγή στα επικοινωνιακά συστήματα.
 - Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια λεπτομερής εξέταση της ανάλυσης Fourier σημάτων και συστημάτων και μια εισαγωγή στην αναπαράσταση μιγαδικής βασικής ζώνης της αντίστοιχης ζωνοπερατής έκδοσης.
 - Στα Κεφάλαια 3 και 4 καλύπτονται η θεωρία και πρακτικές πλευρές της διαμόρφωσης πλάτους και της διαμόρφωσης γωνίας, αντίστοιχα.
 - Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της θεωρίας των πιθανοτήτων και των στοχαστικών ανελίξεων που είναι ουσιαστικές για την εξέταση του θορύβου στα συστήματα επικοινωνιών (αναλογικά ή ψηφιακά) σε εισαγωγικό επίπεδο.
 - Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η επίπτωση του θορύβου διαύλου στην απόδοση των συστημάτων διαμόρφωσης συνεχούς κύματος (δηλαδή, διαμόρφωσης πλάτους και γωνίας).
 - Στο Κεφάλαιο 7 αρχίζουμε να μετατοπίζουμε την προσοχή μας από τις αναλογικές στις ψηφιακές επικοινωνίες περιγράφοντας τα θέματα της ψηφιακής αναπαράστασης των αναλογικών σημάτων. Στην πράξη, αυτό το κεφάλαιο αντιπροσωπεύει τη μετάβαση από τις αναλογικές στις ψηφιακές επικοινωνίες.
 - Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται μια εισαγωγή στις ψηφιακές ζωνοπερατές επικοινωνίες και εξετάζονται οι επιπτώσεις δύο σημαντικών υποβαθμίσεων: του θορύβου και της ενδοσυμβολικής παρεμβολής. Αυτά τα δύο θέματα εξετάζονται ξεχωριστά. Οι ουσιαστικές προϋποθέσεις γι' αυτή την εξέταση είναι ότι ο θόρυβος είναι λευκός και ο δίαυλος είναι γραμμικός και χρονικά αμετάβλητος.
 - Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται μια εισαγωγή στις ψηφιακές ζωνοπερατές επικοινωνίες. Η εξέταση είναι ένας συνδυασμός ζωνοπερατής ανάλυσης και ανάλυσης μιγαδικής βασικής ζώνης. Η εξέταση των επιπτώσεων του θορύβου διαύλου στην απόδοση καταδεικνύει τη σημασία της δεύτερης αναπαράστασης, ειδικότερα της ενσωμάτωσής της στην αναπαράσταση χώρου σημάτων των διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης.
 - Τελικώς, στο Κεφάλαιο 10 παρέχεται μια εισαγωγή στη θεωρία της πληροφορίας και της κωδικοποίησης. Ειδικότερα, η χρήση της κωδικοποίησης παρέχει ένα πανίσχυρο εργαλείο για να τεθούν οι επιπτώσεις της υποβάθμισης του διαύλου σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών (για παράδειγμα, τα σφάλματα που εμφανίζονται στη φώραση του σήματος στην έξοδο του δέκτη) κάτω από τον έλεγχο του μηχανικού.

- Έχει καταβληθεί κάθε προσπάθεια για να γίνει το βιβλίο ευανάγνωστο και ευκολότερο από μαθηματική άποψη. Επιπλέον, για να δοθεί κάποιο ιστορικό υπόβαθρο των συστημάτων επικοινωνιών, κάθε κεφάλαιο περιλαμβάνει τουλάχιστον μια παρέκβαση, η οποία επισημαίνει τη συμβολή των πρωτοπόρων μηχανικών στο θέμα που εξετάζεται στο κεφάλαιο αυτό.

Τέλος, η ύλη του βιβλίου περιλαμβάνει παραδείγματα, πειράματα υπολογιστών και προβλήματα τέλους κεφαλαίου για να ενισχύσει την κατανόηση του βιβλίου από τον αναγνώστη. Ένα λυσάρι, το οποίο διατίθεται από τον εκδότη, είναι διαθέσιμο μόνο για καθηγητές οι οποίοι χρησιμοποιούν το βιβλίο για τη διδασκαλία σε προπτυχιακό στάδιο των Συστημάτων Επικοινωνίας.

SIMON HAYKIN
MICHAEL MOHER

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ vii

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.2 Διαδικασία επικοινωνίας 1
- 1.2 Πολυεπίπεδη προσέγγιση 2
- 1.3 Θεματικό παράδειγμα – Ασύρματες επικοινωνίες 4
(Endnotes) 8

Κεφάλαιο 2 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

- 2.1 Εισαγωγή 9
- 2.2 Μετασχηματισμός Fourier 9
- 2.3 Ιδιότητες του μετασχηματισμού Fourier 16
- 2.4 Η αντίστροφη σχέση μεταξύ χρόνου και συχνότητας 30
- 2.5 Συνάρτηση Dirac Δέλτα 35
- 2.6 Μετασχηματισμοί Fourier περιοδικών σημάτων 42
- 2.7 Μετάδοση σημάτων μέσω γραμμικών συστημάτων 45
- 2.8 Φίλτρα 52
- 2.9 Βαθυπερατά και ζωνοπερατά σήματα 59
- 2.10 Ζωνοπερατά συστήματα 64
- 2.11 Καθυστέρηση φάσης και ομάδας 68
- 2.12 Πηγές πληροφορίας 70
- 2.13 Αριθμητικός υπολογισμός του μετασχηματισμού Fourier 72
- 2.14 Θεματικό Παράδειγμα – Εκτίμηση διαύλου σε ένα ασύρματο δίκτυο LAN 75
- 2.15 Περίληψη 78
Προβλήματα 78
(Endnotes) 84

Κεφάλαιο 3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ

- 3.1 Εισαγωγή 85
- 3.2 Διαμόρφωση πλάτους 86
- 3.3 Διαμόρφωση διπλής πλευρικής ζώνης με καταπιεσμένο φέρον 95

- 3.4 Πολυπλεξία ορθογωνικών φερόντων 101
- 3.5 Μέθοδοι διαμόρφωσης απλής και υπολειπόμενης πλευρικής ζώνης 102
- 3.6 Θεματικό παράδειγμα – Εκπομπή διαμόρφωσης VSB αναλογικής και ψηφιακής τηλεόρασης 106
- 3.7 Μετατόπιση συχνότητας 108
- 3.8 Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας 110
- 3.9 Περίληψη 110
Προβλήματα 112
(Endnotes) 119

Κεφάλαιο 4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΓΩΝΙΑΣ

- 4.1 Εισαγωγή 121
- 4.2 Βασικοί ορισμοί 121
- 4.3 Διαμόρφωση συχνότητας 128
- 4.4 Βρόχος κλειδωμένης Φάσης 149
- 4.5 Μη γραμμικά φαινόμενα στα συστήματα FM 156
- 4.6 Υπερετερόδυνος δέκτης 158
- 4.7 Θεματικό παράδειγμα – Κινητά τηλέφωνα αναλογικής και ψηφιακής διαμόρφωσης FM 160
- 4.8 Περίληψη 162
Προβλήματα 164
(Endnotes) 170

Κεφάλαιο 5 ΘΕΩΡΙΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΕΛΙΞΕΙΣ

- 5.1 Εισαγωγή 171
- 5.2 Πιθανότητες 172
- 5.3 Τυχαίες μεταβλητές 176
- 5.4 Στατιστικοί μέσοι όροι 182
- 5.5 Στοχαστικές ανελίξεις 186
- 5.6 Μέση τιμή, συναρτήσεις συσχέτισης και συνδιασποράς 188
- 5.7 Μετάδοση στοχαστικής ανέλιξης μέσω γραμμικού φίλτρου 194

- 5.8 Πυκνότητα φάσματος ισχύος 195
- 5.9 Στοχαστική ανάλυση Gauss 201
- 5.10 Θόρυβος 205
- 5.11 Θόρυβος στενής ζώνης 214
- 5.12 Θεματικό παράδειγμα – Στοχαστικό μοντέλο ασύρματου διαύλου κινητής τηλεφωνίας 222
- 5.13 Περιληψη 229
Προβλήματα 231
(Endnotes) 238

Κεφάλαιο 6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ CW

- 6.1 Εισαγωγή 239
- 6.2 Μοντέλο δέκτη 239
- 6.3 Θόρυβος στους δέκτες DSB-SC 242
- 6.4 Θόρυβος στους δέκτες AM 245
- 6.5 Θόρυβος στους δέκτες FM 248
- 6.6 Προέμφαση και αποέμφαση στη διαμόρφωση FM 261
- 6.7 Θεματικό παράδειγμα – Υπολογισμός ζεύξης μιας δορυφορικής ζεύξης FM 264
- 6.8 Περιληψη 270
Προβλήματα 271
(Endnotes) 275

Κεφάλαιο 7 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ

- 7.1 Εισαγωγή 277
- 7.2 Ψηφιοποίηση αναλογικών πηγών 278
- 7.3 Διαδικασία δειγματοληψίας 279
- 7.4 Διαμόρφωση πλάτους παλμών 285
- 7.5 Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου 289
- 7.6 Διαμόρφωση θέσης παλμών 290
- 7.7 Θεματικό παράδειγμα – Διαμόρφωση PPM στην ασύρματη εκπομπή κρουστικών παλμών 299
- 7.8 Διαδικασία κβαντισμού 301
- 7.9 Παλμοκωδική διαμόρφωση 305
- 7.10 Διαμόρφωση δέλτα 314
- 7.11 Θεματικό παράδειγμα – Ψηφιοποίηση βίντεο και MPEG 319
- 7.12 Περιληψη 322
Προβλήματα 323
(Endnotes) 328

Κεφάλαιο 8 ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΒΑΣΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ

- 8.1 Εισαγωγή 329
- 8.2 Παλμοί βασικής ζώνης και ανίχνευση προσαρμοσμένου φίλτρου 330
- 8.3 Πιθανότητα σφάλματος που οφείλεται στο θόρυβο 337
- 8.4 Διασυμβολική παρεμβολή 342
- 8.5 Διάγραμμα ματιού 347
- 8.6 Κριτήρια Nyquist για μετάδοση χωρίς παραμόρφωση 349
- 8.7 Μετάδοση Μ-δικής διαμόρφωσης PAM βασικής ζώνης 356
- 8.8 Ισοστάθμιση απομάστευσης γραμμής καθυστέρησης 358
- 8.9 Θεματικό παράδειγμα – 100BASE-TX – εκπομπή 100Mbps μέσω συνεισραμμένου ζεύγους καλωδίων 360
- 8.10 Περιληψη 364
Προβλήματα 365
(Endnotes) 371

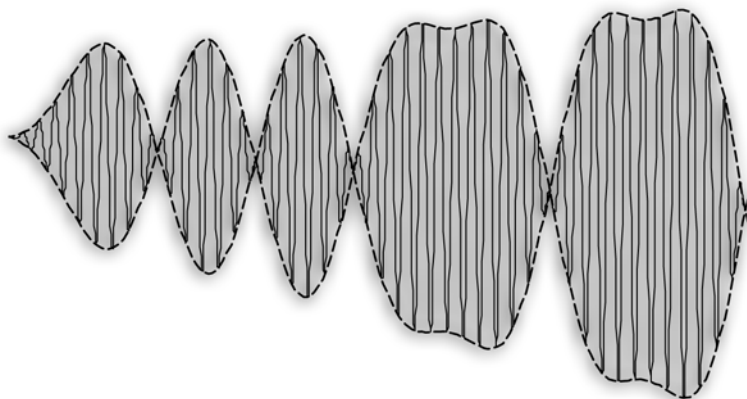
Κεφάλαιο 9 ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΖΩΝΟΠΕΡΑΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

- 9.1 Εισαγωγή 373
- 9.2 Μοντέλο ζωνοπερατής μετάδοσης 374
- 9.3 Μετάδοση δυαδικής διαμόρφωσης PSK και FSK 377
- 9.4 Ομόδυνη φάραση σημάτων FSK και PSK 379
- 9.4 Συστήματα μετάδοσης Μ-δικών δεδομένων 390
- 9.5 Σύγκριση απόδοσης θορύβου διαφόρων συστημάτων PSK και FSK 395
- 9.6 Θεματικό παράδειγμα – Ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (OFDM) 397
- 9.7 Περιληψη 403
Προβλήματα 403
(Endnotes) 408

Κεφάλαιο 10 ΘΕΩΡΙΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

- 10.1 Εισαγωγή 409
- 10.2 Αβεβαιότητα, πληροφορία και εντροπία 410

10.3	Θεώρημα κωδικοποίησης πηγής	415	10.12	Συνελκτικοί κώδικες	453
10.4	Συμπύεση δεδομένων χωρίς απώ- λειες	416	10.13	Διαμόρφωση με κωδικοποίηση δικτυ- ώματος	459
10.5	Θεματικό παράδειγμα – Ο αλγό- ριθμος Lempel-ziv και η συμπύεση αρχείων	422	10.14	Κώδικες Turbo	464
10.6	Διακριτοί δίαυλοι χωρίς μνήμη	424	10.15	Περίληψη	470
10.7	Χωρητικότητα διαύλου	426		Προβλήματα	471
10.8	Θεώρημα κωδικοποίησης διαύ- λου	429		(Endnotes)	475
10.9	Χωρητικότητα διαύλου Gauss	433		ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ	
10.10	Κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμά- των	438		ΠΙΝΑΚΕΣ	477
10.11	Γραμμικοί τμηματικοί κώδικες	440		ΓΛΩΣΣΑΡΙ	485
				ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	489
				ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	495



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

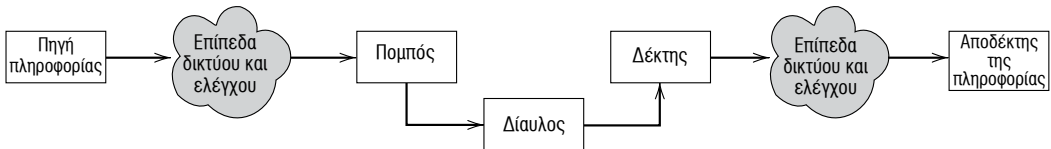
Ο όρος *επικοινωνία* (*communication*) καλύπτει μια ευρεία περιοχή και περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό πεδίων μελέτης, από τη χρήση των συμβόλων μέχρι τις κοινωνικές επιπτώσεις και τα αποτελέσματα. Η σημασία του όρου *επικοινωνία*, όπως χρησιμοποιείται σε αυτό το βιβλίο, θα επικεντρωθεί αυστηρά στην έννοια της *μετάδοσης της πληροφορίας* (*transmission of information*) από ένα σημείο Α σε ένα σημείο Β. Σε άλλες εποχές θα είχε χρησιμοποιηθεί, σωστά, ο όρος *τηλεπικοινωνίες* (*telecommunications*), με τη χρήση του ελληνικού προθέματος *τηλε* (*tele*), που σημαίνει μακριά. Όμως, πολλές σύγχρονες εφαρμογές των τεχνικών που περιγράφονται σε αυτό το βιβλίο μπορεί να έχουν μικρή εμβέλεια, όπως είναι τα ασύρματα ακουστικά τεχνολογίας Bluetooth ή τα τοπικά δίκτυα υπολογιστών (*local area networks*) όπως το WiFi.

Η επικοινωνία με αυτή την έννοια αποτελεί μέρος της καθημερινής μας ζωής με τόσο πολλούς διαφορετικούς τρόπους, που είναι εύκολο να παραβλέψουμε κάποιους από αυτούς. Με τα τηλέφωνα που έχουμε στη διάθεσή μας, με τα ραδιόφωνα και τις τηλεοράσεις στα σπίτια μας, και με τους υπολογιστές που μας παρέχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο από τα γραφεία και τα σπίτια μας, έχουμε τη δυνατότητα να επικοινωνήσουμε με κάθε γωνιά του πλανήτη. Η επικοινωνία είναι αυτή που εξασφαλίζει την ανταλλαγή πληροφοριών με τα ποντοπόρα πλοία ενώ ταξιδεύουν στους ωκεανούς, τα αεροσκάφη κατά τη διάρκεια της πτήσης τους και τους δορυφόρους στο διάστημα. Η επικοινωνία τηρεί το μετεωρολόγο ενήμερο για τις περιβαλλοντικές αλλαγές οι οποίες μετρώνται από ένα πλήθος αισθητήρων. Ο κατάλογος των εφαρμογών που χρησιμοποιούν τις επικοινωνίες με τον ένα ή τον άλλο τρόπο είναι μακροσκελής.

ΔΟΜΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Με την παραπάνω έννοια του όρου, ένα επικοινωνιακό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε ένα μικρότερο αριθμό συστατικών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

- Το πρώτο συστατικό είναι η *πηγή* (*source*) της πληροφορίας. Μερικά προφανή παραδείγματα πληροφορίας που θα μπορούσε να μεταδοθεί είναι η ομιλία, η μουσική, οι εικόνες, τα βίντεο ή τα αρχεία δεδομένων.
- Το δεύτερο μη σκιασμένο συστατικό στο Σχήμα 1.1 απεικονίζει τον *πομπό* (*transmitter*). Η λέξη «πομπός» είναι ένας πρωτογενής όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία της επεξεργασίας της πληροφορίας από τη μορφή που παρέχεται από την πηγή σε μορφή κατάλληλη να μεταδοθεί μέσω του διαύλου. Ένα απλό παράδειγμα είναι η διαδικασία της μετατροπής ενός μουσικού σήματος σε σήμα διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation – FM) κατάλληλο για ραδιοφωνική εκπομπή.



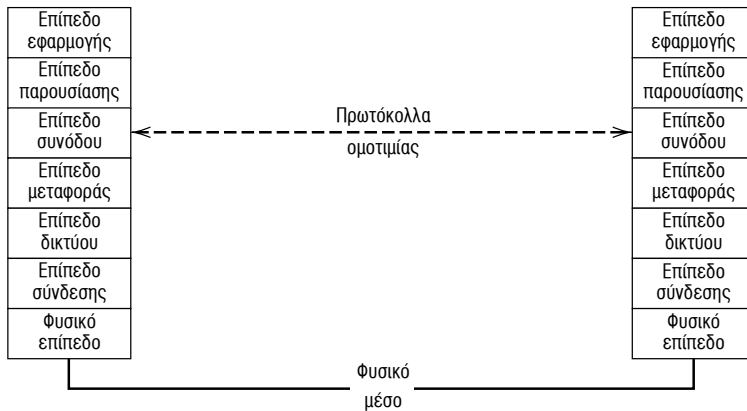
ΣΧΗΜΑ 1.1 Συστατικά επικοινωνιακού συστήματος.

- Το τρίτο μη σκιασμένο συστατικό στο Σχήμα 1.1 απεικονίζει το δίαυλο επικοινωνίας ή το μέσο μετάδοσης. Το μέσο μετάδοσης μπορεί να είναι ένα καλώδιο, μια οπτική ίνα ή ο ελεύθερος χώρος στην περίπτωση της επικοινωνίας μέσω ραδιοκυμάτων ή υπέρυθρων κυμάτων.
- Το τέταρτο μη σκιασμένο συστατικό στο Σχήμα 1.1 απεικονίζει το *δέκτη* (*receiver*). Η λέξη «δέκτης» είναι και αυτή ένας πρωτογενής όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία της μετατροπής του σήματος που μεταδόθηκε μέσω του διαύλου σε μορφή κατανοητή από τον επιθυμητό αποδέκτη. Η λειτουργία του δέκτη είναι απλώς αντίστροφη της αντίστοιχης του πομπού. Ο δέκτης μπορεί επίσης να αντισταθμίσει τις παραμορφώσεις που εισάγονται από το δίαυλο, καθώς επίσης και να εκτελέσει άλλες λειτουργίες, όπως ο συγχρονισμός του δέκτη με τον πομπό.
- Το τελικό συστατικό του δέκτη είναι ο προορισμός ή ο αποδέκτης της πληροφορίας.

Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζονται επίσης δύο σκιασμένες περιοχές με την ονομασία *επίπεδα δικτύου και ελέγχου* (*network and control layers*). Στην περίπτωση των απλών συστημάτων επικοινωνίας, τα οποία διαθέτουν έναν πομπό και ένα δέκτη, το δίκτυο και ο έλεγχος ενδεχομένως να μην υπάρχουν. Όμως, τα περισσότερα συστήματα επικοινωνίας, όπως το Διαδίκτυο και τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό πομπών και δεκτών, οι οποίοι πρέπει να χρησιμοποιούν από κοινού το ίδιο φυσικό μέσο. Τα επίπεδα δικτύου και ελέγχου εξασφαλίζουν την αξιόπιστη και αποτελεσματική χρησιμοποίηση του ίδιου φυσικού μέσου από πολλά τερματικά.

1.2 ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας αναλύονται ως ένα σύνολο διαδοχικών επιπέδων. Αυτή η αρχή της διαστρωμάτωσης στα συστήματα επικοινωνίας καταδεικνύεται καλύτερα από το πρότυπο Διασύνδεσης Ανοιχτών Συστημάτων (Open System Interconnect – OSI) για την *επικοινωνία υπολογιστών* (*computer communications*)¹. Το μοντέλο των επτά επιπέδων φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Στα πλαίσια αυτού του βιβλίου δεν είναι σημαντικό να καταλάβει ο αναγνώστης τη λειτουργία του κάθε επιπέδου του μοντέλου OSI. Το σημαντικό γι' αυτόν είναι αντιληφθεί την αριστερή και τη δεξιά πολυεπίπεδη *στοίβα* (*stack*) στο Σχήμα 1.2, οι οποίες αντιπροσωπεύουν δύο επικοινωνιακούς κόμβους, για παράδειγμα, τον πομπό και το δέκτη. Κάθε επίπεδο της στοίβας αντιπροσωπεύει και ένα *πρωτόκολλο* (*protocol*). Το πρώτο-



ΣΧΗΜΑ 1.2 Ομότιμες διαδικασίες του μοντέλου OSI επτά επιπέδων για την επικοινωνία υπολογιστών.

κολλο αυτό διαθέτει σαφώς προσδιορισμένες διασυνδέσεις με τα επίπεδα πάνω και κάτω από το ίδιο, αλλά οι λειτουργίες που εκτελεί σχετίζονται μόνο με το αντίστοιχο ομότιμο (*peer*) επίπεδο της πλευράς λήψης. Τα ομότιμα επίπεδα επικοινωνούν στην πραγματικότητα διαβιβάζοντας μηνύματα προς το κάτω μέρος της στοίβας της πλευράς τους, μέσω του φυσικού μέσου, και προς το πάνω μέρος της στοίβας της άλλης πλευράς. Μόνο το φυσικό μέσο επικοινωνεί απευθείας με το αντίστοιχό του επίπεδο. Κατ' αυτό τον τρόπο, θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε ή να τροποποιήσουμε το πρωτόκολλο ενός συγκεκριμένου επιπέδου, χωρίς να χρειαστεί να επεμβούμε σε κανένα άλλο τμήμα του μοντέλου OSI.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του μοντέλου OSI είναι ότι απλοποιεί τη σχεδίαση των συστημάτων επικοινωνιών και επιτρέπει την ανεξάρτητη ανάπτυξη των διαφορετικών λειτουργιών. Αυτό το πολυεπίπεδο μοντέλο ταιριάζει καλύτερα στις επικοινωνίες των ψηφιακών πληροφοριών και λιγότερο στις αντίστοιχες των αναλογικών πληροφοριών². Πολλά ψηφιακά συστήματα χρησιμοποιούν λιγότερα από τα επτά επίπεδα που φαίνονται στο Σχήμα 1.2.

Τα τρία πλαίσια στο κέντρο του Σχήματος 1.1, ο πομπός, ο δίαυλος και ο δέκτης, αναφέρονται συχνά ως το *φυσικό επίπεδο* (*physical layer*) του συστήματος επικοινωνίας, ή απλά ως PHY. Αυτό το βιβλίο θα

Claude E. Shannon (1916-2001)

Ο Shannon είναι γνωστός ως ο πατέρας της θεωρίας της πληροφορίας, κυρίως χάρη στις πολλές επιστημονικές ανακοινώσεις τις οποίες εξέδωσε στο τέλος της δεκαετίας του 1940 και τις αρχές της δεκαετίας του 1950. Οι ανακοινώσεις αυτές ήταν τόσο δημιουργικές, που ουσιαστικά ίδρυσαν το γνωστικό πεδίο της θεωρίας της πληροφορίας. Το 1948 έθεσε τα θεωρητικά θεμέλια των ψηφιακών επικοινωνιών σε μια επιστημονική ανακοίνωση με τον τίτλο «Μαθηματική Θεωρία των Επικοινωνιών» (A Mathematical Theory of Communications). Αξίζει τον κόπο να παρατηρήσουμε ότι πριν από τη δημοσίευση αυτής της επιστημονικής ανακοίνωσης, θεωρούνταν ότι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας μέσω του διαύλου επικοινωνίας θα προκαλούσε αύξηση της πιθανότητας σφάλματος. Η κοινότητα της θεωρίας των επικοινωνιών αφινιδιάστηκε όταν ο Shannon απέδειξε ότι αυτό δεν ήταν αληθές, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι μικρότερος από τη χωρητικότητα του διαύλου.

Πριν από το 1948, ο Shannon είχε συμβάλει σημαντικά στο πεδίο της σχεδίασης των ψηφιακών κυκλωμάτων, όπου συχνά πιστώνεται με την εισαγωγή της θεωρίας δειγματοληψίας στα ηλεκτρικά συστήματα, μεταφέροντας τη σχεδίαση κυκλωμάτων από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο. Ήταν ο πρώτος που απέδειξε ότι η άλγεβρα Boole θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την απλοποίηση της σχεδίασης των ψηφιακών κυκλωμάτων.

Ο Shannon ήταν επίσης διάσημος για την ενασχόλησή του με τα θαύματα (μαγικά), το μονόκυκλο ποδήλατο και το σκάκι, καθώς επίσης και για πολλές άλλες εφευρέσεις που σχετίζονταν με αυτές τις ενασχολήσεις. Μία από τις εφευρέσεις του ήταν το ηλεκτρομηχανολογικό ποντίκι με το όνομα Θησέας, σκοπός του οποίου ήταν η αναζήτηση κάποιου αντικειμένου μέσα σε ένα λαβύρινθο. Το ποντίκι του Shannon, το οποίο εφευρέθηκε το 1950, φαίνεται ότι είναι η πρώτη αυτοεκπαιδευόμενη μηχανή αυτού του είδους.

ασχοληθεί σχεδόν αποκλειστικά με το φυσικό επίπεδο της διαδικασίας επικοινωνίας. Τα επίπεδα δικτύου και ελέγχου είναι πολύπλοκα και αποτελούν το αντικείμενο άλλων βιβλίων επικοινωνιών.

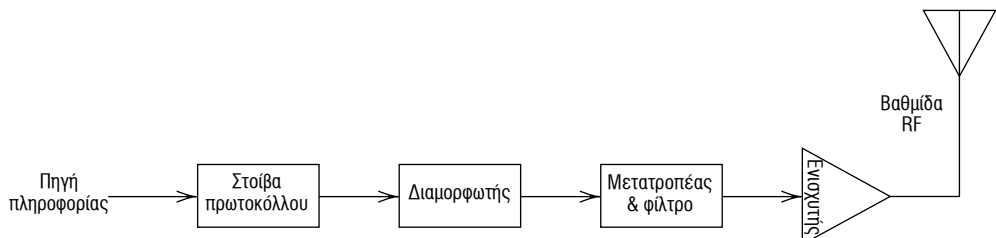
Στο βιβλίο αυτό ασχολούμαστε με μεθόδους επικοινωνίας για αναλογικές και ψηφιακές πηγές πληροφοριών. Αυτές οι δύο μέθοδοι αναφέρονται συχνά με τους όρους αναλογικές επικοινωνίες (*analog communications*) και ψηφιακές επικοινωνίες (*digital communications*). Ο όρος ψηφιακές επικοινωνίες μπορεί να θεωρηθεί λανθασμένος. Στην πράξη, όλες οι επικοινωνίες διεξάγονται με συνεχή σήματα και κατά συνέπεια από τη φύση τους είναι αναλογικές. Ο χαρακτηρισμός «αναλογικός» ή «ψηφιακός» αναφέρεται στη φύση της πληροφορίας που πρέπει να μεταδοθεί. Δεδομένου ότι οι περισσότερες σύγχρονες επικοινωνίες είναι «ψηφιακές», η έμφαση που δίνεται στις αναλογικές επικοινωνίες μειώνεται σταθερά. Όμως, η αναφορά σε αναλογικές τεχνικές γίνεται για τους παρακάτω τρεις λόγους: (α) Κατανόηση των παλαιών συστημάτων. (β) Πολλές τεχνικές ψηφιακών επικοινωνιών έχουν τη βάση τους στις αντίστοιχες αναλογικές. (γ) Πολλές από τις παραμορφώσεις που παρατηρούνται σε συστήματα «ψηφιακής μετάδοσης» μπορούν να χαρακτηριστούν από τη φύση τους αναλογικές. Ακόμη πιο σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι η καλή κατανόηση των αναλογικών συστημάτων διαμόρφωσης βοηθάει στην αναγνώριση και στην εξουδετέρωση αυτών των παραμορφώσεων.

Για να συνοψίσουμε, αυτό το βιβλίο επικεντρώνεται στο φυσικό επίπεδο της διαδικασίας επικοινωνίας. Με τις αναλογικές πληροφορίες, το όριο μεταξύ του φυσικού και των άλλων επιπέδων μπορεί να είναι δυσδιάκριτο.

1.3 ΘΕΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ – ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ³

Σε αυτό το πρώτο παράδειγμα του βιβλίου θεωρούμε τις ασύρματες επικοινωνίες ως ένα παράδειγμα επικοινωνιακού συστήματος. Η περιγραφή μας ισχύει γενικώς για ασύρματα συστήματα, όμως, όπου απαιτείται, παρέχουμε λεπτομέρειες συγκεκριμένων συστημάτων. Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται ένα απλοποιημένο δομικό διάγραμμα ενός πομπού ο οποίος αποτελείται από τέσσερα βασικά συστατικά:

- Το πρώτο συστατικό του δομικού διαγράμματος είναι η *στοίβα πρωτοκόλλου* (*protocol stack*), την οποία περιγράψαμε νωρίτερα. Η στοίβα πακετάρει τα δεδομένα έτσι ώστε να μπορούν να φτάσουν στον επιθυμητό προορισμό με αξιοπιστία, αφού μεταδοθούν μέσω της ραδιοζεύξης. Σε ένα σύστημα ασύρματης επικοινωνίας *σημείο-προς-σημείο* (*point-to-point*) ή σε ένα σύστημα ασύρματης *εκπομπής* (*broadcast*), αυτό το συστατικό μπορεί να μην υπάρχει επειδή δεν περιλαμβάνονται συγκεκριμένες πληροφορίες διεύθυνσης του αποδέκτη. Πράγματι, πολλά πρώιμα συστήματα λειτουργούσαν κατ' αυτό τον τρόπο. Τα ραδιόφωνα AM και FM αποτελούν τέτοια παραδείγματα ασύρματων συστημάτων, τα οποία εξακολουθούν να λειτουργούν έτσι. Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας με την οποία χρησιμοποιούνται οι ραδιοσυχνότητες, τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα, με κάποιο τρόπο, *χρησιμοποιούν από κοινού τους ασύρματους διαύλους* (*share*



ΣΧΗΜΑ 1.3 Βασικά συστατικά του πομπού.

radio channels). Αυτή η *πολυπλεξία (multiplexing)* πολλών σημάτων πάνω στον ίδιο ασύρματο δίαυλο απαιτεί τη χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων.

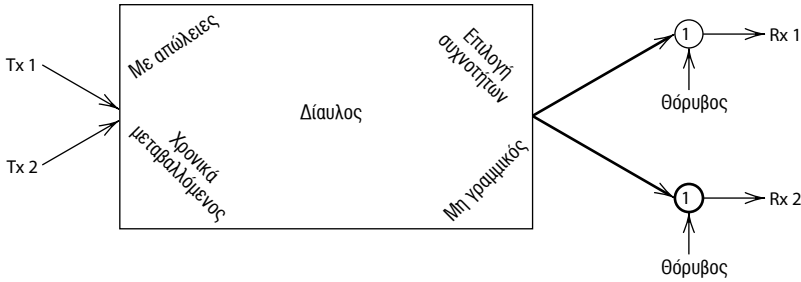
- Το δεύτερο συστατικό του δομικού διαγράμματος είναι ο *διαμορφωτής (modulator)*. Σε αυτό το συστατικό, η πληροφορία ενσωματώνεται σε μια συχνότητα φέροντος κύματος, κατά τρόπο που να μπορεί να ανακτηθεί στη λήψη.
- Το τρίτο συστατικό είναι η *βαθμίδα μετατροπής (up-conversion)*. Στη βαθμίδα αυτή το διαμορφωμένο σήμα μετατρέπεται στην τελική ραδιοσυχνότητα (*radio frequency – RF*) στην οποία θα εκπεμφθεί. Ένας πομπός ενδεχομένως να μπορεί να εκπέμψει σε έναν αριθμό συχνοτήτων, και έτσι η διαμόρφωση σε μια κοινή συχνότητα και η μετατροπή του αποτελέσματος στην τελική επιθυμητή συχνότητα είναι συχνά η καλύτερη προσέγγιση. Όμως, με τις βελτιώσεις που επήλθαν στην ψηφιακή επεξεργασία σημάτων και στη σχετική τεχνολογία, αυτή η βαθμίδα μετατροπής μπορεί να αντικατασταθεί από ένα διαμορφωτή ο οποίος λειτουργεί με τρόπο που ονομάζεται *απευθείας σε RF (direct-to-RF)*.
- Το τέταρτο συστατικό είναι η *βαθμίδα RF (RF stage)*. Μόλις βρεθεί στην κατάλληλη ραδιοσυχνότητα, το σήμα ενισχύεται στο κατάλληλο επίπεδο ισχύος και στη συνέχεια εκπέμπεται μέσω μιας κεραίας, κάτι που σημαίνει ότι το ηλεκτρικό σήμα που αντιπροσωπεύει το διαμορφωμένο σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η ισχύς εξόδου εξαρτάται τυπικά από την επιθυμητή εμβέλεια εκπομπής και μπορεί να ποικίλλει από λιγότερο από ένα χιλιοστό του Watt για ασύρματες εφαρμογές μικρής εμβέλειας μέχρι μια ισοδύναμη εκπεμπόμενη ισχύ μεγαλύτερη από χίλια Watt για τηλεοπτικούς πομπούς. Ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας και την εφαρμογή. Τα διάφορα είδη κεραιών περιλαμβάνουν κατακόρυφες, παραβολικές, κερατοειδείς ή διπολικές.

Στα σύγχρονα συστήματα, ο διαμορφωτής υλοποιείται τυπικά με χρήση της τεχνολογίας ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να είναι ένας ψηφιακός επεξεργαστής σημάτων, ένας πίνακας πυλών προγραμματισμού πεδίου [*field-programmable gate array (FPGA)*] ή ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για εφαρμογές υψηλής έντασης. Τα συστατικά που ακολουθούν το διαμορφωτή υλοποιούνται τυπικά σε αναλογική τεχνολογία, αν και, όπως προαναφέρθηκε, η ψηφιακή υλοποίηση της βαθμίδας μετατροπής γίνεται βαθμιαία πιο πρακτική.

Τα συστατικά ραδιοσυχνότητας (RF) του ασύρματου συστήματος είναι συχνά πολύ συγκεκριμένα για την εφαρμογή που προορίζονται. Μια φορητή συσκευή απαιτεί τυπικά έναν ενισχυτή χαμηλής ισχύος και μια μικρή κεραία, ενώ ένας πομπός διαθέτει τυπικά έναν ενισχυτή υψηλής ισχύος και μια κεραία εγκατεστημένη σε πύργο ύψους εκατοντάδων μέτρων. Άλλα συστήματα μπορεί να διαθέτουν ενισχυτές ισχύος και κεραίες κάπου στο ενδιάμεσο. Όμως, η ίδια τεχνική διαμόρφωσης θα μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις εφαρμογές. Επιπλέον, μια καλά σχεδιασμένη βαθμίδα μετατροπής και ραδιοσυχνότητας (RF) θα μπορούσε να εκπέμψει διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης. Αυτή είναι η βάση του αποκαλούμενου *προγραμματιζόμενου ασύρματου [software defined radio (SDR)]*⁴. Κατά συνέπεια, η τεχνική διαμόρφωσης είναι, κατά μία έννοια, πρωτογενής σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Στο παρελθόν, ένα από τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της διαμόρφωσης ήταν η ευκολία της υλοποίησής της. Στο σημείο που βρίσκεται σήμερα η τεχνολογία, το βασικό κριτήριο είναι η απόδοση και η δυνατότητα της διαμόρφωσης να αντισταθμίσει την εξασθένηση που εισάγει ο δίαυλος, θέμα που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

Η απεικόνιση ενός διαύλου στο Σχήμα 1.4 έχει στόχο να αποδώσει μερικές από τις ιδιότητες του διαύλου επικοινωνίας. Ειδικότερα, έχουμε:

- *Απώλεια διάδοσης (propagation loss)*. Η επικοινωνία συνήθως αναφέρεται στη μεταφορά πληροφοριών σε κάποια απόσταση, οπότε προκαλείται αναπόφευκτα απώλεια



ΣΧΗΜΑ 1.4 Απεικόνιση της εξασθένησης που εισάγει ο δίαυλος.

της έντασης του σήματος, η οποία είναι ανάλογη της απόστασης. Στις ραδιοζεύξεις ο βασικός μηχανισμός απωλειών, ο οποίος οφείλεται στη διάδοση στον ελεύθερο χώρο, προκαλεί τη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από το δέκτη. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση άλλων διαύλων, όπως είναι οι οπτικές ίνες, η απώλεια της ισχύος του σήματος αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση.

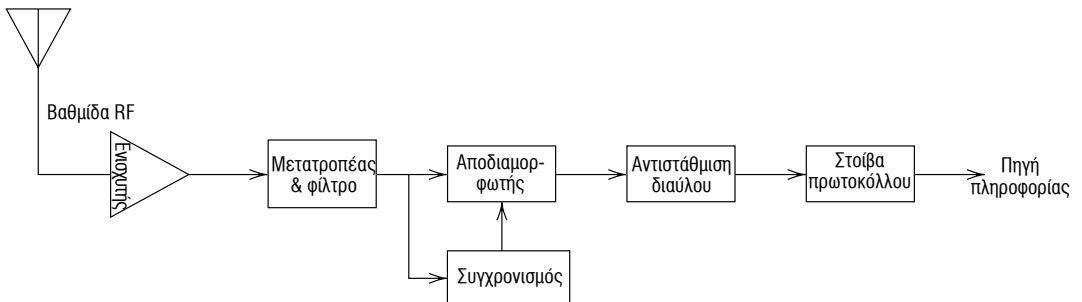
- *Επιλεκτικότητα συχνοτήτων (frequency selectivity)*. Οι δίαυλοι επικοινωνίας λειτουργούν πάνω σε κάποιο μέσο. Πολλά μέσα έχουν καλή απόδοση μόνο μέσα σε ένα σχετικά μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Για παράδειγμα, μια οπτική ίνα αποδίδει καλά σε ένα μικρό εύρος ζώνης συχνοτήτων του οπτικού φάσματος, αλλά δεν χρησιμοποιείται ποτέ για τη διάδοση ραδιοκυμάτων. Ακόμα και μέσα στο κανονικό εύρος ζώνης συχνοτήτων εκπομπής ενός μέσου, μπορεί η ποιότητα της διάδοσης μιας συχνότητας να μεταβάλλεται σε σύγκριση με κάποια άλλη. Η μεταβολή αυτή αναφέρεται ως *επιλεκτικότητα συχνοτήτων (frequency selectivity)*.
- *Χρονικά μεταβαλλόμενο (time-varying)*. Μερικοί δίαυλοι μεταβάλλονται με το χρόνο (δηλαδή τα χαρακτηριστικά τους ποικίλλουν με το χρόνο). Οι δίαυλοι των κινητών ασύρματων αποτελούν ένα καλό παράδειγμα αυτού του φαινομένου. Η διάδοση των ραδιοκυμάτων πάνω από ξηρά εξαρτάται από το παρεμβαλλόμενο έδαφος, τα κτίρια και τη βλάστηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Όταν ο πομπός ή ο δέκτης μετακινηθεί, ο δίαυλος αλλάζει και επηρεάζει την απόδοση. Συνηθισμένα παραδείγματα αυτού του φαινομένου είναι γνωστά ως *σκίαση (shadowing)* και *εξασθένηση (fading)*.
- *Μη γραμμικότητα (Nonlinearity)*. Ιδανικά, ο δίαυλος θα πρέπει να είναι γραμμικός για να ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση του εκπεμπόμενου σήματος. Όμως, ο δίαυλος μπορεί να διαθέτει μη γραμμικά συστατικά, όπως έναν αναμεταδότη που περιλαμβάνει έναν ενισχυτή που λειτουργεί στα όρια ή και πάνω στον κορεσμό. Μια κατάσταση κατά την οποία μπορεί να συμβεί αυτό είναι σε ένα δορυφορικό δίαυλο, όπου το σήμα από τον επίγειο σταθμό ενισχύεται από το δορυφόρο πριν επανεκπεμφθεί στη Γη.
- *Κοινή χρήση (shared usage)*. Για την αποτελεσματική χρήση των διαύλων επικοινωνίας, οι δίαυλοι χρησιμοποιούνται συχνά από κοινού από πολλούς χρήστες. Αυτό οδηγεί σε μια ποικιλία διαφορετικών σχημάτων πολυπλεξίας τα οποία καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο δίαυλος. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα κοινής χρήσης διαύλου αποτελούν οι χρήστες των κινητών τηλεφώνων, οι οποίοι χρησιμοποιούν από κοινού την ίδια ραδιοζεύξη στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας με πολλούς τρόπους. Η πολυπλεξία οδηγεί επίσης σε ενδεχόμενη *παρεμβολή (interference)* μεταξύ των χρηστών, αν οι στρατηγικές πολυπλεξίας δεν παρέχουν απόλυτη απομόνωση μεταξύ τους.
- *Θόρυβος (noise)*. Η κατάρτα οποιουδήποτε συστήματος επικοινωνίας το οποίο θέλει να επιτύχει τη μέγιστη εμβέλεια εκπομπής με την ελάχιστη ισχύ πομπού είναι η παρουσία

του θορύβου. Η συνηθέστερη πηγή θορύβου είναι η *τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων* στα κυκλώματα του δέκτη, στο σημείο όπου το σήμα είναι πολύ ασθενές, και αυτό συνήθως θέτει ένα θεμελιώδες όριο στην απόδοση.

Όλες αυτές οι ιδιότητες αποτελούν κριτήρια για την επιλογή της στρατηγικής διαμόρφωσης. Πράγματι, για σχεδόν οποιαδήποτε από τις παραπάνω *υποβαθμίσεις (impairments)* μπορούμε να βρούμε μια στρατηγική διαμόρφωσης, η οποία έχει σχεδιαστεί να αποδίδει καλά στην παρουσία της αντίστοιχης υποβάθμισης. Στην πράξη, αυτές οι υποβαθμίσεις συμβαίνουν συχνά σε διάφορους συνδυασμούς και ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να είναι εξοικειωμένος με μια ποικιλία τεχνικών για να μπορέσει να επιλέξει τη στρατηγική διαμόρφωσης που ταιριάζει καλύτερα στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Το Σχήμα 1.5 απεικονίζει το τελευταίο συστατικό του διαύλου επικοινωνίας, το δέκτη (*receiver*). Πολλά από τα συστατικά του δέκτη εκτελούν λειτουργίες αντίστροφες των αντίστοιχων συστατικών του πομπού. Ειδικότερα, έχουμε:

- **Βαθμίδα RF.** Η κεραία συλλέγει ενέργεια RF στην επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων και, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της, μπορεί να συλλέγει ενέργεια τόσο από ανεπιθύμητες όσο και από επιθυμητές πηγές. Ο πρώτος ενισχυτής της βαθμίδας RF, ο οποίος συχνά αποκαλείται *ενισχυτής χαμηλού θορύβου (low-noise amplifier)*, είναι σημαντικό να ενισχύσει την ισχύ του σήματος σε επίπεδο που να μπορεί αυτό εύκολα να υποστεί επεξεργασία, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το θόρυβο που έχει εισαχθεί.
- **Μετατροπή (down conversion).** Αυτή η βαθμίδα φιλτράρει και μετατρέπει το σήμα ραδιοσυχνότητας σε μια συχνότητα από την οποία το σήμα του μηνύματος μπορεί ευκολότερα να αποδιαμορφωθεί. Σε πολλούς σύγχρονους δέκτες, το σήμα μετατρέπεται απευθείας στη *βασική ζώνη (baseband)*, γεγονός που αναφέρεται ως *άμεση μετατροπή IQ (direct-IQ down conversion)*.
- **Αποδιαμόρφωση (demodulation).** Αυτή είναι η βαθμίδα στην οποία το εκπεμπόμενο σήμα του μηνύματος ανακτάται. Στους κλασικούς δέκτες, η αποδιαμόρφωση αποτελούνταν συχνά από μια σειρά γραμμικών φίλτρων. Σε πολλούς σύγχρονους δέκτες, με την ανακάλυψη της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων και τα προηγμένα ηλεκτρονικά, η αποδιαμόρφωση είναι συχνά πιο σύνθετη για να βελτιώσει την απόδοση.
- **Συγχρονισμός (synchronization).** Σχεδόν όλα τα συστήματα επικοινωνίας απαιτούν κάποια μορφή κυκλώματος συγχρονισμού, εξαιτίας των διαφορών μεταξύ των ρολογιών χρόνου και συχνότητας που χρησιμοποιούνται στον πομπό και στο δέκτη. Ανάλογα με τη στρατηγική διαμόρφωσης και πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται, οι μέθοδοι για την υλοποίηση του συγχρονισμού μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκες. Όμως, ένα κύκλωμα το οποίο ονομάζεται *βρόχος κλειδωμένης φάσης (phased-locked loop)* και οι παραλλαγές του διαδραματίζουν θεμελιώδη ρόλο σε πολλές από αυτές τις στρατηγικές.



ΣΧΗΜΑ 1.5 Απεικόνιση του δέκτη.

- *Αντιστάθμιση διαύλου (channel compensation)*. Σκοπός αυτής της βαθμίδας είναι να αποκαταστήσει κάποιες από τις υποβαθμίσεις που παρουσιάστηκαν στο δίαυλο. Ενώ η στρατηγική διαμόρφωσης μπορεί να έχει σχεδιαστεί για την αποκατάσταση ενός συγκεκριμένου τύπου υποβάθμισης, τυχόν πρόσθετη επεξεργασία στο δέκτη βελτιώνει συχνά την απόδοση. Οι τεχνικές αντιστάθμισης διαύλου έχουν την τάση να είναι μάλλον προηγμένες και περιλαμβάνουν *ισοστάθμιση (equalization)* για διαύλους με επιλεκτικότητα συχνοτήτων και *κώδικες ευθείας διόρθωσης λαθών (forward error correction codes)* για διαύλους με θόρυβο.
- *Στοίβα πρωτοκόλλου (protocol stack)*. Στα ψηφιακά συστήματα, αυτή είναι συνήθως η μόνη βαθμίδα στην οποία ο δέκτης καθορίζει αν το μήνυμα που αναγνώρισε προοριζόταν γι' αυτόν ή όχι.

Από την παραπάνω εξέταση είναι προφανές ότι ο επικοινωνιακός δέκτης έχει την τάση να είναι πολύ πιο πολύπλοκος σε σχέση με τον πομπό, απλώς επειδή διαθέτει περισσότερους άγνωστους με τους οποίους πρέπει να ασχοληθεί και η ισχύς του σήματος είναι πολύ ασθενέστερη από αυτή που εκτέμφθηκε. Όπως και στον πομπό, η σχεδίαση των βαθμίδων ραδιοσυχνότητας και μετατροπής εξαρτάται συχνά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η επιλογή του τύπου διαμόρφωσης και του αντίστοιχου αποδιαμορφωτή είναι σαφώς ιδιαίτερα κρίσιμη για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης της ραδιοζεύξης. Με την πρόοδο στην τεχνολογία της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων, οι αντίστοιχες δυνατότητές μας βελτιώνονται. Γι' αυτόν το λόγο, η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση παίζουν κρίσιμο ρόλο στη μελέτη των συστημάτων επικοινωνίας, όπως παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 3 έως 7. Όμως, πριν προχωρήσουμε στο θέμα της διαμόρφωσης, απαιτείται η καλή κατανόηση της αναπαράστασης των σημάτων και των συστημάτων, θέμα το οποίο αποτελεί το αντικείμενο ενδιαφέροντος του Κεφαλαίου 2.

(ENDNOTES)

1. Το μοντέλο αναφοράς OSI αναπτύχθηκε από μια υποεπιτροπή του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) το 1977. Για μια εξέταση των αρχών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των επτά επιπέδων του μοντέλου OSI, καθώς επίσης και μια περιγραφή των ιδίων των επιπέδων, βλέπε Tanenbaum (2005).
2. Για μια ιστορική επισκόπηση των τηλεπικοινωνιών, ανατρέξτε στη δεύτερη έκδοση του βιβλίου *Introduction to Analog and Digital Communications*, Haykin and Moher (2007).
3. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ασύρματη επικοινωνία, βλέπε Haykin και Moher (2007).
4. Ο προγραμματιζόμενος ασύρματος είναι ένα σύστημα επικοινωνίας το οποίο αποτελείται από προγραμματιζόμενο υλικό κάτω από τον έλεγχο λογισμικού. Διάφορες εκδόσεις λογισμικού παρέχουν στη συσκευή διαφορετικές λειτουργίες, για παράδειγμα, διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης και διαφορετικές δυνατότητες. Για μια λεπτομερή εξέταση του SDR, βλέπε Reed (2002).