

Περιεχόμενα

Πρόλογος	17
1 Εισαγωγή	21
1.1 Χρήσεις των δικτύων υπολογιστών.....	23
1.1.1 Επιχειρηματικές εφαρμογές.....	23
1.1.2 Οικιακές εφαρμογές.....	26
1.1.3 Μετακινούμενοι χρήστες.....	31
1.1.4 Κοινωνικά ζητήματα.....	34
1.2 Υλικό δικτύων	37
1.2.1 Δίκτυα προσωπικής περιοχής	39
1.2.2 Τοπικά δίκτυα	40
1.2.3 Μητροπολιτικά δίκτυα.....	43
1.2.4 Δίκτυα ευρείας περιοχής.....	44
1.2.5 Διαδίκτυα	48
1.3 Λογισμικό δικτύων	49
1.3.1 Ιεραρχίες πρωτοκόλλων.....	49
1.3.2 Ζητήματα σχεδίασης των επιπέδων	53
1.3.3 Συνδεσμοστρεφείς και ασυνδεσμικές υπηρεσίες.....	55
1.3.4 Θεμελιώδεις λειτουργίες υπηρεσιών	57
1.3.5 Η σχέση των υπηρεσιών με τα πρωτόκολλα	60
1.4 Μοντέλα αναφοράς.....	61
1.4.1 Το μοντέλο αναφοράς OSI	61
1.4.2 Το μοντέλο αναφοράς TCP/IP	65
1.4.3 Το μοντέλο που χρησιμοποιείται σε αυτό το βιβλίο.....	68
1.4.4 Σύγκριση των μοντέλων αναφοράς OSI και TCP/IP	69

1.4.5	Κριτική του μοντέλου και των πρωτοκόλλων OSI.....	70
1.4.6	Κριτική του μοντέλου αναφοράς TCP/IP.....	73
1.5	Παραδείγματα δικτύων.....	73
1.5.1	Το Internet	74
1.5.2	Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς.....	84
1.5.3	Ασύρματα LAN: 802.11	89
1.5.4	RFID και δίκτυα αισθητήρων	92
1.6	Τυποποίηση δικτύων	94
1.6.1	Ποιος είναι ποιος στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών	96
1.6.2	Ποιος είναι ποιος στον κόσμο των διεθνών προτύπων.....	98
1.6.3	Ποιος είναι ποιος στον κόσμο των προτύπων του Internet.....	100
1.7	Μετρικές μονάδες.....	101
1.8	Διάρθρωση του υπόλοιπου βιβλίου.....	102
1.9	Σύνοψη	103

2 Το φυσικό επίπεδο

109

2.1	Η θεωρητική βάση της επικοινωνίας δεδομένων	110
2.1.1	Ανάλυση Φουριέ.....	110
2.1.2	Σήματα που περιορίζονται από το εύρος ζώνης	110
2.1.3	Ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ενός καναλιού.....	113
2.2	Κατευθυνόμενα μέσα μετάδοσης	115
2.2.1	Μαγνητικά μέσα	115
2.2.2	Σύστροφο ζεύγος	115
2.2.3	Ομοαξονικό καλώδιο	117
2.2.4	Γραμμές ρεύματος	118
2.2.5	Οπτικές ίνες	119
2.3	Ασύρματη μετάδοση.....	124
2.3.1	Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	125
2.3.2	Μετάδοση με ραδιοκύματα.....	128
2.3.3	Μετάδοση με μικροκύματα	129
2.3.4	Υπέρυθρη μετάδοση	133
2.3.5	Μετάδοση με οπτικά κύματα.....	133
2.4	Τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι.....	135
2.4.1	Γεωστατικοί δορυφόροι.....	136
2.4.2	Δορυφόροι μέσης γήινης τροχιάς	140
2.4.3	Δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς	140
2.4.4	Δορυφόροι εναντίον οπτικών ινών	143
2.5	Ψηφιακή διαμόρφωση και πολύπλεξη.....	144
2.5.1	Μετάδοση βασικής ζώνης	144
2.5.2	Μετάδοση ζώνης διέλευσης	149
2.5.3	Πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας.....	152
2.5.4	Πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου.....	154
2.5.5	Πολύπλεξη με διαίρεση κώδικα	154

2.6	Δημόσιο δίκτυο μεταγωγής τηλεφωνίας	157
2.6.1	Δομή του τηλεφωνικού συστήματος	158
2.6.2	Η πολιτική της τηλεφωνίας.....	161
2.6.3	Ο τοπικός βρόχος: μόντεμ, ADSL και ασύρματες επικοινωνίες.....	163
2.5.4	Ζεύξεις και πολύπλεξη.....	171
2.6.5	Μεταγωγή	179
2.7	Σύστημα κινητής τηλεφωνίας.....	183
2.7.1	Κινητή τηλεφωνία πρώτης γενιάς: αναλογική φωνή.....	185
2.7.2	Κινητή τηλεφωνία δεύτερης γενιάς: ψηφιακή φωνή	188
2.7.3	Κινητή τηλεφωνία τρίτης γενιάς: ψηφιακή φωνή και δεδομένα	192
2.8	Καλωδιακή τηλεόραση.....	197
2.8.1	Τηλεόραση κοινοτικής κεραίας	198
2.8.2	Internet μέσω καλωδιακής.....	198
2.8.3	Κατανομή του φάσματος.....	200
2.8.4	Καλωδιακά μόντεμ	201
2.8.5	ADSL εναντίον καλωδιακής.....	203
2.9	Σύνοψη	205

3 Το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων 211

3.1	Ζητήματα σχεδιασμού του επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων.....	212
3.1.1	Παρεχόμενες υπηρεσίες προς το επίπεδο δικτύου.....	212
3.1.2	Πλαισίωση	214
3.1.3	Έλεγχος σφαλμάτων	218
3.1.4	Έλεγχος ροής	219
3.2	Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων	220
3.2.1	Κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων.....	222
3.2.2	Κώδικες ανίχνευσης σφαλμάτων.....	227
3.3	Βασικά πρωτόκολλα συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων	233
3.3.1	Ένα ουτοπικό μονόδρομο πρωτόκολλο	237
3.3.2	Ένα μονόδρομο πρωτόκολλο παύσης και αναμονής για ένα κανάλι χωρίς σφάλματα.....	239
3.3.3	Ένα μονόδρομο πρωτόκολλο για κανάλια χωρίς θόρυβο.....	241
3.4	Πρωτόκολλα κυλιόμενου παραθύρου	244
3.4.1	Ένα πρωτόκολλο κυλιόμενου παραθύρου του ενός bit.....	247
3.4.2	Ένα πρωτόκολλο με οπισθοχώρηση κατά N	250
3.4.3	Ένα πρωτόκολλο με επιλεκτική επανάληψη	256
3.5	Παραδείγματα πρωτοκόλλων συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων.....	262
3.5.1	Πακέτα μέσω SONET.....	262
3.5.2	ADSL (Ασύμμετρη Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή)	266
3.6	Σύνοψη	268

4	Το υποεπίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσω	275
4.1	Το πρόβλημα της κατανομής του καναλιού	276
4.1.1	Στατική κατανομή καναλιού	276
4.1.2	Παραδοχές για τη δυναμική εκχώρηση καναλιού	278
4.2	Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης	279
4.2.1	ALOHA	280
4.2.2	Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος σήματος.....	284
4.2.3	Πρωτόκολλα χωρίς συγκρούσεις.....	287
4.2.4	Πρωτόκολλα περιορισμένου ανταγωνισμού.....	291
4.2.5	Πρωτόκολλα ασύρματων LAN.....	294
4.3	Ethernet.....	297
4.3.1	Φυσικό επίπεδο του κλασικού Ethernet	298
4.3.2	Το πρωτόκολλο υποεπιπέδου MAC του κλασικού Ethernet.....	299
4.3.3	Απόδοση του Ethernet	303
4.3.4	Ethernet μεταγωγής	305
4.3.5	Γρήγορο Ethernet.....	307
4.3.6	Gigabit Ethernet.....	310
4.3.7	Ethernet 10 gigabit.....	313
4.3.8	Ανασκόπηση του Ethernet.....	315
4.4	Ασύρματα LAN	316
4.4.1	Η αρχιτεκτονική και στοίβα πρωτοκόλλων του 802.11	316
4.4.2	Το φυσικό επίπεδο του 802.11	318
4.4.3	Το πρωτόκολλο υποεπιπέδου MAC του 802.11	320
4.4.4	Δομή πλαισίων του 802.11	326
4.4.5	Υπηρεσίες	328
4.5	Ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα.....	330
4.5.1	Σύγκριση του 802.11 με το 802.16	331
4.5.2	Η αρχιτεκτονική και η στοίβα πρωτοκόλλων του 802.16	332
4.5.3	Το φυσικό επίπεδο του 802.16	333
4.5.4	Το πρωτόκολλο υποεπιπέδου MAC του 802.16.....	335
4.5.5	Η δομή πλαισίων του 802.16	336
4.6	Bluetooth	337
4.6.1	Αρχιτεκτονική του Bluetooth	338
4.6.2	Εφαρμογές του Bluetooth	338
4.6.3	Η στοίβα πρωτοκόλλων του Bluetooth.....	340
4.6.4	Το επίπεδο ραδιοκυμάτων του Bluetooth.....	341
4.6.5	Τα επίπεδα συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων του Bluetooth.....	341
4.6.6	Η δομή πλαισίων του Bluetooth	343
4.7	RFID.....	344
4.7.1	Αρχιτεκτονική του EPC Gen 2	345
4.7.2	Φυσικό επίπεδο EPC Gen 2.....	346
4.7.3	Επίπεδο αναγνώρισης ετικετών EPC Gen 2	347
4.7.4	Μορφές μηνυμάτων για αναγνώριση ετικετών	348

4.8	Μεταγωγή επιπέδου συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων	349
4.8.1	Χρήσεις των γεφυρών.....	349
4.8.2	Γέφυρες εκμάθησης.....	351
4.8.3	Γέφυρες δένδρου κάλυψης	354
4.8.4	Επαναλήπτες, διανομείς, γέφυρες, μεταγωγείς, δρομολογητές, και πύλες.....	357
4.8.5	Εικονικά LAN.....	359
4.9	Σύνοψη	365

5 Το επίπεδο δικτύου

371

5.1	Ζητήματα σχεδίασης του επιπέδου δικτύου	371
5.1.1	Μεταγωγή πακέτων με αποθήκευση και προώθηση	371
5.1.2	Παρεχόμενες υπηρεσίες προς το επίπεδο μεταφοράς.....	372
5.1.3	Υλοποίηση της ασυνδεσμικής υπηρεσίας.....	373
5.1.4	Υλοποίηση της συνδεσμοστρεφούς υπηρεσίας	375
5.1.5	Σύγκριση δικτύων εικονικών κυκλωμάτων και αυτοδύναμων πακέτων	376
5.2	Αλγόριθμοι δρομολόγησης.....	378
5.2.1	Η αρχή της βελτιστότητας	380
5.2.2	Δρομολόγηση συντομότερης διαδρομής	381
5.2.3	Δρομολόγηση με κατακλυσμό.....	384
5.2.4	Δρομολόγηση με διανύσματα απόστασης	386
5.2.5	Δρομολόγηση με κατάσταση συνδέσμων.....	389
5.2.6	Ιεραρχική δρομολόγηση	394
5.2.7	Δρομολόγηση με εκπομπή.....	396
5.2.8	Δρομολόγηση πολυδιανομής	398
5.2.9	Δρομολόγηση πλησιοδιανομής.....	402
5.2.10	Δρομολόγηση για μετακινούμενους υπολογιστές υπηρεσίας.....	403
5.2.11	Δρομολόγηση σε δίκτυα ειδικού σκοπού	405
5.3	Αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης	409
5.3.1	Προσεγγίσεις ως προς τον έλεγχο συμφόρησης.....	411
5.3.2	Δρομολόγηση με επίγνωση της κίνησης.....	412
5.3.3	Έλεγχος αποδοχής	413
5.3.4	Στραγγαλισμός κίνησης.....	415
5.3.5	Απόρριψη φορτίου.....	419
5.4	Ποιότητα υπηρεσιών	421
5.4.1	Απαιτήσεις εφαρμογών.....	422
5.4.2	Μορφοποίηση κυκλοφορίας	424
5.4.3	Χρονοπρογραμματισμός πακέτων	428
5.4.4	Έλεγχος αποδοχής	432
5.4.5	Ολοκληρωμένες υπηρεσίες.....	435
5.4.6	Διαφοροποιημένες υπηρεσίες	438
5.5	Διαδικτύωση	441
5.5.1	Πώς διαφέρουν τα δίκτυα	442
5.5.2	Πώς μπορούν να συνδεθούν τα δίκτυα.....	444

5.5.3	Διοχέτευση σε σήραγγα	446
5.5.4	Δρομολόγηση στα διαδίκτυα	448
5.5.5	Κατακερματισμός πακέτων	449
5.6	Το επίπεδο δικτύου στο Internet.....	453
5.6.1	Το πρωτόκολλο IP έκδοσης 4.....	455
5.6.2	Διευθύνσεις IP	459
5.6.3	IP έκδοση 6	472
5.6.4	Πρωτόκολλα ελέγχου του Internet	482
5.6.5	Μεταγωγή ετικετών και MPLS	487
5.6.6	OSPF — Το εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πύλης δικτύου.....	491
5.6.5	BGP — Το εξωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πύλης δικτύου.....	496
5.6.8	Πολυδιανομή στο Internet	502
5.6.7	Φορητό IP	503
5.7	Σύνοψη	507

6 Το επίπεδο μεταφοράς 513

6.1	Η υπηρεσία μεταφοράς.....	513
6.1.1	Παρεχόμενες υπηρεσίες προς τα υψηλότερα επίπεδα	513
6.1.2	Θεμελιώδεις λειτουργίες υπηρεσίας μεταφοράς.....	515
6.1.3	Υποδοχές Berkeley	518
6.1.4	Ένα παράδειγμα προγραμματισμού υποδοχών: ένας διακομιστής αρχείων του Internet.....	521
6.2	Στοιχεία πρωτοκόλλων μεταφοράς	525
6.2.1	Διευθυνσιοδότηση	527
6.2.2	Εγκαθίδρυση συνδέσεων	530
6.2.3	Αποδέσμευση συνδέσεων	535
6.2.4	Έλεγχος ροής και προσωρινή αποθήκευση	540
6.2.5	Πολύπλεξη	545
6.2.6	Ανάκαμψη από κατάρρευση	546
6.3	Έλεγχος συμφόρησης	548
6.3.1	Επιθυμητή κατανομή εύρους ζώνης	548
6.3.2	Ρύθμιση της ταχύτητας αποστολής.....	553
6.3.3	Ζητήματα ασύρματων δικτύων.....	557
6.4	Πρωτόκολλα μεταφοράς του Internet: UDP	559
6.4.1	Εισαγωγή στο UDP.....	559
6.4.2	Κλήση απομακρυσμένων διαδικασιών.....	561
6.4.3	Πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων πραγματικού χρόνου.....	564
6.5	Πρωτόκολλα μεταφοράς του Internet: TCP	570
6.5.1	Εισαγωγή στο TCP	570
6.5.2	Το μοντέλο υπηρεσίας του TCP	571
6.5.3	Το πρωτόκολλο TCP	573
6.5.4	Η κεφαλίδα τμήματος του TCP	574
6.5.5	Εγκαθίδρυση συνδέσεων στο TCP.....	578

6.5.6	Αποδέσμευση συνδέσεων στο TCP	579
6.5.7	Μοντελοποίηση διαχείρισης συνδέσεων του TCP	580
6.5.8	Κυλιόμενο παράθυρο του TCP	582
6.5.9	Διαχείριση χρονομέτρων στο TCP	586
6.5.10	Έλεγχος συμφόρησης στο TCP	589
6.5.11	Το μέλλον του TCP.....	599
6.6	Ζητήματα απόδοσης	600
6.6.1	Προβλήματα απόδοσης σε δίκτυα υπολογιστών	600
6.6.2	Μέτρηση της απόδοσης του δικτύου	601
6.6.3	Σχεδίαση υπολογιστών υπηρεσίας για ταχύτερα δίκτυα	604
6.6.4	Γρήγορη επεξεργασία των τμημάτων	607
6.6.5	Συμπίεση κεφαλίδας	611
6.6.6	Πρωτόκολλα για μακριά και πλατιά δίκτυα	613
6.7	Ανεκτικά σε καθυστέρηση δίκτυα.....	617
6.7.1	Αρχιτεκτονική DTN.....	618
6.7.2	Το Πρωτόκολλο Δέσμης.....	620
6.8	Σύνοψη	623

7 Το επίπεδο εφαρμογών

629

7.1	DNS — Το σύστημα ονομάτων περιοχών	629
7.1.1	Ο χώρος ονομάτων του DNS.....	630
7.1.2	Εγγραφές πόρων περιοχής.....	634
7.1.3	Διακομιστές ονομάτων	637
7.2	Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο	641
7.2.1	Αρχιτεκτονική και υπηρεσίες	643
7.2.2	Ο πράκτορας χρήστη	644
7.2.3	Μορφές μηνυμάτων.....	649
7.2.4	Μεταφορά μηνυμάτων.....	656
7.2.5	Τελική παράδοση.....	663
7.3	Ο Παγκόσμιος Ιστός.....	665
7.3.1	Επισκόπηση αρχιτεκτονικής.....	667
7.3.2	Στατικές ιστοσελίδες.....	682
7.3.3	Δυναμικές ιστοσελίδες και εφαρμογές Ιστού	692
7.3.4	HTTP — Το πρωτόκολλο μεταφοράς υπερ-κειμένου	703
7.3.5	Ο φορητός Ιστός	713
7.4	Ήχος και βίντεο συνεχούς ροής.....	718
7.4.1	Ψηφιακός ήχος.....	719
7.4.2	Ψηφιακό βίντεο.....	725
7.4.3	Ρεύματα αποθηκευμένων μέσων	733
7.4.4	Ρεύματα μέσων πραγματικού χρόνου.....	741
7.4.5	Συνδιάσκεψη σε πραγματικό χρόνο.....	744

7.5	Παράδοση περιεχομένου	755
7.5.1	Περιεχόμενο και κυκλοφορία του Internet	756
7.5.2	Φάρμες διακομιστών και διαμεσολαβητές Ιστού	759
7.5.3	Δίκτυα διανομής περιεχομένου	763
7.5.4	Ομότιμα δίκτυα	769
7.6	Σύνοψη	778

8 Ασφάλεια δικτύων

785

8.1	Κρυπτογραφία	788
8.1.1	Εισαγωγή στην κρυπτογραφία	789
8.1.2	Κρυπταλγόριθμοι αντικατάστασης	791
8.1.3	Κρυπταλγόριθμοι μετάθεσης	793
8.1.4	Σημειωματάριο μίας χρήσης	794
8.1.5	Δύο θεμελιώδεις κρυπτογραφικές αρχές	799
8.2	Αλγόριθμοι συμμετρικού κλειδιού	801
8.2.1	DES — Το Πρότυπο Κρυπτογράφησης Δεδομένων	802
8.2.2	AES — Το προηγμένο πρότυπο κρυπταλγορίθμου	805
8.2.3	Καταστάσεις λειτουργίας κρυπταλγορίθμου	809
8.2.4	Άλλοι κρυπταλγόριθμοι	814
8.2.5	Κρυπτανάλυση	814
8.3	Αλγόριθμοι δημόσιου κλειδιού	815
8.3.1	RSA	816
8.3.2	Άλλοι αλγόριθμοι δημόσιου κλειδιού	818
8.4	Ψηφιακές υπογραφές	819
8.4.1	Υπογραφές συμμετρικού κλειδιού	819
8.4.2	Υπογραφές δημόσιου κλειδιού	820
8.4.3	Συνοψεις μηνυμάτων	822
8.4.4	Η επίθεση των γενεθλίων	826
8.5	Διαχείριση δημόσιων κλειδιών	828
8.5.1	Πιστοποιητικά	829
8.5.2	X.509	830
8.5.3	Υποδομές δημόσιων κλειδιών	831
8.6	Ασφάλεια επικοινωνιών	835
8.6.1	IPsec	835
8.6.2	Αντιπυρικές ζώνες	839
8.6.3	Εικονικά ιδιωτικά δίκτυα	843
8.6.4	Ασύρματη ασφάλεια	844
8.7	Πρωτόκολλα πιστοποίησης ταυτότητας	849
8.7.1	Πιστοποίηση ταυτότητας βασισμένη σε κοινόχρηστο μυστικό κλειδί	850
8.7.2	Εγκαθίδρυση ενός κοινόχρηστου κλειδιού: η ανταλλαγή κλειδιού Diffie-Hellman	855
8.7.3	Πιστοποίηση ταυτότητας με χρήση ενός κέντρου διανομής κλειδιών	857

8.7.4	Πιστοποίηση ταυτότητας με χρήση του Kerberos	860
8.7.5	Πιστοποίηση ταυτότητας με χρήση κρυπτογραφίας δημόσιου κλειδιού	862
8.8	Ασφάλεια ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.....	863
8.8.1	PGP — Αρκετά καλή προστασία απορρήτου.....	863
8.8.2	S/MIME	867
8.9	Ασφάλεια στον Ιστό	868
8.9.1	Απειλές	868
8.9.2	Ασφαλής ονομασία	869
8.9.3	SSL — Ασφαλές επίπεδο υποδοχών	874
8.9.4	Ασφάλεια κώδικα Ιστού	878
8.10	Κοινωνικά ζητήματα	881
8.10.1	Προστασία απορρήτου.....	882
8.10.2	Ελευθερία του λόγου	885
8.10.3	Πνευματικά δικαιώματα	888
8.11	Σύνοψη	891

9 Προτεινόμενα αναγνώσματα και βιβλιογραφία 899

9.1	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	899
9.1.1	Εισαγωγή και γενικά έργα	900
9.1.2	Το φυσικό επίπεδο	901
9.1.3	Το επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων	902
9.1.4	Το υποεπίπεδο ελέγχου προσπέλασης μέσω	902
9.1.5	Το επίπεδο δικτύου	903
9.1.6	Το επίπεδο μεταφοράς.....	904
9.1.7	Το επίπεδο εφαρμογών	904
9.1.8	Ασφάλεια δικτύων	905
9.2	Αλφαβητική Βιβλιογραφία	906

Ευρετήριο 925

2

Το φυσικό επίπεδο

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε το χαμηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας του μοντέλου πρωτοκόλλων μας, που είναι το φυσικό επίπεδο. Το επίπεδο αυτό προδιαγράφει τις ηλεκτρικές, χρονικές, και άλλες διασυνδέσεις μέσω των οποίων τα bit στέλνονται ως σήματα σε κανάλια. Το φυσικό επίπεδο είναι το θεμέλιο πάνω από το οποίο δομούνται τα δίκτυα. Επειδή οι ιδιότητες των διαφόρων ειδών φυσικών καναλιών προσδιορίζουν την απόδοση (π.χ. τη διεκπεραιωτική ικανότητα, την καθυστέρηση, και το ρυθμό σφαλμάτων), αυτό είναι ένα καλό σημείο για να ξεκινήσουμε το ταξίδι μας στη χώρα των δικτύων.

Θα ξεκινήσουμε με μια θεωρητική ανάλυση της μετάδοσης δεδομένων, μέσω της οποίας θα ανακαλύψουμε ότι η Μητέρα Φύση έχει θέσει κάποια όρια ως προς το τι μπορεί να σταλεί μέσω ενός καναλιού. Στη συνέχεια θα καλύψουμε τρία είδη μέσων μετάδοσης: τα κατευθυνόμενα (χάλκινα σύρματα και οπτικές ίνες), τα ασύρματα (επίγεια ραδιοκύματα), και τα δορυφορικά. Καθεμία από τις τεχνολογίες αυτές έχει διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν τον σχεδιασμό και τις επιδόσεις των δικτύων που τις χρησιμοποιούν. Το υλικό αυτό χρησιμεύει ως υπόβαθρο για τις βασικές τεχνολογίες μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στα σημερινά δίκτυα.

Κατόπιν θα εξετάσουμε την ψηφιακή διαμόρφωση, που αφορά τον τρόπο μετατροπής των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά σήματα, και το αντίστροφο. Μετά θα μελετήσουμε σχήματα πολύπλεξης, εξερευνώντας με ποιον τρόπο μπορούμε να τοποθετήσουμε ταυτόχρονα πολλές "συνομιλίες" στο ίδιο μέσο μετάδοσης χωρίς η μία να παρεμβάλλεται με την άλλη.

Τέλος θα μελετήσουμε τρία παραδείγματα συστημάτων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στην πράξη στα δίκτυα υπολογιστών ευρείας περιοχής: το σύστημα (σταθερής) τηλεφωνίας, το σύστημα κινητής τηλεφωνίας, και το σύστημα καλωδιακής τηλεόρασης. Επειδή και τα τρία είναι σημαντικά στην πράξη, θα αφιερώσουμε αρκετό χώρο στο καθένα τους.

2.1 Η θεωρητική βάση της επικοινωνίας δεδομένων

Οι πληροφορίες μπορούν να μεταδίδονται μέσω συρμάτων με μεταβολή κάποιας φυσικής ιδιότητας, όπως είναι η τάση ή η ένταση του ρεύματος. Αν αναπαραστήσουμε αυτή την τιμή της τάσης ή της έντασης του ρεύματος με τη μορφή μιας συνάρτησης ως προς τον χρόνο, $f(t)$, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά του σήματος και να την αναλύσουμε μαθηματικά. Η ανάλυση αυτή είναι το θέμα των επόμενων ενοτήτων.

2.1.1 Ανάλυση Φουριέ

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ο Γάλλος μαθηματικός Ζαν-Μπαπτίστ Φουριέ απέδειξε ότι οποιαδήποτε μη ιδιάζουσα περιοδική συνάρτηση $g(t)$ με περίοδο T μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα μιας (πιθανόν άπειρης) σειράς ημίτονων και συνημίτονων:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft) \quad (2-1)$$

όπου $f = 1/T$ είναι η θεμελιώδης συχνότητα, a_n και b_n είναι τα πλάτη του ημίτονου και του συνημίτονου της n -οστής **αρμονικής** (όρου), και c είναι μια σταθερά. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται **σειρά Φουριέ** (Fourier series). Από τη σειρά Φουριέ μπορεί να ανακατασκευαστεί η συνάρτηση. Με άλλα λόγια, αν είναι η γνωστή η περίοδος T και δίνονται και τα πλάτη, μπορούμε να βρούμε την αρχική συνάρτηση ως προς το χρόνο εξάγοντας το άθροισμα της Εξίσωσης (2-1).

Ένα σήμα δεδομένων το οποίο έχει πεπερασμένη διάρκεια (γεγονός που ισχύει για όλα αυτά τα σήματα) μπορεί να αντιμετωπιστεί με την παραπάνω μέθοδο αν θεωρήσουμε ότι επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο άπειρες φορές (δηλαδή, το διάστημα από T έως $2T$ είναι το ίδιο με το διάστημα από 0 έως T , κ.λπ.).

Μπορούμε να υπολογίσουμε τα πλάτη a_n για οποιαδήποτε συνάρτηση $g(t)$ πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές της Εξίσωσης (2-1) επί $\sin(2\pi kft)$ και παίρνοντας στη συνέχεια το ολοκλήρωμα από 0 έως T . Αφού

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0 & \text{για } k \neq n \\ T/2 & \text{για } k = n \end{cases}$$

θα "επιβιώσει" μόνο ένας όρος του αθροίσματος: ο a_n . Το άθροισμα των b_n εξαφανίζεται εντελώς. Παρομοίως, αν πολλαπλασιάσουμε την Εξίσωση (2-1) επί $\cos(2\pi kft)$ και ολοκληρώσουμε για το διάστημα από 0 έως T , μπορούμε να υπολογίσουμε τα b_n . Αν ολοκληρώσουμε και τα δύο μέρη της εξίσωσης ως έχει, μπορούμε να βρούμε το c . Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των παραπάνω πράξεων είναι τα εξής:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

2.1.2 Σήματα που περιορίζονται από το εύρος ζώνης

Η σημασία που έχουν όλα τα παραπάνω για την επικοινωνία δεδομένων είναι το ότι τα πραγματικά κανάλια επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τα σήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Ας θεωρήσουμε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα: τη μετάδοση του χαρακτήρα ASCII "b" κωδικοποιημένου σε ένα 8μπιτο byte. Η ακολουθία bit που πρέπει να μεταδοθεί είναι η 01100010. Το αριστερό μέρος της Εικόνας 2-1(α) δείχνει την τάση που παράγεται από τον υπολογιστή που μεταδίδει. Η ανάλυση Φουριέ του σήματος αυτού δίνει τους συντελεστές:

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n / 4) - \cos(3\pi n / 4) + \cos(6\pi n / 4) - \cos(7\pi n / 4)]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n / 4) - \sin(\pi n / 4) + \sin(7\pi n / 4) - \sin(6\pi n / 4)]$$

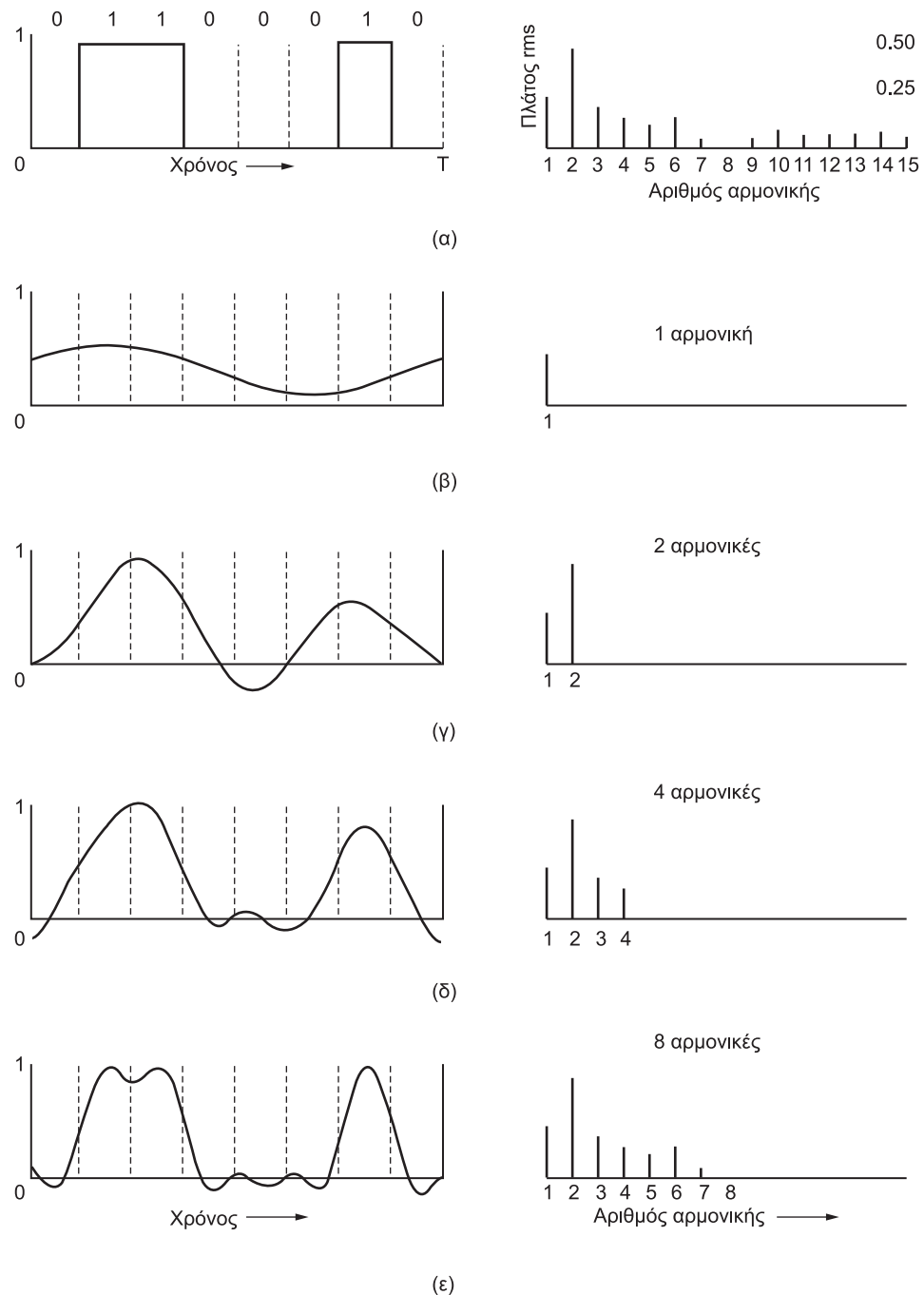
$$c = 3 / 4$$

Τα πλάτη των πρώτων όρων σε μορφή ρίζας αθροίσματος τετραγώνων (root-mean-square ή rms), δηλαδή $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, φαίνονται στη δεξιά πλευρά της Εικόνα 2-1(α). Οι τιμές αυτές είναι σημαντικές επειδή τα τετράγωνά τους είναι ανάλογα με την ενέργεια που μεταδίδεται στην αντίστοιχη συχνότητα.

Κανένα σύστημα μετάδοσης δεν μπορεί να μεταδίδει σήματα χωρίς να χάνεται στην πορεία κάποιο τμήμα της ισχύος. Αν όλες οι συνιστώσες του μετασχηματισμού Φουριέ μειώνονταν εξίσου, το σήμα που θα προέκυπτε θα είχε μειωμένο πλάτος αλλά δεν θα ήταν παραμορφωμένο — με άλλα λόγια, θα είχε το ίδιο "τετραγωνισμένο" σχήμα με την Εικόνα 2-1(α). Δυστυχώς, σε όλα τα συστήματα μετάδοσης, οι διάφορες συνιστώσες του μετασχηματισμού Φουριέ μειώνονται σε διαφορετικό βαθμό, εισάγοντας έτσι κάποια παραμόρφωση. Συνήθως, στην περίπτωση του σύρματος, τα πλάτη μεταδίδονται χωρίς εξασθένηση από το 0 έως κάποια συχνότητα f_c — η οποία μετρίεται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο ή Hertz (Hz) — με όλες τις συχνότητες πέρα από αυτή τη συχνότητα αποκοπής να εξασθενούν. Η περιοχή των συχνοτήτων που μεταδίδονται χωρίς σημαντική εξασθένηση ονομάζεται **εύρος ζώνης** (bandwidth). Στην πράξη το όριο αποκοπής δεν είναι απολύτως αυστηρό, και έτσι ως ονομαστικό εύρος ζώνης συχνά δίνεται η τιμή από το 0 έως τη συχνότητα για την οποία η λαμβανόμενη ισχύς έχει πέσει στο μισό.

Το εύρος ζώνης είναι μια φυσική ιδιότητα του μέσου μετάδοσης που εξαρτάται, για παράδειγμα, από την κατασκευή, το πάχος, και το μήκος του καλωδίου ή της οπτικής ίνας. Συχνά χρησιμοποιούνται φίλτρα έτσι ώστε να περιορίζεται ακόμα περισσότερο το εύρος ζώνης του σήματος. Για παράδειγμα, τα ασύρματα κανάλια 802.11 επιτρέπεται να χρησιμοποιούν μέχρι περίπου 20 MHz, και έτσι τα ραδιοσήματα 802.11 φιλτράρουν το εύρος ζώνης του σήματος σε αυτό το μέγεθος. Ως ένα ακόμα παράδειγμα, τα παραδοσιακά (αναλογικά) τηλεοπτικά κανάλια καταλαμβάνουν περίπου 6 MHz το καθένα, σε σύρμα ή στον αέρα. Αυτό το φιλτράρισμα επιτρέπει να μοιράζονται περισσότερα κανάλια μια δεδομένη περιοχή του φάσματος, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή συχνοτήτων για κάποια σήματα δεν θα ξεκινά από το μηδέν, όμως αυτό δεν έχει σημασία. Το εύρος ζώνης είναι και πάλι το πλάτος της ζώνης συχνοτήτων που διέρχεται, και η πληροφορία που μπορεί να μεταφερθεί εξαρτάται μόνο από αυτό το πλάτος, και όχι από τις συχνότητες αρχής και τέλους. Τα σήματα που κυμαίνονται από το 0 μέχρι μια μέγιστη συχνότητα ονομάζονται **σήματα βασικής ζώνης** (baseband signals). Τα σήματα που έχουν μετατοπιστεί έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μια υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων, όπως συμβαίνει σε όλες τις ασύρματες μεταδόσεις, αποκαλούνται **σήματα ζώνης διέλευσης** (passband signals).

Ας δούμε τώρα πώς θα έμοιαζε το σήμα της Εικόνας 2-1(α) αν το εύρος ζώνης ήταν τόσο χαμηλό ώστε να μεταδίδονται μόνο οι χαμηλότερες συχνότητες — δηλαδή, αν η συνάρτηση προσεγγιζόταν μόνο από τους πρώτους λίγους όρους της Εξίσωσης (2-1). Η Εικόνα 2-1(β) δείχνει το σήμα που προκύπτει από ένα κανάλι το οποίο επιτρέπει τη διέλευση μόνο της πρώτης αρμονικής (της θεμελιώδους συχνότητας f). Παρομοίως, οι Εικόνες 2-1(γ)-(ε) δείχνουν τα φάσματα και τις ανακατασκευασμένες συναρτήσεις για διάφορα κανάλια με υψηλότερο εύρος ζώνης. Στην περίπτωση της ψηφιακής μετάδοσης, ο στόχος είναι η λήψη ενός σήματος με ε-



Εικόνα 2-1. (α) Ένα δυαδικό σήμα και τα πλάτη των αντίστοιχων συντελεστών Φουριέ σε μορφή ρίζας αθροίσματος τετραγώνων. (β-ε) Διαδοχικές προσεγγίσεις στο αρχικό σήμα.

παρκώς καλή πιστότητα έτσι ώστε να μπορεί να ανακατασκευαστεί η ακολουθία των bit που στάλθηκε. Επειδή αυτό μπορεί ήδη να γίνει εύκολα με το σήμα της Εικόνας 2-1(ε), είναι σπατάλη να χρησιμοποιήσουμε περισσότερες αρμονικές προκειμένου να ληφθεί ένα πιο ακριβές αντίγραφο.

Με δεδομένο έναν ρυθμό μεταφοράς (bit rate) των b bit/sec, ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή των 8 bit του παραδείγματος όταν στέλνουμε 1 bit ανά χρονική στιγμή είναι $8/b$ sec, άρα η συχνότητα της πρώτης αρμονικής αυτού του σήματος είναι $b/8$ Hz. Μια συνηθισμένη τηλεφωνική γραμμή, που συχνά ονομάζεται **γραμμή ποιότητας φωνής** (voice-grade line), έχει μια τεχνητά κατασκευασμένη συχνότητα αποκοπής πάνω ακριβώς από τα 3000 Hz. Αυτός

ο περιορισμός σημαίνει ότι ο αριθμός της υψηλότερης αρμονικής που μπορεί να διέλθει από ένα τέτοιο κανάλι είναι περίπου $3000/(b/8)$ ή $24.000/b$ (η αποκοπή δεν είναι απολύτως αυστηρή).

Τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων φαίνονται στην Εικόνα 2-2. Από τις τιμές αυτές, είναι σαφές ότι το να προσπαθούμε να μεταδώσουμε με ταχύτητα 9600 bps μέσω μιας τηλεφωνικής γραμμής που έχει ποιότητα φωνής θα μετασχημάτιζε την Εικόνα 2-1(α) σε κάτι ανάλογο με την Εικόνα 2-1(γ), δυσκολεύοντας πολύ έτσι την ορθή λήψη της αρχικής ροής bit. Θα πρέπει να είναι σαφές ότι, για ρυθμούς μετάδοσης πολύ υψηλότερους από τα 38,4 kbps, δεν υπάρχει καμία απολύτως ελπίδα για τα *δυναμικά* σήματα, ακόμα και αν το σύστημα μετάδοσης είναι τελείως απαλλαγμένο από θόρυβο. Με άλλα λόγια, ο περιορισμός του εύρους ζώνης περιορίζει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, ακόμα και για τέλεια κανάλια. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολύπλοκα συστήματα κωδικοποίησης τα οποία χρησιμοποιούν πολλά επίπεδα τάσης, πετυχαίνοντας υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Θα τα εξετάσουμε στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Υπάρχει αρκετή σύγχυση σχετικά με το εύρος ζώνης, επειδή έχει διαφορετική σημασία για τους ηλεκτρολόγους μηχανικούς και τους επιστήμονες των υπολογιστών. Για τους ηλεκτρολόγους μηχανικούς, το (αναλογικό) εύρος ζώνης είναι (όπως το περιγράψαμε προηγουμένως) μια ποσότητα που μετριέται σε Hz. Για τους επιστήμονες των υπολογιστών, το (ψηφιακό) εύρος ζώνης είναι ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ενός καναλιού, μια ποσότητα που μετριέται σε bit/sec. Αυτός ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι το τελικό αποτέλεσμα της χρήσης του αναλογικού εύρους ζώνης ενός αναλογικού καναλιού για ψηφιακή μετάδοση, και τα δύο αυτά μεγέθη σχετίζονται μεταξύ τους, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Στο βιβλίο αυτό, θα είναι φανερό από τα συμφραζόμενα το αν εννοούμε αναλογικό εύρος ζώνης (Hz) ή ψηφιακό εύρος ζώνης (bit/sec).

2.1.3 Ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων ενός καναλιού

Ήδη από το 1924 ένας μηχανικός της AT&T, ο Henry Nyquist, είχε αντιληφθεί ότι ακόμη και ένα τέλειο κανάλι έχει περιορισμένη χωρητικότητα μετάδοσης. Κατασκεύασε λοιπόν μια εξίσωση που εκφράζει τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για ένα κανάλι χωρίς θόρυβο με πεπερασμένο εύρος ζώνης. Το 1948 ο Claude Shannon προχώρησε ακόμα περισσότερο τη δουλειά του Nyquist, επεκτείνοντάς την στην περίπτωση ενός καναλιού που υπόκειται σε τυχαίο (δηλαδή θερμοδυναμικό) θόρυβο (Shannon, 1948). Εδώ θα δώσουμε μόνο μια περίληψη των κλασικών πια αποτελεσμάτων τους.

Bps	T (msec)	Πρώτη αρμονική (Hz)	# αρμονικών που στέλνονται
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1200	6,67	150	20
2400	3,33	300	10
4800	1,67	600	5
9600	0,83	1200	2
19200	0,42	2400	1
38400	0,21	4800	0

Εικόνα 2-2. Συσχέτιση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων με τις αρμονικές.

Ο Nyquist απέδειξε ότι, αν ένα αυθαίρετο σήμα διέλθει από ένα χαμηλοδιαβατό (low-pass) φίλτρο με εύρος ζώνης B , το φιλτραρισμένο σήμα μπορεί να ανακατασκευαστεί πλήρως αν λάβουμε μόνο $2B$ (ακριβή) δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Η δειγματοληψία της γραμμής περισσότερο από $2B$ φορές ανά δευτερόλεπτο δεν έχει νόημα, αφού οι τυχόν υψηλότερης συχνότητας συνιστώσες που θα μπορούσαν να ανακτηθούν από τη δειγματοληψία αυτή έχουν ήδη φιλτραριστεί. Αν το σήμα αποτελείται από V διακριτά επίπεδα, το θεώρημα του Nyquist δηλώνει ότι:

$$\text{μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων} = 2B \log_2 V \text{ bit/sec} \quad (2-2)$$

Για παράδειγμα, ένα κανάλι χωρίς θόρυβο των 3 kHz δεν μπορεί να μεταδίδει δυαδικά σήματα (δηλαδή σήματα δύο επιπέδων) με ρυθμό πάνω από τα 6000 bps.

Μέχρι στιγμής έχουμε ασχοληθεί μόνο με κανάλια χωρίς θόρυβο. Αν στο κανάλι υπάρχει τυχαίος θόρυβος, η κατάσταση χειροτερεύει ραγδαία. Και υπάρχει πάντοτε τυχαίος (θερμικός) θόρυβος, λόγω της κίνησης των μορίων στο σύστημα. Η ποσότητα του θερμικού θορύβου στο κανάλι μετριέται με τον λόγο της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου, και ονομάζεται **λόγος σήματος προς θόρυβο** (signal-to-noise ratio, **SNR**). Αν αναπαραστήσουμε την ισχύ του σήματος με S και την ισχύ του θορύβου με N , ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι S/N . Συνήθως ο λόγος αυτός εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα ως η ποσότητα $10 \log_{10} S/N$, επειδή μπορεί να έχει εξαιρετικά μεγάλη διακύμανση. Οι μονάδες αυτές ονομάζονται **ντεσιμπέλ** (dB), όπου το "ντεσι" σημαίνει 10 και το "μπελ" είναι προς τιμήν του Alexander Graham, Bell, που εφηύρε το τηλέφωνο. Ένας λόγος S/N με τιμή 10 είναι ίσος με 10 dB, ένας λόγος με τιμή 100 είναι ίσος με 20 dB, ένας λόγος με τιμή 1000 είναι ίσος με 30 dB, και ούτω καθεξής. Οι κατασκευαστές στερεοφωνικών ενισχυτών συχνά προσδιορίζουν το εύρος ζώνης (την περιοχή συχνοτήτων) στην οποία τα προϊόντα τους αποδίδουν γραμμικά δίνοντας τη συχνότητα που αντιστοιχεί στα 3 dB σε κάθε άκρο. Αυτά είναι τα σημεία στα οποία ο παράγοντας ενίσχυσης έχει μειωθεί περίπου στο μισό (επειδή $10 \log_{10} 0.5 \approx -3$).

Το βασικό αποτέλεσμα του Shannon είναι ότι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε ένα κανάλι με θόρυβο το οποίο έχει εύρος ζώνης B Hz και στο οποίο ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι S/N δίνεται από την παράσταση

$$\text{μέγιστο πλήθος bit/sec} = B \log_2(1 + S/N) \quad (2-3)$$

Αυτό μας δείχνει την καλύτερη χωρητικότητα που μπορούν να έχουν τα πραγματικά κανάλια. Για παράδειγμα, το σύστημα ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line, Ασύμμετρη Συμδρομητική Ψηφιακή Γραμμή), που παρέχει πρόσβαση στο Internet μέσω κανονικών τηλεφωνικών γραμμών, χρησιμοποιεί εύρος ζώνης περίπου 1 MHz. Ο λόγος SNR εξαρτάται πολύ από την απόσταση μεταξύ οικίας και τηλεφωνικού κέντρου, και ένας λόγος SNR περίπου ίσος με 40 dB για μικρές γραμμές μήκους 1 έως 2 km είναι πολύ καλός. Με τα χαρακτηριστικά αυτά, το κανάλι δεν μπορεί να μεταδώσει ποτέ περισσότερα από 13 Mbps, ανεξάρτητα από το πόσο λίγα επίπεδα σημάτων χρησιμοποιούνται και από το πόσο συχνά ή λιγότερο συχνά λαμβάνονται δείγματα. Στην πράξη, το σύστημα ADSL έχει προδιαγραφές μέχρι τα 12 Mbps, αν και οι χρήστες βλέπουν συχνά χαμηλότερες ταχύτητες. Αυτός ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι στην πραγματικότητα πολύ καλός, και τα περίπου 60 χρόνια εξέλιξης των τεχνικών επικοινωνίας έχουν μειώσει σημαντικά το χάσμα ανάμεσα στη χωρητικότητα Shannon και τη χωρητικότητα των πραγματικών συστημάτων.

Το αποτέλεσμα του Shannon βασίζεται σε επιχειρήματα της θεωρίας των πληροφοριών, και εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε κανάλι που υπόκειται σε θερμικό θόρυβο. Τα αντιπαραδείγματα θα πρέπει να αντιμετωπίζονται όπως οι αεικίνητες μηχανές. Για να υπερβεί το σύστημα ADSL τα 13 Mbps, θα πρέπει είτε να βελτιώσει τον λόγο SNR (για παράδειγμα, με εισαγωγή

ψηφιακών επαναληπτών στις γραμμές κοντά στους πελάτες) ή να χρησιμοποιεί περισσότερο εύρος ζώνης, όπως γίνεται με την εξέλιξη στο ASDL2+.

2.2 Κατευθυνόμενα μέσα μετάδοσης

Ο στόχος του φυσικού επιπέδου είναι να μεταδίδει bit από μια μηχανή σε μια άλλη. Για την ίδια τη μετάδοση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα φυσικά μέσα. Κάθε ένα από αυτά έχει τα δικά του χαρακτηριστικά από πλευράς εύρους ζώνης, καθυστέρησης, κόστους, και ευκολίας εγκατάστασης και συντήρησης. Σε γενικές γραμμές, τα μέσα ομαδοποιούνται σε κατευθυνόμενα μέσα (guided media), όπως τα χάλκινα σύρματα και οι οπτικές ίνες, και μη κατευθυνόμενα μέσα (unguided media), όπως τα επίγεια ασύρματα, τα δορυφορικά, και οι ακτίνες λέιζερ στον αέρα. Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε τα κατευθυνόμενα μέσα, ενώ θα ασχοληθούμε με τα μη κατευθυνόμενα μέσα στις επόμενες ενότητες.

2.2.1 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., εγγραψίμα 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.

Ένας απλός υπολογισμός θα ξεκαθαρίσει την κατάσταση. Μια τυπική κασέτα Ultrium μπορεί να χωρέσει 800 gigabyte. Ένα κουτί διαστάσεων $60 \times 60 \times 60$ cm μπορεί να χωρέσει περίπου 1000 τέτοιες κασέτες, δίνοντας συνολική χωρητικότητα 800 terabyte ή 6400 terabit (6,4 petabit). Ένα κουτί με κασέτες μπορεί να παραδοθεί οπουδήποτε στις Η.Π.Α. μέσα σε 24 ώρες από την Federal Express και άλλες εταιρείες. Το τελικό εύρος ζώνης για αυτή τη μετάδοση είναι $1600 \text{ terabit} / 86.400 \text{ sec}$, δηλαδή 70 Gbps. Αν ο προορισμός απέχει μία ώρα με το αυτοκίνητο, το εύρος ζώνης αυξάνεται σε περισσότερα από 1700 Gbps. Κανένα δίκτυο υπολογιστών δεν μπορεί ούτε καν να πλησιάσει κάτι τέτοιο. Φυσικά, τα δίκτυα υπολογιστών γίνονται όλο και πιο γρήγορα, όμως μεγαλώνει επίσης και η πυκνότητα εγγραφής των ταινιών.

Αν εξετάσουμε τώρα το κόστος, βλέπουμε μια παρόμοια κατάσταση. Το κόστος μιας ταινίας Ultrium είναι περίπου \$40 για μαζικές παραγγελίες. Η ταινία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί τουλάχιστον δέκα φορές, και έτσι το κόστος των ταινιών είναι περίπου \$4000 ανά κουτί και ανά χρήση. Προσθέτουμε άλλα \$1000 για τη μεταφορά (και πιθανόν πολύ λιγότερα), οπότε έχουμε ένα κόστος περίπου \$5000 για να μεταφέρουμε 800 TB. Αυτό σημαίνει ότι στέλνουμε ένα gigabyte με κόστος 3 cents. Κανένα δίκτυο δεν μπορεί να ξεπεράσει αυτή την τιμή. Το ηθικό δίδαγμα λοιπόν είναι:

Μην υποτιμάτε ποτέ το εύρος ζώνης ενός φορητού γεμάτου ταινίες που τρέχει στον αυτοκινητόδρομο.

2.2.2 Σύστροφο ζεύγος

Αν και το εύρος ζώνης της μαγνητικής ταινίας είναι άριστο, η καθυστέρησή της δεν είναι καλή. Ο χρόνος μετάδοσης μετρίεται σε λεπτά ή ώρες, και όχι χιλιοστά του δευτερολέπτου. Σε πολλές εφαρμογές χρειάζεται η άμεση σύνδεση (on-line). Ένα από τα παλαιότερα μέσα μετά-

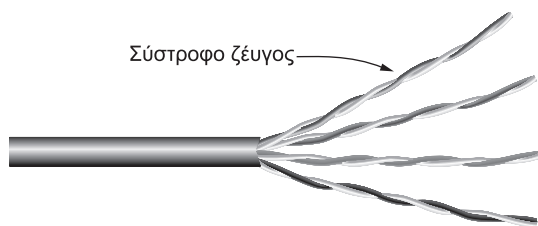
δοσης, το οποίο παραμένει ακόμα ένα από τα πιο συνηθισμένα, είναι το **σύστροφο ζεύγος** (twisted pair). Το σύστροφο ζεύγος αποτελείται από δύο μονωμένα χάλκινα σύρματα, με πάχος γύρω στο 1 mm συνήθως. Τα σύρματα συστρέφονται ελικοειδώς, όπως τα μόρια του DNA. Αυτό χρειάζεται επειδή δύο παράλληλα σύρματα δημιουργούν μια πολύ καλή κεραία. Όταν τα σύρματα συστρέφονται, τα κύματα από τις διάφορες περιστροφές ακυρώνονται μεταξύ τους, οπότε το σύρμα ακτινοβολεί λιγότερο. Το σήμα συνήθως μεταφέρεται ως διαφορά της τάσης μεταξύ των δύο καλωδίων του ζεύγους. Αυτό παρέχει καλύτερη προστασία από τον εξωτερικό θόρυβο, επειδή ο θόρυβος τείνει να επηρεάζει εξίσου και τα δύο καλώδια, αφήνοντας τη διαφορά αμετάβλητη.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή του σύστροφου ζεύγους είναι το τηλεφωνικό σύστημα. Όλα σχεδόν τα τηλέφωνα συνδέονται με τα κέντρα της τηλεφωνικής εταιρείας με ένα καλώδιο σύστροφου ζεύγους. Μέσω αυτών των καλωδίων πραγματοποιούνται τόσο οι τηλεφωνικές κλήσεις, όσο και η πρόσβαση στο Internet μέσω ADSL. Τα καλώδια αυτά μπορούν να εκτείνονται για αρκετά χιλιόμετρα χωρίς ενίσχυση, αλλά για μεγαλύτερες αποστάσεις χρειάζονται επαναλήπτες (repeaters) λόγω της εξασθένησης του σήματος. Όταν πολλά καλώδια σύστροφου ζεύγους εκτείνονται παράλληλα σε αρκετή απόσταση, όπως τα καλώδια που προέρχονται από μια πολυκατοικία με κατεύθυνση το κέντρο της τηλεφωνικής εταιρείας, πακετάρονται όλα μαζί σε μια δέσμη και καλύπτονται από ένα προστατευτικό περίβλημα. Τα ζεύγη των δεσμών αυτών θα προκαλούσαν παρεμβολές το ένα στο άλλο αν δεν ήταν σύστροφα. Στις χώρες όπου οι τηλεφωνικές γραμμές κρέμονται σε στύλους πάνω από το έδαφος, είναι συνηθισμένο να βλέπει κανείς δέσμες με διάμετρο πολλά εκατοστά.

Τα σύστροφα ζεύγη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση είτε αναλογικών, είτε ψηφιακών σημάτων. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από το πάχος του σύρματος και την καλυπτόμενη απόσταση, αν και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί εύρος πολλών megabit/sec για λίγα χιλιόμετρα. Λόγω της επαρκούς απόδοσής τους και του χαμηλού τους κόστους τα καλώδια σύστροφου ζεύγους χρησιμοποιούνται ευρύτατα, και αυτό είναι πολύ πιθανό να συνεχιστεί και για τα επόμενα χρόνια.

Τα καλώδια σύστροφου ζεύγους υπάρχουν σε πολλές ποικιλίες. Η ευρέως διαδεδομένη ποικιλία που χρησιμοποιείται σε πολλά κτίρια γραφείων είναι τα καλώδια **κατηγορίας 5**, ή "Cat 5". Τα καλώδια σύστροφου ζεύγους κατηγορίας 5 αποτελούνται από δύο μονωμένα σύρματα ελαφρώς συστραμμένα μεταξύ τους. Τέσσερα τέτοια ζεύγη ομαδοποιούνται σε ένα πλαστικό κάλυμμα που προστατεύει και διατηρεί μαζί τα καλώδια. Αυτή η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 2-3.

Τα διάφορα πρότυπα για LAN μπορεί να χρησιμοποιούν με διαφορετικό τρόπο τα καλώδια σύστροφου ζεύγους. Για παράδειγμα, το Ethernet 100 Mbps χρησιμοποιεί δύο (από τα τέσσερα) ζεύγη, με ένα ζεύγος ανά κατεύθυνση. Για να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες, το Ethernet 1 Gbps χρησιμοποιεί ταυτόχρονα και τα τέσσερα ζεύγη και προς τις δύο κατευθύνσεις· αυτό απαιτεί ο παραλήπτης να αφαιρεί το σήμα που μεταδίδεται τοπικά.



Εικόνα 2-3. Καλώδιο UTP κατηγορίας 5 με τέσσερα σύστροφα ζεύγη.

Είναι ώρα να δώσουμε κάποια γενική ορολογία. Οι γραμμές συνδέσμων που μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και προς τις δύο κατευθύνσεις, όπως ένας δρόμος διπλής κατεύθυνσης, αποκαλούνται **πλήρως αμφίδρομοι σύνδεσμοι** (full-duplex links). Σε αντιδιαστολή, οι γραμμές συνδέσμων που μπορούν να χρησιμοποιούνται και προς τις δύο κατευθύνσεις, όμως με μία κατεύθυνση τη φορά (όπως στην περίπτωση μιας απλής σιδηροτροχιάς), αποκαλούνται **ημιαμφίδρομοι σύνδεσμοι** (half-duplex links). Μια τρίτη κατηγορία αποτελείται από συνδέσμους που επιτρέπουν κίνηση μόνο προς τη μία κατεύθυνση, όπως στην περίπτωση των μονοδρόμων. Αυτές αποκαλούνται **μονόδρομοι σύνδεσμοι** (simplex links).

Για να επιστρέψουμε στα καλώδια σύστροφου ζεύγους, τα καλώδια κατηγορίας 5 αντικατέστησαν τα παλαιότερα καλώδια **κατηγορίας 3** τα οποία είχαν παρόμοια καλωδίωση με ίδιο συνδετήρα, όμως είχαν λιγότερες στροφές ανά εκατοστό. Η ύπαρξη περισσότερων στροφών οδηγεί σε λιγότερες παρεμβολές και καλύτερη ποιότητα σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις — έτσι, τα καλώδια αυτά είναι πιο βολικά για επικοινωνία υπολογιστών σε υψηλές ταχύτητες, ειδικά σε δίκτυα Ethernet LAN στα 100 Mbps και το 1 Gbps.

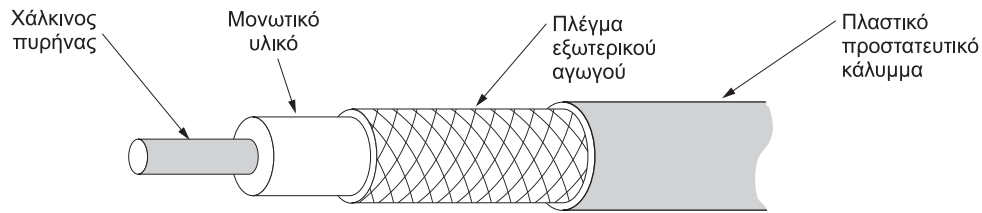
Οι νέες μορφές καλωδίωσης πιθανόν να είναι τα καλώδια **κατηγορίας 6** ή ακόμα και **κατηγορίας 7**. Αυτές οι κατηγορίες έχουν αυστηρότερες προδιαγραφές για τον χειρισμό σημάτων με μεγαλύτερα εύρη ζώνης. Κάποια καλώδια κατηγορίας 6 και υψηλότερων μπορούν να χειριστούν σήματα 500 MHz και να υποστηρίξουν τις γραμμές συνδέσμων 10 Gbps που θα αρχίσουν σύντομα να εμφανίζονται.

Μέχρι και την κατηγορία 6, αυτοί οι τύποι καλωδίωσης αναφέρονται ως **Μη Θωρακισμένο Σύστροφο Ζεύγος** ή **UTP** (Unshielded Twisted Pair), επειδή αποτελούνται απλώς από καλώδια και μονωτήρες. Σε αντιδιαστολή, τα καλώδια κατηγορίας 7 έχουν θωράκιση στα μεμονωμένα σύστροφα ζεύγη, καθώς και γύρω από ολόκληρο το καλώδιο (μέσα όμως από το πλαστικό προστατευτικό κάλυμμα). Η θωράκιση μειώνει την επιδεκτικότητα εξωτερικών παρεμβολών και παρεμβολών από άλλα γειτονικά καλώδια, έτσι ώστε να ικανοποιούνται απαιτητικές προδιαγραφές απόδοσης. Τα καλώδια θυμίζουν τα υψηλής ποιότητας, αλλά ογκώδη και δαπανηρά καλώδια θωρακισμένου σύστροφου ζεύγους που παρουσίασε η IBM στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αλλά τα οποία δεν έγιναν δημοφιλή έξω από τις εγκαταστάσεις της IBM. Φαίνεται ότι ήρθε ο καιρός για την επιστροφή τους.

2.2.3 Ομοαξονικό καλώδιο

Ένα άλλο συνηθισμένο μέσο μετάδοσης είναι το **ομοαξονικό καλώδιο** (coaxial cable, γνωστό στους πολλούς φίλους τους και ως "coax"). Έχει καλύτερη θωράκιση από τα σύστροφα ζεύγη, οπότε μπορεί να καλύπτει μεγαλύτερες αποστάσεις σε υψηλότερες ταχύτητες. Δύο είδη ομοαξονικού καλωδίου χρησιμοποιούνται ευρέως. Το ένα είδος, το καλώδιο των 50 ohm, χρησιμοποιείται συνήθως όταν προορίζεται από την αρχή για ψηφιακή μετάδοση. Το άλλο είδος, το καλώδιο των 75 ohm, χρησιμοποιείται συνήθως για αναλογική μετάδοση και καλωδιακή τηλεόραση. Αυτή η διάκριση βασίζεται περισσότερο σε ιστορικούς παρά σε τεχνικούς παράγοντες (για παράδειγμα, οι πρώτες διπολικές κεραίες είχαν σύνθετη αντίσταση 300 ohm, και ήταν πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχοντες μετασχηματιστές σύνθετης αντίστασης με λόγο 4:1). Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι φορείς καλωδιακής τηλεόρασης άρχισαν να παρέχουν πρόσβαση στο Internet μέσω καλωδιακής, γεγονός που έκανε την καλωδίωση των 75 ohm πιο σημαντική για τις επικοινωνίες δεδομένων.

Το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείται από έναν πυρήνα άκαμπτου χάλκινου καλωδίου, ο οποίος περιβάλλεται από ένα μονωτικό υλικό. Ο μονωτής καλύπτεται από έναν κυλινδρικό



Εικόνα 2-4. Ομοαξονικό καλώδιο.

αγωγό, συχνά με μορφή ενός πυκνού δικτυωτού πλέγματος. Ο εξωτερικός αγωγός καλύπτεται από ένα πλαστικό προστατευτικό περίβλημα. Η τομή ενός ομοαξονικού καλωδίου φαίνεται στην Εικόνα 2-4.

Η κατασκευή και η θωράκιση του ομοαξονικού καλωδίου τού δίνουν έναν καλό συνδυασμό υψηλού εύρους ζώνης και εξαιρετικής αντοχής στον θόρυβο. Το εφικτό εύρος ζώνης εξαρτάται από την ποιότητα και το μήκος του καλωδίου. Τα σύγχρονα καλώδια έχουν εύρος ζώνης κοντά στο 1 GHz. Παλαιότερα τα ομοαξονικά καλώδια χρησιμοποιούνταν συχνά στο τηλεφωνικό σύστημα για τις υπεραστικές γραμμές, αλλά έχουν πια αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από τις οπτικές ίνες για τις πιο μακρινές αποστάσεις. Το ομοαξονικό καλώδιο χρησιμοποιείται ακόμη όμως για την καλωδιακή τηλεόραση και τα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής.

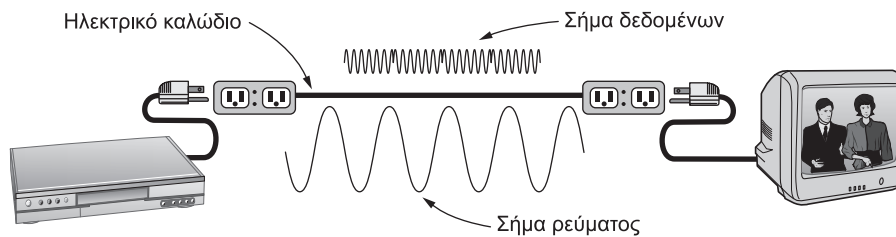
2.2.4 Γραμμές ρεύματος

Τα δίκτυα τηλεφωνίας και καλωδιακής τηλεόρασης δεν είναι οι μόνες πηγές καλωδίωσης που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για επικοινωνία δεδομένων. Υπάρχει και ένα ακόμα πιο διαδεδομένο είδος καλωδίωσης: οι γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος. Οι γραμμές ρεύματος μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα σε σπίτια, και η ηλεκτρική καλωδίωση μέσα στα σπίτια διανέμει το ρεύμα στις πρίζες.

Η χρήση των γραμμών ρεύματος για την επικοινωνία δεδομένων είναι μια παλιά ιδέα. Οι γραμμές ρεύματος έχουν εδώ και πολλά χρόνια χρησιμοποιηθεί από τις εταιρίες ηλεκτρισμού για επικοινωνία χαμηλής ταχύτητας, όπως στην περίπτωση της τηλεμέτρησης, καθώς και μέσα στο σπίτι για τον έλεγχο συσκευών (π.χ. το πρότυπο X10). Τα τελευταία χρόνια έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον για επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας μέσω αυτών των γραμμών, τόσο μέσα στο σπίτι ως δίκτυο LAN, όσο και έξω από το σπίτι για ευρυζωνική πρόσβαση στο Internet. Θα επικεντρωθούμε στο πιο συνηθισμένο σενάριο: τη χρήση ηλεκτρικών καλωδίων μέσα στο σπίτι.

Θα πρέπει να είναι προφανές η ευκολία που παρέχει η χρήση γραμμών ρεύματος για τη δικτύωση. Με την απλή σύνδεση μιας τηλεόρασης και ενός δέκτη στην πρίζα, κάτι που θα κάναμε έτσι κι αλλιώς επειδή χρειάζονται ρεύμα, οι συσκευές αυτές θα μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν ταινίες μέσω της ηλεκτρικής καλωδίωσης. Αυτή η διευθέτηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-5. Δεν υπάρχει καμία άλλη σύνδεση ή ραδιοσήματα. Τα σήματα δεδομένων τοποθετούνται με υπέρθεση στο χαμηλής συχνότητας σήμα ρεύματος (στο ενεργό ή "καυτό" καλώδιο), καθώς και τα δύο σήματα χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το καλώδιο.

Η δυσκολία με τη χρήση της οικιακής ηλεκτρικής καλωδίωσης για δικτύωση είναι το ότι έχει σχεδιαστεί για τη διανομή σημάτων ρεύματος. Αυτό είναι αρκετά διαφορετικό από τη διανομή σημάτων δεδομένων, για την οποία η οικιακή καλωδίωση έχει εξαιρετικά κακή απόδοση. Τα ηλεκτρικά σήματα στέλνονται στα 50–60 Hz και η καλωδίωση εξασθενεί τα πολύ υψηλότερης συχνότητας (MHz) σήματα τα οποία απαιτούνται για την επικοινωνία δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες της καλωδίωσης ποικίλλουν από σπίτι σε



Εικόνα 2-5. Ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί την οικιακή καλωδίωση ηλεκτρικού ρεύματος.

σπίτι, και μεταβάλλονται καθώς ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται οι διάφορες συσκευές, γεγονός που προκαλεί "αναπηδήσεις" στα σήματα δεδομένων στο καλώδιο. Τα πρόσκαιρα ρεύματα κατά την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση συσκευών δημιουργούν ηλεκτρικό θόρυβο σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Και καθώς δεν διαθέτει την προσεκτική συστροφή των ζευγών καλωδίων, η ηλεκτρική καλωδίωση λειτουργεί ως εξαιρετική κεραία, συλλαμβάνοντας εξωτερικά σήματα και εκπέμποντας δικά της σήματα. Η συμπεριφορά αυτή σημαίνει ότι, για να ικανοποιηθούν οι ρυθμιστικές διατάξεις, τα σήματα δεδομένων θα πρέπει να αποκλείουν αδειοδοτημένες συχνότητες, όπως εκείνες των ραδιοσυχνοτήτων ερασιτεχνικού ραδιοφώνου.

Παρά τις δυσκολίες αυτές, είναι εφικτή η αποστολή τουλάχιστον 100 Mbps πάνω από τυπική οικιακή ηλεκτρική καλωδίωση, με χρήση σχημάτων επικοινωνίας τα οποία είναι ανθεκτικά σε εξασθενημένες συχνότητες και ριπές σφαλμάτων. Πολλά προϊόντα χρησιμοποιούν διάφορα ιδιόκτητα πρότυπα για δικτύωση μέσω γραμμών ρεύματος, και έτσι αυτή τη στιγμή υπάρχει έντονη δραστηριότητα για την ανάπτυξη διεθνών προτύπων.

2.2.5 Οπτικές ίνες

Πολλοί άνθρωποι από τη βιομηχανία των υπολογιστών υπερηφανεύονται για το πόσο γρήγορα βελτιώνεται η τεχνολογία των υπολογιστών, καθώς ακολουθεί το νόμο του Moore, ο οποίος προβλέπει διπλασιασμό του πλήθους τρανζίστορ ανά τσιπ κάθε περίπου δύο χρόνια (Schaller, 1997). Το αρχικό IBM PC (1981) λειτουργούσε με ταχύτητα ρολογιού 4,77 MHz. Εικοσιοκτώ χρόνια αργότερα οι προσωπικοί υπολογιστές μπορούσαν να λειτουργούν με μια τετραπύρηνη CPU στα 3 GHz. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί σε συντελεστή ανάπτυξης περίπου ίσο με 2500, δηλαδή περίπου 16 ανά δεκαετία. Εντυπωσιακό.

Την ίδια περίοδο, οι επικοινωνίες ευρείας περιοχής έφτασαν από τα 45 Mbps (μια γραμμή T3 στο τηλεφωνικό σύστημα) στα 100 Gbps (στις σημερινές γραμμές μεγάλων αποστάσεων). Αυτή η βελτίωση είναι εξίσου εντυπωσιακή, αφού αντιστοιχεί σε συντελεστή αύξησης μεγαλύτερο από 2000 και κοντά στο 16 ανά δεκαετία, ενώ ταυτόχρονα το ποσοστό σφαλμάτων μειώθηκε από το 10^{-5} ανά bit σχεδόν στο μηδέν. Επιπλέον, οι μεμονωμένοι επεξεργαστές αρχίζουν να προσεγγίζουν τα όρια των φυσικών νόμων, που είναι ο λόγος για τον οποίο τώρα αυξάνεται το πλήθος των επεξεργαστών ανά τσιπ. Αντιθέτως, με την τρέχουσα τεχνολογία οπτικών ινών, το εύρος ζώνης που μπορεί να επιτευχθεί είναι πάνω από τα 50.000 Gbps (50 Tbps), και δεν πλησιάζουμε καν στο να φτάσουμε αυτό το όριο. Το πρακτικό όριο για τα σήματα είναι αυτή τη στιγμή γύρω στα 100 Gbps, και οφείλεται στην αδυναμία μας να επιτύχουμε ταχύτερες μετατροπές ανάμεσα στα ηλεκτρικά και στα οπτικά σήματα. Για τη δημιουργία γραμμών υψηλότερης χωρητικότητας, απλώς μεταφέρονται παράλληλα πολλά κανάλια μέσω μίας οπτικής ίνας.

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε τις οπτικές ίνες για να μάθουμε πώς λειτουργεί αυτή η τεχνολογία μετάδοσης. Στον διαρκή αγώνα ανάμεσα στους υπολογιστές και τις επικοινωνίες,

ANDREW S. TANENBAUM**DAVID J. WETHERALL****Μια σύγχρονη, αλλά και κλασική πλέον, εισαγωγή στις σημαντικές τεχνολογίες δικτύωσης του σήμερα**

Το βιβλίο *Δίκτυα υπολογιστών*, στην πέμπτη αμερικανική του έκδοση, αποτελεί την ιδανική εισαγωγή στον τομέα της δικτύωσης. Πρόκειται για ένα βιβλίο με παγκόσμια επιτυχία, το οποίο είναι πλήρως ενημερωμένο με τις τελευταίες τεχνολογίες δικτύωσης και δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ασύρματη δικτύωση, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών 802.11, 802.16, Bluetooth™, και κυψελωτής 3G, αλλά καλύπτει επίσης τις τεχνολογίες σταθερής δικτύωσης ADSL, Internet μέσω καλωδίων, gigabit Ethernet, MPLS, και ομότιμων δικτύων. Αξίζει να τονιστεί ότι αυτή η τελευταία έκδοση περιλαμβάνει επίσης εντελώς νέο υλικό για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G, την Οπτική Ίνα μέχρι το Σπίτι, το RFID, τα ανεκτικά σε καθυστερήσεις δίκτυα, και την ασφάλεια 802.11, καθώς και εμπλουτισμένο και διευρυμένο υλικό για τη δρομολόγηση μέσω Internet, την πολυεκπομπή, τον έλεγχο συμφόρησης, την ποιότητα υπηρεσιών, τη μεταφορά σε πραγματικό χρόνο, και τη διανομή περιεχομένου.



**ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ
ΧΑΜΗΛΗΣ
ΤΡΟΧΙΑΣ**

Οι συγγραφείς Andrew Tanenbaum και David Wetherall περιγράφουν διεξοδικά όλες τις εσωτερικές πτυχές ενός δικτύου, εξερευνώντας τη λειτουργικότητά του από το υποκείμενο υλικό μέχρι τις εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων και των εξής:

- Φυσικό επίπεδο – π.χ., χαλκός, οπτικές ίνες, ασύρματο, δορυφόροι, OFDM, και CDMA
- Επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων – π.χ., ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, κυλιόμενα παράθυρα, και πακέτα πάνω από SONET
- Υποεπίπεδο MAC – π.χ., gigabit Ethernet, 802.16, RFID, Ethernet μεταγωγής, VLAN
- Επίπεδο δικτύου – π.χ., αλγόριθμοι δρομολόγησης, πολυεκπομπή, QoS, IPv4, IPv6, και MPLS
- Επίπεδο μεταφοράς δεδομένων – π.χ., υποδοχές (sockets), UDP, TCP, RTP, έλεγχος συμφόρησης, και ανεκτικά σε καθυστερήσεις δίκτυα
- Επίπεδο εφαρμογών – π.χ., DNS, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, Παγκόσμιος Ιστός, πολυμέσα ροής, διανομή περιεχομένου, και ομότιμα δίκτυα
- Ασφάλεια δικτύων – π.χ., AES, RSA, IPsec, αντιπυρικές ζώνες (firewalls), VPN, 802.11i, και ασφάλεια Ιστού

Οι συγγραφείς παρουσιάζουν και εξετάζουν αναλυτικά τις αρχές που σχετίζονται με κάθε επίπεδο, και στη συνέχεια τις «μεταφράζουν» σε παραδείγματα από το Internet και τα ασύρματα δίκτυα.

ΟΙ ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ

Ο **ANDREW S. TANENBAUM** είναι Καθηγητής Επιστήμης Υπολογιστών στο Vrije Universiteit του Άμστερνταμ, στην Ολλανδία. Είναι μέλος των IEEE, ACM, και της Ολλανδικής Βασιλικής Ακαδημίας Τεχνών και Επιστημών. Πρόσφατα επιχορηγήθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Έρευνας για την ανάπτυξη εξαιρετικά αξιόπιστων συστημάτων υπολογιστών. Είναι ο συγγραφέας των παγκόσμιων μπεστ σέλερ *Σύγχρονα λειτουργικά συστήματα*, *Αρχιτεκτονική των υπολογιστών: Μια δομημένη προσέγγιση*, και *Κατανεμημένα συστήματα: Αρχές και υποδείγματα* που κυκλοφορούν από τις Εκδόσεις Κλειδαριθμός.

Ο **DAVID J. WETHERALL** είναι Αναπληρωτής Καθηγητής Επιστήμης Υπολογιστών και Μηχανικής στο Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον, στο Σιάτλ των ΗΠΑ. Κατάγεται από την Αυστραλία και έχει εργαστεί στον τομέα της δικτύωσης τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Το ερευνητικό του έργο εστιάζεται στα πρωτόκολλα του Internet, τα ασύρματα δίκτυα, και την ασφάλεια, και έχει αναγνωριστεί με την υποτροφία Sloan, το βραβείο Bennett του IEEE, και το βραβείο Test-of-Time του ACM SIGCOMM.

**εκδόσεις
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ**

Λεωφόρος 4, Στάθμος Πάρκινγκ, 10448 Αθήνα, Τηλ. 210-5237005
info@kclidarithmos.gr www.kclidarithmos.gr
www.facebook.com/kclidarithmos.gr

ISBN 978-960-461-447-9



9 789604 614479