

1

Ελέγχοντας την Ένταση

Τα κινητά τηλέφωνα είναι πλέον μέρος της καθημερινότητάς μας. Πάρτε την εικόνα 1.1, η οποία δείχνει τη διείσδυση της **κινητής τηλεφωνίας** για επιλεγμένες χώρες στα μέσα του 2015. Αυτός είναι ο μέσος αριθμός κινητών τηλεφώνων ανά άτομο στη χώρα. Παρατηρήστε ότι τα πέντε αριστερά είναι πάνω από 100%, που σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερα κινητά τηλέφωνα από άτομα σε αυτές τις περιπτώσεις.

Επίσης, οι 13 χώρες στην εικόνα 1.1 ήταν αυτές στα μέσα του 2015 με πάνω από 100 εκατομμύρια συνδρομές. Αν πάρουμε τον παγκόσμιο συνολικό αριθμό των αγορασμένων συνδρομών κινητής τηλεφωνίας εκείνη την εποχή, ήταν πάνω από 6.800.000.000 (δηλαδή 6,8 δισεκατομμύρια!).

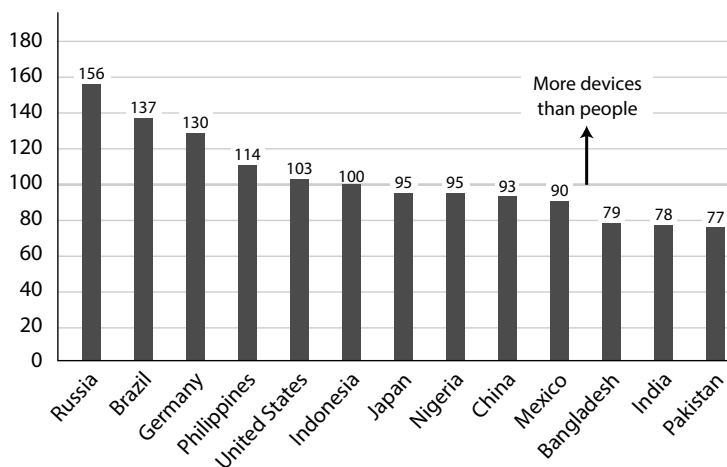
Με αυτούς τους τεράστιους αριθμούς, θα μπορούσατε να ρωτήσετε, πώς είναι δυνατόν να μπορούμε όλοι να επικοινωνούμε αποτελεσματικά στον αέρα χωρίς να διακόπτουμε ο ένας τις κλήσεις, τα μηνύματα ή τη χρήση του Διαδικτύου του άλλου; Θα δούμε μερικές μεθόδους για κοινή χρήση σε αυτό το μέρος του βιβλίου, ξεκινώντας με τον έλεγχο ισχύος (ένταση ομιλίας) σε αυτό το κεφάλαιο.

Το σύγχρονο κινητό **κυψελοειδές (cellular)** σύστημα είναι το αποτέλεσμα δεκαετιών τεχνολογικής καινοτομίας. Καθώς οι κινητές συσκευές μετατράπηκαν από ένα είδος πολυτελείας τη δεκαετία του 1940-80 σε απόλυτη αναγκαιότητα μέχρι τον εικοστό πρώτο αιώνα, οι μηχανικοί έπρεπε να βρουν διαφορετικούς τρόπους για να αφήσουν τους ανθρώπους να μοιράζονται τον αέρα.

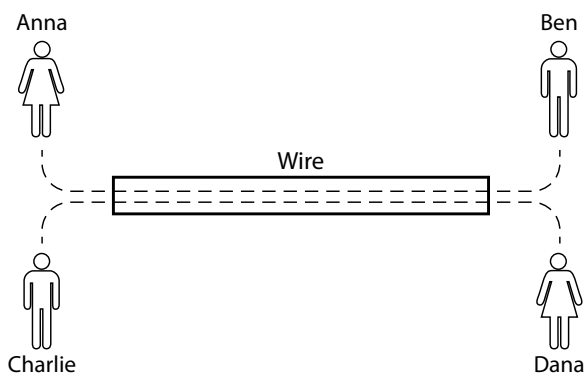
ΑΠΟ ΤΗΛΕΦΩΝΟ ΣΕ ΚΙΝΗΤΟ

Πριν από την εμφάνιση των ασύρματων δικτύων και των κινητών τηλεφώνων, η δικτύωση επικοινωνίας αφορούσε περισσότερο την **ενσύρματη σύνδεση**

(wireline). Η ενσύρματη γραμμή είναι επικοινωνία με χρήση καλωδίων, σε αντίθεση με την **ασύρματη (wireless)** επικοινωνία. Το πρώτο τηλεφώνημα έγινε στις 9 Οκτωβρίου 1876, από τον Alexander Graham Bell, σε μια ενσύρματη σύνδεση έκτασης 2 μιλίων από τη Βοστώνη στο Κέιμπριτζ. Το επόμενο έτος, ο Bell ίδρυσε την Bell Telephone Company, την πρώτη εταιρεία που παρείχε **υπηρεσία δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής** (συνήθως αναφερόμαστε σε αυτό ως "σταθερό").



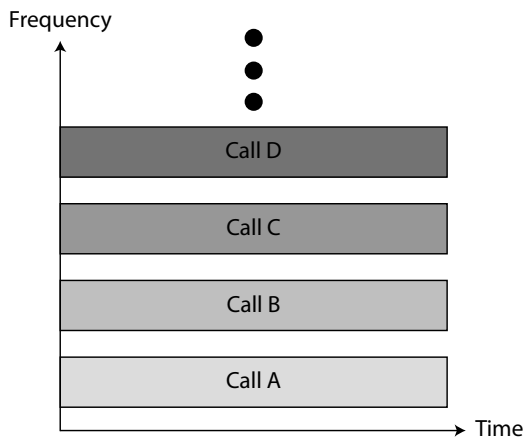
Εικόνα 1.1 Διείσδυση κινητής τηλεφωνίας ή αριθμός κινητών τηλεφώνων ανά άτομο, σε επιλεγμένες χώρες από τον Ιούνιο του 2015. Έξι χώρες έχουν διείσδυση τουλάχιστον 100%, που σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερα τηλέφωνα από ανθρώπους.



Εικόνα 1.2 Ας υποθέσουμε ότι η Άννα και ο Μπεν έχουν μια τηλεφωνική συνομιλία, όπως και ο Τσάρλι και η Ντάνα. Πώς είναι δυνατόν και τα δύο ζευγάρια να χρησιμοποιούν το ίδιο καλώδιο χωρίς να παρεμβαίνουν μεταξύ τους;

Πριν ο Bell σχεδιάσει το τηλέφωνο, πειραματιζόταν με τον τηλεγράφο, μια παλαιότερη εφεύρεση. Ο «πολλαπλός τηλεγράφος» ήταν ένας όπου πολλαπλοί **πομποί** (αποστολείς μηνυμάτων-transmitters) και **δέκτες** (δέκτες μηνυμάτων-receivers) μπορούσαν να λειτουργούν μέσω ενός μόνο καλωδίου.

Σταματήστε εδώ για ένα δευτερόλεπτο: πώς είναι δυνατόν να έχουμε πολλούς διαφορετικούς ανθρώπους να μοιράζονται το ίδιο καλώδιο, όπως στην εικόνα 1.2; Αν η Άννα και ο Μπεν προσπαθούν να μιλήσουν μεταξύ τους, όπως και ο Τσάρλι και η Ντάνα, αυτό δεν θα τους έκανε να διαταράξουν ο ένας τις συνομιλίες του άλλου;



Εικόνα 1.3 Με την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας, οι κλήσεις διακρίνονται από τα καθορισμένα κανάλια συχνότητας: οι χρήστες στην κλήση Α λαμβάνουν ένα κανάλι, εκείνοι στο Β λαμβάνουν διαφορετικό και ούτω καθεξής.

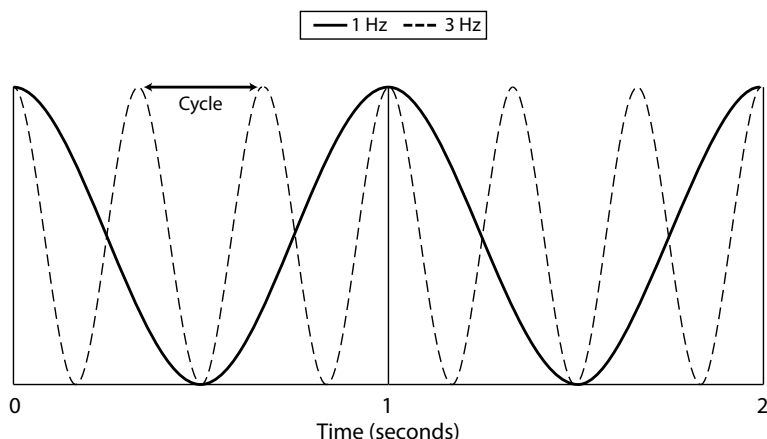
Οχι απαραίτητα. Παρόλο που μοιράζονται τον ίδιο *χώρο* (το καλώδιο), μπορούμε να τα χωρίσουμε σε κάποια άλλη διάσταση. Το πιο διαισθητικό είναι ίσως ο χρόνος: αφήστε την Άννα και τον Μπεν να χρησιμοποιήσουν το καλώδιο για λίγο, μετά τον Τσάρλι και τη Ντάνα, μετά πίσω στην Άννα και τον Μπεν και ούτω καθεξής. Θα μπορούσαμε επίσης να δοκιμάσουμε τη γλώσσα: να βάλουμε την Άννα και τον Μπεν να μιλήσουν στα αγγλικά και τον Τσάρλι και τη Ντάνα να μιλήσουν στα ισπανικά. Στη συνέχεια, μπορούν απλώς να ακούσουν τη δική τους γλώσσα ενώ εξακολουθούν να μιλούν ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει ακόμα να ανησυχούμε για διαφορετικές φωνές που υπερισχύουν η μια της άλλης.

Αυτές οι διαστάσεις - χρόνος και γλώσσα - είναι απλοποιημένα παραδείγματα διαφορετικών **τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης (multiple access)**. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο μέσο δικτύου (π.χ. ενσύρματο ή αέρα). Τους ρίχνουμε μια ματιά με περισσότερες λεπτομέρειες σε αυτό το κεφάλαιο.

Διαμοιρασμός βάσει Συχνότητας

Ο πολλαπλός τηλέγραφος διαχωρίζει τις συνομιλίες σε διαφορετικές *συχνότητες*, σε αυτό που είναι γνωστό ως **πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access)** ή FDMA. Το FDMA διαθέτει σε κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη, το οποίο ονομάζουμε ζεύξη, ένα ξεχωριστό **κανάλι συχνότητας** με το οποίο μπορούν να επικοινωνούν. Μπορείτε να το δείτε στην εικόνα 1.3.

Τι είναι η «συχνότητα»; Για αυτές που μπορούμε να ακούσουμε, τα διακρίνουμε ως διαφορετικούς τόνους ήχου. Η συχνότητα μετريέται σε μονάδες **hertz (Hz)**, που δείχνει τον αριθμό των κύκλων ανά δευτερόλεπτο σε ένα κύμα. Άρα 10 Hz σημαίνει ότι ένα κύμα ολοκληρώνει 10 κύκλους ανά δευτερόλεπτο (βλ. εικόνα 1.4). Για περισσότερα σχετικά με τα κανάλια συχνότητας, ρίξτε μια ματιά στο Q1.1 στον ιστότοπο του βιβλίου.



Εικόνα 1.4 Δύο κύματα διαφορετικών συχνότητων, που είναι ο αριθμός των κύκλων που ολοκληρώνει το κύμα σε ένα δευτερόλεπτο. Το συμπαγές κύμα έχει συχνότητα 1 Hz, ενώ το διακεκομμένο κύμα έχει συχνότητα 3 Hz.

Η μονάδα συχνότητας θα αναφερθεί πολλές φορές σε αυτό το μέρος του βιβλίου, αλλά τα πραγματικά εύρη με τα οποία θα ασχοληθούμε είναι πολλές τάξεις μεγέθους υψηλότερα από ένα hertz. Οι ζώνες ασύρματων συχνοτήτων αναφέρονται συνήθως σε εκατομμύρια hertz, γνωστά ως megahertz (MHz), ή δισεκατομμύρια hertz, γνωστά ως gigahertz (GHz). Για να σας δώσουμε μια ιδέα για το πόσο μεγάλα είναι, η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να ακούσει ένας άνθρωπος είναι περίπου 20.000 Hz.

Τα πρώτα κινητά τηλέφωνα, που χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1920-30, χρησιμοποιούσαν FDMA. Ήταν **αναλογικά** στη φύση τους, που σημαίνει ότι τα σήματά τους διέσχιζαν τον αέρα με τις ακριβείς ηλεκτρικές τους μορφές. Το 1946, το πρώτο δίκτυο «κινητής τηλεφωνίας» (mobile phone), που ονομάζεται Υπηρεσία Κινητής Τηλεφωνίας (Mobile Phone Service), εισήχθη από την Bell Telephone. Αυτό ήταν ένα σύστημα FDMA, όπως και ο διάδοχός του το 1964. Θεωρούνται τεχνολογίες μηδενικής γενιάς ή **0G**, σε αντίθεση με τις τεχνολογίες **4G** που χρησιμοποιούμε σήμερα.

Το πρώτο φορητό τηλέφωνο

Πίσω στη δεκαετία του 1970, ο Martin Cooper της Motorola ήταν πεπεισμένος ότι οι φορητές συσκευές ήταν το μέλλον. Το 1973, αυτός και μια ομάδα πέρασαν 90 ημέρες φτιάχνοντας το πρώτο κινητό τηλέφωνο χειρός: το DynaTAC.

Το DynaTAC δεν ήταν αυτό που θεωρούμε σήμερα ως φορητό. Με βάρος κοντά στις 2 λίβρες, κόστιζε σχεδόν 3,000 δολάρια (σε δολάρια του 1973!) και πρόσφερε 30 λεπτά χρόνου κλήσης πριν χρειαστεί η φόρτιση. Συγκριτικά, ένα iPhone το 2016 ζύγιζε λιγότερο από το ένα τρίτο της λίβρας, κόστιζε μόλις 150 \$ (ανάλογα με το μοντέλο και το ασύρματο συμβόλαιο) και πρόσφερε πολλές ώρες εφαρμογών φωνής και δεδομένων μετά από κάθε επαναφόρτιση.

Μόλις στα μέσα της δεκαετίας του 1990 η βιομηχανία θα άρχιζε πραγματικά να αλλάζει από τα τηλέφωνα αυτοκινήτων. Παρόμοια με τα ψηφιακά δίκτυα, τα τηλέφωνα σε μέγεθος παλάμης έγιναν πρακτικά μόνο όταν το κόστος των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων άρχισε να μειώνεται δραστικά, κάτι που με τη σειρά του οφείλεται εν μέρει στον όγκο της ζήτησης, ο οποίος με τη σειρά του καθοδηγείται εν μέρει από τις εφαρμογές που ενεργοποιούνται από τέτοιες τεχνολογίες.

Η "Κυψέλη" στην "Κυψελωτή Τηλεφωνία "

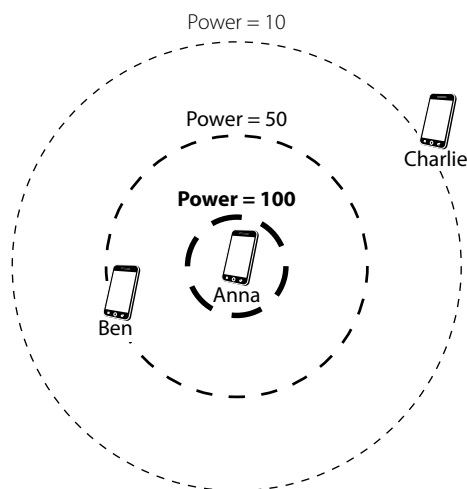
Το 1976, μόνο η Νέα Υόρκη είχε περίπου 500 συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας και πάνω από έξι φορές αυτόν τον αριθμό στη λίστα αναμονής. Υπήρχε απόλυτη ανάγκη να αυξηθεί η **χωρητικότητα του δικτύου (network capacity)**. Τι θα μπορούσαν λοιπόν να κάνουν οι πάροχοι δικτύων; Υπήρχαν πραγματικά μόνο δύο επιλογές: να υποβάλετε αίτηση στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communication Commission), ή FCC, για περισσότερο φάσμα ή να βρείτε έναν τρόπο να χωρέσετε περισσότερους χρήστες στο ίδιο φάσμα.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία αδειοδότησης της FCC, ανατρέξτε στο Q1.2 στον ιστότοπο του βιβλίου. Πώς μπορούμε να βάλουμε περισσότερους χρήστες στο ίδιο φάσμα; Ίσως μπορούμε να επαναχρησιμοποιήσουμε τα κανάλια; Αυτό φαίνεται κάπως τραβηγμένο: αν έχουμε δύο συνδέσμους ο ένας δίπλα στον άλλο και χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι, σίγουρα θα παρεμβάλλονται. Τι γίνεται όμως αν δεν είναι ακριβώς ο ένας δίπλα στον άλλο; Εάν είναι αρκετά μακριά, τότε θα μπορούσαμε να επαναχρησιμοποιήσουμε το ίδιο κανάλι;

Η απάντηση είναι ναι. Όταν τα σήματα διαδίδονται μέσω του αέρα (καθώς και μέσω καλωδίων), τα επίπεδα ισχύος τους **εξασθενούν**. Αυτό σημαίνει ότι μειώνονται με την απόσταση, όπως στην εικόνα 1.5.

Συνήθως, η εξασθένηση θεωρείται αρνητική ποιότητα. Προκαλεί την αποδυνάμωση ενός σήματος, καθιστώντας δυσκολότερη τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Αλλά αυτό ακριβώς χρειαζόμαστε εδώ: αν εσείς και εγώ είμαστε αρκετά μακριά, μπορούμε ο καθένας να κάνει μια κλήση χωρίς επικάλυψη στο χώρο.

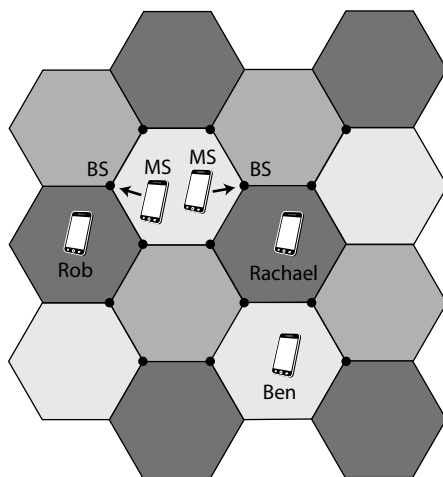
Η φύση της εξασθένησης οδήγησε τους μηχανικούς να αρχίσουν να διαιρούν τις κινητές περιοχές γεωγραφικά σε **κυψέλες (cells)**, που συχνά αντιπροσωπεύονται ως «εξάγωνα» (για καλό λόγο, πέρα από το πεδίο εφαρμογής μας εδώ). Η ιδέα είναι ότι σε κάθε δεδομένη κυψέλη μπορεί να εκχωρηθεί ένα σύνολο συχνοτήτων που δεν χρησιμοποιούνται από μια κυψέλη δίπλα της. Με αυτόν τον τρόπο, οι κυψέλες που χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι θα είναι αρκετά μακριά η μια από την άλλη ώστε να μην έχει σημασία, επιτρέποντάς μας να είμαστε πιο αποτελεσματικοί με τους διαθέσιμους πόρους.



Εικόνα 1.5 Καθώς τα σήματα διαδίδονται στο χώρο, τα επίπεδα ισχύος τους εξασθενούν. Γύρω από το τηλέφωνο της Άννας, το επίπεδο ισχύος εκπομπής της είναι 100. Μέχρι να φτάσει το σήμα στον Μπεν, είναι 50 και στον Τσάρλι είναι 10.

Μπορείτε να δείτε ένα παράδειγμα διαγράμματος κυψελών στην εικόνα 1.6. Εδώ, σε οποιοδήποτε από τα εξάγωνα με την ίδια απόχρωση θα εκχωρηθούν οι ίδιες συχνότητες, αφού δεν είναι γειτονικά. Ας υποθέσουμε ότι η πιο σκούρα απόχρωση παίρνει τα κανάλια 1–4, η μεσαία απόχρωση παίρνει τα 5–8 και η πιο ανοιχτή απόχρωση παίρνει τα 9–12. Ο Ρομπ βρίσκεται σε μια σκοτεινή κυψέλη και είναι στο κανάλι 2. Κάποιος άλλος στην κυψέλη του μπορεί να έχει 1, 3 ή 4. Δεδομένου ότι η Ραχήλ βρίσκεται σε διαφορετική σκοτεινή κυψέλη, μπορεί επίσης να της ανατεθεί το κανάλι 2, επειδή είναι αρκετά μακριά. Ο Μπεν, σε μια μεσαία κυψέλη, δεν μπορεί να πάρει το κανάλι 2, επειδή είναι πολύ κοντά στις σκοτεινές κυψέλες. Όταν εκχωρούμε χρώματα (συχνότητες) σε κυψέλες, συχνά θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το μικρότερο δυνατό αριθμό χρωμάτων. Η εύρεση κυψελών κελιών στο διάγραμμα γίνεται πολύ μεγάλος.

Λοιπόν, τι υπάρχει σε μια κυψέλη; Υπάρχουν **σταθμοί βάσης (base station)**, ή BS, και **κινητοί σταθμοί (mobile station)** ή MS. Οι BS σε κάθε κελί συνδέονται από τη μία πλευρά με το ενσύρματο κεντρικό δίκτυο και το Διαδίκτυο και από την άλλη με κάθε κινητό σταθμό που τους έχει εκχωρηθεί. Ένας MS θα μπορούσε να είναι ένα κινητό τηλέφωνο, ένα τάμπλετ ή οποιαδήποτε συσκευή που μπορεί να εκπέμπει και να λαμβάνει σύμφωνα με ένα πρότυπο κινητής τηλεφωνίας.



Εικόνα 1.6 Αυτό είναι ένα διάγραμμα ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Κάθε κυψέλη είναι ένα εξάγωνο, με πολλαπλούς κινητούς σταθμούς (MS) και έναν σταθμό βάσης (BS). Δεν υπάρχουν δύο γειτονικές κυψέλες που να έχουν την ίδια σκίαση και επομένως χρησιμοποιήστε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για να αποφύγετε παρεμβολές.

Οι κυψέλες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο σηματοδότησε την αρχή της **τεχνολογίας 1G** στις Ηνωμένες Πολιτείες. Σύμφωνα με αυτό το σύστημα, ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας εκτοξεύτηκε στα ύψη. Μέχρι τη δεκαετία του 1990, υπήρχαν 25 εκατομμύρια συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό σήμαινε επίσης ότι, λόγω του υψηλού ποσοστού χρήσης και της χαμηλής χωρητικότητας, το αναλογικό απλά δεν μπορούσε να ακολουθήσει πια.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΟΧΗ

Με τα αναλογικά δίκτυα για άλλη μια φορά υπερπλήρη, οι Ηνωμένες Πολιτείες και άλλες χώρες άρχισαν να πειραματίζονται με μια εναλλακτική: τα **ψηφιακά (digital)** συστήματα. Ένα αναλογικό σήμα θα «ψηφιοποιηθεί» μετατρέποντάς το σε μια ακολουθία **bit** ή 1 και 0 (βλ. εικόνα 1.7).

Τα ψηφιακά συστήματα μπορούν να προσφέρουν τεράστια πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χωρητικότητα, καθώς επιτρέπουν τη χρήση δύο άλλων τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης που θα συζητήσουμε στη συνέχεια. Πριν από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, τα ηλεκτρονικά μικρής κλίμακας που ήταν απαραί-