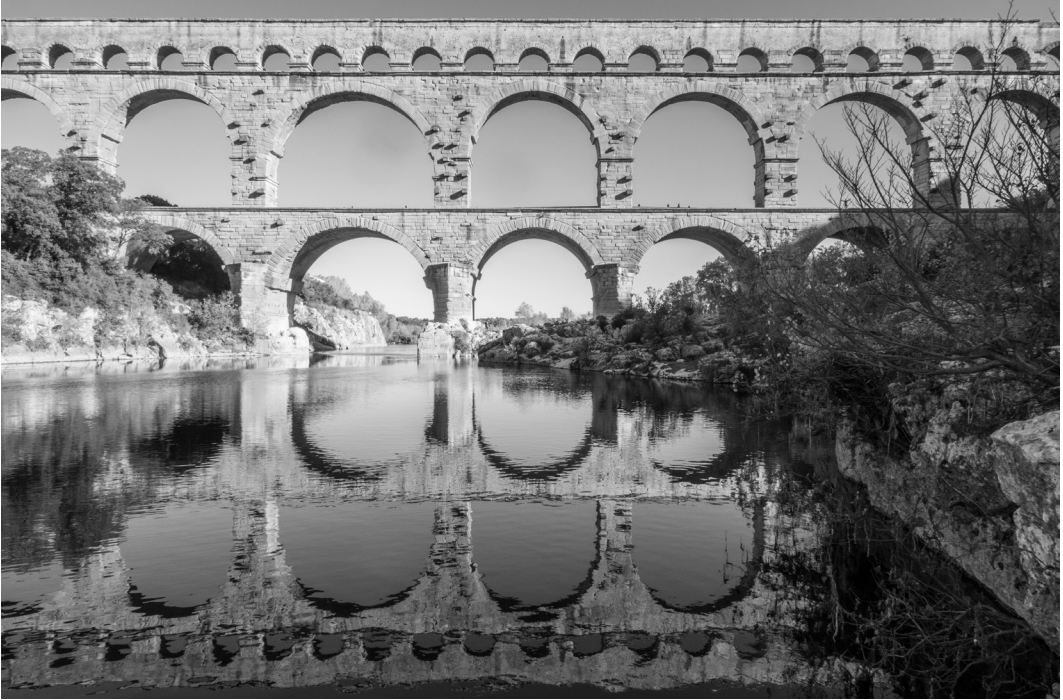


Ασύρματα και Κινητά Δίκτυα



Τα τελευταία 15 χρόνια έχει σημειωθεί μια εντυπωσιακή αύξηση στην ανάπτυξη και χρήση ασύρματων και κινητών δικτύων. Το 2008, ο αριθμός των συνδρομητών σταθερού (ενσύρματου) ευρυζωνικού διαδικτύου ήταν περίπου ο ίδιος με τον αριθμό των συνδρομητών ευρυζωνικού διαδικτύου που συνδέονταν μέσω ασύρματων τεχνολογιών. Αν και από τότε έχει αυξηθεί το μέγεθος και των δύο βάσεων συνδρομητών, σήμερα (το 2025) οι συνδρομητές που συνδέονται ασύρματα στο Διαδίκτυο είναι *πέντε φορές περισσότεροι* απ' αυτούς που συνδέονται ενσύρματα. Εκτιμάται ότι το 2025 ένα 60% της επισκεψιμότητας των ιστοτόπων κατευθύνθηκε σε κινητές αντί σε σταθερές συσκευές [Statista Mobile 2025]. Τα πολλά πλεονεκτήματα της ασύρματης πρόσβασης είναι προφανή σε όλους: πρόσβαση στο παγκόσμιο Διαδίκτυο οπουδήποτε, οποτεδήποτε και χωρίς περιορισμούς, μέσω μιας εξαιρετικά φορητής και ελαφριάς συσκευής. Όλο και περισσότερο, συσκευές όπως κονσόλες παιχνιδιών, οικιακές συσκευές, συστήματα ασφάλειας, ρολόγια, γυαλιά, αυτοκίνητα, φορετά ρούχα και πολλά άλλα συνδέονται ασύρματα στο Διαδίκτυο. Πράγματι, ορισμένοι έχουν υποστηρίξει ότι μία εξαιρετικά σημαντική, τέταρτη βιομηχανική επανάσταση [Schwab 2016] – που καθίσταται δυνατή χάρη στα ασύρματα δίκτυα και τα κυβερνοφυσικά συστήματα που συνδυάζουν τον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο – βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη.

Οι προκλήσεις που θέτει η δικτύωση ασύρματων και κινητών συσκευών είναι τόσο διαφορετικές απ' τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών, που κρίνεται σκόπιμο να αφιερωθεί ένα ξεχωριστό κεφάλαιο στη μελέτη των ασύρματων και κινητών δικτύων (δηλ. το παρόν κεφάλαιο). Σ' αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, θα καλύψουμε τα ασύρματα και

τα κινητά δίκτυα τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά. Στην Ενότητα 7.1, θα ξεκινήσουμε θέτοντας το «γενικό πλαίσιο».

Ως αναγνώστης αυτού του βιβλίου, γνωρίζετε ήδη ότι είμαστε φανατικοί οπαδοί της προσέγγισης από πάνω προς τα κάτω. Ωστόσο, πολλές πτυχές της ασύρματης δικτύωσης προκύπτουν απ' την πολύπλοκη, μεταβαλλόμενη στο χρόνο, περιορισμένης χωρητικότητας και κοινόχρηστη φύση του φυσικού ασύρματου καναλιού, με αποτέλεσμα να απαιτείται η έγκαιρη κατανόηση των ραδιοκαναλιών, προκειμένου να εκτιμηθεί πρακτικά οποιαδήποτε άλλη πτυχή των ασύρματων δικτύων. Έτσι, θα αρχίσουμε τη σε βάθος μελέτη των ασύρματων και κινητών δικτύων από-κάτω-προς-τα-πάνω, μαθαίνοντας πρώτα για τις ιδιότητες των ασύρματων ραδιοκαναλιών στην Ενότητα 7.2. Στην Ενότητα 7.3, θα επικεντρωθούμε κατόπιν στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης πρώτου άλματος. Εδώ, θα μάθουμε τεχνικές για τον διαμοιρασμό του ραδιοκαναλιού, την ανακάλυψη δικτύου και τη σύνδεση συσκευών, τον χρονοπρογραμματισμό μετάδοσης πλαισίων, την εξοικονόμηση ενέργειας κ.ά. Στην Ενότητα 7.4, θα μάθουμε για τον «πυρήνα» του ασύρματου δικτύου που παρέχει υπηρεσίες επιπέδου ελέγχου, όπως διαχείριση ταυτοτήτων και κινητικότητας, καθώς και συνδεσιμότητα επιπέδου δεδομένων με το ευρύτερο Διαδίκτυο. Στις Ενότητες 7.2–7.4, θα αρχίσουμε με την αναγνώριση και τη μελέτη των θεμελιωδών αρχών που είναι ανεξάρτητες από οποιαδήποτε συγκεκριμένη τεχνολογία δικτύωσης και, στη συνέχεια, θα επεξηγήσουμε αυτές τις αρχές στην πράξη στο πλαίσιο των δικτύων WiFi και κινητής τηλεφωνίας. Ο στόχος μας εδώ είναι να διαχωρίσουμε το «γιατί» και το «πώς» απ' το «τι». Υπάρχουν πολλά βιβλία και άλλα έγγραφα που περιγράφουν «τι» γίνεται σε μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ασύρματου δικτύου. Πράγματι, υπάρχουν (αρκετά ανιαρά) πρότυπα, πολλά απ' τα οποία έχουν χιλιάδες σελίδες, που περιγράφουν με μεγάλη λεπτομέρεια το «τι». Οι Ενότητες 7.2–7.4 στοχεύουν να παρέχουν τις βάσεις για την κατανόηση του «γιατί» – γιατί μία αρχιτεκτονική είναι δομημένη με έναν συγκεκριμένο τρόπο ή γιατί ένα πρωτόκολλο ακολουθεί μία συγκεκριμένη προσέγγιση για την εκτέλεση μιας εργασίας. Αυτή η βαθύτερη κατανόηση θα διαρκέσει πολύ περισσότερο απ' τη διάρκεια ζωής οποιασδήποτε συγκεκριμένης ασύρματης τεχνολογίας, βοηθώντας σας να διασφαλίσετε μακροπρόθεσμα τις γνώσεις σας σε σχέση με τα ασύρματα και τα κινητά δίκτυα!

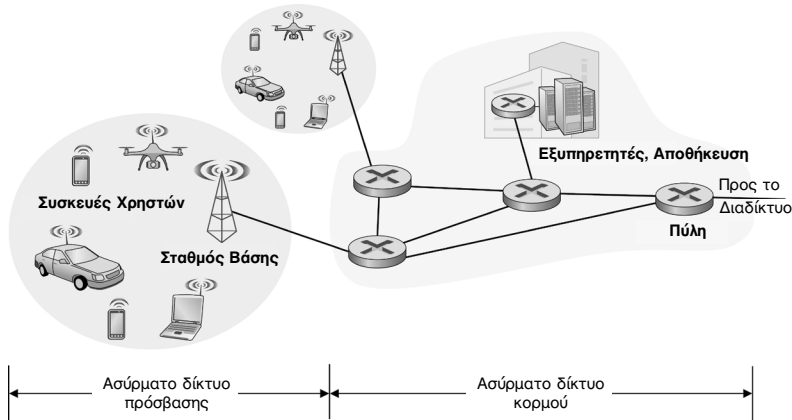
Η κινητικότητα των συσκευών είναι ένα τόσο μοναδικό χαρακτηριστικό των ασύρματων δικτύων, που θα αφιερώσουμε μία ολόκληρη ενότητα (Ενότητα 7.5) σ' αυτό το σημαντικό θέμα. Αν και σε αυτό το κεφάλαιο εστιάζουμε κυρίως στα δίκτυα 5G και WiFi, υπάρχουν και άλλες ευρέως διαδεδομένες αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων. Στην Ενότητα 7.6, θα καλύψουμε εν συντομία τα ασύρματα δίκτυα Bluetooth, τα δορυφορικά δίκτυα και τα ασύρματα δίκτυα IoT (Διαδίκτυο των Πραγμάτων). Η Ενότητα 7.7 ολοκληρώνει αυτό το κεφάλαιο. Θα μεταθέσουμε τη συζήτηση για την ασφάλεια στα ασύρματα δίκτυα στο επόμενο κεφάλαιο.

7.1 Εισαγωγή

Η Εικόνα 7.1 αποτυπώνει το πλαίσιο της συζήτησής μας για τα ασύρματα και τα κινητά δίκτυα. Θα ξεκινήσουμε με μία γενική συζήτηση που θα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των κυψελοειδών δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G, των τοπικών δικτύων WiFi (WLAN) και των κατ' απαίτηση δικτύων, όπως τα δίκτυα Bluetooth και IoT.

Σ' ένα ασύρματο δίκτυο μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα βασικά κοινά στοιχεία:

- **Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης.** Στο ανώτατο επίπεδο, ένα ασύρματο δίκτυο διαθέτει ένα ή περισσότερα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης (ή προσπέλασης). Το **δίκτυο ασύρματης πρόσβασης** (wireless access network) βρίσκεται στην εξωτερική «περιφέρεια» του συνολικού δικτύου, συνδέοντας συσκευές σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο μέσω ενός ασύρματου ραδιοκαναλιού. Ένα δίκτυο πρόσβασης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τύπος τοπικού δικτύου, όπως μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 6: έχει περιορισμένο γεωγραφικό εύρος, βρίσκεται υπό τον έλεγχο ενός μοναδικού παρόχου υπηρεσιών και παρέχει



Εικόνα 7.1 Στοιχεία ενός ασύρματου δικτύου

κυρίως μία υπηρεσία επιπέδου ζεύξης. Στα (κυψελοειδή) δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης είναι γνωστό ως **Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης** (Radio Access Network – RAN). Στα δίκτυα WiFi, το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης συχνά αποκαλείται **Ασύρματο Δίκτυο Τοπικής Περιοχής** (Wireless Local Area Network – WLAN).

- **Ασύρματο δίκτυο κορμού.** Το **ασύρματο δίκτυο κορμού** (wireless core network) αποτελείται από διακομιστές, μονάδες αποθήκευσης, δρομολογητές και (συνήθως ενσύρματες) ζεύξεις που βρίσκονται μεταξύ των συσκευών στο δίκτυο πρόσβασης ενός παρόχου και του εξωτερικού δικτύου. Το δίκτυο κορμού μπορεί να είναι γεωγραφικά κατακεκομμένο, π.χ. με ορισμένα τμήματα να βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία με την υποδομή του δικτύου πρόσβασης και άλλα να βρίσκονται σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων. Το δίκτυο κορμού υλοποιεί υπηρεσίες ελέγχου και διαχείρισης ανώτερου επιπέδου (π.χ. για τη διαχείριση της ταυτότητας χρηστών και συσκευών, της κινητικότητας και της ασφάλειας πρόσβασης), καθώς και υπηρεσίες επιπέδου δεδομένων που προωθούν δεδομενογράμματα από συσκευές στο δίκτυο πρόσβασης στο ευρύτερο Διαδίκτυο και **αντίστροφα**. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, υπάρχει ένα καλά καθορισμένο δίκτυο κορμού, το οποίο διαχειρίζεται ο πάροχος του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Θα μελετήσουμε τα δίκτυα κορμού 4G/5G στην Ενότητα 7.4. Σε αντίθεση με τα δίκτυα 4G/5G, δεν υπάρχει αντίστοιχο ασύρματο δίκτυο κορμού για το WiFi. Αντ' αυτού, μια επιχείρηση χρησιμοποιεί για τα WLAN την ίδια υποδομή που χρησιμοποιεί για τα ενσύρματα LAN της. Υπ' αυτήν την έννοια, μια επιχείρηση θεωρεί το WiFi ως μια ακόμη τεχνολογία επιπέδου ζεύξης στο εταιρικό της δίκτυο.
- **Ασύρματες συσκευές.** Μία ασύρματη συσκευή μπορεί να είναι ένα έξυπνο κινητό (smartphone), μία ταμπλέτα (tablet) ή φορητός υπολογιστής (laptop) ή μία συσκευή IoT όπως ένας αισθητήρας ή μία οικιακή συσκευή. Όπως και στην περίπτωση των ενσύρματων δικτύων, αυτές οι συσκευές φιλοξενούν και εκτελούν εφαρμογές. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1, οι ασύρματες συσκευές συνδέονται σε ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Σημειώνουμε ότι οι ασύρματες συσκευές μπορεί να είναι ή να μην είναι κινητές – ένα θέμα στο οποίο θα επανέλθουμε στην Ενότητα 7.5.
- **Σταθμός βάσης.** Ο **σταθμός βάσης** (base station) είναι αναμφισβήτητο το πιο σημαντικό και το πιο μοναδικό μέρος ενός ασύρματου δικτύου, καθώς δεν έχει αντίστοιχο στοιχείο σε ένα ενσύρματο δίκτυο. Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την αποστολή και τη λήψη πακέτων προς και από τις ασύρματες συσκευές των χρηστών που είναι συνδεδεμένες μ' αυτόν τον σταθμό βάσης. Δηλαδή, όλες οι ασύρματες συσκευές που στέλνουν

πακέτα στο Διαδίκτυο και λαμβάνουν πακέτα από το Διαδίκτυο το κάνουν μέσω ενός σταθμού βάσης. Ένας σταθμός βάσης είναι τυπικά υπεύθυνος για πολλαπλές συνδεδεμένες ασύρματες συσκευές. Όταν λέμε ότι μια ασύρματη συσκευή είναι «συνδεδεμένη» με έναν σταθμό βάσης, εννοούμε ότι: (1) η συσκευή βρίσκεται εντός της απόστασης ασύρματης επικοινωνίας του σταθμού βάσης και (2) η συσκευή και ο σταθμός βάσης έχουν εκτελέσει ένα πρωτόκολλο που έχει ως αποτέλεσμα ο σταθμός βάσης να λειτουργεί ως αναμεταδότης πακέτων μεταξύ της συσκευής και του ευρύτερου Διαδικτύου. Η μετάδοση πλαισίων απ' τον σταθμό βάσης στις συνδεδεμένες συσκευές συχνά λέγεται ότι πραγματοποιείται στο **συρρευματικό κανάλι** (downstream channel) ή **κανάλι κατερχόμενης ζεύξης** (downlink channel), ενώ η μετάδοση πλαισίων απ' τις συνδεδεμένες συσκευές στον σταθμό βάσης πραγματοποιείται στο **αντιρρευματικό κανάλι** (upstream channel) ή **κανάλι ανερχόμενης ζεύξης** (uplink channel).

- Στα δίκτυα 5G, ο σταθμός βάσης είναι γνωστός ως **gNodeB**, και σε συντομογραφία **gNB**, που σημαίνει «Next Generation Node B» (Κόμβος Β Επόμενης Γενιάς) στα πρότυπα 5G. Στα δίκτυα 4G, ο σταθμός βάσης αναφέρεται ως **eNodeB**, που σημαίνει «evolved Node B» (εξελιγμένος Κόμβος Β), και σε συντομογραφία **eNB**. Αυτά είναι πιθανώς τα λιγότερο διαισθητικά, τα λιγότερο αυτονόητα και τα πιο ακατανόητα ακρωνύμια στο σύνολο της δικτύωσης! Ως εκ τούτου, και προτιμώντας πάντα να χρησιμοποιούμε περιγραφική γλώσσα αντί για ορολογία, θα αναφερόμαστε στους σταθμούς βάσης των δικτύων 4G και 5G απλά ως «σταθμούς βάσης». Ωστόσο, εάν θελήσετε να εμβαθύνετε στα τεχνικά πρότυπα, λάβετε υπόψη ότι οι όροι “eNB” και “gNB” αποτελούν ορολογία του 3GPP (3rd Generation Partnership Project – Εταιρισμικό Έργο 3^{ης} Γενιάς) για τον «σταθμό βάσης» σε ένα δίκτυο 4G ή 5G, αντιστοίχως. Στα δίκτυα WiFi, ένας σταθμός βάσης αναφέρεται ως **Σημείο Πρόσβασης** (Access Point – AP). Δεδομένου ότι αυτή η ορολογία είναι πιο περιγραφική και χρησιμοποιείται συχνά, θα αναφερόμαστε επίσης περιστασιακά στους σταθμούς βάσης WiFi ως AP.

Οι συσκευές που συνδέονται με έναν σταθμό βάσης συχνά λέγεται ότι ενεργούν σε **λειτουργία υποδομής** (infrastructure mode), καθώς οι παραδοσιακές δικτυακές υπηρεσίες (π.χ. εκχώρηση διευθύνσεων, ταυτότητα και δικαιώματα πρόσβασης, δρομολόγηση) παρέχονται απ' την υποδομή δικτύου, με την οποία συνδέεται μία συσκευή μέσω του σταθμού βάσης. Στα **κατ' απαίτηση ή ειδικά δίκτυα** (ad hoc networks), δεν υπάρχει τέτοια υποδομή για να συνδεθούν οι ασύρματες συσκευές. Ελλείψει τέτοιας υποδομής, οι ίδιες οι συσκευές πρέπει να αυτοοργανώνονται και να παρέχουν υπηρεσίες όπως δρομολόγηση, εκχώρηση διευθύνσεων, μετάφραση ονομάτων τύπου DNS κ.λπ. Τα δίκτυα WiFi μπορούν να χρησιμοποιούν είτε λειτουργία υποδομής είτε λειτουργία κατ' απαίτηση, αλλά σε αυτό το κεφάλαιο θα υποθέσουμε ότι τα δίκτυα WiFi διαθέτουν σταθμό βάσης, δηλαδή ενεργούν με λειτουργία υποδομής. Τα δίκτυα Bluetooth, τα οποία θα μελετήσουμε στην Ενότητα 7.6, είναι ένα παράδειγμα αμιγώς κατ' απαίτηση δικτύων. Το [Mohapatra 2004] παρέχει μία λεπτομερή μελέτη των κατ' απαίτηση δικτύων.

Όταν μία κινητή συσκευή μετακινείται εκτός εμβέλειας ενός σταθμού βάσης και εισέρχεται στην εμβέλεια ενός άλλου, αλλάζει το σημείο σύνδεσής της με το ευρύτερο δίκτυο, δηλαδή αλλάζει τον σταθμό βάσης με τον οποίο συνδέεται – μία διαδικασία που αποκαλείται **μεταπομπή ή αλλαγή κυψέλης** (handoff ή handover). Αυτή η κινητικότητα δημιουργεί πολλά δύσκολα ερωτήματα. Εάν μία ασύρματη συσκευή μπορεί να μετακινηθεί, πώς μπορεί να εντοπιστεί η τρέχουσα θέση της κινητής συσκευής μέσα στο δίκτυο, ώστε τα δεδομένα να μπορούν να προωθηθούν σε εκείνη την κινητή συσκευή; Πώς πραγματοποιείται η διευθυνσιοδότηση, δεδομένου ότι μία συσκευή μπορεί να βρίσκεται σε μία από πολλές πιθανές τοποθεσίες; Εάν η συσκευή μετακινείται κατά τη διάρκεια μίας σύνδεσης TCP ή μίας κλήσης φωνής/βίντεο, πώς προωθούνται τα δεδομενογράμματα, ώστε η σύνδεση να συνεχίζεται χωρίς διακοπή; Θα εξετάσουμε την απάντηση σε αυτά και σε πολλά άλλα ερωτήματα σχετικά με την κινητικότητα στην Ενότητα 7.5.

Ας εμβαθύνουμε τώρα στη μελέτη των ασύρματων δικτύων από κάτω προς τα πάνω, αρχίζοντας από την περιφέρεια του δικτύου, με μία μελέτη των ασύρματων ραδιοκαναλιών.

7.2 Το Φυσικό Επίπεδο στα Ασύρματα Δίκτυα

Ίσως έχετε παρατηρήσει ότι η μελέτη μας για τα δίκτυα μέχρι στιγμής έχει αναφερθεί ελάχιστα στο φυσικό επίπεδο. Υπάρχει ένα όριο στην ποσότητα υλικού που μπορεί να καλύψει ένα μόνο βιβλίο και η γνώση μερικών απλών χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου, όπως ο ρυθμός μετάδοσης bit, ο ρυθμός σφαλμάτων bit και η καθυστέρηση διάδοσης, ήταν αρκετή για την κατανόηση του υλικού που μελετήσαμε στα Κεφάλαια 2 έως 6. Αλλά αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων! Έτσι, σ' αυτήν την ενότητα και στην επόμενη, θα εμβαθύνουμε στις λεπτομέρειες του φυσικού επιπέδου του ασύρματου δικτύου. Θα υιοθετήσουμε μία προσέγγιση πιο κοντά στην επιστήμη των υπολογιστών παρά στην παραδοσιακή προσέγγιση της ηλεκτρολογίας όσον αφορά το ασύρματο κανάλι, προσφέροντας μία πιο διαισθητική περιγραφή του φυσικού επιπέδου αντί για μία ακριβέστερη μαθηματική περιγραφή.

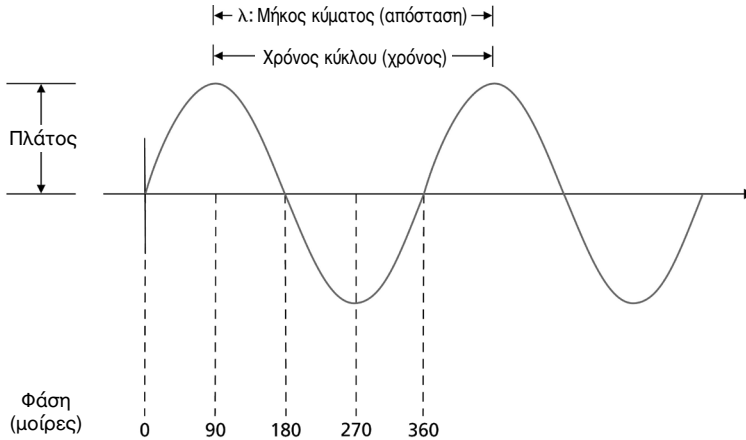
7.2.1 Χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών

Στο πιο βασικό επίπεδο, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε μία κεραία σε κάποια τοποθεσία (τον πομπό) δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά (ραδιο-) κύματα που διαδίδονται στον χώρο και δημιουργούν ρεύμα σε κεραίες λήψης σε άλλες τοποθεσίες. Ο πομπός (ή μεταδότης) κωδικοποιεί τις πληροφορίες στο ηλεκτρομαγνητικό σήμα αλλάζοντας (ή αλλιώς «διαμορφώνοντας») τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Δεδομένης της κωδικοποίησης των πληροφοριών στο ηλεκτρομαγνητικό σήμα, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε μερικά απ' αυτά τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Ραδιοκύματα: Πλάτος, Συχνότητα και Φάση

Η Εικόνα 7.2 δείχνει τη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος — ένα σχήμα που ίσως θυμάστε από ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **πλάτος** : το ύψος ενός κύματος σε ένα συγκεκριμένο σημείο στον χώρο και τον χρόνο·
- **μήκος κύματος** (λ) : η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του κύματος·
- **χρόνος κύκλου** : ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών κύματος·
- **συχνότητα** : $1 / \text{χρόνο κύκλου}$, μετρούμενη σε Hertz (Hz). Ένα κύμα ενός megahertz (MHz), παραδείγματος χάριν, έχει 1×10^6 κύκλους ανά δευτερόλεπτο·
- **φάση** : το τμήμα ενός κύκλου που διανύεται μέχρι τη χρονική στιγμή t . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.2, η φάση μετριέται από ένα σημείο αναφοράς στο χρόνο, συνήθως ένα σημείο όπου το πλάτος του κύματος είναι μηδέν και αυξάνεται. Η φάση εκφράζεται επίσης τυπικά σε μονάδες γωνίας, δηλαδή από 0° έως 360° . Έτσι, όταν η φάση ισούται με το 75% ενός κύκλου, αυτό αντιστοιχεί σε φάση 270° .



Εικόνα 7.2 Ηλεκτρομαγνητικό κύμα: πλάτος, μήκος κύματος και φάση

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν κατεύθυνση και διαδίδονται με ταχύτητα περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός, 3×10^8 m/sec.

Ραδιομετάδοση: Ισχύς, Εύρος Ζώνης

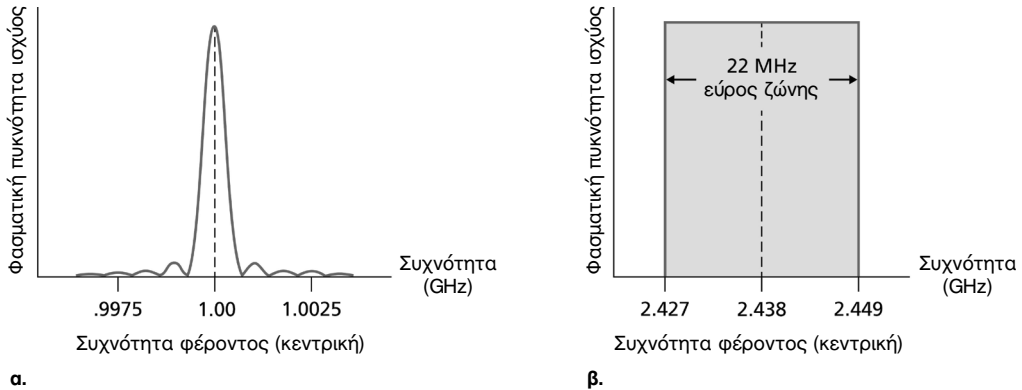
Άτυπα, απ’ την καθημερινή μας εμπειρία γνωρίζουμε ότι τα ραδιοσήματα μπορεί να είναι ισχυρά ή αδύναμα και ότι μπορεί να είναι καθαρά ή γεμάτα παράσιτα («θόρυβο»). Ας τυποποιήσουμε τώρα αυτές τις έννοιες.

Η **ισχύς** (power) είναι η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μεταδίδει ένας πομπός στα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Μπορούμε άτυπα να θεωρήσουμε την ισχύ ως τη δύναμη του σήματος. Η ισχύς μετριέται σε μονάδες watt, κατά κανόνα σε milliwatt (mW) στα ασύρματα δίκτυα. Οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί μερικές φορές προτιμούν να μετρούν την ισχύ σε decibel milliwatt (“dBm”), που είναι ο λογάριθμος του λόγου της ισχύος του σήματος (μετρούμενης σε mW) προς ένα mW. Εδώ όμως θα χρησιμοποιήσουμε την πιο συνηθισμένη γραμμική μέτρηση σε mW.

Το εξιδανικευμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα της Εικόνας 7.2 έχει μόνο μία συχνότητα. Δηλαδή, όλη η ακτινοβολούμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε μία συγκεκριμένη συχνότητα. Στην πράξη, η ισχύς ενός πομπού κατανέμεται σε περισσότερες από μία συχνότητες. Η συνάρτηση **φασματικής πυκνότητας ισχύος** (power spectral density), που φαίνεται στην Εικόνα 7.3(α), χαρακτηρίζει την ποσότητα ισχύος που υπάρχει στο σήμα του πομπού ως συνάρτηση της συχνότητας. Μία συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ισχύος συνήθως είναι κεντρισμένη γύρω απ’ τη λεγόμενη **συχνότητα φορέα** (carrier frequency), όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.3(α). Η συχνότητα φορέα στο παράδειγμα της Εικόνας 7.3(α) είναι 1 GHz.

Με βάση την έννοια της φασματικής πυκνότητας ισχύος, μπορούμε πλέον να ορίσουμε με ακρίβεια την έννοια του **εύρους ζώνης** (bandwidth) ενός ραδιοσήματος – μία βασική έννοια του φυσικού επιπέδου στα ασύρματα δίκτυα. Το εύρος ζώνης ενός ραδιοσήματος, όπως υποδηλώνει το όνομά του, είναι το πλάτος (μετρούμενο σε Hz) του εύρους συχνοτήτων που καταλαμβάνει το σήμα. Το σήμα της Εικόνας 7.3(β) έχει εύρος ζώνης 22 MHz, με την ισχύ του να κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ 2,427 και 2,429 GHz. Στην Ενότητα 7.6 θα δούμε ότι αυτό το συγκεκριμένο «κανάλι» εύρους 22 MHz – δηλαδή, ένα ραδιοκανάλι με εύρος ζώνης 22 MHz – αντιστοιχεί στο κανάλι 6 σε ένα δίκτυο WiFi.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτή η ακριβής έννοια του «εύρους ζώνης» του σήματος στο ασύρματο φυσικό επίπεδο – το πλάτος της ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει

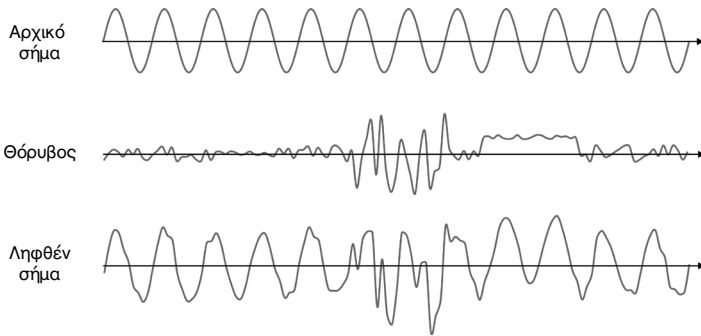


Εικόνα 7.3 (α) Φασματική πυκνότητα ισχύος σήματος, (β) εύρος ζώνης σήματος (εξειδανικευμένο)

ένα ραδιοσήμα— διαφέρει πολύ απ’ την μάλλον άτυπη χρήση του όρου «εύρος ζώνης» σε άλλους τομείς των δικτύων, όπου αναφέρεται στον ρυθμό μετάδοσης bit ή τη χωρητικότητα μίας ζεύξης. Οι φοιτητές συχνά μπερδεύονται μ’ αυτό, πράγμα κατανοητό. Κατ’ αρχάς, σημειώστε ότι το εύρος ζώνης του ραδιοσήματος μετράται σε Hertz, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης μίας ζεύξης μετράται σε bit ανά δευτερόλεπτο (bps). Όπως θα δούμε, το εύρος ζώνης ενός ραδιοκαναλιού (σε Hertz) σχετίζεται με την ταχύτητα με την οποία μπορούν να μεταδοθούν τα bit μέσω μίας ραδιοζεύξης (σε bits/sec). Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός, με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν τα bit. Για παράδειγμα, ένα κανάλι WiFi 802.11n εύρους 20 MHz (Ενότητα 7.3.2) υποστηρίζει μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης 72,2 Mbps, ενώ ένα κανάλι WiFi 802.11n εύρους 40 MHz έχει μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης 150 Mbps [Intel 2024]. Όπως θα δούμε, όμως, η σχέση μεταξύ του εύρους ζώνης του ραδιοκαναλιού (μετρούμενου σε Hertz) και του εύρους ζώνης μετάδοσης της ζεύξης (μετρούμενος σε bits/sec) είναι μάλλον περίπλοκη. Σ’ αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιούμε προσεκτικά τον όρο «εύρος ζώνης» για να υποδηλώσουμε το εύρος της ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει ένα ραδιοσήμα.

Γνωρίζουμε απ’ την καθημερινή μας εμπειρία (π.χ. από την ακρόαση AM, FM ή δορυφορικού ραδιοφώνου) ότι τα ραδιοσήματα μπορεί μερικές φορές να είναι καθαρά και άλλες φορές να είναι γεμάτα θόρυβο. Το επάνω μέρος της Εικόνας 7.4 δείχνει το αρχικό «καθαρό» σήμα απ’ την Εικόνα 7.2, με ένα πρόσθετο σήμα θορύβου που προστέθηκε μεταξύ πομπού και δέκτη (το μεσαίο τμήμα της Εικόνας 7.4) και το ληφθέν σήμα (το κάτω μέρος της Εικόνας 7.4). Κοιτώντας το κεντρικό τμήμα του ληφθέντος θορυβώδους σήματος, μπορείτε ίσως να εκτιμήσετε τη δυσκολία εξαγωγής του αρχικού μεταδοθέντος σήματος απ’ το ληφθέν θορυβώδες σήμα. Μπορεί να υπάρχουν πολλές πηγές θορύβου:

- **Παρεμβαλλόμενοι πομποί.** Ορισμένες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων προορίζονται για «μη αδειοδοτημένη» χρήση, πράγμα που σημαίνει ότι πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές συσκευές μπορούν να μεταδίδουν ραδιοκύματα σ’ αυτήν τη ζώνη, υποκειμένες σε περιορισμούς ισχύος. Μία απ’ αυτές είναι η ζώνη 2,4–2,5 GHz, όπου μπορούν να μεταδίδουν σήματα συσκευές παρακολούθησης μωρών, μηχανισμοί ανοίγματος γκαραζόπορτας και πολλές άλλες οικιακές συσκευές. Ακόμα πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι πολλά δίκτυα — για παράδειγμα, δίκτυα WiFi, Bluetooth και Zigbee (IEEE 802.15.4) — χρησιμοποιούν τη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων 2,4–2,5 GHz και το κάνουν με ασυντόνιστο τρόπο. Φυσικά, δεν υπάρχει πρόβλημα όταν το δικό σας δίκτυο WiFi χρησιμοποιεί αυτή τη ζώνη, αλλά τα κοντινά δίκτυα που ανήκουν σε άλλους φαίνονται σαν θόρυβος στο δίκτυό σας! Όπως λέει μία ρήση, «η μετάδοση του δικτύου ενός ατόμου είναι θόρυβος για κάποιο άλλο άτομο».



Εικόνα 7.4 Αρχικό σήμα, θόρυβος και ληφθέν θορυβώδες σήμα

- Πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι φούρνοι μικροκυμάτων, ιδίως τα παλαιότερα μοντέλα με λιγότερη μόνωση, μπορεί να εκπέμπουν ραδιοκύματα.
- Θερμικός και ηλεκτρονικός θόρυβος. Οι φυσικές θερμικές διακυμάνσεις και οι ατέλειες στα ηλεκτρονικά συστήματα ενός πομπού ή δέκτη μπορούν να προσθέσουν θόρυβο στο σήμα.

Ραδιοκανάλι: Θόρυβος, Λόγος Σήματος-Προς-Θόρυβο (SNR) και Χωρητικότητα

Ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου είναι γνωστός ως **λόγος σήματος-προς-θόρυβο** (signal-to-noise ratio – SNR). Ο SNR μετριέται συνήθως σε ντεσιμπέλ (decibel, dB):

$$\text{SNR (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{ισχύς λαμβανόμενου σήματος}}{\text{ισχύς θορύβου}} \right)$$

Σημειώστε ότι μία τιμή SNR 0 σημαίνει ότι υπάρχει ίση ποσότητα σήματος και θορύβου. Για δίκτυα WiFi, η ελάχιστη αποδεκτή τιμή SNR σε ένα λαμβανόμενο σήμα είναι περίπου 20 dB [Meraki 2023]. Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή για LTE κυμαίνεται από -5 έως 18 dB, ανάλογα με την τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται· δείτε την Ενότητα 7.2.2 [Rohde και Schwarz 2013].

Έχοντας ορίσει τις έννοιες της ισχύος, του εύρους ζώνης και του θορύβου, είμαστε πλέον έτοιμοι να διατυπώσουμε ένα απ' τα πιο σημαντικά αποτελέσματα της θεωρίας της επικοινωνίας, το θεώρημα χωρητικότητας του Shannon. Το θεώρημα του Shannon συσχετίζει τη **χωρητικότητα του καναλιού επικοινωνίας**, C – τον μέγιστο δυνατό ρυθμό με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα (μετρούμενο σε bits/sec), χωρίς σφάλματα, μέσω του καναλιού – με το εύρος ζώνης του καναλιού (B) και τις ισχύες του λαμβανόμενου σήματος και του θορύβου (και τις δύο μετρούμενες γραμμικά, π.χ. σε mW):

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\text{ισχύς λαμβανόμενου σήματος}}{\text{ισχύς θορύβου}} \right)$$

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το θεώρημα χωρητικότητας του Shannon καθορίζει ένα άνω όριο για τη χωρητικότητα του καναλιού. Σύμφωνα με αυτό, ανεξάρτητα απ' το πόσο έξυπνα κωδικοποιούνται και διαμορφώνονται τα δεδομένα στο ασύρματο σήμα, η ποσότητα των λαμβανόμενων δεδομένων θα είναι μικρότερη ή ίση της C , για δεδομένο εύρος ζώνης καναλιού και δεδομένο SNR. Υπάρχουν επίσης αρκετές σημαντικές πρακτικές συνέπειες του θεωρήματος χωρητικότητας του Shannon:

- Για δεδομένο SNR, η μέγιστη χωρητικότητα καναλιού αυξάνεται γραμμικά με το εύρος ζώνης του καναλιού. Μεγαλύτερο εύρος ζώνης καναλιού σημαίνει δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων bit ανά δευτερόλεπτο.

- Στην περίπτωση υψηλού SNR, δεν υπάρχει ιδιαίτερο όφελος απ' την καταβολή περισσότερων προσπαθειών για αύξηση του SNR, καθώς η μέγιστη χωρητικότητα θα αυξάνεται μόνο λογαριθμικά, δηλαδή με υπογραμμικό ρυθμό με αυξανόμενο SNR.

Ιδιότητες ραδιοκαναλιού: απώλεια διαδρομής, πολλαπλές διαδρομές και κρυμμένα τερματικά

Ένα ραδιοσήμα μπορεί να υποστεί σημαντικές αλλαγές καθώς μεταδίδεται απ' τον πομπό στον δέκτη. Κυρίως, ένα κύμα χάνει την ισχύ του καθώς διαδίδεται. Αυτή η αποδυναμωση ενός ραδιοσήματος καθώς διαδίδεται ονομάζεται **απώλεια διαδρομής** (path loss) ή **εξασθένιση** (attenuation). Σε περίπτωση ανεμπόδιστης οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, η αναλογία της μεταδιδόμενης ισχύος προς τη λαμβανόμενη ισχύ μειώνεται σύμφωνα με ένα νόμο αντίστροφου τετραγώνου:

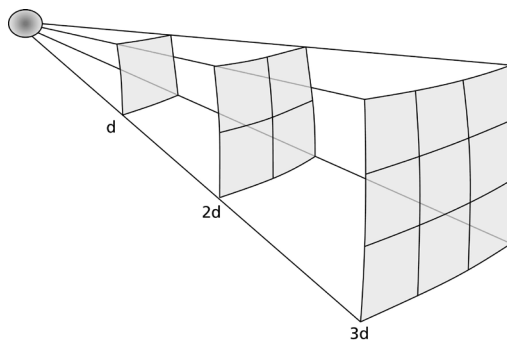
$$\frac{P_{received}}{P_{transmitted}} \sim \frac{1}{(fd)^2}$$

όπου $P_{transmitted}$ και $P_{received}$ είναι η μεταδιδόμενη και η λαμβανόμενη ισχύς, αντιστοίχως, f είναι η συχνότητα ενός σήματος και d είναι η απόσταση ανάμεσα σε πομπό και δέκτη.

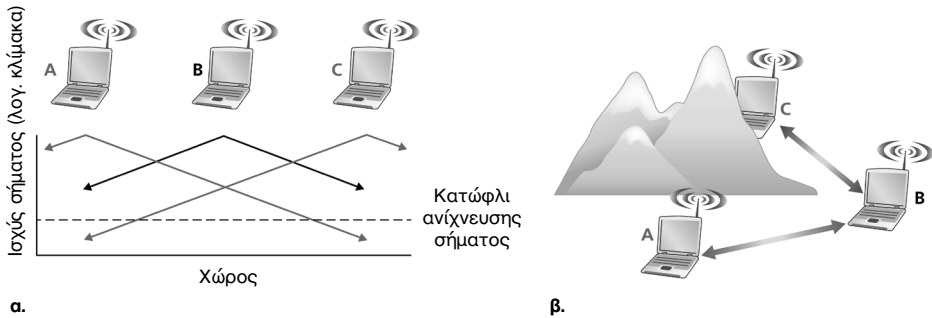
Η διαίσθηση πίσω απ' αυτήν την τετραγωνική απώλεια διαδρομής απεικονίζεται στην Εικόνα 7.5. Δεδομένου ότι η επιφάνεια μίας σφαίρας αυξάνεται αναλογικά με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ του κέντρου και της επιφάνειας της σφαίρας, η ενέργεια που διέρχεται από μία μονάδα επιφάνειας σε απόσταση d από τον αποστολέα είναι ίδια σε ποσότητα με την ενέργεια που διέρχεται από επιφάνεια τέσσερις φορές μεγαλύτερη σε απόσταση $2d$ και από επιφάνεια εννέα φορές μεγαλύτερη σε απόσταση $3d$. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής 2 αφορά στην αποκαλούμενη απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου στον αέρα. Ένας εκθέτης απώλειας διαδρομής περίπου 3 είναι συνηθισμένος σε εξωτερικό αστικό περιβάλλον, ενώ ένας εκθέτης απώλειας διαδρομής 4 ή υψηλότερος σε εσωτερικό αστικό περιβάλλον, καθιστώντας την απώλεια διαδρομής ένα ακόμη πιο σημαντικό ζήτημα.

Η τετραγωνική απώλεια διαδρομής συναρτήσκει τόσο της απόστασης όσο και της συχνότητας έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ραδιοεπικοινωνίες: ραδιοκύματα χαμηλής συχνότητας (π.χ. kHz) τείνουν να χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ραδιοεπικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων και χαμηλού ρυθμού δεδομένων, όπως η ραδιοναυτιλία, ενώ ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας (π.χ. GHz) τείνουν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές σχετικά μικρότερης απόστασης, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και WiFi.

Η εκθετική μείωση της λαμβανόμενης ισχύος με την απόσταση δημιουργεί το πρόβλημα του **κρυμμένου τερματικού** (hidden terminal), ένα φαινόμενο που θα καθορίσει τον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ασύρματης πολλαπλής προσπέλασης επιπέδου ζεύξης, όπως το πρώτο-



Εικόνα 7.5 Η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη



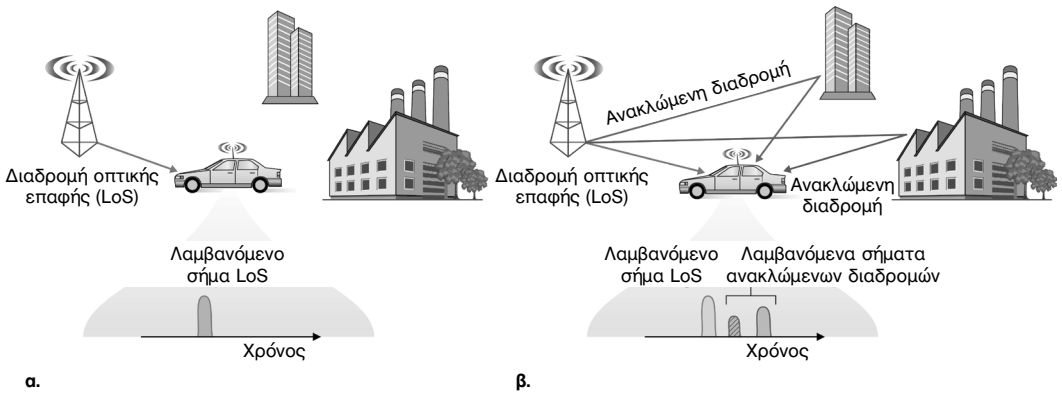
Εικόνα 7.6 Κρυμμένα τερματικά: Τα A και B μπορούν να ακούσουν το ένα το άλλο, τα B και C μπορούν να ακούσουν το ένα το άλλο, αλλά τα A και C δεν μπορούν να ακούσουν το ένα το άλλο.

κολλο CSMA/CA του WiFi (Ενότητα 7.3.1). Η Εικόνα 7.6(α) παρουσιάζει την περίπτωση όπου οι κόμβοι A και B μπορούν να «ακούσουν» ο ένας τον άλλον, δηλαδή τα επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος των σημάτων τους είναι πάνω από ένα κατώφλι ανίχνευσης. Ομοίως, οι κόμβοι B και C μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλον. Ωστόσο, λόγω της απώλειας διαδρομής, οι κόμβοι A και C δεν μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλον, επειδή τα επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος τους έχουν πέσει κάτω απ’ το κατώφλι ανίχνευσης. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι A και C είναι «κρυμμένοι» από αλλήλους. Μπορεί κάποιος ήδη να εκτιμήσει τον αντίκτυπο που θα έχουν τα κρυμμένα τερματικά στα ασύρματα πρωτόκολλα CSMA: εάν οι κόμβοι A και C θέλουν να μεταδώσουν στο B, μπορεί να ακούνε το κανάλι, να μην ακούνε αλλήλους να μεταδίδουν (λόγω απώλειας διαδρομής) και, ωστόσο, οι μεταδόσεις τους προς το B να αλληλοεπικαλύπτονται στον B. Η Εικόνα 7.6(β) απεικονίζει ένα άλλο σενάριο κρυμμένων τερματικών, όπου τα σήματα του A και του C είναι φυσικά αποκλεισμένα το ένα απ’ το άλλο. Ωστόσο, και σ’ αυτήν την περίπτωση, οι μεταδόσεις τους αλληλοεπικαλύπτονται στον B. Είναι σαφές ότι η επικοινωνία μέσω ασύρματου καναλιού θα είναι πιο περίπλοκη απ’ την επικοινωνία μέσω ενσύρματου καναλιού!

Ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου ορίζει επίσης ότι η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται εκθετικά όχι μόνο με την απόσταση, αλλά και με τη συχνότητα. Αυτή η εκθετική μείωση με τη συχνότητα έχει επίσης πολύ σημαντικές συνέπειες στα ασύρματα δίκτυα. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι η μετάβαση από ένα κανάλι σταθερού εύρους ζώνης στα 5 GHz σε ένα παρόμοιο κανάλι στα 50 GHz θα έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη 100 φορές μικρότερης ισχύος στα 50 GHz! Ως εκ τούτου, τα κανάλια σε υψηλότερες συχνότητες τείνουν να χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων.

Η Εικόνα 7.7 παρουσιάζει ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της ασύρματης επικοινωνίας: τα σήματα **πολλαπλών διαδρομών** (multipath signals). Σ’ αυτήν την εικόνα, μέρος του ραδιοσήματος που μεταδίδεται από έναν αποστολέα ακολουθεί μία ευθεία **οπτική διαδρομή** (line-of sight – LoS) προς τον δέκτη, που απεικονίζεται εννοιολογικά ως ένας λαμβανόμενος πράσινος παλμός στην Εικόνα 7.7(α). Ωστόσο, το μεταδιδόμενο σήμα ανακλάται επίσης από αντικείμενα (π.χ. κτήρια) στο περιβάλλον και φτάνει στον δέκτη σε ελαφρώς μεταγενέστερη χρονική στιγμή, καθώς οι ανακλώμενοι παλμοί έχουν διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις απ’ τον πομπό μέχρι τον δέκτη. Αυτά τα σήματα που λαμβάνονται μέσω πολλαπλών διαδρομών εμφανίζονται ως κόκκινοι και μοβ παλμοί στην Εικόνα 7.7(β). Εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών, η λήψη ενός σήματος που μεταδόθηκε σε μία δεδομένη χρονική στιγμή απ’ τον αποστολέα κατανέμεται χρονικά στον δέκτη. Είναι προφανές ότι οι πολλαπλές διαδρομές περιπλέκουν το έργο του δέκτη να ανακατασκευάσει το αρχικά μεταδοθέν σήμα.

Οι πολλαπλές διαδρομές θέτουν επίσης περιορισμούς στον μέγιστο ρυθμό με τον οποίο ένας πομπός μπορεί να αλλάξει το μεταδιδόμενο σήμα του και, κατά συνέπεια, περιο-

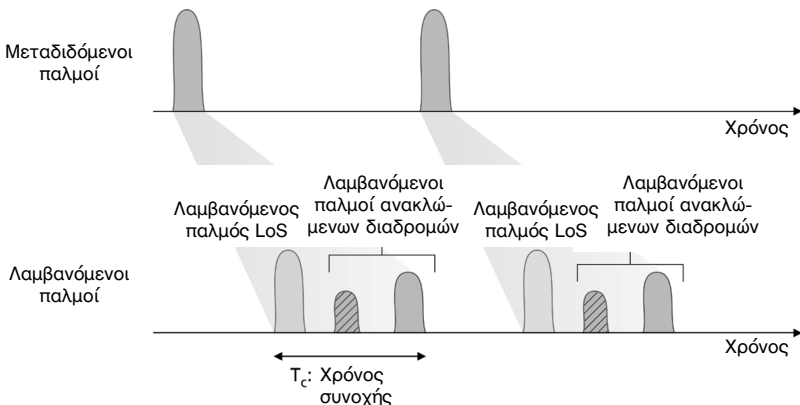


Εικόνα 7.7 (α) Σήμα οπτικής επαφής (LoS), (β) λήψη LoS και ανακλώμενων σημάτων

ρίζουν τον ρυθμό με τον οποίο ένας πομπός μπορεί να μεταδίδει bitH Εικόνα 7.8 δείχνει δύο παλμούς που μεταδίδονται απ’ τον αποστολέα. Ο πομπός πρέπει να διαχωρίζει τις μεταδόσεις του σήματος/παλμού επαρκώς μεταξύ τους χρονικά, έτσι ώστε το σήμα LoS (ο πράσινοι παλμοί στην Εικόνα 7.8) και όλες οι πολλαπλές ανακλάσεις του (οι κόκκινοι και μοβ παλμοί) να λαμβάνονται στον δέκτη πριν απ’ τη λήψη του επόμενου σήματος/παλμού LoS. Εάν δεν γίνει αυτό, οι δύο παλμοί και οι ανακλάσεις τους θα αναμειχθούν χρονικά στον δέκτη. Αυτός ο καθοριζόμενος απ’ τον δέκτη ελάχιστος χρόνος που απαιτείται μεταξύ αλλαγών στο σήμα του πομπού αναφέρεται ως **χρόνος συνοχής** (coherence time) του δέκτη.

Κεραίες: MIMO

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους σταθμούς βάσης και συσκευές ασύρματων κυψελοειδών και WiFi δικτύων δεν μοιάζουν καθόλου με τις κεραίες των παμπουδών σας (ή ακόμα και των γονιών σας)! Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, τα ασύρματα δίκτυα άρχισαν να μεταβαίνουν από συστήματα με μία μοναδική κεραία στον πομπό και μία μοναδική κεραία στον δέκτη, σε **κεραίες πολλαπλής-εισόδου και πολλαπλής-εξόδου** (multiple-input multiple-output – MIMO) που χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Όπως θα δούμε, αυτές οι καινοτόμες τεχνολογίες MIMO έχουν επιτρέψει στα ραδιοδίκτυα να αυξήσουν σημαντικά τη ρυθμαπόδοση

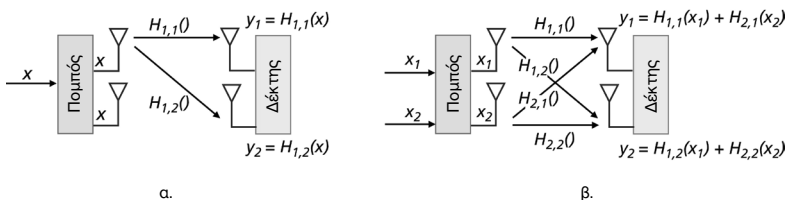


Εικόνα 7.8 Οι ανακλάσεις πολλαπλών διαδρομών καθορίζουν τον χρόνο συνοχής

ή **διεκπεραιωτικότητα** (throughput) των ζεύξεων (τον αριθμό των bit ανά δευτερόλεπτο που λαμβάνονται με επιτυχία) μεταξύ πομπού και δέκτη. Ένα άμεσο πλεονέκτημα της ύπαρξης πολλαπλών κεραιών στον δέκτη είναι προφανές: N κεραιές δέκτη σημαίνουν (σε πρώτη προσέγγιση) ότι το συνολικό λαμβανόμενο σήμα έχει N φορές μεγαλύτερη ισχύ. Ωστόσο, τα συστήματα MIMO προσφέρουν πολύ περισσότερα απ' αυτό!

Το σύστημα MIMO εξασφαλίζει τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τα συστήματα μονής κεραιάς, αξιοποιώντας τις πολλαπλές διαδρομές μεταξύ των κεραιών αποστολής και λήψης με έναν από δύο θεμελιωδώς διαφορετικούς τρόπους:

- **Χωρική ποικιλομορφία MIMO.** Οι τεχνικές χωρικής ποικιλομορφίας MIMO στέλνουν πλεονάζουσες ροές πληροφοριών από έναν πομπό σε έναν δέκτη, εκμεταλλευόμενες το γεγονός ότι τα ραδιοσήματα που ταξιδεύουν σε διαφορετικές φυσικές διαδρομές μεταξύ μίας ή περισσότερων κεραιών μετάδοσης προς μία ή περισσότερες κεραιές λήψης θα υποστούν διάφορες αλλοιώσεις (π.χ. φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών). Αυτή η τεχνική είναι απαραίτητη για την καταπολέμηση των αρνητικών επιπτώσεων της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών, όπου οι ανακλάσεις του σήματος από κτήρια, δέντρα και άλλα εμπόδια προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος. Λαμβάνοντας πολλαπλά αντίγραφα του σήματος μέσω διαφορετικών διαδρομών, τα συστήματα MIMO μπορούν να συνδυάζουν αυτά τα σήματα με τρόπο που μεγιστοποιεί την ισχύ του σήματος και ελαχιστοποιεί τα ποσοστά σφάλματος. Παρόλο που οι κεραιές μπορεί να απέχουν μεταξύ τους μόνο λίγα εκατοστά (π.χ. σ' ένα κινητό τηλέφωνο), τα σήματα που λαμβάνονται σε διαφορετικές διαδρομές μπορεί πράγματι να αντιμετωπίζουν αρκετά διαφορετικές συνθήκες καναλιού.
- Η Εικόνα 7.9(α) δείχνει την περίπτωση μίας μονής κεραιάς μετάδοσης και δύο κεραιών λήψης. Η χωρική ποικιλομορφία μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί με πολλαπλές κεραιές μετάδοσης, αλλά εδώ θα επικεντρωθούμε στην απλούστερη περίπτωση. Για μία ευανάγνωστη εισαγωγή στην πιο γενική περίπτωση, δείτε το [Halperin 2010].
- Ας υποθέσουμε ότι ο πομπός στέλνει ένα αρχικό σήμα, x . Η άνω κεραιά λαμβάνει ένα σήμα $y_1 = H_{1,1}(x)$, όπου η συνάρτηση $H_{1,1}(\cdot)$ αντιπροσωπεύει το πώς έχει αλλάξει το μεταδιδόμενο σήμα (π.χ. σε πλάτος και φάση) μεταξύ της μονής κεραιάς του πομπού και της άνω κεραιάς του δέκτη. Ομοίως, η κάτω κεραιά λαμβάνει ένα διαφορετικό σήμα $y_2 = H_{1,2}(x)$. Τι πρέπει να κάνει όμως ο δέκτης με αυτά τα δύο διαφορετικά σήματα που λαμβάνει; Εδώ είναι που μπαίνουν στο παιχνίδι οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος φυσικού επιπέδου. Η απλή «πρόσθεση» των σημάτων μεταξύ τους, θα αναπαρήγαγε ουσιαστικά τα αποτελέσματα της μετάδοσης πολλαπλών διαδρομών από μία κεραιά. Αντ' αυτού, θα μπορούσε κάποιος να επιλέξει το σήμα y με τον μεγαλύτερο SNR. Ή θα μπορούσε κάποιος να επιλέξει πρώτα να συγχρονίσει τις φάσεις των λαμβανόμενων σημάτων (οι οποίες ενδέχεται να έχουν μεταταθεί ως αποτέλεσμα της μετάδοσης) και στη συνέχεια να προσθέσει συνεκτικά τα σήματα μεταξύ τους, ίσως σταθμίζοντας τις συνεισφορές των δύο σημάτων με βάση τους λόγους SNR τους. Αυτές δεν είναι παρά δύο μόνο απ' τις πολλές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση του αρχικού σήματος από πολλαπλά λαμβανόμενα σήματα [Goldsmith 2005, Tse 2005].



Εικόνα 7.9 Απλό MIMO (α) χωρική ποικιλομορφία, (β) χωρική πολύπλεξη

- **Χωρική πολύπλεξη MIMO.** Στην περίπτωση της χωρικής πολύπλεξης MIMO, πολλές διαφορετικές ροές πληροφοριών αποστέλλονται παράλληλα κατά μήκος διαφορετικών διαδρομών απ' τις κεραιές του πομπού στις κεραιές του δέκτη. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 7.9(β), που δείχνει ένα παράδειγμα, στο οποίο δύο διαφορετικές ροές πληροφοριών, οι x_1 και x_2 μεταδίδονται από δύο διαφορετικές κεραιές πομπού. Στον δέκτη, κάθε κεραιά λαμβάνει ένα σήμα που περιέχει και τις δύο ροές πληροφοριών, με κάθε συνιστώσα ροή να έχει υποστεί διαφορετικές αλλοιώσεις. Για παράδειγμα, το λαμβανόμενο σήμα στην άνω κεραιά λήψης αντιπροσωπεύεται απ' τη σχέση $y_1 = H_{1,1}(x_1) + H_{2,1}(x_2)$, όπου το άθροισμα υποδηλώνει ότι τα σήματα συνδυάζονται στον αέρα, ότι το αρχικό σήμα x_1 έχει μετασχηματιστεί σύμφωνα με την $H_{1,1}()$ κατά τη διαδρομή του προς την άνω κεραιά λήψης και ότι το x_2 έχει μετασχηματιστεί απ' την $H_{2,1}()$ κατά τη διαδρομή του προς την άνω κεραιά. Το σήμα που λαμβάνεται στην κάτω κεραιά, y_2 , έχει ανάλογη ερμηνεία.
- Ο ρόλος του δέκτη είναι να προσδιορίσει τα αρχικά σήματα x_1, x_2 , με βάση τα ληφθέντα σήματα, y_1, y_2 . Φυσικά, οι συναρτήσεις $H_{1,1}()$ και $H_{2,1}()$ είναι άγνωστες στην πράξη, αλλά μπορούν να υπολογιστούν, εάν ο αποστολέας και ο δέκτης συνεργαστούν. Αυτό, σε συνδυασμό με την παρατήρηση ότι η Εικόνα 7.9(β) έχει δύο εξισώσεις (μία για το y_1 και μία για το y_2) με δύο αγνώστους (x_1 και x_2), υποδεικνύει τον τύπο των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στον δέκτη για τον υπολογισμό των αρχικών σημάτων, x_1 και x_2 . Στην πράξη, ο αποστολέας μπορεί επίσης να εκτελέσει κωδικοποίηση και διαμόρφωση, βοηθώντας τον δέκτη να βελτιώσει τις εκτιμήσεις του για τα x_1 και x_2 .

Η θεωρία και η πρακτική των τεχνικών επεξεργασίας σημάτων MIMO υπερβαίνουν κατά πολύ το πλαίσιο που μπορούμε να καλύψουμε εδώ. Ο ταπεινός μας στόχος εδώ ήταν να παρουσιάσουμε την χωρική ποικιλομορφία και την χωρική πολύπλεξη και να δώσουμε μία γεύση των τύπων επεξεργασίας σημάτων που αποτελούν τη βάση των συστημάτων MIMO. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα [Goldsmith 2005, Tze 2005, Halperin 2010] για λεπτομερέστερες αναλύσεις.

Σχηματοποίηση δέσμης και κατευθυντικές κεραιές

Η **σχηματοποίηση δέσμης** (beam forming) αναφέρεται στην κατεύθυνση του μεταδιδόμενου σήματος προς έναν συγκεκριμένο χρήστη ή περιοχή αντί της εκπομπής του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Η σχηματοποίηση δέσμης με κατευθυντικές κεραιές ενισχύει την ισχύ του σήματος στον δέκτη, μειώνει τις παρεμβολές και βελτιώνει τη συνολική απόδοση της ασύρματης επικοινωνίας.

Η σχηματοποίηση δέσμης υλοποιείται συνήθως με τη χρήση μίας συστοιχίας κεραιών. Ρυθμίζοντας τη φάση και το πλάτος του σήματος σε κάθε κεραιά μετάδοσης, το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει εποικοδομητική παρεμβολή στην επιθυμητή κατεύθυνση και καταστροφική παρεμβολή σε άλλες κατευθύνσεις, σχηματίζοντας μία «δέσμη» ραδιοκυμάτων. Η σχηματοποίηση δέσμης μπορεί να είναι δυναμική, με το σύστημα να ρυθμίζει διαρκώς την κατεύθυνση της δέσμης με βάση την τοποθεσία του χρήστη. Αυτό εξασφαλίζει βέλτιστη ποιότητα σήματος ακόμη και όταν οι χρήστες κινούνται. Η σχηματοποίηση δέσμης έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. **Αυξημένη ισχύ σήματος:** Εστιάζοντας το σήμα σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, η σχηματοποίηση δέσμης αυξάνει την ισχύ του σήματος που λαμβάνει ο επιθυμητός χρήστης, με αποτέλεσμα υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και πιο αξιόπιστες συνδέσεις.
2. **Μειωμένες παρεμβολές:** Η σχηματοποίηση δέσμης μειώνει τις παρεμβολές με άλλους χρήστες, ελαχιστοποιώντας τη διαρροή σήματος σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη απόδοση σε πυκνά περιβάλλοντα με πολλές συσκευές.

- 3. Βελτιωμένη κάλυψη:** Οι κατευθυντικές δέσμες μπορούν να επεκτείνουν την περιοχή κάλυψης των ασύρματων δικτύων, παρέχοντας καλύτερη συνδεσιμότητα στις παρυφές της ζώνης κάλυψης.
- 4. Βελτιωμένη χωρητικότητα:** Καθιστώντας εφικτή την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, η σχηματοποίηση δέσμης μπορεί να αυξήσει τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα περισσότερους χρήστες.

Η σχηματοποίηση δέσμης χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα WiFi, σύγχρονα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και δορυφορικές επικοινωνίες.

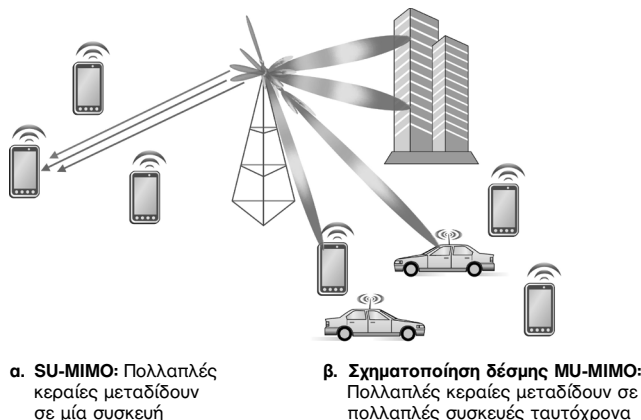
MIMO Πολλαπλών Χρηστών (MU-MIMO)

Η παραπάνω συζήτησή μας για το MIMO έχει επικεντρωθεί σιωπηρά μέχρι τώρα στο **MIMO μονού χρήστη** (Single-user MIMO – SU-MIMO) – τη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό ή/και στον δρομολογητή για τη μετάδοση σε μία μοναδική συσκευή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10(α). Στην πράξη, ο αριθμός των κεραιών σε τέτοια συστήματα είναι μικρός, π.χ. 2 έως 4 κεραιές σε έναν σταθμό βάσης WiFi.

Στα κυψελοειδή δίκτυα, οι τεχνικές MIMO χρησιμοποιούνται επίσης για την αποστολή δεδομένων από έναν αποστολέα σε πολλούς παραλήπτες ταυτόχρονα. Αυτό είναι γνωστό ως **MIMO Πολλαπλών Χρηστών** (Multi-user MIMO – MU-MIMO) ή, μερικές φορές, ως **Μαζικό MIMO** (Massive MIMO). Το MU-MIMO χρησιμοποιεί διαφορετικά υποσύνολα των κεραιών του για να μεταδίδει ταυτόχρονα σε πολλές διαφορετικές συσκευές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10(β). Κάθε υποσύνολο κεραιών χρησιμοποιεί, με τη σειρά του, χωρική ποικιλομορφία MIMO για να μεταδώσει πολλαπλά σήματα με τις ίδιες πληροφορίες σε μία συσκευή. Επιπλέον, το MU-MIMO συχνά χρησιμοποιεί σχηματοποίηση δεσμών, όπως περιγράφηκε παραπάνω και φαίνεται στην Εικόνα 7.10(β). Μία σύγχρονη κεραιά MU-MIMO για έναν σταθμό βάσης 5G μπορεί να περιέχει μία συστοιχία από έως και 64 στοιχεία πομπού σχηματοποίησης δεσμών και έναν ίσο ή παρόμοιο αριθμό στοιχείων κεραιάς λήψης [Ericsson 2024, Samsung 2021].

Ραδιοφάσμα

Το ραδιοφάσμα είναι το εύρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 3 Hz έως 3 THz. Το ραδιοφάσμα θεωρείται εθνικό αγαθό και, ως εκ τούτου, η χρήση του ρυθμίζεται από κάθε χώρα, με κάποιο βαθμό συντονισμού (αλλά χωρίς κανονιστική ρύθμιση) από έναν οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών που ονομάζεται Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU). Συνήθως, μια χώρα εκχωρεί συγκεκριμένα εύρη συχνοτήτων του ραδιοφάσματος



α. SU-MIMO: Πολλαπλές κεραιές μεταδίδουν σε μία συσκευή

β. Σχηματοποίηση δέσμης MU-MIMO: Πολλαπλές κεραιές μεταδίδουν σε πολλαπλές συσκευές ταυτόχρονα

Εικόνα 7.10 Σχηματοποίηση δεσμών σε MU-MIMO

για συγκεκριμένες χρήσεις. Ένα δημοφιλές γραφικό πόστερ («δημοφιλές» τουλάχιστον μεταξύ των ραδιοερασιτεχνών!) [NPIA 2016] δείχνει την κατανομή του ραδιοφάσματος των ΗΠΑ για χρήσεις που περιλαμβάνουν τη ναυτική και αεροναυτική ραδιοναυτιλία, τις επίγειες εκπομπές AM, FM και τηλεόρασης, τις δορυφορικές εκπομπές, τον ραδιοεντοπισμό (π.χ. GPS), την ερασιτεχνική ραδιοφωνία, τη ραδιοαστρονομία, τα μετεωρολογικά ραντάρ, τις ασύρματες συσκευές καταναλωτών και, φυσικά, τα ασύρματα δίκτυα που καλύπτονται στις Ενότητες 7.3 έως 7.6.

Υπάρχουν δύο ευρείες κατηγορίες τύπων χρήσης του φάσματος:

- **Αδειοδοτημένο (licensed) φάσμα.** Όπως υποδηλώνει το όνομα, για τη λειτουργία ενός πομπού σε αδειοδοτημένη ζώνη φάσματος απαιτείται η απόκτηση άδειας που εκδίδεται απ' την κυβέρνηση. Αυτό περιλαμβάνει τις ζώνες φάσματος που χρησιμοποιούνται απ' τους εμπορικούς παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας (δείτε τον Πίνακα 7.1).
- Σε πολλές χώρες, το φάσμα εκχωρείται σε εμπορικούς παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέσω δημοπρασιών φάσματος, οι οποίες έχουν αποφέρει δεκάδες έως εκατοντάδες δισεκατομμύρια δολάρια από τέλη αδειοδότησης στην Ινδία, το Ηνωμένο Βασίλειο και τις ΗΠΑ. Μία συνέπεια της εμπορικής αγοράς ακριβών δικαιωμάτων χρήσης φάσματος (καθώς και του κόστους των πύργων και της πρόσβασης σε γη που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας) είναι ότι οι εμπορικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας (σε αντίθεση με τους παρόχους WiFi) πρέπει να τιμολογούν τις υπηρεσίες τους, έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν όλα αυτά τα κόστη και να αποκομίσουν κέρδος. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας και του κόστους του αδειοδοτημένου φάσματος, αναπτύσσονται νέες μέθοδοι κοινής χρήσης φάσματος, ώστε να επιτρέπεται σε μη εξουσιοδοτημένες συσκευές (δηλ.

Πίνακας 7.1 Οι πιο συνηθισμένες ζώνες φάσματος που χρησιμοποιούνται από τα ασύρματα δίκτυα στις ΗΠΑ (μη περιοριστικός κατάλογος· οι συχνότητες εκτός των ΗΠΑ διαφέρουν ελαφρώς)

Ζώνη φάσματος (ανεπίσημη ονομασία)	Τύπος Δικτύου	Αδειοδοτημένο (L) Μη αδειοδοτημένο (U)	Σχόλια
2,4 GHz (2,40 – 2,49 GHz)	WiFi, Bluetooth, Zigbee	U	WiFi: 802.11 b/g/n/ax. Δείτε Ενότητα 7.3.2. Bluetooth: Δείτε Ενότητα 7.6.1.
5 GHz (5,17 – 5,83 GHz)	WiFi	U	802.11 a/h/n/ac/ax. Δείτε Ενότητα 7.3.2.
6 GHz (5,9 – 7,12 GHz)	WiFi	U	802.11 ax/be. Δείτε Ενότητα 7.3.2.
< 1 GHz (διάφορες κυψελοειδείς «χαμηλές» συχνότητες)	κυψελοειδείς	L	2G/3G/4G/5G. Δείτε Ενότητα 7.2.2. Οι χαμηλές συχνότητες καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις (δεκάδες χιλιόμετρα), αλλά με χαμηλότερες ταχύτητες (50 – 250 Mbps).
1,8 GHz, 3,3 – 3,8 GHz, 6 GHz (διάφορες κυψελοειδείς «μεσαίες» συχνότητες)	κυψελοειδείς	L	2G/3G/4G/5G. Δείτε Ενότητα 7.3.3. Οι μεσαίες συχνότητες είναι η «ιδανική ζώνη», συμβιβάζοντας αποστάσεις (5 μίλια) και ταχύτητες μετάδοσης (100 – 900 Mbps).
3,5 GHz Citizens Broadband Radio Service (CBRS)	κυψελοειδείς	L/U	Το CBRS (Υπηρεσία Ευρζωνικής Ραδιοεπικοινωνίας Πολιτών) είναι γνωστό και ως «ιδιωτικό 5G».
26 GHz, 40 GHz, 50 GHz, 66 GHz (διάφορες κυψελοειδείς «υψηλές» συχνότητες)	κυψελοειδείς	L	5G. Δείτε Ενότητα 7.3.2. Οι υψηλές συχνότητες, γνωστές και ως συχνότητες «κυμάτων χιλιοστού», καλύπτουν μικρές αποστάσεις (< 1,6 χλμ.), αλλά με υψηλές ταχύτητες (< 3 Gbps).
915 MHz (902 – 928 MHz)	LoRa (IoT)	U	Δείτε Ενότητα 7.6.3

συσκευές που δεν συνδέονται με τον κάτοχο της άδειας χρήσης φάσματος) να χρησιμοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα των εξουσιοδοτημένων συσκευών σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες και όρους. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, η ζώνη CBRS 3,5 GHz (δείτε τον Πίνακα 7.1) επιτρέπει σε σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας (μη εξουσιοδοτημένους) να μεταδίδουν εάν δεν υπάρχουν ναυτικά ραντάρ (εξουσιοδοτημένα) στο φάσμα. Εξετάζονται πολλές προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένων των γνωστικών συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας που ανιχνεύουν δυναμικά και χρησιμοποιούν φάσμα που δεν χρησιμοποιείται εκείνη τη στιγμή. Δείτε το [Parvini 2023] για μία πρόσφατη έρευνα.

- *Μη αδειοδοτημένο (unlicensed) φάσμα.* Τμήματα του φάσματος είναι επίσης διαθέσιμα για μη αδειοδοτημένη χρήση. Αυτό σημαίνει ότι οργανισμοί και άτομα μπορούν να αγοράζουν και να χρησιμοποιούν συσκευές (π.χ. μηχανισμούς ανοίγματος γκαραζόπορτας, συσκευές παρακολούθησης μωρών, φούρνους μικροκυμάτων και πολλά άλλα) και ασύρματα δίκτυα (κυρίως δίκτυα WiFi) που λειτουργούν στο μη αδειοδοτημένο φάσμα, χωρίς να απαιτείται άδεια. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές πρέπει να συμμορφώνονται με κανόνες χρήσης, π.χ. περιορίζοντας το επίπεδο ισχύος μετάδοσης. Επίσης, δεδομένου ότι πολλές μη συντονισμένες συσκευές μπορούν να μεταδίδουν σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, ενδέχεται να προκαλούν παρεμβολές η μία στην άλλη. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε ότι τα ασύρματα δίκτυα που λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο φάσμα υιοθετούν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για την αποφυγή, τον μετριασμό και την αντιμετώπιση αυτών των παρεμβολών.

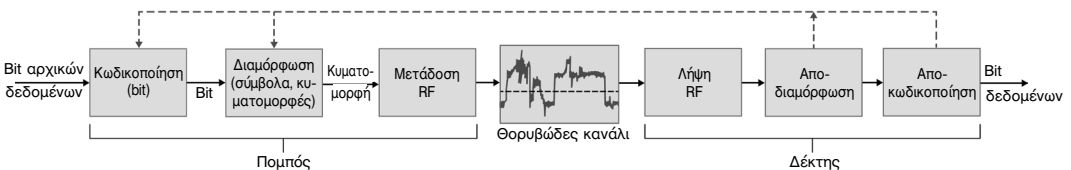
Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει έναν μη περιοριστικό κατάλογο των πιο συνηθισμένων ζωνών φάσματος που χρησιμοποιούνται από ασύρματα δίκτυα.

Σε αυτήν την ενότητα, έχουμε ήδη καλύψει πολλά θέματα σχετικά με τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, που όλα θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τα ανώτερα επίπεδα των ασύρματων δικτύων. Ωστόσο, πριν φύγουμε απ’ το φυσικό επίπεδο, πρέπει να καλύψουμε μία ακόμη βασική έννοια του φυσικού επιπέδου: πώς τα bit απ’ το επίπεδο ζεύξης μετατρέπονται σε σύμβολα και πώς τα σύμβολα μετατρέπονται στη συνέχεια σε μεταδιδόμενες κυματομορφές.

7.2.2 Κωδικοποίηση και διαμόρφωση: από bit σε σύμβολα σε κυματομορφές

Στην υποενότητα αυτή, θα κινηθούμε «προς τα επάνω» στη στοιβιά (παραμένοντας στο φυσικό επίπεδο) και θα συζητήσουμε πώς ένας ασύρματος πομπός ομαδοποιεί τα bit που πρόκειται να μεταδοθούν σε «σύμβολα», τα οποία στη συνέχεια κωδικοποιούνται σε κυματομορφές που μεταδίδονται μέσω του ασύρματου καναλιού. Στον δέκτη, τα σύμβολα εξάγονται απ’ τη λαμβανόμενη κυματομορφή και μεταφράζονται ξανά σε bit.

Η Εικόνα 7.11 παρουσιάζει τα κυριότερα βήματα της μετάδοσης και της λήψης στο φυσικό επίπεδο. Τα bit δεδομένων παραδίδονται στο φασματικό επίπεδο στον πομπό απ’ το υπερκείμενο επίπεδο ζεύξης. Αυτά τα bit μετατρέπονται στη συνέχεια σε ηλεκτρομαγνητικές κυματομορφές, οι οποίες διαδίδονται μέσω του καναλιού στον δέκτη, όπου μετατρέ-



Σημείωση: RF = radio frequencies (ραδιοσυχνότητες)

Εικόνα 7.11 Κυριότερα βήματα μετάδοσης και λήψης στο φυσικό επίπεδο

πονται ξανά σε bit, που στη συνέχεια διαβιβάζονται απ' το φυσικό επίπεδο στο επίπεδο ζεύξης. Στην ιδανική περίπτωση, αυτά τα bit διέρχονται επίσης απ' αυτήν τη σωλήνωση επεξεργασίας και μετάδοσης όσο το δυνατόν ταχύτερα.

Κωδικοποίηση φυσικού επιπέδου

Στο πρώτο βήμα («κωδικοποίηση») τα bit των αρχικών δεδομένων απ' το επίπεδο ζεύξης ενδέχεται να επεκταθούν, π.χ. στην απλούστερη περίπτωση, πλεονάζοντα αντίγραφα των αρχικών bit μπορούν να προστεθούν στο αρχικό σύνολο bit για λόγους προστασίας έναντι της αλλοίωσης ορισμένων εκ των μεταδιδόμενων bit λόγω θορύβου του καναλιού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα bit που προστίθενται εδώ στο φυσικό επίπεδο είναι επιπρόσθετα των bit ελέγχου αθροίσματος ή CRC που έχουν προστεθεί στο επίπεδο ζεύξης και τα οποία μελετήσαμε στο Κεφάλαιο 6. Εάν ένα πλαίσιο επιπέδου ζεύξης περιέχει bit ελέγχου αθροίσματος ή CRC, αυτά τα bit αντιμετωπίζονται στο φυσικό επίπεδο ακριβώς όπως και οποιαδήποτε άλλα bit στο πλαίσιο επιπέδου ζεύξης και, συνεπώς, μπορούν και αυτά να προστατευτούν από τα πρόσθετα bit φυσικού επιπέδου!

Τα μεταδιδόμενα bit μπορούν επίσης να αναδιαταχθούν, π.χ. με τη διασπορά των πλεονάζοντων bit μεταξύ των μεταδιδόμενων bit, έτσι ώστε μία ριπή θορύβου να μην επηρεάζει όλα τα αντίγραφα ενός bit. Ο δέκτης αντιστρέφει στη συνέχεια τα βήματα κωδικοποίησης προκειμένου να ανακτήσει την αρχική ροή bit. Για παράδειγμα, οκτώ bit αρχικών δεδομένων

$$d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6 d_7 d_8$$

μπορούν να επεκταθούν (με το d_i' να συμβολίζει ένα αντίγραφο του i -οστού bit) σε 16 bit:

$$d_1 d_1' d_2 d_2' d_3 d_3' d_4 d_4' d_5 d_5' d_6 d_6' d_7 d_7' d_8 d_8'$$

και στη συνέχεια να ανακατευτούν με αποτέλεσμα:

$$d_1 d_5' d_2 d_6' d_3 d_7' d_4 d_8' d_5 d_1' d_6 d_2' d_7 d_3' d_8 d_4'$$

Εάν, για παράδειγμα, τρία bit στη σειρά υποβληθούν σε μία ριπή παρεμβολών κατά τη μετάδοση (με το x να συμβολίζει ένα bit που ο δέκτης δεν είναι σε θέση να εξαγάγει από το ληφθέν σήμα):

$$d_1 d_5' d_2 d_6' d_3 d_7' x x x d_1' d_6 d_2' d_7 d_3' d_8 d_4'$$

τότε, αφού ο δέκτης αποκαταστήσει τη σειρά των ληφθέντων bit για να πάρει:

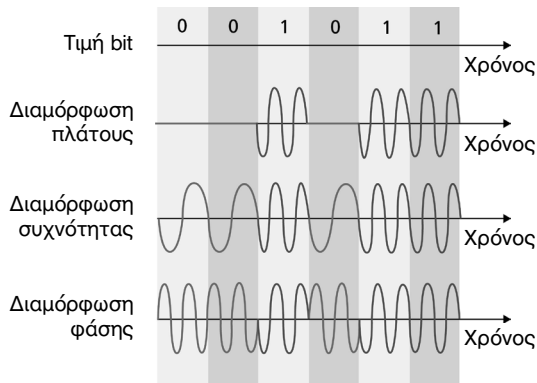
$$d_1 d_1' d_2 d_2' d_3 d_3' x d_4' x d_5' d_6 d_6' d_7 d_7' d_8 x$$

υπάρχουν ακόμα αρκετά ληφθέντα bit, ώστε ο δέκτης να ανακτήσει τα οκτώ bit των αρχικών δεδομένων, ακόμη και στην περίπτωση μίας ριπής σφαλμάτων. Υπάρχουν πολύ πιο εξελιγμένες τεχνικές κωδικοποίησης που προσφέρουν πιο αποδοτικές τεχνικές απ' τον απλό κώδικα πλεονασμού που περιγράφεται παραπάνω, και μάλιστα διδάσκονται ολόκληρα μαθήματα σχετικά μ' αυτό το θέμα (δείτε το [Goldsmith 2005]).

Τέλος, σημειώνουμε ότι τα διακεκομμένα βέλη στο επάνω μέρος της Εικόνα 7.11 απ' τον δέκτη προς τον πομπό αντιπροσωπεύουν την ανατροφοδότηση του δέκτη που χρησιμοποιείται απ' τον πομπό για να επιλέξει την τεχνική διαμόρφωσης που ταιριάζει καλύτερα στις τρέχουσες (αλλά μεταβαλλόμενες) συνθήκες του ασύρματου καναλιού — ένα θέμα που θα εξετάσουμε σύντομα στο τέλος αυτής της ενότητας.

Διαμόρφωση: πλάτος, συχνότητα και φάση

Η **διαμόρφωση** (modulation) βρίσκεται στον πυρήνα του φυσικού επιπέδου του ασύρματου πομπού. Η διαμόρφωση λαμβάνει κωδικοποιημένα bit απ' τη μονάδα κωδικοποίησης που φαίνεται στην Εικόνα 7.11 και δημιουργεί κυματομορφές που κωδικοποιούν αυτά τα bit



Εικόνα 7.12 Διαμόρφωση πλάτους, συχνότητας και φάσης

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.12, υπάρχουν τρεις συνήθεις μέθοδοι κωδικοποίησης πληροφοριών σε ραδιοσήμα, το οποίο μερικές φορές αναφέρεται ως φέρον σήμα. Κάθε μέθοδος κωδικοποιεί τις πληροφορίες αλλάζοντας ή «**διαμορφώνοντας**» ένα απ’ τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των ραδιοκυμάτων που αναφέρονται στην Ενότητα 7.2.1: το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση του σήματος.

- **Διαμόρφωση Πλάτους.** Στη διαμόρφωση πλάτους, γνωστή και ως διαμόρφωση μεταλλαγής (ή μετατόπισης) πλάτους (amplitude shift keying – ASK), οι τιμές των bit κωδικοποιούνται μέσα στο φέρον σήμα, αλλάζοντας το **πλάτος** του σήματος σε διάφορες διακριτές τιμές. Το χρονοδιάγραμμα «διαμόρφωσης πλάτους» στην Εικόνα 7.12 δείχνει με ποιον τρόπο κωδικοποιούνται οι τιμές bit 0 και 1 στο επάνω μέρος της εικόνας, οι οποίες πρόκειται να μεταδοθούν κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών διαστημάτων, ρυθμίζοντας το πλάτος του φέροντος σήματος σε 0 ή 1, αντιστοίχως.
- **Διαμόρφωση Συχνότητας.** Στη διαμόρφωση συχνότητας, γνωστή και ως διαμόρφωση μεταλλαγής (ή μετατόπισης) συχνότητας (frequency shift keying – FSK), οι τιμές των bit κωδικοποιούνται μέσα στο φέρον σήμα, αλλάζοντας τη **συχνότητα** του φέροντος σήματος κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών διαστημάτων. Το χρονοδιάγραμμα «διαμόρφωσης συχνότητας» στην Εικόνα 7.12 δείχνει πώς ρυθμίζεται η συχνότητα του σήματος σε μία από δύο συχνότητες για την κωδικοποίηση μίας τιμής bit 0 ή 1.
- **Διαμόρφωση Φάσης.** Στη διαμόρφωση φάσης, γνωστή και ως διαμόρφωση μεταλλαγής (ή μετατόπισης) φάσης (phase shift keying – PSK), οι τιμές των bit κωδικοποιούνται στο φέρον σήμα, αλλάζοντας τη **φάση** του φέροντος σήματος κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών διαστημάτων. Στο χρονοδιάγραμμα «διαμόρφωσης φάσης» στην Εικόνα 7.12, το κόκκινο σήμα έχει μηδενική και αυξανόμενη τιμή στην αρχή ενός χρονικού διαστήματος. Αυτή η φάση κωδικοποιεί μία τιμή bit 0 σ’ αυτό το παράδειγμα. Η μπλε καμπύλη είναι 180° εκτός φάσης απ’ την κόκκινη καμπύλη· έχει μηδενική και μειούμενη τιμή στην αρχή ενός χρονικού διαστήματος και κωδικοποιεί μία τιμή bit 1.

Σ’ αυτά τα παραδείγματα, βλέπουμε ότι ο δέκτης μπορεί να προσδιορίσει εάν μία τιμή bit 0 ή 1 είναι κωδικοποιημένη στο αναλογικό ραδιοσήμα του πομπού απλά μετρώντας το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση του ραδιοσήματος. Σημειώστε ότι η δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών συχνότητας και φάσης προϋποθέτει ότι τα ρολόγια του πομπού και του δέκτη είναι προσεκτικά συγχρονισμένα.

Διαμόρφωση Μεταλλαγής Φάσης με Ορθογωνισμό (QPSK)

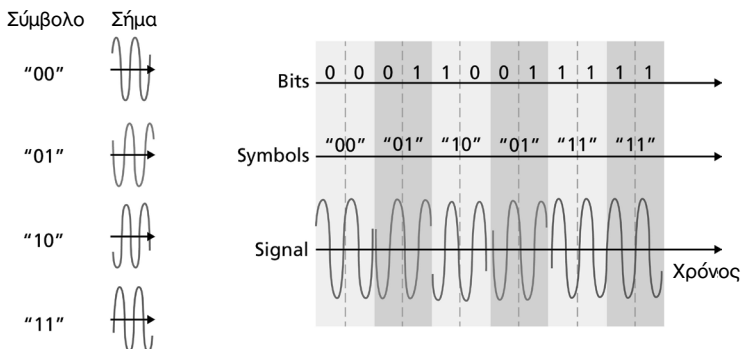
Το παράδειγμα μας στην Εικόνα 7.12 δείχνει δύο τιμές πλάτους, συχνότητας ή φάσης που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της τιμής ενός μοναδικού bit. Αλλά γιατί να στα-

ματήσουμε στις δύο τιμές; Γιατί να μην χρησιμοποιήσουμε *περισσότερες* από δύο τιμές πλάτους, φάσης ή συχνότητας για να κωδικοποιήσουμε *περισσότερες* από δύο μόνο τιμές; Και γιατί να μην διαμορφώσουμε *ταυτόχρονα* τις τιμές πλάτους, φάσης ή συχνότητας για να κωδικοποιήσουμε ακόμη *περισσότερες* πληροφορίες; Οι απαντήσεις σ’ αυτές τις ερωτήσεις βρίσκονται στο επίκεντρο των σύγχρονων τεχνικών διαμόρφωσης φυσικού επιπέδου που έχουν τυποποιηθεί για 4G, 5G, WiFi, Bluetooth και άλλα ασύρματα δίκτυα.

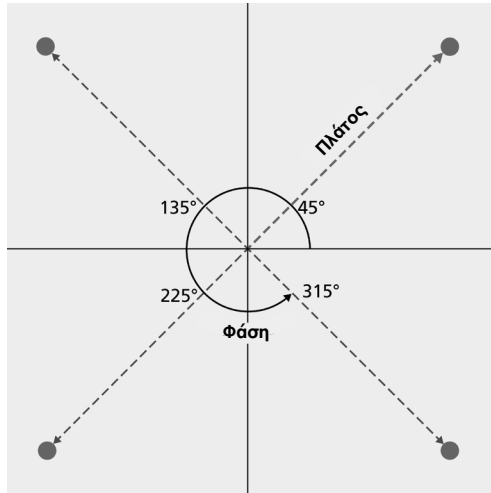
Έτσι, ως εξετάσουμε στη συνέχεια την ομαδοποίηση των διαδοχικών bit που εξέρχονται απ’ τη μονάδα κωδικοποίησης στην Εικόνα 7.11 ανά ζεύγη, δύο bit τη φορά: εάν οι τιμές δύο διαδοχικών bit είναι ένα 0 ακολουθούμενο από άλλο ένα 0, θα ομαδοποιηθούν και θα γίνουν το ενιαίο **σύμβολο** “00”. εάν οι τιμές δύο διαδοχικών bit είναι ένα 0 ακολουθούμενο από ένα 1, θα ομαδοποιηθούν και θα γίνουν ένα διαφορετικό σύμβολο, το “01”. εάν οι τιμές δύο διαδοχικών bit είναι ένα 1 ακολουθούμενο από ένα 0, θα ομαδοποιηθούν και θα γίνουν το σύμβολο “10” και οι τιμές δύο διαδοχικών bit με την τιμή 1 θα ομαδοποιηθούν και θα γίνουν το σύμβολο “11”. Το έργο του πομπού να μεταδίδει μία ροή bit μετατρέπεται πλέον σε έργο μετάδοσης συμβόλων. Δεδομένου ότι υπάρχουν τέσσερις τιμές συμβόλων (“00”, “01”, “10”, “11”) που μπορούν να μεταδοθούν, τέσσερις διαφορετικές τιμές μετατόπισης φάσης αρκούν για να αναπαραστήσουν αυτές τις τέσσερις τιμές συμβόλων. Η μέθοδος αυτή, που χρησιμοποιεί τέσσερις τιμές φάσης για την κωδικοποίηση τεσσάρων διαφορετικών συμβόλων (τα οποία αντιπροσωπεύουν τέσσερα διαφορετικά ζεύγη τιμών δύο bit), είναι γνωστή ως **Διαμόρφωση Μεταλλαγής Φάσης με Ορθογωνισμό** (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK) και απεικονίζεται στην Εικόνα 7.13.

Παρατηρήστε ότι στην QPSK, όλα τα σήματα έχουν το ίδιο πλάτος, αλλά έχουν τιμές φάσης που διαφέρουν κατά 90° : 45° (κόκκινο), 135° (πράσινο), 225° (μπλε) και 315° (μοβ). Ο δέκτης χρειάζεται μόνο να μετρήσει τη φάση του σήματος για να προσδιορίσει ποιο από τα τέσσερα σύμβολα μεταδίδεται. Σημειώστε επίσης ότι ο ρυθμός επεξεργασίας των συμβόλων είναι ο μισός μόνο του ρυθμού μετάδοσης bit, αφήνοντας περισσότερο χρόνο για την επεξεργασία του σήματος συμβόλων απ’ ό,τι για την επεξεργασία του σήματος bit-προς-bit. Ένας διασκεδαστικός διαδραστικός ιστότοπος όπου μπορείτε να μάθετε και να παίξετε με σήματα QPSK είναι ο <https://www.geogebra.org/m/enkymjtg>.

Τα τέσσερα σύμβολα στην QPSK μπορούν να χαρακτηριστούν συνοπτικά σε ένα διάγραμμα γνωστό ως **διάγραμμα αστερισμού** ή **αστερισμοειδές διάγραμμα** (constellation diagram). Ένα σημείο σε ένα διάγραμμα αστερισμού απεικονίζει τη φάση του συμβόλου (μετρούμενη σε μοίρες αριστερόστροφα απ’ την ανατολή, δηλαδή τη θέση 3:00) και το πλάτος (μετρούμενο σε απόσταση απ’ την αρχή των αξόνων). Τα τέσσερα σύμβολα QPSK αναπαριστάνται ως κόκκινες κουκκίδες στην Εικόνα 7.14. Παραδείγματος χάριν, το σύμβολο στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο έχει φάση 45° . Όπως θα περιμένε κάποιος, τα τέσσερα σύμβολα QPSK που δείχνονται στην Εικόνα 7.14 έχουν τις ίδιες φάσεις των 45° , 135° , 225° και 315° και έχουν όλα το ίδιο πλάτος.



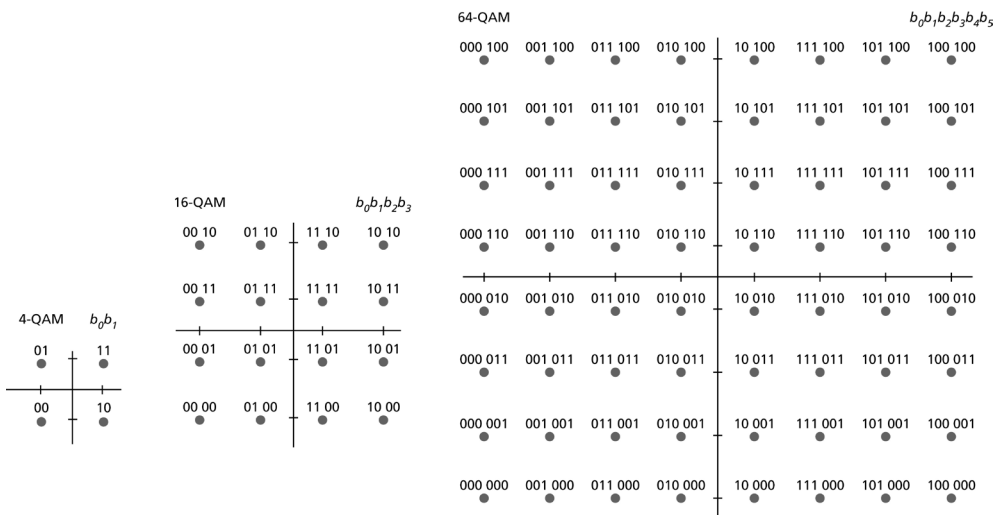
Εικόνα 7.13 Διαμόρφωση Μεταλλαγής Φάσης με Ορθογωνισμό (QPSK)



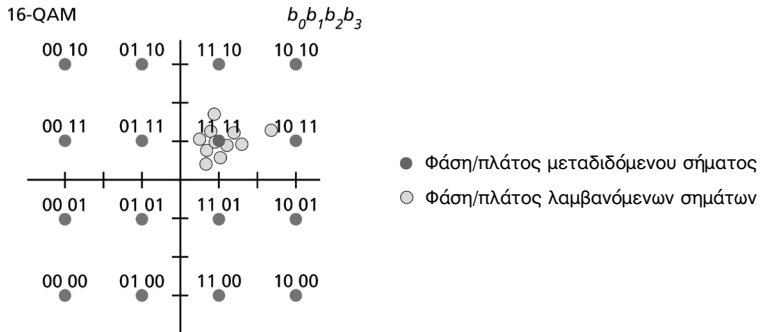
Εικόνα 7.14 Διάγραμμα αστερισμού QPSK- τέσσερα σύμβολα που αντιπροσωπεύονται από τέσσερις κυματομορφές σήματος που έχουν τέσσερις διαφορετικές φάσεις και ίδια πλάτη

Διαμόρφωση Πλάτους με Ορθογωνισμό (QAM)

Στην QPSK, διαμορφώνεται μόνο η φάση του σήματος. Στη **διαμόρφωση πλάτους με ορθογωνισμό** (quadrature amplitude modulation – QAM), διαμορφώνονται τόσο η φάση όσο και το πλάτος ενός σήματος. Η QAM εξηγείται καλά με τη χρήση διαγραμμάτων αστερισμού. Η Εικόνα 7.15 δείχνει τα διαγράμματα αστερισμού για 4-QAM, 16-QAM και 64-QAM. Ο αριθμός που προηγείται της ένδειξης “-QAM” αναφέρεται στον αριθμό των συμβόλων στη συγκεκριμένη έκδοση της QAM. Η 4-QAM είναι ουσιαστικά ίδια με την QPSK και έχει 4 σύμβολα. Η Εικόνα 7.15 δείχνει επίσης τις τιμές bit που κωδικοποιούνται από ένα σύμβολο – 2 bit για 4-QAM, 4 bit για 16-QAM και 6 bit για 64-QAM. Οι 16-QAM, 64-QAM και 256-



Εικόνα 7.15 Κωδικοποιήσεις bit για 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, αστερισμοί (για WiFi)



Εικόνα 7.16 Μεταδιδόμενα έναντι λαμβανόμενων σημάτων με διαμόρφωση 16-QAM

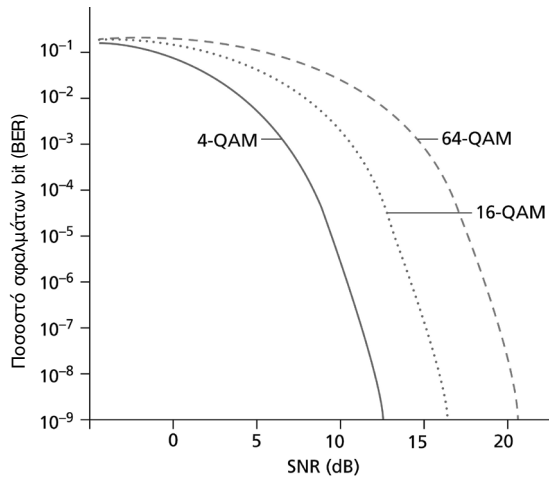
QAM χρησιμοποιούνται σε δίκτυα 4/5G και WiFi, ενώ QAM υψηλότερης τάξης (1024, 4096) εμφανίζονται στα πρότυπα WiFi-6 και WiFi-7.

Ένα διάγραμμα αστερισμού μπορεί επίσης να μας δώσει επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο ο θόρυβος προκαλεί σφάλματα bit (ή, ακριβέστερα, σφάλματα συμβόλων). Θεωρήστε τον αστερισμό 16-QAM στην Εικόνα 7.16 και υποθέστε ότι ένας αποστολέας μεταδίδει το σύμβολο “1111” που απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Λόγω της μεταβολής του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και του θορύβου μέτρησης στον δέκτη, το πλάτος και η φάση ενός σήματος “1111” θα λαμβάνονται διαφορετικά κάθε φορά που μεταδίδεται το σήμα. Οι κίτρινες κουκκίδες στην Εικόνα 7.16 αντιπροσωπεύουν πιθανές περιπτώσεις μετρούμενου πλάτους και φάσης στον δέκτη. Οι περισσότερες απ’ τις κίτρινες κουκκίδες, που αντιστοιχούν στις μετρημένες τιμές πλάτους και φάσης, βρίσκονται πιο κοντά στο πλάτος και τη φάση του συμβόλου “1111” από οποιοδήποτε άλλο σύμβολο του αστερισμού. Σ’ αυτές τις περιπτώσεις, ο δέκτης θα συμπεράνει ορθά ότι το αρχικά μεταδοθέν σύμβολο ήταν το “1111”. Ωστόσο, παρατηρήστε ότι υπάρχει ένα ληφθέν σήμα που είναι πιο κοντά στο σύμβολο “1011” παρά στο σύμβολο “1111”. Σ’ αυτήν την περίπτωση, ο δέκτης θα συμπεράνει εσφαλμένα ότι έχει σταλεί το σύμβολο “1011”, ενώ στην πραγματικότητα έχει μεταδοθεί το σύμβολο “1111”, με αποτέλεσμα την εσφαλμένη λήψη του συμβόλου.

Προσαρμοστική διαμόρφωση

Οι εικόνες 7.15 και 7.16 υποδηλώνουν επίσης ότι καθώς το διάγραμμα αστερισμού γίνεται πιο πυκνό σε QAM υψηλότερης τάξης, τα αποτελέσματα του θορύβου και του σφάλματος μέτρησης του δέκτη θα καταστούν πιο έντονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερα ποσοστά σφαλμάτων συμβόλων και, κατά συνέπεια, υψηλότερα ποσοστά σφαλμάτων bit. Αν και μπορεί να φαίνεται ότι οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης είναι πάντα επιθυμητοί και, ως εκ τούτου, η χρήση QAM υψηλότερης τάξης μπορεί επίσης να φαίνεται πάντα καλή ιδέα, αυτό δεν ισχύει αν το ποσοστό σφάλματος είναι πολύ υψηλό! Αυτή η παρατήρηση προσφέρει μία πολύτιμη *διαπίστωση για την ασύρματη επικοινωνία φυσικού επιπέδου* — ότι θα είναι σημαντικό για τον πομπό και τον δέκτη να επιλέξουν μία τεχνική διαμόρφωσης που να συνάδει με τις συνθήκες του καναλιού.

Η Εικόνα 7.17 διαφωτίζει αυτήν την διαπίστωση. Ας υποθέσουμε ότι ο στόχος είναι να διατηρήσουμε το ποσοστό σφαλμάτων bit (BER) κάτω από 10^{-4} . Ταυτόχρονα, φυσικά, θα θέλαμε να επιτύχουμε τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό μετάδοσης bit, με τήρηση αυτού του περιορισμού. Η Εικόνα 7.17 δείχνει ότι εάν ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (SNR, μετρούμενος σε dB) είναι μικρότερος από 13, τότε πρέπει να χρησιμοποιείται η 4-QAM. Απ’ την άλλη, εάν ο SNR είναι μεταξύ 13 και 17, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η 16-QAM, μ’ έναν αναλογικά υψηλότερο ρυθμό bit. Και εάν ο SNR είναι μεγαλύτερος από 17, τότε μπορεί να χρησιμοποιη-



Εικόνα 7.17 SNR έναντι BER για 4-QAM, 16-QAM και 64-QAM

ηθεί η 64-QAM. Καθώς ο SNR ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου, η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται απ’ τον πομπό και τον δέκτη μπορεί να αλλάζει δυναμικά, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ρυθμαπόδοση σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό στο BER. Φυσικά, αυτό απαιτεί τη συνεργασία αποστολέα και παραλήπτη για τη μέτρηση και την αναφορά των BER και SNR, καθώς και για τον συντονισμό των αλλαγών στην τεχνική διαμόρφωσης. Θα δούμε πώς γίνεται αυτό όταν θα μελετήσουμε τα ασύρματα δίκτυα 4G/5G.

Με αυτό ολοκληρώνεται η συζήτησή μας για το ασύρματο φυσικό επίπεδο. Έχουμε καλύψει πολλά θέματα! Πράγματι, όπως σημειώσαμε στην αρχή αυτής της ενότητας, τα ασύρματα δίκτυα είναι ένα παράδειγμα όπου οι λειτουργίες των κατώτερων επιπέδων δεν μπορούν εύκολα να ληφθούν υπόψη αφαιρετικά με μερικές απλές και κατανοητές έννοιες. Εάν είστε επιστήμονας πληροφορικής, το ασύρματο φυσικό επίπεδο μπορεί να είναι αρκετά καινούριο για εσάς. Ωστόσο, οι έννοιες του φυσικού επιπέδου που μάθαμε στην παρούσα ενότητα θα σας δώσουν μία εξαιρετική βάση για μία βαθύτερη και ευρύτερη κατανόηση των ασύρματων δικτύων.

7.3 Το Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης

Σε αυτήν την ενότητα, θα εξετάσουμε τις αρχές και τις πρακτικές που διέπουν τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων 802.11 WiFi WLAN και 4/5G RAN. Τα θέματα σχετικά με το ραδιοκάναλι, τη διαμόρφωση και την κωδικοποίηση που μόλις μελετήσαμε αφορούν στο φυσικό επίπεδο. Οι αρχές και οι πρακτικές του δικτύου πρόσβασης που θα μελετήσουμε στην παρούσα ενότητα αφορούν το επίπεδο ζεύξης και συμπληρώνουν τις γνώσεις που αποκτήσαμε για το φυσικό επίπεδο. Θα αρχίσουμε στην Ενότητα 7.3.1 μελετώντας πώς μοιράζεται το ραδιοκάναλι μεταξύ των πολλών συσκευών και του σταθμού βάσης σε ένα δίκτυο πρόσβασης. Καθώς έχουμε ήδη μελετήσει το πρόβλημα της πολλαπλής προσπέλασης στην Ενότητα 6.3, θα επικεντρωθούμε εδώ στον τρόπο με τον οποίο οι βασικές τεχνικές που μάθαμε εκεί (FDM, TDM και τυχαία προσπέλαση) εξειδικεύονται για ένα ασύρματο κανάλι. Μ’ αυτήν την κοινή βάση, μαζί με τις βάσεις απ’ την Ενότητα 7.2, θα μελετήσουμε στη συνέχεια τα δύο κύρια δίκτυα ασύρματης πρόσβασης: το 802.11 WiFi WLAN και το 4/5G RAN στις Ενότητες 7.3.2 και 7.3.3, αντιστοίχως. Στη

συνέχεια, θα στραφούμε σε πιο εξειδικευμένα θέματα που σχετίζονται με το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης. Στην Ενότητα 7.3.4, θα μάθουμε πώς μία ασύρματη συσκευή εντοπίζει την ύπαρξη ενός δικτύου ασύρματης πρόσβασης και τα αρχικά βήματα που ακολουθεί για να συνδεθεί σ' ένα τέτοιο δίκτυο. Στην Ενότητα 7.3.5, θα εμβραθύνουμε στο θέμα της κοινής χρήσης καναλιών, μελετώντας την κατανομή του εύρους ζώνης και τον προγραμματισμό των μεταδόσεων πλαισίων σε αντιρρευματικά και συρρευματικά κανάλια. Η Ενότητα 7.3.6 καλύπτει την κατανάλωση ενέργειας σε συσκευές ασύρματων δικτύων.

7.3.1 Κοινή χρήση του ασύρματου καναλιού

Στην Ενότητα 6.3, μάθαμε για τις διάφορες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την κοινή χρήση ενός καναλιού πολλαπλής προσπέλασης:

- *τεχνικές διαμέρισης καναλιού*, στις οποίες περιλαμβάνονται η πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (TDM) και η πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας (FDM)·
- *πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης*, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων Aloha και Πολλαπλής Προσπέλασης με Ανίχνευση Φέροντος (CSMA)· και
- *πρωτόκολλα λειτουργίας εκ περιτροπής*, συμπεριλαμβανομένης της σταθμοσκόπησης.

Θα θεωρήσουμε εδώ την Ενότητα 6.3 ως υπόβαθρο, οπότε ίσως θελήσετε να ανατρέξετε σε αυτήν την ενότητα για να ανανεώσετε τις γνώσεις σας. Θα δούμε ότι όλες αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται στις αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων που θα μελετήσουμε! Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρήση τους είναι αρκετά απλή. Σ' άλλες όμως περιπτώσεις, αυτές οι βασικές προσεγγίσεις συνδυάζονται ή επεκτείνονται ειδικά για χρήση σε ασύρματα δίκτυα. Σ' αυτήν την υποενότητα, θα εξετάσουμε δύο συγκεκριμένες προσεγγίσεις για τον διαμοιρασμό του ασύρματου καναλιού: (i) την Ορθογωνική Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA), που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 4G, 5G και WiFi-6/7, και (ii) την πολλαπλή προσπέλαση με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων (CSMA/CA), που χρησιμοποιείται σε όλες τις γενιές δικτύων WiFi. Θα μάθουμε επίσης πώς το φυσικό ραδιοκάνάλι χωρίζεται σε αντιρρευματικά και συρρευματικά κανάλια για τη μετάδοση πλαισίων δεδομένων επιπέδου ζεύξης, τη μέτρηση καναλιών, την ανακάλυψη δικτύων κ.λπ.

FDM, OFDM: κανάλια και υποκανάλια

Η Εικόνα 7.18 δείχνει το σημείο εκκίνησης της συζήτησής μας για την OFDM. Η Εικόνα 7.18(α) δείχνει ένα ιδανικό κανάλι μονής ευρείας ζώνης, στο οποίο το φάσμα ισχύος (δείτε την Ενότητα 7.2) κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων. Επειδή ένα κανάλι μονής ευρείας ζώνης μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην πράξη (π.χ. λόγω της παρουσίας διαφόρων παρεμβολών σε διάφορες συχνότητες) και επειδή οι συσκευές δεν χρειάζονται το πλήρες εύρος ζώνης ενός καναλιού ευρείας ζώνης, μια ζώνη συχνοτήτων συχνά διαιρείται σε πολλαπλά **κανάλια στενής ζώνης** (narrowband channels), το καθένα με μικρότερο εύρος ζώνης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.18(β). Κάθε κανάλι στενής ζώνης στην Εικόνα 7.18(β) εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα. Η εικόνα αυτή δείχνει επίσης τις **ζώνες προστασίας** (guard bands) μεταξύ των καναλιών στενής ζώνης – ένα μικρό εύρος συχνοτήτων, στο οποίο δεν μεταδίδεται κανένα σήμα, αποτρέποντας έτσι την αλληλοεπι κάλυψη των μεταδόσεων ενός υποκαναλιού με τις μεταδόσεις ενός γειτονικού υποκαναλιού.