



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**"Τεχνικές μετάδοσης του σήματος στις  
τηλεπικοινωνίες"**

**"Signal transmission techniques in  
telecommunications"**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΓΙΟΥΣΟΥΦ ΕΡΤΖΑΝ (2725)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΠΑΤΡΑ 2023

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ιστορική εξέλιξη των επικοινωνιών .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	15
2.1 Ορισμός επικοινωνίας και σήματος .....	15
2.2 Βασικές αρχές μετάδοσης δεδομένων.....	19
2.3 Μοντέλο τηλεπικοινωνιακού συστήματος.....	26
2.4 Αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ .....	35
3.1 Ασύρματη μετάδοση .....	35
3.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία .....	39
3.3 Μέσα μετάδοσης .....	44
3.4 Κεραίες.....	52
3.5 Μοντέλο ψηφιακών επικοινωνιών .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	59
4.1 Κατηγορίες ασύρματων δικτύων.....	59
4.2 Ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες .....	63
4.3 Ασύρματα συστήματα.....	67
4.4 Κυβελωτά συστήματα.....	72
4.5 Επίγεια μικροκυματικά συστήματα .....	75
4.6 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	76
4.7 Οπτικά συστήματα .....	86
4.8 Δορυφορικά συστήματα.....	91
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	95

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η πτυχιακή αυτή εργασία έχει ως σκοπό την θεωρητική μελέτη των τεχνικών μετάδοσης του σήματος στις τηλεπικοινωνίες. Αρχικά γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών και παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες. Στην συνέχεια περιγράφονται οι βασικές αρχές και τεχνολογίες μετάδοσης με σκοπό να αναλυθούν τα μέσα και οι τρόποι μετάδοσης του σήματος καθώς και η δομή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας αναλύονται τα σημερινά χρησιμοποιούμενα συστήματα επικοινωνιών και οι σύγχρονες εφαρμογές τους.

## **ABSTRACT**

This thesis aims at the theoretical study of signal transmission techniques in telecommunications. First, the evolution of telecommunications is mentioned and the basic concepts and quantities widely used in telecommunications are presented. Then the basic principles and transmission technologies are described in order to analyze the means and methods of signal transmission as well as the structure of a telecommunications system. In the last part of the work, the currently used communication systems and their modern applications are analyzed.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Η έννοια της επικοινωνίας είναι ευρεία και σύνθετη, καθώς έχει διαστάσεις σε όλα τα επίπεδα που συναντώνται στην ανθρώπινη φύση. Κάθε φορά που εκφράζουμε μια ιδέα ή θέλουμε να μεταδώσουμε μια πληροφορία μεταξύ μας, επικοινωνούμε. Επικοινωνία, λοιπόν, είναι όλες εκείνες οι διαδικασίες που αναμειγνύονται στη μετάδοση της πληροφορίας από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη. Κατά συνέπεια, για να μπορέσουμε να επικοινωνήσουμε μέσω φυσικών προσώπων ή μηχανών, χρειαζόμαστε μία σειρά από φυσικές και διανοητικές λειτουργίες, όπως μία γλώσσα επικοινωνίας ή έναν κώδικα, καθώς και ένα μέσο για να μεταφερθεί το μήνυμα.

Οι επικοινωνίες που συμβαίνουν, όταν οι συμμετέχοντες βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία, αποκαλούνται τηλεπικοινωνίες και οι εφευρέσεις σε αυτό το χώρο επιτρέπουν στους ανθρώπους όλου του κόσμου να επικοινωνούν μεταξύ τους. Το επικοινωνιακό μοντέλο του Shannon (1948) εισήγαγε έννοιες, οι οποίες έγιναν ευρέως αποδεκτές στη συνέχεια. Το μοντέλο αυτό, αναφέρεται στην πηγή πληροφορίας, στο μεταδιδόμενο μήνυμα, τον πομπό, τον δέκτη, το κανάλι, την εντροπία, την κωδικοποίηση, την πιθανότητα σφάλματος, την χωρητικότητα του καναλιού κ.ά.

## 1.2 Ιστορική εξέλιξη των επικοινωνιών

Οι επικοινωνίες στην αρχαιότητα είχαν μεγάλη διείσδυση στους λαούς λόγω των συστημάτων επικοινωνιών που επινοήθηκαν και κατά καιρούς χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις ιστορικές περιόδους.

Παρακάτω περιγράφονται τηλεπικοινωνιακά συστήματα που λειτουργούσαν στην αρχαιότητα, καθώς και σημαντικές ανακαλύψεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

- Αγγελιοφόροι, πεζοί και έφιπποι

Η πρώτη και πανάρχαια μέθοδος μετάδοσης πληροφοριών και μηνυμάτων στηρίχθηκε στη δύναμη των ανθρώπινων άκρων να διασχίζουν τις αποστάσεις όσο το δυνατόν συντομότερα. Υπήρχαν αρκετοί, των οποίων τα ονόματα δεν έχουν διασωθεί, γενικά ονομαζόμενοι ημεροδρόμοι, που η δουλειά τους ήταν να διατρέχουν με ταχύτητα αποστάσεις, μεταφέροντας διάφορα μηνύματα, κυρίως στρατιωτικά.

Υπήρχαν και έφιπποι αγγελιοφόροι, που με μεγάλη ταχύτητα διέσχιζαν τεράστιες αποστάσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα, έχοντας μαζί τους πάνω από δυο ή τρία άλογα, τα οποία ίππευαν διαδοχικά, ώστε να τα ξεκουράζουν.

- Σφυρίγματα

Οι Γκουάντσε, οι κάτοικοι των Καναρίων Νησιών, χρησιμοποιούσαν μια ειδική γλώσσα σφυριγμάτων για να επικοινωνούν σε μεγάλες αποστάσεις. Η πληροφορία ήταν ο ήχος, και το μέσο μετάδοσης ο αέρας.

- Σήματα καπνού

Χρησιμοποιούνταν από τους Κινέζους στρατιώτες στο Σινικό Τείχος ως προειδοποίηση επικείμενης επίθεσης. Τα νέα μεταδίδονταν σε μία απόσταση 480 km μέσα σε μερικές ώρες. Η πληροφορία ήταν ο καπνός, και το μέσο μετάδοσης ο αέρας.

- Ακουστικά Σήματα

Ορισμένες φυλές ιθαγενών στην Αφρική και στην Αμερική χρησιμοποιούσαν ήχους τυμπάνων για να μεταφέρουν πληροφορία. Η πληροφορία ήταν ο ήχος, και το μέσο μετάδοσης ο αέρας.

- Ταχυδρομικά περιστέρια

Οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν τα ταχυδρομικά περιστέρια για να μεταφέρουν πληροφορίες σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέσο μετάδοσης ήταν τα περιστέρια.

- Φрукτωρίες

Ήταν ένα σύστημα μηνυμάτων με μέσο μετάδοσης τη φωτιά, ώστε να μεταφερθεί το σήμα σύντομα και σε μεγάλη απόσταση. Για τη μετάδοση των οπτικών σημάτων με έντονους καπνούς ή στήλες καπνού ήταν απαραίτητη η κατασκευή ειδικών κτισμάτων σε υπερυψωμένα σημεία, τα οποία ονομάζονταν φрукτωρίες. Τα φωτεινά σήματα που ανταλλάσσονταν μέσω των φрукτών (πυρσών) είχαν συμφωνηθεί εκ των προτέρων και από τις δύο πλευρές, ώστε να είναι δυνατή η μετάφραση των μηνυμάτων. Έτσι, δημιουργήθηκε ο πρώτος κώδικας με οπτικά σήματα. Σε αυτή την περίπτωση, η πληροφορία ήταν το φως.

- Ο τηλεγράφος του Πολύβιου

Ο Έλληνας ιστορικός Πολύβιος σχεδίασε μία μέθοδο σηματοδότησης, όπου τα γράμματα του αλφαβήτου ήταν χωρισμένα σε πέντε σειρές και πέντε στήλες από πέντε γράμματα στην κάθε μία. Έτσι, με δυο ομάδες από πέντε φωτιές η κάθε μία, μπορούσαν να μεταδώσουν οποιοδήποτε γράμμα. Με αυτόν τον τρόπο λέγεται ότι μπορούσαν να μεταδώσουν 20 με 25 λέξεις την ώρα.

	1	2	3	4	5
1	A	B	Γ	Δ	E
2	Z	H	Θ	I	K
3	Λ	M	N	Ξ	O
4	Π	P	Σ	T	Υ
5	Φ	X	Ψ	Ω	

Εικόνα 1.1: Μέθοδος σηματοδότησης του Πολύβιου.

- Ανακλαστήρες ενίσχυσης

Τα σήματα από τις φωτιές λέγεται ότι υποβοηθούνταν με ειδικούς ανακλαστήρες, προκειμένου να φανούν αρκετά μακριά, με χρήση γυαλισμένων ασπίδων. Αργότερα, η χρήση κανονικών κάτοπτρων μπορούσε να χρησιμοποιήσει και την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός για επικοινωνία, όπως π.χ. ο φάρος της Αλεξάνδρειας. Η πληροφορία ήταν το φως.

- Ακουστικός τηλεγράφος

Η ανάρτηση ενός κυκλικού ηχητικού κέρατος (κέρας), επέτρεπε εύκολα την περιστροφική κίνησή του προς όλες τις κατευθύνσεις. Η πληροφορία ήταν ο ήχος, και το μέσο μετάδοσης ο αέρας, που μπορούσε να ακουστεί καθαρά, ακόμα και σε απόσταση τεσσάρων χιλιομέτρων.



Εικόνα 1.2: Ακουστικός τηλεγράφος.

- Υδραυλικός τηλέγραφος

Ο υδραυλικός τηλέγραφος ήταν εφεύρεση του Αινεία του Τακτικού. Χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Στηριζόταν στη χρήση δύο πανομοιότυπων δοχείων νερού, μέσα στα οποία επέπλεε ειδικός πλωτήρας με στέλεχος, επί του οποίου υπήρχαν τοποθετημένες σε σταθερές θέσεις, ετικέτες με συνεννοημένα μηνύματα. Ο συντονισμός γινόταν με τη χρήση φωτεινών σημάτων (επικοινωνιακός κώδικας). Το όλο σύστημα εξελίχθηκε και έφτασε σε αυτό που νεότεροι ερευνητές αποκάλεσαν «πρώτη μορφή του συστήματος μορς».

- Σωληνώσεις τηλεπικοινωνιών

Αναφορά ακουστικών τηλεπικοινωνιών έχει γίνει και στην Κίνα. Μέσα στο Σινικό Τείχος (περίπου 9 μέτρα ψηλό με πύργους των 12 μέτρων και με συνολικό μήκος 6.400 χιλιόμετρα) υπάρχουν μεταλλικοί σωλήνες, όπου η πληροφορία ήταν ο ήχος, και το μέσο μετάδοσης οι σωληνώσεις.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι εφευρέσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού, οι οποίες οδήγησαν στην ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, καθώς και κάποια πρότυπα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα.

- Ο πρώτος τηλέγραφος (1792)

Ο Γάλλος εφευρέτης Claude Chappe παρέδωσε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το οποίο βασιζόταν σε πύργους, με κινητά μέρη στην κορυφή τους. Κατάφερε να καλύψει ολόκληρη τη Γαλλία και να μεταφέρει μηνύματα με ένα αλφάβητο 32 και πλέον συμβόλων.

- Ο πρώτος ηλεκτρικός τηλέγραφος (1837)

Οι Wheatstone και Cooke στην Αγγλία και ο Morse στις ΗΠΑ επινόησαν τον πρώτο ηλεκτρικό τηλέγραφο. Το 1866 πραγματοποιήθηκε η πρώτη διατλαντική ζεύξη.

Το διάσημο τηλεγράφημα που έστειλε το 1844 ο Samuel Morse στον Alfred Vail από την Capitol της Ουάσιγκτον στη Βαλτιμόρη: "What hath God wrought"





Εικόνα 1.3: Ηλεκτρικός τηλέγραφος και κώδικας Morse.

- Το πρώτο τηλέφωνο (1876)

Οι Bell και Grey ανακάλυψαν το τηλέφωνο, όπου η μετάδοση της ομιλίας γίνεται μέσω ηλεκτρικών σημάτων. Σχηματίζοντας έναν αριθμό με τον επιλογέα της τηλεφωνικής συσκευής, ένα κωδικοποιημένο ηλεκτρικό σήμα αποστέλλεται στο τηλεφωνικό κέντρο. Το σήμα ανοίγει μια γραμμή στο κέντρο, και στη συνέχεια προς το τηλέφωνο για το οποίο έγινε η κλήση, ενώ ταυτόχρονα, η συσκευή κουδουνίζει. Το 1878 και το 1879 άρχισαν να εγκαθίστανται οι πρώτες τηλεφωνικές συσκευές στο Λονδίνο και το New Haven.



Εικόνα 1.4: Το πρώτο τηλέφωνο.

- Ο πρώτος αυτόματος μεταγωγέας (1891)

Ο Almod B. Strowger ανακάλυψε έναν τρόπο να διευκολύνει τη ζωή των τηλεφωνητών που εξυπηρετούσαν τα τηλεφωνικά κέντρα της εποχής, δημιουργώντας έναν ηλεκτρομηχανικό διακόπτη (step-by-step switch).



Εικόνα 1.5: Ο πρώτος αυτόματος μεταγωγέας.

- Τρίοδος Λυχνία (1906)

Η εφεύρεση της τριόδου λυχνίας κενού κατέστησε δυνατή την υλοποίηση των ενισχυτών σήματος και τη μετάδοση τηλεφωνικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις. Η τριόδος λυχνία είναι απλώς μια δίοδος λυχνία με την προσθήκη ενός τρίτου ηλεκτροδίου που ονομάζεται “Control Grid”. Η τάση που εφαρμόζεται σε αυτό προκαλεί το ρεύμα ανόδου να ποικίλλει κατά παρόμοιο τρόπο με ένα τρανζίστορ, έτσι μία τριόδος λυχνία μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί ως διακόπτης ή ως ενισχυτής.



Εικόνα 1.6: Τρίοδος λυχνία.

- Ραδιοφωνία διαμόρφωσης πλάτους AM (1920)

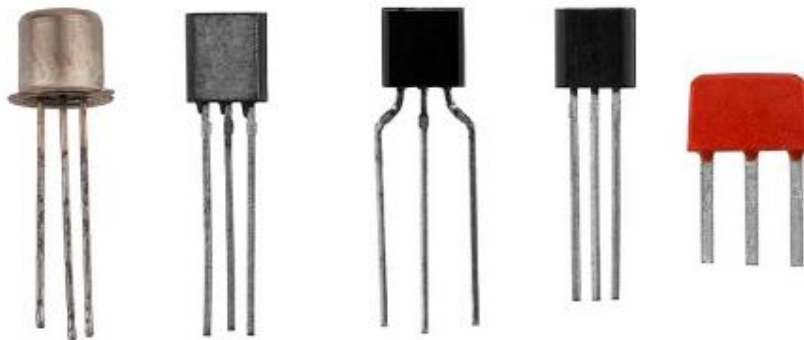
Η ραδιοφωνία διαμόρφωσης πλάτους AM εγκαινιάστηκε στο Pittsburg των ΗΠΑ από τον ραδιοφωνικό σταθμό KDKA. Το 1918 ο Edwin Armstrong ανακάλυψε τον πρώτο υπερτεροδύνο δέκτη AM που έδωσε σημαντική ώθηση στη ραδιοφωνία. Ο ίδιος το 1933 κατασκεύασε το σύστημα επικοινωνίας FM.

- Το πρώτο σύστημα τηλεόρασης (1929)

Ο V. K. Zworykin κατασκεύασε το πρώτο σύστημα τηλεόρασης στις ΗΠΑ. Οι πρώτες τηλεοπτικές εκπομπές ξεκίνησαν το 1936 από τον σταθμό BBC στην Αγγλία. Ακολούθησε η Αμερική, πέντε χρόνια αργότερα.

- Ημιαγωγό τρανζίστορ (1947)

Οι Brattain, Bardeen και Shockley εφηύραν το ημιαγωγό τρανζίστορ, ανοίγοντας το δρόμο για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα.



Εικόνα 1.7: Διάφοροι τύποι τρανζίστορ.

- Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (1958)

Οι Jack Kilby και Robert Noyce έφτιαξαν το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα, ανοίγοντας το δρόμο για μικρότερες και φθηνότερες τηλεπικοινωνιακές συσκευές.



Εικόνα 1.8: Διάφοροι τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

- Πηγή ημιαγωγού LASER (1962)

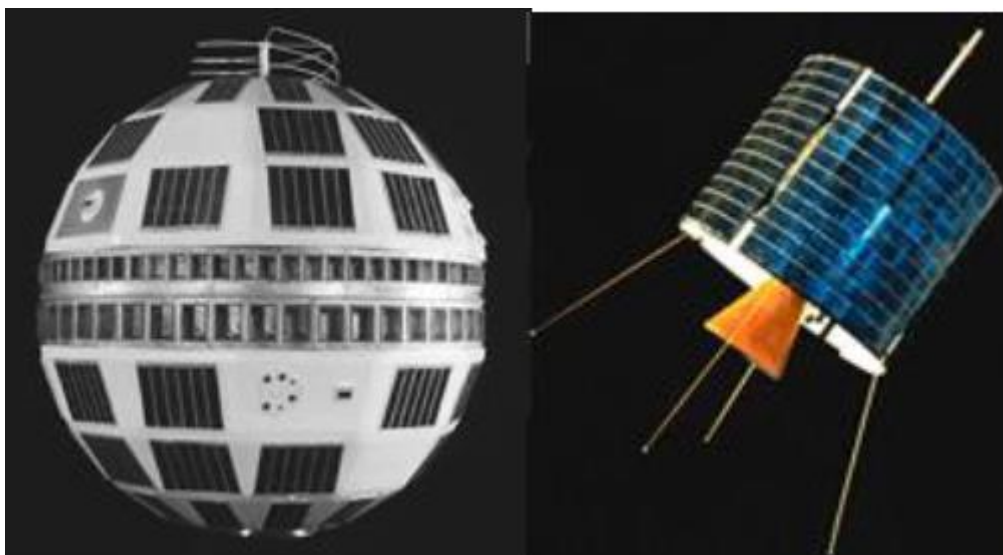
Ο Robert Hall παρουσίασε την πρώτη ημιαγωγό δίοδο LASER, που μαζί με τις οπτικές ίνες αύξησαν τις ταχύτητες των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.



Εικόνα 1.9: LASER.

- Ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος (1962)

Ο δορυφόρος Telstar I τέθηκε σε τροχιά και χρησιμοποιήθηκε για αναμετάδοση σήματος TV μεταξύ ΗΠΑ και Ευρώπης. Το 1965 εκτοξεύθηκε ο Early Bird, ο πρώτος εμπορικός τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος.



Εικόνα 1.10: Telstar I και Early Bird.

- Internet (1969)

Το Διαδίκτυο (Internet) προέκυψε από χρηματοδότηση της DARPA τη δεκαετία του 1970. Το 1969 υλοποιήθηκε το ARPANET, το πρώτο δίκτυο μεταγωγής πακέτων. Το Διαδίκτυο είναι ένα παγκόσμιο σύστημα διασυνδεδεμένων δικτύων υπολογιστών που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο Internet (TCP/IP) για να συνδέονται δισεκατομμύρια συσκευές σε όλο τον κόσμο.

- DSL (1988)

Η Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή (Digital Subscriber Line/xDSL) είναι μια οικογένεια ψηφιακών τεχνολογιών ειδικά σχεδιασμένων για τη μεταφορά ψηφιακών δεδομένων σε υψηλό ρυθμό μετάδοσης μέσω των υφιστάμενων τοπικών βρόχων.

Επί πολλές δεκαετίες ο τοπικός βρόχος χρησιμοποιούνταν μόνο για τη μεταφορά φωνής, η οποίας εκτείνεται στην περιοχή συχνοτήτων από 300 Hz έως 4.000 Hz. Το εύρος ζώνης (Bandwidth) του τοπικού βρόχου φτάνει τυπικά μέχρι το 1,1 MHz, ή/και το ξεπερνά, υπό προϋποθέσεις (μήκος, διατομή και ποιότητα τοπικού βρόχου). Επομένως, το τμήμα του φάσματος του βρόχου που περισσεύει από την τηλεφωνία μπορεί να αξιοποιηθεί για την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων. Για το σκοπό αυτό απαιτούνται ειδικές συσκευές, οι διαποδιαμορφωτές (Modems) στα άκρα της γραμμής. Επειδή το κανάλι επικοινωνίας που χρησιμοποιούν (τοπικός βρόχος) έχει φτωχά ποιοτικά χαρακτηριστικά φάσματος και υψηλές παραμορφώσεις, οι τεχνολογίες DSL συνδυάζουν εξελιγμένες τεχνικές πολύπλεξης (Multiplexing), διαμόρφωσης (Modulation), κωδικοποίησης καναλιού (Channel Coding), όπως επίσης εύρεσης και διόρθωσης λαθών (Error Detection and Correction).

Αν και η απόσταση που μπορούν να καλύψουν οι τεχνολογίες xDSL περιορίζεται στα λίγα χιλιόμετρα από το κέντρο του παρόχου, το γεγονός ότι αξιοποιούν με τρόπο αποδοτικό ένα απλό, αλλά ευρύτατα διαδεδομένο μέσο επικοινωνίας (τον τοπικό βρόχο) εξηγεί την τεράστια εμπορική επιτυχία τους. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία DSL:

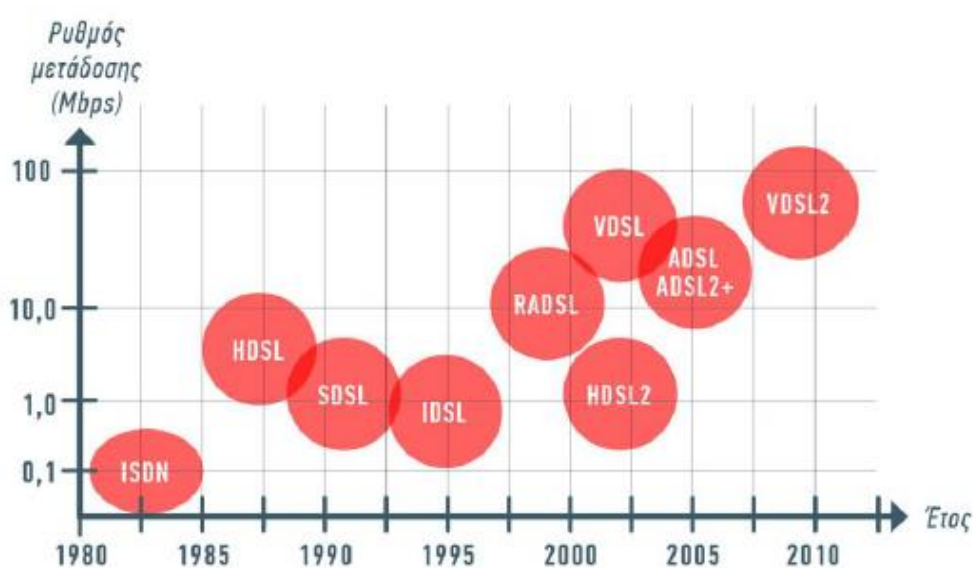
- είναι η πρώτη επιλογή ευρυζωνικής πρόσβασης στον κόσμο, με το μερίδιό της στην αγορά να ξεπερνά το 65% και τους χρήστες της να υπερβαίνουν τους 200 εκατομμύρια,
- είναι διαθέσιμη σε κάθε περιοχή του κόσμου, με την ADSL (και τις παραλλαγές της) να κατέχει το μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς και τη VDSL (και τις παραλλαγές της) να κερδίζει έδαφος.

Συνοπτικά, οι τεχνολογίες xDSL προσφέρουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- υψηλές παρεχόμενες ταχύτητες σε σχέση με τις συνδέσεις Plain Old Telephone Service (POTS) και Integrated Services Digital Network (ISDN),
- υποστήριξη υπηρεσιών φωνής, βίντεο και δεδομένων (υπό προϋποθέσεις, μπορεί να παρέχει ταχύτητες μέχρι και 100 Mbps),
- φθηνή και σταθερή (Flat Rate) χρέωση,
- ταυτόχρονη χρήση υπηρεσιών τηλεφωνίας και δεδομένων (διαδικτύου),
- εύκολο μοίρασμα της σύνδεσης σε περισσότερους από έναν υπολογιστές,
- συνεχής διαθεσιμότητα (Always On) της σύνδεσης στο διαδίκτυο,
- υψηλή επεκτασιμότητα, δηλαδή δυνατότητα υποστήριξης από μικρό έως μεγάλο αριθμό χρηστών,
- αξιόπιστη διαχείριση του δικτύου από «άκρο σε άκρο»,
- υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου, όπως οι τηλεδιασκέψεις, ή εφαρμογών υψηλού ρυθμού δεδομένων, όπως τα βίντεο κατ' απαίτηση.

Τα μέλη της οικογένειας DSL διακρίνονται μεταξύ τους, κυρίως, βάσει του τρόπου με τον οποίο κατακερματίζουν το εύρος ζώνης της γραμμής, ώστε να παρέχουν συμμετρικές ή ασύμμετρες υπηρεσίες. Όλες οι τεχνολογίες DSL περιγράφονται με τον γενικό όρο «xDSL».

Στην Εικόνα 1.11 παρουσιάζονται οι τεχνολογίες DSL ανάλογα με το χρόνο εφαρμογής τους και το ρυθμό μετάδοσης που υποστηρίζουν.



Εικόνα 1.11: Ταξινόμηση των παραλλαγών της DSL σε σχέση με την ημερομηνία υλοποίησης και τους προσφερόμενους ρυθμούς μετάδοσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 2.1 Ορισμός επικοινωνίας και σήματος

Ως επικοινωνία (communication) ορίζουμε τη μετάδοση πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο, μέσω μιας ακολουθίας διαδικασιών. Στα συστήματα επικοινωνιών, οι διαδικασίες που ακολουθούνται ορίζονται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Γι' αυτό τον λόγο και αναφερόμαστε, συνήθως, σε τηλεπικοινωνία (telecommunication), που είναι υποβοηθούμενη με τεχνικά μέσα μετάδοσης σημάτων σε κάποια απόσταση. Προέρχεται από το αρχαίο ελληνικό επίρρημα «τηλε» που σημαίνει μακριά, σε μεγάλη απόσταση.

Η πληροφορία (information) είναι γενικά μία αλληλουχία συμβόλων που καταγράφονται ή μεταδίδονται μέσω ενός μέσου μετάδοσης. Η πληροφορία είναι το μέγεθος που, αυξανόμενο, προσδίδει σημασία στα δεδομένα και παράγει γνώση. Στις επικοινωνίες, η πληροφορία αποτελείται από δεδομένα με σημασία, δηλαδή δεδομένα που έχουν ουσιαστικό περιεχόμενο. Η πληροφορία σχετίζεται με την αβεβαιότητα (uncertainty) μιας τυχαίας μεταβλητής ή γενικότερα μίας τυχαίας στοχαστικής διαδικασίας. Το μέτρο της πληροφορίας είναι αντιστρόφως ανάλογο της εντροπίας (entropy), δηλαδή του μέτρου της αταξίας, και κάθε μεταβολή της εντροπίας μεταβάλλει την ενέργεια του σήματος. Η αύξηση της πληροφορίας συνεπάγεται την αύξηση της οργάνωσης ή αντίστοιχα την ελάττωση της αταξίας.

Στα συστήματα επικοινωνιών για να θεωρηθεί επιτυχής η μετάδοση (επικοινωνία), θα πρέπει ο δέκτης να μπορεί να ανακτήσει σωστά (ή επαρκώς αξιόπιστα) την πληροφορία. Μερικές διαδικασίες που συναντώνται τη μετάδοση πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο είναι:

- Η δημιουργία ενός προτύπου ή εικόνας στο μυαλό κάποιου.
- Η περιγραφή αυτής της εικόνας με κάποια ακρίβεια, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ακουστικών ή οπτικών συμβόλων.
- Η κωδικοποίηση αυτών των συμβόλων σε μια μορφή κατάλληλη προς μετάδοση, από το μέσο που μας ενδιαφέρει.
- Η μετάδοση των κωδικοποιημένων συμβόλων στον επιθυμητό προορισμό.
- Η αποκωδικοποίηση και αναπαραγωγή των αρχικών συμβόλων.
- Η αναδημιουργία της αρχικής εικόνας, με μια καθορισμένη ποιοτική υποβάθμιση. Η υποβάθμιση αυτή προκαλείται από ατέλειες του συστήματος.

Μερικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα επικοινωνιών που υπάρχουν στη φύση και στα συστήματα επικοινωνιών είναι:

- Μετάδοση αποτελεσμάτων αγώνων μέσω ραδιοφώνου.
- Αποστολή αρχείων μέσω Διαδικτύου.
- Μετάδοση μηνύματος πείνας από το στομάχι στον εγκέφαλο μέσω του νευρικού συστήματος.
- Απενεργοποίηση συναγερμού αυτοκινήτου μέσω του αέρα (ασύρματο κανάλι).
- Αποστολή επιστολής μέσω ταχυδρομείου.

Ως σήμα (signal) ορίζουμε ένα σύνολο τιμών που λαμβάνει μία φυσική ποσότητα, όταν αυτή μεταβάλλεται με το χρόνο, με το χώρο ή οποιαδήποτε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή ή μεταβλητές. Δηλαδή, ένα σήμα μεταφέρει μεταβολές κάποιου φυσικού μεγέθους. Από μαθηματικής σκοπιάς, ένα σήμα παριστάνεται ως συνάρτηση ή ακολουθία μιας ή περισσότερων ελεύθερων μεταβλητών και συνήθως είναι μία μονοσήμαντη συνάρτηση χρόνου.

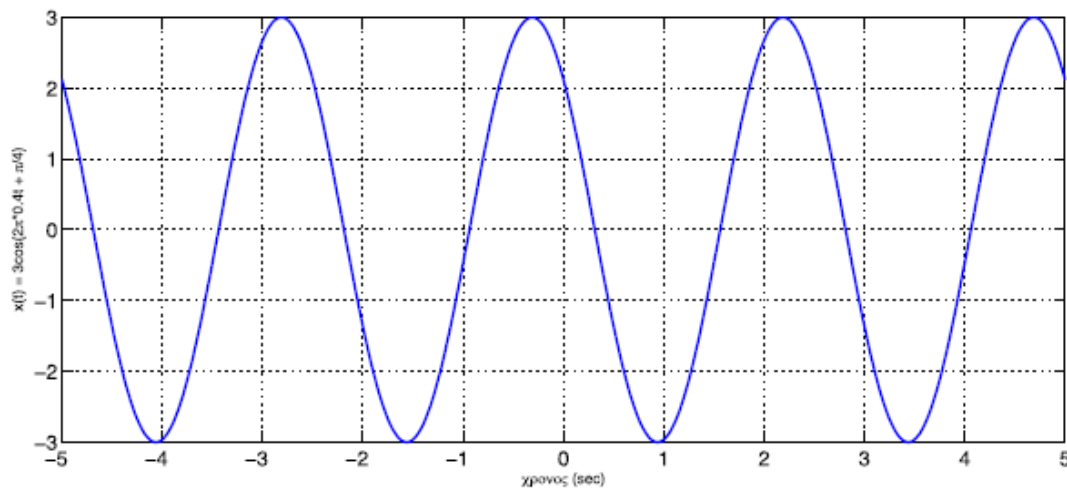
Άμεσα συνδεδεμένος με τα σήματα είναι και ο τρόπος με τον οποίο αυτά παράγονται. Η παραγωγή ενός σήματος συνδέεται συνήθως με ένα σύστημα που αποκρίνεται σε μία διέγερση. Ως τηλεπικοινωνιακό σύστημα (system) ορίζουμε την οντότητα εκείνη που επιτρέπει τη μετατροπή ενός σήματος σε ένα άλλο. Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα δέχονται ένα σήμα εισόδου ως διέγερση και αποκρίνονται με ένα σήμα εξόδου.

Μπορούμε να διακρίνουμε διάφορες κατηγορίες σημάτων ανάλογα με τις τιμές που παίρνει η ανεξάρτητη μεταβλητή (χρόνος) που είναι πραγματικός αριθμός. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Πραγματικά Σήματα (real-valued signals), όπου το σήμα παίρνει τιμές από το σύνολο των πραγματικών αριθμών.
  2. Μιγαδικά Σήματα (complex-valued signals), όπου το σήμα παίρνει τιμές από το σύνολο των μιγαδικών αριθμών.
- Τα μιγαδικά σήματα χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες για τη μοντελοποίηση σημάτων που μεταφέρουν πληροφορία πλάτους και φάσης. Αναπαρίστανται από δύο πραγματικούς αριθμούς: πλάτος (απόλυτη τιμή) και φάση, ή πραγματικό και φανταστικό μέρος.

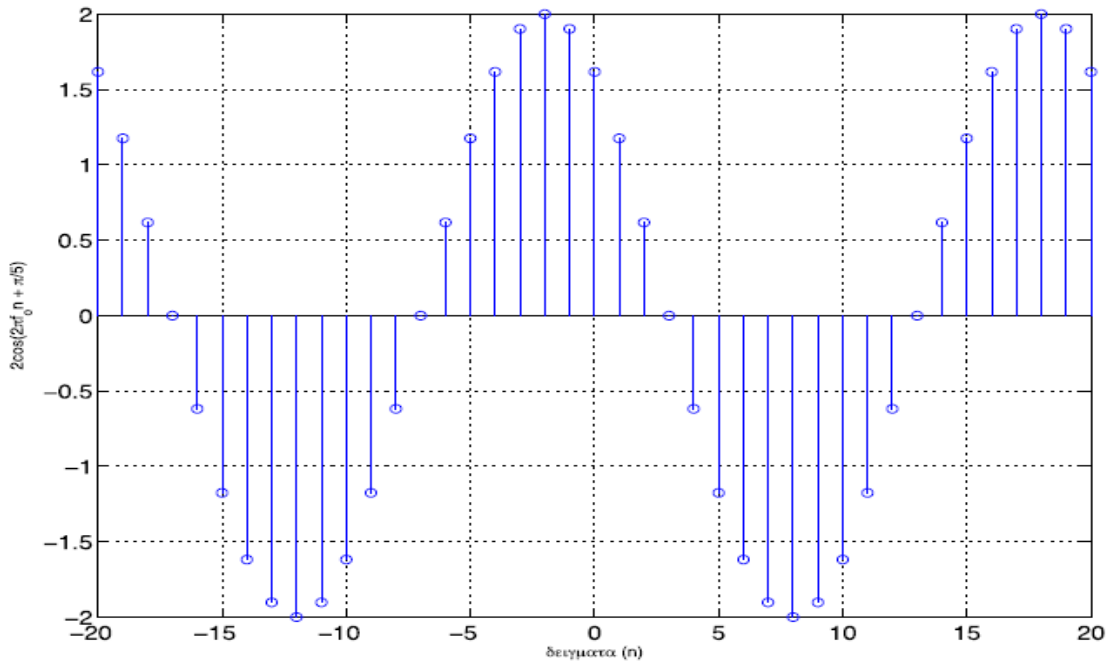


3. Ντετερμινιστικά (deterministic) ή νομοτελειακά σήματα, όταν για οποιαδήποτε χρονική στιγμή  $t$ , η τιμή του σήματος  $x(t)$  είναι ένας πραγματικός ή μιγαδικός αριθμός, χωρίς να παρουσιάζει αβεβαιότητα ως προς την τιμή του.
4. Τυχαία (random) ή Στοχαστικά (stochastic) Σήματα, όταν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή  $t$ , η τιμή του σήματος  $x(t)$  είναι τυχαία μεταβλητή και παρουσιάζει αβεβαιότητα ως προς την τιμή του.
5. Σήμα Συνεχούς Χρόνου (Αναλογικό Σήμα)  $x(t)$ : μια πραγματική ή μιγαδική συνάρτηση του χρόνου, στην οποία η ανεξάρτητη μεταβλητή  $t$  παίρνει τιμές στο σύνολο των πραγματικών αριθμών. Ένα αναλογικό σήμα (analog signal) είναι συνεχής συνάρτηση του χρόνου, με, επίσης, συνεχές πλάτος, το οποίο προκύπτει μέσω ενός μετατροπέα (transducer).



Εικόνα 2.1: Ημίτονο συχνότητας 0.4Hz, πλάτους 3 και αρχικής φάσης  $\pi/4$  στο χρονικό διάστημα  $-5 < t < 5$  sec.

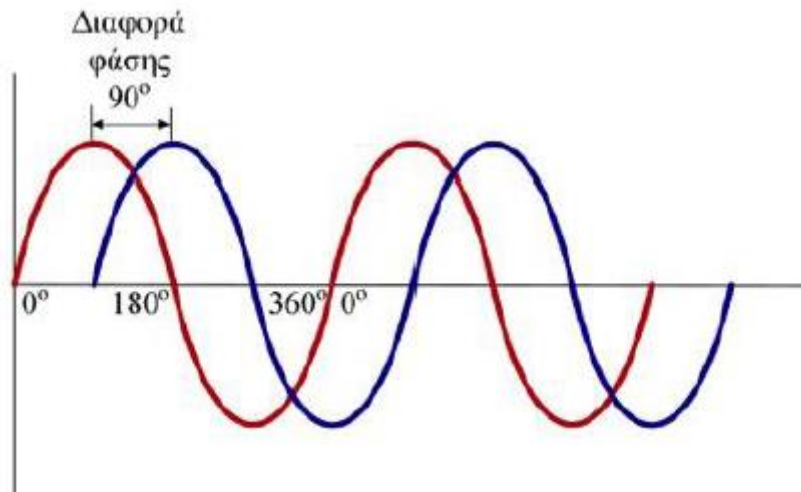
6. Σήμα Διακριτού Χρόνου (Ψηφιακό Σήμα)  $x[n]$ : ένα σήμα για το οποίο η ανεξάρτητη μεταβλητή,  $n$ , παίρνει τιμές στο σύνολο των ακεραίων. Οι διακριτές τιμές του χρόνου δεν ισαπέχουν κατ' ανάγκη, αλλά γενικά αναπαριστώνται έτσι, μόνο για μαθηματική και υπολογιστική ευκολία. Ένα σήμα διακριτού χρόνου (discrete-time signal) ορίζεται μόνο σε διακριτές χρονικές τιμές. Συνήθως, περιγράφονται σαν σειρές δειγμάτων, των οποίων τα πλάτη μπορούν να λάβουν συνεχείς τιμές. Τα δείγματα (samples) προκύπτουν από τη δειγματοληψία (sampling) του αναλογικού σήματος. Όταν κάθε δείγμα ενός σήματος διακριτού χρόνου είναι κβαντισμένο (quantized), και στη συνέχεια κωδικοποιημένο (coded), αναφέρεται σαν ψηφιακό σήμα (digital signal).



Εικόνα 2.2: Ημιτονοειδές σήμα διακριτού χρόνου πλάτους  $A=2$ , συχνότητας  $f_0=0.05$  Hz και αρχικής φάσης  $\theta=\pi/5$ .

7. Περιοδικό Σήμα: είναι το σήμα που επαναλαμβάνεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο αντιστοιχεί στην περίοδο του σήματος
8. Μη-Περιοδικά Σήματα: είναι τα σήματα που δεν ικανοποιούν τις συνθήκες της περιοδικότητας.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη διαφορά μεταξύ δεδομένων και σημάτων, και για τις δύο κατηγορίες που συζητάμε. Αναλογικά δεδομένα θεωρούνται τα δεδομένα που παράγονται από αναλογική πηγή πληροφορίας (π.χ. ηχητικά κύματα), ενώ τα αναλογικά σήματα χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν αναλογικά δεδομένα. Ένα αναλογικό σήμα είναι ένα συνεχές μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που μπορεί να μεταδοθεί από διάφορα μέσα μετάδοσης. Χαρακτηριστικά μεγέθη του είναι το πλάτος ( $A$  σε Volts), η περίοδος ( $T$  σε sec), η συχνότητα ( $f$  σε Hz) και η διαφορά φάσης ( $\varphi$  σε μοίρες ή rad), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Διαφορά φάσης μεταξύ δύο αναλογικών σημάτων.

Τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν από ψηφιακά σήματα με ένα διαφορετικό επίπεδο τάσης για κάθε ένα από τα δύο δυαδικά ψηφία. Ένα ψηφιακό σήμα είναι μία ακολουθία παλμών τάσης, που μπορούν να μεταδοθούν από διάφορα μέσα μετάδοσης, αναπαριστώντας με το δυαδικό 1 ένα σταθερό θετικό επίπεδο τάσης, και με το δυαδικό 0 ένα σταθερό αρνητικό επίπεδο τάσης.

## 2.2 Βασικές αρχές μετάδοσης δεδομένων

Η επιτυχής μετάδοση των δεδομένων εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: την ποιότητα του σήματος που μεταδίδεται, και τα χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης. Η μετάδοση δεδομένων επιτυγχάνεται μεταξύ του πομπού και του δέκτη πάνω από κάποιο μέσο μετάδοσης. Τα μέσα μετάδοσης μπορούν να χαρακτηριστούν ως καθοδηγούμενα ή χωρίς καθοδήγηση, αλλά και στις δύο περιπτώσεις η επικοινωνία γίνεται σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με τα καθοδηγούμενα μέσα μετάδοσης, τα κύματα οδηγούνται κατά μήκος μιας φυσικής διαδρομής. Παραδείγματα καθοδηγούμενων μέσων είναι το συνεστραμμένο ζεύγος, το ομοαξονικό καλώδιο και η οπτική ίνα. Τα μη καθοδηγούμενα μέσα παρέχουν ένα μέσο για τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, χωρίς όμως να τα καθοδηγούν. Παράδειγμα είναι η διάδοση μέσω αέρα, κενού, και θάλασσας.

Ο όρος απευθείας ζεύξη (direct link) χρησιμοποιείται για να αναφερθεί στη διαδρομή μετάδοσης μεταξύ δύο συσκευών, στις οποίες τα σήματα μεταδίδονται απευθείας από τον πομπό στον δέκτη, χωρίς ενδιάμεσες συσκευές, χωρίς να παρεμβάλλονται ενισχυτές ή επαναλήπτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την ισχύ του σήματος.

Ένα καθοδηγούμενο μέσο μετάδοσης αναφέρεται ως σημείο-προς-σημείο (point-to-point), αν, αφενός, παρέχει άμεση σύνδεση μεταξύ δύο συσκευών και, αφετέρου, αυτές είναι οι μόνες συσκευές που έχουν πρόσβαση στο μέσο. Σε μία πολυσημειακή (multipoint) διάταξη, περισσότερες από δύο συσκευές μοιράζονται το ίδιο μέσο.

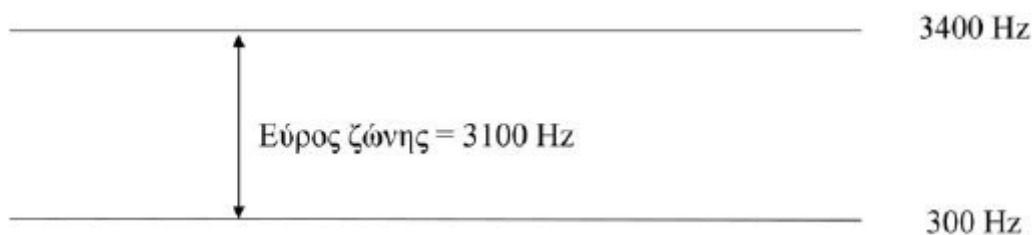
Η μετάδοση μπορεί να είναι μονόδρομη (simplex), ημι-αμφίδρομη (half-duplex) ή αμφίδρομη (full-duplex). Σε μία μονόδρομη μετάδοση, τα σήματα μεταδίδονται σε μία μόνο κατεύθυνση, δηλαδή, ένας σταθμός είναι ο πομπός και ο άλλος είναι ο δέκτης (π.χ. τηλε-ειδοποίηση). Στην ημι-αμφίδρομη λειτουργία και οι δύο σταθμοί μπορούν να μεταδίδουν, αλλά όχι ταυτόχρονα. Υπάρχει, με άλλα λόγια, ένας δίαυλος επικοινωνίας και για τις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή, ένας χρήστης μια δεδομένη στιγμή μπορεί είτε μόνο να εκπέμπει είτε μόνο να λαμβάνει (π.χ. push-to-talk). Συνήθως, είναι τα ραδιο-συστήματα οργανισμών κοινής ωφέλειας (π.χ. ΕΚΑΒ, ΔΕΗ, ΟΤΕ, κλπ.), τα walkie-talkie και οι ασυρμάτοι πομποδέκτες επί οχημάτων (Citizen's Band, CB). Σε πλήρη αμφίδρομη λειτουργία και οι δύο σταθμοί μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα. Στην τελευταία περίπτωση, το μέσο μεταφέρει τα σήματα στις δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα μέσω καναλιών επικοινωνίας (π.χ. κινητή τηλεφωνία).

### **Συχνότητα, φάσμα και εύρος ζώνης**

Τα σήματα που μεταδίδονται από έναν πομπό είναι συνήθως συναρτήσεως του χρόνου. Μπορούν, επίσης, να εκφραστούν ως συνάρτηση της συχνότητας, εξαιτίας του ότι το σήμα αποτελείται από συνιστώσες διαφορετικών συχνοτήτων. Γενικά, η μελέτη και ανάλυση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στο πεδίο του χρόνου είναι δύσκολη, οπότε για λόγους μαθηματικής ευκολίας αναλύουμε τη συμπεριφορά τους στο πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας μαθηματικά εργαλεία, όπως είναι η ανάλυση Fourier.

Μέχρι τώρα είδαμε ότι η απεικόνιση ενός σήματος χαρακτηρίζεται στο πεδίο του χρόνου από το πλάτος, τη συχνότητα και τη γωνία φάσης του. Μέσω της ανάλυσης Fourier προκύπτει η απεικόνιση στο πεδίο των συχνοτήτων, η οποία αναπαριστάται γραφικά από το φάσμα συχνοτήτων του σήματος ή απλώς το φάσμα (spectrum) του σήματος. Κατά συνέπεια, το φάσμα ενός σήματος είναι το εύρος συχνοτήτων που περιέχει αυτό το σήμα. Το εύρος ζώνης (bandwidth) του σήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, είναι η περιοχή συχνοτήτων μεταξύ της μέγιστης και

της ελάχιστης συχνότητας του μεταδιδόμενου σήματος, μέσω της οποίας μεταφέρεται όλη η ενέργεια του σήματος, χωρίς σημαντική εξασθένιση. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι δεν θα πρέπει να συγχέεται το εύρος ζώνης του σήματος με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων  $R$  του σήματος, αφού ο ρυθμός μετάδοσης αντιστοιχεί στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων μέσα από ένα κανάλι επικοινωνίας και εκφράζεται σε μονάδες bits/sec (ψηφιακό σήμα, μετάδοση δυαδικών ψηφίων) ή baud/sec (ψηφιακό σήμα, μετάδοση συμβόλων), ενώ το εύρος ζώνης εκφράζεται σε μονάδες Hz.



Εικόνα 2.4: Εύρος Ζώνης σήματος πληροφορίας.

### Θόρυβος

Η απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων υποβαθμίζεται σημαντικά με την παρουσία του θορύβου, που αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για την απόδοσή τους. Ο όρος θόρυβος (noise) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις ανεπιθύμητες κυματομορφές, που τείνουν να ενοχλούν τη μετάδοση και την επεξεργασία των σημάτων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, και πάνω στις οποίες δεν έχουμε πλήρη έλεγχο.

Ο θόρυβος μπορεί να διακριθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τον εξωτερικό και τον εσωτερικό θόρυβο. Ο εξωτερικός θόρυβος, ειδικότερα, δημιουργείται έξω από τον δέκτη, και τα είδη του διακρίνονται σε ατμοσφαιρικό (ή κρουστικό), βιομηχανικό και εξωγήινο θόρυβο. Στον ατμοσφαιρικό θόρυβο περιλαμβάνονται οι στατικές ξαφνικές εκκενώσεις των καταιγίδων και άλλων φυσικών ηλεκτρικών διαταραχών που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Ο βιομηχανικός θόρυβος περιλαμβάνει πηγές θορύβου, όπως ηλεκτρικές μηχανές, διαρροές από γραμμές υψηλών τάσεων και γενικά έναν μεγάλο αριθμό από ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Ο εξωγήινος θόρυβος προέρχεται από το διάστημα και διακρίνεται σε ηλιακό, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και σε κοσμικό, λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας.

Ο θόρυβος, ο οποίος αφορά τους τηλεπικοινωνιακούς δέκτες, είναι ο εσωτερικός θόρυβος και προέρχεται από κάθε ενεργή ή παθητική συσκευή που βρίσκεται μέσα στον δέκτη. Μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Θερμικός θόρυβος (Thermal noise)
2. Θόρυβος βολής (Shot noise)
3. Θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης (Inter-modulation noise)
4. Συνακρόαση (Cross-talk)

Ο θερμικός θόρυβος οφείλεται στη θερμική αναταραχή των ηλεκτρονίων, λόγω της τυχαίας κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων που εμφανίζεται σε όλα τα στοιχεία ενός κυκλώματος, και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος σε όλες τις συχνότητες, έχει φασματική πυκνότητα ισχύος σταθερή, και γι' αυτό καλείται λευκός θόρυβος (white noise). Είναι το πιο διαδεδομένο είδος θορύβου, θέτοντας ένα άνω όριο στην απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Ο θόρυβος βολής (ή θόρυβος Poisson) είναι ένα είδος ηλεκτρονικού θορύβου που προέρχεται από τη διακριτή φύση του ηλεκτρικού φορτίου, και προκύπτει από ένα φαινόμενο που σχετίζεται με τη ροή ρεύματος διαμέσου ημιαγωγικών επαφών. Στα είδη θορύβου των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων διακρίνεται, επίσης, και ο ηλεκτρονικός θόρυβος (flicker ή pink noise), που αφορά χαμηλές συχνότητες, αφού η φασματική πυκνότητα ισχύος του είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας.

Ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης προξενείται, όταν σήματα σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης. Παράγεται όταν υπάρχει μη γραμμικότητα στον πομπό, στον δέκτη ή στο σύστημα μετάδοσης που μεσολαβεί.

Η συνακρόαση είναι γνωστή στον καθένα ως το φαινόμενο που κατά τη διάρκεια μίας συνομιλίας κάποιος μπορεί ακούσια να ακούσει μία άλλη συνομιλία. Δημιουργείται από την ηλεκτρική επαγωγή μεταξύ κοντινών συνεστραμμένων ζευγών ή στις τηλεφωνικές γραμμές χαλκού ή στις γραμμές ομοαξονικών καλωδίων ή ακόμα και στα λαμβανόμενα ανεπιθύμητα σήματα στις κεραίες των δεκτών.

### **Εξασθένιση, παραμόρφωση και παρεμβολή σημάτων**

Λόγω της διάδοσης των σημάτων από το μέσο μετάδοσης, υπάρχουν μεταβολές στο πλάτος του σήματος που, γενικά, εξαρτώνται από την απόσταση, το μέσο μετάδοσης

και τη συχνότητα. Για τα καθοδηγούμενα μέσα, η εξασθένιση είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης και είναι ένας σταθερός αριθμός ανά μονάδα απόστασης. Στα μη καθοδηγούμενα μέσα όμως, η εξασθένιση είναι μία πολύπλοκη συνάρτηση της απόστασης, της συχνότητας και του περιβάλλοντος διάδοσης.

Η παραμόρφωση στα καθοδηγούμενα μέσα προκαλείται από το γεγονός ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι συνάρτηση της συχνότητας. Αν έχουμε, για παράδειγμα, ένα σήμα περιορισμένου εύρους ζώνης, η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη κοντά στην κεντρική συχνότητα, και μειώνεται στις δύο άκρες του εύρους ζώνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι διάφορες συνιστώσες της συχνότητας του σήματος να φθάσουν στον δέκτη σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, προκαλώντας μετατοπίσεις στις φάσεις μεταξύ των διαφορετικών συχνοτήτων. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, καλείται και παραμόρφωση καθυστέρησης.

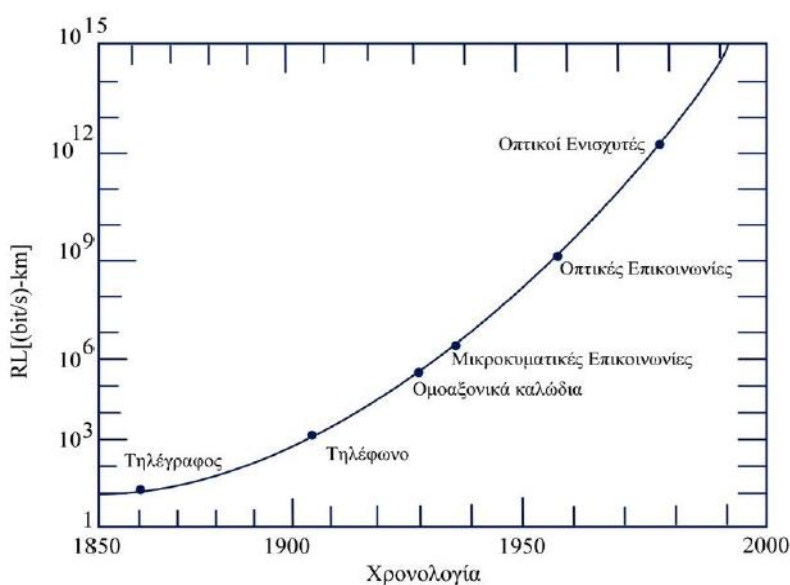
Η παραμόρφωση στα μη καθοδηγούμενα μέσα είναι ιδιαίτερα αντιληπτή, λόγω της σημαντικής εξάρτησης από τη συχνότητα και το περιβάλλον διάδοσης. Κατά τη διάδοση του σήματος, εκτός της εξασθένισης, οι μηχανισμοί διάδοσης εξαρτώνται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους, καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης που μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι τα λαμβανόμενα σήματα να υπόκεινται σε παραμόρφωση στον δέκτη, αφού τελικά έχουν αφιχθεί με διαφορετικό πλάτος και φάση, λόγω της διαφορετικής μεταβολής που έχει υποστεί η κάθε συχνοτική συνιστώσα του σήματος κατά τη διάδοση.

Στον δέκτη είναι πιθανό να φτάσουν σήματα που προέρχονται από τον ίδιο πομπό, αλλά ακολουθούν διαφορετικές πορείες. Η συμβολή των δύο σημάτων δίνει σήμα, η ισχύς του οποίου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται διαλείψεις (fading) και είναι ιδιαίτερα ενοχλητικά, συμβαίνουν συχνά, ιδίως κατά την κίνηση των δεκτών, και εξασθενούν το σήμα τόσο, ώστε ο δέκτης να το θεωρεί θόρυβο.

Η παρεμβολή είναι η πρόσμειξη στο επιθυμητό σήμα εξωτερικών σημάτων από πηγές, όπως ενισχυτές, καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κινούμενα μέρη μηχανημάτων, ηλεκτρονικά κυκλώματα, κ.ά. Η παρεμβολή συμβαίνει τις περισσότερες φορές στα ραδιοσυστήματα, οι κεραιές των δεκτών των οποίων λαμβάνουν πολλαπλά σήματα την ίδια χρονική στιγμή. Η παρεμβολή των ραδιοκυμάτων RF εμφανίζεται, επίσης, και σε ενσύρματα συστήματα, αν τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των σημάτων ή τα κυκλώματα των δεκτών

λάβουν σήματα από παραπλήσιες πηγές. Ένας αποτελεσματικός τρόπος καταπολέμησης των παρεμβολών είναι η χρήση φίλτρων, ώστε να αφαιρεθούν τα σήματα που καταλαμβάνουν διαφορετικό εύρος ζώνης σε έναν δέκτη από το επιθυμητό σήμα.

Όλα τα συνδεδεμένα κέντρα δικτύων και παροχής δεδομένων (αστικά, υπεραστικά) συνδέονται μεταξύ τους με ζευκτικές γραμμές. Οι γραμμές αυτές μπορούν να είναι καλώδια χαλκού, ομοαξονικά καλώδια, μικροκυματικά ασύρματα συστήματα ή οπτικές ίνες και ονομάζονται γραμμές μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς εισάγουν απώλειες στα σήματα που μεταφέρουν από τον πομπό προς τον δέκτη και χαρακτηρίζονται από το ρυθμό με τον οποίο είναι ικανές να μεταδώσουν την πληροφορία (bits/sec). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των απωλειών (εξασθένιση), τοποθετούνται κατά μήκος των γραμμών και σε αποστάσεις που εξαρτώνται κάθε φορά από τον τύπο της γραμμής μεταφοράς, κατάλληλοι επαναλήπτες, οι οποίοι είναι διατάξεις που καταπιέζουν την παραμόρφωση και τον θόρυβο και ενισχύουν το μεταδιδόμενο σήμα. Για παράδειγμα, στα ομοαξονικά καλώδια οι επαναλήπτες τοποθετούνται περίπου ανά 3-4 km, ενώ στις οπτικές ίνες ανά περίπου 60 km. Ένα κριτήριο αξιολόγησης των διαφόρων γραμμών μεταφοράς είναι το γινόμενο  $R \cdot L$ , όπου  $R$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας (bits/sec) και  $L$  (km) η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών επαναληπτών. Η ιστορική εξέλιξη των διαφόρων γραμμών μεταφοράς και η αύξηση του γινομένου  $R \cdot L$  με την πάροδο των ετών, αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: Ιστορική εξέλιξη των γραμμών μεταφοράς και αύξηση του γινομένου «ρυθμός μετάδοσης επί την απόσταση».



## Χωρητικότητα καναλιού

Ο θόρυβος αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα στη μετάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Ένας ακόμα σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι το εύρος ζώνης. Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι που τα δεδομένα παρουσιάζουν πεπερασμένο ρυθμό μετάδοσης πάνω από ένα κανάλι επικοινωνίας. Γενικότερα, οι περιορισμοί προκύπτουν από τις φυσικές ιδιότητες του μέσου μετάδοσης (εύρος ζώνης) ή από περιορισμούς του εύρους ζώνης στον πομπό, ώστε να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο των παρεμβολών από άλλες πηγές. Ο μέγιστος ρυθμός στον οποίο τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν αξιόπιστα από ένα κανάλι υπό ορισμένες συνθήκες αναφέρεται ως χωρητικότητα καναλιού (channel capacity).

Για να μπορέσει να αποτυπωθεί η έννοια της χωρητικότητας καναλιού στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, έχει αναπτυχθεί από τον Claude Shannon ένας απλός μαθηματικός τύπος. Για ένα συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου (ισχύς θορύβου) και για μία συγκεκριμένη ποσότητα λαμβανόμενου σήματος (ισχύς σήματος), προκύπτει ο ευρέως χρησιμοποιούμενος λόγος σήματος-προς-θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR).

Ο SNR αποτυπώνει το πόσες φορές η ισχύς ενός σήματος είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του θορύβου σε ένα συγκεκριμένο σημείο της μετάδοσης. Συνήθως, ο λόγος μετριέται στην είσοδο του δέκτη, όπου σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται η προσπάθεια ανάκτησης και επεξεργασίας του σήματος και απομάκρυνσης του ανεπιθύμητου θορύβου. Στις αναλογικές επικοινωνίες η μεγαλύτερη ισχύς βελτιώνει τη δυνατότητα να λάβουμε τα δεδομένα σωστά, για συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου. Δεν ισχύει όμως το ίδιο στις ψηφιακές επικοινωνίες. Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός δεδομένων, τόσο υψηλότερος είναι και ο αναμενόμενος ρυθμός των σφαλμάτων, αλλοιώνοντας, δηλαδή, τα λαμβανόμενα bits στον δέκτη, λόγω της παρουσίας του θορύβου. Όμως, όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός δεδομένων, τόσο υψηλότερος είναι και ο αναμενόμενος ρυθμός των σφαλμάτων, αλλοιώνοντας, δηλαδή, τα λαμβανόμενα bits στον δέκτη, λόγω της παρουσίας του θορύβου.

Ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο είναι σημαντικός για τη μετάδοση δεδομένων, επειδή θέτει το ανώτατο όριο στον επιτευξιμό ρυθμό δεδομένων. Ο Shannon απέδειξε ότι η μέγιστη χωρητικότητα  $C$  του καναλιού που ορίζεται σε bits/sec, δίνεται από την εξίσωση:

$$C = B \cdot \log_2 (1 + \text{SNR}) \text{ bits/s}$$

όπου  $B$  είναι το εύρος ζώνης του καναλιού σε Hz. Η σχέση, γνωστή ως νόμος Hartley-Shannon, αντιπροσωπεύει το θεωρητικό μέγιστο που μπορεί να επιτευχθεί, όμως στην πράξη επιτυγχάνονται πολύ χαμηλότεροι ρυθμοί. Ένας λόγος είναι επειδή ο τύπος του Hartley-Shannon υποθέτει μόνο λευκό (θερμικό) θόρυβο, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα άλλα είδη θορύβων.

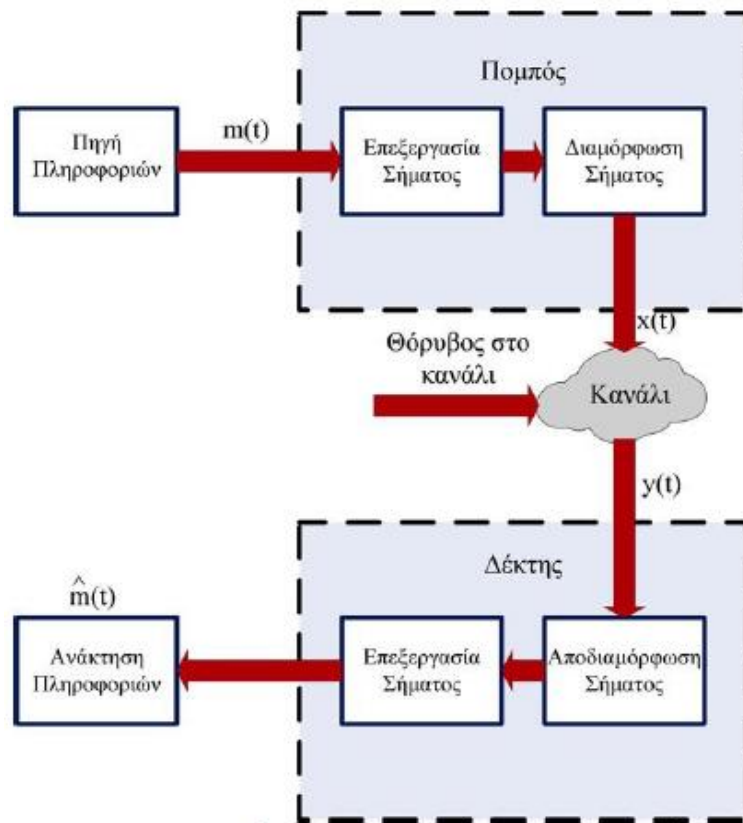
Η προηγούμενη αποτύπωση της χωρητικότητας αναφέρεται στη χωρητικότητα απαλλαγμένη από λάθη. Ο Shannon απέδειξε ότι, αν ο πραγματικός ρυθμός δεδομένων σε ένα κανάλι είναι μικρότερος από τη χωρητικότητα χωρίς λάθη, τότε είναι θεωρητικά εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο μορφοποιημένο σήμα, ώστε να επιτευχθεί η μετάδοση μέσω ενός καναλιού χωρίς λάθη. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι το θεώρημα του Shannon αποτελεί μόνο ένα πρακτικό κριτήριο απόδοσης των μεθόδων επικοινωνίας και δεν προτείνει τρόπους επιλογής των τεχνικών μετάδοσης και μορφοποίησης του σήματος.

### **2.3 Μοντέλο τηλεπικοινωνιακού συστήματος**

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα σχεδιάζονται για να αποστέλλουν μηνύματα από μία πηγή προς έναν ή περισσότερους παραλήπτες. Η μετάδοση πληροφορίας περιλαμβάνει ένα πολύ μεγάλο φάσμα διαφορετικών σεναρίων και εφαρμογών. Υπάρχουν διαφορές ως προς το είδος του πομπού και την πληροφορία προς μετάδοση, ως προς το μέσο μετάδοσης, ως προς το είδος του δέκτη, ως προς τον αριθμό των πομπών και δεκτών, ως προς το ποιος έχει πρόσβαση στην πληροφορία. Για να μπορέσουμε να απλοποιήσουμε την ανάλυση και τον σχεδιασμό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, υπάρχει η ανάγκη ενός γενικού, απλοποιημένου μοντέλου. Το μοντέλο αυτό πρέπει να είναι επαρκώς αφηρημένο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα συστήματα, κάνοντάς το ταυτόχρονα προσαρμόσιμο στις ιδιαιτερότητες κάθε συστήματος.

#### **Απλοποιημένο μοντέλο επικοινωνιών**

Το γενικό δομικό διάγραμμα ενός απλοποιημένου μοντέλου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, απεικονίζεται στην Εικόνα 2.6. Το σύστημα αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη για τη μεταφορά πληροφορίας ενός χρήστη (single-user communication). Μελετώντας και κατανοώντας το μοντέλο ενός χρήστη, μπορούμε να μεταβούμε στη μελέτη συστημάτων πολλαπλών χρηστών.



Εικόνα 2.6: Δομικό διάγραμμα ενός απλοποιημένου μοντέλου τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

- Πηγή πληροφορίας

Η πληροφορία που παράγεται από την πηγή, μπορεί να έχει τη μορφή της φωνής (ομιλίας), της εικόνας ή του απλού κειμένου σε κάποια συγκεκριμένη γλώσσα. Το φασματικό περιεχόμενο της πληροφορίας είναι στη βασική ζώνη, δηλαδή γύρω από τη μηδενική συχνότητα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της κάθε πηγής που παράγει πληροφορία είναι ότι η παραγωγή της περιγράφεται με στατιστικούς όρους. Δηλαδή, η έξοδος της πηγής δεν είναι ντετερμινιστική, αλλά παράγει στοχαστικά (τυχαία) σήματα και μηνύματα. Αν γνωρίζαμε τι περιμένουμε να λάβουμε στον δέκτη, δεν θα υπήρχε λόγος αποστολής του μηνύματος.

- Μετατροπές εισόδου/εξόδου

Συνήθως, απαιτείται ένας μετατροπέας για τη μετατροπή της εξόδου μιας πηγής σε ένα ηλεκτρικό σήμα κατάλληλο για μετάδοση. Για παράδειγμα, ένα μικρόφωνο χρησιμεύει ως μετατροπέας, που μετατρέπει ένα ακουστικό σήμα ομιλίας σε ένα ηλεκτρικό σήμα, και μια βιντεοκάμερα μετατρέπει την εικόνα σε ένα ηλεκτρικό σήμα. Στον τόπο προορισμού, απαιτείται ένας παρόμοιος μετατροπέας για τη

μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων που λαμβάνονται σε μια μορφή που είναι κατάλληλη για το χρήστη, π.χ., ακουστικά σήματα (ηχείο), εικόνες (οθόνη), κ.λπ.

Το κύριο τμήμα του συστήματος επικοινωνίας, ανεξάρτητα από την εφαρμογή του, αποτελείται από τρεις βασικές μονάδες: τον Πομπό (Transmitter), το Κανάλι (Channel) και τον Δέκτη (Receiver).

- Πομπός

Ο πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα (σήμα πληροφορίας) σε μια μορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσω του φυσικού καναλιού ή του μέσου μετάδοσης. Είναι ένα ντετερμινιστικό σύστημα που στέλνει στοχαστικά σήματα στο κανάλι επικοινωνίας. Κατά το στάδιο της επεξεργασίας του σήματος, πραγματοποιείται φιλτράρισμα του σήματος, και, αν αναφερόμαστε σε ψηφιακό σήμα, γίνεται μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter, ADC), και στη συνέχεια πραγματοποιείται κωδικοποίηση και κρυπτογράφηση του σήματος.

Η βαθμίδα της διαμόρφωσης μεταφράζει το σήμα πληροφορίας που πρέπει να μεταδοθεί στην κατάλληλη περιοχή συχνοτήτων που εκχωρείται στον πομπό, μέσω της διαμόρφωσης. Έτσι, τα σήματα που μεταδίδονται από πολλαπλούς ραδιοφωνικούς σταθμούς δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Παρόμοιες λειτουργίες εκτελούνται σε συστήματα τηλεφωνικής επικοινωνίας, όπου τα ηλεκτρικά σήματα ομιλίας από πολλούς χρήστες μεταδίδονται πάνω από το ίδιο καλώδιο. Σε γενικές γραμμές, ο πομπός εκτελεί την αντιστοίχιση του σήματος πληροφορίας στο κανάλι με μια διαδικασία, που ονομάζεται διαμόρφωση (modulation). Συνήθως, η διαμόρφωση περιλαμβάνει τη χρήση του σήματος πληροφορίας, ώστε να μεταβάλλει συστηματικά είτε το πλάτος, είτε τη συχνότητα, είτε τη φάση ενός φέροντος (υψίσυχνου ημιτονοειδούς σήματος ή παλμοσειράς), μεταφέροντας έτσι το σήμα βασικής ζώνης σε κατάλληλη ζώνη συχνοτήτων προς μετάδοση, και τότε το σήμα καλείται ζωνοπερατό. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία διαμόρφωσης καθιστά δυνατή τη μετάδοση πολλαπλών μηνυμάτων από πολλούς χρήστες επί του ίδιου φυσικού καναλιού.

Εκτός από τη διαμόρφωση, άλλες λειτουργίες, οι οποίες, συνήθως, πραγματοποιούνται στον πομπό, είναι το φιλτράρισμα του σήματος πληροφορίας, η ενίσχυση του διαμορφωμένου σήματος, καθώς και στην περίπτωση της ασύρματης μετάδοσης, η ακτινοβολία του σήματος με τη βοήθεια μίας κεραίας εκπομπής.

- Κανάλι ή διάυλος

Το κανάλι επικοινωνίας είναι το φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται για την αποστολή του σήματος από τον πομπό στον δέκτη και είναι στοχαστικό σύστημα. Στην ασύρματη μετάδοση, το κανάλι είναι, συνήθως, η ατμόσφαιρα (ελεύθερος χώρος, free space). Από την άλλη πλευρά, τα τηλεφωνικά κανάλια συχνά χρησιμοποιούν μία ποικιλία φυσικών μέσων, συμπεριλαμβανομένων των συνεστραμμένων καλωδίων, καλωδίων οπτικών ινών, καθώς και την ασύρματη ραδιοζεύξη. Όποιο και αν είναι το φυσικό μέσο μετάδοσης του σήματος, το ουσιώδες χαρακτηριστικό είναι ότι το μεταδιδόμενο σήμα θα υποστεί υποβάθμιση (εξασθένηση) κατά τυχαίο τρόπο από μία σειρά πιθανών μηχανισμών.

Η πιο κοινή μορφή της υποβάθμισης του σήματος εμφανίζεται με τη μορφή του προσθετικού θορύβου, ο οποίος δημιουργείται στο μετωπιαίο άκρο (front-end) του δέκτη, όπου εκτελείται η ενίσχυση του σήματος. Άλλη μορφή προσθετικού θορύβου είναι η εμφάνιση παρεμβολής από άλλους χρήστες του καναλιού, που προκύπτει συχνά σε ασύρματα και ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας.

Υπάρχει, επίσης, η πολυδιαδρομική (multipath) διάδοση ως μορφή υποβάθμισης, όπου τα σήματα φθάνουν στον δέκτη με χρονική διαφορά. Τέτοια παραμόρφωση του σήματος χαρακτηρίζεται ως μη-προσθετική διαταραχή του σήματος, που εκδηλώνεται με διαφορετικά είδωλα του ίδιου σήματος στο πεδίο του χρόνου, τα οποία έχουν διαφορετικό πλάτος και φάση, προκαλώντας το φαινόμενο της διάλειψης (fading).

Η προσθετική και μη-προσθετική παραμόρφωση, συνήθως, χαρακτηρίζονται ως τυχαία φαινόμενα και περιγράφονται με στατιστικούς όρους. Η επίδραση και των δύο ειδών παραμόρφωσης στο σήμα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό του συστήματος επικοινωνίας.

- Δέκτης

Η βασική λειτουργία του δέκτη είναι να ανακτήσει αξιόπιστα και πλήρως το σήμα πληροφορίας που περιέχεται στο λαμβανόμενο σήμα. Είναι ένα ντετερμινιστικό σύστημα που δέχεται στοχαστικά σήματα. Εάν το σήμα πληροφορίας μεταδίδεται με διαμόρφωση φέροντος, ο δέκτης εκτελεί την αποδιαμόρφωση φέροντος, με σκοπό να εξάγει την πληροφορία από το ημιτονοειδές φέρον. Δεδομένου ότι η αποδιαμόρφωση του σήματος εκτελείται υπό την παρουσία προσθετικού θορύβου και πιθανώς άλλων ειδών παραμόρφωσης του σήματος, το αποδιαμορφωμένο σήμα πληροφορίας είναι

γενικά υποβαθμισμένο σε κάποιο βαθμό από την παρουσία αυτών των παραμορφώσεων στο λαμβανόμενο σήμα. Η ακρίβεια του λαμβανόμενου σήματος πληροφορίας είναι συνάρτηση του τύπου διαμόρφωσης, της ισχύος του προσθετικού θορύβου, του τύπου και της ισχύος της κάθε άλλης προσθετικής παρεμβολής και το είδος της μη-προσθετικής παρεμβολής.

Κατά τη βαθμίδα της επεξεργασίας του σήματος, ο δέκτης εκτελεί έναν αριθμό περιφερειακών λειτουργιών, συμπεριλαμβανομένου του φιλτραρίσματος του σήματος, της καταστολής του θορύβου και της ανίχνευσης των συμβόλων, αν πρόκειται για ψηφιακό σήμα, ή της κυματομορφής του σήματος πληροφορίας, αν πρόκειται για αναλογικό σήμα.

## **2.4 Αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες**

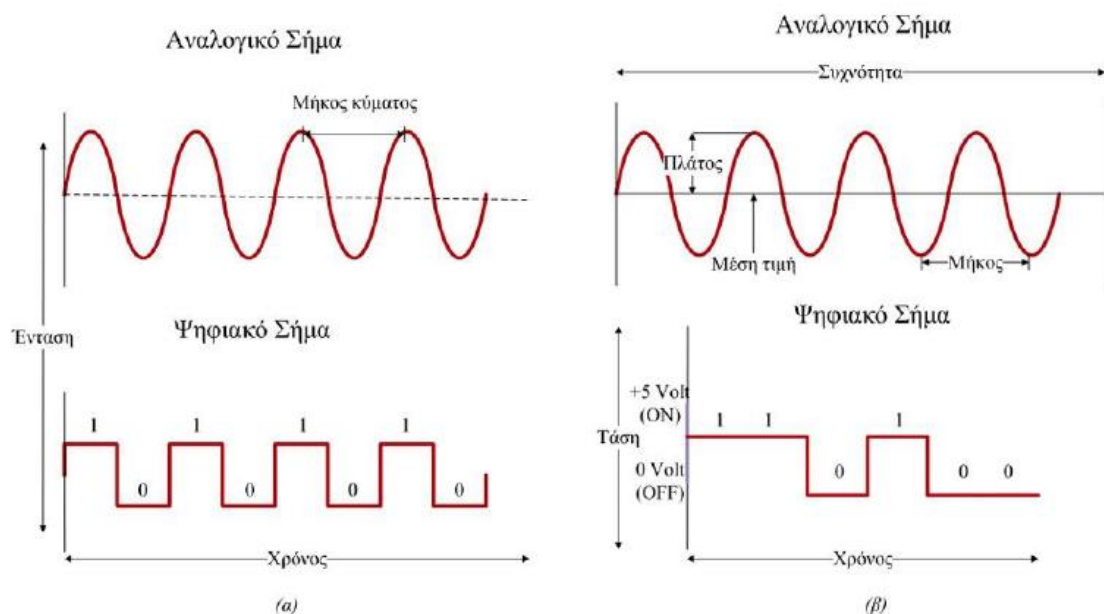
Τα αναλογικά και ψηφιακά σήματα μπορούν να μεταδοθούν μέσα από κατάλληλα μέσα μετάδοσης είτε με αναλογικό είτε με ψηφιακό τρόπο. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μετάδοσης δεδομένων ανάλογα με τα σήματα και τα δεδομένα και ανάλογα με τον τρόπο μεταχείρισης των σημάτων. Υπάρχουν, δηλαδή, αναλογικές μεταδόσεις με αναλογικό ή ψηφιακό σήμα πληροφορίας, το οποίο προέρχεται από αναλογικά (π.χ. ήχος, εικόνα) ή ψηφιακά δεδομένα (bits μέσω ενός modem), αδιαφορώντας για το περιεχόμενό τους. Αντίστοιχα, υπάρχουν ψηφιακές μεταδόσεις με αναλογικό ή ψηφιακό σήμα πληροφορίας, το οποίο προέρχεται από αναλογικά ή ψηφιακά δεδομένα, όπου η ψηφιακή μετάδοση σχετίζεται με το περιεχόμενο του σήματος.

Ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας, επεξεργασίας και μετάδοσης των σημάτων, τα σήματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα αναλογικά και τα ψηφιακά. Κατά προσέγγιση οι όροι αναλογικό και ψηφιακό μπορούν να αντιστοιχηθούν σε συνεχές και διακριτό αντίστοιχα.

Τα αναλογικά δεδομένα λαμβάνουν συνεχείς τιμές σε κάποιο διάστημα. Για παράδειγμα, το μικρόφωνο είναι ένα καλό υπόδειγμα αναλογικής πηγής, καθότι η τάση εξόδου (σε Volts) περιγράφει την πληροφορία του ήχου και είναι κατανεμημένη σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, λόγω της συνεχούς μεταβολής του.

Κατά συνέπεια, το αναλογικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα μεταφέρει προς τους προορισμούς του πληροφορία που προέρχεται από αναλογική πηγή, καταλαμβάνοντας ένα περιορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, και αναπαριστάνεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα που καταλαμβάνει το ίδιο εύρος ζώνης.

Η ψηφιακή πηγή πληροφορίας παράγει ένα πεπερασμένο σύνολο πιθανών μηνυμάτων. Η γραφομηχανή είναι ένα καλό παράδειγμα ψηφιακή πηγής, η οποία δημιουργεί ένα πεπερασμένο σύνολο χαρακτήρων (μηνύματα) που μπορούν να μεταδοθούν από αυτή την πηγή. Κατά συνέπεια, το ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα μεταφέρει προς τους προορισμούς του πληροφορία που προέρχεται από ψηφιακή πηγή προς τους προορισμούς του. Έτσι μία ψηφιακή κυματομορφή ορίζεται ως μία συνάρτηση του χρόνου που μπορεί να λάβει μόνο ένα διακριτό σύνολο τιμών. Αν η ψηφιακή κυματομορφή είναι δυαδικού χαρακτήρα, τότε μόνο δύο τιμές επιτρέπονται. Οι κυματομορφές του αναλογικού και ψηφιακού σήματος και τα αντίστοιχα μεγέθη τους απεικονίζονται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: (α) Κυματομορφή αναλογικού και ψηφιακού σήματος (β) μεγέθη αναλογικού και ψηφιακού σήματος.

Ένα ηλεκτρονικό ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα, συνήθως, περιλαμβάνει τάσεις και ρεύματα που έχουν ψηφιακές κυματομορφές. Όμως, μπορεί να περιλαμβάνει και αναλογικές κυματομορφές. Για παράδειγμα, η πληροφορία από μία δυαδική πηγή μπορεί να μεταδοθεί χρησιμοποιώντας μία ημιτονική κυματομορφή των 1000 Hz για την αναπαράσταση του δυαδικού 1 και μία ημιτονική κυματομορφή των 500 Hz για την αναπαράσταση του δυαδικού 0. Δηλαδή, η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας πραγματοποιείται με τη χρήση αναλογικών κυματομορφών.

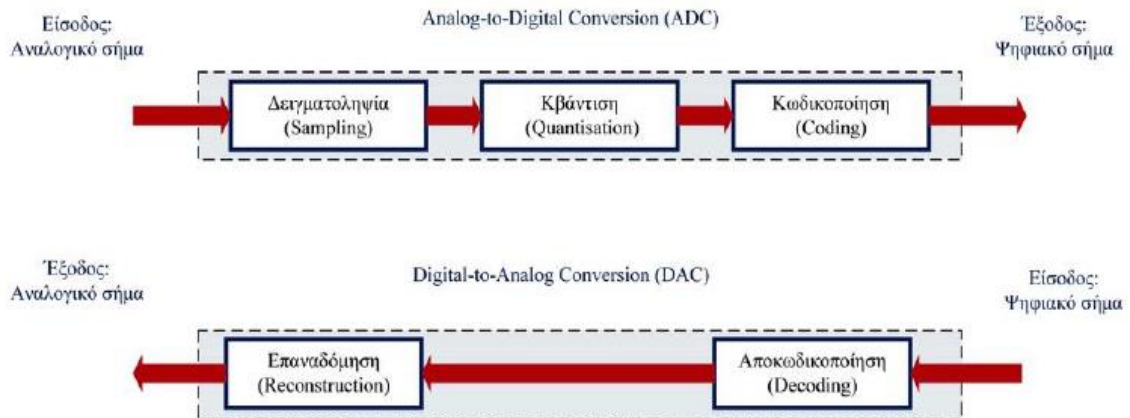
Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δίνεται στην Εικόνα 2.8, όπου τα ψηφιακά σήματα μπορούν να αναπαρασταθούν από αναλογικά σήματα μέσω ενός modem (modulator/demodulator - διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής). Το modem μετατρέπει μια

σειρά δυαδικών παλμών τάσης σε ένα αναλογικό σήμα, κωδικοποιώντας τα ψηφιακά δεδομένα σε μια φέρουσα συχνότητα (carrier frequency). Το προκύπτον σήμα καταλαμβάνει ένα καθορισμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων με κέντρο τη φέρουσα συχνότητα, και μπορεί να μεταδοθεί σε ένα μέσο κατάλληλο για τον εν λόγω φέρον.

Σε μια λειτουργία πολύ παρόμοια με εκείνη που εκτελείται από ένα μόντεμ, τα αναλογικά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν από ψηφιακά σήματα. Η συσκευή που εκτελεί αυτή τη λειτουργία είναι ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog-to-Digital Converter, ADC). Ο ADC λαμβάνει ένα αναλογικό σήμα που αντιπροσωπεύει τα αναλογικά δεδομένα και προσεγγίζει αυτό το σήμα με μία ακολουθία δυαδικών ψηφίων (bits), με τη χρήση των τεχνικών δειγματοληψίας (sampling), κβάντισης (quantization) και κωδικοποίησης (coding).

Κατά τη δειγματοληψία λαμβάνονται δείγματα τάσης του αναλογικού σήματος σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, διακριτοποιώντας τα ως προς τον χρόνο. Ο ρυθμός δειγματοληψίας  $f_s$  εξαρτάται από το εύρος ζώνης του σήματος ή την υψηλότερη συχνότητα του σήματος πληροφορίας  $f$ , και η ελάχιστη τιμή του προκύπτει από το θεώρημα του Nyquist,  $f_s \geq 2f$ , ώστε να διασφαλιστεί η πιστή ανακατασκευή του σήματος στον δέκτη. Στη συνέχεια, η διακριτικοποίηση ως προς τις τιμές του σήματος συνεχούς χρόνου ονομάζεται κβάντιση. Η τελευταία βαθμίδα είναι του κωδικοποιητή (encoder), που αντιστοιχεί κάθε κβαντισμένο δείγμα του αναλογικού σήματος σε κατάλληλη δυαδική μορφή (σύμβολο), βασισμένη σε ένα προκαθορισμένο σχήμα κωδικοποίησης (code). Στον δέκτη, η ακολουθία των bits χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή των αναλογικών δεδομένων κάνοντας χρήση του μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital-to-Analog Converter, DAC), όπου ο αποκωδικοποιητής (decoder) μετατρέπει την ακολουθία των λαμβανόμενων κωδικοποιημένων ψηφιακών συμβόλων σε κατάλληλες στάθμες κβάντισης του σήματος. Στη συνέχεια, τα κβαντισμένα δείγματα εισέρχονται στη βαθμίδα επαναδόμησης (reconstruction) που περιλαμβάνει ένα φίλτρο, και δημιουργείται μία προσέγγιση του αρχικού σήματος. Στην Εικόνα 2.8 φαίνεται η λειτουργία του ADC και DAC αντίστοιχα.





Εικόνα 2.8: Μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) και ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC).

Η αναλογική μετάδοση, όπου όλες οι λεπτομέρειες των σημάτων πρέπει να αναπαράγονται ακριβώς, παρουσιάζει συγκεκριμένα μειονεκτήματα:

- Μικρή ακτίνα κάλυψης λόγω του θορύβου.
- Ασύμφορη, γιατί μία μετάδοση καταλαμβάνει όλο το μέσο.
- Μεταφέρεται πληροφορία που δεν είναι απαραίτητη.
- Παρουσιάζει μερική ασυμβατότητα με την ψηφιακή τεχνολογία των πληροφοριακών συστημάτων.

Η ψηφιακή μετάδοση, όπου μόνο διακεκριμένες στάθμες πρέπει να αναπαράγονται, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης λόγω χρησιμοποίησης τεχνικών για τη διόρθωση σφαλμάτων και τη χρήση αναμεταδοτών (δυνατότητα να διαχωρίσουμε την πληροφορία από τον θόρυβο).
- Χαμηλό κόστος κατασκευής ψηφιακού εξοπλισμού.
- Ασφαλέστερη διακίνηση της πληροφορίας.
- Καλύτερη χρήση των πόρων του συστήματος.
- Μεταφορά μόνο χρήσιμης πληροφορίας.
- Συμβατότητα με πληροφοριακά συστήματα.

Αλλά και μειονεκτήματα:

- Γενικά, απαιτείται περισσότερο εύρος ζώνης απ' ό,τι στα αναλογικά, κάτω από συνθήκες υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων πληροφορίας.
- Απαιτείται πολύ καλός συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων ξεπερνούν τα μειονεκτήματα και, κατά συνέπεια, γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή. Αρκετά αναλογικά συστήματα επικοινωνίας έχουν ήδη αντικατασταθεί πλήρως από αντίστοιχα ψηφιακά (π.χ. ψηφιακή επίγεια τηλεόραση).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ**

### **3.1 Ασύρματη μετάδοση**

Η ασύρματη μετάδοση των σημάτων γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παράγονται (ακτινοβολούνται) από κεραίες. Διακρίνονται δύο είδη επικοινωνίας για την ασύρματη μετάδοση, ανάλογα με τον σκοπό, τη χρήση, τον επιτυγχανόμενο ρυθμό μετάδοσης και το πλήθος των χρηστών:

1. η κατευθυντική (directional), όπου το σήμα κατευθύνεται σε συγκεκριμένη ηλεκτρομαγνητική δέσμη, και
2. η ομοιο-κατευθυντική (omni-directional), όπου το σήμα διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

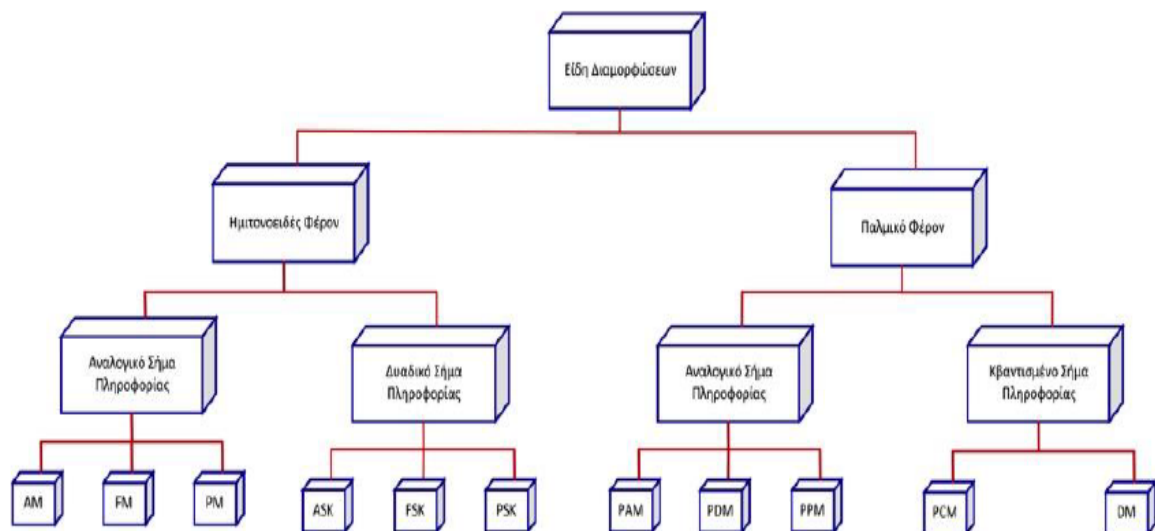
Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μετάδοση, με το φάσμα συχνοτήτων να αποτελεί τον σπάνιο πόρο και το αντικείμενο διεκδίκησης. Γενικά, οι υψηλές συχνότητες εξασφαλίζουν μεγάλες τηλεπικοινωνιακές χωρητικότητες, αλλά και μεγάλες εξασθενήσεις. Αντίστοιχα, οι χαμηλές συχνότητες εξασφαλίζουν αξιόπιστη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά με χαμηλό ρυθμό. Οι εφαρμογές των ασύρματων μεταδόσεων περιλαμβάνουν τη μετάδοση πληροφορίας σε δορυφορικά δίκτυα και επίγεια ασύρματα δίκτυα, όπως π.χ. ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (GSM, UMTS, LTE), ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN).

#### **Διαμόρφωση σημάτων**

Για να μπορέσει να μεταδοθεί η πληροφορία αξιόπιστα και αποδοτικά σε μεγάλες αποστάσεις, γίνεται χρήση της διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση περιλαμβάνει δύο σήματα: το προς διαμόρφωση σήμα που αναπαριστά το σήμα πληροφορίας (χαμηλή συχνότητα) και το φέρον σήμα (ή φέρουσα κυματομορφή ή απλώς φέρον) που βρίσκεται σε υψηλή συχνότητα, το οποίο μπορεί να είναι είτε αναλογικό σήμα είτε παλμοσειρά και ανταποκρίνεται στην κατάλληλη εφαρμογή (αναλογική, ψηφιακή). Ο διαμορφωτής μεταβάλλει συστηματικά τη φέρουσα κυματομορφή με τις μεταβολές του σήματος διαμόρφωσης και το προκύπτον διαμορφωμένο σήμα 'φέρει' το σήμα πληροφορίας. Γενικά, η διαμόρφωση πρέπει να είναι μία αντιστρεπτή διαδικασία,

όπου η πληροφορία μπορεί να ανακτηθεί από μία συμπληρωματική διεργασία που καλείται αποδιαμόρφωση.

Υπάρχουν πολλά είδη και τεχνικές διαμορφώσεων, τα οποία εξαρτώνται από το είδος του σήματος πληροφορίας και το είδος του φέροντος που χρησιμοποιείται. Ανάλογα με το είδος του φέροντος κύματος, διακρίνεται η διαμόρφωση συνεχούς φέροντος κύματος (Continuous Wave, CW) και παλμικού φέροντος. Ανάλογα με το είδος της πληροφορίας που διαμορφώνεται (αναλογικό ή ψηφιακό) και το είδος του φέροντος κύματος (αναλογικό ή παλμικό φέρον), διακρίνονται οι διαμορφώσεις πλάτους (Amplitude Modulation, AM), συχνότητας (Frequency Modulation, FM), φάσης (Phase Modulation, PM), πλάτους παλμών (Pulse Amplitude Modulation, PAM), διάρκειας παλμών (Pulse Code Modulation, PDM), θέσης παλμών (Pulse Position Modulation, PPM), μεταλλαγής μετατόπισης πλάτους (Amplitude Shift Keying, ASK), μεταλλαγής μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shift Keying, FSK), μεταλλαγής μετατόπισης φάσης (Phase Shift Keying, PSK), παλμοκωδική διαμόρφωση (Pulse-Coded Modulation, PCM) και διαμόρφωση Δέλτα (Delta Modulation, DM). Όλα τα είδη διαμόρφωσης απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Διάφορα είδη διαμόρφωσης.

Ο κύριος σκοπός της διαμόρφωσης σε ένα επικοινωνιακό σύστημα είναι να παράγει ένα κατάλληλα διαμορφωμένο σήμα που να μπορεί να μεταδοθεί πάνω από ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης αφορούν:

- Διαμόρφωση για αποδοτική μετάδοση

Η μετάδοση σημάτων πάνω από μία αξιοσημείωτη απόσταση πάντα περιλαμβάνει ένα οδεύον ηλεκτρομαγνητικό κύμα, σε καθοδηγούμενο ή μη μέσο. Η απόδοση οποιασδήποτε μεθόδου μετάδοσης εξαρτάται από τη συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά της επιλογής του φέροντος εξαρτώνται κυρίως από τη συχνότητα διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, η διάδοση οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS) προϋποθέτει κεραία, όπου η φυσική της διάσταση θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1/10 του μήκους κύματος του σήματος μετάδοσης. Μία αδιαμόρφωτη μετάδοση στην ακουστική συχνότητα των 100 Hz θα χρειαζόταν κεραία μήκους 300 km. Μία διαμορφωμένη μετάδοση στη συχνότητα των 100 MHz (ραδιοφωνική μετάδοση FM) χρειάζεται ένα πρακτικό μέγεθος κεραίας της τάξης των 30 cm.

- Διαμόρφωση για την εξάλειψη των περιορισμών του υλισμικού (hardware)

Η σχεδίαση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μπορεί να περιορίζεται λόγω του κόστους και της διαθεσιμότητας του υλικού, του οποίου η απόδοση εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας. Η διαμόρφωση επιτρέπει στον σχεδιαστή να θέσει το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων που να αποτρέπει τους περιορισμούς του υλικού. Ειδική μεταχείριση γίνεται για την επιλογή του κατάλληλου κλασματικού εύρους ζώνης (fractional bandwidth), το οποίο ορίζεται ως το απόλυτο εύρος ζώνης προς την κεντρική χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Γενικά, προτιμάται το ποσοστό του κλασματικού εύρους ζώνης να κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, περίπου 1-10 %.

- Διαμόρφωση για την υποβάθμιση του θορύβου και των παρεμβολών

Μία μέθοδος για την καταπολέμηση του θορύβου και των παρεμβολών είναι η αύξηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος μέχρι να υπερκεράσει τα εμπόδια που δημιουργεί ο θόρυβος και οι παρεμβολές. Όμως, η αύξηση της ισχύος κοστίζει ακριβά και μπορεί να βλάψει τον εξοπλισμό. Ευτυχώς, η διαμόρφωση FM και μερικά άλλα είδη διαμορφώσεων έχουν την ιδιότητα της καταπίεσης του θορύβου και των παρεμβολών. Αυτή η ιδιότητα καλείται μείωση του θορύβου ευρείας ζώνης (wideband noise reduction), επειδή προϋποθέτει το εύρος ζώνης μετάδοσης να είναι πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του προς διαμόρφωση σήματος (σήματος πληροφορίας). Δηλαδή, η διαμόρφωση ευρείας ζώνης επιτρέπει στον σχεδιαστή την ανταλλαγή του εύρους ζώνης με την ισχύ μετάδοσης.

- Διαμόρφωση για την εκχώρηση συχνοτήτων

Όταν συντονίζει κάποιος τον δέκτη σε έναν ραδιοφωνικό ή τηλεοπτικό σταθμό, επιλέγει ένα από τα περισσότερα λαμβανόμενα σήματα. Επειδή ο κάθε σταθμός έχει μία ξεχωριστή εκχωρημένη κεντρική συχνότητα, το επιθυμητό σήμα μπορεί να διαχωριστεί από τα άλλα με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων. Αν δεν υπήρχε η διαμόρφωση, μόνο ένας σταθμός θα μπορούσε να μεταδίδει σήματα σε μία περιοχή.

- Διαμόρφωση για την πολυπλεξία σημάτων

Η πολυπλεξία είναι μία διαδικασία κατά την οποία πολλά σήματα συνδυάζονται, ώστε να μεταδοθούν ταυτόχρονα πάνω από ένα κανάλι επικοινωνίας. Υπάρχουν τέσσερα είδη πολυπλεξίας με βάση:

1. τη συχνότητα (Frequency Division Multiplexing, FDM), όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικές φέρουσες συχνότητες για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων,
2. τον χρόνο (Time Division Multiplexing, TDM), όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικές μη επικαλυπτόμενες χρονικές σχισμές (timeslots) για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων,
3. το μήκος κύματος (Wavelength division multiplexing, WDM) σε περιπτώσεις μετάδοσης οπτικών σημάτων και
4. τη στατιστική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Statistical time division multiplexing, STDM), που χρησιμοποιείται στις ψηφιακές επικοινωνίες, με το κανάλι επικοινωνίας να διαιρείται σε πολλαπλά κανάλια μεταβλητού ρυθμού, καταλαμβάνοντας δυναμικό εύρος ζώνης.

Εφαρμογές της πολυπλεξίας περιλαμβάνουν τη στερεοφωνική FM μετάδοση, την καλωδιακή τηλεόραση και την υπεραστική τηλεφωνία. Μία παραλλαγή της πολυπλεξίας είναι η πολλαπλή πρόσβαση (Multiple Access, MA), η οποία περιλαμβάνει τον εξ αποστάσεως καταμερισμό των πόρων. Για παράδειγμα, η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code-Division Multiple Access, CDMA) εκχωρεί έναν μοναδικό κωδικό σε κάθε χρήστη, με τέτοιο τρόπο, ώστε οι μεταδόσεις να είναι ασυσχέτιστες μεταξύ πομπού και δέκτη. Εφόσον η τεχνική CDMA επιτρέπει διαφορετικούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων ταυτόχρονα, παρέχεται με αυτόν τον τρόπο αύξηση της απόδοσης του φάσματος.

### 3.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ονομάζεται το σύνολο των ακτινοβολιών που μεταφέρουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή, τοπικών και χρονικών μεταβολών του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου. Τα περισσότερα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στα οποία είμαστε εκτεθειμένοι είναι κατασκευασμένα από τον άνθρωπο (τεχνητά), αλλά μερικά προκύπτουν από τη φύση (φυσικά).

Το πιο διαδεδομένο και διαρκές φυσικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι το μαγνητικό πεδίο της ίδιας της γης, το οποίο υπάρχει παντού στον πλανήτη και στο διάστημα. Παρόλο που το μαγνητικό πεδίο της γης είναι παντού γύρω μας, είναι πολύ χαμηλής ισχύος, μόνο περίπου 500 milligauss. Γενικότερα, η ακτινοβολία επιδρά στον ανθρώπινο οργανισμό κατά πολύπλοκο τρόπο, άλλοτε με ευεργετικές και άλλοτε με βλαβερές συνέπειες, ανάλογα με το είδος, την ένταση και την ενέργεια που μεταφέρει.

#### Πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Οι πηγές της ηλεκτρομαγνητικής (H/M) ακτινοβολίας είναι φυσικές και τεχνητές και βρίσκονται παντού στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Μερικές από αυτές είναι:

- Ηλεκτροφόρα καλώδια.
- Τηλεφωνικά καλώδια.
- Πομποί ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών σταθμών και ραντάρ.
- Κινητά τηλέφωνα.
- Δορυφορικές επικοινωνίες.
- Ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές οικιακές συσκευές ή χώρου εργασίας, όπως: ηλεκτρικοί φούρνοι, ηλεκτρική θέρμανση, φούρνοι μικροκυμάτων, ηλεκτρικοί συσσωρευτές, ηλεκτρικές αντιστάσεις θέρμανσης πατώματος, στεγνωτήρες μαλλιών, ηλεκτρονικά παιχνίδια, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ηλεκτρικές κουβέρτες και θερμαινόμενα στρώματα ύδατος.
- Ασύρματες, ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές.
- Συστήματα γείωσης που προστατεύουν από κεραυνούς ή από ελαττωματικές οικιακές συσκευές.
- Φυσικές πηγές (π.χ. Ήλιος).
- Κοσμική ακτινοβολία.
- Πηγές Ακτίνων X.

- Πηγές Ακτίνων  $\gamma$ .

### **Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**

Φάσμα ονομάζουμε το σύνολο των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων για τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελείται από αόρατα, στην πλειονότητά τους, κύματα. Μόνο ένα μικρό μέρος της ακτινοβολίας μπορεί να εντοπισθεί από το ανθρώπινο μάτι και αποτελεί το ορατό φως που παράγει τα χρώματα του ουράνιου τόξου.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία κυμαίνεται από το ηλιακό φάσμα, ακτίνες  $\gamma$  και ακτίνες X με πολύ χαμηλά μήκη κύματος και πολύ υψηλές συχνότητες (περιοχή άνω των 300 GHz), μέχρι το ορατό φως, ακτίνες με μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως υπέρυθρες ακτινοβολίες, μικροκύματα, ραντάρ, UHF και VHF τηλεοπτικά σήματα, ραδιοκύματα (περιοχή μέχρι 300 GHz) και τις πολύ χαμηλές και εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (ELF) με εύρος των 50 μέχρι 60 Hertz. Όσο υψηλότερη η συχνότητα της ακτινοβολίας, τόσο μικρότερο το μήκος κύματος.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, μεταφέροντας ενέργεια και πληροφορίες. Η θεμελιώδης σχέση ανάμεσα στη συχνότητα  $f$ , στο μήκος κύματος  $\lambda$  και στην ταχύτητα του φωτός  $c$  είναι  $c=\lambda*f$ . Κατά συνέπεια, το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Τα διάφορα είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με τη συχνότητα ή το μήκος κύματος του διαδιδόμενου κύματος. Η συχνότητα μετράται σε Hz (ταλαντώσεις ή κύκλοι ανά δευτερόλεπτο), ενώ το μήκος κύματος μετράται σε μονάδες απόστασης (μέτρα, εκατοστά κ.λπ.).

Οι περιοχές του φάσματος, της μη ιονίζουσας (στατικά και χαμηλόσυχα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, ραδιοκύματα και μικροκύματα, υπέρυθρη, ορατή και υπεριώδης ακτινοβολία) και της ιονίζουσας (υπεριώδης UV και σωματιδιακή ακτινοβολία, ακτίνες X, ακτίνες  $\gamma$ ) ακτινοβολίας αναλύονται ως εξής:

- Ακτίνες  $\gamma$

Έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα και τα μικρότερα μήκη κύματος εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά, αλλά βρίσκονται και στο διάστημα. Οι ακτίνες αυτές έχουν εκπληκτική διατρητική ικανότητα, που μπορούν να διατρήσουν μια επιφάνεια



τισμέντου με πάχος 3 μέτρα. Τα μήκη κύματος αυτής της ακτινοβολίας εκτείνονται από 0.0001 έως 0.000001 νανόμετρα (1 νανόμετρο =  $10^{-9}$  μέτρα).

- Ακτίνες X

Η συχνότητά τους βρίσκεται σε τιμές μεταξύ των ακτίνων  $\gamma$  και των υπεριώδων ακτίνων. Έχουν τέτοια διατρητική ικανότητα, ώστε να διαπερνούν εύκολα αρκετά υλικά και να καταστρέφουν ιστούς δέρματος. Η ικανότητα της διαφορετικής απορρόφησής της από τους ιστούς ή τα οστά έχει οδηγήσει τους επιστήμονες στο να χρησιμοποιούν τις ακτίνες X, ώστε να παρατηρούν το ανθρώπινο σώμα, όπως συμβαίνει με τις ακτινογραφίες. Τα μήκη κύματος των ακτίνων X εκτείνονται από 1 μέχρι 0.0001 νανόμετρα.

- Υπεριώδης ακτινοβολία (UV)

Έχει συχνότητες λίγο παραπάνω από αυτές του ορατού φωτός, ωστόσο η έντασή της είναι τέτοια που μπορεί να καταστρέψει ιστούς και κύτταρα, αφού μια περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας ανήκει στις ιονίζουσες. Οι πηγές της UV ακτινοβολίας περιλαμβάνουν τον ήλιο, τα μαύρα φώτα, τις συσκευές οξυγονοκόλλησης και τα UV λέιζερ. Τα φωτόνια της υπεριώδους ακτινοβολίας έχουν υψηλή ενέργεια, λόγω της υψηλής συχνότητάς τους και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη, μη περιοριζόμενη μόνο στη θέρμανση του σώματος που την απορροφά, αλλά μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμα και σε καρκίνο. Η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται ευρέως στον επιστημονικό χώρο σε διάφορα πειράματα, καθώς και από τους αστρονόμους για την παρατήρηση του ηλιακού συστήματος, του γαλαξία μας και άλλων περιοχών του σύμπαντος. Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας εκτείνεται από 50 μέχρι 400 νανόμετρα.

- Ορατή ακτινοβολία

Τα χρώματα ενός ουράνιου τόξου, δηλαδή η ακτινοβολία που μπορεί να εντοπιστεί από το ανθρώπινο μάτι (από 400 έως 700 νανόμετρα) είναι ένα πολύ μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο ήλιος είναι η σημαντικότερη πηγή, όπως επίσης σε μικρότερη κλίμακα οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες πυρακτώσεως και φθορισμού. Τα μάτια μας αντιλαμβάνονται τις διαφορετικές ορατές συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ως διαφορετικά χρώματα. Ακόμα και η ορατή ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τα μάτια και το δέρμα, όταν αυτή είναι έντονη.

- Υπέρυθρη ακτινοβολία

Εκτείνεται από εκεί που σταματάει η ορατή ακτινοβολία, δηλαδή περίπου από τα 700 νανόμετρα, μέχρι περίπου το ένα χιλιοστό. Η ακτινοβολία αυτή γίνεται αντιληπτή κυρίως από την θέρμανση που προκαλεί. Έτσι, το δέρμα και τα μάτια απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία ως θερμότητα. Όλα τα σώματα λίγο έως πολύ εκπέμπουν θερμότητα σε αυτά τα μήκη κύματος ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Οι πιο κοινές χρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν να κάνουν με τη νυχτερινή όραση, τους ανιχνευτές σε δορυφόρους και αεροπλάνα, καθώς και την αστρονομία. Πηγές υπέρυθρης ακτινοβολίας (infrared, IR) αποτελούν οι φούρνοι, οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες θερμότητας και τα λέιζερ IR.

- Μικροκύματα (MW)

Έχουν μήκος κύματος που εκτείνεται από ένα χιλιοστό μέχρι 30 εκατοστά. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε αυτήν την ακτινοβολία για την μετάδοση σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις, όπως π.χ. οι υπεραστικές τηλεφωνικές κλήσεις, κινητή τηλεφωνία, μετάδοση τηλεοπτικού σήματος, δορυφορικές επικοινωνίες, κ.ά., καθώς και για τη λειτουργία των φούρνων μικροκυμάτων. Τα μικροκύματα είναι ένα μέρος μιας μεγαλύτερης κατηγορίας ακτινοβολίας, που ονομάζονται ραδιοκύματα.

- Ραδιοκύματα (RF)

Εκπέμπονται από τη Γη, τα κτίρια, τα αυτοκίνητα και άλλα μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα. Πάνω στα ραδιοκύματα έχει βασιστεί η λειτουργία των ραντάρ, τα οποία ανιχνεύουν την παρουσία και την κίνηση σωμάτων που εκπέμπουν αυτού του τύπου την ακτινοβολία. Τα ραδιοκύματα, επίσης, είναι ευρέως γνωστά για την ικανότητά τους να μεταφέρουν ραδιοφωνικά σήματα, σήματα τηλεόρασης, κινητής τηλεφωνίας κ.ά. Τα ραδιοκύματα έχουν μήκος κύματος που εκτείνεται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή, από ένα εκατοστό έως δεκάδες και εκατοντάδες μέτρα.

### **Ιονίζουσα και μη-ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που σχετίζεται με το μήκος κύματος και τη συχνότητα, είναι η ενέργεια που μεταφέρεται. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρονται από σωματίδια που ονομάζονται κβάντα. Στην υψηλή συχνότητα (άρα στα μικρά μήκη κύματος) η κβαντική ενέργεια είναι πολύ μεγάλη. Όταν η μεταφερόμενη ενέργεια είναι μεγάλη, τότε σπάζουν οι δεσμοί

μεταξύ των μορίων. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο και έχει ως αποτέλεσμα αλλοιώσεις του γενετικού κώδικα του DNA και κατά συνέπεια, την πρόκληση καρκίνου και άλλων σοβαρών ασθενειών.

Αλλοιώσεις και βλάβες στο DNA μπορούν να προκαλέσουν μόνο όσα είδη ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται από υψηλή συχνότητα, μικρό μήκος κύματος και υψηλή ενέργεια. Διαφορετικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό έχουν τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και τα πεδία που προκύπτουν από αυτήν. Οι επιδράσεις αυτές εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη συχνότητα και την ισχύ εκπομπής.

- Ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που έχει συχνότητα υψηλότερη από το ορατό φως, είναι μικρότερου μήκους κύματος και μεταφέρει πολύ υψηλή ενέργεια. Η ιονίζουσα ακτινοβολία περιλαμβάνει την περιοχή άνω των 10<sup>17</sup> Hz, δηλαδή τις ακτίνες X και γ.

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι επικίνδυνη, διότι μπορεί να εισχωρήσει στην ύλη, να προκαλέσει ιονισμό των ατόμων της, να διασπάσει βίαια τους χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές μεταβολές στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο ιονισμός ενός ελεύθερου ατόμου είναι η βίαιη απόσπαση ηλεκτρονίου από τις στοιβάδες του και η δημιουργία δύο αντίθετα φορτισμένων ιόντων.

Το φαινόμενο αυτό είναι επικίνδυνο, διότι διασπά τους δεσμούς του γενετικού κώδικα DNA και είναι αιτία βλαβών στην υγεία που σχετίζονται με τη δόση, το είδος της ακτινοβολίας και το είδος του ιστού.

- Μη ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η μη ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει χαμηλή συχνότητα και αντίστοιχα μεγάλο μήκος κύματος. Η ενέργεια που μεταφέρουν τα κβάντα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής συχνότητας, δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει ιονισμό, δηλαδή δεν μπορεί να διασπάσει τους χημικούς δεσμούς στα μόρια των κυττάρων. Οι πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που έχει κατασκευάσει ο άνθρωπος, στα οποία υποβαλλόμαστε καθημερινά (ραδιοκύματα, μικροκύματα, ηλεκτρισμός), είναι μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής συχνότητας, άρα δεν μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό.

Οι επιδράσεις της μη ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με την ιονίζουσα, προκαλώντας ηλεκτρικές, θερμικές ή χημικές επιδράσεις στα κύτταρα. Ειδικότερα, τα χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία επάγουν ρεύμα στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος, ενώ τα υψίσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (ραδιοκύματα και μικροκύματα) θερμαίνουν τα κύτταρα και τους ιστούς.

Η συχνότητα και το μήκος κύματος όλων των περιοχών της μη ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φαίνονται στον Πίνακα 3.1, μαζί με τις πηγές εκπομπής τους.

Περιοχή συχνότητων	Συχνότητα	Μήκος κύματος στον αέρα	Πηγές εκπομπής
Εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (ELF)	0 – 300Hz	>1000Km	Γραμμές Ηλ. Ενέργειας, ακουστικές συχνότητες, υποβρύχιες επικοινωνίες
Ακουστικές Συχνότητες (VF)	0,3 – 3kHz	~100Km	Φωνή, ακουστικές συχνότητες
Πολύ χαμηλές συχνότητες (VLF)	3 – 30kHz	~10Km	Ακουστικές συχνότητες
Χαμηλές Συχνότητες (LF)	30 – 300kHz	~1Km	Ραδιοεπικοινωνία Ναυσιπλοΐας
Μεσαίες Συχνότητες (MF)	0,3 – 3MHz	~0,1Km	Ραδιοεπικοινωνία ναυσιπλοΐας, ερασιτεχνικοί ραδιοσταθμοί
Υψηλές Συχνότητες (HF)	3 – 30MHz	~10m	Ερασιτεχνικοί σταθμοί διεθνείς επικοινωνίες, έλεγχος αεροπλοΐας
Πολύ υψηλές συχνότητες (VHF)	30 – 300MHz	~1m	Αστυνομία, σταθμοί FM VHF-TV, Έλεγχος αεροπλοΐας και ναυσιπλοΐας
Πάρα πολύ υψηλές συχνότητες (UHF)	0,3 – 3GHz	1 – 0,1m	Επικοινωνία ταξί, Αστυνομία, UHF-TV, φούρνοι μικροκυμάτων, ιατρική διαθερμία
Υπερυψηλές Συχνότητες (SHF)	3 – 30GHz	~1cm	Ραντάρ, δορυφορικές επικοινωνίες
Εξαιρετικά υψηλές συχνότητες (EHF)	30 – 300GHz	1 – 0,1cm	Ραντάρ, δορυφορικές επικοινωνίες
Υπέρυθρη ακτινοβολία (IR)	300GHz – 300THz	1mm – 0,001mm	Εποπτεία, ηλεκτρονικός πόλεμος

Πίνακας 3.1: Κατανομή της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας.

### 3.3 Μέσα μετάδοσης

Στα συστήματα επικοινωνίας, για να μεταδοθεί κάθε πληροφορία από την πηγή στον προορισμό, θα πρέπει η μετάδοση να γίνει με κάποιο μέσο, που ονομάζεται μέσο μετάδοσης. Ανάλογα με τη χωρητικότητα, τα μέσα μετάδοσης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. στενής ζώνης (narrowband), που χρησιμοποιούνται όπου οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα, και άρα σε ρυθμό μετάδοσης, είναι πολύ μικρές (π.χ. τηλεγραφικά κυκλώματα),
2. βασικής ζώνης (baseband), που χρησιμοποιούνται κυρίως για μετάδοση τηλεφωνικών συνδιαλέξεων και γενικά σημάτων βασικής ζώνης (π.χ. φωνή, ήχος, εικόνα κ.λπ.), δηλαδή σήματα, τα οποία βρίσκονται γύρω από τη μηδενική συχνότητα,
3. ευρείας ζώνης (wideband), που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων υψηλού ρυθμού, κάνοντας χρήση όλου του εύρους ζώνης για έναν ή περισσότερους χρήστες.

Ανάλογα με το είδος μετάδοσης, τα μέσα μετάδοσης ομαδοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. στα κατευθυνόμενα μέσα (ενσύρματης) μετάδοσης, που συναντάμε τα καλώδια χαλκού και τις οπτικές ίνες, και
2. στα μη κατευθυνόμενα (ασύρματα) μέσα μετάδοσης, που ουσιαστικά αφορούν τις ασύρματες ζεύξεις, και συναντάμε τα ραδιοκύματα και τις υπέρυθρες ακτίνες στον αέρα.

### **Κατευθυντικά μέσα (ενσύρματης) μετάδοσης**

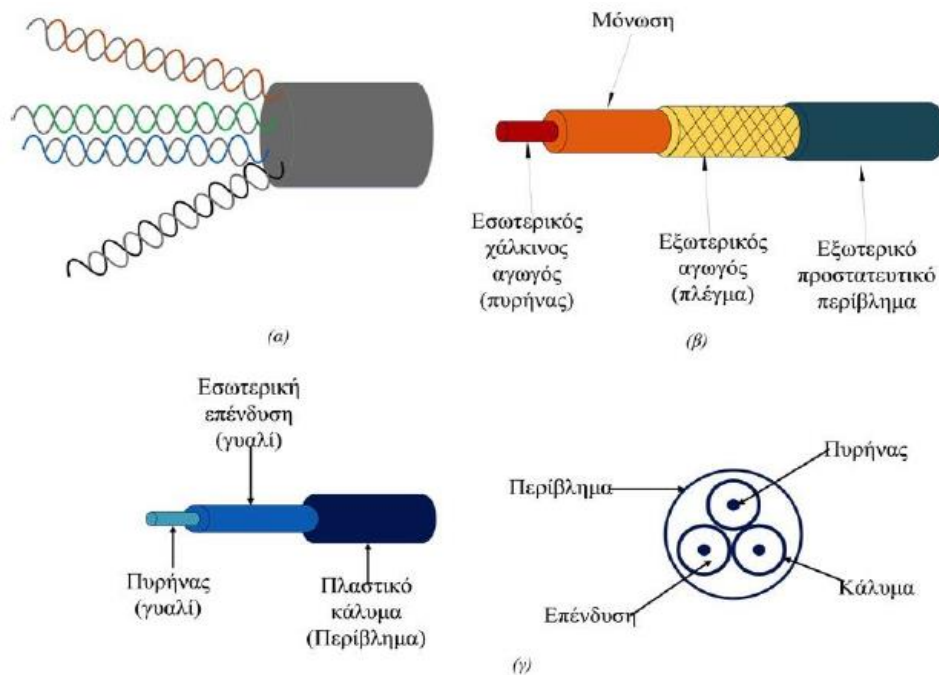
Τα κατευθυνόμενα μέσα ενσύρματης μετάδοσης διακρίνονται στα καλώδια χαλκού και οπτικής ίνας. Η οπτική ίνα αποτελείται από εύκαμπτες κυλινδρικές λεπτές ίνες γυαλιού ή πλαστικού, όπου εγκλωβίζουν τις ακτίνες φωτός, κάνοντάς τες ικανές να καθοδηγήσουν μία οπτική δέσμη. Αποτελείται από τον πυρήνα, τον μανδύα και το περίβλημα. Τα καλώδια χαλκού χωρίζονται, επίσης, σε δύο υποκατηγορίες: στα καλώδια συνεστραμμένων ζευγών (twisted – pair wires) και στα ομοαξονικά καλώδια (coaxial cables).

Το συνεστραμμένο ζεύγος αποτελείται από δύο μονωμένα σύρματα χαλκού, τα οποία συστρέφονται μεταξύ τους για καλύτερη απομόνωση των παρεμβολών και της συνακρόασης (cross-talk), άρα αύξηση της χωρητικότητας. Όταν τα σύρματα συστρέφονται, τα κύματα από τις διάφορες περιστροφές ακυρώνονται μεταξύ τους, οπότε το σύρμα ακτινοβολεί λιγότερο και δεν υπάρχουν παρεμβολές (ενώ τα παράλληλα σύρματα λειτουργούν ως κεραία). Η πιο συνήθης εφαρμογή του είναι το τηλεφωνικό σύστημα. Το καλώδιο συνήθως αποτελείται από περισσότερα τους ενός

ζεύγη, τα οποία περιβάλλονται από πλαστικό μονωτικό υλικό. Τα συνεστραμμένα ζεύγη μπορούν να εκτείνονται για αρκετά km χωρίς ενίσχυση, αλλά για μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτούνται επαναλήπτες (repeaters) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση είτε αναλογικών είτε ψηφιακών σημάτων. Το εύρος ζώνης του εξαρτάται από το πάχος του σύρματος και την καλυπτόμενη απόσταση.

Το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείται από δύο χάλκινους αγωγούς με τον ίδιο κεντρικό άξονα, παρέχοντας καλύτερη θωράκιση από το συνεστραμμένο ζεύγος σε θέματα παρεμβολών και συνακρόασης. Η κατασκευή και η θωράκιση του ομοαξονικού καλωδίου του δίνουν έναν καλό συνδυασμό υψηλού εύρους ζώνης και άριστης αντοχής στον θόρυβο. Το εφικτό εύρος ζώνης εξαρτάται από την ποιότητα και το μήκος καλωδίου και από το σηματοθορυβικό λόγο του σήματος δεδομένων. Χρησιμοποιείται ευρέως στα μητροπολιτικά δίκτυα (MANs) και την καλωδιακή τηλεόραση.

Στην Εικόνα 3.2 δίνονται αντιπροσωπευτικές εικόνες από καλώδια χαλκού και οπτικής ίνας. Ανάλογη με το μέσο ενσύρματης μετάδοσης εμφανίζεται η χωρητικότητα μετάδοσης, δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης, η οποία εξαρτάται από την απόσταση και την ευαισθησία σε θόρυβο και παρεμβολές. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τα τυπικά χαρακτηριστικά των κατευθυνόμενων μέσων, καθώς και σε ποιες περιπτώσεις αυτά χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 3.2: Αντιπροσωπευτικές εικόνες από (α) καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών (UTP καλώδιο), (β) ομοαξονικό καλώδιο και (γ) οπτική ίνα.

	Συνεστραμμένο Ζεύγος	Ομοαξονικό Καλώδιο	Οπτική Ίνα	
Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων	Ανάλογα με την κατηγορία έως 600 MHz	100 kHz – 1 GHz	100-200 THz	
Ρυθμός Μετάδοσης	Ανάλογα με την κατηγορία έως 10 Gbps	έως 1 Gbps	Εως 50 Gbps (πρακτικά) Εως 50 Tbps (θεωρητικά)	
Ευαισθησία σε παρεμβολές	Μέτρια	Χαμηλή έως Μέτρια	Χαμηλή	
Ευκολία εγκατάστασης	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	
Απόσταση χωρίς αναμεταδότη	Δεκάδες μέτρα	Εκατοντάδες μέτρα	Πολλά Χιλιόμετρα	
Ανάγκη αναμεταδοτών	Κάθε 3 – 4 km, αλλά για υψηλούς ρυθμούς η απόσταση είναι χαμηλότερη	Κάθε 3 – 4 km, αλλά για υψηλούς ρυθμούς η απόσταση είναι αρκετά χαμηλότερη	Κάθε 40 – 60 km	
Κόστος	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό	
Επιλογή	Αθωράκιστο: λιγότερο αξιόπιστο σε μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης	Θωρακισμένο: λιγότερο ευαίσθητο σε παρεμβολές	50 Ohm, 5 mm: περισσότερο ευέλικτο (βασικής ζώνης) 75 Ohm, 10 mm: μεγαλύτερο εύρος (ευρείας ζώνης)	Μονότροπη: υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης Πολύτροπη: φθηνότερη και πιο ευέλικτη

Πίνακας 3.2: Τυπικά χαρακτηριστικά των κατευθυνόμενων μέσων.

### Μη κατευθυνόμενα μέσα (ασύρματης) μετάδοσης

- Μετάδοση με ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα παράγονται εύκολα, μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις και διεισδύουν εύκολα σε κτίρια. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις τηλεπικοινωνίες, τόσο σε εσωτερικούς, όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Τα ραδιοκύματα είναι ομοιοκατευθυντικά (omnidirectional), ταξιδεύουν από την πηγή τους προς όλες τις κατευθύνσεις. Κατά συνέπεια, πομπός και δέκτης δε χρειάζονται ιδιαίτερη φυσική ευθυγράμμιση και δε χρειάζεται κατ' απαίτηση να υπάρχει οπτική επαφή.

Οι ιδιότητες των ραδιοκυμάτων εξαρτώνται κυρίως από τη συχνότητα και το περιβάλλον διάδοσης. Στις χαμηλές συχνότητες διαπερνούν όλα τα εμπόδια, αλλά η ισχύς τους μειώνεται απότομα, ανάλογα με την απόσταση από την πηγή προέλευσης. Γενικότερα, η ισχύς μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη ( $\sim 1/r^2$ ). Δηλαδή, διπλασιάζοντας την απόσταση, η ισχύς μειώνεται κατά τέσσερις φορές.

Στις υψηλές συχνότητες, τα ραδιοκύματα τείνουν να ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές, να ανακλώνται στα εμπόδια και να απορροφώνται από τη βροχή. Σε κάθε

συχνότητα υπόκεινται σε παρεμβολές από τους κινητήρες και τον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Στις ζώνες VLF, LF, και MF, τα ραδιοκύματα ακολουθούν το έδαφος και την κυρτότητα της γης, ενώ στη ζώνη HF ανακλώνται και διαθλώνται από την ιονόσφαιρα, επανερχόμενα στη γη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διάδοση των κυμάτων σε μακρινές αποστάσεις, υπό συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

- Μηχανισμοί διάδοσης ραδιοκυμάτων

Στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, η ενέργεια καταφθάνει στον δέκτη ακολουθώντας διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης, με αποτέλεσμα τα αφικνούμενα ραδιοκύματα, που το καθένα καταφθάνει από διαφορετική κατεύθυνση και με διαφορετική χρονική καθυστέρηση, να αθροίζονται διανυσματικά στην κεραία του δέκτη. Το φαινόμενο αυτό της άφιξης πολλαπλών εκδόσεων του εκπεμπόμενου σήματος ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) και έχει σαν αποτέλεσμα την αφαιρετική ή την αθροιστική συμβολή ραδιοκυμάτων, ανάλογα με την κατανομή των φάσεων στα επιμέρους κύματα.

Οι μηχανισμοί διάδοσης των ραδιοκυμάτων, εκτός της απευθείας συνιστώσας είναι τρεις:

1. Η ανάκλαση (reflection), που συμβαίνει όταν ένα εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια λεία επιφάνεια με πολύ μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος του RF σήματος.
2. Η περίθλαση (diffraction), που συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη υπάρχει φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος. Αυτό, προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που ερμηνεύει τη μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη, χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη απευθείας μονοπατιού μεταξύ τους.
3. Η σκέδαση ή διάχυση (diffuse scattering), που συμβαίνει όταν ένα σήμα προσκρούει είτε σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια είτε σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του μήκους κύματος ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.

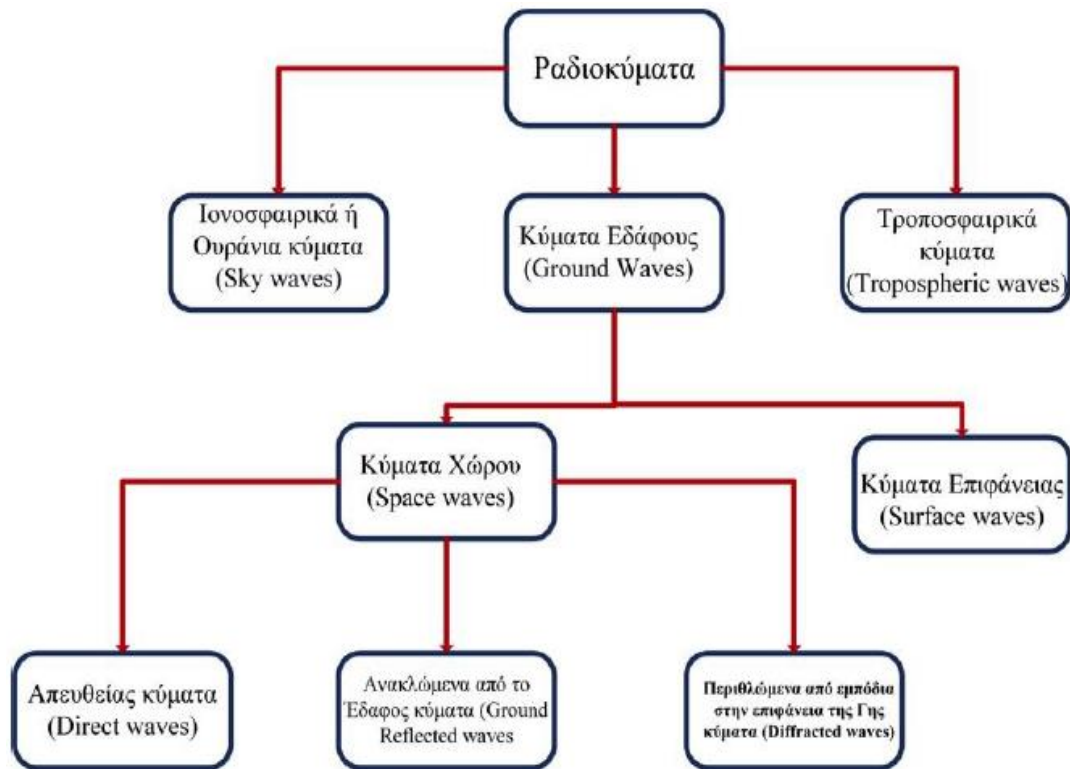
Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την ύπαρξη των πολλαπλών αντιτύπων (ειδώλων) του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία του δέκτη. Οι πολυδιαδρομικές



συνιστώσες καταφθάνουν στον δέκτη με χαρακτηριστικά (πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης) ολισθημένα ως προς τα χαρακτηριστικά του σήματος της απευθείας συνιστώσας. Εκτός όμως από το ωφέλιμο σήμα στην κεραία του δέκτη, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τόσο την επίδραση του συνήθως λευκού προσθετικού θορύβου Gauss (Additive White Gaussian Noise - AWGN) όσο και την παρουσία παρεμβολών.

Ανάλογα με τη διαδρομή διάδοσης, τα ραδιοκύματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Κύματα εδάφους (ground waves), είναι κύματα όπου κατά τη διάδοσή τους ακολουθούν το ανάγλυφο του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του εδάφους, τόσο λιγότερο απορροφώνται. Ο τρόπος αυτός διάδοσης έχει ενδιαφέρον στα μακρά και μεσαία κύματα (VLF, LF και MF) των οποίων η εμβέλεια είναι μεγαλύτερη κατά τη διάδοσή τους στη θάλασσα. Διακρίνονται επιμέρους σε κύματα επιφανείας (έως 3MHz) και σε κύματα χώρου (άνω των 30MHz), στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα απευθείας, ανακλώμενα, περιθλώμενα και διαχεόμενα λόγω σκέδασης κύματα. Τα κύματα χώρου φθάνουν στον δέκτη από πολλαπλές διαδρομές, χωρίς να υπάρχει ανάγκη οπτικής επαφής, αλλά προκαλώντας ταυτόχρονα το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης και των διαλείψεων. Βρίσκονται στην περιοχή της ζώνης συχνοτήτων HF.
2. Ιονοσφαιρικά ή Ουράνια κύματα (sky waves), είναι κύματα που ανακλώνται ή υπόκεινται σε σκέδαση από την ιονόσφαιρα, στην οποία υπάρχει μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικών φορτίων. Τα φορτία αυτά προέρχονται από τον ιονισμό των μορίων του αέρα από τις ακτινοβολίες του ήλιου. Η πυκνότητα των φορτίων, καθώς και το ύψος των στρωμάτων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Η ιονόσφαιρα λειτουργεί ως αγωγίμη επιφάνεια, προκαλώντας την ανάκλαση και τη διάδοση των βραχέων κυμάτων (HF) σε μεγάλες αποστάσεις.
3. Τροποσφαιρικά κύματα (tropospheric waves), που είναι κύματα που ανακλώνται, περιθλώνται ή υπόκεινται σε σκέδαση από την τροπόσφαιρα, δηλαδή την περιοχή της ατμόσφαιρας που παρουσιάζονται τα περισσότερα καιρικά φαινόμενα, επηρεάζοντας τη συμπεριφορά των σημάτων λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας και της διηλεκτρικής σταθεράς (άνω των 30MHz).



Εικόνα 3.3: Κατηγορίες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

- Μετάδοση με μικροκύματα

Για συχνότητες μεγαλύτερες από τα 100MHz, τα κύματα ταξιδεύουν σε σχεδόν ευθείες γραμμές και άρα εστιάζονται με ακρίβεια. Η συγκέντρωση όλης της ενέργειας σε μια μικρή ακτίνα μέσω π.χ. μιας παραβολικής κεραίας, δίνει πολύ υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο, στην περίπτωση όμως που οι κεραίες πομπού και δέκτη είναι με ακρίβεια ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους.

Η κατευθυντικότητα αυτή επιτρέπει σε πολλαπλούς πομπούς που είναι παρατεταγμένοι στη σειρά να επικοινωνούν με πολλαπλούς δέκτες, όταν ακολουθούνται κάποιοι κανόνες ελάχιστης απόστασης. Λόγω της εξασθένησης των σημάτων, απαιτούνται επαναλήπτες ανά τακτά διαστήματα. Όσο ψηλότερα βρίσκονται οι σταθμοί βάσης, τόσο πιο απομακρυσμένοι μπορεί να είναι. Η απόσταση ανάμεσα στους αναμεταδότες αυξάνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του ύψους του σταθμού βάσης.

Σε αντίθεση με τα ραδιοκύματα σε χαμηλές συχνότητες, τα μικροκύματα δεν διαπερνούν εύκολα τα κτίρια. Μερικά μικροκύματα μπορεί να διαθλαστούν από την ατμόσφαιρα (χαμηλά στρώματα) και να χρειαστούν περισσότερο χρόνο να φτάσουν από το απευθείας κύμα. Τότε φθάνουν με διαφορά φάσης από το απευθείας κύμα, οπότε μπορεί να το ακυρώσουν (φαινόμενο εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών ή

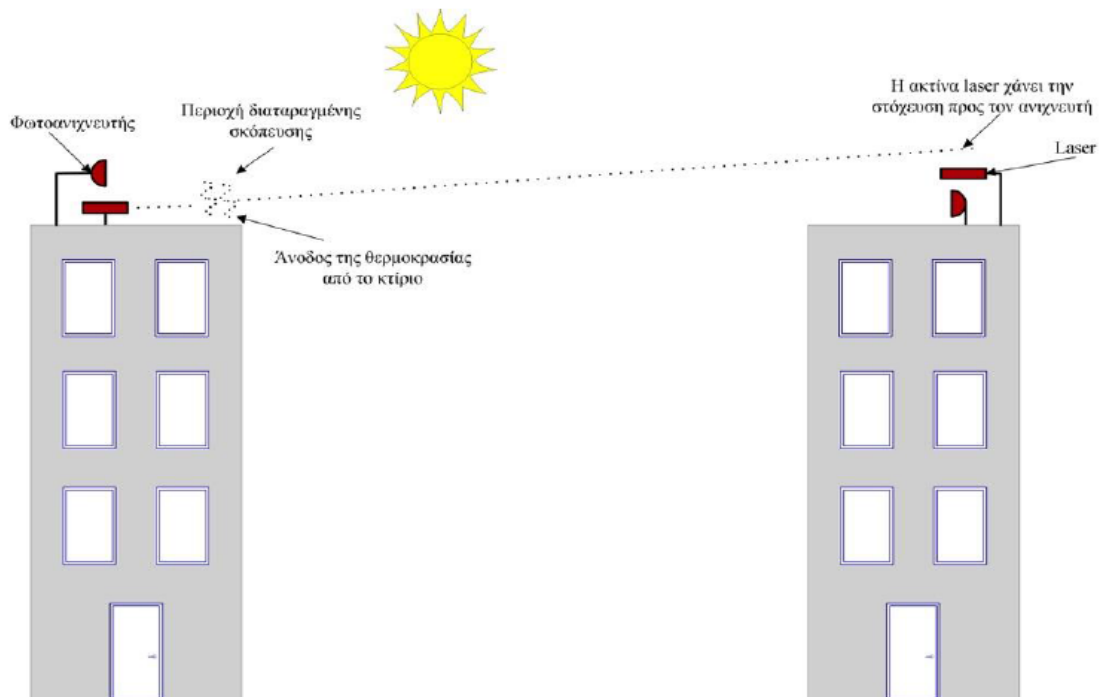
multipath fading). Οι ζώνες μέχρι τα 10GHz είναι πια σε κοινή χρήση, με τις υψηλότερες συχνότητες να παρουσιάζουν το μειονέκτημα της απορρόφησης από το νερό (βροχή, υγρασία, υδρατμοί).

Γενικά, οι μικροκυματικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται πλέον τόσο πολύ για υπεραστικές τηλεφωνικές κλήσεις, κινητά τηλέφωνα, διανομή τηλεόρασης, δορυφορικές επικοινωνίες, κ.λπ., που έχει εμφανιστεί έλλειψη διαθέσιμου φάσματος. Πλεονεκτούν συγκριτικά με τις οπτικές ίνες, γιατί συνήθως δεν απαιτούν δικαιώματα χρήσης, δίνουν τη δυνατότητα να παρακαμφθεί εύκολα το τηλεφωνικό σύστημα και να επικοινωνήσει κανείς άμεσα. Η εγκατάσταση του σχετικού συστήματος είναι οικονομικότερη από την τοποθέτηση οπτικών ινών, ενώ συχνά η χρήση τους μπορεί να είναι φθηνότερη από τη μίσθωση οπτικής ίνας.

- Μετάδοση με οπτικά και υπέρυθρα κύματα

Η μετάδοση των οπτικών και υπέρυθρων κυμάτων γίνεται με τη χρήση laser, υπέρυθρων και υπεριωδών ακτινών που παράγονται από άτομα και πυρήνες. Βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου υπάρχει οπτική επαφή και μεγάλη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, παρέχοντας υψηλό εύρος ζώνης σε σχετικά χαμηλό κόστος, εύκολη εγκατάσταση, ενώ δεν απαιτείται άδεια χρήσης. Χρησιμοποιούνται για συνδέσεις σημείου-προς-σημείο μεταξύ κτιρίων ενός βιομηχανικού, εμπορικού ή εκπαιδευτικού συμπλέγματος κάποιας περιοχής, δηλαδή σε περιοχές περιορισμένης γεωγραφικής εμβέλειας. Ένα παράδειγμα εφαρμογής μετάδοσης οπτικών κυμάτων αποτελεί η σύνδεση των τοπικών δικτύων (LAN) δύο κτιρίων μέσω laser στις ταράτσες τους. Επειδή η οπτική σηματοδότηση με χρήση laser είναι μονόδρομη, κάθε κτίριο χρειάζεται το δικό του laser και το δικό του ανιχνευτή φωτός.

Μειονεκτούν ως προς το ότι παρουσιάζουν απορρόφηση από τη βροχή ή την πυκνή ομίχλη, παρουσιάζουν διακυμάνσεις ισχύος σε ισχυρούς ανέμους με τη δέσμη να αποκλίνει από την εστίαση, τα ρεύματα μεταφοράς μπορούν να παρεμποδίσουν τα συστήματα επικοινωνιών laser, ενώ δουλεύουν συνήθως καλά στις ηλιόλουστες μέρες.



Εικόνα 3.4: Απεικόνιση ενός αμφίπλευρου συστήματος με δύο laser.

### 3.4 Κεραίες

Η κατασκευή που σχετίζεται με την περιοχή μετάβασης από καθοδηγούμενα κύματα σε κύματα ελεύθερου χώρου και αντίστροφα ονομάζεται κεραία. Ο μηχανισμός ακτινοβολίας των κεραιών στηρίζεται στην επιτάχυνση ή επιβράδυνση των φορτίων σε έναν αγωγό. Ο πιο απλός τρόπος λειτουργίας είναι με τη χρήση πηγής εναλλασσόμενης τάσης σε έναν διπλό αγωγό. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ο σχηματισμός κυμάτων ελεύθερου χώρου, που οδεύουν με την ταχύτητα του φωτός.

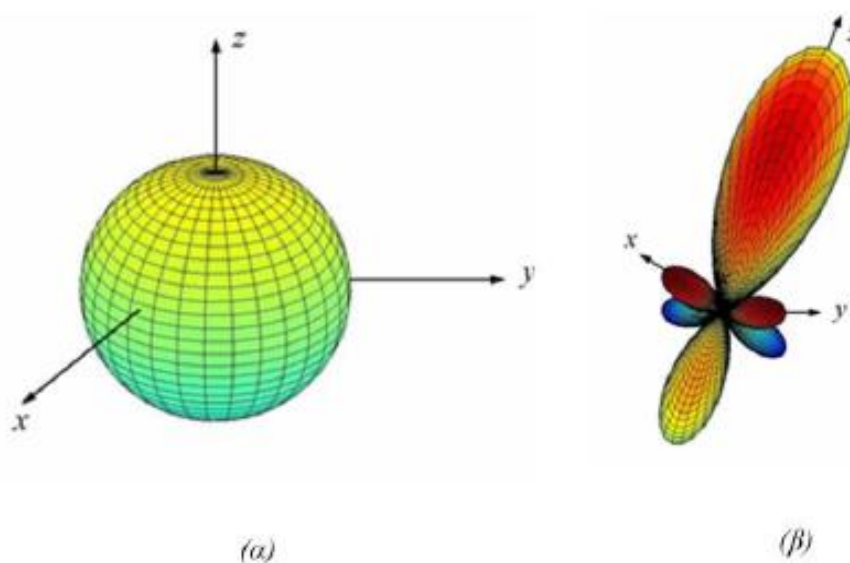
Η κεραία, που αποτελείται από ένα σύστημα αγωγών κατάλληλου σχήματος, όταν τροφοδοτηθεί (διεγερθεί) κατάλληλα από ρεύματα υψηλής συχνότητας, δημιουργεί ισχυρά Η/Μ πεδία ή κύματα στον περιβάλλοντα χώρο, τα οποία είναι της ίδιας συχνότητας και μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετάδοση της Η/Μ ενέργειας. Το Η/Μ πεδίο εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος που επάγεται στην επιφάνεια της κεραίας.

Οι κεραίες χρησιμοποιούνται τόσο για την εκπομπή, όσο και για τη λήψη ραδιοκυμάτων και μπορούν να λειτουργήσουν με την ίδια απόδοση τόσο για εκπομπή, όσο και για λήψη, στην ίδια συχνότητα, με αποτέλεσμα τη συχνή χρήση μίας μόνο κεραίας. Στην εκπομπή, η ηλεκτρική ενέργεια από τον πομπό μετατρέπεται

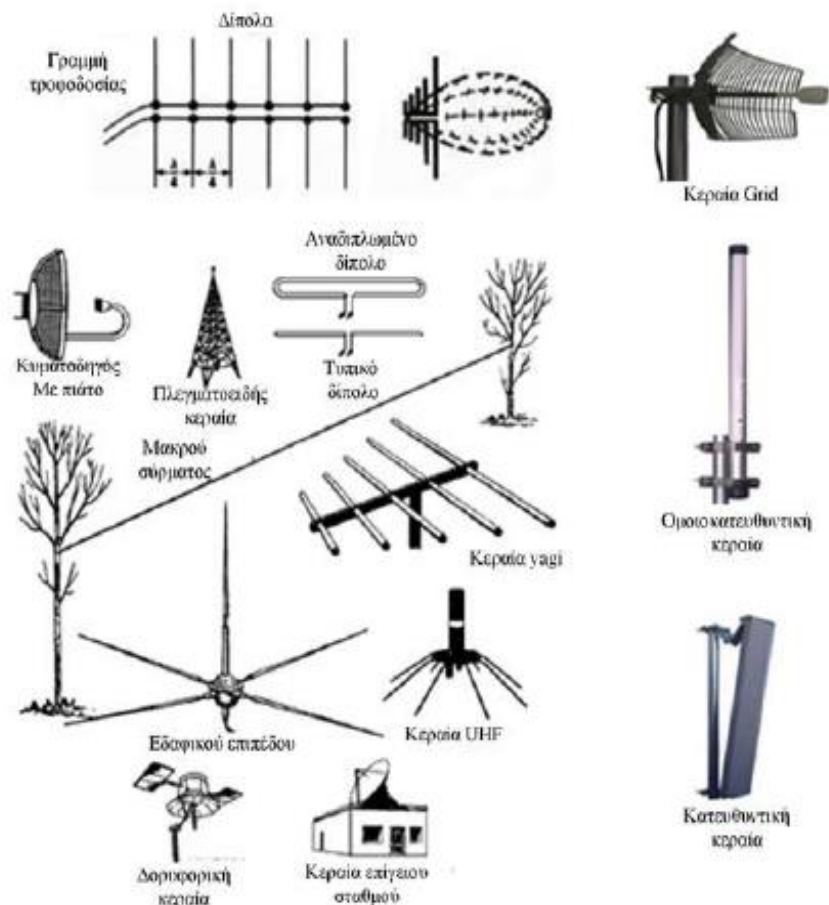
σε ηλεκτρομαγνητική από την κεραία και εκπέμπεται στο περιβάλλον της. Στη λήψη, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει στην κεραία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία και αποδίδεται στον δέκτη.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της κεραίας είναι το σχήμα, ο τρόπος διέγερσης και η συχνότητα. Βασικές παράμετροι και λειτουργικά χαρακτηριστικά των κεραιών είναι το κέρδος κεραίας (antenna gain), η αντίσταση ακτινοβολίας (radiation resistance), το εύρος δέσμης (beamwidth), στοιχεία από τα οποία προκύπτει το διάγραμμα ακτινοβολίας (radiation pattern) που δείχνει την ισχύ που ακτινοβολείται σε κάθε κατεύθυνση.

Ανάλογα με τις παραπάνω ιδιότητες και χαρακτηριστικά, και το σύστημα για το οποίο προορίζονται, προκύπτουν τα διάφορα είδη κεραιών, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3.6. Βασικές κατηγορίες κεραιών που χρησιμοποιούνται συχνά είναι οι κεραίες διπόλου, οι συστοιχίες κεραιών και οι παραβολικές κεραίες. Προφανώς, τα είδη των κεραιών είναι πάρα πολλά. Η επιλογή του κατάλληλου είδους κεραίας εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή και το σύστημα μετάδοσης.



Εικόνα 3.5: (α) Ισοτροπικό διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρεις διαστάσεις, (β) Κατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας σε τρεις διαστάσεις.



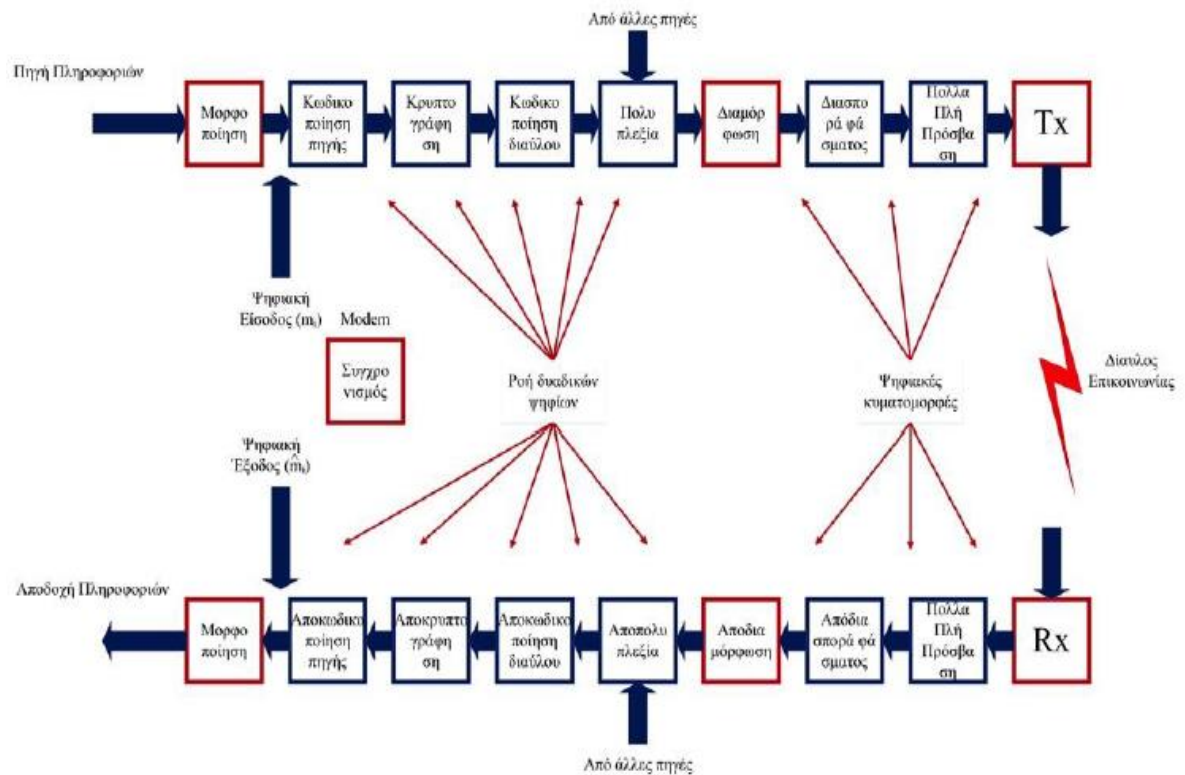
Εικόνα 3.6: Διάφορα είδη κεραιών.

### 3.5 Μοντέλο ψηφιακών επικοινωνιών

Όταν χρησιμοποιούμε ψηφιακές επικοινωνίες, το απλοποιημένο μοντέλο επικοινωνιών μπορεί να αναπτυχθεί συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον δομικά στοιχεία. Ένα αντιπροσωπευτικό δομικό διάγραμμα ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος απεικονίζεται στην Εικόνα 3.7. Το διάγραμμα αυτό μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την εφαρμογή (π.χ. ασύρματη ή ενσύρματη) και το περιβάλλον λειτουργίας (π.χ. επικοινωνία σημείο-προς-σημείο ή λειτουργία πολλαπλών σημείων). Σε ορισμένες εφαρμογές η πληροφορία που πρέπει να μεταδίδεται είναι εγγενώς ψηφιακή. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πηγή πληροφοριών που δημιουργεί τα δεδομένα ονομάζεται διακριτή (discrete) ψηφιακή πηγή.

Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας, οι λειτουργικές εργασίες που εκτελούνται στον πομπό και τον δέκτη θα πρέπει να επεκταθούν, ώστε να συμπεριλάβουν μηνύματα διακριτοποίησης του σήματος στον πομπό και μηνύματα σύνθεσης σήματος ή παρεμβολής στον δέκτη. Επιπλέον, λειτουργίες περιλαμβάνουν

την αφαίρεση πλεονασμού πληροφορίας, καθώς και κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση καναλιού. Το πιο σημαντικό στοιχείο που χρειάζονται τα συστήματα ψηφιακών επικοινωνιών, σε μεγαλύτερο βαθμό από τα αναλογικά συστήματα, είναι η ανάγκη για συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη.



Εικόνα 3.7: Δομικό διάγραμμα ενός ψηφιακού μοντέλου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. (Το κόκκινο περίγραμμα οριοθετεί τις λειτουργίες ενός modem)

Οι λειτουργικές βαθμίδες που έχουν προστεθεί για την ψηφιακή μετάδοση των σημάτων, είναι οι εξής:

### 1. Πομπός

- Κωδικοποίηση πηγής: Περιλαμβάνει τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ή αν η πληροφορία είναι ήδη σε ψηφιακή μορφή, τότε γίνεται συμπίεση των δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, η έξοδος της βαθμίδας είναι μία ακολουθία από bits.
- Κρυπτογράφηση: Η κρυπτογράφηση (encryption) είναι η διαδικασία μετασχηματισμού ενός μηνύματος σε μία ακατανόητη μορφή με τη χρήση κάποιου κρυπτογραφικού αλγορίθμου, ώστε να μην μπορεί να ανιχνευτεί από κανέναν άλλον εκτός του νόμιμου παραλήπτη. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή

υποκλοπών και για την ασφάλεια των δεδομένων κατά τη μετάδοση των ψηφιακών σημάτων, ώστε να διασφαλιστεί η εμπιστευτικότητα της πληροφορίας.

- Κωδικοποίηση Διαύλου: Για την αύξηση της αξιοπιστίας αναγνώρισης των bits στον δέκτη υλοποιούνται συστηματικές μετατροπές των ακολουθιών bits πριν την εκπομπή ή την εγγραφή τους σε μέσα αποθήκευσης. Οι μετατροπές αυτές συνίστανται κατά βάση σε εισαγωγή πλεονάζουσας πληροφορίας (ψηφία ισοτιμίας – parity bits), με σκοπό την ανίχνευση και διόρθωση λαθών κατά τη διαδικασία διάδοσης, ώστε να αυξάνεται η αντοχή του συστήματος στον θόρυβο και την παραμόρφωση που προκαλεί ο δίαυλος επικοινωνίας. Η κωδικοποίηση διαύλου περιλαμβάνει, επίσης, την επιλογή κατάλληλων κυματομορφών για τη διαμόρφωση που ακολουθεί, με στόχο την πιο αξιόπιστη αποδιαμόρφωση.
- Πολυπλεξία: Για τον αποδοτικό διαμοιρασμό και ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ή/και χρηστών πάνω από κοινό φυσικό μέσο (δίαυλο επικοινωνίας), χρησιμοποιείται η τεχνική της πολυπλεξίας. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές πολυπλεξίας, η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) και η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing – TDM). Στην πολυπλεξία FDM, τα σήματα πληροφορίας διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ στην πολυπλεξία TDM, διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου.
- Διαμόρφωση: Ο διαμορφωτής “αποτυπώνει” μία ακολουθία από  $K$  bits της εξόδου του κωδικοποιητή διαύλου σε μία από  $M=2^K$  αναλογικές κυματομορφές, με τέτοιο τρόπο και με τέτοια δομή, ώστε να είναι κατάλληλες προς μετάδοση. Η επιλογή της τεχνικής της ψηφιακής διαμόρφωσης επιλέγεται ανάλογα με την αποδοτικότητα φάσματος σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης των παρεχόμενων υπηρεσιών, την ευκολία υλοποίησης και την ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Επιπλέον, ο διαμορφωτής εκτελεί πρόσθετες λειτουργίες, όπως η μετατροπή σε συχνότητα κατάλληλη προς μετάδοση, ενίσχυση του σήματος και προσαρμογή στον πομπό και στην κεραία εκπομπής.
- Πολλαπλή πρόσβαση: Λαμβάνει χώρα αποκεντρωμένα σε κάθε χρήστη που πιθανώς ζητά πρόσβαση σε ένα δίαυλο και είναι συνήθως προσαρμοστική τεχνική.

Το σήμα που τελικά εκπέμπεται στο φυσικό μέσο είναι πάντοτε αναλογικό είτε πρόκειται για αναλογική είτε για ψηφιακή μετάδοση. Δηλαδή, σε επίπεδο φυσικού μέσου, οι ψηφιακές επικοινωνίες είναι αναλογικές.



## 2. Κανάλι ή δίαυλος

Ο δίαυλος επικοινωνίας κατά τη διάδοση των σημάτων προκαλεί υποβαθμίσεις στον δέκτη, με τη μορφή προσθετικού θορύβου, παρεμβολών και παραμόρφωσης. Όλα αυτά επιδρούν αρνητικά στον συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη, προκαλώντας τα φαινόμενα της απώλειας bits στον δέκτη, με ταυτόχρονη υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος.

## 3. Δέκτης

- Αποδιαμόρφωση: Ο αποδιαμορφωτής εκτελεί την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία σε σχέση με τον πομπό, ενισχύοντας το σήμα, μετατρέποντας τη λαμβανόμενη συχνότητα σε μικρότερη και μετατρέποντας την λαμβανόμενη αναλογική κυματομορφή σε κατάλληλη ακολουθία bits.
- Αποπολυπλεξία: Αντίστροφη διαδικασία με την πολυπλεξία, όπου τα σήματα ή/και οι χρήστες οδηγούνται σε άλλες πηγές.
- Αποκωδικοποίηση διαύλου: Εκτελεί την αντίστροφη διεργασία από τον κωδικοποιητή, εφαρμόζοντας κατάλληλες τεχνικές διόρθωσης τυχόν λαθών που εμφανίζονται στον δέκτη κατά την αποδιαμόρφωση, που οφείλονται σε μέγιστο βαθμό στο δίαυλο. Αφαιρεί, επίσης, τον ελεγχόμενο πλεονασμό στην ακολουθία της πληροφορίας, που χρησιμοποιήθηκε στον δέκτη για την όσο το δυνατόν χωρίς σφάλματα ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας.
- Αποκρυπτογράφηση: Αν είναι γνωστή στον δέκτη η τεχνική κρυπτογράφησης των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στον πομπό, υλοποιείται η αντίστροφη διαδικασία, με σκοπό τη μετάδοση μόνο των ωφέλιμων ακολουθιών bits στην επόμενη βαθμίδα.
- Αποκωδικοποίηση πηγής: Εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία από τον κωδικοποιητή, αποσυμπιέζοντας τα δεδομένα και ανάλογα με την εκπεμπόμενη πληροφορία (αναλογικό ή ψηφιακό σήμα), μετατρέπει ή όχι τα bits σε αναλογικό σήμα.

Στα περισσότερα συστήματα, στόχος είναι η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων πόρων για τη μετάδοση δεδομένης ποσότητας πληροφορίας ή ισοδύναμα η βέλτιστη χρησιμοποίηση δεδομένων πόρων για τη μετάδοση περισσότερης πληροφορίας. Στους διαθέσιμους πόρους για επικοινωνία περιλαμβάνεται ο συνολικός χρόνος που χρησιμοποιούμε για τη μετάδοση, το εύρος ζώνης συχνοτήτων όπου μεταφέρεται το σύνολο της πληροφορίας, και η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση. Για κάθε

έναν από τους διαθέσιμους πόρους, έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί εξοικονόμησης φάσματος (π.χ. τεχνικές cognitive radio) και εξοικονόμησης ενέργειας (green networks, energy harvesting).

Υπάρχουν και άλλοι πόροι, για τους οποίους πρέπει να εξευρεθούν κατάλληλες τεχνικές, ώστε τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα να είναι πιο αποδοτικά, όπως π.χ. ο χώρος, η πολυπλοκότητα των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων, η επιφάνεια του κυκλώματος, η τεχνολογία των ημιαγωγών, η μνήμη πομπού/δέκτη κ.ά. Ως πόρος, επίσης, μπορεί να θεωρηθεί και το φυσικό μέσο μετάδοσης.

Παρόλο που τα περισσότερα συστήματα επικοινωνιών εμπίπτουν στα γενικά μοντέλα που αναφέρθηκαν, εντούτοις η ακριβής σχεδίαση κάθε συστήματος είναι διαφορετική. Η σχεδίαση ενός συστήματος επικοινωνιών είναι το αποτέλεσμα αντιστάθμισης (trade-off) μεταξύ των απαιτήσεων, των περιορισμών, του κόστους και των διαθέσιμων πόρων. Όταν υπάρχουν περιορισμοί στην ενέργεια, π.χ. στους ασύρματους αισθητήρες, δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε το σύστημα με βέλτιστο τρόπο. Υπάρχουν, επίσης, φορές που προτιμάται εν γνώσει μας η μη βέλτιστη σχεδίαση, λόγω κόστους ή γιατί μπορεί να μας αρκεί μία υπο-βέλτιστη απόδοση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 4.1 Κατηγορίες ασύρματων δικτύων

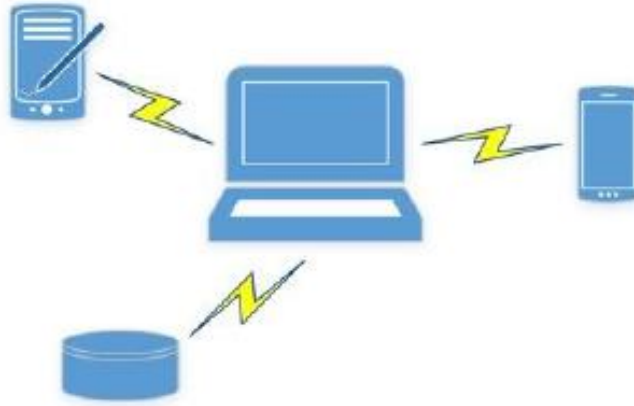
Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ραγδαία βελτίωση της ποιότητας των ασυρμάτων δικτύων με ταχύτητες, οι οποίες μπορεί να ξεπεράσουν τις αντίστοιχες των ενσύρματων δικτύων, καθώς και με την υιοθέτηση νέων προτύπων από οργανισμούς και συμμαχίες γνωστών εταιρειών.

Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα των Bluetooth, GPRS (General Packet Radio Service), HIPERLAN (High – Performance European Radio LAN) από τον οργανισμό ETSI (European Telecommunications Standard Institute), 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network) και 802.16 από τον οργανισμό IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), καθώς και τα UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) και LTE (Long Term Evolution) από τον οργανισμό 3GPP.

Όλα αυτά τα πρότυπα καλύπτουν τις προδιαγραφές για το φυσικό στρώμα και το υπόστρωμα MAC (Medium Access Control). Επιπλέον, τα συστήματα κυβελωτών δικτύων τρίτης (3G) και τέταρτης γενιάς (4G) που αναπτύχθηκαν από τη συμμαχία 3GPP (3rd Generation Partnership Project) προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι παλαιότερα επιτυγχάνονταν μόνο μέσω ενσύρματης δικτύωσης. Με μια πρώτη προσέγγιση, τα ασύρματα δίκτυα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. Δίκτυα προσωπικής περιοχής – PAN (Personal Area Network).
2. Δίκτυα τοπικής περιοχής – LAN.
3. Δίκτυα ευρείας περιοχής – WAN (Wide Area Network).

Η διασύνδεση PAN αναφέρεται στη διασύνδεση των εξαρτημάτων του υπολογιστή με τη χρήση ραδιοκυμάτων μικρής εμβέλειας ή συσκευών, οι οποίες τοποθετούνται στο σώμα ή σε κοντινή απόσταση από το χρήστη. Το δημοφιλέστερο πρωτόκολλο PAN είναι το Bluetooth, το οποίο διευκολύνει τη διασύνδεση αλλά και τη μεταφορά αρχείων μεταξύ τερματικών συσκευών των χρηστών (Εικόνα 4.1).

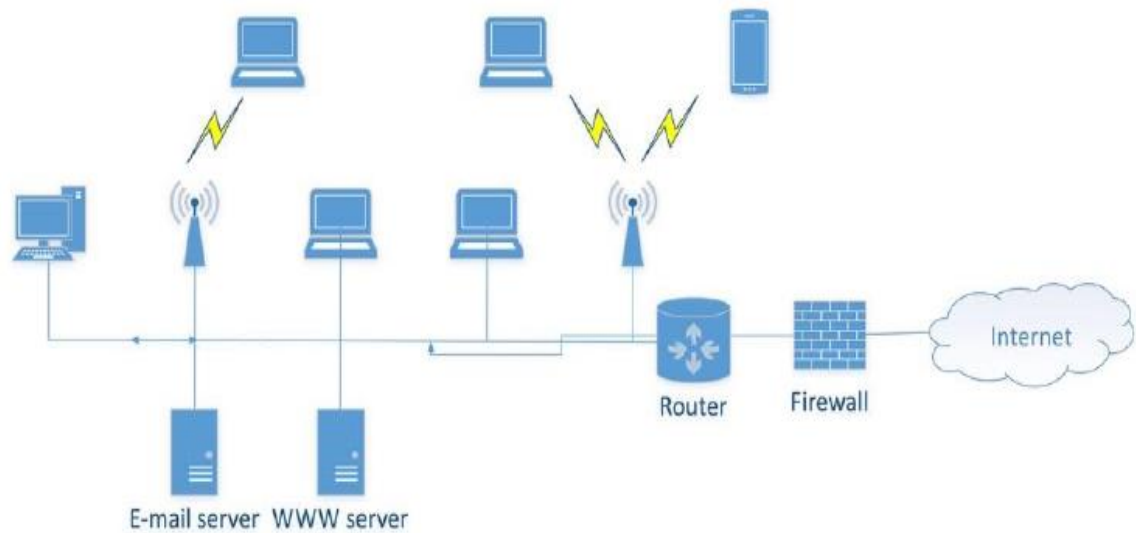


Εικόνα 4.1: Διασύνδεση συστήματος PAN.

Τα PAN υποστηρίζουν μία ευρεία γκάμα εφαρμογών σχετικών με την τηλεϊατρική, την ψυχαγωγία και την εργασία. Άλλα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε αυτού του τύπου τα συστήματα είναι η IrDA και το WiDi (Wireless Display), με το τελευταίο να μην απαιτεί οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

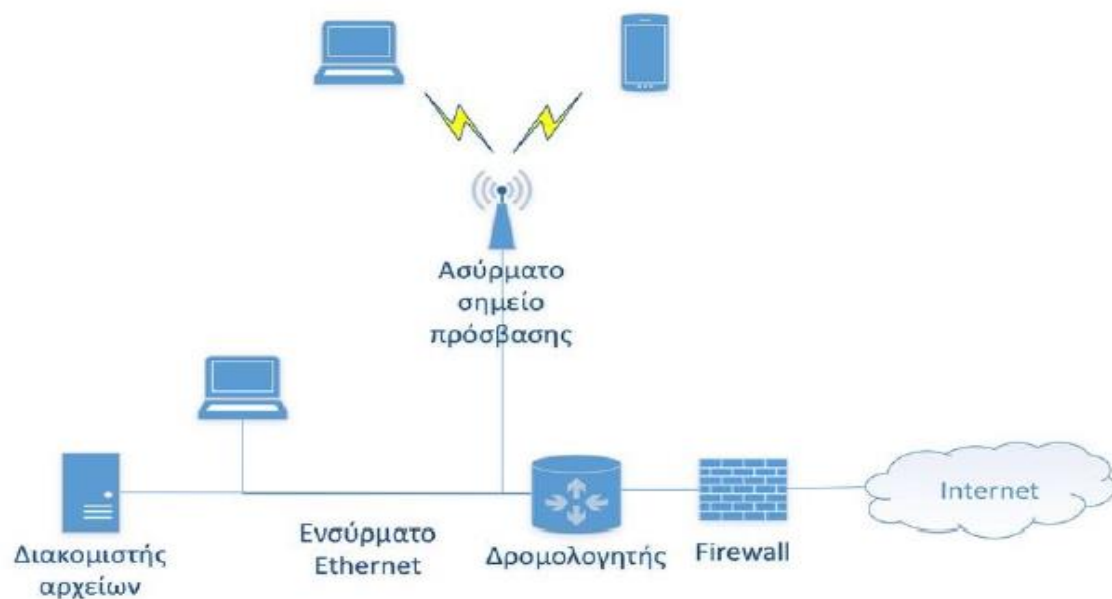
Την επόμενη κατηγορία ασύρματων δικτύων αποτελούν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LANs, WLANs). Στα LAN κάθε συσκευή έχει ένα ασύρματο μόντεμ και μια κεραία, μέσω των οποίων μπορεί να επικοινωνεί με άλλα συστήματα. Το WLAN με τη σειρά του μπορεί να συνδεθεί σε ένα ενσύρματο LAN ή να συντελέσει στη δημιουργία ενός νέου δικτύου. Η περιοχή που καλύπτει το WLAN εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, καθώς και από τα χαρακτηριστικά της περιοχής του δικτύου, όπως τοίχοι και εμπόδια. Στην απλούστερη μορφή του, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του WLAN είναι ισοτροπικό, δηλαδή καλύπτει μία προσεγγιστικά κυκλική περιοχή.

Οι συσκευές του δικτύου (laptops, tablets, smartphones) μπορούν να μετακινούνται εντός του WLAN, χωρίς να αποσυνδέονται από το δίκτυο. Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών μέσα στην περιοχή κάλυψης του ασύρματου δικτύου συντονίζεται από το σημείο πρόσβασης (Access Point, AP). Το AP μπορεί να συνδέσει διάφορα WLAN μεταξύ τους και μπορεί, επίσης, να συνδέσει τις κυψέλες του WLAN με ένα ενσύρματο LAN μέσω καλωδίου σε μια έξοδο του ενσύρματου LAN. Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται μία τοπολογία WLAN.

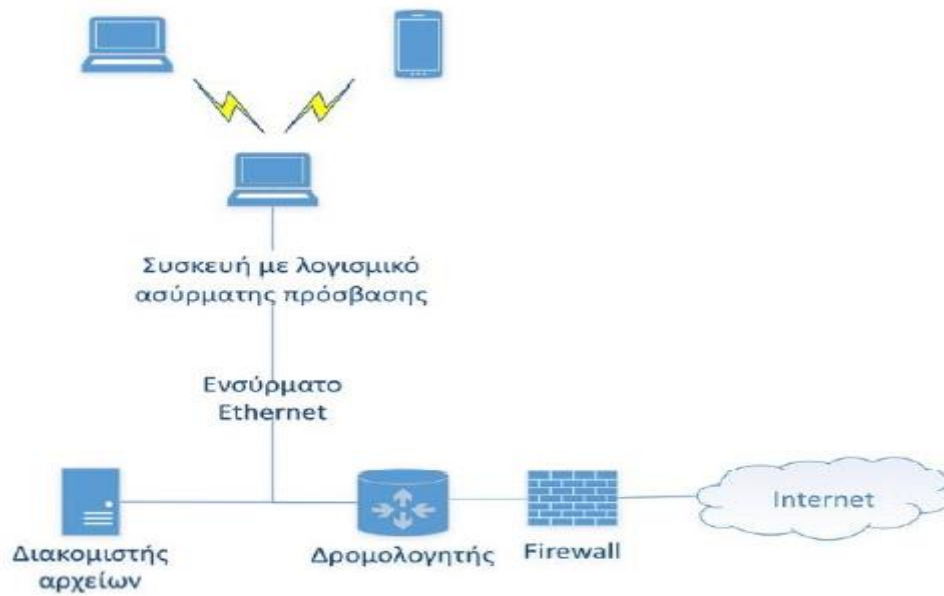


Εικόνα 4.2: Τοπολογία WLAN.

Επίσης το AP μπορεί να είναι ξεχωριστός εξοπλισμός, αλλά και κάποια συσκευή χρήστη με κατάλληλο λογισμικό, η οποία μπορεί να εκμεταλλεύεται ετερογενείς τεχνολογίες δικτύωσης (WLAN με 3G/4G).

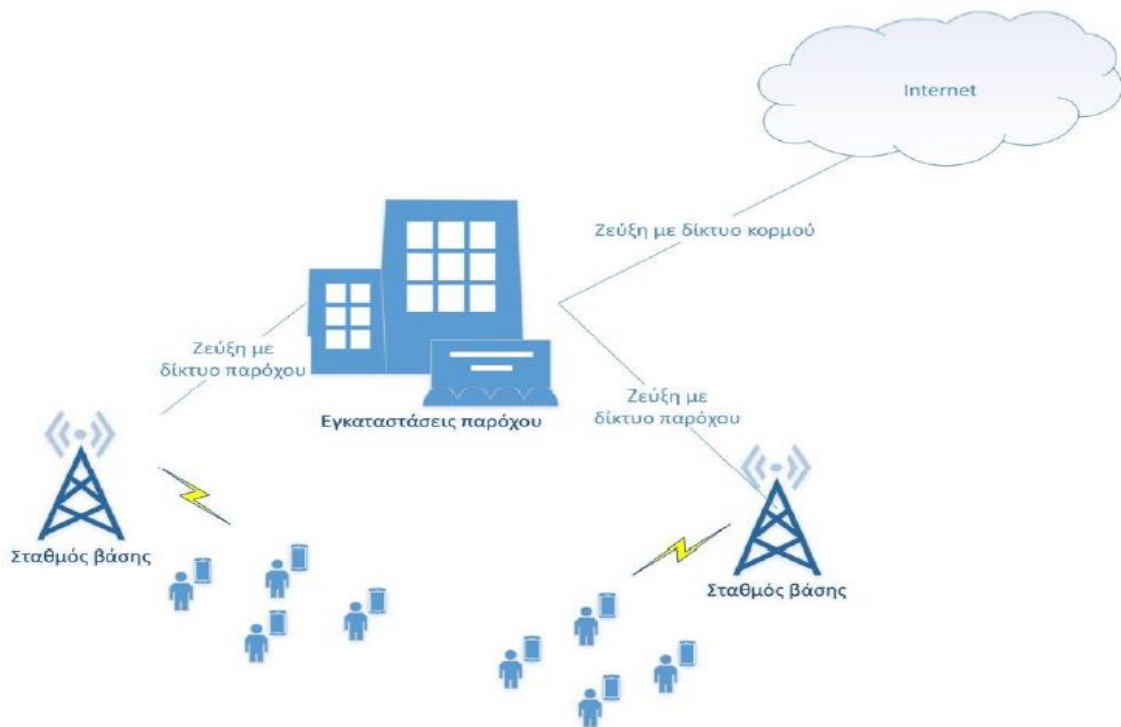


Εικόνα 4.3: Ασύρματο AP ως ξεχωριστός εξοπλισμός.



Εικόνα 4.4: Ασύρματο AP μέσω συσκευής χρήστη.

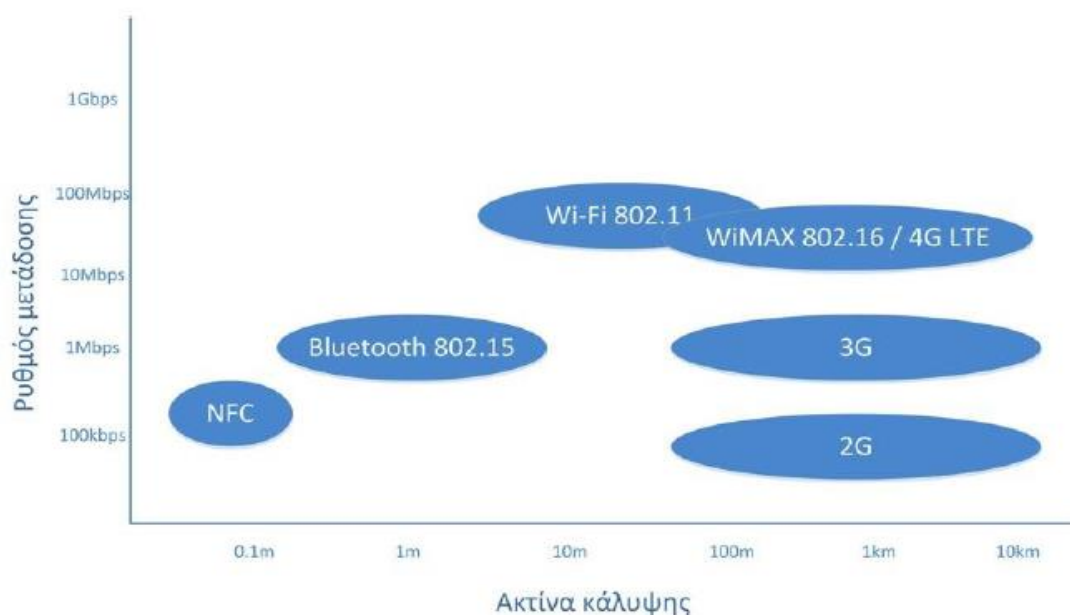
Το τρίτο είδος ασύρματου δικτύου είναι τα WAN με κύρια περιοχή εφαρμογής τους τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ευρισκόμενα πλέον στην τέταρτη γενιά τους, τα κυψελωτά δίκτυα μπορούν να παρέχουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων συγκρίσιμες με τα LAN με ακτίνα κάλυψης δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων. Περισσότερα για τα συστήματα WAN θα αναπτυχθούν σε επόμενες ενότητες.



Εικόνα 4.5: Τοπολογία WAN.

## 4.2 Ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες

Η υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών από τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα θέτει σημαντικές απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες πολυμέσων, όπου δεδομένα βίντεο και ήχου πρέπει να μεταδοθούν χωρίς καθυστέρηση, αποτελούν μία από τις δημοφιλέστερες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Για την αύξηση της ποιότητας εξυπηρέτησης χρειάζεται να εξασφαλιστεί ένας υψηλός ρυθμός μετάδοσης, ο οποίος διατηρείται και στην κάτω ζεύξη (μεταξύ του σημείου πρόσβασης και της συσκευής του χρήστη), καθώς και στην άνω ζεύξη (από τη συσκευή του χρήστη προς το σημείο πρόσβασης). Ακόμη, θα πρέπει να επιτυγχάνεται αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας σε κινούμενους χρήστες, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε και να επικοινωνούν οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας.



Εικόνα 4.6: Σύγκριση ευρυζωνικών τεχνολογιών.

Δημοφιλείς υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης και εύρος ζώνης είναι οι παρακάτω:

- Φωνή μέσω IP.
- Πρόσβαση στο Διαδίκτυο.
- Πλοήγηση και αναζήτηση στον Παγκόσμιο Ιστό.
- Μεταφορά γραπτών μηνυμάτων.
- Μεταφορά αρχείων.

- Αναζήτηση και ειδοποίηση χρηστών.
- Συνδρομητικές υπηρεσίες (π.χ. διαδικτυακά παιχνίδια, ή άλλες διαδραστικές πολυμεσικές εφαρμογές).
- Τηλεδιασκέψεις (βίντεο και ήχος).

Για την υποστήριξη αυτών των υπηρεσιών έχουν αναπτυχθεί διάφορα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα όπως:

- Κλασικά κυψελωτά (GSM, UMTS, IS95, IS136, LTE).
- Ασύρματα (DECT, PHS).
- Συστήματα Τηλεειδοποίησης (HERMES).
- Συστήματα για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης (TETRA).
- Συστήματα εντοπισμού στόλων (OmniTracs).
- Συστήματα ευρείας αναμετάδοσης ψηφιακού ήχου (DAB) και video (DVB).
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών WLANs (IEEE 802.11a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, m, n, ac, ad).
- Δορυφορικά συστήματα κινητών επικοινωνιών (Globalstar, Teledesic, S-UMTS, HAPS).
- Ασύρματη δικτύωση σε μικρές αποστάσεις (Bluetooth, IEEE 802.15).
- Συστήματα Σταθερής Ασυρματικής Ευρυζωνικής Ραδιοπρόσβασης (LMDS, MMDS, IEEE 802.16, HiperACCESS, HiperMAN).
- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.
- Ασύρματα Οπτικά Συστήματα.

Τα συστήματα αυτά καταλαμβάνουν διαφορετικές περιοχές του Η/Μ φάσματος και παρουσιάζουν σημαντικές ιδιαιτερότητες. Έτσι, τα κυψελωτά συστήματα μπορούν να συνυπάρχουν με ασύρματα οπτικά συστήματα, καλύπτοντας περιπτώσεις όπου χρήστες κινούνται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους και μπορούν να μεταβούν από τη μία μορφή επικοινωνίας στην άλλη. Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται το σύνολο των προσφερόμενων λύσεων ασύρματης δικτύωσης και επιτυγχάνεται ο στόχος της πανταχού παρούσας επικοινωνίας. Ακόμη, η συνύπαρξη ετερογενών λύσεων δικτύωσης βασίζεται και στην απαίτηση κάλυψης διαφορετικών περιοχών όπως:

- Εσωτερικοί ή/και εξωτερικοί χώροι.
- Μικρή περιοχή, μια πόλη, μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή, ολόκληρη η γη.



- Χρήστες με υψηλή ή χαμηλή κινητικότητα.

Για να καταστεί εφικτή η συνεχής ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, καθώς και η αύξηση της χωρητικότητάς τους, είναι απαραίτητο να καθοριστούν κοινές πολιτικές από τους κατασκευαστές. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν συμφωνηθεί κοινά αποδεκτές προδιαγραφές σε κάθε γενιά ασύρματων δικτύων που βρίσκεται σε φάση ανάπτυξης.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα δίκτυα δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς, τα οποία προδιαγράφηκαν από κοινοπραξίες εταιρειών και αναπτύχθηκαν σε βάθος χρόνου με κοινή στόχευση από τη βιομηχανία και τα ερευνητικά ιδρύματα.

Για να εξασφαλιστεί η πρόσβαση σε ευρυζωνικές υπηρεσίες, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα θα πρέπει να παρέχουν ευελιξία στην εγκατάσταση και ανάπτυξη του δικτύου, ανεκτό κόστος υπηρεσιών και συμβατότητα με τα συστήματα προηγούμενης γενιάς.

- Έξυπνα τηλέφωνα

Οι πρώτες ευρυζωνικές συνδέσεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας εντοπίζονται στα δίκτυα τρίτης γενιάς. Το πρότυπο IMT-2000, το οποίο προδιαγράφηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990, αποτελείτο από μία ομοσπονδία συστημάτων κινητών επικοινωνιών για την ασύρματη πρόσβαση στην παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

Η γκάμα των υπηρεσιών, που μπορούν να υποστηριχθούν από τα ευρυζωνικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, είναι ιδιαίτερος πλούσια και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων:

- Πρόσβαση στο Διαδίκτυο.
- Διαδραστικές αγορές & τραπεζικές συναλλαγές.
- On-line εφημερίδες.
- Location Based Services.
- Video και Μουσική.
- On-line βιβλιοθήκη.
- Διαδραστικά παίγνια.
- Κινητό γραφείο (Mobile Office).
- Τηλεϊατρική.

- Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.

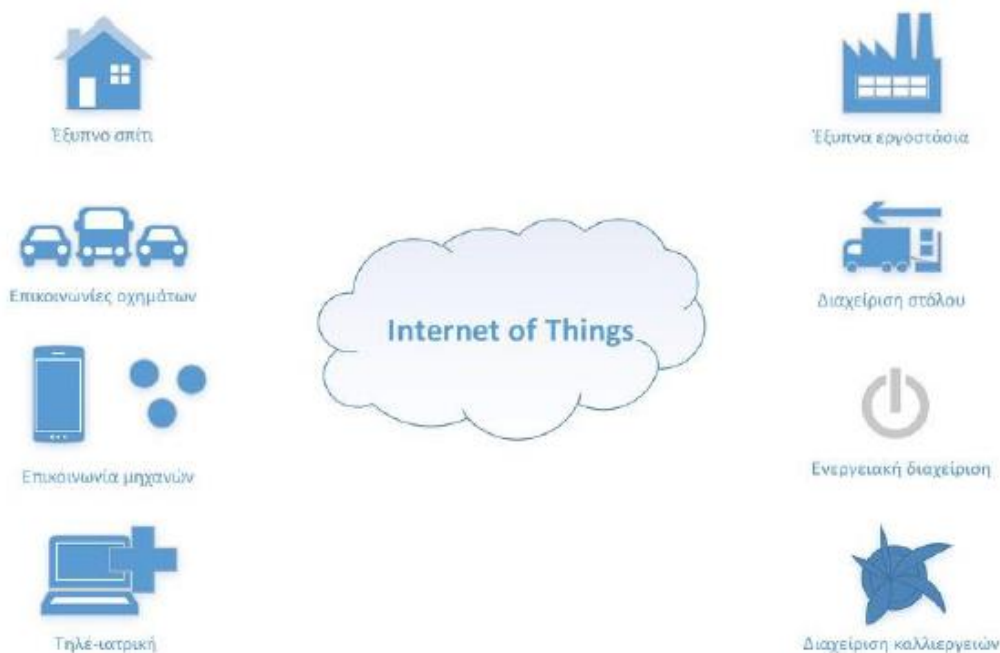
Τα δίκτυα τρίτης γενιάς συνέχισαν να αναπτύσσονται και να βελτιώνονται παράλληλα με την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους. Η κοινοπραξία 3GPP ήταν υπεύθυνη για τις ανανεωμένες εκδόσεις του πρωτοκόλλου UMTS που προέκυψε από την ανάπτυξη του IMT-2000. Έτσι, εισήχθησαν νέα χαρακτηριστικά στο δίκτυο, οδηγώντας στα δίκτυα 3.5ης γενιάς. Σε αυτά υποστηρίζονται ταχύτητες στην κάτω ζεύξη έως 47Mbps, ξεπερνώντας την πλειοψηφία των ενσύρματων xDSL συνδέσεων. Η εκρηκτική αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας συνέπεσε με τη μαζική υιοθέτηση των έξυπνων τηλεφώνων από τους χρήστες. Οι συσκευές αυτές προσφέρουν υψηλή υπολογιστική ισχύ, η οποία παλαιότερα εντοπιζόταν σε φορητούς ή σταθερούς υπολογιστές, ενώ ταυτόχρονα δεν περιορίζουν τη φορητότητά τους. Επιπλέον, οι νέες μέθοδοι αλληλεπίδρασης μέσω αφής και οι μεγάλες οθόνες τους έχουν καταστήσει τα smartphones ως τις κυριότερες συσκευές για την ασύρματη πρόσβαση στην τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

Τα συστήματα τέταρτης γενιάς αποτέλεσαν την εξέλιξη των προδιαγραφών του οργανισμού 3GPP και του οργανισμού IEEE για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών επικοινωνιών σε κινητά τερματικά. Το Long-Term Evolution, LTE, (3GPP R8 και R9) και ιδιαίτερα το LTE-Advanced (3GPP R10 και R11), όπως επίσης το WiMAX (IEEE802.16.e) και το WiMAX2 (IEEE 802.16.m) ή όπως αποκαλείται WirelessMAN-Advanced, βασίζονται σε προδιαγραφές που έρχονται να αντιμετωπίσουν με αξιώσεις τις απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε πληθώρα από περιβάλλοντα διάδοσης και για χρήστες, οι οποίοι βρίσκονται στις πλέον απομακρυσμένες περιοχές των κυψελών.

Κεντρικό σημείο στην αρχιτεκτονική του συστήματος είναι και ο μερισμός των πόρων, με τη χρήση του μεριζόμενου διαύλου. Ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) ελέγχει σε κάθε χρονική στιγμή πώς θα κατανεμηθούν τα επιμέρους τμήματα των πόρων σε διαφορετικούς χρήστες. Ο έλεγχος αφορά τόσο την κάτω όσο και την άνω ζεύξη και λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση του ράδιο-διαύλου. Στο LTE γίνεται πλήρης επαναχρησιμοποίηση των πόρων σε γειτονικές κυψέλες. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές συντονισμού των εκπομπών των γειτονικών κυψελών για χρήστες που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών και υφίστανται παρεμβολές. Επιπρόσθετα, έχει αναπτυχθεί η τεχνική συνάθροισης τμημάτων του φάσματος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στο LTE προσφέροντας εύρος ζώνης το

οποίο φθάνει τα 100MHz, αυξάνοντας κατακόρυφα τον ρυθμό μετάδοσης. Ταυτόχρονα, υποστηρίζεται η χρήση έξυπνων κεραιών, οι οποίες μπορούν να εστιάσουν την ακτινοβολία τους προς ένα χρήστη ή ομάδες χρηστών, προσφέροντας ρυθμό μετάδοσης μέχρι 3Gbps στην κάτω ζεύξη και 1,5Gbps στην άνω ζεύξη, σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές πολυπλεξίας.

Γίνεται σαφές ότι μια πληθώρα υπηρεσιών μπορεί να υποστηριχθεί, εφόσον επιτυγχάνονται τέτοιοι ρυθμοί μετάδοσης, και γι' αυτό τον λόγο εφαρμογές για επικοινωνίες μεταξύ μηχανών (Machine-to-Machine, M2M) και του Διαδικτύου των Αντικειμένων (Internet of Things, IoT) θα μπορούν να υποστηριχθούν από τα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία παρουσίαση των διαφόρων τύπων ασύρματων δικτύων, τα οποία στη σημερινή εποχή της ετερογενούς δικτύωσης δρουν συμπληρωματικά, με στόχο την αδιάλειπτη ευρυζωνική επικοινωνία.



Εικόνα 4.7: Μελλοντικές εφαρμογές ασύρματων δικτύων.

### 4.3 Ασύρματα συστήματα

Μία βασική περίπτωση ασύρματου δικτύου αποτελούν τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLANs, τα οποία εγκαθίστανται από χρήστες και παρόχους, στοχεύοντας στην επέκταση της κάλυψης των ενσύρματων τοπικών δικτύων.

## **Ασύρματα τοπικά δίκτυα**

Η τεχνολογία WLAN προσφέρει ευρυζωνική πρόσβαση σε χρήστες που μπορούν να μετακινούνται μέσα σε έναν μικρό χώρο και διαθέτουν ασύρματο τερματικό εξοπλισμό. Μέσω του WLAN είναι δυνατή η διασύνδεση συσκευών χρηστών (smartphones, tablets, laptops), καθώς και εξοπλισμού γραφείου, όπως εκτυπωτές και scanners. Καθώς η ασύρματη δικτύωση προσφέρει αυξημένη ευελιξία συγκριτικά με την ενσύρματη διασύνδεση, τα συστήματα WLAN έχουν κυριαρχήσει τόσο σε εξωτερικούς, όσο και σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, οι ταχύτητες που προσφέρουν είναι συγκρίσιμες με αυτές των ενσύρματων λύσεων, αρκεί οι παρεμβολές από άλλα WLAN να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα και η τοποθέτηση του AP να έχει πραγματοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο.

Το πρωτόκολλο του WLAN υλοποιεί ένα σύνολο χαρακτηριστικών που εγγυώνται ασφάλεια πρόσβασης και μετάδοσης (ταυτοποίηση χρήστη, κρυπτογραφημένη μετάδοση), αλλά και δυνατότητες που προσφέρονται για υπηρεσίες περιαγωγής (roaming), όπου ένας συνδρομητής τοπικού δικτύου μπορεί να συνδεθεί σε ένα άλλο WLAN (π.χ. η περίπτωση των WLAN που έχουν υλοποιηθεί σε αεροδρόμια). Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν πλατφόρμες ασύρματης πρόσβασης, όπου ιδιοκτήτες WLAN αφήνουν ελεύθερη την πρόσβαση στο δίκτυό τους, εξασφαλίζοντας πρόσβαση σε άλλα AP, των οποίων οι ιδιοκτήτες είναι μέλη αυτών των πλατφορμών, όπως στην περίπτωση του OTE My Wi-Fi.

- Περιοχές εφαρμογής

Τα WLAN βρίσκουν εφαρμογή σε τέσσερις περιπτώσεις ασύρματης δικτύωσης:

- Στην επέκταση ενσύρματων LAN.
- Στη διασύνδεση LAN που βρίσκονται σε διαφορετικά κτίρια.
- Στη νομαδική πρόσβαση.
- Στη δικτύωση ad-hoc.

- Επέκταση LAN

Με ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο αποφεύγονται τα έξοδα που σχετίζονται με την καλωδίωση, διευκολύνοντας ταυτόχρονα πιθανές τροποποιήσεις που μπορεί να απαιτηθούν κατά τη λειτουργία του δικτύου. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις όπου προτιμάται η ασύρματη δικτύωση είναι σε:

- Περιβάλλοντα μεγάλων εκτάσεων, όπως οι χώροι παραγωγής ενός εργοστασίου ή μιας αποθήκης.
- Μικρά γραφεία, όπου η εγκατάσταση και η συντήρηση ενός δικτύου με καλώδιο είναι αντικοινομική.
- Μη ιδιόκτητα κτίρια, όπου εταιρίες οι οποίες ενοικιάζουν χώρο γραφείου μπορεί να μη θέλουν να επενδύσουν στην εγκατάσταση καλωδίωσης.
- Παλαιά κτίρια, τα οποία δεν είχαν σχεδιαστεί για εγκατάσταση δομημένης καλωδίωσης.
- Ιστορικά/Διατηρητέα, τα οποία προστατεύονται από τη νομοθεσία που απαγορεύει την τροποποίηση της δομής τους.

- Δια-κτιριακή διασύνδεση LAN

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται μια ασύρματη σύνδεση από σημείο-σε-σημείο (wireless point-to-point link) μεταξύ των δύο κτιρίων. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται είναι γέφυρες ή δρομολογητές.

- Νομαδική πρόσβαση

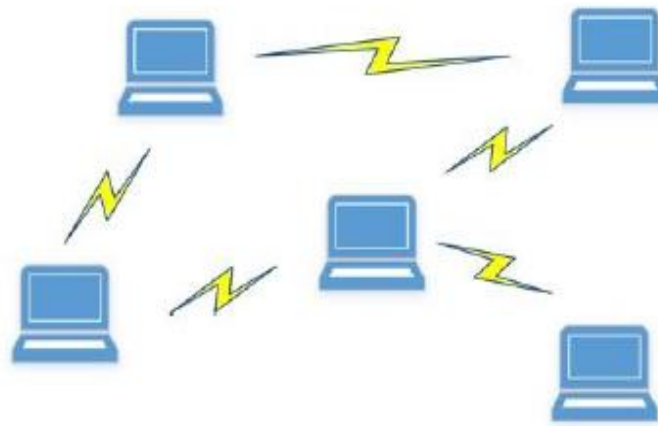
Η νομαδική πρόσβαση παρέχει μία ασύρματη σύνδεση μεταξύ ενός τοπικού δικτύου και ενός φορητού υπολογιστή, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με μια κεραία, όπως είναι ένα smartphone ή ένα laptop. Πολλοί επαγγελματίες προτιμούν τη νομαδική πρόσβαση, καταργώντας έτσι τους γεωγραφικούς περιορισμούς. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν:

- Δικτυακές συναντήσεις: Η χρήση φορητών συσκευών και άλλων ηλεκτρονικών μέσων για την on-line επικοινωνία και πρόσβαση στο δίκτυο, επιτρέπει στους ανθρώπους να συναντώνται διαδικτυακά με τη χρήση πολυμέσων.
- Συνέδρια: Κατ' εξοχήν χώροι όπου απαιτείται προσωρινή δικτύωση και σύνδεση στο Internet ή μεταφορά video και εφαρμογές εικονοδιάσκεψης.
- Κάθετες αγορές: Εργοστάσια, ιατρικά κέντρα και κλινικές, φορητά τερματικά point-of-sale (PoS) και άλλες εφαρμογές που απαιτούν από έναν χρήστη να έχει στη διάθεσή του πληροφορίες σε μόνιμη βάση, είναι ιδανικές για χρήση WLAN.

- Δικτύωση ad-hoc

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει κεντρικός υπολογιστής που να διαχειρίζεται το δίκτυο και οι φορητές συσκευές διασυνδέονται μεταξύ τους. Προσωρινά γραφεία, ομάδες εργασίας, επιχειρήσεις αποκατάστασης καταστροφών, πολιτικά και άλλα συνέδρια, οικονομικοί έλεγχοι, γενικά κάθε είδους εφαρμογή που απαιτεί προσωρινή διασύνδεση μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω ad-hoc δικτύων.

Οι επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή (Device-to-Device, D2D) έχουν προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον, οδηγώντας σε τοπολογίες όπου συσκευές χρηστών επικοινωνούν μεταξύ τους και ανταλλάσσουν δεδομένα απευθείας, με βάση τη ζήτηση των αρχείων, τα οποία είναι αποθηκευμένα στις συσκευές τους.



Εικόνα 4.8: Δίκτυο ad-hoc.

## WiMAX

Τα ασύρματα συστήματα τέταρτης γενιάς, τα οποία έχουν γίνει διαθέσιμα τα τελευταία χρόνια, προσφέρουν ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση και άλλες υπηρεσίες, οι οποίες καθιστούν εφικτή τη μετάβαση στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο και με στόχο την ικανοποίηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, ιδιαίτερα από φορητές συσκευές, όπως είναι τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα, ξεκίνησε η προτυποποίηση των ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων (Wireless Metropolitan Networks, WMANs) από οργανισμούς, όπως το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και το Ινστιτούτο Ευρωπαϊκών Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute - ETSI). Έτσι, άρχισε σταδιακά η ανάπτυξη του IEEE 802.16, για

το οποίο χρησιμοποιείται το εμπορικό όνομα WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Η ομάδα εργασίας 802.16 του IEEE ιδρύθηκε το 1999 και έκτοτε έχει αναπτύξει διάφορες εκδόσεις προτύπων ράδιο-διεπαφής (air Interface) για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα.

Τα πρότυπα IEEE 802.16x ορίζουν τη δομή των λειτουργιών του φυσικού στρώματος και του στρώματος ζεύξεως δεδομένων που εμφανίζονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά του 802.16 για το φυσικό επίπεδο και το στρώμα MAC, παρέχουν σημαντική ευελιξία και επιτρέπουν διάφορες υλοποιήσεις για τα χαρακτηριστικά του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, απαιτώντας προσοχή, ώστε να αποφευχθούν οι περιπτώσεις μη συμβατών υλοποιήσεων.

- Εφαρμογές WiMAX

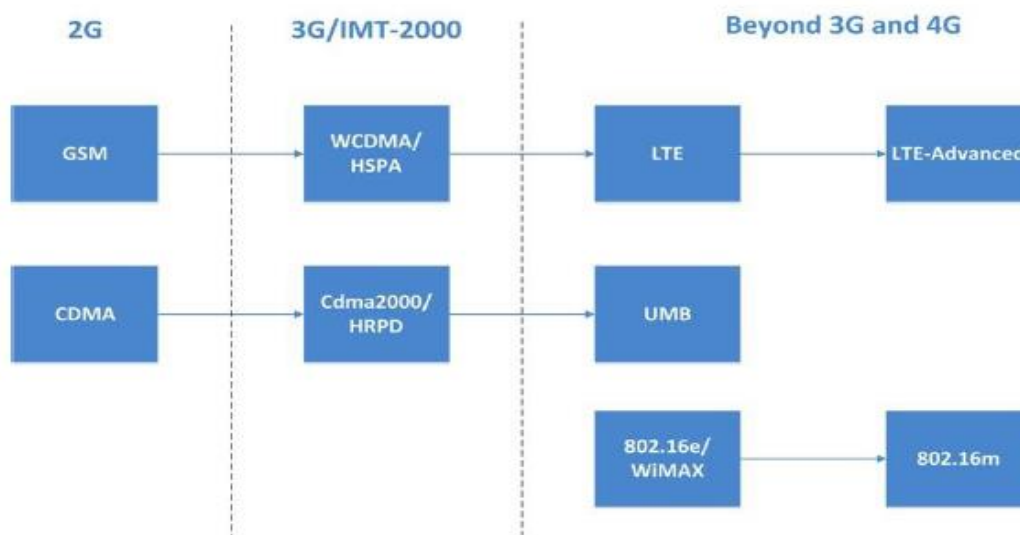
Γενικά, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες εφαρμογών του WiMAX. Οι εφαρμογές που αφορούν σταθερά σημεία πρόσβασης, οι οποίες παρέχουν ευρυζωνική πρόσβαση σε σπίτια και σε επιχειρήσεις, και οι εφαρμογές WiMAX που απευθύνονται σε κινητούς χρήστες, οι οποίες προσφέρουν πλήρη κινητικότητα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πιο αναλυτικά, οι κύριες εφαρμογές του WiMAX είναι:

- Ασύρματη σύνδεση με το δίκτυο κορμού και ασύρματη πρόσβαση: Το 802.16 αποτελεί μία εξαιρετική λύση για παρόχους υπηρεσιών Διαδικτύου, οι οποίοι θα μπορούν να αποφύγουν τη μίσθωση ενσύρματων γραμμών, παρέχοντας ασύρματη σύνδεση με το δίκτυο κορμού. Επιπλέον, εξαιτίας των περιορισμών της τεχνολογίας DSL παρατηρούνται προβλήματα ποιότητας υπηρεσιών, ειδικά σε χρήστες που βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις από τα ψηφιακά κέντρα. Η χρήση οπτικής ίνας από τη μεριά των παρόχων βελτιώνει την απόδοση του δικτύου αρκετά, ωστόσο, ο χαλκός παραμένει στην εγκατάσταση του «τελευταίου μιλίου» (last mile) και μαζί με αυτόν παραμένουν και τα προβλήματα για τους χρήστες. Η ασύρματη πρόσβαση μέσω του 802.16 μπορεί να λύσει αυτά τα προβλήματα.
- Επέκταση της ασύρματης ευρυζωνικότητας: Το πρότυπο 802.16 συνεισφέρει στην αξιοποίηση του 802.11. Τα σπίτια ή τα γραφεία που έχουν μικρά LAN, τα οποία χρησιμοποιούν το 802.11, μπορεί να γίνουν σταθμοί για ένα 802.16 WAN, ειδικότερα σε περιοχές που η χρήση καλωδίων είναι δύσκολη.

- Απομακρυσμένες περιοχές: Η ασύρματη δικτύωση με τη χρήση του 802.16 αποτελεί μία αποδοτική επιλογή για απομακρυσμένες περιοχές, καθώς η αναβάθμιση του δικτύου DSL σε απομακρυσμένες αγροτικές ή νησιωτικές περιοχές είναι ακριβή, συμπεριλαμβανομένου και του μικρού αριθμού συνδρομητών που θα καλυφθεί. Έτσι, η ασύρματη επέκταση σε αυτές τις περιοχές με χρήση της WiMAX τεχνολογίας είναι μια ελκυστική επιλογή για τους παρόχους υπηρεσιών Διαδίκτυου.

#### 4.4 Κυβελωτά συστήματα

Μία εξίσου σημαντική κατηγορία ασύρματων δικτύων είναι τα κυβελωτά δίκτυα ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικά άλματα αναφορικά με την αύξηση της χωρητικότητας αυτών των δικτύων, συνδυάζοντας έτσι ευρυζωνικές υπηρεσίες με μεγάλες ακτίνες κάλυψης. Η μαζική υιοθέτηση των smartphones καθιστά τα κυβελωτά συστήματα ως τον κύριο εκπρόσωπο ασύρματης δικτύωσης, δίνοντας το κίνητρο σε ερευνητές και εταιρείες για την περαιτέρω ανάπτυξή τους.

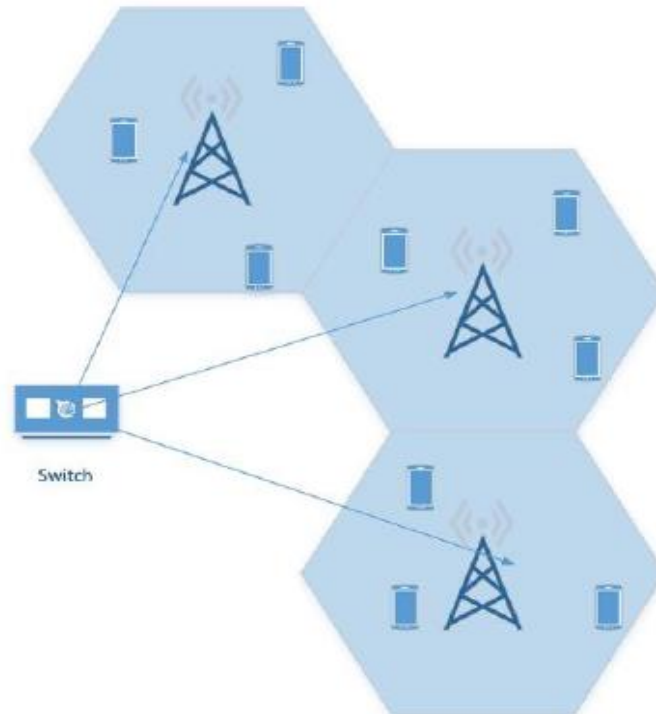


Εικόνα 4.9: Εξέλιξη των κυβελωτών συστημάτων.

Γενικά, στα κυβελωτά δίκτυα, όταν ο χρήστης θέλει να πραγματοποιήσει μία κλήση, το κινητό τηλέφωνο επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης, ζητώντας να συνδεθεί με έναν δεδομένο τηλεφωνικό αριθμό ή με έναν δικτυακό κόμβο με συγκεκριμένη διεύθυνση IP. Εάν ο σταθμός βάσης έχει επαρκείς πόρους για να ικανοποιήσει την κλήση, ένα κέντρο μεταγωγής (switching center) θα αναλάβει να δρομολογήσει τα δεδομένα του



χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, η κλήση καταλαμβάνει ένα ασύρματο κανάλι, το οποίο αποδίδεται αποκλειστικά στο χρήστη μέχρι την ολοκλήρωσή της. Η βασική δομή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Δομή κυψελωτού συστήματος.

Τα συστήματα κινητών τηλεφώνων αποτελούνται από πολλές μικρές κυψέλες. Κάθε κυψέλη σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας αντιπροσωπεύει την περιοχή εξυπηρέτησης ενός σταθμού βάσης. Η πυκνή τοποθέτηση σταθμών βάσης επιτρέπει στα κινητά τηλέφωνα να εκπέμπουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος (τυπικά 200mW-1W, ανάλογα με το σύστημα). Έτσι, χρησιμοποιούν μικρούς πομπούς και μπαταρίες, μειώνοντας δραστικά το μέγεθός τους και αυξάνοντας τη χρηστικότητά τους.

Καθώς χιλιάδες κλήσεις κινητών τηλεφώνων λαμβάνουν χώρα οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ημέρας, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη διάφορων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης στο ασύρματο μέσο. Έτσι, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας διαχωρίζουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλά κανάλια, κάθε ένα από τα οποία είναι ικανό να υποστηρίξει μία συνομιλία. Οι σημαντικότερες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης είναι:

- Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA), που διαιρεί το διαθέσιμο φάσμα σε πολλά κανάλια.

Όταν ένα FDMA κινητό τηλέφωνο εγκαθιστά μια κλήση, δεσμεύει το κανάλι συχνότητας για όλη τη διάρκεια της κλήσης.

- Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA). Η τεχνική TDMA αποδίδει ένα ραδιοδίαυλο σε πολλούς χρήστες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) που υιοθετήθηκε στα τρίτης γενιάς δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα συστήματα CDMA κωδικοποιούν κάθε κλήση ως συνθηματική ακολουθία κατά μήκος ολόκληρου του φάσματος συχνοτήτων. Στην πραγματικότητα, κάθε σήμα δεν απλώνεται κατά μήκος όλου του φάσματος (12,5MHz για τα παραδοσιακά κινητά ή 60MHz στα PCS (Personal Communication Service)), αλλά απλώνεται κατά μήκος μιας περιοχής συχνοτήτων 1,25 MHz.
- Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χώρου (Space Division Multiple Access, SDMA), η οποία λειτουργεί με τον έλεγχο της ακτινοβολούμενης Η/Μ ακτινοβολίας για κάθε χρήστη στην περιοχή κάλυψης. Στην τεχνική SDMA χρησιμοποιούνται έξυπνες προσαρμοστικές κεραίες. Έτσι, σε κάθε περιοχή που εξυπηρετείται από ένα λοβό ακτινοβολίας, είναι δυνατή η χρήση άλλων τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης.
- Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση ορθογώνιων συχνοτήτων (OFDMA). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης OFDM, η οποία καταφέρνει να αντιμετωπίσει την επιλεκτικότητα του καναλιού ως προς τη συχνότητα, με το σπάσιμο της μετάδοσης σε κομμάτια μέσω καναλιών με μικρό εύρος ζώνης, γνωστά και ως υποφορείς (subcarriers), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση της πληροφορίας. Επιπρόσθετα, το σχήμα OFDMA προσθέτει ευελιξία στην ανάθεση των πόρων του συστήματος, τόσο στον χρόνο όσο και στη συχνότητα. Μέσω της τεχνικής αυτής, πραγματοποιείται βέλτιστη απόδοση του φάσματος στους χρήστες, αξιοποιώντας τους υποφορείς με τα βέλτιστα χαρακτηριστικά.

Όταν ο χρήστης ανοίγει το κινητό του τηλέφωνο, στέλνει το αναγνωριστικό του στον σταθμό βάσης της κυψέλης στην οποία βρίσκεται. Αυτό συμπεριλαμβάνει τον αριθμό ταυτοποίησης της κινητής συσκευής (Mobile Identification Number, MIN), δηλαδή τον αριθμό του τηλεφώνου και τον αριθμό του ηλεκτρονικού σειριακού αριθμού της συσκευής (Electronic Serial Number, ESN). Ο σταθμός βάσης προωθεί αυτές τις

πληροφορίες σε έναν κεντρικά τοποθετημένο διακόπτη, μέσω του δικτύου κορμού του παρόχου που συνδέει το διακόπτη με άλλες κυψέλες. Όταν ο διακόπτης παίρνει τις πληροφορίες, τις προωθεί σε ανωτέρου επιπέδου διακόπτες.

Όταν λαμβάνεται μία κλήση, αυτή θα έρθει στον διακόπτη που εξυπηρετεί το κέντρο. Αυτός ο υψηλού επιπέδου διακόπτης θα δρομολογήσει την κλήση σε χαμηλότερου επιπέδου διακόπτες, εάν υπάρχουν. Όταν η κλήση περάσει σε χαμηλότερου επιπέδου διακόπτη, αυτός ελέγχει αν η κινητή συσκευή είναι ακόμη καταχωρημένη, δηλαδή αν είναι ενεργοποιημένη και βρίσκεται εντός της ακτίνας κάλυψης του σταθμού βάσης. Αν είναι καταχωρημένη, η συσκευή ειδοποιείται μέσω του καναλιού σηματοδότησης και αρχίζει να λαμβάνει δεδομένα κλήσης, εφόσον ο χρήστης επιλέξει να αποδεχτεί την κλήση.

Για την παροχή βέλτιστης κάλυψης, οι κυψέλες πρέπει να επικαλύπτονται, ώστε όταν ένας χρήστης ταξιδεύει ανάμεσα στις κυψέλες, η μία κυψέλη να μεταφέρει την κλήση σε μία άλλη κυψέλη. Οι κυψέλες πρέπει, επίσης, να μην παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται δίνοντας σε κάθε κυψέλη διαφορετικό τμήμα του φάσματος της συχνότητας (εκτός της περίπτωσης του CDMA). Όταν το επίπεδο ισχύος του χρήστη αρχίζει να εξασθενεί, ο σταθμός βάσης προσδιορίζει ποια κυψέλη είναι η πιο κοντινή. Μόλις αποκτηθεί αυτή η πληροφορία, ο σταθμός βάσης στέλνει ένα μήνυμα στον νέο σταθμό βάσης και στη φορητή συσκευή. Με αυτόν τον τρόπο, ο νέος σταθμός βάσης συνεχίζει την κλήση και ο παλιός τη διακόπτει, καθώς το κινητό αλλάζει ράδιο-διάυλο.

#### **4.5 Επίγεια μικροκυματικά συστήματα**

Οι σταθερές μικροκυματικές ζεύξεις παρέχουν διασύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων σταθερών επίγειων σημείων για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπως τη μετάδοση φωνής, video ή δεδομένων. Αρχικά, η ανάπτυξη των ασύρματων μικροκυματικών συστημάτων πραγματοποιήθηκε για υποστήριξη των ήδη υπάρχοντων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στη συνέχεια, προτάθηκε για την παροχή σταθερής ασύρματης πρόσβασης και τη διασύνδεση συνδρομητών. Οι ασύρματες μικροκυματικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται συνήθως για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, όπου ο πομπός και ο δέκτης διαθέτουν οπτική επαφή μεταξύ τους, όπως π.χ. για τη διασύνδεση των σταθμών βάσεων κινητής τηλεφωνίας μεταξύ

τους, και υλοποιούνται με παραβολικές κεραίες, οι οποίες παράγουν κατευθυντικές δέσμες σε συχνότητες από 2 έως 40 GHz.

Οι τοπολογίες των σταθερών μικροκυματικών ζεύξεων είναι οι εξής:

1. Οι ζεύξεις σημείου προς σημείο (point-to-point), που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα υποδομών για την επικοινωνία υψηλών αποστάσεων με υψηλούς ρυθμούς.
2. Οι ζεύξεις σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία (point-to-multipoint), που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης επιτρέποντας στους παρόχους να προσφέρουν υπηρεσίες σε συνδρομητές, χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης καλωδίων.
3. Οι ζεύξεις πολλαπλών-σημείων-προς-πολλαπλά-σημεία (multipoint-to-multipoint), οι οποίες ονομάζονται και δίκτυα πλέγματος (mesh networks), και παρέχουν ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε πολλαπλούς κόμβους του δικτύου, χωρίς την ανάγκη ενός κεντρικού σταθμού βάσης.

Δύο από τα πιο σημαντικά επίγεια μικροκυματικά συστήματα αποτελούν η τοπική πολυσημειακή υπηρεσία διανομής (Local Multipoint Distribution Service, LMDS) και η πολυδιαυλική πολυσημειακή υπηρεσία διανομής (Multichannel Multipoint Distribution Service, MMDS), που έχουν τις ρίζες τους στην τηλεόραση. Τα συστήματα αυτά είναι ευρυζωνικά από σημείο-προς πολλά σημεία (point-to-multipoint), παρέχοντας ψηφιακές υπηρεσίες διπλής κατεύθυνσης, όπως βίντεο, φωνή, δεδομένα και πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Το LMDS διαθέτει μεγάλο υψηλό εύρος ζώνης, παρέχοντας επικοινωνία με υψηλού επιπέδου ποιότητα υπηρεσίας.

Αρχικά, τα συστήματα αυτά σχεδιάστηκαν για την εξυπηρέτηση της ασύρματης ψηφιακής τηλεόρασης, ωστόσο, σε σύντομο χρονικό διάστημα, έγινε εμφανές ότι μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες της ασύρματης συνδρομητικής τηλεόρασης. Επιπλέον, το MMDS εξυπηρετεί ευρυζωνικές ασύρματες υπηρεσίες σε συχνότητες κάτω των 10GHz, ενώ το LMDS λειτουργεί στις συχνότητες άνω των 10GHz. Οι υπηρεσίες αυτές παρέχονται σε χρήστες, οι συσκευές των οποίων βρίσκονται σταθερά σε συγκεκριμένα σημεία.

#### **4.6 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων**

Οι αισθητήρες είναι διατάξεις που μετατρέπουν κάποια γεγονότα ή φυσικά μεγέθη σε ηλεκτρικό σήμα, προκειμένου να καταστεί δυνατή η μέτρηση αυτών των μεγεθών.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο αισθητήρας είναι εκείνη η διάταξη, η οποία πραγματοποιεί τη διασύνδεση του δικτυακού συστήματος με τον αναλογικό κόσμο. Ένα πολύ απλό παράδειγμα αισθητήρα μπορεί να αποτελέσει το μικρόφωνο, το οποίο μετατρέπει την ακουστική – ηχητική ενέργεια σε ηλεκτρικό σήμα.

Η επιλογή των αισθητήρων πραγματοποιείται με μια σειρά από κριτήρια που παρατίθενται παρακάτω:

- Εμβέλεια
- Γωνιακό εύρος (Field Of View, FOV)
- Ακρίβεια
- Επαναληψιμότητα
- Διακριτική ικανότητα
- Συμβατότητα με το περιβάλλον χρήσης
- Κατανάλωση ενέργειας
- Αξιοπιστία του υλικού (hardware)
- Μέγεθος

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων οφείλεται αρχικά στην ανάπτυξη των Μίκρο-Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (Micro-Electromechanical Systems, MEMS). Σε μια διάταξη MEMS είναι δυνατό να ενσωματώσουμε μια σειρά από μικρότερες διατάξεις πέραν του αισθητηρίου, οι οποίες δύνανται να βοηθήσουν τον αισθητήρα στο έργο που επιτελεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των έξυπνων αισθητήρων. Ο συνδυασμός πέραν του ενός έξυπνου αισθητήρα οδηγεί στη δημιουργία των κόμβων αισθητήρων (sensor nodes). Ένας κόμβος αισθητήρων αποτελεί το σημείο στο οποίο μπορεί να συνδεθεί ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος αισθητήρων αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Πέραν του ενός αισθητήρες
- Επεξεργαστής (Micro Processor Unit, MCU)
- Μνήμη
- Τροφοδοσία
- Πομποδέκτης
- Ενεργοποιητής

Από τη μεριά τους, οι αισθητήρες που τοποθετούνται στους κόμβους μπορεί να είναι:

- Μηχανικοί

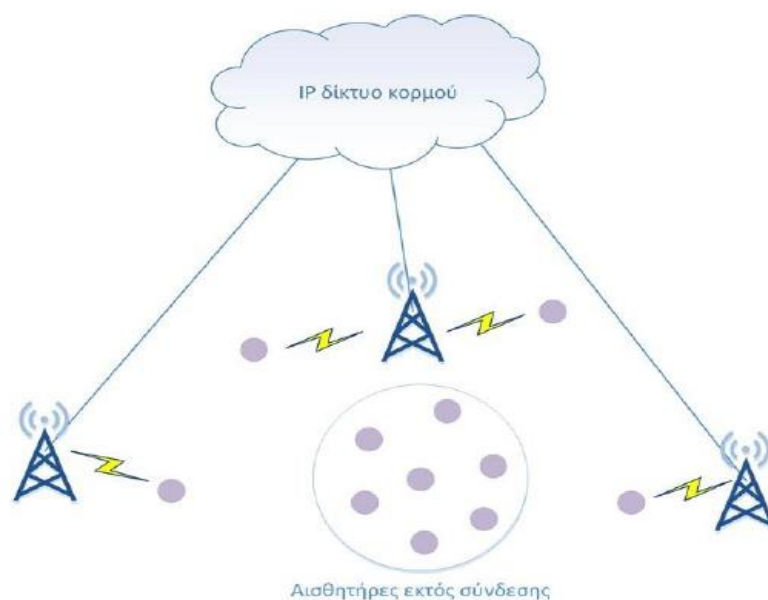
- Θερμικοί
- Βιολογικοί
- Χημικοί
- Οπτικοί
- Μαγνητικοί

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από ένα μεγάλο σύνολο κόμβων αισθητήρων (μερικές δεκάδες έως και χιλιάδες) για συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να είναι:

1. Δομημένο δίκτυο (structured WSN)
2. Αδόμητο δίκτυο (Ad-Hoc WSN)

#### 1. Δομημένο δίκτυο (Structured WSN)

Το δομημένο δίκτυο σχεδιάζεται από την αρχή με συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, η οποία τηρείται και στο επόμενο στάδιο που αφορά τη λειτουργία του. Συγκεκριμένα, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, από επικοινωνιακής πλευράς, αποτελείται από μικρούς επικοινωνιακούς σταθμούς χαμηλής εμβέλειας, οι οποίοι συνδέονται με έναν σταθμό βάσης.



Εικόνα 4.11: Δομημένο δίκτυο αισθητήρων (structured WSN).

Ο σταθμός βάσης είναι επιφορτισμένος με το έργο της διασύνδεσης με το δίκτυο κορμού, στο οποίο διοχετεύονται τα δεδομένα που συλλέγονται από το δίκτυο αισθητήρων. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού, ανατίθεται σε κάθε σταθμό βάσης ένα

σύνολο δικτύων αισθητήρων, το εύρος των οποίων κυμαίνεται ανάλογα με το είδος των μετρήσεων που πρέπει να κάνουν. Στο δομημένο δίκτυο, οι συνδέσεις ανάμεσα στο δίκτυο αισθητήρων και τον σταθμό βάσης είναι μονού άλματος (single hop). Αυτό σημαίνει ότι ο εκάστοτε σταθμός βάσης θα πρέπει να έχει υψηλή ικανότητα διαβίβασης δεδομένων, λόγω του ότι θα πρέπει να εξυπηρετεί ένα μεγάλο αριθμό δικτύων αισθητήρων. Επίσης, από τη στιγμή που έχουμε συνδέσεις μονού άλματος, η επικοινωνιακή υποδομή του κάθε δικτύου αισθητήρων δεν απαιτεί να έχει πολύ υψηλές επιδόσεις, λόγω του ότι εξυπηρετεί μόνο ένα δίκτυο.

Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει η δομημένη τοπολογία έγκειται στο γεγονός ότι κάθε νεοεισερχόμενο δίκτυο αισθητήρων δεν αναγνωρίζεται. Στην προκείμενη περίπτωση, χρειάζεται να γίνει συμπληρωματικός συνδυασμός, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ρυθμιστεί το επικοινωνιακό σύστημα εκ νέου, έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωρίσει τα νεοεισερχόμενα δίκτυα. Εντούτοις, το δομημένο δίκτυο χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και κυρίως εκεί όπου το περιβάλλον μπορεί να χαρακτηριστεί ως «στατικό», χωρίς μεγάλες μελλοντικές αλλαγές που θα απαιτήσουν μεγάλο όγκο νέων εγκαταστάσεων δικτύων αισθητήρων.

## 2. Αδόμητο δίκτυο (Ad-Hoc WSN)

Το ad-hoc δίκτυο διαφοροποιείται αρκετά από το δομημένο. Αρχικά, ενώ στο δομημένο η κεντρική επικοινωνία επιτυγχάνεται διαμέσου των σταθμών βάσης, εδώ, η ανάθεση των επικοινωνιακών «ρόλων» ανατίθεται στο επίπεδο των κόμβων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος από επικοινωνιακής πλευράς έχει τη δυνατότητα να λάβει και να αποστείλει δεδομένα, ενώ παράλληλα μπορεί να αποτελέσει μέσο για την επικοινωνία άλλων κόμβων μεταξύ τους.

Στη συγκεκριμένη τοπολογία υποστηρίζονται συνδέσεις πολλαπλών αλμάτων (multi-hop). Αυτό ως στοιχείο προσδίδει μια ευελιξία στο δίκτυο, ενώ παράλληλα αποφορτίζεται ένα μεγάλο κομμάτι από τον σταθμό βάσης, όσον αφορά τις επικοινωνίες μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Η Εικόνα 4.12 απεικονίζει μια τοπολογία ενός ad-hoc δικτύου αισθητήρων, η οποία επικοινωνεί μέσω ενός σταθμού βάσης με το δίκτυο κορμού.



Εικόνα 4.12: Ad-hoc δίκτυο αισθητήρων.

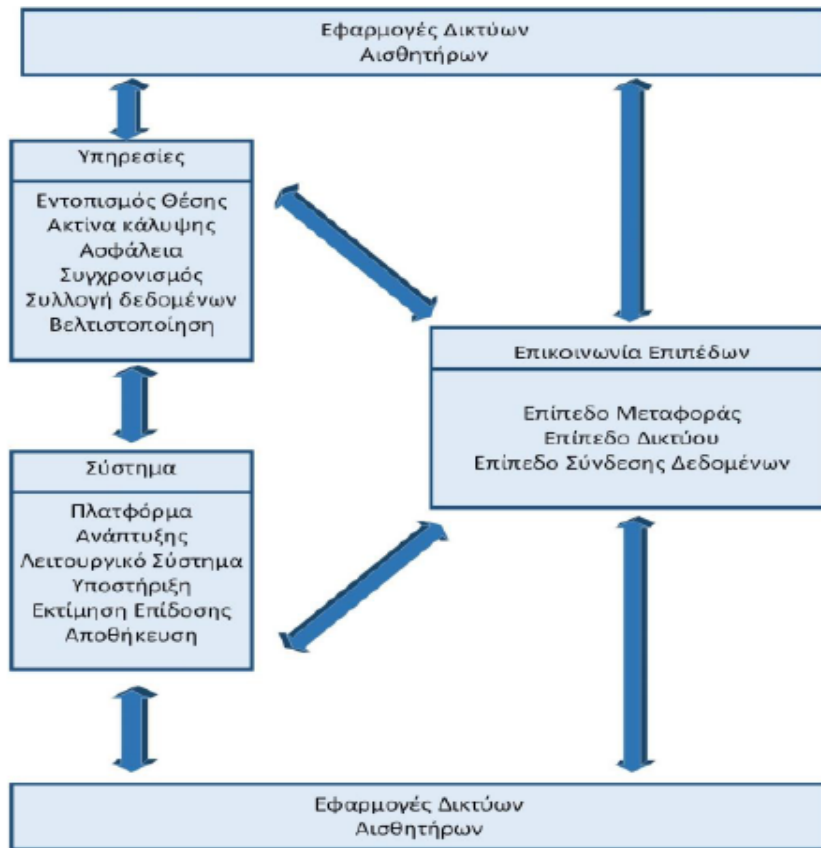
- Ανάπτυξη ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Η ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου απαιτεί αρχικά τον σχεδιασμό του, για τον οποίο είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων έχει μικρή ακτίνα επικοινωνιακής κάλυψης, όπως επίσης και μικρό εύρος ζώνης.

Ο επεξεργαστής που διαθέτει κάθε κόμβος μπορεί να κάνει βασικές υπολογιστικές διεργασίες, όπως τη λήψη των δεδομένων από το περιβάλλον και την ομαδοποίησή τους, έτσι ώστε να αποσταλούν στο κεντρικό σημείο ελέγχου και επεξεργασίας. Το μέγεθος του κόμβου εξαρτάται, επίσης, από το περιβάλλον. Εάν πρόκειται για εσωτερική εγκατάσταση (indoor), τότε μπορούμε να έχουμε μικρό αριθμό κόμβων (μερικές δεκάδες). Εάν πρόκειται για εξωτερική εγκατάσταση (outdoor), τότε συζητάμε για μεγάλο αριθμό κόμβων (μερικές εκατοντάδες). Επίσης, τα φυσικά εμπόδια δυσχεραίνουν την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Σε συνέχεια με τις δυο προηγούμενες τοπολογίες που περιγράφηκαν, πρέπει να αναφερθεί ότι η ad-hoc τοπολογία συνίσταται έναντι της δομημένης, όταν ο περιβάλλον χώρος παρουσιάζει δυσκολία πρόσβασης, όπως, επίσης, και αν το δίκτυο αποτελείται από μεγάλο αριθμό κόμβων (εκατοντάδες έως χιλιάδες κόμβους).

Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της ανάπτυξης του δικτύου, έχει αναπτυχθεί ένα βασικό δομικό διάγραμμα, το οποίο παρατίθεται στην Εικόνα 4.13.





Εικόνα 4.13: Διάγραμμα ανάπτυξης ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, η ανάπτυξη των εφαρμογών απαιτεί την ύπαρξη τριών βασικών στοιχείων. Τις υπηρεσίες που προσφέρει το δίκτυο, την επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων, καθώς και το σύστημα που υποστηρίζει το δίκτυο. Το κεντρικό σημείο του διαγράμματος αποτελεί η επικοινωνία. Διαμέσου της επικοινωνίας είναι εφικτό να υπάρξει διασύνδεση μεταξύ των επιπέδων τα οποία οδηγούν στην υλοποίηση των εφαρμογών. Όπως παρατηρείται, οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων βρίσκονται σε δυο σημεία του διαγράμματος. Αυτό γίνεται, έτσι ώστε να είναι κατανοητό ότι οποιαδήποτε ανάπτυξη πραγματοποιείται σε επίπεδο δικτύου αισθητήρων είναι για να εξυπηρετηθούν κάποιες βασικές εφαρμογές.

Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την περιοχή στην οποία τοποθετείται το εκάστοτε δίκτυο, και συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

	Επίγεια δίκτυα	Υπόγεια δίκτυα	Υποβρύχια δίκτυα	Πολυμεσικά δίκτυα	Κινητά δίκτυα
Εφαρμογές	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιβαλλοντική ανίχνευση και παρακολούθηση</li> <li>• Βιομηχανική παρακολούθηση</li> <li>• Εξερεύνηση επιφανειών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Παρακολούθηση γεωργίας</li> <li>• Υπόγεια δομική παρακολούθηση</li> <li>• Παρακολούθηση εδάφους, ύδατος και μεταλλευμάτων</li> <li>• Παρακολούθηση συνόρων και στρατιωτικές εφαρμογές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Παρακολούθηση μόλυνσης</li> <li>• Υποθαλάσσια παρακολούθηση</li> <li>• Πρόβλεψη και πρόληψη καταστροφών</li> <li>• Παρακολούθηση σεισμικών φαινομένων</li> <li>• Υποβρύχια ρομποτική</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ενίσχυση ήδη υπαρχουσών εφαρμογών, όπως είναι η παρακολούθηση χώρων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιβαλλοντική παρακολούθηση</li> <li>• Στρατιωτικές εφαρμογές</li> <li>• Ανίχνευση στόχου</li> <li>• Υποβρύχια παρακολούθηση</li> <li>• Εύρεση και διάσωση</li> </ul>

Πίνακας 4.1 Εφαρμογές δικτύων αισθητήρων.

Στην προσπάθεια να καλύψουμε την ανάπτυξη του δικτύου αισθητήρων, πρέπει να σταθούμε και στο κομμάτι της επικοινωνίας, δηλαδή, στο εκάστοτε σύστημα που υλοποιείται, έτσι ώστε να επικοινωνήσουν μεταξύ τους οι κόμβοι των αισθητήρων. Στο σύστημα επικοινωνίας περιλαμβάνονται στοιχεία, όπως είναι η περιοχή κάλυψης που προσφέρει ο επικοινωνιακός εξοπλισμός, η διαμόρφωση του σήματος, ο ρυθμός μετάδοσης, η κωδικοποίηση, το είδος της κεραίας μετάδοσης, καθώς και η κατανάλωση ισχύος που έχει. Αντίστοιχα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το κομμάτι της επεξεργασίας. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο κάθε κόμβος αισθητήρων είναι εφοδιασμένος με έναν επεξεργαστή που ονομάζεται και micro-controller unit, MCU.

Ο μικροεπεξεργαστής είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο του αισθητήρα (ή των αισθητήρων), εκτελεί αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος ως προς τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί και τέλος, υλοποιεί από πλευράς υλικού την επικοινωνία μεταξύ κόμβου και δικτύου. Όταν επιλέγεται ο μικροεπεξεργαστής για το δίκτυο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες, όπως είναι η απόδοση και οι ανάγκες σε επεξεργαστική ισχύ, η κατανάλωση ενέργειας, ο χρόνος αφύπνισης, η ταχύτητα λειτουργίας της μονάδας, το κόστος ανάπτυξης, καθώς και η υποστήριξη περιφερειακών μονάδων.

### Τεχνολογία RFID

Η ταυτοποίηση μέσω ράδιο-συχνοτήτων (RFID) έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον και καταλαμβάνει αυξανόμενα μερίδια της αγοράς από τη δεκαετία του 1970, όταν έγιναν διαθέσιμες οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές της, οι οποίες αφορούσαν την ταυτοποίηση ζώων και συστήματα πληρωμής διοδίων.

Τα συστήματα RFID βασίζονται στην αρχή λειτουργίας των ραντάρ, δηλαδή της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (back-scatter). Η απλότητα του σχεδιασμού των κυκλωμάτων (αναμεταδοτών – tags/transponders) RFID οδηγεί σε χαμηλό κόστος και ευκολία εγκατάστασης, χαρακτηριστικά τα οποία έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στις αλυσίδες τροφοδοσίας και σε λογιστικά συστήματα που σχετίζονται με αυτές.

Η δυνατότητα των ταυτοτήτων RFID να συνδυάζουν λειτουργίες αισθητήρων και αναγνώρισης, τις έχει καταστήσει ως ένα από τα δομικά στοιχεία του Διαδικτύου των Αντικειμένων (Internet of Things), το οποίο θα διασυνδέσει μεγάλα δίκτυα συσκευών. Με αυτό τον τρόπο, ένα μεγάλο εύρος έξυπνων αντικειμένων, όπως οικιακές συσκευές, αυτοκίνητα και κτίρια, καθώς και εφαρμογές σχετικές με τηλεϊατρική και συστήματα υποβοήθησης, θα είναι διαθέσιμα τα επόμενα χρόνια στην υπηρεσία της κοινωνίας.

Η τεχνολογία RFID υλοποιεί πολύ χαμηλής ισχύος διατάξεις, που καλούνται RFID αναμεταδότες. Η ακτίνα κάλυψης μπορεί να είναι κάτι λιγότερο από 1cm μέχρι και μερικά μέτρα, ανάλογα με το είδος του αναμεταδότη. Οι επικοινωνίες πραγματοποιούνται σε φάσμα συχνοτήτων χωρίς αδειοδότηση. Ανάλογα με τη χρήση του, ο αναμεταδότης μπορεί να είναι ενεργός ή παθητικός. Ο ενεργός έχει ξεχωριστή παροχή ενέργειας που προέρχεται συνήθως από μία μικρή μπαταρία. Αντίστοιχα, ο παθητικός δεν έχει ξεχωριστή παροχή ενέργειας και συλλέγει ενέργεια από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό αποτύπωμα αυτών των συσκευών, καθώς και τη διαχείριση των αποβλήτων των μπαταριών τους, όταν παύσει η λειτουργία τους.

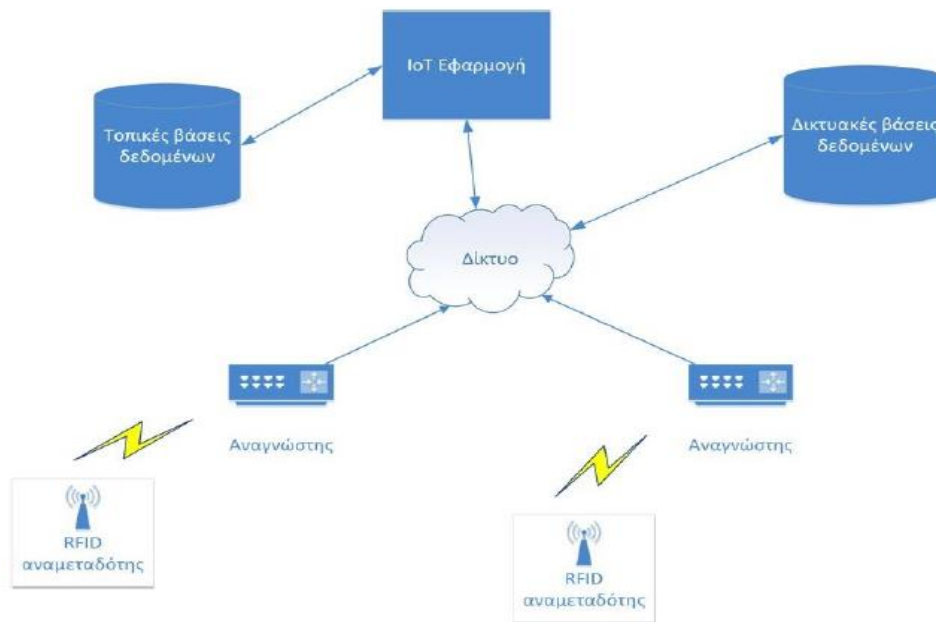
- Εφαρμογές RFID

Οι εφαρμογές RFID διαφέρουν, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι γενικές κατηγορίες RFID εφαρμογών:

- Εφαρμογές άμεσης λειτουργίας: Οι εφαρμογές άμεσης λειτουργίας παρέχουν πληροφορίες, προειδοποιήσεις και επισημάνσεις, όταν οι αναμεταδότες ενεργοποιηθούν από κάποιο σήμα ή όταν εκπέμπουν κάποιο σήμα και αυτό λαμβάνεται από κάποιον αναγνώστη. Ένα παράδειγμα τέτοιου τύπου αποτελείται από ένα RFID σύστημα ενός καταστήματος λιανικής πώλησης, το οποίο χρησιμοποιείται για την αποτροπή κλοπών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι

αναμεταδότες προσκολλώνται στα προϊόντα και εκπέμπουν συνεχώς ένα σήμα, το οποίο λαμβάνεται από εγκατεστημένους αναγνώστες. Αν διακοπεί η επικοινωνία του σήματος αυτού από τον αναγνώστη ή για κάποιο λόγο ο αναμεταδότης πάψει να εκπέμπει, τότε ενεργοποιείται το αντικλεπτικό σύστημα.

- Εφαρμογές έμμεσης λειτουργίας: Τα RFID συστήματα κατά τη λειτουργία τους συλλέγουν διάφορες πληροφορίες για τα αγαθά στα οποία εγκαθίστανται. Οι συλλεγόμενες πληροφορίες μεταδίδονται σε ειδικά συστήματα επεξεργασίας, τα οποία χρησιμοποιούν μεθόδους εξόρυξης γνώσης (data mining). Έτσι, σε ένα κατάστημα λιανικής πώλησης, τέτοιες πληροφορίες μπορεί να καθορίσουν τη δημοφιλία ενός προϊόντος και το αγοραστικό κοινό του. Σε επόμενο στάδιο, αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της εξόρυξης γνώσης, μια διαφημιστική εταιρεία μπορεί να αξιοποιήσει αυτές τις πληροφορίες, με στόχο την καλύτερη προώθηση του προϊόντος.
- Εφαρμογές πραγματικού χρόνου: Πραγματικού χρόνου καλούνται οι εφαρμογές οι οποίες είναι απαραίτητο να έχουν άμεση χρονικά πρόσβαση στα δεδομένα που χρειάζονται. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι κρίσιμης σημασίας σε τέτοια συστήματα, τα οποία μπορεί να υποστηρίζουν εφαρμογές εντοπισμού και κατάστασης προϊόντων και ανθρώπων. Εφαρμογές πραγματικού χρόνου είναι τα συστήματα αυτοματοποίησης παραγωγής, τα συστήματα ελέγχου διαδικασιών, καθώς και τα συστήματα χειρισμού υλικών και τροφοδοσίας.
- Δικτυακές εφαρμογές: Κύριο χαρακτηριστικό των δικτυακών εφαρμογών είναι οι χαμηλού κόστους αναμεταδότες, οι δικτυωμένες συσκευές ανάγνωσης με συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών, και μία ή περισσότερες βάσεις δεδομένων που αποθηκεύουν πληροφορίες του προϊόντος και επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών. Σε τέτοια συστήματα, πέραν από τη διασύνδεση που υπάρχει με διάφορες βάσεις δεδομένων, σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει και διασύνδεση μεταξύ συστημάτων για την αξιοποίηση των πληροφοριών που διαθέτουν τα διασυνδεδεμένα συστήματα. Στην Εικόνα 7.25 φαίνεται η δομή ενός δικτυωμένου RFID συστήματος.



Εικόνα 4.14: Ένα απλό Networked RFID σύστημα.

- Επικοινωνία κοντινού πεδίου NFC

Η τεχνολογία επικοινωνίας κοντινού πεδίου (Near Field Communication, NFC) είναι μια επέκταση της τεχνολογίας RFID, η οποία χρησιμοποιείται για αναγνώριση αντικειμένων σε μεγάλες, κυρίως, αποστάσεις. Αντίθετα, η NFC χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία σε αποστάσεις μερικών εκατοστών.

Η τεχνολογία NFC προσφέρει αμφίδρομη και μικρής εμβέλειας ασύρματη επικοινωνία. Η επικοινωνία λαμβάνει μέρος μεταξύ δύο NFC συσκευών σε απόσταση μερικών εκατοστών. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 13.56MHz και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται είναι 424kbps. Η NFC τεχνολογία λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις επικοινωνίας:

- ανάγνωσης/εγγραφής
- ομότιμη (peer) επικοινωνία
- εξομοίωση (emulation) κάρτας

Όταν μία NFC συσκευή βρίσκεται εντός του πεδίου εκπομπής μίας άλλης NFC συσκευής, δημιουργείται επαγωγική σύζευξη (που επιτρέπει τη μεταφορά ενέργειας και δεδομένων από τη μία συσκευή στην άλλη). Η συσκευή NFC που έχει δική της παροχή ενέργειας θεωρείται η ενεργή και η συσκευή που δεν έχει δική της παροχή ενέργειας, όπως οι έξυπνες κάρτες, θεωρείται η παθητική. Μόλις η παθητική συσκευή τροφοδοτηθεί με ενέργεια, μπορεί να επικοινωνήσει και να ανταλλάξει δεδομένα με την ενεργή συσκευή.

Σήμερα, η τεχνολογία NFC έχει υιοθετηθεί από τα συστήματα πληρωμών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες εφαρμογές για έξυπνα τηλέφωνα, οι οποίες χρησιμοποιούν τα NFC τσιπ για χρηματικές συναλλαγές. Ουσιαστικά, εισάγεται η έννοια του ηλεκτρονικού πορτοφολιού (e-wallet), καθώς και η ενσωμάτωσή του στο κινητό τηλέφωνο. Έτσι, ο χρήστης ακουμπώντας απλά το κινητό του στο κατάλληλο σημείο, ανταλλάσσει δεδομένα, τα οποία του επιτρέπουν να πληρώσει για την υπηρεσία ή για το αγαθό που αγόρασε. Άλλες πιθανές εφαρμογές της τεχνολογίας NFC αποτελούν:

- Εφαρμογές ταυτοποίησης χρηστών, όπως ταυτότητες εργαζομένων, έγγραφα ταυτοποίησης πολιτών, ηλεκτρονικά διαβατήρια, άδειες οδήγησης. Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί, όπως ξεκλείδωμα του ηλεκτρονικού υπολογιστή, άνοιγμα μιας πόρτας ασφαλείας μιας επιχείρησης ή ενός σπιτιού, ή ενός δωματίου ξενοδοχείου, και γενικά όποια εφαρμογή απαιτεί ταυτοποίηση του χρήστη, ο οποίος έχει δικαίωμα χρήσης της εφαρμογής ή της υπηρεσίας.
- Εφαρμογές υγείας, όπως κάρτες υγείας για τους πολίτες: Ο γιατρός μπορεί να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες του χρήστη, όπως το ιστορικό υγείας του και οτιδήποτε άλλο θα τον βοηθήσει, έτσι ώστε να κάνει πιο σωστή διάγνωση. Επίσης, ο ασθενής μπορεί να ελέγχει την υγεία του, συλλέγοντας μετρήσεις από διάφορες συσκευές (π.χ. πίεση αίματος, θερμοκρασία σώματος) απλά ακουμπώντας το κινητό του τηλέφωνο πάνω σε αυτές, και να τις αποστέλλει για έλεγχο ή για παρακολούθηση, μέσω του κινητού του.
- Εφαρμογές με ετικέτες. Κλασικό παράδειγμα είναι σε ένα αεροπλάνο στο οποίο, όταν εισέρχεται ο επιβάτης και πλησιάζει πολύ κοντά το κινητό του στη συσκευή ανάγνωσης, αυτό ρυθμίζεται στη λειτουργία πτήσης. Κατά την έξοδο του επιβάτη ακουμπάει πάλι το κινητό του και επανέρχεται στην αρχική του λειτουργία. Άλλο παράδειγμα είναι κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Ο χρήστης εισέρχεται στο αμάξι, ακουμπάει πάνω στην ετικέτα με τις ρυθμίσεις και αυτόματα το κινητό τηλέφωνο εισέρχεται σε προφίλ οδήγησης.

#### **4.7 Οπτικά συστήματα**

Μία αποδοτική λύση, η οποία δεν βασίζεται στα ραδιοκύματα, αποτελείται από συστήματα οπτικών μεταδόσεων με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας, ορατού φωτός και λέιζερ. Μια βασική κατηγοριοποίηση των οπτικών συστημάτων αποτελεί ο χώρος

εφαρμογής τους και συγκεκριμένα, αν αυτά εξυπηρετούν επικοινωνία χρηστών σε εσωτερικό περιβάλλον ή επικοινωνία με το δίκτυο κορμού σε εξωτερικό χώρο.

- Οπτικά συστήματα εσωτερικού χώρου

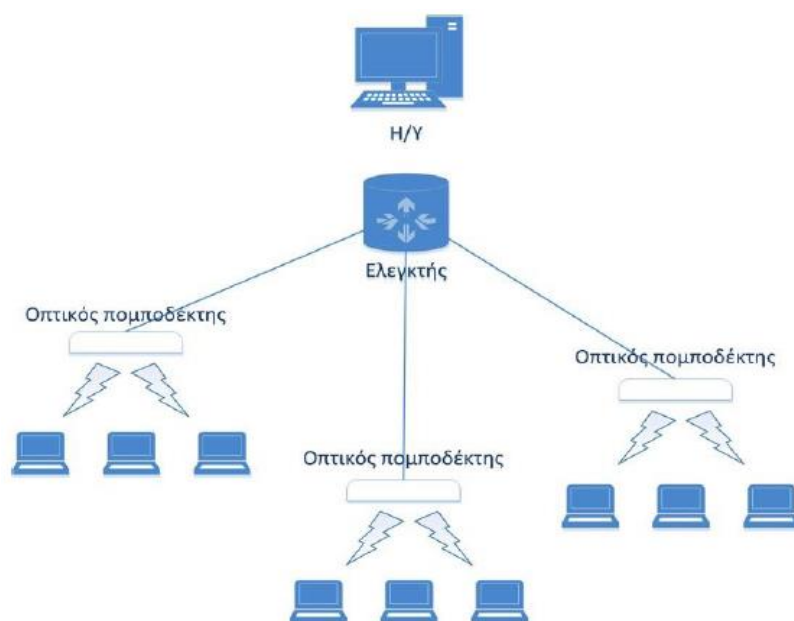
Η οπτική ασύρματη τεχνολογία κατέχει ορισμένα χαρακτηριστικά που ταιριάζουν απόλυτα σε ασύρματα δίκτυα εσωτερικών χώρων. Οι οπτικοί πομποί και δέκτες μπορούν να κατασκευαστούν με σχετικά χαμηλό κόστος, έχουν σχετικά μικρό μέγεθος και χαμηλές απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας. Ακόμη, οι οπτικοί διαμορφωτές/αποδιαμορφωτές είναι πολύ φθηνότεροι στην κατασκευή απ' ό,τι ο RF εξοπλισμός, με κόστος κοντά στο κόστος κατασκευής των modems καλωδίου. Επιπλέον, οι οπτικές μεταδόσεις δεν υφίστανται και δεν προκαλούν παρεμβολές σε μεταδόσεις συστημάτων RF (όπως π.χ. με τη ραδιοφωνική λήψη) και οι περιοχές συχνοτήτων στις οποίες λειτουργούν δεν υπόκεινται στις ρυθμίσεις της FCC και της Ευρώπης, οπότε και δίκτυα αυτού του τύπου μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς ειδική άδεια.

Επειδή τα οπτικά σήματα δεν μπορούν να διαπεράσουν τους τοίχους ενός δωματίου, τα οπτικά συστήματα παρέχουν έναν υψηλό βαθμό μυστικότητας και ασφάλειας από υποκλοπές, αλλά και μόνο επειδή περιορίζουν τις μεταδόσεις σε ένα συγκεκριμένο χώρο, όπως είναι ένα δωμάτιο ή ένα μικρό γραφείο. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο είναι δυνατός ο εντοπισμός των οπτικών σημάτων έξω από την περιοχή εγκατάστασης είναι μέσω των παραθύρων, εμπόδιο που μπορεί όμως να ξεπεραστεί σχετικά εύκολα, αν χρησιμοποιηθούν κουρτίνες ή ρολά. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης οπτικών ασύρματων δικτύων είναι ότι συστήματα με ίδιες συχνότητες λειτουργίας μπορούν να βρίσκονται εγκατεστημένα σε γειτονικά δωμάτια, χωρίς να παρεμβάλλονται μεταξύ τους.

Σε ένα ασύρματο οπτικό σύστημα, οι σταθμοί εργασίας μίας περιοχής κάλυψης επικοινωνούν με έναν κεντρικό κόμβο, ο οποίος βρίσκεται εγκατεστημένος στο ταβάνι και επικοινωνεί με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω ενσύρματων ή ασύρματων συνδέσεων. Η περιοχή κάλυψης μπορεί να είναι είτε ένα μικρό γραφείο είτε ένα τμήμα ενός μεγαλύτερου γραφείου, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Στην Εικόνα 4.15 φαίνεται μία εγκατάσταση όπου τρεις περιοχές εξυπηρετούνται από έναν κεντρικό κόμβο η κάθε μία (οπτικός πομποδέκτης), ο οποίος παρέχει ασύρματη οπτική πρόσβαση στους σταθμούς εργασίας. Οι κεντρικοί

κόμβοι συνδέονται έπειτα, μέσω καλωδίων, με έναν ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο.



Εικόνα 4.15: Μία τυπική εγκατάσταση οπτικών ασύρματων δικτύων, όπου κάθε περιοχή εξυπηρετείται από έναν κεντρικό κόμβο.

Πρόσφατα, οι επικοινωνίες με τη χρήση ορατού φωτός (Visible Light Communication, VLC) έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον από τη βιομηχανία και την ερευνητική κοινότητα. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία φωτισμού LED είναι δυνατή η μετάδοση δεδομένων μέσω μικρών διακυμάνσεων της φωτεινότητας, οι οποίες δεν είναι αισθητές στο ανθρώπινο μάτι. Έτσι, με τη συνεχή διείσδυση της τεχνολογίας λαμπτήρων LED είναι δυνατή η εκμετάλλευση της υποδομής φωτισμού προς όφελος των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Τα κέρδη της τεχνολογίας VLC είναι:

- το υψηλό εύρος ζώνης στο ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος,
- η απουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών με τα ήδη υπάρχοντα ραδιοσυστήματα,
- η εγγενής ασφάλεια της επικοινωνίας είτε μέσω της απομόνωσης των πομποδεκτών μέσω της υψηλής κατευθυντικότητας είτε μέσω της χρήσης υλικών που αποκλείουν την περαιτέρω διάδοση του ορατού φωτός.

Η τεχνολογία VLC αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ικανοποίηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η οποία παράγεται σε εσωτερικό χώρο, καθώς και σε



συστήματα εντοπισμού εσωτερικού χώρου. Επιπλέον, πρέπει να επισημανθεί ότι η επικοινωνία μέσω VLC θα δράσει συμπληρωματικά με τα υπάρχοντα συστήματα τηλεπικοινωνιών, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο στην υπέρβαση των περιορισμών που απορρέουν από την έλλειψη εύρους ζώνης ραδιοσυχνοτήτων.

- Οπτικά συστήματα εξωτερικού χώρου

Τα συστήματα οπτικής μετάδοσης σε εξωτερικό χώρο αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου (Free Space Optical, FSO). Τα συστήματα FSO εγκαθίστανται για την επίτευξη επικοινωνίας με υψηλό ρυθμό μετάδοσης μεταξύ πομποδεκτών, οι οποίοι μπορεί να απέχουν αρκετά χιλιόμετρα. Όπως και στα οπτικά συστήματα εσωτερικού χώρου, ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης οφείλεται στο μεγάλο εύρος ζώνης το οποίο είναι διαθέσιμο. Στην Εικόνα 4.16 απεικονίζεται μία εφαρμογή της FSO τεχνολογίας για διασύνδεση μεταξύ δύο κτιρίων και μεταφορά δεδομένων διαδικτύου.



Εικόνα 4.16: Παράδειγμα οπτικού συστήματος εξωτερικού χώρου.

Η επικοινωνία μέσω FSO χρησιμοποιεί πολύ στενές δέσμες λέιζερ, προσφέροντας έτσι υψηλή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, ασφάλεια και αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Η συχνότητα λειτουργίας τους εντοπίζεται στην περιοχή άνω των 300GHz, η οποία είναι παγκοσμίως διαθέσιμη προς χρήση. Με αυτόν τον τρόπο τα συστήματα FSO δεν απαιτούν την ύπαρξη άδειας για τη

λειτουργία τους. Επίσης, αποφεύγονται τα υψηλά κόστη εγκατάστασης συγκριτικά με τα ενσύρματα δίκτυα οπτικών ινών, τα οποία προσφέρουν παρόμοιους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Για τους παραπάνω λόγους, τα συστήματα FSO έχουν αρχίσει να εγκαθίστανται από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για τη διασύνδεση των δικτύων πρόσβασης με το δίκτυο κορμού, το οποίο είναι βασισμένο σε οπτικές ίνες.

Οι πιθανές εφαρμογές των συστημάτων FSO εντοπίζονται στις παρακάτω εφαρμογές:

- Στη διασύνδεση κτιριακών τηλεπικοινωνιακών υποδομών εταιρειών/πανεπιστημίων. Με αυτόν τον τρόπο τα ετερογενή ράδιο-συστήματα μπορούν να διασυνδεθούν χωρίς την εγκατάσταση οπτικών ινών.
- Στην επίβλεψη και παρακολούθηση χώρων. Παρότι η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου εξωτερικών χώρων αυξάνεται συνεχώς, τα υπάρχοντα τηλεπικοινωνιακά συστήματα αδυνατούν να καλύψουν τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, σε αντίθεση με τα συστήματα FSO, τα οποία διαθέτουν μεγάλο εύρος ζώνης.
- Στη διασύνδεση των κυψελωτών συστημάτων μεταξύ τους και με το δίκτυο κορμού. Η υπάρχουσα λύση των ενσύρματων μέσων διασύνδεσης μειώνει σημαντικά την ευελιξία των κυψελωτών δικτύων. Καθώς οι κινητές εφαρμογές απαιτούν όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης, τα συστήματα FSO μπορούν να επιτύχουν τη δρομολόγηση μεγάλου όγκου δεδομένων από και προς το δίκτυο κορμού.
- Στην έγκαιρη ανάπτυξη δικτύων έπειτα από φυσικές και μη καταστροφές. Εκμεταλλευόμενοι την ασύρματη φύση των επικοινωνιών FSO, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι και οι υπηρεσίες ασφάλειας μπορούν σε μικρό χρονικό διάστημα να εγκαταστήσουν δίκτυα, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο τη διακοπή κρίσιμων εφαρμογών που θα μπορούσε να κοστίσει ανθρώπινες ζωές.
- Σε υπηρεσίες ευρυεκπομπής. Η μετάδοση ζωντανών γεγονότων απαιτεί τη μετάδοση πληροφορίας από απομακρυσμένες περιοχές προς ένα όχημα, το οποίο φέρει τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό για την προώθηση σε ένα δορυφορικό σύστημα που θα αναμεταδώσει την πληροφορία στο κεντρικό γραφείο του τηλεοπτικού σταθμού. Αυτό το πρώτο τηλεπικοινωνιακό άλμα μεταξύ της πηγής της πληροφορίας και του οχήματος μπορεί να βασιστεί στην τεχνολογία FSO, εξαιτίας του υψηλού ρυθμού μετάδοσης τον οποίο προσφέρει.

## 4.8 Δορυφορικά συστήματα

Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι το αποτέλεσμα της έρευνας στον τομέα των επικοινωνιών, με στόχο την επίτευξη ολοένα μεγαλύτερης εμβέλειας και χωρητικότητας, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Σήμερα, τα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αποτελούν δομικό κομμάτι των περισσότερων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει καταστήσει τις δορυφορικές επικοινωνίες αναπόσπαστο τμήμα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, τα οποία παρέχουν ευρεία κάλυψη. Η μείωση του μεγέθους της κεραίας και άλλων τμημάτων του εξοπλισμού ενός επίγειου σταθμού είχε ως αποτέλεσμα να μπορεί αυτός να εγκαθίσταται σε περιβάλλον μεμονωμένων χρηστών. Αυτοί οι σταθμοί καλούνται τερματικά συστήματα πολύ μικρής επιφάνειας (Very Small Aperture Terminals, VSAT) και παρέχουν μία σειρά από πλεονεκτήματα:

- Σε πολλές εφαρμογές, η χρησιμοποίηση ενός δικτύου VSAT είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα από τη χρήση ενσύρματων μέσων.
- Τα δίκτυα VSAT ελαχιστοποιούν πιθανά σφάλματα ή καθυστερήσεις του δημόσιου δικτύου.
- Καθίσταται ταχύτερη η πρόσβαση των χρηστών στο δίκτυο.

Επίσης, με τη χρήση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO) λειτουργούν συστήματα κινητής δορυφορικής τηλεπικοινωνίας με φορητά τερματικά μεγέθους ανάλογου με αυτά των επίγειων κυψελωτών συστημάτων τηλεφωνίας.

Οι δορυφορικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται σήμερα σε κινητά συστήματα τηλεπικοινωνίας, είτε συμπληρωματικά στα κυψελωτά συστήματα είτε αυτόνομα. Επιπλέον, βρίσκουν σημαντική εφαρμογή σε υπηρεσίες παροχής φωνής και δεδομένων σε αεροπλάνα, πλοία και οχήματα. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες που παρέχουν τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών είναι:

- Παροχή τηλεφωνικών υπηρεσιών και υπηρεσιών ευρυεκπομπής. Παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι τα INTELSAT και EUTELSAT. Οι επίγειοι σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με κεραίες διαμέτρου από 1,5 μέχρι 30m.
- Συστήματα υπηρεσιών τηλεφωνίας και δεδομένων που χρησιμοποιούνται από γεωγραφικά διεσπαρμένες ομάδες χρηστών. Κάθε ομάδα έχει πρόσβαση μέσω του επίγειου δικτύου σε έναν επίγειο σταθμό. Τέτοια δίκτυα είναι τα

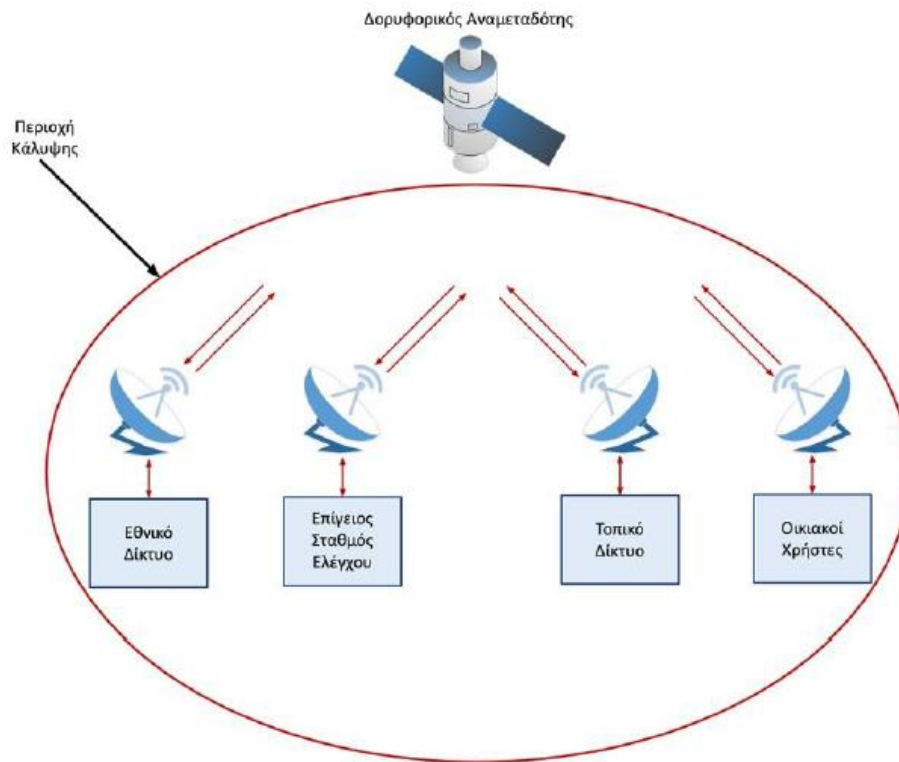
INTELSAT (δίκτυο IBS) και TELECOM 2. Οι επίγειοι σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με κεραιές διαμέτρου από 3 μέχρι 10m.

- Υπηρεσίες μέσω σταθμών VSAT, οι οποίοι διαθέτουν δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με χαμηλό ρυθμό, όπως και δυνατότητα μετάδοσης τηλεοπτικών ή ραδιοφωνικών ψηφιακών προγραμμάτων. Τα συστήματα VSAT διαθέτουν κεραιές διαμέτρου από 0,6 έως 1,8m.
- Τηλεπικοινωνίες με υποστήριξη κινητικότητας από τους χρήστες. Για τις υπηρεσίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχηματισμοί μη γεωστατικών δορυφόρων, όπως τα IRIDIUM, GLOBALSTAR, New-ICO, ELLIPSAT και ODYSSEY.
- Υπηρεσίες πολυμέσων, οι οποίες αποτελούνται από κείμενο, δεδομένα, ήχο, γραφικά, σταθερές εικόνες ή εικόνες αργής σάρωσης και βίντεο, σε μία κοινή ψηφιακή μορφή, ώστε να προσφέρουν επαρκείς δυνατότητες για υπηρεσίες on-line, τηλε-εργασία, τηλε-εκπαίδευση, τηλεϊατρική, αλληλεπιδραστική τηλεόραση. Παραδείγματα δικτύων που παρέχουν αυτές τις υπηρεσίες είναι τα GALAXY/SPACEWAY, VOICESPAN, ASTROLINK με χρήση γεωστατικών δορυφόρων, αλλά και τα υβριδικά CELESTRI και WEST, όπου χρησιμοποιούνται τόσο γεωστατικοί, όσο και μη γεωστατικοί δορυφόροι.

- Δομή δορυφορικού συστήματος

Η θέση των δορυφορικών ζεύξεων στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες είναι σημαντική. Ο δορυφόρος από τη φύση του δεν είναι ένας απλός επαναλήπτης που συνδέει δύο επίγειους σταθμούς, αλλά αποτελεί ένα εύκαμπτο, υψηλής χωρητικότητας τηλεπικοινωνιακό κανάλι με δυνατότητες πολλαπλής εκπομπής και προσπέλασης και κάλυψη σε εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές.

Στα δορυφορικά δίκτυα, σημαντικό ρόλο παίζει η αρχιτεκτονική τους, που επιτρέπει τη μετάδοση και λήψη σημάτων από ανεξάρτητους σταθμούς, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των σημάτων τους. Συγκρινόμενά με τα επίγεια σταθερά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, που αξιοποιούν την τεχνολογία των οπτικών ινών, τα δορυφορικά συστήματα παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης και χωρητικότητα, και συνιστούν την πλέον πρακτική επιλογή για υλοποίηση ζεύξεων, όταν οι αποστάσεις είναι της τάξης εκατοντάδων χιλιομέτρων ή όταν οι συνθήκες του περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα δύσκολες.



Εικόνα 4.17: Δομή δορυφορικού συστήματος.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη των τεχνικών μετάδοσης του σήματος στις τηλεπικοινωνίες ανέδειξε την σημαντικότητα του σήματος και των τεχνικών μετάδοσής του ξεκινώντας από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, εκπληρώνοντας την ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία.

Με αρχή την αναφορά σε θεμελιώδεις ορισμούς, βασικές έννοιες και μεγέθη που χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, μαζί με το απλοποιημένο μοντέλο επικοινωνιών, έγινε μία εκτενής αναφορά στις βασικές αρχές μετάδοσης και στις αναλογικές και ψηφιακές τεχνολογίες μετάδοσης. Τα μέσα μετάδοσης πληροφορίας εξετάστηκαν και οδηγηθήκαμε στην βασική δομή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Ως αποτέλεσμα ήταν η αναφορά στα σημερινά χρησιμοποιούμενα συστήματα επικοινωνιών και τις σύγχρονες εφαρμογές τους. Παρουσιάστηκαν τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τα οποία έχουν γνωρίσει ευρεία εμπορική χρήση και με αφορμή τη μαζική υιοθέτηση έξυπνων συσκευών από τους χρήστες, παρουσιάστηκε μία μεγάλη γκάμα ασύρματων τεχνολογιών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ. Θεολόγου, Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών (2η Έκδοση), Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010.
2. Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, & Γ. Πάντος, Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών (2η Έκδοση), Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2013.
3. Φ. Κωνσταντίνου, Χ. Καψάλης, & Π. Κωττής, Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1995.
4. Γ. Καραγιαννίδης, & Κ. Παππή, Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα (3η Έκδοση), Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010.
5. Χ. Καψάλης, & Π. Κωττής, Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2005.
6. Π. Κωττής, Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων (2η Έκδοση), Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2005.
7. J. G. Andrews, A. Ghosh, & R. Muhamed, Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall, USA, 2007.
8. V. Coskun, B. Ozdenizci, & K. Ok, A Survey on Near Field Communication (NFC) Technology, Wireless Personal Communications, 2013.
9. L.W. Couch, Digital and Analog Communication Systems (8η Έκδοση), Pearson, USA, 2013.
10. L. Grobe, A. Paraskevopoulos, Hilt, et al., High-speed visible light communication systems, IEEE Communications Magazine, 2013.
11. H. Holma, & A. Toskala, WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE (5th Edition), Wiley, USA, 2010.
12. D. K. Klair, K. W. Chin, & R. Raad, A Survey and Tutorial of RFID Anti-Collision Protocols, IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2010.
13. G. Maral, & M. Bousquet, Δορυφορικές Επικοινωνίες (5η Έκδοση), Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2012.
14. C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, 1948.