

**Πανεπιστήμιο Πατρών,  
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS**

**Θέμα διπλωματικής Εργασίας:**

**«Μελέτη και αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών στα δίκτυα  
5G και μεταγενέστερα (6G)»**

**Σταματόπουλος Δημήτριος**

**ΑΜ: 4019**

**Επιβλέπων καθηγητής: Καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας,**

**Πάτρα, 2020**



© Copyright συγγραφέας Σταματόπουλος Δημήτριος, 2020

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας

**Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**

**Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.**

## Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους, που με μοναδικό τρόπο ο καθένας συντέλεσαν στην περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μπούρα και τη συνεργάτιδά του Ε. Μπαρρή για τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση τους. Τα σχόλια και οι υποδείξεις τους αποτέλεσαν πολύτιμα εφόδια.

Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών και ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ.κ. Χ. Μπούρα, Ι. Γαροφαλάκη και Κ. Βλάχο.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για τα ανεκτίμητα φοιτητικά χρόνια που πέρασα μαζί τους.

Πέρα και πάνω από όλα όμως, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη και ανιδιοτελή ψυχολογική και οικονομική στήριξη.

## Περίληψη

Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη των 5G κυψελοειδών συστημάτων εκθέτει συνεχώς τους εγγενείς περιορισμούς αυτού του συστήματος, σε σύγκριση με την αρχική του προϋπόθεση ως παράγοντα ενεργοποίησης των εφαρμογών Διαδικτύου. Αυτά τα μειονεκτήματα του 5G δίνουν ώθηση σε παγκόσμιες δραστηριότητες επικεντρωμένες στον ορισμό του ασύρματου συστήματος 6G επόμενης γενιάς που μπορεί πραγματικά να ενσωματώσει εκτεταμένες εφαρμογές που κυμαίνονται από αυτόνομα συστήματα μέχρι εκτεταμένη πραγματικότητα. Παρά τις πρόσφατες πρωτοβουλίες της δικτύωσης 6G, τα θεμελιώδη στοιχεία αρχιτεκτονικής και επιδόσεων της, παραμένουν σε μεγάλο βαθμό απροσδιόριστα.

Καθώς η δικτύωση 5G εισέρχεται στη φάση ανάπτυξης, η συζήτηση για το 6G σταδιακά αρχίζει να λαμβάνει χώρα. Είναι ακόμα ένα πρώιμο στάδιο για τον επίσημο ορισμό του 6G, και οποιαδήποτε τέτοια συζήτηση είναι περισσότερο ή λιγότερο μια εικασία. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η δικτύωση 6G παίρνει σχήμα. Βασιζόμενοι στο όραμα 5G, η 6G θα συνεχίσει να ενδυναμώνει τις πόλεις ώστε να είναι εξαιρετικά έξυπνες και πλήρως συνδεδεμένες με πληθώρα αυτόνομων υπηρεσιών για κινητά τηλέφωνα/tablet, συσκευές IoT, αυτοκίνητα χωρίς οδηγούς και πολλά άλλα. Μια πραγματικότητα του 6G είναι ότι θα ενισχυθεί με Τεχνητή Νοημοσύνη σε όλα σχεδόν τα επίπεδα, από την ολοκλήρωση και τη διαχείριση του δικτύου έως την κωδικοποίηση και την επεξεργασία σήματος στο φυσικό επίπεδο, το χειρισμό έξυπνων δομών και την εξόρυξη και επεξεργασία δεδομένων μεγάλου όγκου στο δίκτυο.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις του 6G, η πρόβλεψη φαίνεται να είναι ότι ο ρυθμός δεδομένων θα προσεγγίσει το 1Tbps για να καταστεί δυνατή η αυτόνομη διαχείριση διαφόρων δραστηριοτήτων σε μια μελλοντική έξυπνη πόλη. Για μεμονωμένους χρήστες, ο ρυθμός δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί από 1Gbps που είναι τώρα στη δικτύωση 5G σε τουλάχιστον 10Gbps ανά χρήστη και μέχρι 100Gbps σε ορισμένες περιπτώσεις χρήσης, στα αναδυόμενα συστήματα 6G.

**Λέξεις κλειδιά:** 5G, 6G, τεχνητή νοημοσύνη, αυτοματισμός, πέρα από 5G, ρυθμός δεδομένων, μαζική συνδεσιμότητα, εικονική πραγματικότητα, terahertz



## Abstract

The ongoing deployment of 5G cellular systems is continuously exposing the inherent limitations of this system, compared to its original premise as an enabler for Internet of Everything applications. These 5G drawbacks are spurring worldwide activities focused on defining the next generation 6G wireless system that can truly integrate far-reaching applications ranging from autonomous systems to extended reality. Despite recent 6G initiatives, the fundamental architectural and performance components of 6G remain largely undefined.

As 5G networking enters the development phase, talk of 6G is gradually taking place. It's still an early stage for the official definition of 6G, and any such talk is a guess. However, there is no doubt that 6G networking is taking shape. Building on the 5G vision, 6G will continue to empower cities to be extremely smart and fully connected with a multitude of standalone services for mobile phones / tablets, IoT devices, driverless cars and much more. One reality of 6G is that it will be enhanced with Artificial Intelligence at almost every level, from network integration and management to physical coding and signal processing, intelligent structure manipulation and large volume data mining and processing on the network .

As for the requirements of 6G, the prediction seems to be that the data rate will reach 1Tbps to enable various activities to be autonomously managed in a future smart city. For individual users, the data rate is expected to increase from 1Gbps now in 5G networking to at least 10Gbps per user and up to 100Gbps in some use cases in emerging 6G systems.

**Keywords:** 5G, 6G, artificial intelligence, automation, beyond 5G, data rate, massive connectivity, virtual reality, terahertz.

## Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων .....	3
Λίστα Πινάκων.....	4
Ακρωνύμια .....	5
1. Εισαγωγή.....	8
2. Ιστορική αναδρομή στην κινητή τηλεφωνία.....	10
2.1 Δίκτυα 1G.....	10
2.2 Δίκτυα 2G και 2.5G .....	11
2.3 Δίκτυα 3G.....	14
2.3.1 Βασικά τμήματα δικτύου 3G.....	14
2.3.2 Πλεονεκτήματα και λειτουργίες του 3G .....	16
2.3.3 Λήψη πληροφοριών .....	18
2.4 Δίκτυα 4G.....	20
2.4.1 Προκλήσεις για τη μετάβαση σε δίκτυα γενιάς 4G .....	20
2.4.2 Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά δικτύων 4G .....	21
2.4.3 Εξέλιξη δικτύων έως τη γενιά 4G.....	23
3. Δίκτυα 5G .....	25
3.1 Κύριοι τεχνικοί στόχοι για τα συστήματα 5G.....	25
3.2 Τεχνολογία LTE .....	29
3.3 Τεχνολογίες NFV και SDN και NR για μη εξουσιοδοτημένο φάσμα (NR-U).....	31
3.3.1 Ενσωματωμένης πρόσβασης / Backhaul (IAB).....	33
3.4 Προβλεπόμενες τεχνολογίες για 5G από ρυθμιστικούς φορείς.....	34
3.4.1 Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης .....	34
3.5 Το 5G Διαδίκτυο.....	38
3.6 Τεχνολογίες mu – MIMO -AI και ML.....	43
3.6.1 Τεχνολογία mu – MIMO .....	43
3.6.2 Τεχνολογία AI.....	45
3.6.3 Τεχνολογία ML.....	48
4. Δίκτυα 6G .....	50
4.1 Εισαγωγή.....	50
4.2 Βιβλιογραφική έρευνα .....	52
4.3 Τεχνολογίες και οράματα 6G .....	54
4.4 Βελτιώσεις της τεχνολογίας 6G έναντι της 5G .....	56
4.5 Στόχοι τεχνολογίας 6G.....	61
4.5.1 Απαιτήσεις και KPIs .....	62
4.5.2 Ενεργοποιούμενες τεχνολογίες.....	63



4.5.3 Επικοινωνίες Terahertz .....	63
4.5.4. Πιθανές τεχνολογίες με μεγαλύτερη ωριμότητα .....	66
4.6 Προτεινόμενο Σύστημα Τεχνολογίας 6G.....	69
4.6.1 Προδιαγραφές δικτύωσης 6G;.....	70
4.6.2 Χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη 6G .....	72
4.6.3 Αρχιτεκτονική 6G .....	73
4.6.4 Προώθηση μιας νέας κινητής γενιάς.....	76
4.7 Η επίδραση της τεχνολογίας 6G στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων.....	78
5. Μελλοντικές εξελίξεις .....	81
5.1 Η οδήγηση εφαρμογών πίσω από το 6G και οι απαιτήσεις τους .....	81
5.2. Τάσεις μετρήσεις απόδοσης 6G δικτύωσης .....	84
Βιβλιογραφία.....	87

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Βασικά τμήματα δικτύου 3G .....	15
Εικόνα 2: Εξέλιξη της τεχνολογίας 4G .....	24
Εικόνα 3: Υψηλού επιπέδου άποψη της υπηρεσίας cloud .....	41
Εικόνα 4: Βασικό διάγραμμα μοντέλου μαζικού MIMO .....	44
Εικόνα 5: Τεχνολογία ML στην Τεχνητή Νοημοσύνη .....	48
Εικόνα 6: Τυπικές περιπτώσεις χρήσης σε οράματα 6G που περιλαμβάνουν τρεις πτυχές: κινητή υπερψηλή ευρυζωνική σύνδεση, υπερφόρτωση IoT και AI.....	54
Εικόνα 7: Οράματα της τεχνολογίας 6G .....	60
Εικόνα 8: Διπλή δομή για LDPC για πολλούς χρήστες .....	67
Εικόνα 9: 6G με δορυφορικό δίκτυο .....	69
Εικόνα 10: Αρχιτεκτονικές καινοτομίες που εισήχθησαν στα δίκτυα 6G.....	73
Εικόνα 11: Συμβατικό ασύρματο μοντέλο ανοδικής ζεύξης με δύο διαφορετικά σημεία πρόσβασης (AP).....	79
Εικόνα 12: Συμβατικό ασύρματο μοντέλο ανοδικής ζεύξης με ένα κοινό σημείο πρόσβασης (AP) .....	79

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση τεχνολογιών GSM και 3G.....	18
Πίνακας 2: Σειρά φορητών γενεών και τα χαρακτηριστικά τους .....	23
Πίνακας 3: Συχνότητες χαμηλής και μεσαίας ζώνης .....	33
Πίνακας 4: Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI's) τεχνολογίας 5G έναντι 6G .....	55

## Ακρωνύμια

- 2.5G: 2,5 (Second and a half generation) γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (GPRS)
- 2.75G: 2.75G γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (EDGE)
- 3G: Τρίτη γενιά (Third generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 3CLS: Control, Localization, and Sensing
- 4G: Τέταρτη γενιά (Fourth generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 5G: Πέμπτη γενιά (Fifth generation) τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- AMPS: Advanced Mobile Phone System – Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας
- AP: Access Points – Σημεία πρόσβασης
- BS: Base Station – Σταθμός Βάσης
- BBS: Base Band Server – Διακομιστής Βασικής Ζώνης
- BCI: Brain Computer Interaction – Αλληλεπίδραση ανθρώπινου εγκέφαλου - υπολογιστή
- BSC: Base Station Controller – Ελεγκτής Σταθμού Βάσης
- CAPEX: Capital Expenditure
- CDMA: Code Division Multiple Access
- CPRI: Common Public Radio Interface
- D2D: Device to Device
- DAS: Distributed Antenna Systems
- DSL: Digital Subscriber Loop/Line
- EHF: Extremely High Frequency
- eMBB: Enhanced Mobile Broadband
- eNB: NodeB
- EPC: Εξελιγμένοι πυρήνες πακέτων
- FDMA: Frequency Division Multiple Access
- GSM: Groupe Special Mobile

- i-DAS: Indoor DAS
- IoT: Internet of Things
- ITU: Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
- LPWA: Low-Power Wide-Area
- LSA: Αδειοδοτημένη κοινή πρόσβαση
- LTE: Long Term Evolution
- M2M: Machine to Machine
- MEC: Mobile Edge Computing
- MIMO: Multiple Input Multiple Output
- MME: Mobility Management Entity
- MMS: Multimedia Messaging Service
- MTC: Machine Type Communications
- mMTC: massive machine-type communications
- MWS: Millimeter Wave Spectrum
- NFV: Network Function Virtualization
- NMT: Nordic Mobile Telephone
- NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access
- OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
- OPEX: Operational Expenditure
- QoS: Quality of Service
- RAN: Radio Access Networks
- RRHs: Remote Radio Heads
- SA: Sensitivity Analysis
- SDN: Software Defined Network
- SD – BSs: Software-Defined Base Stations
- SD – CN: Software-Defined Core Network

- SD – RAN: Software-Defined Radio Access Network
- SD – switches: Software-Defined switches
- SEE - spectral and energy efficiency
- SON: Self Organized Networks – Δίκτυα αυτόματης οργάνωσης
- SSN - Self-Sustaining Network – Αυτοσυντηρούμενα δίκτυα
- SWOT: Strengths Weaknesses Opportunities and Threats
- TACS: Total Access Communications System
- TCO: Total Cost of Ownership
- VLC: Visible Light Communications
- VoIP: Voice over Internet Protocol
- VR: Virtual Reality – Εικονική Πραγματικότητα
- UE: User Equipment – Εξοπλισμός χρήστη
- URLLC: Ultra-reliable low-latency communications
- WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access
- XR: Extended Reality – Εκτεταμένη Πραγματικότητα
- QoPE: Quality of physical experience

## 1. Εισαγωγή

Στις τελευταίες δεκαετίες, τα κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούνται μόνο για να πραγματοποιούν και να λαμβάνουν τηλεφωνικές κλήσεις μέσω ασύρματων ζεύξεων γύρω από μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Ξεκινήσαμε με τις τεχνολογίες 0G που προσφέρουν μόνο την βασική φωνητική επικοινωνία και η συνέχεια δόθηκε με την τεχνολογία 1G, η οποία επέτρεψε να πραγματοποιηθούν κλήσεις εντός της χώρας με ένα σήμα αναλογικής ταχύτητας έως 2.4 Kbps, γεγονός που έδωσε την ώθηση για ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου μέσω τηλε-ειδοποίησης. Η υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (MMS) ξεκίνησε αργότερα με την εισαγωγή της τεχνολογίας 2G που επέτρεψε στους χρήστες κινητών τηλεφώνων να στέλνουν πολυμέσα με εικόνα.

Οι τεχνολογίες της πληροφορίας έχουν καταστεί αναπόσπαστο κομμάτι της κοινωνίας μας, έχουν βαθιές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις και εμπλουτίζουν την καθημερινότητά μας με πληθώρα υπηρεσιών από ψυχαγωγία μέσω (π.χ. βίντεο) σε πιο ευαίσθητες και κρίσιμες για την ασφάλεια εφαρμογές (π.χ. ηλεκτρονικό εμπόριο, ηλεκτρονική υγεία, υπηρεσίες πρώτης ανταπόκρισης κ.λπ.). Εάν οι προβλέψεις των αναλυτών είναι σωστές, θα πρέπει να συνδεθεί με τα δίκτυα μέχρι το τέλος της δεκαετίας, σχεδόν κάθε φυσικό αντικείμενο που βλέπουμε (π.χ. ρούχα, αυτοκίνητα, τρένα κλπ.). Με τον τρόπο αυτό θα ολοκληρωθεί το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Επίσης, σύμφωνα με μια πρόβλεψη της Cisco για τη χρήση δικτύων IP (Internet Protocol) μέχρι το 2017, η κυκλοφορία στο Διαδίκτυο εξελίσσεται σε ένα πιο δυναμικό μοντέλο κυκλοφορίας.

Αυτές οι προβλέψεις της αγοράς θα ωθήσουν σίγουρα την αύξηση της κινητής τηλεφωνίας με τις τρέχουσες προβλέψεις, γεγονός που υποδηλώνει 1000x αύξηση κατά την επόμενη δεκαετία. Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει στο σημερινό δίκτυο μια βασική πηγή δαπανών για τους φορείς εκμετάλλευσης που θα φτάσει με την αύξηση της κινητής τηλεφωνίας σε ανησυχητικά επίπεδα. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει παροτρύνει τους φορείς εκμετάλλευσης να επανεξετάσουν τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουν, αναπτύσσουν και διαχειρίζονται τα δίκτυά τους, προκειμένου να λάβουν σημαντικά βήματα προς την κατεύθυνση της μείωσης των κεφαλαιουχικών και των λειτουργικών δαπανών τους (Capex και Opex) στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας νέας γενιάς .

Η τεχνολογία 2.5G εξελίχθηκε με την επιτυχή ολοκλήρωση της τεχνολογίας κυψελών με GPRS και GSM. Σε σύγκριση με την τεχνολογία 2.5G, η τεχνολογία 3G παρείχε καλύτερη και πιο ευέλικτη επικοινωνία. Οι τεχνολογίες 4G είναι ικανές να παρέχουν ταχύτητες έως και 300 Mbps, ανεξάρτητα από τοπικούς και χρονικούς περιορισμούς και η τεχνολογία 5G παρέχει την ενισχυμένη ασύρματη επικοινωνία χωρίς περιορισμούς. Προκειμένου να είναι έτοιμοι για την πρόκληση 5G, βασικοί φορείς κινητής τηλεφωνίας προετοιμάζουν ήδη τον οδικό χάρτη 5G που περιλαμβάνει ένα ευρύ όραμα και προβλέπει στόχους σχεδιασμού που περιλαμβάνουν: 10-100x ταχύτητα δεδομένων κορυφής, 1000x χωρητικότητα δικτύου, 10x ενεργειακή απόδοση και 10-30x χαμηλότερη καθυστέρηση ανοίγοντας το δρόμο προς το ασύρματο Gigabit. Η ερευνητική κοινότητα γενικά έχει αρχίσει να εξελίσσει την έννοια του 5G και μελλοντικά του 6G με βάση αυτό το σαφές σύνολο ευρέως αποδεκτών στόχων σχεδίασης [1].

Πρόσφατα, η τεχνολογία 5G ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών του κινητού τηλεφώνου για την επίτευξη υψηλής ταχύτητας δεδομένων, χωρίς καμία διακοπή του δικτύου.



## 2. Ιστορική αναδρομή στην κινητή τηλεφωνία

### 2.1 Δίκτυα 1G

Το 1G είναι η 1<sup>η</sup> γενιά ασύρματης κυψελοειδούς τεχνολογίας. Αναφέρεται στην πρώτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας. Τα δίκτυα 1G ήταν αναλογικά και εκτελούσαν απλά τηλεφωνήματα. Αυτό το πρότυπο τηλεπικοινωνιών παραμένει μέχρι την έλευση του 2G. Την εποχή εκείνη το 1979, η NTT (Nippon Telegraph and Telephone) στην Ιαπωνία ξεκίνησε το πρώτο αυτοματοποιημένο κυψελοειδές δίκτυο παγκοσμίως για εμπορική χρήση. Οι ΗΠΑ εισάγουν το πρώτο δίκτυο 1G για το κινητό τηλέφωνο Motorola DynaTAC. Για τη μεσαία πρόσβαση πολλών χρηστών υιοθετήθηκαν συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (FDMA). Για τη μεταφορά της φωνητικής κίνησης, χρησιμοποιήθηκε διαμόρφωση συχνότητας (FM) ως σχήμα διαμόρφωσης [2].

Αναφορικά με τα συστήματα 1G κινητών τηλεφώνων της Σκανδιναβίας, το NMT είναι ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που καλύπτει πρώτα τις πέντε σκανδιναβικές χώρες, τη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία, τη Σουηδία και την Ισλανδία και αργότερα μερικές άλλες χώρες. Το NMT έχει δύο παραλλαγές που βασίζονται στις ζώνες λειτουργικής συχνότητας, γνωστές ως NMT-450 και NMT-900 αντίστοιχα. Το NMT-450 αναπτύχθηκε για τη δημιουργία ενός συμβατού τηλεφωνικού συστήματος στις σκανδιναβικές χώρες (Nordic Mobile Telephone Group 1995). Αρχικά, η NMT-450 στοχεύει στην ανάπτυξη μακροκυψελών στη ζώνη των 450 MHz για να παρέχει μεγαλύτερη κυτταρική κάλυψη και αργότερα τροποποιήθηκε για να λειτουργεί στη ζώνη των 900 MHz λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και τον περιορισμό της ισχύος μετάδοσης των φορητών ακουστικών. Τα συστήματα NMT ξεκίνησαν αρχικά στη Νορβηγία και τη Σουηδία ως εθνική υπηρεσία και αργότερα ενισχύθηκαν με υπηρεσίες περιαγωγής ανά χώρα.

Το NMT-900 φέρει περισσότερα κανάλια από το δίκτυο NMT-450, ικανά να εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών. Τα συστήματα προηγμένων κινητών τηλεφώνων AMPS αναπτύχθηκαν στη Βόρεια Αμερική. Διαθέτουν εύρος ζώνης 2x20 MHz εντός της ζώνης συχνοτήτων 800-900 MHz (825-845 MHz για ανερχόμενη ζεύξη και 870-890 MHz για την κατερχόμενη κυκλοφορία αντιστοίχως) που χορηγείται

από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC). Με εύρος ζώνης 30 kHz για κάθε κανάλι, παρέχει 832 κανάλια duplex. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί συστοιχίες 7 κυψελών για επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και χρησιμοποιεί κυρίως 120 κεραίες τομέα. Τρεις τομείς για μία μοναδική θέση AMPS κυττάρων σχεδιάστηκαν για να επιτευχθεί ένας λόγος φορέα-παρεμβολής 18 dB με ικανοποιητική ποιότητα φωνής. Το 1991, αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη έκδοση του AMPS με την ονομασία narrow-band AMPS (N-AMPS) για την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας με πρόσθετα προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως ταυτότητα και αναγνώριση καλούντος.

Αναφορικά με τα συστήματα επικοινωνίας συνολικής πρόσβασης (Total Access Communication Systems - TACS), ήταν το πρώτο πρότυπο που χρησιμοποίησε τη ζώνη των 900 MHz. Το TACS λειτουργούσε σε υψηλότερη συχνότητα από το AMPS και υιοθέτησε μικρότερο εύρος ζώνης ανά κανάλι (25 kHz σε TACS έναντι 30 kHz σε AMPS). Με μικρότερο εύρος ζώνης για κάθε κανάλι, ο συνολικός αριθμός καναλιών αυξάνεται για μια ζώνη με σταθερό εύρος ζώνης. Με λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα, η κάλυψη για κάθε κελί θα μειωθεί, λαμβάνοντας υπόψη την ίδια ισχύ μετάδοσης και την κατάσταση του καναλιού. Με άλλα λόγια, το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για να έχει υψηλότερη χωρητικότητα παρά κάλυψη, αναπτύσσοντας μεγαλύτερο αριθμό κυψελών και επιτρέποντας χαμηλότερη ισχύ εκπομπής για κινητούς σταθμούς. Πράγματι, το TACS αποδείχθηκε αποτελεσματικό και οικονομικό για αστικές περιοχές υψηλής πυκνότητας. Μια παραλλαγή του TACS, JTACS, υιοθετήθηκε επίσης στην Ιαπωνία [3].

## 2.2 Δίκτυα 2G και 2.5G

Η δεύτερη γενιά κινητών δικτύων που ήταν το επόμενο στάδιο στην ανάπτυξη της κινητής επικοινωνίας μετά από 1G, το 2G, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 και ολοκληρώθηκε στη δεκαετία του '90, το οποίο ήταν κυρίως για φωνητική μετάδοση με ψηφιακά σήματα και ταχύτητα έως και 64 kbps. Σε σύγκριση με την τεχνολογία 1G, η τεχνολογία 2G ήταν ένα βήμα μπροστά παρέχοντας υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων, υπηρεσίες μηνυμάτων και υπηρεσίες πολυμέσων (MMS). Στη δικτύωση 2G χρησιμοποιήθηκαν δύο σχήματα όπως η *Πολλαπλή Πρόσβαση Χρόνου Διαίρεσης (TDMA)* και η *Πολλαπλή Πρόσβαση Κώδικα (CDMA)*. Το TDMA επιτρέπει τη διαίρεση των σημά-

των σε χρονικά διαστήματα και χρησιμοποιεί έναν ειδικό κωδικό που παράγεται από ένα CDMA για κάθε χρήστη για να επικοινωνήσει μέσω ενός φυσικού καναλιού με πολύπλεξη. Η πιο δημοφιλής ασύρματη τεχνολογία 2G είναι γνωστή ως Global Systems for Mobile Communications (GSM). Τα πρώτα συστήματα GSM χρησιμοποιούσαν ένα φάσμα συχνότητας 25MHz στη ζώνη 900MHz. Σήμερα, τα συστήματα GSM λειτουργούν σε ζώνες 900MHz και 1,8 GHz σε ολόκληρο τον κόσμο, με εξαίρεση την Αμερική όπου λειτουργούν στη ζώνη των 1,9 GHz. Εντός της Ευρώπης, η τεχνολογία GSM επέτρεψε την απρόσκοπτη περιαγωγή σε όλες τις χώρες. Ενώ η τεχνολογία GSM αναπτύχθηκε στην Ευρώπη, στη Βόρεια Αμερική αναπτύχθηκε η τεχνολογία CDMA (Code Division Multiple Access) και TDMA (Time Division Multiple Access).

Τα συστήματα βασισμένα στην τεχνολογία TDMA έχουν καταστεί οι κυρίαρχες τεχνολογίες ασύρματων τεχνολογιών 2G. Η τεχνολογία CDMA παρέχει πιο καθαρή ποιότητα φωνής με λιγότερους θορύβους στο περιβάλλον, λιγότερες μειωμένες κλήσεις, αυξημένη ασφάλεια, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου. Τα συστήματα 2G (δεύτερης γενιάς) που σχεδιάστηκαν στη δεκαετία του 1980 εξακολουθούσαν να χρησιμοποιούνται κυρίως για φωνητικές εφαρμογές, αλλά βασίζονταν στην ψηφιακή τεχνολογία, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών επεξεργασίας ψηφιακού σήματος.

Αυτά τα συστήματα 2G παρείχαν υπηρεσίες επικοινωνίας δεδομένων κυκλικής μετάδοσης με χαμηλή ταχύτητα. Όλα τα πρότυπα που ανήκουν σε αυτή τη γενιά ήταν εμπορικά κεντρικά και ήταν ψηφιακά σε μορφή. Η δεύτερη γενιά ασύρματων συστημάτων κινητής επικοινωνίας αποτέλεσε τεράστια επιτυχία λόγω της επαναστατικής της τεχνολογίας και των υπηρεσιών που έφερε στους χρήστες της το Διεθνές Συνέδριο για το μέλλον των υπολογιστών και της επικοινωνίας. Εκτός από την υπηρεσία ομιλίας υψηλής ποιότητας, η παγκόσμια κινητικότητα ήταν ένας ισχυρός και πειστικός λόγος για τους χρήστες να αγοράζουν τερματικά 2G. Τα πρότυπα δεύτερης γενιάς είναι GSM, iDEN, D-AMPS, IS-95, PDC, CSD, PHS, GPRS, HSCSD και WiDEN.

Τρία βασικά οφέλη των δικτύων 2G έναντι των προκατόχων τους, είναι τα εξής [3]:

- Οι τηλεφωνικές συνομιλίες κρυπτογραφούνταν ψηφιακά.

- Πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος ασύρματων συχνοτήτων που επιτρέπει περισσότερους χρήστες ανά ζώνη συχνοτήτων.
- Υπηρεσίες δεδομένων για κινητά, ξεκινώντας με μηνύματα SMS.

Οι τεχνολογίες 2G επέτρεψαν στα διάφορα δίκτυα να παρέχουν υπηρεσίες όπως μηνύματα κειμένου, εικονομηνύματα και μηνύματα πολυμέσων (MMS – Multimedia Messaging Service). Όλα τα μηνύματα κειμένου που αποστέλλονται μέσω 2G είναι ψηφιακά κρυπτογραφημένα, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο ο προοριζόμενος δέκτης να μπορεί να τα λάβει και να τα διαβάσει. Μετά την εκτόξευση του 2G, τα προηγούμενα συστήματα ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναθεωρήθηκαν αναδρομικά 1G. Ενώ τα ραδιοφωνικά σήματα σε δίκτυα 1G είναι αναλογικά, τα ραδιοφωνικά σήματα σε δίκτυα 2G είναι ψηφιακά. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακή σηματοδότηση για να συνδέσουν τους πύργους εκπομπής (που ακούν τις συσκευές) με το υπόλοιπο κινητό σύστημα.

Η δικτύωση 2.5G είναι η ενδιάμεση γενιά μεταξύ των κυψελοειδών ασύρματων τεχνολογιών 2G και 3G. Αυτός ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα 2G που έχουν υλοποιήσει έναν τομέα μεταγωγής πακέτων επιπρόσθετα στον τομέα μεταγωγής κυκλώματος. Ο όρος 2.5G δεν είναι ένας επίσημα ορισμένος όρος μάλλον εφευρέθηκε για σκοπούς Μάρκετινγκ, προκειμένου να παρέχει μερικά από τα πλεονεκτήματα του 3G και επίσης να μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποια από την υπάρχουσα υποδομή 2G σε δίκτυα GSM και CDMA.

Μπορεί να φαίνεται αντίθετο, αλλά η έκδοση των τεχνολογιών 2.5GBASE-T και 5GBASE-T Ethernet αποτέλεσε έναν τρόπο για τα πρότυπα να επιταχύνουν την ανταπόκρισή τους στην ανάγκη της βιομηχανίας, επιβραδύνοντας το ρυθμό δεδομένων. Ορισμένοι βασικοί χώροι τεχνολογίας, όπως τα ασύρματα σημεία πρόσβασης και οι διακομιστές, είχαν αυξήσει την ανάγκη τους για εύρος ζώνης, δεδομένου ότι το πρότυπο 1000BASE-T<sup>1</sup> τυποποιήθηκε το 1999. Ενώ το 10GBASE-T αποτελεί βιώσιμη λύση για πολλούς, απαιτεί η υλική υποδομή καλωδίωσης να είναι τουλάχιστον Κατηγορία 6Α. Πολλές υφιστάμενες εγκαταστάσεις σε μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις,

<sup>1</sup> Το 1000Base-T είναι ένας τύπος τεχνολογίας δικτύωσης gigabit Ethernet που χρησιμοποιεί καλώδια από χαλκό ως μέσο. Το 1000Base-T χρησιμοποιεί τέσσερα ζεύγη καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους κατηγορίας 5 χωρίς θωράκιση για την επίτευξη ρυθμών δεδομένων gigabit. Το πρότυπο ονομάζεται IEEE 802.3ab και επιτρέπει μεταφορές δεδομένων 1 Gbps για αποστάσεις μέχρι 330 πόδια.

ωστόσο, ολοκληρώθηκαν, χρησιμοποιώντας την κατηγορία 5e. Η τεχνολογία 2.5GBASE-T και 5GBASE-T είχαν σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύονται ένα μεγάλο μέρος αυτού που έχει ήδη αναπτύξει ο κλάδος, όπως είναι το τεχνολογικό πλαίσιο 10GBASE-T PHY και το κλασικό καλώδιο Cat5e που έχει εγκατασταθεί. Αυτές οι νέες τεχνολογίες, ως επί το πλείστον ήταν απλώς κλιμακωτές εκδόσεις του 10GBASE-T. Εντούτοις, μπορούσαν να λειτουργήσουν πάνω από τα 100 μέτρα του συνδυασμένου Cat5e, που είναι το τυπικό "χειρότερο μοντέλο" που χρησιμοποιήθηκε στις υλοποιήσεις - κάτι που δεν σχεδιάστηκε για να κάνει το 10GBASE-T.

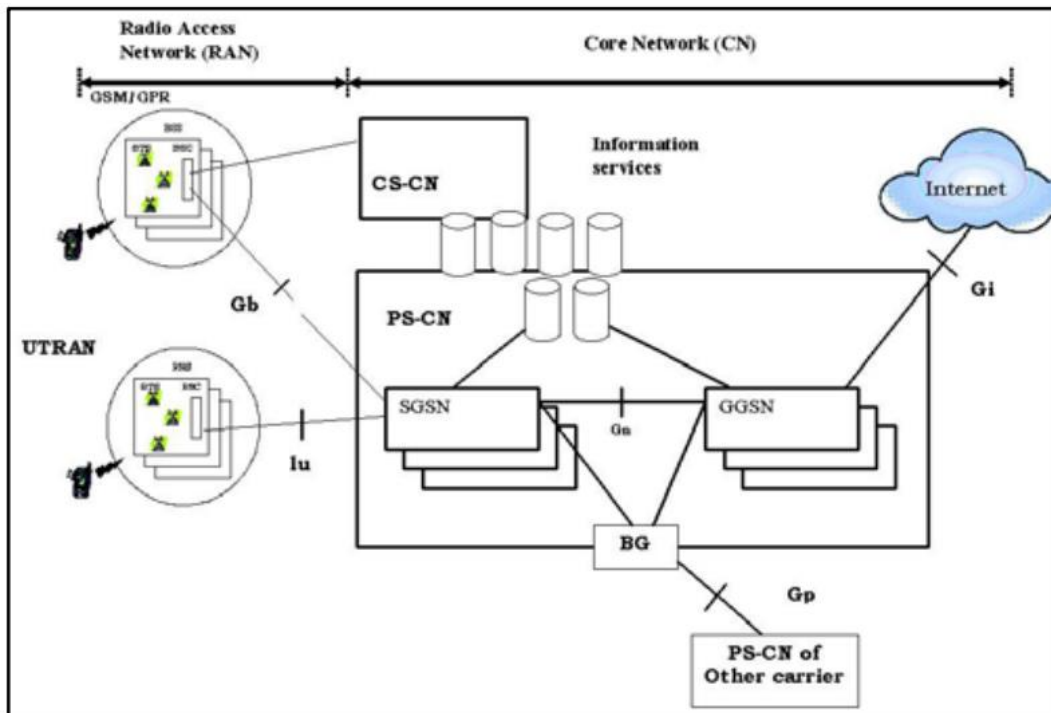
## 2.3 Δίκτυα 3G

### 2.3.1 Βασικά τμήματα δικτύου 3G

Τα ασύρματα δίκτυα κοινής ωφέλειας μεταφέρονται πλέον προς συστήματα τρίτης γενεάς (3G), σχεδιασμένα να υποστηρίζουν υπηρεσίες δεδομένων πακετομεταγωγής. Η Ευρώπη έχει υιοθετήσει το UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), το οποίο αναπτύχθηκε από το 3GPP ως εξέλιξη του GSM. Ένα δίκτυο 3G περιλαμβάνει δύο βασικά τμήματα: ένα βασικό δίκτυο (CN – Core Network) μεταγωγής πακέτων, το οποίο βασίζεται σε πρωτόκολλο IP (Internet Protocol) και ένα ή περισσότερα δίκτυα πρόσβασης ασύρματων συχνοτήτων (RAN – Radio Access Networks). Μαζί με το UMTS RAN (UTRAN) που βασίζεται στο WCDMA, αρκετοί φορείς εκμετάλλευσης διατηρούν ένα παράλληλο GPRS RAN που εξελίχθηκε από το παλαιό ασύρματο δίκτυο GSM. Η δομή αυτή σκιαγραφείται στην Εικόνα 1, που ακολουθεί στη συνέχεια. Αρκετά δίκτυα UMTS άρχισαν να λειτουργούν από το 2003 ενώ οι πρώτες εφαρμογές GPRS χρονολογούνται από το 2000. Έκτοτε, η αυξανόμενη δημοτικότητα των τερματικών 3G και των υπηρεσιών επέκτεινε την κάλυψη της πρόσβασης στο Διαδίκτυο στη γεωγραφική περιοχή και τα δίκτυα 3G γίνονται βασικά συστατικά του παγκόσμιου Διαδίκτυο στην Ευρώπη. Ωστόσο, το περιβάλλον 3G βρίσκεται ακόμη υπό εξέλιξη, τουλάχιστον κατά μήκος των ακόλουθων διαστάσεων:

- Τον πληθυσμό των συνδρομητών και τον όγκο της κυκλοφορίας ·
- Τερματικές δυνατότητες και σχετική διείσδυση στους διάφορους τύπους τερματικών (συσκευές χειρός, φορητοί υπολογιστές με κάρτα 3G κ.λπ.).

- Το χαρτοφυλάκιο υπηρεσιών και τα τιμολόγια που προσφέρουν οι φορείς εκμετάλλευσης.



Εικόνα 1: Βασικά τμήματα δικτύου 3G [3]

Το 3G καλείται επίσης τρίτη γενιά. Ονομάζεται έτσι, επειδή είναι η τρίτη γενιά των προτύπων του τηλεπικοινωνιακού υλικού. Είναι επίσης η γενική τεχνολογία για την κινητή δικτύωση, περνώντας τα πρόσφατα 2.5G. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην ομάδα προτύπων της ITU (Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών) που ανήκει στο IMT-2000. Τα δίκτυα 3G επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να παρέχουν στους χρήστες μια μεγαλύτερη γκάμα από τις πιο πρόσφατες υπηρεσίες, καθώς αυξάνουν τη χωρητικότητα του δικτύου μέσω της αυξημένης φασματικής απόδοσης. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες είναι οι βιντεοκλήσεις, το ασύρματο φωνητικό τηλέφωνο ευρείας ζώνης και οι ευρυζωνικές ασύρματες πληροφορίες, που συμπεριλαμβάνονται στο κινητό περιβάλλον [3]. Περισσότερες δυνατότητες που περιλαμβάνονται είναι οι δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων HSPA, οι οποίες μπορούν να στείλουν ταχύτητες δεδομένων που φτάνουν τα 14,4 Mbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη και στην ανερχόμενη ζεύξη στα 5,8 Mbit/s.

### 2.3.2 Πλεονεκτήματα και λειτουργίες του 3G

Το 3G προσφέρει έναν νέο τρόπο ζωής στους χρήστες κινητών τηλεφώνων και φορητών ακουστικών. Οι καταναλωτές μπαίνουν γρήγορα στη μόδα και επενδύουν σε συσκευές και εργαλεία που λειτουργούν με 3G. Το 3G μπορεί να αλλάξει τον τρόπο που κοιτάζετε το δίκτυο, με τα διάφορα χαρακτηριστικά και τα εφέ. Μπορείτε να προχωρήσετε και να επωφεληθείτε από τις υψηλότερες λεπτομέρειες και συσκευές, κατανοώντας τις λειτουργίες και τις χρήσεις του συστήματος, καθώς και διαθέσιμα δίκτυα.

Οι χρήστες μπορούν να εκτελούν πολλές λειτουργίες όπως η αποστολή πληροφοριών και δεδομένων και η απόκτηση αυτών μέσω ασύρματης πρόσβασης. Μπορεί κανείς να έχει δεδομένα ανεξάρτητα από το χρόνο και την τοποθεσία. Το 3G προσφέρει υψηλότερη δυνατή ταχύτητα, σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες πριν από αυτό. Μπορεί κανείς να έχει ταχύτερη συνδεσιμότητα, μουσική ψυχαγωγία με καλύτερη ποιότητα και ταχύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Τα πλεονεκτήματα είναι ποικίλα. Μπορεί κανείς επίσης να επωφεληθεί από τα οφέλη των βιντεοκλήσεων λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας, να απολαύσει κλήσεις προς την οικογένεια και τους φίλους σε όλο τον κόσμο. Τέλος ενισχύονται η ποιότητα και η σαφήνεια [4].

Οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν τα κινητά τους τηλέφωνα και να τους επιτρέπουν να λειτουργούν ως μόντεμ για τον ηλεκτρονικό τους υπολογιστή προκειμένου να στέλνουν μηνύματα και τα απαραίτητα έγγραφα. Η φόρτωση των τραγουδιών και των παιχνιδιών είναι πολύ ταχύτερη σε σχέση με τις παλαιότερες τεχνολογίες. Οι χρήστες μπορούν επίσης να απολαύσουν και να κατεβάσουν τα αγαπημένα τους παιχνίδια μέσω των κινητών τους μονάδων και να παίξουν ταυτόχρονα. Τα τελευταία μουσικά βίντεο και τραγούδια μπορούν να αποκτηθούν πολύ εύκολα. Η τεχνολογία επιτρέπει επίσης γρήγορες λήψεις, οπότε χρειάζονται μόνο λίγα λεπτά για να κατέβουν άλμπουμ φωτογραφιών και ταινίες.

Η υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χαρακτηρίστηκε ως η προτιμώμενη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας από τους Σουηδούς το 2001, ακολουθούμενη από τρα-

πεζικές εργασίες και χρήση εγκυκλοπαίδειας. Οι υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν σε υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου HTML σε μορφή Web και σε υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου απλού κειμένου. Οι υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου HTML παρείχαν μεγαλύτερη ευελιξία με τη μορφή και την εμφάνιση, ενώ το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο απλού κειμένου είχε ένα μήνυμα στυλ γραμματοσειράς. Αν και τα ηλεκτρονικά μηνύματα αποτελούσαν ένα ευρέως αποδεκτό και προσβάσιμο μέσο επικοινωνίας, υπήρχε έλλειψη έρευνας σχετικά με τη χρήση του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου από κινητές συσκευές.

Για πολλούς χρήστες του Διαδικτύου, ιδιωτικούς και επαγγελματικούς χρήστες, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο αποτέλεσε τον πιο κοινό τρόπο ανταλλαγής πληροφοριών, εγγράφων και επικοινωνίας. Παρόλο που τα ηλεκτρονικά μηνύματα ήταν φθηνά και εύκολα στην πρόσβαση, οι υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου είχαν το πρόβλημα παραλαβής ανεπιθύμητων μηνυμάτων. Ο φόβος να λαμβάνει κανείς ανεπιθύμητα σε κινητές συσκευές επιβράδυνε την υιοθέτηση υπηρεσιών ηλεκτρονικού ταχυδρομείου μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, καθώς οι πρώτες ειδήσεις κινητών ιών είχαν αναφερθεί στα μέσα ενημέρωσης, οι χρήστες κινητών ήθελαν να προστατεύσουν τις κινητές τους συσκευές αποφεύγοντας τη χρήση υπηρεσιών ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Τα μηνύματα για κινητά, αναφερόμενα στην υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων (SMS) και την υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), ήταν η πλέον χρησιμοποιούμενη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας. Εκτιμάται ότι οι καταναλωτές βήμα-βήμα καθώς και οι επιχειρηματικοί χρήστες αναβάθμισαν τα μηνύματά τους από την αποστολή απλών μηνυμάτων κειμένου σε μηνύματα πολυμέσων, συμπεριλαμβανομένων εικόνων και βίντεο κλιπ. Για παράδειγμα, ενώ η ευρωπαϊκή αγορά δεν είχε υιοθετήσει σε μεγάλο βαθμό μηνύματα πολυμέσων, λόγω διαφόρων λόγων, όπως η πολιτική τιμών και η σχετικά πολύπλοκη χρήση, οι Ασιάτες υιοθέτησαν με ανυπομονησία το MMS. Κατά μέσο όρο, ενώ ένας τυπικός χρήστης στην Ευρώπη έστειλε ένα έως δύο μηνύματα MMS ανά μήνα, ενώ ένας Ασιάτης 20-30 μηνύματα MMS. Εκτός από τις υπηρεσίες SMS και MMS, η άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων (IM) στο Διαδίκτυο ήταν μία από τις πιο δημοφιλείς υπηρεσίες, ιδίως μεταξύ των νέων.



### 2.3.3 Λήψη πληροφοριών

Η λήψη πληροφοριών είναι ένα από τα καλύτερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 3G. Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει τις τελευταίες ειδήσεις και τίτλους, λαμβάνοντας δεδομένα όπως ο καιρός, τα αθλητικά και οικονομικά στοιχεία. Μπορεί να αποκτήσει τις τελευταίες βαθμολογίες σε ένα τρέχον αγώνα ποδοσφαίρου και άλλα αγαπημένα αθλήματα. Η βελτιωμένη ποιότητα των υπηρεσιών και η ταχύτητα των τηλεφώνων 3G επιτρέπουν να παρακολουθήσει μουσικά βίντεο και κλιπ βίντεο με καθαρές φωτογραφίες, σε σύγκριση με τα τηλέφωνα τεχνολογίας 2.5G. Με την τεχνολογία 3G, ο χρήστης μπορεί να απολαμβάνει ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που φτάνει τα 2Mbps, δεδομένου ότι έχει ένα τηλέφωνο σε κατάσταση ακινησίας. Παρέχει επίσης υψηλό βαθμό συνδεσιμότητας και υψηλότερη δικτύωση καθώς και αντοχή στον θόρυβο.

Η τεχνολογία έχει βελτιώσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, επιτρέποντας στους παρόχους υπηρεσιών να παρέχουν εγκαταστάσεις υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο, υψηλότερους όγκους κλήσεων και υποδομή των εφαρμογών πολυμέσων που μπορούν να δοθούν στους πελάτες. Όλες οι υπηρεσίες μπορούν να παρασχεθούν στους πελάτες βάσει της μεταφερόμενης ποσότητας δεδομένων και όχι του χρόνου που χρησιμοποιείται για την υπηρεσία. Οι υπηρεσίες που παρέχονται στους πελάτες είναι συνολικά φθηνότερες. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί, φαίνεται μια σύγκριση των τεχνολογιών και 3G και GSM

Πίνακας 1: Σύγκριση τεχνολογιών GSM και 3G

Parameters	GSM	3G
Modulation Technique	GMSK	QPSK
Channel Bandwidth	200-kHz	3.84-MHz
Channel Separation	200-kHz	5-MHz
Data Rate	270.8-kbs	3.84-Mbs

Η δικτύωση 3G επέτρεψε την κινητή πρόσβαση στο Διαδίκτυο και στη συγχώνευση των κυψελοειδών δικτύων και του Διαδικτύου, πράγμα που σημαίνει ότι οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας μπορούσαν να έχουν παντού πρόσβαση σε όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το Διαδίκτυο από την ανταλλαγή μηνυμάτων έως την περιήγηση στον Παγκόσμιο Ιστό. Ο όρος κινητό Διαδίκτυο, ή Διαδίκτυο σε κινητά, αναφέρεται στην απόκτηση πρόσβασης στο Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας μια φορητή ασύρματη συσκευή όπως ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα PDA. Δεδομένου ότι τα δίκτυα 2G ήταν κυρίως φωνητικά με χαμηλή χωρητικότητα μετάδοσης δεδομένων, η τεχνολογία 3G επιτάχυνε τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων [4].

Ωστόσο, στα δίκτυα 3G η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών που έχουν πρόσβαση στο δίκτυο την ίδια χρονική στιγμή. Έτσι, στην πραγματικότητα τα δίκτυα 3G προσφέρουν σπάνια τη θεωρητική μέγιστη ταχύτητα. Μια άλλη ερώτηση σχετίζεται με την ανάγκη των χρηστών να περιηγούνται στο Web από τα κινητά τους τηλέφωνα.

Εκτός από τις πιο διαδεδομένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας στο 2.5G, το ερώτημα αν υπάρχουν άλλες ηλεκτρονικές υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση από κινητές συσκευές και όχι από συσκευές όπως φορητοί υπολογιστές (που έχουν μεγαλύτερες οθόνες και εύχρηστες διεπαφές με μεγάλα πληκτρολόγια), παρέμεινε ανοικτό. Ωστόσο, το ερώτημα αν οι χρήστες ήταν πρόθυμοι να περιηγηθούν στο Διαδίκτυο από το κινητό τηλέφωνο ή το PDA καθίσταται ασήμαντο καθώς τα τερματικά είναι μόνο συσκευές και τελικά ο χρήστης κρίνει τους τερματικούς σταθμούς και επιλέγει αυτό που προτιμά. Για παράδειγμα, με τη χρήση της κάρτας δεδομένων 3G οι χρήστες μπορούσαν να περιηγηθούν στο Διαδίκτυο μέσω του φορητού υπολογιστή τους ή μέσω μιας κινητής συσκευής.

## 2.4 Δίκτυα 4G

### 2.4.1 Προκλήσεις για τη μετάβαση σε δίκτυα γενιάς 4G

*A. Τερματικά χρήστη πολλαπλών λειτουργιών:* με το 4G χρειάζεται να σχεδιάσουμε ένα μόνο τερματικό χρήστη που να μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικά ασύρματα δίκτυα και να ξεπεράσει τα προβλήματα σχεδιασμού, όπως είναι οι περιορισμοί στο μέγεθος της συσκευής, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του ασύρματου λογισμικού, δηλ. το τερματικό χρήστη προσαρμόζεται στις ασύρματες διεπαφές του δικτύου.

*B. Επιλογή μεταξύ διαφόρων ασύρματων συστημάτων:* Κάθε ασύρματο σύστημα έχει μοναδικά χαρακτηριστικά και ρόλους. Ο πολλαπλασιασμός των ασύρματων τεχνολογιών περιπλέκει την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας για μια συγκεκριμένη υπηρεσία σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί πραγματοποιώντας την επιλογή σύμφωνα με την καλύτερη δυνατή προσαρμογή της ποιότητας υπηρεσιών του χρήστη και των διαθέσιμων πόρων δικτύου.

*Γ. Ασφάλεια:* Η ετερογένεια των ασύρματων δικτύων περιπλέκει το ζήτημα της ασφάλειας. Πρέπει να αναπτυχθούν δυναμικοί επαναπροσδιορισμοί, προσαρμόσιμοι και ελαφροί μηχανισμοί ασφαλείας.

*Δ. Υποστήριξη δικτύου και υποστήριξη QoS(Quality of Service):* Η ενσωμάτωση των υφιστάμενων συστημάτων με ή χωρίς IP και η παροχή εγγύησης QoS για υπηρεσίες από άκρο σε άκρο που περιλαμβάνουν διαφορετικά συστήματα είναι επίσης μια μεγάλη πρόκληση.

*Ε. Φόρτιση/χρέωση:* συλλέγονται, υφίστανται διαχείριση και αποθήκευση πληροφοριών λογαριασμών πελατών από πολλούς παρόχους υπηρεσιών.

*ΣΤ. Επίθεση σε επίπεδο εφαρμογής:* 4G κυψελοειδείς ασύρματες συσκευές είναι γνωστές για εφαρμογές λογισμικού που παρέχουν καινοτόμο χαρακτηριστικό στο χρήστη, αλλά εισάγουν νέες τρύπες, με αποτέλεσμα περισσότερες επιθέσεις σε επίπεδο εφαρμογής.

*Z. Εμπλοκή (spoofing) και πλαστογράφιση:* Το Spoofing αναφέρεται σε αποστέλλοντα ψεύτικα σήματα GPS, οπότε ο δέκτης GPS θεωρεί ότι τα σήματα προέρχονται από ένα δορυφόρο και υπολογίζει τις λανθασμένες συντεταγμένες. Οι εγκληματίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τέτοιες τεχνικές για να παρεμβαίνουν στην αστυνομική εργασία. Η εμπλοκή συμβαίνει όταν ένας πομπός που στέλνει σήματα στην ίδια συχνότητα μετατοπίζει ένα σήμα GPS.

*H. Κρυπτογράφιση δεδομένων:* Εάν ένας δέκτης GPS πρέπει να επικοινωνήσει με τον κεντρικό πομπό, τότε ο δεσμός επικοινωνίας μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων δεν είναι δύσκολο να σπάσει και υπάρχει ανάγκη χρήσης κρυπτογραφημένων δεδομένων.

#### 2.4.2 Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά δικτύων 4G

Τα ακόλουθα είναι τα βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά των δικτύων 4G [5].

*1. Υψηλό ποσοστό μετάδοσης πληροφοριών:* Μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης από δίκτυα 3G, με εύρος ζώνης 20-200 Mbps. Τα συστήματα 3ης γενιάς προσφέρουν έως και 2 Mbps σε εσωτερικούς χώρους και τουλάχιστον 144 kbps για περιβάλλοντα αυτοκινήτων ή χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Τα ασύρματα δίκτυα LAN και τα συστήματα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης που λειτουργούν στη ζώνη των 5 GHz και αναπτύσσονται στην Ιαπωνία (MMAC), στην Ευρώπη (Hyperlan 2) και στις ΗΠΑ (IEEE 802.11) έχουν ταχύτητα μετάδοσης 20-30 Mbps. Η ελάχιστη ταχύτητα που έχει οριστεί για τα συστήματα 4G θα είναι 10-20 Mbps για σταθερά περιβάλλοντα και 2 Mbps για κινούμενα οχήματα.

*2. Υψηλότερη χωρητικότητα και χαμηλότερο κόστος ανά bit:* Μεγαλύτερη χωρητικότητα, επομένως καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος και χαμηλότερο κόστος ανά bit. Η χωρητικότητα των συστημάτων 3G δεν θα είναι αρκετή για να φιλοξενήσει την εκρηκτική αύξηση της κυκλοφορίας πολυμέσων γύρω στο 2010. Η χωρητικότητα για τα συστήματα 4G θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερη από την 3G και το κόστος ανά bit θα πρέπει να μειωθεί δραματικά, έτσι ώστε η επιβάρυνση να μην είναι απαγορευτική.

3. *Ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS)*: Τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων και μεταδίδουν ισχύ και υποφέρουν από συμφόρηση. Είναι επομένως απαραίτητο να παρέχεται ένα ικανοποιητικό επίπεδο QoS για την υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών, ειδικά εκείνων που απαιτούν επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

4. *Υποστήριξη Διαδικτύου νέας γενιάς*: Η υποστήριξη για πρωτόκολλα Internet νέας γενιάς (IPv6) και πολυεκπομπή είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου.

5. *Προσαρμογή φυσικής και MAC διεπαφής ανάλογα με το δίκτυο που χρησιμοποιείται κάθε φορά*. Μέχρι τώρα το λογισμικό που ήταν υπεύθυνο για αυτό (ασύρματοι ελεγκτές) ήταν αποκλειστικά σε μεγάλους Σταθμούς Βάσης, αλλά τώρα πρέπει να υπάρχει κάτι παρόμοιο μέσα στις φορητές συσκευές. Επίσης, βασική παράμετρος είναι η δημιουργία αλγορίθμων για την εξοικονόμηση ενέργειας από τη μπαταρία της συσκευής.

6. *Ομαλή διεπαφή με τα συστήματα 3G, WLAN και σταθερά δίκτυα*. Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Internet Protocol (IP) θα υπάρχει απρόσκοπτη διασύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, κάθε χρήστης θα μπορεί να επιλέγει το καλύτερο δίκτυο ανά περίπτωση (ανάλογα με το χρόνο, το χώρο και το κόστος).

7. *Καλή χωρική κάλυψη με μεταβλητή ταχύτητα μετάδοσης*: Καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης αυξάνονται, το απαιτούμενο επίπεδο σήματος θα αυξηθεί αναλόγως. Λόγω του γεγονότος ότι η προβλεπόμενη ταχύτητα των συστημάτων 4G είναι μεγαλύτερη από δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερη από τα υπάρχοντα συστήματα, η ακτίνα του κυττάρου θα μειωθεί και η κάλυψη μέσα στα κτίρια θα μειωθεί αν δεν προστεθεί μεγάλος αριθμός σταθμών. Κατά συνέπεια, χρειάζονται μικρότερα κύτταρα για να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης για τον ίδιο πληθυσμό. Η χρήση συστημάτων μετάδοσης μεγάλης εμβέλειας / μεταβλητής ταχύτητας είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση του εσωτερικού χώρου και για τη μετακίνηση σε διαφορετικό κελί χωρίς προβλήματα ανεξάρτητα από την τεχνολογία των συστημάτων (3G, 4G).

8. *Χρήση πολλαπλών κεραιών*: χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές, τόσο σε σταθμούς βάσης όσο και σε κινητές συσκευές, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ορ-

θογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας, OFDM και άλλες μεθόδους.

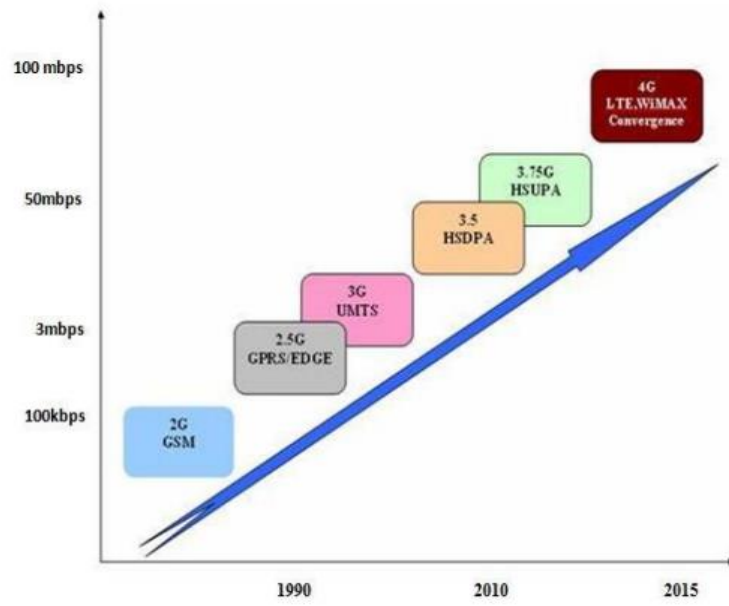
#### 2.4.3 Εξέλιξη δικτύων έως τη γενιά 4G

Στον πίνακα 2 που ακολουθεί, συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων από τη γενιά 1G έως τη γενιά 4G, αναφορικά με το πότε ξεκίνησε η σχεδίαση της κάθε γενιάς (Design Began), η υλοποίηση (Implementation), οι υπηρεσίες (Services), τα πρότυπα που υποστηρίζει (Standards), το εύρος των δεδομένων (Data Bandwidth), το σχήμα πολύπλεξης που χρησιμοποιείται (Multiplexing) και το κύριο δίκτυο (Core Network).

Πίνακας 5: Σειρά φορητών γενεών και τα χαρακτηριστικά τους

Technology	1G	2G	2.5G	3G	4G
Design Began	1970	1980	1985	1990	2000
Implementation	1984	1991	1999	2002	2010?
Services	Analog voice	Digital voice	Higher capacity, packetized data	Higher capacity, broadband data up to 2mbps.	Completely IP based, speed up to hundreds of MBs
Standards	NMT, AMPS, Hicap, CDPD, TACS, ETACS.	GSM, iDEN, D-MPS	GPRS, EDGE etc.	WCDMA, CDMA 2000.	Single standard
Data Bandwidth	1.9 kbps	14.4 kbps	384 kbps	2 Mbps	200 Mbps
Multiplexing	FDMA	TDMA, CDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA?
Core Network	PSTN	PSTN	PSTN, packet network	Packet network	Internet

Στην Εικόνα 2 που ακολουθεί, φαίνεται η χρονική εξέλιξη των προαναφερόμενων γενιών κινητών δικτύων, με τη σειρά που αυτές αναφέρονται στον πίνακα 2. Για κάθε τέτοια γενιά, αναφέρεται εκτός από το όνομά της και η τεχνολογία που αυτή χρησιμοποιεί και υποστηρίζει.



Εικόνα 2: Εξέλιξη της τεχνολογίας 4G [5]

## 3. Δίκτυα 5G

### 3.1 Κύριοι τεχνικοί στόχοι για τα συστήματα 5G

Η ταχεία ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών έχει επιφέρει την εμφάνιση διαφόρων αναδυόμενων εφαρμογών, όπως για παράδειγμα η ανάλυση δεδομένων μεγάλου όγκου, η Τεχνητή Νοημοσύνη, τα τρισδιάστατα μέσα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) κ.λ.π., γεγονός που απαιτεί σημαντική κυκλοφορία δεδομένων. Ενώ τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι ήδη απαραίτητα για την κοινωνία μας για συνδέσεις οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή, ένα κύριο χαρακτηριστικό των κινητών δικτύων 5G και Beyond (B5G) είναι η τεράστια ποσότητα δεδομένων, που απαιτεί πολύ υψηλή απόδοση (ρυθμό διεκπεραίωσης) ανά συσκευή, της τάξεως των bps/km<sup>2</sup>. Για παράδειγμα, προβλέπεται ότι η παγκόσμια μηνιαία κίνηση δεδομένων σε smartphones θα είναι περίπου 50 petabytes το έτος 2021 [1].

Ανάμεσα στα διάφορα είδη κυκλοφορίας δεδομένων, τα δεδομένα βίντεο είναι πιο κυρίαρχα. Η κυκλοφορία βίντεο αποτελεί ήδη σημαντικό ποσοστό του όγκου της κινητής τηλεφωνίας και αναμένεται να φθάσει το 67% της συνολικής κυκλοφορίας έως το 2017 και περισσότερο στο μέλλον. Η κυκλοφορία βίντεο παρουσίασε ήδη πολύ σοβαρές προκλήσεις στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, συμπεριλαμβανομένων των προσεχών δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G. Για παράδειγμα, αναμένεται ότι απαιτείται τουλάχιστον 10 Gbps κίνηση για μια συσκευή Virtual Reality (VR).

Επιπλέον, το πλήρες βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) γίνεται όλο και πιο σημαντικό για τις κινητές συσκευές. Επιπλέον, οι συσκευές που χρησιμοποιούν Ultra HD (UHD) (4K και 8K) και 3D φωτορεαλισμό, αναμένεται να γίνουν ευρέως διαθέσιμες στο όχι και τόσο μακρινό μέλλον. Ένα μη συμπίεσμένο βίντεο UHD μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 24 Gbps, ενώ ένα ασυμπιεσμένο 3D βίντεο με UHD μπορεί να φθάσει τα 100 Gbps [2]. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, οι κύριοι τεχνικοί στόχοι για τα συστήματα 5G θα είναι:

- *Εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων ανά συσκευή (πολλαπλάσιες δεκάδες Gbps).*



- *Υψηλές ταχύτητες δεδομένων ανά περιοχή και μεγάλος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών.* Έτσι, η παρεμβολή μεταξύ των πομπών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ελαχιστοποιημένη.
- *Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση* (στρογγυλοποιημένοι χρόνοι μικρότεροι του ενός msec), ειδικά για πολυμέσα και διαδραστικές εφαρμογές βίντεο 3D/VR.
- *Εξαιρετικά αξιόπιστη υποστήριξη* για διάφορες κρίσιμες εφαρμογές όπως οι επικοινωνίες Vehicle - to-Vehicle (V2V), ο βιομηχανικός έλεγχος και η υγειονομική περίθαλψη.

Η 5G είναι η ασύρματη τεχνολογία πέμπτης γενιάς για ψηφιακά κυψελοειδή δίκτυα που άρχισαν να αναπτύσσονται ευρέως το 2019. Όπως και με τα προηγούμενα πρότυπα, οι καλυμμένες περιοχές χωρίζονται σε περιοχές που ονομάζονται "κελιά" και εξυπηρετούνται από μεμονωμένες κεραιές. Σχεδόν κάθε σημαντικός πάροχος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών στον ανεπτυγμένο κόσμο αναπτύσσει κεραιές ή προτίθεται να τις αναπτύξει σύντομα. Το φάσμα συχνοτήτων του 5G χωρίζεται σε χιλιοστά κύματα, μεσαία ζώνη και χαμηλή ζώνη. Η χαμηλή ζώνη χρησιμοποιεί παρόμοια περιοχή συχνοτήτων με τον προκάτοχό της, 4G.

Το χιλιοστομετρικό κύμα 5G (5G millimeter wave) είναι το ταχύτερο, με τις πραγματικές ταχύτητες να είναι συνήθως 1-2 Gbit / s κάτω. Οι συχνότητες είναι πάνω από 24 GHz και φθάνουν μέχρι τα 72 GHz και βρίσκονται πάνω από τα κατώτατα όρια της ζώνης εξαιρετικά υψηλής συχνότητας. Η εμβέλεια είναι μικρή, έτσι απαιτούνται περισσότερα κελιά. Τα χιλιόμετρα κύματα δυσκολεύουν να διασχίσουν πολλούς τοίχους και παράθυρα, έτσι η εσωτερική κάλυψη είναι περιορισμένη.

Η μεσαία ζώνη 5G (5G mid-band) είναι η πιο ευρέως αναπτυγμένη, σε περισσότερα από 20 δίκτυα. Οι ταχύτητες σε μια ευρεία ζώνη των 100 MHz είναι συνήθως 100-400 Mbit / s κάτω. Στο εργαστήριο και περιστασιακά στο πεδίο, οι ταχύτητες μπορούν να υπερβούν ένα gigabit ανά δευτερόλεπτο. Οι συχνότητες που αναπτύσσονται είναι από 2,4 GHz έως 4,2 GHz. Η Sprint και η China Mobile χρησιμοποιούν 2,5 GHz, ενώ άλλα είναι κυρίως μεταξύ 3,3 και 4,2 GHz, μια σειρά που προσφέρει μεγαλύτερη εμβέλεια. Πολλοί τομείς μπορούν να καλυφθούν απλά με την αναβάθμιση των υφιστάμενων πύργων, γεγονός που μειώνει το κόστος.

Το 5G χαμηλής ζώνης (5G low-band) προσφέρει παρόμοια χωρητικότητα με τα προηγμένα 4G. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η T-Mobile και η AT & T ξεκίνησαν υπηρεσίες χαμηλής ζώνης την πρώτη εβδομάδα του Δεκεμβρίου του 2019. Ο CTO Neville Ray προειδοποιεί ότι οι ταχύτητες στα 600 MHz 5G ενδέχεται να είναι χαμηλότερες από 25 Mbit / s. Η AT & T, χρησιμοποιώντας 850 MHz, θα παραδώσει επίσης συνήθως λιγότερο από 100 Mbit/s το 2019. Η απόδοση θα βελτιωθεί, αλλά δεν μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την εύρωστη 4G στο ίδιο φάσμα

Η πρώτη έκδοση της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης 5G/NR [3] ολοκληρώθηκε κατά την διάρκεια του έτους 2018. Σε σύγκλιση με την τεχνολογία 4G/LTE, το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα της τεχνολογίας NR είναι η επέκταση του εύρους του φάσματος, στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει η τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Ενώ η LTE μπορεί να λειτουργήσει σε φάσμα μέχρι περίπου 3.5 GHz, η πρώτη έκδοση του NR υποστηρίζει την λειτουργία σε φάσμα έως 52.6 GHz, δηλαδή στην περιοχή της ζώνης mmw<sup>2</sup>. Η λειτουργία σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων ανοίγει ένα νέο φάσμα συχνοτήτων, που επιτρέπουν μεγαλύτερους όγκους κυκλοφορίας. Παρέχει επίσης την ευκαιρία για μεγαλύτερα εύρη ζώνης μετάβασης, με αντίστοιχη δυνατότητα υψηλότερων ρυθμών δεδομένων τελικού χρήστη.

Το κλειδί για την αποδοτικότερη χρήση των ζωνών υψηλότερης συχνότητας είναι η χρήση προηγμένων συστημάτων κεραιών που χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό συστοιχιών από κεραιές. Αν και η μετάδοση/λήψη πολλαπλών κεραιών αποτελούν σημαντικό εργαλείο για βελτιωμένες επιδόσεις εντός του LTE, για την τεχνολογία NR είναι ένα στοιχείο ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση των αυξημένων απωλειών διάδοσης και την εύλογη κάλυψη του δικτύου σε υψηλότερες συχνότητες, όπως για παράδειγμα τα 10 GHz. Ταυτόχρονα, λόγω του μικρότερου μεγέθους στοιχείων ανά κεραιά, η λειτουργία σε υψηλότερο εύρος φάσματος επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό κεραιών, χωρίς υπερβολικό μέγεθος του συνολικού συστήματος κεραιάς. Κατά συνέπεια, η τεχνολογία NR περιλαμβάνει ισχυρά εργαλεία για τη μετάδοση και λήψη με χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά της

---

<sup>2</sup> Η εξαιρετικά υψηλή συχνότητα (EHF) είναι η ονομασία της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) για τη ζώνη ασύρματων συχνοτήτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από 30 έως 300 GHz. Βρίσκεται ανάμεσα στη λωρίδα εξαιρετικά υψηλής συχνότητας και τη ζώνη υπέρυθρης ακτινοβολίας. Τα ραδιοκύματα σε αυτή τη ζώνη έχουν μήκη κύματος από δέκα έως ένα χιλιοστό, επομένως ονομάζεται επίσης ζώνη χιλιοστών και η ακτινοβολία σε αυτή τη ζώνη ονομάζεται χιλιοστομετρικά κύματα, γνωστά και με τη συντομογραφία MMW ή mmW ή mmWave

συσκευής. Η πρώτη έκδοση της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης 3GPP 5G/NR (New Radio)<sup>3</sup> ολοκληρώθηκε κατά τη διάρκεια του 2018. Σε σύγκριση με το 4G/LTE, το πιο χαρακτηριστικό γνώρισμα του NR είναι η επέκταση του εύρους φάσματος στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει η τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Ενώ το 4G/LTE μπορεί να λειτουργήσει σε φάσμα μέχρι περίπου 3,5 GHz, η πρώτη έκδοση του NR υποστηρίζει τη λειτουργία σε φάσμα μέχρι 52,6 GHz, δηλαδή στην περιοχή των mmw. Η λειτουργία σε ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων ανοίγει για νέο φάσμα, επιτρέποντας μεγαλύτερους όγκους κυκλοφορίας. Παρέχει επίσης την ευκαιρία για ευρύτερο εύρος ζώνης μετάδοσης, με αντίστοιχη δυνατότητα υψηλότερων ρυθμών δεδομένων τελικού χρήστη.

Αν και η μετάδοση ή/και η λήψη πολλαπλών κεραιών αποτελούν σημαντικό εργαλείο για βελτιωμένες επιδόσεις ήδη εντός του LTE, είναι σημαντικό για την αντιμετώπιση των αυξημένων απωλειών διάδοσης και την εύλογη κάλυψη του δικτύου σε υψηλότερες συχνότητες, όπως για παράδειγμα τα 10 GHz. Ταυτόχρονα, λόγω ενός μικρότερου μεγέθους στοιχείων ανά κεραία, η λειτουργία σε φάσμα υψηλότερης συχνότητας επιτρέπει μεγαλύτερο αριθμό κεραιών χωρίς υπερβολικό μέγεθος του συνολικού συστήματος κεραίας. Συνεπώς, το NR περιλαμβάνει ισχυρά εργαλεία για τη μετάδοση και τη λήψη με χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά της συσκευής.

Για τις υψηλότερες συχνότητες, όπου οι ρυθμοί δεδομένων περιορίζονται συχνότερα από τη διαθέσιμη ισχύ λήψης, και όχι από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η κύρια εστίαση είναι στη διαμόρφωση δέσμης πομπού και δέκτη. Για χαμηλότερες συχνότητες, η χωρική πολυπλεξία που επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος ζώνης είναι πιο σημαντική. Άλλα βασικά χαρακτηριστικά του NR περιλαμβάνουν σημαντικά χαμηλότερη καθυστέρηση και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση δικτύου, επιτρέποντας σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το τελευταίο είναι ενεργοποιημένο από ένα σχεδιασμό ασύρματης διασύνδεσης που μειώνει σημαντικά τις εκπομπές μετάδοσης, όπως η μετάδοση σημάτων αναφοράς και η μετάδοση πληροφοριών συστήματος.

---

<sup>3</sup> Η ακριβής τιμή των 52,6 GHz οφείλεται σε ειδικές περιφερειακές καταστάσεις φάσματος. Το φάσμα υψηλότερων συχνοτήτων το οποίο ανακοίνωσε η NR για ανάπτυξη είναι περίπου 39 GHz.

### 3.2 Τεχνολογία LTE

Long Term Evolution, ή απλώς LTE ονομάζεται η τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται από τον οργανισμό 3GPP.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία δημιουργήθηκε εξαιτίας της ανάγκης για ταχύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω του κινητού καθώς επίσης και για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Έδινε τη δυνατότητα στους χρήστες να περιηγηθούν στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες της τάξης των 300Mb/s για downlink και 75Mb/s για Uplink. Η μελετώμενη τεχνολογία χρησιμοποιεί την τεχνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας OFDM και η ιδέα της ήταν η διαίρεση ενός κύριου υψηλού ρυθμού σε πολλούς μικρότερους ρυθμούς και η χρήση αυτών για την αποστολή των δεδομένων. Τα αργά κανάλια πολυπλέκονται σε ένα γρήγορο κανάλι και μεταδίδονται. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη και αποτελεσματικότερη χρήση του εύρους ζώνης, ώστε να διαχωριστούν τα κανάλια μεταξύ τους. Κύρια χαρακτηριστικά της μελετώμενης τεχνολογίας είναι τα εξής:

- Βελτιωμένη υποστήριξη για φορητές συσκευές ακόμη και αν αυτές κινούνται με ταχύτητα έως και 500χλμ/ώρα ανάλογα με τη συχνότητα που χρησιμοποιείται.
- Βελτιωμένη φασματική ευελιξία: προτυποποίηση καναλιών στα 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz και 20MHz.
- Μικρές καθυστερήσεις κατά τη μεταφορά δεδομένα, συγκεκριμένα καθυστέρηση IP πακέτων κάτω από 5 msec.
- Υποστήριξη κυψελών μεταβλητού μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 χλμ. Το ιδανικό μέγεθος κυψέλης στις αγροτικές περιοχές, όπου χρησιμοποιούνται χαμηλότερες συχνότητες είναι στα 5 χλμ., στο μέγεθος των 30 χλμ. Η απόδοση είναι αρκετά καλή, ενώ με μέγεθος 100 χλμ. Η απόδοσή του είναι ικανοποιητική. Όσον αφορά τα αστικά περιβάλλοντα, εκεί χρησιμοποιούνται υψηλές

συχνότητες με σκοπό την υποστήριξη υψηλών ευρυζωνικών ταχυτήτων μετάδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση κάθε κυψέλη του δικτύου έχει μέγεθος το πολύ 1 χλμ.

- Απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου.
- Χρήση διαμόρφωσης OFDMA<sup>4</sup> για την καθοδική ζεύξη και SC-FDMA<sup>5</sup> για την ανοδική.

Στη συνέχεια έκανε την εμφάνισή της η τεχνολογία LTE – Advanced, η οποία προκάλεσε αρκετές αλλαγές στα ασύρματα δίκτυα και πιο συγκεκριμένα στο downlink ξεπερνούσε την ταχύτητα του 1Gbit/sec, σε χρήστες με υψηλή κινητικότητα η ταχύτητα αυτή περιοριζόταν στα 100 Mbit/sec, ενώ στο uplink ξεπερνούσε τα 500 Mbps. Η μέγιστη ταχύτητα που υποστηρίζεται φτάνει τα 350 km/h. σε ιδανικές συνθήκες υποστηρίζει ταχύτητες 30 bps/Hz στο downlink και 15 bps/Hz στο uplink Στον πίνακα 6 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σύγκριση της LTE τεχνολογίας με άλλες τεχνολογίες.

Πίνακας 6: Σύγκριση τεχνολογίας LTE με άλλες τεχνολογίες

COMPARISON OF LTE-A WITH OTHER CELLULAR TECHNOLOGIES					
	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA / HSUPA	HSPA+	LTE	LTE ADVANCED (4G ADVANCED)
Max downlink speed bps	384 k	14 M	28 M	100M	1G
Max uplink speed bps	128 k	5.7 M	11 M	50 M	500 M
Latency round trip time approx	150 ms	100 ms	50ms (max)	~10 ms	less than 5 ms
3GPP releases	Rel 99/4	Rel 5 / 6	Rel 7	Rel 8	Rel 10
Approx years of initial roll out	2003 / 4	2005 / 6 HSDPA 2007 / 8 HSUPA	2008 / 9	2009 / 10	2014 / 15
Access methodology	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC-FDMA	OFDMA / SC-FDMA

<sup>4</sup> Η ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) είναι μια έκδοση πολλαπλών χρηστών του ψηφιακού διαμόρφωσης πολυπλεξίας δημοφιλούς ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται στο OFDMA, εκχωρώντας υποσύνολα υποφορέων σε μεμονωμένους χρήστες. Αυτό επιτρέπει ταυτόχρονη μετάδοση χαμηλού ρυθμού δεδομένων από διάφορους χρήστες.

<sup>5</sup> Το FDMA ενός φορέα (SC-FDMA) είναι ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας. Ονομάζεται επίσης γραμμικά προ-κωδικοποιημένο OFDMA (LP-OFDMA). Όπως και σε άλλα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA), ασχολείται με την εκχώρηση πολλαπλών χρηστών σε έναν κοινόχρηστο πόρο επικοινωνίας. Η SC-FDMA μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα γραμμικό πρόδρομο σχήμα OFDMA, με την έννοια ότι έχει ένα πρόσθετο βήμα επεξεργασίας DFT που προηγείται της συμβατικής επεξεργασίας OFDMA

### 3.3 Τεχνολογίες NFV και SDN και NR για μη εξουσιοδοτημένο φάσμα (NR-U)

Η τεχνολογία NFV αποσκοπεί στη μεταφορά δικτυακών/τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών που σήμερα λειτουργούν πάνω σε αποκλειστικές και εξειδικευμένες πλατφόρμες, σε εικονικές υποδομές cloud.NFV. Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική έννοια δικτύου που επιτρέπει το διαχωρισμό υλικού και λογισμικού και έχει καταστεί μια πραγματικότητα για τη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας λόγω της αυξημένης απόδοσης των COTS<sup>6</sup>. Η τεχνολογία SDN στοχεύει στην αύξηση της ικανότητας του δικτύου να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των εξυπηρετούμενων εφαρμογών/υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα, η SDN είναι μια επέκταση της τεχνολογίας NFV όπου το λογισμικό μπορεί να εκτελέσει δυναμική αναδιαμόρφωση των τοπολογιών του δικτύου του φορέα εκμετάλλευσης να προσαρμοστεί για να αυξήσει τη ζήτηση, κατευθύνοντας -όπου απαιτείται- πρόσθετη χωρητικότητα δικτύου για να διατηρηθεί η ποιότητα της εμπειρίας του πελάτη κατά τις ώρες αιχμής της κατανάλωσης δεδομένων.

Μια σειρά από φορείς που έχουν κατασκευαστεί ή θεμελιώνουν μέρος ή σύνολο των δικτύων LTE χρησιμοποιούν ως βάση τις τεχνολογίες NFV και SDN. Επιπλέον, παρέχονται λύσεις διαχείριση των πόρων του υπολογιστικού νέφους για υποστήριξη των αναγκών των εφαρμογών και πλήρης αυτοματοποίηση της δικτυακής διασύνδεσης στο κέντρο δεδομένων όσο και στο WAN.

Ιστορικά, οι τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνίας 3GPP περιορίζονται στη λειτουργία σε άδεια φάσματος για το οποίο, σε μια γεωγραφική περιοχή, μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων εκχωρείται σε έναν μόνο φορέα εκμετάλλευσης κινητού δικτύου. Η λειτουργία σε αδειοδοτημένο φάσμα εξασφαλίζει έναν ασύρματο εξοπλισμό ελεγχόμενης παρεμβολής που επιτρέπει σε ένα φορέα εκμετάλλευσης δικτύου να παρέχει υψηλής ποιότητας υπηρεσίες με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Ταυτόχρονα, η δυνατότητα εκμετάλλευσης τεχνολογιών 3GPP και σε μη αδειοδοτημένο φάσμα παρέχει μια ευκαιρία για πρόσθετη χωρητικότητα δικτύου και επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων τελικού χρήστη όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες παρεμβολής.

---

<sup>6</sup> Τα εμπορικά προϊόντα off-the-shelf ή εμπορικά διαθέσιμα στο εμπόριο (COTS) είναι συσκευασμένες λύσεις οι οποίες στη συνέχεια προσαρμόζονται για να ικανοποιούν τις ανάγκες του οργανισμού προμηθειών, αντί να αναθέτουν λύσεις επί παραγγελία ή επί παραγγελία. Οι αγορές COTS είναι εναλλακτικές λύσεις για το προσαρμοσμένο λογισμικό ή για τις εξελίξεις - εξελίξεις που χρηματοδοτούνται από την κυβέρνηση ή με άλλο τρόπο.

Υπό το πρίσμα αυτό, το 4G / LTE επεκτάθηκε για να υποστηρίξει τη λειτουργία και σε μη αδειοδοτημένο φάσμα βάσει της αποκαλούμενης *Licensed Assisted Access* (LAA). Με το LAA, ένας φορέας LTE σε φάσμα χωρίς άδεια λειτουργεί πάντοτε μαζί με έναν αντίστοιχο φορέα σε άδεια φάσματος, δηλαδή ο μη αδειοδοτημένος μεταφορέας επικουρείται από έναν φορέα με άδεια. Το γεγονός ότι μια σύνδεση περιλαμβάνει πάντα έναν μεταφορέα σε άδεια φάσματος υποδηλώνει ότι διατηρείται η αξιοπιστία της αδειοδοτημένης λειτουργίας. Ταυτόχρονα, ο συμπληρωματικός φορέας χωρίς άδεια μπορεί να εκφορτώσει μέρος της κυκλοφορίας δικτύου, επιτρέποντας μεγαλύτερη συνολική ικανότητα μεταφοράς.

Η πρώτη απελευθέρωση του NR περιορίζεται στη λειτουργία σε άδεια φάσματος, με υποστήριξη για λειτουργία σε μη εξουσιοδοτημένο φάσμα, που μερικές φορές αναφέρεται ως NR-U, που εισάγεται ως τμήμα της απελευθέρωσης 16. Παρόμοια με τη μη εξουσιοδοτημένη λειτουργία LTE, το NR-U θα περιλαμβάνει υποστήριξη για LAA, δηλ. λειτουργία όπου ο χωρίς άδεια φορέας NR λειτουργεί μαζί με έναν φορέα σε άδεια φάσματος. Στην περίπτωση του NR-U, ο αδειοδοτημένος φορέας μπορεί να είναι ένας φορέας NR στη συσσωμάτωση φορέα με τον μη αδειοδοτημένο μεταφορέα. Ωστόσο, ο φορέας εκμετάλλευσης που έχει λάβει άδεια μπορεί επίσης να είναι φορέας LTE που λειτουργεί με διπλή συνδεσιμότητα με τον μη εξουσιοδοτημένο φορέα NR.

Εναλλακτικά, και σε αντίθεση με το LTE, ένας NR χωρίς άδεια φορέας μπορεί επίσης να λειτουργεί αυτόνομα, δηλ. χωρίς ένα συμπληρωματικό φορέα σε άδεια φάσματος. Αυτό επιτρέπει τη χρήση NR για παράδειγμα από φορείς που δεν έχουν πρόσβαση σε φάσμα αδειοδοτημένων σε συγκεκριμένη περιοχή. Το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας λειτουργικότητας NR διατηρείται όταν λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, με τις κύριες τροποποιήσεις / προσθήκες να σχετίζονται με τους μηχανισμούς που απαιτούνται για την εξασφάλιση της καλής συνύπαρξης μεταξύ διαφορετικών ανεξάρτητων φορέων NR-U καθώς και μεταξύ μεταφορέων NR-U και τεχνολογιών χωρίς άδεια όπως το IEEE 802.11 (WiFi) καθώς και το μη εξουσιοδοτημένο LTE.

### 3.3.1 Ενσωματωμένης πρόσβασης / Backhaul (IAB)

Η χρήση της ασύρματης τεχνολογίας είναι μια καλά εδραιωμένη προσέγγιση για την παροχή backhaul<sup>7</sup> για δίκτυα κινητής επικοινωνίας. Ιστορικά, μια τέτοια ασύρματη backhaul τυπικά βασιζόταν σε ιδιόκτητες τεχνολογίες που λειτουργούσαν σε φάσμα mmw (> 10 GHz) και με συνθήκες αναπαραγωγής στην οπτική επαφή. Όπως περιγράφεται στην εισαγωγή, το NR επεκτείνει το εύρος του φάσματος για τη σύνδεση πρόσβασης (από δίκτυο σε συσκευή) στο φάσμα mmw, δηλ. στο φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για την ασύρματη backhaul. Ταυτόχρονα, ένας αυξανόμενος αριθμός σταθμών βάσης χαμηλότερης ισχύος που βρίσκονται σε επίπεδο δρόμου δημιούργησε μια ζήτηση για λύσεις ασύρματου backhaul που μπορούν να λειτουργούν και υπό συνθήκες μη ορατότητας [6].

Με άλλα λόγια, τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις για τους συνδέσμους πρόσβασης και ασύρματης πρόσβασης είναι από πολλές απόψεις συγκλίνουσες. Αυτό μιλά υπέρ μιας τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης που υποστηρίζει πρόσβαση και ασύρματη backhaul και με κοινό φάσμα που μπορεί να εκχωρηθεί είτε για πρόσβαση είτε για backhaul σε βάση ανά ανάγκη [4].

Το Integrated Access / Backhaul (IAB) στοχεύει ειδικά σε αυτό, δηλαδή να επεκτείνει την τεχνολογία NR, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ασύρματο backhaul. Με άλλα λόγια, με το IAB, η NR θα προσφέρει μια ολοκληρωμένη τεχνολογία ραδιοεπικοινωνίας που θα υποστηρίζει τόσο την συμβατική πρόσβαση συσκευής όσο και την ασύρματη backhaul. Κατ' αρχήν, το IAB στοχεύει σε οποιοδήποτε φάσμα υποστηρίζεται επί του παρόντος από την NR. Ωστόσο, η κύρια εστίαση για το IAB είναι, τουλάχιστον αρχικά, το φάσμα υψηλότερης συχνότητας (mmw).

- Η μεγάλη ποσότητα φάσματος υψηλότερων συχνοτήτων, σε σύγκριση με το πιο περιορισμένο φάσμα χαμηλής συχνότητας, καθιστά πιο δικαιολογημένη τη χρήση μέρους του συνολικού πόρου φάσματος για το backhaul.

---

<sup>7</sup> Το Backhaul έχει πολλές χρήσεις στον τομέα της πληροφορικής. Στην δορυφορική επικοινωνία χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει τη λήψη δεδομένων σε ένα σημείο από το οποίο μπορούν να διανεμηθούν μέσω ενός δικτύου. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού μεταγωγής δικτύου χρησιμοποιούν τον όρο "λήψη δεδομένων στη ραχοκοκαλιά του δικτύου" (που είναι παρόμοια με τη χρήση του στη βιομηχανία δορυφορικής επικοινωνίας).



- Η εκτεταμένη διαμόρφωση δέσμης που ενεργοποιείται με λειτουργία υψηλότερης συχνότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη σύνδεση IAB backhaul για την οποία και τα δύο τελικά σημεία είναι ακίνητα. Επιπλέον, λόγω περιορισμένων περιορισμών πολυπλοκότητας, μπορούν να εφαρμοστούν πιο εκτεταμένες διαμορφώσεις κεραιάς σε κόμβο IAB σε σύγκριση με φορητή συσκευή.

Το NR IAB θα υποστηρίξει την ασύρματη backhaul εκτός ζώνης όπου ο σύνδεσμος backhaul λειτουργεί σε διαφορετικό φορέα σε σύγκριση με τη σύνδεση πρόσβασης (UE). Ωστόσο, το NR IAB θα υποστηρίξει επίσης την backhaul εντός της ζώνης, όπου οι σύνδεσμοι backhaul και access θα μοιράζονται τον ίδιο φορέα.

### 3.4 Προβλεπόμενες τεχνολογίες για 5G από ρυθμιστικούς φορείς

#### 3.4.1 Δίκτυα ασύρματης πρόσβασης

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, υπήρξε μια αυξανόμενη συναίνεση ότι τα ασύρματα συστήματα 5G θα υποστηρίξουν τρεις γενικές υπηρεσίες, οι οποίες, σύμφωνα με την ITU-R, ταξινομούνται ως βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία (eMBB), μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (mMTC) - αξιόπιστες και χαμηλής ευκρίνειας επικοινωνίες (URLLC) (επίσης γνωστές ως επικοινωνίες κρίσιμης σημασίας). Ένας συνοπτικός χαρακτηρισμός αυτών των υπηρεσιών μπορεί να προταθεί ως εξής:

(α) το eMBB υποστηρίζει σταθερές συνδέσεις με πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων αιχμής, καθώς και μέτριους ρυθμούς για τους χρήστες αιχμής.

(β) το mMTC υποστηρίζει ένα τεράστιο αριθμό συσκευών Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), οι οποίες είναι μόνο σποραδικά ενεργές και στέλνουν μικρά φορτία δεδομένων.

(γ) Το URLLC υποστηρίζει μεταδόσεις χαμηλού λανθάνοντος χρόνου μικρών ωφέλιμων φορτίων με πολύ υψηλή αξιοπιστία από ένα περιορισμένο σύνολο τερματικών, τα οποία είναι ενεργά σύμφωνα με πρότυπα που συνήθως καθορίζονται από ε-

ξωτερικά συμβάντα, όπως συναγερμοί.

Η κυκλοφορία του eMBB μπορεί να θεωρηθεί ως άμεση επέκταση της ευρυζωνικής υπηρεσίας 4G. Χαρακτηρίζεται από μεγάλα ωφέλιμα φορτία και από ένα μοτίβο ενεργοποίησης της συσκευής που παραμένει σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να προγραμματίζει ασύρματους πόρους στις συσκευές eMBB, έτσι ώστε να μην υπάρχουν δύο συσκευές eMBB ταυτόχρονα πρόσβαση στον ίδιο πόρο. Ο στόχος της υπηρεσίας eMBB είναι να μεγιστοποιήσει το ρυθμό δεδομένων, ενώ εγγυάται μέτρια αξιοπιστία, με ποσοστό σφαλμάτων πακέτων (PER) της τάξεως των  $10^{-3}$ .

Αντιθέτως, μια συσκευή mMTC είναι ενεργή διαλείπουσα και χρησιμοποιεί σταθερό, τυπικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη. Ένας τεράστιος αριθμός συσκευών mMTC μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σταθμό βάσης (BS), αλλά σε δεδομένη στιγμή μόνο ένα άγνωστο (τυχαίο) υποσύνολο τους γίνεται ενεργό και προσπαθούν να στείλουν τα δεδομένα τους. Ο μεγάλος αριθμός δυνητικά ενεργοποιημένων συσκευών mMTC καθιστά ανέφικτη την κατανομή εκ των προτέρων πόρων σε μεμονωμένες συσκευές mMTC. Αντ' αυτού, είναι απαραίτητο να παρέχουν πόρους που μπορούν να μοιραστούν μέσω τυχαίας πρόσβασης. Το μέγεθος του ενεργού υποσυνόλου των συσκευών mMTC είναι μια τυχαία μεταβλητή, η μέση τιμή της οποίας μετρά τον ρυθμό άφιξης της κυκλοφορίας του mMTC. Ο στόχος στο σχεδιασμό του mMTC είναι να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός άφιξης που μπορεί να υποστηριχθεί σε έναν συγκεκριμένο ασύρματο πόρο. Η στοχευόμενη PER μιας μεμονωμένης μετάδοσης mMTC είναι τυπικά χαμηλή, π.χ., της τάξης των  $10^{-1}$ .

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της τεχνολογίας 5G είναι η εγγενής ευελιξία της, η οποία θα της επιτρέψει να υποστηρίξει διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης με βελτιστοποιημένο τρόπο, είτε χρησιμοποιώντας φάσμα χαμηλής ζώνης κάτω από 1 GHz, είτε χρησιμοποιώντας συχνότητες μεσαίας ζώνης από 1 GHz έως 6 GHz, είτε φάσμα υψηλών συχνοτήτων πάνω από 6 GHz. Το φάσμα χαμηλής ζώνης (low-band spectrum) θεωρείται απαραίτητο για περιπτώσεις χρήσης που απαιτούν απρόσκοπτη κάλυψη και υψηλή κινητικότητα, όπως συμβαίνει με τις Ultra-Reliable Low Latency Communications (uRLLC) και τις μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC).

Το φάσμα των μεσαίων συχνοτήτων θα αξιοποιηθεί από τα πρώτα δίκτυα 5G για τη στήριξη της ενισχυμένης κινητής ευρυζωνικότητας (*enhanced Mobile Broadband - eMBB*), η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την επίδειξη της επιχειρησιακής περίπτωσης 5G και για την προώθηση επενδύσεων σε δίκτυα 5G. Όταν τα δίκτυα 5G γίνουν ώριμα, η ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB) θα πρέπει να προσφέρει μέγιστες ταχύτητες δεδομένων 20 Gbps και ταχύτητες δεδομένων 100 Mbps σε πολύ μεγάλο αριθμό χρηστών.

Με τις εφικτές φασματικές αποδόσεις, τέτοιες ταχύτητες μετάδοσης μπορούν να παραδοθούν μόνο με κανάλια με εύρος ζώνης της τάξεως των αρκετών εκατοντάδων MHz, τα οποία είναι διαθέσιμα μόνο στις συχνότητες υψηλής συχνότητας σε mmWave. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει ήδη διαθέσει αρκετές ζώνες από 450 MHz έως 6 GHz για την IMT (Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες) [6], όπως φαίνεται στον Πίνακα 3 που ακολουθεί.

Πίνακας 7: Συχνότητες χαμηλής και μεσαίας ζώνης

ITU-R (IMT bands) [4]
450–470 MHz
698–960 MHz
1427–1518 MHz
1710–2025 MHz
2110–2200 MHz
2300–2400 MHz
2500–2690 MHz
3300–3400 MHz
3400–3600 MHz
3600–3700 MHz
4800–4990 MHz

Καταρχήν, η τεχνολογία 5G μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις ζώνες, αν και ορισμένες προτιμήσεις έχουν καθοριστεί:

- Οι ΗΠΑ είναι πρόθυμες να χρησιμοποιήσουν την πρόσφατα εκκαθαρισμένη ζώνη με άδεια χρήσης 600 MHz (617-652 / 663-698 MHz), καθώς και την κοινόχρηστη ζώνη των 3.5 GHz (3550-3700 MHz). Οι ζώνες προηγμένων ασύρματων υπηρεσιών (AWS-3), δηλαδή 1695-1710 MHz, 1755-1780 MHz και 2155-2180 MHz [7], μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν εάν κάτι τέτοιο είναι επι-

θυμητό να συμβεί [8]. Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και η ζώνη των 600 MHz δεν είναι ζώνη IMT, η ITU<sup>8</sup> αποφάσισε ήδη να επανεξετάσει την κατάσταση της ζώνης τηλεοπτικών εκπομπών (470-694/8 MHz) το έτος 2023, ενόψει της απελευθέρωσης περισσότερου φάσματος για κινητά συστήματα αν είναι απαραίτητο.

- Η Ευρώπη επέλεξε 700 MHz (694-790 MHz) ως ζώνη κάτω από 1 GHz για 5G, ενώ η κορυφαία ζώνη 5G θα πρέπει να είναι 3.4-3.8 GHz. Σε αυτή τη ζώνη, κάθε ευρωπαϊκή χώρα αναμένεται να παραδώσει υπηρεσίες 5G τουλάχιστον σε μία πόλη έως το 2020. Η ζώνη του 1.5 GHz (1427-1452 / 1492-1518 MHz) μελετάται για την παροχή συμπληρωματικών συνδέσεων [6], [7], [8]. Το 5G μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε άλλη ζώνη εναρμονισμένη σε ευρωπαϊκό επίπεδο για κινητές υπηρεσίες και με άδεια χρήσης υπό το πρότυπο τεχνολογικής ουδετερότητας (800 MHz, 2 GHz, 2,3 GHz και 2,6 GHz).
- Η Ιαπωνία δοκιμάζει 5G στα 3600-4200 MHz και 4400-4900 MHz και η Κίνα δοκιμάζει 5G στις ζώνες 3300-3600 MHz και 4800-4990 MHz [9].

Όσον αφορά τις ζώνες υψηλών συχνοτήτων 11 mmWave, μεταξύ 24,25 GHz και 86 GHz, υποδείχθηκαν ως υποψήφιες ζώνες 5G κατά τη διάρκεια της τελευταίας Παγκόσμιας Διάσκεψης Ραδιοεπικοινωνιών (WRC-2015) του 2015. Όπως υποδεικνύεται στον Πίνακα 2, τρεις από αυτές τις υποψήφιες ζώνες ενδέχεται να είναι διαθέσιμες μόνο μακροπρόθεσμα, δεδομένου ότι σήμερα δεν κατανέμονται σε κινητές επικοινωνίες σε πρωτογενή βάση. Παρόλο που η απόφαση σχετικά με τις παγκόσμιες ζώνες χιλιοστομετρικών κυμάτων 5G θα πραγματοποιηθεί μόνο στο WRC-2019, τα ρυθμιστικά όργανα των χωρών με ισχυρές πρωτοβουλίες 5G προσπαθούν ήδη να επηρεάσουν την τελική απόφαση. Στις ΗΠΑ, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) επέλεξε 3,85 GHz του αδειοδοτημένου φάσματος στις ζώνες 27,5-28,35 GHz και 37-40 GHz (37-37,6 GHz κατανέμεται σε 5G σε κοινή βάση), μαζί με 7 GHz του μη εξουσιοδοτημένου φάσματος στη ζώνη 64-71 GHz [10]. Παρότι αυτές οι επιλογές δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες με τα σχέδια της ITU, η FCC αναλύει τη δυνατότητα ανοίγματος

---

<sup>8</sup> Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) ορίζει το tactile Internet ως το δίκτυο που συνδυάζει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση με εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια. Πιστεύει ότι το αντιπροσωπεύει ένα επαναστατικό επίπεδο ανάπτυξης για την κοινωνία, την οικονομία και τον πολιτισμό.

επιπλέον φάσματος σε 18 GHz σε όλες τις υποψήφιες ζώνες της ITU, εκτός από τα 42,5-47,2 GHz [11], [12].

### 3.5 Το 5G Διαδίκτυο

Η εξέλιξη των τεχνολογιών του Διαδικτύου έχει συγκλίνει προς μια υπηρεσία παροχής υπηρεσιών πακετομεταγωγής [13], η οποία έχει διαμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο ζούμε, εργαζόμαστε, μαθαίνουμε και παίζουμε. Το σημερινό Διαδίκτυο παρέχει μια πλούσια γκάμα υπηρεσιών που περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται σε, ψυχαγωγία μέσω (π.χ. ηχητικά, βίντεο και παιχνίδια υψηλής ευκρίνειας), εξομίκευση (π.χ. απτικές, εφαρμογές με βάση την παρουσία και υπηρεσίες βάσει τοποθεσίας) και εφαρμογές κρίσιμης σημασίας για την ασφάλεια (π.χ. ηλεκτρονικό εμπόριο, ηλεκτρονική υγεία, πρώτες ανταποκρίσεις κ.λπ.). Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU), ο παγκόσμιος διαδικτυακός τόπος προσεγγίστηκε από περισσότερους από 2,4 δισεκατομμύρια χρήστες σε όλο τον κόσμο τον Ιούνιο του 2012 και αυτό αυξάνεται περαιτέρω. Μια μελέτη της Ericsson αναμένει 40x αύξηση της επισκεψιμότητας δεδομένων από κινητά τηλέφωνα και κινητούς προσωπικούς υπολογιστές /tablet μεταξύ των ετών 2010 και 2015 [14]. Επίσης, η πρόβλεψη της Cisco για τη χρήση των δικτύων IP μέχρι το 2017 αποκάλυψε ότι η κίνηση στο Διαδίκτυο εξελίσσεται από ένα σταθερότερο σε ένα πιο δυναμικό μοτίβο.

Η παγκόσμια κίνηση IP θα αντιστοιχεί σε 41 εκατομμύρια DVD ανά ώρα το 2017 και η επικοινωνία μέσω βίντεο θα συνεχίσει να κυμαίνεται από 80-90% της συνολικής κυκλοφορίας IP [15]. Σε αυτό το πλαίσιο, σχεδόν κάθε φυσικό αντικείμενο που βλέπουμε (π.χ. ρούχα, αυτοκίνητα, τρένα κλπ.) Θα συνδεθεί επίσης μέχρι το τέλος της δεκαετίας, δημιουργώντας το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Ένα παράδειγμα είναι η επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (M2M) που εκμεταλλεύεται τη δικτύωση βασισμένη σε αισθητήρες και έχει ως αποτέλεσμα έναν επιπλέον οδηγό για την αύξηση της κυκλοφορίας.

Αποδεικνύεται ότι οι οδηγοί του μελλοντικού Διαδικτύου είναι όλα τα είδη υπηρεσιών και εφαρμογών, από χαμηλές ταχύτητες (π.χ. αισθητήρες και δεδομένα IoT)

έως υψηλότερους (π.χ. streaming βίντεο υψηλής ευκρίνειας), που πρέπει να είναι συμβατά για να υποστηρίζουν διάφορες λανθάνουσες περιόδους και τις συσκευές. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές Voice over IP (VoIP) απαιτούν μέγιστη καθυστέρηση 150ms, 30ms jitter (διακύμανση καθυστέρησης)<sup>9</sup> και απώλεια πακέτων όχι περισσότερο από 1% προκειμένου να διατηρηθεί η βέλτιστη εμπειρία QoS [16]. Το QoS (Quality of Service, ποιότητα της υπηρεσίας) έρχεται να εξασφαλίσει τις προτεραιότητες που θα δίνονται σε αυτή την επικοινωνία, έτσι ώστε οι πραγματικά σπουδαίες επικοινωνίες να εξυπηρετούνται πριν τις δευτερεύουσες. Διαδραστικές ροές βίντεο ή βίντεο διασκέψεων, ενσωματώνουν φωνητικές κλήσεις και, συνεπώς, έχουν τις ίδιες απαιτήσεις επιπέδου υπηρεσιών με το VoIP. Αντίθετα, οι υπηρεσίες βίντεο συνεχούς ροής, γνωστές και ως βίντεο κατά παραγγελία, έχουν λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις από τις VoIP λόγω τεχνικών προσωρινής αποθήκευσης που συνήθως ενσωματώνονται στις εφαρμογές.

Άλλες υπηρεσίες, όπως το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (FTP) και το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, είναι σχετικά μη διαδραστικές. Ωστόσο, ο έλεγχος δικτύωσης και η διαχείριση των πρωτοκόλλων χρειάζονται τις κατάλληλες εγγυήσεις σχετικά με το εύρος ζώνης για να εξασφαλίσουν ότι τα μηνύματα ελέγχου παραδίδονται σωστά εγκαίρως για να αποφευχθεί η υποβάθμιση της απόδοσης. Επιπλέον, το Internet αντιμετωπίζει τις υπηρεσίες εξίσου, με βάση την μόνο καλύτερη προσπάθεια και τα δίκτυα των σημερινών φορέων (παρόχων) είναι γεμάτα με μια μεγάλη και αυξανόμενη ποικιλία ιδιόκτητων συσκευών υλικού.

Για το λόγο αυτό, η εκκίνηση μιας νέας υπηρεσίας δικτύου απαιτεί συχνά την εξεύρεση του κατάλληλου χώρου και ισχύος για την υποδοχή νέων θυρίδων. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί αυτό και να συμβαδίσει με τις νέες τάσεις, καθώς οι τεχνολογικές και υπηρεσιακές καινοτομίες επιταχύνουν και καθιστούν τους κύκλους ζωής του υλικού μικρότερους από ποτέ. Επίσης, οι δικτυακές υποδομές απαιτούν αυτοματοποιημένες δυνατότητες ελέγχου για κλιμάκωση, ευρωστία και διαθεσιμότητα, ειδικά σε μεγάλα περιβάλλοντα δικτύων [17], προκειμένου να μειωθεί ο αντίκτυπος

---

<sup>9</sup> Όταν υπάρχει σχετικά μεγάλη καθυστέρηση στα πακέτα (latency), πολλές εφαρμογές (που είναι ευαίσθητες σε αυτό) μπορούν να το πάρουν αυτό υπόψη τους και να προσαρμοστούν ανάλογα. Αλλά όταν όμως το latency διαφέρει και αλλάζει συνεχώς, τότε το πρόβλημα γίνεται πολύπλοκο και δεν μπορεί η εφαρμογή να ανταποκριθεί. Το jitter παρουσιάζεται όταν έχουμε μεγάλες διακυμάνσεις υπερφόρτωσης των κυκλωμάτων

της χειρωνακτικής παρέμβασης που γίνεται ένα ακριβό προϊόν.

Άλλες ανησυχίες περιλαμβάνουν το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας, τις προκλήσεις στις επενδύσεις κεφαλαίου και τα προβλήματα που επιβάλλονται από το σχεδιασμό, την ολοκλήρωση και τη λειτουργία ολοένα και πιο σύνθετων συσκευών που βασίζονται στο υλικό. Αυτοί οι αυξανόμενοι περιορισμοί του Διαδικτύου όσον αφορά τη διαχείριση δικτύων, που είναι δύσκολο να αναπτυχθούν, και η προώθηση της καλύτερης προσπάθειας, η οποία απέτυχε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) για εφαρμογές προστιθέμενης αξίας, αναγνωρίζονται ευκρινώς στην ερευνητική κοινότητα, είτε στον ακαδημαϊκό χώρο είτε στη βιομηχανία.

Επιπλέον, πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες ισχυρίστηκαν ότι η υπερπροσφορά πόρων, μπορεί να επιτύχει αποτελεσματική διαφοροποίηση QoS με κλιμακωτό τρόπο [18], η προσέγγιση του οποίου είναι θεμελιώδης για το μελλοντικό Διαδίκτυο. Παρόλο που αυτές οι τεχνολογίες (δηλαδή η SDN, η εικονικοποίηση και η υπέρβαση των προβλέψεων QoS) υπόσχονται ότι θα βελτιώσουν τις μελλοντικές επιδόσεις δικτύωσης, εξακολουθούν να βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και οι περαιτέρω αναλύσεις και έρευνες εξακολουθούν να θεωρούνται απαραίτητες. Για παράδειγμα, η υπερεκτίμηση των πόρων πρέπει να σχεδιαστεί σχολαστικά για να αποφευχθεί η σπατάλη πόρων. Αυτές οι πτυχές καθοδηγούνται περαιτέρω από την αυξανόμενη εξάρτηση από το Cloud Computing, όπου διάφορα μοντέλα όπως το Software-as-a-Service (SaaS), η πλατφόρμα ως υπηρεσία (PaaS) και η υποδομή ως υπηρεσία (IaaS) καθώς άλλες λειτουργίες και υπηρεσίες δικτύου φιλοξενούνται ουσιαστικά μέσω του Διαδικτύου.

Συγκεκριμένα, το SaaS είναι ένα μοντέλο υπηρεσίας υπολογιστικού νέφους για την παράδοση λογισμικού, όπου το λογισμικό και τα σχετικά δεδομένα φιλοξενούνται στο σύννεφο (υπολογιστικό νέφος) και η πρόσβαση μπορεί να εκτελεστεί μέσω απλής πλοήγησης σε ένα πρόγραμμα περιήγησης ιστού (π.χ. Google Mail και Google Docs). Επίσης, το μοντέλο PaaS επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών χαμηλότερου επιπέδου, όπως το λειτουργικό σύστημα, ο διακομιστής ιστού ή ο διερμηνέας γλώσσας υπολογιστή ως υπηρεσίες. Με την εκμετάλλευση του μοντέλου PaaS, για παράδειγμα, οι προγραμματιστές μπορούν να αναπτύξουν προσαρμοσμένες εφαρμογές χωρίς να χρειάζεται να εγκαταστήσουν βαριά λογισμικά στους προσωπικούς υπολογιστές (π.χ. Google

App Engine). Επιπλέον, το μοντέλο IaaS παρέχει δικτυακές υποδομές, συμπεριλαμβανομένων των εξυπηρετητών σε κέντρα δεδομένων (DCs – Data Centers), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι πελάτες cloud σε συνεχή βάση (π.χ. Amazon's Elastic Compute Cloud).

Ως εκ τούτου, καθώς η εικονικοποίηση επιτρέπει την εξομοίωση του υλικού του υπολογιστή στο λογισμικό και πολλοί υπολογιστές εξομοίωσης (εικονικοί υπολογιστές) μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα σε ένα μόνο φυσικό υπολογιστή, το σύνολο της υποδομής και της μεταφοράς δικτύου μπορεί να διατεθεί αποτελεσματικά ως υπηρεσία, ενισχύοντας διαφορετικά σενάρια από την ενίσχυση του δικτύου επιχειρήσεων έως τη διαχείριση ολόκληρου του Παροχέα Υπηρεσιών Διαδικτύου. Όπως εξηγείται στην Εικόνα 3 που ακολουθεί, το υπολογιστικό νέφος είναι ένας γενικός όρος, ο οποίος αντιπροσωπεύει το Internet και το Cloud Computing και επιτρέπει την τοποθέτηση περισσότερων υλικών στο σύννεφο (υπολογιστικό νέφος) και λιγότερο στις συσκευές των πελατών (π.χ. υπολογιστές, διακομιστές και τηλέφωνα). Αυτό ξεπερνά τα υφιστάμενα εμπόδια, όπως η αύξηση της χωρητικότητας υπηρεσιών, η οποία, αντί να απαιτεί από τον παροχέα υπηρεσιών να επεκτείνει φυσικά τους πόρους, μπορεί μάλλον να βασίζεται σε ένα κοινόχρηστο εικονικοποιημένο δίκτυο δικτύωσης, επεξεργασίας και αποθήκευσης πόρων.



Εικόνα 3: Υψηλού επιπέδου άποψη της υπηρεσίας cloud [18]

Ο οδικός χάρτης πορείας για τη διεξαγωγή του Έργου για το Μέλλον της Διασύνδεσης στο Διαδίκτυο (FIA - Future Internet Assembly) για το πρόγραμμα «Ορίζο-



ντας 2020» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (H2020) κατέλαβε τις ιδέες και τη συμβολή της κοινότητας της FIA στα σημαντικά ερευνητικά θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων H2020 [14]. Τα θέματα αυτά ομαδοποιούνται σε τρεις βασικές ανησυχίες:

- a) Οικονομικά και επιχειρηματικά συμφέροντα.
- b) Κοινωνικά συμφέροντα
- c) Προκλήσεις και τεχνικές διακοπές και δυνατότητες.

Από οικονομική και επιχειρηματική σκοπιά, οι προτεραιότητες για τη μελλοντική έρευνα στο Διαδίκτυο στο πλαίσιο του H2020 πρέπει να στοχεύουν σε αντίκτυπο σε προϊόντα, υπηρεσίες, δυνατότητες και οφέλη σε περίπου 10 χρόνια από τώρα. Από κοινωνικής πλευράς, πρέπει να οραματιστούμε ένα δίκτυο το οποίο θα παρέχει στους πολίτες επιχειρηματικά εργαλεία για να ελέγχουν τα δεδομένα τους, να εκφράζουν τα δικαιώματά τους και να εκπληρώνουν τις υποχρεώσεις τους και να ενεργούν με αυτοπεποίθηση σε έναν κυβερνοχώρο που διαπνέεται από δεδομένα για κάθε ζωή και κάθε όψη. Όσον αφορά τις τεχνικές πτυχές, αν υποθέσουμε ότι η σύγκλιση του δικτύου και το σύννεφο έχουν ήδη συμβεί και προσβλέπουμε στο μέλλον, θα δούμε το μελλοντικό Διαδίκτυο όχι μόνο ως δίκτυο, σύννεφο, αποθήκευση ή συσκευές, αλλά ως περιβάλλον εκτέλεσης για έξυπνες εφαρμογές, υπηρεσίες, αλληλεπίδραση, εμπειρία και δεδομένα. Το μελλοντικό δίκτυο πρέπει να ενσωματώνει πολλές διαφορετικές δυνατότητες πέραν των συγκλινόμενων υποδομών - τα δίκτυα αισθητήρων, το Διαδίκτυο, τα hotspots (φορητά σημεία ασύρματης πρόσβασης), το ασύρματο, το βασικό δίκτυο - για να παρέχουν την πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα και το εύρος των απαιτούμενων υπηρεσιών.

Χρειάζονται νέες διεπαφές και τρόποι αλληλεπίδρασης με δικτυωμένα συστήματα και συσκευές, με ανθρώπους και κοινότητες και με δεδομένα. Αυτά θα αποτελέσουν το εφαλτήριο για νέους τρόπους και προοπτικές για την ενθάρρυνση προβληματικών και καινοτόμων λύσεων για την οικοδόμηση του μελλοντικού Διαδικτύου. Τελευταία αλλά εξίσου σημαντικό, απαιτείται ασφάλεια του Διαδικτύου και των χρηστών του σε απευθείας σύνδεση. Λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις ανησυχίες από την ερευνητική κοινότητα δικτύωσης, οι πιθανές μελλοντικές ερευνητικές ατζέντες συζητήθηκαν ευρέως σε αναφορές [15] και [16]. Συγκεκριμένα:

(i) Οι λύσεις πρέπει να είναι πιο οικολογικές για εξοικονόμηση ενέργειας

(ii) Η έννοια του «δικτύου ως υπηρεσίας» απαιτεί στενότερη συνεργασία μεταξύ των φορέων δικτύου και των υπηρεσιών.

(iii) Η αυτοοργάνωση και η αυτονομία διαχείρισης της πολυπλοκότητας των δικτύων αποτελεί βασική απαίτηση.

(iv) η εικονικοποίηση που επιτρέπει ένα δίκτυο δικτύων και την ανταλλαγή υποδομών πρέπει να διερευνηθεί διεξοδικά

(v) Το Mobile Cloud Computing απαιτεί μια πληρέστερη ερευνητική προσέγγιση.

Ως εκ τούτου, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) πρότεινε ένα πρόγραμμα δημόσιου-ιδιωτικού τομέα (PPP), που αποσκοπεί στην παροχή λύσεων, αρχιτεκτονικών, τεχνολογιών και προτύπων για τις πανταχού παρούσες υποδομές δικτύου 5G της επόμενης δεκαετίας. Αναμένεται ότι το 2020, το μελλοντικό Διαδίκτυο, δηλαδή το Διαδίκτυο 5G, θα είναι σε θέση να συνδέει τα πάντα σύμφωνα με μια πληθώρα απαιτήσεων που σχετίζονται με την εφαρμογή: άνθρωποι, πράγματα, διαδικασίες, υπολογιστικά κέντρα, περιεχόμενο, γνώσεις, πληροφορίες και αγαθά, σε ένα ευέλικτο, πραγματικά κινητό και ισχυρό τρόπο. Σε αυτό το περιβάλλον, με τις πρωτοφανείς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, πιστεύουμε ότι το δίκτυο απαιτεί κλιμακούμενες, αξιόπιστες λύσεις κόστους και ενεργειακής απόδοσης για τη δημιουργία υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας που μεταφέρονται μέσω διαφοροποιημένων εγγυήσεων QoS για τους πελάτες.

## 3.6 Τεχνολογίες mu – MIMO -AI και ML

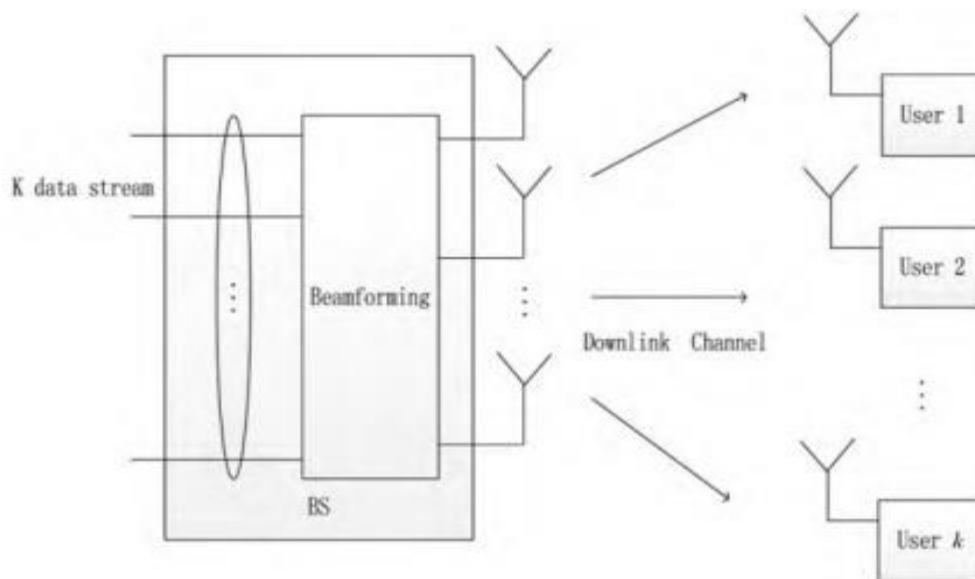
### 3.6.1 Τεχνολογία mu – MIMO

Η ταχεία ανάπτυξη της ασύρματης κινητής επικοινωνίας οδήγησε στην εκρηκτική αύξηση του αριθμού των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και της κλίμακας των συναφών βιομηχανιών. Ως εκ τούτου, το ασύρματο σύστημα επικοινωνίας πρέπει να πληροί τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την υψηλότερη χωρητικότητα του συστήματος και το σύστημα επικοινωνίας πρέπει να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τον πόρο εύρους ζώνης. Λόγω της έλλειψης πόρων ασύρματου φάσματος, είναι πολύ ση-

μαντικό να βελτιωθεί η χρήση του φάσματος του συστήματος. Η παραδοσιακή τεχνολογία MIMO μπορεί να χρησιμοποιήσει πόρους περιορισμένου φάσματος για να ικανοποιήσει τη ζήτηση των χρηστών για απόδοση του συστήματος. Αλλά υπάρχουν λιγότερες κεραιές στον σταθμό βάσης του παραδοσιακού συστήματος MIMO και έχει περιορισμένη απόδοση του συστήματος. Ως μία από τις βασικές τεχνολογίες της μελλοντικής 5G, η μαζική MIMO μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των μελλοντικών επιχειρήσεων ασύρματης επικοινωνίας, να βελτιώσει την αποδοτικότητα του ραδιοφάσματος και την ικανότητα καναλιού του συστήματος επικοινωνίας και να βελτιώσει αποτελεσματικά την αξιοπιστία των συνδέσεων και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Το MIMO πολλαπλών χρηστών ή "mu-MIMO" επιτρέπει μηνύματα για διαφορετικούς χρήστες να ταξιδεύουν με ασφάλεια στους ίδιους αγωγούς δεδομένων και στη συνέχεια να ταξινομούνται σε μεμονωμένους χρήστες όταν τα δεδομένα φτάνουν στις κινητές τους συσκευές. Η εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με την ίδια μετάδοση αυξάνει την χωρητικότητα και επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Αυτό αυξάνει τη δυνατότητα λήψης ή ροής με μια βελτιωμένη εμπειρία για τον χρήστη, ακόμη και σε μια περιοχή που είναι γεμάτη. Αυτή η κοινή μεταφορά δεδομένων σημαίνει ταχύτερο και πιο αποτελεσματικό σύστημα για όλους τους χρήστες. Αυτό αυξάνει τη δυνατότητα λήψης ή ροής με βελτιωμένη εμπειρία για τον χρήστη, ακόμη και σε περιοχές που είναι πολυσύχναστες. Επίσης, τα δίκτυα μπορούν να αλλάξουν δυναμικά μεταξύ ενός ή πολλαπλών χρηστών.

Η μαζική τεχνολογία MIMO αναφέρεται στο ότι ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με μεγάλο αριθμό κεραιών, συνήθως εκατό ή αρκετές εκατοντάδες κεραιές, οι οποίες είναι μερικές τάξεις μεγέθους υψηλότερες από τον αριθμό των κεραιών στο υπάρχον σύστημα επικοινωνίας. Εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς χρήστες στον ίδιο πόρο χρονικής συχνότητας και τα κινητά τερματικά υιοθετούν γενικά τον τρόπο επικοινωνίας της μίας λήψης κεραιάς. Το βασικό μοντέλο του μαζικού MIMO φαίνεται στην Εικόνα 4, που ακολουθεί:



Εικόνα 4: Βασικό διάγραμμα μοντέλου μαζικού MIMO [19]

Η ισχύς που καταναλώνεται από την κεραία είναι εξαιρετικά χαμηλή. Στην ιδανική περίπτωση, υπό την προϋπόθεση μιας ορισμένης συνολικής ισχύος μετάδοσης, η μεταδιδόμενη ισχύς που χρησιμοποιείται από κάθε κεραία είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον αριθμό των κεραιών και υπό την προϋπόθεση ενός ορισμένου λόγου μεταδόσεως σήματος προς θόρυβο, η συνολική ισχύς μετάδοσης είναι αντιστρόφως ανάλογη προς αριθμός κεραιών. Επομένως, η ισχύς μετάδοσης που απαιτείται για κάθε κεραία είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο του αριθμού των κεραιών. Έτσι, η ισχύς που καταναλώνεται σε μαζική εφαρμογή MIMO μειώνεται αποτελεσματικά.

### 3.6.2 Τεχνολογία AI

Το θέμα της τεχνητής νοημοσύνης (AI) βασίζεται σε διάφορους ερευνητικούς κλάδους, όπως η επιστήμη των υπολογιστών, η φιλοσοφία ή οι μελέτες μελλοντικών εξελίξεων. Σε αυτό το έργο εστιάζουμε κυρίως στο πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών, καθώς είναι το πιο συναφές για τον προσδιορισμό της συμβολής της μηχανικής μάθησης στο AI και για τη διαφοροποίηση των δύο όρων. Η έρευνα AI μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικά ερευνητικά ρεύματα. Αυτά τα ρεύματα διαφέρουν, αφενός, από την πλευρά του σκοπού της εφαρμογής του AI (σκέψης και δράσης), αφετέρου όσον αφορά το είδος λήψης αποφάσεων (στοχεύοντας σε μια απόφαση παρόμοια με τον

άνθρωπο έναντι μιας ιδανικής και ορθολογικής απόφασης). Η ΑΙ προσφέρει αξιοπιστία, αποδοτικότητα κόστους, επιλύει πολύπλοκα προβλήματα και λαμβάνει αποφάσεις.

Η ΑΙ εφαρμόζεται σήμερα στα περισσότερα πεδία, είτε πρόκειται για επιχειρήσεις είτε για μηχανικούς. Ένα από τα σπουδαία εργαλεία στο ΑΙ ονομάζεται "μάθηση ενίσχυσης", το οποίο βασίζεται στην επιτυχία και την αποτυχία στην πραγματική ζωή για να αυξήσει την αξιοπιστία των εφαρμογών. Δυστυχώς, το ΑΙ είναι περιορισμένο με τις ικανότητές του και τη λειτουργικότητά του. Αν και η Τεχνητή Νοημοσύνη έκανε τη ζωή μας πολύ ευκολότερη και μας έσωσε περισσότερο χρόνο από ποτέ, οι επιστήμονες προβλέπουν ότι από την τεράστια εξάρτηση από την ΑΙ θα μπορούσε να εξαφανιστεί η ανθρωπότητα. Οι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι με την κατοχή μηχανών ΑΙ, οι άνθρωποι θα είναι άνεργοι και αυτό θα καταλήξει στην απώλεια της αίσθησης της ζωής. Ορισμένες τεχνικές ΑΙ δεν συνδέονται στενά με συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά σχεδιάζονται για πιο γενικό σκοπό, όπως η εξαγωγή χαρακτηριστικών, η ομαδοποίηση, η αναγνώριση προτύπων, η μηχανική μάθηση, ο έξυπνος έλεγχος, η εκπροσώπηση γνώσης, η εξόρυξη γνώσης κ.ο.κ.

*A. Εξαγωγή χαρακτηριστικών:* Η εξαγωγή χαρακτηριστικών ή η επιλογή χαρακτηριστικών είναι η διαδικασία επιλογής των πιο αποτελεσματικών από τον μεγάλο αριθμό πρωτότυπων χαρακτηριστικών, η κατασκευή του διανύσματος χαρακτηριστικών για την αναγνώριση προτύπων και τη μοντελοποίηση. Μια σημαντική λειτουργία της εξαγωγής χαρακτηριστικών είναι η μείωση της απαίτησης πόρων για την περιγραφή ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων. Οι εξαντλημένες λειτουργίες περιέχουν επαρκείς πληροφορίες, αλλά δεν είναι περιττές. Η εξαγωγή χαρακτηριστικών θα μπορούσε να βελτιστοποιήσει τις επακόλουθες διαδικασίες μοντελοποίησης και να φέρει καλύτερες ανθρώπινες ερμηνείες σε ορισμένες περιπτώσεις. Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την εξαγωγή χαρακτηριστικών, για παράδειγμα, γραμμικό μετασχηματισμό, ανάλυση βασικών συστατικών (PCA), ανάλυση γραμμικής διάκρισης (LDA), ανάλυση wavelet κ.ο.κ. Η επιλογή της μεθόδου εξαγωγής χαρακτηριστικών θα μπορούσε να επηρεάσει την απόλυτη απόδοση σε εφαρμογές ΑΙ, όπως αναγνώριση προσώπου και αναγνώριση ομιλίας.

*B. Αναγνώριση σχεδίων:* Η αναγνώριση σχεδίων επικεντρώνεται στην αναγνώ-

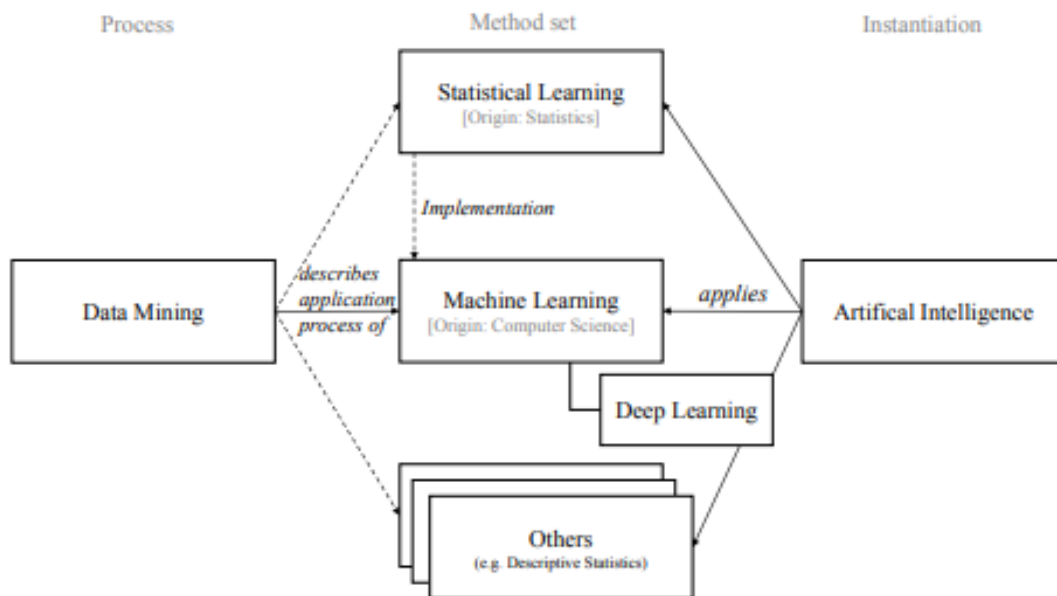
ριση συγκεκριμένων μοτίβων ή κανονικοτήτων στα δεδομένα, γεγονός που επιτρέπει στο AI να κάνει την κρίση σαν ανθρώπινη. Η Bayesian ταξινόμηση, το δέντρο απόφασης, η μέθοδος γραμμικής διακριτικής συνάρτησης, η μέθοδος ταξινόμησης της γειτονιάς, η μέθοδος μη γραμμικής χαρτογράφησης χρησιμοποιούνται συχνά στην αναγνώριση προτύπων. Τα θέματα στην αναγνώριση προτύπων περιλαμβάνουν την κυματομορφή φωνής, το σεισμικό κύμα, το ΗΚΓ, το EEG, τις φωτογραφίες, το κείμενο, τα σύμβολα, τους βιοαισθητήρες και άλλα αντικείμενα, όπως για παράδειγμα τα συστήματα διάγνωσης μέσω υπολογιστή (CAD) στην ανίχνευση και την ταξινόμηση του καρκίνου του μαστού.

*Γ. Μηχανική μάθηση:* Η μηχανική μάθηση αναφέρεται στην τεχνολογία AI που μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος AI μόνο ανάλογα με τα δεδομένα χωρίς να ακολουθήσει τις οδηγίες του προγράμματος. Η εποπτευόμενη μάθηση, η μη εποπτευόμενη μάθηση είναι βασικοί τύποι μηχανικής μάθησης σύμφωνα με τον τρόπο εκμάθησης. Η μηχανική μάθηση είναι ένας τρόπος έξυπνης άρσης του συστήματος AI και είναι η υποστηρικτική τεχνολογία πολλών εφαρμογών AI, έτσι η μηχανική μάθηση έχει εξελιχθεί ως η κύρια ροή στην έρευνα της τεχνητής νοημοσύνης. Μεγάλες προσπάθειες γίνονται σήμερα από πολλούς κορυφαίους ερευνητές του AI για τη βελτίωση της ικανότητας της μηχανικής μάθησης μέσω διαφόρων μεθόδων, όπως η εκμάθηση μεταφοράς, η μικρή δειγματοληψία, η ενίσχυση της μάθησης, η διαδραστική μάθηση, η ανοικτή μάθηση κ.ο.κ.

*Δ. Εξόρυξη γνώσης:* Η εξόρυξη γνώσης είναι η υπολογιστική διαδικασία της ανακάλυψης υποκείμενων γνώσεων από ένα τεράστιο όγκο δεδομένων και καθιστά κατανητό για περαιτέρω χρήση. Η εξόρυξη γνώσης είναι η αναζήτηση κρυφών πληροφοριών μέσω αυτόματου ή ημιαυτόματου αλγορίθμου, όπως εξόρυξη κανόνα σύνδεσης, εξόρυξη διαδοχικών προτύπων. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη διαχείριση πελατειακών σχέσεων, σύσταση εμπορευμάτων, απόφαση μάρκετινγκ και ούτω καθεξής.

### 3.6.3 Τεχνολογία ML

Η μηχανική μάθηση (Machine Learning) περιγράφει ένα σύνολο τεχνικών που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επίλυση ποικίλων προβλημάτων πραγματικού κόσμου με τη βοήθεια συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών που μπορούν να μάθουν να λύσουν ένα πρόβλημα αντί να προγραμματιστούν σαφώς. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να διαφοροποιήσουμε μεταξύ της μη εποπτείας και της επιτηρούμενης εκμάθησης. Όσον αφορά την εποπτευόμενη μηχανική μάθηση, η μάθηση σημαίνει ότι μια σειρά παραδειγμάτων ("προηγούμενη εμπειρία") χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γνώσεων σχετικά με ένα συγκεκριμένο έργο. Παρόλο που χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκμάθησης, δεν απαιτείται χειροκίνητη προσαρμογή ή προγραμματισμός κανόνων ή στρατηγικών για την επίλυση ενός προβλήματος. Λεπτομερέστερα, οι τεχνικές μάθησης μηχανών (εποπτευόμενων μηχανών) στοχεύουν πάντοτε να χτίσουν ένα μοντέλο εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο σε ένα σύνολο γνωστών σημείων δεδομένων για να αποκτήσουν γνώση ενός άγνωστου συνόλου δεδομένων. Η Εικόνα 5 που ακολουθεί, περιγράφει την τεχνολογία ML στην Τεχνητή Νοημοσύνη.



Εικόνα 5: Τεχνολογία ML στην Τεχνητή Νοημοσύνη [19]

Παρόλο που χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκμάθησης, δεν απαιτείται χειροκίνητη προσαρμογή ή προγραμματισμός κανόνων ή στρατηγικών για την επίλυση ενός προβλήματος. Λεπτομερέστερα, οι τεχνικές μάθησης μηχανών (εποπτευόμενων μηχανών) στοχεύουν πάντοτε να χτίσουν ένα μοντέλο εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο σε ένα σύνολο γνωστών σημείων δεδομένων για να αποκτήσουν γνώση ενός άγνωστου συνόλου δεδομένων.



## 4. Δίκτυα 6G

### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή τη σύγχρονη εποχή, η ασύρματη επικοινωνία αναδεικνύεται ως ο πιο ευέλικτος και βολικός τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών που υπάρχουν σε όλο τον κόσμο. Σε αυτό το σενάριο, τα δίκτυα επικοινωνίας 6G θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις των χρηστών για υψηλή ταχύτητα δεδομένων, χωρίς τις οποιεσδήποτε διακοπές δικτύου. Παρέχει ταχύτητα δεδομένων 10 - 300Mbps και επεκτείνεται μέχρι τα 10 -11 Gbps. Η τεχνολογία 6G θεωρείται ως η ταχύτερη και αποδοτικότερη για δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας. Στη σημερινή σύγχρονη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας, χρησιμοποιεί πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία και μεθοδολογία μετάδοσης ραδιοκυμάτων που ξεπερνά κατά πολύ τα υπάρχοντα πρότυπα [19].

Το δίκτυο 6G χρησιμοποιεί ασύρματη τεχνολογία και το δίκτυο οπτικών ινών ως υποκείμενη αρχιτεκτονική, για την ενίσχυση της δυνατότητας υψηλής ταχύτητας δεδομένων, ανεξάρτητα από την απόσταση και τον τρόπο σύνδεσης. Έχει την τάση να παρέχει ταχύτερη ροή, χωρίς καμία διακοπή καθώς και προσωρινή αποθήκευση που δεν υπάρχει σε προηγούμενες γενιές δικτύων. Ο κύριος σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η υλοποίηση δικτύων 6G που να μπορούν να υποστηρίξουν διάφορες αναδυόμενες τεχνολογίες επικοινωνιών για την επίτευξη υψηλής ταχύτητας δεδομένων με χαμηλό κόστος. Σε αυτόν τον ψηφιακό κόσμο, εξαιτίας της εκτεταμένης επιρροής των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας με τα πρόσθετα χαρακτηριστικά του *riconet*<sup>10</sup> και της ασύρματης συνδεσιμότητας, έγινε ευκολότερη η ανταλλαγή δεδομένων και πόρων μεταξύ των ανθρώπων. Η 6G είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας που προσφέρει ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο με τεχνολογία οπτικών ινών 6G. Χρησιμοποιεί ραδιοκύματα με συχνότητες 5.8 GHz και συνδυάζει τα πρότυπα 802.11n<sup>11</sup> και 802.11ac<sup>12</sup> για την

---

<sup>10</sup> Ένα *riconet* είναι ένα ad hoc δίκτυο που συνδέει μια ασύρματη ομάδα χρηστών με συσκευές που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα τεχνολογίας Bluetooth. Ένα *riconet* αποτελείται από δύο ή περισσότερες συσκευές που καταλαμβάνουν το ίδιο φυσικό κανάλι. Επιτρέπει σε μια κύρια συσκευή να διασυνδέεται με έως και επτά ενεργές συσκευές.

<sup>11</sup> Το 802.11n είναι βιομηχανικό πρότυπο IEEE για τις τοπικές επικοινωνίες δικτύου Wi-Fi, επικυρωμένο το 2009. Αντικατέστησε τις τεχνολογίες Wi-Fi 802.11a, 802.11b και 802.11g αλλά αντικαταστάθηκε από το 802.11ac το 2013.

<sup>12</sup> Το IEEE 802.11ac είναι ένα πρότυπο ασύρματης δικτύωσης στο σύνολο πρωτοκόλλων 802.11 (που ανήκει στην οικογένεια δικτύων Wi-Fi), παρέχοντας ασύρματα τοπικά δίκτυα υψηλής ευρυζωνικότητας (WLAN) στη ζώνη των 5 GHz.

ενίσχυση της ασύρματης συνδεσιμότητας. Τα ασύρματα δίκτυα κινητής επικοινωνίας της 6<sup>ης</sup> γενιάς παρέχουν δυνατότητα παγκόσμιας κάλυψης με ενισχυμένα παγκόσμια δίκτυα. Τα συστήματα παγκόσμιας κάλυψης υποστηρίζονται από διάφορες χώρες με συνιστώσες όπως το παγκόσμιο σύστημα θέσης (GPS) που αναπτύχθηκε από τις ΗΠΑ, το σύστημα COMPASS που αναπτύχθηκε από την Κίνα, το σύστημα Galileo που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το σύστημα GLONASS που αναπτύχθηκε από την Ρωσία [20].

Το Διαδίκτυο 6G επέκτεινε την υπάρχουσα ταχύτητα δεδομένων στο εύρος των 10 - 300Mbps για τους οικιακούς χρήστες, ενώ για τους εμπορικούς χρήστες η ταχύτητα δεδομένων κυμαίνεται από 10 έως 12 Gbps, συνδυάζοντας το δίκτυο ασυρμάτων επικοινωνιών με το δίκτυο των φυσικών οπτικών ινών ως την υποκείμενη αρχιτεκτονική δικτύου. Χρησιμοποιεί ίνες ασύρματων συχνοτήτων, το επονομαζόμενο δίκτυο οπτικών ινών, το οποίο αποτελείται από σήματα που διανέμονται μέσω του αέρα και επιτρέπουν την εγκαθίδρυση ευρυζωνικών συνδέσεων. Είναι πραγματικά πολύ δύσκολο να προβλέψουμε τι ακριβώς θα είναι το 6G. Για παράδειγμα, η έρευνα για το 5G ξεκίνησε γύρω στο 2009. Ωστόσο, τα ακριβή χαρακτηριστικά των 5G καθορίστηκαν από την ITU σε συνεργασία με άλλους φορείς τυποποίησης πολύ αργότερα το 2015. Παρόμοιες αβεβαιότητες παρατηρήθηκαν επίσης για τις προβλέψεις μέσω 3G και 4G την εποχή αρχές τους. Εάν δεν συμφωνηθούν τα πλήρη πρότυπα από τις ομάδες εμπειρογνομόνων σε όλο τον κόσμο, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν τα ακριβή χαρακτηριστικά. Ωστόσο, από τις προηγούμενες εμπειρίες, μπορούμε να προβλέψουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του 6G [21].

1. Το 6G θα είναι καλύτερο από το 5G σε όλες τις πτυχές που σχετίζονται με την απόδοση.
2. Οι μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων που προτείνονται για το 5G είναι 20 Gb/s και οι μέγιστοι ρυθμοί ασύρματων δεδομένων των 6G θα είναι περίπου 100 Gb/s. Στην πραγματικότητα, για την ταχύτητα δεδομένων 6G δεν θα είναι το κύριο αξιοθέατο. Αντίθετα, η συνολική ποιότητα των επιδόσεων θα είχε σημασία.
3. Η καθυστέρηση 5G του 1 ms θα μειωθεί περαιτέρω στη σειρά ms.
4. Οι πυκνότητες των συσκευών και η σύνδεση IoT θα είναι πολύ πιο πυκνές από τις 5G. Το πραγματικό ψηφιακό οικοσύστημα θα υλοποιηθεί στο 6G.

5. Η ενεργειακή απόδοση θα είναι σίγουρα καλύτερη από την 5G.
6. Η φασματική απόδοση θα είναι καλύτερη από αυτή της 5G.
7. Περισσότερες εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης θα βρεθούν στο 6G. Στην πραγματικότητα, τα κινητά τηλέφωνα δεν θα χρησιμοποιούνται μόνο για επικοινωνία. μάλλον θα γίνουν προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί των ατόμων.
8. Το 6G θα είναι ένα υβριδικό πανταχού παρόν δίκτυο το οποίο θα ενσωματώνει όλες τις εξελίξεις στις σύγχρονες τεχνολογίες στο πεδίο του [22]. Στο 6G, η οπτική δικτύωση θα έπαιζε μεγαλύτερους ρόλους σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές.

## 4.2 Βιβλιογραφική έρευνα

Το παρόν υποκεφάλαιο εστιάζει στην βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί στους παρακάτω τομείς:

### **A) Τεχνολογίες επικοινωνίας**

Σήμερα, οι ασύρματες τεχνολογίες παραμένουν χρήσιμες καθώς βοηθούν τους χρήστες να μεταφέρουν πληροφορίες από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλον και να επικοινωνούν με άλλους χρήστες που βρίσκονται σε μικρές και μεγάλες αποστάσεις. Με την βοήθεια της ασύρματης επικοινωνίας, οι χρήστες μπορούν να επικοινωνούν άμεσα. Πολλές ασύρματες τεχνολογίες είναι ήδη διαθέσιμες, όπως 1G-5G και έχουν προσφέρει υψηλή διαθεσιμότητα, καλή απόδοση δικτύου και κάλυψη. Οι φορητές 6G τεχνολογίες επιτρέπουν στις συσκευές να συνδέονται μέσω του διαδικτύου με άλλες ασύρματες συσκευές με χρήση τεχνολογιών όπως wi-fi, WiMax, Bluetooth κ.λ.π.

### **B) Εξέλιξη**

Σήμερα, οι ασύρματες τεχνολογίες 4G και 5G είναι διαθέσιμες σε όλες σχεδόν τις κινητές συσκευές. Ωστόσο η ταχύτητα και η κάλυψη των δεδομένων δικτύου, εξακολουθούν να αποτελούν την πρόκληση. Η τεχνολογία 6G έχει την δυνατότητα να προσφέρει στους χρήστες περισσότερα από ότι προσδοκούν με αυξημένη ταχύτητα δεδομένων της τάξης των 1000 Mbps. Αυτή τη στιγμή, οι τεχνολογίες 4G προσφέρουν ταχύτητα Διαδικτύου ίση με 100 Mbps [23].

### **Γ) Οικονομική επίδραση**

Στα δίκτυα 6G, τα ποσοστά και τα κόστη δεδομένων μειώνονται λόγω της συμπερίληψης των ραδιοκυμάτων ως λειτουργία μετάδοσης δεδομένων. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες του δικτύου να χρησιμοποιούν την αποτελεσματική και αποδοτική συνδεσιμότητα που προσφέρονται από τον Wi-Fi router ή τα δεδομένα κινητής τηλεφωνίας, γεγονός που βοηθά πολύ την πληρωμή μεγάλων ποσών στους παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου (ISP). Επιπλέον, υπάρχει κατάργηση προστασίας προσωπικών δεδομένων: δεδομένου ότι η πλειοψηφία των ανθρώπων εξυπηρετείται με χαμηλές ταχύτητες, απαιτείται ένας ευκολότερος τρόπος για το κατέβασμα από διαφορετικές ιστοσελίδες.

Καθώς τα δίκτυα 6G διευκολύνουν μια πολύ υψηλή ταχύτητα δεδομένων, οι χρήστες των κινητών τηλεφώνων μπορούν να παρακολουθήσουν εύκολα τις online ταινίες ακόμα και όταν ταξιδεύουν, οποιαδήποτε χρονική στιγμή και οπουδήποτε, χωρίς τις προκλήσεις αποθήκευσης των ταινιών πριν την προβολή τους. Αυτή η τεχνολογία ευνοεί την βιομηχανία ταινιών, παρέχοντας μια νέα τεχνική ροής των ταινιών στο Διαδίκτυο, κάτι που μειώνει το κόστος δαπάνης για την παρακολούθηση των ταινιών. Αυτή η οικονομικά αποδοτική μέθοδος αυξάνει τον αριθμό των πελατών σε υπηρεσίες streaming, γεγονός που θα αυξήσει αυτόματα τα κέρδη των παραγωγών ταινιών.

Το Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας 6G θα μειώσει επίσης σημαντικά την πειρατεία των ταινιών, καθώς με αυτές τις υψηλές ταχύτητες δεδομένων οι χρήστες προτιμούν να παρακολουθούν τις ταινίες σε απευθείας σύνδεση, παρά να τις κατεβάζουν. Ως εκ τούτου, το δίκτυο 6G αναδεικνύεται ως μια ενδεδειγμένη λύση για την αποφυγή της συνεχώς αυξανόμενης απειλής της πειρατείας ταινιών.

### **Δ) Αποθηκευτική ικανότητα, ταχύτητα και βελτιωμένη ασφάλεια**

Τα δίκτυα 6G, με υψηλή ταχύτητα στο Διαδίκτυο, έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης τεράστιου όγκου δεδομένων και αυτή η διαδικασία καταλαμβάνει περισσότερο χώρο μνήμης. Η τεχνολογία 6G επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα και τις εφαρμογές με ασφαλή τρόπο

### 4.3 Τεχνολογίες και οράματα 6G

Οι κυριότερες 6G τεχνολογίες είναι οι εξής [24]:

**a) Τεχνολογία αιχμής:** καθώς η τεχνολογία 6G θεωρείται ως συνέργεια των σύγχρονων τεχνικών όπως η ασύρματη επικοινωνία και οι οπτικές ίνες, αναγκάζει τους χρήστες των δικτύων να σταματήσουν να χρησιμοποιούν το παραδοσιακό καλώδιο χαλκού και να περάσουν σε μια εποχή ανταλλαγής δεδομένων με πάρα πολύ υψηλούς ρυθμούς.

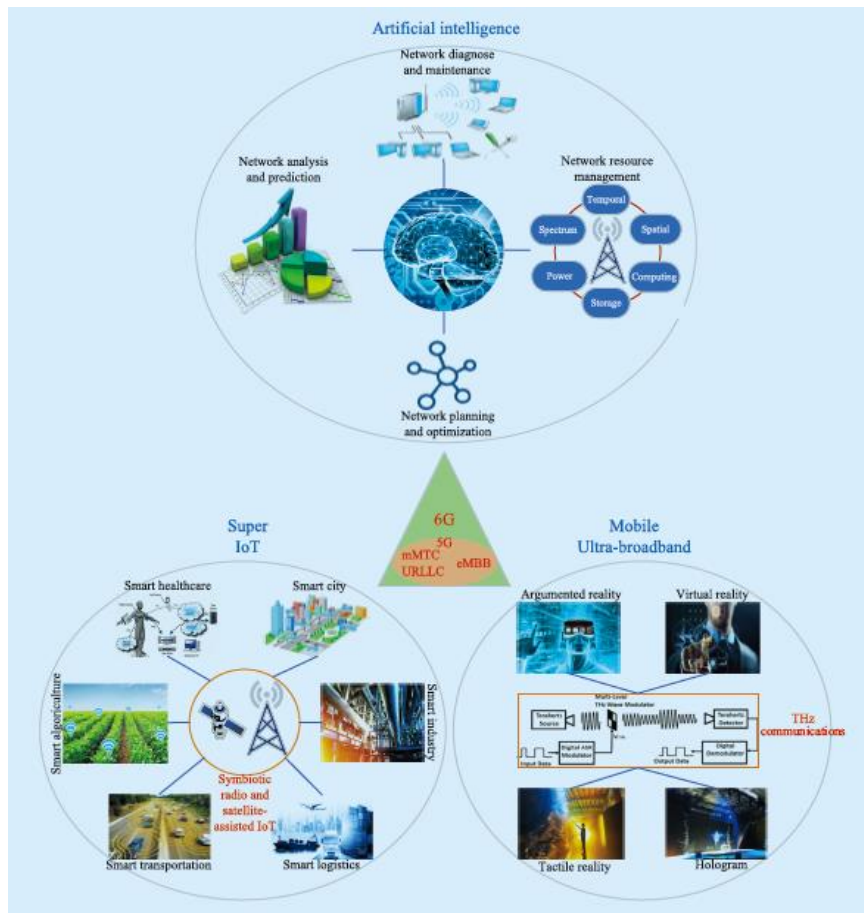
**b) Ασύρματο καινοτόμο σύστημα για δυναμικές λειτουργικές επικοινωνίες (WISDOM - Wireless Innovative System for Dynamic Operating Mega communications):** Η χρήση του WISDOM στα δίκτυα 6<sup>ης</sup> γενιάς παρέχει πολύ υψηλά ποσοστά δεδομένων, ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και εφαρμογές υπηρεσιών.

**c) Ιπτάμενοι αισθητήρες πτήσης και νανο-κεραίες:** Οι ιπτάμενοι αισθητήρες θα παρέχουν πληροφορίες στην απομακρυσμένες τους παρατηρήσεις, γεγονός που βοηθά τις συνδέσεις σε ολόκληρο τον πλανήτη.

**d) Ασύρματη ίνα:** Η τεχνολογία ασύρματων ινών δεν είναι παρά η παραδοσιακή ασύρματη τεχνολογία, η οποία ενσωματώνει αυτή την παλιά τεχνολογία σε ένα νέο πρότυπο. Στη συμβατική ασύρματη τεχνολογία χρησιμοποιούμε μια συγκεκριμένη συχνότητα για να εκπέμψουμε από ένα κανάλι, όπου ο χρήστης μπορεί να στείλει δεδομένα και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα σε λειτουργία αμφίδρομης επικοινωνίας με πολυπλεξία πολλών πακέτων δεδομένων και στη συνέχεια να τα μεταδίδει χρησιμοποιώντας έναν πομπό στην ίδια ασύρματη συχνότητα.

**e) Κρυπτογράφηση:** Δεδομένου ότι η τεχνολογία 6G χρησιμοποιεί ραδιοκύματα, είναι επιρρεπής στην απώλεια πληροφοριών. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση τεχνολογιών κρυπτογράφησης για την προστασία των δεδομένων κατά τη διέλευσή τους μέσω των καναλιών επικοινωνίας και αυτό πραγματοποιείται και ολοκληρώνεται μέσω μιας κοινής αρχιτεκτονική τείχους προστασίας.

Αναφορικά με τα οράματα της τεχνολογίας 6G, θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτά επικεντρώνονται σε τρεις επιμέρους στόχους που είναι: κινητή υπερυψηλή ευρυζωνική σύνδεση ζώνης (ultra - broadband), πολύ γρήγορο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (super Internet of Things) και Τεχνητή Νοημοσύνη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, που ακολουθεί:



Εικόνα 6: Τυπικές περιπτώσεις χρήσης σε οράματα 6G που περιλαμβάνουν τρεις πτυχές: κινητή υπερυψηλή ευρυζωνική σύνδεση, υπερφόρτωση IoT και AI [24]

Σε σχέση με τη νέα τεχνολογία 6G, η τρέχουσα τεχνολογία 5G έχει τρία τυπικά σενάρια χρήσης: Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας (eMBB), μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC) και εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (URLLC). Συγκεκριμένα, ο σκοπός της τεχνολογίας eMBB είναι να παρέχει υψηλά ποσοστά δεδομένων για χρήστες κινητών τηλεφώνων (έως 1G bit ανά δευτερόλεπτο), ο σκοπός της τεχνολογίας mMTC επικεντρώνεται στον αριθμό συνδεδεμένων συσκευών τύπου μηχανής σε IoT (μέχρι 1 εκατομμύριο ασύρματες συνδέσεις ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο) και τέλος η τεχνολογία URLLC δίνει έμφαση στην αξιοπιστία και την καθυστέρηση σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως το δίκτυο οχημάτων και η αυτοματοποίηση της βιομηχανίας (η αξιοπιστία και η λανθάνουσα κατάσταση αντιστοιχούν αντίστοιχα στις τάξεις των 99,999% και των χιλιοστών του δευτερολέπτου). Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε αυτά τα σενάρια

για χρήση, η εξέλιξη 5G βασίζεται κυρίως σε τρεις πτυχές: ζώνες φάσματος, νέες ραδιοσυχνότητες και δίκτυο πυρήνα 5G [25].

- Οι ζώνες φάσματος 5G μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους ζώνες GHz (Sub-GHz), για παράδειγμα 1-6 GHz και πάνω από 6 GHz. Οι ζώνες Sub-GHz είναι κατάλληλες για την παροχή ευρείας κάλυψης για συσκευές τύπου μηχανής σε IoT λόγω των καλών ιδιοτήτων εξασθένησης των σημάτων που πολλαπλασιάζονται σε αυτές τις συχνότητες. Οι ζώνες φάσματος συχνοτήτων 1 - 6 GHz προσφέρουν μια λογική ισορροπία μεταξύ της κάλυψης και του ρυθμού δεδομένων για τις υπηρεσίες 5G. Οι ζώνες φάσματος πάνω από 6 GHz έχουν μεγάλα εύρη ζώνης και έτσι μπορούν να παρέχουν υψηλές ταχύτητες δεδομένων για την υποστήριξη εφαρμογών eMBB μέσα σε περιορισμένη κάλυψη.
- Η δικτύωση 5G στοχεύει σε νέες τεχνολογίες για να βελτιώσει την απόδοση μετάδοσης, π.χ. υψηλή ταχύτητα δεδομένων, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι σχετικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν επικοινωνία με πολύ πυκνό ετερογενές δίκτυο, χιλιοστά κύματος (mmWave), μαζική πολυπλεξία πολλαπλής εισόδου πολλαπλών εισόδων (MIMO), κλιμακούμενη κυματομορφή πολυπλεξίας διαίρεσης ορθογώνιας συχνότητας (OFDM) και μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA).
- Η τεχνολογία 5G έχει σχεδιαστεί για να ικανοποιεί ποικίλες απαιτήσεις από διάφορες εφαρμογές μέσα σε ένα ενιαίο δίκτυο πυρήνα 5G. Ως εκ τούτου, το κεντρικό δίκτυο 5G πρέπει να παρέχει πολλαπλές νέες λειτουργίες, όπως ευέλικτη κατανομή πόρων, ευέλικτη αναδιαμόρφωση δικτύου και ανοικτή πρόσβαση σε διάφορες πλατφόρμες. Χαρακτηριστικές εξελίξεις για το κεντρικό δίκτυο 5G περιλαμβάνουν τα κινητά υπολογιστικά πλεονεκτήματα (MEC), η δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (SDN), η οπτικοποίηση λειτουργίας δικτύου (NFV) και ο τεμαχισμός σε δίκτυο.

#### 4.4 Βελτιώσεις της τεχνολογίας 6G έναντι της 5G

Τα πάντα γύρω μας θα είναι πολύ έξυπνα, οδηγώντας στην έννοια του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), με ένα τεράστιο όγκο δεδομένων και πληροφοριών. Λί-

γοι θα διαφωνήσουν ότι η τεχνητή νοημοσύνη θα αποτελέσει αναπόσπαστο μέρος του 6G λόγω της διαθεσιμότητας μαζικών δεδομένων που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο επεξεργασίας και την πρόοδο της ικανότητας υπολογισμού. Το πρόσφατο ενδιαφέρον έχει επίσης μετατοπιστεί στην ανίχνευση άκρων και τη ραδιοφωνική προσπέλαση ομίχλης (RAN), η οποία φέρνει τα περιεχόμενα πιο κοντά στους εξοπλισμούς των χρηστών (UEs), επιτρέποντας πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση και κατανάλωση ισχύος. Στο 6G, αναμένουμε να δούμε την τεχνητή νοημοσύνη σε λειτουργία με κατανεμημένη εκπαίδευση στις άκρες του δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των σταθμών βάσης μικροκυττάρων (SBS) και των UEs, που εξακολουθεί να είναι ένα ανοιχτό πρόβλημα.

Στο επίπεδο της συσκευής, μια άλλη πραγματικότητα είναι ότι οι τεχνολογίες ραντάρ θα ενσωματωθούν με τις τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας για την παροχή ολοκληρωμένων πληροφοριών πλαισίου από τη μικρή σε μέση κλίμακα για να βοηθήσουν τις επικοινωνίες. Στο 6G, είναι πιθανό να δούμε ότι η ασφάλεια φυσικής στρώσης τελικά ευδοκιμεί για να παρέχει ένα επίπεδο άμυνας, επιπλέον των κρυπτογραφικών τεχνικών, για μια ποικιλία συσκευών και μηχανών με διαφορετικές δυνατότητες. Συγκεκριμένες πληροφορίες που λαμβάνονται από ραντάρ εγκατεστημένα σε κινητά τηλέφωνα, ταμπλέτες ή άλλες συσκευές IoT θα καταστήσουν δυνατή την υιοθέτηση προσεγγίσεων ασφάλειας φυσικών επιπέδων, καθώς και πολλές άλλες χρήσεις των σχετικών πληροφοριών στο επίπεδο της εφαρμογής. Οι συσκευές θα είναι επίσης πολύ πιο έξυπνες, ενισχυμένες από την τεχνητή νοημοσύνη, εκπαιδευμένες από τα δεδομένα συμπεριφοράς του περιβάλλοντος από ραντάρ.

Εκτός από αυτά, η τεχνολογία 6G θα χρησιμοποιήσει έξυπνες δομές για να προσφέρει ένα επιπλέον βαθμό ελευθερίας (DoF) για τη βελτίωση των ασύρματων ζεύξεων, παρέχοντας μια άνευ προηγουμένου χωρητικότητα. Σε μεγάλη κλίμακα, θα εγκατασταθούν έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες σε κτίρια. Οι έξυπνες επιφάνειες θα αυξήσουν αποτελεσματικά το άνοιγμα της κεραίας για να συλλέξουν όσο το δυνατόν περισσότερα ασύρματα σήματα που δεν ήταν δυνατά πριν για βελτιωμένη ενέργεια και φασματική απόδοση. Στη μικρότερη κλίμακα, το 6G θα δει επίσης την ευέλικτη δομή της κεραίας στα UE. Οι κεραίες με μεταμετρικό υλικό μπορούν επίσης να υλοποιηθούν για να καταστούν ακόμη πιο συμπαγείς οι ευρυζωνικές κεραίες. Τέτοιες έξυπνες δομές επιδιώκουν να διαμορφώσουν το περιβάλλον για να καλύψουν διάφο-



ρες εφαρμογές, για παράδειγμα, να βελτιώσουν την ποιότητα των συνδέσεων, να μπλοκάρουν τις παρεμβολές, να ενισχύσουν την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια, να αποφύγουν αντιφατικές επιθέσεις και πολλά άλλα.

Υπάρχει επίσης πιθανότητα επιτυχίας σε άλλες αναδυόμενες περιοχές που δεν έχουν ακόμα μεγάλη επίδραση στο 5G αλλά θα μπορούσαν να γίνουν πραγματικότητα στο 6G, συμπεριλαμβανομένης της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (WPT) και της συγκομιδής ενέργειας RF, των οπτικών ασύρματων επικοινωνιών ή του Li-Fi. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα ότι το 6G θα είναι κάτι περισσότερο από ασύρματο και θα πρέπει να χειριστεί τη συνύπαρξη παραδοσιακών κινητών επικοινωνιών και διασυνδέσεων εντός των υπολογιστών, καθώς οι υπολογιστές πολλών πυρήνων μπορούν να χρησιμοποιούν ψηφιακές επικοινωνίες επιφανειακών κυμάτων για διασυνδέσεις οι οποίες μπορεί να καταλαμβάνουν την ίδια ζώνη με το 6G. Συνολικά, προβλέπουμε ότι η τεχνητή νοημοσύνη θα διεισδύσει σε όλα τα επίπεδα και θα είναι η υπογραφή για το 6G για πιο έξυπνα και ισχυρότερα δίκτυα.

Το 6G αναμένεται επίσης να ολοκληρωθεί μέσα σε δορυφόρους για την παροχή παγκόσμιας κινητής κάλυψης. Η φασματική απόδοση του όγκου (σε bps/Hz/m<sup>3</sup>), σε αντίθεση με την συχνά χρησιμοποιούμενη φασματική απόδοση περιοχής (bps/Hz/m<sup>2</sup>), θα είναι πιο κατάλληλη στο 6G για να μετρήσει σωστά την χωρητικότητα του συστήματος σε έναν τρισδιάστατο χώρο λειτουργίας. Η εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC), ένα βασικό χαρακτηριστικό στο 5G NR, θα είναι και πάλι ένας βασικός οδηγός στο 6G που ωθεί το όριο περαιτέρω για να απαιτεί λανθάνουσα κατάσταση μικρότερη από 1ms. Η ενεργειακή απόδοση θα είναι εξαιρετικά σημαντική για την παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των μονάδων UE. Οι βασικοί δείκτες απόδοσης του 6G συγκριτικά με το 5G φαίνονται στον πίνακα 4. Όπως φαίνεται σε αυτό τον πίνακα, η τεχνολογία 6G αναζητά διάφορες βελτιώσεις σε σχέση με την 5G σε όλες τις πτυχές. Εδώ, επισημαίνουμε μερικά εμπόδια, όπου θα χρειαστούν μεγάλες προσπάθειες. Ορισμένες από αυτές εξετάζονται ήδη και αντιμετωπίζονται εν μέρει στην τεχνολογία 5G.

Πίνακας 8: Βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI's) τεχνολογίας 5G έναντι 6G

Characteristics	5G	6G
Individual data rate	1 Gbps	100 Gbps
DL data rate	20 Gbps	> 1 Tbps
U-plane latency	0.5 ms <sup>1</sup>	< 0.1 ms
C-plane latency	10 ms	< 1 ms
Mobility	up to 500 km/h	up to 1000 km/hr
DL spectral efficiency	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Operating frequency	3 – 300 GHz <sup>2</sup>	up to 1 THz

### A. Δίκτυο πρόσβασης για κυκλοφορία backhaul

Οι πρόσφατα διαμορφωμένες τεχνολογίες ομάδων εστίασης της ITU για τα δίκτυα 2030 (FG NET-2030) εξέφρασαν την ανησυχία τους για το γεγονός ότι οι δυνατότητες δικτύων σταθερής πρόσβασης ήδη υστερούν σε αναδυόμενα συστήματα 5G. Αναμένεται ότι τα δίκτυα πρόσβασης για την κυκλοφορία backhaul θα αγωνιστούν για να αντιμετωπίσουν την άνευ προηγουμένου ανάπτυξη δεδομένων και άλλες απαιτήσεις ποιότητας, εκτός εάν ξεκινήσουν τα απαραίτητα βήματα για την ενίσχυση της ερευνητικής προσπάθειας. Υπάρχει αφθονία του φάσματος που διατίθεται σε υψηλότερες ζώνες, και μια τέτοια επιλογή είναι η D – ζώνη (μπάντα)<sup>13</sup>, όπου το φάσμα 60GHz είναι διαθέσιμο. Οι οπτικές επικοινωνίες του ελεύθερου χώρου και οι κβαντικές επικοινωνίες είναι οι ελπιδοφόρες για το 6G backhaul για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις. Ωστόσο, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και πώς αυτές οι τεχνολογίες, ακόμη και αν υπάρχουν, θα ενσωματωθούν με τους άλλους τύπους εξοπλισμού δικτύου πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν.

### B. Κύματα υπο-χιλιοστομέτρου και συχνότητες THz

Ένας προφανής τρόπος υποστήριξης της μαζικής αύξησης της απαίτησης για το ρυθμό δεδομένων είναι η αύξηση του εύρους ζώνης. Η αρχική συζήτηση δείχνει ότι οι συχνότητες στην περιοχή THz και παραπάνω θα θεωρηθούν για το 6G, καθώς στις ζώνες αυτές υπάρχουν πολλές ελεύθερες ζώνες κατάλληλες για να ικανοποιήσουν αυτήν την απαίτηση. Μια πρόσφατη μελέτη [26] δείχνει ότι το φάσμα 5G δεν μπορεί να υπερβεί τα 140GHz λόγω αρκετών προκλήσεων, όπως η έλλειψη κατανόησης της

<sup>13</sup> Η D - ζώνη είναι το εύρος ασύρματων συχνοτήτων από 110 GHz έως 170 GHz στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αυτές οι συχνότητες είναι ισοδύναμες με μήκη κυμάτων μεταξύ 2,7 mm και 1,8 mm. Η ζώνη D βρίσκεται στην περιοχή των εξαιρετικά υψηλά συχνοτήτων (EHF) του φάσματος.

μοντελοποίησης καναλιών και πολλαπλασιασμού, η αδυναμία της συσκευής να λειτουργήσει σε τέτοιες υψηλές συχνότητες κλπ. Αντίθετα, το 6G θα χρησιμοποιεί φάσμα πέραν των 140GHz με συγκεκριμένη εφαρμογή σε επικοινωνία πολύ μικρής εμβέλειας.

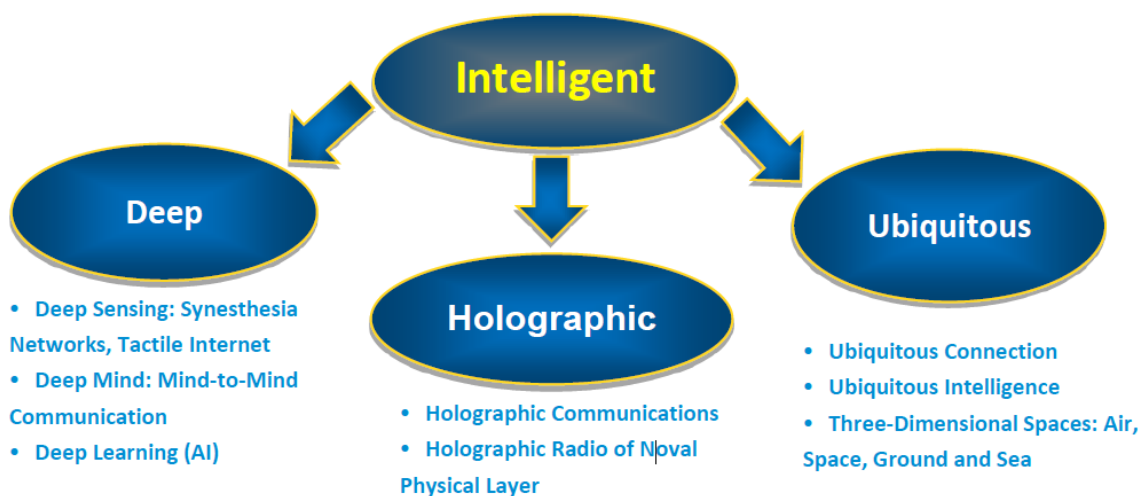
Ωστόσο, η ευαισθησία της ζώνης THz στην παρεμπόδιση, η μοριακή απορρόφηση, η δειγματοληψία και τα κυκλώματα για την κλίμακα επικοινωνίας A/D και D/A είναι μία από τις μείζονες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν τα επόμενα χρόνια. Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι σε υψηλότερες συχνότητες, το μέγεθος της κεραίας και τα σχετικά κυκλώματα γίνονται μικροσκοπικά και είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με ολοκληρωμένα κυκλώματα, εξασφαλίζοντας παράλληλα τον θόρυβο και την καταστολή παρεμβολών μεταξύ των συνιστωσών. Από την άλλη πλευρά, τα ακριβή χαρακτηριστικά διάδοσης σε αυτές τις ζώνες δεν είναι καλά κατανοητά, αν και μερικές πρόσφατες προσπάθειες αντιμετώπισης αυτών των σημείων συμφόρησης έχουν αναφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Σε ένα επιτυχημένο παράδειγμα, δείχνει ότι είναι δυνατό να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα διαμόρφωσης βασισμένο σε CMOS που λειτουργεί στα 300GHz για να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της απόδοσης.

### **Γ. Δικτύωση υπολογιστικού νέφους και φορητός υπολογισμός**

Η δικτύωση υπολογιστικού νέφους και ο φορητός υπολογισμός τελευταίας τεχνολογίας έχουν εισαχθεί στο 5G για να μειώσουν σημαντικά την απόσταση του εξοπλισμού των χρηστών (UEs) από τους σταθμούς βάσης και τους διακομιστές περιεχομένου υπηρεσίας/εφαρμογών, αντίστοιχα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η προσωρινή αποθήκευση σπάει το δίκτυο σε μια κατανεμημένη δομή υπολογιστικού νέφους, όπου τα δεδομένα εκπαίδευσης βρίσκονται στα άκρα του δικτύου, γεγονός που εμποδίζει την πλήρη λειτουργία των τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης. Είναι αναπόφευκτο το δίκτυο να κινηθεί προς ακόμη μικρότερα κελιά για περισσότερη χωρητικότητα και λιγότερη καθυστέρηση στα δίκτυα 6G και η κατάσταση αυτή θα επιδεινωθεί.

#### 4.5 Στόχοι τεχνολογίας 6G

Ο στόχος της δικτύωσης 6G είναι να ανταποκριθεί στις ανάγκες της κοινωνίας της πληροφορίας από σήμερα και δέκα χρόνια, π.χ. έως το έτος 2030, γεγονός που θα ξεπεράσει σημαντικά το τι μπορεί να προσφέρει η 5G. Το όραμα 6G μπορεί να συνοψιστεί σε τέσσερις λέξεις-κλειδιά όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7 που ακολουθεί. Αυτές οι λέξεις – κλειδιά είναι "Ευφυής συνδεσιμότητα", "Βαθιά συνδεσιμότητα", "Ολογραφική συνδεσιμότητα" και "Πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα". Αυτές οι τέσσερις λέξεις-κλειδιά αποτελούν το γενικό όραμα του 6G.



Εικόνα 7: Οράματα της τεχνολογίας 6G [27]

Η έξυπνη συνδεσιμότητα "αντικατοπτρίζει την εγγενή νοημοσύνη των συστημάτων επικοινωνίας: νοημοσύνη στοιχείων δικτύου και αρχιτεκτονικής δικτύων, έξυπνη πληροφόρηση των συνδεδεμένων αντικειμένων (τερματικές συσκευές) και υποστήριξη πληροφοριών από έξυπνες υπηρεσίες. Τα δίκτυα 6G θα αντιμετωπίσουν πολλές προκλήσεις όπως τα υπερσύγχρονα και τεράστια δίκτυα, διάφορους τύπους τερματικών και συσκευών δικτύου και εξαιρετικά πολύπλοκους και ποικίλους τύπους επιχειρήσεων. Η «έξυπνη συνδεσιμότητα» θα ικανοποιεί ταυτόχρονα δύο απαιτήσεις [28]:

- 1) όλες οι σχετικές συνδεδεμένες συσκευές στο ίδιο το δίκτυο είναι έξυπνες και οι σχετικές υπηρεσίες είναι έξυπνες.

- 2) Το πολύπλοκο και τεράστιο δίκτυο χρειάζεται έξυπνη διαχείριση. Η έξυπνη συνδεσιμότητα θα είναι το θεμελιώδες χαρακτηριστικό για την υποστήριξη των άλλων τριών βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου 6G: "Βαθιά συνδεσιμότητα", "Ολογραφική συνδεσιμότητα" και "Πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα".

#### 4.5.1 Απαιτήσεις και KPIs

Με τον όρο KPIs εννοούμε βασικούς δείκτες που αξιολογούν την επιτυχία ενός οργανισμού/δραστηριότητας. Η επιλογή των κατάλληλων KPIs βασίζεται στην καλή κατανόηση του τι είναι σημαντικό για τον οργανισμό. Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (KPI) είναι μετρήσεις της απόδοσης με απεικόνιση και βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο υπολογιζόμενο πεδίο και έχουν σχεδιαστεί για να βοηθούν τους χρήστες να υπολογίζουν γρήγορα την τρέχουσα τιμή και την κατάσταση μιας μονάδας μέτρησης σε σχέση με έναν καθορισμένο στόχο. Ο KPI μετρά την απόδοση μιας τιμής, που ορίζεται από μια μέτρηση Βάση έναντι μιας τιμής Στόχος, που ορίζεται επίσης από ένα πεδίο υπολογισμού ή μια απόλυτη τιμή. Προκειμένου να υλοποιηθεί το όραμα του δικτύου 6G και να ικανοποιηθεί η ζήτηση της μελλοντικής επικοινωνίας, πρέπει να εξεταστούν οι ακόλουθες βασικές απαιτήσεις και προκλήσεις [27]:

- *Ρυθμός αιχμής*: Περίοδος Terabit, ~ 10 terabits ανά δευτερόλεπτο.
- *Παγκόσμια σύνδεση χαμηλής καθυστέρησης και αξιοπιστίας*.
- *Υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης ενέργειας για επικοινωνίες*.
- *Σύνδεση παντού και ανά πάσα στιγμή*.
- *Πανταχού παρούσα νοημοσύνη*.
- *Ευελιξία*: να φιλοξενεί διάφορους τύπους δικτύων με δυναμικούς και οργανικούς τρόπους.
- *Σύγκλιση επικοινωνίας, υπολογισμών, ανίχνευσης και ελέγχου*
- *Μη τεχνικές προκλήσεις*: εμπόδια στη βιομηχανία, πολιτική και ρύθμιση, καταναλωτικές συνήθειες.

#### 4.5.2 Ενεργοποιούμενες τεχνολογίες

Οι τεχνολογίες που θα συζητηθούν σε αυτό το κεφάλαιο είναι επαναστατικές, υπό την έννοια ότι θα αλλάξουν θεμελιωδώς το φυσικό επίπεδο των συστημάτων κινητής επικοινωνίας σε σύγκριση με το 5G. Πολλές πτυχές βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της επιστημονικής εξερεύνησης. Παρόλα αυτά, αντιπροσωπεύουν πράγματι το επίπεδο της ανάπτυξης της επιστήμης και της τεχνολογίας μιας χώρας σε στρατηγικούς τομείς αιχμής. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι παρεμβολές παρεμπόδιζαν πάντα την απόδοση και την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση, εξάλειψη ή αποφυγή παρεμβολών. Σε αντίθεση με τη συμβατική άποψη ότι οι παρεμβολές θεωρούνται επιβλαβείς, η τεχνολογία 6G θα αντιμετωπίζει τις παρεμβολές ως χρήσιμη δύναμη για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών και ασφαλών συστημάτων επικοινωνίας. Μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες παρεμβολής - αξιοποίησης είναι ο υπολογιστικός ολογραφικός ασύρματος σταθμός.

Από τη μία πλευρά, η εκμετάλλευση παρεμβολών επιτυγχάνει τα κέρδη αξιοποιώντας παρεμβολές σε ασύρματα δίκτυα μέσω συνεργασίας μεγάλης κλίμακας μεταξύ κατανεμημένων πομποδεκτών και επιτρέποντας υψηλό πολλαπλασιαστικό κέρδος μέσω πολλαπλών μεταδόσεων. Από την άλλη πλευρά, η ολογραφική RF και η χωρική φασματική ολογραφία δείχνουν δυνατότητες εκμετάλλευσης παρεμβολών με φασματικό συντονισμό πλήρους χώρου. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες φαίνεται να επικεντρώνονται στην επεξεργασία σήματος ανερχόμενης ζεύξης, όπως απεικόνιση και χαρτογράφηση RF. Συνδυάζοντας τη χωρική φασματική ολογραφία με τη χωρική σύνταξη πεδίου των κυμάτων, ο ολογραφικός ασύρματος σταθμός μπορεί όχι μόνο να επιτύχει πλήρως κλειστό βρόχο και τον ακριβή έλεγχο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, αλλά και να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα φάσματος και τη χωρητικότητα δικτύου και να διευκολύνει την ενσωμάτωση της απεικόνισης και της ασύρματης επικοινωνίας.

#### 4.5.3 Επικοινωνίες Terahertz

Η ζώνη συχνοτήτων Terahertz (THz) κυμαίνεται από 0,1 έως 10 THz, η οποία είναι η τελευταία έκταση του ραδιοφάσματος και γενικά θεωρείται ως Terahertz Gap.

Η ζώνη Terahertz είναι ορατή ώστε να μπορεί να παρέχει ταχύτητα δεδομένων έως και Tbps για να ικανοποιήσει εξαιρετικά υψηλή απόδοση, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και εντελώς νέα σενάρια εφαρμογής για το 6G. Το πρώτο έργο στο IEEE 802 προς 100 Gbps, IEEE 802.15d, εγκρίθηκε τον Μάρτιο του 2014, αν και δεν υπάρχει εμπορικό σχέδιο βασισμένο σε αυτό το πρότυπο. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά της ζώνης terahertz, όπως η μεγάλη απώλεια διαδρομής, η διασπορά κ.λ.π. Θέτουν πολλές νέες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν επιτευχθούν οι σύνδεσμοι Tbps (Terabit/s). Τα κύρια χαρακτηριστικά της ζώνης terahertz είναι τα εξής [28]:

- (1) Τεράστια εύρη ζώνης ( $> 50$  GHz) διαθέσιμα στις συχνότητες THz,
- (2) Σοβαρή απώλεια διαδρομής ακόμη και για διάδοση ελεύθερου χώρου, π.χ.  $\sim 100$  dB στα 300 GHz στην απόσταση των 10 m,
- (3) Υπερβολική εξασθένηση λόγω συντονισμού των μορίων στον αέρα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά ατμοσφαιρικά παράθυρα, π.χ. 140, 220, 340GHz όπου η εξασθένηση λόγω συντονισμού μορίων είναι μόλις περίπου 2 dB / km, αμελητέα σε σύγκριση με την εξασθένηση του ελεύθερου χώρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν η συχνότητα υπερβαίνει το 1 THz, το ασύρματο κύμα υφίσταται σημαντική απορρόφηση από ατμούς νερού και οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και μπορεί να εξασθενήσει δέκα φορές σε απόσταση διάδοσης 1 m.
- (4) Ευαισθησία σε σκιές και αποκλεισμό λόγω της ήπιας διάθλασης σε τόσο μικρό μήκος κύματος. Για παράδειγμα, η εξασθένηση σήματος του τούβλου είναι τόσο υψηλή όσο 40-80 dB και το ανθρώπινο σώμα μπορεί να προκαλέσει εξασθένηση σήματος 20-35 dB.
- (5) Λιγότερη ευαισθησία στην υγρασία / βροχόπτωση, π.χ., η εξασθένηση γίνεται σχετικά επίπεδη πάνω από τα 100 GHz. 6) εξαιρετικά γρήγορη διακύμανση καναλιών και διακοπτόμενη σύνδεση, π.χ. ο χρόνος συσχέτισης της ζώνης terahertz είναι πολύ σύντομος και η συχνότητα Doppler είναι πολύ μεγάλη.
- (7) Ευρεία χρήση πολύ κατευθυντικών κεραιών ( $\sim 25$  dBi).
- (8) Εξαιρετικά υψηλή στιγμιαία ισχύς επεξεργασίας. Μία σημαντική πρόκληση στη χρήση πολύ μεγάλων κεραιών είναι η κατανάλωση ισχύος της μετατροπής συστή-

ματος ευρείας ζώνης terahertz (A/D). Η κατανάλωση ενέργειας είναι γενικά ανάλογη με το ρυθμό δειγματοληψίας και αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό δειγματοληψίας ανά bit.

Ωστόσο, η κατασκευή των εξαρτημάτων THz έχει γίνει πιο ώριμη και ορισμένα εμπορικά προϊόντα είναι σε θέση να εκπέμπουν ισχύ 0 - 10 dBm στα 300 GHz. Αναμένεται ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη ισχύς εξόδου στο εγγύς μέλλον. Επιπλέον, τα απλά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ. BPSK, QPSK) θα ήταν επαρκή για υψηλές ταχύτητες δεδομένων (> 100 GBit / s), δεδομένων των τεράστιων εύρους ζώνης των ταινιών THz τουλάχιστον στο πρώτο στάδιο [29]. Ως εκ τούτου, οι επικοινωνίες terahertz έχουν την ευκαιρία να εφαρμοστούν στην εποχή 6G και μπορούμε να προσβλέπουμε στην περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων με ορισμένες βασικές τεχνολογικές καινοτομίες.

Τα σενάρια επικοινωνίας terahertz μπορούν να ταξινομηθούν κυρίως σε: δίκτυα μακρο-, μικρο- και νανο-κλίμακας. Τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές στις οποίες το εύρος μετάδοσης κυμαίνεται από περίπου 10 μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα. Τα δίκτυα μικρής κλίμακας είναι συνήθως για τις εφαρμογές με περιορισμένο εύρος μετάδοσης (λιγότερο από λίγα μέτρα, π.χ.  $\leq 10\text{m}$ ). Τα δίκτυα νανο-κλίμακας είναι πιο κατάλληλα για τις επικοινωνίες σε απόσταση μικρότερη από 1 μέτρο ή εκατοστά. Τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας προορίζονται κυρίως για υπαίθρια σενάρια και οι τυπικές εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν τη σύνδεση φορητού, backhaul / fronthaul και ούτω καθεξής. Αυτές οι εφαρμογές θα απαιτούν ευρύτερη κάλυψη (π.χ., 10 m έως λίγα χιλιόμετρα) και υψηλή απόδοση (έως 1 Tbps) με χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση (π.χ.  $< 1\text{ ms}$ ).

Όσον αφορά τα δίκτυα μικρής κλίμακας, μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε σενάρια εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Για εσωτερικά σενάρια, μπορούν να υποστηρίξουν τις εφαρμογές που απαιτούν κινητικότητα καθώς και εφαρμογές με σταθερές συνδέσεις σημείων ή πολλαπλών σημείων, όπως εσωτερικά μικρά κελιά, WPAN (Wireless Personal Area Network), ασύρματες συνδέσεις σε Data Centers και Near-Field Επικοινωνίες (NFC). Ενώ για υπαίθρια σενάρια, οι εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν οχήματα, μικρά κελιά και σύνδεση backhaul. Και οι εξωτερικές εφαρμογές είναι διαφορετικές από το εσωτερικό περιβάλλον, γεγονός που οφείλεται



σε μεγάλο βαθμό σε φαινόμενα αντανάκλασεων και σκέδασης με απώλεια διαδρομής και απορρόφησης. Επομένως, αυτά τα σενάρια εσωτερικού και εξωτερικού χώρου απαιτούν διαφορετικά μοντέλα διάδοσης, αντίστοιχα, για να αντιπροσωπεύουν διαφορετικά εμπόδια, σκέδαση και ατμοσφαιρικές απώλειες [30].

Το δίκτυο νανο-κλίμακας είναι μια ολοκαίνουργια τοπολογία δικτύου κατάλληλη για εξαιρετικά σύντομο μήκος κύματος. Σε δίκτυο νανο-κλίμακας, η επικοινωνία είναι συνήθως για την απόσταση που κυμαίνεται από 1 μέτρο ή εκατοστά (π.χ. συνδέσεις μεταξύ μικροσκοπικών συσκευών, συνδέσεις on-chip και chip-to-chip, επικοινωνίες εντός σώματος). Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν το νέο σχεδιασμό πομποδέκτη για συσκευές νανο-κλίμακας, μοντέλα καναλιών για τα νέα περιβάλλοντα δικτύων νανο-κλίμακας, λύσεις φυσικών επιπέδων, συμπεριλαμβανομένων των σχημάτων κωδικοποίησης καναλιών και διαμόρφωσης, και πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

Εκτός από τα παραπάνω τρία επίγεια σενάρια, οι επικοινωνίες στο διάστημα είναι επίσης σημαντικά σενάρια επικοινωνιών terahertz, τα οποία έχουν εφαρμοστεί εδώ και πολλά χρόνια στον τομέα της διαστημικής επιστήμης. Στον εξωτερικό χώρο, το κύμα terahertz έχει σχετικά διαφανή ατμοσφαιρικά παράθυρα, όπως τα 350, 450, 620, 735 και 870 microns. Η μετάδοση θα είχε μικρή απορρόφηση από την υγρασία, έτσι ώστε η επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων να είναι εφικτή στο terahertz. Αν και η τεχνολογία επικοινωνίας terahertz εξελίσσεται ταχύτατα στους τομείς των αρχιτεκτονικών πομποδέκτη, των υλικών, του σχεδιασμού της κεραίας, της μέτρησης της διάδοσης, της μοντελοποίησης καναλιών και των τεχνικών φυσικής στρώσης, υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν οι συνδέσεις Tbps καταστούν πρακτικές [31].

#### 4.5.4. Πιθανές τεχνολογίες με μεγαλύτερη ωριμότητα

Ως θεμελιώδεις τεχνολογίες φυσικού στρώματος, η κωδικοποίηση και η διαμόρφωση του καναλιού παρέχουν αποτελεσματικούς τρόπους για να λειτουργήσει μια ασύρματη ζεύξη κοντά στην χωρητικότητα του καναλιού, ενώ ταυτόχρονα καθιστά τις κυματομορφές του σήματος φιλικές προς τα εξαρτήματα RF και της βασικής ζώνης σε πομπούς ή/και δέκτες. Από το 2G, σχεδόν κάθε γενιά σημειώνεται ή κυριαρχείται από ένα νέο σχήμα κωδικοποίησης καναλιών, για παράδειγμα, συνελκτικοί

κώδικες σε 2G, Turbo κωδικούς σε 3G, ενισχυμένους κωδικούς Turbo σε 4G, κώδικες LDPC και Polar code για 5G. Με την γενική έννοια, η κωδικοποίηση και η διαμόρφωση του καναλιού περιλαμβάνουν πολλά ειδικά πεδία που μπορεί να αγγίζουν κυματομορφή ή ακόμα και πολλαπλή πρόσβαση.

Τα μαθηματικά εργαλεία είναι επίσης πολύ διαφορετικά, για παράδειγμα, η συνδυαστική άλγεβρα και η θεωρία αριθμών για την κωδικοποίηση καναλιών, η γραμμική άλγεβρα για την κυματομορφή, η θεωρία ανίχνευσης για τη διαμόρφωση κ.ο.κ. Παραδοσιακά, ο σχεδιασμός κωδικοποίησης καναλιού προϋποθέτει απλή σύνδεση ενός συνδέσμου, του οποίου ο δίαυλος μπορεί να είναι δυαδικός συμμετρικός, δυαδική διαγραφή, πρόσθετος Gaussian θόρυβος (AWGN), κλπ. Ο στόχος επιδόσεων είναι το όριο Shannon Limit<sup>14</sup> για ένα κανάλι ζεύξης. Αυτός ο σχεδιασμός έχει νόημα σε πολλά κινητά συστήματα από το 2G, αφού τα πρωτεύοντα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης είναι ορθογώνια όπου διαφορετικοί χρήστες (εξυπηρετούμενοι τουλάχιστον από τον ίδιο σταθμό βάσης) καταλαμβάνουν διαφορετικούς πόρους χρονικής συχνότητας ή σε μη επικαλυπτόμενους χωρικούς τομείς [32].

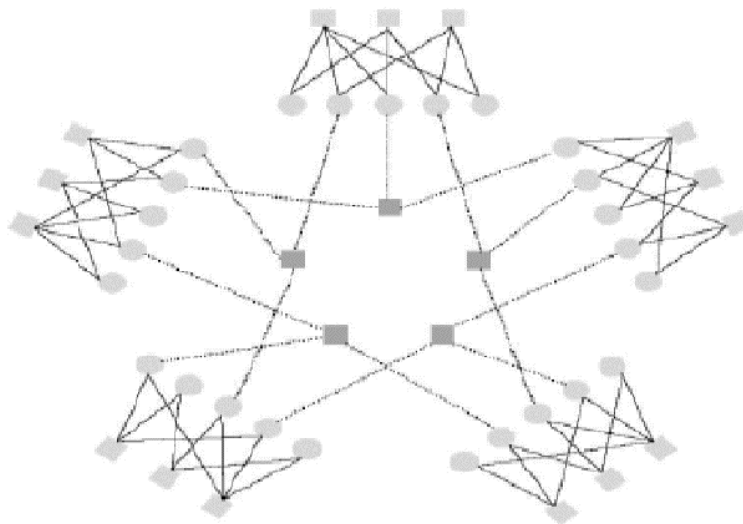
Ωστόσο, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του συστήματος και να εξυπηρετηθεί περισσότερος αριθμός συνδέσεων, η μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα στην ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση. Αυτό ανοίγει μια εντελώς νέα περιοχή: την κωδικοποίηση καναλιών προσανατολισμένη σε πολλούς χρήστες, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημαντικά βελτιωμένη έκδοση της πολλαπλής πρόσβασης διαχωρισμού (IDMA). Είναι καινούργιο επίσης υπό την έννοια ότι η χωρητικότητα του καναλιού του καναλιού πολλαπλών χρηστών δεν είναι πλήρως γνωστή ή αποδεδειγμένη. Θεωρητικά, οποιοσδήποτε κώδικας καναλιού μπορεί να θεωρηθεί με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού πολλαπλών χρηστών, εφόσον ο ίδιος ο κώδικας μπορεί να παρέχει αρκετό περιθώριο για βελτιστοποίηση, π.χ. από ένα χρήστη σε έναν πολλαπλό χρήστη όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8. Πρόσφατα, προτεινόταν κωδικοί LDPC πολλαπλών χρηστών για μη ορθογώνια μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης. Οι λόγοι για την εξέταση των κωδικών LDPC είναι οι ακόλουθοι [32].

---

<sup>14</sup> Είναι ο μέγιστος ρυθμός αποστολής δεδομένων μέσω ενός καναλιού με δεδομένο εύρος ζώνης και δεδομένο επίπεδο θορύβου. Εάν υπερβεί κανείς τη χωρητικότητα του καναλιού, μπορεί να αναμένει κάποια απώλεια δεδομένων.

a) Πρώτον, ο κυκλικός δυαδικός χαμηλής πυκνότητας LDPC (low-density parity-check) έχει ήδη οριστεί στο 5G ως το σχήμα κωδικοποίησης καναλιών για κανάλια δεδομένων. Η υπεροχή της απόδοσης και η χαμηλή πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης αποδεικνύονται καλά για τα μεσαία και μεγάλα κωδικοποιημένα μπλοκ, σε σύγκριση με άλλα μεγάλα κανάλια κωδικοποίησης καναλιών. Για το κανάλι πολλαπλών χρηστών, η πολυπλοκότητα του δέκτη είναι γενικά υψηλότερη από αυτή του ενός χρήστη. Έτσι, οι κωδικοί με χαμηλή πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης θα ήταν πολύ ελκυστικοί.

b) Δεύτερον, το LDPC έχει πολλές ευελιξίες σχεδιασμού, ειδικότερα, το πρότυπο για τον έλεγχο ισοτιμίας, την ανύψωση μήτρας και τις μετατοπίσεις. Με σωστές επιλογές αυτών των παραμέτρων, το δυαδικό LDPC έχει μεγάλη δυνατότητα να προσφέρει πλεονεκτήματα απόδοσης για το κανάλι πολλαπλών χρηστών [33].



Εικόνα 8: Διπλή δομή για LDPC για πολλούς χρήστες [33]

Σε προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών, τα περισσότερα προγράμματα κωδικοποίησης καναλιών σε φυσικό επίπεδο λειτουργούν σε δυαδικό τομέα. Προκειμένου να αυξηθεί η ευρωστία των καναλιών αναφορικά με την εξασθένιση και να λειτουργούν σε πολύ υψηλά σενάρια σήματος προς θόρυβο (SNR), μπορούν να ληφθούν υπόψη μη διμερείς κώδικες (επίσης αποκαλούμενοι πολυπαραλλαγές). Δύο τύποι κωδικών πολλαπλών παραλλαγών είναι ήδη εμφανείς. Η πρώτη είναι πολυπαραλλαγή LDPC που προτείνεται από τους Davey και MacKay [34]. Τέτοιοι κώδικες ορίζονται στο πεδίο Galois  $GF(q)$ . Ο βασικός σχεδιασμός του πολυπαραλλαγμένου

LDPC μοιάζει με αυτόν του δυαδικού LDPC, π.χ. η μήτρα ισοτιμίας μπορεί να κατασκευαστεί τυχαία ή να ακολουθήσει ένα καθορισμένο μοτίβο ως αλγόριθμο βασικής αποκωδικοποίησης. Η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και η πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης είναι γενικά υψηλότερες από αυτή του δυαδικού LDPC.

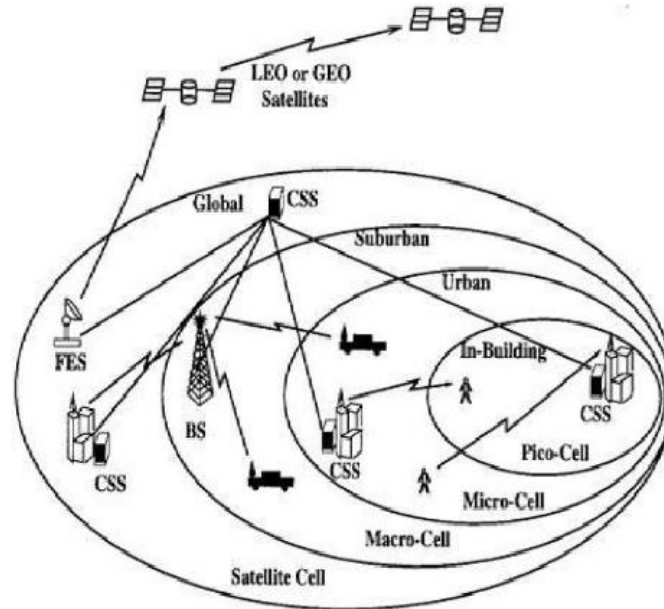
Ο δεύτερος τύπος κώδικα είναι ο κώδικας πλέγματος [35]. Μια πολύ ελπιδοφόρα παραλλαγή του είναι ο κώδικας πλέγματος χαμηλής πυκνότητας (LDLC) ο οποίος μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί ως πίνακας Tanner και πίνακα ελέγχου ισοτιμίας. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος διάδοσης πεποιθήσεων, του οποίου η πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης αναπτύσσεται μόνο γραμμικά με το μήκος του μπλοκ κώδικα. Οι περισσότεροι κωδικοί καναλιών σχεδιάζονται με περιορισμένες επιλογές ρυθμού κωδικοποίησης, όπου η απόδοση των κωδικών μπορεί να βελτιστοποιηθεί για συγκεκριμένους ρυθμούς κωδικών. Ενώ μπορεί να υποστηρίξει πολλούς ρυθμούς κωδικοποίησης, η κυκλική LDPC για το δίκτυο 5G εξακολουθεί να μην είναι μηδενική.

#### 4.6 Προτεινόμενο Σύστημα Τεχνολογίας 6G

Η αρχιτεκτονική του συστήματος 6G χρησιμοποιείται για την επίτευξη της παγκόσμιας κάλυψης του δικτύου που ενσωματώνει το ασύρματο δίκτυο 5G καθώς και το δορυφορικό δίκτυο. Το δορυφορικό δίκτυο καθώς και το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο παραμένουν πολύ χρήσιμα για τους χρήστες κινητών δικτύων προκειμένου να διεκπεραιώσουν τη διαδικασία φωνητικών κλήσεων και τηλεοπτικών εκπομπών. Το κυψελοειδές σύστημα θεωρείται ως ένα φορητό σύστημα τελευταίας τεχνολογίας για την εκκίνηση αμφίδρομης ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του σταθερού μέρους του συστήματος (πομπός ή σταθμός βάσης) και του κινητού μέρους του συστήματος (φορητός σταθμός) που κινείται στην περιοχή που καλύπτεται από κάθε σταθμό βάσης.

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα, ολόκληρη η περιοχή κάλυψης του δικτύου χωρίζεται σε κελιά και κάθε κελί εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, που ακολουθεί, όπου κάθε κυψέλη έχει μέγεθος ανάλογα με τον αριθμό των χρηστών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των χρηστών τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος του κελιού. Οι περιοχές που δεν καλύπτονται από την κυψελοειδή επι-

κοινωνία, όπως είναι το GSM και το AMPPS, μπορούν να καλυφθούν με τη χρήση δορυφορικού συστήματος για την παροχή παγκόσμιων τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας.



Εικόνα 9: 6G με δορυφορικό δίκτυο [34]

#### 4.6.1 Προδιαγραφές δικτύωσης 6G;

Οι προδιαγραφές 5G είναι αρκετά ικανοποιητικές για ατομικές ανάγκες. Έτσι πολύ λίγα άτομα θα ενδιαφέρονταν για το 6G. Υπάρχουν ειδικές ομάδες συμφερόντων που θέλουν την επόμενη γενιά κινητής. Πρώτα απ' όλα, οι πωλητές τηλεπικοινωνιών είναι αυτοί που επωφελούνται περισσότερο από τις νέες γενιές κινητής. Είναι οι ειδικοί που σχεδιάζουν και αναπτύσσουν τα δίκτυα για τις νέες γενιές. Χωρίς νέες γενιές κινητής, οι επιχειρήσεις τους δεν αναπτύσσονται γρήγορα. Επομένως, είναι πάντα μια καλή κατάσταση για τους πωλητές τηλεπικοινωνιών να αναπτύξουν μια νέα τεχνολογία. Οι νέες τεχνολογίες προσφέρονται με νέες τεχνικές και εξοπλισμό, οι οποίες αποτελούν την άμεση πηγή εσόδων για αυτούς.

Οι επόμενοι ευνοημένοι είναι οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς. Οι φορείς εκμετάλλευσης κερδίζουν χρήματα από τις υπηρεσίες τους. Οι νέες γενιές έρχονται με νέες υπηρεσίες και ως εκ τούτου νέες πηγές εισοδήματος για αυτούς. Φυσικά, είναι αλήθεια ότι μερικές από τις παλιές υπηρεσίες είναι επίσης παρωχημένες ή δεν παράγουν

έσοδα. Ωστόσο, στην ανταγωνιστική επιχειρηματική αρένα, οι φορείς εκμετάλλευσης θέλουν να νικήσουν τους αντιπάλους τους μέσω προηγμένων τεχνολογιών. Οι κυβερνήσεις θέλουν επίσης νέες τεχνολογίες για να κερδίσουν νέους φόρους και έσοδα.

Η πολυπλοκότητα των τεχνολογιών επικοινωνίας 6G και της ανάπτυξης δικτύων πιθανότατα θα αποτρέψει τις βελτιστοποιήσεις κλειστής μορφής. Ενώ οι έξυπνες τεχνικές σε κυψελοειδή δίκτυα συζητούνται ήδη για το 5G, αναμένουμε ότι οι εφαρμογές των 6G θα είναι πολύ πιο πυκνές (από την άποψη του αριθμού των σημείων πρόσβασης και των χρηστών), περισσότερο ετερογενείς (όσον αφορά την ενσωμάτωση διαφορετικών τεχνολογιών και χαρακτηριστικών εφαρμογής) και με αυστηρότερες απαιτήσεις απόδοσης σε σχέση με το 5G. Επομένως, η νοημοσύνη θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο δίκτυο, υπερβαίνοντας τα καθήκοντα ταξινόμησης και πρόβλεψης που εξετάζονται για τα συστήματα 5G. Ειδικότερα, η έρευνα 6G θα προσανατολιστεί προς τις ακόλουθες πτυχές:

- *Τεχνικές εκμάθησης για την επιλογή δεδομένων και την εξαγωγή χαρακτηριστικών:* Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που παράγονται από μελλοντικές συνδεδεμένες συσκευές (π.χ. αισθητήρες σε αυτόνομα οχήματα) θα ασκήσει πίεση στις τεχνολογίες επικοινωνιών, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να εγγυηθούν την απαιτούμενη ποιότητα εξυπηρέτησης. Επομένως, είναι θεμελιώδες να γίνεται διάκριση της αξίας των πληροφοριών για τη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας για τους τελικούς χρήστες με (περιορισμένους) πόρους δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο, οι στρατηγικές μηχανικής μάθησης (ML – Machine Learning) μπορούν να αξιολογήσουν το βαθμό συσχέτισης στις παρατηρήσεις ή να εξάγουν χαρακτηριστικά από τους φορείς εισόδου και να προβλέψουν την εκ' των υστέρων πιθανότητα μιας ακολουθίας δεδομένου του συνόλου του ιστορικού. Στη δικτύωση 6G, οι προσεγγίσεις μάθησης χωρίς επίβλεψη και ενίσχυση, επιπλέον, δεν χρειάζονται επισήμανση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λειτουργήσουν το δίκτυο με έναν πραγματικά αυτόνομο τρόπο.
- *Διαμοιρασμός γνώσεων μεταξύ χρηστών.* Η κοινή χρήση ασύρματων συχνοτήτων και υποδομών είναι ωφέλιμη για τα κυψελοειδή δίκτυα, προκειμένου να μεγιστοποιηθούν οι δυνατότητες πολυπλεξίας. Με δίκτυα που βασίζονται στην εκμάθηση, οι φορείς εκμετάλλευσης και οι χρήστες μπορούν επίσης να μοιράζονται αναπαραγόμενες/επεξεργασμένες αναπαραστάσεις συγκεκριμένων αναπτύξεων δικτύου ή/και πε-

ριπτώσεων χρήσης, για παράδειγμα, για να επιταχύνουν τη διαμόρφωση του δικτύου σε νέες αγορές ή να προσαρμοστούν καλύτερα σε νέα μη αναμενόμενα λειτουργικά σενάρια. Οι συμφωνίες καθυστέρησης, κατανάλωσης ρεύματος, επιβάρυνσης του συστήματος και κόστους θα μελετηθούν στη δικτύωση 6G, τόσο για τις λύσεις που είναι on – board όσο και για αυτές που υποστηρίζονται από το Υπολογιστικό Νέφος.

- *Αρχιτεκτονική δικτύου με επίκεντρο τον χρήστη.* Τα δίκτυα με γνώμονα τη μηχανική μάθηση βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, αλλά θα αποτελέσουν θεμελιώδη συνιστώσα σύνθετων συστημάτων 6G, τα οποία προβλέπουν την κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη, για την υλοποίηση μιας αρχιτεκτονικής δικτύου που θα είναι πλήρως προσανατολισμένη στον χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, οι τερματικοί σταθμοί θα μπορούν να λαμβάνουν αυτόνομες αποφάσεις δικτύου με βάση τα αποτελέσματα προηγούμενων λειτουργιών, χωρίς γενικά έξοδα επικοινωνίας προς και από τους κεντρικούς ελεγκτές. Οι κατανεμημένες μέθοδοι μπορούν να επεξεργάζονται αλγόριθμους μηχανικής μάθησης σε πραγματικό χρόνο.

#### 4.6.2 Χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη 6G

Το χρονοδιάγραμμα για το 6G αναμένεται να ακολουθήσει τα προηγούμενα πρότυπα χρονικών ορίων των προηγούμενων γενεών. Παρατηρήθηκε ένα χρονικό χάσμα περίπου 10 ετών μεταξύ δύο γενεών κινητής ξεκινώντας από 2G έως 5G. Ένα παρόμοιο χρονικό χάσμα αναμένεται να φτάσει και για μια προκαταρκτική έκδοση του 6G. Όπως αναμενόταν, το 5G δεν θα μεταφερθεί σε όλο τον κόσμο το 2020, αλλά μόνο μερικές πόλεις σε όλο τον κόσμο θα το έχουν. Γύρω στο έτος 2025, η τεχνολογία 5G θα αναπτυχθεί σε ολόκληρο τον κόσμο και μάλιστα η ανάπτυξη σε αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών, μπορεί να διαρκέσει ακόμη περισσότερο.

Αυτή η σταδιακή διαδικασία καινοτομίας θα έθετε την τεχνολογία 6G έτοιμη για ανάπτυξη γύρω στο 2030. Όπως συνέβη και με τις άλλες γενιές, η ευρεία ανάπτυξη των 6G δεν θα συμβεί αμέσως. Αντίθετα, θα υιοθετηθεί αργά. Δεν μπορεί να αποτελέσει έλξη για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες τη δεκαετία του 2030, καθώς η ίδια η 5G θα είναι πολύ προχωρημένη για αυτούς. Οι ατομικές απαιτήσεις επικοινωνίας μπορούν να ικανοποιηθούν εύκολα με τις προδιαγραφές 5G. Έτσι, το 6G και οι επακόλουθες εκδόσεις του ενδέχεται να παραμείνουν περιορισμένες μόνο στις εφαρμογές

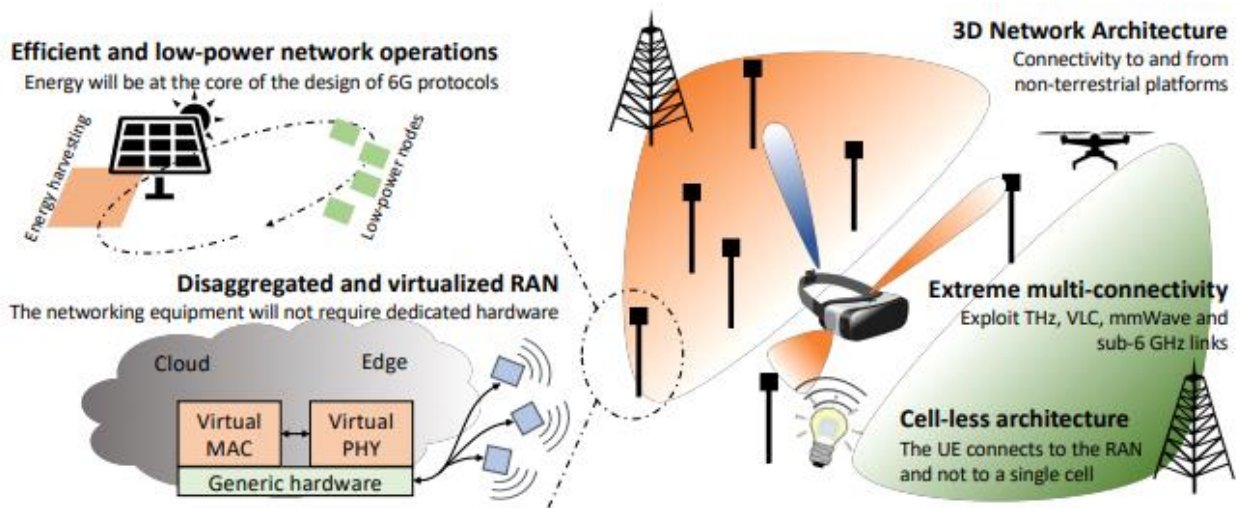
επιχειρηματικών εφαρμογών και υψηλής απόδοσης.

Είναι πολύ δύσκολο να προβλέψουμε πώς μια προηγμένη τεχνολογία θα επηρεάσει την κοινωνία. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, παρατηρήσαμε πολλές διαταραχές μέσω των κινητών τεχνολογιών. Παρόμοιες διαταραχές είναι εξίσου δυνατές μέσω του 6G. Ωστόσο, το 5G είναι πιθανό να κάνει πολλές αλλαγές στην κοινωνία. Επομένως, η άφιξη του 6G δεν μπορεί να αποτελεί έκπληξη για πολλές κοινωνικές δραστηριότητες. Η Τεχνητή Νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση θα παίξουν μερικούς ρόλους στο 5G. Ωστόσο, αυτό δεν θα είναι πολύ ώριμο σε μια μόνο δεκαετία. Ως εκ τούτου, το 6G θεωρείται ως η πραγματική κινητή γενιά Τεχνητής Νοημοσύνης. Μεγάλης κλίμακας δορυφορική και κινητή σύζευξη είναι μια προσδοκία στο 6G. Μπορεί να ενισχύσει τις επιδόσεις επικοινωνίας στους ωκεανούς και στις πτήσεις. Η δορυφορική σύζευξη με την κινητή υποδομή δεν είναι αυτή τη στιγμή ιδιαίτερα εφικτή. Μπορεί να ξεκινήσει στο καθεστώς 5G. Ωστόσο, αναμένεται ότι μόνο στη 6G, δορυφορική και κινητή υποδομή θα είναι πολύ συμβατή. Μέσω δορυφορικής σύζευξης θα είναι δυνατή η πραγματική πανταχού παρούσας επικοινωνίας. Τα δίκτυα IoT θα λάβουν επίσης ώθηση μέσω της δορυφορικής σύνδεσης. Η τεχνολογία 6G είναι ίσως η σωστή φορητή τεχνολογία για να φέρει όλες αυτές τις νέες εφαρμογές και δυνατότητες.

#### 4.6.3 Αρχιτεκτονική 6G

Η πυκνότητα και ο υψηλός ρυθμός πρόσβασης των επικοινωνιών Terahertz θα αυξήσουν τις απαιτήσεις χωρητικότητας στο υποκείμενο δίκτυο μεταφορών, το οποίο πρέπει να προσφέρει και περισσότερα σημεία πρόσβασης σε ίνες και μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα σημερινά δίκτυα backhaul. Επιπλέον, το ευρύ φάσμα διαφορετικών διαθέσιμων τεχνολογιών επικοινωνίας θα αυξήσει την ετερογένεια του δικτύου, το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί. Οι κύριες αρχιτεκτονικές καινοτομίες που θα εισαγάγει η 6G περιγράφονται στην Εικόνα 10, που ακολουθεί.





Εικόνα 10: Αρχιτεκτονικές καινοτομίες που εισήχθησαν στα δίκτυα 6G [39]

Στο πλαίσιο αυτό, οραματιζόμαστε την εισαγωγή ή/και την ανάπτυξη των ακόλουθων παραδειγμάτων [39]:

- Στενή ολοκλήρωση πολλαπλών συχνοτήτων και τεχνολογιών επικοινωνίας και αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες:* Οι συσκευές 6G θα υποστηρίζουν μια σειρά από ετερογενή ασύρματα δίκτυα στις συσκευές. Αυτό επιτρέπει πολλαπλές τεχνικές συνδεσιμότητας που μπορούν να επεκτείνουν τα σημερινά όρια των κυψελών, με χρήστες συνδεδεμένους στο δίκτυο ως σύνολο (δηλαδή μέσω πολλαπλών συμπληρωματικών τεχνολογιών) και όχι σε ένα μόνο κελί. Οι διαδικασίες δικτύου χωρίς κυψέλες εγγυώνται μια απρόσκοπτη υποστήριξη κινητικότητας, χωρίς επιβαρύνσεις λόγω υποκλοπών (οι οποίες ενδέχεται να είναι συχνές κατά την εξέταση συστημάτων σε συχνότητες Terahertz) και θα παρέχουν εγγυήσεις QoS που είναι σύμφωνες με τις πιο απαιτητικές απαιτήσεις κινητικότητας που προβλέπονται για το 6G, όπως στα σενάρια των οχημάτων. Οι συσκευές θα μπορούν να μετακινούνται άψογα μεταξύ διαφορετικών ετερογενών συνδέσεων (π.χ., sub6 GHz, mmWave, Terahertz ή VLC<sup>15</sup>) χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση ή διαμόρφωση. Τέλος, σύμφωνα με την περίπτωση ειδικής χρήσης, ο χρήστης μπορεί επίσης να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα διαφορετικές διασυνδέσεις δικτύου για να εκμεταλ-

<sup>15</sup> Για την επίλυση του συνωστισμένου φάσματος ασύρματων συχνοτήτων των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών, η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC), η οποία χρησιμοποιεί ένα τεράστιο ανεξέλεγκτο και ελεύθερο φάσμα φωτός, έχει εξελιχθεί ως βιώσιμη λύση. Ωστόσο, η αμφίδρομη επικοινωνία, η κινητικότητα των χρηστών, οι μηχανισμοί πρόσβασης και μετάδοσης για πολλούς χρήστες καθίστανται δύσκολοι στόχοι στο δίκτυο VLC (Visible Light Communications).

λευθεί τα συμπληρωματικά χαρακτηριστικά τους, π.χ. το επίπεδο υπο-6 GHz για έλεγχο και μια σύνδεση Terahertz για το επίπεδο δεδομένων.

- *3D αρχιτεκτονική δικτύου:* Τα δίκτυα 5G (και οι προηγούμενες γενιές) σχεδιάστηκαν για να παρέχουν συνδεσιμότητα για έναν ουσιαστικά δισδιάστατο χώρο, δηλαδή αναπτύσσονται σημεία πρόσβασης δικτύου για να προσφέρουν συνδεσιμότητα σε συσκευές στο έδαφος. Αντίθετα, προβλέπουμε μελλοντικές ετερογενείς αρχιτεκτονικές 6G για την παροχή τρισδιάστατης (3D) κάλυψης, συμπληρώνοντας έτσι τις επίγειες υποδομές με μη επίγειες πλατφόρμες (π.χ. drones και δορυφόρους). Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν να αναπτυχθούν γρήγορα για να εξασφαλιστεί η συνεχής και αξιόπιστη εξυπηρέτηση, π.χ. σε αγροτικές περιοχές ή σε περιόδους γεγονότων, αποφεύγοντας το λειτουργικό και διοικητικό κόστος των σταθερών υποδομών. Παρά τις πολλά υποσχόμενες ευκαιρίες, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν πριν οι πλωτές πλατφόρμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε ασύρματα δίκτυα, π.χ. μοντέλο καναλιού αέρα-εδάφους, βελτιστοποίηση τοπολογίας και τροχιάς, διαχείριση πόρων και αποδοτικότητα ενέργειας.
- *Διαχωρισμός και εικονικοποίηση του εξοπλισμού δικτύωσης:* Παρόλο που τα δίκτυα έχουν ξεκινήσει πρόσφατα τη μετάβαση προς τον διαχωρισμό εξοπλισμού μονολιθικής δικτύωσης, το 3GPP δεν καθορίζει απευθείας τον τρόπο εισαγωγής των εννοιών εικονικοποίησης. Επιπλέον, οι τρέχουσες μελέτες 5G δεν έχουν ακόμη αντιμετωπίσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με το σχεδιασμό αναλυτικών αρχιτεκτονικών που μπορούν να λειτουργήσουν υπό την υψηλότερη καθυστέρηση ελέγχου που θα μπορούσε να εισαχθεί από τη συγκέντρωση και την ασφάλεια εικονικών λειτουργιών δικτύου που θα μπορούσαν να υποβληθούν σε επιθέσεις στον κυβερνοχώρο. Η 6G δικτύωση θα επιφέρει διαχωρισμούς με εικονικοποίηση των επιπέδων ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC - Medium Access Control) και του φυσικού (PHY - Physical), τα οποία επί του παρόντος απαιτούν εξειδικευμένες υλοποιήσεις υλικού και πραγματοποιούν χαμηλού κόστους κατανεμημένες πλατφόρμες μόνο με τις κεραιές και ελάχιστη επεξεργασία. Αυτό θα μειώσει το κόστος του εξοπλισμού δικτύωσης, καθιστώντας μια μαζικά πυκνή ανάπτυξη οικονομικά εφικτή.

- *Προηγμένη ολοκλήρωση πρόσβασης-backhaul.* Οι μαζικοί ρυθμοί δεδομένων των νέων τεχνολογιών πρόσβασης 6G απαιτούν επαρκή αύξηση της χωρητικότητας του backhaul. Επιπλέον, οι εφαρμογές Terahertz και VLC θα αυξήσουν την πυκνότητα των σημείων πρόσβασης, τα οποία χρειάζονται σύνδεση backhaul με τους γείτονές τους και το κεντρικό δίκτυο. Η τεράστια χωρητικότητα των τεχνολογιών 6G μπορεί έτσι να αξιοποιηθεί για λύσεις αυτοεξυπηρέτησης, όπου τα ραδιόφωνα στους σταθμούς βάσης παρέχουν τόσο πρόσβαση όσο και πίσω. Παρόλο που μια παρόμοια επιλογή εξετάζεται ήδη για το 5G, η κλίμακα των 6G αναπτύξεων θα εισαγάγει νέες προκλήσεις και ευκαιρίες, π.χ., καθώς τα δίκτυα θα χρειάζονται υψηλότερες αυτόνομες δυνατότητες διαμόρφωσης.
- *Στρατηγικές συγκομιδής ενέργειας για λειτουργίες δικτύων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.* Η ενσωμάτωση των μηχανισμών εξοικονόμησης ενέργειας στις υποδομές 5G αντιμετωπίζει επί του παρόντος πολλά ζητήματα, συμπεριλαμβανομένης της συνύπαρξης με τις επικοινωνίες, και της απώλειας απόδοσης κατά τη μετατροπή των συλλεχθέντων σημάτων στο ηλεκτρικό ρεύμα. Δεδομένης της αναμενόμενης κλίμακας στα δίκτυα 6G, είναι απαραίτητο να σχεδιάσουμε συστήματα όπου το κύκλωμα και η στοίβα επικοινωνίας αναπτύσσονται με γνώση της ενέργειας [40]. Μια επιλογή χρησιμοποιεί κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας για να επιτρέψει στις συσκευές να είναι αυτοτροφοδοτούμενες, η οποία θα μπορούσε να είναι κρίσιμη για την εκτέλεση εργασιών εκτός δικτύου, μεγάλης διάρκειας συσκευές IoT και αισθητήρων ή μεγάλα διαστήματα αναμονής για συσκευές και εξοπλισμό που χρησιμοποιούνται σπάνια.

#### 4.6.4 Προώθηση μιας νέας κινητής γενιάς

Από τη δεκαετία του 1980, παρατηρείται μια ώθηση στην καινοτομία των ΤΠΕ για την προώθηση μιας νέας κινητής γενιάς κάθε δεκαετία. Είναι πλέον σαφές ότι το 5G θα κυκλοφορήσει σε αρκετές πόλεις γύρω από τον κόσμο το 2020. Μέχρι το 2025, αυτή η τεχνολογία θα είναι ώριμη και σχεδόν κάθε χώρα του κόσμου θα τη χρησιμοποιήσει. Με βάση αυτές τις παρατηρούμενες τάσεις, αναμένουμε την άφιξη του 6G στις αρχές της δεκαετίας του 2030 ή λίγο πριν από το 2030, όπως φαίνεται στο χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης. Ωστόσο, η ώθηση αυτή μπορεί να μην είναι τόσο έντονη όσο

βρήκαμε στις προηγούμενες περιπτώσεις 3G, 4G και 5G. Αυτό οφείλεται κυρίως στην πρόοδο που επιτεύχθηκε στο 5G. Μπορούμε να το συγκρίνουμε με τις διαφορετικές γενιές επεξεργαστών υπολογιστών.

Αρχικά, όταν οι μικροεπεξεργαστές ήρθαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ήταν μια επανάσταση εντελώς. Η δεύτερη γενιά ήρθε στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ακολουθούμενη από την τρίτη γενιά στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Η τέταρτη γενιά των επεξεργαστών 32-bit στα τέλη της δεκαετίας του 1980 έφερε πολλή θετική αύρα στον κόσμο των υπολογιστών. Οι επεξεργαστές πέμπτης γενιάς Pentium έφθασαν στη δεκαετία του 1990, οι οποίοι άλλαξαν σε μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό παράδειγμα. Έκτοτε, οι επεξεργαστές ενημερώνονται για να γίνονται ταχύτεροι και καλύτεροι. Ακόμα και οι γενιές έχουν εξελιχθεί ως έκτη, έβδομη, όγδοη, και πέρα. Ωστόσο, η τρέλα, η αύρα και η δημοσιότητα δεν παρατηρούνται πλέον από την πέμπτη γενιά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ταχύτητα των επεξεργαστών που επιτεύχθηκε στην πέμπτη γενιά. Η ταχύτητα των επεξεργαστών από την πέμπτη γενιά είναι αρκετά καλή για την εκτέλεση των περισσότερων κοινών προσωπικών και επαγγελματικών εργασιών. Οι ταχύτεροι επεξεργαστές απαιτούνται μόνο για ειδικά έργα ή προηγμένες εφαρμογές πληροφορικής. Ως εκ τούτου, η τρέλα για τους ταχύτερα νέους επεξεργαστές δεν μοιάζει με αυτά που παρατηρήθηκαν στη δεκαετία του 1990.

Ένα παρόμοιο φαινόμενο κορεσμού αναμένεται να παρατηρηθεί στις κινητές γενιές. Μετά από 5G, οι συνηθισμένοι χρήστες δεν θα αναζητήσουν απεγνωσμένα ταχύτερα συστήματα επικοινωνίας. Ωστόσο, όπως και οι μικροεπεξεργαστές, μερικές ειδικές λειτουργίες επικοινωνίας μπορεί να χρειαστούν ταχύτητες και επιδόσεις υψηλότερες από αυτές του 5G. Αν και οι νέες κινητές τεχνολογίες αναπτύσσονται κάτω από την ιεραρχία των G, δεν θα τραβήξουν τη μεγάλη προσοχή από το κοινό. Ωστόσο, είναι πιθανό οι ΤΠΕ να αναπτυχθούν σε μια εντελώς νέα κατεύθυνση, η οποία θα είναι εξουσιοδοτημένη από την Τεχνητή Νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση.

Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι οι δυνατότητες υπολογισμού των συσκευών 6G θα ήταν καλύτερες από αυτές των 5G. Οι εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης θα βρίσκουν παραγωγική παρουσία στο 6G. Η ανάπτυξη του 6G θα ξεκινήσει γύρω στο 2030. Οι νέες διαστάσεις, όπως η κβαντική επικοινωνία και η δορυφορική ολοκλήρωση, αναμένεται να βρουν θέσεις στο πεδίο 6G. Η ώθηση στις

κινητές επικοινωνίες τελείωσε με τη γενιά 5G. Έτσι, η γενιά 6G, αλλά και άλλες μελλοντικές γενιές, δεν θα δημιουργήσουν τη μανία και τη δημοσιότητα όπως οι προηγούμενες εκδόσεις.

#### 4.7 Η επίδραση της τεχνολογίας 6G στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Σε αυτή την ενότητα, μελετάμε την επίδραση της τεχνολογίας 6G στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) που ενεργοποιείται από συμβιωτικές ραδιοφωνικές και δορυφορικές επικοινωνίες IoT. Συγκεκριμένα, η συμβατική ασύρματη μετάδοση μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών IoT που οδηγούν στις κυψελοειδείς επικοινωνίες και οι δορυφορικές επικοινωνίες IoT μπορούν να παρέχουν εκτεταμένη κάλυψη για συσκευές IoT [35]. Το 5G IoT θα αναπτυχθεί είτε σε εξουσιοδοτημένη ζώνη (π.χ. eMTC και NB-IoT) είτε σε μη εξουσιοδοτημένη ζώνη (π.χ. Sigfox και RoLa) Συγκεκριμένα, η αδειοδοτημένη ζώνη IoT εκχωρεί αποκλειστικές ζώνες συχνοτήτων (π.χ. ανανεωμένη ζώνη GSM) για την υποστήριξη μεταδόσεων δεδομένων μεταξύ συσκευών IoT και σημείων πρόσβασης (AP – Access Points).

Η μη εξουσιοδοτημένη ζώνη IoT πραγματοποιεί μεταδόσεις δεδομένων IoT με κοινή χρήση της μη εξουσιοδοτημένης ζώνης φάσματος (π.χ. ζώνη συχνοτήτων 2.4G) με άλλα συστήματα παλαιού τύπου. Λόγω της ανεπάρκειας του αδειοδοτημένου φάσματος και της πολύπλοκης παρέμβασης επιπλέον καναλιού στο μη εξουσιοδοτημένο φάσμα, ο αριθμός σύνδεσης των συσκευών IoT είναι αυστηρά περιορισμένος. Εναλλακτικά, η συμβατική ασύρματη μετάδοση επιτρέπει ταυτόχρονες κυψελοειδείς μεταδόσεις δεδομένων και μεταδόσεις δεδομένων IoT με την κατανομή του κυψελοειδούς φάσματος [36]. Συγκεκριμένα, η συμβατική ασύρματη μετάδοση ενσωματώνει την κυψελοειδή επικοινωνία και την επικοινωνία οπισθοδιασποράς (backscattering), που υποστηρίζουν τη μετάδοση κυψελοειδών δεδομένων και τη μετάδοση δεδομένων IoT αντίστοιχα. Η συμβατική ασύρματη μετάδοση έχει δύο κύρια πλεονεκτήματα έναντι του 5G IoT.

a) Πρώτον, η μετάδοση δεδομένων IoT κινείται πάνω στο υφιστάμενο κυψελοειδές ραδιοσήμα και ανακουφίζει τις απαιτήσεις του ειδικού πόρου φάσματος.

b) Δεύτερον, το κόστος των συσκευών IoT είναι χαμηλό, δεδομένου ότι η συμβατική ασύρματη μετάδοση δεν χρησιμοποιεί ενεργά στοιχεία ασύρματων συχνοτήτων (RF) στον πομπό του IoT.

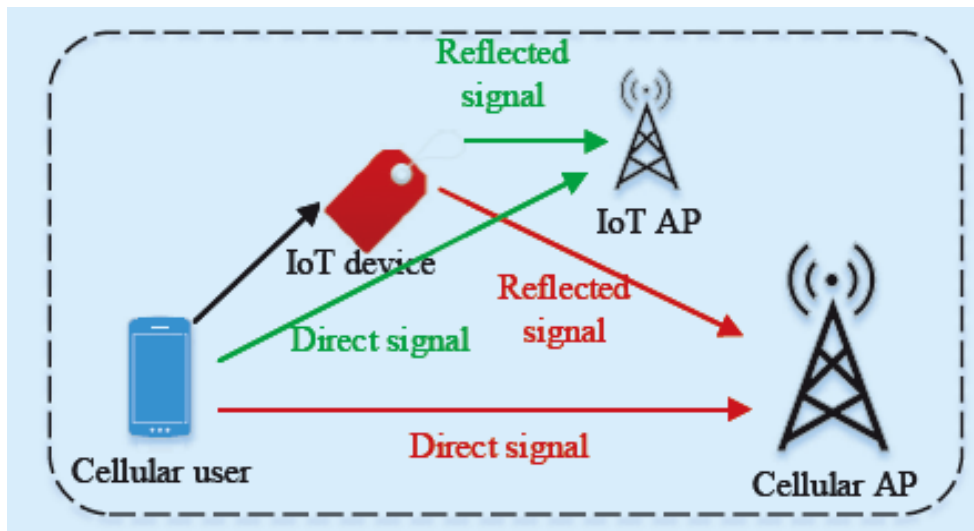
Παρόλο που η συμβατική ασύρματη μετάδοση προέρχεται από την επικοινωνία αναστροφής του περιβάλλοντος, είναι διαφορετικά σε κάποιο βαθμό. Συγκεκριμένα, ούτε ο χρήστης του αλλά ούτε και το σημείο πρόσβασης AP ενός κυψελοειδούς δικτύου γνωρίζουν την παρουσία της συσκευής IoT στην τεχνολογία επικοινωνίας οπισθοδιασποράς. Ως εκ τούτου, αμφότερες οι μεταδόσεις κυψελοειδούς δικτύου και IoT αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, εξαιτίας της έλλειψης συνεργασίας. Αντίθετα, στη συμβατική ασύρματη μετάδοση, τόσο οι κυψελοειδείς όσο και οι IoT μεταδόσεις μπορούν να σχεδιαστούν από κοινού για να επιτύχουν αμοιβαία επωφελή απόδοση.

Ας εξετάσουμε ένα σενάριο, στο οποίο ένας χρήστης κυψελοειδούς δικτύου μεταδίδει ένα ασύρματο σήμα ανερχόμενης ζεύξης σε έναν κυψελωτό σταθμό βάσης (BS), ενώ μια συσκευή IoT υιοθετεί την τεχνολογία επικοινωνίας backscattering (τεχνική οπισθοσκέδασης<sup>16</sup>) περιβάλλοντος για να παραδώσει τα δεδομένα της σε ένα σημείο πρόσβασης IoT (IoT AP). Συγκεκριμένα, η συσκευή IoT διαμορφώνει πρώτα τα δεδομένα της στο ληφθέν κυψελοειδές ραδιοφωνικό σήμα και στη συνέχεια αντανακλά το διαμορφωμένο σήμα στο σημείο πρόσβασης (AP) του IoT. Ανάλογα με το αν το IoT AP μοιράζεται την υποδομή του κυψελοειδούς AP ή όχι, οι τοπολογίες δικτύου του συμβιωτικού ραδιοφώνου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, όπως φαίνεται στις Εικόνες 11 και 12 που ακολουθούν.

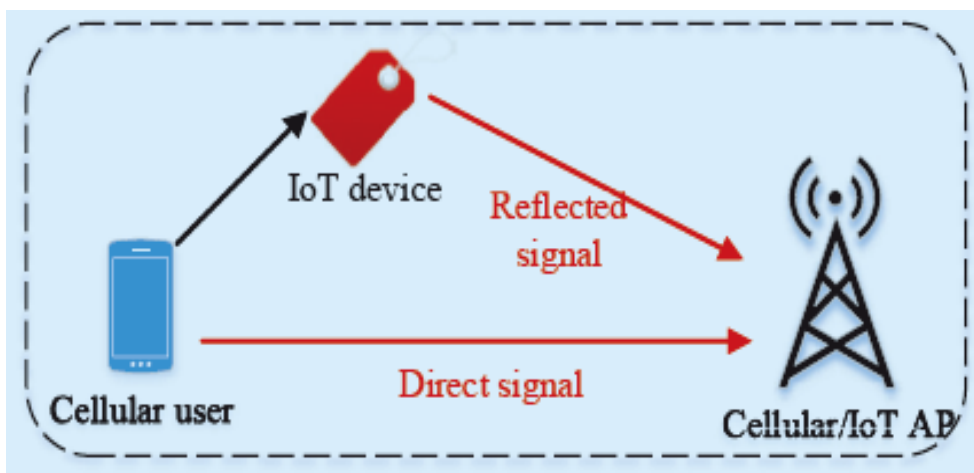
Είναι σαφές ότι τόσο το κυψελοειδές AP όσο και το IoT AP μπορούν ταυτόχρονα να δέχονται δύο σήματα, δηλαδή ένα άμεσο σήμα από τον κυψελοειδή χρήστη και το ανακλώμενο σήμα από τη συσκευή IoT [37]. Πιο συγκεκριμένα, τα κυψελοειδή δεδομένα περιέχονται τόσο στο άμεσο σήμα όσο και στο ανακλώμενο σήμα και τα δεδομένα IoT περιέχονται μόνο στο ανακλώμενο σήμα. Εξάγοντας τα απαιτούμενα δεδομένα στα λαμβανόμενα σήματα στο κυψελοειδές AP και το IoT AP, ολοκληρώνονται τόσο η κυψελοειδής μετάδοση δεδομένων όσο και η μετάδοση δεδομένων IoT.

---

<sup>16</sup> Τα συστήματα RFID βασίζονται στην αρχή λειτουργίας των ραντάρ, δηλαδή της ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (back-scatter).



Εικόνα 11: Συμβατικό ασύρματο μοντέλο ανοδικής ζεύξης με δύο διαφορετικά σημεία πρόσβασης (AP) [37]



Εικόνα 12: Συμβατικό ασύρματο μοντέλο ανοδικής ζεύξης με ένα κοινό σημείο πρόσβασης (AP) [37]

## 5. Μελλοντικές εξελίξεις

Το 2020, τα δίκτυα 5G αναμένεται να λειτουργήσουν πλήρως και να αντιπροσωπεύουν έναν παγκόσμιο παίκτη αλλαγών από τεχνολογική, οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική άποψη με πολύ υποσχόμενες επιδόσεις όσον αφορά την καθυστέρηση, την ενεργειακή απόδοση, την ασύρματη ευρυζωνική ικανότητα, την ελαστικότητα και την αξιοπιστία. Το 2030, όταν μπορεί να προκύψει πιθανότατα η τεχνολογία 6G, θα μπορούσαμε να περιμένουμε την προφητεία του Tesla να φτάσει στην πραγματικότητα μέσω του σχεδιασμού μιας αρχιτεκτονικής που να κάνει τους τελικούς χρήστες να αντιλαμβάνονται ότι περιβάλλονται από έναν τεράστιο τεχνητό εγκέφαλο που παρέχει εικονική μηδενική καθυστέρηση, απεριόριστη αποθήκευση και τεράστιες δυνατότητες γνωστικής ικανότητας. Η έρευνα για τη 6G δικτύωση έχει ήδη ξεκινήσει σε όλο τον κόσμο για την εύρεση καινοτόμων λύσεων, προκειμένου να είναι σε θέση να προσφέρει πανταχού παρούσα 3D κοινή συνδεσιμότητα και υπολογισμούς.

### 5.1 Η οδήγηση εφαρμογών πίσω από το 6G και οι απαιτήσεις τους

Κάθε νέα κυψελωτή γενιά οδηγείται από καινοτόμες εφαρμογές. Το 6G δεν αποτελεί εξαίρεση: θα προκύψει από την απaráμιλλη εμφάνιση συναρπαστικών νέων εφαρμογών και τεχνολογικών τάσεων που θα διαμορφώσουν τους στόχους απόδοσης, ενώ θα ριζικά επαναπροσδιορίσουν τις βασικές υπηρεσίες 5G. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε πρώτα τις κύριες εφαρμογές που παρακινούν την ανάπτυξη 6G και, στη συνέχεια, συζητούμε τις επακόλουθες τεχνολογικές τάσεις, τις μετρήσεις επιδόσεων στόχων και τις νέες απαιτήσεις υπηρεσιών.

**A. Η οδήγηση εφαρμογών πίσω από το 6G και οι απαιτήσεις τους:** Ενώ οι παραδοσιακές εφαρμογές, όπως η ζωντανή ροή πολυμέσων, θα παραμείνουν κεντρικές στο 6G, οι βασικοί καθοριστικοί παράγοντες της απόδοσης του συστήματος θα είναι τέσσερις νέοι τομείς εφαρμογής:

1) *Εφαρμογές εκτεταμένη πραγματικότητα XR<sup>17</sup> πολλαπλών αισθητήρων:* Το XR θα παράγει πολλές εφαρμογές δολοφόνων για 6G σε όλο το φάσμα AR/MR/VR. Τα

---

<sup>17</sup> Η εκτεταμένη πραγματικότητα (XR) αναφέρεται σε όλα τα πραγματικά και εικονικά περιβάλλοντα



επερχόμενα συστήματα 5G εξακολουθούν να μην επαρκούν για να παρέχουν μια πλήρη εμπειρία XR που θα μπορεί να συλλαμβάνει όλες τις εισόδους μέσω αισθητήρων, λόγω της ανικανότητας των τελευταίων να παρέχουν πολύ χαμηλές λανθάνουσες περιόδους για εφαρμογές XR με πληθώρα δεδομένων. Μια πραγματικά βιώσιμη εμπειρία AR/MR /VR απαιτεί ένα κοινό σχεδιασμό που να ενσωματώνει όχι μόνο τις απαιτήσεις της τεχνολογίας (ασύρματη, υπολογιστική, αποθήκευση) αλλά και τις αντιληπτές απαιτήσεις που απορρέουν από τις ανθρώπινες αισθήσεις, τη γνώση και τη φυσιολογία [40].

Πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ελάχιστες και οι μέγιστες αντιληπτικές απαιτήσεις και όρια στη διαδικασία της μηχανικής (υπολογισμός, επεξεργασία κ.λπ.). Για να γίνει αυτό, απαιτείται μια νέα ιδέα μέτρησης της ποιότητας της φυσικής εμπειρίας (QoPE – quality of physical experience) για τη συγχώνευση φυσικών παραγόντων από τον ίδιο τον άνθρωπο χρήστη με εισόδους κλασικής QoS και QoE (π.χ. μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν το QoPE περιλαμβάνουν τη γνωστική λειτουργία του εγκεφάλου, τη φυσιολογία του σώματος και τις χειρονομίες.

2) *Συνδεδεμένη Ρομποτική και Αυτόνομα Συστήματα (CRAS - Connected Robotics and Autonomous Systems)*: Πρωταρχικός οδηγός πίσω από τα συστήματα 6G είναι η επικείμενη ανάπτυξη CRAS, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων παράδοσης με drones, αυτόνομων οχημάτων, διμοιριών οχημάτων και αυτόνομης ρομποτικής. Η εισαγωγή του CRAS μέσω του κυβελοειδούς τομέα δεν είναι μια απλή περίπτωση "μιας ακόμη υπηρεσίας σύντομης σύνδεσης ΙοΕ σε πακέτα". Η έννοια του QoPE ισχύει και πάλι για το CRAS. Ωστόσο, το φυσικό περιβάλλον είναι πλέον ένα σύστημα ελέγχου, ενδεχομένως ενισχυμένο με ΑΙ. Το CRAS είναι ίσως μια υπόθεση βασικής χρήσης που απαιτεί αυστηρές απαιτήσεις σε όλο το εύρος αξιοπιστίας-αξιοπιστίας, μια ισορροπία που δεν είναι ακόμα διαθέσιμη στο 5G.

3) *Ασύρματες αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI - Wireless Brain-Computer Interactions)*: Πέρα από την XR, η προσαρμογή ασύρματων συστημάτων στον ανθρώπινο χρήστη είναι υποχρεωτική για την υποστήριξη υπηρεσιών με άμεσο

---

που παράγονται από γραφικά υπολογιστών και φορητά. Το 'X' στο XR είναι απλά μια μεταβλητή που μπορεί να αντέξει για κάθε γράμμα. Το XR είναι η κατηγορία ομπρέλα που καλύπτει όλες τις διάφορες μορφές μεταβληθείσας από υπολογιστή πραγματικότητας, όπως: Αυξημένη Πραγματικότητα (AR), Μικτή Πραγματικότητα (MR) και Εικονική Πραγματικότητα (VR).

BCI. Παραδοσιακά, οι εφαρμογές BCI περιορίζονταν σε σενάρια υγειονομικής περίθαλψης στα οποία οι άνθρωποι μπορούν να ελέγχουν προσθετικά άκρα ή γειτονικές υπολογιστικές συσκευές χρησιμοποιώντας εμφυτεύματα εγκεφάλου. Ωστόσο, η πρόσφατη εμφάνιση ασύρματων διασυνδέσεων εγκεφάλου-υπολογιστή και εμφυτευμάτων, θα φέρει επανάσταση στο πεδίο αυτό και θα εισαγάγει νέα σενάρια χρήσης που απαιτούν σύνδεση 6G.

Χρησιμοποιώντας ασύρματες τεχνολογίες BCI, αντί για smartphones, οι άνθρωποι θα αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους καθώς και με άλλους ανθρώπους που χρησιμοποιούν διακριτές συσκευές. Αυτό θα επιτρέψει στα άτομα να ελέγχουν το περιβάλλον τους με χειρονομίες και να επικοινωνούν με τα αγαπημένα τους πρόσωπα μέσω απτών μηνυμάτων<sup>18</sup>. Τέτοιες ενσυναίσθητες και απτές επικοινωνίες, σε συνδυασμό με συναφείς ιδέες, όπως συναισθηματικές υπολογιστικές συσκευές, στις οποίες οι συσκευές με συναισθηματική συμπεριφορά μπορούν να ταιριάζουν τις λειτουργίες τους με τη διάθεση του χρήστη, συνιστούν σημαντικές περιπτώσεις χρήσης 6G. Οι ασύρματες υπηρεσίες BCI απαιτούν θεμελιωδώς διαφορετικές μετρήσεις απόδοσης σε σύγκριση με ό, τι προσφέρει η 5G. Παρόμοια με την XR, οι ασύρματες υπηρεσίες BCI χρειάζονται υψηλές ταχύτητες, εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και υψηλή αξιοπιστία. Ωστόσο, είναι πολύ πιο ευαίσθητες από την XR σε φυσικές αντιλήψεις και απαιτούν εγγυήσεις QoPE [41].

4) *Τεχνολογίες Blockchain και κατακευματισμένου ημερολογίου (DLT - Distributed Ledger)*: Οι τεχνολογίες Blockchains και DLT θα είναι μία από τις πιο καινοτόμες τεχνολογίες IoE. Οι εφαρμογές Blockchain και DLT μπορούν να θεωρηθούν ως η επόμενη γενιά των υπηρεσιών κατακευματισμένης ανίχνευσης, των οποίων η ανάγκη για συνδεσιμότητα θα απαιτήσει ένα συνεργικό συνδυασμό URLLC και μαζικών επικοινωνιών τύπου υπολογιστή (mMTC) για να εγγυηθεί χαμηλή λανθάνουσα διάρκεια ζωής, αξιόπιστη συνδεσιμότητα και δυνατότητα κλιμάκωσης.

---

<sup>18</sup> Η απτική επικοινωνία είναι ένας κλάδος της μη λεκτικής επικοινωνίας που αναφέρεται στους τρόπους με τους οποίους οι άνθρωποι και τα ζώα επικοινωνούν και αλληλεπιδρούν μέσω της αίσθησης της αφής. Η αφή είναι η πιο εξελιγμένη και οικεία από τις έξι αισθήσεις.

## 5.2. Τάσεις μετρήσεις απόδοσης 6G δικτύωσης

Οι εφαρμογές του προηγούμενου υποκεφαλαίου οδηγούν σε νέες τάσεις για τους στόχους για το 6G [42]:

### **Τάση 1 - Περισσότερα bits, μεγαλύτερο φάσμα, περισσότερη αξιοπιστία:**

Οι περισσότερες από τις εφαρμογές οδήγησης του 6G απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς bits από το 5G. Για να καλύψει εφαρμογές όπως το XR και το BCI, η τεχνολογία 6G πρέπει να επιτύχει ακόμη 1000x αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, αποφέροντας έναν στόχο περίπου 1 Terabit/δευτερόλεπτο. Αυτό αιτιολογεί την ανάγκη για περισσότερους πόρους ασύρματου φάσματος, με αποτέλεσμα την περαιτέρω διερεύνηση των συχνοτήτων πέραν των 6 GHz. Εν τω μεταξύ, η ανάγκη για υψηλότερη αξιοπιστία θα είναι διαδεδομένη στις περισσότερες εφαρμογές 6G, γεγονός που θα αυξήσει την πρόκληση για υψηλές συχνότητες.

### **Τάση 2 - Από την επιφανειακή στην ογκομετρική φάση και την ενεργειακή αποδοτικότητα:**

Η τεχνολογία 6G πρέπει να αντιμετωπίσει τόσο τους χρήστες εδάφους όσο και τους εναέριους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων των smartphones και των οχημάτων XR/BCI. Αυτή η τρισδιάστατη φύση του 6G απαιτεί μια εξέλιξη προς έναν ορισμό ογκομετρικού και όχι χωρικού εύρους ζώνης. Θεωρούμε ότι τα συστήματα 6G πρέπει να παρέχουν υψηλές απαιτήσεις φασματικής και ενεργειακής απόδοσης (SEE - spectral and energy efficiency) μετρούμενες σε bps/Hz/m<sup>3</sup>/Joules. Αυτή είναι μια φυσική εξέλιξη που ξεκίνησε από 2G (bps) έως 3G (bps/Hz), στη συνέχεια 4G (bps/Hz/m<sup>2</sup>) έως 5G (bps/Hz /m<sup>2</sup>/Joules).

### **Τάση 3 - Παρουσία των έξυπνων επιφανειών και περιβαλλόντων:**

Τα τρέχοντα και τα παρελθόντα κυψελοειδή συστήματα χρησιμοποίησαν σταθμούς βάσης (διαφόρων μεγεθών και μορφών) για μετάδοση. Είμαστε μάρτυρες μιας επανάστασης στις ηλεκτρομαγνητικά ενεργές επιφάνειες που περιλαμβάνουν τεχνητές κατασκευές όπως τοίχους, δρόμους, ακόμη και ολόκληρα κτίρια. Η χρήση τέτοιων έξυπνων μεγάλων ευφών επιφανειών και περιβαλλόντων για ασύρματες επικοινωνίες θα οδηγήσει στην 6G αρχιτεκτονική εξέλιξη.

#### **Τάση 4 - Μαζική Διαθεσιμότητα Μικρών Δεδομένων:**

Η επανάσταση δεδομένων θα συνεχιστεί στο εγγύς μέλλον και θα μεταβληθεί από συγκεντρωτικά, μεγάλα δεδομένα, σε μαζικά, κατανεμημένα και μικρά δεδομένα. Τα συστήματα 6G πρέπει να αξιοποιήσουν τόσο μεγάλα όσο και μικρά σύνολα δεδομένων σε ολόκληρη την υποδομή τους, για την ενίσχυση των λειτουργιών δικτύου και την παροχή νέων υπηρεσιών. Αυτή η τάση παρακινεί νέες τεχνικές εκμάθησης μηχανών που υπερβαίνουν τις κλασσικές αναλυτικές αναλύσεις δεδομένων.

#### **Τάση 5 - Από δίκτυα αυτο-οργάνωσης (SON) σε αυτοσυντηρούμενα δίκτυα:**

Η τεχνολογία SON<sup>19</sup> δεν έχει ενσωματωθεί παρά μόνο στα δίκτυα 4G/5G λόγω έλλειψης πραγματικών αναγκών. Ωστόσο, οι τεχνολογίες CRAS και DLT παρακινούν την άμεση ανάγκη για έξυπνο SON για τη διαχείριση των λειτουργιών του δικτύου, των πόρων και της βελτιστοποίησης. 6G θα απαιτήσει μια εναλλαγή των παραδειγμάτων από τον κλασσικό SON, όπου το δίκτυο απλώς προσαρμόζει τις λειτουργίες του σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές καταστάσεις, σε ένα αυτοσυντηρούμενο δίκτυο (SSN - Self-Sustaining Network) που μπορεί να διατηρήσει τους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs) από περιβάλλοντα που προέρχονται από τους τομείς εφαρμογής της 6G δικτύωσης.

Τα SSN πρέπει να είναι σε θέση όχι μόνο να προσαρμόζουν τις λειτουργίες τους αλλά και να διατηρούν τη χρήση και τη διαχείριση των πόρων τους (π.χ. με τη συγκομιδή ενέργειας και την εκμετάλλευση του φάσματος) για να διατηρούν αυτόνομα υψηλούς, μακροπρόθεσμους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs). Οι λειτουργίες SSN πρέπει να αξιοποιήσουν την πρόσφατη επανάσταση στις τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI).

---

<sup>19</sup> Δίκτυα αποτελούμενα από ένα πλήθος (ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή) αυτόνομων, κινητών, μικρών και τυχαία κατανεμημένων κόμβων οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους σε περιοχές που δεν υπάρχει εγκατεστημένη υποδομή. Από τους κόμβους αυτούς απαιτείται να μπορούν σε σύντομο χρονικό διάστημα να δημιουργήσουν δίκτυο μεταξύ τους, να το λειτουργήσουν και να το συντηρήσουν χωρίς καμία (ή περιορισμένη) ανθρώπινη παρέμβαση παρέχοντας έτσι στιβαρή επικοινωνία η οποία να καλύπτει τις ανάγκες μιας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών.

## **Τάση 6 - Σύγκλιση των Επικοινωνιών, Υπολογισμός, Έλεγχος, Εντοπισμός και Ανίχνευση (3CLS):**

Οι τελευταίες πέντε γενεές κυψελοειδών συστημάτων είχαν μία αποκλειστική λειτουργία: τις ασύρματες επικοινωνίες. Ωστόσο, το 6G θα διαταράξει αυτή την υπόθεση μέσω μιας σύγκλισης διαφόρων λειτουργιών που περιλαμβάνουν επικοινωνίες, υπολογισμό, έλεγχο, εντοπισμό και ανίχνευση. Θεωρούμε 6G ως ένα σύστημα πολλαπλών χρήσεων που μπορεί να προσφέρει πολλές υπηρεσίες 3CLS (Control, Localization, and Sensing), οι οποίες είναι ιδιαίτερα ελκυστικές και ακόμη και απαραίτητες για εφαρμογές όπως οι XR, CRAS και DLT, όπου η παρακολούθηση, ο έλεγχος, ο εντοπισμός και ο υπολογισμός είναι εγγενές χαρακτηριστικό.

Επιπλέον, οι υπηρεσίες ανίχνευσης θα επιτρέψουν στα συστήματα 6G να παρέχουν στους χρήστες μια τρισδιάστατη χαρτογράφηση του ασύρματου περιβάλλοντος επικοινωνίας σε διαφορετικές συχνότητες. Ως εκ τούτου, τα συστήματα 6G πρέπει να ενσωματώνουν και να διαχειρίζονται τις λειτουργίες 3CLS. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξελίξεις που αφορούν προηγούμενες τάσεις θα επιτρέψουν σταδιακά στα συστήματα 6G να παρέχουν εύκολα 3CLS.

## Βιβλιογραφία

1. Ericsson AB, "Traffic Exploration Tool," Online tool. Available at: <http://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBasicEditor.ericsson>.
2. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skoeld, "5G NR - The Next Generation Wireless Access Technology", Elsevier, August 2018.
3. H. J. Song, T. Nagatsuma, Present and Future of Terahertz Communications, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Aug. 2011.
4. Int Telecom Union – Radiocom Sector (ITU-R), Final Acts – World Radiocommunication Conference (WRC-15), Nov. 2015.
5. Tom Wheeler (FCC Chairman), "The Future of Wireless: a Vision for U.S. Leadership in a 5G World", Washington, D.C, Jun. 20, 2016.
6. Dr. Dhananjay Kalbande, "6G-Next Gen Mobile Wireless Communication Approach", 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2019.
7. Lin Zhang, Ying-Chang Liang, "6G Visions: Mobile Ultra-Broadband, Super Internet of Things, and Artificial Intelligence", Invited Paper, China Communications, August 2019.
8. R. Long, H. Guo, L. Zhang, and Y.-C. Liang, "Full-duplex backscatter communications in symbiotic radio systems," IEEE Access, vol. 7, pp. 21597-21608, Feb. 2019.
9. Bai, Y.-Y., Xiao, S. and Wang, B.-Z., 'Appling Weighted Thinned Linear Array and Pattern Reconfigurable Elements to Extend Pattern Scanning Range of Millimetre Wave Microstrip Phased Array', vol. 31, no. 1, pp. 1–6, January 2010.
10. Wang, B.-Z., Xiao, S. and Wang, J., 'Reconfigurable Patch Antenna Design for Wideband Wireless Communication Systems', IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 1, no. 2, pp. 414–419, April 2007.

11. Irie, Y., Hara, S., Nakaya, Y. et al., ‘A Beam Forming Method for a Reactively Steered Adaptive Array Antenna with RF-MEMS Device’, Proc. IEEE Topical Conference on Wireless Communication. Technology, October 2003, pp. 396–397.
12. Daniels, R.C. and Heath, R.W., ‘60 GHz Wireless Communications: Emerging Requirements and Design Recommendations’, IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 2, no. 3, pp. 41–50, 2007.
13. ITU-T Recommendation Y. 2001, General overview of NGN, December 2004.
14. Industry Proposal for a Public Private Partnership (PPP) in Horizon 2020 (Draft Version 2.1), ‘Horizon 2020 Advanced 5G Network Infrastructure for Future Internet PPP’: [www.networks-etp.eu/fileadmin/user\\_upload/Home/draft-PPP-proposal.pdf](http://www.networks-etp.eu/fileadmin/user_upload/Home/draft-PPP-proposal.pdf).
15. The Zettabyte Era – ‘Trends and Analysis’: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VN1\\_Hyperconnectivity\\_WP.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VN1_Hyperconnectivity_WP.html).
16. Cisco, Quality of Service Design Overview [http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/WAN\\_and\\_MAN/QoS\\_SRND/QoSIntro.html](http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/WAN_and_MAN/QoS_SRND/QoSIntro.html).
17. Evaristo, J.R., Desouza, K.C. and Hollister, K., ‘Centralization Momentum: The Pendulum Swings Back Again’, Communications of the ACM, vol. 48, no. 2, pp. 66–71.4, February 2005.
18. Hu, H., Bi, J., Feng, T. et al., ‘A Survey on New Architecture Design of Internet’, International Conference on Computational and Information Sciences (ICCIS), Chengdu, Sichuan, China, October 2011.
19. S. Mohanty, and S. K. Routray, “CE-Driven Trends in Global Communications: Strategic sectors for economic growth and development,” IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 6, no. 1, pp. 61-65, Jan. 2017.
20. S. K. Routray, and K. P. Sharmila, “4.5G: A Milestone Along the Road to 5G,” in Proc. of 5th IEEE International Conference on Information, Communication and Embedded Systems (ICICES), Chennai, Feb 25–26, 2016.

21. S. K. Routray, A. Javali, R. Nymangoudar, and L. Sharma, "Latching on to Keck's Law: Maintaining High Speed Trends in Optical Communication," in Proc. of 4th IEEE International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, Jan. 2017.
22. S. K. Routray, and K. P. Sharmila, "Green Initiatives in 5G," in Proc. of 2nd IEEE International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bioinformatics (AEEICB), Chennai, Feb. 2016.
23. M. K. Weldon, The Future X Network: A Bell Labs Perspective, CRC Press, 2016.
24. Deslandes, D. and Wu, K., 'Single-Substrate Integration Technique of Planar Circuits and Waveguide Filters', IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, no. 2, pp. 593–596,
25. Xu, F. and Wu, K., 'Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide', IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, 2005.
26. Deslandes, D. and Wu, K., 'Design Consideration and Performance Analysis of Substrate Integrated Waveguide Components', Proc. 32nd European Microwave Conference, pp. 1–4, September 2002.
27. Rashid, M.T. and Sebak, A.R., 'Design and Modelling of a Linear Array of Longitudinal Slots on Substrate Integrated Waveguide', Proc. National Radio Science Conference, 2007. NRSC 2007, 13–15 March 2007, pp. 1–19.
28. Athanasopoulos, N., Makris, D. and Voudouris, K., 'Millimeter-Wave Passive Front-End Based on Substrate Integrated Waveguide Technology', Proc. Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2012, Loughborough, UK, 12–13 November 2012, pp. 1–5.
29. J. M. Cioffi, K. J. Kerpez, C. S. Hwang, and I. Kanellakopoulos, "Terabit DSLs," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 11, pp. 152-159, Nov. 2018.
30. S. K. Routray, "The Changing Trends of Optical Communication," IEEE Potentials Magazine, vol. 33, no. 1, pp. 28-33, Jan 2014.



31. J. M. Cioffi, K. J. Kerpez, C. S. Hwang, and I. Kanellakopoulos, "Terabit DSLs," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 11, pp. 152-159, Nov. 2018.
32. S. K. Routray, "The Changing Trends of Optical Communication," *IEEE Potentials Magazine*, vol. 33, no. 1, pp. 28-33, Jan 2014.
33. M. Katz, M. Matinmikko-Blue, and M. Latva-Aho, "6Genesis flagship program: building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem," in *proc. Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Guadalajara, 2018, pp. 1-9.
34. An Improved Decoding Algorithm for the Davey-MacKay Construction, University of Surrey, Dept. of Computing GU2 7XH Guildford, England.
35. D. Elliott, W. Keen, and L. Miao, "Recent advances in connected and automated vehicles," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 109-131, Apr. 2019.
36. Y. Golovachev, A. Etinger, G. A. Pinhasi, and Y. Pinhasi, "Propagation properties of sub-millimeter waves in foggy conditions," *Journal of Applied Physics*, Apr. 2019.
37. Z. Gu, J. Zhang, Y. Ji, L. Bai, and X. Sun, "Network topology reconfiguration for FSO-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 69426-69437, 2018.
38. A. Douik, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M. Alouini, "Hybrid radio/free-space optical design for next generation backhaul systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 6, pp. 2563-2577, Jun. 2016.
39. M. Giordani, *Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies*, 4 Feb. 2020.
40. H. Wang, W. Wang, X. Chen, and Z. Zhang, "Wireless information and energy transfer in interference aware massive MIMO systems," in *Proc. IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, 2014, pp. 2556-2561.
41. T. Nagatsuma, G. Ducournan, C. C. Renaud, *Advances in terahertz communications accelerated by photonics*, *Journal Nature Photonics*, 2016, 10(6): 371-379.

42. V. Petrov, A. Pyattaev, D. Moltchanov and Y. Koucheryavy, Terahertz band communications: Applications, research challenges, and standardization activities, 2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Lisbon, 2016, pp. 183-190