



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

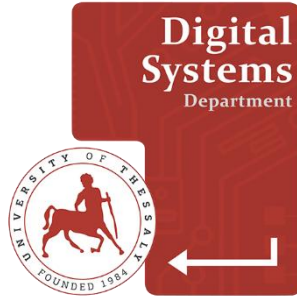
Τεχνολογίες 6G

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ποζιού Ιωάννα (ΑΜ: 3119106)

Επιβλέπων: Χαϊκάλης Κωνσταντίνος, βαθμίδα

ΛΑΡΙΣΑ, Μάρτιος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Towards 6G

BACHELOR THESIS

Poziou Ioanna (RN: 3119106)

Supervisor: *Chaikalis Konstantinos, position*

LARISSA, March 2024

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

(Υπογραφή)

Ποζιού Ιωάννα

03/03/2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Χαϊκάλης Κωνσταντίνος Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 1 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 1
Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 2 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 2, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 2

Ημερομηνία έγκρισης: dd-mm-yyyy

Περίληψη

Η παγκόσμια τεχνολογική και βιομηχανική επανάσταση επιταχύνεται με αποτέλεσμα τις υψηλές απαιτήσεις για πιο έξυπνο δίκτυο, εξαιρετικά χαμηλότερη καθυστέρηση, εξαιρετική ταχύτητα επικοινωνίας δικτύου και υποστήριξη τεράστιου αριθμού διαφόρων συνδεδεμένων εφαρμογών. Η ευρεία εφαρμογή των ΤΠΕ νέας γενιάς (τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνίας), όπως η ΑΙ (τεχνητή νοημοσύνη), η ΕΡ (εικονική πραγματικότητα), η ΑΡ (επαυξημένη πραγματικότητα), η ΧΡ (εκτεταμένη πραγματικότητα), το ΙοΤ (Διαδίκτυο των πραγμάτων), η τεχνολογία blockchain και το ΙοΕ (Διαδίκτυο των Πάντων), οδηγούν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας έκτης γενιάς (6G). Αναμένεται ότι μόνο τα επερχόμενα δίκτυα 6G θα είναι σε θέση να εκτελούν συνδεσιμότητα εξαιρετικά υψηλής απόδοσης με τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, ακόμη και σε επίπονα σενάρια όπως ακραία πυκνότητα, ποικιλόμορφη κινητικότητα και ενεργητικά περιβάλλοντα.

Η ανάπτυξη του 6G θα έχει βαθύ αντίκτυπο στη διαδικασία ευφυΐας της ανάπτυξης επικοινωνίας, η οποία αποτελείται από έξυπνη συνδεσιμότητα, βαθιά συνδεσιμότητα, ολογραφική συνδεσιμότητα και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Για την αποτελεσματική εκπλήρωση τέτοιων διαφορετικών απαιτήσεων, το 6G οραματίζεται να έχει ενσωματωμένα διαστημικά – εναέρια – εδαφικά - ωκεάνια τρισδιάστατα δίκτυα.

Καθώς τα δίκτυα 6G είναι όλο και πιο περίπλοκα, ετερογενή και δυναμικά, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί αποτελεσματική χρήση πόρων, απρόσκοπτη εμπειρία χρήστη, αυτόματη διαχείριση και ενορχήστρωση. Ωστόσο, η πρόοδος της τεχνολογίας επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων, της υπολογιστικής ισχύς και της διαθεσιμότητας εμπλουτισμένων δεδομένων, μπορούν να αντιμετωπισθούν πολύπλοκα ζητήματα δικτύου 6G αξιοποιώντας την τεχνητή νοημοσύνη (ΑΙ).

Σε αυτό το άρθρο, εξετάζουμε τις πιο πρόσφατες τάσεις και τις μελλοντικές αναδυόμενες τάσεις που είναι δυνατή η λειτουργία του δικτύου 6G. Το έγγραφο στοχεύει να παρέχει πιο περιεκτική και σύντομη ανασκόπηση σχετικά με την τεχνολογία κινητών επικοινωνιών 6G σε ένα έγγραφο έρευνας. Αρχικά, εισάγεται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του συστήματος 6G όσον αφορά τα οράματα, τα προγράμματα οδήγησης, τις απαιτήσεις, την αρχιτεκτονική και τα σενάρια χρήσης που απαιτούνται για την ενεργοποίηση εφαρμογών 6G. Στη συνέχεια, συζητήθηκαν οι ευκαιρίες και τα πλεονεκτήματα της

κινητής τεχνολογίας 6G. Επιπλέον, έχουν επισημανθεί οι πολλά υποσχόμενες νέες τεχνικές που επιτρέπουν την τεχνολογία 6G.

Για τον προσδιορισμό του 6G και τα σχετικά ζητήματα του, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα. Σε αυτό το άρθρο, συζητούνται οι προοπτικές του, οι βασικές τεχνολογίες, τα σενάρια, οι προκλήσεις και τα σχετικά ζητήματα. Αυτό το άρθρο προβλέπεται να χρησιμεύσει ως ενημερωτική κατευθυντήρια γραμμή για την τόνωση του ενδιαφέροντος και περαιτέρω μελετών για μετέπειτα έρευνα και ανάπτυξη δικτύων 6G. Η εργασία θα επιτρέψει στους αναγνώστες να καταλάβουν εν συντομία τις βασικές απαιτήσεις, στόχους, που θα χρειαστούν και τις εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα και τις ευκαιρίες που μπορούν να προσφερθούν καθώς και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν από την εφαρμογή αυτής της νέας τεχνολογίας.

Λέξεις-κλειδιά: Δίκτυο 6G, Επικοινωνία THz, Blockchain, Έξυπνες συσκευές, Gadget ελεύθερης επικοινωνίας, Κβαντική επικοινωνία, Διατήρηση απορρήτου, Επικοινωνία, Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Μηχανική Μάθηση (ML), Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), Ασφάλεια δικτύου.

Abstract

The global technological and industrial revolution is accelerating resulting in high demands for smarter network, ultra-low latency, e-excellent network communication speed and support of huge number of various connected applications. The widespread application of new generation ICT (information and communication technologies), such as AI (artificial intelligence), ER (virtual reality), AR (augmented reality), XR (extended reality), IoT (Internet of Things), blockchain technology and IoT (Internet of Everything), lead to the development of sixth generation (6G) technology. It is expected that only the upcoming 6G networks will be able to perform extremely high-performance connectivity with a huge number of connected devices, even in demanding scenarios such as extreme density, diverse mobility and energetic environments.

The development of 6G will have a profound impact on the intelligence process of communication development, which consists of intelligent connectivity, deep connectivity, holographic connectivity and ubiquitous connectivity. To effectively fulfill such diverse requirements, 6G is envisioned to have integrated space-air-terrestrial-ocean 3D networks.

As 6G networks are increasingly complex, heterogeneous and dynamic, it is very difficult to achieve efficient resource utilization, seamless user experience, automatic management and orchestration. However, the advancement of big data processing technology, computing power and availability of e-enriched data, complex issues of 6G network can be tackled by leveraging artificial intelligence (AI).

In this article, we look at the latest trends and future emerging trends that 6G network operation is possible. The paper aims to provide a more comprehensive and concise review on 6G mobile communication technology in a research paper. First, a comprehensive overview of the 6G system is introduced in terms of the visions, drivers, requirements, architecture and use cases required to enable 6G applications. The opportunities and advantages of 6G mobile technology were then discussed. In addition, the promising new techniques enabling 6G technology have been highlighted.

To identify 6G and its related issues, a literature search was conducted. In this article, its prospects, key technologies, scenarios, challenges and related issues are discussed. This article is intended to serve as an informative guideline to stimulate interest and

further studies for further research and development of 6G networks. The paper will enable the readers to briefly understand the basic requirements, objectives, that will be needed and the applications, the advantages and opportunities that can be offered as well as the challenges that must be faced before implementation. of this new technology.

Keywords: 6G Network, THz Communication, Blockchain, Smart Devices, Free Communication Gadget, Quantum Communication, Privacy Preservation, Communication, Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Internet of Things (IoT), Network Security.

Ευχαριστίες

Είναι σημαντική η αναγνώριση της βοήθειας που έλαβε ο σπουδαστής κατά την διάρκεια της προπαρασκευής της εργασίας του. Μπορεί να είναι ακαδημαϊκή, τεχνική, γραμματειακή, διοικητική και προσωπική (π.χ. οικογένεια). Η ενότητα αυτή δεν πρέπει να ξεπερνά τη μισή σελίδα.

Ποζιού Ιωάννα

03/03/2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	17
2.1.1 Δίκτυο 1G	18
2.1.2 Δίκτυο 2G	19
2.1.3 Δίκτυο 3G	20
2.1.4 Δίκτυο 4G	21
2.1.5 Δίκτυο 5G	22
2.1.6 Δίκτυο 6G	24
2.2 ΧΩΡΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 6G	28
2.3 ΔΕΙΚΤΕΣ ΟΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ 6G	30
2.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ 6G.....	32
3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 6G.....	35
3.1 ΈΞΥΠΝΟ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ	35
3.2 ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ	36
3.3 INTELLIGENT RADIO	36
3.4 3D ΕΝΔΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	37
4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΤΟ 6G	39
4.1 ΕΠΙΔΟΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ 6G	39
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΟ 6G.....	40
4.2.1 Επικοινωνία THz	40
4.2.2 Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC)	46
4.2.3 Κεραία επόμενης γενιάς και βασικά συνθετικά υλικά.	47
4.2.4 Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)	48

4.2.5	Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού και Blockchain	53
4.2.6	Δικτύωση Βάσει Πρόθεσης (IBN)	57
4.2.7	Έξυπνες συσκευές (SD) και Gadget ελεύθερης επικοινωνίας... ..	59
4.2.8	Κβαντική επικοινωνία (QC)	62
4.2.9	Μοριακή επικοινωνία.....	65
4.3	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ 6G	66
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	69
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1:	Η αναπτυξιακή τάση της κινητής επικοινωνίας	17
Εικόνα 2:	Δίκτυο 6G πλήρους διαστάσεων	25
Εικόνα 3:	Ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου στο δίκτυο 6G.	26
Εικόνα 4:	Εξέλιξη ζητημάτων ασφάλειας και απορρήτου σε ασύρματα συστήματα.	27
Εικόνα 5:	Βελτιώσεις 6G, Αρχιτεκτονικά επίπεδα 6G υψηλού επιπέδου και Τεχνολογίες και εφαρμογές 6G (Alwis et al., 2023).	41
Εικόνα 6:	Βελτιώσεις 6G, Αρχιτεκτονικά επίπεδα 6G υψηλού επιπέδου και Τεχνολογίες και εφαρμογές 6G (Alwis et al., 2023).	42

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1:	Η ανάπτυξη του δικτύου 6G μεταξύ των χωρών	28
------------	--	----

1 Εισαγωγή

Αν και η ανάπτυξη του δικτύου 5G είναι ακόμη σε εξέλιξη, η έρευνα των δικτύων 6G έχει ήδη ξεκινήσει, διότι αναμένονται προηγμένες απαιτήσεις επικοινωνίας της μελλοντικής κοινωνίας με επίκεντρο τα δεδομένα και την υπερσυνδεσιμότητα. Σύμφωνα με έρευνα της Ericsson (2021) που αφορούσε την πρόσφατη έκθεση των προοπτικών συνδέσεων IoT, οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας IoT για επικοινωνίες τύπου μηχανής (MTC) (στενής ζώνης IoT (NB-IoT) και Cat-M), προβλέπεται να φτάσουν περίπου τα 2,48 δισεκατομμύρια συνδέσεις το 2026, παρουσιάζοντας αύξηση 7,53 φορές συγκριτικά με το 2021 με 330 εκατομμύρια συνδέσεις. Συγκεκριμένα, τα smart wearables αναμένεται να φτάσουν τα 776,23 εκατομμύρια μονάδες μέχρι το 2026 με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 19,48%. Οι αριθμοί αυτοί, δείχνουν την τάση που θα κληθούν να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα έκκτης γενιάς (6G), τα οποία αναμένεται να αναπτυχθούν έως το 2030, με σκοπό την διευκόλυνση της συνδεσιμότητας με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες και της επικοινωνίας με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (Alwis et al., 2023).

Επίσης τα δίκτυα 6G θα δώσουν την δυνατότητα ύπαρξης σε πολλές νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, π.χ. για την επικοινωνία στο διάστημα και τα βάθη των ωκεανών, την ολογραφική τηλεμεταφορά, τα Συνδεδεμένα Αυτόνομα Οχήματα (CAV), το ενεργειακό διαδίκτυο και την επόμενη βιομηχανική επανάσταση (γνωστή ως Industry 5.0). Ωστόσο, απαιτεί σημαντική πρόοδος των υπάρχουσών τεχνολογιών για την υλοποίηση δικτύων και εφαρμογών 6G.

Μια ευρεία επισκόπηση του δικτύου 6G, της εξέλιξης προς αυτό και παρουσίαση τεχνολογικών κατευθύνσεων προς το 6G (π.χ. η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Δικτύωση Βάσει Πρόθεσης (IBN), η Τεχνολογία Καταμεμημένης Λογιστικής (DLT) / Blockchain (BC), η επικοινωνία Terahertz (THz), οι Έξυπνες συσκευές και η Gadget ελεύθερης επικοινωνίας (SDG), η Quantum Communication (QC)) παρουσιάζονται σε διάφορα ερευνητικά άρθρα (Saad, Bennis & Chen, 2019; Alwis et al., 2021; Alwis et al., 2023).

Σε αυτό το άρθρο, εξετάζουμε τα δίκτυα 6G, διερευνούμε την εξέλιξη της τεχνολογίας επικοινωνίας 6G, τις προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει, τις μέχρι τώρα λύσεις αυτών και τις μελλοντικές ερευνητικές προκλήσεις.

Η έρευνα ξεκινά, στο κεφάλαιο 2, με μια ιστορική ανασκόπηση των προηγούμενων τεχνολογιών δικτύωσης, φθάνοντας στις τρέχουσες τάσεις στη δικτύωση 6G. Στη

συνέχεια, αναφερθήκαμε στις χώρες που ήδη συμμετέχουν και ερευνούν της ανάπτυξη του 6G. Επίσης, έγινε αναφορά στους δείκτες οράματος και απόδοσης στην ανάπτυξη του δικτύου 6G. Στο κλείσιμο του κεφαλαίου αναφερόμαστε στις Απαιτήσεις και τις Τεχνολογίες Ασύρματης επικοινωνίας που αναπτύσσονται στο δίκτυο 6G.

Στην συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τέσσερις βασικές πτυχές των δικτύων 6G (ευφυή υπολογιστική ακμής σε πραγματικό χρόνο, κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη, Intelligent Radio και 3D ενδοεπικοινωνίες).

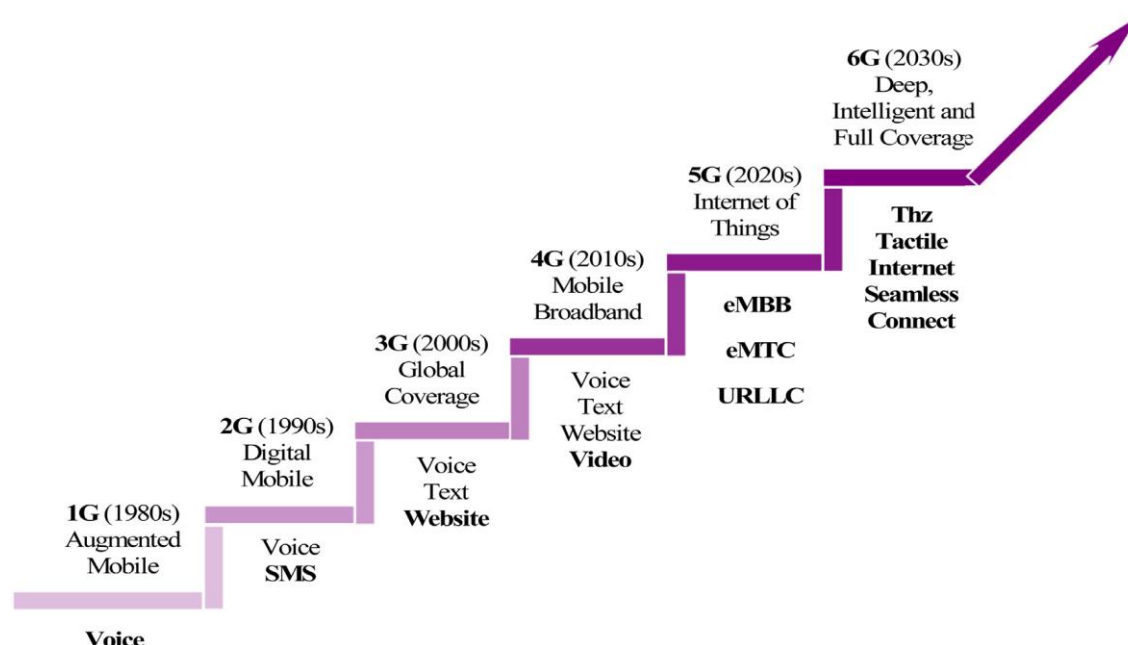
Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι τεχνολογικές κατευθύνσεις του δικτύου 6G, τη δυνατότητα εφαρμογής 6G, τις τεχνικές προκλήσεις, τα σχετικά θέματα ασφάλειας και απορρήτου, τις πιθανές λύσεις που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Επιπλέον δίνονται στοιχεία για την επίδοση του δικτύου 6G.

Κλείνοντας αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση των βιβλιογραφικών πηγών που διερευνήθηκαν.

2 Ιστορία και Εξέλιξη των Δικτύων

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των πληροφοριών και των επικοινωνιών έχει δραματίσει ζωτικό ρόλο στη συνεχή αναβάθμιση του πληροφοριακού συστήματος και στην ευημερία της κοινωνίας. Από τη δεκαετία του 1980, η επόμενη γενιά επαναστατικών τεχνολογιών εμφανίστηκε σε έναν δεκαετή κύκλο¹ για την ανάπτυξη των ΤΠΕ (εικ. 1) (Lu & Zheng, 2020).

Με την εμφάνιση ηλεκτρονικών και φωτονικών υλικών, μικροηλεκτρονικής κατασκευής και σχεδιασμού διεπαφής αέρα, οι τεχνολογίες επικοινωνίας απέκτησαν νέες διαστάσεις και έντονες περιπτώσεις χρήσης (Bang et al., 2023).



Εικόνα 1. Η αναπτυξιακή τάση της κινητής επικοινωνίας

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην ψηφιοποίηση κυκλωμάτων, π.χ. επιτρέπουν σήματα αλλαγής πλήκτρων και κωδικοποίηση καναλιών, αφήνοντας στα συστήματα 2G που βασίζονται σε TDMA (Time Division Multiple Access) να ξεπερνούν κατά πολύ τα συστήματα 1G που χρησιμοποιούσαν το FDMA (Frequency Division Multiple Access) όσον

¹ Καθεμία από τις πέντε τελευταίες γενιές συστημάτων κινητής επικοινωνίας (1G, 2G, 3G, 4G και 5G), από την ιδέα έως την εμπορική εφαρμογή, χρειάστηκε περίπου 10 χρόνια για να αναπτυχθεί (κανόνας δεκαετούς κύκλου). Με άλλα λόγια, όταν η προηγούμενη γενιά μπήκε στο επιχειρηματικό στάδιο, η επόμενη γενιά είχε ήδη αρχίσει να τραβάει την προσοχή μας, τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά (Lu & Zheng, 2020)

αφορά τη χωρητικότητα φωνής. Επίσης, η μετάβαση από το DSP (Digital Signal Processor) στο ASIC (Application Specific Integrated Circuit) ενισχύει σημαντικά την επεξεργαστική ισχύ και την πυκνότητα της βασικής ζώνης στους σταθμούς βάσης, γεγονός που ενισχύει τα κέρδη χωρητικότητας των συστημάτων 4G έναντι των συστημάτων 3G (Bang et al., 2023).

Η κινητή επικοινωνία πριν από το 4G επικεντρωνόταν κυρίως σε μεμονωμένες καταναλωτικές αγορές που ήταν προσανατολισμένες στους ανθρώπους. Το 5G έχει επιτύχει επαναστατικές τεχνολογικές ανακαλύψεις μέσω υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης, εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και τεράστιου αριθμού συνδέσεων. Οι καταναλωτές κυμαίνονται από μεμονωμένους χρήστες έως χρήστες σε διάφορους κλάδους και τομείς (Lu & Zheng, 2020).

Ακόμη, τα εξαιρετικά συνεκτικά κυκλώματα στους τομείς της ζώνης βάσης, των ραδιοσυχνοτήτων και των οπτικών ινών δημιούργησαν ενεργές κεραίες, επιτρέποντας έτσι τη μαζική πολλαπλή είσοδο / πολλαπλή έξοδο (MIMO) στο 5G.

Ειδικά μετά την ένταξη και την καινοτομία του 5G και της AI, η άνοδος των τεχνολογιών πληροφοριών επόμενης γενιάς (π.χ. τα μεγάλα δεδομένα και οι υπολογιστές αιχμής), έχουν προωθήσει περαιτέρω την ανάπτυξη βιομηχανιών όπως η μεταποίηση, η υγειονομική περίθαλψη και οι μεταφορές. Προκειμένου να προσαρμοστεί στη βαθιά ενοποίηση μεταξύ του IoT και των διαφόρων βιομηχανιών, το δίκτυο 6G θα διασφαλίσει ότι όλα θα συνδέονται βαθιά, έξυπνα και απρόσκοπτα (Lu & Zheng, 2020).

Στην συνέχεια γίνεται επισκόπηση των δικτύων από το πρότυπο τεχνολογίας πρώτης γενιάς για δίκτυα (1G) έως το πρότυπο τεχνολογίας έκτης γενιάς για τα δίκτυα (5G).

2.1.1 Δίκτυο 1G

Τη δεκαετία του '80 σχεδιάστηκε για υπηρεσίες φωνής, το δίκτυο 1G, το οποίο βασίζεται σε αναλογικά σήματα για τη μετάδοση πληροφοριών και δεν έχει καθιερωμένο ασύρματο πρότυπο. Το γεγονός αυτό του απέδιδε αρκετά μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένων των σκληρών παραδόσεων, της έλλειψης εγγυήσεων ασφάλειας και απορρήτου και της χαμηλής απόδοσης μετάδοσης. Επίσης, οι τηλεφωνικές υπηρεσίες δεν ήταν κρυπτογραφημένες, πράγμα που σημαίνει ότι οι μεταδόσεις δεδομένων και οι τηλεφωνικές συνομιλίες δεν μπορούσαν να είναι ασφαλείς και ιδιωτικές.

Έτσι, ολόκληρο το δίκτυο και οι χρήστες του αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις ασφάλειας και απορρήτου, συμπεριλαμβανομένης της κλωνοποίησης, της υποκλοπής και της παράνομης πρόσβασης (Chandra et al., 2011; Gupta, Jain & Vaszkun, 2015).

2.1.2 Δίκτυο 2G

Το δίκτυο 2G βασίζεται σε τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης (TDMA-Time Division Multiple Access και CDMA-Code Division Multiple Access), οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες φωνής και σύντομων μηνυμάτων. Έτσι, στο δίκτυο αυτό, το πιο σημαντικό πρότυπο κινητής επικοινωνίας είναι το GSM (Global System for Mobile Communications), το οποίο στοχεύει στην εξασφάλιση ενός ασφαλούς συστήματος, όσο ένα PSTN (Public Switched Telephone Network) (Wang et al., 2020).

Οι υπηρεσίες που προσφέρει για την ασφάλεια και το απόρρητο περιλαμβάνουν: α) ανωνυμία, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση προσωρινών αναγνωριστικών, τα οποία καθιστούν δύσκολη την παρακολούθηση της πραγματικής ταυτότητας του χρήστη, με εξαίρεση την πρώτη ενεργοποίηση της συσκευής στην οποία γίνεται χρήση της πραγματικής ταυτότητας και έπειτα εκδίδεται ένα προσωρινό αναγνωριστικό, β) έλεγχο ταυτότητας, ο οποίος είναι μια προσέγγιση που βασίζεται στην κρυπτογράφηση που αναφέρεται ως «πρόκληση και απάντηση» και χρησιμοποιείται κυρίως από χειριστές δικτύου για την αναγνώριση χρηστών, γ) προστασία σηματοδότησης και δ) προστασία δεδομένων χρήστη. Η σηματοδότηση και η προστασία δεδομένων χρήστη υλοποιούνται επίσης με χρήση κρυπτογράφησης, ενώ σημαντικό ρόλο στα κλειδιά κρυπτογράφησης έχει και η SIM (Subscriber Identity Module) (Brookson, 1994). Τέλος, υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για τη διατήρηση του απορρήτου για τους χρήστες: α) η κρυπτογράφηση διαδρομής ραδιοφώνου και β) η TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity) (Gindraux, 2002).

Ωστόσο, παρά τις μεγάλες βελτιώσεις στην ασφάλεια και το απόρρητο τα δίκτυα 1G και 2G εξακολουθούν να παρουσιάζουν πολλές αδυναμίες, όπως για παράδειγμα ότι ο έλεγχος ταυτότητας είναι μονόδρομος, με αποτέλεσμα το δίκτυο να ελέγχει την ταυτότητα του χρήστη, αλλά οι χρήστες να μην μπορούν να ελέγξουν την ταυτότητα του δικτύου, γεγονός που οδηγεί σε κενά ασφαλείας. Επίσης, οι παράνομες συσκευές (π.χ. οι σταθμοί βάσης), μπορούν να μεταμφιεστούν ως νόμιμα μέλη του δικτύου, εξαπατώντας τους χρήστες και κλέβοντας τις πληροφορίες τους (Cattaneo, De Maio & Petrillo, 2013). Μία ακόμη σημαντική αδυναμία είναι πως η κρυπτογράφηση δεν είναι από άκρο σε άκρο, με αποτέλεσμα μόνο ένα μέρος του ασύρματου καναλιού να είναι κρυπτογραφημένο,

καθώς και το ότι δεν υπάρχει κρυπτογράφηση στο σταθερό δίκτυο, το οποίο παρέχει στους αντιπάλους την ευκαιρία για επίθεση [11]. Ένα ακόμη, ζήτημα είναι το μεγάλο πλήθος υποκλοπών, στις οποίες υπόκεινται η κρυπτογράφηση διαδρομής ραδιοφώνου και το TMSI (Wang et al., 2020).

2.1.3 Δίκτυο 3G

Το 2000 έκανε την εμφάνισή του το δίκτυο 3G και σκοπό είχε την παροχή «υψηλής ταχύτητας» μετάδοση δεδομένων και την πρόσβαση στο διαδίκτυο, που σημαίνει τουλάχιστον 2 Mbps, υποστηρίζοντας προηγμένες υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένης της περιήγησης στο web, της τηλεόρασης υπηρεσίες ροής και βίντεο, οι οποίες δεν υποστηρίζονταν στα δίκτυα 1G και 2G (Sharma, 2013).

Ωστόσο, η ασφάλεια του 3G βασίστηκε στις τεχνολογίες του 2G, ενώ χρειάστηκε να υιοθετηθούν και πρόσθετα ισχυρά στοιχεία ασφαλείας, με αποτέλεσμα την μείωση ορισμένων αδυναμιών ασφαλείας του 2G. Εισήγαγε τη συμφωνία ελέγχου ταυτότητας και κλειδιού (AKA-Authentication and Key Agreement) και τον αμφίδρομο έλεγχο ταυτότητας. Επιπλέον, το 3GPP (3rd Generation Partnership Project) παρέχει ένα πλήρες σύστημα ασφαλείας που διέπει την πρόσβαση που περιλαμβάνει δύο μέρη: α) ασφάλεια διεπαφής αέρα και β) την παροχή ελέγχου ταυτότητας δικτύου χρηστών. Η ασφάλεια διεπαφής αέρα, χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία των χρηστών και τις πληροφορίες σηματοδότησης που μεταδίδονται από ασύρματες συνδέσεις. Η παροχή ελέγχου ταυτότητας δικτύου χρηστών χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της φυσικής αξιοπιστίας των χρηστών και των δύο πλευρών του δικτύου. Όσον αφορά το απόρρητο, το 3GPP ενσωματώνει ορισμένες απαιτήσεις απορρήτου συνδρομητών για χρήστες 3G, όπως το απόρρητο της ταυτότητας του χρήστη, η τοποθεσία και η ιχνηλασιμότητα (Wang et al., 2020).

Ωστόσο, τα δίκτυα 3G εξακολουθούν να είναι ευάλωτα σε απειλές που σχετίζονται με την κυκλοφορία του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) και τα κλειδιά κρυπτογράφησης. Επίσης, η ραδιοεπικοινωνία μεταξύ του τερματικού εξοπλισμού και του δικτύου υπηρεσιών παρέχει επίσης ευκαιρίες για μια σειρά επιθέσεων, καλούμενες ως επιθέσεις ασύρματης διεπαφής, οι οποίες εμπίπτουν στις ακόλουθες κατηγορίες: α) μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε δεδομένα, β) απειλές για την ακεραιότητα, γ) άρνηση υπηρεσίας (DOS) και δ) μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε υπηρεσίες. Τέλος, τα ζητήματα απορρήτου σχετίζονται κυρίως με ορισμένους τύπους επιθέσεων, π.χ. τα μηνύματα σφάλματος AKA, τα

οποία έχουν σχεδιαστεί για να καταστρέφουν τις ταυτότητες των χρηστών και εμπιστευτικές ή ευαίσθητες πληροφορίες (Chuah, 2010).

2.1.4 Δίκτυο 4G

Το 2009, έκανε την εμφάνισή του το δίκτυο 4G των δικτύων LTE (Long-Term Evolution), το οποίο είχε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 1 Gbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη και έως 500 Mbits/s στην ανερχόμενη ζεύξη. Παρέχοντας καλύτερη απόδοση φάσματος και μειωμένη καθυστέρηση, γεγονός που του έδινε την δυνατότητα να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις προηγμένων εφαρμογών (π.χ. η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB), το περιεχόμενο τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HD TV), η συνομιλία μέσω βίντεο κ.λπ.) (Wang et al., 2020).

Το LTE ενσωματώνει ένα μείγμα υφιστάμενων και νέων τεχνολογιών, όπως η Συντονισμένη Μετάδοση και Λήψη Πολλαπλών Σημείων (CoMP-Coordinated Multi-Point Transmission and Reception), η Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλών Εξόδων (MIMO-Multiple Input Multiple Output) και η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) (Varshney, 2012).

Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι τα δίκτυα 4G περιλαμβάνουν δίκτυα κορμού IP, ασύρματα δίκτυα πυρήνα, δίκτυα ασύρματης πρόσβασης και έξυπνα κινητά τερματικά. Επομένως, οι σχετικές απειλές ασφαλείας προέρχονται κυρίως από τους τομείς: α) ασφάλεια ασύρματης σύνδεσης, β) υποκλοπή, γ) παραβίαση, δ) εισαγωγή ή διαγραφή δεδομένων και γ) ελέγχου ταυτότητας οντοτήτων δικτύου (Cao, 2013). Επίσης, το 4G δίκτυο είναι πιο ευάλωτο σε απειλές για την ασφάλεια και το απόρρητο από τα προηγούμενα δίκτυα, επειδή οι χρήστες αλληλεπιδρούν πιο στενά με τερματικά κινητής τηλεφωνίας. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιπλοκότητας και της διάδοση των απειλών μέσα στο δίκτυο 4G. Επιπλέον, λόγω βελτιώσεων στις υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες των τερματικών κινητής τηλεφωνίας, μπορεί να εκτελεστεί ένας αυξανόμενος αριθμός κακόβουλων προγραμμάτων (π.χ. ιοί, παραβίαση πλατφορμών υλικού, ευπάθειες λειτουργικού συστήματος κ.λπ.) γεγονός που μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη βλάβη. Ακόμη, λόγω ελαττωμάτων στα πρωτόκολλα διαχείρισης κλειδιών, τα πρότυπα παγκόσμιας διαλειτουργικότητας για πρόσβαση μικροκυμάτων (WiMAX) έχουν ορισμένες ευπάθειες στο επίπεδο MAC (Medium Access Control), όπως DoS, υποκλοπή και επανάληψη επιθέσεων. Τα δίκτυα LTE είναι επίσης ευάλωτα σε επιθέσεις DoS, επιθέσεις ακεραιότητας δεδομένων, παράνομη χρήση χρηστών και

κινητών συσκευών και παρακολούθηση τοποθεσίας του επιπέδου MAC (Wang et al., 2020; Seddigh, Nandy & Makkar, 2010).

2.1.5 Δίκτυο 5G

Το δίκτυο 5G, εισήχθη το 2010 και διαθέτει μεγαλύτερες ταχύτητες, πιο ολοκληρωμένα συστήματα και πιο ασφαλείς αρχιτεκτονικές (Gupta, Jain & Vaszkun, 2015). Προσφέρει την δυνατότητα της σύνδεσης ενός αυξανόμενου αριθμού συσκευών και της παροχής υπηρεσιών υψηλής ποιότητας για όλες τις συσκευές ταυτόχρονα. Επιπλέον, αυξάνει το εύρος των συσκευών που υποστηρίζονται, όπως είναι ο εξοπλισμός IoT (Wang et al., 2020; Cao, Ma, Li, Zhang & Luo, 2013). Σε αντίθεση με προηγούμενες γενιές, το 5G στοχεύει κυρίως σε σενάρια εφαρμογών IoT/βιομηχανίας. Με τη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των δικτύων 5G, ειδικά στα μεσαία και τελευταία στάδια του 5G, πολλές βιομηχανίες εντάσσονται στο οικοσύστημα 5G. Σε σύγκριση με την τρέχουσα κατάσταση, στην οποία κυριαρχούν οι παραδοσιακοί φορείς εκμετάλλευσης, η σε βάθος συμμετοχή εταιρειών νέου τύπου, στο μέλλον, θα έχει τεράστιο αντίκτυπο στον παραδοσιακό κλάδο των επικοινωνιών και, ίσως, θα γίνει ακόμη και επανάσταση, το λεγόμενο «φαινόμενο γατόψαρου» (Lu & Zheng, 2020).

Το δίκτυο 5G έχει ήδη αναπτύξει την τεχνητή νοημοσύνη σε ορισμένα στοιχεία του, όπως στην κωδικοποίηση και εκτίμηση καναλιών στο φυσικό επίπεδο, στην πολλαπλή πρόσβαση στο επίπεδο MAC και στις διάφορες εφαρμογές στο επίπεδο δικτύου (Huang et al., 2019). Ωστόσο, οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης δεν είναι κοινές και η υποστήριξη για τεχνολογίες αυτής στα δίκτυα 5G περιορίζεται από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική που είναι διαθέσιμη στα πρώτα στάδια της σύλληψής της. Παρά το γεγονός, λοιπόν, ότι το δίκτυο 5G ήδη επιτρέπει τη δυνατότητα αυτόνομης οδήγησης, και ορισμένα χρησιμοποιούνται ήδη από υπηρεσίες cloud που βασίζονται στο AI, δεν μπορούν να υποστηριχθούν οντότητες δικτύου με αυτογνωσία, αυτοπροσαρμογή ή πρόβλεψη Έτσι, παρόλο που το ευφύες πλεονέκτημα σε πραγματικό χρόνο, όπως τα δίκτυα οχημάτων και τα UAV (Unmanned Aerial Vehicle), έχει ήδη εφαρμοστεί για δίκτυα 5G, οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν σε «πραγματικό χρόνο», διότι ο έλεγχος ολόκληρου του δικτύου απαιτεί εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση δικτύου και ευφυΐα σε πραγματικό χρόνο και η τεχνολογία του δικτύου 5G είναι περιορισμένη και δημιουργεί μεγάλη καθυστέρηση. Επιπλέον, η κάλυψη 5G εξακολουθεί να είναι μόνο στο επίπεδο του εδάφους. διαστημικές και υποβρύχιες επικοινωνίες σε ορισμένα επίπεδα τρισδιάστατων ενδοεπικοινωνιών δεν είναι δυνατές (Wang et al., 2020; Kibria et al., 2018).

Τα ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου που προκύπτουν στα δίκτυα 5G χωρίζονται, με βάση την αρχιτεκτονική του δικτύου, σε τρία επίπεδα: α) τα δίκτυα πρόσβασης, στα οποία η ποικιλομορφία των κόμβων και των μηχανισμών πρόσβασης δημιουργεί ορισμένες νέες προκλήσεις ασφάλειας, καθώς οι μεταβιβάσεις μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης αυξάνουν τον κίνδυνο επίθεσης, β) τα δίκτυα backhaul, στα οποία η επικοινωνία γίνεται μεταξύ του σταθμού βάσης και του πυρήνα δικτύου, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ασύρματων καναλιών, μικροκυμάτων και μερικές φορές δορυφορικών δεσμών, καθώς και ενσύρματων γραμμών. Τα δίκτυα αυτά, αντιμετωπίζουν λιγότερες απειλές για την ασφάλεια και το απόρρητο από τα δίκτυα πρόσβασης, ωστόσο τα τρωτά τους σημεία προέρχονται από προσαρμοσμένα στοιχεία του δικτύου πρόσβασης, όπως το eNB (EUTRAN Node B) ή το MME (Mobility Management Entity) στο κεντρικό δίκτυο. Επιπλέον, το δίκτυο backhaul μετατοπίζεται στο επίπεδο δεδομένων χρησιμοποιώντας τις τεχνικές NFV (Network Functions Virtualization) και SDN (Software-Defined Networking), έτσι ώστε οι απειλές ασφαλείας να μεταδίδονται επίσης στο κεντρικό δίκτυο και γ) το κεντρικό δίκτυο, το οποίο περιλαμβάνει λειτουργίες και τεχνικές NFV, SDN και cloud, κάνοντάς το πιο δυναμικό, δημιουργώντας όμως μία μεγαλύτερη σειρά ευπαθειών. Για παράδειγμα, ένας τεράστιος αριθμός συσκευών και υπηρεσιών μπορεί να υπερκαλύψει το φορτίο σηματοδότησης, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα επίθεσης DoS ή πόρων (Wang et al., 2020; Jaber et al., 2016; Prados-Garzon et al., 2016).

Για την αντιμετώπιση υπερφορτώσεων σηματοδότησης, έχουν αναπτυχθεί δύο μέθοδοι: α) η χρήση ελαφρών πρωτοκόλλων ελέγχου ταυτότητας και συμφωνίας κλειδιού, με σκοπό την υποστήριξη της επικοινωνίας για έναν τεράστιο αριθμό συσκευών και β) η χρήση πρωτοκόλλων που επιτρέπουν την ομαδοποίηση των συσκευών μέσω διαφόρων πρωτοκόλλων AKA που βασίζονται σε ομάδες (Wang et al., 2020).

Όσον αφορά την ασφάλεια, οι νέες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου 5G δημιουργούν επίσης ζητήματα ασφαλείας, όπως π.χ. τα τεράστια MIMO βοηθούν στην απόκρυψη παθητικών και ενεργητικών υποκλοπών, η εφαρμογή OpenFlow του SDN αυξάνει τις απειλές από κακόβουλες εφαρμογές ή δραστηριότητες, το NFV εγείρει ζητήματα ασφάλειας ενώ μια υπηρεσία ή μια λειτουργία μεταφέρεται από έναν πόρο σε έναν άλλο κ.λπ. (Ahmad et al., 2019; Pattaranantakul et al., 2018).

Υπάρχουν επίσης νέα ζητήματα απορρήτου που πρέπει να αντιμετωπιστούν λόγω της ποικιλίας των τύπων εργασίας και των σεναρίων εφαρμογών στα δίκτυα 5G. Το άνοιγμα της πλατφόρμας μπορεί να σημαίνει ότι οι ευαίσθητες πληροφορίες ενός χρήστη μπορούν εύκολα και συχνά να αλλάζουν από κλειστή σε ανοιχτή κατάσταση. Αντίστοιχα, η κατάσταση επαφής αλλάζει από offline σε online, αυξάνοντας σημαντικά τον κίνδυνο διαρροών (Wang et al., 2020).

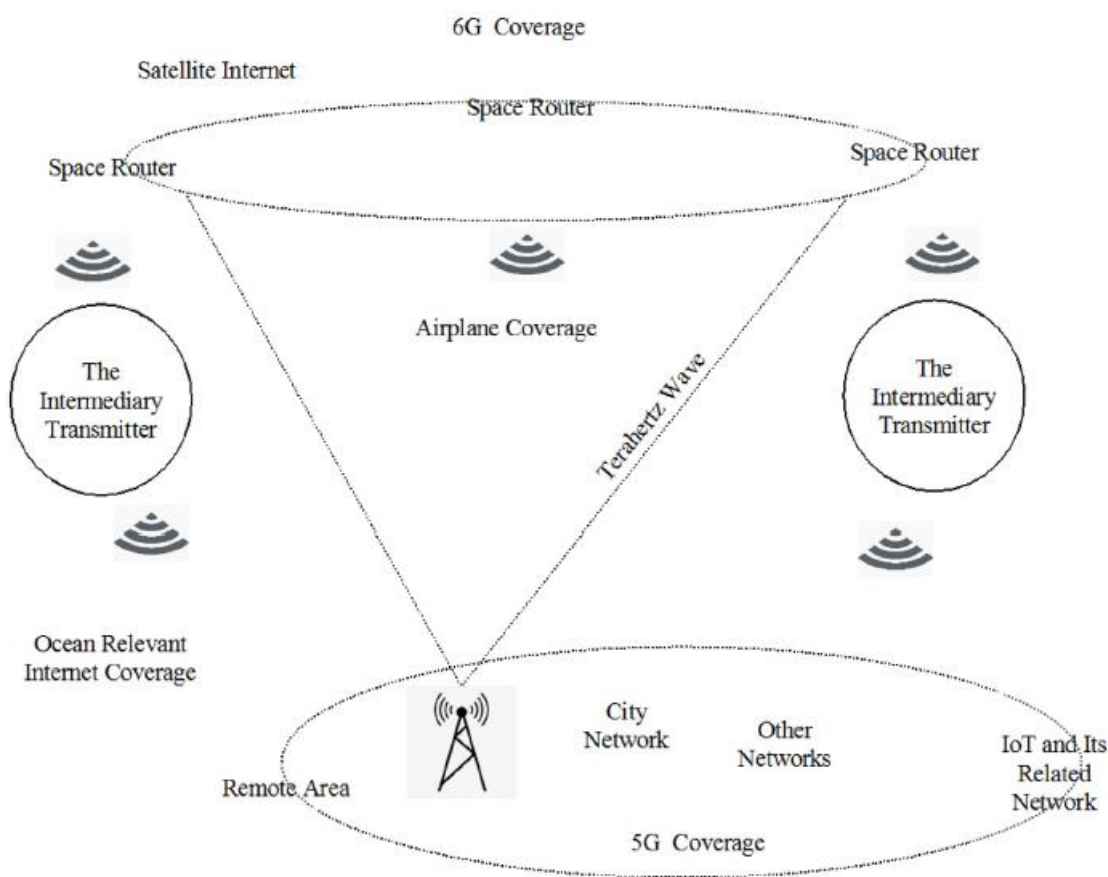
2.1.6 Δίκτυο 6G

Η ITU (Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών) ίδρυσε τον Μάιο του 2019, την IMT-2030 Standard με σκοπό τη διερεύνηση των τεχνολογιών επικοινωνίας, σημειώνοντας ότι το δίκτυο 6G στοχεύει α) να παρέχει μία επαναστατική εμπειρία χρήστη και β) να προσφέρει ένα νέο σύνολο αισθητηριακών πληροφοριών και εμπειριών. Το 6G θα είναι ένα συνδυαστικό σύστημα αποτελούμενο από πολλά διαφορετικά δίκτυα: τοπικά, κινητά κυψελωτά, ωκεάνια, δορυφόρους κ.λπ. (ITU, 2023).

Το δίκτυο 6G ενσωματώνει πλήρως συμβατές νέες έννοιες, νέες αρχιτεκτονικές, νέα πρωτόκολλα και νέες λύσεις για την υποστήριξη υπαρχόντων και μελλοντικών σεναρίων. Συγκεκριμένα, το σύστημα 6G είναι (Marco et al., 2020; Saad, Bennis & Chen, 2019; Zhao, Yu & Xu, 2019):

- ευφυής συνδεσιμότητα, η οποία αντικατοπτρίζεται σε όλη τη νοημοσύνη του συστήματος επικοινωνίας: την ευφυΐα των στοιχείων δικτύου και την αρχιτεκτονική δικτύου, την ευφυΐα του συνδεδεμένου αντικειμένου (τερματική συσκευή) και τις πληροφορίες που μεταφέρονται για την υποστήριξη της έξυπνης υπηρεσίας.
- Βαθιά συνδεσιμότητα. Η βαθιά συνδεσιμότητα σημαίνει βαθιά αίσθηση, βαθιά μάθηση και βαθύ μυαλό.
- Ολογραφική συνδεσιμότητα. Τα χαρακτηριστικά της ολογραφικής συνδεσιμότητας είναι η ολογραφική επικοινωνία παντού (και ανά πάσα στιγμή), η υψηλή πιστότητα και η απρόσκοπτη κάλυψη AR/VR/XR.
- Πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Η πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα είναι μια σύνδεση πολλαπλών διαστάσεων κάλυψης παντός εδάφους και παντός χώρου. Η διασύνδεση δικτύου έχει μετατοπιστεί από την τρέχουσα δισδιάστατη διασύνδεση στο έδαφος σε πολυδιάστατες οντότητες που καλύπτουν τη γη, τον ωκεανό, τον αέρα, το διάστημα, τον μικρόκοσμο και το εξωτερικό διάστημα. Το επίγειο σύστημα κινητής επικοινωνίας 6G, χρησιμοποιώντας τεχνολογία χωρικής

πολυπλεξίας, θα συνεργαστεί με το σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών για να σχηματίσει ένα δίκτυο, ενσωματώνοντας την επίγεια ασύρματη επικοινωνία. Δορυφορικό Διαδίκτυο υψηλού, μεσαίου και χαμηλού γεωγραφικού πλάτους. και θαλάσσιο Διαδίκτυο για να σχηματίσουν τη μέγιστη χωρητικότητα και την πανταχού παρούσα κάλυψη φάσματος υψηλής πυκνότητας (εικ. 2) (Huang et al., 2019; Katz, Pirinen & Posti, 2019; Letaief et al., 2019).

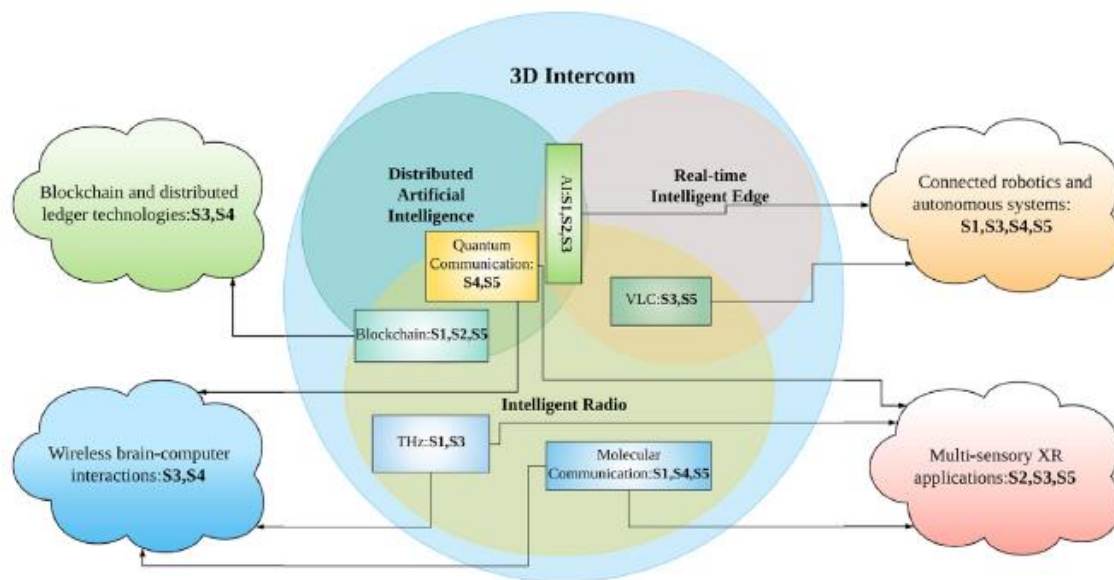


Εικόνα 2. Δίκτυο 6G πλήρους διαστάσεων

Με βάση τη γη, τη θάλασσα, το διάστημα και τον αέρα, το δίκτυο 6 G θα χρησιμοποιεί δορυφόρους υψηλής απόδοσης για τη δημιουργία αστερισμών δορυφορικής επικοινωνίας σε τροχιά (με βάση το διάστημα). Θα ενσωματώσει διάφορες πλατφόρμες για θαλάσσιες επικοινωνίες Διαδικτύου (με βάση τη θάλασσα) και επίγειες κινητές επικοινωνίες (με βάση την ξηρά) για να σχηματίσει ένα δίκτυο υψηλής ακρίβειας, υψηλής αξιοπιστίας που θα καλύπτει ολόκληρο τον κόσμο (Lu & Zheng, 2020). Τα Ηνωμένα Έθνη έχουν αναγνωρίσει το ιαπωνικό QZSS, το ινδικό IRNSS, το κινεζικό BeiDou, το Russian Glonass και το EU Galileo ως τα πέντε μεγαλύτερα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS.GOV, χ.χ.).

Θα πρέπει επίσης να έχει πολύ υψηλότερες δυνατότητες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Να είναι ένα δίκτυο «ενισχυμένο με AI» και όχι απλώς να χρησιμοποιεί AI στην αρχιτεκτονική του. Το δίκτυο 6G θα πρέπει να είναι μια βαθιά ενοποίηση των αναδυόμενων εργαλείων AI και λειτουργιών δικτύωσης (Wang et al., 2020; Letaief, 2019). Επιπλέον, αναπόσπαστο στοιχείο της αρχιτεκτονικής του δικτύου 6G, θα πρέπει να αποτελεί η μείωση του κινδύνου.

Τα τέσσερα βασικά στοιχεία ενός δικτύου 6G (εικ.1), είναι α) το Intelligent Edge σε πραγματικό χρόνο, β) κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη, γ) Intelligent Radio και δ) 3D ενδοεπικοινωνίες. Τα εν λόγω στοιχεία (κύκλοι στην εικ. 1) υπόκεινται στις περισσότερες ανησυχίες για την ασφάλεια και το απόρρητο (Wang et al., 2020).



Εικόνα 3. Ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου στο δίκτυο 6G.

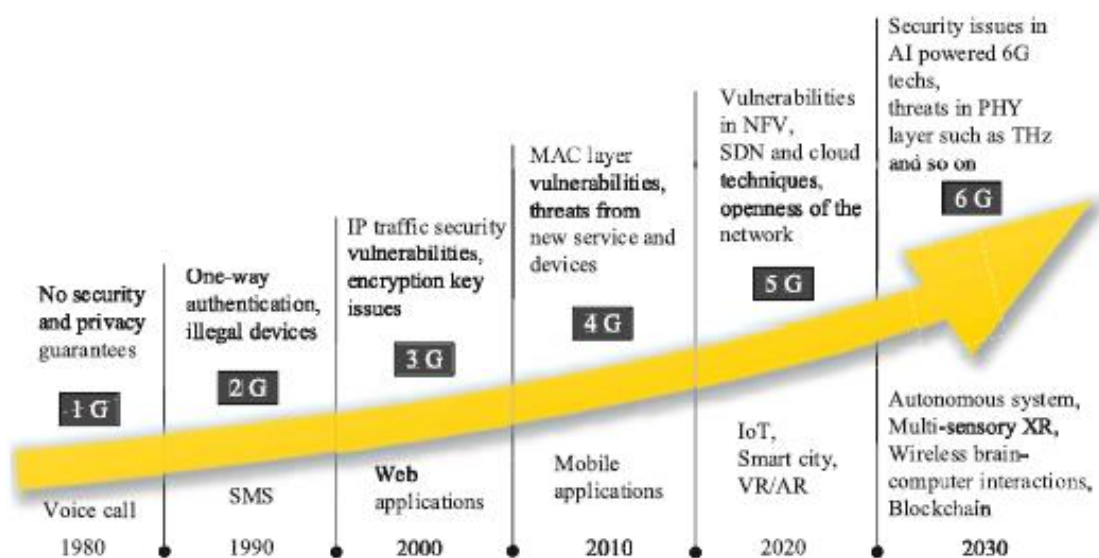
Όπου, S1: Έλεγχος ταυτότητας, S2: Έλεγχος πρόσβασης, S3: Κακόβουλες συμπεριφορές, S4: Κρυπτογράφηση, S5: Επικοινωνία.

Όλες αυτές οι τεχνολογίες υπόσχονται πολλά για χρήση σε διάφορες εφαρμογές δικτύου 6G (εικ.1), όπως εφαρμογές πολλαπλών αισθητήρων X Reality (πολυαισθητηριακές XR), συνδεδεμένη ρομποτική και αυτόνομα συστήματα, ασύρματες αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου-υπολογιστή, και τεχνολογίες blockchain και κατανεμημένων καθολικών (Wang et al., 2020).

Οι τρεις πρώτες περιοχές (κατανεμημένη περιοχή AI, ευφυής περιοχή ακμών σε πραγματικό χρόνο και ευφυής περιοχή ραδιοφώνου), περιέχουν τεχνολογίες που

διασταυρώνονται. Επιπλέον, η AI υπάρχει στη διασταύρωση και των τριών περιοχών, υποθέτοντας ότι τα δίκτυα 6G θα διαθέτουν AI.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα πέντε κύρια ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου. Τα περισσότερα στοιχεία αυτού του διαγράμματος είναι ευάλωτα σε έλεγχο ταυτότητας, έλεγχο πρόσβασης, κακόβουλης συμπεριφοράς, κρυπτογράφησης και μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, ορισμένες τεχνολογίες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε ορισμένα ζητήματα. Για παράδειγμα, το VLC, μαζί με το Intelligent Edge σε πραγματικό χρόνο και το Intelligent Radio, είναι ιδιαίτερα αδύναμο έναντι κακόβουλης συμπεριφοράς και διαδικασίας μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία μοριακής επικοινωνίας συνδέεται με ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου σχετικά με τον έλεγχο ταυτότητας, την κρυπτογράφηση και την επικοινωνία, ενώ η τεχνολογία THz υποφέρει ιδιαίτερα από ασφάλεια ελέγχου ταυτότητας και κακόβουλη συμπεριφορά. Η τεχνολογία blockchain και η κβαντική επικοινωνία επικαλύπτονται με την κατακεκομμένη τεχνητή νοημοσύνη και το Intelligent Radio.



Εικόνα 4. Εξέλιξη ζητημάτων ασφάλειας και απορρήτου σε ασύρματα συστήματα.

Τέλος, οι εφαρμογές 6G έχουν επίσης συγκεκριμένα τρωτά σημεία, όπως η κακόβουλη συμπεριφορά, η κρυπτογράφηση, έκθεση στη μετάδοση δεδομένων και επιθέσεις ελέγχου πρόσβασης. Για παράδειγμα, η συνδεδεμένη ρομποτική και τα αυτόνομα συστήματα βασίζονται συνήθως στην τεχνολογία AI και VLC, είναι επιρρεπείς σε κινδύνους κακόβουλης συμπεριφοράς, της κρυπτογράφησης και της μετάδοσης δεδομένων. Οι πολυαισθητηριακές εφαρμογές XR χρησιμοποιούν την τεχνολογία μοριακής επικοινωνίας, την τεχνολογία THz και την τεχνολογία κβαντικής επικοινωνίας, πράγμα που σημαίνει

ότι είναι επιρρεπείς σε επιθέσεις ελέγχου πρόσβασης, κακόβουλη συμπεριφορά και έκθεση στη μετάδοση δεδομένων. Οι ασύρματες αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου-υπολογιστή χρησιμοποιούν τις ίδιες τεχνικές με την εφαρμογή XR πολλαπλών αισθητήρων και έρχονται αντιμέτωπες με κακόβουλες συμπεριφορές και ευαισθησίες στην κρυπτογράφηση.

Ωστόσο, οι τελευταίες εφαρμογές του δικτύου 6G, οι τεχνολογίες blockchain και κατανεμημένου καθολικού (κυρίως βασισμένες σε blockchain) είναι σχετικά ασφαλείς.

Τέλος, οι βασικοί παράγοντες απόδοσης του 6G περιλαμβάνουν μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1 Tbps, έμπειρο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Gbps, πυκνότητα κυκλοφορίας 100 Tb/s/km², καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms, αξιοπιστία 99,9999%, τοποθέτηση σε επίπεδο εκατοστών και ευαισθησία δέκτη μικρότερη από -130 dBm. Πολλές ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην τρέχουσα παραγωγή δικτύου (π.χ. το χιλιοστό κυμάτων (mmWave) και το Sub-6 GHz) δεν ικανοποιούν τις αυξανόμενες απαιτήσεις στο 6G. Σε αυτό το πνεύμα, η επικοινωνία THz (0,1 THz έως 10 THz) που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 3 mm και 0,03 mm, θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση, καθώς μπορεί να παρέχει έως και 100 GHz εύρος ζώνης, που υπερβαίνει κατά πολύ τη ζώνη mmWave με εύρος ζώνης 10 GHz το πολύ (Banafaa et al., 2022; Chen et al., 2020).

2.2 Χώρες που συμμετέχουν στην ανάπτυξη 6G

Η ITU (Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών) ίδρυσε τον Μάιο του 2019, την IMT-2030 Standard με σκοπό τη διερεύνηση των τεχνολογιών επικοινωνίας. Πολλές κορυφαίες χώρες έχουν ξεκινήσει έρευνα και ανάπτυξη του δικτύου 6G, μεταξύ των οποίων οι ΗΠΑ, η Κίνα, η Νότια Κορέα, η Ιαπωνία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Φινλανδία κ.λπ. (πίν. 1) (Bang et al., 2023; Banafaa et al., 2022; Lu & Zheng, 2020; Yang, Xiao, Xiao & Li, 2019).

Πίνακας 1. Η ανάπτυξη του δικτύου 6G μεταξύ των χωρών

Χώρα	Στοιχεία
ΗΠΑ	Κατά τη διάρκεια του Παγκόσμιου Συνεδρίου για κινητά το 2018, οι Ηνωμένες Πολιτείες ανακοίνωσαν τις φιλοδοξίες τους για το 6G. Τον Σεπτέμβριο του 2018, η FCC (Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών) πρότεινε ότι το δίκτυο 6G θα χρησιμοποιούσε τεχνολογία ζώνης συχνοτήτων Terahertz. Το Ερευνητικό Κέντρο ComSenTer του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια έχει μελετήσει τη σύντηξη της επικοινωνίας και της αίσθησης Terahertz. Το Ασύρματο Κέντρο του

	Πανεπιστημίου της Νέας Υόρκης αναπτύσσει κανάλια που χρησιμοποιούν συχνότητες Terahertz με ταχύτητες μετάδοσης έως και 100 Gbps. Υπό την ηγεσία της ITU και της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών, οι Ηνωμένες Πολιτείες εξέτασαν μελέτες φάσματος THz, αναθεωρώντας τις απαιτήσεις υπηρεσιών και την ευφυΐα αιχμής στην περιοχή 95 GHz–3THz υπό την ηγεσία της ITU και της FCC [67].
Κίνα	Ο Υπουργός Βιομηχανίας και Πληροφορικής της Κίνας, σε συνέντευξή του το Μαρτίου 2018, δήλωσε πως έχει ήδη ξεκινήσει η έρευνα για το 6G. Στις 3 Νοεμβρίου 2019, η Κίνα ίδρυσε την National 6G R&D Promotion Group and Expert Group. Η Huawei Technologies Co., Ltd. πρότεινε το φάσμα συχνοτήτων των 6G να είναι ευρύτερο και το ποσοστό να είναι υψηλότερο. Στον τομέα της τεχνολογίας επικοινωνίας Terahertz, ορισμένες εταιρείες έχουν επίσης ξεκινήσει έρευνα και ανάπτυξη, όπως η China Telecom, η China Mobile, και China Unicom.
Νότια Κορέα	Τον Απρίλιο του 2019, το Κορεατικό Ινστιτούτο Επικοινωνιών και Επιστήμης Πληροφοριών άρχισε να αναπτύσσει το δίκτυο 6G και τις σχετικές βασικές τεχνολογίες. Η κυβέρνηση της Κορέας και οι επιχειρήσεις επένδυσαν (Samsung) από κοινού. Η LG Korea δημιούργησε ένα εργαστήριο 6G τον Ιανουάριο του 2019.
Ιαπωνία	Η Ιαπωνία σχεδιάζει να διαμορφώσει μια συνολική στρατηγική για την επίτευξη του δικτύου 6G έως το 2030 μέσω της συνεργασίας επίσημων-πολιτικών. Το σχέδιο φιλοξενείται από τον πρόεδρο του Πανεπιστημίου του Τόκιο στην Ιαπωνία και υποστηρίζεται από την Toshiba και άλλους ιαπωνικούς τεχνολογικούς γίγαντες. Το Πανεπιστήμιο της Χιροσίμα συνεργάστηκε με τον NICT (Οργανισμό Έρευνας Πληροφοριών) και με την Panasonic Corporation για την υλοποίηση επικοινωνιών terahertz στη ζώνη των 300 GHz, με βάση την τεχνολογία χαμηλού κόστους CMOS.
UK	Το Ηνωμένο Βασίλειο αναμένει ότι το δίκτυο 6G θα κυκλοφορήσει στο εμπόριο μέχρι το 2025. Το Πανεπιστήμιο Brown του Ηνωμένου Βασιλείου έχει εφαρμόσει μια μη διαισθητική μετάδοση ζεύξης δεδομένων Terahertz.
Φινλανδία	Το 2018, η Φινλανδία ξεκίνησε ερευνητικές πρωτοβουλίες με επικεφαλής το Πανεπιστήμιο του Oulu σχετικά με το φάσμα THz, τις εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και τον εντοπισμό και την ανίχνευση. Τον Μάρτιο του 2019, το Πανεπιστήμιο του Oulu, της Φινλανδίας πραγματοποίησε την πρώτη σύνοδο κορυφής 6G σε όλο τον κόσμο

όπου οι κορυφαίοι ειδικοί στον τομέα της επικοινωνίας συνέταξαν μαζί με την πρώτη πράξη για το δίκτυο 6G. Η Nokia, το Πανεπιστήμιο Oulu και το VTT της Φινλανδίας ξεκίνησαν το έργο «6Genesis-Wireless Smart Society and Ecosystem Support 6G», το οποίο επικεντρώθηκε στη μελέτη και ανάπτυξη της τεχνολογίας επικοινωνίας 6G. Με αυτή την πράξη γεννήθηκε ανεπίσημα η δικτύωση 6G ως πεδίο έρευνας. Έκτοτε, όλο και περισσότερες κυβερνήσεις και οργανισμοί έχουν ανακοινώσει την εισαγωγή των ερευνητικών τους έργων στο δίκτυο 6G ² .
--

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, τον Οκτώβριο του 2018, ανακοίνωσε την έναρξη της πρόσκλησης ICT-20–2019 «5G Long Term Evolution» στο πλαίσιο του όγδοου Προγράμματος Πλαισίου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (FPS) που ονομάζεται Horizon 2020. Οκτώ αποδεκτά έργα³, επιλέχθηκαν μέσω μιας διαδικασίας άκρως ανταγωνιστικής αξιολόγησης στην πρόσφατη πρόσκλησή τους ICT-52–2020 Smart Connectivity Beyond 5G» δηλώνουν ρητά ότι το όραμά τους είναι να παρέχουν πρώιμες ερευνητικές δραστηριότητες στο 6G (Banafaa et al, 2022).

Επιπλέον, τον Φεβρουάριο του 2020, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε το στρατηγικό της σχέδιο για επιτάχυνση των επενδύσεων στη «Συνδεσιμότητα Gigabit» της Ευρώπης, συμπεριλαμβανομένων των 5G και 6G, προκειμένου να διαμορφωθεί το ψηφιακό μέλλον της Ευρώπης (Banafaa et al., 2022).

Τέλος και άλλες χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ινδίας, της Ρωσίας και άλλων, έχουν ανακοινώσει και υλοποιούν καινοτόμα σχέδια για την ανάπτυξη έργων έρευνας και ανάπτυξης 6G, ώστε να είναι έτοιμοι για 6G έως το 2030 (Bang et al., 2023).

2.3 Δείκτες Οράματος και Απόδοσης του δικτύου 6G

Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων για δίκτυα 5G είναι 20 GB/s, ενώ τα δίκτυα 6G μπορούν να φτάσουν το 1-10 TB/s λόγω της χρήσης Terahertz και οπτικών ασύρματων ζωνών. Σε

² π.χ. η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου ανακοίνωσε την πρόθεσή της να επενδύσει σε τεχνικές και τεχνολογίες με πιθανές χρήσεις σε δίκτυα 6G, η Ακαδημία της Φινλανδίας ανακοίνωσε την έναρξη ενός ερευνητικού προγράμματος με το όνομα «6 Genesis», το οποίο επικεντρώνεται στη θεμελιώδη έρευνα, κ.λπ.

³ Συμπεριλαμβανομένου του 5G-COMPLETE και 5G-CLARITY.

σύγκριση με το 5G, η χρήση AI για τη βελτίωση της διαχείρισης δικτύου μπορεί να αυξήσει την απόδοση του φάσματος κατά 3-5 φορές και την ενεργειακή απόδοση κατά 10 φορές. Η χρήση εξαιρετικά HetNets, μιας ποικιλίας σεναρίων επικοινωνίας και των μεγάλων εύρους ζώνης σε ζώνες υψηλής συχνότητας θα οδηγήσει στη σημαντική αύξηση της πυκνότητας σύνδεσης (από 10-100 φορές). Λόγω των κινήσεων των ultra-HST και των δορυφόρων, θα είναι δυνατή η κινητικότητα σε ταχύτητες μεγαλύτερες από χιλιάδες km/h. Η αποδεκτή καθυστέρηση θα είναι μικρότερη από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου (Bang et al., 2023).

Άλλοι βασικοί δείκτες απόδοσης, όπως η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, η ασφάλεια, η κάλυψη και το επίπεδο ευφυΐας, θα πρέπει να αναπτυχθούν προκειμένου να διερευνηθούν διεξοδικά τα δίκτυα 6G. Τα δίκτυα επικοινωνίας 6G θα πρέπει να κάνουν σημαντικές αλλαγές και να επικεντρωθούν σε νέες τεχνολογίες που επιτρέπουν την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων εφαρμογών και των στόχων απόδοσης. Η παγκόσμια κάλυψη, η χρήση πλήρους φάσματος και η ισχυρή ενδογενής ασφάλεια είναι από τις πιο πρόσφατες αλλαγές (Series, 2015; Marzetta, 2010).

Για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης, τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας 6G θα επεκταθούν από τα επίγεια σε ολοκληρωμένα δίκτυα διάστημα-αέρας-εδάφους-θαλάσσης. Αυτά τα δίκτυα θα περιλαμβάνουν τις χρήσεις δορυφόρων, UAV, επίγεια UDNs (Ultra-Dense Networks), υπόγειες και υποβρύχιες επικοινωνίες. Για να βελτιωθούν οι ρυθμοί δεδομένων, όλες οι φασματικές ζώνες θα πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά, συμπεριλαμβανομένων των κάτω των έξι GHz, των κυμάτων χιλιοστών, των terahertz και των ασύρματων οπτικών ζωνών. Για την ενεργοποίηση περιεκτικών εφαρμογών, οι βασικές τεχνολογίες και οι εφαρμογές επόμενης γενιάς θα ενσωματωθούν σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση AI και μεθοδολογιών επιστήμης δεδομένων. Επιπλέον, η AI μπορεί να ενισχύσει την απόδοση του δικτύου επιτρέποντας δυναμική και βέλτιστη χρήση πόρων δικτύωσης και υπολογιστών. Τέλος, η ολοκληρωμένη ή ενσωματωμένη ασφάλεια δικτύου, συμπεριλαμβανομένης της ασφάλειας φυσικού επιπέδου και επιπέδου δικτύου, θα γίνεται όλο και πιο δημοφιλής κατά την ανάπτυξη δικτύων 6G (Wang et al., 2014).

2.4 Απαιτήσεις και Τεχνολογίες Ασύρματης Επικοινωνίας 6G.

Αρκετές απαιτήσεις από τους τελικούς χρήστες και τις τεχνολογίες θα επηρεάσουν το σύστημα 6G. Αυτές οι απαιτήσεις υψηλότερου επιπέδου συνεπάγονται, φυσικά, περισσότερη δημιουργική τεχνολογική βοήθεια. Αναφορικά έχουν ως εξής (Bang et al., 2023):

- **Dynamic Spectrum Allocation:** Στα δίκτυα 6G, η μεγάλη απόδοση απαιτεί τεράστια ευελιξία. Η δυναμική κατανομή φάσματος απαιτεί την ευέλικτη χρήση αντιληπτικών πληροφοριών περιβάλλοντος.
- **Network Slicing:** Οι χειριστές δικτύου σε δίκτυο επικοινωνιών νέας γενιάς χρησιμοποιούν τεχνολογία δυναμικής κοπής δικτύου για να ενεργοποιήσουν αποκλειστικά εικονικά δίκτυα. Αυτό βοηθά στη διευκόλυνση της αποτελεσματικής παροχής οποιασδήποτε υπηρεσίας σε ένα διαφορετικό σύνολο πελατών, αυτοκινήτων, εξοπλισμού και βιομηχανιών.
- **Έξυπνα Συστήματα Κεραιών:** Λόγω της αυξανόμενης συχνότητας, απαιτείται μαζική χρήση πολυάριθμων συστημάτων κεραιών. Η τεχνική MIMO είναι ικανή να στέλνει και να λαμβάνει σήματα χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες. Μια άλλη σημαντική τεχνική κεραίας είναι η ολογραφική διαμόρφωση δέσμης, η οποία χρησιμοποιεί κεραίες που καθορίζονται από λογισμικό, προσφέροντας εξαιρετικά αποτελέσματα.
- **Αναλύσεις Μεγάλων Δεδομένων:** Η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων μεγάλης κλίμακας απαιτεί προηγμένη τεχνολογία και κατανόηση σε βάθος. Ο όγκος των δεδομένων στο 6G θα είναι τεράστιος και θα υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων δεδομένων. Η επεξεργασία μεγάλων δεδομένων απαιτεί κατανόηση των υποκείμενων προτύπων και των κρυφών συνδέσεων μέσα στα δεδομένα.
- **Backhaul Υψηλής Χωρητικότητας:** Για αποτελεσματικές επικοινωνίες, τα δίκτυα αυτά είναι ιδιαίτερα ελκυστικά. Τα συστήματα οπτικών ινών υψηλής ταχύτητας και FSO (Free Space Optical) είναι οι κατάλληλη επιλογή στο πλαίσιο της υπερβολικής κίνησης backhaul.
- **Ενσωμάτωση Τεχνολογίας Ραντάρ με Τεχνολογίες Κινητής Τηλεφωνίας:** Για να διασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια της γεωγραφικής θέσης στον τομέα της επικοινωνίας και να γίνουν πιο εύκολες οι επικοινωνίες με ραντάρ, το σύστημα ραντάρ θα συνδεθεί με ασύρματες επικοινωνίες 6G.

- Ενσωμάτωση της Μεταφοράς Ενέργειας με Ασύρματες Πληροφορίες: Η ασύρματη φόρτιση συσκευών μπαταρίας θα είναι δυνατή με δίκτυα 6G, διευκολύνοντας ταυτόχρονα και τη μεταφορά πληροφοριών. Η ασύρματη μετάδοση ενέργειας απαιτεί την ασύρματη φόρτιση μικροσκοπικών συσκευών (π.χ. τα κινητά τηλέφωνα) ή μεγάλων συσκευών (π.χ. τα αυτοκίνητα), γεγονός που όχι μόνο διασφαλίζει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας αλλά επιτρέπει επίσης τη φόρτιση ανά πάσα στιγμή και σε οποιαδήποτε τοποθεσία.
- Ενσωμάτωση Ανίχνευσης και Επικοινωνίας: Η συνεχής παρατήρηση του ασύρματου περιβάλλοντος και η μεταφορά πληροφοριών μεταξύ πολλαπλών κόμβων μαζί με την πραγματοποίηση δυναμικών αλλαγών θα απαιτούνταν στο 6G. Αυτό θα κάνει τη γνωστική ασύρματη επικοινωνία πιο προσαρμοστική σε πολύ δυναμικές, πολύπλοκες ηλεκτρομαγνητικές ρυθμίσεις.
- Λογισμικό και Εικονικοποίηση: Η ευελιξία, η επαναδιαμόρφωση και ο προγραμματισμός διασφαλίζονται όλα μέσω του softening και της virtualization. Επιπλέον, θα επιτρέψουν την κοινή χρήση δισεκατομμυρίων συσκευών μέσω μιας κοινής φυσικής υποδομής.
- Τεχνητή Νοημοσύνη: Οι ασύρματες επικοινωνίες θα φέρουν επανάσταση στο μέλλον ως αποτέλεσμα ουσιαστικών εξελίξεων στην τεχνητή νοημοσύνη σε πολλούς τομείς. Η ΑΙ χρησιμοποιεί εντατική ανάλυση για την ανάλυση περίπλοκων στόχων, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και μειώνοντας τον λανθάνοντα χρόνο επικοινωνίας.
- Κβαντική Επικοινωνία (QC): Η QC έχει τεράστια ικανότητα επεξεργασίας. Σε έναν τεράστιο χώρο προϊόντων, η QC μπορεί να κάνει παράλληλη επεξεργασία πολυδιάστατων μεγάλων δεδομένων. Σε μελλοντικές επικοινωνίες 6G, η QC θα επιτύχει εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και ασφάλεια σύνδεσης.
- Επικοινωνίες Terahertz: Αυτό σχετίζεται με τη μετάδοση σε μικρή απόσταση υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιεί ένα τεράστιο εύρος συχνοτήτων πέρα από τα 100 GHz, μεταφέροντας επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων στην απελευθερωμένη ζώνη χαμηλότερης συχνότητας. Το Terahertz έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο λεπτό και έχει καλύτερη κατευθυντικότητα, καθιστώντας το ιδανικό για MIMO. Ωστόσο, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με το ξεθώριασμα μεγάλης κλίμακας, τη χρήση ρεύματος και άλλους παράγοντες.
- Οπτική Ασύρματη Τεχνολογία: Βασίζεται σε ζώνες οπτικών συχνοτήτων, όπως Επικοινωνία ορατού φωτός (VLC), πιστότητα φωτός και επικοινωνία οπτικού

ελεύθερου χώρου (FSO). Τόσο σε εξωτερικές όσο και σε εσωτερικούς χώρους, η οπτική ασύρματη επικοινωνία μπορεί να προσφέρει υψηλή απόδοση δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση.

- Ακριβής Εντοπισμός Εσωτερικού Χώρου: Η τοπική προσαρμογή σε εσωτερικούς χώρους θα γίνει πιο σημαντική στις επικοινωνίες 6G. Πολλές υποσχόμενες λύσεις (π.χ. κατανεμημένα μοντέλα), θα απαιτούν συστήματα εντοπισμού θέσης υψηλής ακρίβειας για να βοηθήσουν την αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Η ακρίβεια είναι ανάγκη για αποτελεσματικότητα. Το εσωτερικό περιβάλλον επικοινωνίας θα γίνεται όλο και πιο περίπλοκο όσο αυξάνεται ο αριθμός των φορητών συσκευών και των χρηστών. Απαιτείται εντοπισμός εσωτερικών χώρων με υψηλή ακρίβεια και η ασύρματη τοπική προσαρμογή υψηλής ακρίβειας σε εσωτερικούς χώρους θα βοηθήσει την εικονική πραγματικότητα (VR) και άλλα σχετικά συστήματα.

3 Βασικές Περιοχές Δικτύου 6G

Στα δίκτυα 6G υπάρχει υποστήριξη για την κατανομημένη AI ή το Intelligent Radio (περιοχές που βασίζονται πλήρως σε AI) και σε αντίθεση με το δίκτυο 5G, το δίκτυο 6G μπορεί να αντιμετωπίσει σε «πραγματικό χρόνο» καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, καθότι ο λανθάνοντας χρόνος ραδιοφώνου των δικτύων 6G είναι 0,1 ms, που είναι το $\frac{1}{10}$ από εκείνο των δικτύων 5G. Επιπλέον, η κάλυψη του 6G δεν περιορίζεται μόνο στο επίπεδο του εδάφους, αλλά φθάνει σε διαστημικές και υποβρύχιες επικοινωνίες σε ορισμένα επίπεδα τρισδιάστατων ενδοεπικοινωνιών (Wang et al., 2020).

Έτσι, στη συνέχεια, περιγράφονται αυτές οι τέσσερις περιοχές των δικτύων 6G και τα πιθανά ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου που αναμένεται να αντιμετωπισθούν σε αυτούς τους τομείς.

3.1 Έξυπνο Πλεονέκτημα σε Πραγματικό Χρόνο

Όπως ήδη έχει αναφερθεί παραπάνω τα δίκτυα οχημάτων και τα UAV (Unmanned Aerial Vehicle) δεν μπορούν να εφαρμοστούν, πλήρως στο δίκτυο 5G, διότι το δίκτυο αυτό παρουσιάζει μεγάλη καθυστέρηση. Την λύση σε αυτό καλείται να δώσει ένα νέο δίκτυο που μπορεί να χειριστεί αυτές τις λειτουργίες και να υποστηρίξει τέτοιες διαδραστικές υπηρεσίες που τροφοδοτούνται από AI. Για παράδειγμα, στα δίκτυα οχημάτων, η ευφυής άκρη σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει μια αυτόνομη απόκριση οδήγησης σε ένα άγνωστο περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο (Huang, 2019). Επιπλέον, ορισμένες νέες τεχνολογίες, όπως το VLC, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις επικοινωνίες όχημα με όχημα. Αξίζει να αναφερθεί πως, όταν η τεχνητή νοημοσύνη / μηχανική μάθηση αναπτύσσεται σε δίκτυα οχημάτων, η τεχνολογία προωθεί ορισμένους βασικούς αλγόριθμους ασφαλείας πέρα από τη μηχανική μάθηση. Ωστόσο, παρουσιάζει επίσης ορισμένες νέες προκλήσεις ασφαλείας (Wang et al., 2020).

Σύμφωνα με τους Tang et al. (2020) ένα δίκτυο οχημάτων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το φυσικό περιβάλλον, επειδή, σε κάποιο βαθμό, αυτό μπορεί να περιορίσει την απειλή κακόβουλων οχημάτων και όχι μόνο το περιβάλλον του δικτύου. Καθώς επίσης, να λαμβάνεται υπόψη η ομαδική συμπεριφορά σε ομαδικά οχήματα.

3.2 Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη

Το δίκτυο 6G θα πρέπει να είναι συμβατό με το IoE (Internet of Everything). Λαμβάνοντας υπόψιν το προηγούμενο, είναι σχεδόν βέβαιο πως το δίκτυο 6G θα είναι ένα μεγάλο αποκεντρωμένο σύστημα ικανό να λαμβάνει έξυπνες αποφάσεις σε διαφορετικά επίπεδα (Huang et al., 2019). Επιπλέον, το δίκτυο θα χρειαστεί κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη ώστε να ικανοποιεί πολλαπλές απαιτήσεις, δεδομένου ότι όλα σε αυτό είναι συνδεδεμένα στο διαδίκτυο. Ακόμη, προκύπτει πως το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης θα πρέπει να κατανέμεται άνισα στις περισσότερες συσκευές άκρων, ενώ κάθε συσκευή ακμών θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα πρόσβασης και ελέγχου μέρους των δεδομένων. Η συσκευή άκρων θα πρέπει επίσης να μπορεί να υπολογίζει και να αποθηκεύει δεδομένα ανεξάρτητα. Επίσης, θα πρέπει να μπορεί να μειώνει τις διαστάσεις, τα καθαρά δεδομένα και τα αφηρημένα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, τα κοινά δεδομένα λειτουργούν ως εκπαιδευτικό σύνολο πέρα από την αντιμετώπισή τους ως προσωπικές πληροφορίες. Εφαρμόζοντας τη προσέγγιση αυτή σωστά, μπορεί ακόμη και να βελτιωθεί η ασφάλεια και το απόρρητο του δικτύου (Tomkos et al., 2020).

Τα ζητήματα ασφαλείας που σχετίζονται με την κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη λαμβάνουν χώρα στο μοντέλο εκπαίδευσης (π.χ. ένας κακόβουλος χρήστης μπορεί να ενημερώσει ένα δηλητηριασμένο μοντέλο για την ολοκληρωτική αλλοίωσή του), αλλά και σε επίπεδο συσκευής. Επιπλέον, τα μοντέλα μηχανικής εκμάθησης θα πρέπει να βελτιωθούν για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των δεδομένων, εξασφαλίζοντας έτσι και τη διαρκή ασφάλεια των επικοινωνιών και του ελέγχου. Ορισμένα ζητήματα ελέγχου ταυτότητας, αναμένεται να λυθούν με μηχανισμούς που μοιάζουν με blockchain (Wang et al., 2020; Tomkos et al., 2020; Loven et al., 2019).

3.3 Intelligent Radio

Σύμφωνα, με τις πρόσφατες εξελίξεις στα κυκλώματα και τις κεραίες, κατέστη δυνατός ο διαχωρισμός του υλικού από τους αλγόριθμους πομποδέκτη, πράγμα που σημαίνει ότι το Intelligent Radio θα μπορούσε να λειτουργήσει ως ενιαίο πλαίσιο. Σύμφωνα με αυτό το παράδειγμα, οι αλγόριθμοι πομποδέκτη θα μπορούσαν να διαμορφωθούν δυναμικά και να ενημερώνονται με βάση τις πληροφορίες υλικού (Huang et al., 2019).

Σύμφωνα με του Yang et al. (2019) οι τεχνικές ραδιοφώνου και δικτύωσης που καθορίζονται από λογισμικό θα μπορούσαν να συνδυαστούν για να αξιοποιήσουν πολλαπλές ζώνες υψηλής συχνότητας και να χρησιμοποιήσουν δυναμικά διαφορετικές

συχνότητες, καθιστώντας δυνατή την υποστήριξη για Intelligent Radio. Οι Huang et al. (2019) παρουσίασαν ένα λειτουργικό σύστημα και μια γλώσσα διεπαφής που βασίζεται σε πληροφορίες υλικού και μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, στις οποίες οι αλγόριθμοι πομποδέκτη μπορούν να διαμορφωθούν. Επίσης, η έξυπνη ραδιοϋποστήριξη θα πρέπει να ικανοποιεί διάφορες απαιτήσεις, όπως, η προσαρμοστικότητα της ζώνης συχνοτήτων στο περιβάλλον και το υλικό, η σταθερά ενεργοποιημένη με AI, κοινή χρήση φάσματος, η ηλεκτρονική εκτίμηση των δυνατοτήτων του υλικού κ.λπ. (Wang et al., 2020).

Περαιτέρω, οι Jiang et al. (2016) στην έρευνά τους εντόπισαν στοιχεία για ορισμένες παρεμβολές ευρείας ζώνης και ζητήματα εμπλοκής σήματος, στη διαδικασία μετάδοσης δεδομένων που θα μπορούσαν να απειλήσουν την ασφάλεια των δεδομένων, ενώ οι Tariq et al. (2019) διαπίστωσαν ότι οι ύποπτες δραστηριότητες από κακόβουλους κόμβους θα πρέπει να μπορούν να προβλεφθούν κατά τις διαδικασίες επικοινωνίας.

3.4 3D Ενδοεπικοινωνία

Στα δίκτυα 6G, είναι απαραίτητη η αύξηση των δυνατοτήτων ανάλυσης, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης δικτύου από δύο διαστάσεις σε τρεις, καθώς και η δυνατότητα υποστήριξης επικοινωνιών στον τρισδιάστατο χώρο, ώστε να έχουν την ικανότητα φιλοξενίας δορυφόρων, UAV και υποθαλάσσιων επικοινωνιών. Μια τρισδιάστατη ενδοεπικοινωνία θα μπορούσε να παρέχει αυτήν την υπηρεσία ανάλογα με την τοποθεσία και τον χρόνο που απαιτείται. Για παράδειγμα, όταν εμφανίζεται μια έκτακτη ανάγκη σε μια απομακρυσμένη περιοχή, η ανάπτυξη και η απόκριση των δικτύων UAV είναι πιο οικονομική από τη χρήση δικτύων 4G ή 5G, επειδή η σταθερή υποδομή που σχετίζεται με αυτές τις γενιές δεν μπορεί να μεταφερθεί (Dang et al., 2020; Strinati et al., 2019).

Ωστόσο, απαιτείται νέα βελτιστοποίηση του δικτύου για την προσθήκη των διαστάσεων του υψομέτρου και των σχετικών βαθμών ελευθερίας και την επίτευξη διαχείρισης κινητικότητας, δρομολόγησης και διαχείρισης πόρων στο πλαίσιο της 3D-ενδοεπικοινωνίας (Saad, Bennis & Chen, 2019). Ακόμη, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν μερικές νέες τεχνολογίες, όπως η μοριακή επικοινωνία και η κβαντική επικοινωνία, λόγω της καταλληλότητάς τους για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων (Tariq et al., 2019). Ωστόσο, για την περίπτωση αυτή, οι Wei et al. (2019) προειδοποιεί ότι υπάρχουν ορισμένα ζητήματα ασφαλείας με τη διαδικασία ελέγχου ταυτότητας κατά τη χρήση του συστήματος πλοήγησης Beidou. Ακόμη, οι Yao et al. (2018) έχουν προτείνει την τεχνολογία STIN (Space-Terrestrial Integrated Network), η οποία είναι μια σύγκλιση των δορυφορικών

επικοινωνιών, του Διαδικτύου και της ασύρματης δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση επηρεάζεται από ορισμένα προβλήματα επικοινωνίας unicast και multicast με τη διαχείριση κλειδιών.

Σε εναέριο επίπεδο, οι Gupta et al. (2015) ανακάλυψαν ότι ένας από τους μηχανισμούς ασφαλείας του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο παράδοσης UAV είναι πολύ αδύναμος. Επιπλέον, οι Chen et al. (2019) περιέγραψε μια μέθοδο επίθεσης που βασίζεται σε Android που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να θέσει σε κίνδυνο οποιοδήποτε UAV που εκτελεί το σύστημα Android. Σε διαστημικό επίπεδο, οι ζώνες THz διερευνώνται και δοκιμάζονται επί του παρόντος, καθώς οι δορυφόροι πρέπει να χρησιμοποιούν ρυθμιζόμενες ζώνες συχνοτήτων και τέλος, οι υποβρύχιες επικοινωνίες παραμένουν αμφιλεγόμενες λόγω της περίπλοκης φύσης του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος (Wang et al., 2020).

4 Τεχνολογικές Κατευθύνσεις προς το 6G

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ορισμένες βασικές τεχνολογίες αποδεικνύονται ήδη χρήσιμες σε κρίσιμους τομείς του δικτύου 6G, παρέχοντας σε αυτά, υψηλή αξιοπιστία, χαμηλή καθυστέρηση, ασφαλείς και αποτελεσματικές υπηρεσίες μετάδοσης κ.λπ.. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες δημιουργούν νέους προβληματισμούς για την ασφάλεια και το απόρρητο.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε και θα επεξηγήσουμε τις τεχνολογικές επιδόσεις και τις βασικές τεχνολογίες του δικτύου 6G, θα αναφερθούμε στις δυνατότητές τους, στις υπάρχουσες προκλήσεις και στις πιθανές λύσεις, συμπεριλαμβανομένου των θεμάτων ασφάλειας και απορρήτου που σχετίζονται με βασικές τεχνολογίες 6G.

4.1 Επίδοση δικτύου 6G

Στο δίκτυο 6G, θα υπάρχουν προηγμένες επιδόσεις που συναντιούνται για πρώτη φορά στην ανάπτυξη ΤΠΕ, όπως το VLC (Επικοινωνία Ορατού Φωτός), το WTI (Ασύρματο Απτικό Διαδίκτυο) και το HPC (Υπολογιστικός Υψηλής Απόδοσης) (Chowdhury et al., 2019; Shafin et al., 2020). Μερικά από τα πλεονεκτήματά του θα είναι τα εξής (Alwis et al., 2023; Lu & Zheng, 2020):

- ο υψηλός ρυθμός αιχμής $\rightarrow$ 1 Tbps (αντί των 20 Gbps στο δίκτυο 5G),
- το υψηλό ποσοστό εμπειρίας χρήστη υπολογίζεται 10 Gbps (αντί του μέγιστου 1 Gbps στο δίκτυο 5G),
- η χαμηλή καθυστέρηση $\rightarrow$ 0,1 ms (αντί του 1 ms στο δίκτυο 5G),
- η υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας $\rightarrow$ μεταξύ 100-10.000 Tb/s/km²,
- η υψηλή πυκνότητα σύνδεσης,
- η ισχυρή κινητικότητα $\rightarrow$ >1000 km/h (αντί τα 500 km/h στο δίκτυο 5G),
- η υψηλή απόδοση φάσματος $\rightarrow$ 200–300 bps/Hz (αντί τα 100 bps/Hz στο δίκτυο 5G),
- η ικανότητα ισχυρής τοποθέτησης $\rightarrow$ για Εξωτερικό 1m και Εσωτερικό 10 cm (αντί των 10m για Εξωτερικό και περίπου 1m για Εσωτερικό στο δίκτυο 5G),

- η ισχυρή ικανότητα υποστήριξης φάσματος → 20 GHz για συμβατικό εύρος ζώνης φορέα και 100 GHz για συνάθροιση πολλαπλών φορέων (αντί των 100 GHz για εύρος ζώνης υποσυμβατικού φορέα και 200 GHz για συνάθροιση πολλών φορέων στο δίκτυο 5G),
- η υψηλή αξιοπιστία (ποσοστό κωδικοποίησης σφάλματος) → λιγότερο από 1/1.000.000 (αντί το 1/100.000 στο δίκτυο 5G),
- η υψηλή ενεργειακή απόδοση δικτύου → 200 bit/J (αντί των 100 bit/J στο δίκτυο 5G),
- ευαισθησία δέκτη → < -130 dBm
- κ.λπ.

4.2 Βασικές Τεχνολογίες στο 6G

Ειδικότερα, οι βασικές τεχνολογίες του δικτύου 6G περιλαμβάνουν τεχνολογία και σύστημα ασύρματης επικοινωνίας (π.χ. επικοινωνία THz, επικοινωνία ορατού φωτός κ.λπ), κεραία επόμενης γενιάς και βασικά συνθετικά υλικά, τεχνικές κωδικοποίησης καναλιών και διαμόρφωσης (π.χ. κωδικοποίηση καναλιών, μη ορθογώνιο κύμα, σύστημα πολλαπλής πρόσβασης κ.λπ.), κοινή χρήση φάσματος (π.χ. free duplex, full duplex, δυναμική κοινή χρήση φάσματος κ.λπ.) και άλλες ενσωματωμένες νέες τεχνολογίες (π.χ. AI, IoT, τεχνολογία blockchain κ.λπ.).

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε μερικές από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες του 6G δικτύου.

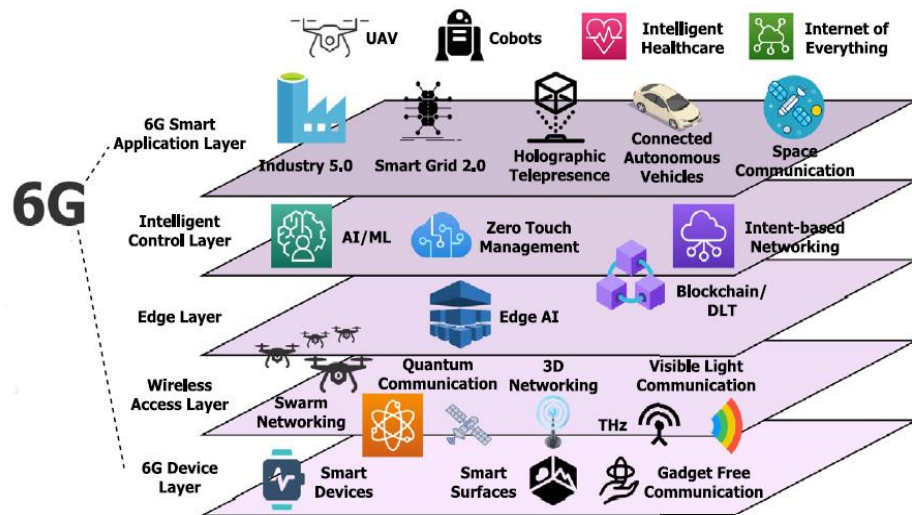
4.2.1 Επικοινωνία THz

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας Terahertz πυροδοτήθηκε από την πληρότητα της ζώνης ραδιοσυχνοτήτων (RF), η οποία εμποδίζει την χρήση της ζώνης για κάποια μελλοντική τεχνολογία και από την ανεπάρκεια της ζώνης κυμάτων mm εντός του δικτύου 6G λόγω της ζήτησης για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (Elmeadawy & Shubair, 2019).

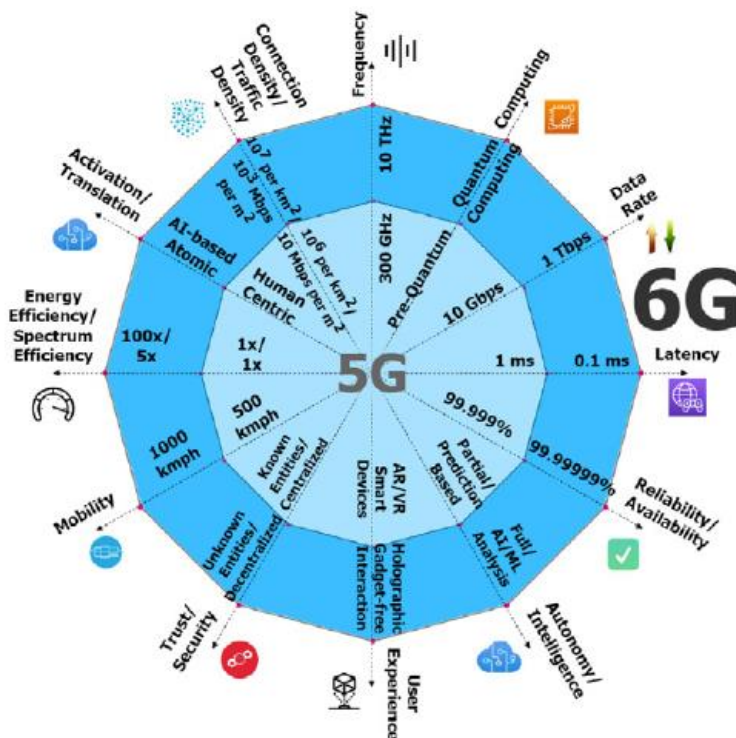
Η επικοινωνία THz αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα (φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 0,1-10 THz και μήκος κύματος 3 mm και 0,03 mm), όπου το φάσμα συχνοτήτων βρίσκεται μεταξύ των μικροκυμάτων και του μακρινού υπέρυθρου φωτός και τα κύματα THz υπάρχουν μεταξύ της μακρο και της μικροηλεκτρονικής (Lu & Zheng, 2020). Επιπλέον, θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση, διότι μπορεί να παρέχει έως και 100 GHz εύρος ζώνης, που υπερβαίνει κατά πολύ τη ζώνη mmWave με εύρος ζώνης 10 GHz

το πολύ. Ακόμη, ενδείκνυται για τεράστια συστήματα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO) με εκατοντάδες κεραίες. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον μετριασμό των παρεμβολών και τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των χρηστών, διότι έχει υψηλή κατευθυντικότητα που ενεργοποιείται από τα σήματα THz (Hua et al., 2019). Επιπλέον, εκμεταλλεύεται τόσο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όσο και τα κύματα φωτός (Zhang et al., 2019). Τέλος, η τεχνολογία επικοινωνίας THz μπορεί α) να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων 100 Gbps ή υψηλότερο, β) λόγω της στενής δέσμης και της μικρής διάρκειας παλμού που χρησιμοποιείται στην επικοινωνία THz, μπορεί να περιορίσει την υποκλοπή, με αποτέλεσμα υψηλότερη ασφάλεια και γ) να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία μοναδικών εφαρμογών, καθώς η εξασθένιση των κυμάτων THz μέσω ορισμένων υλικών είναι πολύ μικρή (Huang et al., 2019).

Σύμφωνα λοιπόν με τις πρόσφατες εξελίξεις στο υλικό THz και στις ασύρματες τεχνολογίες έχουν δείξει τη μεγάλη επίδραση της επικοινωνίας THz στα αρχιτεκτονικά επίπεδα 6G (εικ. 4 & 5), καθώς παρέχει το διπλό πλεονέκτημα των άφθονων πόρων φάσματος και του υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Το γεγονός αυτό αναμένεται να επηρεάσει τις μελλοντικές κινητές επικοινωνίες, διότι αποτελεί μια συμφέρουσα ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση τεχνολογία (Tb/s επικοινωνίας) (Lu & Zheng, 2020).



Εικόνα 5. Βελτιώσεις 6G, Αρχιτεκτονικά επίπεδα 6G υψηλού επιπέδου και Τεχνολογίες και εφαρμογές 6G (Alwis et al., 2023).



Εικόνα 6. Βελτιώσεις 6G, Αρχιτεκτονικά επίπεδα 6G υψηλού επιπέδου και Τεχνολογίες και εφαρμογές 6G (Alwis et al., 2023).

Δυνατότητα εφαρμογής 6G στα THz

Η τεχνολογία Terahertz έχει γίνει μία από τις «δέκα τεχνολογίες που θα αλλάξουν τον κόσμο του μέλλοντος». Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του 6G είναι η ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας terahertz. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις δικτύου 6G, οι τεχνολογίες Terahertz περιλαμβάνουν (Lu & Zheng, 2020):

1. Επικοινωνία χώρου και εδάφους Terahertz και θεωρία μετάδοσης καναλιών, όπως μέτρηση καναλιών, μοντελοποίηση και αλγόριθμοι.
2. Τεχνικές κωδικοποίησης και διαμόρφωσης σήματος Terahertz, όπως μηχανισμοί λήψης και παρακολούθησης υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας, κωδικοποίηση κυματομορφών και καναλιών, άμεση διαμόρφωση Terahertz, υβριδική διαμόρφωση terahertz και διαμόρφωση εκπομπής Terahertz.
3. Τεχνολογία κεραιών και συστημάτων ραδιοσυχνοτήτων Terahertz, όπως η έρευνα και ανάπτυξη νέων υλικών, η έρευνα και ανάπτυξη νέου εξοπλισμού, η επικοινωνία Terahertz ζώνη βάσης, τεχνολογία βασικής κεραίας, βασική ζώνη υψηλής ταχύτητας, τεχνολογία επεξεργασίας σήματος και μέθοδοι σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

4. Πειραματισμός συστημάτων επικοινωνίας Terahertz και ανάπτυξη υλικού και εξοπλισμού.

Τα κύματα Terahertz έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα από τα μικροκύματα και τις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες και έχουν ευρείες προοπτικές εφαρμογής σε ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας και μικρής απόστασης, ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση ασφαλείας και διαστημικές επικοινωνίες (Kato et al., 2020). Έτσι:

1. το κύμα Terahertz όταν διαδίδεται στον αέρα, απορροφάται εύκολα από την υγρασία του αέρα, κάνοντάς το καταλληλότερο για ασύρματη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και μικρής απόστασης.
2. Η δέσμη είναι στενότερη, η κατευθυντικότητα είναι καλύτερη και η ικανότητα κατά των παρεμβολών είναι ισχυρότερη.
3. Το κύμα Terahertz έχει υψηλότερη συχνότητα και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Μπορεί να καλύψει τη ζήτηση εύρους ζώνης φάσματος στην ασύρματη ευρυζωνική μετάδοση. Το φάσμα κύματος terahertz είναι μεταξύ 108 και 1013 GHz και το διαθέσιμο εύρος ζώνης φάσματος είναι δεκάδες GHz. Μπορεί να παρέχει ρυθμό επικοινωνίας που υπερβαίνει τα Tb/s.
4. Όσον αφορά την επικοινωνία στο διάστημα τα κύματα terahertz έχουν σχετικά διαφανή ατμοσφαιρικά παράθυρα γύρω από τα μήκη κύματος των 350 μm , 450 μm , 620 μm , 735 μm και 870 μm . Μπορούν να επιτύχουν λιγότερη μετάδοση και χαμηλής ισχύος επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων.
5. Τα μικρά μήκη κύματος στη ζώνη terahertz είναι επίσης κατάλληλα για Massive MIMO (πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου) με περισσότερα στοιχεία κεραίας.
6. Όσον αφορά την υψηλή ενεργειακή του απόδοση, σε σύγκριση με την ασύρματη οπτική επικοινωνία, η ενέργεια φωτονίων των κυμάτων terahertz είναι πολύ χαμηλή, περίπου 10–3 eV. Είναι μόνο το 1/40 του ορατού φωτός. Η χρήση του ως φορέα πληροφοριών μπορεί να επιτύχει εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή απόδοση.
1. Ισχυρή διείσδυση. Τα κύματα Terahertz μπορούν να διαπεράσουν την ύλη με λιγότερη εξασθένηση. Είναι κατάλληλα για επικοινωνιακές ανάγκες σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις.

Σύμφωνα με τους Alwis et al. (2023) η επικοινωνία THz έχει χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως η αίσθηση, η απεικόνιση και ο εντοπισμός και μπορεί να χρησιμοποιηθεί

για εφαρμογές α) βελτιωμένης ασύρματης ασφάλειας και ελέγχου, β) έξυπνης υγειονομικής περίθαλψης, γ) επικοινωνίας σώματος (THz nano), δ) απρόσκοπτης συνδεσιμότητας με διάφορα αντικείμενα, ε) αποτελεσματικού ελέγχου τιμολόγησης και μεταδόσεων μεταξύ τελικών συσκευών, στ) εξαιρετικά γρήγορων και πυκνών δικτύων εναέριας πρόσβασης και τέλος, για μεταδόσεις Tbps μεταξύ τελικών συσκευών και διακομιστών υπολογιστών αιχμής.

Ακόμη σύμφωνα με τους Zhang, Zhang & Yu (2021) τα κανάλια THz με άφθονο εύρος ζώνης χρησιμοποιούνται για απευθείας ασύρματες μεταδόσεις μεταξύ ραδιοπύργων και φορητών συσκευών. Επιπλέον, η επικοινωνία THz μπορεί να αξιοποιηθεί ως βασικός παράγοντας για την ολοκληρωμένη πρόσβαση και τα δίκτυα backhaul⁴, καθώς επιτρέπει την ασύρματη backhauling μεταξύ macrocells και microcells. Αυτό το ασύρματο backhaul με δυνατότητα THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω από άλλες ζώνες συχνοτήτων, όπως Sub-6 GHz και mmWave, και επίσης εξαλείφει την ανάγκη για αδειοδοτημένο φάσμα εύρους ζώνης. Τα υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως τη ζώνη Ku, τη ζώνη Ka και τη ζώνη V για σύνδεση στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, η επικοινωνία THz για συνδέσεις δορυφορικής επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας είναι επίσης ένα πολλά υποσχόμενο σενάριο σε μελλοντικά δίκτυα.

Προκλήσεις ανάπτυξης της THz και πιθανές λύσεις

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας THz σε ασύρματα συστήματα 6G, θα πρέπει να ξεπεραστούν αρκετές προκλήσεις, όπως οι μεγάλες απώλειες διαδρομής και οι μικρές περιοχές κάλυψης, που απαιτούν, με συνέπεια να χρειάζονται περισσότερους και πιο πυκνούς σταθμούς βάσης με μικροσκοπικές κυψέλες. Ακόμη, για να επιτευχθεί κέρδος διαφοροποίησης, η ασύρματη επικοινωνία THz απαιτεί μικρά μεγέθη κεραιών (Alwis et al., 2021). Το γεγονός αυτό, για να διευκολύνει την ασύρματη επικοινωνία THz σε δίκτυα 6G, χρειάζεται υπερ-Τεράστιο MIMO. Έτσι, οι Μεγάλες Ευφυείς Επιφάνειες (LIS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με 6G για να υπερβούν το τεράστιο MIMO, ώστε να διευκολύνουν τις συχνότητες εύρους THz.

Πρόσθετες προκλήσεις για τη χρήση της ζώνης THz στο 6G εντοπίζονται α) νέα μοντέλα καναλιών (π.χ. σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου ή εξωτερικού χώρου με ιδανικές

⁴ Η εφαρμογή του ασύρματου backhaul παίζει σημαντικό ρόλο σε εξαιρετικά πυκνά ετερογενή δίκτυα, όπου η ανάπτυξη ενσύρματου backhaul για μεγάλο αριθμό μικρών κυψελών και μικροσκοπικών κυψελών είναι μια μη πρακτική λύση.

συνθήκες, όπου τα νέα μοντέλα καναλιού δεν είναι εφικτά, για όλα τα σενάρια επικοινωνίας THz λόγω πολύ υψηλής απώλειας απορρόφησης), β) στα προηγμένα σχέδια πομποδέκτη/κεραία (π.χ. το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας αποκλειστικών εξαρτημάτων RF για μεμονωμένες κεραίες, ανάπτυξη κεραιών THz κ.λπ.) και γ) στα νέα πρωτόκολλα MAC και δικτύωσης (π.χ. προκλήσεις κατευθυντικότητας της κεραίας, απόδοσης του δικτύου μέσω αποδοτικών σχημάτων πρόσβασης μέσου, οπτικής επαφής THz, διαχείριση παρεμβολών, προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης, απόφραξη οπτικής επαφής, κώφωση) (Alwis et al., 2023).

Επίσης, η κατανάλωση ενέργειας της επικοινωνίας THz είναι ένα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπισθεί (Strianti et al., 2019). Όπως επίσης και το μέγεθος των κυψελών 6G πρέπει να αλλάξει από «μικρό» σε «μικροσκοπικό», που σημαίνει ότι πρέπει να σχεδιαστούν πιο πολύπλοκα υλικά και αρχιτεκτονικές (Saad, Bennis & Chen, 2019).

Έτσι, η επικοινωνία THz, βοηθάει στην ανάπτυξη μικροσκοπικών κυψελών για την αντιμετώπιση μικρών αποστάσεων επικοινωνίας, αποτελεσματικών συστημάτων διαχείρισης πόρων και παρεμβολών και δίνει λύση στα ζητήματα των νέων μοντέλων καναλιών. Επίσης, προσφέρει λύσεις στα ζητήματα των προηγμένων σχεδίων πομποδέκτη/κεραία, με υβριδικές λύσεις διαμόρφωσης δέσμης, κεραίες υψηλής απολαβής και γρήγορης παρακολούθησης με χρήση νανουλικών και τέλος τα πρωτόκολλα MAC πολλαπλών επιπέδων, τα οποία εξετάζουν τον προγραμματισμό χρήστη στο επίπεδο πρόσβασης μέσου και την επιλογή διαδρομής στο επίπεδο δικτύου, δίνουν λύσεις στα ζητήματα που προκύπτουν στα νέα πρωτόκολλα MAC και δικτύωσης (Alwis et al., 2023).

Επίσης, σοβαρά ζητήματα για πρωτόκολλα μεσαίας και τυχαίας πρόσβασης γεννιούνται από το χαρακτηριστικό κατευθυντικότητας μεταδόσεων σημάτων της ζώνης THz. Για την διευθέτηση αυτών των ζητημάτων απαιτείται η χρήση μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) και η διαμόρφωση δέσμης. Συγκεκριμένα, το NOMA επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια δέσμη THz, επιτρέποντας έτσι τη μαζική συνδεσιμότητα IoT (Zhang, Duan, Long & Leung, 2021).

Τέλος, η τεχνολογία THz έρχεται και αυτή αντιμέτωπη με προβλήματα ασφάλειας και απορρήτου, τα οποία επικεντρώνονται κυρίως στον έλεγχο ταυτότητας και στις κακόβουλες συμπεριφορές. Μία λύση για το πρόβλημα αυτό είναι η ηλεκτρομαγνητική υπογραφή των συχνοτήτων THz, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διαδικασίες ελέγχου ταυτότητας του φυσικού στρώματος (Akyildiz et al., 2014).

4.2.2 Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC)

Μια πιθανή συμπληρωματική τεχνολογία της υπάρχουσας τεχνολογίας ασύρματης επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων είναι η OWC (Optical Wireless Communications). Η ζώνη συχνοτήτων περιλαμβάνει υπέρυθρες, ορατές και υπεριώδεις ακτίνες. Η συχνότητα του ορατού φωτός είναι μια πολύ σημαντική ζώνη συχνοτήτων του OWC (Lee & Park, 2011). Το σύστημα OWC στην ορατή ζώνη (390–700 νανόμετρα) αναφέρεται συνήθως ως επικοινωνία ορατού φωτός (VLC). Κάνει πλήρη χρήση των πλεονεκτημάτων των διόδων εκπομπής ορατού φωτός (LED) για την επίτευξη του διπλού σκοπού του φωτισμού και της επικοινωνίας δεδομένων υψηλής ταχύτητας (Lu & Zheng, 2020).

Η τεχνολογία επικοινωνίας ορατού φωτός, λοιπόν, είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των αυξανόμενων απαιτήσεων για ασύρματη συνδεσιμότητα (Islim et al., 2017). Έχει ήδη αναπτυχθεί σε πολλούς τομείς, όπως τα συστήματα εντοπισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους και το δίκτυο Vehicular Ad Hoc Network (VANET).

Το VLC έχει υψηλότερα εύρη ζώνης από το RF (που έχει παρεμβολές και υψηλή καθυστέρηση) και μπορεί να αντισταθεί στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η ανάπτυξη των LED βοήθησε επίσης στην προώθηση της τεχνολογίας VLC (π.χ. τα LED μπορούν να αλλάξουν σε διαφορετικές εντάσεις φωτός με πολύ γρήγορο ρυθμό, έτσι, ορισμένοι ερευνητές προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν LED για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας) (Banafaa et al., 2022; Wang et al., 2020). Οι Chen et al. (2018) επινόησαν ένα σύστημα VLC με το όνομα LiFi που υποστηρίζει πολλαπλή πρόσβαση και θα μπορούσε ενδεχομένως να παρέχει σε μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων χρηστών κινητών υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας.

Η VLC (συγκριτικά με την ραδιοεπικοινωνία) έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως (Lu & Zheng, 2020):

1. παρέχει πολλά δυνητικά διαθέσιμα φάσματα (εύρος ζώνης σε επίπεδο Terahertz),
2. δεν παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία,
3. δεν επηρεάζεται εύκολα από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως για εξειδικευμένες χρήσεις που είναι ευαίσθητες σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και ακόμη και για την εξάλειψη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, όπως νοσοκομεία, αεροπλάνα, βενζινάδικα και χημικά εργοστάσια και
4. το δίκτυο που δημιουργείται από την τεχνολογία VLC είναι πιο ασφαλές.

Προκλήσεις ανάπτυξης της VLC και πιθανές λύσεις

Ωστόσο, υπάρχουν και κάποιες ελλείψεις που εμποδίζουν την ανάπτυξη της τεχνολογίας VLC, όπως π.χ. τα κύρια σενάρια χρήσης για το VLC θα πρέπει να είναι σε εσωτερικούς χώρους, επειδή το ισχυρό φυσικό φως θα επηρεάσει τις μεταδόσεις (Wang et al., 2020).

Επίσης, τα ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου που σχετίζονται με το VLC περιλαμβάνουν κακόβουλες συμπεριφορές και διαδικασίες επικοινωνίας. Σύμφωνα με τους Pathak et al. (2015) εάν ένας εισβολέας θέλει να εξαπολύσει μια επίθεση σε μια επικοινωνία VLC που βρίσκεται σε εξέλιξη, πρέπει να βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του θύματος, γεγονός που διευκολύνει τον εντοπισμό του εισβολέα. Και αυτό διότι η τεχνολογία VLC δεν μπορεί να διαπεράσει τοίχους και άλλα εμπόδια, καθώς το μέσο μετάδοσης που χρησιμοποιείται από αυτή είναι ορατό φως. Έτσι, η μετάδοση περιορίζεται στην όραση του χρήστη και η μετάδοση πληροφοριών δικτύου περιορίζεται σε κτίρια.

Οι Mostafa et al. (2014) πρότειναν μια τεχνική προκωδικοποίησης για συνδέσμους VLC για την ενίσχυση της ασφάλειας του φυσικού επιπέδου. Ενώ, οι Cho, Chen & Coo (2019) επαλήθευσαν ότι η συνεργασία των υποκλοπών μπορεί να μειώσει την ασφάλεια στις τεχνολογίες VLC.

Τέλος, οι Ucar et al. (2016) παρουσίασαν ένα πρωτόκολλο SecVLC που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα δίκτυο οχημάτων για την προστασία της ασφάλειας των δεδομένων μετάδοσης.

4.2.3 Κεραία επόμενης γενιάς και βασικά συνθετικά υλικά.

Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών, ειδικά η τεχνολογία κεραιών πολύ μεγάλης κλίμακας, είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες που θα βελτιώσουν την απόδοση του φάσματος των ασύρματων συστημάτων κινητής επικοινωνίας. Μια κεραία πολύ μεγάλης κλίμακας είναι ένα σημαντικό μέσο για τη βελτίωση της απόδοσης του φάσματος του συστήματος επικοινωνίας.

Η τεχνολογία κεραιών πολύ μεγάλης κλίμακας πρέπει να ξεπεράσει τα ακόλουθα προβλήματα: α) την επίλυση της θεωρίας και των τεχνικών προβλημάτων υλοποίησης του crossband, β) του πεδίου ραδιοσυχνοτήτων κεραίας υψηλής απόδοσης, γ) κάλυψης πλήρους χώρου, δ) να μελετήσει τη διαμορφώσιμη κεραία μεγάλης συστοιχίας, την τεχνολογία RF και τα άκρως ολοκληρωμένα κυκλώματα RF και ε) να κατανοήσει τη νέα μεγάλη κλίμακας θεωρία και τεχνολογία σχεδίασης κεραιών συστοιχίας, τη θεωρία

σχεδιασμού και τις μεθόδους εφαρμογής βελτιστοποίησης κυκλωμάτων ραδιοσυχνότητων υψηλής ενσωματωμένης συχνότητας και την τεχνολογία σχεδίασης αναλογικών δικτύων υψηλής απόδοσης μεγάλης κλίμακας (Qi et al., 2020).

4.2.4 Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)

Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση θα διαδραματίσουν βασικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των δικτύων και στη δημιουργία νέων κυματομορφών στην τεχνολογία 6G. Σε σύγκριση με όλες τις άλλες τεχνολογίες που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυα 6G, η AI είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην ανάλυση μεγάλων δεδομένων, στη κατανεμημένη AI, στη διαχείριση πόρων και στην βελτιστοποίηση δικτύου (Wang et al., 2020). Από την άλλη πλευρά ωστόσο, η τεχνολογία 6G θα επιτρέψει περαιτέρω εξελίξεις στην AI και την ML χρησιμοποιώντας δεδομένα που είναι αποθηκευμένα τοπικά στον αισθητήρα 6G.

Η χρήση της AI στα δίκτυα 6G θα οδηγήσει στη δυνατότητα ύπαρξης α) ευφυούς ανάλυσης δεδομένων για αυτόνομες αποφάσεις, β) αυτόνομου ελέγχου και λειτουργίας αισθητήρων και ενεργοποιητών, γ) έξυπνης δρομολόγησης και τοποθέτησης, με στόχο την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, δ) ευφυούς ανίχνευσης, ανάλυσης και κατανομής φάσματος και τέλος, ευφύων συσκευών χρήστη και αλγορίθμων που επεξεργάζονται και αναλύουν δεδομένα σε τοπικό επίπεδο (Alwis et al., 2023).

Έχει επίσης τη δυνατότητα να εξελίξει τις συμβατικές μεθόδους σε ένα ευέλικτο και προγραμματιζόμενο δίκτυο που θα βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας διαχείρισης δικτύου στο 6G (Zeb et al., 2022). Επιπλέον, με την χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, οι ευφυείς πράκτορες θα βοηθήσουν στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων σε τεράστιες κλίμακες που θα οδηγήσουν στην παροχή ταυτόχρονων συνδέσεων και νέων τεχνολογιών ανίχνευσης (Zeb et al., 2021).

Η AI θα πραγματοποιήσει επίσης, την απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ εδάφους, δορυφόρου και εναέριου εξοπλισμού μέσω δεδομένων δικτύου, επιχειρηματικών δεδομένων, δεδομένων χρήστη και άλλων πολυδιάστατων μάθησης με επίγνωση δεδομένων και ανταλλαγής υψηλής ταχύτητας σε πραγματικό χρόνο. Το αυτόνομο σύστημα εκμάθησης διαχείρισης και ελέγχου δικτύου θα συνεχίσει να βελτιστοποιείται και να αναβαθμίζεται. Οι βασικές τεχνολογίες του θα περιλαμβάνουν ευφύες δίκτυο πυρήνα και ευφύες δίκτυο αιχμής, τεχνολογία δικτύων αυτο-οργάνωσης και βαθιάς εκμάθησης, τεχνολογία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης καναλιών που βασίζεται σε βαθιά εκμάθηση,

τεχνολογία εκτίμησης και ανίχνευσης σήματος με βάση τη βαθιά εκμάθηση και τεχνολογία κατανομής ασύρματων πόρων με βάση τη βαθιά εκμάθηση μάθηση (Lu & Zheng, 2020).

Εν κατακλείδι, τα δίκτυα 6G με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, θα γίνουν γνωστά με νόμιμο τρόπο. Για παράδειγμα, οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης θα προσφέρουν λύσεις σε περίπλοκα και ειδικά προβλήματα τομέων, όπως η ανάπτυξη πτυχών επικοινωνίας του 6G, συμπεριλαμβανομένης της κοινής χρήσης φάσματος, της διαχείρισης ραδιοφωνικών πόρων, της ποιότητας της υπηρεσίας, του τεμαχισμού δικτύου και της ειρηνικοποίησης (Alwis et al., 2023).

Ακόμη και στα δίκτυα 6G, η σημασία του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου δικτύωσης θα παραμείνει η ίδια. Τα όρια μεταξύ αυτών των στρωμάτων θα γίνουν λιγότερο σφιχτά και οι αλγόριθμοι AI και ML θα διαδραματίσουν μεγάλο ρόλο σε αυτήν την τεχνολογική εξέλιξη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη απόδοση και δυνατότητες δικτύου (DeLima et al., 2021; Yuan et al., 2020).

Οι τεχνολογίες AI μπορούν να χωριστούν στα αρχιτεκτονικά επίπεδα που εξυπηρετούν: α) τα φυσικά επίπεδα, τα οποία περιλαμβάνουν συσκευές (π.χ. συνδέσμους δεδομένων και υποδομή δικτύου), και β) τα επίπεδα υπολογιστών, τα οποία περιλαμβάνουν δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό, εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου και υπολογισμό νέφους/άκρης/ομίχλης κ.λπ. (Zhang et al., 2019). Έτσι στα φυσικά επίπεδα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετές τεχνολογίες, οι οποίες βασίζονται στην AI, όπως α) η τεχνολογία των βαθιών νευρωνικών δικτύων, β) των K-Means και γ) της εποπτευόμενης/μη εποπτευόμενης μάθησης. Αυτές, μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των φυσικών επιπέδων βελτιστοποιώντας τη συνδεσιμότητα και να προβλέψουν την κυκλοφορία και να ενισχύσουν την ασφάλεια (Zhang et al., 2019). Στην πτυχή της αρχιτεκτονικής δικτύου, οι Loven et al. (2019), υποστηρίζουν ότι η AI, μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια των άκρων μέσω συστημάτων ασφαλείας και λεπτομερών ελέγχων, καθώς και να χρησιμοποιηθεί πιο συγκεκριμένη βαθιά μάθηση για τον εντοπισμό απειλών στον υπολογισμό αιχμής.

Δυνατότητες εφαρμογής 6G στην AI

Με την τεχνολογία 6G, η AI θα προσφέρει την δυνατότητα αναμόρφωσης των υπηρεσιών που βασίζονται στην επικοινωνία, καθώς και των άλλων εφαρμογών όπως, η αυτόνομη

εργασία για cobots, οι νευρωνικοί σύνδεσμοι για έλεγχο μηχανών από απόσταση, η αυτόματη ανάλυση αρχείων υγείας, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και οι συστάσεις υγείας, η ετερογενής ανάλυση δεδομένων, οι συστάσεις βάσει συνθηκών, οι έξυπνες υπηρεσίες, η έξυπνη κατανομή και εξισορρόπηση φορτίου, η επαναδρομολόγηση σε περίπτωση καταστροφών, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ενεργειακής απόδοσης, επαναδρομολόγηση, υπολογιστική εκφόρτωση και η εύρεση συντομότερης διαδρομής και τέλος οι προηγμένες τεχνικές όρασης υπολογιστή για την αναγνώριση περιβάλλοντος και χειρονομιών (Alwis et al., 2023).

Ο χειρισμός, η παραγωγή και η επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων ταυτόχρονα είναι άλλη μια εργασία που χρειάζεται την AI, ώστε να επιλύσει τα σύνθετα προβλήματα μεγάλης κλίμακας σε πραγματικό χρόνο. Ένα καλό παράδειγμα για την κατανόηση των δυνατοτήτων της συνύπαρξης του δικτύου 6G και της AI είναι τα αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα, τα οποία πρέπει να γνωρίζουν σε πραγματικό χρόνο το συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, την τοποθεσία τους, τους πεζούς, τους ποδηλάτες και τα άλλα αυτοκίνητα για να βρουν την καλύτερη διαδρομή, να περάσουν από διασταυρώσεις και να φθάσουν στον προορισμό με ασφάλεια (Alwis et al., 2023).

Στον τομέα της AI, οι πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας 6G περιλαμβάνουν τις πιο παραδοσιακές χρήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διαγνωστική, συνταγογραφική και περιγραφική ανάλυση (Alwis, et al., 2021). Η προδιαγραφική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει κρίσεις ή να κάνει προβλέψεις σχετικά με τον υπολογισμό ακμών, την τοποθέτηση κρυφής μνήμης, την εικονικοποίηση δικτύου, τον τεμαχισμό, την κατανομή πόρων και άλλα σχετικά θέματα (Mahmood et al., 2022). Με τη χρήση προγνωστικών αναλυτικών στοιχείων, μπορεί κανείς να κάνει μορφωμένες εικασίες για το μέλλον με βάση τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί σε πραγματικό χρόνο και έχουν εφαρμοστεί σε παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα πόρων, οι προτιμήσεις, η συμπεριφορά των χρηστών, οι τοποθεσίες των χρηστών και τα μοτίβα επισκεψιμότητας. Ο σκοπός των διαγνωστικών αναλυτικών στοιχείων είναι ο εντοπισμός προβλημάτων μέσα σε ένα δίκτυο, που περιλαμβάνει τον εντοπισμό ανωμαλιών δικτύου, βλάβες υπηρεσιών, αστοχίες δικτύου και τις υποκείμενες αιτίες τους. Αυτό, με τη σειρά του, συμβάλλει στη βελτίωση του επιπέδου αξιοπιστίας και ασφάλειας του δικτύου. Προκειμένου να βελτιωθεί η επίγνωση της κατάστασης του παρόχου υπηρεσιών και του διαχειριστή δικτύου, η περιγραφική ανάλυση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε προηγούμενα δεδομένα. Οι

εφαρμογές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, όπως προβολές χρηστών, συνθήκες καναλιού, προφίλ κίνησης και απόδοση δικτύου, μεταξύ άλλων (Alwis et al., 2023).

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μοντέλα και αλγόριθμους για τη ρύθμιση και τη βελτιστοποίηση δικτύου ενδέχεται να αποτύχουν να καταγράψουν τις περίπλοκες σχέσεις μεταξύ φυσικών συστημάτων και συμπεριφορών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες λύσεις που ενδέχεται να μην ικανοποιούν πλήρως τις ανάγκες του δικτύου από άκρο σε άκρο. Λόγω της κλίμακας, της πυκνότητας και της ετερογένειάς του, η μοντελοποίηση δυναμικών και περίπλοκων δικτύων 6G χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθόδους θα ήταν ανέφικτη. Η ΑΙ θα είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των μελλοντικών δικτύων 6G, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις που είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με μοντέλα κλειστής μορφής (Yuan et al., 2020).

Μαζικές αναπτύξεις IoT που χρησιμοποιούν τεχνολογία επικοινωνίας 6G μπορούν να αντιμετωπιστούν με ΑΙ και αλγόριθμους προγνωστικής κατανομής πόρων που βασίζονται σε ML που εστιάζουν σε προκλήσεις που σχετίζονται με απρόβλεπτα ζητήματα απόδοσης δικτύου (Yuan et al., 2020).

Η μάθηση βαθιάς ενίσχυσης, χρησιμοποιεί μοντέλα νευρωνικών δικτύων ως προσέγγιση συναρτήσεων για την απόκτηση ανταμοιβών σε έναν μηχανισμό ανάδρασης. Αυτό επιτρέπει στον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων επανειλημμένα να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του ανάλογα με την είσοδο από το σύστημα. Ως εκ τούτου, αυτή η εκμάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσαρμοστική διαμόρφωση, επιλογή σχήματος κωδικοποίησης, βέλτιστη χρήση ισχύος και διαμόρφωση δέσμης (DeLima et al., 2021; Yuan et al., 2020).

Μία εκ των προσεγγίσεων της ML επιτρέπει στους χρήστες να συνεργαστούν για να δημιουργήσουν ένα κοινό μοντέλο μάθησης. Αυτό θα διευκολύνει τη διατήρηση όλων των δεδομένων εκπαίδευσης στους κόμβους του δικτύου, διασφαλίζοντας το απόρρητο των δεδομένων.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως, οι επιχειρήσεις κινητής τηλεφωνίας βρίσκονται ακόμη στα πρώτα στάδια της τεχνολογίας 6G, καθώς και όλοι οι κατασκευαστές και οι πάροχοι υπηρεσιών βρίσκονται στην πρώιμη φάση της έρευνας. Οι ιδιώτες και τα ενδιαφερόμενα μέρη της κυβέρνησης αναμφίβολα θα επηρεαστούν από την επερχόμενη και νέα τεχνολογία. Αντίστοιχα, η επικοινωνία THz, ο υπολογισμός αιχμής, ο κβαντικός υπολογισμός, τα μοντέλα ασφαλείας, η ΑΙ και η ML έχουν τη δυνατότητα να φέρουν

επανάσταση στην αλληλεπίδραση δικτύου και να προσφέρουν νέες περιπτώσεις χρήσης (Bang et al., 2023).

Προκλήσεις ανάπτυξης της AI και πιθανές λύσεις

Σύμφωνα με τους Alwis et al. (2021) η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να ενσωματωθεί στο δίκτυο 6G και στα εξαρτήματα και στις εφαρμογές, με τον κατάλληλο τρόπο. Ωστόσο, τα εξαρτήματα ενεργοποίησης 6G βρίσκονται σε αρχικό στάδιο και πρέπει ακόμη να επιλύσουν ορισμένες δυσκολίες, οι οποίες εντοπίζονται α) στην ανίχνευση δεδομένων (π.χ. επεξεργασία δεδομένων από εκατομμύρια συσκευές, μεγάλος όγκος επεξεργασίας δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στην υπερφόρτωση του συστήματος, μείωση της απόδοσης ισχύος από τη συνεχή μετάδοση δεδομένων κ.λπ.), β) στην ανίχνευση φάσματος (π.χ. τα γνωστικά ραδιόφωνα, όπου οι κύριοι χρήστες ενδέχεται να επηρεαστούν, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αυξηθεί λόγω της συνεχούς σάρωσης του διαθέσιμου φάσματος κ.λπ.) και γ) στην ετερογένεια των δεδομένων (π.χ. συνδυασμός συσκευών που ποικίλλουν ως προς τον ρυθμό δειγματοληψίας, την επιστημονική μέτρηση, τον τύπο δεδομένων, με αποτέλεσμα την δυσκολία στην ανάλυση δεδομένων λόγω διαφορετικών τύπων δεδομένων).

Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης στο χώρο του αισθητήρα για τοπική ανάλυση ή περίληψη για την επίτευξη καλύτερης ενεργειακής απόδοσης, αποτελεί την λύση για τα ζητήματα στην ανίχνευση δεδομένων. Ακόμη, για αποτελεσματική χρήση του φάσματος συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η Cooperative Spectrum Sensing που χρησιμοποιεί τεχνολογία AI. Ενώ η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης μειώνει τα ζητήματα που προκύπτουν από την ετερογένεια των δεδομένων, καθώς επιτρέπει στα δεδομένα να μετασχηματίζονται σε λανθάνοντα / χώρο χαρακτηριστικών για ανάλυση δεδομένων (Alwis et al., 2023).

Επιπλέον, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στο 6G χρειάζεται την εξόρυξη τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, η οποία θέτει ερωτήματα σχετικά με την ιδιοκτησία των δεδομένων, καθώς και την ηθική, το απόρρητο και την ασφάλεια, μεταξύ άλλων ζητημάτων. Ακόμη, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) μπορούν να γίνουν μέρος της υπολογιστικής υποδομής αιχμής των δικτύων 6G για να διευκολύνουν την επεξεργασία AI σε δίκτυα 6G (Wang et al., 2022). Για να επιτευχθεί η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ πιθανών οφελών και πιθανών κινδύνων, πρέπει να συνταχθούν κανόνες και νόμοι, ούτως ώστε να διατηρηθεί η ακεραιότητα, το απόρρητο και η ασφάλεια των δεδομένων κατά τη

διαδικασία κατασκευής των αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων δικτύου στο πλαίσιο του 6G (Alwis et al., 2023).

Τέλος, οι δυσκολίες ποικίλλουν περισσότερο στα διαφορετικά σύνολα εφαρμογών, όπως η βελτιστοποίηση της υγειονομικής περίθαλψης, η παρακολούθηση της χρηματοοικονομικής αγοράς, τα έξυπνα δίκτυα, η εκτεταμένη πραγματικότητα και η βιομηχανία 5.0 (Alwis et al., 2023).

Οι Sattiraju et al. [45] πρότεινε μια μέθοδο εκμάθησης χωρίς επίβλεψη που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία ελέγχου ταυτότητας για την ενίσχυση της ασφάλειας του φυσικού επιπέδου. Οι Hong et al. [46] παρουσίασε ένα σχέδιο κεραίας που βασίζεται σε μηχανική μάθηση που θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην επικοινωνία του φυσικού επιπέδου για την αποφυγή διαρροών πληροφοριών. Επίσης, οι Nawaz et al. [47] σημείωσε ότι τα σχήματα μηχανικής μάθησης και κβαντικής κρυπτογράφησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία της ασφάλειας των συνδέσεων επικοινωνίας στο 6G networks. Επιπλέον, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό ανωμαλιών του δικτύου και στην παροχή μηχανισμών έγκαιρης προειδοποίησης για τη βελτίωση της ασφάλειας των δικτύων 6G (Dang et al., 2020). Επίσης, με την χρήση κατανεμημένης και ενοποιημένης AI σε ένα δίκτυο 6G, οι συσκευές αιχμής δεν χρειάζεται να ανταλλάσσουν δεδομένα, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω την ασφάλεια του δικτύου της (Tomkos et al., 2020). Επιπλέον, οι Zhang et al. (2020) αναφέρουν ότι ο αντίκτυπος της συσχέτισης δεδομένων σε ορισμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των διαρροών απορρήτου και τέλος, οι Zhu et al. (2017) παρουσίασε ορισμένους αλγόριθμους που βασίζονται σε διαφορικό απόρρητο που θα μπορούσαν να είναι κατάλληλοι για την επίλυση ορισμένων ζητημάτων απορρήτου του 6G.

4.2.5 Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού και Blockchain

Η Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού (DLT) συμβάλει στην ανάπτυξη των δικτύων 6G και των εφαρμογών του, επιτρέποντας την ασφαλή και κατανεμημένη αποθήκευση ενός ψηφιακού καθολικού σε όλους τους κόμβους που συμμετέχουν στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση ενός πανομοιότυπου αντιγράφου του ψηφιακού καθολικού στον εκάστοτε κόμβο (McLean & Deane-Johns, 2016).

Ένας από τους σημαντικότερους τύπους DLT είναι το BC, το οποίο ακολουθεί μια συγκεκριμένη δομή για τη δημιουργία και την ενημέρωση του κατανεμημένου

καθολικού. Περιλαμβάνει αμετάβλητα μπλοκ, στα οποία οι συναλλαγές επικυρώνονται, συγκεντρώνονται μαζί και κρυπτογραφούνται και τα οποία έχουν χρονική σήμανση. Το μπλοκ που δημιουργήθηκε τελευταίο προσαρτάται στο BC και συνδέεται με το τελευταίο μπλοκ στο καθολικό χρησιμοποιώντας μια κρυπτογραφική αλυσίδα που βασίζεται σε κατακερματισμό. Η αλυσίδα δημιουργείται με την εισαγωγή του κατακερματισμού του προηγούμενου μπλοκ (την κεφαλίδα του) στο μπλοκ που δημιουργήθηκε πρόσφατα (McLean & Deane-Johns, 2016).

Μερικά καλά χαρακτηριστικά του BC είναι η αμεταβλητότητά του, η μη άρνηση του, η ενισχυμένη ασφάλεια, η κρυπτογράφηση, η κατανεμημένη βάση δεδομένων και οι αποκεντρωμένες λειτουργίες (Alwis et al., 2023).

Μερικές χρήσεις της τεχνολογίας Blockchain σε ένα δίκτυο 6G είναι: α) η αποκέντρωση δικτύου, η οποία θα μπορούσε να απλοποιήσει τη διαχείριση του δικτύου και να βελτιώσει την απόδοσή του, β) οι τεχνολογίες κατανεμημένης καθολικού, οι οποίες θα ενίσχυαν σημαντικά την ασφάλεια του ελέγχου ταυτότητας και γ) η κοινή χρήση φάσματος, με την οποία λύνονται τα προβλήματα της χαμηλής χρήσης φάσματος και του μονοπωλίου του φάσματος, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη χρήση του φάσματος (Dang et al., 2020; Strinati et al., 2019; Zhang et al., 2019).

Δυνατότητα εφαρμογής 6G στην DTL/BC

Ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη 6G, όπως η ευελιξία, η αυτόνομη και έξυπνη λειτουργία, η ασφάλεια, το απόρρητο, η λογοδοσία, η διαλειτουργικότητα και η αποτελεσματική διαχείριση πόρων, μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη DLT και πιο συγκεκριμένα μέσω της τεχνολογίας BC. Ωστόσο, αυτό απαιτεί την ενσωμάτωση της DLT/blockchain με δίκτυα 6G. Μερικά παραδείγματα των δυνατοτήτων του είναι η αποτελεσματική κοινή χρήση φάσματος σε ασύρματα δίκτυα 6G, η μείωση του διοικητικού κόστους και των ζητημάτων που σχετίζονται με την κεντρική διαχείριση του φάσματος και την κοινή χρήση πόρων (Alwis et al., 2023).

Ακόμη, η τεχνολογία BC με έξυπνα συμβόλαια έχει τη δυνατότητα να συνάψει δυναμικές συμφωνίες, να πραγματοποιήσει απρόσκοπτες περιπτώσεις περιαγωγής και να αντιμετωπίσει τις απάτες περιαγωγής (Weerasinghe et al., 2021). Μπορεί, επίσης, να βελτιώσει την εφαρμογή των τεχνικών μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης, για δίκτυα και εφαρμογές 6G, παρέχοντας βελτιωμένη ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής (Alwis et al., 2023). Επιπλέον, η BC μπορεί να εξασφαλίσει τη συνολική

ασφάλεια των δικτύων 6G σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. για την κοινή χρήση δεδομένων εκπαίδευσης AI/ML και μοντέλων για έξυπνο έλεγχο, για αποκεντρωμένες, ασφαλείς, διαφανείς και προστατευμένες από το απόρρητο εφαρμογές, για την κοινή χρήση τοπικά εκπαιδευμένων μοντέλων στο FL και αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων, για την κοινή χρήση δικτύων πρόσβασης και φάσματος, ασφαλείς λειτουργίες που βασίζονται σε SDN, διαφανής διαχείριση ραδιοφώνου, για υπολογιστική εκφόρτωση κατ' απαίτηση, εμπορία επιπλέον πόρων βάσει κινήτρων κ.λπ.) (Alwis et al., 2023).

Επιπροσθέτως, η τεχνολογία BC έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει τη νέα σειρά εφαρμογών 6G, όπως α) ενισχυμένη ασφάλεια, προστασία απορρήτου, δυναμικές επιχειρηματικές συμβάσεις, β) ασφαλής παρακολούθηση ασθενών, αυτοματοποιημένος χειρισμός ιατρικής ασφάλισης, γ) αποκεντρωμένος υπολογισμός, κατανεμημένη αποθήκευση, ασφαλής επικοινωνία, έξυπνα συμβόλαια, δ) αποκεντρωμένα αυτοματοποιημένα έξυπνα δίκτυα, ανοιχτή αγορά ενέργειας, ε) διαχείριση ταυτότητας, ανοχή σφαλμάτων, αποκεντρωμένη διαχείριση ασφάλειας και στ) αποκεντρωμένες αγορές περιεχομένου, ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής (Alwis et al., 2023).

Μπορεί, ακόμη, να ικανοποιήσει τις κρίσιμες απαιτήσεις των εφαρμογών 6G, όπως είναι η ασφαλής και προστατευμένη από το απόρρητο ανταλλαγή δεδομένων, ο αυστηρός έλεγχος πρόσβασης, η ιχνηλασιμότητα και η επαλήθευση ταυτότητας, καθώς περιέχει υποκείμενους κρυπτογραφικούς μηχανισμούς, κατανεμημένη βάση δεδομένων, πρωτόκολλα συναίνεσης και έξυπνα συμβόλαια (Alwis et al., 2023).

Είναι, επίσης, καθοριστική για τη δημιουργία μιας ανοιχτής αγοράς και επιχειρηματικού μοντέλου 6G, καθώς μπορούν να συμμετέχουν στη δημιουργία πολύπλοκων οικοσυστημάτων 6G με τρόπο αξιόπιστο αλλά ελεγχόμενο διαφορετικοί χειριστές δικτύου, προμηθευτές και πάροχοι (Yrjola, 2020).

Προκλήσεις ανάπτυξης της DTL/ BC και πιθανές λύσεις

Μερικές από τις προκλήσεις ανάπτυξης που πρέπει να αντιμετωπίσει η DTL/BC είναι η αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών IoE, το αυξημένο πλήθος των νέων εφαρμογών υψηλής έντασης δεδομένων και της υποδομής επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας, καθώς ένας μεγάλος αριθμός συναλλαγών θα προωθηθεί στο σύστημα 6G που βασίζεται σε DLT. Ενώ, από την άλλη πλευρά, το σύστημα θα απαιτεί πολύ υψηλή απόδοση (μεγάλος αριθμός συναλλαγών ανά μονάδα χρόνου) και μεγάλη χωρητικότητα (οι επαληθευμένες

συναλλαγές πρέπει να αποθηκευτούν σε όλους τους κόμβους ανεξάρτητα) (Alwis et al., 2023).

Επιπλέον, θα πρέπει να αντιμετωπίσει την αύξηση του λανθάνοντα χρόνου, η οποία θα προκύψει από την αύξηση του χρόνου που θα απαιτείται για την επαλήθευση μιας νέας συναλλαγής, με την παροδική αύξηση της βάσης δεδομένων (καθολικό). Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως η DLT/BC είναι επιρρεπές σε επιθέσεις ασφαλείας (επιθέσεις DDoS ή επιθέσεις που σχετίζονται με AI), διότι μπορεί να επιτρέψει συναλλαγές μεταξύ μη αξιόπιστων ενδιαφερομένων (Alwis et al., 2023).

Για την βελτίωση της απόδοσης, της αποθήκευσης εκτός αλυσίδας ή της πλευρικής αλυσίδας για αποθήκευση, της ομομορφικής υπογραφής προτείνεται ο διαμοιρασμός ή η ιεραρχική BC ως πιθανές λύσεις, ενώ για την ενίσχυση της ασφάλειας και του απορρήτου προτείνονται το Trusted Execution Environment (TEE) και οι Τεχνολογίες Ενίσχυσης του Απορρήτου (PET) και η Κρυπτογράφηση βάσει Χαρακτηριστικών (ABE). Επιπλέον, για τη διευκόλυνση της απρόσκοπτης λειτουργίας των δικτύων προτείνεται η ενίσχυση της διαλειτουργικότητας και για την αύξηση της επεκτασιμότητας προτείνεται η περιορισμένη αναπαραγωγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων (Alwis et al., 2023).

Επίσης, η τεχνολογία blockchain πρέπει να αντιμετωπίσει θέματα ασφάλειας και απορρήτου που σχετίζονται με τον έλεγχο πρόσβασης, τον έλεγχο ταυτότητας και τις διαδικασίες επικοινωνίας. Σύμφωνα με τους Ling et al. (2019) μια αρχιτεκτονική δικτύου ραδιοπρόσβασης blockchain θα μπορούσε να ασφαλίσει και να διαχειριστεί αποτελεσματικά την πρόσβαση στο δίκτυο και τον έλεγχο ταυτότητας μεταξύ οντοτήτων του δικτύου. Οι Kiyomoto et al. (2017) παρουσίασαν μια νέα εννοιολογική αρχιτεκτονική για την εξουσιοδότηση υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας που βασίζεται στην τεχνολογία blockchain, ενώ οι Kotobi et al. (2018) προτείνανε μια μέθοδο χρήσης του blockchain για τη βελτίωση της ασφάλειας των πρωτοκόλλων πρόσβασης στα μέσα και του γνωστικού ραδιοφώνου, προκειμένου να αποκτηθεί πρόσβαση στα αχρησιμοποίητα φάσματα με άδεια χρήσης.

Ωστόσο, οι Ferraro, King & Shorten (2018) ανέφεραν ότι η ικανότητα κατακερματισμού που απαιτείται για την επικύρωση συναλλαγών, σε ένα δίκτυο που βασίζεται σε blockchain, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ασφάλεια. Τέλος, παρόλο που η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική του δικτύου 6G σημαίνει ότι θα ήταν δυνατή η αλλαγή των εγγραφών μόνο εάν περισσότερο από το 51% των κόμβων ήταν υπό τον έλεγχο του χάκερ (αρκετά ασφαλές), δεν υπάρχει αξιόπιστο τρίτο μέρος υπεύθυνο για ασφάλις

αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων όταν συμβαίνουν παραβιάσεις ασφάλειας (Puthal et al, 2018).

Λόγω της μοναδικότητας του blockchain, π.χ. της αποκέντρωσης, της ανωνυμίας, της διαφάνειας, της έλλειψης παρέμβασης και της ασφάλειας, η τεχνολογία κατακευκμένου καθολικού blockchain μπορεί να διασφαλίσει ότι οι πληροφορίες των χρηστών δεν θα κλαπούν από τρίτους, μπορεί να βελτιώσει σταθερά την αποτελεσματικότητα της συνεργασίας του δικτύου και την ικανότητα μεταξύ κόμβων υπηρεσιών δικτύου, μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια της επικοινωνίας πληροφοριών και να βελτιώσει την ασφάλεια και το απόρρητο των εμπλεκόμενων οντοτήτων εντός του συστήματος επικοινωνίας 6G (Lu, 2019).

Τέλος, για την επίτευξη πιο στενής ενοποίησης μεταξύ της αλυσίδας μπλοκ και αναδόμενων δικτύων 6G προτείνεται η ανάπτυξη περισσότερων ενεργειακά και χρονικά αποδοτικών αλγορίθμων συναίνεσης και η ανάπτυξη προτύπων για τις εξελίξεις της αλυσίδας μπλοκ (Alwis et al., 2023).

4.2.6 Δικτύωση Βάσει Πρόθεσης (IBN)

Με την χρήση καλά καθορισμένων πολιτικών υποστήριξης της ταχείας προσαρμογής νέων υπηρεσιών 6G, η Δικτύωση Βάσει Πρόθεσης (IBN) αυτοματοποιεί την ανάπτυξη επιχειρηματικής πρόθεσης σε δίκτυα και προσαρμόζεται στα δίκτυα παραγωγής μεγάλων επιχειρήσεων (Karam et al., 2022).

Το IBN περιλαμβάνει τρεις κύριες λειτουργίες: α) τη μετάφραση πρόθεσης, η οποία μεταφράζει τις επιχειρήσεις σε πολιτικές που μπορούν να γίνουν κατανοητές από τα δίκτυα, β) την ενεργοποίηση των προθέσεων, η οποία αναπτύσσει πολιτικές πρόθεσης σε όλο το δίκτυο, αυτοματοποιώντας τη διαμόρφωση σε φυσικές και εικονικές συσκευές δικτύωσης και γ) τη διασφάλιση, η οποία παρακολουθεί και αναλύει το δίκτυο για να επαληθεύσει την επιθυμητή πρόθεση, με τη χρήση της Μηχανικής Μάθησης (ML) και της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) (Alwis et al., 2023).

Τέλος, η ανάπτυξη των IBN βασίζεται στη δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN), όπου ο ελεγκτής SDN λειτουργεί ως κεντρικό σημείο ελέγχου για τη διαχείριση λειτουργιών δικτύου. Έτσι, τόσο οι τεχνολογίες λογισμικού δικτύων (SDN και NFV⁵)

⁵ Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου - Network Function Virtualization.

όσο και οι ευφυείς τεχνολογίες δικτύου (ΑΙ και ML) αναμένεται να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο στην υλοποίηση του IBN στα μελλοντικά δίκτυα (Alwis et al., 2023).

Δυνατότητες εφαρμογής 6G στα IBN

Η δικτύωση βάσει πρόθεσης (IBN) αναμένεται να εισάγει την τεχνητή νοημοσύνη στα δίκτυα 6G (Wei, Peng & Liu, 2020), ενώ έχει επίσης την δυνατότητα να λύσει πολλά ζητήματα των δικτύων προ-6G, ειδικά στους τομείς της ευελιξίας, της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας, μετατρέποντας τις προθέσεις των χρηστών σε διαμορφώσεις και στρατηγικές δικτύου. Ακόμη, δύναται η δυνατότητα για βελτίωση της ευρωστίας, της δυναμικότητας και της προσαρμοστικότητας στην αυτοματοποιημένη λειτουργία και συντήρηση του δικτύου με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και των Big Data (Alwis et al., 2023).

Όπως έχει διατυπωθεί και προηγουμένως, το IBN, για την εκτέλεση εργασιών ρουτίνας, τον καθορισμό πολιτικών, την απόκριση σε συμβάντα του συστήματος και την επαλήθευση της επίτευξης των στόχων και των ενεργειών κάθε πρόθεσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνητή νοημοσύνη και την μηχανική μάθηση. Επιπροσθέτως, τα δίκτυα 6G με IBN έχουν την δυνατότητα για γρήγορη και εύκολη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, ιεράρχηση προτεραιοτήτων υπηρεσιών και ενοποίηση υπηρεσιών σε όλα τα επίπεδα του δικτύου 6G (π.χ. ακριβής προσδιορισμό της πρόθεσης υπηρεσίας τελικού χρήστη πολλαπλών τύπων σε εφαρμογές, όπως στο Internet of Things (IoT) και στην εφαρμογή απαιτήσεων πολυδιάστατης ανίχνευσης κ.λπ.). Επιπλέον, το IBN βοηθά στη βελτιστοποίηση και τη διαμόρφωση των υπηρεσιών δικτύου για την επίτευξη των στόχων των αντίστοιχων επιχειρηματικών εφαρμογών (Alwis et al., 2023).

Η λειτουργία της μετάφρασης πρόθεσης στο IBN, του δίνει την δυνατότητα αποτελεσματικής εφαρμογής των επιθυμητών συμφωνιών σε επίπεδο λειτουργικών υπηρεσιών των χρηστών σε όλο το δίκτυο και τη βελτίωση της εμπειρίας των πελατών. Ακόμη, τροφοδοτεί τη χρήση του 6G σε πολλές κάθετες βιομηχανίες (Alwis et al., 2023).

Το IBN μπορεί να προβλέψει έξυπνα πιθανές αποκλίσεις από την πρόθεση και να αναλάβει προληπτικά μέτρα για τον εξορθολογισμό με την πρόθεση, επιτρέποντας τις λειτουργίες αυτοελέγχου και αυτοδιόρθωσης του δικτύου 6G. Ακόμη, διευκολύνει τη μαζική ζήτηση για ευφυείς υπηρεσίες στο δίκτυο 6G (π.χ. τα δίκτυα τραπεζικού περιβάλλοντος σε δεδομένα δικτύου πραγματικού χρόνου) (Wei, Peng & Liu, 2020).

Εν κατακλείδι, το IBN προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα έναντι της κανονικής δικτύωσης για την ενεργοποίηση εφαρμογών 6G.

Προκλήσεις ανάπτυξης των IBN και πιθανές λύσεις

Δεδομένου ότι, οι υλοποιήσεις και εξελίξεις του IBN επικεντρώνονται κυρίως στον πυρήνα του δικτύου, οι λύσεις IBN πρέπει να βελτιστοποιούνται για το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Επομένως, την ανάπτυξη του IBN σε ασύρματα δίκτυα, θα διευκολύνει η διαθεσιμότητα πόρων της τεχνητής νοημοσύνης στο τμήμα του δικτύου πρόσβασης με Edge-AI και κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη (Alwis et al., 2023).

Επιπλέον, οι πιθανές προκλήσεις ολοκλήρωσης στο μέλλον, μπορούν να επιλυθούν στα πολύ πρώιμα στάδια με την εξέταση της ενσωμάτωσης του IBN με το 6G. Ακόμη, οι νέες προκλήσεις ασφαλείας, όπως έκθεση πληροφοριών, ανεπιθύμητη διαμόρφωση και επιθέσεις μη φυσιολογικής συμπεριφοράς που εισάγονται με τη χρήση του IBN στο 6G, μπορούν να επιλυθούν με τεχνικές που θα υπάρχουν πριν από την ενσωμάτωση του IBN στην αρχιτεκτονική 6G (π.χ. με την επικύρωση εισόδου μέσω αμοιβαίας πιστοποίησης μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή, με την ελεγχόμενη πρόσβαση μέσω εξουσιοδότησης και προληπτική παρακολούθηση βάσει τεχνητής νοημοσύνης για ανίχνευση ανωμαλιών) (Alwis et al., 2023).

Επιπροσθέτως, τα IBN δεν έχουν ευέλικτο λειτουργικό σύστημα για να συμβαδίζουν με ένα τόσο τεράστιο οικοσύστημα συσκευών χρήστη και τις ταχέως μεταβαλλόμενες επιχειρηματικές ανάγκες των δικτύων 6G. Η λύση σε αυτό βρίσκεται μέσω αυτοματισμού που βασίζεται στην μηχανική μάθηση και την τεχνητή νοημοσύνη. Τέλος, για τη διευκόλυνση δυναμικών επιχειρηματικών μοντέλων, απαιτούνται εξελίξεις προς ένα πιο ευέλικτο και έξυπνο IBN και για τη διευκόλυνση της αποτελεσματικής και ακριβούς λειτουργίας των IBN, πρέπει να διερευνηθεί η επιλογή και η βελτιστοποίηση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (Wei, Peng & Liu, 2020).

4.2.7 Έξυπνες συσκευές (SD) και Gadget ελεύθερης επικοινωνίας

Έως το 2030 αναμένεται να συνδεθούν σε δίκτυα 6G, περισσότερες από 24 δις. έξυπνες συσκευές (π.χ. smartphone, έξυπνοι αισθητήρες, έξυπνες φορητές συσκευές, έξυπνα μηχανήματα κ.λπ.), οι οποίες θα συνδυάζουν προηγμένες τεχνολογίες, έξυπνες οθόνες και αισθητήρες για να παρέχουν εξατομικευμένες ψηφιακές υπηρεσίες. Επιπλέον, οι διεπαφές χρήστη θα αξιοποιήσουν τεχνολογίες (π.χ. η εκτεταμένη πραγματικότητα (XR) και η ολογραφική τηλεπαρουσία (HT)) για να επιτρέψουν μια πληθώρα έξυπνων υπηρεσιών,

όπως η έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, οι έξυπνες πόλεις και το Industry 5.0 (Alwis et al., 2021).

Ένας άλλος τομέας που αναμένεται να διαταράξει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι έχουν πρόσβαση στις ψηφιακές υπηρεσίες είναι η gadget ελεύθερης επικοινωνίας (Kumar et al., 2018). Η gadget ελεύθερης επικοινωνίας θα εξαλείψει τις φυσικές συσκευές, παρέχοντας ταυτόχρονα ένα παντοδύναμο περιβάλλον χρήστη μέσω ολογραμμάτων, απτικών και ψηφιακών διεπαφών, στο οποίο οι αλληλεπιδράσεις των χρηστών θα ανιχνεύονται μέσω πολλαπλών αισθητήρων ικανών να καταγράφουν εισόδους χρήστη, όπως φωνή και χειρονομίες (Alwis et al., 2023).

Δυνατότητα εφαρμογών 6G στις SD και Gadget ελεύθερης επικοινωνίας

Οι έξυπνες συσκευές και τα gadget ελεύθερης επικοινωνίας προβλέπεται να είναι μια βασική κατεύθυνση της τεχνολογίας προς το 6G, καθώς θα ενεργοποιήσουν νέες αλληλεπιδράσεις, ισχυρούς υπολογιστές και ισχυρή συνδεσιμότητα, θα συμβάλουν στις δυνατότητες αιχμής της νοημοσύνης, θα υποστηρίζουν επικοινωνία THz, κβαντική επικοινωνία, VLC και LIS και τέλος, θα ενεργοποιήσουν την εκτεταμένη πραγματικότητα, την ολογραφική τηλεπαρουσία και τα gadget ελεύθερης επικοινωνίας (Alwis et al., 2023).

Το SDG διαδραματίζει βασικό ρόλο στην ενεργοποίηση εφαρμογών και συσκευών 6G, όπως τα cobots, smart-wearables, οι προηγμένοι αισθητήρες, οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας, οι γεννήτριες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα προηγμένα drones, τα έξυπνα οχήματα, οι συσκευές XR, τα απτικά, οι ολογραφικές οθόνες, τα gadget ελεύθερης επικοινωνίας κ.λπ. (Alwis et al., 2023).

Για παράδειγμα, στις εφαρμογές Industry 5.0, διάφορα κυβερνοφυσικά συστήματα αναμένεται να διευκολύνουν την αυτόνομη παραγωγή σε έξυπνα εργοστασιακά περιβάλλοντα, καθώς να λειτουργούν, να παρακολουθούνται και να συντηρούνται μέσω του digital-twin banking τους, σε τεχνολογίες όπως η XR και η ολογραφική επικοινωνία. Επιπλέον, οι εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης που συνδέουν ετερογενείς συσκευές Intelligent Internet of Medical Things (IIoMT) παράγουν μεγάλο όγκο Big Data που πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, για τη διευκόλυνση προηγμένων υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης. Επίσης, οι επισκέψεις στο νοσοκομείο μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας gadget ελεύθερης επικοινωνίας για τη δημιουργία εικονικής παρουσίας των ιατρών στους ασθενείς.

Επιπλέον, τα CAV θα αυτοφορτίζονται, θα κάνουν αυτοδιάγνωση και θα αυτοσυντηρούνται συνδέοντας με το προβλεπόμενο Energy Internet (EI) και υπηρεσίες αιχμής που βασίζονται σε νοημοσύνη. Τα UAV θα ελέγχονται με χρήση ευφυΐας αιχμής και διασύνδεσης υπολογιστών εγκεφάλου (BCI) ενσωματωμένων σε μελλοντικά δίκτυα 6G και αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς και περιβάλλοντα (βιομηχανικά, εμπορικά, επικοινωνιακά, στρατιωτικά και κινηματογραφικά περιβάλλοντα).

Προκλήσεις ανάπτυξης των SD και Gadget ελεύθερης επικοινωνίας και πιθανές λύσεις.

Στο εγγενές μέλλον, αναμένεται να αναπτυχθούν τα SDG, λόγω της μεγάλης προόδου των ηλεκτρονικών, των υπολογιστών, των έξυπνων οθονών και των προβλεπόμενων χαρακτηριστικών μέσω των μελλοντικών δικτύων επικοινωνίας 6G (υψηλοί ρυθμοί δεδομένων, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα και ευφυΐα αιχμής) (Alwis et al., 2021).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις των SDG προς το 6G, συναντώνται α) στην περαιτέρω βελτιωμένη Mobile Broad-band (FeMBB) και Mobile BroadBand and Low-Latency (MB-BLL), β) στις ολογραφικές απεικονίσεις και γ) στην ευφυΐα αιχμής (edge intelligence). Στην περίπτωση (α) οι προκλήσεις που θα απαιτηθεί να αντιμετωπισθούν είναι ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η υψηλή αξιοπιστία, η συνδεσιμότητα δικτύου εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, το περιορισμένο εύρος ζώνης, η κακή αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα δικτύου. Για την επίλυση των προαναφερόμενων ζητημάτων θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, VLC για επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και QC για εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία. Στην περίπτωση (β) οι προκλήσεις που θα απαιτηθεί να αντιμετωπισθούν είναι η ενεργοποίηση ολογραφικής επικοινωνίας, η ελεύθερη επικοινωνία gadget μέσω ολογραμμάτων, η εικονική τηλεπαρουσία, η ακριβής αναπαράσταση πληροφοριών, η αναγνώριση χειρονομιών, καθώς και η επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, η χρήσης οθονών 3-D με φωτεινό πεδίο, τρισδιάστατη αίσθηση αφής και η ευφυΐα άκρων για επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αποτελούν τις επικρατέστερες λύσεις. Αντίστοιχα, οι επεξεργαστές πολλών πυρήνων με προηγμένες τεχνικές διαχείρισης ενέργειας επιτρέπουν στις έξυπνες συσκευές να οδηγούν πολλαπλούς αισθητήρες και οθόνες υψηλής ευκρίνειας. Επιπλέον, οι εργασίες έρευνας και ανάπτυξης προχωρούν προς την υλοποίηση διαφανών ολογραφικών οθονών 360 μοιρών. Τέλος, οι προκλήσεις της περίπτωσης (γ) λαμβάνουν χώρα, στις έξυπνες συσκευές που πρέπει να έχουν πρόσβαση, σε πραγματικό χρόνο, σε

ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους. επίσης πρέπει να αντιμετωπίσουν την καθυστέρηση του δικτύου, την σπανιότητα των δεδομένων, την συνέπεια των δεδομένων, τους μηχανισμούς κινήτρων, την ασφάλεια δεδομένων και το απόρρητο. Μερικές από τις λύσεις στα προαναφερόμενα ζητήματα είναι η επικοινωνία THz για καλύτερη συνδεσιμότητα, η τεχνητή νοημοσύνη και το DLT/BC για αποκεντρωμένη διαχείριση πόρων. Επιπλέον, οι απαιτήσεις δικτύου για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας SDG αναμένεται να πραγματοποιηθούν μέσω εξελίξεων σε τεχνολογίες όπως το φάσμα THz, η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC) και οι μεγάλες ευφείς επιφάνειες (LIS).

Επίσης, η σύνδεση ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού έξυπνων συσκευών, αισθητήρων και gadget με αποκεντρωμένο τρόπο σε μελλοντικά δίκτυα 6G αναμένεται να είναι μια σημαντική πρόκληση που προβλέπεται να πραγματοποιηθεί μέσω τεχνολογιών διαχείρισης δικτύων και υπηρεσιών DLT/BC και zero touch. Επιπλέον, οι δυνατότητες ευφυΐας αιχμής σε μελλοντικά δίκτυα 6G μπορούν να αξιοποιηθούν για την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων που λαμβάνονται μέσω πολλών συσκευών σε πραγματικό χρόνο για την παροχή προηγμένων ψηφιακών υπηρεσιών. Επιπλέον, διερευνώνται αποτελεσματικοί μηχανισμοί για τη διασφάλιση της ασφάλειας του δικτύου και του απόρρητου των χρηστών σε μελλοντικά δίκτυα 6G με SDG (Alwis et al., 2023).

4.2.8 Κβαντική επικοινωνία (QC)

Οι επικοινωνίες με δυνατότητα κβαντικού υπολογισμού (QC) είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας με μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής σε δίκτυα 6G, η οποία την επόμενη δεκαετία θα είναι μια μεταμορφωτική πραγματικότητα στο δίκτυο 6G (Ghose, 2020). Η κινητήρια δύναμη του QC είναι ότι εκμεταλλεύεται τις παραδοσιακές έννοιες της φυσικής, χρησιμοποιώντας τα φωτόνια για την επεξεργασία του υπολογισμού στα κβαντικά qubits. Στέλνοντας, στη συνέχεια, τα qubit από μια μηχανή αποστολέα (ή εκπομπού) σε μια μηχανή δέκτη (Djordjevic, 2020).

Μερικά πλεονεκτήματα από τη χρήση ιπτάμενων qubits στις επικοινωνίες είναι η αδύναμη αλληλεπίδραση με ένα περιβάλλον, οι ταχύτεροι υπολογισμοί και επικοινωνίες, η κβαντική τηλεμεταφορά, η ασφάλεια επικοινωνίας και οι χαμηλές απώλειες μετάδοσης στην επικοινωνία (Wang & Rahman, 2022).

Αυτά τα συναρπαστικά χαρακτηριστικά θα κάνουν το QC μία από τις βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης στο 6G.

Δυνατότητα εφαρμογών 6G στην QC

Το μέλλον της επικοινωνίας αναμένεται να αναδιαμορφωθεί μέσω των περιπτώσεων χρήσης QC-enabled 6G. Για παράδειγμα, το κβαντικό οπτικό δίκτυο θα συμπληρωθεί για να επιτύχει σχεδόν απεριόριστη χωρητικότητα κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών 6G. Ωστόσο, αυτό θα απαιτούσε προηγμένους αλγόριθμους ή μεθόδους, όπως η προηγμένη επεξεργασία σήματος, που είναι ικανή να εκτελέσει τον άμεσο μετασχηματισμό πληροφοριών μεταξύ THz και οπτικών περιοχών. Την λύση στον περιορισμό αυτόν μπορούν να δώσουν οι κβαντικές τεχνολογίες (βασισμένες σε πλασμονικούς διαμορφωτές) (Djordjevic, 2020). Το 2019, οι Ummethala et al. στην εργασία τους προτείνουν έναν υπερ-ευρυζωνικό πλασμονικό διαμορφωτή που εκμεταλλεύεται τις εφαρμογές κβαντικών τεχνολογιών σε συστήματα και δίκτυα επικοινωνιών.

Η έρευνα 6G έχει πυροδοτήσει καινοτόμες τεχνικές, όπως είναι το κβαντικό πλαίσιο δικτύου πρόσβασης, η κβαντική μεταγωγή και η τεχνητή νοημοσύνη με δυνατότητα QC, ενώ παράλληλα συνεχίζει να αναπτύσσεται για την υλοποίηση υπηρεσιών 6G με δυνατότητα QC (Alwis et al., 2023).

Σύμφωνα με τους Granelli et al. (2022), μια νέα αρχιτεκτονική που προτείνουν, θα επέτρεπε τη μελλοντική κλασσική κβαντική επικοινωνία για μελλοντικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας την ιδέα του λογισμικού (μέσω του λογισμικού που ορίζει το δίκτυο και την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου). Συνδυάζει κυρίως κινητά ευρυζωνικά / διαδίκτυο με δυνατότητα 4G και 5G και τρισδιάστατο (δηλαδή δεδομένα, έλεγχος και κβαντικές δυνατότητες) των δικτύων επικοινωνίας 6G μέσω κβαντικού φυσικού στρώματος. Τα κύρια οφέλη αυτής της αρχιτεκτονικής θα ήταν η αναπαράσταση του κβαντικού και του παλαιού Διαδικτύου ως ενιαίας ελεγχόμενης και ανεξάρτητης-ολοκληρωμένης οντότητας. Ομοίως, το QC θα διευκολύνει τις επικοινωνιακές απαιτήσεις του IoE όπου θα χρησιμοποιηθούν εκατομμύρια συσκευές για τη συλλογή δεδομένων και τη ζήτηση αξιόπιστων, αναξιόπιστων και χαμηλού κόστους τεχνολογιών επικοινωνίας. Ωστόσο, ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η τυποποίηση νέων αρχιτεκτονικών ασφαλείας, προτύπων κρυπτογράφησης και μηχανισμών ασφάλειας δεδομένων για τον κβαντικό υπολογισμό δεν έχει ακόμη προχωρήσει (Alwis et al., 2023).

Προκλήσεις ανάπτυξης της QC και πιθανές λύσεις

Η υλοποίηση του QC για εφαρμογές 6G επιβάλλει σημαντικές προκλήσεις στην πρόβλεψη λύσεων, υπηρεσιών και εφαρμογών QC. Μια θεμελιώδης πρόκληση είναι η

μετάδοση των κβαντικών καταστάσεων σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, οι καταστάσεις των κβαντικών qubits μπορούν να διαδραματίσουν πρωταρχικό ρόλο, λόγω της ανθεκτικότητάς τους στο θόρυβο και της υψηλής ικανότητας μεταφοράς πληροφοριών (Alwis et al., 2023).

Η εφαρμογή των κβαντικών καταστάσεων είναι δύσκολη για πολλούς λόγους, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμένων πόρων και της έλλειψης επαρκών πρακτικών γνώσεων. Μια άλλη πρόκληση είναι η αποθήκευση οπτικής κβαντικής μνήμης. Πολλές έρευνες έχουν ήδη αποδείξει ότι η ικανότητα αποθήκευσης πολυδιάστατων καταστάσεων σε κβαντικές μνήμες είναι δυνατή. Ωστόσο, ελάχιστοι ερευνητές έχουν δείξει την προσαρμοστικότητα εντός των εξωτερικών πηγών qubit και των καταστάσεων υψηλών διαστάσεων που είναι αποθηκευμένες σε κβαντικές μνήμες (Alwis et al., 2023).

Επιπλέον, η ακρίβεια των δεδομένων θα είναι πρόκληση στο IoE με δυνατότητα 6G. Οι πρόσφατες καινοτομίες της βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τους κβαντικούς υπολογιστές (QCiO) έχουν προσφέρει νέα μονοπάτια για την επίτευξη ακρίβειας δεδομένων για εφαρμογές πραγματικού κόσμου (Alwis et al., 2023). Οι Bhatia & Sood (2020) παρουσίασαν ένα QCiO για την απόκτηση δεδομένων αισθητήρα IoT σε κβαντική μορφή και πέτυχαν υψηλή ακρίβεια δεδομένων και χρονική απόδοση δεδομένων.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα πρόκληση των λύσεων ασφαλείας που βασίζονται σε κβαντικά (π.χ. QKD) είναι η βιωσιμότητά τους σε συσκευές IoE με περιορισμένους πόρους. Ωστόσο, το QKD έχει τις δικές του προκλήσεις, όπως ο ρυθμός μυστικού κλειδιού (λίγα Mbps), η απόσταση (λίγα 100 δευτερόλεπτα Km) και η πρακτική και επίσημη επαλήθευση ασφαλείας (Alwis et al., 2023).

Επίσης, η κβαντική επικοινωνία βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια και την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων, καθώς η κβαντική κατάσταση επηρεάζεται, όταν κάποιος εχθρός «κρυφακούει», μετράει ή αναπαράγει οτιδήποτε στην κβαντική επικοινωνία και έτσι γίνεται άμεσα αντιληπτός (Zhang et al., 2019).

Θεωρητικά, η κβαντική επικοινωνία θα μπορούσε να είναι απόλυτα ασφαλής και κατάλληλη για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων, προσφέροντας νέες λύσεις και ανεβάζοντας τις επικοινωνίες σε υψηλότερο, από τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνιών, επίπεδο (Gyongyosi, Imre & Nguyen, 2018). Ωστόσο, αν και έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη της κβαντικής κρυπτογραφίας, τα σφάλματα εξασθένησης ινών και λειτουργίας, δυσκολεύουν την κβαντική επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων. Σύμφωνα με τους Hu et al. (2016), για την εξασφάλιση απόλυτα ασφαλών κβαντικών επικοινωνιών,

απαιτούνται αρκετοί διαφορετικοί τρόποι κβαντικής κρυπτογράφησης και άλλες τεχνικές, όπως η διανομή κβαντικού κλειδιού, η κβαντική κοινή χρήση μυστικών, η κβαντική ασφαλής απευθείας επικοινωνία, η κβαντική τηλεμεταφορά και η κβαντική πυκνή κωδικοποίηση.

Ακόμη, οι Zhang et al. (2017) έδωσαν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ασφάλεια της κβαντικής άμεσης επικοινωνίας, η οποία μπορεί να μεταδώσει μυστικά μηνύματα απευθείας μέσω ενός κβαντικού καναλιού χωρίς τη χρήση ιδιωτικού κλειδιού. Ενώ, οι Nawaz et al. (2019) παρουσίασαν μερικούς κβαντικούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούν μοντέλα διανομής κβαντικών κλειδιών για την προστασία της ασφάλειας κλειδιών.

Ως εκ τούτου, απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες για τη διερεύνηση λύσεων ασφάλειας που βασίζονται σε κβαντικά και τη βιωσιμότητά τους σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους.

4.2.9 Μοριακή επικοινωνία

Η μοριακή επικοινωνία είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρατηρείται μεταξύ ζωντανών οντοτήτων με δομές νανοκλίμακας (Akan et al., 2016). Η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τη δημιουργία και τη διάδοση ενός σήματος μοριακής επικοινωνίας είναι πολύ χαμηλή. Αυτό το φαινόμενο, αποτελεί ερευνητικό θέμα στον τομέα της επικοινωνίας κατά την τελευταία δεκαετία. Η τεχνολογία μοριακής επικοινωνίας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τις επικοινωνίες 6G (Wang et al., 2020).

Η βασική ιδέα της μοριακής επικοινωνίας είναι η χρήση βιοχημικών σημάτων για τη μετάδοση πληροφοριών. Οι Nakano et al. (2019) παρουσίασαν μια κινητή διαδικασία μοριακής επικοινωνίας που επιτρέπει στον αποστολέα, τον δέκτη και τους σχετικούς κόμβους να επικοινωνούν ενώ κινούνται.

Ωστόσο, έχουν ήδη εντοπισθεί αρκετά ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου που σχετίζονται με τη διαδικασία επικοινωνίας, ελέγχου ταυτότητας και κρυπτογράφησης. Οι Lu et al. (2015) παρουσίασαν ένα σχήμα κωδικοποίησης ικανό να ενισχύσει την ασφάλεια των μεταδιδόμενων δεδομένων και οι Loscri et al. (2014) προτείνανε ορισμένες δυνητικά αποτελεσματικές βασικές κατευθύνσεις για τη μοριακή επικοινωνία, προωθώντας την ανάπτυξη νέων μηχανισμών ελέγχου ταυτότητας για την προστασία της ασφάλειας των δεδομένων και της ιδιωτικής ζωής. Αυτοί οι συγγραφείς συζητούν επίσης διάφορες

μεθόδους επίθεσης σε διαφορετικά επίπεδα μοριακής επικοινωνίας, όπως επιθέσεις πλημμύρας, παρεμβολές και αποσυγχρονισμό (Wang et al., 2020).

4.3 Προοπτικές σεναρίων 6G

Ήδη σήμερα, βιώνουμε πώς είναι η κοινωνία και η βιομηχανία γίνεται ολοένα και πιο επικεντρωμένη στα δεδομένα και αυτοματοποιημένη. Η συγχώνευση ψηφιακού και πραγματικού κόσμου και η υποστήριξη της δικτυακής νοημοσύνης και αυτοματισμού οδηγούν την επόμενη τεχνολογική επανάσταση. Το όριο μεταξύ της επιστήμης των υπολογιστών, της τεχνητής νοημοσύνης και των τηλεπικοινωνιών εξαφανίζεται, δημιουργώντας τη δυναμική για μια πληθώρα νέων εφαρμογών. Πιθανές νέες περιπτώσεις χρήσης που παρακινούν τη μετάβαση προς τα δίκτυα 6G, είναι οι εξής (Strinati & Barbarossa, 2021):

- Διαδίκτυο νανο-βιολογικών πραγμάτων.
- Συνδεδεμένη διαβίωση.
- Ακρίβεια και εξατομικευμένη ψηφιακή υγεία.
- Συνδεσιμότητα απομακρυσμένων περιοχών.
- Διαστημική συνδεσιμότητα και υποστήριξη 3D AI.
- Έξυπνη σιδηροδρομική κινητικότητα.
- Εξαιρετική χωρητικότητα Xhaul.
- Γεωργία ακριβείας.
- Μη επανδρωμένη κινητικότητα.
- Αυτόνομη κινητικότητα οχημάτων.
- Ενσωματωμένες υπερέξυπνες πόλεις.
- Ταξίδι στο διάστημα.
- Υπηρεσίες πολλαπλών νοημάτων.
- Εκτεταμένη εμβαπτιστική πραγματικότητα πολλαπλών αισθητήρων και φορητών συσκευών.
- Πολυαισθητηριακή ολογραφική τηλεμεταφορά.
- Απτικές επικοινωνίες πολλαπλών αισθήσεων για εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα.
- Πολυαισθητηριακή συναισθηματική πληροφορική.
- Ολογραφική επικοινωνία & τηλεπαρουσία.

- Απομακρυσμένη εκπαίδευση XR.
- Κατανάλωση ψηφιακών εμπειριών σε φυσικά προϊόντα.
- Υποστήριξη ανθρωποκεντρικής τεχνητής νοημοσύνης.
- Αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου με υπολογιστή.
- Ασύρματη ρομποτική.
- Βιώσιμη συνδεσιμότητα και υποστήριξη AI.
- Society 5.0.
- Κατασκευή υψηλής ακρίβειας, αφαίρεση παρακολούθησης και ελέγχου.
- Έξυπνη πρόβλεψη καταστροφών.
- Έξυπνα ψηφιακά διπλά περιβάλλοντα.
- Αμφίδρομη διαπλοκή νοημοσύνης (φυσική ή/και τεχνητή).

Μια ευρεία κατηγορία περιπτώσεων νέας χρήσης θα χρειαστεί να υποστηρίζει εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (XR), πραγματοποιώντας μια ολόκληρη συνέχεια πραγματικότητας-εικονικότητας, όπου τόσο η πραγματικότητα όσο και η εικονικότητα μπορούν να επαυξηθούν. Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) θα υποστηρίζει εφαρμογές όπου η ανθρώπινη αντίληψη επαυξάνεται από πληροφορίες που δημιουργούνται από υπολογιστή. Αντίθετα, η εικονική πραγματικότητα αντικαθιστά το περιβάλλον του πραγματικού κόσμου με ένα προσομοιωμένο. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η επαυξημένη εικονικότητα (AV) περιλαμβάνει εφαρμογές όπου ένα αντικείμενο του πραγματικού κόσμου εισάγεται σε ένα περιβάλλον που δημιουργείται από υπολογιστή (Maier & Ebrahimzadeh, 2020). Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο, για παράδειγμα, για έναν μηχανικό που ελέγχει την εισαγωγή ενός νέου εργαλείου κατασκευής σε ένα έξυπνο εργοστάσιο ελεγχόμενο, από απόσταση, μέσω μιας εφαρμογής VR (Strinati & Barbarossa, 2021).

Οι ολογραφικές επικοινωνίες και οι πολλαπλές αισθήσεις, συμπεριλαμβανομένων των απτικών, υπηρεσίες επικοινωνίας αναμένεται επίσης να πραγματοποιηθούν σε ένα όχι και τόσο μακρινό μέλλον. Τέτοιες εφαρμογές θα κυριαρχήσουν στις υπηρεσίες όχι μόνο στη σφαίρα της ψυχαγωγίας, της τηλεδιάσκεψης, της έξυπνης εργασίας και του τουρισμού, αλλά θα επιτρέψουν επίσης περισσότερες εφαρμογές που επηρεάζουν τη ζωή και τη βιομηχανική παραγωγικότητα. Αυτές οι φουτουριστικές υπηρεσίες θα είναι για παράδειγμα το κλειδί για το όραμα της Japanese Society 5.0 ή για την απομακρυσμένη ολογραφική παρουσία, τη βιομηχανική συντήρηση σε εχθρικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα και την ευφυή παραγωγή γενικά (Strinati & Barbarossa, 2021).

Τέτοιες περιπτώσεις νέας χρήσης θα επιβάλλει αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά τη χωρητικότητα ανά ζεύξη. Για παράδειγμα, οι ολογραφικές επικοινωνίες που χρησιμοποιούν κάμερες πολλαπλής προβολής αναμένεται να απαιτούν αρκετά terabits ανά δευτερόλεπτο (Tb/s) ανά σύνδεση τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη (απαίτηση που δεν υποστηρίζεται από το 5G) και ένα αυστηρό end-to- λανθάνουσα κατάσταση λήξης (E2E) για τη διασφάλιση αρκετής πραγματικής εικονικής και απρόσκοπτης απομακρυσμένης εμπειρίας. Το 6G στοχεύει επίσης υπηρεσίες, όπως ο βιομηχανικός αυτοματισμός, το αυτόνομο σύστημα και τα τεράστια δίκτυα αισθητήρων, στα οποία οι μηχανές, και όχι οι άνθρωποι, είναι τα τελικά σημεία (Strinati & Barbarossa, 2021).

Με το 6G, οι νέες εφαρμογές δεν θα περιοριστούν στη σφαίρα της ψυχαγωγίας και της τηλεδιάσκεψης, αλλά αρχίζουν να εμφανίζονται πιο ενοχλητικές εφαρμογές, μερικές από τις οποίες επηρεάζουν τη ζωή, ενώ άλλες παρέχουν εναλλακτικές λύσεις για έξυπνη παραγωγή και έξυπνη κινητικότητα με πολυδιάστατο δίκτυο μεταφορών που αποτελείται από όλων των οχημάτων εδάφους-θαλάσσιου-αέρα-διαστημικού οχήματος με μέγιστη κινητικότητα έως και 1000 km/h (Strinati & Barbarossa, 2021).

Αυτό το πολυδιάστατο όραμα κινητικότητας ανοίγει επίσης την ευκαιρία για τρισδιάστατες (3D) εγγενείς υπηρεσίες, επιτρέποντας στους τελικούς χρήστες και μηχανές που κινούνται στον τρισδιάστατο χώρο να αντιλαμβάνονται απρόσκοπτη υποστήριξη υπηρεσιών 6G και λειτουργίες τηλεμεταφοράς cloud κατά παραγγελία, όπου και πότε είναι η υποστήριξη πληροφοριών. χρειάζεται στον τρισδιάστατο χώρο (Strinati & Barbarossa, 2021).

5 Συμπεράσματα

Η μελέτη παρουσιάζει μια συστηματική επισκόπηση του 6G δικτύου που εστιάζει στις προοπτικές και την ανάπτυξη, τις βασικές τεχνικές, τα εφαρμόσιμα σενάρια, τις τεχνολογικές εξελίξεις, τις υπάρχουσες προκλήσεις και τις πιθανές λύσεις σε κάθε τεχνολογική κατεύθυνση του δικτύου 6G. Με την παρούσα μελέτη διερευνήθηκαν επίσης τα πλεονεκτήματα και οι ευκαιρίες, που προσφέρει το δίκτυο 6G και οι τεχνολογίες του, λαμβάνοντας υπόψη πρόσφατα ερευνητικά άρθρα από όλο τον κόσμο.

Η εργασία παρουσιάζει.

Με βάση τα ευρήματα αυτής της μελέτης, συμπεραίνουμε ότι το δίκτυο 6G αναμφίβολα θα φέρει τις υπηρεσίες δικτύου σε υψηλότερο επίπεδο από αυτά των προηγούμενων γενεών.

Με την κυκλοφορία του 6G, αναμένεται ότι πολλές συσκευές που χρησιμοποιούν την υποδομή του Διαδικτύου θα συμπεριληφθούν στην καθημερινή ζωή. Η αξιοπιστία, η χαμηλή καθυστέρηση και ο υψηλός ρυθμός δεδομένων θα επιτρέψουν στο 6G να παρέχει ουσιαστική υποστήριξη IoE. Η λειτουργία σε τρισδιάστατο χώρο και η απομάκρυνση από τον απλό μέσο όρο προς τη λεπτομερή ανάλυση που ασχολείται με τις ουρές, τις κατανομές και την ποιότητα φυσικής εμπειρίας (QoPE) συνιστώνται για ανάλυση και βελτιστοποίηση απόδοσης 6G. Για την επίτευξη αυτών των υψηλών στόχων, οι τεχνικές AI/ML θα είναι κρίσιμα στοιχεία του 6G. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να βελτιστοποιηθούν γρήγορα.

Η αρχιτεκτονική 6G θα λύσει πολλά ζητήματα και θα παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Από την άποψη της πρόσβασης στο δίκτυο, το 6G θα περιλαμβάνει διάφορα δίκτυα πρόσβασης, όπως κινητά δίκτυα, δορυφορικές επικοινωνίες, επικοινωνίες αεροπλάνου, υποβρύχιες ακουστικές επικοινωνίες και ορατά ελαφριές επικοινωνίες. Από την άποψη της κάλυψης δικτύου, το 6G θα δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο δίκτυο στο διάστημα, τον αέρα, τους ωκεανούς και τη γη για να επιτύχει πραγματικά απρόσκοπτη παγκόσμια κάλυψη ολοκληρωμένων πληροφοριών (Huang et al., 2019; Xu, 2020). Από την άποψη της απόδοσης του δικτύου, το 6G θα βελτιώσει σημαντικά τον ρυθμό μετάδοσης, τον λανθάνοντα χρόνο από άκρο σε άκρο, την αξιοπιστία, την πυκνότητα σύνδεσης, την αποδοτικότητα του φάσματος και την αποδοτικότητα του δικτύου για να καλύψει τις διαφορετικές ανάγκες δικτύου διαφόρων βιομηχανιών. Από την άποψη της ευφυΐας δικτύου, το

δίκτυο 6G και οι χρήστες του θα γίνουν ένα ενοποιημένο αντικείμενο. Η ΑΙ θα μελετήσει τις ανάγκες των χρηστών σε μεγαλύτερο βάθος και κάθε χρήστης θα μπορεί να βελτιώσει την εμπειρία χρήστη μέσω των βοηθών τεχνητής νοημοσύνης. Από την άποψη των ορίων υπηρεσιών δικτύου, ο στόχος των υπηρεσιών 6G θα επεκταθεί από ανθρώπους, μηχανές και φυσικά αντικείμενα στον φυσικό κόσμο στον εικονικό κόσμο (Giordani et al., 2020; Lu & Zheng, 2020).

Το 6G θα υλοποιήσει τις εξατομικευμένες και έγκαιρες ανάγκες της αειφόρου ανάπτυξης των ΤΠΕ. Το δίκτυο θα συνεχίσει να διεισδύει σε πανταχού παρόντες χώρους, σε πράξεις που γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο και στην εικονική κοινωνία. Θα μας παρέχει μια έξυπνη, βαθιά, ολογραφική, πανταχού παρούσα, απρόσκοπτη και ασφαλή υποδομή δικτύου. Με τη συνεχή καινοτομία και τον μετασχηματισμό της ΑΙ, το δίκτυο 6G θα ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του ατόμου και των βιομηχανιών στην πράξη.

Υπό το φως αυτών των πληροφοριών, είναι σαφές ότι η ζωή μας θα γίνει πιο άνετη. Η προσαρμογή σε έναν μελλοντικό ψηφιοποιημένο κόσμο μπορεί να είναι δυνατή μόνο με το 6G. Δεδομένου ότι αυτές οι καινοτομίες θα ενσωματωθούν σε κάθε πτυχή της ζωής και σε όλους τους τομείς, θα οδηγήσουν σε έναν νέο τρόπο ζωής. Κατά συνέπεια, οι χώρες θα είναι σε θέση να αναπτυχθούν περαιτέρω με τη χρήση αυτών των καινοτομιών.

Βιβλιογραφία

1. Akan O.B., Ramezani H., Khan T., Abbasi N.A., Kuscü M., 2016, “Fundamentals of molecular information and communication science”, *Proc. IEEE* 105 (2) 306–318.
2. Akyildiz I.F., Jornet J.M., Han C., 2014, “Terahertz band: next frontier for wireless communications”, *Phys. Commun.* 12 16–32.
3. Ahmad I., Shahabuddin S., Kumar T., Okwuibe J., Gurtov A., Ylianttila M., 2019, “Security for 5g and beyond”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 21 (4) 3682–3722.
4. Banafaa M., Shayeia I., Din J., Azmi H.M., Alashbi A., Daradkeh I.Y., Alhammadi A., 2022, “6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges” in *Alexandria Engineering Journal* by Alexandria University, pp: 245-274.
5. Bang A., Kamal K.K., Joshi P., Bhatia K., 2023, “International Conference on Machine Learning and Data Engineering. 6G: The Next Giant Leap for AI and ML”, in *Procedia Computer Science* by Elsevier, ScienceDirect, pp. 310-317.
6. Bhatia M., Sood S.K., 2020, “Quantum computing-inspired network optimization for IoT applications”, *IEEE Internet Things J.* 7 (6) 5590–5598.
7. Brookson C., 1994 “Gsm security: a description of the reasons for security and the techniques”, in: *IEE Colloquium on Security and Cryptography Applications to Radio Systems*, 2/1–2/4.
8. Calvanese Strinati E. & Barbarossa S., 2021, “6G networks: Beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications”, in *Computer Networks* by Elsevier, ScienceDirect, 190: 107930.
9. Cao J., Ma M., Li H., Zhang Y., Luo Z., 2013, “A survey on security aspects for lte and lte-a networks”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 16 (1) 283–302.
10. Cattaneo G., De Maio G., Petrillo U.F., 2013, “Security issues and attacks on the gsm standard: a review”, *J. UCS* 19 (16) 2437–2452.
11. Chandra P., Bensky D., Bradley T., Hurley C., Rackley S.A., Rittinghouse J., Ransome J.F., Cism C., Stapko T., Stefanek G.L., et al., 2011, “Wireless Security: Know it All”, Newnes.

12. Chen C., Bian R., Haas H., 2018, "Omnidirectional transmitter and receiver design for wireless infrared uplink transmission in lifi, in: 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), IEEE, pp. 1–6.
13. Chen S., Liang Y.C., Sun S., Kang S., Cheng W., Peng M., 2020, "Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed", *IEEE Wirel. Commun.* 27 (2) 218–228.
14. Chen X., Li C., Wang D., Wen S., Zhang J., Nepal S., Xiang Y., Ren K., 2019, "Android hiv: a study of repackaging malware for evading machine-learning detection", *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 15 987–1001.
15. Cho S., Chen G., Coon J.P., 2019, "Enhancement of physical layer security with simultaneous beamforming and jamming for visible light communication systems", *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* 14 (10) 2633–2648.
16. Chowdhury M.Z., Shahjalal M., Hasan M., Jang Y.M., 2019, "The role of optical wireless communication technologies in 5G/6G and IoT solutions: prospects, directions, and challenges", *Appl. Sci.* 9 (20) 4367.
17. Chuah M.C., 2010, "Universal mobile telecommunications system (umts) quality of service (qos) supporting variable qos negotiation", *uS Patent* 7,668,176.
18. Dang S., Amin O., Shihada B., Alouini M.S., 2020, "What should 6g be?", *Nat. Electron.* 3 (1) 20–29.
19. Dao N-N, 2022, "Internet of wearable things: Advancements and benefits from 6G technologies", in *Future Generation Computer Systems* by Elsevier, ScienceDirect, pp. 172–184.
20. De Alwis C., Kalla A., Pham Q.V., Kumar P., Dev K., Hwang W.J., Liyanage M., 2021, "Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research", *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2 836–886.
21. De Alwis C., Kumar P., Pham Q-V., Dev K., Kalla A., Liyanage M., Hwang W-J., 2022, "Towards 6G: Key technological directions", in *Information & Communications Technology Express* by the Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS), ScienceDirect, pp.525-533.
22. DeLima C., Belot D., Berkvens R., Bourdoux A., Dardari D., Guillaud M., Isomursu M., Lohan E.S., Miao Y., Barreto A.N., et al., 2021, "Convergent communication, sensing and localization in 6g systems: An over view of technologies, opportunities and challenges", *IEEE Access*, vol.9 , pp.26902-26925.

23. Djordjevic I.B., 2020, ‘On global quantum communication networking’, *Entropy* 22 (8) 831.
24. Elmeadawy S., Shubair R.M., 2019, “6g wireless communications: future technologies and research challenges”, in: 2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), IEEE, pp. 1–5.
25. Ericsson, 2021, Ericsson mobility report, URL <https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>
26. Ferraro P., King C., Shorten R., 2018, “Distributed ledger technology for smart cities, the sharing economy, and social compliance”, *IEEE Access* 6 62728–62746.
27. Gindraux S., 2002, “From 2g to 3g: a guide to mobile security, in: Third International Conference on 3G Mobile Communication Technologies”, *IET*, pp. 308–311.
28. Giordani M., Polese M., Mezzavilla M., Rangan S., Zorzi M., 2020, “Toward 6G networks: use cases and technologies”, *IEEE Commun. Mag.* 58 (3) 55–61.
29. GPS.GOV, χ.χ., “Other global navigation satellite systems (GNSS)”. <https://www.gps.gov/systems/gnss/>, Access date: 26/02/2024.
30. Granelli F., Bassoli R., Notzel J., Fitzek F.H., Boche H., da Fonseca N.L., 2022, “A novel architecture for future classical-quantum communication networks, *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2022.
31. Gupta L., Jain R., Vaszkun G., 2015, “Survey of important issues in uav communication networks”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 18 (2) 1123–1152.
32. Gyongyosi L., Imre S., Nguyen H.V., 2018, “A survey on quantum channel capacities”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 20 (2) 1149–1205.
33. Hu J.Y., Yu B., Jing M.Y., Xiao L.T., Jia S.T., Qin G.Q., Long G.L., 2016, “Experimental quantum secure direct communication with single photons”, *Light Sci. Appl.* 5 (9), e16144.
34. Huang C., Hu S., Alexandropoulos G.C., Zappone A., Yuen C., Zhang R., Debbah M., (2019), “Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: opportunities, challenges, and trends”, *arXiv preprint arXiv:1911.12296*.
35. Huang T., Yang W., Wu J., Ma J., Zhang X., Zhang D., 2019, “A survey on green 6G network: architecture and technologies”, *IEEE Access* 7 175758–175768.
36. Huq K.M.S., Busari S.A., Rodriguez J., Frascolla V., Bazzi W., Sicker D.C., 2019, “Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultra-fast networks: A brief survey”, *IEEE Netw.* 33 (4) 89–95.

37. Islim M.S., Ferreira R.X., He X., Xie E., Videv S., Viola S., Watson S., Bamiedakis N., Pentty R.V., White I.H., et al., 2017, "Towards 10 gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a Gan violet micro-LED", *Photon. Res.* 5 (2) A35–A43.
38. ITU, $\chi\chi$, <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. Access Date: 27/12/2023.
39. Jaber M., Imran M.A., Tafazolli R., Tukmanov A., 2016, "5g backhaul challenges and emerging research directions: a survey, *IEEE Access* 4 1743–1766.
40. Jiang C., Zhang H., Ren Y., Han Z., Chen K.C., Hanzo L., 2016, "Machine learning paradigms for next-generation wireless networks", *IEEE Wireless Commun.* 24 (2) 98–105.
41. Karam G.M., Gruber M., Adam I., Boutigny F., Miche Y., Mukherjee S., 2022, "The evolution of networks and management in a 6G world: An inventor's view", *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*
42. Kato N., Mao B., Tang F., Kawamoto Y., Liu J., 2020, "Ten challenges in advancing machine learning technologies toward 6G", *IEEE Wireless Commun.*
43. Katz M., Pirinen P., Posti H., 2019, "Towards 6G: getting ready for the next decade", 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), IEEE, pp. 714–718.
44. Kiyomoto S., Basu A., Rahman M.S., Ruj S., 2017, "On blockchain-based authorization architecture for beyond-5g mobile services", in: 2017 12th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST), IEEE, pp. 136–141.
45. Kotobi K., Bilen S.G., 2018, "Secure blockchains for dynamic spectrum access: a decentralized database in moving cognitive radio networks enhances security and user access", *IEEE Veh. Technol. Mag.* 13 (1) 32–39.
46. Kumar T., Porambage P., Ahmad I., Liyanage M., Harjula E., Ylianttila M., 2018, "Securing gadget-free digital services", *Computer* 51 (11) 66–77.
47. Lee K., Park H., 2011, "Modulations for visible light communications with dimming control", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 23 (16) 1136–1138.
48. Letaief K.B., Chen W., Shi Y., Zhang J., Zhang Y.J.A., 2019, "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks", *IEEE Commun. Mag.* 57 (8) 84–90.
49. Ling X., Wang J., Bouchoucha T., Levy B.C., Ding Z., 2019, "Blockchain radio access network (b-ran): towards decentralized secure radio access paradigm", *IEEE Access* 7 9714–9723.

50. Loscri V., Marchal C., Mitton N., Fortino G., Vasilakos A.V., 2014, ‘Security and privacy in molecular communication and networking: opportunities and challenges’, *IEEE Trans. NanoBioscience* 13 (3) 198–207.
51. Loven L., Leppanen T., Peltonen E., Partala J., Harjula E., Porambage P., Ylianttila M., Riekkari J., 2019, “Edge AI: A vision for distributed, edge-native artificial intelligence in future 6g networks”, *The 1st 6G Wireless Summit*, pp. 1–2.
52. Lu Y., 2019, “The blockchain: state-of-the-art and research challenges”, *J. Ind. Inf. Integr.* 15 80–90.
53. Lu Y., Higgins M.D., Leeson M.S., 2015, “Comparison of channel coding schemes for molecular communications systems”, *IEEE Trans. Commun.* 63 (11) 3991–4001.
54. Lu Y. & Zheng X., 2020, “6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues”, in *Journal of Industrial Information Integration by Elsevier, ScienceDirect*, 19: 100158.
55. Luo J., Fan L., Li H., 2017, “Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 19 (4) 2871–2893.
56. McLean S., Deane-Johns S., 2016, “Demystifying blockchain and distributed ledger technology—hype or hero”, *Comput. Law Rev. Int.* 17 (4) 97–102.
57. Mahmood A., et al., 2022, “Industrial IoT in 5G-and-beyond networks: Vision, architecture, and design trends”, *IEEE Trans. Ind. Inform.* 18 (6) 4122–4137.
58. Maier M. & Ebrahimzadeh A., 2020, “Toward 6G: A New Era of Convergence”, *John Wiley & Sons*.
59. Marco G., et al., 2020, ‘Toward 6G networks: use cases and technologies’, *IEEE Commun. Mag.* 58 (3) 55–61.
60. Marzetta T. L., 2010, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600.
61. Mostafa A., Lampe L., 2014, “Physical-layer security for indoor visible light communications”, in: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, pp. 3342–3347.
62. Nawaz S.J., Sharma S.K., Wyne S., Patwary M.N., Asaduzzaman M., 2019, “Quantum machine learning for 6g communication networks: state-of-the-art and vision for the future”, *IEEE Access* 7 46317–46350.

63. Nakano T., Okaie Y., Kobayashi S., Hara T., Hiraoka Y., Haraguchi T., 2019, "Methods and applications of mobile molecular communication", *Proc. IEEE* 107 (7) 1442–1456.
64. Pathak P.H., Feng X., Hu P., Mohapatra P., 2015, "Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges", *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 17 (4) 2047–2077.
65. Pattaranantakul M., He R., Song Q., Zhang Z., Meddahi A., 2018, "Nfv security survey: from use case driven threat analysis to state-of-the-art countermeasures", *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 20 (4) 3330–3368.
66. Prados-Garzon J., Adamuz-Hinojosa O., Ameigeiras P., Ramos-Munoz J.J., Andres-Maldonado P., Lopez-Soler J.M., 2016, "Handover implementation in a 5g sdnbased mobile network architecture", in: 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), IEEE, pp. 1–6.
67. Puthal D., Malik N., Mohanty S.P., Kougianos E., Yang C., 2018, "The blockchain as a decentralized security framework [future directions]", *IEEE Consum. Electron. Mag.* 7 (2) 18–21.
68. Qi Q., Chen X., Zhong C., Zhang Z., 2020, "Integration of energy, computation and communication in 6G cellular internet of things", *IEEE Commun. Lett.*
69. Saad W., Bennis M., Chen M., 2019, "A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems", *IEEE Netw.* 34 (3) 134–142.
70. Seddigh N., Nandy B., Makkar R., Beaumont J.F., 2010, "Security advances and challenges in 4g wireless networks, in: 2010 Eighth International Conference on Privacy, Security and Trust, IEEE, pp. 62–71.
71. Series M., 2015, "Imt vision–framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond," *Recommendation ITU*, vol. 2083, p. 21.
72. Shafin R., Liu L., Chandrasekhar V., Chen H., Reed J., Zhang J.C., 2020, "Artificial intelligence-enabled cellular networks: a critical path to beyond-5G and 6G", *IEEE Wirel. Commun.* 27 (2) 212–217.
73. Sharma P., 2013, "Evolution of mobile wireless communication networks-1g to 5g as well as future prospective of next generation communication network:, *Int. J. Comput. Sci. Mobile Comput.* 2 (8) 47–53.

74. Shohini Ghose, 2020, “Are you ready for the quantum computing revolution?”, URL <https://hbr.org/2020/09/are-you-ready-for-the-quantum-computing-revolution> (Accessed on 24 January 2024).
75. Strinati E. C., Barbarossa S., Gonzalez-Jimenez J. L., Ktenas D., Cassiau N., Dehos C., 2019, “6g: the Next Frontier, arXiv_Preprint arXiv:1901.03239.
76. Tang F., Kawamoto Y., Kato N., Liu J., 2020, “Future intelligent and secure vehicular network toward 6g: machine-learning approaches”, *Proc. IEEE*, 108 (2) pp. 292 – 307.
77. Tariq F., Khandaker M., Wong K.K., Imran M., Bennis M., Debbah M., 2019, “A Speculative Study on 6g”, *arXiv Preprint arXiv:1902.06700*.
78. Tomkos I., Klonidis D., Pikasis E., Theodoridis S., 2020, “Toward the 6g network era: opportunities and challenges”, *IT Prof.* 22 (1) 34–38.
79. Ucar S., Coleri Ergen S., Ozkasap O., Tsonev D., Burchardt H., 2016, “Secvle: secure visible light communication for military vehicular networks”, in: *Proceedings of the 14th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 123–129.
80. Ummethala S., et al., 2019, “THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator”, *Nat. Photonics* 13 (8) 519–524.
81. Varshney U., 2012, “4g wireless networks”, *IT Prof.* 14 (5) 34–39.
82. Wang C., Rahman A., 2022, “Quantum-enabled 6G wireless networks: Opportunities and challenges”, *IEEE Wirel. Commun.* 29 (1) 58–69.
83. Wang C.X., Haider F., Gao X., You X.H., Yang Y., Yuan D., Aggoune H. M., Haas H., Fletcher S., Hepsaydir E., 2014, “Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks,” *IEEE communications magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130.
84. Wang M., Zhu T., Zhang T., Zhang J., Yu S., Zhou W., 2020, “Security and privacy in 6G networks: New areas and new challenges”, in *Digital Communications and Networks by Chongqing University of Posts and Telecommunications*, ScienceDirect, pp.281-291.
85. Wang W., Srivastava G., Lin J.C.W., Yang Y., Alazab M., Gadekallu T.R., 2022, “Data freshness optimization under CAA in the UAV-aided MECN: a potential game perspective”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*

86. Wei Y., Liu H., Ma J., Zhao Y., Lu H., He G., 2019, "Global voice chat over short message service of beidou navigation system", in: 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, pp. 1994–1997.
87. Wei Y., Peng M., Liu Y., 2020, "Intent-based networks for 6G: Insights and challenges, *Digit. Commun. Netw.* 6 (3) 270–280.
88. Xu L., 2020, "Industrial information integration - An emerging subject in industrialization and informatization process", *J. Ind. Inf. Integr.* 17 100128.
89. Yang P., Xiao Y., Xiao M., Li S., 2019, "6g wireless communications: vision and potential techniques", *IEEE Network* 33 (4) 70–75.
90. Yao H., Wang L., Wang X., Lu Z., Liu Y., 2018, "The space-terrestrial integrated network: an overview", *IEEE Commun. Mag.* 56 (9) 178–185.
91. Yrjola S., 2020, "How could Blockchain transform 6G towards open ecosystemic business models?", in: 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, IEEE, pp. 1–6.
92. Yuan Y., Zhao Y., Zong B., Parolari S., 2020, "Potential key technologies for 6g mobile communications" *Science China Information Sciences*, vol.63, no.8, pp.1–19.
93. Zeb S., et al., 2022, "Industrial digital twins at the nexus of nextg wireless networks and computational intelligence: A survey", *J. Netw. Comput. Appl.* 200 103309.
94. Zeb S., et al., 2021, "Edge intelligence in softwarized 6G: Deep learningenabled network traffic predictions", in: IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, pp.1-6.
95. Zhang H., Duan Y., Long K., Leung V.C., 2021, "Energy efficient resource allocation in Terahertz downlink NOMA systems", *IEEE Trans. Commun.* 69 (2) 1375–1384.
96. Zhang H., Zhang L., Yu X., 2021, "Terahertz band: Lighting up nextgeneration wireless communications", *China Commun.* 18 (5) 153–174.
97. Zhang W., Ding D.S., Sheng Y.B., Zhou L., Shi B.S., Guo G.C., 2017, "Quantum secure direct communication with quantum memory", *Phys. Rev. Lett.* 118 (22) 220501.
98. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G.K., Fan P., 2019, "6g wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies", *IEEE Veh. Technol. Mag.* 14 (3) 28–41.

99. Zhang S., Zhu D., 2020, “Towards artificial intelligence enabled 6G: State of the art, challenges, and opportunities” in *Computer Networks* by Elsevier, ScienceDirect, 183: 107556.
100. Zhang T., Zhu T., Xiong P., Huo H., Tari Z., Zhou W., 2020, “Correlated differential privacy: feature selection in machine learning”, *IEEE Trans.*
101. Zhang Y., Zhao W., Dong P., Du X., Qiao W., Guizani M., 2021, “Improve the reliability of 6G vehicular communication through skip network coding”, in *Vehicular Communications* by Elsevier, ScienceDirect, 33: 100400.
102. Zhao Y.J., Yu G.H., Xu H.Q., 2019, “Mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies”, *Scientia Sinica Inf.* 49 (8) 963–987.
103. Zhu T., Li G., Zhou W., Philip S.Y., 2017, “Differentially private data publishing and analysis: a survey”, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 29 (8) 1619–1638.
104. Zhu T., Xiong P., Li G., Zhou W., Philip S. Y., χχ, “Differentially private model publishing in cyber physical systems”, *Future Generat. Comput. Syst.*