



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

6G: Αρχιτεκτονική και Προκλήσεις

Χριστίνα Γ. Δούση

Επιβλέπων: Νίκος Πασσάς, μέλος ΕΔΙΠ

ΑΘΗΝΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

6G: Αρχιτεκτονική και Προκλήσεις

Χριστίνα Γ. Δούση

A.M.: 1115 2014 00274

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Νίκος Πασσάς, Μέλος ΕΔΙΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την επιταχυνόμενη εξέλιξη των έξυπνων τερματικών και την αυξανόμενη τάση εμφάνισης νέων εφαρμογών, η ασύρματη κίνηση πληροφοριών έχει βελτιωθεί απότομα και τα υπό εξέλιξη κυψελωτά δίκτυα (ακόμη και το 5G) δεν μπορούν να ανταγωνιστούν πλήρως τις ταχέως αναδυόμενες τεχνικές ανάγκες. Ένα νέο πλαίσιο ασύρματης επικοινωνίας, το πλαίσιο της έκτης γενιάς (6G), με κύρια βοήθεια από την τεχνητή νοημοσύνη αναμένεται να εφαρμοστεί κάπου στο εύρος του 2027 και του 2030. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια κριτική ανάλυση του του οράματος ασύρματης επικοινωνίας του 6G και της δομής του δικτύου του. Επίσης, περιγράφονται μια σειρά από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις, όπως το άνοιγμα του φάσματος υπο-terahertz για αυξημένη απαίτηση εύρους ζώνης και τη δυνατότητα χρήσης αυτών των εύρους ζώνης, η ώθηση των ορίων των τεχνολογιών ημιαγωγών για λειτουργία εντός αυτών των ζωνών, η ανάπτυξη σχεδίων και αρχιτεκτονικών πομποδέκτη για την πραγματοποίηση υψηλών ταχυτήτων δεδομένων αιχμής και την επίτευξη καθυστερήσεων δευτερολέπτου σε επίπεδο δικτύου για την επίτευξη βασικών δεικτών απόδοσης 6G. Επιπλέον καθορίζονται πιθανές λύσεις που σχετίζονται με το 6G, καθώς και διαδικασίες μετάδοσης φυσικού επιπέδου, σχέδια δικτύου και μέθοδοι ασφαλείας.

Πιο συγκεκριμένα, η δομή της εργασίας είναι η εξής: Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη εισαγωγή για τη σημασία των τηλεπικοινωνιών, φτάνοντας στο 6G. Στο κεφάλαιο 2 ακολουθεί μια αναφορά στις προηγούμενες γενιές επικοινωνιών από το 1G μέχρι και το 5G Advanced, εστιάζοντας κυρίως στο τελευταίο, καθώς είναι και η τρέχουσα τελευταία τεχνολογία (σε συνδυασμό με 3G, 4G) που χρησιμοποιείται. Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται το όραμα της αρχιτεκτονικής του 6G, το οποίο θα μπορούσε να το στηρίξει, καθώς και τεχνικά θέματα που μπορεί να προκύψουν σε τομείς όπως στις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης, στην ασφάλεια, στους πόρους του δικτύου, στην ετερογένεια των δικτύων και στις απτικές επικοινωνίες. Στο κεφάλαιο 4 συζητούνται εκτενέστερα προκλήσεις που συναντώνται στο 6G, αναφερόμενοι στις απαιτήσεις που θα πρέπει να πληροί. Τέλος, στο κεφάλαιο 5, γίνεται μια σύνοψη και αναφέρονται σκέψεις και συμπεράσματα για το μέλλον, καθοριζόμενες από την εξέλιξη του 6G.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: κινητές επικοινωνίες, δίκτυα έκτης γενιάς, δίκτυα πέμπτης γενιάς, ραδιοτεχνολογία, ευρυζωνικό δίκτυο

ABSTRACT

With the accelerated development of smart terminals and the increasing trend of new applications, wireless information traffic has improved sharply, and the evolving cellular networks (even 5G) cannot fully compete with the rapidly emerging technical needs. A new wireless communication framework, the sixth generation (6G) framework, mainly assisted by artificial intelligence is expected to be implemented sometime in the range of 2027 and 2030. This project presents a critical analysis of the 6G wireless communication vision and structure of its network. A number of important technical challenges are also described, such as opening up the sub-terahertz spectrum for increased bandwidth requirement and the ability to use these bandwidths, pushing the limits of semiconductor technologies to operate within these bands, developing designs and transceiver architectures to realize peak high data rates and achieve sub-second network-level latencies to meet 6G Key Performance Indicators. In addition, possible solutions related to 6G are specified, as well as physical layer transmission procedures, network designs and security methods.

More specifically, the structure of the project is as follows: In chapter 1, a brief introduction is made on the importance of telecommunications, reaching 6G. Following, in chapter 2 a reference is made to the previous generations of communications from 1G to 5G Advanced, focusing mainly on the latter, as it is also the current latest technology (together with 3G, 4G) in use. In chapter 3 is discussed the vision of the 6G architecture that could support it, as well as technical issues that may arise in areas such as radio access technologies, security, network resources, network heterogeneity, and tactile communications. In chapter 4 is discussed in more detail challenges encountered in 6G, referring to the requirements it will have to meet. Finally, in chapter 5, a summary is made and thoughts and conclusions for the future, determined by the evolution of 6G.

SUBJECT AREA: Communication Networks

KEYWORDS: mobile communications, sixth generation networks, fifth generation networks, radiotechnology, broadband network

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, μέλος Ε.Δ.Ι.Π κ. Νίκο Πασσά, για την υποστήριξη και την πολύτιμη συμβολή του στην ολοκλήρωση της, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2. ΑΠΟ ΤΟ 1G ΣΤΟ 5G	13
2.1 Πρώτη γενιά (1G αναλογική τεχνολογία).....	13
2.2 Δεύτερη γενιά (2G ψηφιακή τεχνολογία)	13
2.3 Τρίτη γενιά (3G)	13
2.4 Τέταρτη γενιά (4G).....	14
2.5 Πέμπτη γενιά (5G).....	14
2.5.1 Τομείς εφαρμογής	15
2.6 Εξελιγμένο 5G (5G Advanced)	16
2.6.1 Τρέχουσα αγορά 5G.....	16
2.6.2 Η εποχή του 5G – Advanced	17
2.6.3 Σημαντικές βελτιώσεις στο 5G – Advanced	18
3. ΟΡΑΜΑ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ 6G.....	21
3.1 Πλαίσιο για τη χρήση πόρων χώρου, συχνότητας και χρόνου	21
3.2 Συσχέτιση με το δίκτυο κεραιών	22
3.3 Όραμα συνδεσιμότητας.....	23
3.4 Αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες	24
3.5 Σενάρια αρχιτεκτονικής 6G.....	25
3.6 Σύγκριση του 5G και 6G	27
3.7 Τεχνικά θέματα.....	28
3.7.1 Όρια στις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης	28
3.7.2 Θέματα ασφάλειας δικτύου	29
3.7.3 Πόρος ως υπηρεσία (Resource as a Service)	29
3.7.4 Ετερογενή δίκτυα σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων	29
3.7.5 Απτικές επικοινωνίες	30
4. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΟΥ 6G	31
4.1 Αξιοποίηση του φάσματος σε συχνότητες υπο-terahertz	31
4.2 Όρια των τεχνολογιών των ημιαγωγών	31
4.3 Ενσωμάτωση του σχεδιασμού των πομποδεκτών σε συχνότητες υπο-terahertz.....	33
4.4 Επίτευξη ρυθμών terabit/ sec στην πραγματικότητα.....	34

4.5	Κατανόηση και επίτευξη των καθυστερήσεων σε επίπεδο υπο-millisecond.....	37
4.6	Κατάρριψη των εμποδίων συμβατότητας προς τα πίσω	38
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	45
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	48
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Χρονοδιάγραμμα τυποποίησης από τη 3GPP, [11].	17
Εικόνα 2: Πλαίσιο 6G για τη χρήση πόρων χώρου, συχνότητας και χρόνου, [12].	21
Εικόνα 3: Το 6G με το δορυφορικό δίκτυο, [13].	22
Εικόνα 4: Όραμα 6G.	23
Εικόνα 5: Η αρχιτεκτονική του του 6G δικτύου, χωρίς κυψέλες, [14].	25
Εικόνα 6: Πιθανά σενάρια της αρχιτεκτονικής επικοινωνίας του 6G, [15].	26
Εικόνα 7: Σύγκριση ανάμεσα στην επικοινωνία 5G και 6G, [16].	27
Εικόνα 8: Ποιοτική απεικόνιση τεχνολογιών που εξετάζουν την αποδοτικότητα, τη λειτουργικότητα και το κόστος, [21].	33
Εικόνα 9: Παράδειγμα μιας massive συστοιχίας MIMO, που αποτελείται από υποπίνακες $M \times N$, όπου κάθε υποπίνακας έχει 32×16 διαπολωτικά στοιχεία, [5].	35
Εικόνα 10: CDF για ρυθμό δεδομένων ultra massive MIMO ενός χρήστη με 4.096 κεραίες σταθμούς βάσης σε τέσσερις συστοιχίες που εξυπηρετούν ένα UE με 16 κεραίες σε εύρος ζώνης 10GHz.	36
Εικόνα 11: Μια πιθανή αρχιτεκτονική συστήματος 6G σε μια μη αυτόνομη διαμόρφωση που συνυπάρχει με συστήματα 4G και 5G – NR.	38
Εικόνα 12: Μια πιθανή αρχιτεκτονική συστήματος 6G σε αυτόνομη διαμόρφωση που συνυπάρχει με συστήματα 4G και 5G.	39
Εικόνα 13: Λειτουργία 6G σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών/ περιοχών συχνοτήτων που ξεκινούν από συχνότητες χαμηλότερες του 1 GHz έως τάξη συχνοτήτων υπο-terahertz.	40

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση των KPIs του 5G και 6G, [17].	28
Πίνακας 2: Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διάφορων κυματομορφών διεπαφής αέρα για ασύρματα συστήματα 6G, [5].	40

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο "6G: Αρχιτεκτονική και Προκλήσεις" εκπονήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, στα πλαίσια των υποχρεώσεων μου του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών.

Η εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας έγινε στα πλαίσια της συνεργασίας με τον κύριο Νίκο Πασσά, και έχει ως σκοπό τη μελέτη των δικτύων 6^{ης} γενιάς, που δεν έχουν βγει ακόμα στην αγορά, με τα υπό σχεδίαση όραμα και αρχιτεκτονική του καθώς και προκλήσεις που αναμένονται να συναντηθούν, λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι το 5G εξακολουθεί να βρίσκεται στη φάση της εμπορικής εδραίωσης και ανάπτυξης, δηλαδή, τα σχετικά τεχνικά χαρακτηριστικά πρέπει να βελτιωθούν περαιτέρω και το επιχειρηματικό μοντέλο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και οι καταστάσεις εφαρμογών κάθετης βιομηχανίας (vertical industry) θα πρέπει να διερευνηθούν επιπλέον, είναι επίσης υποχρεωτική η θέσπιση οράματος για τις μελλοντικές επικοινωνιακές ανάγκες της κοινωνίας της πληροφορίας. Η έρευνα ιδεών και τεχνολογίας για το σύστημα κινητής επικοινωνίας επόμενης γενιάς θα πρέπει να συνεχίσει να διερευνάται. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια ανάλυσης της αναγκαιότητας της άμεσης εκκίνησης της ιδέας και της τεχνολογικής έρευνας για το σύστημα κινητής επικοινωνίας επόμενης γενιάς που αναφέρεται ως 6G, καθώς και οι προκλήσεις που αυτό μπορεί να επιφέρει.

Ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας 6G απαιτεί εξαιρετικά γρήγορη ταχύτητα, αύξηση χωρητικότητας και μακρινές αποστάσεις, προκειμένου να υποστηριχθεί η πιθανότητα νέων εφαρμογών, όπως δυναμική ιατρική, πρόβλεψη υπολογιστικών καταστροφών και εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality – VR). Υπό το πρίσμα των προηγούμενων προκαθορισμένων κανονισμών για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι πρώτες ζεύξεις 6G θα βασίζονται κυρίως στην τρέχουσα υποδομή 5G, επωφελούμενες από τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν στο 5G (για παράδειγμα, η αύξηση των επιτρεπόμενων ζωνών συχνοτήτων βελτιστοποίησε επίσης το σχεδιασμό ενός αποκεντρωμένου συστήματος). Περίπου το 2030, τα έξυπνα δίκτυα είναι πιθανό να επηρεαστούν από τα δεδομένα, επιτρέποντας άμεση και απεριόριστη ασύρματη συνδεσιμότητα. Ως αποτέλεσμα, το 6G θα πρέπει να προωθήσει τις ασύρματες τεχνολογίες και να επιτύχει την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος. Ως ένα όραμα που στοχεύει στο μέλλον, όσον αφορά την ταχύτητα, το 6G είναι πιθανό να χρησιμοποιεί ένα προηγμένο φάσμα συχνοτήτων από τις προηγούμενες γενιές για να προωθήσει τη ροή δεδομένων που εκτιμάται σε 100 έως 1000 φορές ταχύτερα από το 5G. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα 6G θα επιτρέψουν συνδέσεις εκατοντάδων GB ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας συνδυαστικά το ευρυζωνικό φάσμα. Για παράδειγμα, η συνδυασμένη χρήση μιας ζώνης από 1 έως 3 GHz, μιας ζώνης κυμάτων χιλιοστού (mm wave) (30 έως 300 GHz) και μιας ζώνης terahertz (0,06 έως 10 THz).

Το 1926, ο οραματιστής Νίκολα Τέσλα ανακοίνωσε: "Όταν εφαρμοστεί πλήρως η ασύρματη σύνδεση, η Γη θα είναι γεμάτη απίστευτους εγκεφάλους...". Το 2030, εμπνευσμένο από τις βασικές ανάγκες σε προσωπικό και κοινωνικό επίπεδο, αυτό εξαρτάται από την αναμενόμενη πρόοδο των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ) (Information and Communication Technology – ICT). Οι προβλέψεις του Tesla αφορούν όλο τον κόσμο και το 6G θα παίξει συγκεκριμένο ρόλο σε αυτήν την πρόοδο δίνοντας ένα πλαίσιο ΤΠΕ που θα επιτρέπει στους τελικούς χρήστες να περικλείονται από έναν "τεράστιο τεχνητό εγκέφαλο". Προσφέρει υπηρεσίες εικονικής αποθήκευσης, απεριόριστες δυνατότητες αποθήκευσης και μαζικής γνώσης, [2].

2. ΑΠΟ ΤΟ 1G ΣΤΟ 5G

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν συνοπτικά οι τεχνολογίες 1G-4G, το 5G και κατ' επέκταση και το εξελιγμένο 5G (5G Advanced) θα περιγραφούν πιο αναλυτικά. Θα αναδειχτεί η εξέλιξη από τη μία γενιά στην άλλη και πώς αυτή αυξάνει κατακόρυφα στις τελευταίες. Η μελλοντική γενιά ασύρματων συστημάτων, δηλαδή το 6G, αναμένεται να διαθέτει πολλαπλές νέες προδιαγραφές, απαιτήσεις και πιθανές χρήσεις. Θα εξετάσουμε το 6G από πολλές πτυχές: κοινωνική, τεχνική και οικονομική άποψη.

2.1 Πρώτη γενιά (1G αναλογική τεχνολογία)

Η πρώτη γενιά κινητής τηλεφωνίας (1980-1990) συνεισέφερε σε ταχύτητες δεδομένων που ξεκινούσαν από 1Kbps έως 2,8Kbps και χρησιμοποιούσε τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος (circuit switch). Χρησιμοποιούσε μια τεχνολογία εξόδου που ονομαζόταν "Αναλογική Τηλεφωνική Υπηρεσία" (Analog Phone Service). Επίσης, χρησιμοποιούσε εύρος ζώνης 40MHz σε εύρος συχνοτήτων από 800 έως 900MHz, με υποστήριξη επικοινωνίας ήχου. Η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ήταν η πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) και το αποτέλεσμα ήταν κλήσεις χαμηλής ποιότητας. Αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας, το μειονέκτημα ήταν ότι ήταν υψηλή και είχε και επιπλέον μειονεκτήματα, όπως διακοπτόμενες συνδέσεις ήχου, κακή χωρητικότητα δεδομένων, έλλειψη ασφάλειας και αναξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

2.2 Δεύτερη γενιά (2G ψηφιακή τεχνολογία)

Το 2G εξαρτάται από το παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (ή διαφορετικά από το Global Mobile Communication System – GSM). Η τεχνολογία αυτή προωθήθηκε στη Φινλανδία το 1991 και ήταν τα πρώτα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα, με ορισμένα στοιχεία που αντικατέστησαν από το 1G: καλύτερα πρότυπα, μεγαλύτερη ασφάλεια. Οι τεχνολογίες 1G έχουν αντικατασταθεί από ψηφιακές τεχνολογίες για ψηφιακές επικοινωνίες παρέχοντας υπηρεσίες π.χ. γραπτά μηνύματα, φωτογραφίες και MMS. Πλέον τα μηνύματα εξ ολοκλήρου τα μηνύματα κειμένου ήταν ψηφιακά κωδικοποιημένα σε τεχνολογία 2G. Αυτή η ψηφιακή κρυπτογράφηση επέτρεπε την ανταλλαγή δεδομένων έτσι ώστε ο ενδιαμέσος επιτιθέμενος χρήστης να μην τα κατανοεί και να τα κατανοεί μόνο ο τελικός παραλήπτης. Υπάρχουν 3 ανόμοια είδη "πολλαπλή διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA, πολλαπλή πρόσβαση χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA / GSM και πολυπλεξία διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiplexing Access – CDMA)" τεχνικών κινητής τηλεφωνίας 2G που προσφέρονται με διαφορετικές επιχειρησιακές τεχνικές, χαρακτηριστικά και όρους.

2.3 Τρίτη γενιά (3G)

Η τρίτη γενιά συστημάτων κινητών επικοινωνιών προσφέρει μεγάλες ταχύτητες των 144kbps για κινητούς χρήστες και ακόμα μεγαλύτερες για δεδομένα υψηλής ταχύτητας (384kbps για πεζούς και 2Mbps για σταθερά σημεία). Η τεχνολογία αυτή συμμορφώνεται με βελτιώσεις σε παλαιότερες ασύρματες τεχνολογίες, όπως "η μετάδοση υψηλής ταχύτητας, η υψηλή πρόσβαση πολυμέσων και η παγκόσμια περιαγωγή". Το 3G χρησιμοποιείται συνήθως για κινητά τηλέφωνα και ακουστικά ως τρόπος σύνδεσης του τηλεφώνου με το Διαδίκτυο ή για άλλα δίκτυα IP για την παροχή φωνητικών κλήσεων και βιντεοκλήσεων, λήψης και δεδομένων, καθώς και περιήγηση στο διαδίκτυο. Το 3G βοήθησε εφαρμογές πολυμέσων όπως το πλήρως κινούμενο βίντεο, την τηλεδιάσκεψη καθώς και την πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Τα δεδομένα κατευθύνονται μέσω της τεχνολογίας που ονομάζεται μεταγωγή πακέτων (packet switch). Οι τηλεφωνικές κλήσεις αποκρυπτογραφούνται με μεταγωγέα κυκλώματος. Το

3G πρόκειται για μια πολύ σύγχρονη διαδικασία επικοινωνίας που έχει εξελιχθεί την περασμένη εποχή.

2.4 Τέταρτη γενιά (4G)

Στα τέλη της δεκαετίας του 2000 παρουσιάστηκε το πλαίσιο κινητής επικοινωνίας 4G και βασιζόταν σε τεχνολογία IP. Ο πρωταρχικός στόχος των καινοτομιών 4G ήταν η παροχή υψηλής ποιότητας, μεγάλης χωρητικότητας και μικρής πολυπλοκότητας διαχείρισης ασφάλειας για υπηρεσίες φωνής και πληροφοριών, ήχου και Διαδικτύου μέσω συστημάτων IP. Ο στόχος της τροποποίησης όλων των διευθύνσεων IP είναι να υπάρχει μια κοινή πλατφόρμα για όλες τις καινοτομίες που έχουν εξελιχθεί μέχρι σήμερα. Έχει χωρητικότητα 100Mbps έως και 1 Gbps. Για να χρησιμοποιηθεί το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 4G, τα πολυτροπικά τερματικά χρήστη πρέπει να είναι έξυπνα για να επιλέξουν το τελικό ασύρματο σύστημα. Για την παροχή ασύρματης υπηρεσίας οποτεδήποτε, οπουδήποτε, η φορητότητα τερματικού είναι σημαντική επιρροή στο 4G. Η κινητικότητα τερματικού υποδηλώνει αυτόματη περιαγωγή μεταξύ ανόμοιων ασύρματων δικτύων. Η τεχνολογία 4G συντονίζει μια σειρά από τωρινές και μελλοντικές ασύρματες τεχνικές όπως "Ορθογώνια Πολύπλεξη Διάρθρωσης Συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM), Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Κώδικα με Πολλές Φέρουσες (Multi-Carrier Code Division Multiple Access – MC-CDMA), Συγχρονισμένη Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Κώδικα Ευρείας Ζώνης (Large Area Synchronized Code Division Multiple Access – LAS-CDMA) και Τοπικό Πολυσημειακό Σύστημα Διανομής (Network Local Multipoint Distribution System – Network-LMDS)" για να προσφέρει ελευθερία κίνησης και συνεχή περιαγωγή από μια τεχνολογία σε μια άλλη. Η "μακροπρόθεσμη εξέλιξη" του LTE και η "ασύρματη διαλειτουργικότητα για πρόσβαση σε μικροκύματα" του Wi-MAX αποτελούν τεχνολογίες 4G. Η αρχική σημαντική δοκιμή πεδίου τέταρτης γενιάς συντονίστηκε στην Ιαπωνία το 2005.

2.5 Πέμπτη γενιά (5G)

Στο 5G, η έρευνα επικεντρώνεται στην πρόοδο ενός "Παγκόσμιου Ασύρματου Δικτύου (World Wide Wireless Web – WWW), δυναμικών ad-hoc ασύρματων δικτύων (DAWN) και πραγματικής ασύρματης επικοινωνίας". Οι πιο σημαντικές τεχνικές για τις τεχνολογίες 5G είναι τα "ασύρματα δίκτυα 802.11 σε τοπικές περιοχές (Wireless Local Area Network – WLAN) και ασύρματα δίκτυα σε αστική περιοχή (Wireless Metropolitan Area Network – WMAN), ένα ad hoc ασύρματο προσωπικό δίκτυο (Wireless Personal Area Network – WPAN) και δίκτυα ασύρματα για ψηφιακές επικοινωνίες". Το 5G παρέχει δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI) σε φορητές συσκευές.

Ο αυξημένος ρυθμός δεδομένων επιτυγχάνεται εν μέρει με τη χρήση πρόσθετων ραδιοκυμάτων υψηλότερης συχνότητας πέραν των συχνοτήτων χαμηλής και μεσαίας ζώνης που χρησιμοποιούνται σε προηγούμενες γενιές κυψελωτών δικτύων. Για την παροχή ενός μεγάλου φάσματος υπηρεσιών, τα δίκτυα 5G μπορούν να λειτουργούν σε τρεις ζώνες συχνοτήτων: σε χαμηλή, μεσαία και υψηλή.

Το 5G μπορεί να εφαρμοστεί σε κύματα χιλιοστού (millimeter-wave) χαμηλής ζώνης, μεσαίας ζώνης ή υψηλής ζώνης 24GHz έως 54GHz. Το 5G χαμηλής ζώνης χρησιμοποιεί παρόμοιο εύρος συχνοτήτων με τα κινητά τηλέφωνα 4G, 600–900MHz, δίνοντας ταχύτητες λήψης λίγο υψηλότερες από το 4G: 30–250megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbit/s). Οι κεραίες που εκπέμπουν σε χαμηλή ζώνη έχουν εμβέλεια και περιοχή κάλυψης παρόμοια με τις κεραίες 4G. Το 5G μεσαίας ζώνης χρησιμοποιεί μικροκύματα 1,7–4,7GHz, επιτρέποντας ταχύτητες 100–900Mbit/s, με κάθε κεραία κινητής τηλεφωνίας να παρέχει υπηρεσίες σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων. Αυτό το επίπεδο υπηρεσίας είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο και αναπτύχθηκε σε πολλές

μητροπολιτικές περιοχές το 2020. Σε ορισμένες περιοχές δεν εφαρμόζεται η χαμηλή ζώνη, καθιστώντας στη μεσαία ζώνη το ελάχιστο επίπεδο υπηρεσιών. Το 5G υψηλής ζώνης χρησιμοποιεί συχνότητες 24–47GHz, κοντά στο κάτω μέρος της ζώνης κυμάτων χιλιοστού, αν και ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες συχνότητες στο μέλλον. Συχνά επιτυγχάνει ταχύτητες λήψης στο εύρος gigabit-per-second (Gbit/s), συγκρίσιμες με το ενσύρματο διαδίκτυο. Ωστόσο, τα κύματα χιλιοστού (mmWave) έχουν πιο περιορισμένο εύρος, που απαιτούν πολλές μικρές κυψέλες. Μπορούν να παρεμποδιστούν ή να μπλοκαριστούν από υλικά σε τοίχους ή παράθυρα. Λόγω του υψηλότερου κόστους τους, το σχέδιο είναι να αναπτυχθούν αυτά οι κυψέλες μόνο σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα και περιοχές όπου συγκεντρώνονται πλήθη ανθρώπων, όπως αθλητικά στάδια και συνεδριακά κέντρα. Οι παραπάνω ταχύτητες είναι αυτές που επιτεύχθηκαν σε πραγματικές δοκιμές το 2020 και οι ταχύτητες αναμένεται να αυξηθούν. Το φάσμα που κυμαίνεται από 24,25–29,5GHz είναι αδειοδοτούμενο και αποτελεί την πιο χρησιμοποιημένη περιοχή φάσματος 5G mmWave στον κόσμο, [10].

Η διάδοση της τεχνολογίας 5G έχει οδηγήσει σε συζητήσεις σχετικά με την ασφάλεια και τη σχέση της με κινέζους προμηθευτές. Έχει επίσης αποτελέσει αντικείμενο ανησυχιών για την υγεία και παραπληροφόρησης, συμπεριλαμβανομένων θεωριών συνωμοσίας που το συνδέουν με την πανδημία COVID-19.

2.5.1 Τομείς εφαρμογής

Ο Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών Ένωσης Διεθνών Επικοινωνιών (International Telecommunications Union Radiocommunications Sector – ITU-R) έχει ορίσει τρεις βασικούς τομείς εφαρμογής για τις βελτιωμένες δυνατότητες του 5G. Αυτές είναι: οι Ενισχυμένες Ευρυζωνικές Επικοινωνίες Κινητής Τηλεφωνίας (Enhanced Mobile Broadband – eMBB), οι Εξαιρετικά Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλών Καθυστερήσεων (Ultra-Reliable Low-Latency Communications – URLLC) και οι Επικοινωνίες Τύπου Μαζικής Μηχανής (Massive Machine Type Communications – mMTC).

Οι Ενισχυμένες Ευρυζωνικές Επικοινωνίες Κινητής Τηλεφωνίας χρησιμοποιούν το 5G για μετάβαση από τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες του 4G LTE, σε ταχύτερες συνδέσεις, υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό θα ωφελήσει, όπως αναφέρθηκε, περιοχές με μεγαλύτερη κίνηση, όπως στάδια, πόλεις και χώρους συναυλιών.

Οι εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλών καθυστερήσεων αναφέρονται στη χρήση του δικτύου για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν αδιάλειπτη και συνεχή ανταλλαγή δεδομένων. Η μετάδοση δεδομένων μικρών πακέτων χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων αξιοπιστίας και καθυστέρησης των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας.

Οι μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής χρησιμοποιούνται για συνδέσεις με μεγάλο αριθμό συσκευών. Η τεχνολογία 5G ήδη συνδέει μερικές από τις 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές IoT. Το κόστος του Wi-Fi θα μειωθεί ακόμα περισσότερο και θα είναι πιο εύκολα αποκτήσιμο για περισσότερες κοινωνικές ομάδες. Τα drones, που εκπέμπουν μέσω 4G ή 5G, θα βοηθήσουν στις προσπάθειες ανάκαμψης από καταστροφές, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τους χειριστές έκτακτων αναγκών. Τα περισσότερα αυτοκίνητα θα έχουν σύνδεση κινητής τηλεφωνίας 4G ή 5G για πολλές υπηρεσίες και τα αυτόνομα αυτοκίνητα δεν θα απαιτούν 5G, καθώς πρέπει να μπορούν να λειτουργούν ακόμα και όπου δεν έχουν σύνδεση δικτύου. Ωστόσο, τα περισσότερα αυτόνομα οχήματα ήδη διαθέτουν επίσης τηλελειτουργίες πολλές λειτουργίες και αυτές επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία 5G, [4], [10].

2.6 Εξελιγμένο 5G (5G Advanced)

Το 5G-Advanced είναι το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της τεχνολογίας 5G. Θα φέρει ένα νέο επίπεδο βελτιωμένων δυνατοτήτων πέρα από τη συνδεσιμότητα και θα επιτρέψει ένα ευρύτερο σύνολο προηγμένων περιπτώσεων χρήσης για τον κάθετο τομέα (verticals). Θα υποστηρίζει προηγμένες εφαρμογές με βελτιωμένη κινητικότητα και υψηλή αξιοπιστία καθώς και τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και μηχανική μάθηση (Machine Learning – ML) που θα βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου. Θα εισάγει επίσης περαιτέρω βελτιώσεις στη φασματική απόδοση και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αυτή την υποενοότητα θα εξεταστεί τι θα φέρει η εποχή του 5G-Advanced, πώς θα αλλάξει την καθημερινότητά μας και πώς θα φτάσουμε εκεί, [7].

2.6.1 Τρέχουσα αγορά 5G

Ακόμη και στα αρχικά του στάδια, ο ρυθμός ανάπτυξης των δικτύων 5G έχει ξεπεράσει τα δίκτυα 4G/LTE. Δύο χρόνια μετά την πρώτη κυκλοφορία του LTE, υπήρχαν 25 εκατομμύρια συνδρομές σε 60 δίκτυα. Αντίθετα, δύο χρόνια μετά την πρώτη κυκλοφορία του 5G υπήρχαν 340 εκατομμύρια συνδρομές σε 155 δίκτυα. Η GSMA Intelligence έχει προβλέψει ότι οι συνδέσεις 5G θα φτάσουν τους 692 εκατομμύρια συνδρομητές παγκοσμίως μέχρι το τέλος του 2022. Πράγματι, σε ορισμένες αγορές όπως η Νότια Κορέα και οι ΗΠΑ, το 5G καλύπτει ήδη το 80% και περισσότερο του πληθυσμού.

Ο οργανισμός προτύπων, 3GPP, τυποποίησε για πρώτη φορά την πρώτη στον κόσμο λύση Νέου Ραδιοφώνου 5G (New Radio – NR) στην έκδοση 15 – η οποία εισήγαγε ένα εντελώς νέο κυψελοειδές σύστημα, για να βοηθήσει τους προγραμματιστές να εφαρμόσουν νέες λειτουργίες στο δίκτυο. Οι βασικές βελτιώσεις που προέκυψαν από αυτήν τη διαδικασία, όπως αναφέρθηκε, αφορούσαν τρεις τομείς: Ενισχυμένες Ευρυζωνικές Επικοινωνίες Κινητής Τηλεφωνίας (Enhanced Mobile Broadband – eMBB), οι Εξαιρετικά Αξιοπίστες Επικοινωνίες Χαμηλών Καθυστερήσεων (Ultra-Reliable Low-Latency Communications – URLLC) και οι Επικοινωνίες Τύπου Μαζικής Μηχανής (Massive Machine Type Communications – mMTC).

Η έκδοση 15 αποτέλεσε τη βάση για τις επόμενες υλοποιήσεις του μη αυτόνομου 5G (Non-Standalone – NSA), ωστόσο, αυτές εξακολουθούσαν να βασίζονται στην υποδομή του 4G LTE για την παροχή υπηρεσιών από άκρο σε άκρο (end to end services). Πράγματι, πολλοί πάροχοι κυκλοφόρησαν εμπορικές υπηρεσίες 5G με βελτιωμένη τεχνολογία eMBB ή σταθερή ασύρματη πρόσβαση (Fixed Wireless Access – FWA), οι οποίες στην ουσία ήταν παρόμοιες με προηγούμενες υπηρεσίες LTE. Ωστόσο, οι πάροχοι σε ορισμένες πιο προηγμένες αγορές, όπως η Νότια Κορέα, εστίασαν στην ανάπτυξη καινοτόμων περιπτώσεων χρήσης που χρησιμοποιούν τις πιο προηγμένες δυνατότητες του 5G, όπως το cloud gaming, την επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality – AR), την εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality – VR) και το βίντεο 4K με σκοπό να ενθαρρύνουν τους συνδρομητές να υιοθετήσουν σχέδια 5G. Η έκδοση 15 επέτρεψε επίσης περαιτέρω πρόοδο οδηγώντας στο αυτόνομο 5G (Stand-Alone – SA), στο οποίο το σύστημα νέου ραδιοφώνου 5G (5G New Radio) υποστηρίζεται από αυτόνομο πυρήνα 5G με προαιρετικές λειτουργίες δικτύου βασισμένες στο σύννεφο.

Στη συνέχεια ακολούθησε η 3GPP με τις εκδόσεις 16 και 17, οι οποίες εισήγαγαν βελτιώσεις για το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things – IIoT) συμπεριλαμβανομένων καινοτομιών για την υποστήριξη της ευαίσθητης στον χρόνο επικοινωνίας (Time Sensitive Communication – TSC) και την ευρύτερη επέκταση του οικοσυστήματος 5G, το βελτιωμένο σύστημα πολλαπλών κεραιών εισόδου/ εξόδου (Multiple Input Multiple Output – MIMO), τη μετάδοση μικρών δεδομένων (Small Data Transmission – SDT), την εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας εξοπλισμού χρήστη

και πολλές άλλες βελτιώσεις. Άλλοι τομείς περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό δικτύου (network slicing), τον υπολογισμό άκρων και την υποστήριξη για μη επίγεια δίκτυα (Non Terrestrial Networks – NTN). Για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, αυτοί οι τομείς παρουσίασαν την ευκαιρία να προσφέρουν υπηρεσίες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπως στην εξόρυξη δεδομένων, στις μεταφορές, καθώς και να προσφέρουν στους εταιρικούς πελάτες την ευκαιρία να ψηφιοποιήσουν τις λειτουργίες και τις διαδικασίες τους. Η Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0) είναι ένας από τους πρώτους τομείς που επωφελούνται πραγματικά από τις υπηρεσίες 5G για τη βελτίωση στον τομέα της παραγωγής και κατασκευών. Για παράδειγμα, για ορισμένες περιπτώσεις χρήσης, το 5G προσφέρει ροή βίντεο υψηλής ποιότητας, ζωντανή λήψη βίντεο από κινητά και τροφοδοσία από πολλαπλές ροές βίντεο για μια σειρά περιπτώσεων, όπως προηγμένα αναλυτικά στοιχεία βίντεο (advanced video analytics) ή παρακολούθηση με βίντεο.



Εικόνα 1: Χρονοδιάγραμμα τυποποίησης από τη 3GPP, [11].

Η κυκλοφορία του Release 18 σηματοδοτεί μια άλλη σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία 5G που θα οδηγήσει τη βιομηχανία στην εποχή του 5G-Advanced, [6].

2.6.2 Η εποχή του 5G – Advanced

Το 5G-Advanced προορίζεται να εξελίξει το 5G στις πληρέστερες, πλουσιότερες δυνατότητές του. Θα δημιουργήσει τη βάση για πιο απαιτητικές εφαρμογές και ένα ευρύτερο φάσμα περιπτώσεων χρήσης, με μια αναβαθμισμένη εμπειρία χρήστη που θα βασίζεται σε λειτουργίες εκτεταμένης πραγματικότητας (eXtended Reality – XR). Θα εισάγει επίσης βελτιώσεις στην τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση στο επίπεδο διαχείρισης του δικτύου ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network – RAN), πυρήνα και δικτύου για βελτιωμένη απόδοση, βελτιστοποίηση δικτύου αλλά και ενεργειακή απόδοση. Θα είναι επίσης πλήρως συμβατό με λειτουργικότητες σε προηγούμενες εκδόσεις, δηλαδή θα μπορεί να συνυπάρχει με τις τρέχουσες εκδόσεις 5G NR 15-17, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας εξυπηρέτησης παλαιότερων συσκευών 5G.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τέσσερις διαστάσεις της εμπειρίας, της επέκτασης (expansion), της επέκτασης (με την έννοια του extension) και της βελτιστοποίησης λειτουργίας, είναι εφικτή η υποστήριξη των χρηστών με οποιονδήποτε συνδυασμό απαιτήσεων δικτύου, σεναρίων ανάπτυξης και περιπτώσεων χρήσης, [11]:

- **Εμπειρία:** Το 5G-Advanced θα προσφέρει μια βελτιωμένη εμπειρία για ανθρώπους και μηχανές. Αυτός ο συνδυασμός χαρακτηριστικών εστιάζει στη βελτίωση της απόδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink), στη μείωση του χρόνου διακοπής υπηρεσίας και στην παροχή ανώτερης ψηφιακής εμπειρίας. Βελτιωμένες εμπειρίες χρήστη θα είναι δυνατές χάρη στη χρήση της εκτεταμένης πραγματικότητας, της εικονικής πραγματικότητας και της επαυξημένης πραγματικότητας (AR), όπου ο φυσικός και ο εικονικός κόσμος θα συγχωνεύονται.
- **Επέκταση (expansion):** Το 5G-Advanced θα επιτρέψει νέες υπηρεσίες πέρα από την παραδοσιακή επικοινωνία. Με την εισαγωγή βελτιωμένης ανίχνευσης τοποθεσίας με ακρίβεια κάτω των 10 εκατοστών με συνέπεια τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, καθώς και με το συγχρονισμό χρόνου ως υπηρεσία (Time Synchronization as a Service), το 5G-Advanced προσφέρει

πολύτιμα οφέλη για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης π.χ.: έλεγχος έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, βιομηχανικός αυτοματισμός και οικονομικές συναλλαγές σε πραγματικό χρόνο. Αυτό θα βελτιώσει την πλοήγηση και θα κάνει τα συστήματα logistics πιο αποτελεσματικά.

- **Επέκταση (extension):** Το 5G-Advanced θα επεκτείνει την εμβέλεια της συνδεσιμότητας και θα την καταστήσει διαθέσιμη σε νέα τμήματα της αγοράς, συμπεριλαμβανομένων καινοτομιών για βελτιωμένη κάλυψη, βελτιωμένο χαμηλού κόστους μαζικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων και περαιτέρω υποστήριξη για μη επίγεια δίκτυα και drones. Αυτό θα συμβάλει στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος επεκτείνοντας την ευρυζωνική συνδεσιμότητα σε αγροτικές και χαμηλά εξυπηρετούμενες γεωγραφικές περιοχές, προσφέροντας στους ανθρώπους πρόσβαση σε οικονομικές ευκαιρίες και τα οφέλη που παρέχει η συνδεσιμότητα κινητής τηλεφωνίας. Θα είναι επίσης σημαντική η συμβολή για τη λειτουργία των αυτοκινήτων χωρίς οδηγό, των αυτόνομων ρομπότ και των συστημάτων βιομηχανικού αυτοματισμού.
- **Βελτιωμένη λειτουργικότητα:** Το 5G-Advanced θα τροφοδοτείται από βελτιωμένη λειτουργικότητα που στοχεύει στην ανάπτυξη και περαιτέρω βελτίωση της πλατφόρμας 5G και της λειτουργίας της με τη σταδιακή εισαγωγή ενεργοποιητών τεχνητής νοημοσύνης/ μηχανικής μάθησης, ενσύρματης και ασύρματη σύγκλισης, βελτιωμένης ανθεκτικότητας και βελτιώσεων από πλευράς ενεργειακής απόδοσης. Αυτές οι λειτουργικές βελτιώσεις θα εξασφαλίσουν αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου με προσιτό λειτουργικό κόστος.

2.6.3 Σημαντικές βελτιώσεις στο 5G – Advanced

Σημαντικές βελτιώσεις στο 5G – Advanced αποτελούν οι ακόλουθες, [11]:

- **Εκτεταμένη πραγματικότητα (eXtended Reality – XR)** (επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα, παιχνίδια): Το 5G-Advanced θα βελτιώσει την τρέχουσα εμπειρία XR επεκτείνοντας την εμβέλεια των εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας και σημαντικών εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας και την εμπειρία gaming στο σύννεφο. Το 5G-Advanced θα προσφέρει στους χρήστες μια ανώτερη εμπειρία XR εν κινήσει, επιτρέποντας πραγματικά μια εμπειρία υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Απαιτεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων με αυστηρούς περιορισμούς καθυστερήσεων καθώς και υψηλό βαθμό ευαισθητοποίησης (awareness) της εφαρμογής. Αυτή η βελτιωμένη ευαισθητοποίηση εφαρμογών βοηθά στη μεταφορά του φόρτου επεξεργασίας της εκτεταμένης πραγματικότητας από τη συσκευή στο δίκτυο, περιορίζοντας το κόστος, το μέγεθος και την ισχύ του εξοπλισμού χρήστη. Οι παλαιότερες πιο ογκώδεις συσκευές θα αντικατασταθούν από πολύ μικρότερα μοντέλα σε μέγεθος τσέπης που θα επιτρέπουν τις περιπτώσεις χρήσεων XR παντού. Αυτό θα μπορούσε να δώσει στους χρήστες την αληθινή αντίληψη ότι βρίσκονται σε ένα απομακρυσμένο περιβάλλον και να τους επιτρέψει να αλληλεπιδρούν αποτελεσματικά, ανεξάρτητα από το πού βρίσκονται φυσικά.
- **Βελτιωμένη κάλυψη και απόδοση MIMO:** Το 5G-Advanced θα αντιμετωπίσει την ανάπτυξη απαιτητικών εφαρμογών ανερχόμενης ζεύξης, όπως το βίντεο υψηλής ποιότητας. Αναμένεται ότι το 5G-Advanced θα προσφέρει 20% υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σύγκριση με το 5G μέσω καινοτόμων τεχνικών. Θα έχει επίσης χαμηλότερες καθυστερήσεις στην ανερχόμενη ζεύξη. Απαραίτητη προϋπόθεση για μια καλή εμπειρία τελικού χρήστη σε έναν κόσμο XR είναι να έχουμε χαμηλές καθυστερήσεις και στις δύο κατευθύνσεις συνδέσεων, καθώς οι εφαρμογές XR απαιτούν συχνά αμφίδρομη επικοινωνία υψηλής απόκρισης.

Επίσης, οι βελτιώσεις κάλυψης ανερχόμενης ζεύξης αποτελούν επίσης μέρος του 5G-Advanced.

- Το 5G αντικαθιστά το GSM-R: Η επέκταση του 5G-Advanced σε ορισμένες εξειδικευμένες περιπτώσεις κάθετης χρήσης σε όλους τους τομείς από τους σιδηρόδρομους και τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μέχρι τη δημόσια ασφάλεια απαιτεί τη δυνατότητα ανάπτυξης νέου ραδιοφώνου σε αποκλειστικά εύρη ζώνης φάσματος κάτω των 5MHz. Η παροχή σηματοδότησης και επικοινωνιών επόμενης γενιάς για τους σιδηροδρόμους προσαρμόζοντας το 5G στο εκχωρημένο εύρος ζώνης τους, συνδέοντας έξυπνα δίκτυα επόμενης γενιάς και τροφοδοτώντας εξαιρετικά συνδεδεμένες και αποκρινόμενες υπηρεσίες φωτός, αποτελούν παραδείγματα. Στην Ευρώπη, αποφασίστηκε ότι το Σύστημα Μελλοντικής Σιδηροδρομικής Κινητής Επικοινωνίας (Future Railway Mobile Communication System – FRMCS) που θα αντικαταστήσει το GSM-R θα χρησιμοποιεί 5G New Radio.
- Εξέλιξη πέρα από το smartphone: Το 5G-Advanced θα πρωτοτυπήσει επίσης σε μια εποχή νέων τύπων συσκευών που επωφελούνται από την κάλυψη και την αποτελεσματική συνδεσιμότητα του 5G. Θα εισαχθεί μια πληθώρα νέων τύπων συσκευών με δυνατότητες, πέρα από τα smartphone, καθώς και συσκευές που δε χρειάζεται να εφαρμόσουν όλα τα χαρακτηριστικά τους για αυξημένη απόδοση και ευελιξία. Αυτό επιτρέπει επίσης σημαντικά χαμηλότερο κόστος συσκευής. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται συσκευές "μειωμένης ικανότητας" ή RedCap και είναι ιδανικές για περιπτώσεις χρήσης όπως παρακολούθηση βίντεο για βιομηχανικό ποιοτικό έλεγχο, παρακολούθηση διεργασιών ή ανίχνευση και παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να σχεδιαστούν έξυπνα φορητά ηλεκτρονικά στοιχεία με μικρό μέγεθος που έχουν ταυτόχρονα μπαταρίες μεγάλης διάρκειας. Σε σενάρια παρακολούθησης βιομηχανικών διεργασιών και ποιοτικού ελέγχου, η συχνή συναλλαγή μικρών πακέτων δεδομένων μπορεί να μεταδοθεί αποτελεσματικά για την υποστήριξη της απόδοσης του δικτύου. Επίσης, η χρήση συσκευών όπως τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs) ή τα drones, αναμένεται να αυξηθεί με εφαρμογές από αναζήτηση και διάσωση μέχρι παράδοση δεμάτων και εναέριες επιδείξεις. Όχι μόνο τα drones, αλλά και τα αυτόνομα οχήματα, τα ρομπότ και τα αυτοματοποιημένα οχήματα εδάφους (Automated Ground Vehicles – AGVs) θα εξελιχθούν περαιτέρω με δίκτυα 5G-Advanced που είναι προσαρμοσμένα για να διασφαλίζουν αξιόπιστες επικοινωνίες με σταθμούς βάσης.
- Ακριβής ανίχνευση τοποθεσίας: Το 5G-Advanced θα προσφέρει επίσης βελτιώσεις όσον αφορά τον εντοπισμό θέσης με τη βοήθεια της κινητής τηλεφωνίας, συμπεριλαμβανομένης της αναγνώρισης μονοπατιών που δεν είναι οπτικά, καθώς και ακρίβεια τάξης εκατοστού, τόσο για σενάρια εσωτερικού όσο και εξωτερικού χώρου. Σε εσωτερικούς χώρους, θα λειτουργεί συμπληρωματικά των εξωτερικών παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems – GNSS) και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτίρια για βιομηχανικούς αυτοματισμούς ή logistics ή σε σήραγγες για αυτοκίνητα ή για τη δημόσια ασφάλεια. Χάρη στην ακριβή ανίχνευση τοποθεσίας και το RedCap, μπορούν να εφαρμοστούν συνδεδεμένες ετικέτες 5G για παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων. Μια μέρα, αυτές οι ετικέτες θα μπορούν ακόμη και να συλλέξουν ενέργεια από το περιβάλλον τους.
- Ανθεκτικός χρονισμός: Το 5G γίνεται βιώσιμη εναλλακτική ή συμπληρωματικό του GNSS/ GPS για την παροχή συγχρονισμού χρόνου σε συντονισμένη παγκόσμια ώρα (Universal Time Coordinated – UTC) ή σε οποιονδήποτε καλά καθορισμένο

τομέα χρόνου, υποστηρίζοντας τα πάντα: από βιομηχανικό αυτοματισμό μέχρι οικονομικές συναλλαγές σε πραγματικό χρόνο και έξυπνα δίκτυα. Στο σημερινό έξυπνο δίκτυο, η ηλεκτρική ενέργεια ρέει σε πολλαπλές κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, απαιτείται εξαιρετικά ακριβής, σύγχρονη και συνεχής παρακολούθηση για την αποφυγή ανωμαλιών και αυτό απαιτεί εξαιρετικά ακριβείς πληροφορίες χρόνου τάξης micro και milliseconds.

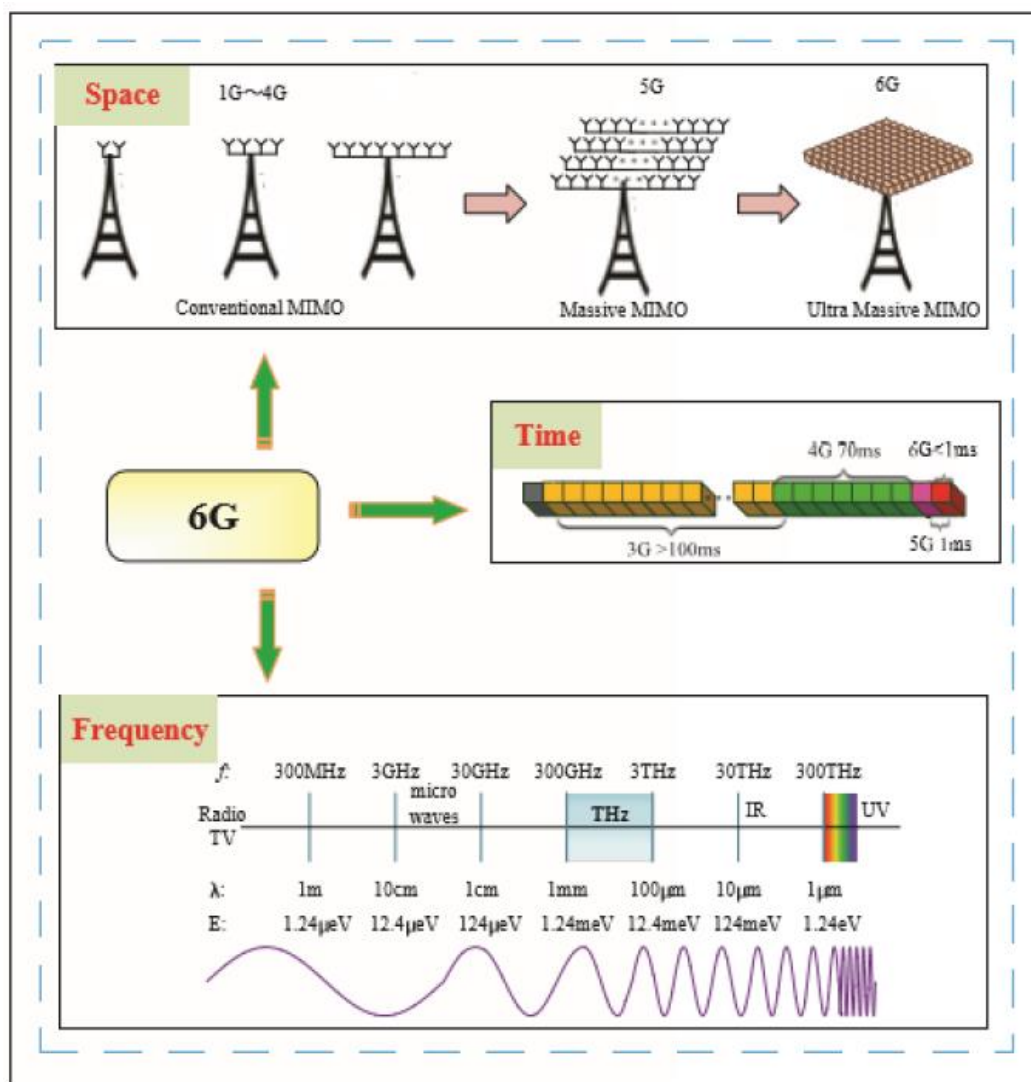
- **Αποδοτικότητα λειτουργίας δικτύου:** Το 5G-Advanced θα εισαγάγει νέες τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στους τομείς διαχείρισης δικτύου ραδιοπρόσβασης, πυρήνα και δικτύου που θα βελτιώσουν την απόδοση, τον αυτοματισμό και την ενεργειακή απόδοση. Αυτό περιλαμβάνει λύσεις για πιο αποτελεσματική συλλογή δεδομένων, εκπαίδευση μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης και ανταλλαγή μοντέλων μεταξύ πρακτόρων τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης και για πρώτη φορά, επίσης εισαγωγή τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στη διεπαφή αέρα για περαιτέρω ενίσχυση της απόδοσης ραδιοφώνου 5G-Advanced. Με την εκθετική ανάπτυξη της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, το θέμα της ενεργειακής απόδοσης θα πρέπει να συνεχίσει να αντιμετωπίζεται στο 5G-Advanced με την εφαρμογή νέων χαρακτηριστικών εξοικονόμησης ενέργειας. Θα χρειαστεί ένας συνδυασμός καλά σχεδιασμένων προτύπων και εξαιρετικής εφαρμογής που θα υποστηρίζεται από την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση για την πρόβλεψη των διακυμάνσεων της κίνησης και την εξοικονόμηση ενέργειας σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας των δεδομένων. Επιπλέον, οι επιχειρησιακές καινοτομίες αφορούν τη βελτίωση του τεμαχισμού και την ενσωμάτωση τεχνολογιών πρόσβασης εκτός 3GPP, όπως το Wi-Fi.
- **Βελτιωμένη πλευρική ζεύξη:** Το 5G-Advanced συνεχίζει να ενισχύει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των χρηστών ή των χρηστών και της υποδομής. Οι βελτιώσεις πλευρικών ζεύξεων θα περιλαμβάνουν μηχανισμούς υποστήριξης αναμετάδοσης συσκευής σε συσκευή (User Equipment to User Equipment – UE-to-UE) που θα επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν πληροφορίες από δίκτυα μέσω άλλων χρηστών.
- **Βελτιωμένη κινητικότητα:** Το 5G-Advanced θα στοχεύει ουσιαστικά σε μηδενικούς χρόνους διακοπής λειτουργίας της υπηρεσίας κατά την μεταπομπή χωρίς να διακυβεύεται η ευρωστία. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για συσκευές εν κινήσει με υπηρεσίες κρίσιμες για καθυστέρηση, όπως η εκτεταμένη πραγματικότητα, το βιομηχανικό διαδίκτυο πραγμάτων ή για την προδιαγραφή των εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών με χαμηλές καθυστερήσεις.

3. ΟΡΑΜΑ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ 6G

Δεδομένου ότι το 5G συνεχώς εξελίσσεται και δεν έχουν επιτευχθεί στο 100% οι στόχοι του, φαίνεται πολύ ελκυστική η μελέτη των προϋποθέσεων του 6G. Η βάση του 6G θα παρακολουθήσει τα επόμενα τεχνολογικά μοντέλα, π.χ. "τα έξυπνα αυτοκίνητα και την έξυπνη συναρμολόγηση". Όσον αφορά τις μεταφορές καθώς και την κατασκευή, ένα μεγάλο δίκτυο έξυπνων μεταφορικών μέσων και ρομπότ θα χρειαστεί ένα κινητό ευρυζωνικό δίκτυο καθώς και ένα "ασύρματο δίκτυο εξαιρετικά υψηλών ρυθμών με εξαιρετική αξιοπιστία και εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις, δίνοντας νέα είδη κινητών ως υπηρεσιών (mobile as a service) και κινητών ως εφαρμογών κατασκευών".

3.1 Πλαίσιο για τη χρήση πόρων χώρου, συχνότητας και χρόνου

Η Εικόνα 2 περιγράφει ότι το 6G θα χρησιμοποιήσει ένα προηγμένο φάσμα συχνοτήτων από τις προηγούμενες γενιές για να προωθήσει την ταχύτητα των δεδομένων στη διάσταση συχνότητας. Στο πρώτο βέλος όπως φαίνεται, θα χρησιμοποιηθούν μεγάλες ζώνες συχνοτήτων, όπως "η ζώνη κυμάτων χιλιοστού, η ζώνη terahertz και η ζώνη συχνοτήτων ορατού φωτός" για μετάδοση τουλάχιστον 100 GB/s στο 6G.



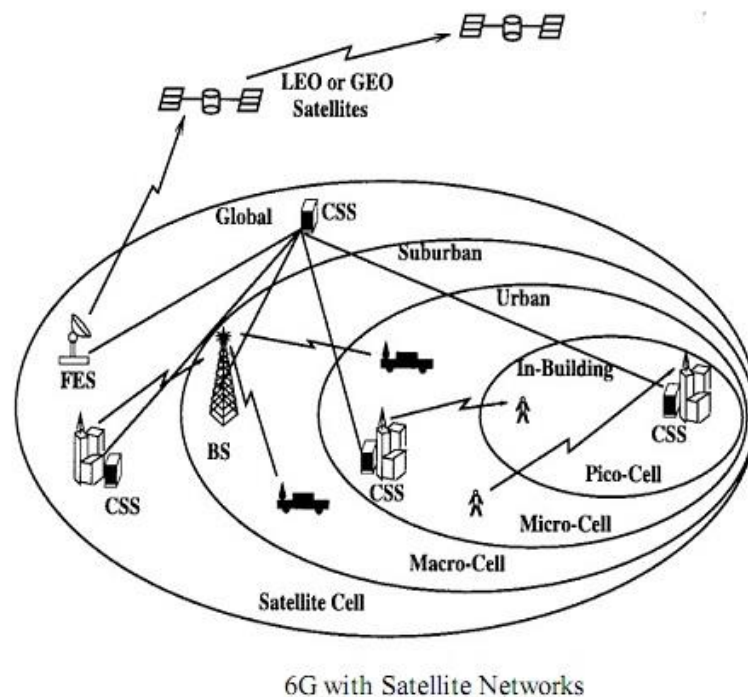
Εικόνα 2: Πλαίσιο 6G για τη χρήση πόρων χώρου, συχνότητας και χρόνου, [12].

Συνακόλουθα στο δεύτερο βέλος, στο μέλλον "μπορεί να ενσωματωθούν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με δορυφορικά συστήματα και το διαδίκτυο για τη δημιουργία ολοκληρωμένων δικτύων", τα οποία θα αποκτήσουν τη συχνότητα, για λογαριασμό των

υπηρεσιών από πλευράς της ατομικής κινητής επικοινωνίας. Στη χωρική διάσταση, για την αποκόμιση όσο το δυνατόν περισσότερων πλεονεκτημάτων από την πολυπλεξία καναλιού, θα ενισχυθεί ο αριθμός των συσκευών κεραίας που προετοιμάζονται εξίσου στον πομπό και στη συνέχεια στον δέκτη. Οι τεχνικές υπολοίπου MIMO, π.χ. το εξαιρετικά τεράστιο MIMO (Ultra Massive MIMO – UM-MIMO) για επικοινωνία terahertz, μπορούν να βοηθήσουν εκατοντάδες ή χιλιάδες κεραίες κατά την εκπομπή ή λήψη σήματος. Στη διάσταση του χρόνου, το 6G θα προσφέρει πολλά υποσχόμενες αλλαγές σε αδυναμίες δομικές και μη. Επιπλέον, η μονάδα χρονοθυρίδας 6G μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σύγχρονο τρόπο για να αξιοποιήσει περαιτέρω επάρκεια στις ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων και να ανταποκριθεί σε ευαίσθητες χρονικά υπηρεσίες. Καθώς οι μονάδες χρόνου βελτιώνονται, η ευελιξία των συστημάτων θα είναι καλύτερη και έτσι θα διευκολύνεται η συμβατότητά τους από το 2G μέχρι το 5G, [12].

3.2 Συσχέτιση με το δίκτυο κεραιών

Το σύστημα κινητής τηλεφωνίας 6G για την παγκόσμια κάλυψη θα συντονίζεται με το κινητό ασύρματο σύστημα 5G σε συνδυασμό με το δορυφορικό δίκτυο. Τέτοια δορυφορικά δίκτυα περιλαμβάνουν ένα "δίκτυο δορυφορικών επικοινωνιών, ένα δορυφορικό δίκτυο εικόνων της Γης και ένα δορυφορικό δίκτυο πλοήγησης". Ο τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος χρησιμοποιείται για τη μετάδοση φωνής, δεδομένων, διαδικτύου και βίντεο. Τα δεδομένα από το δορυφορικό δίκτυο απεικόνισης γης χρησιμοποιούνται για τη συλλογή κλιματικών και περιβαλλοντικών δεδομένων και το δίκτυο δορυφορικής πλοήγησης για το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (Global Positioning System – GPS). Οι τέσσερις δημοκρατίες που κατασκεύασαν τέτοια δορυφορικά συστήματα είναι: το GPS των ΗΠΑ, το πλαίσιο Compass που κατασκευάστηκε από την Κίνα, το "σύστημα Galileo" από την ΕΕ και το ρωσικό σύστημα Glonass. Ο βασικός στόχος του 6G είναι να παρέχει στους χρήστες κινητών τηλεφώνων μια ποικιλία υπηρεσιών ως βασικό χαρακτηριστικό του δικτύου σε διάφορες τοποθεσίες, σε εφαρμογές πολυμέσων και προσβασιμότητα στη σύνδεση διαδικτύου για χρήστες κινητών τηλεφώνων με υψηλή ταχύτητα δεδομένων χωρίς διακοπή του δικτύου. Η Εικόνα 3 δείχνει το δορυφορικό δίκτυο με το 6G.



Εικόνα 3: Το 6G με το δορυφορικό δίκτυο, [13].

Θα παρέχει εξαιρετικά γρήγορη πρόσβαση σε υπηρεσίες διαδικτύου με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων έως και 10-11Gbps. Θα προσφέρει ένα πλήρες ασύρματο δίκτυο χωρίς όρια και ανεπαρκή συνδεσιμότητα μεταξύ πελατών δικτύου για την παροχή των μεγάλων ταχυτήτων μετάδοσης στην περιοχή Terabit. Τέλος, θα μεγιστοποιήσει τα δεδομένα και δεδομένα εισόδου και εξόδου ανά δευτερόλεπτο λειτουργίας (Input and Output Per Second – IOPS), [13].

3.3 Όραμα συνδεσιμότητας

Σύμφωνα με την , το όραμα του 6G μπορεί να συνοψιστεί σε τέσσερις βασικές λέξεις "Ευφυής Συνδεσιμότητα" (Intelligent Connectivity), "Βαθιά Συνδεσιμότητα" (Deep Connectivity), "Ολογραφική Συνδεσιμότητα" (Holographic Connectivity) και "Πανταχού Παρούσα Συνδεσιμότητα" (Ubiquitous Connectivity). Αυτές οι τέσσερις λέξεις κλειδιά καθιερώνουν το γενικό όραμα 6G.



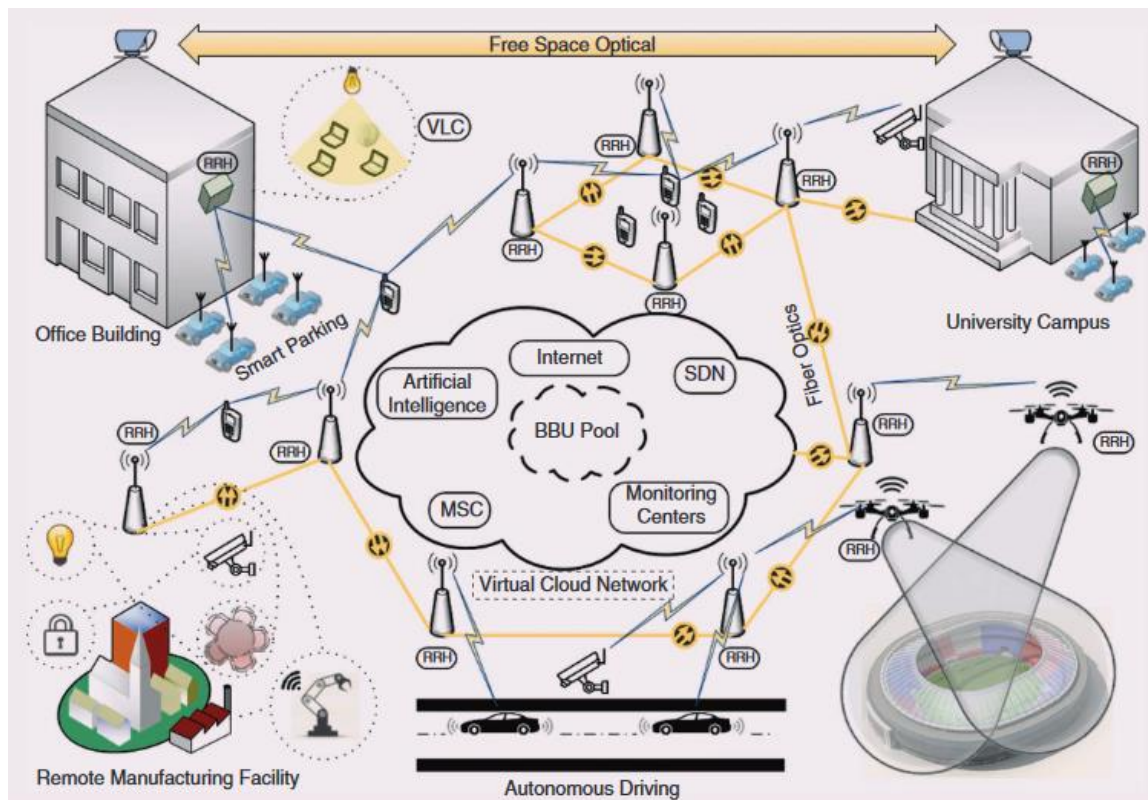
Εικόνα 4: Όραμα 6G.

Υποστηρίζεται η άποψη ότι η δημιουργία δικτύου 6G με βάση την τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης θα είναι μια αναπόφευκτη επιλογή και το "έξυπνο" θα είναι το εγγενές χαρακτηριστικό του δικτύου 6G, δηλαδή η λεγόμενη "έξυπνη συνδεσιμότητα". Τα δίκτυα 6G θα αντιμετωπίσουν πολλές προκλήσεις, π.χ.: θα είναι πιο περίπλοκα και τεράστια δίκτυα, θα έχουν περισσότερους τύπους τερματικών και συσκευών δικτύου και θα αφορούν πιο σύνθετους και διαφορετικούς τύπους επιχειρήσεων. Η "έξυπνη συνδεσιμότητα" θα πληροί δύο απαιτήσεις ταυτόχρονα: αφενός, όλες οι σχετικές συνδεδεμένες συσκευές στο ίδιο το δίκτυο θα είναι έξυπνες και οι σχετικές υπηρεσίες θα είναι έξυπνες, αφετέρου το ίδιο πολύπλοκο και τεράστιο δίκτυο θα χρειάζεται έξυπνη διαχείριση. Η "έξυπνη συνδεσιμότητα" θα είναι το βασικό χαρακτηριστικό που θα υποστηρίξει τα άλλα τρία κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου 6G, που προαναφέρθηκαν: βαθιά συνδεσιμότητα, ολογραφική συνδεσιμότητα και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Αναμένεται ότι στα επόμενα 10 χρόνια (2030 ~) των συστημάτων 6G, οι απαιτήσεις πρόσβασης θα εξελιχθούν από βαθιά κάλυψη σε "βαθιά συνδεσιμότητα". Τα χαρακτηριστικά της μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: Βαθιά Ανίχνευση (Deep Sensing): Απτικό Διαδίκτυο (Tactile Internet), Βαθιά Μάθηση (Deep Learning) / Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence): Βαθιά Εξόρυξη Δεδομένων (Deep Data Mining), Βαθιά Λογική (Deep Mind): Τηλεπάθεια (Telepathy), Mind-to-Mind Communication (Επικοινωνία μέσω Μυαλού). Σε δέκα χρόνια (2030 ~) προβλέπεται ότι η επικοινωνία μέσω των θα είναι κατά κύριο λόγο με επίπεδα πολυμέσα (planar multimedia), π.χ. επίπεδες τηλεοράσεις κλπ., με αλληλεπίδραση εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας υψηλότερης ακρίβειας, ακόμη και με αλληλεπίδραση ολογραφικών πληροφοριών, και επίσης ασύρματη ολογραφική επικοινωνία. Η εικονική και

επαυξημένη πραγματικότητα υψηλής πιστότητας θα είναι πανταχού παρούσες, καθώς και η ολογραφική επικοινωνία – απεικόνιση θα μπορούν επίσης να πραγματοποιηθούν ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε, έτσι ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να απολαμβάνουν μια πλήρως ολογραφική διαδραστική εμπειρία ανά πάσα στιγμή και τόπο, δηλαδή να πραγματοποιούν το όραμα επικοινωνίας της λεγόμενης "ολογραφικής συνδεσιμότητας". Η απαίτηση σύνδεσης "οποιαδήποτε στιγμή, παντού" (anytime, anywhere) δέκα χρόνια αργότερα (2030 ~), για να επιτευχθεί δηλαδή η πραγματική "πανταχού συνδεσιμότητα", ένας τεράστιος κόσμος θα γίνει όλο και πιο προσιτός. Μελλοντικά οράματα του 6G, όπως η "ευφυής συνδεσιμότητα" είναι το πιο κεντρικό ιδεώδες του δικτύου 6G, ενώ τα άλλα τρία χαρακτηριστικά του "βαθιά συνδεσιμότητα", "ολογραφική συνδεσιμότητα" και "πανταχού συνδεσιμότητα" αποτελούν τον κορμό του δικτύου 6G. Αυτά τα τέσσερα χαρακτηριστικά μαζί κάνουν το μελλοντικό δίκτυο 6G ένα πλήρες οργανικό σύνολο, με ζωή. Στο μέλλον, το σύστημα επικοινωνίας θα αναπτυχθεί και θα βελτιωθεί περαιτέρω με βάση το υπάρχον σύστημα 5G. Οι πληροφορίες θα ξεπεράσουν το τροχοπέδη του χρόνου και του χώρου, το δίκτυο θα κλείσει την απόσταση μεταξύ όλων των πραγμάτων και η απρόσκοπτη ενοποίηση του ανθρώπου και όλων των πραγμάτων θα πραγματοποιηθεί, [3], [8].

3.4 Αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες

Τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών τερματικών σε μικρές γεωγραφικές εκτάσεις, και αυτό θα επεκταθεί με πυκνή ή εξαιρετικά πυκνή τοποθέτηση access points (AP) / σταθμών βάσεων (Base Stations – BS) με επικαλυπτόμενες ζώνες κάλυψης. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα διαφορετικό AP / BS θα εξυπηρετεί ταυτόχρονα τις συσκευές (για παράδειγμα με πολλαπλές μεταδόσεις), κάτι το οποίο θα είναι απαραίτητο για μια καλά οργανωμένη μεταπομπή (handover), διανομή συχνότητας και διαχείριση παρεμβολών. Όταν χρησιμοποιείται ένα εξαιρετικά γρήγορο κομμάτι δικτύου μεταξύ ορισμένων AP και BS, το γενικό δίκτυο, από πλευράς τερματικών συσκευών, θα παρουσιάζεται ως ένα κύριο σύστημα διανομής, χωρίς κυψέλες, με πολλαπλές εισόδους και πολλαπλές εξόδους (Multiple Input Multiple Output – MIMO). Συγκεκριμένα, όλα τα AP θα γνωρίζουν όλες τις συσκευές που είναι ενεργές στην περιοχή τους. Τα AP μπορούν να θεωρηθούν ως απομακρυσμένες ραδιοφωνικοί πομποδέκτες (Remote Radio Headers – RRHs), όπως συμβαίνει με τα δίκτυα ραδιοπρόσβασης σύννεφου (Cloud Radio Access Network – CRAN). Περισσότερες από μία κεραία μπορούν να φιλοξενήσουν κάθε συσκευή, χάρη στο συντονισμό της μετάδοσης ή μέσω ενός πολυπλέκτη μετάδοσης. Είναι πιο εύκολο να μελετηθεί η αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες ως μια γενική μορφή της περίφημης μετάδοσης Comp, όπου τα συνεργαζόμενα access point οργανώνονται για να ανταποκριθούν σε όλες τις συσκευές στις περιοχές κάλυψής τους (κινητές συσκευές και αντικατάσταση κυψελών). Αυτό μπορεί να βελτιωθεί μέσω της χρήσης πολύ γρήγορων κεντρικών μονάδων επεξεργασίας που κατανέμουν πόρους σε διαφορετικές τερματικές συσκευές και τα CRAN μπορούν να εστιάσουν στην επεξεργασία δεδομένων σε αυτό που ονομάζεται ομάδα μονάδων βασικής ζώνης (group of baseband units). Ο πλήρης συντονισμός μεταξύ των αριθμών των συστημάτων κατανεμημένων κεραίων (Distributed Antenna System – DAS) μπορεί να οδηγήσει σε διαχείριση παρεμβολών ιδανικά ή σχεδόν ιδανικά, μέσω κεντρικών ή κατανεμημένων τεχνικών βελτίωσης, [5].



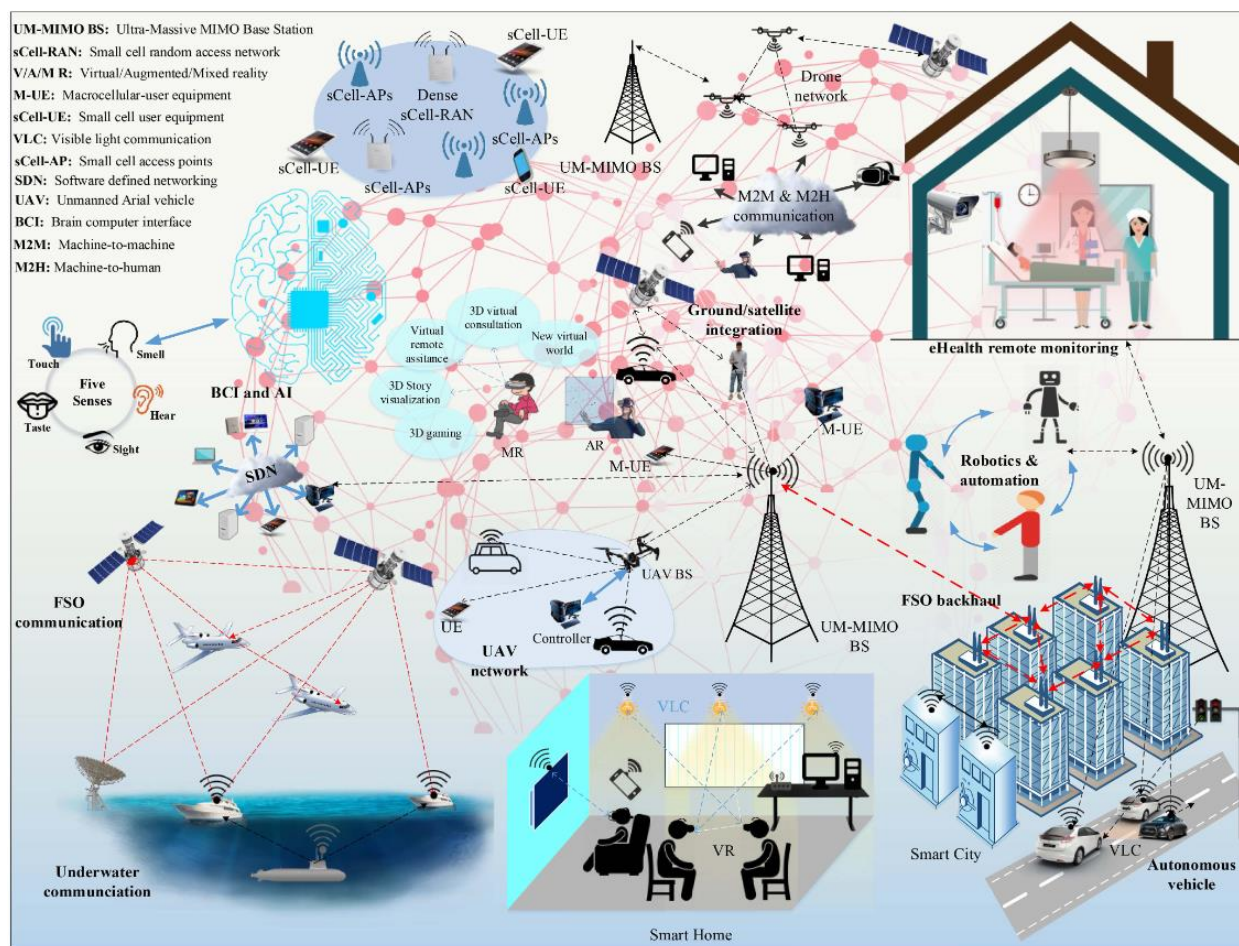
Εικόνα 5: Η αρχιτεκτονική του του 6G δικτύου, χωρίς κυψέλες, [14].

Η Εικόνα 5 δείχνει την αρχιτεκτονική δικτύου με σημαντικές ανάγκες πρόσβασης, όπου απαιτείται νέα διαχείριση φάσματος και στρατηγικές πολλαπλής πρόσβασης. Η επιλογή προηγμένων ζωνών συχνοτήτων όπως "κύματα χιλιοστού και πέρα" (millimeter waves and beyond) θα αξιολογήσει τις προβληματικές ελλείψεις φάσματος. Αν και αυτές οι ζώνες δεν είναι τέλειες, ιδιαίτερα σε μεσαίες και μεγάλες περιοχές (από γεωγραφική άποψη), αυτό θα συμβαίνει λόγω της χαλάρωσης και κατεύθυνσης της δέσμης. Στην περίπτωση πολλαπλής πρόσβασης, η επιλογή σχημάτων ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access – OMA) στο φάσμα που μπορούν να αποκτηθούν δεν είναι αρκετά. Από τη άλλη πλευρά, οι καθαρές τεχνικές NOMA δεν έχουν την ευελιξία για να υποστηρίξουν την ασύρματη συνδεσιμότητα σε συσκευές με διαφορετικές ανάγκες υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, θα χρειαστούν νέες τεχνικές πρόσβασης και κατανομής πόρων και πολλαπλών τεχνικών διαχείρισης πρόσβασης για την παρέμβαση σε αυτά τα δίκτυα χωρίς κυψέλες, με την προϋπόθεση ότι οι πόροι του φάσματος είναι περιορισμένοι, [14].

3.5 Σενάρια αρχιτεκτονικής 6G

Μερικές από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη του πλαισίου μετάδοσης 6G είναι η βάση: "υψηλός ρυθμός bit, υψηλή αξιοπιστία, χαμηλές καθυστερήσεις, υψηλή ενεργειακή απόδοση, υψηλή φασματική απόδοση, νέα φάσματα, πράσινη επικοινωνία, έξυπνα δίκτυα, διαθεσιμότητα δικτύου και σύγκλιση επικοινωνιών, εντοπισμός, υπολογιστική (computing), έλεγχος και ανίχνευση". Το 6G θα είναι πλήρως μηχανογραφημένο και διασυνδεδεμένο.

Η Εικόνα 6 δείχνει την εγκατάσταση της αρχιτεκτονικής της επικοινωνίας για να μπορεί κάποιος να φανταστεί τα συστήματα επικοινωνίας 6G. Σημαντικές προβλέψεις καθώς και εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας 6G καθορίζονται συνοπτικά ακολούθως, [2]:



Εικόνα 6: Πιθανά σενάρια της αρχιτεκτονικής επικοινωνίας του 6G, [15].

Πολύ έξυπνη κοινωνία: Οι συγκεκριμένες δομές του 6G θα επιταχύνουν τη δομή των έξυπνων κοινωνιών προκαλώντας "εξελίξεις ζωτικής σημασίας, όπως παρατήρηση περιβάλλοντος και ρομποτική χρησιμοποιώντας επικοινωνία μηχανή με μηχανή (Machine to Machine – M2M) που βασίζεται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και συλλογής ενέργειας".

Εκτεταμένη πραγματικότητα: Οι υπηρεσίες επαυξημένης πραγματικότητας "βασιζόμενες σε επαυξημένη πραγματικότητα, μικτής πραγματικότητας και εικονική πραγματικότητα", είναι βασικά στοιχεία των συστημάτων επικοινωνίας 6G.

Συνδεδεμένη ρομποτική και αυτόνομα συστήματα: Τα συστήματα 6G βοηθούν στην ανάπτυξη συνδεδεμένων ρομπότ και αυτόνομων συστημάτων. Τα αυτοματοποιημένα μέσα μεταφοράς που βασίζονται στην ασύρματη επικοινωνία 6G θα μπορούν να τροποποιήσουν σημαντικά την καθημερινότητά μας. Το δίκτυο 6G θα υιοθετήσει την πραγματική χρήση των αυτοκινήτων χωρίς οδηγό.

Ασύρματες αλληλεπιδράσεις υπολογιστή – εγκεφάλου (Computer Brain Interaction – CBI): Είναι ένα μέσο απευθείας επικοινωνίας μεταξύ του εγκεφάλου και των εξωτερικών συσκευών. Το σύστημα αλληλεπίδρασης υπολογιστή εγκεφάλου – λαμβάνει σήματα από τον εγκέφαλο και αυτά μεταδίδονται σε μια ψηφιακή συσκευή, τα οποία αναλύονται και ερμηνεύονται σε πρόσθετες εντολές ή ενέργειες. Τα στοιχεία ασύρματης επικοινωνίας 6G θα διευκολύνουν την πραγματική εφαρμογή των δικτύων CBI για έναν πιο έξυπνο τρόπο ζωής.

Απτική Επικοινωνία: Η αίσθηση της αφής χρησιμοποιείται από τη μη λεκτική επικοινωνία. Η προτεινόμενη ασύρματη επικοινωνία 6G θα υποστηρίζει τυχαία επικοινωνία (τυχαία επικοινωνία είναι όταν ένας host στέλνει σε οποιονδήποτε άλλο

host στο δίκτυο· οι αντιστοιχίσεις εδώ είναι μία προς μία, που σημαίνει ότι κάθε host λαμβάνει ροές από έναν ξεχωριστό αποστολέα).

Έξυπνη υγειονομική περίθαλψη: Τα συστήματα 6G θα διευκολύνουν ένα συνεπές σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης στο σύστημα υγειονομικής περίθαλψης. Ακόμη και τα εξ αποστάσεως χειρουργεία θα είναι δυνατά χάρη στην επικοινωνία 6G. Η μεγαλύτερη ταχύτητα δεδομένων, η μικρότερη πιθανότητα σφάλματος και ένα πολύ συνεπές δίκτυο 6G θα βοηθήσουν στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ιατρικών δεδομένων γρήγορα και αξιόπιστα, γεγονός που μπορεί να προωθήσει την πρόσβαση στη συντήρηση και την υπεροχή της περίθαλψης.

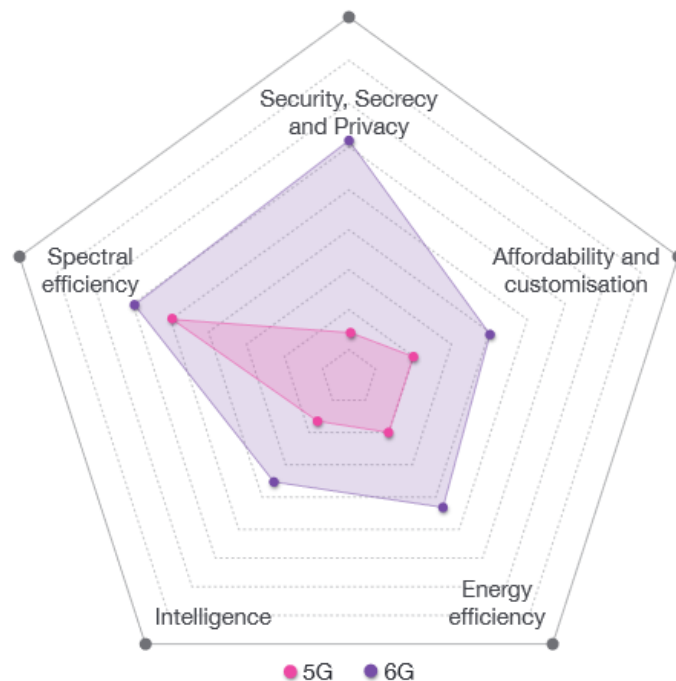
Αυτοματισμός και βιομηχανία: Ο όρος αυτοματισμός αναφέρεται στον "αυτόματο έλεγχο διαδικασιών, συσκευών και συστημάτων". Τα αυτοματοποιημένα συστήματα 6G θα προσφέρουν "πολύ αξιόπιστες, επεκτάσιμες και ασφαλείς επικοινωνίες χρησιμοποιώντας δίκτυα υψηλής ταχύτητας και χαμηλής νοημοσύνης".

Μεταφορά πληροφοριών με τις πέντε έννοιες: Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται από τη νευρολογική διαδικασία έως την αισθητηριακή ολοκλήρωση. Ανακτά τα συναισθήματα της ανθρώπινης σωματικής διάπλασης καθώς και του περιβάλλοντος και αξιοποιεί το σώμα αποτελεσματικά στο περιβάλλον και στις γηγενείς συνθήκες. Η τεχνική BCI θα βελτιώσει αποτελεσματικά αυτήν την εφαρμογή.

Διαδίκτυο των Πάντων (Internet of Everything – IoE): Το σύστημα 6G θα υποστηρίξει το πλήρες σύστημα IoE. Είναι ουσιαστικά ένα Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), μια γενική λέξη που αφομοιώνει τέσσερα χαρακτηριστικά, όπως "δεδομένα, άνθρωποι, διεργασίες και φυσικές συσκευές", σε ένα πλαίσιο.

3.6 Σύγκριση του 5G και 6G

Μια σύγκριση των επικοινωνιών 5G και 6G συνοψίζεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Σύγκριση ανάμεσα στην επικοινωνία 5G και 6G, [16].

Αρχικά υποθέτουμε ότι η ηλεκτρική ικανότητα του 5G ήταν προηγουμένως κοντά στα όρια με πρόοδο σε ένα τεράστιο MIMO, συμπίεση δικτύου και μετάδοση κυμάτων χιλιοστών, για παράδειγμα, παρόμοια μια σειρά μεθόδων πολυπλεξίας παλαιού τύπου που αποκτήθηκαν από το 4G. Καθώς τα όρια του Shannon είναι περιορισμένα, είναι απίθανο η φασματική απόδοση στο 6G να βελτιωθεί σε μεγάλη κλίμακα. Αντίθετα, οι

επικοινωνιών 6G θα πρέπει να βελτιώσουν σημαντικά την ασφάλεια, το απόρρητο και την εμπιστευτικότητα με νέες τεχνικές. Στα δίκτυα 5G, οι συνήθεις αλγόριθμοι κρυπτογράφησης που βασίζονται κυρίως στον "Rivest-Shamir-Adleman (RSA)" με τα δημόσια κρυπτογραφημένα μηνύματα να εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται για τη διασφάλιση της ασφάλειας και του απορρήτου των μεταδόσεων. Οι κρυπτογραφημένες μονάδες RSA είναι σχετικά αβέβαιες αναφορικά με την πίεση των τεχνολογιών εξόρυξης δεδομένων και τεχνητής νοημοσύνης, πολύ λιγότερο όμως από τους μηχανισμούς απορρήτου που αναπτύχθηκαν νωρίτερα από την εποχή του 5G, [16].

Πίνακας 1: Σύγκριση των KPIs του 5G και 6G, [17].

KPI	5G	6G
Χωρητικότητα Κίνησης	10 Mb/s/m ²	~1-10Gb/s/m ³
Ρυθμός δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης	20 Gb/s	1 Tb/s (1000x)
Ρυθμός δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης	10 Gb/s	1 Tb/s
Ομοιόμορφη εμπειρία χρήστη	50 Mb/s, 2D παντού	10 Gb/s, 3D παντού
Καθυστερήση (ραδιοδιεπαφή)	1 ms	0.1 ms
Καθυστερήση (από άκρο σε άκρο)	10 ms	1 ms
Jitter	Μη καθορισμένο	1 μs
Αξιοπιστία (ρυθμός λανθασμένων πλαισίων)	1-10 ⁻⁵	1-10 ⁻⁹
Ενέργεια/ bit	Μη καθορισμένο	~1pJ/b
Ακρίβεια εντοπισμού	10 cm στο 2D	1 cm στο 3D

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τους σημαντικούς δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), και υπογραμμίζει τις ουσιαστικές βελτιώσεις από τα KPIs του 5G. Περισσότερα ή λιγότερα KPIs, π.χ. η διακύμανση καθυστέρησης (delay jitter) και ενέργεια ανά bit, δεν είναι καθορισμένα στο 5G, καθώς δεν είναι σημαντικά στο 5G, ενώ στο 6G είναι σημαντικά KPIs.

3.7 Τεχνικά θέματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ορισμένα πρώτα τεχνικά θέματα για το 6G σε συνδυασμό με προτάσεις υπό σχεδιασμό.

3.7.1 Όρια στις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης

Το μέγεθος κυψέλης σε συνδυασμό με τη συχνότητα φορέα μπορεί να περιορίσει την επιλογή του εύρους των παραμέτρων του OFDM. Από τη μια πλευρά, η χρήση της αριθμολογίας των παραμέτρων του OFDM με την εκτεταμένη απόσταση των subcarrier είναι συνήθως πιο κατάλληλη για μικρά μεγέθη κυψελών λόγω των μικρότερων καθυστερήσεων σε σχέση με τις μεγαλύτερες σε έκταση κυψέλες. Από την άλλη πλευρά, πολλές ψηφιακές κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγαλύτερο εύρος subcarrier, αλλά με κόστος χαμηλότερης απόδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος

των κυψελών με φορείς υψηλής συχνότητας είναι περιορισμένο λόγω απωλειών διάδοσης διαδρομής και διάδοσης Doppler σε περίπτωση υψηλής κινητικότητας, [18].

3.7.2 Θέματα ασφάλειας δικτύου

Η ασφάλεια αποτελεί σοβαρό ζήτημα για τα ασύρματα δίκτυα 6G, ειδικά στην περίπτωση του Επίγειου Διαστημικού Ολοκληρωμένου Δικτύου (Terrestrial Space Integrated Network – STIN). Στο 6G, εκτός από την παραδοσιακή φυσική ασφάλεια, πρέπει να συνδυάζονται και άλλες μορφές απορρήτου, όπως η ασφάλεια συνεκτικών δικτύων (cohesive network). Πρέπει επομένως να ενταθεί μια νέα προσέγγιση της ασφάλειας, η οποία εμπεριέχει μικρή δυσκολία και υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Για αυτό το σκοπό, ορισμένες τεχνικές ασφάλειας φυσικού επιπέδου που προορίζονται για το 5G μπορούν να ενταχθούν και σε συστήματα 6G, π.χ.: ένα ασφαλές σύστημα MIMO που βασίζεται σε έλεγχο ισότητας χαμηλής πυκνότητας (Low Density Parity Control – LDPC). Οι τεχνικές Mm-Wave Safe μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για "εφαρμογές ζώνης εξαιρετικά μεγάλου MIMO (Ultra Massive MIMO – UM-MIMO) και σε εφαρμογές με απαιτήσεις THz". Όταν πρόκειται για ολοκληρωμένη ασφάλεια δικτύου, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένας κατάλληλος σκοπός διαχείρισης για διάφορα μέσα λειτουργίας για διάφορους τομείς ασφάλειας. Ένας κεντρικός μηχανισμός διαχείρισης διανομής (distribution management) είναι ένας πολλά υποσχόμενος μηχανισμός για το STIN που λαμβάνει υπόψη τη διαχείριση πολυπολιτισμικών κλειδιών επικοινωνίας χωρίς πιστοποιητικά. Με την αποτελεσματική διαχείριση και εφαρμογή του backbone του δικτύου, αυτές οι μέθοδοι ασφάλειας φυσικού επιπέδου και δικτύου μπορούν να συνδυάσουν την ολοκληρωμένη λύση ασφαλείας, η οποία προστατεύει αποτελεσματικά τις εμπιστευτικές πληροφορίες και το απόρρητο στα δίκτυα 6G, [9], [12].

3.7.3 Πόρος ως υπηρεσία (Resource as a Service)

Η έλευση της δικτύωσης βασισμένης στο λογισμικό (Software Defined Network – SDN) και της επαλήθευσης λειτουργικότητας δικτύου (Network Function Verification – NFV) διευκολύνει την εξέλιξη προς μια ολοκληρωμένη κατανομή πόρων προσανατολισμένη στους πόρους που ονομάζεται Πόρος ως Υπηρεσία (Resource as a Service – RaaS). Το αποτέλεσμα είναι μια αντίληψη του διαχωρισμού του δικτύου για τη δημιουργία εικονικών δικτύων σε όλη τη φυσική υποδομή. Επιτρέπει στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας ή στους προμηθευτές υπηρεσιών να εκχωρούν πόρους του εικονικού δικτύου για να αντιμετωπίσουν τις ακριβείς ανάγκες των καταναλωτών. Οι προγραμματιζόμενες παράμετροι των δικτύων του μετρό και οι ιδιαιτερότητες του λογισμικού πιθανότατα θα αποτελούν μέρος των πόρων του δικτύου. Ως εκ τούτου, οι τάσεις ανάπτυξης NFV κατά τη διάρκεια του κύκλου 6G θα περιλαμβάνουν την παρακολούθηση του δικτύου με προγραμματιζόμενο λογισμικό, τον τεμαχισμό του δικτύου, προγραμματιζόμενες επιφάνειες, από δίκτυα πρόσβασης στο σύννεφο (σύννεφο) που ενεργοποιούνται μια μηχανή μέχρι και τα δίκτυα πρόσβασης ομίχλης (fog), [2].

3.7.4 Ετερογενή δίκτυα σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων

Η χρήση των mm-Wave και των THz στο 6G παρουσιάζει μια επιπλέον νέα ανοιχτά προβλήματα. Για το mm-Wave, η υποστήριξη για υψηλή κινητικότητα σε συχνότητες mm-Wave αποτελεί ένα ανοιχτό κεντρικό πρόβλημα. Στην περίπτωση της συχνότητας THz, είναι απαραίτητα νέα μοντέλα αρχιτεκτονικής και διάδοσης. Η μεγάλη ισχύς, η μεγάλη ευαισθησία και ο χαμηλός θόρυβος του πομπού που απαιτούνται για να ξεπεραστούν οι απώλειες διαδρομής στη συχνότητα THz είναι σημαντικές προϋποθέσεις. Μόλις γίνουν κατανοηθεί το υλικό που απαιτείται, πρέπει να

αναπτυχθούν πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου και νέες συνδέσεις για να ενισχυθεί η χρήση πόρων διαμοιραζόμενων συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη την εξαιρετικά μεταβλητή και ανακριβή φύση των περιβαλλόντων mm-wave και THz. Εναλλακτικός σημαντικός τρόπος είναι η εκμάθηση της συνύπαρξης κυψελών THz, κυμάτων χιλιοστού και μικροκυμάτων σε κάθε επίπεδο: εκτεταμένο και τοπικό, [19].

3.7.5 Απτικές επικοινωνίες

Σημαντικό θέμα αποτελεί η χρήση ολογραφικής επικοινωνίας για τη μεταφορά εικονικών προβολών κοντά στην πραγματικότητα των ανθρώπων, ενεργειών, περιβαλλόντων κ.λπ. Είναι βασικό πλεονέκτημα η ανταλλαγή εξ αποστάσεως μια φυσικής επικοινωνίας μέσω μιας σύνδεσης διαδικτύου σε πραγματικό χρόνο. Οι αναμενόμενες υπηρεσίες περιλαμβάνουν τις τηλεπικοινωνίες, τον αυτοματοποιημένο συνεργατικό αναγνώστη και τη διαπροσωπική επικοινωνία, που θα επιτρέπουν την εφαρμογή τυχαίου ελέγχου στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός του τηλεπικοινωνιακού συστήματος μεταξύ των νέων τεχνικών πρέπει να πραγματοποιηθεί για να πληροί αυτές τις αυστηρές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, πρέπει να δημιουργηθούν νέα διαγράμματα φυσικού επιπέδου, για το σχεδιασμό συστημάτων σηματοδότησης, τη συμφόρηση κυματομορφών κ.λπ. για τη βελτίωση του πρωτοκόλλου μεταφοράς και δικτύου. Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας δεν μπορούν να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις και για αυτό κρίνεται αναγκαία η χρήση των συστημάτων οπτικών ινών, [20].

4. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΟΥ 6G

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν αναλυτικά οι σημαντικοί δείκτες απόδοσης του 6G (Key Performance Indicators – KPIs). Επιπλέον, δεδομένου ότι τα συστήματα 6G δεν θα εισαχθούν σε "πράσινα" περιβάλλοντα, σημαντική είναι και η συμβατότητα με τα υπάρχοντα συστήματα. Όπου είναι δυνατόν, θα παρουσιαστούν πρακτικές λύσεις για την υλοποίηση των προκλήσεων που έχουν εντοπιστεί.

4.1 Αξιοποίηση του φάσματος σε συχνότητες υπο-terahertz

Η προσδοκία αύξησης των συχνοτήτων φέροντος προς ζώνες subterahertz φέρνει την αντίστοιχη μετάβαση σε πολύ υψηλότερο εύρος ζώνης σε σχέση με το 5G. Δεδομένου του προφίλ ατμοσφαιρικής απορρόφησης στο επίπεδο της θάλασσας ως συνάρτηση της συχνότητας, η λειτουργία του συστήματος εντός του πρώτου παραθύρου συχνότητας, W1 (140 – 350GHz), φαίνεται η πιο πρακτικά εφικτή επιλογή για την επόμενη δεκαετία. Ενώ αυτό εισάγει πολύ μεγαλύτερα εύρη ζώνης, η υλοποίηση ραδιοφωνικών πομποδεκτών σε ολόκληρο το εύρος ζώνης είναι σχεδόν αδύνατο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα αν κάποιος θέλει να διατηρήσει την ομοιομορφία κέρδους (gain) και φάσης στο frontend του τομέα των ραδιοσυχνοτήτων (RadioFrequency – RF). Ακόμη και τα συστήματα 5G-NR που λειτουργούν στις ζώνες mmWave έχουν μέγιστο εύρος ζώνης φορέα 400MHz. Στο ίδιο πλαίσιο, συζητούνται οι υπηρεσίες μικρών αποστάσεων (close proximity services) που έχουν περιορισμό εύρους ζώνης 1GHz σε ζώνες subterahertz. Αυτό είναι αξιοσημείωτο δεδομένου ότι η υιοθέτηση σε τόσο υψηλές ζώνες οφείλεται στο γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα σε τάξη μεγέθους εύρη ζώνης. Ωστόσο, στην πράξη, αυτό σπάνια φαίνεται να συμβαίνει.

Οι περισσότεροι από τους τρέχοντες εμπορικούς σταθμούς βάσης των 24,5 - 29,5GHz αποτελούνται από δύο έως τέσσερις συγκεντρωτικούς φορείς (aggregating carriers). Δηλαδή, κάθε φορέας έχει πλάτος 100MHz (στην περίπτωση τεσσάρων φορέων). Σε σύγκριση με έναν φορέα 100MHz, το επίπεδο θορύβου ενός δέκτη που χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 1GHz είναι 10dB υψηλότερο, αποφέροντας υποβάθμιση του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) κατά ένα παράγοντα 10. Επομένως, στην πράξη, το εύρος ζώνης ενός μόνο φορέα θα μπορούσε να περιοριστεί στα π.χ. 100MHz και μεγαλύτερα εύρη ζώνης θα μπορούσαν να ληφθούν με τη συγκέντρωση συστατικών φορέων (component carriers), παρέχοντας την απαιτούμενη ποικιλομορφία στη συχνότητα. Αντίστοιχα, αν απαιτείται εύρος ζώνης 5GHz, θα πρέπει να συγκεντρωθούν 50 τέτοιοι φορείς των 100MHz. Μια άμεση συνέπεια αυτού είναι ότι ο ραδιοφωνικός πομποδέκτης (και τα σχετικά στοιχεία) πρέπει να είναι βαθμονομημένος στους 50 φορείς. Αυτό αποτελεί μια πρόκληση στις συχνότητες subterahertz, ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική και το μέγεθος της διάταξης κεραίας, καθώς οι επιπτώσεις του θορύβου φάσης αρχίζουν να γίνονται πιο έντονες. Ως εκ τούτου, ο μέγιστος αριθμός φορέων και το μέγιστο λειτουργικό εύρος ζώνης θα είναι προσαρμοσμένα με βάση την ικανότητα διατήρησης της γραμμικότητας του frontend RF, των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ραδιοσυχνοτήτων κεραίας και των αποτελεσματικών ιστροπικών ορίων ισχύος ακτινοβολίας για ασφαλή λειτουργία, [1].

4.2 Όρια των τεχνολογιών των ημιαγωγών

Με την τάση προς τη λειτουργία στο εύρος του παραθύρου W1, οι αποτελεσματικές αναλογικές λειτουργίες που χειρίζονται από το RF frontend, θα το έχουν ως βασική προϋπόθεση λειτουργίας. Για τη βελτιστοποίηση των tradeoff απόδοσης, η ετερογένεια στους ημιαγωγούς θα είναι σημαντική μαζί με την 3D ολοκλήρωση και συσκευασία με τις δυνατότητες "κεραίας σε πακέτο" (antenna in package, δηλαδή όπου η κεραία είναι ενσωματωμένη σε ένα πακέτο μαζί με το ενσωματωμένο κύκλωμα RF). Αναφορικά με

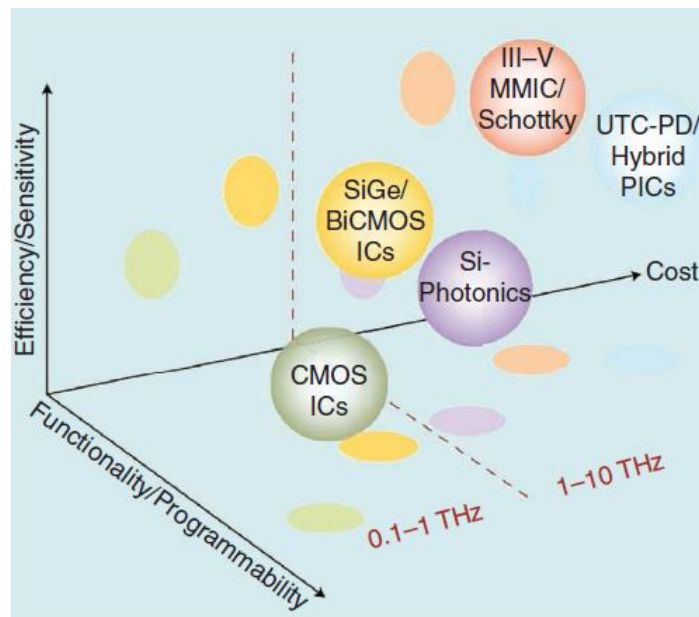
την ψηφιακή επεξεργασία, απαιτούνται συμπληρωματικοί ημιαγωγοί μεταλλικού οξειδίου (Complementary Metal Oxide Semiconductor - CMOS) κάτω των 10 nm και μελλοντικές τεχνολογίες με λογικά τρανζίστορ που μπορούν να προσφέρουν υψηλές ταχύτητες με χαμηλή τάση τροφοδοσίας και μειωμένο κόστος. Στην αναλογική σχεδίαση, είναι απαραίτητη μια αρκετά υψηλή f_{max} σε συνδυασμό με σταθερή ισχύ του σήματος εξόδου, την αντίστοιχη ποιότητα των εξαρτημάτων στο chip, για την αντιμετώπιση προβλημάτων θορύβου και ανθεκτικότητα σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Ενώ μια τεχνολογία CMOS των 28 nm ή μικρότερη μπορεί να προσφέρει f_{max} πάνω από 250GHz, η συνεχής κλιμάκωση του μήκους της πύλης οδηγεί σε επιδείνωση της αντίστασης της πύλης και ως εκ τούτου περιορίζει περαιτέρω αύξηση του f_{max} . Οι επιλογές που σχετίζονται με το παράθυρο W1 (και με το μαζικό CMOS) περιλαμβάνουν συσκευές πλήρους κένωσης πυριτίου πάνω σε μονωτή (Fully Depleted Silicon-On-Insulator – FD-SOI) και τρανζίστορ και επίδρασης πεδίου fin (FinFETs). Σε σχέση με το μαζικό CMOS, το FD-SOI αποδίδει καλύτερα, ενώ το FinFET έχει κυρίως πλεονεκτήματα στο κέρδος, στην κλίση κατωφλίου και στην ικανότητα να μειωθεί σε μέγεθος μέχρι και 5 nm.

Ταυτόχρονα, οι διεργασίες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες διπολικών ημιαγωγών CMOS και SiGe υιοθετούνται όλο και περισσότερο στο σχεδιασμό RF σε συχνότητες πέραν των 100GHz, χρησιμοποιώντας διαδικασία λιθογραφίας 90 nm. Αυτό οδηγεί σε μεγάλα εύρη θερμοκρασιών, υψηλότερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της διεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διπολική τεχνολογία SiGe αποδίδει τέσσερις φορές υψηλότερη τάση διάσπασης σε σχέση με το CMOS για δεδομένο f_{max} , η οποία είναι μεγάλης σημασίας σε κυκλώματα όπως ενισχυτές ισχύος (Power Amplifiers – PAs) και ελεγχόμενους από τάση ταλαντωτές για την επίτευξη χαμηλού θορύβου φάσης. Για να επιτευχθεί η σωστή ισορροπία μεταξύ κόστους και απόδοσης, οι τεχνολογίες SiGe–BiCMOS ίσως είναι η καταλληλότερη επιλογή.

Για να διατηρηθεί υψηλή ισχύς εξόδου εντός του παραθύρου W1, θα μπορούσαν να εξεταστούν συσκευές τύπου GaAs ή άλλες συσκευές τύπου III–V λόγω των ιδιοτήτων τους όπως: επιφάνεια υψηλής φόρτισης, υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων και ευρύτερα διάκενα ζώνης, σε αντίθεση με την περιορισμένη ισχύ εξόδου που προσφέρουν οι τεχνολογίες που βασίζονται στο πυρίτιο. Για αποτελεσματική εφαρμογή, γίνονται συνεχείς προσπάθειες για την ενσωμάτωση συσκευών GaAs και III–V με τα CMOS ή τα BiCMOS. Αυτή η ολοκλήρωση από κοινού μπορεί να υλοποιηθεί είτε με τη χρήση μονολιθικών διεργασιών, όπου οι συσκευές III–V τοποθετούνται δίπλα στο CMOS στο ίδιο υπόστρωμα, είτε με τη χρήση ετερογενούς ολοκλήρωσης για την ανάπτυξη μονάδων που συνδυάζουν στοιχεία μικροκυμάτων και "κεραίας σε πακέτο".

Στην πράξη, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες, όντας πιο σημαντικοί: η επαναδιαμόρφωση, η αποτελεσματικότητα και το κόστος. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ένα ευρύ φάσμα επιλογών ημιαγωγών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ ευρύτερη ζώνη από το W1. Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συντμήσεις στην εικόνα:

- IC: Integrated Circuit,
- MMIC: Monolithic Microwave IC,
- UTC-PD: Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode,
- PIC: Photonic IC.



Εικόνα 8: Ποιοτική απεικόνιση τεχνολογιών που εξετάζουν την αποδοτικότητα, τη λειτουργικότητα και το κόστος, [21].

Η Εικόνα 8 είναι μια ποιοτική απεικόνιση των σχετικών tradeoff μεταξύ της αύξησης της συχνότητας έναντι της πολυπλοκότητας και του κόστους των ανταγωνιστικών τεχνολογιών. Οι αναγνώστες μπορούν να ανατρέξουν στον Πίνακα 1 στο [10] για μια περίληψη μιας ποσοτικής ανάλυσης σχετικά με ορισμένες σχετικές μετρήσεις απόδοσης, [21].

4.3 Ενσωμάτωση του σχεδιασμού των πομποδεκτών σε συχνότητες υπο-terahertz

Ανεξάρτητα από τον τύπο διαμόρφωσης δέσμης, μια αρχιτεκτονική πομποδέκτη για κυψελωτά συστήματα περιλαμβάνει συνήθως έναν δέκτη με έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low-Noise Amplifier – LNA), έναν μείκτη I/Q και μια ακολουθία τοπικού ταλαντωτή (Local Oscillator – LO) με πολλαπλασιαστές συχνότητας. Ο πομπός έχει παρόμοια αρχιτεκτονική, όπου ο μίκτης ακολουθείται από έναν ενισχυτή ισχύος. Η επιτεύξιμη τιμή θορύβου του δέκτη και η απόδοση του πομπού θα μπορούσαν να υποβαθμιστούν σοβαρά σε συχνότητες υπο-terahertz σε σύγκριση με χαμηλότερες.

Για παράδειγμα, η λειτουργία στα 250GHz με 10.000 στοιχεία θα απαιτήσει μεγέθη συστοιχιών μόλις $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ με στοιχεία σε απόσταση μισού μήκους κύματος μεταξύ τους (περίπου 0,6mm). Γι' αυτό το λόγο, τα ηλεκτρονικά στοιχεία της διεπαφής πρέπει να έχουν το ίδιο μέγεθος για να ελαχιστοποιηθεί το μήκος των διασυνδέσεων, γεγονός που αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Κάθε "τσιπ" πρέπει στη συνέχεια να διαθέτει πολλαπλούς πομποδέκτες, π.χ. μια συστοιχία $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ θα μπορούσε να έχει 10 πομποδέκτες, όπου θα χρειαζόνταν 1.000 τσιπ για 10.000 στοιχεία. Τα στοιχεία θα έπρεπε να ενσωματωθούν στο τσιπ, αφαιρώντας τις απώλειες διεπαφής τσιπ προς φορέα (chip-to-carrier) υποβαθμίζοντας την απόδοση της κεραίας. Εδώ προκύπτουν δύο σημαντικές προκλήσεις: 1) η παραγωγή ενέργειας και 2) η μεταφορά θερμότητας.

Προφανώς, το πιο σημαντικό εξάρτημα στον πομπό για αύξηση της ισχύος είναι ο ενισχυτής ισχύος, ο οποίος θα έχει τυπικά απόδοση 115% σε ζώνες υπο-terahertz χρησιμοποιώντας κυματομορφές πολλαπλών φορέων. Η ισχύς εξόδου αναμένεται να είναι μεταξύ 10 και 15dBm για chipset που είναι ενσωματωμένα σε ενισχυτή ισχύος. Ως εκ τούτου, οι ενισχυτές ισχύος θα πρέπει να λειτουργούν με υψηλές ισχύες backoff και κοντά στα σημεία συμπίεσης κέρδους 1-dB για να μεγιστοποιήσουν την ισχύ εξόδου. Αυτό γίνεται εις βάρος των μη γραμμικοτήτων που προκαλούνται από γινόμενα

ενδοδιαμόρφωσης—σημαντικές για τον χαρακτηρισμό εκτός ζώνης και τη συνύπαρξη φάσματος. Εξαιτίας αυτού, η μεταφορά ισχύος από τον ενισχυτή ισχύος/ πομποδέκτη αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Δεδομένου ότι ο συνολικός συντελεστής διαμόρφωσης είναι αρκετά μειωμένος, η συνολική επιφάνεια για τη μεταφορά θερμότητας είναι σημαντικά χαμηλότερη. Εάν κάθε πομποδέκτης καταναλώνει κατά μέσο όρο 50mW, η συνολική κατανάλωση ισχύος της συστοιχίας θα είναι 0,5kW, με καθοριστικές συνέπειες, όπως το σύστημα να μην είναι συνεχώς ενεργό. Αυτό είναι σημαντικό για λόγους ενεργειακής απόδοσης. Επιπλέον, η παραγωγή σύγχρονων/ χαμηλού θορύβου σημάτων του τοπικού ταλαντωτή είναι μια σημαντική πρόκληση. Εδώ, μια αποκεντρωμένη λύση που βασίζεται σε τοπικούς βρόχους κλειδώματος φάσης είναι απαραίτητη για την αποφυγή δημιουργίας κεντριοποιημένου σήματος και για τον αποσυσχετισμό του θορύβου φάσης.

Η πλήρης υλοποίηση συστημάτων υπο-terahertz θα έχει έλλειψη σε διασυνδέσεις ραδιοσυχνοτήτων χαμηλών απωλειών/ κόστους. Σε αυτή την περίπτωση, οι συμβατικές τεχνικές συσκευασίας τσιπ είναι ακατάλληλες. Το ζήτημα της συσκευασίας κυκλωμάτων μικτού σήματος έγκειται στη μετάβαση μεταξύ των θυρών κυκλώματος ραδιοσυχνοτήτων προς/ έξω από έναν κυματοδηγό, συχνά μέσω καλωδίων σύνδεσης. Ωστόσο, τα καλώδια σύνδεσης εντός του παραθύρου W1 εμπεριέχουν μεγάλη αντίσταση, γεγονός που τα καθιστά δύσκολο για την προσαρμογή σύνθετης αντίστασης. Η μείωση του μεγέθους των καλωδίων σύνδεσης παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα στην επαναληψιμότητα και αυξημένα κόστη κατασκευής. Αντίθετα, μια μετάβαση σε κυματοδηγό εντός του κυκλώματος μπορεί να είναι μια καλύτερη εναλλακτική λύση, μειώνοντας το κόστος του εύρους ζώνης, καθώς ο ρυθμός διάδοσης μεταξύ του κυματοδηγού και της κοιλότητας πρέπει να καταστέλλεται για να διατηρηθεί η απόδοση του κυκλώματος. Αυτό θα αποφέρει μια πιο συμπαγή ενοποίηση κεραιών με ενισχυτές ισχύος/ χαμηλού θορύβου, μίκτες και διαμορφωτές. Σε κάθε περίπτωση, η εύρεση της σωστής ισορροπίας όσον αφορά την απόδοση/ ενσωμάτωση του πομποδέκτη, το κόστος, τη συσκευασία και τα κατασκευαστικά ελαττώματα είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχή υιοθέτηση των πομποδεκτών σε ζώνες υπο-terahertz. Επιπλέον, από την πλευρά της επεξεργασίας σήματος, προκλήσεις όπως αυτές που εμπλέκονται στη διαχείριση δέσμης για συστήματα υπο-terahertz χρήζουν επίσης περαιτέρω προσοχή, [22].

4.4 Επίτευξη ρυθμών terabit/ sec στην πραγματικότητα

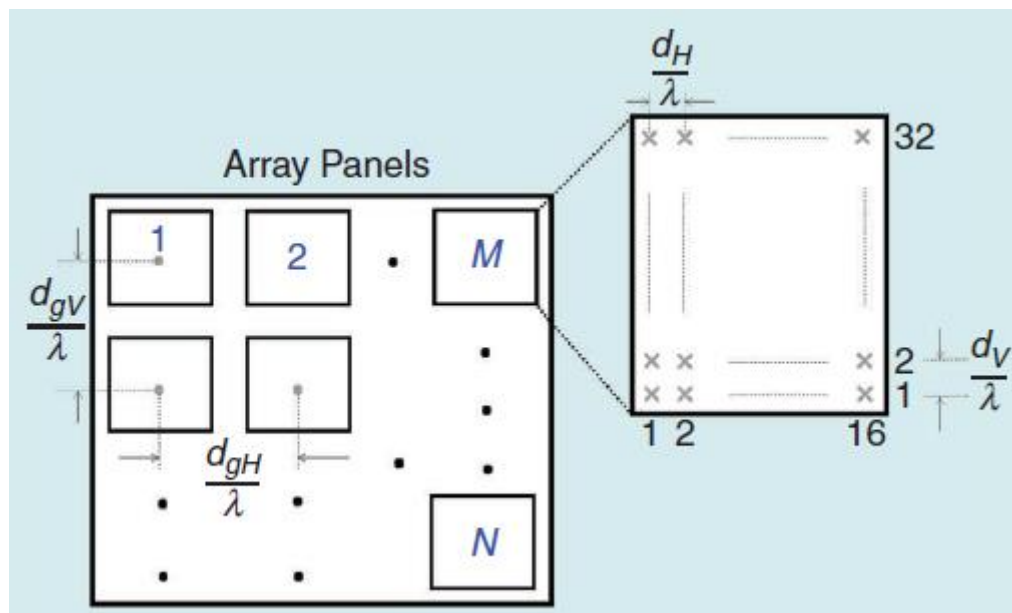
Η λειτουργία μεταξύ 140 και 350GHz θα απαιτήσει άνευ προηγουμένου μαζικά συστήματα κεραιών. Ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων που λειτουργούν με υψηλή αποδοτικότητα ακτινοβολίας θέτει θεμελιώδεις προκλήσεις στο σχεδιασμό των συγκεκριμένων δικτύων παροχής ραδιοσυχνοτήτων για την υποστήριξη εύρους ζώνης σε gigahertz. Αναφορικά με τα συστήματα συμφασικών κεραιών, ενώ η υπερβολική κλιμάκωση του αριθμού των στοιχείων θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερα πλάτη δέσμης, καθώς το εύρος ζώνης κλιμακώνεται, η απόδοση του συστήματος στα κάτω και πάνω όρια των ζωνών θα είναι ουσιαστικά διαφορετική. Αυτό οδηγεί σε παραμόρφωση στο μοτίβο ακτινοβολίας του κύριου λοβού καθώς και σε αυξημένη ισχύ στους πλευρικούς λοβούς.

Επιπλέον, το ζήτημα της απόκλισης δέσμης είναι μια πρόκληση που θα πρέπει να ξεπεραστεί, ιδιαίτερα καθώς το σύστημα κεραιών βασίζεται σε κυματομορφές ευρείας ζώνης που έχουν υψηλό λόγο μέγιστη προς μέση ισχύ. Με μια τέτοια καλή ανάλυση δέσμης, η κατεύθυνση της συνολικής απολαβής της διάταξης/ διαμόρφωσης δέσμης προς τη συσκευή χρήστη γίνεται υπερβολικά δύσκολη. Δεδομένου ότι τα στοιχεία θα ενσωματωθούν στο τσιπ, η διατήρηση του κέρδους και της απόκρισης φάσης του συστήματος (και η απορρόφηση των επιπτώσεων της σύζευξης κεραίας/ κυκλώματος)

αποτελεί μια τρομερή δυσκολία. Το κανάλι διάδοσης υπο-terahertz αναμένεται να έχει χαμηλή θέση ως προτίμηση, στην οποία περίπτωση τα κατανομημένα συστήματα κεραιών μπορεί να χρησιμεύσουν ως τρόπος για να βελτιώσουν αυτή την κατάταξη και εντέλει να οδηγήσουν σε αύξηση των επιτεύξιμων ρυθμών.

Έχουν επίσης γίνει σε αρκετά ερευνητικά άρθρα προτάσεις για τη βελτίωση της κατάταξης από πλευράς προτίμησης και της κάλυψης του σύνθετου καναλιού με επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RISs). Ωστόσο, η εμπορική τους ανάπτυξη αναμένεται να παρεμποδιστεί από πολλά προβλήματα. Για την επιτυχή λειτουργία των RIS θα απαιτηθούν συνδέσεις μεταφοράς απροσδιόριστου εύρους ζώνης μεταξύ των κυψελοειδών σταθμών βάσης και κάθε RIS. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης μεταφοράς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των στοιχείων στο RIS, τον αριθμό των bit ελέγχου ανά στοιχείο και τους ρυθμούς ανανέωσής τους. Οι προστιθέμενες συνδέσεις μεταφοράς θα αυξήσουν τις καθυστερήσεις του επιπέδου ελέγχου του συνολικού συστήματος. Για τη λειτουργία πολλών χρηστών, η χωρητικότητα του δικτύου μεταφοράς θα πρέπει να κλιμακωθεί περαιτέρω με τον αριθμό των συσκευών χρήστη που εξυπηρετούνται και ο απαιτούμενος αριθμός επιφανειών "ανά κυψέλη" δεν είναι ακόμα σαφώς ορισμένος.

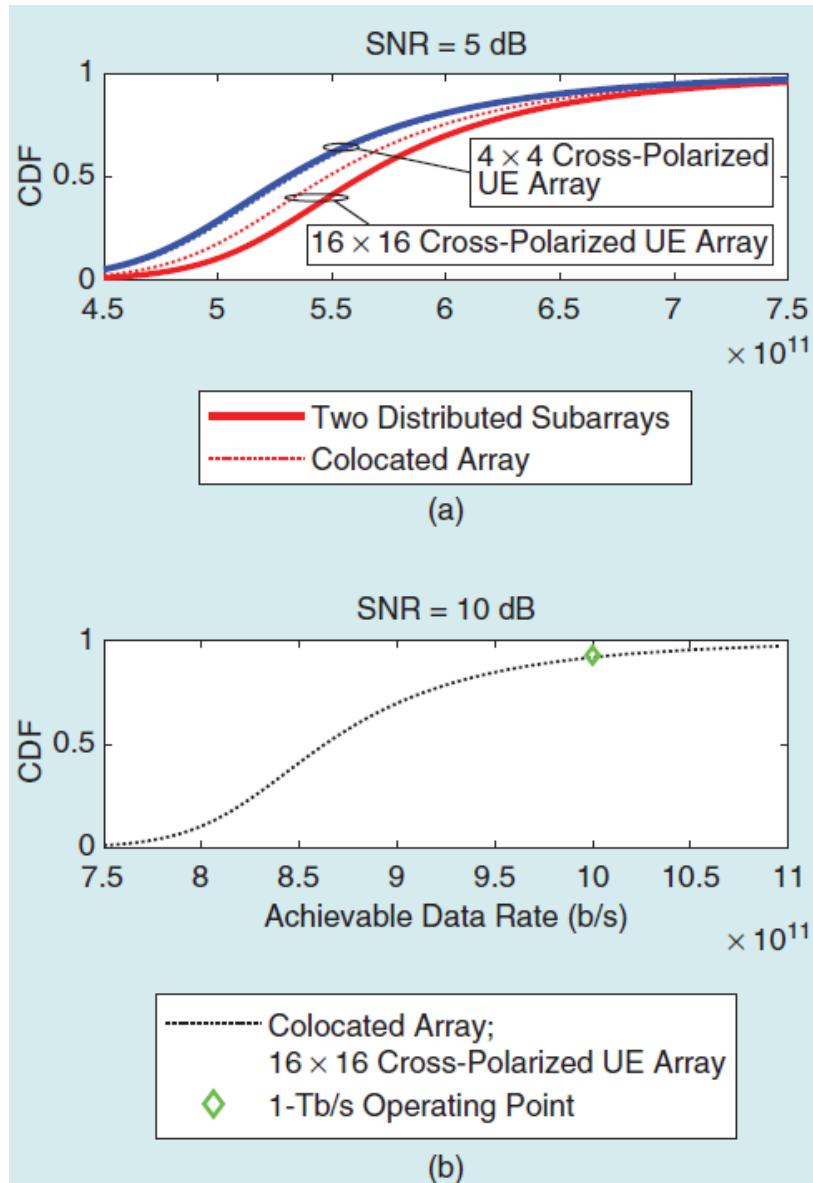
Για να αξιολογηθεί αν είναι εφικτό να επιτευχθούν ρυθμοί terabit/ sec, πραγματοποιείται ένα πείραμα με μια συσκευή χρήστη. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις, [1]: στην πρώτη, διαμορφώνεται ένας συντοπισμένος (co-located) πίνακας υποσυστοιχιών που περιέχει 4.096 στοιχεία σε μια επίπεδη διαμόρφωση 2×2 . Κάθε υποσυστοιχία αποτελείται από τη δομή που απεικονίζεται στην Εικόνα 9 με 32×16 διαπολωτικά στοιχεία. Παράλληλα στην Εικόνα 9 απεικονίζεται και ένας πίνακας $M \times N$ υποσυστοιχιών. Η συντοπισμένη αυτή διάταξη τοποθετείται στην αρχή ενός κυκλικού κελιού με ακτίνα 50 m. Στη δεύτερη περίπτωση, δύο πίνακες κατανέμονται στις απέναντι πλευρές του κελιού, διατηρώντας ίσο αριθμό στοιχείων. Η συσκευή χρήστη χρησιμοποιεί είτε μια διαπολωτική διάταξη 4×4 ή 16×16 με επίπεδο τρόπο. Τα κανάλια διάδοσης δημιουργήθηκαν για συχνότητες 140–150GHz, καθώς δεν υπάρχουν πλήρως καθιερωμένα μοντέλα καναλιών άνω των 150GHz, [5].



Εικόνα 9: Παράδειγμα μιας massive συστοιχίας MIMO, που αποτελείται από υποπίνακες $M \times N$, όπου κάθε υποπίνακας έχει 32×16 διαπολωτικά στοιχεία, [5].

Η Εικόνα 10(a) προβλέπει τις αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής (Cumulative Distribution Functions – CDFs) ρυθμού δεδομένων και για τις δύο περιπτώσεις και τους πίνακες εξοπλισμού χρήστη (User Equipment – UE) με λόγο σήματος προς θόρυβο

(Signal to Noise Ratio – SNR) ίσο με 5dB. Μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής: 1) Λόγω της αύξησης της κατάταξης (rank), οι κατανομημένες υποσυστοιχίες αποδίδουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε σχέση με τον συντοπισμένο πίνακα. 2) Η αύξηση του μεγέθους της διάταξης UE οδηγεί σε μεγαλύτερη διαφορά ρυθμού μεταξύ κατανομημένων και συντοπισμένων αναπτύξεων. 3) Ανεξάρτητα από την περίπτωση, για το CDF > 0,85, παρατηρήθηκε μικρότερη διαφορά στην απόδοση λόγω της ομοιότητας των καναλιών υψηλού SNR. Η Εικόνα 10(b) δείχνει την συντοπισμένη απόδοση με μια διάταξη 16 x 16 UE με SNR = 10dB, όπου το σημείο λειτουργίας 1-Tb/s απεικονίζεται με τη CDF = 0,95.



Εικόνα 10: CDF για ρυθμό δεδομένων ultra massive MIMO ενός χρήστη με 4.096 κεραίες σταθμούς βάσης σε τέσσερις συστοιχίες που εξυπηρετούν ένα UE με 16 κεραίες σε εύρος ζώνης 10GHz.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορεί κανείς εύκολα να αμφισβητήσει πώς μπορούν να επιτευχθούν στην πράξη τόσο υψηλοί ρυθμοί δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τους προαναφερθέντες περιορισμούς πομποδεκτών. Επιπλέον, ανακύπτει το ερώτημα του πώς θα κλιμακωθούν τα κέρδη για συστήματα πολλαπλών χρηστών. Αυτά είναι σημαντικά ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν—δυσνητικά με χρήση λύσεων που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη αντί για ντετερμινιστικές προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλα. Οι Hoydis et al., [23], επισήμαναν τις προκλήσεις στην ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης σε ένα υποσύνολο λειτουργιών

πομποδέκτη, όπως π.χ. την εκτίμηση καναλιού, την αποχαρτογράφηση συμβόλων και/ή εξισορρόπηση δέκτη. Ωστόσο, ακόμα κι αν τα στοιχεία που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη είναι μικρά, μπορεί να χρειαστεί να ξεπεραστούν αρκετά σημαντικά προβλήματα, όπως οι ενημερώσεις μοντέλου και η επεξήγηση δεδομένων, χρησιμοποιώντας πλήρως ενσωματωμένους επιταχυντές υλικού στη ροή επεξεργασίας του πομποδέκτη για τη διαχείριση των υπολογιστικών φόρτου.

4.5 Κατανόηση και επίτευξη των καθυστερήσεων σε επίπεδο υπο-millisecond

Η σημασία των χαμηλών καθυστερήσεων έχει τονιστεί με την εισαγωγή των Εξαιρετικά Αξιόπιστων Επικοινωνιών Χαμηλών Καθυστερήσεων (Ultra-Reliable Low-Latency Communications – URLLC) στο 5G. Ο Πίνακας 1 δείχνει τους σημαντικούς δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) καθυστερήσεων για το 6G. Στην παρούσα υποενότητα, ο τελικός μας στόχος είναι η διαπίστωση αν το 6G μπορεί να επιτρέψει κάτι επαναστατικό: ένα Διαδίκτυο πραγματικά χαμηλών καθυστερήσεων που να λειτουργεί σε όλο τον κόσμο, όχι μόνο τοπικά.

Έχουν μελετηθεί οι καθυστερήσεις τόσο στο δίκτυο PHY όσο και στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης, και στο 5G και τώρα στο 6G. Ωστόσο, δεν έχουν ληφθεί υπόψη για την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων παγκοσμίως, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για ένα δίκτυο με εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις! Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, οι συνολικές καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο καθορίζονται από, [5]:

- το δίκτυο μεταφορών
- δυνατότητες edge-cloud
- εφαρμογές χρήστη.

Πράγματι, το 6G δίνει τη δυνατότητα για μια συστηματική επανεξέταση της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής και για μια αφαίρεση παλαιών μοτίβων, όπως το δίκτυο μεταφοράς. Η διατήρηση του παραδοσιακού δικτύου μεταφοράς δεν επιτρέπει εφαρμογές με εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις, όπως η επταξημένη πραγματικότητα. Δεδομένου ότι το Διαδίκτυο έχει εξελιχθεί ως προς τη χωρητικότητα στη μεταφορά, το 6G μπορεί να μισθώσει τη διαθέσιμη ίνα μεταφοράς, να εικονικοποιήσει όλες τις λειτουργίες του βασικού δικτύου και να επικεντρωθεί στο σχεδιασμό της διεπαφής του δικτύου ραδιοπρόσβασης και αέρα. Για παράδειγμα, η δημιουργία αξιόπιστων σημείων διάσπασης (breakout points) κοντά στο RAN και η εξοικονόμηση ινών μεταφοράς 2 x 500km αποφέρει κέρδος σε καθυστερήσεις μεγαλύτερη από 3 ms.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των καθυστερήσεων από άκρο σε άκρο είναι ο σχεδιασμός του σύννεφου στο άκρο. Πράγματι, το σύννεφο στα άκρα θα είναι ζωτικής σημασίας για την ενεργοποίηση ενός πραγματικού Διαδικτύου με εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις υπερβαίνοντας τα θεμελιώδη όρια που επιβάλλει η ταχύτητα του φωτός. Για παράδειγμα, η σύνδεση οπτικών ινών μεταξύ Λονδίνου και Λος Άντζελες επιβάλλει καθυστέρηση μεγαλύτερη από 40 ms. Οι εφαρμογές που απαιτούν καθυστερήσεις πολύ χαμηλότερες από αυτές θα απαιτούν ειδική τροφοδοσία μέσω προγνωστικής τεχνητής νοημοσύνης, [23]. Το 6G θα χρειαστεί επομένως να μεταβεί από συστήματα τηλεπαρουσίας που με μοντέλα σε συστήματα τηλεπαρουσίας με τεχνητή νοημοσύνη. Τα πρώτα είναι γνωστό ότι σταθεροποιούν ζεύξεις με διαφορά καθυστέρησης 120ms, τα τελευταία επιτυγχάνουν την ίδια σταθερότητα και μπορούν να προσαρμοστούν στη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης, [23].

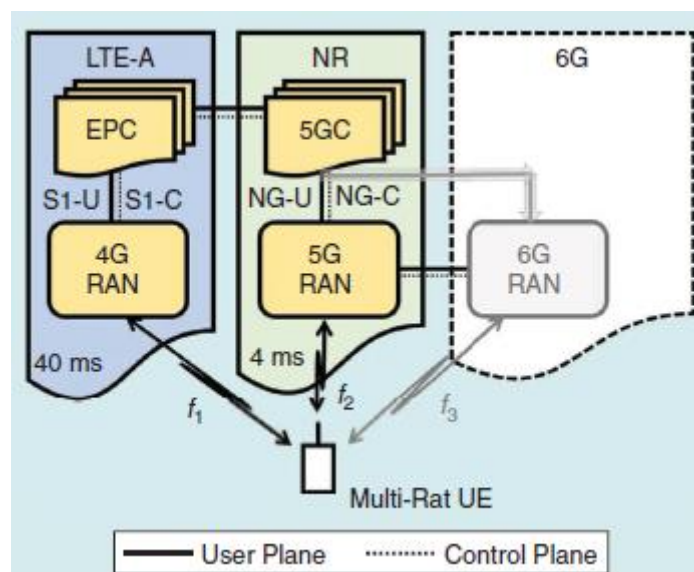
Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, είναι ότι οι εφαρμογές πρέπει να είναι προσανατολισμένες προς τη λειτουργία εξαιρετικά χαμηλών καθυστερήσεων. Για παράδειγμα, οι βρόχοι ελέγχου, τα βασικά στοιχεία κυβερνοασφάλειας και οι αλγόριθμοι συμπίεσης βίντεο/ήχου πρέπει να προσαρμόζονται σε χαμηλές καθυστερήσεις. Εδώ, οι

νέες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό εφαρμογών θα είναι κρίσιμης σημασίας. Για παράδειγμα, η τρέχουσα καθυστέρηση του κωδικοποιητή βίντεο που είναι άνω των 60ms θα πρέπει να μειωθεί σχεδόν στο μηδέν, αν πρόκειται να επιτευχθούν καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο 6G σε όλο τον κόσμο. Το 5G είναι σε θέση να επιτύχει καθυστέρηση χιλιοστών του δευτερολέπτου περιορισμένα σε μια μονάδα παραγωγής αλλά όχι σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Με τις προηγούμενες προτεινόμενες αλλαγές σχεδιασμού, το 6G θα είναι σε θέση να προσφέρει καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο σε τάξη χιλιοστού του δευτερολέπτου παγκοσμίως. Πράγματι, μια σύνδεση πολυμέσων μεταξύ ηπείρων με συστήματα τηλεπαρουσίας με τεχνητή νοημοσύνη και ένα βελτιστοποιημένο επίπεδο εφαρμογής μειώνει μια τυπική καθυστέρηση >100ms σε σχεδόν μηδέν, επιτρέποντας έτσι πρωτοπόρες εφαρμογές, [1].

4.6 Κατάρριψη των εμποδίων συμβατότητας προς τα πίσω

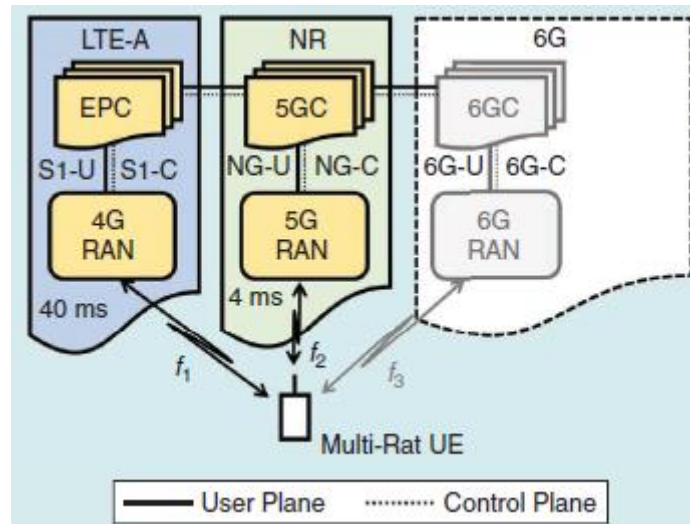
Όταν αναπτυχθούν τα συστήματα 6G, θα συνυπάρχουν με συστήματα 5G και 4G. Για μια απρόσκοπτη εμπειρία εξοπλισμού χρήστη (User Equipment), η συμβατότητα προς τα πίσω με συστήματα προηγούμενης γενιάς θα είναι απαραίτητη. Στην παρούσα υποενότητα παρέχονται παραδείγματα απαιτήσεων συμβατότητας προς τα πίσω και αναλύεται πώς μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτά συστήματα 6G.

Για να αξιολογηθεί η συμβατότητα προς τα πίσω, πρέπει να εξεταστεί πώς διασυνδέονται τα δίκτυα κορμού 5G και 6G (5G Core – 5GC και 6G Core – 6GC). Ωστόσο, δεν υπάρχει τρέχουσα τυποποίηση του πυρήνα 6G στο 3GPP. Υποθέτοντας ότι θα υπάρχουν διαθέσιμες συσκευές χρήστη τεχνολογίας πρόσβασης πολλαπλού ραδιοφώνου (Radio Access Technology – RAT) και υιοθετηθούν τις αρχές της βελτιωμένης καθολικής επίγειας πρόσβασης νέας ραδιοδιπλής συνδεσιμότητας (Enhanced Universal Terrestrial Radio Access New Radio Dual Connectivity – ENDC), το 6G θα μπορούσε να εισαχθεί αρχικά ως ένα μη αυτόνομο σύστημα (Non-Standalone – NSA), παρόμοιο με τις τρέχουσες υλοποιήσεις 5G. Στη συνέχεια, ένας σταθμός βάσης 6G θα μπορεί να λειτουργήσει ως δευτερεύουσα κυψέλη σε μια κύρια κυψέλη 5G-New Radio, όπου μια κλήση 6G θα είναι αγκυρωμένη, με την κυκλοφορία δεδομένων επιπέδου χρήστη να ακολουθεί μια προσέγγιση διαχωρισμού στο επίπεδο πρωτοκόλλου σύγκλισης δεδομένων πακέτων. Αυτή η αρχιτεκτονική απεικονίζεται στην Εικόνα 11, [5].



Εικόνα 11: Μια πιθανή αρχιτεκτονική συστήματος 6G σε μια μη αυτόνομη διαμόρφωση που συνυπάρχει με συστήματα 4G και 5G – NR.

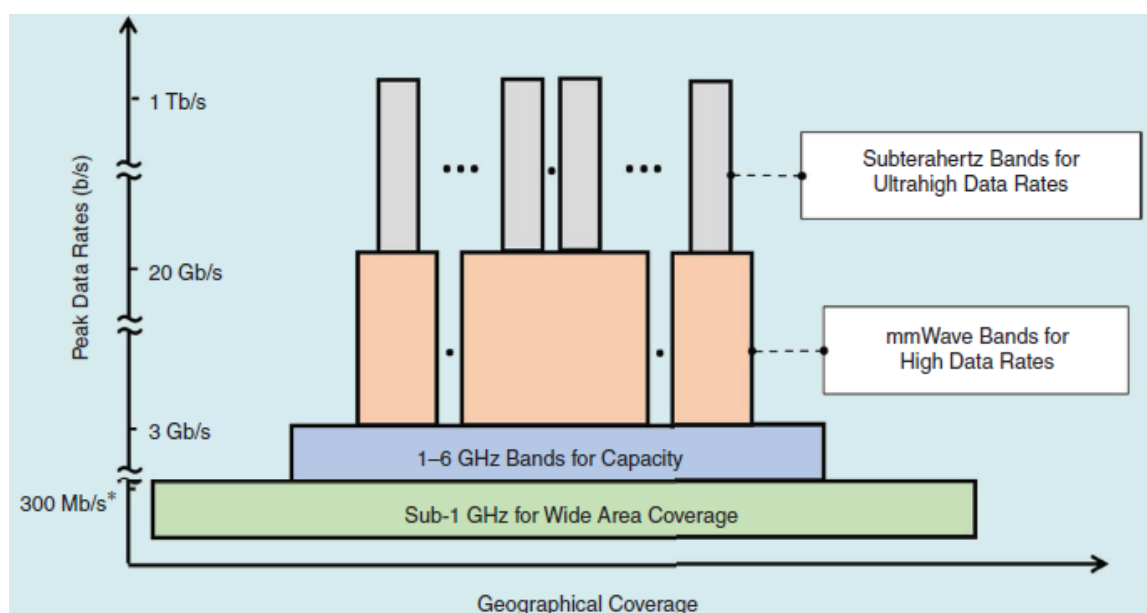
Μια κλήση 6G εκτός της περιοχής κάλυψης 6G θα παραμείνει αγκυρωμένη σε μια κύρια κυψέλη 5G και θα εξυπηρετείται από την κυψέλη 5G. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να καθοριστούν οι διεπαφές μεταξύ των δικτύων ραδιοπρόσβασης 5G και 6G και οι διεπαφές μεταξύ του δικτύου ραδιοπρόσβασης 6G και του δικτύου κορμού 5G, κάτι που αποτελεί μεγάλη πρόκληση στο κομμάτι της τυποποίησης. Εναλλακτικά, το 6G θα μπορούσε να εισαχθεί ως αυτόνομο σύστημα (Stand – Alone – SA), στην οποία περίπτωση μια κλήση 6G θα είναι αγκυρωμένη στο σταθμό βάσης 6G και η συνέχεια της κλήσης, στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάλυψη 6G, γίνεται μέσω συνδεσιμότητας μεταξύ του 5GC και του 6GC. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 12, [5].



Εικόνα 12: Μια πιθανή αρχιτεκτονική συστήματος 6G σε αυτόνομη διαμόρφωση που συνυπάρχει με συστήματα 4G και 5G.

Εδώ, και πάλι, οι διεπαφές επιπέδου χρήστη και επιπέδου ελέγχου μεταξύ των δικτύων κορμού 5G και 6G δεν έχουν ακόμη καθοριστεί. Ανεξάρτητα από την προσέγγιση, μια πολύ στενή συνεργασία και συμβατότητα προς τα πίσω με συστήματα προηγούμενης γενιάς θα αποτελέσει το θεμέλιο του 6G.

Όσον αφορά το φυσικό επίπεδο, ο αντίκτυπος της προς τα πίσω συμβατότητας στην επιλογή της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) με κλιμακούμενες αριθμολογίες αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτό θα είναι μια βασική πτυχή εάν το φάσμα μπορεί να μετατραπεί εν μέρει σε 6G για να καταστεί δυνατή η συνύπαρξή τους, [5].



Εικόνα 13: Λειτουργία 6G σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών/ περιοχών συχνοτήτων που ξεκινούν από συχνότητες χαμηλότερες του 1 GHz έως τάξη συχνοτήτων υπο-terahertz.

Η Εικόνα 13 απεικονίζει τον ρόλο ενός ευρέος φάσματος ζωνών συχνοτήτων για το 6G, από συχνότητες χαμηλότερες του 1GHz έως τάξη συχνοτήτων υπο-terahertz. Ενώ οι χαμηλότερες ζώνες είναι φυσικά κατάλληλες για την παροχή πανταχού κάλυψης, οι υψηλότερες ζώνες θα υπάρχουν σε υψηλά εντοπισμένες περιοχές διαφορετικής γεωγραφικής έκτασης για να παρέχουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων για ορισμένες υπηρεσίες 6G. Ο Πίνακας 2 παραθέτει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός ευρέος φάσματος κυματομορφών ενός φορέα και πολλαπλών φορέων και συσχετίζει τους διαφορετικούς τύπους κυματομορφών με την καταλληλότητά τους για συμβατότητα προς τα πίσω από 6G σε 5G και 4G, αντίστοιχα.

Πίνακας 2: Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διάφορων κυματομορφών διεπαφής αέρα για ασύρματα συστήματα 6G, [5].

Κυματομορφές πολλαπλών φορέων			
Τύπος Κυματομορφής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Συμβατότητα προς τα Πίσω
CP-OFDM	- Απλούστερη εξισορρόπηση συχνότητας - Ευέλικτη εκχώρηση συχνότητας - Χαμηλότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης - Απλούστερη ενσωμάτωση MIMO	- Υψηλό PAPR και OOB - Δύσκολα κωδικοποιημένο CP - Κακή απόδοση σε υψηλή κινητικότητα - Αυστηρότερα όρια συγχρονισμού	Ναι
W-OFDM	- Χαμηλότερο OOB - Χαμηλότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης	- Χαμηλή φασματική απόδοση - Κακός ρυθμός σφαλμάτων (ανάλογα με τον τύπο παραθύρου)	Όχι
Ο QAM-FBMC	- Βέλτιστος εντοπισμός συχνότητας - Υψηλή φασματική απόδοση - Κατάλληλο για ασύγχρονη μετάδοση - Κατάλληλο για περιπτώσεις χρήσης	- Πιλοτική σχεδίαση με προκλήσεις - Όχι ανθεκτικότητα στο ISI - Υψηλή πολυπλοκότητα	Όχι

	υψηλής κινητικότητας	υλοποίησης	
		Υψηλή κατανάλωση ενέργειας	
F-OFDM	- Ευέλικτη ευαισθησία φιλτραρίσματος - Καλύτερος εντοπισμός συχνότητας - Μικρότερο μήκος φίλτρου - Συμβατό με MIMO	Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης	Όχι
GFDM	- Μειωμένο κατά μέσο όρο PAPR - Εντοπισμός ανώτερης συχνότητας - Ευέλικτη σχεδίαση	- Υψηλότερη καθυστέρηση λόγω επεξεργασίας μπλοκ - Δύσκολη ενσωμάτωση MIMO - Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης	Όχι
UFMC	- Καλά εντοπισμένο φιλτράρισμα - Μικρότερο μήκος σε σχέση με το μέγεθος του δευτερεύοντος φορέα - Συμβατότητα MIMO	- Καμία ανοσία στο ISI - Υψηλή πολυπλοκότητα δέκτη	Όχι
OTFS	- Δυνατότητα χειρισμού καναλιών υψηλής συχνότητας Doppler - Εκμετάλλευση διασποράς συχνότητας για διαφορετικότητα - Αποτελεσματική πολυπλεξία συσκευής χρήστη	- Υψηλότερη πολυπλοκότητα υλοποίησης - Μη βέλτιστες αρχιτεκτονικές εξισορρόπησης	Όχι
Κυματομορφές μονού φορέα			
CP-DFT-s-OFDM	- Όλα τα πλεονεκτήματα του CP-OFDM - Χαμηλό PAPR	- Υψηλό OOBΕ - Δύσκολα κωδικοποιημένο CP	Ναι (για την ανερχόμενη)

		Αυστηρά συγχρονισμένες απαιτήσεις	ζεύξη)
ZT-DFT-s-OFDM	- Ευέλικτο διάστημα (εύρος) προστασίας - Υψηλότερη φασματική απόδοση - Χαμηλότερο OOBΕ σε σύγκριση με το CP-DFT-s-OFDM	- Πρόσθετη σηματοδότηση ελέγχου - Περιορισμένη απόδοση ζεύξης (για διαμόρφωση υψηλότερης τάξης)	Όχι
UW-DFT-s-OFDM	- Βέλτιστη φασματική απόδοση - Χαμηλότερο OOBΕ και PAPR	- Όλα τα μειονεκτήματα του ZT-DFT-s-OFDM - Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης	

Σημείωση τα ακρωνύμια του πίνακα είναι τα ακόλουθα:

- MIMO: multiple-input, multiple-output
- PAPR: peak-to-average power ratio
- OOBΕ: out-of-band emission
- CP: cyclic prefix
- ISI: intersymbol interference
- W-OFDM: wide-band OFDM
- QAM-FBMC: offset quadrature amplitude modulation-filter bank multicarrier
- F-OFDM: filtered OFDM
- GFDM: generalized frequency-division multiplexing
- UFMF: universal filtered multicarrier
- OTFS: orthogonal time–frequency space
- CP-DFT-s-OFDM: cyclic prefix discrete Fourier transform spread OFDM
- ZT-DFT-s-OFDM: zero-tail discrete Fourier transform spread OFDM
- UW-DFT-s-OFDM: unique-word discrete Fourier transform spread OFDM
- CA: carrier aggregation.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναμφίβολα το 6G θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη και θα επιτρέψει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες που διαφορετικά δεν θα ήταν δυνατές με το 5G και τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Η τεχνολογία θα είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο προς το metaverse. Υπόσχεται να φέρει τη νοημοσύνη κοντά στον τελικό χρήστη, ενώ χτίζει γέφυρες μεταξύ φυσικών και εικονικών χώρων για τη δημιουργία νέων περιπτώσεων χρήσης, επιτρέποντας παράλληλα στον κλάδο να βελτιστοποιήσει καλύτερα τις λειτουργίες του και τον επιχειρηματικό σχεδιασμό μελλοντικών προϊόντων και υπηρεσιών.

Για να υλοποιηθεί αυτό το όραμα, το 6G θα πρέπει να θέσει τα θεμέλια για πολλές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων υπολογιστών, της τεχνητής νοημοσύνης και τηλεπικοινωνιών, ώστε να ενωθούν και να οδηγήσουν σε δομικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζεται η κινητή υποδομή. Το 6G θα πρέπει να φέρει νέα αρχιτεκτονικά πρότυπα διαφορετικά από το πώς σχεδιάστηκαν και σχεδιάστηκαν οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας προηγούμενων γενιών. Αυτές οι γενιές δικτύων, συμπεριλαμβανομένου του 5G, έχουν επικεντρωθεί μέχρι στιγμής στις λειτουργίες των κυψελωτών τηλεπικοινωνιών ως βασικά δομικά στοιχεία, ενώ άλλες τεχνολογίες πρόσβασης, όπως τα μη επίγεια δίκτυα, οι τεχνολογίες υπολογιστών ή η τεχνητή νοημοσύνη, αντιμετωπίζονται ως πρόσθετα χαρακτηριστικά που δεν είναι απαραίτητα στην κατασκευή της υποδομής. Αντίθετα, η υποδομή 6G θα πρέπει να παρέχει εγγενώς ολιστικές και ολοκληρωμένες λύσεις σε κρίσιμες αδυναμίες που αντιμετωπίζει ο κλάδος και να υλοποιεί την πλήρη υπόσχεση του ψηφιακού μετασχηματισμού της βιομηχανίας και της δημιουργίας προς το metaverse. Αυτές οι λύσεις θα πρέπει να βασίζονται στους τρεις πυλώνες σύγκλισης: τεχνολογίες υπολογισμού και τηλεπικοινωνιών, και ψηφιακών και φυσικών χώρων για το όραμα 6G.

Ωστόσο, για να υλοποιηθεί αυτό το όραμα, πρέπει να λάβει χώρα ένας σημαντικός αριθμός νέων καινοτομιών στους τομείς της ασφάλειας, της ενορχήστρωσης από άκρο σε άκρο, της αυτοματοποίησης και πολλών άλλων τεχνικών τομέων. Επιπλέον, η αλυσίδα εφοδιασμού 6G πρέπει να διατηρήσει την παγκόσμια κατάστασή της και να παραμείνει απαλλαγμένη από γεωπολιτικές επιρροές για να επιτρέψει στο 6G να επιταχύνει και να δημιουργήσει ένα κρίσιμο πλήθος περιπτώσεων επιχειρηματικής χρήσης. Τα δίκτυα 6G θα αγκαλιάσουν νέες ζώνες φάσματος, συνδυάζοντας τις εξελίξεις σε όλο το δίκτυο, από το σχεδιασμό κυκλωμάτων και κεραιών έως την αρχιτεκτονική δικτύου, τα πρωτόκολλα και την τεχνητή νοημοσύνη. Επισημάνθηκαν μια σειρά από ζητήματα στα συστήματα επικοινωνίας 6G, τα οποία ελπίζουμε ότι θα συμβάλουν στη μελλοντική ανάπτυξη. Παρατηρήθηκε ότι τα δίκτυα 6G χαρακτηρίζονται από ευελιξία και ότι ο σχεδιασμός τους αποτελεί μια πολύ οργανωμένη επιστημονική αρένα. Επίσης, η πραγματοποίηση ρυθμών δεδομένων terabit/ δευτερόλεπτο απαιτεί μεγάλα εύρη ζώνης. Με βάση την εμπειρία 5G, τα μέγιστα εύρη ζώνης φορέα περιορίζονται στα 400MHz. Αυτό οδηγεί στη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού φορέων για τη δημιουργία υψηλότερου συνολικού εύρους ζώνης. Η κατασκευή ραδιοφώνων και σχετιζόμενων κυκλωμάτων ραδιοσυχνοτήτων σε ζώνες υπο-terahertz παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις. Επομένως, η εύρεση της σωστής ισορροπίας μεταξύ της απόδοσης/ ενσωμάτωσης του πομποδέκτη, της συσκευασίας και του κόστους είναι ένα βασικό ζήτημα. Υποθέτοντας ότι μπορούν να κατασκευαστούν πομποδέκτες, η επίτευξη ρυθμών terabit/ second θα απαιτήσει μεγάλες συστοιχίες κεραιών. Οι ευαίσθητες στον χρόνο επικοινωνίες χρειάζονται καθυστερήσεις κάτω του millisecond. Μια προσέγγιση για την επίτευξη χαμηλών καθυστερήσεων είναι η εκμετάλλευση των συνεισφορών από τη διεπαφή αέρα, το δίκτυο ραδιοπρόσβασης και τα δίκτυα μεταφορών. Από τεχνικής πλευράς, ο κλάδος προετοιμάζεται για να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις, με

υπερκλιμάκωση, προμηθευτές υποδομών, τηλεπικοινωνιακούς φορείς και παρόχους περιεχομένου να ευθυγραμμίζονται προς τις δυνατότητες δικτύων 5G και 6G. Αυτή η ευθυγράμμιση θα απεικονίσει περαιτέρω τις δυνατότητες του 6G και μέχρι να είναι έτοιμο το πρότυπο 6G, η αγορά θα έχει ωριμάσει για αρκετές περιπτώσεις χρήσης που θα εμπορευματοποιηθούν.

Τα σημάδια μιας τέτοιας ευθυγράμμισης αντικατοπτρίζονται ήδη στην εξέλιξη των προτύπων 5G, τα οποία θα χαρακτηρίζουν όλο και περισσότερο το 6G ως το δίκτυο δικτύων και το θεμέλιο για τη σύγκλιση πολλών τεχνολογιών. Για παράδειγμα, πολλά δίκτυα πρόσβασης επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων των δορυφορικών και άλλων μη επίγειων τεχνολογιών, Wi-Fi και άλλων μη δημόσιας πρόσβασης δικτύων θα υποστηρίζονται όλο και περισσότερο σε μελλοντικές εκδόσεις 5G. Επίσης, οι προδιαγραφές 5G επόμενης γενιάς θα μπορούν να φιλοξενήσουν πολλές λειτουργίες τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστών για να επιτρέψουν στους πόρους του δικτύου να αυτοματοποιηθούν και να βελτιστοποιηθούν περισσότερο. Οι μελλοντικές εκδόσεις 5G θα είναι επίσης σε θέση να παρέχουν περισσότερη υποστήριξη σε υπηρεσίες και εμπειρίες επαυξημένης και εκτεταμένης πραγματικότητας, κάτι που θα μας φέρει ένα βήμα πιο κοντά στο όραμα του metaverse, [24].

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Advanced Video Analytics	Προηγμένα Αναλυτικά Στοιχεία Βίντεο
Aggregating Carrier	Συγκεντρωτικός Φορέας
Artificial Intelligence	Τεχνητή Νοημοσύνη
Automated Ground Vehicles	Αυτοματοποιημένα Οχήματα Εδάφους
Awareness	Ευαισθητοποίηση
Base Station	Σταθμός Βάσης
Brain Computer Interaction	Αλληλεπίδραση Εγκεφάλου Υπολογιστή
Breakout Point	Σημείο Διάσπασης
Circuit Switch	Μεταγωγή Κυκλώματος
Close Proximity Services	Υπηρεσίες Μικρών Αποστάσεων
Cloud Radio Access Network	Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης Σύννεφου
Code Division Multiple Access	Πολυπλεξία Διαίρεσης Κώδικα
Cohesive Network	Συνεκτικό Δίκτυο
Component Carriers	Φορείς Συστατικών
Cumulative Distribution Functions	Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής
Deep Connectivity	Βαθιά Συνδεσιμότητα
Deep Data Mining	Βαθιά Εξόρυξη Δεδομένων
Deep Learning	Βαθιά Μάθηση
Deep Mind	Βαθιά Λογική
Deep Sensing	Βαθιά Ανίχνευση
Delay jitter	Διακύμανση καθυστέρησης
Distributed Antenna System	Κατανεμημένο Σύστημα Κεραιών
Distribution Management	Διαχείριση Διανομής
Dynamic Ad-hoc Wireless Network	Δυναμικό Ad-hoc Ασύρματο Δίκτυο
Edge Computing	Υπολογισμός στα Άκρα
End to End Services	Υπηρεσίες Από Άκρο σε Άκρο
Enhanced Mobile Broadband	Ενισχυμένες Ευρυζωνικές Επικοινωνίες Κινητής Τηλεφωνίας
Enhanced Universal Terrestrial Radio Access New Radio Dual Connectivity	Βελτιωμένη Καθολική Επίγεια Πρόσβαση Νέας Ραδιοδιπλής Συνδεσιμότητας
Extended Reality	Εκτεταμένη Πραγματικότητα
Fixed Wireless Access	Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση
Frequency Division Multiplexing	Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
Fully Depleted Silicon-On-Insulator Device	Συσκευή Πλήρους Κένωσης Πυριτίου
Future Railway Mobile Communication System	Σύστημα Μελλοντικής Σιδηροδρομικής Κινητής Επικοινωνίας
Gain	Κέρδος
Global Navigation Satellite Systems	Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης
Global Positioning System	Παγκόσμια Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
Group of Baseband Units	Ομάδα Μονάδων Βασικής Ζώνης
Holographic Connectivity	Ολογραφική Συνδεσιμότητα
Industrial Internet of Things	Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Information and Communication Technology	Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών
Input and Output Per Second	Είσοδος και Έξοδος Ανά Δευτερόλεπτο
Integrated Circuit	Ενσωματωμένο Κύκλωμα
Intelligent Connectivity	Ευφυής Συνδεσιμότητα

International Telecommunications Union Radiocommunications Sector	Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών Ένωσης Διεθνών Επικοινωνιών
Internet of Everything	Διαδίκτυο των Πάντων
Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Large Area Synchronized Code Division Multiple Access	Συγχρονισμένη Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα Ευρείας Ζώνης
Local Oscillator	Τοπικός Ταλαντωτής
Low Density Parity Control	Έλεγχος Ισοτιμίας Χαμηλής Πυκνότητας
Low-Noise Amplifier	Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου
Machine Learning	Μηχανική Μάθηση
Massive Machine Type Communications	Επικοινωνίες Τύπου Μαζικής Μηχανής
Millimeter-Wave	Κύματα Χιλιοστού
Mind to Mind Communication	Επικοινωνία μέσω Μυαλού
Multi-Carrier Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα με Πολλές Φέρουσες
Multiple Input Multiple Output	Πολλαπλοί Είσοδοι Πολλαπλές Έξοδοι
Network Function Verification	Επαλήθευση Λειτουργικότητας Δικτύου
Network Local Multipoint Distribution System	Τοπικό Πολυσημειακό Σύστημα Διανομής
Network Slicing	Τεμαχισμός Δικτύου
New Radio	Νέο Ραδιο
Non Terrestrial Networks	Μη Επίγεια Δίκτυα
Non-Standalone	Μη Αυτόνομο
Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογώνια Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνοτήτων
Orthogonal Multiple Access	Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση
Packet Switch	Μεταγωγή Πακέτων
Planar Multimedia	Επίπεδα Πολυμέσα
Power Amplifier	Ενισχυτής Ισχύος
Radio Access Network	Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης
RadioFrequency	Ραδιοσυχνότητα
Rank	Κατάταξη
Reconfigurable Intelligent Surfaces	Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες
Remote Radio Header	Απομακρυσμένος Ραδιοφωνικός Πομποδέκτης
Resource as a Service	Πόροι ως Υπηρεσία
Signal to Noise Ratio	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
Small Data Transmission	Μετάδοση Μικρών Δεδομένων
Software Defined Network	Δικτύωση Βασισμένη στο Λογισμικό
Tactile Internet	Απτικό Διαδίκτυο
Telepathy	Τηλεπάθεια
Terrestrial Space Integrated Network	Επίγειο Διαστημικό Ολοκληρωμένο Δίκτυο
Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Χρόνου
Time Sensitive Communication	Επικοινωνία Ευαίσθητη στο Χρόνο
Time Synchronization as a Service	Συγχρονισμός Χρόνου ως Υπηρεσία
Ubiquitous Computing	Πανταχού παρών Υπολογισμός
Ubiquitous Connectivity	Πανταχού Παρούσα Συνδεσιμότητα
Ultra-Reliable Low-Latency Communications	Εξαιρετικά Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλών Καθυστερήσεων
Universal Time Coordinated	Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα

Unmanned Aerial Vehicles	Μη επανδρωμένα Αέρια Οχήματα
Uplink	Ανερχόμενη Ζεύξη
User Equipment	Εξοπλισμός Χρήστη
User Equipment to User Equipment	Συσκευή σε Συσκευή
Vertical Industry	Κάθετη Βιομηχανία
Verticals	Κάθετος τομέας
Virtual Reality	Εικονική Πραγματικότητα
World Wide Wireless Web	Παγκόσμιο Ασύρματο Δικτύου

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

5GC	5G Core
6GC	6G Core
AGVs	Automated Ground Vehicles
AI	Artificial Intelligence
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
BCI	Brain Computer Interaction
BS	Base Station
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CRAN	Cloud Radio Access Network
DAS	Distributed Antenna System
DAWN	Dynamic Ad-hoc Wireless Network
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
ENDC	Enhanced Universal Terrestrial Radio Access New Radio Dual Connectivity
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FD-SOI	Fully Depleted Silicon-On-Insulator
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
FWA	Fixed Wireless Access
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
IC	Integrated Circuit
ICT	Information and Communication Technology
IIoT	Industrial Internet of Things
IoE	Internet of Everything
IOPS	Input and Output Per Second
IoT	Internet of Things
ITU-R	International Telecommunications Union Radiocommunications Sector
LAS-CDMA	Large Area Synchronized Code Division Multiple Access
LDPC	Low Density Parity Control
LNA	Low-Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
M2M	Machine to Machine
MC-CDMA	Multi-Carrier Code Division Multiple Access
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
MMIC	Monolithic Microwave IC
mMTC	Massive Machine Type Communications
Network LMDS	Network Local Multipoint Distribution System
NFV	Network Function Verification
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMA	Orthogonal Multiple Access
PA	Power Amplifier

PIC	Photonic IC
RaaS	Resource as a Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RF	RadioFrequency
RISs	Reconfigurable Intelligent Surfaces
RRH	Remote Radio Header
RSA	Rivest-Shamir-Adleman
SA	Stand – Alone
SDN	Software Defined Network
SDT	Small Data Transmission
SNR	Signal to Noise Ratio
STIN	Terrestrial Space Integrated Network
TDMA	Time Division Multiple Access
TSC	Time Sensitive Communication
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
UE	User Equipment
UE-to-UE	User Equipment to User Equipment
UM-MIMO	Ultra Massive MIMO
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
UTC	Universal Time Coordinated
UTC-PD	Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWW	World Wide Wireless Web
XR	eXtended Reality
NTN	Non Terrestrial Networks
ΤΠΕ	Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] H. Tataria, M. Shafi, M. Dohler and S. Sun, "Six Critical Challenges for 6G Wireless Systems: A Summary and Some Solutions," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 16-26, March 2022, doi: 10.1109/MVT.2021.3136506.
- [2] N. Faiza, I. Jawwad, A. A. Muhammad, J. Maida, K. Sabila and P. Tamseela, "A Review of Vision and Challenges of 6G Technology", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 11(2), 2020.
- [3] A.I. Salameh, M. El. Tarhuni, "From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications", *Future Internet* 2022, 14, 117.
- [4] S.K. Pattnaik, S.R. Samal, S. Bandopadhyaya, K. Swain, S. Choudhury, J.K. Das, A. Mihovska, V. Poulkov, "Future Wireless Communication Technology towards 6G IoT: An Application-Based Analysis of IoT in Real-Time Location Monitoring of Employees Inside Underground Mines by Using BLE, *Sensors* 2022, 22, 3438.
- [5] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland, and F. Tufvesson, "6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 7, pp. 1166–1199, Jul. 2021.
- [6] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
- [7] "Network 2030 - Representative use cases and key network requirements for network 2030," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-T FG Network 2030, Jun. 2020.
- [8] "Network 2030 architecture framework," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, ITU-T FG Network 2030, Jun. 2020.
- [9] W. Hong et al., "The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications," *IEEE J. Microw.*, vol. 1, no. 1, pp. 101–121, Jan. 2021.
- [10] Wikipedia, 5G: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G> [Προσπελάστηκε στις 5/09/2022]
- [11] Nokia, "5G Advanced": <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/5g-advanced-explained/> [Προσπελάστηκε στις 6/09/2022]
- [12] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao & S. Li, "6g wireless communications: Vision and potential techniques", *IEEE Network*, 33(4), 70-75, 2019.
- [13] D. Kalbande, S. Haji & R. Haji, "6G-Next Gen Mobile Wireless Communication Approach", In *IEEE 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)* (pp. 1-6).
- [14] Y. Al-Eryani & E. Hossain, "The D-OMA Method for Massive Multiple Access in 6G: Performance, Security, and Challenges", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 92-99, Sept. 2019.
- [15] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957-975, 2020.
- [16] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, & M.S. & Alouini, "From a Human-Centric Perspective: What Might 6G Be?", *Networking and Internet Architecture*, arXiv, 2019.
- [17] E. Calvanese Strinati et al., "6G: The Next Frontier: From Holographic Messaging to Artificial Intelligence Using Subterahertz and Visible Light Communication", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 42-50, Sept. 2019.
- [18] A. A. Zaidi, R. Baldemair, V. Moles-Cases, N. He, K. Werner and A. Cedergren, "OFDM Numerology Design for 5G New Radio to Support IoT, eMBB, and MBSFN", *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 78-83, JUNE 2018.
- [19] W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems", *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May/June 2020.
- [20] K. S. Kim et al., "Ultrareliable and Low-Latency Communication Techniques for Tactile Internet Services", *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 376-393, Feb. 2019.

- [21] K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D. M. Mittleman, "Terahertz integrated electronic and hybrid electronic–photonic systems", *Nature Electron.*, vol. 1, no. 12, pp. 622–635, December 2018.
- [22] J. Tan and L. Dai, "Wideband beam tracking in THz massive MIMO systems", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1693–1710, Jun. 2021.
- [23] J. Hoydis, F. A. Aoudia, A. Valcarce, and H. Viswanathan, "Towards a 6G AI-native air interface", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 5, pp. 76–81, May 2021.
- [24] M. Saadi, " 6G: the network of technology convergence", *ABiresearch*, February 2022.