



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## **Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών 6G με χρήση UAVs/Drones/Cubesats**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Κ. Ντούφας

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών 6G με χρήση UAVs/Drones/Cubesats

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Κ. Ντούφας

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2024.

.....

Α. Παναγόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γ. Φικιώρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Γ. Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....  
Χρήστος Κ. Ντούφας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Κ. Ντούφας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **Περίληψη**

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η λεπτομερής μελέτη των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων 5G και 6G, από πλευράς επιδόσεων (ρυθμοί μετάδοσης, χωρητικότητα, πιθανότητα αποκοπής κ.λπ.), τεχνολογικής ωρίμανσης και τρόπων ενσωμάτωσης στις υπάρχουσες υποδομές των κινητών δικτύων. Αρχικά, στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης εξετάζονται οι προκλήσεις, που θα ανακύψουν για τα υπάρχοντα δίκτυα με την πλήρη ενσωμάτωση του διαδικτύου των πραγμάτων και από το συνεχώς αυξανόμενο πλήθος τελικών χρηστών, που θα απαιτούν πρόσβαση στους πόρους του δικτύου, οδηγώντας το στον κορεσμό. Εν συνεχεία, παρατίθενται οι δυνατότητες των επίγειων και μη επίγειων δικτύων και οι πιθανοί τρόποι ενσωμάτωσής των, στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα, προκειμένου να συμβάλλουν στην αύξηση των επιδόσεων τους, ούτως ώστε να τα καταστήσουν ικανά να προσφέρουν αξιόπιστες και ποιοτικές υπηρεσίες δεδομένων και φωνής. Επίσης, εξετάζεται η συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης προκειμένου να βελτιστοποιηθούν σημαντικές διαδικασίες (κωδικοποίηση, διαπομπή, παρακολούθηση του χρήστη κ.λπ.), που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των κινητών δικτύων και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή τους.

## **Λέξεις Κλειδιά**

Δίκτυα 5G και 6G, Κινητά δίκτυα επικοινωνιών, Τηλεπικοινωνιακά συστήματα, Κυψελωτά συστήματα, Σταθμός Βάσης, Δορυφόρος, Μη επανδρωμένα οχήματα, Αναμεταδότης, Συχνότητες THz, Ρυθμός μετάδοσης, Ποιότητα υπηρεσιών, Πιθανότητα αποκοπής, Κυψέλη, Έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες, Κεραίες πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων

## **Abstract**

The purpose of this thesis is the detailed study of modern telecommunications systems B5G and 6G, in terms of performance (transmission rates, capacity, outage probability etc.), technological maturity, and ways of integration into existing mobile network infrastructures. Initially, within the framework of this analysis, the challenges that will arise for existing networks with the full integration of the Internet of Things and the continuously increasing number of end-users demanding access to network resources are examined, as they lead to network congestion. Subsequently, the capabilities of terrestrial and non-terrestrial networks and possible ways of integrating them into modern cellular systems are presented, in order to contribute to their performance enhancement, making them capable of offering reliable and high-quality data and voice services. Additionally, the contribution of artificial intelligence and machine learning is examined in order to optimize significant processes (encoding, handover, user tracking etc.) that take place during the operation of mobile networks and significantly impact their performance.

## **Key Words**

Networks B5G and 6G, Mobile Communication Networks, Telecommunication Systems, Cellular Systems, Base Station, Satellite, Unmanned Vehicles, Relay, THz Frequencies, Transmission Rate, Quality of Service, Outage Probability, Cell, Intelligent Reflective Surfaces, Multiple-Input Multiple-Output Antennas.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και γενικά την πολύτιμη βοήθειά του, με τις χρήσιμες συμβουλές του, τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο κατά τη φάση της εκπόνησης της παρούσας μελέτης - εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την αμέριστη υποστήριξή της, όλα αυτά τα χρόνια, στην πορεία προς την επίτευξη των στόχων μου.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b> .....	14
<b>Γιατί ασύρματες επικοινωνίες;</b> .....	14
1.1 Τεχνολογίες ασυρμάτων επικοινωνιών .....	14
1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης ασυρμάτων επικοινωνιών.....	15
1.3 Προκλήσεις από τη χρήση ασυρμάτων επικοινωνιών .....	16
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	19
<b>Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών</b> .....	19
2.1 Γενική περιγραφή εννοιών των κυψελωτών συστημάτων .....	19
2.2 Ιστορική εξέλιξη κυψελωτών δικτύων (1G - 5G).....	22
2.2.1 Δίκτυα 1 <sup>ης</sup> Γενιάς (1G) .....	22
2.2.2 Δίκτυα 2 <sup>ης</sup> Γενιάς (2G) .....	22
2.2.3 Δίκτυα 3 <sup>ης</sup> Γενιάς (3G) .....	24
2.2.4 Δίκτυα 4 <sup>ης</sup> Γενιάς (4G) .....	25
2.2.5 Δίκτυα 5 <sup>ης</sup> Γενιάς (5G) .....	28
2.3 Θέματα Διάδοσης ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας – Μοντελοποίηση Καναλιού .....	32
2.3.1 Ισχύς του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει του μήκους κύματος.....	32
2.3.2 Περιγραφή του περιβάλλοντος διάδοσης .....	33
2.3.3 Είδη διαλείψεων .....	34
2.3.4 Μοντέλα διάδοσης και διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.....	35
2.3.5 Διαλείψεις μικρής κλίμακας .....	38
2.3.6 Ταξινόμηση διαύλων με διαλείψεις .....	40
<b>Κεφάλαιο 3</b> .....	43
<b>Ανάλυση των δικτύων 6<sup>ης</sup> γενιάς (6G Networks)</b> .....	43
3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 6G .....	43
3.2 Βασικοί πυλώνες ανάπτυξης των δικτύων 6G.....	44
3.2.1 Οραματίζοντας τα δίκτυα 6G .....	44
3.2.2 Βασικοί πυλώνες ανάπτυξης και απαιτήσεις των δικτύων 6G .....	45
3.3 Αρχιτεκτονική των δικτύων 6G.....	48
3.4 Περιγραφή εξοπλισμού υλοποίησης των δικτύων 6G (Φάσμα συχνοτήτων, κεραιές κ.λπ.).....	49
3.4.1 Το φάσμα συχνοτήτων στα δίκτυα 6G.....	49
3.4.2 Η χρήση των κεραιών στα δίκτυα 6G.....	52



3.4.3	Η χρήση μη-ορθογώνιας τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA) στα δίκτυα 6G .....	57
3.4.4	Οι προκλήσεις στα ηλεκτρονικά των συσκευών του 6G .....	63
3.5	Semantic Communications .....	65
3.5.1	Παραδείγματα παραμέτρων μέτρησης ποιότητας στις semantic επικοινωνίες .....	66
3.5.2	Προκλήσεις στις semantic επικοινωνίες.....	68
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>		<b>70</b>
<b>Ενσωμάτωση των Non-Terrestrial δικτύων στο 6G .....</b>		<b>70</b>
4.1	Εισαγωγή στην έννοια των Non-Terrestrial Networks (NTNs).....	70
4.2	Non-Terrestrial Networks (NTNs) στα δίκτυα 6G .....	71
4.2.1	Διαστημικές πλατφόρμες για NTN δίκτυα .....	71
4.2.2	Εναέριες πλατφόρμες για NTN δίκτυα .....	73
4.2.3	Υβριδικά NTN δίκτυα .....	73
4.3	Η χρήση των δορυφόρων (Cubesats) στα δίκτυα 6G.....	74
4.3.1	Γενική αρχιτεκτονική.....	75
4.3.2	Βασικά χαρακτηριστικά NTN δικτύων με χρήση Cubesats .....	76
4.3.3	Προκλήσεις στη χρήση Cubesats και NTN δικτύων.....	80
4.4	Η χρήση των UAV/ Drones στα δίκτυα 6G.....	83
4.4.1	Κατηγοριοποίηση των UAV με βάση τα χαρακτηριστικά τους.....	84
4.4.2	Κατηγοριοποίηση των UAV με βάση το ρόλο τους στο δίκτυο.....	84
4.4.3	Τύποι των Wireless Infrastructure UAV με βάση τον τρόπο χρησιμοποίησής τους στο δίκτυο 6G .....	85
4.5	Πλεονεκτήματα από τη χρήση των UAV/Drones στα δίκτυα 6G.....	87
4.6	Τεχνητή Νοημοσύνη στα Δίκτυα 6G - Data Driven Wireless Networks	89
4.6.1	Σύντομη εισαγωγή στην έννοια του «Data Driven Wireless Networks» .....	89
4.6.2	Η Τεχνητή Νοημοσύνη στο φυσικό και MAC επίπεδο.....	90
4.6.3	Η Τεχνητή Νοημοσύνη στο επίπεδο δικτύου και μεταφοράς.....	94
4.6.4	Ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα NTN δίκτυα και προκλήσεις.....	95
4.7	Προτυποποίηση των NTN και το χρονοδιάγραμμα ενσωμάτωσής τα δίκτυα 6G .....	98
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>		<b>100</b>
<b>Συμπεράσματα .....</b>		<b>100</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές.....</b>		<b>103</b>

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων [1].....	19
Εικόνα 2.2: Τύποι κυψελών και κυψέλη ομπρέλα [2],[3].....	21
Εικόνα 2.3: Αρχιτεκτονική του δικτύου GSM [5].....	23
Εικόνα 2.4: Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος 2G και 3G [6].....	24
Εικόνα 2.5: Τύποι του Carrier Aggregation (CA) [7].....	26
Εικόνα 2.6: Αρχιτεκτονική δικτύου 4G - LTE [8].....	27
Εικόνα 2.7: Εφαρμογές των δικτύων 5G σύμφωνα με το IMT-2020 [9].....	29
Εικόνα 2.8: Συγκριτικό διάγραμμα των βασικών παραμέτρων για τα IMT-Advanced και IMT-2020 [9].....	30
Εικόνα 2.9: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G (Service-based architecture SBA) [10]	31
Εικόνα 2.10: Υπέρθυση διαλείψεων.....	35
Εικόνα 2.11: Διάδοση σήματος σε δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις [13].....	41
Εικόνα 2.12: Διάδοση σήματος σε δίαυλο με επιλεκτικές διαλείψεις [13].....	42
Εικόνα 3.1: Βασικές προδιαγραφές δικτύων 4G, 5G και 6G [2].....	47
Εικόνα 3.2: Τοπολογία συστήματος 6G [6].....	48
Εικόνα 3.3: Συντελεστής απωλειών λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας (30 GHz – 3 THz) [2,7].....	51
Εικόνα 3.4: Απεικόνιση ενός συστήματος CF – mMIMO [8].....	54
Εικόνα 3.5: Εφαρμογές συσκευών IRS στα δίκτυα 6G [9].....	55
Εικόνα 3.6: Λειτουργία του Successive Interference Cancellation - SIC.....	58
Εικόνα 3.7: Downlink NOMA δύο χρηστών [11].....	60
Εικόνα 3.8: Downlink NOMA k-χρηστών [10].....	61
Εικόνα 3.9: Uplink NOMA δύο χρηστών [11].....	62
Εικόνα 4.1: Υβριδική τοπολογία δικτύου (επίγειου και NTN) [6].....	74
Εικόνα 4.2: Ενδεικτικές αποστολές δορυφόρων (cubesats) στα NTN δίκτυα [3].....	76
Εικόνα 4.3: Αναχρησιμοποίηση συχνότητας μέσω πολλαπλών δεσμών [16]	82
Εικόνα 4.4: Ενδεικτικές αποστολές των UAVs στα NTN δίκτυα [17].....	86

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας ασύρματων και ενσύρματων δικτύων.....	18
Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας κυψελών [3] .....	21
Πίνακας 3: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών [11] .....	37
Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας των βασικών προδιαγραφών 5G και 6G [3-5] .....	47

## Ακρωνύμια

Ακρωνύμιο	Περιφραστική περιγραφή ακρωνυμίου
IoT	Internet of Things
WiFi	Wireless Fidelity
PtP	Point to Point
NFC	Near Field Communication
RFID	Radio Frequency Identification
CAPEX	Capital Expenditures
OPEX	Operational Expenditures
SNIR	Signal to Noise and Interference Ratio
BSs	Base Stations
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GSM	Global System for Mobile Communication
SIM	Subscriber Identity Module
PSTN	Public Switched Telephone Network
LTE	Long Term Evolution
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
CA	Carrier Aggregation
eMBB	enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
mMTC	massive Machine Type Communications
ISI	Intersymbol Interference
QoS	Quality of Service
IRS	Intelligent Reflecting Surfaces
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ML	Machine Learning
AI	Artificial Intelligence
APs	Access Points
NTN	Non – Terrestrial Networks
GEO	Geostationary Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
LEO	Low Earth Orbit
CSI	Channel State Information
QoE	Quality of Experience
AZP – IoT	Almost Zero Power IoT
MEC	Multi-Access Edge Computing
VLB	Visible Light Band
OWC	Optical Wireless Communications
VLC	Visible Light Communications

<b>Ακρωνύμιο</b>	<b>Περιφραστική περιγραφή ακρωνυμίου</b>
CF – mMIMO	Cell – Free mMIMO
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA
SIC	Successive Interference Cancellation
BER	Bit Error Rate
NF	Noise Figure
ANNs	Artificial Neural Networks
LAPS	Low Amplitude Platform Systems
HAPS	High Amplitude Platform Systems
CCI	Co-Channel Interference
GCS	Ground Control Station
D2D	Device-to-Device
DoS	Denial-of-Service

# Κεφάλαιο 1

## Γιατί ασύρματες επικοινωνίες;

### 1.1 Τεχνολογίες ασυρμάτων επικοινωνιών

Με τον όρο ασύρματες επικοινωνίες αναφερόμαστε στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία χρησιμοποιούν ως μέσο διάδοσης την ατμόσφαιρα, προκειμένου να επιτύχουν μεταφορά δεδομένων ή πληροφοριών. Συνεπώς, όταν χρησιμοποιούνται ασύρματες τεχνολογίες για την εγκαθίδρυση μιας ζεύξης μεταξύ δύο μερών δεν απαιτείται κάποια φυσική διασύνδεση με χρήση ενσύρματων μέσων (καλώδια, οπτική ίνα).

Στην σύγχρονη εποχή του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things – IoT) που ζούμε υπάρχει πληθώρα ασύρματων τεχνολογιών που η κάθε μια έχει μοναδικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των τελικών χρηστών του δικτύου. Ενδεικτικά θα αναφερθούν οι πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες έχουν ως ακολούθως:

α. **Wireless Fidelity (WiFi):** Το WiFi αποτελεί μία από τις δημοφιλέστερες ασύρματες τεχνολογίες η οποία προσφέρει δυνατότητα διασύνδεσης σε μικρή εμβέλεια και συνήθως χρησιμοποιείται σε σπίτια, γραφεία και δημόσιους χώρους (εμπορικά κέντρα, πλατείες, αεροδρόμια κ.λπ.), προκειμένου να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο.

β. **Κυψελωτές Επικοινωνίες (Cellular Communications):** Τα συστήματα κυψελωτών επικοινωνιών (3G, 4G, LTE- Advanced, 5G, 6G) παρέχουν ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις επιτρέποντας στις συσκευές να διασυνδέονται στο διαδίκτυο και να εκτελούν κλήσεις φωνής ή βιντεοκλήσεις.

γ. **Δορυφορικές Επικοινωνίες (Satellite Communications):** Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν δορυφόρους οι οποίοι είναι σε τροχιά γύρω από τη γη σε διάφορες αποστάσεις, παρέχοντας πληθώρα υπηρεσιών (φωνής, δεδομένων, τηλεόραση κ.λπ.) ακόμη και σε περιοχές που δεν υπάρχει καμία υποδομή.

δ. **Μικροκυματικές Ζεύξεις (Microwave Links):** Η τεχνολογία αυτή παρέχει ζεύξεις σημείο προς σημείο (Point to Point Links – PtP) για μεγάλες αποστάσεις και χρησιμοποιείται κατά κόρο στα κυψελωτά συστήματα για την διασύνδεση των σταθμών βάσης με το δίκτυο κορμού (Backhaul Connection).

ε. **Near Field Communication (NFC):** Η τεχνολογία NFC παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ συσκευών που βρίσκονται σε πολύ κοντινή

απόσταση, της τάξης των μερικών εκατοστών και η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της είναι η εκτέλεση ασύρματων πληρωμών.

στ. Ταυτοποίηση με ραδιοσυχνότητες (Radio Frequency Identification – RFID): Η τεχνολογία RFID χρησιμοποιεί τα ραδιοκύματα για την αναγνώριση και παρακολούθηση αντικειμένων. Οι πιο συνηθισμένες χρήσεις είναι η διαχείριση αποθεμάτων στην εφοδιαστική αλυσίδα και σε συστήματα ελέγχου πρόσβασης.

## 1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης ασυρμάτων επικοινωνιών

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει μια σύντομη ανάλυση των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από τη χρήση των ασύρματων επικοινωνιών σε διάφορους τομείς όπως τα κόστη εγκατάστασης, η ευελιξία (flexibility) και η δυνατότητα επέκτασης (scalability).

α. Έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης (Capital Expenditures – CAPEX) και λειτουργίας – συντήρησης (Operational Expenditures – OPEX) του δικτύου καθώς δεν απαιτούνται έξοδα για την εγκατάσταση καλωδίων που είναι μία κοστοβόρα διαδικασία καθώς πέρα από την αγορά του εξοπλισμού (καλώδια, μούφες σύνδεσης κ.λπ.) περιλαμβάνει και ένα επιπλέον κόστος που δεν είναι καθόλου αμελητέο και αφορά την εκσκαφή του εδάφους για την εγκατάσταση του καλωδίου. Επιπλέον, στα ασύρματα δίκτυα η συντήρηση και ο έλεγχος βλαβών τις περισσότερες φορές μπορεί να εκτελεστεί εξ' αποστάσεως ενώ αντίθετα στα ενσύρματα δίκτυα απαιτείται επί τόπου έλεγχος που ενδεχομένως να απαιτεί σκάψιμο προκειμένου να διορθωθεί να αποκατασταθεί η βλάβη στο καλώδιο.

β. Παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία τόσο υπό την έννοια της κινητικότητας (mobility) των χρηστών όσο και της σχεδίασης των δικτύων. Στις ασύρματες επικοινωνίες οι τελικοί χρήστες μπορούν να κινούνται και να απολαμβάνουν απρόσκοπτα τις υπηρεσίες που επιθυμούν σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα όπου ο χρήστης είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το τελικό σημείο που καταλήγει η ενσύρματη σύνδεση και μόνο από εκεί μπορεί να έχει πρόσβαση στο δίκτυο. Ένα ασύρματο δίκτυο είναι πολύ πιο εύκολο να διαμορφωθεί ad hoc προκειμένου να ταιριάζει στις απαιτήσεις των χρηστών, όπως για παράδειγμα η κάλυψη ενός μεγάλου γεγονότος (πχ Ολυμπιακοί Αγώνες) που δεν απαιτεί συνέχεια αποκλειστικούς (dedicated) πόρους, ενώ από την άλλη πλευρά το ενσύρματο δίκτυο είναι δέσμιο της αρχικής του εγκατάστασης.

γ. Η δυνατότητα επέκτασης είναι ένα χαρακτηριστικό που βρίσκει απόλυτη εφαρμογή στη λειτουργία των ασύρματων δικτύων. Γενικά, με τον όρο επεκτασιμότητα εννοούμε ότι το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τις αυξανόμενες ανάγκες σε τελικούς χρήστες διατηρώντας ταυτόχρονα υψηλό επίπεδο στην ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών, στην αξιοπιστία και στην

ασφάλεια του. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τα σύγχρονα συστήματα τηλεπικοινωνιών θα χρησιμοποιούν την τεχνολογία πολλαπλών κεραιών, η οποία πρόκειται να αυξήσει θεαματικά την επίδοση των δικτύων σε ότι αφορά τη χωρητικότητα και την κάλυψη, η επιλογή των ασύρματων δικτύων για την επίτευξη της επεκτασιμότητας είναι μονόδρομος.

### 1.3 Προκλήσεις από τη χρήση ασυρμάτων επικοινωνιών

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν εν συντομία οι προκλήσεις που εγείρονται από τη χρήση των ασύρματων επικοινωνιών έναντι της εναλλακτικής που είναι η ενσύρματη δικτύωση σε βασικά χαρακτηριστικά όπως η παρεμβολή, η ασφάλεια και η επίδοση (σε ταχύτητες μετάδοσης, αξιοπιστία κ.λπ.).

α. Με τον όρο παρεμβολή αναφερόμαστε στη λήψη κάθε μη επιθυμητού σήματος στην πλευρά του δέκτη (θόρυβος, εξωτερικά σήματα από άλλες πηγές κ.λπ.), η οποία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της σύνδεσης ή ακόμη και τη διακοπή της, σε περιπτώσεις που η λαμβανόμενη ισχύς των ανεπιθύμητων σημάτων γίνει τέτοια ώστε ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise and Interference Ratio – SNIR) να μην ικανοποιεί την προδιαγραφή του δέκτη. Ως εξωτερικά ανεπιθύμητα σήματα εννοούμε αυτά που προέρχονται είτε από πηγές άλλων ασύρματων δικτύων που βρίσκονται σε γειτονικές γεωγραφικές περιοχές και λειτουργούν στην ίδια συχνότητα είτε από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως λόγου χάρη ο φούρνος μικροκυμάτων, οι οποίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μπορεί να παρεμβάλουν τη ορθή λειτουργία των ασύρματων δικτύων. Επίσης, δεδομένου ότι το μέσο μετάδοσης των ασύρματων δικτύων είναι η ατμόσφαιρα αξίζει να σημειωθεί ότι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος υπόκειται σε επιπρόσθετη εξασθένιση ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (βροχή, ομίχλη κ.λπ.), πράγμα το οποίο έχει έμμεση επίδραση στο λόγο SNIR, όχι από την πλευρά της παρεμβολής αλλά από την εξασθένιση του ωφέλιμου σήματος. Συνεπώς, όταν πρέπει να υλοποιηθεί μία ζεύξη με υψηλή επίδοση και πλήρως αξιόπιστη, η χρήση των ενσύρματων δικτύων είναι η ενδεδειγμένη επιλογή.

β. Με τον όρο ασφάλεια αναφερόμαστε τόσο στην ακεραιότητα των μεταδιδόμενων σημάτων όσο και στην ελεγχόμενη πρόσβαση των χρηστών μέσω διαδικασιών αυθεντικοποίησης. Οι περισσότερες προκλήσεις των ασύρματων δικτύων έχουν ένα κοινό γνώμονα και αυτός είναι το μέσο διάδοσής τους, καθώς στα ενσύρματα δίκτυα το μέσο μετάδοσης (καλώδιο, οπτική ίνα κ.λπ.) είναι υπό κάποια έννοια ελεγχόμενο, αφού δεν μπορεί εύκολα κάποιος κακόβουλος χρήστης του δικτύου να παρεμβληθεί στη ζεύξη προκειμένου να υποκλέψει ή να μεταβάλει να διακινούμενα δεδομένα. Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, καθίσταται σαφές ότι στην λειτουργία των ασύρματων επικοινωνιών θα πρέπει να συμπεριληφθούν μηχανισμοί αυθεντικοποίησης προκειμένου το δίκτυο να πιστοποιεί την ακεραιότητα των χρηστών που αιτούνται πρόσβαση σε αυτό και κρυπτογράφησης για να εξασφαλίζει ότι και στην περίπτωση που



κάποια ευαίσθητα δεδομένα φτάσουν σε κακόβουλο χρήστη να μην έχει τη δυνατότητα να τα αξιοποιήσει. Συνεπώς, από την μία πλευρά η ενσωμάτωση των παραπάνω μηχανισμών είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των ασύρματων δικτύων αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει πάρα πολύ την πολυπλοκότητα του συστήματος και εισάγει πρόσθετες καθυστερήσεις, πράγμα το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να υπάρχει μία ισορροπία μεταξύ της σκληρότητας των αλγορίθμων κρυπτογράφησης και του χρόνου εκτέλεσης.

γ. Η τεράστια πρόκληση που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, είναι η εξασφάλιση υπηρεσιών στον τελικό χρήστη με επιδόσεις (σε ρυθμό μετάδοσης, αξιοπιστία κ.λπ.) εφάμιλλες με αυτές των οπτικών ινών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου ο σχεδιασμός των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων περιλαμβάνει τη λειτουργία σε πολύ υψηλές συχνότητες, της τάξης των GHz και THz. Αρχικά, η επιλογή λειτουργίας σε τόσο υψηλές συχνότητες θα μειώσει την εμβέλεια των συστημάτων με αποτέλεσμα να χρειαστεί μια τεράστια πύκνωση του δικτύου, η οποία με τη σειρά της θα απαιτήσει ένα πολύ μεγάλο κόστος επένδυσης, για την αγορά του νέου εξοπλισμού, το οποίο οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι θα κληθούν να καλύψουν εφόσον πειστούν για την αποτελεσματικότητα αυτής της πρότασης. Επιπρόσθετα, ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να τεθεί υπό έρευνα με βάση τα παραπάνω είναι τα ηλεκτρονικά που θα χρησιμοποιηθούν καθώς με την υπάρχουσα τεχνολογία πυριτίου δεν υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε τόσο υψηλές συχνότητες.

Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα γίνεται μία σύνοψη όσων αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

<b>Παράμετρος</b>	<b>Ενσύρματο Δίκτυο</b>	<b>Ασύρματο Δίκτυο</b>
Μέσο διάδοσης	Χαλκός, Οπτική Ίνα κ.λπ.	Αέρας
Κινητικότητα (Mobility)	Περιορισμένη	Υψηλή
Ταχύτητα Μετάδοσης	Υψηλή	Υψηλή αλλά χαμηλότερη από το ενσύρματο δίκτυο
Ασφάλεια	Υψηλή	Υψηλή αλλά χαμηλότερη από το ενσύρματο δίκτυο
Καθυστέρηση	Χαμηλή	Υψηλή
Αξιοπιστία	Υψηλή	Υψηλή αλλά χαμηλότερη από το ενσύρματο δίκτυο
Παρεμβολή	Χαμηλή	Υψηλή
Ευελιξία	Χαμηλή	Υψηλή
Πρόσβαση στο δίκτυο	Απαιτείται φυσική πρόσβαση	Ασύρματη πρόσβαση εντός εμβέλειας
Κόστος Εγκατάστασης	Υψηλό	Χαμηλό

Κόστος συντήρησης και αναβάθμισης	Υψηλό	Χαμηλό
-----------------------------------	-------	--------

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας ασύρματων και ενσύρματων δικτύων

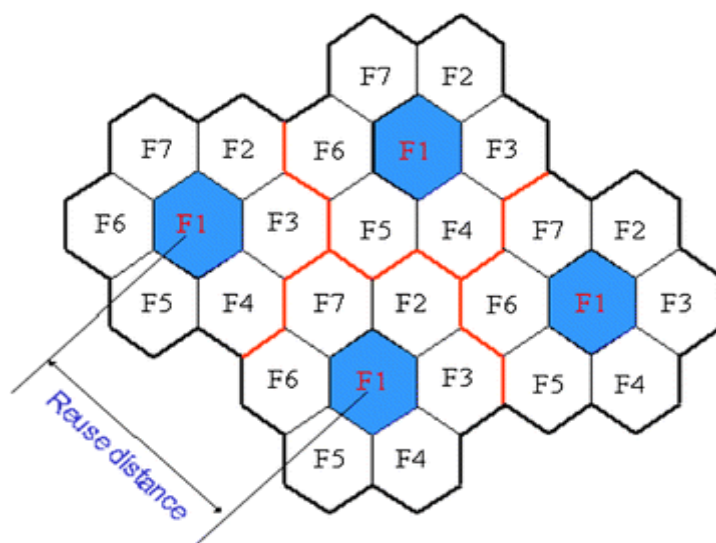
## Κεφάλαιο 2

### Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών

#### 2.1 Γενική περιγραφή εννοιών των κυψελωτών συστημάτων

Με τον όρο κυψελωτό σύστημα εννοούμε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα που αποτελείται από πολλούς σταθμούς βάσης (Base Stations – BSs), όπου στον καθένα έχει αποδοθεί μια ομάδα συχνοτήτων η οποία χρησιμοποιείται εντός μία περιορισμένης γεωγραφικής περιοχής, που καλείται κυψέλη (cell). Ο αντικειμενικός σκοπός των κυψελωτών συστημάτων είναι η παροχή αδιάλειπτης επικοινωνίας φωνής και δεδομένων σε τελικούς χρήστες οι οποίοι είναι είτε και οι δύο κινητοί είτε ο ένας είναι σταθερός και ο άλλος κινητός. Με τον όρο σταθερός και κινητός εννοούμε ότι ο τελικός χρήστης έχει πρόσβαση στο δίκτυο από σταθερή και ασύρματη υποδομή αντιστοίχως.

Η βασική ιδέα πίσω από τη λειτουργία των κυψελωτών συστημάτων είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων με σκοπό την εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων τελικών χρηστών. Η ανάθεση συχνοτήτων λειτουργίας στους σταθμούς βάσης αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία, στο πλαίσιο επίτευξης των παραπάνω στόχων και απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό. Σε ότι αφορά τον τρόπο υλοποίησής της έχουμε ότι γειτονικοί σταθμοί βάσης απαιτείται να έχουν διαφορετική συχνότητα ενώ σταθμοί βάσης που απέχουν μεταξύ τους μια ικανή απόσταση μπορούν να επαναχρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες, εάν και εφόσον το επίπεδο των μεταξύ τους παρεμβολών βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Επομένως, η διαδικασία επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτικότητα και την αύξηση της χωρητικότητας ενός κυψελωτού συστήματος.



Εικόνα 2.1: Παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων [1]

Η λειτουργία των κυψελωτών συστημάτων περιλαμβάνει δύο βασικούς άξονες που αφορούν την περιοχή κάλυψης (coverage area) και την υποστήριξη της κινητικότητας (mobility), οι οποίοι περιγράφονται εν συντομία παρακάτω:

α. Κάλυψη: Αφορά τους σταθμούς βάσης και ειδικότερα την επιλογή των θέσεων εγκατάστασής τους προκειμένου να είναι δυνατή η παροχή επικοινωνιών στο σύνολο της γεωγραφικής περιοχής που καλείται να καλύψει το σύστημα. Καθίσταται σαφές ότι η έννοια της κάλυψης είναι άμεσα εξαρτημένη από τη γεωγραφική περιοχή η οποία δεν ίδια είναι σε όλες τις περιπτώσεις και για το λόγο αυτό υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για να κατατάξουμε μία περιοχή ανά είδος (αστική, αγροτική, πυκνοκατοικημένη, αραιοκατοικημένη κ.λπ.). Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα καταλήγουμε ότι διαφορετικά είδη κυψελών θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής.

β. Υποστήριξη κινητικότητας: Αφορά τη δυνατότητα σύνδεσης ενός κινούμενου χρήστη με το δίκτυο και ειδικότερα την ύπαρξη των διαδικασιών προσδιορισμού της θέσης (Paging Cache) εντός του δικτύου, δρομολόγησης των κλήσεων (Routing Cache) και διαπομπής (Handover). Με την τελευταία διαδικασία επιτυγχάνεται η μεταβίβαση των κλήσεων από την τρέχουσα κυψέλη στη νέα χωρίς να γίνει αντιληπτό από το χρήστη καθώς εκτελείται αυτόματα και χωρίς υπάρχει καμία διακοπή στην επικοινωνία που βρίσκεται σε εξέλιξη.

Τα είδη των κυψελών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα είναι τα παρακάτω:

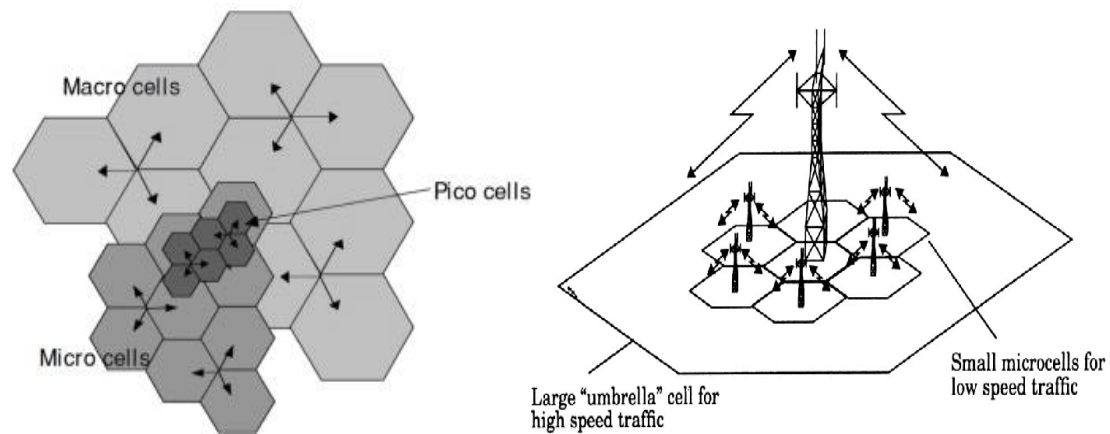
α. Μακροκυψέλη (Macro cell): Οι μακροκυψέλες αφορούν σταθμούς βάσης οι οποίοι έχουν ακτίνα κάλυψης που εκτείνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα και χρησιμοποιούνται για να παρέχουν κάλυψη σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές με μέτρια πυκνότητα τελικών χρηστών. Είναι προφανές ότι για να επιτευχθούν αυτές οι εμβέλειες οι σταθμοί βάσης έχουν κεραίες οι οποίες είναι τοποθετημένες σε μεγάλο ύψος και εκπέμπουν με μεγάλη σχετικά ισχύ. Επιπλέον, συχνά στα κυψελωτά συστήματα συναντάμε και τον όρο κυψέλη-ομπρέλα (umbrella cell) που δεν είναι τίποτα άλλο από μια μακροκυψέλη που καλύπτει μια γεωγραφική περιοχή εντός της οποίας υπάρχουν πολλές μικρότερες κυψέλες. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι εξασφαλίζει την κάλυψη στα «νεκρά» σημεία μεταξύ των μικρότερων κυψελών, μειώνει τις απαιτούμενες διαπομπές για ταχέως κινούμενους χρήστες και ικανοποιεί διαπομπές ελλείπει πόρων στις μικρότερες κυψέλες.

β. Μικροκυψέλη (Micro cell): Οι τυπικές ακτίνες κάλυψης των μικροκυψελών εκτείνονται από λίγες εκατοντάδες μέτρα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα και ο βασικός λόγος χρησιμοποίησής τους είναι η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Σε αντίθεση με τις μακροκυψέλες οι σταθμοί

βάσης τοποθετούνται σε μικρά ύψη και εκπέμπουν με μικρή σχετικά ισχύ, πράγμα που οδηγεί και σε μειωμένη κατανάλωση ισχύος.

γ. Πικοκυψέλη (Pico cell): Οι πικοκυψέλες είναι σταθμοί βάσης που εκπέμπουν με πολύ μικρή ισχύ και η ακτίνα κάλυψης τους εκτείνεται από μερικά μέτρα μέχρι λίγες εκατοντάδες μέτρα. Συνήθως χρησιμοποιούνται για να παρέχουν κάλυψη εντός μεγάλων εσωτερικών χώρων (σταθμός μετρό κ.λπ.).

δ. Φεμτοκυψέλη (Femto cell): Η πρώτη εμφάνιση του όρου φεμτοκυψέλη γίνεται στα δίκτυα 4G καθώς ένας από τους βασικούς στόχους που είχαν τεθεί ήταν η τεράστια πύκνωση των δικτύων με σταθμούς βάσης μικρής εμβέλειας της τάξης των μερικών μέτρων. Σήμερα οι φεμτοκυψέλες χρησιμοποιούνται κυρίως εντός των σπιτιών και για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία αναφέρονται και με τον όρο (Home eNodeB – HeNB), με σκοπό να καλύψουν συγκεκριμένους χώρους όπως για παράδειγμα ένα δωμάτιο.



Εικόνα 2.2: Τύποι κυψελών και κυψέλη ομπρέλα [2],[3]

Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά για τους διάφορους τύπους κυψελών που αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή.

Χαρακτηριστικό	Femto cell	Pico cell	Micro cell	Macro cell
Ισχύς εκπομπής	10mW - 200mW	250mW - 2W	2W - 20W (5W)	20W-160W (40 W)
Ακτίνα κάλυψης	10m-50m	100m -300m	250 m – 1km	1 km <
Χρήση	Εσωτερικούς χώρους	Εσωτερικούς - Εξωτερικούς χώρους	Εσωτερικούς - Εξωτερικούς χώρους	Εξωτερικούς χώρους
Εξυπηρετούμενοι χρήστες	4 - 30	60 - 150	120 – 250	250 <

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας κυψελών [3]

## 2.2 Ιστορική εξέλιξη κυψελωτών δικτύων (1G - 5G)

### 2.2.1 Δίκτυα 1<sup>ης</sup> Γενιάς (1G)

Τα δίκτυα 1G έκαναν την εμφάνισή τους στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και συγκεκριμένα το 1979 λειτούργησε στο Τόκιο το πρώτο κυψελωτό σύστημα από τη Nippon Telephone and Telegraph (NTT). Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων ήταν ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίησή τους βασίζονταν σε αναλογικά συστήματα τηλεπικοινωνιών και ο σκοπός τους ήταν να παρέχουν υπηρεσίες φωνής στους τελικού χρήστες. Τα πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα που αναπτύχθηκαν εκείνη την εποχή ήταν το Advanced Mobile Phone Service (AMPS) στην Αμερική και το Nordic Mobile Telephone (NMT) στην Ευρώπη. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά αντιμετώπιζαν πολλούς περιορισμούς σε βασικές παραμέτρους όπως η χωρητικότητα (μικρός αριθμός ταυτόχρονων χρηστών) και η ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών (χαμηλή ποιότητα φωνής, χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μειωμένη ασφάλεια κ.λπ.).[4]

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της τεχνολογίας 1G ήταν ότι βασίζονταν σε αναλογικά σήματα για την μετάδοση της πληροφορίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα αναλογικά σήματα που χρησιμοποιούνταν στα δίκτυα 1G είναι λιγότερο αποδοτικά και ανθεκτικά από τα ψηφιακά σήματα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα 1G δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτικά. Με την πάροδο των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας αυξήθηκαν οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών για την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και επιπλέον δημιουργήθηκε η ανάγκη για την εμφάνιση πιο εξελιγμένων υπηρεσιών πέραν από αυτή της φωνής, πράγμα που οδήγησε στη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή εποχή. Η μετάβαση αυτή έφερε τεράστιες αλλαγές στην ποιότητα της φωνής, στη χωρητικότητα, στην ασφάλεια και του ρυθμούς μετάδοσης των νέων συστημάτων.

### 2.2.2 Δίκτυα 2<sup>ης</sup> Γενιάς (2G)

Συγκρίνοντας τα δίκτυα 2G με τα δίκτυα 1G, η πρώτη και κύρια διαφορά που εντοπίζουμε είναι ότι τα συστήματα 2G βασίζονται στη χρησιμοποίηση ψηφιακών τεχνικών όπως το Time Division Multiple Access (TDMA) και το Code Division Multiple Access (CDMA). Με τη χρήση των ανωτέρω τεχνολογιών επιτυγχάνονται σημαντικές βελτιώσεις στους ρυθμούς μετάδοσης και στην ποιότητα των κλήσεων. Επιπλέον, τα συστήματα 2G δεν σχεδιάζονται για να υποστηρίζουν μόνο υπηρεσίες φωνής αλλά εισάγεται κατά κάποιο τρόπο και η έννοια της μεταφοράς δεδομένων με την υπηρεσία Short Message Service (SMS).

Το πιο δημοφιλές σύστημα 2G είναι το Global System for Mobile Communication (GSM) που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε εξολοκλήρου στην Ευρώπη από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Προτυποποίησης ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Με την τεχνολογία GSM υλοποιείται

πλήρως η έννοια της κινητικότητας (mobility) των τερματικών καθώς το σύστημα είναι σε θέση να διατηρεί τη συνδεσιμότητα καθώς ένας τελικός χρήστης μετακινείται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ζωτικής σημασίας για την επίτευξη της κινητικότητας είναι η χρήση του SIM (Subscriber Identity Module) που εισήχθη στα δίκτυα GSM και έχει αποθηκευμένους το μοναδικό αριθμό που έχει ο κάθε χρήστης στην κάρτα SIM για να συνδέεται στο δίκτυο.

Τα βασικά δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του GSM δικτύου είναι τα ακόλουθα:

α. Κινητός Σταθμός (Mobile Station): Πρόκειται για το κινητό τηλέφωνο με την κάρτα SIM.

β. Σταθμός Βάσης – Πομποδεκτής (Base Transceiver Station - BTS): Είναι ο πομποδέκτης με τον οποίο επικοινωνεί ο τελικός χρήστης για να έχει πρόσβαση στο δίκτυο.

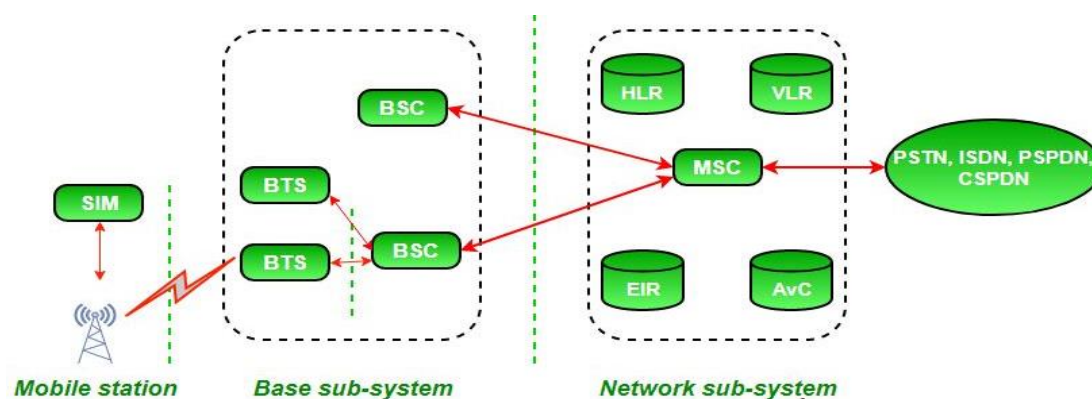
γ. Σταθμός Βάσης – Ελεγκτής (Base Station Controller - BSC): Ο ελεγκτής είναι επιφορτισμένος με την ανάθεση πόρων στους BTS, τη διαχείριση της διαπομπής και τη συγκέντρωση - προώθηση των δεδομένων στον κορμό του δικτύου και συγκεκριμένα στο κινητό κέντρο μεταγωγής (Mobile Switching Center – MSC).

δ. Home Location Register (HLR): Είναι μία βάση δεδομένων που περιέχει παραμέτρους, όπως το ID και η τοποθεσία, των τελικών χρηστών.

ε. Visitor Location Register (VLR): Είναι στην ουσία ένα αντίγραφο της HLR αλλά περιλαμβάνει μόνο τους ενεργούς χρήστες στην περιοχή αυτή.

στ. Equipment Identity Register (EIR): Είναι μία βάση δεδομένων με όλους τους έγκυρους χρήστες του δικτύου.

ζ. Κέντρο Αυθεντικοποίησης (Authentication Center – AuC): Με αυτή τη βαθμίδα πραγματοποιείται ο έλεγχος αυθεντικότητας των χρηστών.



Εικόνα 2.3: Αρχιτεκτονική του δικτύου GSM [5]

### 2.2.3 Δίκτυα 3ης Γενιάς (3G)

Τα δίκτυα 3G συνέβαλαν τα μέγιστα στο μετασχηματισμό των κινητών επικοινωνιών της δεκαετίας του 2000 καθώς εισήγαγαν βελτιώσεις που οδήγησαν στην τεράστια αύξηση τόσο των ρυθμών μετάδοσης όσο και των λοιπών δυνατοτήτων του δικτύου, συντελώντας στην εμφάνιση μιας πληθώρας υπηρεσιών πολυμέσων, όπως η βιντεοκλήση, το video streaming, το gaming και η πλοήγηση στο διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες (fast internet browsing).

Οι ελάχιστες απαιτήσεις που έπρεπε να ικανοποιούν τα δίκτυα 3G συνοψίζονται παρακάτω [4]:

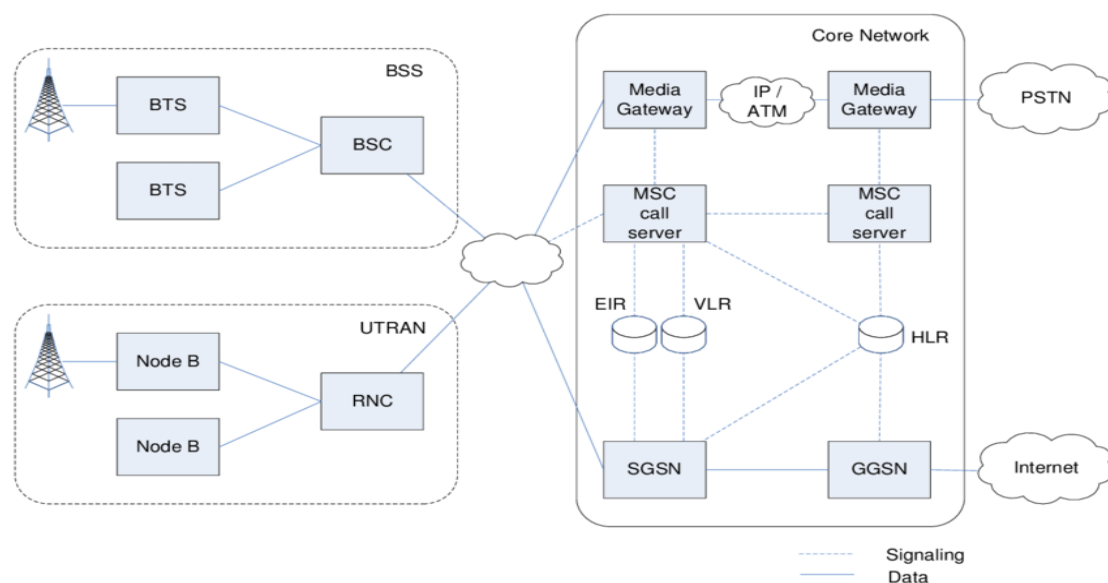
α. Ρυθμοί μετάδοσης έως 144 kbps για κινούμενα οχήματα, 384 kbps για κινούμενους πεζούς ανθρώπους και 2 Mbps για σταθερούς χρήστες.

β. Πολυπλεξία υπηρεσιών στην ίδια σύνδεση, παρόλο που μπορεί έχουν διαφορετική ανοχή σε παραμέτρους όπως η καθυστέρηση, η διακύμανση καθυστέρησης ή η απώλεια πακέτων (πχ φωνή, βίντεο).

γ. Διαλειτουργικότητα με τα δίκτυα 2G προκειμένου να υποστηρίζονται η χρήση της ήδη υπάρχουσας υποδομής, η εκτέλεση διαπομπής μεταξύ των δύο συστημάτων και ο επιμερισμός του τηλεπικοινωνιακού φόρτου.

δ. Επίτευξη μεγαλύτερης φασματικής απόδοσης.

Οι ψηφιακές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη των παραπάνω στόχων είναι το Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access (FDMA) και το Code Division Multiple Access (CDMA).



Εικόνα 2.4: Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος 2G και 3G [6]



Παρατηρώντας την παραπάνω αρχιτεκτονική του δικτύου βλέπουμε ότι η διαφορά στην υλοποίηση του δικτύου 3G έγκειται στο γεγονός ότι διαχωρίζει τις υπηρεσίες σε φωνή και δεδομένα και εν συνεχεία οι υπηρεσίες φωνής μεταγονται στο κλασικό τηλεφωνικό (Public Switched Telephone Network – PSTN) ενώ οι υπηρεσίες δεδομένων μετατρέπονται σε πακέτα IP και διοχετεύονται στο διαδίκτυο.

#### 2.2.4 Δίκτυα 4<sup>ης</sup> Γενιάς (4G)

Τα δίκτυα 4G αποτελούν μια τεχνολογία η οποία επέφερε τεράστιες αλλαγές στις κινητές επικοινωνίες και στα κυψελωτά συστήματα γενικότερα. Η εμφάνισή τους ξεκινά από το 2004 όπου έχουμε τις πρώτες προδιαγραφές για το Long Term Evolution (LTE) που είναι η απαρχή των δικτύων 4G. Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για υπηρεσίες δεδομένων υψηλής ποιότητας δημιούργησε την ανάγκη για περεταίρω βελτίωση των ρυθμών μετάδοσης και της απόκρισης του δικτύου από πλευράς καθυστέρησης και διακύμανσης καθυστέρησης.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις και τα βασικά χαρακτηριστικά που έπρεπε να ικανοποιούν τα δίκτυα 4G συνοψίζονται παρακάτω:

α. Εφαρμογή της τεχνολογίας All – IP, που σημαίνει ότι η μετάδοσης της φωνής και των δεδομένων γίνεται με τη μορφή IP πακέτων (packet switching) και παύει η χρήση της τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος (circuit switching).

β. Επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης [ LTE: 300 Mbps (DL) / 75 Mbps (UL), LTE-A: 1Gbps (DL) / 300Mbps (UL)]

γ. Αύξηση της χωρητικότητας 3 - 4 σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα.

δ. Διαλειτουργικότητα με δίκτυα 2G, 3G, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και δορυφορικά δίκτυα το οποίο από μόνο του ήταν μια μεγάλη πρόκληση λόγω της μεγάλης ετερογένειας που έχουν σαν τεχνολογίες.

ε. Χρήση απλών τερματικών συσκευών και εκτέλεση των πιο πολύπλοκων διαδικασιών στον σταθμό βάσης ή στον κορμό του δικτύου.

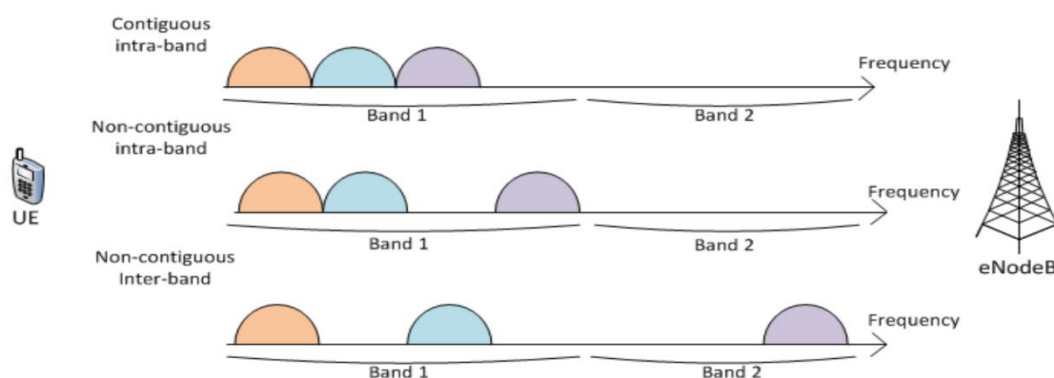
στ. Πύκνωση του δικτύου με σκοπό την μείωση των καθυστερήσεων στο δίκτυο.

Οι παραπάνω απαιτήσεις δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες των κυψελωτών συστημάτων. Συνεπώς, απαιτήθηκε η ενσωμάτωση νέων τεχνικών και μεθόδων, ορισμένες εξ αυτών είναι η Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), το Carrier

Aggregation (CA) και η εκτεταμένη χρήση κεραιών MIMO, οι οποίες θα αναλυθούν συντόμως παρακάτω [4]:

α. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): Με τη χρήση της τεχνικής OFDMA δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα να αναθέτει πόρους τόσο στο πεδίο της συχνότητας όσο και στο πεδίο του χρόνου, έτσι ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) που έχει την πραγματική εικόνα του δικτύου και γνωρίζει τις απαιτήσεις των χρηστών εκτελεί την ανάθεση των πόρων με γνώμονα την καλύτερη εξυπηρέτηση του χρήστη.

β. Carrier Aggregation (CA): Το CA δίνει δυνατότητα στον ίδιο χρήστη να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα πολλαπλά φέροντα, προκειμένου να επιτύχει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης όταν το χρειάζεται. Ο κάθε χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μέχρι πέντε συνιστώσες φάσματος οι οποίες μπορεί να είναι διαφορετικού εύρους και επιπλέον δεν απαιτείται να είναι συνεχόμενα στη συχνότητα και το ανώτερο φάσμα που μπορεί να φτάσει είναι τα 100 MHz.



Εικόνα 2.5: Τύποι του Carrier Aggregation (CA) [7]

γ. Χρήση κεραιών MIMO: Η εκτεταμένη χρήση κεραιών MIMO σε πομπό και δέκτη συμβάλει σε τομείς όπως η αύξηση της κάλυψης, η μείωση των παρεμβολών, η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και η αύξηση των ρυθμών μετάδοσης. Με τις κεραιές MIMO λόγω του κέρδους διαφορισμού μπορεί πλέον να επιτευχθεί μεγαλύτερη κάλυψη καθώς τα σήματα θα ακολουθήσουν διαφορετικές και ανεξάρτητες μεταξύ τους διαδρομές με αποτέλεσμα στο δέκτη να είναι δυνατή η λήψη ισχυρότερων σημάτων. Επιπλέον, με την εφαρμογή της διαμόρφωσης ακτινοβολίας (beamforming) που χρησιμοποιούν οι κεραιές MIMO είναι πολύ εύκολο να στρέψουμε το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών στις επιθυμητές κατευθύνσεις επιτυγχάνοντας έτσι και μείωση των παρεμβολών σε άλλες κεραιές και ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα να επαναχρησιμοποιεί τις συχνότητες σε μικρότερες αποστάσεις. Τέλος, με τη χρήση τη χωρικής πολυπλεξίας (spatial diversity), το σύστημα μπορεί αυξάνει τους ρυθμούς μετάδοσης και τη χωρητικότητα του δικτύου, καθώς επιτρέπει την πολυπλεξία πολλαπλών διαφορετικών ροών μεταξύ τους να αποσταλούν ταυτόχρονα προς πολλαπλούς χρήστες.

Στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου 4G και οι βασικές οντότητες του, οι οποίες έχουν ως ακολούθως:

α. eNodeB: Οι σταθμοί βάσης στα δίκτυα 4G ονομάζονται πλέον eNodeB και η έννοια του σταθμού βάσης ελεγκτή παύει να υφίσταται.

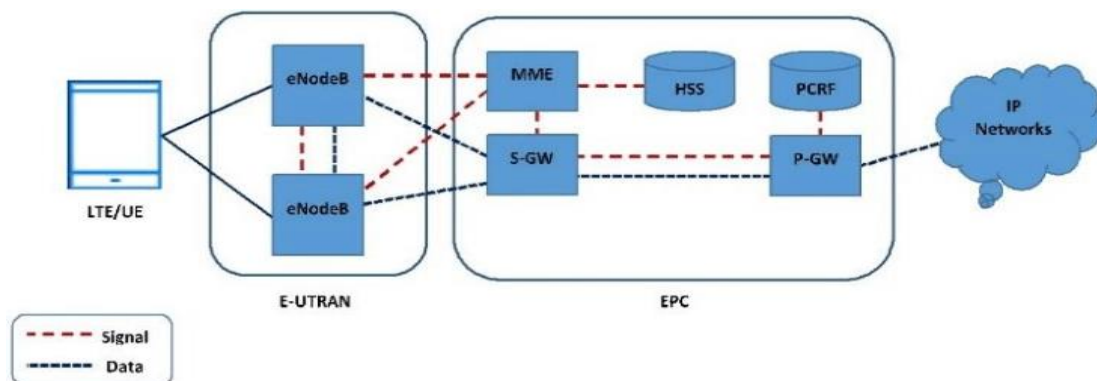
β. Mobility Management Entity (MME): Η μονάδα MME βρίσκεται πιο κοντά στον κορμό του δικτύου και έχει το ρόλο του ελεγκτή. Αλληλοεπιδρά με την οντότητα Home Subscriber System (HSS) για την ταυτοποίηση των χρηστών και με την οντότητα Serving Gateway (S-GW) για τον εντοπισμό των χρηστών στο δίκτυο (paging) και τη διαχείριση της διαπομπής (handover).

γ. Home Subscriber System (HSS): Είναι μία κεντρική βάση δεδομένων που περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για τα προφίλ των χρηστών (τοποθεσία, IMSI της κάρτας SIM, δεδομένα QoS που προκύπτουν από τη διάδραση με το δίκτυο) και αλληλοεπιδρά με την οντότητα MME για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

δ. Serving Gateway (S-GW): Είναι η οντότητα που διαχειρίζεται όλα τα IP πακέτα όταν και το δίκτυο προορισμού είναι 2G/3G/4G.

ε. Packet Data Network Gateway (P-GW): Είναι η οντότητα που διαχειρίζεται όλα τα IP πακέτα του δικτύου (εισερχόμενα και εξερχόμενα) ανεξάρτητα αν είναι δίκτυο προορισμού είναι 2G/3G/4G ή όχι. Αλληλοεπιδρά με την οντότητα Policy and Charging Rule Function (PCRF) προκειμένου να καθορίσουν την ποιότητα των υπηρεσιών.

στ. Policy and Charging Rule Function (PCRF): Η επικοινωνία μεταξύ P-GW και PCRF είναι πολύ σημαντική καθώς στο PCRF υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με το συμβόλαιο του χρήστη και ενδεχομένως ειδικές απαιτήσεις που μπορεί να έχει θέσει. Επιπλέον, μέσω της PCRF γίνεται και η χρέωση των χρηστών για της χρήση του δικτύου.



Εικόνα 2.6: Αρχιτεκτονική δικτύου 4G - LTE [8]

### 2.2.5 Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G)

Η συνεχώς αυξανόμενη ποσότητα διακινούμενων δεδομένων και η ανάγκη για παροχή συνδεσιμότητας σε όλο και περισσότερους τελικούς χρήστες άρχισε να ωθεί τα δίκτυα των προηγούμενων γενιών στα όρια των δυνατοτήτων τους και ως εκ τούτου οδηγηθήκαμε στην εμφάνιση των δικτύων 5G περί το 2020. Παρόλο που τα δίκτυα 4G έφεραν τεράστιες αλλαγές στα κυπελωτά συστήματα η International Telecommunication Union (ITU) εντόπισε τη ανάγκη για περεταίρω βελτίωση των κινητών επικοινωνιών και ο «οδικός άξονας» καθορίστηκε στο International Mobile Telecommunication 2020 (IMT-2020)[9].

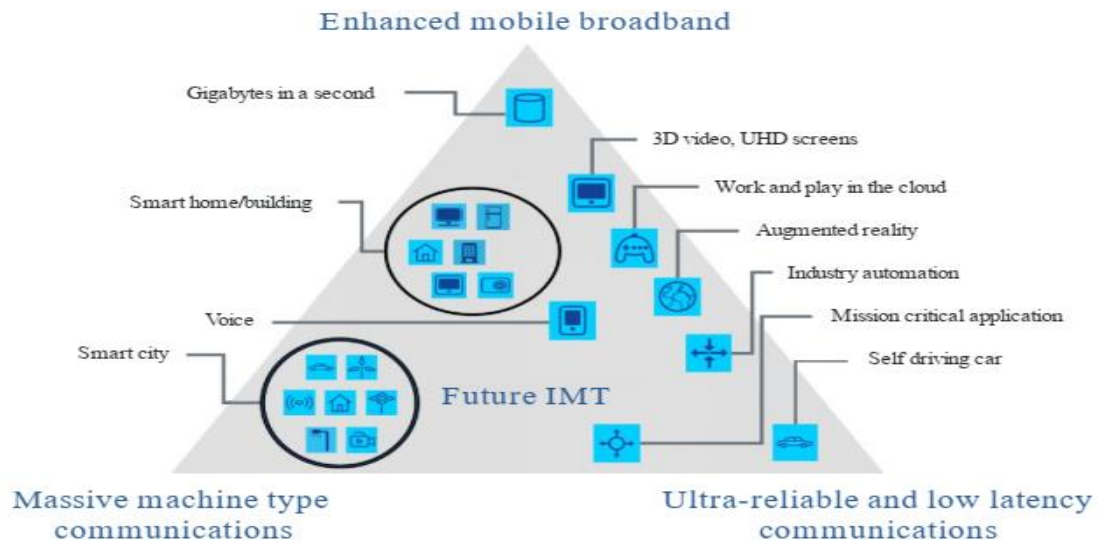
Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών από τα δίκτυα 4G και έπειτα έχουν μετατοπίσει το ενδιαφέρον τους για παροχή πιο απαιτητικών υπηρεσιών από την κλασική τηλεφωνία και ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτό είχε η εμφάνιση του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things – IoT). Ο νέος αυτός προσανατολισμός συνεχίζεται και στα δίκτυα 5G με ακόμη μεγαλύτερη ένταση. Τα κύρια σενάρια χρήσης των δικτύων 5G αφορούν εφαρμογές οι οποίες ομαδοποιούνται, σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους, στις τρεις ακόλουθες μεγάλες κατηγορίες:

α. enhanced Mobile Broadband (eMBB): Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κυρίως υπηρεσίες πολυμέσων και δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Η ανάγκη για ευρυζωνικότητα είναι απαραίτητη στις επικοινωνίες καθώς αποτελεί τη βασική παράμετρο για την επίτευξη υψηλής ποιότητας εμπειρίας στους τελικούς χρήστες.

β. Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC): Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υπηρεσίες που θέτουν αυστηρές απαιτήσεις σε παραμέτρους όπως η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα και ρυθμός μετάδοσης του δικτύου. Ορισμένα παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι ο ασύρματος χειρισμός μηχανημάτων στη βιομηχανία, η απομακρυσμένη ιατρική εξέταση ή εγχείρηση και η αυτόνομη οδήγηση.

γ. massive Machine Type Communications (mMTC): Στην κατηγορία αυτή έχουμε δίκτυα αισθητήρων τα οποία αποτελούνται από τεράστιο αριθμό συσκευών που πρέπει να συνδεθούν στο δίκτυο να αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους και να στείλουν τις μετρήσεις σε κάποιο κεντρικό σημείο. Προφανώς ο στόχος σε αυτή τη κατηγορία αφορά στη δυνατότητα παροχής συνδεσιμότητας σε ένα τεράστιο όγκο συσκευών, οι οποίες ταυτόχρονα θέλουμε να εκπέμπουν και με μικρή ισχύ για να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο χρόνο ζωής.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές όπως καθορίστηκαν από το IMT-2020.



Εικόνα 2.7: Εφαρμογές των δικτύων 5G σύμφωνα με το IMT-2020 [9]

Ήδη από τα ονόματα και μόνον μπορούμε να αντιληφθούμε ότι ο παραπάνω διαχωρισμός των εφαρμογών – υπηρεσιών γίνεται με βάση τις απαιτήσεις που έχουν από το δίκτυο σε βασικές παραμέτρους όπως ο ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση, η πυκνότητα (δυνατότητα σύνδεσης) και η κινητικότητα.

Οι απαιτήσεις που τέθηκαν από το IMT-2020 για τις παραμέτρους των δικτύων 5G [9] συνοψίζονται παρακάτω:

α. Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Peak Data Rate): Τα δίκτυα 5G σχεδιάστηκαν να μπορούν να υποστηρίξουν 10 φορές μεγαλύτερο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης από τα δίκτυα 4G. Επομένως, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης θα είναι της τάξης των 10 Gbps και σε ορισμένες περιπτώσεις θα φτάνει έως τα 20 Gbps.

β. User experienced data rate: Οι ρυθμοί μετάδοσης που απολαμβάνει ο χρήστης σε όλο το εύρος της περιοχής κάλυψης της κυψέλης θα πρέπει να τουλάχιστον 100 Mbps.

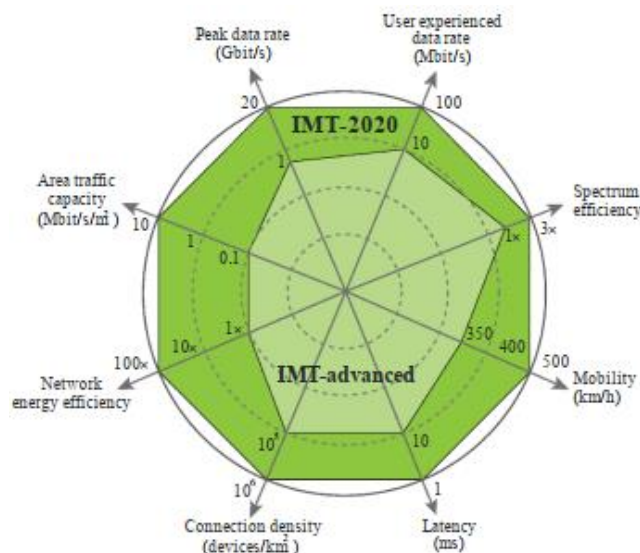
γ. Καθυστέρηση (Latency): Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει ένα πακέτο στον προορισμό του θα πρέπει να είναι της τάξης του ms. Ανάλογα με την ανοχή της υπηρεσίας στην καθυστέρηση θα μπορεί να κινείται σε ένα εύρος από 1 ms (μικρή ανοχή) έως 4 ms (μεγάλη ανοχή).

δ. Κινητικότητα (Mobility): Είναι η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να κινείται ο τελικός χρήστης διατηρώντας πλήρως λειτουργική την σύνδεση του καθώς μεταπίπτει από κόμβο σε κόμβο (handover) και την ποιότητα υπηρεσίας σε αποδεκτά επίπεδα. Στα δίκτυα 5G ο στόχος για την τιμή αυτής της παραμέτρου είναι τα 500km/h.

ε. Πυκνότητα συνδεσιμότητας (Connection Density): Η μεγάλη πύκνωση του δικτύου και ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συσκευών που έχουν πρόσβαση στο δίκτυο (massive Machine Type Communications) οδήγησαν την IMT-2020 να θέσει μια απαίτηση της τάξης του 1 εκατ. συσκευών/km<sup>2</sup>.

στ. Αποδοτικότητα Φάσματος (Spectrum Efficiency): Ο στόχος σε αυτή τη παράμετρο είναι να επιτευχθεί 3 φορές μεγαλύτερη απόδοση από τα δίκτυα 4G χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα σχήματα διαμόρφωσης και κεραιές MIMO με περισσότερα στοιχεία.

ζ. Ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency): Η ενεργειακή απόδοση αναφέρεται στη μείωση των καταναλώσεων ενέργειας τόσο από την πλευρά του δικτύου (κατανάλωση κεραιών) όσο και από την πλευρά των τελικών χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση μια τοπολογίας δικτύου η οποία είναι πολύ πυκνή και η ισχύς εκπομπής που απαιτείται είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα.



Εικόνα 2.8: Συγκριτικό διάγραμμα των βασικών παραμέτρων για τα IMT-Advanced και IMT-2020 [9]

Στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου 5G [9] και οι βασικές οντότητες του, οι οποίες έχουν ως ακολούθως:

α. Access and Mobility Management Function (AMF): Είναι η λειτουργία που είναι επιφορτισμένη με τον έλεγχο ταυτότητας, εξουσιοδότηση πρόσβασης και τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών.

β. Authentication Server Function (AUSF): Η βαθμίδα AMF αλληλοεπιδρά με την AUSF προκειμένου να διενεργήσει τον έλεγχο ταυτότητας των χρηστών.

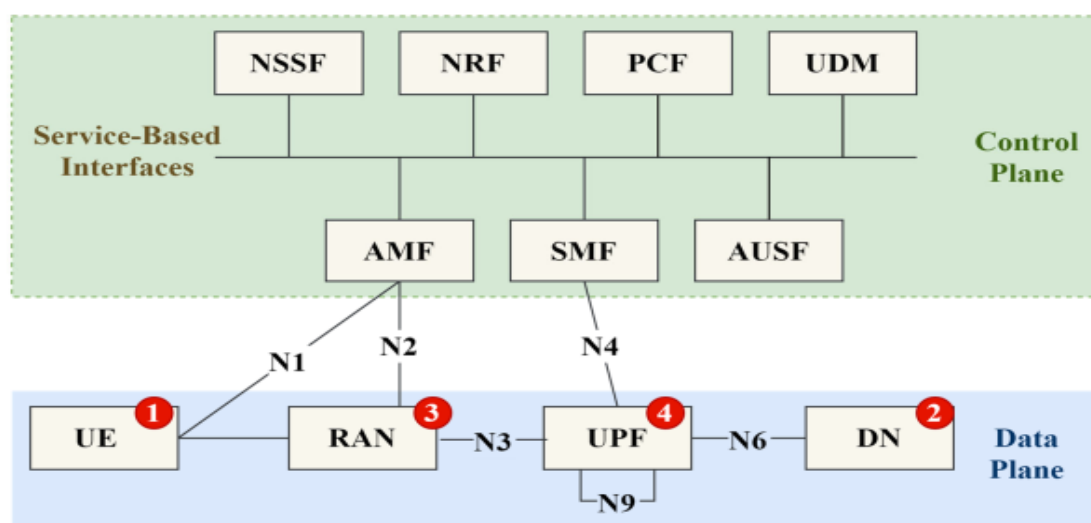
γ. Unified Data Management (UDM): Η βαθμίδα AUSF επικοινωνεί με την UDM καθώς εδώ είναι αποθηκευμένες οι πληροφορίες που αφορούν τους τελικούς χρήστες και είναι επιφορτισμένη με εργασίες όπως η καταχώρηση των δεδομένων των συνδρομητών (είδος συμβολαίου, αριθμός κάρτας SIM, πληροφοριών παρακολούθησης κ.λπ.) και ο έλεγχος ταυτότητας του χρήστη μέσω των αποθηκευμένων διαπιστευτηρίων.

δ. Session Management Function (SMF): Είναι μια λειτουργία που χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαχείριση των συνδέσεων (Session Management). Η βασική εργασία του SMF αφορά τη δημιουργία, την ενημέρωση και την αφαίρεση του Protocol Data Unit (PDU) στα πακέτα IP και τον καθορισμό των πολιτικών για το QoS σύμφωνα με τα προφίλ των χρηστών.

ε. Policy Control Function (PCF): Η λειτουργία PCF χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις πολιτικές ελέγχου στο επίπεδο ελέγχου του δικτύου. Επιπλέον, επειδή έχει την πλήρη εικόνα του δικτύου μπορεί να συμμετάσχει και λάβει αποφάσεις που αφορούν τη διαμέριση του δικτύου και τη διαχείριση της κινητικότητας.

στ. Network Slice Selection Function (NSSF): Είναι η λειτουργία με την οποία επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός των πόρων του δικτύου (network slicing), παρέχοντας υπηρεσίες προσανατολισμένες στις απαιτήσεις των χρηστών. Στην ουσία μέσω την NSSF μπορεί να επιλεγθεί ένα κομμάτι του δικτύου για να ικανοποιήσει ένα χρήστη.

ζ. NF Repository Function (NRF): Η λειτουργία NRF αποθηκεύει τις λειτουργίες δικτύου του συστήματος και είναι υπεύθυνη να ενημερώνει τις υπόλοιπες λειτουργίες δικτύου όταν μια νέα λειτουργία δικτύου εισαχθεί στο σύστημα.



Εικόνα 2.9: Αρχιτεκτονική δικτύου 5G (Service-based architecture SBA) [10]

## 2.3 Θέματα Διάδοσης ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας – Μοντελοποίηση Καναλιού

### 2.3.1 Ισχύς του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει του μήκους κύματος

Στις τηλεπικοινωνίες οι όροι συχνότητα και μήκος κύματος χρησιμοποιούνται σαν να μιλάμε για το ίδιο μέγεθος απλά η μόνη διαφορά τους είναι ότι είναι αντιστρόφως ανάλογα όπως προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$c = \lambda * f$$

,όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός στον κενό χώρο που ισούται με  $3*10^8$  m/s.

Η ισχύς λήψης μπορεί να εκφραστεί είτε χρησιμοποιώντας την ενεργό επιφάνεια των κεραιών εκπομπής και λήψης είτε το κέρδος, όπως φαίνεται στους παρακάτω ισοδύναμους τύπους [12]:

$$P_r = \frac{P_t A_{et} A_{er}}{\lambda^2 d^2}, \text{ όπου } A_{et} = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \text{ και } A_{er} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.1)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t A_{er}}{4\pi d^2} \quad (2.2)$$

$$P_r = \frac{P_t A_{et} G_r}{4\pi d^2} \quad (2.3)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.4)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρούμε ότι η ισχύς λήψης  $P_r$ , εξαρτάται από ανεξάρτητες παραμέτρους όπως η εκπεμπόμενη ισχύς  $P_t$ , τα κέρδη ή οι ενεργές επιφάνειες των κεραιών, το μήκος κύματος και την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Προσπαθώντας να απαντήσουμε στο ερώτημα τι συμβαίνει στην ισχύ λήψης καθώς αυξάνεται (μειώνεται) η συχνότητα ή ισοδυνάμως καθώς μειώνεται (αυξάνεται) το μήκος κύματος από τις παραπάνω σχέσεις μας δημιουργούνται κάποιες αμφιβολίες καθώς οι σχέσεις έρχονται σε αντίφαση μεταξύ τους. Για παράδειγμα χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.2) και (2.3) θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η  $P_r$  δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος κάτι το οποίο είναι λανθασμένο καθώς αυτό εμπεριέχεται στον υπολογισμό της ενεργούς επιφάνειας της κεραιάς. Επίσης, από τη σχέση (2.1) μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι η  $P_r$  είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του  $\lambda$  και από τη (2.4) ανάλογη του τετραγώνου του  $\lambda$ .

Επομένως, για να χρησιμοποιήσουμε σωστά τις παραπάνω σχέσεις θα πρέπει να έχουμε αποφασίσει ποια μεγέθη είναι σταθερά, έτσι αν θεωρήσουμε



τις επιφάνειες των κεραιών σταθερές κατάλληλη επιλογή είναι η (2.1) ενώ αν θεωρήσουμε σταθερά τα κέρδη των κεραιών, όπως συμβαίνει συνήθως, η σχέση (2.4) είναι η καταλληλότερη επιλογή. Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα αυξάνεται η κατεθυντικότητα και κατ' επέκταση το κέρδος των κεραιών, οπότε έχοντας κεραίες με μεγάλα κέρδη μπορούν να αντισταθμιστούν οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου [ $L_s=(4\pi d/\lambda)^2$ ]. Η αντιστάθμιση αυτή δεν είναι πανάκεια διότι όσο αυξάνεται η συχνότητα μικραίνει το μήκος κύματος και όταν αρχίζει να γίνεται συγκρίσιμο με στοιχεία του περιβάλλοντος (βροχή, ομίχλη κ.λπ.) υπεισέρχονται πρόσθετες απώλειες λόγω των φυσικών φαινομένων της σκέδασης και της διάχυσης, οι οποίες είναι πολύ μεγάλες και μπορούν να οδηγήσουν έως την διακοπή λειτουργίας της ζεύξης.

### 2.3.2 Περιγραφή του περιβάλλοντος διάδοσης

Στα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο κάθε σταθμός βάσης εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή η οποία ονομάζεται κυψέλη. Οι γειτονικοί σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες για να αποφευχθούν οι ομοδιαυλικές παρεμβολές (co-channel interference) και να διατηρούνται οι παρεχόμενες υπηρεσίες σε υψηλό επίπεδο.

Στις ασύρματες επικοινωνίες τις περισσότερες φορές τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά τη διάδοσή τους συναντούν εμπόδια τα οποία μπλοκάρουν την οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Ωστόσο, τα σήματα καταφέρνουν να φτάνουν στο δέκτη μέσω πολλαπλών ανακλάσεων στα διάφορα εμπόδια και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation). Το tradeoff της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι ότι οι εκδοχές του σήματος που φτάνουν στο δέκτη είναι διαφορετικά εξασθενημένες και καθυστερημένες δημιουργώντας πολλές αυξομειώσεις στο συνολικά λαμβανόμενο σήμα καθώς όπως αυτές προστίθενται στο δέκτη συμβάλλουν άλλοτε ενισχυτικά και άλλοτε καταστρεπτικά.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη πολυδιαδρομική διάδοση είναι οι ακόλουθοι [4, 11, 12]:

α. Ανάκλαση (Reflection): Συμβαίνει όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε λείες επιφάνειες (έδαφος, κτίρια, τοίχοι κ.λπ.) των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος.

β. Περίθλαση (Diffraction): Εμφανίζεται όταν μεταξύ πομπού και δέκτη υπάρχουν εμπόδια (βουνά, κτίρια κ.λπ.) των οποίων οι διαστάσεις είναι μεγαλύτερες από το μήκος κύματος. Τα εμπόδια αυτά λειτουργούν ως δευτερεύουσες πηγές ακτινοβολίας και προκαλούν τη διάδοση του κύματος και σε σημεία που δεν υπάρχει οπτική επαφή.

γ. Σκέδαση (Scattering): Συμβαίνει όταν στη διεύθυνση διάδοσης του σήματος υπάρχουν τραχιές επιφάνειες ή αντικείμενα μικρών διαστάσεων σε σχέση με το μήκος κύματος. Στις αστικές περιοχές παραδείγματα τέτοιων εμποδίων είναι οι ανωμαλίες του εδάφους, η βλάστηση, οι κολώνες φωτισμού, τα φανάρια και οι πινακίδες σήμανσης.

Ένας ακόμη ανασταλτικός παράγοντας στα χαρακτηριστικά των καναλιών διάδοσης είναι το φαινόμενο Doppler, το οποίο δημιουργείται από την κίνηση των κινητών σταθμών. Το φαινόμενο Doppler προκαλεί ολίσθηση στη φέρουσα συχνότητα και τα αποτελέσματα της έχουν επίδραση στις διαλείψεις (Fading) που θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα. Όταν ο χρήστης κινείται προς το σταθμό βάσης τότε στη φέρουσα συχνότητα ( $f_c$ ) προστίθεται η μετατόπιση Doppler ( $f = f_c + f_D$ ) ενώ όταν απομακρύνεται αφαιρείται ( $f = f_c - f_D$ ). Η ολίσθηση ή μετατόπιση Doppler δίνεται από την παρακάτω σχέση [11]:

$$f_D = \frac{u}{\lambda} * \cos\alpha \quad (2.5)$$

όπου  $u$  η ταχύτητα με την οποία κινείται ο κινητός χρήστης,  $\lambda$  το μήκος κύματος του σήματος και  $\alpha$  η γωνία με την οποία προσπίπτει το κύμα στον κινητό χρήστη.

### 2.3.3 Είδη διαλείψεων

Τα φαινόμενα της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης, μέσω της πολυδιαδρομικής διάδοσης, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ισχύ του σήματος και αποτελούν τη βασική αιτία για την εμφάνιση των διαλείψεων, δηλαδή των αυξομειώσεων που παρατηρούνται στο επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος στην πλευρά του δέκτη. Οι διαλείψεις κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους [4, 11, 12]:

α. Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (Large-Scale Fading): Είναι οι μεταβολές στην ισχύ λήψης που λαμβάνουν χώρα έπειτα από μετακινήσεις μεγάλων σχετικά αποστάσεων και οφείλονται στις απώλειες διάδοσης (Path Loss) και τη σκίαση (Shadowing).

β. Διαλείψεις μικρής κλίμακας (Small-Scale Fading): Είναι οι ταχείες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος που συμβαίνουν έπειτα από μικρές μετακινήσεις (της τάξης του μήκους κύματος) και οφείλονται στη χρονική διασπορά του διαύλου λόγω του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω της σχετικής κίνησης των σκεδαστών (κινούμενοι χρήστες, αυτοκίνητα κ.λπ.) και του ίδιου του δέκτη στο περιβάλλον διάδοσής.

Για να γίνει κατανοητή η διαφορά ανάμεσα στις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας θα θεωρήσουμε ότι το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη  $r_c$  είναι

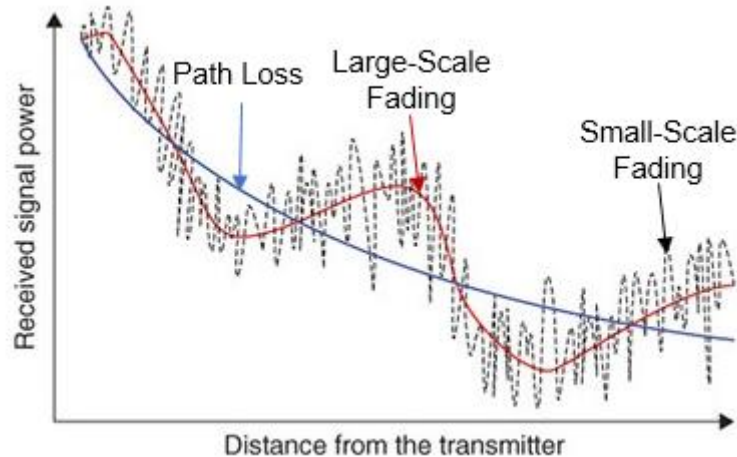
η συνέλιξη του σήματος  $s(t)$  που εκπέμφθηκε από τον πομπό και της απόκρισης του καναλιού  $h_c(t)$ :

$$r(t) = s(t) \otimes h_c(t)$$

Συναφώς με τα παραπάνω, το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως πολλαπλασιασμός δύο τυχαίων μεταβλητών:

$$r(t) = m(t) \cdot r_0(t)$$

όπου  $m(t)$  είναι η συνιστώσα που αναπαριστά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και  $r_0(t)$  η συνιστώσα για τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Η  $m(t)$  είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς (της κάθε θέσης) και συχνά χαρακτηρίζεται από μία λογαριθμοκανονική (lognormal) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που σημαίνει ότι το επιθυμητό μέγεθος (τάση ή ισχύ λήψης) μετράτε σε dB και έχει γκαουσιανή (Gaussian) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.



Εικόνα 2.10: Υπέρθυση διαλείψεων

#### 2.3.4 Μοντέλα διάδοσης και διαλείψεις μεγάλης κλίμακας

Τα μοντέλα διάδοσης χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος στην πλευρά του δέκτη για μια αυθαίρετη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι το μοντέλο ελευθέρου χώρου και το μοντέλο απλής κλίσης και η ανάλυση τους έχει όπως παρακάτω [4, 11, 12]:

##### α. Μοντέλο διάδοσης ελευθέρου χώρου

Το μοντέλο διάδοσης ελευθέρου χώρου είναι ένα ιδανικό μοντέλο για τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη, υπό την προϋπόθεση ότι δεν παρεμβάλλονται εμπόδια, δηλαδή υπάρχει οπτική επαφή (LOS), μεταξύ πομπού και δέκτη που απέχουν κατά μία απόσταση ( $d$ ). Η ισχύς λήψης στον ελεύθερο χώρο από την εξίσωση του Friis δίνεται από την παρακάτω σχέση [12]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} \quad (2.6)$$

όπου  $P_t$  η ισχύς εκπομπής,  $G_t$  και  $G_r$  τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $d$  η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και  $L$  οι απώλειες του συστήματος (απώλειες στα φίλτρα, απώλειες σύζευξης κ.λπ.). Χωρίς βλάβη της γενικότητας για το μοντέλο που μελετάμε θα θεωρήσουμε ότι το σύστημα δεν έχει επιπλέον απώλειες όποτε η τιμή του  $L$  ισούται με μονάδα. Από τη σχέση (2.6) μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου (Free Space Loss -  $L_{fs}$ ) που ορίζονται ως ο λόγος της εκπεμπόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ.

$$L_{fs}|_{dB} = 10 \log \left( \frac{P_t G_t G_r}{P_r L} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2.7)$$

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου  $L_{fs}$  είναι ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης  $d$  που χρειάζεται να διανύσει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ πομπού και δέκτη δεν υπάρχει οπτική επαφή ούτε επιτυγχάνεται καθαρότητα στην πρώτη ζώνη Fresnel κατά 60% επομένως η απόσβεση του σήματος είναι εκθετική συνάρτηση της απόστασης με εκθέτη απωλειών μεγαλύτερο του 2.

### β. Μοντέλο απλής κλίσης

Στο μοντέλο απλής κλίσης οι απώλειες διάδοσης εκφράζονται συναρτήσει της απόστασης  $d$  χρησιμοποιώντας έναν εκθέτη απωλειών που είναι ανεξάρτητος από την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη.

$$\overline{L_p(d)} \propto \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \quad (2.8)$$

όπου  $n$  ο εκθέτης απωλειών διάδοσης που εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο αυξάνονται οι απώλειες διάδοσης συναρτήσει της απόστασης  $d$  και της απόστασης αναφοράς  $d_0$ . Οι τιμές που επιλέγονται ως απόσταση αναφοράς θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές και κατάλληλες για το περιβάλλον διάδοσης που μελετάται. Επιπλέον, η απόσταση αναφοράς θα πρέπει να βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της κεραίας, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει ότι  $d_0 > (2D^2/\lambda)$ , όπου  $D$  η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών  $n$  ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης

Περιβάλλον Διάδοσης	Εκθέτης απωλειών $n$
Ελεύθερος Χώρος	2
Αστική Μακροκυψέλη	3.7-6.5

Αστική Μικροκυψέλη	2.7-3.5
Κατάστημα	1.8-2.2
Εργοστάσιο	1.6-3.3
Οικία	3

Πίνακας 3: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών [11]

Πληθώρα μετρήσεων έχουν γίνει σε περιβάλλοντα που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι απώλειες διάδοσης είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική (lognormal) κατανομή γύρω από τη μέση λαμβανόμενη ισχύ [12].

$$\overline{L_p(d)}_{dB} = L_{fs}(d_0)_{dB} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.8)$$

όπου το πρώτο σκέλος της σχέσης (2.8) εκφράζει τις απώλειες ελευθέρου χώρου σε απόσταση  $d_0$  και το δεύτερο σκέλος τις επιπλέον απώλειες διάδοσης που οφείλονται στο περιβάλλον διάδοσης και εξαρτώνται από τον εκθέτη απωλειών  $n$ .

Η σχέση (2.8) μπορεί να γίνει ακόμη πιο ακριβής αν προστεθεί μία επιπλέον τυχαία μεταβλητή  $X_\sigma$  που έχει μηδενική μέση τιμή και ακολουθεί τη γκαουσιανή (Gaussian) κατανομή. Στην ουσία η μεταβλητή  $X_\sigma$  εκφράζει την απόκλιση της τιμής των πραγματικών απωλειών διάδοσης από τη μέση τιμή αυτών. Η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται από την τιμή  $X_\sigma$ , δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο [12].

$$\overline{L_p(d)}_{dB} = L_{fs}(d_0)_{dB} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma_{dB} \quad (2.9)$$

Η σχέση (2.9) μας δίνει της διαλείψεις λόγω σκίασης (shadow fading), που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν διάφορα εμπειρικά μοντέλα τα οποία έχουν προκύψει από μετρήσεις και χρησιμοποιούνται ευρέως από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους κατά τη φάση της σχεδίασης των συστημάτων τους. Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα εμπειρικών μοντέλων που συναντάμε στη βιβλιογραφία είναι τα ακόλουθα:

- α. Μοντέλο Egli
- β. Μοντέλο Okumura - Hata
- γ. Μοντέλο COST 231 – Hata και COST 231 – Walfisch - Ikegami

## δ. Μοντέλο IEE 802.16

### 2.3.5 Διαλείψεις μικρής κλίμακας

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις ταχείες διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια πολύ μικρών χρονικών περιόδων, στην πλευρά του δέκτη. Αυτές οι διαλείψεις προκαλούνται κατά κύριο λόγο από το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης όπου δύο ή περισσότερες εκδοχές του ίδιου σήματος αφικνούνται στο δέκτη εξαιτίας μιας μικρής μετακίνησής του (της τάξης του μισού μήκους κύματος). Η διανυσματική πρόσθεση των παραπάνω πολλαπλών εκδοχών δίνει το τελικό σήμα του δέκτη, του οποίου το πλάτος και η φάση τις περισσότερες φορές εμφανίζουν συνεχείς διακυμάνσεις. Επιπλέον, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο μπορεί να εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι ακόλουθοι [4, 11, 12]:

α. Πολυδιαδρομική Διάδοση: Η ύπαρξη στο δίαυλο μεταξύ πομπού και δέκτη, εμποδίων – επιφανειών που μπορούν να προκαλέσουν ανακλάσεις και σκεδάσεις του σήματος δημιουργούν μεταβολές στη φάση, το πλάτος και την καθυστέρηση άφιξης μεταξύ των διάφορων εκδοχών. Αυτές οι τυχαίες μεταβολές της φάσης και του πλάτους που υφίστανται οι διάφορες συνιστώσες συνήθως προκαλούν αυξομειώσεις στη λαμβανόμενη ισχύ του συνολικού σήματος.

β. Κινητικότητα των τερματικών: Η σχετική κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη προκαλεί χρονική μεταβολή της φέρουσας συχνότητας λόγω της μετατόπισης Doppler καθώς οι διάφορες συνιστώσες μπορεί να εμφανίζουν θετική ή αρνητική μετατόπιση συχνότητας ανάλογα με το αν ο πομπός πλησιάζει ή απομακρύνεται από το δέκτη αντιστοίχως.

γ. Κινητικότητα των σκεδαστών: Η ύπαρξη κινούμενων σκεδαστών (άνθρωποι, αυτοκίνητα κ.λπ.) εντός του περιβάλλοντος διάδοσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις ασύρματες επικοινωνίες καθώς η κάθε συνιστώσα του σήματος υφίσταται διαφορετική μετατόπιση Doppler, η οποία ταυτόχρονα μεταβάλλεται τυχαία με το χρόνο καθώς σε κάθε χρονική στιγμή το περιβάλλον είναι διαφορετικό.

δ. Εύρος ζώνης του σήματος: Όταν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μεγαλύτερο από αυτό του διαύλου τότε προκαλείται παραμόρφωση του σήματος και η επίδραση των διαλείψεων είναι ήσσονος σημασίας.

Συνδυάζοντας τους ανωτέρω παράγοντες μπορούμε να ταξινομήσουμε τις διαλείψεις μικρής κλίμακας σε δύο μεγάλες κατηγορίες και εν συνεχεία να τις χρησιμοποιήσουμε για να διακρίνουμε τους διαύλους, όπως έχουν παρακάτω:

α. Διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης: Δίαυλοι που προκαλούν επίπεδες ή επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις.

β. Διαλείψεις λόγω διασποράς Doppler : Δίαυλοι που εμφανίζουν αργές και ταχείες διαλείψεις.

Πριν ξεκινήσουμε την μελέτη των διαλείψεων που προκαλούν οι δίαυλοι θα ορίσουμε κάποιες βασικές παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν στην παρακάτω ανάλυση.

α. Διασπορά Καθυστέρησης ( $\sigma_\tau$ )

Η διασπορά καθυστέρησης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [11,12]:

$$\sigma_\tau = \sqrt{(\overline{\tau^2}) - (\overline{\tau})^2} \quad (2.10)$$

όπου

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k}{\sum_k \alpha_k^2} \quad (2.11)$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k^2}{\sum_k \alpha_k^2} \quad (2.12)$$

Τις πληροφορίες για τα παραπάνω μεγέθη τις εξάγουμε από το προφίλ καθυστέρησης ισχύος (power delay profile) και συγκεκριμένα το  $\alpha_k$  και  $\tau_k$  είναι αντίστοιχα το πλάτος και η καθυστέρηση της κ-οστής πολυδιαδρομικής συνιστώσας. Εν συνεχεία υπολογίζουμε τη μέση επιπλέον καθυστέρηση (mean excess delay) (σχέση 2.11), τη δεύτερη ροπή της επιπλέον καθυστέρησης (σχέση 2.12) και τέλος τη διασπορά καθυστέρησης  $\sigma_\tau$  (σχέση 2.10).

β. Εύρος ζώνης συνοχής ( $B_c$ )

Το προφίλ ισχύος μας δίνει πληροφορίες για τη συμπεριφορά του διαύλου στο πεδίο του χρόνου. Το αντίστοιχο μέγεθος που χρησιμοποιείται στο πεδίο της συχνότητας για να προσδιοριστεί η διασπορά του φάσματος είναι το εύρος ζώνης συνοχής (Coherence Bandwidth) που σαν μέγεθος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διασποράς καθυστέρησης. Στην ουσία το εύρος συνοχής είναι το φασματικό εύρος εντός του οποίου δύο διαφορετικές συχνότητες είναι συσχετισμένες κατά πλάτος.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ακριβής τύπος, ως εύρος ζώνης συνοχής ορίζεται το εύρος συχνοτήτων για το οποίο η συσχέτιση δύο σημάτων υπερβαίνει το 0.5 και η προσεγγιστική σχέση που ισχύει είναι η ακόλουθη [11,12]:

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.13)$$

γ. Διασπορά Doppler ( $B_D$ ) και χρόνος συνοχής ( $T_c$ )

Η διασπορά καθυστέρησης και το εύρος ζώνης συνοχής είναι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη χρονική διαπλάτυνση του καναλιού εξαιτίας της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Ενώ οι παράμετροι διασπορά Doppler (Doppler spread) και χρόνος συνοχής (coherence time) χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη μεταβλητότητα του διαύλου λόγω της σχετικής κίνησης των σκεδαστών που υπάρχουν στο περιβάλλον διάδοσης ή μικρών αλλαγών της θέσης του πομπού ή του δέκτη.

Η διασπορά Doppler ( $B_D$ ) είναι το φασματική διεύρυνση που υφίσταται ένα σήμα λόγω της μεταβλητότητας του διαύλου και δίνεται από τον παρακάτω τύπο [11]:

$$B_D = 2f_{Dmax} = \frac{2u}{\lambda} \quad (2.14)$$

Συνεπώς, το λαμβανόμενο σήμα έχει φασματικές συνιστώσες στο εύρος  $f_c - f_{Dmax}$  έως  $f_c + f_{Dmax}$ , και από την σχέση (2.14) συμπεραίνουμε ότι η φασματική διεύρυνσή του εξαρτάται από τη μετατόπιση Doppler.

Ο χρόνος συνοχής είναι το δυαδικό ανάλογο της διασποράς Doppler και είναι το μέγεθος που μετρά τη διάρκεια για την οποία ο δίαυλος είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται. Η σχέση που συνδέει τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι η ακόλουθη [11]:

$$T_c \approx \frac{1}{B_D} \quad (2.15)$$

### 2.3.6 Ταξινόμηση διαύλων με διαλείψεις

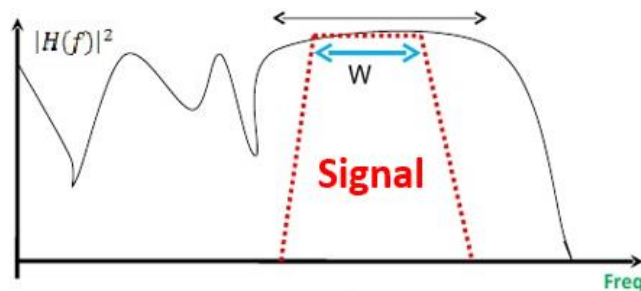
α. Επίπεδες Διαλείψεις

Οι δίαυλοι προκαλούν επίπεδες ή μη επιλεκτικές διαλείψεις όταν ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσουν οι συνιστώσες δεν ξεπερνά τη διάρκεια του συμβόλου. Επομένως, δεδομένου ότι όλες οι εκδοχές του ίδιου σήματος αφικνούνται στο δέκτη σε χρόνο μικρότερο από τη διάρκεια του συμβόλου ( $T_s$ ) δεν προκαλείται διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference – ISI).



Αυτού του είδους οι δίαυλοι έχουν σταθερό κέρδος και γραμμική φάση σε εύρος συχνοτήτων που είναι μεγαλύτερο από εύρος ζώνης του σήματος. Σε διαύλους με επίπεδες διαλείψεις τα φασματικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου σήματος παραμένουν αναλλοίωτα καθώς διαδίδεται στο κανάλι καθώς αυτό δεν προκαλεί καμία παραμόρφωση λόγω της χρονικής διασποράς. Οι δίαυλοι επίπεδων διαλείψεων συχνά αναφέρονται και ως δίαυλοι στενής ζώνης καθώς το εύρος ζώνης του σήματος είναι πολύ μικρότερο από το εύρος ζώνης του διαύλου. Ένα σήμα εύρους ζώνης  $W$  υπόκειται σε επίπεδες διαλείψεις αν ισχύουν οι παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις [4, 11, 12]:

$$W \ll B_c \quad \text{ή} \quad T_s \gg \sigma_\tau$$

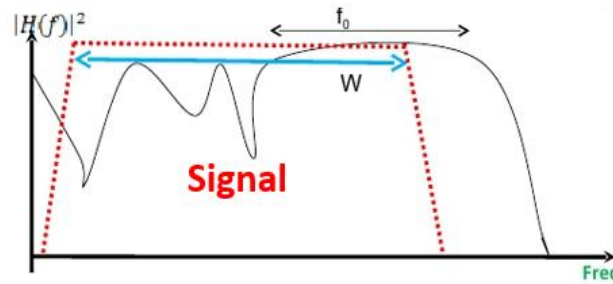


Εικόνα 2.11: Διάδοση σήματος σε δίαυλο με επίπεδες διαλείψεις [13]

#### β. Επιλεκτικές διαλείψεις ως προς τη συχνότητα

Σε αντίθεση με τις επίπεδες διαλείψεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, αν ο δίαυλος εμφανίζει σταθερό κέρδος και γραμμική φάση σε εύρος συχνοτήτων που είναι πολύ μικρότερο από εύρος ζώνης του σήματος τότε λέμε ότι ο δίαυλος προκαλεί διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή η υπέρθεση στο δέκτη διαφορετικά καθυστερημένων και εξασθενημένων συνιστωσών λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης προκαλούν παραμόρφωση του σήματος. Επομένως, οι δίαυλοι με επιλεκτικές διαλείψεις προκαλούν χρονική διασπορά των συμβόλων, καθώς υπάρχουν καθυστερημένες εκδοχές του σήματος που φτάνουν στο δέκτη ενώ αυτός έχει ήδη ξεκινήσει να λαμβάνει εκδοχές νέου (διαφορετικού) συμβόλου, το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι οι δίαυλοι που προκαλούν επιλεκτικές διαλείψεις μεταχειρίζονται τις φασματικές συνιστώσες του σήματος με διαφορετικό τρόπο. Ένα σήμα εύρους ζώνης  $W$  υπόκειται επιλεκτικές διαλείψεις ως προς τη συχνότητα αν ισχύουν οι παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις [4, 11, 12]:

$$W > B_c \quad \text{ή} \quad T_s < \sigma_\tau$$



Εικόνα 2.12: Διάδοση σήματος σε δίαυλο με επιλεκτικές διαλείψεις [13]

γ. Ταχείες διαλείψεις

Οι δίαυλοι προκαλούν ταχείες διαλείψεις όταν η κρουστική απόκρισή τους μεταβάλλεται ταχύτερα από τη διάρκεια του συμβόλου, δηλαδή ο χρόνος συνοχής του διαύλου είναι μικρότερος από τη διάρκεια του προς μετάδοση συμβόλου. Εξετάζοντας το πεδίο των συχνοτήτων η διασπορά Doppler προκαλεί παραμόρφωση και φασματική διασπορά και οι διαλείψεις που προκαλούνται από αυτή χαρακτηρίζονται ως επιλεκτικές ως προς το χρόνο. Η παραμόρφωση που προκαλείται από τις ταχείες διαλείψεις είναι ανάλογη της διασποράς Doppler, δηλαδή γίνεται εντονότερη η εμφάνισή της καθώς αυξάνει η διασπορά Doppler σε σχέση με το εύρος ζώνης του σήματος που μεταδίδεται. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι ένας δίαυλος που εμφανίζει ταχείες ή αργές διαλείψεις, δεν προσδιορίζει αν την ίδια στιγμή προκαλεί επιλεκτικές ή μη επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις. Ένα σήμα υπόκειται σε ταχείες διαλείψεις αν ισχύουν οι παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις [4, 11, 12]:

$$T_s > T_c \quad \text{ή} \quad W < B_D$$

δ. Αργές Διαλείψεις

Στην περίπτωση των αργών διαλείψεων η κρουστική απόκριση των διαύλων μεταβάλλεται με πιο αργό ρυθμό σε σύγκριση με το υπό μετάδοση σήμα. Σε αυτή την περίπτωση ο δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί σταθερός κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός ή περισσότερων συμβόλων. Στο πεδίο της συχνότητας, η διασπορά Doppler που εμφανίζει ο δίαυλος είναι πολύ μικρότερη από το εύρος ζώνης του σήματος. Ένα σήμα υπόκειται σε αργές διαλείψεις αν ισχύουν οι παρακάτω ισοδύναμες σχέσεις [4, 11, 12]:

$$T_s \ll T_c \quad \text{ή} \quad W \gg B_D$$

## Κεφάλαιο 3

### Ανάλυση των δικτύων 6<sup>ης</sup> γενιάς (6G Networks)

#### 3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 6G

Στο παρόν κεφάλαιο θα διερευνηθεί ο «οδικός άξονας» για την υλοποίηση των ευρυζωνικών επικοινωνιών στα σύγχρονα συστήματα 6G. Αναζητώντας την υπάρχουσα βιβλιογραφία γύρω από τα δίκτυα 6G θα παραθέσουμε τις αλλαγές που πρόκειται να επιτευχθούν σε βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος όπως η χωρητικότητα, η καθυστέρηση, ο ρυθμός μετάδοσης κ.α. και εν συνεχεία, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες μετρικές, θα εξετάσουμε πως αυτές οι αλλαγές επιδρούν στην ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) που αντιλαμβάνονται οι τελικοί χρήστες (End Users – EU).

Η βελτίωση των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι άμεσα εξαρτημένη από τα δομικά στοιχεία των ασυρμάτων δικτύων (φάσμα συχνοτήτων, υποδομή, πρωτόκολλα/ αλγόριθμοι) τα οποία πρέπει να διερευνηθούν εκ νέου προκειμένου να συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων απαιτείται στο δίκτυο να ενσωματωθούν συχνότητες της τάξης των THz (0.1 THz – 10 THz), οι οποίες θα συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και στην υλοποίηση ζεύξεων σημείο προς σημείο (Point to Point – PtP) στο δίκτυο οπισθόζευξης (backhaul) με τεράστια χωρητικότητα. Σε ότι αφορά την υποδομή αναφερόμαστε στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας ultra – massive MIMO, των έξυπνων ανακλαστικών επιφανειών (Intelligent Reflecting Surfaces – IRS), της cell – free δικτύωσης η οποία είναι προσανατολισμένη στο χρήστη και εύκολα κλιμακούμενη και τέλος στα μη επίγεια δίκτυα (non – terrestrial networks) όπου θα γίνεται χρήση μη επανδρωμένων αεροχημάτων (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) και δορυφόρων για αύξηση της παρεχόμενης κάλυψης. Τέλος, στα πρωτόκολλα / αλγόριθμους αναφερόμαστε σε βελτιώσεις που πρέπει να επέλθουν στην κωδικοποίηση, στη διαμόρφωση και τις χρησιμοποιούμενες κυματομορφές προκειμένου να επιτευχθούν οι προδιαγραφές που αφορούν τη χαμηλότερη καθυστέρηση, την υψηλότερη αξιοπιστία και τη μειωμένη πολυπλοκότητα του συστήματος. [14]

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να κατανοήσουμε ότι οι παραπάνω βελτιώσεις θα χρησιμοποιηθούν έχοντας δύο κύριες κατευθύνσεις, η μεν πρώτη προς την πλευρά της εξασφάλισης καλύτερων ευρυζωνικών επικοινωνιών και η δεύτερη, αλλά όχι λιγότερο σημαντική, προς την πλευρά της παροχής πλήρους κάλυψης καθώς αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους των δικτύων 6G.

## 3.2 Βασικοί πυλώνες ανάπτυξης των δικτύων 6G

### 3.2.1 Οραματίζοντας τα δίκτυα 6G

Τα δίκτυα 6G θα βασίζονται σε τεχνολογίες οι οποίες κατά τη σχεδίαση και την ανάπτυξη των δικτύων 5G δεν ήταν ακόμη ώριμες για υλοποίηση και είχαν αποκλειστεί. Επιπλέον, θα ενσωματώνει νέα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που προέκυψαν με την εξέλιξη και την ωρίμανση διάφορων νέων τεχνολογιών όπως η μηχανική μάθηση (Machine Learning – ML) και η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI).

Εν συνεχεία θα παραθέσουμε κάποια χαρακτηριστικά τα οποία με μεγάλη βεβαιότητα θα ενσωματωθούν στα δίκτυα 6G και θα μας δείξουν πως οραματίζεται η ερευνητική κοινότητα τις επικοινωνίες του 2030. [14]

α. Πύκνωση του δικτύου: Τα δίκτυα 6G θα βασίζονται στην μεγάλη πύκνωση του δικτύου, από πλευράς σημείων πρόσβασης (Access Points – APs), τα οποία θα μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους διαμορφώνοντας έτσι ένα cell – free δίκτυο το οποίο θα παρέχει αξιόπιστες επικοινωνίες εντός της περιοχής κάλυψης.

β. Κατανεμημένη επεξεργασία (Distributed Processing): Θα υπάρχει εκτεταμένη χρήση της κατανεμημένης επεξεργασίας με τη χρήση της τεχνολογίας cloud – RAN, προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι απαιτούμενοι υπολογιστικοί πόροι θα βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον τελικό χρήστη για να ελαχιστοποιούνται οι καθυστερήσεις διάδοσης.

γ. Χρήση υψηλών συχνοτήτων: Αναμένεται να χρησιμοποιηθούν χιλιομετρικές συχνότητες (mmWave 10 GHz – 100 GHz), συχνότητες της τάξης των THz (0.1 THz – 10 THz) και μπορεί να φτάσουν μέχρι τη μπάντα του ορατού φωτός (Visible Light Band 430 THz – 790 THz), προκειμένου να υλοποιήσουν ζεύξεις σημείο προς σημείο οι οποίες θα παρέχουν μεγάλη χωρητικότητα, στην μετάδοση δεδομένων από και προς το δίκτυο κορμού.

δ. Διαμέριση του δικτύου (Network Slicing): Με τη χρήση της διαμέρισης του δικτύου δίνεται η δυνατότητα να εξειδικεύονται οι υπηρεσίες ανάλογα με τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών, με αποτέλεσμα το δίκτυο να μπορεί να αποφασίσει κάθε φορά τους απαιτούμενους υπολογιστικούς πόρους προκειμένου να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ποιότητα της εκάστοτε υπηρεσίας.

ε. Ενσωμάτωση μη επίγειων δικτύων (Non – Terrestrial Networks - NTN): Θα υπάρχει αυξημένη χρήση UAVs και δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit – LEO) προκειμένου να συμβάλλουν στη κάλυψη περιοχών που δεν υπάρχει υποδομή (πχ ωκεανοί) και επιπλέον στην αποσυμφόρηση του δικτύου όπου κρίνεται αναγκαίο.

στ. Ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης: Η χρήση της μηχανικής μάθησης θα συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της πολυπλοκότητας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων, την κατανομή των πόρων (resource allocation) και τη βελτιστοποίηση του τρόπου με τον οποίο γίνεται το Handover.

### 3.2.2 Βασικοί πυλώνες ανάπτυξης και απαιτήσεις των δικτύων 6G

Συγκρίνοντας τα δίκτυα 5G με τα 6G, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στα δίκτυα 5G το κύριο ενδιαφέρον εστιάζονταν στην επίτευξη στόχων που σχετίζονταν με την υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, τη μαζική συνδεσιμότητα, την αυξημένη αξιοπιστία (reliability) και τη χαμηλή καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά στα δίκτυα 6G η εστίαση αφορά σε χαρακτηριστικά όπως η βιωσιμότητα, η κάλυψη, ο συγχρονισμός, ο ακριβής καθορισμός της τοποθεσίας (geo-location) και η αξιοπιστία (trustworthiness).

Τα δίκτυα 5G έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης της τάξης του 1 ms, όμως κατά τη σχεδίαση τους δεν εξετάστηκε η δυνατότητα να μπορεί να εγγραφεί για το χρόνο συγχρονισμού. Συνεπώς, μεταξύ δύο διαφορετικών ροών ή συνοδών που δημιουργούνται από διαφορετικά αντικείμενα και απαιτείται η αλληλεπίδρασή τους, γίνεται αντιληπτό ότι θα υπάρχει μία χρονική διαφορά. Στα δίκτυα 6G αυτά τα αντικείμενα θα αλληλοεπιδρούν σε μεγάλο βαθμό είτε σε εικονικό είτε πραγματικό περιβάλλον και είναι απαραίτητο αυτές οι χρονικές διαφορές να περιορίζονται εντός κάποιων ορίων προκειμένου ο τελικός χρήστης να απολαμβάνει την υπηρεσία σε πραγματικό χρόνο και έχοντας την καλύτερη δυνατή εμπειρία. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στη επίτευξη της παραπάνω δυνατότητας θα παίξει ο περιορισμός της διακύμανσης της καθυστέρησης (jitter) και ο ακριβής καθορισμός της τοποθεσίας (geo-location). [15]

Η συνδεσιμότητα είναι άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να σχεδιαστεί σωστά στα δίκτυα 6G, καθώς στα σύγχρονα δίκτυα οι συνδέσεις πέρα από τις υψηλές ταχύτητες (της τάξης των Tbps) είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα και προσαρμοστικότητα. Αν για παράδειγμα έχουμε τη μετάδοση ενός βίντεο 4D αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, οι οποίοι μπορούν να επιτευχθούν όταν έχουμε διαθέσιμο εύρος ζώνης, ενδεχομένως να πρέπει να εξεταστεί και η ανάγκη για συμπίεση δεδομένων, η οποία με την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και έξυπνων αλγορίθμων θα μπορεί να γίνει με το βέλτιστο και αποδοτικότερο τρόπο. Επιπροσθέτως, για την επίτευξη αυτού του τεράστιου ρυθμού μετάδοσης απαιτείται η ύπαρξη ενός αξιόπιστου δικτύου οπισθόζευξης (backhaul) που θα έχει μικρή καθυστέρηση. Επιπλέον, στα δίκτυα 6G απαιτείται ευέλικτη πρόσβαση στο διαθέσιμο φάσμα, ακριβείς πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού (Channel State Information – CSI), εκτέλεση εργασιών

προκωδικοποίησης για τη χρήση κατανεμημένου mMIMO και όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. [15]

Συμπερασματικά, τα δίκτυα 6G θα προσφέρουν εκπληκτικές δυνατότητες δικτύου που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση της κοινωνίας των πληροφοριών του 2030. Συνοπτικά, στην επόμενη παράγραφο παρατίθενται οι απαιτήσεις του 6G, οι οποίες περιλαμβάνουν τις ακόλουθες προδιαγραφές [16]:

α. Αποδοτικότητα φάσματος (Spectrum Efficiency) να είναι 5 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του 5G.

β. Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Peak Data Rate) τουλάχιστον 1 Tbps και να μπορεί να φτάσει έως 10 Tbps σε ζεύξεις που αφορούν κυρίως το δίκτυο οπισθόζευξης.

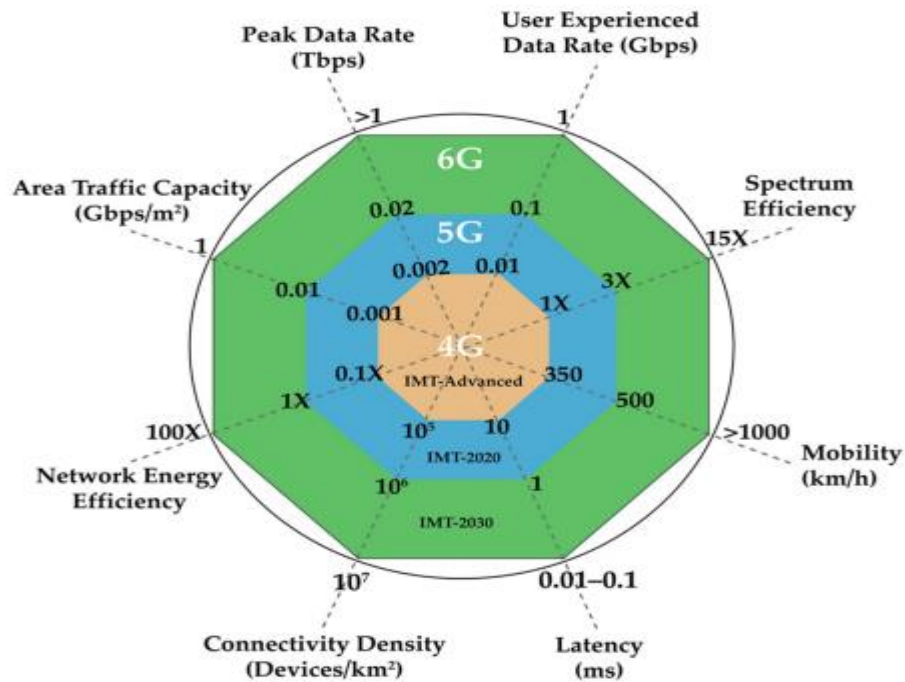
γ. Ρυθμός μετάδοσης που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης από 1 Gbps και να υπάρχει η δυνατότητα να επιτευχθούν ρυθμοί έως 10 Gbps σε δίκτυα εσωτερικών χώρων.

δ. Πυκνότητα συνδεσιμότητας μεγαλύτερη (Connectivity Density) δέκα φορές σε σχέση με το 5G, επομένως μιλάμε για δυνατότητα σύνδεσης  $10^7$  συσκευών/km<sup>2</sup> και χωρητικότητα κίνησης 1 Gbps/m<sup>2</sup> για hotspot δίκτυα.

ε. Συνδεσιμότητα σε συνθήκες κίνησης με μεγάλες ταχύτητες ( $\geq 1000$  χλμ./ώρα) και ανοχή στην καθυστέρηση από 10 έως 100  $\mu$ s σε περίπτωση που εμπλέκονται συστήματα αεροπορίας για να υπάρχει αποδεκτή ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) για το χρήστη.

στ. Ενεργειακή απόδοση 10 έως 100 φορές υψηλότερη από αυτή του 5G.

Στην παρακάτω εικόνα συνοψίζονται οι βασικές προδιαγραφές για τα δίκτυα 4G, 5G και 6G, δίνοντας με σχηματική αναπαράσταση στις αλλαγές – βελτιώσεις που επέρχονται από τη μία γενιά επικοινωνιών στην επόμενη.



Εικόνα 3.13: Βασικές προδιαγραφές δικτύων 4G, 5G και 6G [15]

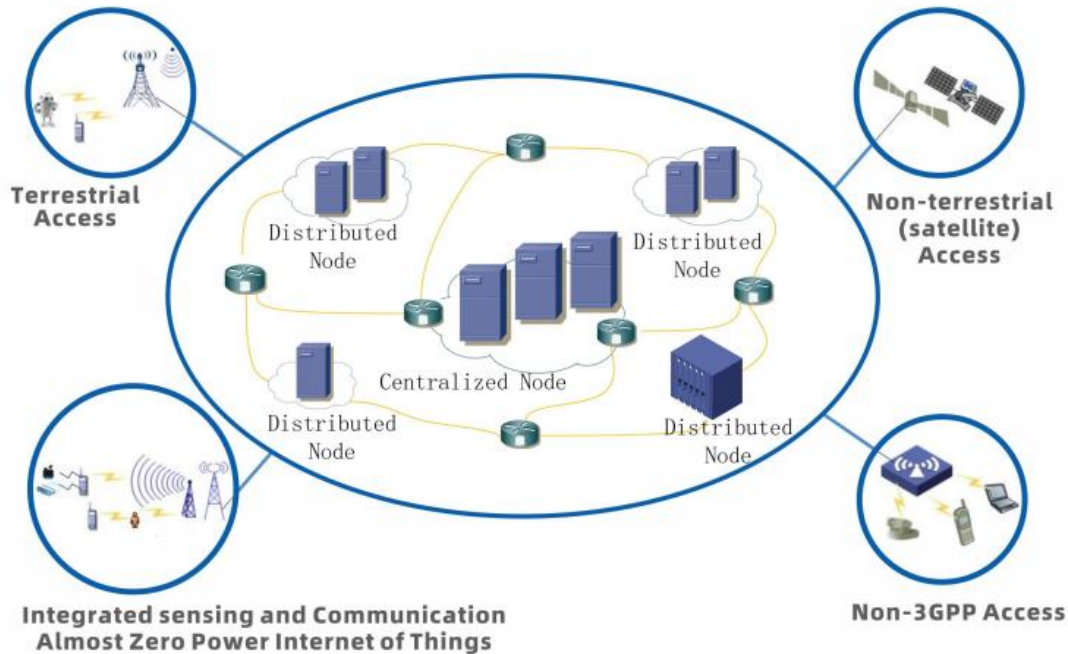
Στον παρακάτω συγκριτικό πίνακα συνοψίζονται οι διαφορές για τα δίκτυα 5G και 6G και από τα μεγέθη που βλέπουμε είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι αλλαγές που πρόκειται να επέλθουν στις κινητές επικοινωνίες του 2030 θα είναι τεράστιες.

Χαρακτηριστικό	5G	6G
Συχνότητες Λειτουργίας	3 GHz – 99 GHz	100 GHz – 10 THz
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	20 Gbps	1 Tbps
Καθυστερήση	1 ms	10–100 $\mu$ s
Κινητικότητα	500 km/h	>1000 km/h
Διαθέσιμο Φάσμα	30 GHz	10–100 μεγαλύτερο από του 5G
Αποδοτικότητα φάσματος	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Πυκνότητα συνδεσιμότητας	$10^6$ συσκευών /km <sup>2</sup>	$10^7$ συσκευών /km <sup>2</sup>
Κάλυψη	99.99%	99.9999%
Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης	Μέτρο	Εκατοστό
Ενσωμάτωση δορυφόρων	Μερική	Πλήρης
Αξιοπιστία	$10^{-5}$	$10^{-9}$

Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας των βασικών προδιαγραφών 5G και 6G [16-18]

### 3.3 Αρχιτεκτονική των δικτύων 6G

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μια ενδεικτική τοπολογία των δικτύων 6G.



Εικόνα 3.14: Τοπολογία συστήματος 6G [6]

Αρχικά, από την παραπάνω τοπολογία μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι υπάρχει η απαίτηση για συνεργασία μεταξύ του κεντροποιημένου (Centralized) και κατακεμημένου δικτύου (Distributed Network) του συστήματος. Το κεντροποιημένο δίκτυο περιλαμβάνει κόμβους οι οποίοι είναι επιφορτισμένοι με την εκτέλεση απαιτητικών διεργασιών από πλευράς υπολογιστικών πόρων, όπως για παράδειγμα διεργασίες ασφάλειας (π.χ. αυθεντικοποίηση των χρηστών). Από την άλλη πλευρά το κατακεμημένο δίκτυο περιλαμβάνει κόμβους οι οποίοι έχουν λιγότερες δυνατότητες (από πλευράς υπολογιστικών πόρων) που όμως μπορούν να εξυπηρετήσουν τμήματα του δικτύου και βελτιώνουν εν γένει τη συνολική απόδοση του συστήματος καθώς μόνο οι απαιτητικές υπηρεσίες θα χρειαστεί να μεταβούν στο δίκτυο κορμού για να εκτελεστούν. Επομένως, με τα κατακεμημένα δίκτυα μπορούμε να αποφύγουμε σε κάποιες περιπτώσεις την υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών που προκαλούνται λόγω βλαβών στο κεντροποιημένο δίκτυο, που αποτελεί ένα single point of failure. Επιπλέον, με τη χρήση των κατακεμημένων δικτύων παρατηρούμε ότι το σύστημα μπορεί να βελτιώσει την ευελιξία και αξιοπιστία του καθώς μπορεί να δεσμεύσει του απαραίτητους πόρους για να παρέχει υπηρεσίες προσανατολισμένες στις απαιτήσεις των χρηστών.



Μια άλλη διάσταση που παρατηρούμε στο σύστημα είναι ότι τα επίγεια και τα μη επίγεια δίκτυα δρουν συμπληρωματικά το ένα ως προς το άλλο για την παροχή όσο το δυνατό μεγαλύτερης κάλυψης με γνώμονα να πετύχουν την προδιαγραφή για κάλυψη 99.9999%. Από την άλλη πλευρά όμως θα πρέπει να καταλάβουμε όμως αυτό θα αυξήσει δραματικά τον αριθμό των τελικών χρηστών οι οποίοι θα έχουν απαιτήσεις για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, με μικρή καθυστέρηση, με εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας, διαδραστικές εφαρμογές κ.λπ.[19]

Επιπλέον, τα νέα αυτά συστήματα ενσωματώνουν έννοιες όπως το ISAC (Integrated sensing and Communication), που αφορά δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα συλλέγουν δεδομένα, θα τα επεξεργάζονται και θα αλληλοεπιδρούνε μεταξύ τους και με το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο προκειμένου να υποστηρίξουν εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, οι έξυπνες πόλεις, η βιομηχανική αυτοματοποίηση και η παρακολούθηση της υγείας. Σε συνδυασμό με το προηγούμενο έχουμε και την έννοια του σχεδόν μηδενικής ενέργεια διαδίκτυο των πραγμάτων (Almost Zero Power IoT - AZP – IoT), που αναφέρεται σε συσκευές ή συστήματα τα οποία λειτουργούν με πολύ μικρή κατανάλωση και είναι αποδοτικά για μακροπρόθεσμή χρήση, και είναι ιδανικά για εφαρμογές σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες τοποθεσίες.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί ότι για να επιτευχθούν όλες αυτά τα νέα χαρακτηριστικά και το σύστημα να λειτουργεί με βέλτιστο και αποδοτικό τρόπο θα πρέπει να αντιληφθούμε ότι απαιτείται άριστη συνεργασία ανάμεσα στο δίκτυο των νέων δυνατοτήτων (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρή καθυστέρηση, αξιοπιστία κ.λπ.) και στην οντότητα που εκτελεί την ανάθεση των υπολογιστικών πόρων (Multi-Access Edge Computing – MEC), ο συνδυασμός των οποίων στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως «communications and computing convergence».

Τέλος, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης κρίνεται ζωτικής σημασίας για να επιτευχθεί αυτή η σύγκλιση ανάμεσα στο δίκτυο και τους υπολογιστικούς πόρους. Η τεχνητή νοημοσύνη μέσω της λήψης πραγματικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θα είναι σε θέση να βελτιώνει την αποδοτικότητα μικρών διεργασιών σε τμήματα του συστήματος και εν γένει τη συνολική απόδοσή του.

### 3.4 Περιγραφή εξοπλισμού υλοποίησης των δικτύων 6G (Φάσμα συχνοτήτων, κεραίες κ.λπ.)

#### 3.4.1 Το φάσμα συχνοτήτων στα δίκτυα 6G

Μία από τις σημαντικότερες αλλαγές που επέρχεται στις επικοινωνίες του 2030 είναι το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους τελικούς χρήστες για την μετάδοση των δεδομένων τους. Στην πάροδο των ετών τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών έχουν επιδειξει

σημαντική εξέλιξη σε ότι αφορά το φάσμα συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών για υψηλότερες ταχύτητες στη μεταφορά δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό και με οδηγό να μπορέσουν τα δίκτυα 6G να υλοποιήσουν όλα όσα υπόσχονται, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω απαιτείται η χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων οι οποίες θα είναι της τάξης των THz και μπορεί να φτάσουν μέχρι τη μπάντα του ορατού φωτός (Visible Light Band - VLB).

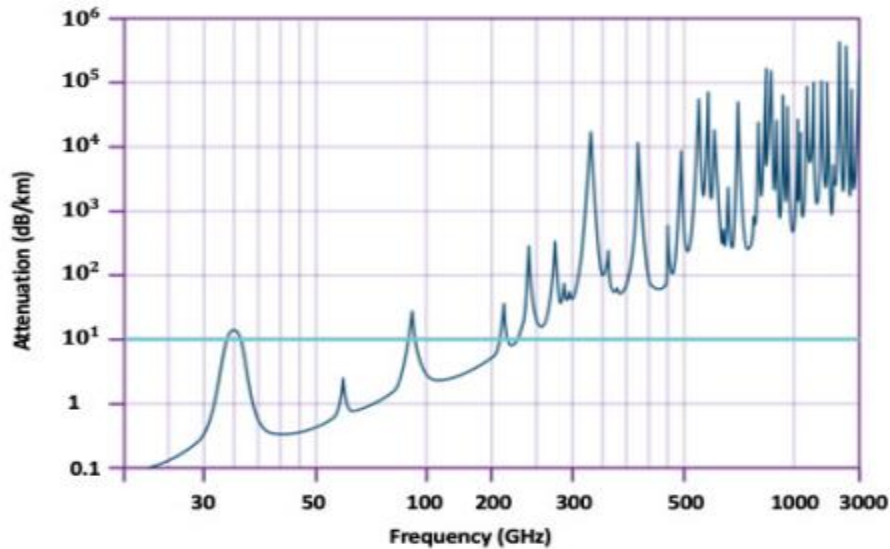
α. Συχνότητες της τάξης των THz (0.1 THz – 10 THz)

Η πιθανή μετάβαση σε τόσο υψηλές συχνότητες μπορεί να αυξήσει το διαθέσιμο εύρος ζώνης (Bandwidth) και να βοηθήσει στην επίτευξη ρυθμών μετάδοσης της τάξης των Tbps, που είναι από τους βασικούς στόχους των δικτύων 6G, από την άλλη πλευρά όμως, πριν την οποιαδήποτε μετάβαση θα πρέπει να εξεταστούν οι νέες συνθήκες διάδοσης που δημιουργούνται. [20]

Είναι ευρέως γνωστό ότι απώλειες ελευθέρου χώρου, θεωρώντας ότι χρησιμοποιούμε κεραιές σταθερού κέρδους, είναι ανάλογες (αυξάνονται ή μειώνονται) με το τετράγωνο της φέρουσας συχνότητας, όταν χρησιμοποιούνται κεραιές σταθερού εμβαδού και στα δύο άκρα της ζεύξης. Επομένως, με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών μπορούμε έως ένα βαθμό να αντισταθμίσουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου. Υπό το πρίσμα των ανωτέρω οδηγούμαστε σε συστήματα επικοινωνιών που θα χρησιμοποιούν κατά κόρον την τεχνολογία των πολλαπλών κεραιών (massive-MIMO, ultramassive-MIMO) και πλέον θα έχουμε κατευθυντικές δέσμες από τους σταθμούς βάσης προς τους τελικούς χρήστες. [20]

Μια άλλη πτυχή που πρέπει να διερευνηθεί για την ευρεία χρήση αυτών των συχνοτήτων είναι η περαιτέρω εξασθένησή που θα υφίστανται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα λόγω της απορρόφησης της ατμόσφαιρας. Ο παράγοντας εξασθένησης  $\alpha_{atm}$  είναι συνάρτηση της συχνότητας και των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή (βροχή, ομίχλη κ.λπ.).

Επομένως, η επιλογή των παραθύρων που εμφανίζουν χαμηλές απώλειες θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή σκεπτόμενοι πάντα τις αποστάσεις μεταξύ σταθμού βάσης και τελικού χρήστη που πρέπει να εξυπηρετηθούν. Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα βλέπουμε ότι, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ο συντελεστής εξασθένησης λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές.



Εικόνα 3.15: Συντελεστής απωλειών λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας (30 GHz – 3 THz) [15, 20]

Επιπλέον, μια ακόμη πρόκληση για τη χρήση των THz συχνοτήτων είναι η εκτέλεση πραγματικών μετρήσεων προκειμένου να συλλεχθούν στοιχεία, να επεξεργαστούν, να εξαχθούν συμπεράσματα για το πώς λαμβάνουν χώρα και το πώς αλληλοεπιδρούν τα φαινόμενα της διάδοσης (ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση κ.λπ.) και στο τέλος όλα αυτά να συγκεντρωθούν σε βάσεις δεδομένων και να δημιουργηθούν μοντέλα διάδοσης, όπως αυτά υπάρχουν για τις ραδιοσυχνότητες (Radio-Frequencies – RF).

β. Μπάντα του ορατού φωτός (Visible Light Band 430 THz – 790 THz)

Οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (Optical Wireless Communications – OWC), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελούν για τα RF συστήματα κινητών επικοινωνιών μια συμπληρωματική τεχνολογία. Τα βασικά πλεονέκτημα για τα συστήματα OWC που λειτουργούν στη μπάντα του ορατού φωτός είναι ότι έχουν πολύ μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης, οι δέσμες είναι πολύ κατευθυντικές με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ τους και επιπλέον μπορούν πολύ ευκολά να ξαναχρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες σε γειτονικές περιοχές, τελευταίο και ίσως το σημαντικότερο δεν απαιτείται αδειοδότηση για τη χρήση του φάσματος.

Στα σύγχρονα δίκτυα 6G η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας VLC (Visible Light Communications – VLC) απαιτείται να είναι εφάμιλλη με την επίδοση ενός δικτύου οπτικών ινών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε συνθήκες εργαστηρίου και χρησιμοποιώντας ως πηγές διόδους LED έχουν επιτευχθεί ρυθμοί περίπου 10 Gbps και εύρος ζώνης 1 GHz. [15]

### 3.4.2 Η χρήση των κεραιών στα δίκτυα 6G

#### α. Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών στα δίκτυα 6G

Η χρήση της τεχνολογίας MIMO στα δίκτυα 6G δεν αποτελεί κάποια καινοτομία, καθώς έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στις προηγούμενες γενιές δικτύων 4G και 5G με πολύ καλά αποτελέσματα. Η εξέλιξη της τεχνολογίας MIMO στα δίκτυα 6G αφορά τη λειτουργία σε νέες πολύ υψηλές συχνότητες και τη δυνατότητα συνεργασίας μεταξύ τους προκειμένου να δημιουργηθεί ένα καταναμημένο σύστημα MIMO, μεγάλης κλίμακας, για να υποστηρίξει τη cell free δικτύωση που θα αναλυθεί παρακάτω.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συχνότητες λειτουργίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι τα στοιχεία των κεραιών που μπορούν να τοποθετηθούν στην ίδια επιφάνεια κεραίας (antenna panel) θα αυξηθούν σε μεγάλο βαθμό. Ειδικότερα για τα συστήματα 6G, οι σταθμοί βάσης θα εξοπλιστούν με μεγάλα πάνελ για να παρέχουν όσο το δυνατόν πιο λεπτές δέσμες και να επιτυγχάνουν το λεγόμενο «beamforming». Καθώς αυξάνεται η συχνότητα το μήκος κύματος γίνεται όλο και μικρότερο και καθώς πλησιάζουμε στο επίπεδο του χιλιοστού και πιο κάτω μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η περιοχή πολύ κοντά στην κεραία βρίσκεται σε συνθήκες κοντινού πεδίου. Υπό συνθήκες κοντινού πεδίου, οι δέσμες δεν στοχεύουν πλέον μια ευρύτερη κατεύθυνση αλλά έναν μεμονωμένο χρήστη.

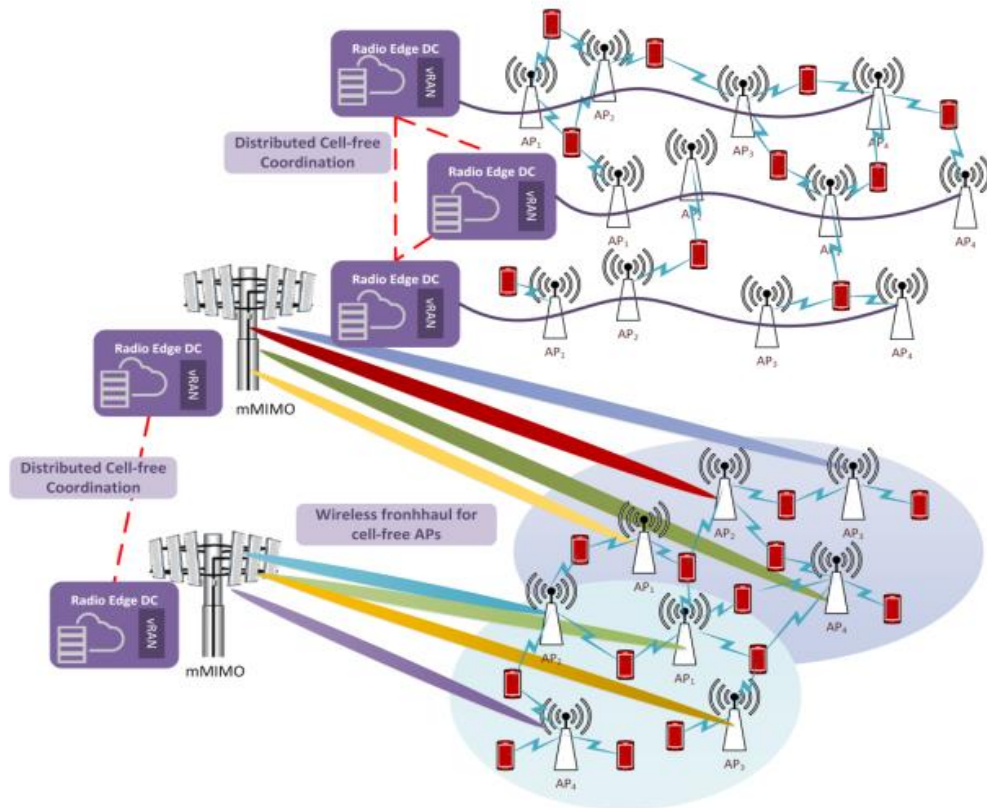
Επιπρόσθετα, η χρήση της τεχνολογίας MIMO κατά καταναμημένο τρόπο θα συνδράμει στην μείωση των παρεμβολών και ειδικότερα της ομοδιαυλικής παρεμβολής (inter-cell interference) που υφίστανται οι τελικοί χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης. Με το όρο καταναμημένο MIMO εννοούμε ένα σύστημα το οποίο θα περιλαμβάνει είτε πολλούς σταθμούς βάσης είτε οι υπάρχοντες σταθμοί βάσης θα συνεργάζονται μεταξύ τους ή με άλλες συσκευές όπως οι έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surfaces – IRS) και οι επαναλήπτες διαμόρφωσης δέσμης (beamforming relays) [21]. Λόγω της πληθώρας και της ετερογένειας των ανωτέρω συσκευών ένα καταναμημένο σύστημα MIMO μπορεί να παρέχει διάφορα σχήματα μετάδοσης τα οποία είναι άμεσα εξαρτώμενα από τις δυνατότητες του εξοπλισμού. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η σύμφωνη μετάδοση MIMO (Coherent MIMO transmission), η οποία επιλέγεται για να βελτιώσει το κέρδος πολυπλεξίας (multiplexing gain) όταν οι πομποί έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν με ακρίβεια το συγχρονισμό, στην περίπτωση που η προηγούμενη δυνατότητα δεν παρέχεται με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιείται η μη σύμφωνη μετάδοση MIMO (Non - Coherent MIMO transmission), με σκοπό το σύστημα να αποκτήσει κάποιο επιπλέον διαφορικό κέρδος (diversity gain). Τέλος, η συνεργασία των σταθμών βάσης με τις έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (IRS) και τους επαναλήπτες μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την κάλυψη της κυψέλης και το ρυθμό μετάδοσης (throughput).

β. Η δικτύωση μέσω της τεχνολογίας Cell – Free mMIMO (CF – mMIMO)

Η τεχνολογία mMIMO έχει ήδη αρχίσει να υλοποιείται και να ενσωματώνεται σε ορισμένες αγορές παγκοσμίως, ωστόσο στην παρούσα φάση θεωρείται σχετικά ανώριμη και μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένουμε την περαιτέρω εξέλιξή της για να βοηθήσει τα δίκτυα 6G να παρέχουν όσο το δυνατόν περισσότερες υπηρεσίες και εφαρμογές. Η τεχνολογία CF – mMIMO θεωρείται ως μία πιθανή λύση για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί και αφορούν την παροχή αξιόπιστων ευρυζωνικών επικοινωνιών και την αύξηση της περιοχής κάλυψης. Στη δικτύωση CF – mMIMO θα υπάρχουν καταναλωμένα συστήματα MIMO τα οποία θα συνεργάζονται και στην πραγματικότητα θα δημιουργείται ένα ultramassive-MIMO σύστημα.

Τα βασικό πλεονέκτημα ενός συστήματος CF – mMIMO είναι ότι έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα πολλούς χρήστες με τη χρήση των ίδιων πόρων κάτι το οποίο το καθιστά πλήρως αποδοτικό όσον αφορά τις απαιτήσεις φάσματος και ενέργειας. Επιπλέον, σαν αποτέλεσμα των προηγούμενων επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος που επιδρά τόσο στη μείωση των παρεμβολών όσο και στην κατανάλωση ενέργειας που αντιστοιχεί σε μέρος των λειτουργικών εξόδων (Operational Expenditures – COPEX) του δικτύου. Παρόλα αυτά, η χρήση αυτών των συστημάτων, έχει και κάποια tradeoffs, όπως συμβαίνει τις περισσότερες φορές, και τα οποία μπορούν να μειώσουν την αποδοτικότητά τους. Τα tradeoffs είναι ότι απαιτείται η εκτέλεση πολύπλοκων διεργασιών προκωδικοποίησης στα συστήματα MIMO, μεγάλη ακρίβεια στο χρονικό συγχρονισμό των συστημάτων που αλληλοεπιδρούν και τέλος παράγεται πολύ μεγάλη πλεονάζουσα πληροφορία (overhead) από τις αναδράσεις που αποστέλλονται ως ενημέρωση για την κατάσταση του καναλιού (CSI).



Εικόνα 3.16: Απεικόνιση ενός συστήματος CF – mMIMO [21]

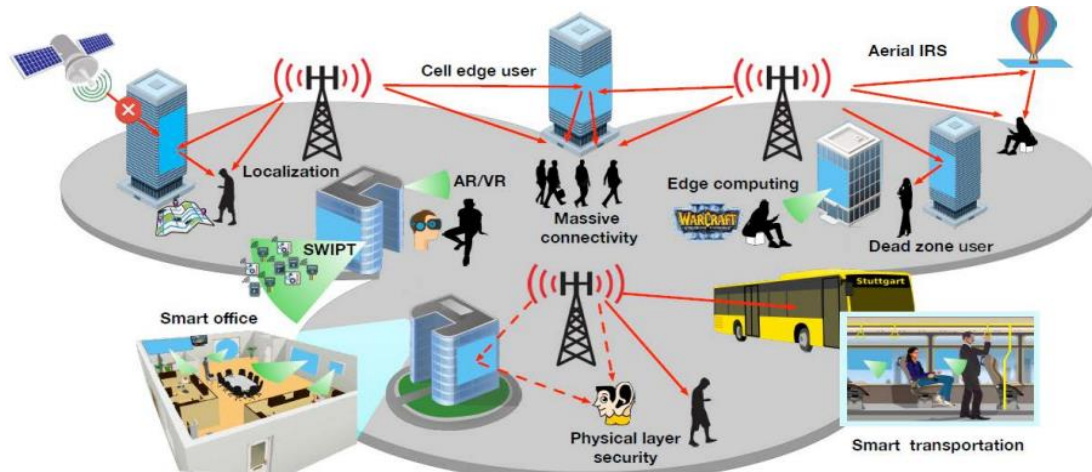
γ. Έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (Intelligent Reflecting Surfaces – IRS)

Οι έξυπνες ανακλαστικές επιφάνειες (IRS) αποτελούν μια νέα ιδέα χαμηλού κόστους και κατανάλωσης, με τεράστια ευελιξία στον τρόπο και τον τόπο εγκατάστασής τους, με σκοπό να προσδώσουν μία επέκταση στα συστήματα mMIMO. Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από μεγάλες επίπεδες επιφάνειες οι οποίες τοποθετούνται σε τοίχους (εσωτερικούς, εξωτερικούς), σε προσόψεις κτιρίων με σκοπό να βοηθήσουν την επέκταση της κάλυψης του συστήματος [15].

Οι παραπάνω επιφάνειες αποτελούνται από πολλά μικρά ανακλαστικά στοιχεία τα οποία δεν είναι τίποτα περισσότερο από απλές διατάξεις πυκνωτών μεταβλητής χωρητικότητας, ηλεκτρομηχανικών συστημάτων συμβατικών καθρεφτών και φωτοδιόδων PIN. Ελέγχοντας απλά τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να τροποποιηθούν σε πραγματικό χρόνο οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι (πλάτος, πόλωση, φάση κ.λπ.) τόσο του προσπίπτοντος όσο και του ανακλώμενου σήματος. Συνεπώς, αντιλαμβανόμαστε ότι μπορούμε να ελέγξουμε τα χαρακτηριστικά στοιχεία των δεσμών (κατεύθυνση, ένταση ακτινοβολίας κ.λπ.) που δημιουργούνται.

Ο σχεδιασμός για την αξιοποίηση της τεχνολογίας IRS είναι να τοποθετηθούν στο δίκτυο ως ανεξάρτητοι κόμβοι οι οποίοι θα συμβάλλουν στην

βελτίωση της απόδοσής του [22]. Ειδικότερα, η τοποθέτηση συσκευών IRS θα βοηθήσει στη δημιουργία νέων μονοπατιών διάδοσης για τα σήματα με αποτέλεσμα να βελτιωθεί η επίδοση του συστήματος και σε περιοχές που προηγουμένως είχαν μειωμένη κάλυψη ή καθόλου κάλυψη. Επιπλέον, αυτοί οι ανεξάρτητοι κόμβοι IRS μέσω του ελέγχου των δεσμών θα μπορούν να βελτιώνουν την ποιότητα του σήματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχει το ασύρματο δίκτυο εκείνη τη στιγμή είτε δημιουργώντας νέα μονοπάτια διάδοσης είτε βελτιώνοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Noise and Interference Ratio – SNIR) στους τελικούς χρήστες.



Εικόνα 3.17: Εφαρμογές συσκευών IRS στα δίκτυα 6G [22]

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εφαρμογές θα παρουσιάσουμε εν συντομία τη μοντελοποίηση του καναλιού, εκφράζοντας την μέσω των απωλειών διάδοσης, χρησιμοποιώντας διάφορα μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

Στην παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο ακτινών, όπου στο δέκτη αφικνούνται δύο εκδοχές του σήματος και συγκεκριμένα η μία ακτίνα είναι αυτή που προέρχεται από την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού - δέκτη και η δεύτερη από ανάκλαση στο έδαφος. Θεωρούμε ένα σύστημα IRS με  $Q$  στοιχεία, το οποίο είναι τοποθετημένο στο έδαφος με σκοπό να υποστηρίξει την επικοινωνιακή κάλυψη μίας γεωγραφικής περιοχής. Η λαμβανόμενη ισχύς στην πλευρά του δέκτη δίνεται από την παρακάτω σχέση [21]:

$$P_r \approx (Q + 1)^2 P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi(d_1 + d_2)} \right)^2 \quad (3.1)$$

όπου  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις του πομπού και του δέκτη από την ανακλαστική επιφάνεια και  $P_t$  είναι η ισχύς εκπομπής. Από τη σχέση (3.1) μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι η λαμβανόμενη ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλήθους των στοιχείων ( $Q^2$ ) και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης πομπού – δέκτη μέσω της ανάκλασης  $[(d_1 + d_2)^2]$ .

Η ακόλουθη ανάλυση προτείνει τη μοντελοποίηση των απωλειών μακρινού πεδίου με χρήση των κλασικών τεχνικών της οπτικής φυσικής, εξηγώντας ταυτόχρονα γιατί μια επιφάνεια που αποτελείται από πολλά στοιχεία που λειτουργούν ατομικά ως σκεδαστές μπορεί, εφόσον τα στοιχεία αυτά λειτουργήσουν συνδυαστικά, να επιτύχει συγκεκριμένο πλάτος στο λαμβανόμενο σήμα και να κατευθύνει τη δέσμη στην επιθυμητή κάθε φορά κατεύθυνση [22].

$$PL = \frac{(4\pi d_1 d_2)^2}{G_t G_r (ab)^2 \cos^2 \theta_i \left[ \text{sinc} \left( \frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta_r) \right) \right]^2} \quad (3.2)$$

όπου  $d_1$  και  $d_2$  οι αποστάσεις του πομπού και του δέκτη από την ανακλαστική επιφάνεια,  $G_t$  και  $G_r$  τα κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη αντιστοίχως,  $a$  και  $b$  οι διαστάσεις της ανακλαστικής επιφάνειας,  $\theta_i$  η γωνία πρόσπτωσης,  $\theta_r$  η επιθυμητή γωνία ανάκλασης και  $\theta_s$  η παρατηρούμενη γωνία ανάκλασης. Η παραπάνω σχέση (3.2) μπορεί να απλοποιηθεί αν θεωρήσουμε ότι παρατηρούμε στην γωνία ανάκλασης (δηλαδή  $\theta_r = \theta_s$ ) και λαμβάνει την ακόλουθη μορφή.

$$PL = \frac{(4\pi d_1 d_2)^2}{G_t G_r (ab)^2 \cos^2 \theta_i} \quad (3.3)$$

Συνεπώς, από την απλοποιημένη σχέση (3.3) παρατηρούμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς ανάλογη του τετραγώνου της επιφάνειας της IRS και αντιστρόφως ανάλογη του παράγοντα  $(d_1 d_2)^2$  που εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών (πομπού, δέκτη και IRS).

Σε συνάφεια με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω θα παρουσιάσουμε σύντομα ένα γενικό μοντέλο απωλειών βασισμένο στις IRS επιφάνειες, το οποίο δίνεται από την παρακάτω έκφραση [23]:

$$PL = \frac{64\pi^3}{G_t G_r G d_x d_y \lambda^2} * \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{\sqrt{F_{n,m}^{\text{combine}} \Gamma_{n,m}}}{r_{n,m}^t r_{n,m}^r} e^{\frac{-j2\pi(r_{n,m}^t + r_{n,m}^r)}{\lambda}} \right)^{-2} \quad (3.4)$$

όπου  $G$  το κέρδος του ενός στοιχείου,  $d_x$  και  $d_y$  οι διαστάσεις του κάθε στοιχείου κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ ,  $M$  και  $N$  το πλήθος των στοιχείων που είναι τοποθετημένα κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$  αντιστοίχως,  $F^{\text{combine}}$  είναι ένας παράγοντας που εκφράζει την επίδραση που έχει το κανονικοποιημένο διάγραμμα ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου στη λαμβανόμενη ισχύ,  $\Gamma_{n,m}$  ο συντελεστής ανάκλασης κάθε στοιχείου,  $r_{n,m}^t$  και  $r_{n,m}^r$  οι απόσταση που απέχει κάθε στοιχείο από πομπό και δέκτη αντίστοιχα. Συμπερασματικά, από τη σχέση (3.4) μπορούμε να δούμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς εξαρτάται από τα κέρδη των κεραιών πομπού – δέκτη, το κέρδος, το μέγεθος, το πλήθος και συγκεκριμένες



ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των στοιχείων και τέλος από τις απαιτούμενες αποστάσεις διάδοσης.

Στο μακρινό πεδίο η παραπάνω σχέση (3.4) μπορεί να απλοποιηθεί και να δοθεί από την παρακάτω σχέση [23]:

$$PL = \frac{64\pi^3 (d_1 d_2)^2}{G_t G_r G M^2 N^2 d_x d_y \lambda^2 F(\theta_t, \varphi_t) F(\theta_r, \varphi_r) A^2} \quad (3.5)$$

όπου  $F(\theta_t, \theta_r)$  και  $F(\varphi_t, \varphi_r)$  τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας του κάθε στοιχείου στις κατευθύνσεις πρόσπτωσης  $(\theta_t, \theta_r)$  και ανάκλασης  $(\varphi_t, \varphi_r)$ .

### 3.4.3 Η χρήση μη-ορθογώνιας τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA) στα δίκτυα 6G

#### α. Γενική περιγραφή της NOMA

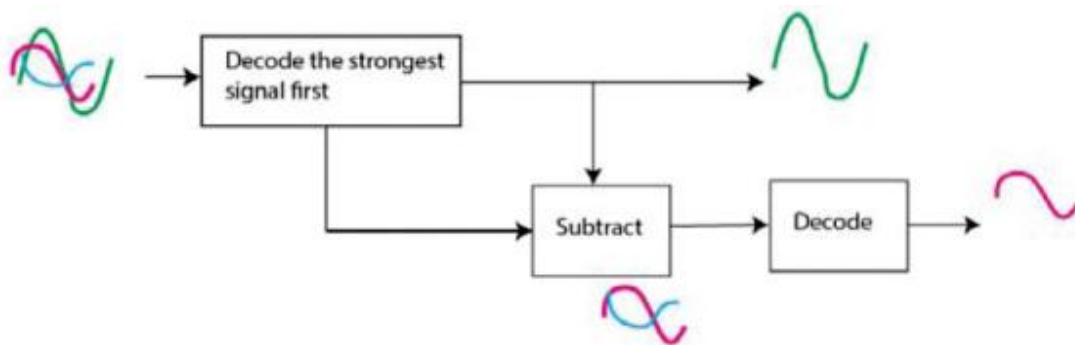
Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα αναμένεται ότι θα εξυπηρετούν δισεκατομμύρια τελικούς χρήστες, όπου ο καθένας θα έχει διαφορετικές απαιτήσεις. Συνεπώς, τα σύγχρονα δίκτυα με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, σε ότι αφορά την πολλαπλή πρόσβαση, είναι δεδομένο ότι δε θα μπορέσουν ανταποκριθούν στις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις των τελικών χρηστών για υπηρεσίες με πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων με μικρές καθυστερήσεις. Η NOMA είναι μία καινοτόμα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία έχει προταθεί για να ενσωματωθεί στα δίκτυα 6G, λόγω των πολύ καλών αποτελεσμάτων στην αποδοτικότητα του φάσματος σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης.

Η τεχνική NOMA επιτρέπει τη συνύπαρξη πολλών τελικών χρηστών, οι οποίοι διαμοιράζονται ταυτόχρονα πόρους όπως κώδικας, συχνότητα, χρονοθυρίδα, μέσω της ανάθεσης διαφορετικών επιπέδων ισχύος σε κάθε χρήστη. Με την τεχνική αυτή η ισχύς εκπομπής το κάθε χρήστη εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού που αντιμετωπίζει η ζεύξη η οποία υλοποιεί. Ως εκ τούτου, σε μία ζεύξη με δυσμενείς συνθήκες διαύλου αναμένεται ότι η ισχύς εκπομπής των πομποδεκτών θα είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με μία άλλη που αντιμετωπίζει καλύτερες συνθήκες.

Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των NOMA, είναι τα ακόλουθα:

- **Superposition Coding:** Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σχήματα, όπου οι χρήστες καταλαμβάνουν ορθογώνιους πόρους, στη NOMA πολλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται τον ίδιο πόρο (χρόνο, συχνότητα κ.λπ.). Τα σήματα αυτά υπερτίθενται στον τομέα της ενέργειας, χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες του διαύλου.

- Φασματική απόδοση: Εξαιτίας του Superposition Coding, η NOMA με τον ίδιο πόρο (resource block) μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς χρήστες, οδηγώντας σε καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συγκριτικά με τις ορθογώνιες τεχνικές πρόσβασης.
- Εκτεταμένη συνδεσιμότητα (Massive Connectivity): Η τεχνική NOMA ταιριάζει απόλυτα στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα καθώς, λόγω του τεράστιου όγκου τελικών χρηστών (IoT, αισθητήρες κ.λπ.) θα απαιτείται η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των χρηστών με τον ίδιο πόρο.
- Πολύπλοκη αποκωδικοποίηση στο δέκτη: Με τη χρήση της επιτυχούς ακύρωσης παρεμβολών (Successive Interference Cancellation - SIC) στην πλευρά του δέκτη, η NOMA επιτρέπει στους τελικούς χρήστες, των οποίων οι συνθήκες καναλιού είναι καλές, να απομονώνουν και να αποκωδικοποιούν το επιθυμητό σήμα και να απορρίπτουν όλα τα υπόλοιπα.



Εικόνα 3.18: Λειτουργία του Successive Interference Cancellation - SIC

- Δυναμική απόδοση ισχύος (Dynamic Power Allocation): Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνθήκες του διαύλου μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια μίας επικοινωνίας, η NOMA έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει δυναμικά το επίπεδο ισχύος των χρηστών προκειμένου να εξασφαλίζει την βέλτιστη απόδοση του δικτύου.
- Ενσωμάτωση σε άλλες τεχνολογίες: Η NOMA μπορεί να ενσωματωθεί σε τεχνολογίες όπως οι κεραϊαίες MIMO και οι χιλιοστομετρικές συχνότητες προκειμένου να αυξήσει ακόμη περισσότερο την απόδοση του δικτύου.

## β. Ανάλυση του downlink της NOMA

Έστω ότι έχουμε ένα απλό σύστημα NOMA, όπως αυτό της εικόνας 3.7, που αποτελείται από ένα σταθμό βάσης και δύο τελικούς χρήστες. Θεωρούμε ότι τα  $x_1$  και  $x_2$  είναι τα σήματα που εκπέμπονται από το σταθμό

βάσης προς τους δύο χρήστες. Το σήμα που εκπέμπει ο σταθμός βάσης είναι υπέρθεση των δύο σημάτων και έχει την ακόλουθη μορφή [24]:

$$s = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2 \quad (3.6)$$

όπου  $P_1$  και  $P_2$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς του σταθμού βάσης για τους δύο χρήστες. Η συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς για τους δύο χρήστες μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα των επιμέρους ισχύων ( $P = P_1 + P_2$ ). Στην πράξη, για ένα πραγματικό σύστημα η ισχύς εκπομπής είναι προκαθορισμένη, καθώς πρέπει να συμμορφώνεται με τα εκάστοτε όρια που υπάρχουν και ανάλογα με το σχήμα της κατανομής ισχύος (Power Allocation - PA) επιμερίζεται στους τελικούς χρήστες. Το λαμβανόμενο σήμα σε κάθε χρήστη είναι της μορφής [24]:

$$y_i = h_i s + n_i \quad i = 1, 2 \quad (3.7)$$

όπου  $h_i$  είναι το κέρδος του καναλιού μεταξύ σταθμού βάσης και τελικού χρήστη και ως  $n_i$  αναπαριστάτε ο γκαουσιανός θόρυβος και οι παρεμβολές, που έχουν φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_{f,i}$ .

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για να μπορέσουν οι δέκτες να διαχωρίσουν τα διαφορετικά σήματα χρησιμοποιούν την τεχνική SIC. Η βέλτιστη σειρά αποκωδικοποίησης μέσω της τεχνικής SIC, είναι με φθίνουσα διάταξη της ποιότητας – δύναμης των καναλιών των χρηστών η οποία καθορίζεται από τον παρακάτω παράγοντα [24]:

$$\frac{|h_i|^2}{N_{f,i}} \quad \text{όπου } i = 1, 2 \quad (3.8)$$

Συνεπώς, στη θεώρησή μας ο χρήστης 1 έχει το πιο ισχυρό κανάλι ή ενναλλακτικά είναι ο πιο ισχυρός χρήστης και μπορεί να αφαιρέσει - ακυρώσει την παρεμβολή από το χρήστη 2, που έχει το λιγότερο ισχυρό κανάλι και συχνά αναφέρεται ως ο αδύναμος χρήστης. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο σταθμός βάσης εκτελεί περιοδικά ταξινόμηση των καναλιών με βάση τις πληροφορίες κατάστασης διαύλου (Channel State Information – CSI) που λαμβάνει από τους χρήστες και εν συνεχεία προωθεί στους τελικούς χρήστες την ενημερωμένη ταξινόμηση των καναλιών με βάση τις δικές του πληροφορίες. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται και η κατανομή της ισχύος, όπου χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να αναφέρουμε ότι στους ασθενέστερους χρήστες η ισχύς εκπομπής είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τους ισχυρούς χρήστες, προκειμένου να μπορούν να διατηρήσουν σε ικανοποιητικό επίπεδο το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SNIR). Για το απλό παράδειγμά μας ισχύουν τα εξής:

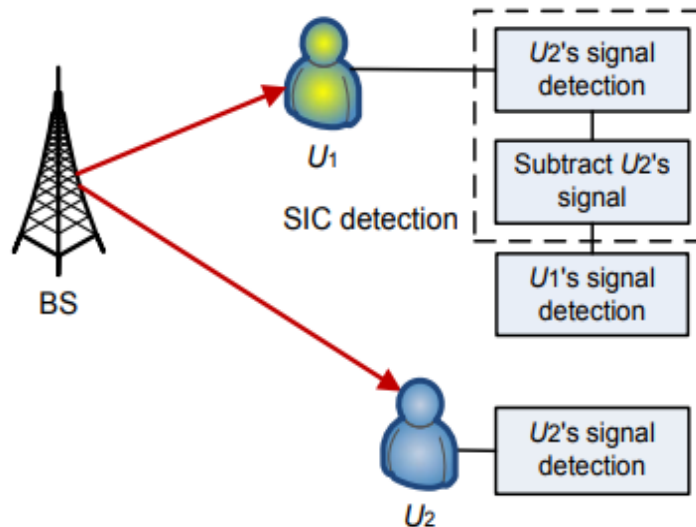
$$\frac{|h_1|^2}{N_{f,1}} > \frac{|h_2|^2}{N_{f,2}} \Rightarrow P_1 < P_2$$

Επομένως, μόνο ο χρήστης 1 εφαρμόζει την τεχνική SIC. Αρχικά αποκωδικοποιεί το σήμα  $x_2$ , που είναι το σήμα του χρήστη 2 και το αφαιρεί από το σήμα  $y_1$  που έχει λάβει και εν συνεχεία αποκωδικοποιεί το σήμα που απευθύνεται προς αυτόν. Ο χρήστης 2 με το ασθενέστερο κανάλι αντιμετωπίζει το σήμα  $x_1$  σαν θόρυβο και προβαίνει απευθείας στην αποκωδικοποίηση του σήματος  $y_2$  που έλαβε χωρίς την εφαρμογή της SIC. Αν υποθέσουμε ότι η τεχνική SIC είναι τέλεια, τότε οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν για τους δύο χρήστες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [24]:

$$R_1^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{N_{f,1}} \right) \quad (3.9)$$

$$R_2^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{P_1 |h_2|^2 + N_{f,1}} \right) \quad (3.10)$$

Η συνολική χωρητικότητα που επιτυγχάνει το σύστημα είναι το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων ( $R = R_1 + R_2$ ). Από τις σχέσεις (3.9) και (3.10) μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι ο σταθμός βάσης μπορεί να ελέγξει τους ρυθμούς μετάδοσης ελέγχοντας απλά τους λόγους ισχύος ( $\alpha_1 = P_1 / P$  και  $\alpha_2 = P_2 / P$ ).



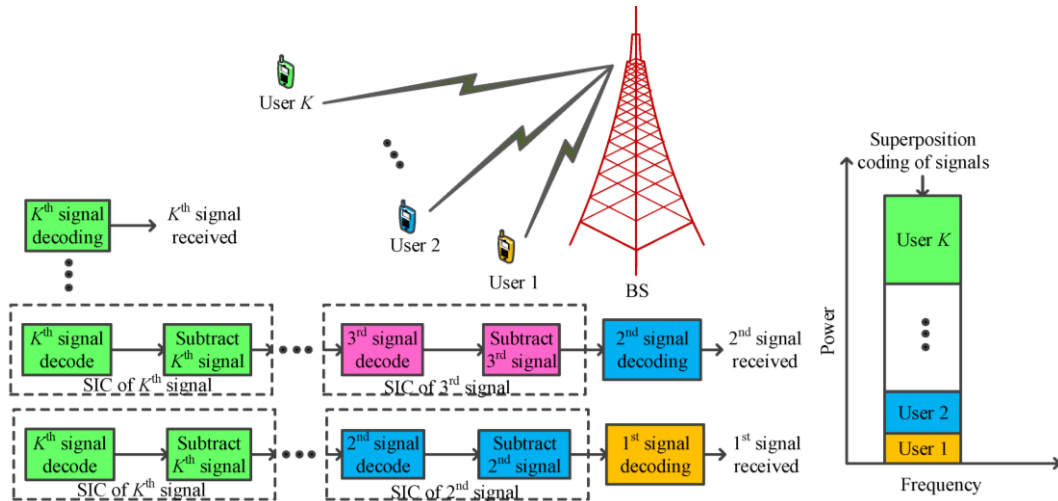
Εικόνα 3.19: Downlink NOMA δύο χρηστών [11]

Γενικεύοντας τις παραπάνω σχέσεις για ένα σύστημα  $k$ -χρηστών μπορούμε να πάρουμε τις παρακάτω εκφράσεις [24]:

$$\frac{|h_1|^2}{N_{f,1}} > \frac{|h_2|^2}{N_{f,2}} \dots > \frac{|h_{k-1}|^2}{N_{f,k-1}} > \frac{|h_k|^2}{N_{f,k}} \Rightarrow P_1 < P_2 < \dots < P_{k-1} < P_k$$

$$R_k^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |h_k|^2}{\sum_{j=1}^{k-1} P_j |h_k|^2 + N_{f,k}} \right) \quad (3.11)$$

Η παραπάνω σχέση (3.11) αναφέρεται σε όλους του χρήστες πλην του χρήστη 1 (ισχυρότερου) του οποίου ο ρυθμός μετάδοσης παραμένει ως έχει στη σχέση (3.9).



Εικόνα 3.20: Downlink NOMA k-χρηστών [25]

Αν και θεωρητικά δεν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά τους NOMA χρήστες που μπορούν να διαμοιράζονται τον ίδιο πόρο, στην πράξη όμως η τεχνική NOMA στο downlink έχει καλά αποτελέσματα όταν αριθμός τελικών χρηστών είναι σχετικά μικρός. Αντιθέτως, όταν έχουμε μεγάλο πλήθος τελικών χρηστών και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τεχνική SIC δεν είναι τέλεια, παρατηρείται μία υπάρχει μια υποβάθμιση στο λόγο εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER), πράγμα το οποίο οδηγεί σε πολλά προβλήματα.

### β. Ανάλυση του uplink της NOMA

Κατά αναλογία με την ανάλυση που κάναμε στην προηγούμενη ενότητα και εδώ θα θεωρήσουμε ένα απλό σύστημα όπου υπάρχουν δύο τελικοί χρήστες που εκπέμπουν ταυτόχρονα τα σήματά τους  $x_1$  και  $x_2$  προς το σταθμό βάσης. Το σήμα που λαμβάνετε από το σταθμό βάσης έχει την παρακάτω μορφή [24]:

$$y = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_i} h_i x_i + n \quad (3.12)$$

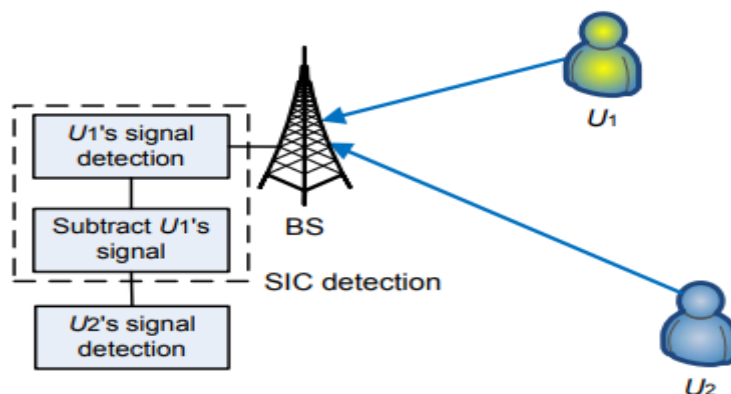
όπου  $P_1$  και  $P_2$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς των δύο χρηστών για να εκπέμπουν τα σήματά τους προς τον σταθμό βάσης και ως η αναπαριστάτε ο γκαουσιανός θόρυβος και οι παρεμβολές, που έχουν φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_f$ .

Ο σταθμός βάσης εκπέμπει προς όλους τους χρήστες σήμα αναφοράς, με βάση το οποίο ο κάθε χρήστης προβαίνει στην εκτίμηση του καναλιού. Έτσι, εν συνεχεία οι τελικοί χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν – προσαρμόσουν την εκπεμπόμενη ισχύ τους ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού. Αντίστοιχα με προηγουμένως, ο χρήστης 1 είναι ο ισχυρός χρήστης, καθώς έχει κανάλι με υψηλότερο κέρδος εν συγκρίσει με αυτό του χρήστη 2, που είναι ο αδύναμος χρήστης. Συνεπώς, μόλις ο σταθμός βάσης λάβει την υπέρθεση των δύο διαφορετικών σημάτων, με χρήση της τεχνικής SIC προβαίνει στο διαχωρισμό των σημάτων ( $x_1$  και  $x_2$ ). Ο σταθμός βάσης πρώτα αποκωδικοποιεί το σήμα του χρήστη 1, θεωρώντας την εκπομπή του χρήστη 2 ως θόρυβο, και εν συνεχεία αφαιρεί από το λαμβανόμενο σήμα το απόκωδικοποιημένο σήμα ( $\hat{x}_1$ ). Αυτό που απομένει μετά την αφαίρεση είναι το απόκωδικοποιημένο σήμα ( $\hat{x}_2$ ). Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειώσουμε ότι στο uplink ο χρήστης 1 υφίσταται παρεμβολή από την εκπομπή του χρήστη 2, ενώ ο χρήστης 2 δεν υπόκειται σε παρεμβολή γιατί πριν αποκωδικοποιηθεί το δικό του σήμα έχει ήδη αφαιρεθεί το σήμα  $x_1$ . Η παραπάνω επισήμανση αντιστοιχεί με ακριβώς τον αντίθετο τρόπο στο downlink, όπου ο χρήστης 2 είναι αυτός που υφίσταται την παρεμβολή από την εκπομπή του χρήστη 1, ενώ ο χρήστης 1 δεν υποφέρει από παρεμβολή γιατί πριν την απόκωδικοποίησή του σήμα έχει αφαιρεθεί το σήμα  $x_2$ . Αν υποθέσουμε ότι η τεχνική SIC είναι τέλεια, τότε οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν για τους δύο χρήστες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [24]:

$$R_1^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{P_2 |h_2|^2 + N_f} \right) \quad (3.13)$$

$$R_2^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{N_f} \right) \quad (3.14)$$

Όπως και προηγουμένως η συνολική χωρητικότητα που επιτυγχάνει το σύστημα είναι το άθροισμα των επιμέρους χωρητικότητων ( $R = R_1 + R_2$ ).



Εικόνα 3.21: Uplink NOMA δύο χρηστών [26]

Γενικεύοντας τις παραπάνω σχέσεις για ένα σύστημα k-χρηστών μπορούμε να πάρουμε τις παρακάτω εκφράσεις [24]:

$$\frac{|h_1|^2}{N_{f,1}} > \frac{|h_2|^2}{N_{f,2}} \dots > \frac{|h_{k-1}|^2}{N_{f,k-1}} > \frac{|h_k|^2}{N_{f,k}} \Rightarrow P_1 < P_2 < \dots < P_{k-1} < P_k$$

$$R_k^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |h_k|^2}{\sum_{j=k+1}^K P_j |h_k|^2 + N_{f,k}} \right) \quad (3.15)$$

$$R_k^{\text{NOMA}} = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_k |h_k|^2}{N_f} \right) \quad (3.16)$$

Όπου η σχέση (3.15) ισχύει για όλους του χρήστες ( $k=1,2,\dots,K-1$ ) πλην του χρήστη K για τον οποίο ισχύει η σχέση (3.16).

Σε αντίθεση με το downlink, στο uplink του NOMA το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει ένα σχετικά μεγαλύτερο αριθμό τελικών χρηστών καθώς ο σταθμός βάσης είναι μία εγκατάσταση που είναι εξοπλισμένη με πληθώρα υπολογιστικών πόρων και επιπλέον δεν αντιμετωπίζει ζητήματα επάρκειας ενέργειας όπως ένας τελικός χρήστης που βασίζεται στο συσσωρευτή της συσκευής που χρησιμοποιεί. Επίσης, δεδομένου ότι στον σταθμό βάσης υπάρχει η απαιτούμενη υπολογιστική ικανότητα, μπορούν να πιο πολύπλοκες και αξιόπιστες τεχνικές αποκωδικοποίησης για να αυξηθεί η επίδοση του συστήματος κάτι το οποίο δεν μπορεί να γίνει από την πλευρά των τελικών χρηστών.

#### 3.4.4 Οι προκλήσεις στα ηλεκτρονικά των συσκευών του 6G

Η μετάβαση σε ζώνες συχνοτήτων της τάξης των THz εγείρει τεράστιες προκλήσεις στο σχεδιασμό του υλικού των πομποδεκτών. Με πρώτη και σημαντικότερη αυτή που αφορά στην τεχνολογία των ημιαγωγών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η λειτουργία των συστημάτων θα γίνεται σε τόσο υψηλές συχνότητες, οι απαιτήσεις που θα πρέπει να τεθούν θα είναι ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν ημιαγωγοί τελευταίας τεχνολογίας (state-of-the-art), η συχνότητα λειτουργίας θα πλησιάζει ή και σε ακραίες περιπτώσεις θα υπερβαίνει τη μέγιστη συχνότητα στην οποία ο ημιαγωγός μπορεί να πετύχει κέρδος ισχύος. Ως εκ τούτου, η απόδοση του πομπού και ο παράγοντας θορύβου (Noise Figure – NF) που επιτυγχάνεται στο δέκτη θα είναι υποβαθμισμένα σε σύγκριση με τη λειτουργία σε χαμηλότερες συχνότητες. Για να μεγιστοποιηθεί το κέρδος στις υψηλές συχνότητες, θα πρέπει τα υλικά που θα χρησιμοποιούνται να γίνουν πολύ μικρότερα σε μέγεθος με αποτέλεσμα να απαιτούν χαμηλότερη τάση τροφοδοσίας, για να επιτυγχάνουν την απαιτούμενη αξιοπιστία, με tradeoff τη μείωση της ισχύος εξόδου στον πομπό. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω και συγκεκριμένα τον υποβαθμισμένο παράγοντα θορύβου στο δέκτη, το μειωμένο μέγεθος της κεραίας και το μεγάλο εύρος ζώνης του

σήματος, οδηγούν σε ζεύξεις με πολύ μικρή εμβέλεια εκτός και αν τεράστιος αριθμός τέτοιων στοιχείων συνδυαστεί σύγχρονα για να επιτευχθεί το beamforming. Εκτιμάται ότι για δίκτυα που λειτουργούν στα THz, μπορεί να απαιτηθούν από μερικές χιλιάδες έως δεκάδες χιλιάδες στοιχεία κεραίας. [20]

Για παράδειγμα, μια κεραία 10000 στοιχείων και συχνότητα λειτουργίας στα 500 GHz, όπου τα στοιχεία απέχουν κατά μισό μήκος κύματος (0.3 χιλ.) χρειάζεται μία επιφάνεια (3 εκ.\* 3 εκ.) για την τοποθέτησή τους. Βλέποντας τα μεγέθη καταλαβαίνουμε ότι το κάθε chip θα πρέπει να έχει πολλούς πομποδέκτες. Ένα chip, με μέγεθος (3 χιλ.\* 3 χιλ.), θα πρέπει να έχει 100 πομποδέκτες και απαιτούνται 100 τέτοια chip για την υλοποίηση της παραπάνω στοιχειοκεραίας [20]. Πηγαίνοντας την αναζήτηση μας ένα βήμα πιο κάτω και θεωρώντας ότι ο κάθε πομποδέκτης καταναλώνει 100 mW, τότε η συνολική κατανάλωση ισχύος γίνεται 1 kW, πράγμα που σημαίνει ότι το σύστημα δεν μπορεί να είναι συνεχώς ενεργό. Επομένως, τέτοιου είδους πομποδέκτες στα THz θα έχουν μειωμένη απόδοση και η δυνατότητα για αποβολή θερμότητας (heat dissipation) θα είναι περιορισμένη, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των υλικών. Επιπρόσθετα, αν η αποβολή θερμότητας δεν επιφέρει τα απαιτούμενα αποτελέσματα θα πρέπει να εξεταστεί το αραίωμα της διάταξης, δηλαδή τα στοιχεία να απέχουν μεταξύ μεγαλύτερη απόσταση από το μισό μήκος κύματος, το tradeoff αυτής της επιλογής είναι ότι μπορεί να εμφανιστούν πλευρικοί λοβοί που θα πρέπει να τους διαχειριστεί το σύστημα, καθώς μπορεί να δημιουργούν πρόβλημα σε γειτονικές ζεύξεις.

Η τεχνολογία MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor) έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στις προηγούμενες γενιές των ασύρματων δικτύων όμως στην παρούσα φάση θεωρείται ότι έχει πιάσει το ανώτατο όριο της, όσον αφορά τις επιδόσεις που μπορεί να επιτύχει. Οι βασικές προκλήσεις που προκύπτουν από τη χρήση της τεχνολογίας MOSFET στα δίκτυα 6G αφορούν την αδυναμία της για περαιτέρω βελτίωση σε τομείς όπως η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η αύξηση ταχύτητας, η αξιοπιστία (συχνότητα βλαβών και υπερθέρμανση) και η μείωση του μεγέθους. Η ερευνητική κοινότητα αξιολογώντας τις προηγούμενες διαπιστώσεις έχει ήδη στρέψει το βλέμμα της σε νέες τεχνολογίες, οι οποίες θα μπορούν να ανταποκριθούν στις αυστηρές προδιαγραφές που έχουν τεθεί για τη λειτουργία των δικτύων 6G.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα διπολικά τρανζίστορ πυριτίου – γερμανίου (Silicon – Germanium - SiGe) τα οποία προβλέπεται να φτάσουν σε μέγιστη συχνότητα περί τα 2 THz σε συσκευές των 5 nm [20]. Με αυτή τη τεχνολογία, θα μπορούν να υλοποιηθούν ενισχυτές και ταλαντωτές που θα λειτουργούν κοντά στο 1 THz, με πολύ καλά αποτελέσματα τόσο στην επίδοση όσο και στη δυνατότητα ολοκλήρωσης. Επίσης, το νιτρίδιο γαλλίου (Gallium Nitride - GaN) και ο πυρόχαλκος πυριτίου (Silicon Carbide - SiC) είναι άλλα δύο υλικά που αναμένεται να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των δικτύων 6G, καθώς λόγω των ηλεκτρικών και θερμικών τους ιδιοτήτων, αποτελούν ιδανικές



λύσεις για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές συχνότητες λειτουργίας και υψηλά επίπεδα ισχύος.

Επιπρόσθετα, μια ακόμη πρόκληση που πρέπει να ξεπεραστεί αφορά τους τοπικούς ταλαντωτές και συγκεκριμένα τον μηχανισμό με τον οποίο επιτυγχάνεται ο συντονισμός τους. Η χρήση της συχνότητας στην επίτευξη του συντονισμού καθίσταται πλέον προβληματική, καθώς η συχνότητα λειτουργίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον παράγοντα ποιότητας, ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την αποδοτικότητα και τη σταθερότητα του ταλαντωτή. Συνεπώς, η λειτουργία σε συχνότητες της τάξης των THz θα προκαλέσει υποβάθμιση του παράγοντα ποιότητας και της συνολικής απόδοση του συστήματος.

Όλες οι παραπάνω προκλήσεις χρήζουν άμεσης διερεύνησης προκειμένου να μπορέσουν να υλοποιηθούν τα συστήματα που θα δώσουν πνοή στα δίκτυα 6G, με τις δυνατότητες που τα έχουμε οραματιστεί.

### 3.5 Semantic Communications

Ένα χρόνο μετά τη διατύπωση της θεωρίας του Shannon, ο Weaver κατηγοριοποίησε τα προβλήματα των επικοινωνιών σε τρία επίπεδα, όπως παρακάτω [43]:

- Level A (Το τεχνικό πρόβλημα): Με πόση ακρίβεια μπορούν να μεταδοθούν τα προς μετάδοση σύμβολα;
- Level B (Το semantic πρόβλημα): Με πόση ακρίβεια τα μεταδιδόμενα δεδομένα μπορούν να διατηρήσουν – μεταφέρουν το επιθυμητό νόημα;
- Level C (Το πρόβλημα της αποτελεσματικότητας): Πόσο επηρεάζει η ληφθείσα έννοια, τον επιθυμητό τρόπο συμπεριφοράς;

Η θεωρία του Shannon παρείχε μια κομψή λύση, για το τεχνικό πρόβλημα, η οποία έδωσε περαιτέρω ώθηση στον τομέα της θεωρίας της πληροφορίας. Στη προτεινόμενη λύση, η ποσότητα των πληροφοριών σε ένα μήνυμα μετρείται από την έννοια της αβεβαιότητας, η οποία είναι ανάλογη με τη στατιστική πιθανότητα του συστήματος. Συνεπώς, σύμφωνα με τον Shannon, η έμφαση δίνεται στις πιθανότητες και όχι στη σημασία των μηνυμάτων. Αντιθέτως, στις semantic επικοινωνίες μας ενδιαφέρει πολύ περισσότερο να μπορεί να μεταδοθεί η σημασία του μηνύματος. Εν συντομία θα αναφερθούν δύο παραδείγματα για να δείξουμε τη διαφορά μεταξύ τεχνικών και semantic επικοινωνιών.

- Επιτυχής τεχνική αλλά ανεπιτυχής semantic επικοινωνία: Έστω ότι έχουμε την επικοινωνία μεταξύ δύο ανθρώπων. Ο ομιλητής λέει «Τα φρούτα είναι καλά». Ο ακροατής παρακούει και λαμβάνει «Τα νέα είναι καλά». Σε αυτό

το απλό παράδειγμα η τεχνική επικοινωνία είναι πετυχημένη γιατί με βάση τα σύμβολα το μήνυμα έχει μεταδοθεί τέλεια στον παραλήπτη. Ωστόσο, με βάση τις semantic επικοινωνίες έχει αποτύχει γιατί το νόημα του μηνύματος που ελήφθη είναι εντελώς διαφορετικό.

- Ανεπιτυχής τεχνική αλλά επιτυχής semantic επικοινωνία: Έστω ότι έχουμε την μετάδοση ενός μηνύματος μεταξύ τριών ανθρώπων. Ο Δημήτρης λέει «Ο Βασίλης δεν τρώει φρούτα». Ο Ιωάννης μεταφέρει το μήνυμα που έλαβε «Ο Βασίλης δεν καταναλώνει φρούτα». Ωστόσο, ο Κώστας που λαμβάνει τελευταίος το μήνυμα ενώ έχει λάβει ένα διαφορετικό μήνυμα από το αρχικό (ανεπιτυχής τεχνική επικοινωνία), αντιλαμβάνεται πλήρως το νόημα του μηνύματος (επιτυχής semantic επικοινωνία) που μεταδόθηκε αρχικά διότι οι λέξεις «τρώει» και «καταναλώνει» είναι συνώνυμες.

Αφού εξηγήσαμε την έννοια του semantic προβλήματος στις κλασικές επικοινωνίες μεταξύ των ανθρώπων, μπορούμε να πάμε ένα βήμα παρακάτω και να συζητήσουμε τις επικοινωνίες μεταξύ συσκευών, εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά των δεδομένων, όπως η έγκαιρη παράδοση, η προτεραιότητα και η τιμή, προκειμένου να επιτευχθούν αποδοτικές επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο.

### 3.5.1 Παραδείγματα παραμέτρων μέτρησης ποιότητας στις semantic επικοινωνίες

Σε αυτήν την υποπαράγραφο, θα αναφερθούμε σε ορισμένες βασικές παραμέτρους μέτρησης της ποιότητας των semantic επικοινωνιών.

#### α. Πόσο πρόσφατη είναι η πληροφορία (Freshness)

Η ηλικία της πληροφορίας είναι μία μέτρηση, μέσω της οποίας υπολογίζουμε πόσο πρόσφατη είναι η συγκεκριμένη ροή πληροφορίας και ορίζεται ως ο χρόνος που έχει παρέλθει από το πιο πρόσφατο δείγμα αυτής της ροής, στην πλευρά του δέκτη [44]. Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις semantic επικοινωνίες, που υποστηρίζουν εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση της θέσης και ο έλεγχος συστημάτων. Η ηλικία της πληροφορίας είναι μία σύνθετη παράμετρος που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας, που χρησιμοποιείται για την δημιουργία των δεδομένων από το αρχικό σήμα και την καθυστέρηση διάδοσης, που υφίστανται τα δεδομένα καθώς μεταδίδονται εντός του δικτύου. Συνεπώς, η εν λόγω παράμετρος αντιβαίνει στις αρχές σχεδιασμού των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών, που εξετάζουν αυτές τις δύο πτυχές ξεχωριστά. Στα σύγχρονα δίκτυα 5G και 6G απαιτείται η παροχή εγγυημένης καθυστέρησης για τα δεδομένα. Ωστόσο, ο έλεγχος της καθυστέρησης από μόνος του δεν είναι επαρκής και αυτό που χρειάζεται στις επικοινωνίες μεταξύ συσκευών είναι ο υπολογισμός της μέγιστης ηλικίας της πληροφορίας, προκειμένου να

εξασφαλιστεί και το freshness, διότι ο ρυθμός δειγματοληψίας προσαρμόζεται στις καθυστερήσεις του δικτύου κάθε φορά.

#### β. Συνάφεια (Relevance)

Για να κατανοήσουμε την έννοια της συνάφειας, ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι οι μετρήσεις μιας διαδικασίας στέλνονται σε μια οθόνη για απομακρυσμένη εκτίμηση ή παρακολούθηση, μέσω ενός καναλιού που εισάγει τυχαίες καθυστερήσεις. Τα αποτελέσματα θα είναι ολέθρια, από πλευράς των σφαλμάτων, αν διαχειριστούμε ξεχωριστά τη δειγματοληψία και την μετάδοση, καθώς η αύξηση των σφαλμάτων θα είναι πολλαπλασιαστική, στην περίπτωση της ομοιόμορφης δειγματοληψίας έναντι της εναλλακτικής, που βασίζεται στην ηλικία των δειγμάτων [44]. Ένα ακόμη περισσότερο προηγμένο semantic κριτήριο για τη δειγματοληψία, πέρα από αυτό της ηλικίας, είναι η σχετική αλλαγή της διαδικασίας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη συνάφεια – σχετικότητα του παρόντος σε σχέση με το προηγούμενο δείγμα, κατά την εκτέλεση των υπολογισμών. Επομένως, με εφαρμογή μη ομοιόμορφης δειγματοληψίας, αλλά με επίγνωση της διαδικασίας και την αποστολή ενός μέρους των δειγμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσο τετραγωνικό σφάλμα, αντίστοιχο με αυτό που επιτυγχάνεται από την ομοιόμορφη δειγματοληψία. Συνοψίζοντας, αν θεωρήσουμε ότι τα πακέτα στο δίκτυο υπόκεινται σε εκθετικά κατανομημένη καθυστέρηση, η δειγματοληψία με βάση την ηλικία της πληροφορίας και τη συνάφεια των δειγμάτων, έχουν καλύτερη απόδοση έναντι της ομοιόμορφης δειγματοληψίας. Συνεπώς, η αναθεώρηση και η αναζήτηση νέων τεχνικών δειγματοληψίας είναι ζωτικής σημασίας για τα σύγχρονα δίκτυα, που θα περιλαμβάνουν πληθώρα συσκευών μικρής κατανάλωσης, οι οποίες θα υπόκεινται σε διαφορετικές καθυστερήσεις.

#### γ. Αξία της πληροφορίας (Value of Information - Vol)

Το χαρακτηριστικό της συνάφειας – σχετικότητας, που περιεγράφηκε παραπάνω λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη γήρανση του δείγματος αλλά και τις σχετικές αλλαγές μεταξύ του προηγούμενου δείγματος. Ωστόσο, ακόμη και αυτό ενδέχεται να μην είναι επαρκές σε ορισμένα συστήματα ελέγχου του δικτύου (Network Control Systems – NCSs), που απαιτούν την ύπαρξη μιας πιο προηγμένης semantic παραμέτρου, η οποία θα λαμβάνει υπόψη την τιμή του επόμενου δείγματος για τους υπολογισμούς. Η παράμετρος αυτή είναι η αξία της πληροφορίας, η οποία μπορεί να μετρηθεί ως η διαφορά μεταξύ του οφέλους να έχω διαθέσιμη την τιμή του επόμενου δείγματος και του κόστους μετάδοσης του. Οι πολιτικές μετάδοσης που βασίζονται στην αξία της πληροφορίας, δύνανται να επιτύχουν σημαντικές μειώσεις στον όγκο της διακινούμενων δεδομένων, εξασφαλίζοντας ένα αποδεκτό επίπεδο για την απόδοση των συστημάτων.

### 3.5.2 Προκλήσεις στις semantic επικοινωνίες

Σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα εκτελούνται εσωτερικά, πληθώρα από διαδικασίες, όπως η δειγματοληψία, η κωδικοποίηση, η συμπίεση, η ανάθεση πόρων, ο προγραμματισμός, που θα πρέπει να προσαρμοστούν ανάλογα στις semantic παραμέτρους, που αναφέρθηκαν προκειμένου να μπορέσουν να προσαρμοστούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων δικτύων.

#### α. Δειγματοληψία, Κωδικοποίηση και Συμπίεση

Όλα τα κλασικά συστήματα εκτελούν τις διαδικασίες αυτές με τον ίδιο τρόπο. Αρχικά, το σήμα λαμβάνεται στην επιθυμητή ανάλυση και εν συνεχεία συμπιέζεται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας που αποβάλουν την πλεονάζουσα πληροφορία. Με αυτόν τον τρόπο κατασπαταλώνται πόροι του δικτύου για να μεταφερθούν δεδομένα που εν τέλει στο στάδιο της συμπίεσης το σύστημα θα τα αποβάλλει [44]. Αντίθετα, μια προσέγγιση της semantic συμπίεσης, θα είναι μία μέθοδος με μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, που θα συλλέγει την ελάχιστη ποσότητα δεδομένων, που απαιτούνται για την ανακατασκευή του λαμβανόμενου σήματος, στην επιθυμητή ανάλυση, όπως αυτή ορίζεται από την εφαρμογή που ζητά τα δεδομένα.

Η προσέγγιση της semantic συμπίεσης, θα εκτελεί συγκεκριμένες διαδικασίες της επεξεργασίας σήματος, απευθείας στο συμπιεσμένο σήμα, χωρίς να απαιτείται η πλήρης ανακατασκευή του. Με αυτόν τον τρόπο φιλοδοξούμε στην ανάπτυξη μιας βέλτιστης θεωρίας δειγματοληψίας που θα συνδυάζει την αραιότητα του σήματος και τη γήρανση των δειγμάτων, και θα είναι σε θέση να ανακατασκευάζει σε πραγματικό χρόνο το σήμα, παρά τους περιορισμούς που εισάγονται μέσω της διάδοσης (καθυστέρηση, εξασθένηση κ.λπ.).

Η παραπάνω προσέγγιση επηρεάζει σαφώς και τη διαδικασία της κλασικής κωδικοποίησης πηγής καναλιού, καθώς υπάρχει μεγάλος χρονικός περιορισμός στην εκτέλεση της κωδικοποίησης και της ανακατασκευής του σήματος. Για παράδειγμα, στις επικοινωνίες μεταξύ αυτόνομων οχημάτων, η ενημέρωση των δεδομένων απαιτεί την υποστήριξη συμπίεσης, πραγματικού χρόνου, που υπόκειται ταυτόχρονα στους χρονικούς περιορισμούς του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει η χρονική πολυτέλεια για την εκτέλεση της κλασικής κωδικοποίησης πηγής, που εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του μήκους της κωδικολέξης, προκειμένου να ικανοποιήσει το θεώρημα της εντροπίας του Shannon. Συνεπώς, η επίλυση της παραπάνω πρόκλησης δεν μπορεί να βασιστεί στις υπάρχουσες τεχνικές κωδικοποίησης, που απαιτούν την πλήρη ανακατασκευή του σήματος, χρησιμοποιώντας την ανάδραση για ενημερώνονται για την κατάσταση του διαύλου.

## β. Ανάθεση πόρων, προγραμματισμός και κατασκευή πακέτων

Για να επιτευχθεί η ισορροπία μεταξύ των semantic παραμέτρων και της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο, πρέπει να αναθεωρηθεί η δομή και ο τρόπος υλοποίησης βασικών διαδικασιών, όπως η ανατροφοδότηση, η ανάθεση πόρων, ο προγραμματισμός και η κατασκευή πακέτων. Αυτό απαιτεί την εγκατάλειψη απλουστευμένων υποθέσεων (οι συσκευές έχουν πάντα ενημερωμένες πληροφορίες, η μετάδοση πακέτων καταναλώνει ενέργεια κ.λπ.) και απλών μετρικών (AoI) και ενδεχομένως εξετάζοντας την εκμετάλλευση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης.

Όπως είναι γνωστό, οι πληροφορίες που μεταφέρει ένα πακέτο δεν είναι όλη ωφέλιμη αλλά ένα μέρος αυτής χρησιμοποιείται για σηματοδότηση και έλεγχο του δικτύου. Συνεπώς, όταν ένα τμήμα του μηνύματος είναι αφιερωμένο για να παρέχει ανατροφοδότηση στο σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί, με τη semantic προσέγγιση θα επωφελούνται μόνο οι ελάχιστοι χρήστες, οι οποίοι εμπλέκονται σε αυτή την επικοινωνία ή υπηρεσία, σε αντίθεση με την κλασική ανατροφοδότηση όπου όλοι οι χρήστες απολαμβάνουν τις βελτιώσεις, που επιφέρει η ανάδραση στην απόδοση του δικτύου. Συναφώς, η δομή των πακέτων είναι άλλη πτυχή, που χρήζει αναθεώρησης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο ρόλος της ανατροφοδότησης και των απαιτούμενων αναμεταδόσεων σε πραγματικές συνθήκες μετάδοσης.

Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να αναπτυχθούν semantic προγραμματισμός και ανάθεση πόρων, με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας, που είναι εξαιρετικά σημαντικό για τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Σε αντίθεση με την αντίληψη, που επικρατεί ότι για να λαμβάνουμε πιο ενημερωμένα δεδομένα απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός δειγματοληψίας, υπάρχουν έρευνες, οι οποίες έχουν δείξει ότι μπορούμε να πετύχουμε εξοικονόμηση ενέργειας αποστέλλοντας ενημερώσεις με μειωμένο ρυθμό (περίπου 30%) και ταυτόχρονα να επιτυγχάνουμε βελτιωμένη φρεσκάδα (6% χαμηλότερη AoI) στη διαδικασία [45]. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο πρόκειται να δοθούν τεράστιες δυνατότητες στα νέα συστήματα, που απαιτούν μικρή κατανάλωση ενέργειας. Το ενεργειακό αποτύπωμα, αυτής της διαδικασίας, θα είναι τεράστιο, αν αναλογιστούμε ότι η μείωση μεταδόσεων θα αφορά δισεκατομμύρια τερματικές συσκευές.

## Κεφάλαιο 4

### Ενσωμάτωση των Non-Terrestrial δικτύων στο 6G

#### 4.1 Εισαγωγή στην έννοια των Non-Terrestrial Networks (NTNs)

Τα δίκτυα 6G, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξης του 1 Tbps), μικρή καθυστέρηση (της τάξης του μs), υψηλή αξιοπιστία (100 φορές καλύτερη από ότι στα δίκτυα 5G) και αυξημένη κάλυψη. Η ευρεία κάλυψη μιας περιοχής με δυνατότητα παροχής πλήρους συνδεσιμότητας είναι μια πρόκληση η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί με την υπάρχουσα υποδομή των κυβελωτών συστημάτων. Τα Non-Terrestrial Networks (NTNs) αποτελούν τη λύση στην παραπάνω πρόκληση καθώς ενσωματώνουν εναέριες και διαστημικές πλατφόρμες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επικοινωνιών σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς υποδομή ή σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών που έχει υποστεί βλάβες η επίγεια υποδομή (φυσικές καταστροφές, πυρκαγιές κ.λπ.). Επιπλέον, το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης δορυφόρων (χαμηλής τροχιάς περί τα 600χλμ) αφορά το μειωμένο κόστος εκτόξευσης και συντήρησης καθώς τα εν λόγω κόστη είναι ανάλογα με το ύψος της τροχιάς δηλαδή τείνουν μειούμενα καθώς μικραίνει το ύψος της τροχιάς. Συνεπώς, τα NTN εκτιμάται ότι θα διαδραματίσουν σημαντικό παράγοντα στην εξέλιξη των δικτύων 6G και θα συνδράμουν τα μέγιστα για την εξασφάλιση ενός σημαντικού στόχου που έχει τεθεί στις προδιαγραφές και αφορά την παροχή επικοινωνιών παντού και πάντα [27].

Από την άλλη πλευρά η χρήση των NTNς εμπεριέχει και την αντιμετώπιση σημαντικών προκλήσεων οι οποίες εγείρονται λόγω της ανάγκης για κινητικότητα των χρηστών και του περιβάλλοντος διάδοσης [27]. Η πλειονότητα των προβλημάτων σε αυτού του είδους τις επικοινωνίες προέρχονται λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ του επίγειου τελικού χρήστη και του διαστημικού σταθμού βάσης η οποία αναπόφευκτα δημιουργεί μεγάλες καθυστερήσεις διάδοσης (propagation delay). Επιπλέον, για να καταστεί εφικτή η υιοθέτηση διαστημικών πλατφορμών στα δίκτυα 6G απαιτούνται τροποποιήσεις σε σημαντικές υπάρχουσες λειτουργίες όπως αυτές της διαπομπής και του εντοπισμού του χρήστη στο δίκτυο (paging protocol), για λόγους που θα αναλυθούν λεπτομερώς παρακάτω. Ένας ακόμη ανασταλτικός παράγοντας είναι οι μεγάλες απώλειες διάδοσης οι οποίες δημιουργούν την ανάγκη για αύξηση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος λήψης για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, επομένως και εδώ θα πρέπει να εξεταστεί η χρήση καινοτόμων τεχνικών για τη διαχείριση των πόρων. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι θα υπάρχουν μέρη του φάσματος τα οποία θα είναι κοινά τόσο για τα επίγεια

όσο και για τα εναέρια-διαστημικά δίκτυα καθίσταται σαφές ότι η αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των τελικών χρηστών αποτελεί μια πρόκληση που πρέπει να ερευνηθεί περαιτέρω καθώς ο οραματισμός για τα δίκτυα 6G περιλαμβάνει τη σύγκληση των επίγειων και εναέριων-διαστημικών δικτύων με σκοπό την εξασφάλιση ενός δικτύου με εξαιρετικά υψηλές δυνατότητες.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, δεν θα μπορούσε να μείνει έξω από την εξίσωση και η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI), η οποία στην παρούσα φάση αποτελεί έναν παράγοντα που επιφέρει πραγματική επανάσταση σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας που σχετίζονται με την υγεία, τις μεταφορές και το ηλεκτρονικό εμπόριο. Η τεχνητή νοημοσύνη εν γένει περιλαμβάνει συστοιχίες από έξυπνες συσκευές οι οποίες λειτουργούν συνήθως καταναμεμημένα με σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος. Η μηχανική μάθηση (Machine Learning – ML) είναι ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης που επιτρέπει στις μηχανές να εκπαιδεύονται – μαθαίνουν χρησιμοποιώντας μεγάλες ποσότητες δεδομένων προκειμένου να είναι σε θέση να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού. Η βαθιά μάθηση (Deep Learning – DL) είναι ένα ειδικό υποσύνολο της μηχανικής μάθησης που μελετά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANNs) και συνήθως είναι υλοποιημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιάζουν τον εγκέφαλο του ανθρώπου. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα κυβελωτά συστήματα είναι σε πολύ αρχικό στάδιο σε σύγκριση με άλλους τομείς λόγω της δυναμικής τους φύσης και της πολυπλοκότητάς των. Ωστόσο, η αντιμετώπιση των προκλήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω για την ανάπτυξη των δικτύων NTN αποτελούν ένα ελκυστικό τομέα που μπορεί να βρει εφαρμογή η τεχνητή νοημοσύνη, προκειμένου να λαμβάνονται οι βέλτιστες αποφάσεις για τη λειτουργία των δικτύων [28].

## 4.2 Non-Terrestrial Networks (NTNs) στα δίκτυα 6G

Η έννοια του Non-Terrestrial Network (NTN) αναφέρετε σε οποιοδήποτε δίκτυο λειτουργεί χρησιμοποιώντας εναέρια ή διαστημικά οχήματα για την παροχή επικοινωνιών. Επομένως, από τον ορισμό των Non-Terrestrial Networks προκύπτει ότι υπάρχουν δύο τύποι πλατφορφών (εναέρια και διαστημική) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το ύψος που λειτουργούν.

### 4.2.1 Διαστημικές πλατφόρμες για NTN δίκτυα

Με την έννοια διαστημική πλατφόρμα αναφερόμαστε σε δορυφόρους οι οποίοι εκτοξεύονται στο διάστημα με σκοπό να συνδράμουν στις υπηρεσίες που προσφέρει ένας ή περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι [29]. Οι δορυφόροι όπως είναι γνωστό κινούνται γύρω από τη γη σε συγκεκριμένες τροχιές με μεταβλητές γωνιακές ταχύτητες εκμεταλλευόμενοι τη βαρύτητα της

γης προκειμένου να διατηρούν τις τροχιές τους. Ο χρόνος που χρειάζεται ένας δορυφόρος για να ολοκληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τη γη ονομάζεται τροχιακή περίοδος και είναι ένα σημαντικό μέγεθος καθώς λόγω των διαφορετικών τροχιακών περιόδων ορισμένοι δορυφόροι μπορεί να μην είναι ορατοί από τη γη όλο το 24ωρο. Επομένως, άλλο ένα σημαντικό μέγεθος είναι ο χρόνος ορίζοντα που αναφέρεται στη μέγιστη χρονική διάρκεια που ένας δορυφόρος έχει οπτική επαφή από ένα επίγειο σταθμό ή δέκτη. Οι δορυφόροι, λαμβάνοντας υπόψη τη κινητικότητα τους ως προς τη γη, διακρίνονται σε γεωστατικούς (Geostationary Earth Orbit - GEO) και μη γεωστατικούς (Non-Geostationary Earth Orbit - GEO).

α. Γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit - GEO)

Αυτού του τύπου οι δορυφόροι έχουν τροχιακή περίοδο 24 ώρες η οποία ισούται με το χρόνο που χρειάζεται η γη για να κάνει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα αυτοί οι δορυφόροι να φαίνονται σταθεροί από τους επίγειους σταθμούς έτσι προκύπτει και το όνομα τους. Οι γεωστατικοί δορυφόροι για να επιτύχουν και να διατηρήσουν την παραπάνω τροχιακή περίοδο εκτοξεύονται σε ένα ύψος περίπου 35.786 χλμ. Συνεπώς, λόγω του μεγάλου ύψους η δέσμη έχει πολύ μεγάλο ίχνος και συγκεκριμένα η διάμετρός του μπορεί να εκτείνεται από 200 έως 1000 χλμ παρέχοντας κάλυψη σε μια ευρεία περιοχή. Ωστόσο, λόγω της τεράστιας απόστασης μεταξύ του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου, η διάδοση των σημάτων υπόκεινται σε πολύ μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης (της τάξης των 250 ms) [30] με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η υποστήριξη υπηρεσιών - επικοινωνιών που απαιτούν μικρή καθυστέρηση. Η πιο συνηθισμένη χρήση αυτών των δορυφόρων είναι για υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcasting).

β. Μη Γεωστατικοί δορυφόροι (Non-Geostationary Earth Orbit - GEO)

Όπως υποδηλώνετε από το όνομα τους οι δορυφόροι αυτοί έχουν τροχιακή περίοδο που είναι μικρότερη από τις 24 ώρες και ως εκ τούτου ένας επίγειος παρατηρητής δεν τους αντιλαμβάνεται ως σταθερούς. Οι βασικές διαφορές σε σχέση με τους γεωστατικούς δορυφόρους είναι ότι έχουν μικρότερη τροχιακή περίοδο, μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα και αρκετά μικρότερο ύψος λειτουργίας. Ανάλογα με το ύψος λειτουργίας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι χαμηλής (Low Earth Orbit – LEO) και μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit – MEO). Τα τυπικά ύψη λειτουργίας εκτείνονται από τα 200 έως 2.000 χλμ για τους LEO και από 2.000 έως 25.000 χλμ για τους MEO. Εξαιτίας της μικρότερης τροχιακής περιόδου ο χρόνος οπτικής επαφής ενός επίγειου σταθμού με ένα μη γεωστατικό δορυφόρο είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με ένα γεωστατικό. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε



ένα LEO που λειτουργεί σε ύψος περί τα 500 – 600 χλμ και έχει μία τροχιακή περίοδο 1.5 - 2 ώρες, τότε αυτός ο δορυφόρος ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν θα είναι ορατός από τη γη για 5 – 10 λεπτά κάθε φορά. Επιπλέον, δεδομένου ότι λειτουργούν σε μικρότερο ύψος οι δορυφόροι αυτοί έχουν μικρότερο ίχνος (διαμέτρου 5 έως 500 χλμ) αλλά το tradeoff είναι ότι έχουν πολύ μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης, ήτοι 20 ms για LEO και 94 ms για MEO [5], σε σχέσης με τους GEO. Η εγγύτητα των μη-γεωστατικών δορυφόρων στη γη έχει ως αποτέλεσμα αυτού του είδους οι δορυφορικές επικοινωνίες να αποτελούν μια ελκυστική επιλογή για τα δίκτυα 6G καθώς χαρακτηρίζονται από μικρή καθυστέρηση και απώλειες και επομένως μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και μεγάλου ρυθμού μετάδοσης. Οι πιο συνηθισμένος τύπος δορυφόρων LEO είναι οι λεγόμενοι Cubesats, οι οποίοι όπως υποδηλώνει το όνομα τους έχουν σχήμα κύβου και έχουν πολύ μικρό μέγεθος. Οι Cubesats χρησιμοποιούνται κατά κόρο σε ακαδημαϊκά και ερευνητικά προγράμματα λόγω του μικρού τους μεγέθους και του χαμηλού κόστους εκτόξευσης [31].

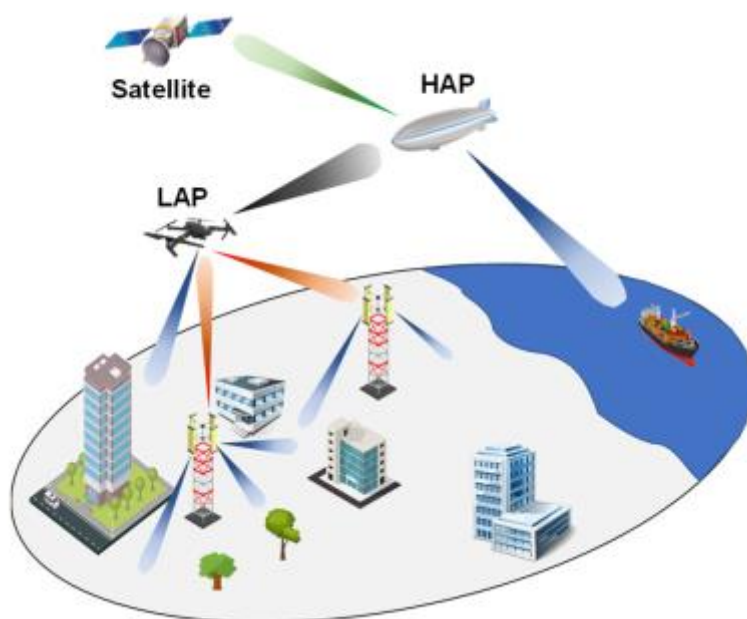
#### 4.2.2 Εναέριες πλατφόρμες για NTN δίκτυα

Οι εναέριες πλατφόρμες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), καθώς αποτελούν μια υποσχόμενη λύση για την επέκταση της κάλυψης των ασυρμάτων δικτύων σε δύσκολα περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχει υποδομή. Ανάλογο με το υψόμετρο που θα λειτουργούν διακρίνονται σε Low Amplitude Platform Systems (LAPS) και High Amplitude Platform Systems (HAPS). Οι πιο αξιoσημείωτες εναέριες πλατφόρμες που πρόκειται να ενσωματωθούν στα NTN δίκτυα είναι τα drone, τα αερόστατα, τα ιπτάμενα μπαλόνια και τα αεροπλάνα. Ο σχεδιασμός είναι τα παραπάνω συστήματα να λειτουργούν ως σταθμοί βάσης κατά αντιστοιχία με αυτούς των επίγειων δικτύων, προκειμένου να επιτυγχάνεται η επέκταση της κάλυψης του δικτύου σε σημεία χωρίς υποδομή και να εξασφαλίζεται υψηλή ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες που βρίσκονται σε περιοχές με οριακή κάλυψη. Αυτά τα συστήματα συνήθως λειτουργούν στην περιοχή της στρατόσφαιρας δηλαδή σε υψόμετρο περί τα 20 χλμ και το ίχνος τους έχει διάμετρο της τάξης των μερικών χιλιομέτρων. Από την μία πλευρά τα συστήματα αυτά έχουν πολύ μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης σε σύγκριση με τα διαστημικά από την άλλη όμως πλευρά καλούνται να αντιμετωπίσουν σημαντικές προκλήσεις που αφορούν στη σταθεροποίηση και τον ανεφοδιασμό τους.

#### 4.2.3 Υβριδικά NTN δίκτυα

Με τον όρο υβριδικά δίκτυα NTN αναφερόμαστε σε προχωρημένες τηλεπικοινωνιακές υποδομές οι οποίες θα ενσωματώσουν πολλές τεχνολογίες NTN με σκοπό να δημιουργήσουν ένα πλέγμα επικοινωνιών, πολλαπλών

επίπεδων, το οποίο θα είναι ανθεκτικό, ενοποιημένο και θα συμβάλει στην απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος [32]. Η ενσωμάτωση θα περιλαμβάνει δορυφορικά συστήματα και μη επανδρωμένα αεροχήματα τα οποία θα λειτουργούν συνεργατικά προκειμένου να εξασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση για το δίκτυο. Ο βασικός στόχος είναι η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της κάθε πλατφόρμας με απώτερο σκοπό τη βελτίωση παραμέτρων όπως η κάλυψη, η επίδοση και η ευελιξία του δικτύου.



Εικόνα 4.22: Υβριδική τοπολογία δικτύου (επίγειου και NTN) [31]

Συνοψίζοντας, οι διαστημικές και οι εναέριας πλατφόρμες αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και την εξέλιξη των NTN δικτύων. Οι δορυφόροι εκτιμάται ότι θα έχουν τα πρωτεία στις παραπάνω ενέργειες καθώς προσφέρουν τη δυνατότητα παγκόσμιας κάλυψης, υπόκεινται σε διεθνείς κανονισμούς σε ότι αφορά την χρήση του και τέλος υπάρχει η έννοια του χρονοδιαγράμματος καθώς γνωρίζουμε το χρόνο ζωής τους. Ως εκ τούτου, τα δορυφορικά δίκτυα θα καταλάβουν ένα μεγάλο μερίδιο των σύγχρονων NTN δικτύων.

#### 4.3 Η χρήση των δορυφόρων (Cubesats) στα δίκτυα 6G

Ο οραματισμός των δικτύων 6G για πανταχού παρουσία παρέχοντας υπηρεσίες παντού και πάντα φαίνεται να είναι εφικτός με την ενσωμάτωση των NTN δικτύων και ιδιαίτερα των δορυφορικών δικτύων. Οι δορυφόροι λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης μπορούν να παράσχουν επικοινωνίες σε περιοχές που είναι υποεξυπηρετούμενες ή δεν διαθέτουν καθόλου υποδομή (ωκεανοί, δυσπρόσιτες περιοχές κ.λπ.). Επιπλέον, μπορούν να αποτελέσουν μια

αξιόπιστη εναλλακτική σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών (πλημμύρες, πυρκαγιές κ.λπ.) όπου οι επίγειες υποδομές θα έχουν υποστεί βλάβες. Λαμβάνοντας υπόψη και την εξέλιξη της τεχνολογίας στην κατασκευή όλο και μικρότερων κεραιών και δορυφόρων (Cubesats) οι οποίοι εκτοξεύονται σε χαμηλές τροχιές εξασφαλίζοντας αξιόπιστες επικοινωνίες με μικρή καθυστέρηση. Προφανώς, ο στόχος των δικτύων 6G όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα είναι η συνεργατική λειτουργία των επίγειων και μη-επίγειων δικτύων με σκοπό την άριστη εξυπηρέτηση της πληθώρας των απαιτητικών εφαρμογών που θα κληθούν να υποστηρίξουν.

#### 4.3.1 Γενική αρχιτεκτονική

Οι δορυφόροι (Cubesats) μπορούν να αναλάβουν τους παρακάτω ρόλους [3]:

α. Αναμεταδότης (Relay Satellite): Ο δορυφόρος αυτός είναι σε θέση να εκτελέσει βασικές λειτουργίες όπως το φιλτράρισμα, η μετατροπή συχνότητας και η ενίσχυση του σήματος προκειμένου να φτάσει στον επίγειο δέκτη.

β. Αναγεννητής (Regenerator Satellite): Ο δορυφόρος αυτός θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αναγεννήσει τη ληφθείσα πληροφορία, υποστηρίζοντας λειτουργίες όπως η επεξεργασία σήματος, η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση δηλαδή να εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες με ένα σταθμό βάσης.

γ. Σύνδεση οπισθόζευξης (Backhaul Satellite): Ο δορυφόρος αυτός παρέχει σύνδεση μεταξύ ενός επίγειου σταθμού βάσης και του δικτύου κορμού.

Τα βασικά υποσυστήματα που απαρτίζουν ένα δορυφορικό NTN δίκτυο είναι τα ακόλουθα [30,33]:

α. Δορυφόρος: Είναι επιφορτισμένος με τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή να λειτουργεί ως αναγεννητής, αναμεταδότης και για παροχή σύνδεσης οπισθόζευξης.

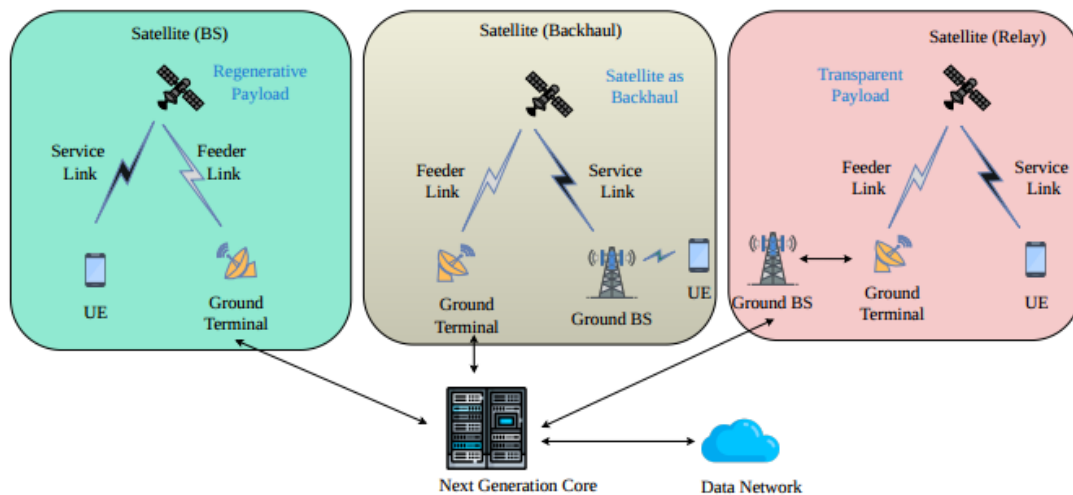
β. Πύλη (Gateway): Με τον όρο πύλη αναφερόμαστε στον επίγειο σταθμό που χρησιμοποιείται για να διασυνδεθεί το NTN δίκτυο με το δημόσιο δίκτυο δεδομένων. Στην περίπτωση που ο δορυφόρος λειτουργεί ως αναμεταδότης ο επίγειος σταθμός θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος με έναν επίγειο σταθμό βάσης, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις ο επίγειος σταθμός απλά διοχετεύει τα δεδομένα που λαμβάνει στον κορμό του δικτύου.

γ. Τελικός Χρήστης: Οι τελικοί χρήστες είναι είτε συσκευές χειρός είτε τα λεγόμενα VSAT (Very Small Aperture Terminal) που πρέπει βρίσκονται εντός της εμβέλειας του δορυφόρου.

δ. Ζεύξη Feeder Link: Είναι η ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου και της πύλης.

ε. Ζεύξη Service Link: Είναι η ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου και του τελικού χρήστη.

στ. Ζεύξη μεταξύ δορυφόρων: Είναι η ζεύξη μεταξύ διαφορετικών δορυφόρων προκειμένου να καθίσταται εφικτή η διαπομπή (handover) όταν απαιτηθεί ο τελικός χρήστης να αλλάξει κυψέλη εξυπηρέτησης.



Εικόνα 4.23: Ενδεικτικές αποστολές δορυφόρων (cubesats) στα NTN δίκτυα [28]

#### 4.3.2 Βασικά χαρακτηριστικά NTN δικτύων με χρήση Cubesats

α. Συχνότητες Λειτουργίας

Το επιτρεπόμενο φασματικό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται από τα 0.5 – 100 GHz. Παραδοσιακά στις δορυφορικές επικοινωνίες έχουν ανατεθεί οι παρακάτω μπάντες συχνοτήτων:

- L-Band (1 - 2 GHz): Σε αυτή τη μπάντα συχνοτήτων λειτουργεί το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (Global Positioning System – GPS) και τα φορητά δορυφορικά τερματικά.

- S-Band (2 - 4 GHz): Η μπάντα αυτή χρησιμοποιείται από ραντάρ (ναυτικού, πρόβλεψης καιρού κ.λπ.) και για παροχή δορυφορικών επικοινωνιών.
- C-Band (4 - 8 GHz): Η βασική χρήση αυτής της μπάντας αφορά την ευρυεκπομπή δορυφορικής τηλεόρασης.
- X-Band (4 - 8 GHz): Η μπάντα αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές.
- Ku-Band (12 - 18 GHz): Η βασική χρήση αυτής της μπάντας είναι για δορυφορικές υπηρεσίες ευρυεκπομπής.
- Ka-Band (26 - 40 GHz): Η μπάντα αυτή χρησιμοποιείται για παροχή υπηρεσιών με υψηλή ταχύτητα μετάδοσης συμπεριλαμβανομένου και τη δυνατότητα παροχής ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τη 3GPP, δύο από τις παραπάνω μπάντες συχνοτήτων θα αξιοποιηθούν για τα ενσωματωμένα δίκτυα (integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Network -NTN) και συγκεκριμένα αυτές είναι οι S-Band και Ka-Band. Συνεπώς, κατά την εξέταση των τρόπων για την αύξηση της απόδοσης του δικτύου, θα πρέπει να εξεταστούν παράμετροι όπως η ισχύς εκπομπής και οι παρεμβολές, καθώς οι εν λόγω συχνότητες διέπονται από αυστηρούς κανονισμούς.

#### β. Καθυστέρηση Διάδοσης

Η καθυστέρηση διάδοσης για τους cubesats είναι της τάξης των 20 – 100 ms δεδομένου ότι ανήκουν στις κατηγορίες MEO και LEO. Το εν λόγω χαρακτηριστικό χρήζει ιδιαίτερης προσοχής αν αναλογιστούμε ότι στα επίγεια δίκτυα η καθυστέρηση διάδοσης τις περισσότερες φορές είναι αμελητέα καθώς είναι της τάξης των ms [30]. Συναφώς, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό κατά τη σχεδίαση των δικτύων γιατί σε συγκεκριμένες υπηρεσίες μπορεί να επηρεάσει με αρνητικό τρόπο την επίδοση του συστήματος.

#### γ. Απώλειες Διάδοσης

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου συμβάλλουν το μεγαλύτερο μερίδιο στις απώλειες διάδοσης καθώς είναι ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και συνήθως κυμαίνονται από 60 – 120 dB. Επιπρόσθετα, ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλει στην αύξηση των

απωλειών διάδοσης, για επικοινωνίες με συχνότητα λειτουργίας πάνω από τα 6 GHz, είναι οι καιρικές συνθήκες (βροχή, ομίχλη κ.λπ.) [34] που επικρατούν στην περιοχή καθώς το μήκος κύματος αυτών των σημάτων είναι συγκρίσιμο με τα συσσωματώματα της βροχής (σταγόνες) με αποτέλεσμα να αλληλοεπιδρούν και να έχουμε διάχυση του σήματος προς όλες τις κατευθύνσεις. Τέλος, έχουμε το φαινόμενο του σπινθηρισμού το οποίο προκαλεί ταχείες διακυμάνσεις στο πλάτος και τη φάση του σήματος καθώς αυτό διαπερνά την ιονόσφαιρα (για συχνότητα λειτουργίας κάτω από τα 6 GHz) και την τροπόσφαιρα (για συχνότητα λειτουργίας πάνω από τα 6 GHz) [28]. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για την αποδοτική χρήση των NTN δορυφορικών δικτύων απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ελέγχου ισχύος που θα χρησιμοποιείται για να αντισταθμίζει, εφόσον είναι εφικτό τις απώλειες διάδοσης, με βέλτιστο τρόπο.

#### δ. Οι Cubesats ως σταθμοί βάσης

Οι Cubesats στα NTN δίκτυα αναμένεται ότι θα λειτουργούν και ως σταθμοί βάσης, πράγμα το οποίο από μόνο του αποτελεί μία τεράστια πρόκληση καθώς όπως γνωρίζουμε οι επίγειοι σταθμοί βάσης έχουν σταθερή θέση ενώ οι MEO και LEO δορυφόροι για έναν επίγειο παρατηρητή είναι κινούμενοι και ορατοί μόνο για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους μέσα στο 24ωρο, ως εκ τούτου απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός των τροχιών, του αστερισμού (πλήθος δορυφόρων) και του τρόπου εκτέλεσης των διαπομπών, προκειμένου να υπάρχει απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος.

#### ε. Περιοχή κάλυψης

Ένα από βασικότερα χαρακτηριστικά των δορυφορικών NTN δικτύων είναι ότι λόγω της λειτουργίας τους σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τη γη, το ίχνος των δορυφόρων έχει μεγάλη ακτίνα το οποίο σημαίνει ότι η εμβέλεια μιας δορυφορικής κυψέλης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με την εμβέλεια των επίγειων σταθμών βάσης. Αυτό το πλεονέκτημα δίνει την δυνατότητα της εξασφάλισης της πανταχού παρουσίας που είναι ένας από τους σημαντικότερους στόχους των δικτύων 6G, ωστόσο εισάγει και τεράστιες προκλήσεις σε ότι αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης εντός της κυψέλης και τη δυνατότητα εξυπηρέτησης ευαίσθητων υπηρεσιών ως προς την καθυστέρηση.

#### στ. Σηματοθορυβικός λόγος

Σε μία δορυφορική ζεύξη η συνολική ισχύς θορύβου που λαμβάνεται στην πλευρά του δέκτη δίνεται από την παρακάτω σχέση [46]:

$$N = kT_{\Sigma}B_{IF} \quad (4.1)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann,  $T_{\Sigma}$  η συνολική θερμοκρασία θορύβου ανηγμένη στην είσοδο του δέκτη και  $B_{IF}$  το διαθέσιμο εύρος ζώνης της δορυφορικής ζεύξης.

Ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του δορυφορικού δέκτη υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [46]:

$$SNR = \frac{P_r}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{L} \frac{1}{k T_{\Sigma} B_{IF}} \quad (4.2)$$

όπου  $P_r$  η ισχύς λήψης,  $P_t$  η ισχύς εκπομπής,  $G_t$  και  $G_r$  τα κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη αντίστοιχα και  $L$  οι συνολικές απώλειες της δορυφορικής ζεύξης.

Για να καταστεί εφικτή η ανεξαρτητοποίηση του σηματοθορυβικού λόγου από το εύρος ζώνης που είναι διαφορετικό από ζεύξη σε ζεύξη θα ορίσουμε την πυκνότητα ισχύος θορύβου, όπως παρακάτω [46]:

$$N_0 = \frac{N}{B_{IF}} = k T_{\Sigma} \quad (4.3)$$

Η παραπάνω σχέση (4.2) μπορεί πλέον να γραφεί, ως εξής [46]:

$$\frac{S}{N_0} = (P_t G_t) \left( \frac{G_r}{T_{\Sigma}} \right) \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left( \frac{1}{k} \right) \left( \frac{1}{L_r} \right) \quad (4.4)$$

όπου στη σχέση (4.4) εμφανίσαμε ξεχωριστά τις απώλειες ελευθέρου χώρου και τις λοιπές απώλειες της ζεύξης. Επομένως, αν εκφράσουμε τη προηγούμενη σχέση σε dB, θα έχουμε [46]:

$$\left[ \frac{S}{N_0} \right]_{dBHz} = 10 \log(P_t G_t) + 10 \log \left( \frac{G_r}{T_{\Sigma}} \right) - 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 10 \log(k) - 10 \log(L_r) \quad (4.5)$$

Συνεπώς από τη σχέση (4.5), μπορούμε να διακρίνουμε ότι ο σηματοθορυβικός λόγος μπορεί να αναλυθεί στους επιμέρους παράγοντες, όπως παρακάτω:

- Ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (Equivalent Isotropically Radiated Power - EIRP) του πομπού [ $10 \log(P_t G_t)$ ].

- Απώλειες ελευθέρου χώρου  $[-20\log(4\pi d/\lambda)]$ , οι οποίες εξαρτώνται από την απόσταση πομπού – δέκτη και τη συχνότητα λειτουργίας.

- Λόγο κέρδους κεραίας λήψης προς τη συνολική θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του δέκτη  $[10\log(G_r/T_z)]$ . Το οποίο είναι ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη μιας δορυφορικής ζεύξης καθώς ως χρήστες για να βελτιώσουμε το σηματοθορυβικό λόγο μόνο αυτό το μέγεθος μπορούμε να επηρεάσουμε καθώς όλα τα άλλα αφορούν και λαμβάνονται υπόψη κατά την αρχική εγκατάσταση του συστήματος.

- Λοιπές απώλειες της δορυφορικής ζεύξης  $[-10\log(L_r)]$ .

Η γνώση του παραπάνω λόγου  $(S/N_0)_{dBHz}$  είναι ιδιαίτερως σημαντική διότι στα μεν αναλογικά συστήματα αν τον διαιρέσουμε με το εύρος ζώνης προκύπτει ο λόγος σήματος προς θόρυβο και στα δε ψηφιακά αν πολλαπλασιάσουμε το λόγο με τη διάρκεια του ψηφίου προκύπτει ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς την πυκνότητα ισχύος θορύβου.

#### 4.3.3 Προκλήσεις στη χρήση Cubesats και NTN δικτύων

Μπορεί η χρήση των Cubesats στα NTN δίκτυα να επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε τομείς όπως η κάλυψη και να εισάγει την έννοια της παγκόσμιας κάλυψης όταν ο αστερισμός των δορυφόρων (πλήθος και τροχιές) γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε ένας επίγειος χρήστης να έχει πάντα πρόσβαση στο NTN δίκτυο μέσω ενός δορυφόρου. Παρόλα αυτά, εγείρονται και διάφορες προκλήσεις που πρέπει να εξεταστούν και να ληφθούν υπόψη από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και τους παγκόσμιους οργανισμούς που καταρτίζουν τις προδιαγραφές των συστημάτων. Ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις θα παρατεθούν και αναλυθούν εν συντομία, όπως παρακάτω:

α. Εκτίμηση Καναλιού: Η εκτίμηση του καναλιού στις ασύρματες επικοινωνίες αναφέρετε σε όλες εκείνες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη προκειμένου το σύστημα να αποκτήσει πληροφορίες που αφορούν στην κατάσταση του διαύλου (Chanel State Information – CSI). Η γνώση της κατάστασης του διαύλου, κάθε χρονική στιγμή, παρέχει τη δυνατότητα στο σύστημα να προσαρμόζεται στην κατάσταση του διαύλου και στις συνθήκες διάδοσης με σκοπό την εξασφάλιση αξιόπιστων επικοινωνιών. Οι προσαρμογές αυτές μεταξύ άλλων αφορούν τον έλεγχο ισχύος με σκοπό αφενός την αποφυγή παρεμβολών και αφετέρου την εξοικονόμηση ενέργειας που είναι ένα μείζον θέμα για τους cubesats καθώς επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των. Στα παραδοσιακά κυψελωτά συστήματα οι κλασικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού είναι αυτές της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood) και του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού

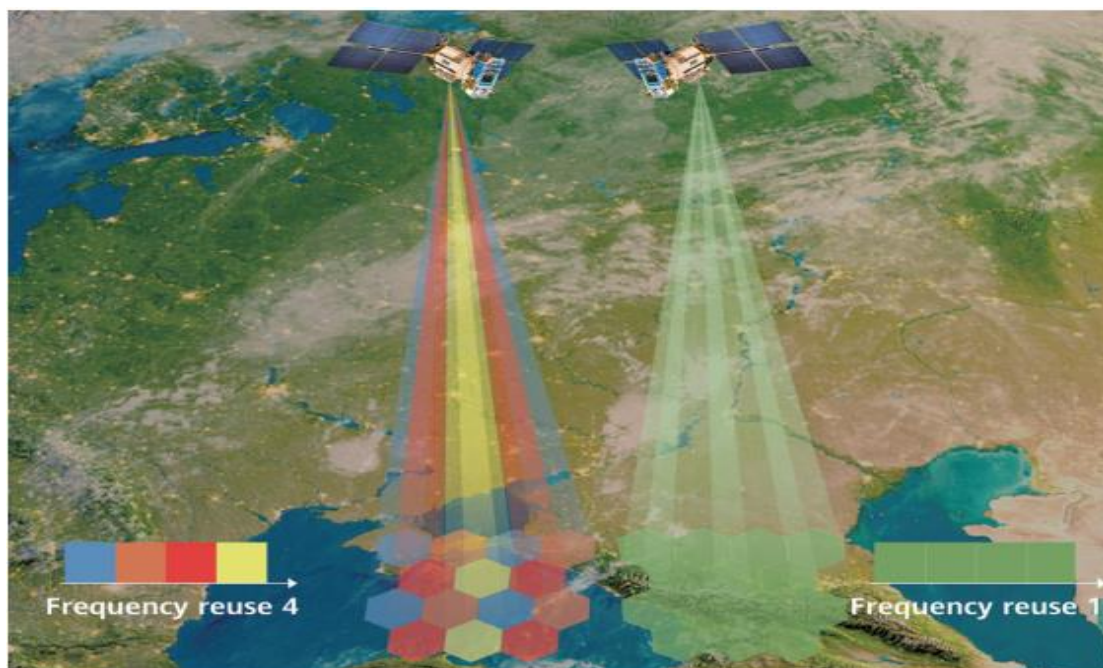


σφάλματος (Minimum Mean Square Error – MMSE). Ωστόσο, στα NTN δίκτυα οι παραπάνω μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν απόλυτα καθώς λόγω της μεγάλης καθυστέρησης διάδοσης, εν συγκρίσει με τα επίγεια δίκτυα, καθώς οι πληροφορίες που θα φτάσουν για την κατάσταση του καναλιού ενδεχομένως να μην ανταποκρίνονται στην τωρινή κατάστασή του [35]. Επομένως, για τους παραπάνω λόγους, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση νέων μεθόδων εκτίμησης καναλιού, για τα NTN δίκτυα, οι οποίες θα λειτουργούν σε συνδυασμό τις υπάρχουσες μεθόδους των επίγειων δικτύων, προκειμένου να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση του καναλιού.

β. Διαχείριση της κινητικότητας: Οι cubesats είναι δορυφόροι της κατηγορίας MEO και LEO, που σημαίνει ότι ανάλογα με το ύψος λειτουργίας η τροχιακή περίοδος θα κυμαίνεται από 2 έως 10 ώρες. Εξαιτίας την σύντομής τροχιακής περιόδου, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω ένας επίγειος παρατηρητής έχει οπτική επαφή για μερικά λεπτά με το δορυφόρο και ως εκ τούτου απαιτείται μεγάλος αριθμός cubesats για να παρασχεθεί απρόσκοπτη επικοινωνία στο χρήστη. Επομένως, ένας τελικός χρήστης ανεξάρτητα από τη δική του κινητικότητα θα χρειαστεί να υποστεί διαπομπές (handovers), από cubesat σε cubesat, εντός του αστερισμού που τον εξυπηρετεί και τα πράγματα μπορεί να γίνουν ακόμη χειρότερα αν υποθέσουμε ότι οι cubesats παρέχουν κάλυψη με χρήση πολλαπλών δεσμών καθώς η κάθε δέσμη καλύπτει πολύ μικρότερη περιοχή συγκριτικά με τη συνολική περιοχή κάλυψής του. Το φαινόμενο των συχνών διαπομπών στα δίκτυα επικοινωνιών δημιουργεί μεγάλο όγκο πλεονάζουσας πληροφορία που αφορά τη σηματοδότηση και αυτό με τη σειρά του οδηγεί εν γένει σε υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου.

γ. Μετατόπιση Doppler: Δεδομένου ότι υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των cubesats και των τελικών χρηστών ως μετατόπιση Doppler ορίζεται η μετατόπιση από τη φέρουσα συχνότητα του σήματος. Εξαιτίας αυτής της μετατόπισης συχνότητας οι τελικοί χρήστες συγχρονίζουν σε κεντρική συχνότητα η οποία είναι διαφορετική από την πραγματική φέρουσα. Αυτή η απώλεια του συγχρονισμού ενδεχομένως να οδηγήσει σε παρεμβολές μεταξύ των τελικών χρηστών, οι οποίες είναι γνωστές ως Inter-Carrier Interference (ICI). Στα επίγεια δίκτυα συνήθως η μετατόπιση συχνότητας θεωρείται αμελητέα, παρόλα αυτά στα NTN δίκτυα η μετατόπιση συχνότητας λαμβάνει μεγάλες τιμές καθώς οι cubesats κινούνται με υψηλές ταχύτητες. Εν γένει, η μετατόπιση Doppler εξαρτάται από τη φέρουσα συχνότητα και από το ύψος λειτουργίας των cubesats. Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε ένα σύστημα MEO ή LEO που λειτουργεί στην Ka-Band η μετατόπιση Doppler μπορεί να κυμανθεί από 225 kHz και μπορεί να φτάσει ακόμη και ως τα 720 kHz ανάλογα με το ύψος λειτουργίας, επομένως η αντιμετώπιση των ICI παρεμβολών πρέπει να ληφθεί σημαντικά υπόψη στην εφαρμογή και λειτουργία των NTN δικτύων [30].

δ. Κοινή χρήση - Διαμοιρασμός Φάσματος: Στα δίκτυα NTN αναμένεται ότι θα υπάρχει εκτεταμένη χρήση των S-Band και Ka-band. Ωστόσο, αξίζει να σημειώσουμε ότι η S-Band χρησιμοποιείται ήδη στα επίγεια δίκτυα για λογαριασμό των δικτύων 4G και αντιστοίχως η Ka-band για τα δίκτυα 5G. Συναφώς, οι τελικοί χρήστες που θα χρησιμοποιούν τους cubesats και τα NTN δίκτυα στις ανωτέρω μπάντες συχνοτήτων θα υποφέρουν από ομοδιαυλικές παρεμβολές (Co-Channel Interference - CCI) καθώς στο ίδιο φάσμα θα εκπέμπουν και οι χρήστες των επίγειων δικτύων. Επομένως, κρίνεται ζωτικής σημασίας η εξεύρεση και χρήση αποδοτικών τεχνικών για την κοινή χρήση του φάσματος προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι ομοδιαυλικές παρεμβολές.



Εικόνα 4.24: Αναχρησιμοποίηση συχνότητας μέσω πολλαπλών δεσμών [41]

ε. Διαχείριση Πόρων: Το φάσμα και η ισχύς εκπομπής είναι μεταξύ άλλων δύο βασικοί πόροι που συναντάμε σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Στα NTN δίκτυα η κατανομή και η διαχείριση των παραπάνω πόρων αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία, εξαιτίας των μεγάλων απωλειών διάδοσης και του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος. Για να αντισταθμιστούν οι απώλειες στα NTN δίκτυα απαιτείται περίπου 10 φορές μεγαλύτερη ισχύς εκπομπής από ότι στα επίγεια δίκτυα προκειμένου η ισχύς που αφικνείται στο δέκτη να του επιτρέπει να εκτελέσει τις διεργασίες που απαιτούνται για την ανάκτηση του εκπεμπόμενου σήματος. Η αύξηση της ισχύος εκπομπής είναι η προφανής λύση, όμως δεν αποτελεί πανάκεια στα συστήματα τηλεπικοινωνιών καθώς υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς που πρέπει να υπακούει. Επιπλέον, δεν πρέπει να ξεχνάμε τους τελικούς χρήστες που συνήθως έχουν φορητές συσκευές οι οποίες αφενός έχουν περιορισμένες δυνατότητες εκπομπής

μεγάλης ισχύος και αφετέρου η διάρκεια ζωής των μπαταριών είναι επίσης περιορισμένη και άμεσα εξαρτημένη από την ισχύ εκπομπής. Τέλος, το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων είναι πολύ περιορισμένο αναλογικά με το πλήθος των τελικών χρηστών που πρόκειται να έχουν πρόσβαση στα NTN δίκτυα.

στ. Οπτική του δικτύου: Υπό το πρίσμα των ανωτέρω αντιλαμβανόμαστε ότι η ενσωμάτωση των NTN στα επίγεια δίκτυα αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα που είναι ακόμη ανοικτό και χρήζει λεπτομερούς έρευνας σε διάφορους τομείς. Ένας από αυτούς είναι το computational offloading, που έχει ως στόχο να μεταφέρει τον υπολογιστικό φόρτο των διεργασιών στα NTN δίκτυα με σκοπό να μπορούν να συμμετέχουν σε αυτά απλές τερματικές συσκευές χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ικανότητα (ακόμη και αισθητήρες IoT), οι προκλήσεις όμως που εγείρονται λόγω της κινητικότητας των δορυφόρων και των μεγάλων καθυστερήσεων διάδοσης θέτουν ερωτηματικά σε ότι αφορά την αποτελεσματικότητα του. Επιπλέον, τα NTN δίκτυα θα είναι δυναμικά που σημαίνει ότι η τοπολογία τους θα μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και τις επικοινωνιακές ανάγκες της εκάστοτε περιοχής κάλυψής, το οποίο από μόνο του είναι ένα περίπλοκο θέμα αν αναλογιστούμε τις δυσκολίες που υπάρχουν για την κατανομή των πόρων στα συμβατικά δίκτυα των οποίων η τοπολογία έως ένα βαθμό θεωρείται αμετάβλητη.

#### 4.4 Η χρήση των UAV/ Drones στα δίκτυα 6G

Τα μη επανδρωμένα αεροχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), τα οποία είναι ευρέως γνωστά με τον όρο drone, είναι ιπτάμενα οχήματα τα οποία δύνανται να εκτελούν αποστολές πτήσης, σε καθορισμένο εναέριο χώρο, είτε υπό τον μεμακρυσμένο έλεγχο ανθρώπινου χειριστή είτε αυτόνομα χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση, υπό την προϋπόθεση ότι το σχέδιο πτήσης έχει φορτωθεί εκ προτέρων. Η χρήση των UAV από εφαρμογές εμφανίζει μια ραγδαία άνοδο στις μέρες μας λόγω της πληθώρας των χαρακτηριστικών που διαθέτουν. Τα βασικότερα εξ' αυτών να είναι η ευελιξία και η κινητικότητα, οι εγκατεστημένοι αισθητήρες (γυροσκόπια, θερμομέτρα κ.λπ.), το GPS, τα οπτικά φορτία και ίσως το σημαντικότερο όλων το χαμηλό κόστος κατασκευής.

Η χρήση και η ενσωμάτωση των UAV/ Drones στα δίκτυα 6G προκύπτει από την ανάγκη αποσυμφόρησης και υποβοήθησης του επίγειου δικτύου όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο από τους παρόχους. Ένα τέτοιο παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η κάλυψη ενός κορυφαίου αθλητικού γεγονότος, όπου λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν πρόκειται για κάτι μόνιμο η τηλεπικοινωνιακή υποστήριξη του θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ανάπτυξη ενός ad hoc δικτύου με συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Ο τρόπος λειτουργίας θα είναι παρόμοιος με αυτόν των δορυφορικών δικτύων με τη διαφορά ότι το ύψος

λειτουργίας, η εμβέλεια, η διάρκεια πτήσης και το κόστος είναι τάξης μεγέθους μικρότερα.

#### 4.4.1 Κατηγοριοποίηση των UAV με βάση τα χαρακτηριστικά τους

Τα UAV/Drones λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους και χαρακτηριστικά, όπως το βάρος, το μέγεθος, η διάρκεια πτήσης, η εμβέλεια κ.λπ. μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα micro-UAV, small-UAV, UAV και personalized-UAV, η ανάλυση των οποίων έχει όπως παρακάτω [36]:

α. micro-UAV: Το βάρος τους κυμαίνεται από 50 g έως 2 kg και εμβέλεια πτήσης δεν μπορεί να ξεπερνά τα 10 χλμ. Τα φτερά τους μπορεί να είναι σταθερά ή αναδιπλούμενα και η απογείωσή τους να απαιτεί ή όχι εκτοξευτή. Επίσης, μπορεί να είναι ελικοφόρα και να εκτελούν κάθετη προσγείωση και απογείωση (Vertical Take-off Landing - VTOL). Το άνοιγμα των πτερύγων ή των ελίκων κυμαίνεται από 15 εκ. έως 1 μ.

β. small-UAV: Το βάρος τους κυμαίνεται από 5 έως 10 kg και το άνοιγμα των πτερύγων από 1 έως 2μ. Μπορούν να εκτελούν πτήσεις σε εμβέλεια από 10 έως 15 χλμ.

γ. UAV: Σε αυτή την μεγάλη και γενική κατηγορία ανήκουν πληθώρα από UAV τα οποία ξεκινούν έχοντας τις βασικές δυνατότητες και μπορούν να φτάσουν σε πολύ προχωρημένες υλοποιήσεις. Το βάρος τους εκτείνεται από 5 έως 150 kg, το άνοιγμα των πτερύγων τους από 2 έως 7 μ. και η πτητική τους εμβέλεια από 10 έως 250 χλμ.

δ. personalized-UAV: Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει ογκώδη αεροχήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά εμπορευμάτων και προσωπικού από ένα σημείο σε ένα άλλο. Το βάρος τους είναι αρκετά μεγαλύτερο και εκτείνεται από 140 έως 1500 kg, το άνοιγμα των πτερύγων τους ξεπερνά τα 7 μ. και η πτητική τους εμβέλεια είναι μεγαλύτερη από τα 250 χλμ. Στην παρούσα φάση τα αεροχήματα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται κυρίως για στρατιωτικές εφαρμογές, όμως αναμένεται σύντομα η διάθεσή τους για εμπορική χρήση.

#### 4.4.2 Κατηγοριοποίηση των UAV με βάση το ρόλο τους στο δίκτυο

Τα UAV από τηλεπικοινωνιακής άποψης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που εξυπηρετούνται από το δίκτυο (Wireless Service UAV) και σε αυτά που θεωρούνται υποδομή του (Wireless Infrastructure UAV).

α. **Wireless Service UAV:** Αυτός ο τύπος των UAV αποτελεί για το δίκτυο έναν τελικό χρήστη που πρέπει να εξυπηρετηθεί όπως όλοι οι υπόλοιποι (κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές, κ.λπ.). Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βασικούς τομείς, όπως αυτοί των μεταφορών και της λογιστικής, της παρακολούθησης και ελέγχου ευαίσθητων υποδομών (αεροδρόμια, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, σύνορα κ.λπ.) και της έρευνας και διάσωσης. Τα Wireless Service UAV για να εκτελέσουν την αποστολή τους εγκαθιδρύουν με τον επίγειο σταθμό ελέγχου (Ground Control Station – GCS) δύο ζεύξεις επικοινωνίας. Η πρώτη είναι για τη διοίκηση και τον έλεγχο του UAV και περιλαμβάνει την ανταλλαγή δεδομένων που αφορούν την πλοήγηση, αναγνώριση, στοιχεία τηλεμετρίας κ.λπ. Η δεύτερη ζεύξη χρησιμοποιείται για την μεταφορά προς τον επίγειο σταθμό ελέγχου των πραγματικών δεδομένων (εικόνα, φωνή, βίντεο κ.λπ.) που συλλέγονται από τους εγκατεστημένους αισθητήρες.

β. **Wireless Infrastructure UAV:** Σε αντίθεση με προηγουμένως αυτού του τύπου τα UAV θεωρούνται ότι είναι μέρος της υποδομής του δικτύου και χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την κάλυψη, τη χωρητικότητα και γενικότερα τις δυνατότητές του. Στην πραγματικότητα τα Wireless Infrastructure UAV θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, κατ' απαίτηση (on-demand), ως σταθμοί βάσης και αναμεταδότες για να επεκτείνουν την εμβέλεια και να βελτιώσουν την αξιοπιστία του δικτύου.

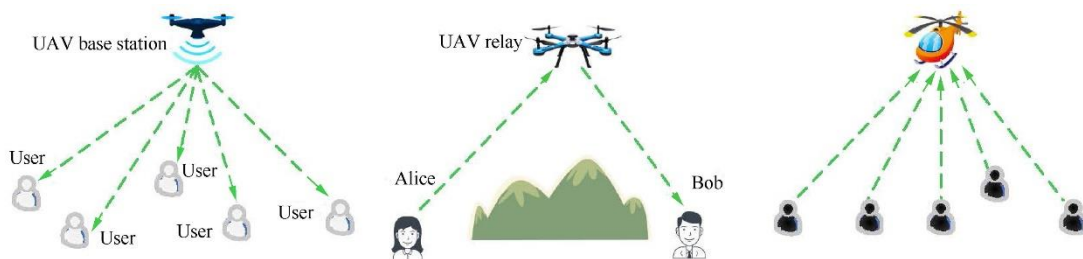
#### 4.4.3 Τύποι των Wireless Infrastructure UAV με βάση τον τρόπο χρησιμοποίησής τους στο δίκτυο 6G

Τα Wireless Infrastructure UAV αποτελούν μια ελκυστική λύση, για την επέκταση των δικτύων 6G, καθώς είναι πολύ εύκολη και γρήγορη η ανάπτυξή τους, έχουν ένα σχετικά χαμηλό κόστος απόκτησης και τέλος εκτιμάται ότι μπορούν να προσδώσουν μεγάλη ευελιξία. Η χρησιμοποίησή τους μπορεί να τύχει εφαρμογής σε διάφορα σενάρια, όπως λόγω χάρη η παρακολούθηση περιοχών και καταστροφών σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών. Όσον αφορά τη χρήση τους στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, η ιδέα της ύπαρξης ενός UAV που θα έχει τις δυνατότητες ενός σταθμού βάσης με σκοπό να βελτιώσει την κάλυψη του δικτύου, έχει ήδη κεντρίσει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας και η ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα 6G θεωρείται δεδομένη. Οι ρόλοι που ενδεχομένως να αναλάβουν τα Wireless Infrastructure UAV εντός του δικτύου, έχουν ως ακολούθως:

α. **Wireless Infrastructure UAV ως σταθμός βάσης:** Τα UAV θα παρέχουν την τηλεπικοινωνιακή υποδομή προκειμένου ένας επίγειος χρήστης να έχει πρόσβαση στο δίκτυο 6G, μέσω ενός σταθμού βάσης ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε ένα drone [37]. Αρχικά, το drone πρέπει να αποκτήσει σύνδεση με τον κορμό του δικτύου 6G, εφόσον αυτό επιτευχθεί μπορεί πλέον να λειτουργήσει είτε ως μεμονωμένος σταθμός βάσης είτε σε δίκτυο από drone

παρέχοντας έτσι απρόσκοπτες επικοινωνίες και επέκταση της περιοχής κάλυψης του επίγειου δικτύου. Επιπροσθέτως, η χρήση των UAV ως σταθμών βάσης αποτελεί μια καλή εναλλακτική επιλογή για την εξασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου σε περιπτώσεις, που για διάφορους λόγους (διακοπές ρεύματος, φυσικές καταστροφές κ.λπ.), υπάρχει κάποια δυσλειτουργία ή βλάβη στους επίγειους σταθμούς βάσης. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν συνεργατικά με τους επίγειους σταθμούς βάσης και να χρησιμοποιούνται για την αποσυμφόρηση του δικτύου όταν εντοπιστεί φόρτος από πλευράς όγκου δεδομένων, προκειμένου η ποιότητα των υπηρεσιών να διατηρείται σε όσο το δυνατό υψηλότερο επίπεδο και εντός των προδιαγραφών που έχουν τεθεί για τα δίκτυα 6G.

β. Wireless Infrastructure UAV ως αναμεταδότης: Αυτού του τύπου τα UAV για να εκτελέσουν την αποστολή τους θα πρέπει πρώτα να διασυνδεθούν σε έναν επίγειο σταθμό βάσης, ο οποίος με τη σειρά του θα είναι συνδεδεμένος και θα έχει πρόσβαση στον κορμό του δικτύου 6G. Επιπλέον, τα drone που λειτουργούν ως αναμεταδότες μπορούν να συνδεθούν με γειτονικά UAV/ drone επεκτείνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την εμβέλεια αναμετάδοσής τους. Ένα παράδειγμα που τα UAV πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αναμεταδότες είναι σε δυσπρόσιτες περιοχές που στερούνται τηλεπικοινωνιακής υποδομής και οπτικής επαφής μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών (π.χ. παρεμβολή ενός φυσικού εμποδίου μεταξύ πομπού και δέκτη), όπου ο αναμεταδότης να αναλάβει το ρόλο του ενδιάμεσου για να φτάσει το σήμα από το ένα στο άλλο άκρο.



Εικόνα 4.25: Ενδεικτικές αποστολές των UAVs στα NTN δίκτυα [42]

γ. Wireless Infrastructure UAV ως σημείο συγκέντρωσης - προώθησης δεδομένων: Στα δίκτυα 6G θα υπάρχει εκτεταμένη χρήση αισθητήρων οι οποίοι θα είναι διεσπαρμένοι σε διάφορες περιοχές προκειμένου να εκτελούν μετρήσεις και να συλλέγουν τα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν. Η συλλογή και η προώθηση των παραπάνω δεδομένων στο δίκτυο είναι μια ιδιαίτερα σημαντική και επίπονη διαδικασία, αν αναλογιστούμε ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η ανθρώπινη παρουσία είναι αρκετά δύσκολη ή ακόμη και ανέφικτη. Επομένως, τα UAV που θα λειτουργούν ως σημεία

συγκέντρωσης/προώθησης δεδομένων στην ουσία θα αποτελούν μία εύκολη και φθηνή λύση για την εγκατάσταση μιας backhaul ζεύξης προς τον κορμό του δικτύου. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η περιοδική συλλογή δεδομένων από αισθητήρες που είναι διεσπαρμένοι σε καλλιέργειες (smart agriculture), όπου το drone σε τακτά χρονικά διαστήματα θα ίπταται πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος για να συλλέγει – προωθεί τα δεδομένα στο δίκτυο.

#### 4.5 Πλεονεκτήματα από τη χρήση των UAV/Drones στα δίκτυα 6G

Με βάση τους παραπάνω τρόπους χρήσης και την ενσωμάτωση των UAV/ Drones στα δίκτυα 6G, αναμένεται ότι θα δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για τη βελτίωση σημαντικών μετρικών παραμέτρων του δικτύου, όπως χωρητικότητα, κάλυψη, ευκολία ανάπτυξης και ποιότητα εμπειρίας, παρέχοντας σημαντικότερα πλεονεκτήματα που θα αναλυθούν συνοπτικά, ως ακολούθως [36]:

α. Χωρητικότητα και κάλυψη: Η σχεδίαση των δικτύων της νέας εποχής έχει την τάση να στρέφεται όλο και περισσότερο στα NTN δίκτυα με χρήση UAV/Drones, καθώς όπως είναι γνωστό λειτουργούν σε φασματικές περιοχές που αφενός υπάρχει αρκετό διαθέσιμο φάσμα και αφετέρου είναι ελεύθερες προς χρήση, δηλαδή δεν απαιτείται η λήψη σχετικής άδειας από τον υπεύθυνο φορέα διαχείρισης του φάσματος. Στα 5 GHz που λειτουργεί η πλειονότητα των drones το διαθέσιμο φάσμα είναι 600 MHz και επίσης είναι σε εξέλιξη η διαδικασία «απελευθέρωσης» και νέων συχνοτήτων σε χαμηλότερες και υψηλότερες μπάντες. Συνεπώς, αυτές οι μη αδειοδοτούμενες μπάντες συχνοτήτων μπορούν να χωριστούν σε πολλαπλά κανάλια όπου το καθένα θα μπορεί να έχει το δικό του εύρος ζώνης, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου. Επιπλέον, με χρήση του carrier aggregation και του μη αδειοδοτημένου φάσματος, οι σταθμοί βάσης θα είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν ακόμα περισσότερους χρήστες, διατηρώντας ταυτόχρονα και τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε υψηλό επίπεδο. Επιπρόσθετα, όπως έχει αναφερθεί δεδομένου ότι τα drones θα λειτουργούν σε ύψος που είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από το ύψος ενός κλασικού επίγειου σταθμού βάσης θα συμβάλλουν στην επέκταση της κάλυψης της κυψέλης που εξυπηρετούν.

β. Κατ' απαίτηση (on-demand) ανάπτυξη του δικτύου: Η ευελιξία και η ευκολία της ανάπτυξης ενός ασύρματου δικτύου όταν παρίσταται ανάγκη είναι το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα που προσδίδει στα σύγχρονα δίκτυα η χρήση των UAV/Drones. Επιπρόσθετα, με τη χρήση τεχνολογιών που βασίζονται στις μη αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων, επωφελούνται σημαντικά και οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, διότι δεν αναγκάζονται να εμπλακούν στην μακρά, υψηλού κόστους και χρονοβόρα διαδικασία της απόκτησης νέου φάσματος. Επίσης, είναι δυνατή η αξιοποίηση και χρησιμοποίηση λειτουργιών που υπάρχουν ήδη στα δίκτυα 5G και αφορούν την απομακρυσμένη ρύθμιση και

διαχείριση του δικτύου με χρήση εικονικών διαδικασιών, με σκοπό να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο η ταχύτητα ανάπτυξης και οι δυνατότητες του δικτύου.

γ. Βελτιωμένη ποιότητα εμπειρίας: Οι μη αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων δεδομένου ότι είναι ελεύθερες προς χρήση από το ευρύ κοινό υπόκεινται σε αυστηρούς περιορισμούς σε ότι αφορά την ισχύ εκπομπής και για το λόγο αυτό έχουν πολύ μικρή περιοχή κάλυψης. Αυτό είναι και το κύριο μειονέκτημά τους και δεν μπορούν να ενσωματωθούν στα επίγεια δίκτυα που υποφέρουν συνήθως από μεγάλες απώλειες και διαλείψεις. Παρόλα αυτά, στα NTN δίκτυα με χρήση των UAV/Drones τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν έως ένα βαθμό πιο εύκολα καθώς το δίκτυο έχει δυναμική τοπολογία και οι θέσεις των σταθμών βάσης δεν είναι σταθερές, οπότε ανάλογα με τις συνθήκες και το περιβάλλον διάδοσης μπορεί να επιλεγεί αναλόγως το ύψος λειτουργίας με αποτέλεσμα ο τελικός χρήστης να απολαμβάνει πάντοτε υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Επιπλέον, με τη χρήση των UAV/Drones η επίτευξη και διατήρηση οπτικής επαφής μεταξύ τελικού χρήστη και εναέριου σταθμού βάσης είναι σχετικά εύκολο να επιτευχθεί, συνδυάζοντάς την με την μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης οδηγούμαστε σε ένα δίκτυο που απαιτούνται λιγότερες διαπομπές και οι χρήστες λαμβάνουν καλύτερες υπηρεσίες, καθώς δεν απαιτείται η ανταλλαγή πλεονάζουσας πληροφορίας που απλά επιβαρύνει το δίκτυο.

δ. Υλοποίηση επικοινωνιών από συσκευή-προς-συσκευή (machine-to-machine type communications): Στα NTN δίκτυα με χρήση UAV/Drones η επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών ξεφεύγει από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές, όπου μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών πρέπει να μεσολαβεί ένας κεντροποιημένος σταθμός βάσης. Στις επικοινωνίες συσκευή-προς-συσκευή (device-to-device - D2D) επιτρέπεται η απευθείας επικοινωνία – σύνδεση μεταξύ των συσκευών όταν βρεθούν η μία εντός της εμβέλειας της άλλης. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων τα δίκτυα με UAV/Drones τη backhaul ζεύξη την υλοποιούν μέσω δορυφορικής ή επίγεια ζεύξης και εκτελείται συνήθως σε ένα άλμα (hop). Στα NTN δίκτυα όπου θα υποστηρίζονται οι D2D επικοινωνίες και δεδομένου ότι τα drones θα λειτουργούν σε σμήνη (swarms) θα είναι εφικτή η υλοποίηση της backhaul ζεύξης με πολλαπλά άλματα (multi-hop) μεταξύ των drones, πράγμα που θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της καθυστέρησης – απόκρισης του δικτύου καθώς το σήμα δεν θα χρειάζεται να ταξιδέψει σε κάποια διαστημική πλατφόρμα.

ε. Αυξημένη ασφάλεια στις ζεύξεις: Η χρήση των UAV/Drones που λειτουργούν στις μη αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων καθιστά τα NTN δίκτυα ως μια λύση με χαμηλό κόστος υλοποίησης που όμως είναι ασφαλέστερη από ένα κοινό δίκτυο Wi-Fi που υλοποιείται στις ίδιες περιοχές συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει διότι τα UAV/Drones ενσωματώνονται και



διαλειτουργούν με τα επίγεια κυψελωτά συστήματα που έχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές ασφαλείας σε ότι αφορά την απόκτηση πρόσβασης ενός τελικού χρήστη πρόσβαση στο δίκτυο, οι οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν τον έλεγχο ακεραιότητας και αυθεντικότητάς του, έτσι κατά κάποιο τρόπο είναι σαν να μεταβιβάζεται η ασφάλεια και στα NTN δίκτυα.

Συμπερασματικά, η χρήση των NTN δικτύων με χρήση UAV/Drones στις μη αδιοδοτούμενες μπάντες συχνοτήτων έχουν σημαντικές πιθανότητες να επιφέρουν «επανάσταση» τόσο στις τεχνολογίες των UAV όσο και στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών. Ο οδικός χάρτης για τα δίκτυα 6G είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την ενσωμάτωση των UAV, καθώς αναμένεται να εισάγουν σημαντικές βελτιώσεις σε παραμέτρους όπως κάλυψη, χωρητικότητα, φασματική απόδοση, κινητικότητα, διαλειτουργικότητα και ευελιξία ανάπτυξης.

#### 4.6 Τεχνητή Νοημοσύνη στα Δίκτυα 6G - Data Driven Wireless Networks

##### 4.6.1 Σύντομη εισαγωγή στην έννοια του «Data Driven Wireless Networks»

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών μας έχει οδηγήσει σε μια νέα καθημερινότητα όπου γίνεται εκτεταμένη χρήση του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), του cloud-computing, της έξυπνης δικτύωσης (intelligent networking) και των κυψελωτών συστημάτων 5G και 6G, δημιουργώντας την ανάγκη για εμφάνιση νέων τεχνολογιών και δυνατοτήτων που θα έχουν ως κύριο στόχο να συμβάλλουν στην αποδοτικότερη λειτουργία των δικτύων. Τα συμβατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά βάση στα ασύρματα δίκτυα είναι είτε θεωρητικά είτε εμπειρικά που έχουν προκύψει κατόπιν μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της υποδομής και των απαιτήσεων, σε τομείς όπως η απόδοση, η σταθερότητα και η ασφάλεια των σύγχρονων δικτύων, καθίσταται σαφές ότι τα παραπάνω μοντέλα δεν θα είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν πλήρως στη σύγχρονη πραγματικότητα.

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης αναμένεται να διαδραματίσουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην περιοχή των ασύρματων δικτύων της νέας εποχής και κατ' επέκταση των δικτύων 6G. Σε ενεστώτα χρόνο έχουν αρχίσει ήδη να εμφανίζονται νέες ερευνητικές περιοχές που στοχεύουν στη βελτίωση της επίδοσης και της ασφάλειας των δικτύων αξιοποιώντας την τεχνητή νοημοσύνη. Ειδικότερα, οδηγούμαστε στην έννοια του «Data Driven Wireless Networks» όπου η τεχνητή νοημοσύνη θα χρησιμοποιεί τον μεγάλο όγκο δεδομένων που προκύπτει από τη λειτουργία των δικτύων με σκοπό να «εκπαιδεύσει» τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιεί και εν τέλει να λαμβάνει αποφάσεις πάνω σε πραγματικά δεδομένα. Η έννοια του «Data Driven Wireless Networks» βρίσκει μεγάλη απήχηση στα σύγχρονα δίκτυα γιατί οι τεχνολογικές εξελίξεις σε κρίσιμους τομείς όπως η υπολογιστική ικανότητα, η χωρητικότητα και η τεχνητή νοημοσύνη καθιστούν εφικτή πλέον

την επεξεργασία, μεταφορά και ταχεία ανάλυση αυτής της τεράστιας ποσότητας δεδομένων με σκοπό οι βέλτιστες αποφάσεις να λαμβάνονται βασισμένες στα δεδομένα (data driven decisions). Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η τεχνητή νοημοσύνη αναμένεται να υιοθετηθεί – ενσωματωθεί στα διάφορα επίπεδα των ασύρματων δικτύων με σκοπό να βελτιωθεί η απόδοση (ρυθμοί μετάδοσης, χωρητικότητα, καθυστέρηση κ.λπ.) και η ασφάλειά του και επιπλέον θα γίνουν προσπάθειες στην κατεύθυνση της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας.

#### 4.6.2 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στο φυσικό και MAC επίπεδο

Στους όρους των ασύρματων δικτύων τα κατώτερα επίπεδα, ήτοι φυσικό και MAC, είναι επιφορτισμένα με το να αλληλοεπιδρούνε στις μεταβολές του διαύλου προκειμένου να εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη, αξιόπιστη και αποδοτική χρήση του δικτύου στους τελικούς χρήστες. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στα κατώτερα επίπεδα έχει αποδειχθεί πλέον ότι επιτυγχάνεται με πολύ μεγάλη επιτυχία βοηθώντας τα ασύρματα δίκτυα να προσαρμόζονται στις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες του διαύλου με γρήγορο και αποδοτικό τρόπο. Συνοπτικά, στις επόμενες παραγράφους θα αναπτύξουμε τις διαδικασίες που επηρεάζονται και με ποιο τρόπο αυτές βελτιώνονται [38].

α. Βελτίωση της απόδοσης στο φυσικό επίπεδο με χρήση της τεχνητής νοημοσύνης

1. Κωδικοποίηση Καναλιού (Channel Coding): Η κωδικοποίηση καναλιού είναι μια βασική διαδικασία, που χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ασύρματων επικοινωνιών δεδομένου ότι λαμβάνουν χώρα σε θορυβώδη περιβάλλοντα διάδοσης. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν ήδη δημοσιευμένες μελέτες οι οποίες χρησιμοποιώντας τη μηχανική μάθηση βελτιώνουν τη διαδικασία της κωδικοποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανάπτυξη ενός νέου αποκωδικοποιητή ο οποίος βασίζεται στη χρήση των νευρωνικών δικτύων και λειτουργεί αποσυνθέτοντας τις διάφορες επαναλαμβανόμενες λειτουργίες που εκτελεί ένας συμβατικός αποκωδικοποιητής σε διαφορετικά επίπεδα, το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση στη κατανάλωση μνήμης. Επιπλέον, η μηχανική μάθηση έχει σημαντικές δυνατότητες και στο αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή γνωρίζοντας την κατάσταση τη διαύλου, είναι σε θέση να υπολογίζει το βέλτιστο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για να διατηρείται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) πάνω από το ελάχιστο κατώφλι.

2. Εκτίμηση Καναλιού (Channel Estimation): Στα ασύρματα δίκτυα, οι παρεμβολές μεταξύ των διαύλων δυσχεραίνουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια εκτίμησης καναλιού και το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη εντονότερο στα συστήματα MIMO. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την εκτίμηση

καναλιού είναι η μέθοδος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, η οποία είναι ακριβής αλλά έχει μεγάλη πολυπλοκότητα και η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, η οποία είναι γρηγορότερη αλλά λιγότερο ακριβής. Έχουν αναπτυχθεί ήδη κάποιοι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης [39] που βελτιώνουν την εκτίμηση καναλιού συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω μεθόδων, αποδεικνύοντας σε θεωρητικό επίπεδο ότι, δεδομένου ότι ο θόρυβος μπορεί να φιλτραριστεί, τα αποτελέσματα της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό αυτά της μεθόδου μέσου τετραγωνικού σφάλματος που είναι ακριβέστερα. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι η εκτίμηση καναλιού γίνεται ακόμη δυσκολότερη όταν πρέπει να λάβει υπόψη και το φαινόμενο Doppler, συνεπώς για το λόγο αυτό έχει ήδη ξεκινήσει η ανάπτυξη αλγορίθμων βαθιάς μάθησης οι οποίοι δεν θα βασίζονται στην εκτίμηση τους σε δεδομένα που είναι και ίδια προϊόντα εκτίμησης όπως συμβαίνει στις συμβατικές μεθόδους, όπου πρώτα εκτιμάται ο ρυθμός Doppler και εν συνεχεία χρησιμοποιείται ως δεδομένο για την εκτίμηση του καναλιού.

3. Ανάδραση σχετικά με την κατάσταση του καναλιού (Channel State Information - CSI Feedback): Στα συστήματα πολλαπλών χρηστών MIMO, τα οποία βασίζονται στη διαμόρφωση δέσμης, κάθε ασύρματος σταθμός παρέχει ανάδραση σχετικά με την κατάσταση του καναλιού (CSI Feedback) στο σημείο πρόσβασης (Access Point – AP) που τον εξυπηρετεί, προκειμένου αυτός να εκτελέσει μία προκωδικοποίηση (precoding) η οποία βοηθά στην αντιμετώπιση των παρεμβολών μεταξύ των διαφορετικών σταθμών. Λαμβάνοντας υπόψη, το τεράστιο μέγεθος των διατάξεων MIMO που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 6G αντιλαμβανόμαστε ότι η συμπίεση και η κβάντιση του πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές για την κατάσταση του καναλιού είναι μια πρόκληση για το σύστημα. Επομένως, η τεχνητή νοημοσύνη μέσω της βαθιάς μάθησης προσανατολίζεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων οι οποίοι δεν θα απαιτούν «επανεκπαίδευση» του μοντέλου όταν αλλάξει ο ρυθμός κβάντισης, τεχνική η οποία έχει το πλεονέκτημα ότι οι παράμετροι του νευρωνικού δικτύου μπορούν να θεωρηθούν ότι παραμένουν σταθερές και ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η «επανεκπαίδευση» να γίνει βελτιστοποιώντας τη διαφορά των δύο ρυθμών.

4. Αυτόματη αναγνώριση του σχήματος διαμόρφωσης: Με τον όρο αυτόματη αναγνώριση του σχήματος διαμόρφωσης εννοούμε ότι το τηλεπικοινωνιακό σύστημα έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει το σχήμα διαμόρφωσης που έχει χρησιμοποιηθεί χωρίς να απαιτείται αποκωδικοποίηση του σήματος. Η τεχνητή νοημοσύνη έχει δείξει κάποια ενθαρρυντικά δείγματα γραφής, καθώς έχουν ήδη αναπτυχθεί εφαρμογές [15] που αναγνωρίζουν βασικά σχήματα διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας αλγορίθμους μηχανικής μάθησης του τύπου K-NN (K- Nearest Neighbors), οι οποίοι έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά απλοί και ως εκ τούτου διαθέτουν χαμηλής

πολυπλοκότητας υλοποίηση από πλευράς υλικού και όλα αυτά χωρίς να υποβαθμίζεται η ακρίβεια της αναγνώρισης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να αναγνωρίζονται κυματομορφές χρησιμοποιώντας μεθόδους βαθιάς μάθησης για την αναγνώριση εικόνων, το οποίο επιτυγχάνεται με τη μετατροπή των κυματομορφών σε μιγαδικά σήματα και εν συνεχεία με την απεικόνισή τους ως αστερισμούς πλάτους και φάσης.

5. Διαχείριση των δεσμών (Beam Management): Η διαμόρφωση δέσμης αναμένεται να έχει εκτεταμένη χρήση στα δίκτυα 6G, καθώς εξαιτίας των πολύ υψηλών συχνοτήτων (mmWave, THz) οι δέσμες θα είναι τελείως κατευθυντικές. Συναφώς, δεδομένου ότι ο στόχος είναι σε κάθε χρήστη να διατίθεται μία δέσμη για να αποκαθιστά την επικοινωνία με τον σταθμό βάσης, η διαχείριση των δεσμών θα γίνει μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, αν σε αυτό προσθέσουμε και τον τεράστιο όγκο τελικών χρηστών που θα κληθούν να εξυπηρετήσουν τα δίκτυα 6G. Επομένως, οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης αποτελούν ίσως μία πιθανή λύση για τη βέλτιστη διαχείριση των δεσμών. Για παράδειγμα, στις επικοινωνίες vehicle-to-vehicle (V2V) που το περιβάλλον και οι θέσεις των εμπλεκόμενων μερών αλλάζουν δυναμικά η βέλτιστη ανάθεση δέσμης αποτελεί μία τεράστια πρόκληση. Επιπλέον, με την ενσωμάτωση των NTN δικτύων, όπου τα UAV/Drones θα χρησιμοποιούνται ευρέως, απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων οι οποίοι θα επιτρέπουν στα UAV να επιλέγουν τη βέλτιστη δέσμη που θα τα εξυπηρετήσει, μεταξύ αυτών που τα παρακολουθούν και δύνανται να τα υποστηρίξουν επικοινωνιακά. Τέλος, η ευθυγράμμιση της δέσμης μεταξύ των πομποδεκτών θα είναι επίσης μια δύσκολη διαδικασία λόγω της κατευθυντικότητας και του μικρού μεγέθους των κεραιών, ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο θα λαμβάνει ως δεδομένα τη μορφολογία του εδάφους και τις θέσεις των κεραιών και θα υπολογίζει τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των δεσμών.

β. Βελτίωση της απόδοσης στο MAC επίπεδο με χρήση της τεχνητής νοημοσύνης

1. Κατανομή ισχύος και διαχείριση ενέργειας: Η τεχνητή νοημοσύνη έχει αρχίσει ήδη να υιοθετείται για την ανάπτυξη μοντέλων που θα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος και διαχείρισης ενέργειας. Στην παρούσα φάση, οι προσπάθειες που έχουν υλοποιήσει το παραπάνω ζητούμενο το έχουν πετύχει σε ευφυή δίκτυα αποτελούμενα από αισθητήρες και χρήστες οι οποίοι διακρίνονται σε πρωτεύοντες και δευτερεύοντες ανάλογα με τις δυνατότητές τους και διαμοιράζονται το ίδιο φάσμα. Οι μεν πρωτεύοντες σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν το επίπεδο ισχύος βασιζόμενοι στους κανόνες που ισχύουν κάθε φορά. Οι δε δευτερεύοντες σταθμοί δεν μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις πληροφορίες που αφορούν την κατανομή ισχύος των πρωτευόντων σταθμών και πρέπει εμμέσως να την εκτιμήσουν χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες και

το λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος των σημάτων που φτάνει σε αυτούς. Επομένως, η λύση στην παραπάνω πρόκληση είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης, που θα προβλέπει την κατανομή ισχύος των πρωτεύοντων και εν συνεχεία θα προσαρμόζει το επίπεδο ισχύος στους δευτερεύοντες σταθμούς. Συναφώς, δεδομένου ότι στα δίκτυα αισθητήρων μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις είναι εξοικονόμηση ενέργειας με σκοπό την εξασφάλιση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης διάρκειας ζωής για τη μπαταρία του αισθητήρα, υπάρχει ένα ανοικτό πεδίο έρευνας για την τεχνητή νοημοσύνη για να αναπτυχθούν μοντέλα που θα εξασφαλίζουν το παραπάνω ζητούμενο θέτοντας κανόνες λειτουργίας, όπως για παράδειγμα πότε και πόσο τακτά θα αποστέλλονται τα δεδομένα, πόση ώρα θα είναι ενεργός ο αισθητήρας και πόση ώρα σε λειτουργία ύπνου και όλα αυτά να είναι πλήρως εναρμονισμένα με το φόρτο και τις ανάγκες του δικτύου.

2. Διαχείριση φάσματος και τεχνικών πρόσβασης: Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιηθεί στη διαχείριση του φάσματος και των τεχνικών πρόσβασης των δικτύων 6G με σκοπό να βελτιώσει ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητά των. Στα δίκτυα beyond 5G και 6G βρίσκει όλο και περισσότερο πρόσφορο έδαφος η χρήση της μη-ορθογώνιας πρόσβασης πολλαπλών χρηστών (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA), που είναι μια νέα και αρκετά δημοφιλής τεχνική πρόσβασης. Η NOMA σε αντίθεση με τις κλασσικές τεχνικές πρόσβασης (TDMA, FDMA) επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται και να χρησιμοποιούν την ίδια χρονοθυρίδα και την ίδια συχνότητα ταυτόχρονα. Δεδομένου επίσης ότι στην NOMA οι πολλαπλοί χρήστες αντιστοιχούνται σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος για να ξεχωρίζουν, απαιτείται πλήρης διαχείριση της ενέργειας και του φάσματος, έτσι ώστε ο εκάστοτε δέκτης να είναι σε θέση να αποσυνθέσει επιτυχώς τα σήματα από τους χρήστες. Επιπλέον, με χρήση μηχανικής μάθησης έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο με χρήση πιθανοτήτων που στοχεύει στη δυναμική πρόσβαση των χρηστών στο διαθέσιμο φάσμα, χρησιμοποιώντας πολλαπλά κανάλια πρόσβασης. Συγκεκριμένα, ο κάθε χρήστης αποκτά πρόσβαση σε ένα κανάλι και στέλνει πακέτα με κάποια πιθανότητα και στο τέλος ενημερώνεται αν έγινε επιτυχώς η λήψη τους στο δέκτη. Συνεπώς, μέσω της «εκπαίδευσης» του μοντέλου μπορούν να εξαχθούν σημαντικά στοιχεία που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος όπως για παράδειγμα πότε είναι η καταλληλότερη χρονική θυρίδα να αποκτήσει πρόσβαση ένας χρήστης και να μεγιστοποιήσει το ρυθμό μετάδοσης στο κανάλι.

3. Συσχέτιση του χρήστη: Με τον όρο συσχέτιση του χρήστη εννοούμε μια διαδικασία που είναι υπεύθυνη να συσχετίσει τον τελικό χρήστη με ένα κατάλληλο σημείο πρόσβασης, λαμβάνοντας υπόψη πληροφορίες που αφορούν τη γεωγραφική του θέση, την ποιότητα του καναλιού, το επίπεδο παρεμβολών και το διαθέσιμο φάσμα. Στην ερευνητική κοινότητα υπάρχουν ήδη δημοσιευμένες έρευνες που αφορούν την ανάπτυξη τεχνικών μηχανικής

μάθησης για την επίτευξη της βέλτιστης συσχέτισης του χρήστη με πολύ υψηλά ποσοστά αποτελεσματικότητας, τόσο σε απλά δίκτυα όσο και σε δίκτυα με μεγάλη ετερογένεια τεχνολογιών όπως για παράδειγμα τα 5G. Εν γένει, ο τρόπος λειτουργίας αυτών των μοντέλων περιλαμβάνει δύο φάσεις, όπου στην μεν πρώτη φάση αποφασίζεται η συσχέτιση του χρήστη και σε δεύτερη φάση εκτελείται η αξιολόγηση, συνήθως με χρήση του SNIR, της απόδοσης του μοντέλου.

#### 4.6.3 Η Τεχνητή Νοημοσύνη στο επίπεδο δικτύου και μεταφοράς

Όταν χρησιμοποιούμε τον όρο ασύρματες επικοινωνίες στο μυαλό μας έχουμε τα δύο κατώτερα στρώματα (φυσικό και MAC) και περιλαμβάνουν βασικές διεργασίες, οι οποίες έχουν αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας στην παρούσα ενότητα θα αναφέρουμε δύο βασικές διεργασίες των επιπέδων δικτύου (δρομολόγηση) και μεταφοράς (έλεγχος συμφόρησης), στις οποίες μπορεί να βρει εφαρμογή η τεχνητή νοημοσύνη και να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο η απόδοση του δικτύου και κατ' επέκταση του συστήματος.

α. Δρομολόγηση: Η δρομολόγηση είναι η σημαντικότερη διεργασία που εκτελείται από το επίπεδο δικτύου, καθώς μέσω των αλγορίθμων δρομολόγησης καθορίζονται οι διαδρομές που πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα για να φτάσουν από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Επομένως, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης αποτελούν ένα πεδίο που ταιριάζει απόλυτα στη φιλοσοφία των μοντέλων μηχανικής μάθησης, καθώς μπορούν να βοηθήσουν τους δρομολογητές στον προσδιορισμό του αποδοτικότερου τρόπου αποστολής των δεδομένων (πότε και από πού) του δικτύου. Στα δίκτυα 6G ο διακινούμενος όγκος δεδομένων θα είναι τεράστιος και η φύση των υπηρεσιών που τα παράγουν εξαιρετικά ετερογενής (ευαίσθητη ή μη-ευαίσθητη στην καθυστέρηση, πραγματικού ή μη-πραγματικού χρόνου κ.λπ.), ως εκ τούτου είναι ζωτικής σημασίας η ανάπτυξη ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης που θα λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω δεδομένα και θα εφαρμόζει πολιτικές προτεραιοτήτων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου.

β. Έλεγχος συμφόρησης: Με τον όρο έλεγχο συμφόρησης αναφερόμαστε στις ενέργειες που κάνει το πρωτόκολλο TCP, με σκοπό να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου ή να μετριαστεί σε περίπτωση που υπάρχουν ενδείξεις ότι έχει αρχίσει να υπάρχει. Στη βιβλιογραφία, υπάρχει μεγάλο πλήθος δημοσιεύσεων από αλγορίθμους μηχανικής μάθησης που έχουν εφαρμοστεί στον έλεγχο συμφόρησης του επιπέδου μεταφοράς. Η φιλοσοφία πίσω από τη λειτουργία αυτών των αλγορίθμων είναι η επιβράβευση όταν υπάρχει η δυνατότητα και ο περιορισμός όταν εντοπίζεται η έναρξη της συμφόρησης. Τα σύγχρονα δίκτυα αποτελούνται από πληθώρα ζεύξεων το εύρος ζώνης των οποίων ποικίλει, δίνοντας τη δυνατότητα να υπάρχουν

κανάλια με διαφορετικές χωρητικότητες. Υπό αυτό το πρίσμα, όταν το δίκτυο μπορεί να διεκπεραιώσει τη μεταφορά των διακινούμενων δεδομένων εκμεταλλεύεται τα κανάλια με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα και όταν όλο αυτό αρχίζει να του δημιουργεί προβλήματα τότε εφαρμόζει τον περιορισμό που σημαίνει μείωση του μεγέθους του παραθύρου συμφόρησης στους πομπούς και άρα αποστολή λιγότερου όγκου δεδομένων. Συνεπώς, απαιτείται ένας διαρκής έλεγχος της κατάστασης του δικτύου με σκοπό να αξιοποιούνται βέλτιστα οι ζεύξεις με μεγάλη χωρητικότητα και ταυτόχρονα να επιβάλλονται περιορισμοί όταν η συμφόρηση αρχίζει να κάνει την εμφάνισή της μέσω της απώλειας πακέτων.

#### 4.6.4 Ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα NTN δίκτυα και προκλήσεις

Η ανάπτυξη των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, που θα τύχουν εφαρμογής στα NTN δίκτυα, αποτελεί μια επίπονη διαδικασία με πολλές προκλήσεις. Αν και τα τελευταία χρόνια έχουν μειωθεί σημαντικά τα έξοδα εκτόξευσης και συντήρησης των διαφόρων NTN πλατφορμών, και ειδικά των δορυφορικών, η βελτιστοποίηση του κόστους είναι μία από τις σημαντικότερες περιοριστικές παραμέτρους που καθυστερεί την ενσωμάτωση των NTN δικτύων στα 6G σε ευρεία κλίμακα. Λαμβανομένων υπόψη των ανωτέρω, οι NTN πλατφόρμες έχουν περιορισμένες δυνατότητες σε ότι αφορά την εκπεμπόμενη ισχύ, το διαθέσιμο φάσμα και τους υπολογιστικούς πόρους, τα οποία με τη σειρά τους περιορίζουν την απόδοση των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης. Η αναπόφευκτη μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης σε συνδυασμό με την πολύπλοκη και χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του περιβάλλοντος διάδοσης των NTN δικτύων εισάγει πρόσθετες προκλήσεις στα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης σε ότι αφορά την «εκπαίδευση» και ανάπτυξή τους σε πραγματικό χρόνο. Στην ενότητα αυτή, θα αναλύσουμε συνοπτικά ορισμένες από τις προκλήσεις, που εγείρονται κατά το σχεδιασμό των αξιόπιστων, αποδοτικών και σύγχρονων NTN δικτύων που θα βασίζονται στα μοντέλα της τεχνητής νοημοσύνης [28].

α. Περιορισμένη δυνατότητα ενσωματωμένης λειτουργίας: Οι προηγμένες εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης απαιτούν ειδικά ενσωματωμένα chip, τα οποία μπορούν να συνδράμουν στην εκτέλεση παράλληλης επεξεργασίας σύνθετων διεργασιών, όπως για παράδειγμα η εκτεταμένη εκτέλεση πράξεων με πίνακες που χρησιμοποιούνται κατά κόρο από τα μοντέλα βαθιάς μάθησης, επιταχύνοντας έτσι την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συνεπώς, η αποδοτικότητα αυτών των αλγορίθμων είναι άμεσα και ισχυρά εξαρτημένη από τη διαθεσιμότητα υπολογιστικών πόρων και τις δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων (από πλευράς υλικού). Ωστόσο, περισσότερη υπολογιστική δυνατότητα πρακτικά σημαίνει περισσότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς επίσης και αυξημένο μέγεθος, τα οποία αυξάνουν το κόστος συνολικό κόστος συντήρησης για τις NTN πλατφόρμες. Οι περισσότερες NTN

πλατφόρμες, όπως για παράδειγμα οι δορυφόροι έχουν περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους, προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση του κόστους. Η αποτελεσματικότητα των υπολογιστικών συσκευών, και ειδικότερα των ενσωματωμένων, υπολογίζεται συνήθως από την αναλογία της υπολογιστικής ισχύος προς το γινόμενο της κατανάλωσης ενέργειας, του συνολικού βάρους και του συνολικού κόστους και για να συμφέρι μια τέτοια επένδυση σε έναν δορυφόρων η τιμή της θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Συνοψίζοντας, η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας στους τομείς της ενεργειακής απόδοσης και της ικανότητας κατασκευής όλο και μικρότερων chip είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της ενσωμάτωσης της τεχνητής νοημοσύνης στα NTN δίκτυα, με αποδοτικό τρόπο παρέχοντας πλέον επαρκή δυνατότητα ενσωματωμένης λειτουργίας.

β. Ξεπερασμένες (Outdated) πληροφορίες: Η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης είναι ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση στην ανάπτυξη NTN δικτύων που θα βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη. Το βασικό πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η επίδοση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, που εφαρμόζονται για τέτοιου είδους εφαρμογές, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πληροφορίες ανάδρασης που λαμβάνει από το περιβάλλον. Δεδομένου ότι το δίκτυο μεταβάλλεται ταχέως, οι πληροφορίες ανάδρασης θα πρέπει να φτάνουν σε πραγματικό χρόνο (λιγότερο του 1 ms) ή κοντά στον πραγματικό χρόνο (της τάξης του 1 – 10 ms) για να θεωρηθούν ότι ανταποκρίνονται στην παρούσα περίοδο, ωστόσο αυτό είναι ανέφικτο για τα NTN δίκτυα καθώς λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη έχουν πολύ μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης. Επομένως, η εξασφάλιση online «εκπαίδευσης» των μοντέλων είναι ιδιαίτερα δύσκολη και ενδεχομένως ανακριβής, λόγω της μεγάλης απόκλισης που υπάρχει στους χρόνους που απαιτούνται για να φτάσει η ανάδραση των επίγειων και NTN δικτύων. Επιπρόσθετα, πολλές φορές απαιτείται και αποστολή πληροφοριών ελέγχου από τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης προς τις συσκευές του δικτύου, προκειμένου να προσαρμοστούν στο ραγδαία εξελισσόμενο περιβάλλον, όμως και εδώ υπάρχει το ίδιο πρόβλημα ότι αυτές οι πληροφορίες ενδέχεται όταν φτάσουν να είναι ξεπερασμένες και να μην ανταποκρίνονται στην πραγματική κατάσταση του περιβάλλοντος.

γ. Πλεονάζοντα Δεδομένα: Πέρα από τη μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, που είναι ένα πρόβλημα για τα NTN δίκτυα έχουν επίσης και περιορισμένο εύρος ζώνης λόγω των ελλείψεων στο διαθέσιμο φάσμα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης αλληλοεπιδρούνε με το δίκτυο ανταλλάσσοντας μηνύματα (ανατροφοδότησης, σηματοδότησης, ελέγχου κ.λπ.), τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του συστήματος όμως για τους χρήστες είναι πλεονάζοντα δεδομένα που καταναλώνουν τους ήδη περιορισμένους πόρους του δικτύου. Για παράδειγμα, η ανταλλαγή μηνυμάτων για τη διασφάλιση του βέλτιστου handover, απαιτεί την



ανταλλαγή μηνυμάτων που αφορούν τη θέση των NTN πλατφορμών, καθώς αυτή η πληροφορία δεν είναι άμεσα διαθέσιμη στο σύστημα. Συνεπώς, αντιλαμβανόμαστε ότι όλες αυτές οι πλεονάζουσες πληροφορίες μειώνουν την απόδοση και τη χωρητικότητα των NTN δικτύων.

δ. Θέματα Ασφαλείας: Η χρησιμοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης στα NTN δίκτυα εκτιμάται ότι θα δημιουργήσει πολλές ευπάθειες καθώς εισάγει νέα πεδία για την εκτέλεση επιθέσεων και λιγότερη διαφάνεια στο σύστημα. Αυτές οι επιθέσεις (adversarial, poisoning, model evasion) επηρεάζουν τα δεδομένα που δίνονται ως είσοδοι στο μοντέλο μηχανικής μάθησης, με σκοπό να υποβαθμίσουν την απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Δεδομένου ότι αυτά τα δεδομένα εισόδου συλλέγονται από το περιβάλλον των NTN δικτύων, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος κάποιος κακόβουλος χρήστης να μπορεί να αλλοιώσει και να επηρεάσει τα δεδομένα «εκπαίδευσης» των μοντέλων προς όφελος του. Οι επιθέσεις Denial-of-Service (DoS) μπορούν να προκαλέσουν διακοπές σε βασικές λειτουργίες του δικτύου ή ακόμη και την κατάρρευσή του, υπερφορτώνοντάς εικονικά προκαλώντας έτσι υπερβολική κατανάλωση πόρων. Ως ένα ενδεικτικό σενάριο, μπορούμε να θεωρήσουμε έναν κακόβουλο χρήστη που έχει αποκτήσει πρόσβαση σε ένα από τα τμήματα του δικτύου. Εν συνεχεία εκμεταλλευόμενος αυτή την πρόσβαση δημιουργεί υπερβολικές απαιτήσεις που οδηγούν στην υπερκατανάλωση πόρων και ενδεχομένως στην εμφάνιση συμφόρησης προκαλώντας έτσι μείωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Επιπλέον, όπως συζητήθηκε και παραπάνω το μοντέλο της τεχνητής νοημοσύνης επικοινωνεί με το περιβάλλον του δικτύου και ανταλλάσσουν διάφορα μηνύματα κατά τη φάση της «εκπαίδευσης». Συνεπώς, κατά την ανταλλαγή αυτών των μηνυμάτων ένας κακόβουλος χρήστης μπορεί να παρεμβληθεί μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων μερών και να τροποποιήσει αυτά τα μηνύματα, αυτή η μορφή επίθεσης είναι γνωστή ως Man-in-the-Middle (MiM) και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του δικτύου. Επομένως, ο εντοπισμός και η αποφυγή αυτών των επιθέσεων είναι ζωτικής σημασίας για την διατήρηση της απόδοσης του δικτύου σε υψηλά επίπεδα.

ε. Έλλειψη ποιοτικών δεδομένων: Όλες οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης είναι data driven, όποτε η πρόσβαση και η διαθεσιμότητα σε κατάλληλα δεδομένα «εκπαίδευσης» είναι εξαιρετικά σημαντική για τη βελτίωση της απόδοσης αυτών των μεθόδων. Ωστόσο, στα δορυφορικά δίκτυα για παράδειγμα η δημιουργία ποιοτικών δεδομένων μερικές φορές μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή ακόμη και ανέφικτη λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος και των διακοπών της σύνδεσης. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά των δεδομένων του NTN περιβάλλοντος μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αυτά του επίγειου περιβάλλοντος, το οποίο απαιτεί προσεκτικό χειρισμό κατά τη φάση «εκπαίδευσης» και προσαρμογής του μοντέλου, διότι μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην διαδικασία «εκπαίδευσης», η οποία θα γίνει με

δυσκολία και ενδεχομένως όταν εφαρμοστεί σε ένα πραγματικό δίκτυο να μην έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

στ. Αδυναμία γενίκευσης των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης: Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι data driven, δηλαδή η «εκπαίδευση» τους βασίζεται σε συγκεκριμένα δεδομένα και ως εκ τούτου είναι δύσκολη η γενικευμένη χρήση αυτών των αλγορίθμων για διαφορετικά σενάρια. Τα «εκπαιδευμένα» μοντέλα είναι σε θέση να σκιαγραφήσουν τα χαρακτηριστικά των δεδομένων «εκπαίδευσης», ωστόσο αυτό δεν εξασφαλίζει εγγυημένη απόδοση όταν αξιολογηθούν με πραγματικά δεδομένα λόγω της μεταβλητής φύσης των NTN δικτύων. Συναφώς, ένα «εκπαιδευμένο» μοντέλο για κάποιο συγκεκριμένο σενάριο μπορεί να μην είναι αποδοτικό σε κάποιο άλλο και ενδεχομένως να μην μπορεί να εφαρμοστεί σε κανένα άλλο NTN σενάριο. Επομένως, το επιθυμητό είναι ένα μοντέλο του «εκπαιδευτεί» να μπορεί να τύχει ευρείας και αποδοτικής εφαρμογής σε οποιοδήποτε άλλο σενάριο. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα και την ετερογένεια των NTN δικτύων η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων αποτελεί μια τεράστια πρόκληση για τον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης.

#### 4.7 Προτυποποίηση των NTN και το χρονοδιάγραμμα ενσωμάτωσής τα δίκτυα 6G

Η 3GPP, ως η παγκόσμια αρχή, σε συνεργασία με τους περιφερειακούς οργανισμούς προτυποποίησης, έχει επηρεάσει σημαντικά την ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων από τα αρχικά στάδια (3G, 4G και 5G) εμφάνισής τους, μέσω της κατάρτισης των προτύπων. Επιπλέον, η 3GPP αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, ήτοι εκπρόσωποι της αγοράς, κατασκευαστές εξοπλισμού (chip, UE, κεραιές κ.λπ.), τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, προσφέροντας τη δυνατότητα για αμοιβαία και αποτελεσματική συνεργασία, προς όφελος τόσο των τελικών χρηστών όσο και των επιχειρήσεων. Συνεπώς, η κατάρτιση των τεχνικών προδιαγραφών και των λοιπών απαιτήσεων για τα δίκτυα 6G σε ένα τέτοιο περιβάλλον παγκόσμιας συνεργασίας εκτιμάται ότι θα έχει θετικό αντίκτυπο και στις αγορές.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, τα μέλη του έργου 6G-NTN έχουν ήδη αναγνωρίσει τα θετικά οφέλη που θα προκύψουν από την ενσωμάτωση των NTN στα δίκτυα 6G και προσβλέπουν ότι μια συλλογική συνεργασία στον καθορισμό των προδιαγραφών, ενδεχομένως να ωφελήσει και να ενθαρρύνει συνεργασίες και σε άλλους τομείς, όπως η βιομηχανική παραγωγή, η τεχνογνωσία και τα κανάλια διανομής.

Στην παρούσα φάση, η προτεραιότητα που έχει δοθεί αφορά την ενσωμάτωση των δορυφορικών NTN στα δίκτυα 6G και αυτό θα καταγραφεί επίσημα πρώτα στο Rel-20 και έπειτα στο Rel-21, όπου θα αναφέρονται

στοιχεία για το δορυφορικό εξοπλισμό και το κανονιστικό πλαίσιο αντίστοιχα. Συνεπώς, στο Rel-21 θα εγκριθεί ένα πρώτο σύνολο ελάχιστων προδιαγραφών που πρέπει να υποστηρίξει ο δορυφορικός εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί στα 6G-NTN και στη συνέχεια στα επόμενα releases θα μπορούν να προταθούν περαιτέρω βελτιώσεις για την αντιμετώπιση νέων αναγκών.

Το χρονοδιάγραμμα για τις παραπάνω εργασίες έχει ως εξής [40]:

α. Rel-20: Θα περιλαμβάνει την υποβολή κάποιων βασικών μελετών με πιθανούς τρόπους χρήσης των δορυφορικών δικτύων και τις τεχνικές απαιτήσεις του εξοπλισμού και θα ακολουθήσει η εκπόνηση νέων μελετών που θα αφορούν την αρχιτεκτονική και τα πρωτοκολλά πρόσβασης. Το Σεπτέμβριο του 2024 αναμένεται να εγκριθούν οι πρώτες μελέτες και ως τον Ιούνιο του 2025 εκτιμάται να εγκριθεί και η δεύτερη φάση των μελετών.

β. Rel-21: Θα εισάγει βελτιώσεις στις τεχνικές προδιαγραφές σε επίπεδο συστήματος και RAN και αναμένεται να ξεκινήσει το 2027.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας το παρόν πόνημα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και εν γένει οι επικοινωνίες της νέας εποχής δεν θα έχουν καμία σχέση με την αρχική φιλοσοφία των επικοινωνιών, που ξέραμε μέχρι τώρα, που το επίκεντρο ήταν ο τελικός χρήστης και καταβάλλονταν η μέγιστη δυνατή προσπάθεια για να του παρασχεθούν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Στα δίκτυα B5G και 6G η ενσωμάτωση του IoT/IoE θα προκαλέσει την εισαγωγή ενός τεράστιου όγκου ετερογενών συσκευών στο δίκτυο, που θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ισότιμοι τελικοί χρήστες και ανάλογα με τις απαιτήσεις – προδιαγραφές, που έχουν τεθεί, να εξυπηρετούνται αναλόγως, παρέχοντας αξιόπιστες και ποιοτικές υπηρεσίες.

Το κλειδί της επιτυχίας στο παραπάνω εγχείρημα και στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί για τα δίκτυα B5G και 6G είναι η αποτελεσματική συνεργασία της υπάρχουσας επίγειας υποδομής με τα μελλοντικά, υπό ανάπτυξη, NTN δίκτυα, προκειμένου να δημιουργηθεί μία εσχάρα – πλέγμα επικοινωνιών. Αυτή η νέα φιλοσοφία των δικτύων θα συμβάλλει στην εξασφάλιση απρόσκοπτων επικοινωνιών, καθώς με τη συμπληρωματική λειτουργία της επίγειας και εναέριας υποδομής, ο πλεονασμός (redundancy), που θα επιτυγχάνεται, θα φτάσει σε τέτοιο επίπεδο, όπου οι οποιοσδήποτε αστοχίες σε εξοπλισμό, θα παρακάμπτονται δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο από το ίδιο το σύστημα. Συναφώς, τα NTN δίκτυα με την ευελιξία ανάπτυξής τους και την παροχή αυξημένης γεωγραφικής κάλυψης έρχονται να καλύψουν πλήρως την απαίτηση για πανταχού παρουσία του δικτύου, οπότεδήποτε το απαιτεί ο τελικός χρήστης.

Επιπλέον, το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας έχει και πρέπει να στραφεί ακόμη περισσότερο, προς τις οπτικές τεχνολογίες, (Visible Light Communication – VLC, Light – Fidelity – LiFi, Free Space Optical Communication – FSOC), καθώς μπορούν να δώσουν μια τεράστια ώθηση στις RF επικοινωνίες, όπου το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα βρίσκεται ήδη στον κορεσμό. Συνεπώς, με τις οπτικές τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν κατά βάση φασματικές περιοχές (ορατό φως, υπέρυθρη, υπεριώδης), που παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης και μπορούν να πετύχουν αποδόσεις στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων εφάμιλλους με αυτούς των οπτικών ινών. Τα βασικά πλεονεκτήματα των οπτικών τεχνολογιών είναι ότι το φάσμα στο οποίο λειτουργούν δεν χρειάζεται άδεια χρήσης, η χωρητικότητα του συστήματος είναι τεράστια και ειδικά στις FSO επικοινωνίες, λόγω της κατευθυντικότητας των δεσμών, δίνεται η δυνατότητα αναχρησιμοποίησης συχνότητας, αγνοώντας σχεδόν την ύπαρξη των παρεμβολών. Ωστόσο, οι οπτικές επικοινωνίες που λαμβάνουν χώρα σε εξωτερικούς χώρους, επηρεάζονται σημαντικά από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και την ύπαρξη ή όχι άριστης ευθυγράμμισης

μεταξύ πομπού και δέκτη, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν από σταδιακή υποβάθμιση μέχρι τη διακοπή της ζεύξης.

Επιπρόσθετα, θα ήταν μεγάλη παράλειψη αν δεν εκθειάσουμε τη σημαντική συμβολή της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων από την μία πλευρά θα ωθεί το δίκτυο στα όρια του και από την άλλη πλευρά θα αποτελεί την τροφοδότηση των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, προκειμένου να «εκπαιδευτούν» και εν συνεχεία να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν διαδικασίες, όπως ο έλεγχος ροής, η διαχείριση συμφόρησης, η κατασκευή των πινάκων δρομολόγησης και η διαπομπή. Υπό το πρίσμα, όσων έχουν αναφερθεί εκτενώς στο κυρίως σώμα της παρούσας, η βελτιστοποίηση αυτού του είδους των διαδικασιών θα είναι ζωτικής σημασίας στα B5G και 6G, καθώς οι εφαρμογές που θα κληθούν να υποστηρίξουν (αυτόνομη οδήγηση, εξ αποστάσεως ιατρικές επεμβάσεις κ.λπ.) έχουν μηδενική ανοχή στην καθυστέρηση και απαιτούν υψηλή αξιοπιστία στις ζεύξεις, δηλαδή η απώλεια της συνδεσιμότητας δεν θα πρέπει να υπάρχει ούτε σαν σκέψη. Επομένως, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στην SDN τεχνολογία, όπου οι ελεγκτές είναι επιφορτισμένοι με βέλτιστη εκτέλεση των ανωτέρω διαδικασιών, θεωρείται «εκ των ων ουκ άνευ» για την αποδοτική λειτουργία των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση - μελέτη του θέματος των σύγχρονων δικτύων μας έδειξε ότι πρέπει να γίνουν τεράστια βήματα στην ανάπτυξη και κατασκευή του υλικού που θα υλοποιήσει τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές, προκειμένου να ξεπεραστούν σημαντικές προκλήσεις, όπως η υπερβολική κατανάλωσης ενέργειας και η απαγωγή θερμότητας. Αρχής γενομένης, από τις κεραίες MIMO, που θεωρούνται τα βασικά συστατικά στοιχεία της τοπολογίας των B5G και 6G δικτύων, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητά τους. Επίσης, η τεχνολογία των συσσωρευτών είναι ένα πεδίο, που απαιτεί ριζοσπαστικές αλλαγές, καθώς η διάρκεια πτήσης - λειτουργίας των UAV - drones επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη βιωσιμότητα των NTN δικτύων. Το ζητούμενο στην περίπτωση αυτή είναι τελείως αντιφατικό καθώς από τη μία στοχεύουμε στην κατασκευή όσο το δυνατόν μικρότερου μεγέθους μπαταριών (μείωση όγκου και βάρους) και από την άλλη πλευρά επιθυμούμε ταυτόχρονα μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης (αύξηση χωρητικότητας του συσσωρευτή), το αν εν τέλει καταστεί εφικτό θα πετύχουμε αυξημένη διάρκεια πτήσης, που είναι βαρύνουσας σημασίας για τα NTN δίκτυα.

Επίσης, ανάθεση των απαραίτητων υπολογιστικών πόρων (υπολογιστική ισχύ, μνήμη, κ.λπ.) και η πρόσβαση σε αυτούς είναι ένας τομέας, που χρήζει περαιτέρω ανάπτυξης, αν αναλογιστούμε το πλήθος των τελικών χρηστών στα σύγχρονα δίκτυα. Η μία οπτική αφορά την εξέλιξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων του υλικού και η άλλη τη βέλτιστη κατανομή αυτών των πόρων στην τοπολογία του δικτύου, προκειμένου το ποσοστό

χρησιμοποίησης τους να είναι τέτοιο, που να τους καθιστά αποδοτικούς και οικονομικά βιώσιμους.

Συνοψίζοντας, τα σύγχρονα συστήματα B5G και 6G, συνδυαζόμενα με τα NTN δίκτυα, αναμένεται ότι θα δώσουν μια καινούρια πνοή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, επιφέροντας μια νέα τεχνολογική επανάσταση, η οποία έχει σκοπό να επηρεάσει και να βελτιώσει την καθημερινότητα (εργασία, διασκέδαση, υγεία, μεταφορές κ.λπ.), στο σύνολο της κοινωνίας.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές

- [1] SC. Horng, SS. Lin, “Fuzzy call admission control combined with distributed dynamic channel assignment and reassignment for cellular mobile systems”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Article number: 86 (2015).
- [2] A. Mishra, “Advanced Cellular Network Planning and Optimisation 2G/2.5G /3G...Evolution to 4G”, Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [3] T. S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice”, Hall PTR, 1996.
- [4] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών (2<sup>η</sup> Έκδοση)”, Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε, 2013.
- [5] Ιστοσελίδα, “<https://www.geeksforgeeks.org/how-gsm-works/>”.
- [6] Erstellung von Bottom-up Kostenrechnungsmodellen zur Ermittlung der Kosten der Zusammenschaltung in Mobilnetzen, Studie für die RTR GmbH, Österreich - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/1-Architecture-of-a-hybrid-GSM-UMTS-Mobile-Network-UMTS-based-on-Release-4-with-its\\_fig1\\_278671940](https://www.researchgate.net/figure/1-Architecture-of-a-hybrid-GSM-UMTS-Mobile-Network-UMTS-based-on-Release-4-with-its_fig1_278671940)
- [7] Ιστοσελίδα, “<https://www.hocell.com/newsinfo/501758.html>”.
- [8] Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/4G-Network-Architecture\\_fig1\\_357586857](https://www.researchgate.net/figure/4G-Network-Architecture_fig1_357586857).
- [9] Series, M. IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recomm. ITU 2015, 2083, 1–19.
- [10] Y.-B. Lin, C.-C. Tseng, M.-H. Wang, “Effects of Transport Network Slicing on 5G Applications”, Future Internet 2021, 13(3), 69, March 2021.
- [11] Π. Κωπής, Π. – Δ. Αράπογλου, “Ασύρματες Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [12] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, “ Ασύρματες Επικοινωνίες ”, Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε, 2010.
- [13] Ιστοσελίδα, “[https://pysdr.org/content/multipath\\_fading.html](https://pysdr.org/content/multipath_fading.html)”.

- [14] N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, JB Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu, X. Huang, J. Hulkkonen, J. M. Jornet, M. Katz, R. Nilsson, E. Panayirci, K. Rabie, N. Rajapaksha, M. Salehi, H. Sardeddeen, T. Svensson, O. Tervo, A. Tolli, Q. Wu and W. Xu, "White paper on broadband connectivity in 6G," 6G Research Visions, No. 10, University of Oulu, June 2020.
- [15] S. Alraih, I. Shayea, M. Behjati, R. Nordin, Nor Fadzilah Abdullah, A. Abu-Samah and D. Nandi, "Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations towards 6G Mobile Communications.", Sensors (Basel, Switzerland), April 2022.
- [16] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, "6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, pp. 28-41 September 2019.
- [17] Series, M. IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recomm. ITU 2015, 2083, 1–19.
- [18] Series, M. IMT Vision—Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. Recomm. ITU 2023, 2160, 1–19.
- [19] vivo Communications Research Institute, "6G Network Architecture", October 2023.
- [20] H. Tataria, M. Shafi, A. F. Molisch, M. Dohler, H. Sjöland and F. Tufvesson, "6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities," in Proceedings of the IEEE, vol. 109, no. 7, pp. 1166-1199, July 2021.
- [21] 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) Architecture Working Group, "The 6G Architecture Landscape European perspective", Version 1.0, December 2022.
- [22] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface aided wireless communications: a tutorial," submitted to IEEE Transactions on Communications (Invited Paper), July 2020.
- [21] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini and R. Zhang, "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," in IEEE Access, vol. 7, pp. 116753-116773, August 2019.



- [22] Ö. Özdoğan, E. Björnson and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surfaces: Physics, Propagation, and Pathloss Modeling," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 581-585, May 2020.
- [23] W. Tang, M. Z. Chen, X. Chen, J. Y. Dai, Y. Han, M. Di Renzo, Y. Zeng, S. Jin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 20, no. 1, pp. 421–439, January 2021.
- [24] S. M. Riazul Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, and K.- S. Kwak, "Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA): How It Meets 5G and Beyond", *Wiley 5G Ref 23*, July 2019.
- [25] S.P. Kumaresan, C.K. Tan, Y.H. Ng, "Deep Neural Network (DNN) for Efficient User Clustering and Power Allocation in Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) 5G Networks", *Symmetry*, August 2021.
- [26] L. Lv, J. Chen, Q. Ni, Z. Ding and H. Jiang, "Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 188-195, April 2018.
- [27] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi and H. D. Schotten, "The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334-366, February 2021.
- [28] S. Mahboob and L. Liu, "Revolutionizing Future Connectivity: A Contemporary Survey On AI-Empowered Satellite-Based Non-Terrestrial Networks in 6G," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, December 2023.
- [29] X. Lin, S. Rommer, S. Euler, E. A. Yavuz and R. S. Karlsson, "5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 147-153, December 2021
- [30] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks", Technical Report (TR), TR 38.811, September 2020.
- [31] F.A. Dicandia, N.J.G. Fonseca, M. Bacco, S. Mugnaini and S. Genovesi, "Space-Air-Ground Integrated 6G Wireless Communication Networks: A Review of Antenna Technologies and Application Scenarios", *Sensors*, April 2022.

- [32] S. Plastras, D. Tzoumatidis, D. N. Skoutas, A. Rouskas, G. Kormentzas, and C. Skianis, "Non-Terrestrial Networks for Energy-Efficient Connectivity of Remote IoT Devices in the 6G Era: A Survey", *Sensors*, February 2024.
- [33] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Summary of Rel-17 Work Items", Technical Report (TR), TR 21.917, January 2023.
- [34] International Telecommunications Union (ITU), "Attenuation due to clouds and fog", Recommendation ITU-R P.840-8, August 2019.
- [35] International Telecommunications Union (ITU), "Propagation data required for the design systems in the land mobile-satellite service", Recommendation ITU-R P.681-11, August 2019.
- [36] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. Kim and H. Jung, "6G NR-U Based Wireless Infrastructure UAV: Standardization, Opportunities, Challenges and Future Scopes," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 30536-30555, March 2022.
- [37] P. Q. Viet and D. Romero, "Aerial Base Station Placement: A Tutorial Introduction," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 5, pp. 44-49, May 2022.
- [38] J. Xue, Z. Qu, S. Zhao, Y. Liu and Z. Lu, "Data-Driven Next-Generation Wireless Networking: Embracing AI for Performance and Security.", 2023 32nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN) IEEE, June 2023.
- [39] E. Balevi, A. Doshi and J. G. Andrews, "Massive MIMO Channel Estimation With an Untrained Deep Neural Network," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 2079-2090, March 2020.
- [40] Thales Alenia Space France, Ericsson Sweden and Ericsson France, Qualcomm France, SES Techcom, Thales – SIX, Telit Cinterion, GreenerWave Martel Innovate, Digital for Planet, CTTC, German Aerospace Center – DLR, Alma Mater Studiorum - University of Bologna, "Vision on Non-Terrestrial Networks in 6G system (or IMT-2030) Use Cases, Requirements, And Possible Standardization Approach A Perspective From The 6G-NTN Project", European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Conference on "Non-Terrestrial Networks, a Native Component of 6G", April 2024.
- [41] H. Luo, X. Shi, Y. Chen, X. Meng, F. Zhao, M. Mayer, P. Ashwood Smith, B. McCormick , A. Akhavain, D.Liu , H.Wen, Y. Wang, X.Wang, R. Yang, R. Li, B. Wang , J. Wang, W. Tong, "Very-Low-Earth-Orbit Satellite Networks for 6G", *Communications of HUAWEI RESEARCH*, September 2022.

- [42] X. Jiang, M. Sheng, N. Zhao, C. Xing, W. Lu, X. Wang, "Green UAV communications for 6G: A survey", Chinese Journal of Aeronautics, September 2022.
- [43] W. Weaver, "Recent Contributions to The Mathematical Theory of Communication", ETC: A Review of General Semantics, vol. 10, no. 4, pp. 261–81, 1953.
- [44] E. Uysal, O. Kaya, A. Ephremides, J. Gross, M. Codreanu, P. Popovski, M. Assaad, G. Liva, A. Munari, B. Soret, T. Soleymani and K. H. Johansson, "Semantic Communications in Networked Systems: A Data Significance Perspective," in IEEE Network, vol. 36, no. 4, pp. 233-240, August 2022.
- [45] B. T. Bacinoglu, Y. Sun, E. Uysal and V. Mutlu, "Optimal status updating with a finite-battery energy harvesting source," in Journal of Communications and Networks, vol. 21, no. 3, pp. 280-294, June 2019.
- [46] Π. Κωπτής, Χ. Καψάλης, "Δορυφορικές Επικοινωνίες", Εκδόσεις Τζιόλα, 3<sup>η</sup> Έκδοση, 2016.