



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

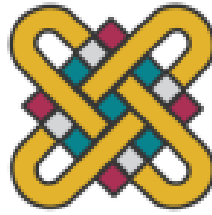
«Δίκτυα 5G και μεταγενέστερα»

Πτυχιακή εργασία

Σταυρίδης Σταύρος (2138)

Επιβλέπων: **Δ. Βέργαδος**
Αν. Καθηγητής

Καστοριά, Δεκέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

«Δίκτυα 5G και μεταγενέστερα»

Πτοχιακή εργασία

Επιβλέπων: Δ. Βέργαδος

Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ημερομηνία.

.....

Ον/μο Μέλος Ε.Π

.....

Ον/μο Μέλος Ε.Π

.....

Ον/μο Μέλος Ε.Π

Καστοριά, Δεκέμβριος 2024

Copyright © Σταυρίδης Σταύρος, 2024.

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.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέπων καθηγητή Δημήτριο Βέργαδο για την επιμέλεια και την υπομονή που έδειξε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής, καθώς και την καθοδήγηση του.

Να ευχαριστήσω επίσης το υπόλοιπο προσωπικό του πανεπιστημίου δυτικής Μακεδονίας, τόσο στους καθηγητές που με την απλόχερη παροχή των γνώσεων τους όσο και στους υπολοίπους που με τις υπηρεσίες τους, έγινε εφικτή η διδασκαλία τόσο σε εμένα όσο και στους συμφοιτητές μου, τους οποίους και ευχαριστώ επίσης για την στήριξή τους σε όλα αυτά τα έτη φοίτησης.

Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου που μου συμπαραστάθηκαν σε κάθε αγώνα στην ζωή μου όπως και σε αυτόν της μάθησης, στηρίζοντάς με τόσο υλικά όσο και πνευματικά-ψυχολογικά.

Περίληψη

Η μελέτη αυτή προσφέρει μια διεξοδική ανάλυση της ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων, περιλαμβάνοντας τα πάντα, από τα πρώτα κυψελοειδή συστήματα μέχρι τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία πέμπτης γενιάς (5G). Η συζήτηση καλύπτει τα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε γενιάς δικτύου, δίνοντας έμφαση στα χαρακτηριστικά και τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που τα διαφοροποιούν. Γίνεται εις βάθος ανάλυση της έλευσης της τεχνολογίας 5G, αποκαλύπτοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, την αρχιτεκτονική του δικτύου και τους κρίσιμους ρόλους που διαδραματίζουν τεχνολογίες όπως οι στρατηγικές Cloud, το Software-Defined Networking (SDN) και το Network Functions Virtualization (NFV).

Η μελέτη διερευνά τις δυσκολίες και τα ζητήματα που περιβάλλουν την ανάπτυξη των δικτύων 5G, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για ενοποιημένες και κλιμακούμενες υποδομές. Η μελέτη εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο οι σύγχρονες τεχνολογίες, όπως το SDN και το NFV, μπορούν να ενσωματωθούν στην ασύρματη τεχνολογία 5G, υπογραμμίζοντας τα οφέλη και τους τρόπους με τους οποίους προωθούν την εικονικοποίηση δικτύων. Επιπλέον, εξετάζεται η συμβολή του Multi-Access Edge Computing (MEC) στη βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου 5G.

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας 5G, ιδίως όσον αφορά τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) και την αρχιτεκτονική Beyond 5G (B5G), καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της μελέτης. Κάνουμε μια πλήρη ανάλυση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για UAV, συμπεριλαμβανομένων των κυψελοειδών δικτύων mmWave, των θεμάτων ενεργειακής απόδοσης, της μη-ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA) και των γνωστικών δικτύων.

Με έμφαση στο ρόλο του 5G στις ρομποτικές επικοινωνίες, την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) και την επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M) στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), η μελέτη ολοκληρώνεται με μια εμπροσθοβαρή ανάλυση των μελλοντικών προοπτικών στα ασύρματα δίκτυα. Για τους μελετητές, τους εμπειρογνώμονες επιχειρήσεων και τους οπαδούς που είναι περίεργοι για το μέλλον των ασύρματων δικτύων πέραν του 5G, η ολοκληρωμένη ανάλυση που παρέχεται σε αυτό το άρθρο αποτελεί ανεκτίμητη πηγή.

Λέξεις κλειδιά

Ασύρματα δίκτυα, τεχνολογία 5G, γενιές δικτύων, αρχιτεκτονική δικτύων, Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV).

Abstract

This study offers a thorough analysis of the development of wireless networks, including everything from the first cellular systems to the most recent developments in fifth-generation (5G) technology. The discussion covers the unique characteristics of each network generation, with an emphasis on the features and architectural elements that differentiate them. An in-depth analysis of the advent of 5G technology is provided, revealing its unique characteristics, network architecture and the critical roles played by technologies such as Cloud strategies, Software-Defined Networking (SDN) and Network Functions Virtualization (NFV).

The study explores the difficulties and issues surrounding the deployment of 5G networks, with an emphasis on the need for unified and scalable infrastructures. The study examines how modern technologies, such as SDN and NFV, can be integrated into 5G wireless technology, highlighting the benefits and ways in which they promote network virtualization. In addition, the contribution of Multi-Access Edge Computing (MEC) to improving the efficiency of the 5G network is examined.

The applications of 5G technology, in particular with regard to Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Beyond 5G (B5G) architecture, occupy a significant part of the study. We make a comprehensive analysis of the communication protocols used for UAVs, including mmWave cellular networks, energy efficiency issues, nonorthogonal multiple access (NOMA) and cognitive networks.

With a focus on the role of 5G in robotic communications, device-to-device (D2D) and machine-to-machine (M2M) communications in the context of the Internet of Things (IoT), the paper concludes with a forward-looking analysis of future perspectives in wireless networks. For scholars, business experts, and enthusiasts curious about the future of wireless networks beyond 5G, the comprehensive analysis provided in this article is an invaluable resource.

Keywords

Wireless Networks, 5G Technology, Network Generations, Network Architecture
Network Functions Virtualization (NFV).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	7
Keywords	7
Πίνακας εικόνων	12
Εισαγωγή	13
1. Ιστορική αναδρομή	15
1.1. Δίκτυα και κατηγορίες δικτύων	15
1.1.1. Κυψελωτά Συστήματα	17
1.2. Γενιές δικτύων	18
1.2.1. Τεχνολογία πρώτης γενιάς ή 1G	18
1.2.2. Τεχνολογία δεύτερης γενιάς ή 2G	20
1.2.3. Τεχνολογία τρίτης γενιάς ή 3G	21
1.2.4. Τεχνολογία τέταρτης γενιάς ή 4G	22
2. Τεχνολογία πέμπτης γενιάς ή 5G	24
2.1. Χαρακτηριστικά	25
2.1.1. Δυνατότητες	27
2.1.2. Πλεονεκτήματα	31
2.2. Αρχιτεκτονική δικτύου 5G	34
2.2.1. Ασύρματα δίκτυα 5G	35
2.2.2. Δίκτυα σταθερής πρόσβασης	36
2.2.3. Οπτικά δίκτυα	38
2.2.4. Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN	39
2.2.5. Εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών-NFV	40
2.2.6. Μικροκυματική ζώνη	41

2.3. Εγκαταστάσεις Φυσικής Δικτύωσης και Υπολογιστών.....	42
2.4. Ενοποίηση Δυνατοτήτων Δικτύου.....	42
2.5. Επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής 5G.....	44
2.6. Στρατηγικές Cloud.....	46
2.7. Τεμαχισμός δικτύου.....	49
2.8. Ανάλυση κυριάρχων τεχνολογιών.....	53
2.9. Προβλήματα και προκλήσεις.....	55
3. Ασύρματη τεχνολογία 5G.....	60
3.1. Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (NFV).....	64
3.2. Πλεονεκτήματα τεχνολογίας NFV.....	69
3.3. Δίκτυο καθοριζόμενο από το λογισμικό (SDN).....	72
3.3.1. Οι κόμβοι του SDN.....	72
3.3.2. Τα επίπεδα του SDN.....	74
3.4. Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου (Multi-access edge computing)	77
4. Εφαρμογές τεχνολογίας 5G.....	80
4.1. Μη επανδρωμένα συστήματα και UAVs.....	80
4.2. Αρχιτεκτονική B5G.....	84
4.3. Τεχνικές επικοινωνίας.....	88
4.3.1. UAV οδηγούμενα από κυψελωτά δίκτυα mmWave.....	88
4.3.2. UAV οδηγούμενα μέσω NOMA.....	90
4.3.3. Γνωστικά δίκτυα UAV.....	93
5. Μελλοντικές προοπτικές σε ασύρματα δίκτυα.....	95
5.1. 5G σε ρομποτικές επικοινωνίες.....	101
5.2. Επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή D2D.....	104
5.3. M2M επικοινωνία και IoT.....	106

Βιβλιογραφία 111

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1 Υποδομή κυψελοειδών συστημάτων.....	17
Εικόνα 2 Βασική δομή της τεχνολογίας κινητών επικοινωνιών 5G.....	30
Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G.....	35
Εικόνα 4 Αρχιτεκτονική 5G.....	36
Εικόνα 5 Εφαρμογή των οπτικών μονάδων στην αρχιτεκτονική 5G.....	39
Εικόνα 6 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN.....	40
Εικόνα 7 Διάγραμμα ροής Massive MIMO.....	54
Εικόνα 8 Network Functions Virtualization (NFV).....	69
Εικόνα 9 Λειτουργική δομή MEC.....	79
Εικόνα 10 Μέθοδος επικοινωνίας ρομπότ.....	106
Εικόνα 11 Αριθμός φορέων εκμετάλλευσης M2M που δραστηριοποιούνται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους.....	108

Εισαγωγή

Η επικοινωνία έχει αποτελέσει αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος για την κοινωνία σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας. Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας, η ανθρωπότητα προσπαθούσε να βρει μεθόδους επικοινωνίας που να είναι ταχύτερες, αποτελεσματικότερες και οικονομικά αποδοτικότερες. Η σημαντική πρόοδος στον τομέα αυτό, η οποία τελικά άνοιξε το δρόμο για τις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες, έγινε από τον Ιταλό εφευρέτη G. Marconi. Μετέδωσε με επιτυχία το γράμμα "S" σε σημαντική απόσταση χρησιμοποιώντας κώδικα Μορς και ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν καταστεί ζωτικής σημασίας στοιχείο των σύγχρονων και μελλοντικών κοινωνιών. Από την έναρξη των ασύρματων επικοινωνιών στις αρχές της δεκαετίας του 1970, έχουμε γίνει μάρτυρες αξιοσημείωτων εξελίξεων στην τεχνολογία των έξυπνων συσκευών και της εμφάνισης των ασύρματων συστημάτων πέμπτης γενιάς (5G) (Albreem, 2015).

Οι κινητές επικοινωνίες έχουν υποστεί σημαντικούς μετασχηματισμούς με την πάροδο των ετών. Αρχικά, ήταν ένα σύστημα που μπορούσε να μεταδώσει μόνο φωνητικές συνομιλίες σε λίγες συσκευές. Ωστόσο, έχει πλέον εξελιχθεί σε ένα τεράστιο δίκτυο που μπορεί να υποστηρίξει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετάδοση δεδομένων. Η ταχεία εξάπλωση των τηλεφωνικών συσκευών σε παγκόσμιο επίπεδο, η αυξανόμενη ανάγκη για γρήγορες ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων και οι συνεχείς εξελίξεις στις ασύρματες τεχνολογίες, υπηρεσίες και εφαρμογές έχουν δημιουργήσει τεράστιες προκλήσεις για τους φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων (Arnon et al., 2012).

Στο διαρκώς μεταβαλλόμενο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, η εμφάνιση των δικτύων 5G έφερε μια νέα εποχή συνδεσιμότητας που ξεπερνά τις δυνατότητες των προηγούμενων γενεών. Με την άφιξή του, το 5G προαναγγέλλει μια νέα εποχή ασύρματης τεχνολογίας, προσφέροντας αξιοσημείωτη ταχύτητα, ελάχιστη καθυστέρηση και τη δυνατότητα σύνδεσης αμέτρητων συσκευών. Αυτή η σημαντική πρόοδος όχι μόνο βελτιώνει τις μεθόδους επικοινωνίας μας, αλλά αποτελεί και το θεμέλιο για το επερχόμενο κύμα τεχνολογικής προόδου (Silva & Guerreiro, 2020).

Στην ουσία του, το 5G ενσωματώνει μια σημαντική πρόοδο στη μετάδοση δεδομένων, παρέχοντας ταχύτερες δεδομένων που ξεπερνούν κατά πολύ τον

προκάτοχό του, το 4G. Με ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν τα επίπεδα των gigabit ανά δευτερόλεπτο, οι χρήστες είναι σε θέση να απολαμβάνουν αδιάλειπτη ροή, παιχνίδια με υψηλή απόκριση και απίστευτα γρήγορες λήψεις. Ωστόσο, ο αντίκτυπος του 5G υπερβαίνει κατά πολύ την εντυπωσιακή του ταχύτητα, καθώς αποτελεί το θεμέλιο για μια πληθώρα πρωτοποριακών εξελίξεων που είναι έτοιμες να αναμορφώσουν ολόκληρους κλάδους και κοινωνίες (Silva & Guerreiro, 2020).

Ένα από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του 5G είναι η ικανότητά του να διευκολύνει την ταυτόχρονη λειτουργία σημαντικού αριθμού διασυνδεδεμένων συσκευών. Αυτή η ικανότητα, που αναφέρεται ως μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (mMTC), υποστηρίζει την εμφάνιση του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και επιτρέπει έναν κόσμο όπου αμέτρητες συσκευές, από έξυπνες συσκευές έως αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, μπορούν να επικοινωνούν άμεσα (Ahmad et al., 2019).

Μειωμένη σε μόλις χιλιοστά του δευτερολέπτου, η χαμηλή καθυστέρηση αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του 5G. Αυτή η απίστευτα χαμηλή καθυστέρηση είναι επαναστατική για εφαρμογές που απαιτούν άμεση επικοινωνία, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), η εικονική πραγματικότητα (VR) και η χειρουργική επέμβαση εξ αποστάσεως. Η αξιοπιστία και η ταχύτητα του 5G επιτρέπουν την ανάπτυξη πρωτοποριακών λύσεων που προηγουμένως περιορίζονταν από περιορισμούς καθυστέρησης (Silva & Guerreiro, 2020).

Κοιτάζοντας στον ορίζοντα, το πεδίο των τηλεπικοινωνιών επιφυλάσσει τη δυνατότητα για αξιοσημείωτες εξελίξεις που ξεπερνούν τις δυνατότητες του 5G. Η πρόοδος προς το 6G και τις μελλοντικές γενιές δικτύων προβλέπει συστήματα που δεν είναι μόνο ταχύτερα, αλλά διαθέτουν επίσης αυξημένη ευφυΐα και βιωσιμότητα. Ιδέες όπως η ολογραφική επικοινωνία, τα ευφυή δίκτυα που μπορούν να προσαρμόζονται στη συμπεριφορά των χρηστών και οι ενεργειακά αποδοτικές υποδομές είναι μερικές από τις συναρπαστικές δυνατότητες που βρίσκονται μπροστά μας. Σε αυτή την εποχή της αέναης συνδεσιμότητας και της συνεχιζόμενης επανάστασης της τεχνολογίας, τα δίκτυα 5G και οι διάδοχοί τους πρωτοστατούν στη διαμόρφωση του τρόπου ζωής, των επαγγελματιών και των κοινωνικών αλληλεπιδράσεων. Η εξέλιξη από το 5G στις μελλοντικές γενιές ασύρματης τεχνολογίας αποτελεί μια συναρπαστική εξερεύνηση των απεριόριστων δυνατοτήτων της συνδεσιμότητας στον ολόένα και πιο διασυνδεδεμένο κόσμο μας (Ahmad et al., 2019).

1. Ιστορική αναδρομή

1.1. Δίκτυα και κατηγορίες δικτύων

Ένα δίκτυο ορίζεται αρχικά ως μια συλλογή συσκευών που συνδέονται μεταξύ τους με σκοπό την επικοινωνία. Με τη συνεχώς αυξανόμενη εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας μας από την τεχνολογία και το Διαδίκτυο, η ζήτηση για συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Έτσι, οι πάροχοι υπηρεσιών δικτύου έχουν αναπτύξει ξεχωριστά δίκτυα σύνδεσης για να καλύψουν αποτελεσματικά τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των συνδρομητών τους. Τα δίκτυα αυτά διακρίνονται κυρίως από τη μέθοδο μέσω της οποίας οι συσκευές εγκαθιδρύουν σύνδεση με το δίκτυο (Khor et al., 2010).

❖ Τα δίκτυα χωρίζονται κυρίως σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες:

- Ενσύρματα δίκτυα
- Ασύρματα δίκτυα

Ως ενσύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο στο οποίο οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μιας φυσικής σύνδεσης (καλώδιο). Τα δίκτυα αυτά ταξινομούνται σύμφωνα με (Underberg et al., 2018):

➤ Τον τρόπο χρήσης

- Δημόσια: Για παράδειγμα, είναι ιδανικά για άτομα που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το διαδίκτυο. Αυτά τα δίκτυα βασίζονται συνήθως στην υποδομή εταιρειών τηλεπικοινωνιών και ακαδημαϊκών συνεργασιών για την παροχή ευρυζωνικών συνδρομών.
- Τα ιδιωτικά δίκτυα περιλαμβάνουν τόσο τοπικά δίκτυα για επιχειρήσεις και οργανισμούς, όσο και δίκτυα ευρείας περιοχής προσαρμοσμένα στις ειδικές απαιτήσεις ορισμένων οντοτήτων (Underberg et al., 2018).

➤ Ο βαθμός στον οποίο καλύπτουν

- Δίκτυα τοπικής περιοχής (LAN): Αυτά είναι κατάλληλα για τη σύνδεση μονάδων υπολογιστών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, όπως μια πολυκατοικία. Οι ταχύτητες σε αυτά τα δίκτυα κυμαίνονται από 10Mbps έως 2Gbps.
- Αστικά δίκτυα (MAN): Καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα περιοχών περίπου στο μέγεθος μιας πόλης.

- Δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN): Πρόκειται για τα δίκτυα που καλύπτουν τη μεγαλύτερη απόσταση και είναι ικανά να συνδέουν απομακρυσμένα σημεία μιας χώρας (Underberg et al., 2018).

➤ Ο τρόπος μετάδοσης

Δίκτυα μεταγωγής: Σε αυτή την κατηγορία η μετάδοση γίνεται με συγκεκριμένο αποστολέα και παραλήπτη. Για να επιτευχθεί η μετάδοση τα δεδομένα μπορεί να χρειαστεί να περάσουν από ενδιάμεσους κόμβους οι οποίοι απλά προωθούν τις πληροφορίες. Τα δίκτυα χωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης σε (Underberg et al., 2018):

- Δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος
- Δίκτυα μεταγωγής μηνυμάτων
- Δίκτυα μεταγωγής πακέτων
- Δίκτυα μετάδοσης: Σε αυτή την κατηγορία, οι πληροφορίες αποστέλλονται μέσω ενός μόνο κόμβου πομπού και όλοι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες (Underberg et al., 2018).

Ένα ασύρματο δίκτυο είναι ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών ή υπολογιστών που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη μετάδοση δεδομένων. Οι πληροφορίες μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με τη συχνότητα να ποικίλλει ανάλογα με τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης του δικτύου. Τα ασύρματα δίκτυα έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να επεκταθούν πέρα από τις σταθερές εγκαταστάσεις, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για περιοχές όπου η εγκατάσταση καλωδίων αποτελεί πρόκληση. Μπορούμε επίσης να εμπλακούμε σε επικοινωνία με άτομα που βρίσκονται σε διάφορες τοποθεσίες, ενώ η επέκταση σε νέες τοποθεσίες είναι μια σχετικά απλή διαδικασία.

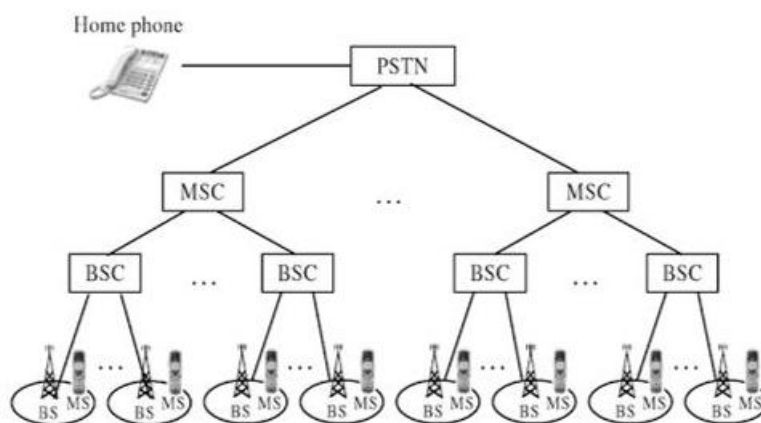
➤ Τα ασύρματα δίκτυα διακρίνονται σε (Vijay Kumar Garg, 2007):

- Δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN)
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN)
- Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN)
- Κινητά δίκτυα
- Ασύρματα δίκτυα PAN

1.1.1. Κυψελωτά Συστήματα

Στα συστήματα κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούνται κυψελοειδή ή κυψελωτά συστήματα. Μια θεμελιώδης πτυχή ενός κυψελοειδούς συστήματος περιλαμβάνει την κατάτμηση μιας δεδομένης γεωγραφικής περιοχής σε μικρότερες μονάδες, γνωστές ως κυψέλες. Τα κύτταρα παρουσιάζουν διαφορετικά σχήματα με βάση τη μορφολογία του εδάφους. Προκειμένου μια κυψέλη να λειτουργεί αποτελεσματικά, είναι απαραίτητο να διαθέτει το δικό της σύνολο καναλιών και ένα σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης αποτελείται από κεραία, πομπό και δέκτη. Μια ομάδα γειτονικών κυψελών αναφέρεται ως συστάδα. Για να διευκολυνθεί η ταυτόχρονη χρήση του δικτύου από πολλούς χρήστες, εφαρμόζεται η μέθοδος επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, η οποία μετριάζει αποτελεσματικά τυχόν προβλήματα παρεμβολών (Andrews et al., 2016).

Τα κυψελοειδή δίκτυα χρησιμοποιούνται εκτενώς στις ασύρματες επικοινωνίες λόγω των αξιοσημείωτων χαρακτηριστικών τους. Τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν σχεδιαστεί με δομή που τους επιτρέπει να αξιοποιούν αποτελεσματικά ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων. Αυτό τους επιτρέπει να παρέχουν εξαιρετική ποιότητα επικοινωνίας σε μεγάλες αποστάσεις, καλύπτοντας μεγάλες περιοχές (Andrews et al., 2016).



Εικόνα 1 Υποδομή κυψελοειδών συστημάτων

1.2. Γενιές δικτύων

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δημιουργήθηκαν μετά τη λήξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου μέσω μιας συλλογικής προσπάθειας μεταξύ των Ηνωμένων Πολιτειών και των σκανδιναβικών χωρών. Στη Σκανδιναβία, το πρώτο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας εισήχθη το 1980. Εκείνη την περίοδο, τα κινητά τηλέφωνα τοποθετούνταν κυρίως σε οχήματα όπως αυτοκίνητα και φορτηγά λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεών τους (Liu et al., 2017).

1.2.1. Τεχνολογία πρώτης γενιάς ή 1G

Τα αρχικά κυψελοειδή δίκτυα, γνωστά ως 1G, εφαρμόστηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1980. Η έλευση των κινητών τηλεφώνων αποτέλεσε ένα πρωτοποριακό ορόσημο στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Στόχος τους ήταν η αξιοποίηση των αναλογικών καναλιών σηματοδότησης αποκλειστικά για τη διευκόλυνση της φωνητικής επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούσαν μεταγωγή κυκλώματος και εξαρτιόνταν από αναλογικές τεχνικές μετάδοσης. Οι πρώτες εκδόσεις της τεχνολογίας, σε αντιδιαστολή με τις μεταγενέστερες εκδόσεις, παρουσίαζαν περιορισμένη χωρητικότητα, υποβαθμισμένες συνδέσεις φωνής και δεν είχαν μέτρα ασφαλείας. Οι φωνητικές κλήσεις διευκολύνονταν μέσω κοινών ραδιοκεραιών, γεγονός που τις καθιστούσε ευάλωτες σε υποκλοπές από μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Το 1979, η Nippon Telephone and Telegraph έγραψε ιστορία, καθώς έγινε η πρώτη εταιρεία που πρωτοστάτησε στη χρήση του κυψελοειδούς συστήματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον καταμερισμό της χωρητικότητας του καναλιού στην εποχή 1G ήταν η FDMA (Frequency Division Multiple Access), με εύρος ζώνης καναλιού έως και 30 KHz (Liu et al., 2017).

Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, τα άτομα έχουν τη δυνατότητα να κατανέμουν τη συγκεκριμένη συχνότητα υποδιαιρώντας το μπλοκ συχνοτήτων σε μικρότερα τμήματα και αναθέτοντάς τα σε κάθε χρήστη. Κάθε τηλεφωνική κλήση εκχωρείται σε ένα συγκεκριμένο κανάλι συχνότητας ανερχόμενης ζεύξης και σε ένα αντίστοιχο κανάλι συχνότητας κατερχόμενης ζεύξης. Κάθε συχνότητα που χρησιμοποιείται στο

FDMA εκχωρείται αποκλειστικά σε μια μοναδική κλήση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται από την 1G για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία φωνής αναφέρεται ως μεταγωγή κυκλώματος. Η 1G δεν υποστηρίζει τη μετάδοση δεδομένων. Ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα είναι ότι ήταν αποκλειστικά κατάλληλο για επικοινωνία φωνής. Τα μειονεκτήματα των κινητών τηλεφώνων 1G περιλάμβαναν περιορισμένη χωρητικότητα καναλιών, αναξιόπιστη επικοινωνία, μειωμένη ποιότητα φωνής, περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και δυσκίνητο μέγεθος. Ως εκ τούτου, οι περιορισμοί εξετάστηκαν διεξοδικά όταν εισήχθησαν τα κινητά τηλέφωνα 2G (Sharma, 2013). Η τεχνολογία ασύρματων τηλεπικοινωνιών 1G περιλαμβάνει μια σειρά προτύπων που χρησιμοποιούν τεχνικές διαμόρφωσης συχνότητας για τη μετάδοση φωνητικών σημάτων. Επιπλέον, οι λειτουργίες παράδοσης πραγματοποιούνταν αποκλειστικά στους σταθμούς βάσης. Σε μια επιστημονική μελέτη που διεξήχθη από τους Liu et al. (2017), παρατηρήθηκε ότι το φάσμα εντός της κυψέλης χωρίζεται σε διάφορα κανάλια. Στη συνέχεια, σε κάθε κλήση κατανέμεται ένα ξεχωριστό ζεύγος αυτών των καναλιών. Τα ακόλουθα πρότυπα ήταν τα εξής:

➤ Η υπηρεσία Advance Mobile Phone Service (AMPS)

Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η FDMA (Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας), η οποία επέτρεπε τη φιλοξενία πολλαπλών χρηστών σε ένα μόνο κύτταρο ή τομέα κυψέλης. Στην αρχή, το μέγεθος της κυψέλης ήταν μεταβλητό. Στις αστικές περιοχές, η ακτίνα της κυψέλης έφτανε τα οκτώ μίλια, ενώ στις αγροτικές περιοχές έφτανε τα είκοσι πέντε μίλια. Φυσικά, καθώς η βάση χρηστών επεκτεινόταν, ενσωματώθηκαν επιπλέον κυψέλες. Με τη συμπερίληψη μιας νέας κυψέλης, κατέστη απαραίτητος ο επανασχεδιασμός της μεθόδου ανάθεσης συχνοτήτων προκειμένου να αμβλυνθούν τυχόν προβλήματα που προκαλούνταν από παρεμβολές. Υπήρχαν πρόσθετες προκλήσεις πέρα από την περιορισμένη χωρητικότητα. Επιπλέον, υπήρχαν ζητήματα που αφορούσαν την ασφάλεια. Ως ακαδημαϊκός, σκεφτείτε το σενάριο όπου ένα άτομο αποκτά μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στον σειριακό κωδικό κάποιου άλλου, επιτρέποντάς του να συμμετέχει σε παράνομες τηλεφωνικές κλήσεις. Παρά τις εκτεταμένες προσπάθειες που καταβλήθηκαν για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, ιδίως εκείνων που αφορούσαν τη χωρητικότητα, τα αποτελέσματα υπολείπονταν των προσδοκιών. Κατά συνέπεια, ο κλάδος άρχισε να διερευνά εναλλακτικές λύσεις, όπως τα ψηφιακά συστήματα επόμενης γενιάς (Bakare & Bassey, 2021).

➤ Σκανδιναβική κινητή τηλεφωνία (NMT)

Το κινητό δίκτυο NMT δημιουργήθηκε το 1981 ως απάντηση στην αυξανόμενη συμφόρηση και τις απαιτητικές απαιτήσεις ARP (Autoradiotelefon). Η ανάπτυξη του NMT, που σημαίνει Nordic Mobile Telephone, περιελάμβανε τη δημιουργία δύο εκδόσεων: NMT 450 και NMT 900. Οι εκδόσεις αυτές βασίστηκαν στην αναλογική τεχνολογία, όπως περιγράφουν αναλυτικά οι Bakare και Basseyy στην έρευνά τους (2021).

Το πρότυπο αυτό περιέγραφε τις έννοιες της χρέωσης και της περιαγωγής, αλλά δυστυχώς δεν διέθετε τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Η απουσία κρυπτογράφησης άφηνε τις επικοινωνίες ευάλωτες σε υποκλοπές. Με τη χρήση ενός ανιχνευτή συχνότητας στην κατάλληλη συχνότητα, η υποκλοπή μπορούσε εύκολα να επιτευχθεί. Στις επόμενες επαναλήψεις του NMT, η συμπερίληψη της αναλογικής κρυπτογράφησης έγινε προαιρετική, με την εφαρμογή της να εξαρτάται από τη χρήση αντιστροφής συχνότητας ήχου δύο ζωνών. Οι κυψέλες ενός δικτύου NMT ποικίλλουν σε μέγεθος, εκτεινόμενες από 2 km έως 30 km. Το NMT χρησιμοποιούσε πλήρως αμφίδρομη μετάδοση, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λήψη και μετάδοση φωνής. Η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού γινόταν στο ίδιο κανάλι RF που χρησιμοποιούνταν για τον ήχο, χρησιμοποιώντας διαμορφωτές FFSK 1200 bps. Η εμφάνιση διακοπτόμενων ριπών θορύβου στο σύστημα NMT είχε ως αποτέλεσμα ένα χαρακτηριστικό ηχητικό μοτίβο (Bakare & Basseyy, 2021).

➤ Το σύστημα επικοινωνίας συνολικής πρόσβασης (TACS).

Το TACS ήταν παρόμοιο με το AMPS και λειτουργούσε στην περιοχή συχνοτήτων 900 MHz (Bakare & Basseyy, 2021).

1.2.2. Τεχνολογία δεύτερης γενιάς ή 2G

Η εμφάνιση της τεχνολογίας 2G έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η εποχή αυτή ήταν μάρτυρας της ανόδου των ψηφιακών τεχνολογιών επικοινωνίας, με στόχο την αντικατάσταση των ξεπερασμένων αναλογικών κυψελοειδών δικτύων και την

παροχή αυξημένων πλεονεκτημάτων στους χρήστες. Με τη χρήση ψηφιακών συστημάτων, η φωνή συλλαμβάνεται μέσω του ακουστικού και στη συνέχεια μετατρέπεται από έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα, με αποτέλεσμα μια ροή από bits. Χρησιμοποιούνται τεχνικές δειγματοληψίας και φιλτραρίσματος για τη βελτίωση της ποιότητας της φωνής, ακόμη και σε χαμηλότερους ρυθμούς bit, σε σύγκριση με το 1G. Ως εκ τούτου, είναι εφικτή η εξυπηρέτηση μεγαλύτερης ποσότητας κινητών χρηστών εντός του ραδιοφάσματος. Επιπλέον, η εμφάνιση των τεχνολογιών δεύτερης γενιάς διευκόλυνε την ενσωμάτωση υπηρεσιών δεδομένων όπως τα SMS (υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων) και τα MMS (υπηρεσίες μηνυμάτων πολυμέσων). Αυτές οι υπηρεσίες χρησιμοποιούν προηγμένες μεθόδους κρυπτογράφησης για να εγγυηθούν ότι μόνο ο προοριζόμενος παραλήπτης μπορεί να έχει ασφαλή πρόσβαση και να αποκρυπτογραφήσει τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Τέσσερα πρότυπα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην ανάπτυξη τεχνολογιών δεύτερης γενιάς (Suurs & Hekkert, 2009):

- GSM,
- D-AMPS,
- cdmaOne και
- PDC

Τα πρότυπα αναπτύχθηκαν με έμφαση στις ψηφιακές επικοινωνίες, επιτρέποντας την εφαρμογή διαδικασιών που έκαναν την παγκόσμια περιαγωγή μια πιο εφικτή ιδέα. Σε αντίθεση με την προηγούμενη γενιά (1G), η οποία περιοριζόταν σε εθνικά πρότυπα και δεν ήταν σε θέση να παρέχει υπηρεσίες πέρα από τα σύνορα (Suurs & Hekkert, 2009).

1.2.3. Τεχνολογία τρίτης γενιάς ή 3G

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η ανάγκη για βελτιωμένες υπηρεσίες φωνής και συνδεσιμότητα δεδομένων και πολυμέσων υψηλής ταχύτητας οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας τρίτης γενιάς (3G). Αυτό ήταν μια απάντηση στην απαξίωση των συστημάτων δεύτερης γενιάς που προκλήθηκε από την τεχνολογική πρόοδο και τις αυξανόμενες απαιτήσεις των συνδρομητών. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) καθόρισε τις παραμέτρους για τα συστήματα τρίτης γενιάς που μπορούν να

διευκολύνουν υψηλές ταχύτητες δεδομένων που κυμαίνονται από 144 kbps έως πάνω από 2 Mbps. Οι τεχνολογίες που μπορούν να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις είναι (Sharma, 2013):

- CDMA,
- UMTS και
- η παραλλαγή του GSM, EDGE.

Η τρίτη γενιά ψηφιακών τεχνολογιών εμφανίστηκε μετά το 2000 για να βελτιώσει τις υπηρεσίες φωνής σε ευρύτερες περιοχές συχνοτήτων και να υποστηρίξει υπηρεσίες πολυμέσων. Για να ενεργοποιηθούν αυτές οι δυνατότητες, τα συστήματα 3G αναπτύχθηκαν με βάση δύο τεχνολογίες (Sharma, 2013):

- UMTS Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (UMTS).
- Το CDMA 2000, γνωστό και ως IMT Multi-Carrier (IMT-MC)

1.2.4. Τεχνολογία τέταρτης γενιάς ή 4G

Η τέταρτη γενιά (4G) είναι ένα εννοιολογικό πλαίσιο για ένα ασύρματο δίκτυο υψηλής ταχύτητας που μεταδίδει απρόσκοπτα πολυμέσα και δεδομένα, ενσωματώνοντας απρόσκοπτα τα ενσύρματα δίκτυα κορμού. Είναι θεωρητικά δυνατό να επιτευχθούν ταχύτητες έως και 1 Gbps με την τεχνολογία 4G. Το LTE αναγνωρίζεται ευρέως ως τεχνολογία 4G. Το 4G παρέχει ταχύτητα λήψης 100Mbps. Το 4G προσφέρει παρόμοια χαρακτηριστικά με το 3G, αλλά περιλαμβάνει επίσης πρόσθετες υπηρεσίες, όπως εφημερίδες πολλαπλών μέσων. Επιτρέπει την καθαρότερη προβολή τηλεοπτικών προγραμμάτων και την ταχύτερη μετάδοση δεδομένων σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές. Το 4G αναπτύσσεται για να καλύψει τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών και ταχύτητας των επερχόμενων εφαρμογών, όπως η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, η υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων (MMS), η συνομιλία μέσω βίντεο, η κινητή τηλεόραση, το περιεχόμενο HDTV, η ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB), οι βασικές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων και άλλες υπηρεσίες έντασης εύρους ζώνης. Τα δίκτυα 4G αποτελούνται από ένα κεντρικό δίκτυο και πολλαπλά δίκτυα ραδιοπρόσβασης, όπως σημειώνει ο Albreem (2015).

Μια θεμελιώδης διεπαφή χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το κεντρικό δίκτυο και τα δίκτυα ραδιοπρόσβασης, ενώ ένα σύνολο ραδιοδιεπαφών

χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με τα δίκτυα ραδιοπρόσβασης και τους κινητούς χρήστες. Αυτός ο τύπος ολοκλήρωσης συγχωνεύει τις διάφορες διεπαφές ραδιοπρόσβασης σε ένα ενοποιημένο δίκτυο, εξασφαλίζοντας ομαλή περιαγωγή και μεταβίβαση, καθώς και βέλτιστη συνδεσιμότητα για βελτιωμένες υπηρεσίες. Ο κύριος παράγοντας διαφοροποίησης μεταξύ 3G και 4G έγκειται στους ρυθμούς δεδομένων. Το 4G έχει τη δυνατότητα να παρέχει ρυθμούς αιχμής τουλάχιστον 100 Mbps σε κάλυψη ευρείας περιοχής ενώ βρίσκεται σε κίνηση, και 1 Gbps σε κάλυψη τοπικής περιοχής με χαμηλή κινητικότητα. Σύμφωνα με τον Sharma (2013), οι ταχύτητες του 3G μπορούν να φτάσουν έως και τα 2 Mbps, οι οποίες είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με τις ταχύτητες του 4G.

Παρ' όλα αυτά, το πρότυπο 4G θα βασίζεται στην ευρυζωνική τεχνολογία IP-based, χρησιμοποιώντας μεταγωγή πακέτων για τη μετάδοση και εξασφαλίζοντας απρόσκοπτη σύγκλιση πρόσβασης. Σημαίνει ότι το 4G έχει ενσωματώσει με επιτυχία διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης, υπηρεσίες και εφαρμογές, επιτρέποντας την απρόσκοπτη λειτουργία τους μέσω τόσο ασύρματων όσο και ενσύρματων κορμών, χρησιμοποιώντας διευθύνσεις IP. Ωστόσο, το 5G είναι έτοιμο να γίνει η πύλη για την επόμενη γενιά ασύρματης συνδεσιμότητας, που συχνά αναφέρεται ως "World Wide Wireless Web" (Kumar, Ashish;Aswal, Ankit;Singh, Lalit, 2014).

2. Τεχνολογία πέμπτης γενιάς ή 5G

Αναμφίβολα, βρισκόμαστε σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις και πρόοδο. Η ανάδυση μιας κοινωνίας διασυνδεδεμένης μέσω του διαδικτύου, με αδιάλειπτη πρόσβαση στην πληροφορία και την απρόσκοπτη διάδοσή της, μας ωθεί προς πρωτοποριακές τεχνολογικές εξελίξεις. Ένας από τους βασικούς στόχους είναι η ενίσχυση της χωρητικότητας, η βελτιστοποίηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και η αναβάθμιση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών. Αυτό θα επιτρέψει στους ιδιώτες και τις επιχειρήσεις να επωφεληθούν από σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες και να εξερευνήσουν νέες ευκαιρίες (Shukurillaevich et al., 2019). Το 5G, η πέμπτη γενιά ασύρματων συστημάτων, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ασύρματων δικτύων. Βρίσκεται σήμερα σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης και υπόσχεται να εγκαινιάσει μια νέα εποχή για το διαδίκτυο. Η τεχνολογία αυτή αντιπροσωπεύει την εξέλιξη των σύγχρονων δικτύων 4G, που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να διευκολύνουν την απρόσκοπτη μετάδοση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων. Η πρωταρχική της εστίαση, ωστόσο, έγκειται στη δυνατότητα διασύνδεσης αμέτρητων συσκευών στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Το δίκτυο 5G χρησιμοποιεί κεραίες MIMO (πολλαπλών εισόδων, πολλαπλών εξόδων), επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη σημαντικών όγκων δεδομένων, λειτουργώντας με αξιοσημείωτες ταχύτητες. Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει ένα πλήθος κεραιών στο σταθμό βάσης που εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό χρηστών χρησιμοποιώντας τον ίδιο πόρο συχνότητας.

Ο στόχος του 5G είναι να παρέχει γρήγορη, απλοποιημένη και οικονομική συνδεσιμότητα δεδομένων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τα έξοδα εγκατάστασης και μεγιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αξιοποίηση της μαζικής MIMO στα ασύρματα δίκτυα υπόσχεται πολλά για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης. Τα δίκτυα 5G προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην ταχύτητα, αλλά συνοδεύονται επίσης από την πρόκληση της αυξημένης πολυπλοκότητας. Αυτός ο περίπλοκος χαρακτήρας έχει οδηγήσει φυσικά στην υλοποίηση πολυάριθμων μικρών κυψελών, με απώτερο στόχο την ενίσχυση της κάλυψης τόσο για οικιακούς όσο και για επιχειρηματικούς σκοπούς (Jain et al., 2018).

Όταν εξετάζει κανείς τις δυνατότητες μιας προσέγγισης ετερογενούς δικτύου, δεν μπορεί παρά να γοητεύεται από τις δυνατότητες που παρουσιάζει. Με τη μείωση του μεγέθους των κυψελών και την αύξηση του αριθμού τους, σε συνδυασμό με τη χρήση προηγμένων δεκτών, κεραιών και μετάδοσης πολλαπλών κυψελών, η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί εκθετικά. Στην πραγματικότητα, έχει τη δυνατότητα να παρέχει έως και 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ό,τι είναι σήμερα διαθέσιμη. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι με την εφαρμογή του 5G, θα υπάρξει ανάγκη για πρόσθετα συστήματα κεραιών. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι λόγω του πυκνότερου δικτύου, η ποσότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα εκπέμπεται θα είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με τα επίπεδα που παρατηρούνται στα σημερινά δίκτυα 4G/3G/2G. Επιπλέον, όσο υψηλότερη είναι η πυκνότητα ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, τόσο λιγότερη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απαιτείται για τη δημιουργία σύνδεσης μεταξύ μιας συσκευής και του δικτύου (Shukurillaevich et al., 2019).

2.1. Χαρακτηριστικά

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά η χρήση δεδομένων από διάφορες συσκευές, από κινητά τηλέφωνα μέχρι οικιακές συσκευές και αυτοκίνητα. Όταν ένας μεγάλος αριθμός ατόμων συγκεντρώνεται σε μια τοποθεσία και χρησιμοποιεί τα δεδομένα κινητής τηλεφωνίας, η ταχύτητα παρουσιάζει σημαντική μείωση. Λόγω της σημαντικής επέκτασης, έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη η αξιοποίηση των λιγότερο χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων προκειμένου να φιλοξενηθούν περισσότερες συσκευές και να επιτευχθούν οι στόχοι του Διαδικτύου των πραγμάτων. Μια αξιοσημείωτη διαφορά του 5G από τους προκατόχους του είναι η λειτουργία του σε τρεις διαφορετικές ζώνες φάσματος (Hu, 2016).

- Χαμηλή ζώνη φάσματος (<1GHz)

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του εύρους λειτουργίας είναι η ικανότητά του να παρέχει εκτεταμένη κάλυψη σε μεγάλη περιοχή, διατηρώντας παράλληλα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας. Ένα μειονέκτημα είναι ότι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που

μπορεί να μεταφέρει δεν θα υπερβαίνει τα 100Mbps. Όσον αφορά την ταχύτητα, η ελάχιστη δυνατότητα του 5G είναι σχεδόν εφάμιλλη της μέγιστης ταχύτητας που διατίθεται σήμερα στη χώρα μας. Με τη χρήση αυτής της ζώνης φάσματος, θα επιτευχθεί εκτεταμένη κάλυψη των αγροτικών περιοχών. Η λειτουργία σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων (κάτω από 1GHz) θα επιτρέψει τη χρήση της τεχνολογίας 5G, μαζί με τα πολυάριθμα οφέλη της, να είναι προσβάσιμη σε μεγάλο αριθμό ατόμων που κατοικούν σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ανάπτυξης μιας μόνο κεραίας, όπως τονίζεται από τους Alsharif και Nordin (2016).

Τελικά, το χαμηλότερο δυνατό αποτέλεσμα για τη λειτουργία χαμηλού φάσματος θα ξεπεράσει μόνο οριακά τις υψηλότερες επιδόσεις του 4G, ενώ παράλληλα θα παρέχει εκτεταμένη κάλυψη και το πρόσθετο πλεονέκτημα των ανώτερων δυνατοτήτων διείσδυσης μέσω διαφόρων εμποδίων, όπως παράθυρα, τοίχοι και άλλα αντικείμενα. Χαρακτηρίζεται έτσι ως ένα αρχικό στάδιο από το οποίο γίνονται βελτιώσεις (Alsharif & Nordin, 2016).

- Μεσαία ζώνη φάσματος (<6GHz)

Το μεσαίο εύρος ζώνης προσφέρει ανώτερες ταχύτητες και μειωμένη καθυστέρηση σε σύγκριση με τη χαμηλή ζώνη. Ωστόσο, η ικανότητά του να διεισδύει σε κτίρια δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο αυτή του φάσματος χαμηλής ζώνης. Στο φάσμα της μεσαίας ζώνης προβλέπονται αναμενόμενες ταχύτητες έως και 1Gbps. Η μεσαία ζώνη, γνωστή ως "sub-6GHz", περιλαμβάνει ραδιοσυχνότητες που κυμαίνονται από 1GHz έως 6GHz. Αυτή η ζώνη παρουσιάζει σταθερά χαρακτηριστικά απόδοσης και απόστασης. Όσον αφορά τις κεραίες που έχουν σχεδιαστεί για συστήματα μετάδοσης μεσαίας ζώνης, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν υπηρεσίες σε μεγάλη ακτίνα αρκετών χιλιομέτρων. Αναμφίβολα, η εμβέλεια αυτή είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη χαμηλή ζώνη, αλλά προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη ταχύτητα (Palazzo & Siano, 2021).

Ως εκ τούτου, η αξιοποίηση του φάσματος μεσαίας ζώνης θα επικεντρωθεί κυρίως σε αστικές περιοχές, όπου υπάρχει ζήτηση για υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας. Στις περιοχές αυτές, η κάλυψη δεν θα αποτελέσει σημαντική πρόκληση, καθώς, λόγω της

διάταξης των σύγχρονων πόλεων, κάθε συνδρομητής θα βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από μια κεραία (Rappaport et al., 2017).

- Υψηλή ζώνη φάσματος (24GHz-40GHz)

Αυτή είναι η κοινή αντίληψη για το 5G μεταξύ του γενικού πληθυσμού. Είναι ευρέως γνωστό ως mmWave. Το φάσμα υψηλών συχνοτήτων παρέχει εξαιρετικές ταχύτητες έως και 10Gbps και διαθέτει ελάχιστη καθυστέρηση. Το κύριο μειονέκτημα της υψηλής ζώνης είναι η περιορισμένη περιοχή κάλυψής της, σε συνδυασμό με τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει στη διείσδυση σε παράθυρα και τοίχους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, αναπτύσσονται πυκνότερες μικρές κυψέλες, οι οποίες εξασφαλίζουν εντυπωσιακές ταχύτητες και ελάχιστη καθυστέρηση (Rappaport et al., 2017).

Αυτές μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά με τη χρήση κεραιών μικρής εμβέλειας που τοποθετούνται στρατηγικά σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές και δημοφιλείς δημόσιους χώρους που συχνά φιλοξενούν μεγάλα πλήθη. Στις τοποθεσίες αυτές περιλαμβάνονται στάδια, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για συναυλίες, αθλητικές εκδηλώσεις και άλλους παρόμοιους χώρους, όπως συνεδριακά κέντρα. Ως εκ τούτου, η χρήση υψηλού εύρους ζώνης θα καλύψει αποτελεσματικά κρίσιμες περιοχές σε όλη τη χώρα που, με τις τρέχουσες τεχνολογίες, παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις στην ικανοποίηση των απαιτήσεών τους (Rappaport et al., 2017).

2.1.1. Δυνατότητες

Σε προηγούμενες εποχές, η συνδεσιμότητα θεωρούνταν συχνά δευτερεύον ζήτημα. Ωστόσο, στον σημερινό κόσμο, έχει γίνει θεμελιώδης ανάγκη, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση της επικοινωνίας, της αλληλεπίδρασης και της παραγωγικότητας τόσο για τους ιδιώτες όσο και για τις επιχειρήσεις. Σε συνδυασμό με τις οπτικές ίνες και άλλες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, το 5G θα αποτελέσει το θεμέλιο της υποδομής για την ψηφιακή εποχή, όπως σημειώνουν οι Palazzo και Siano (2021).

Το 4G επέφερε σημαντικές εξελίξεις στην ταχύτητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Ωστόσο, η άφιξη του 5G πρόκειται να φέρει επανάσταση στο τοπίο εισάγοντας ένα πλήθος συναρπαστικών δυνατοτήτων. Με την έλευση του 5G, μπορούμε να περιμένουμε την εμφάνιση δικτύων Gigabit, τα οποία θα ενισχύσουν σημαντικά τις δυνατότητες του Διαδικτύου των πραγμάτων. Επιπλέον, το 5G θα επιτρέψει την απρόσκοπτη σύνδεση εκατομμυρίων έξυπνων συσκευών στο διαδίκτυο, ανοίγοντας έναν κόσμο ατελείωτων ευκαιριών. Η εμφάνιση της τεχνολογίας 5G δεν περιορίζεται στην εφαρμογή της στις κινητές συσκευές. Επηρεάζει σημαντικά διάφορους τομείς της κοινωνίας μας και μεταμορφώνει τον τρόπο λειτουργίας των επιχειρήσεων. Με τη διαθεσιμότητα προσιτών, μακροπρόθεσμων υπηρεσιών σε πολλαπλές συσκευές, οι επιχειρηματίες μπορούν πλέον να συλλέγουν δεδομένα και να εντοπίζουν τάσεις που θα τους επιτρέψουν να προσαρμοστούν και να αναπτυχθούν. Συγκεκριμένα, οι τομείς που θα βιώσουν σημαντικές μεταμορφώσεις και συνολικές βελτιώσεις όσον αφορά τη λειτουργία τους είναι (Ortiz, 2020):

- **Εμπειρία των χρηστών:** Αυτό είναι το πεδίο στο οποίο η πλειοψηφία των χρηστών θα αντιμετωπίσει τον σημαντικότερο αντίκτυπο, καθώς οι εξαιρετικά γρήγορες ταχύτητες θα φέρουν επανάσταση στη χρήση του διαδικτύου. Όταν πολλοί χρήστες συνδέονται ταυτόχρονα σε ένα κύτταρο, οι ταχύτητες θα παραμένουν εντυπωσιακά υψηλές. Η λήψη ταινιών και σειρών, η αναπαραγωγή παιχνιδιών και η ζωντανή ροή θα γίνονται σχεδόν ακαριαία.
- **Οχήματα:** Μια κρίσιμη πτυχή των αυτόνομων οχημάτων περιλαμβάνει την ικανότητά τους να μεταδίδουν και να λαμβάνουν γρήγορα εντολές, καθώς και να επεξεργάζονται αποτελεσματικά δεδομένα. Δεδομένης της αλληλεπίδρασής τους τόσο με τους ανθρώπους όσο και με άλλα οχήματα, είναι επιτακτική ανάγκη να διαθέτουν την ικανότητα άμεσης επικοινωνίας με όλα τα συστήματα. Αυτό είναι ένα έργο που τα σημερινά συστήματα δεν είναι σε θέση να επιτελέσουν σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή της τεχνολογίας 5G.
- **Η εμφάνιση των έξυπνων πόλεων** έχει μετατρέψει τα αστικά περιβάλλοντα σε ένα πεδίο που μοιάζει με τα φουτουριστικά τοπία που απεικονίζονται σε ταινίες επιστημονικής φαντασίας. Αυτό που θα μας επιτρέψει το 5G είναι να επιβλέπουμε ένα πλήθος αισθητήρων, συνδεδεμένων με ένα κεντρικό σημείο ελέγχου, οι οποίοι θα συλλέγουν δεδομένα για ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως η ακριβής ποσότητα του ημερήσιου φωτός που απαιτείται για την αυτόματη ενεργοποίηση

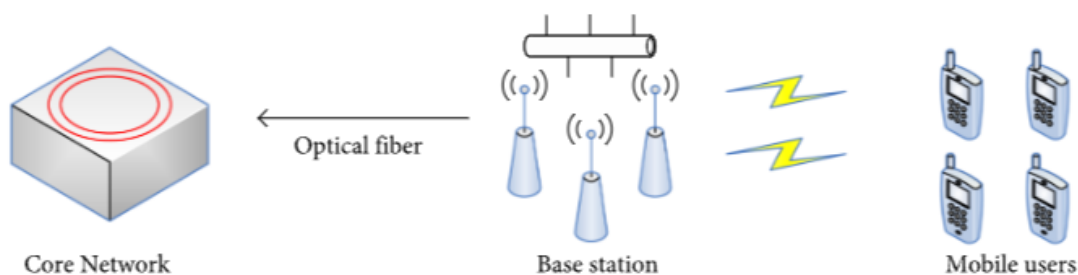
των φώτων του δρόμου, ο συγχρονισμός των φωτεινών σηματοδοτών με τα έξυπνα οχήματα και η παρακολούθηση των διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης για την αποτελεσματική διαχείριση των δημόσιων χώρων στάθμευσης.

- Η δημόσια ασφάλεια και η προστασία των πολιτών είναι μια κρίσιμη πτυχή που αξίζει να εξεταστεί ξεχωριστά, καθώς υπερβαίνει το πεδίο εφαρμογής των έξυπνων πόλεων και είναι εφαρμόσιμη σε διάφορα περιβάλλοντα, όχι μόνο σε αστικά. Αισθητήρες εγκατεστημένοι σε διάφορες κατασκευές, όπως γέφυρες, δάση, ποτάμια, υπονόμους και αποχετεύσεις Στο μέλλον, οι αισθητήρες σε γέφυρες, αερογέφυρες, σήραγγες και δρόμους θα έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες και τα προβλήματα αυτών των υποδομών. Θα είναι σαν να υπάρχουν επιμελείς μηχανικοί τοποθετημένοι σε κάθε τοποθεσία, οι οποίοι θα εξετάζουν σχολαστικά κάθε κτίριο και υποδομή και θα στέλνουν αμέσως λεπτομερείς αναφορές.
- Έξυπνα σπίτια: Η έλευση των δικτύων 5ης γενιάς θα επιφέρει μια επαναστατική αλλαγή στον τρόπο που ζούμε σε ένα έξυπνο σπίτι, επηρεάζοντάς το με τρεις σημαντικούς τρόπους. Εξασφαλίζοντας την ασφάλεια, παρέχοντας ευκολία και προσφέροντας ευχάριστες εμπειρίες. Με την έλευση του 5G, ένας εντελώς νέος κόσμος δυνατοτήτων ανοίγεται μπροστά μας. Φανταστείτε να μπορούμε να ελέγχουμε από απόσταση τις συσκευές και τα συστήματα ασφαλείας, λαμβάνοντας ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο στο κινητό μας τηλέφωνο ενώ βρισκόμαστε στο γραφείο. Φανταστείτε έξυπνες συσκευές να επικοινωνούν απρόσκοπτα μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα πραγματικά διασυνδεδεμένο περιβάλλον. Οι ταχύτητες και το εύρος ζώνης που προσφέρει το 5G καθιστούν όλα αυτά εφικτά. Σε συνδυασμό με τις βελτιωμένες ευρυζωνικές δυνατότητες, το έξυπνο σπίτι έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί απρόσκοπτα σε έναν κεντρικό κόμβο πολυμέσων και ψυχαγωγίας. Αυτό επιτρέπει την ταχεία μετάδοση και λήψη πληροφοριών και περιεχομένου ψυχαγωγίας, χωρίς αξιοσημείωτες καθυστερήσεις.
- Βιομηχανία και άλλοι τομείς εργασίας: Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G θα έχει βαθύ αντίκτυπο σε διάφορους τομείς, ιδίως στη βιομηχανία. Οι βελτιωμένες δυνατότητες επικοινωνίας θα επιτρέψουν τον απρόσκοπτο τηλεχειρισμό και τη λειτουργία των μηχανημάτων, οδηγώντας σε σημαντικά οφέλη. Ο χειρισμός ή η λεπτομερής ρύθμιση ενός μηχανήματος δεν θα απαιτεί πλέον την παρουσία ενός τεχνικού επί τόπου, καθώς θα έχει τη δυνατότητα να εκτελεί αυτές τις εργασίες εξ

αποστάσεως από το σταθμό εργασίας του. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει αναγνωριστεί ευρέως ως σημαντικό ορόσημο σε όλες τις μέχρι σήμερα επιδείξεις συστημάτων 5G, δεδομένης της δυνατότητάς του να ενισχύσει σημαντικά τα πλεονεκτήματα της κατασκευής προϊόντων. Θα υπάρξουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα στην κτηνοτροφία και τη γεωργία, καθώς και σε μια βιομηχανική ζώνη. Οι αγρότες και οι κτηνοτρόφοι θα έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν όλες τις πτυχές σε πραγματικό χρόνο και να δημιουργούν ζωντανή σύνδεση με κάθε σημείο παραγωγής. Αυτό θα τους επιτρέψει να μετρούν διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η χημεία του εδάφους, το νερό, οι ζωοτροφές και οι καιρικές συνθήκες.

- **Φάρμακα:** Είναι προφανές ότι ο κλάδος των υπηρεσιών θα γνωρίσει σημαντικές βελτιώσεις στον τομέα της ιατρικής. Αξιοποιώντας τη δύναμη της τεχνολογίας 5G, αναδύεται η δυνατότητα διενέργειας χειρουργικών επεμβάσεων από απόσταση, προσφέροντας μια σανίδα σωτηρίας σε άτομα σε απομακρυσμένες περιοχές ή κατά τη διάρκεια κρίσιμων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Οι κάτοικοι απομακρυσμένων περιοχών θα έχουν πλέον πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα ιατρικών υπηρεσιών, κάτι που κάποτε θεωρούνταν αδύνατο. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή πολύπλοκων περιστατικών, η πρόσβαση στην τεχνογνωσία εξειδικευμένων γιατρών θα είναι πολύ πιο εύκολη. Χάρη στις εξελίξεις στην τεχνολογία 5G, τόσο οι γιατροί όσο και οι ασθενείς μπορούν πλέον να είναι ήσυχοι γνωρίζοντας ότι τα προβλήματα συνδεσιμότητας δεν θα αποτελούν πλέον απειλή, σώζοντας ενδεχομένως ζωές σε κρίσιμες καταστάσεις. (Ortiz, 2020).

Σίγουρα, οι αλλαγές που έρχονται στην καθημερινότητά μας είναι κολοσσιαίες και έχουν τεράστιο ενδιαφέρον. Ωστόσο, παρ' όλες τις θετικές πτυχές, υπάρχουν επίσης αρκετά προβλήματα και διάφοροι κίνδυνοι που προκύπτουν από αυτή την τεχνολογική επανάσταση που αποτελεί τη νέα πραγματικότητα (Palazzo & Siano, 2021).



Εικόνα 2 Βασική δομή της τεχνολογίας κινητών επικοινωνιών 5G.

2.1.2. Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία 5G προσφέρει παγκόσμιες δυνατότητες συνδεσιμότητας, καλύπτοντας διάφορες προσωπικές και επαγγελματικές ανάγκες. Θα συζητήσουμε σημαντικούς λόγους για τη σημασία της αξιοποίησης αυτού του δικτύου. 12 Δυνατότητα παρακολούθησης οποιασδήποτε τοποθεσίας σε ολόκληρο τον κόσμο. Με την εφαρμογή αυτών των μέτρων, παρατηρείται αξιοσημείωτη μείωση της εγκληματικής δραστηριότητας. Διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αναζήτηση και τον εντοπισμό αγνοούμενων ατόμων, ανεξάρτητα από τον τόπο διαμονής τους (Jain et al., 2018).

- Βελτίωση της κατανομής εύρους ζώνης για όλους τους χρήστες.
- Με την εκθετική αύξηση των διαθέσιμων δεδομένων, οι χρήστες έχουν πλέον τη δυνατότητα να κατεβάζουν αβίαστα αρχεία, να περιηγούνται σε ιστότοπους και να απολαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα βίντεο και περιεχομένου. Οι έξυπνες συσκευές σε δίκτυο 5ης γενιάς επιτρέπουν σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες σε σύγκριση με το 4G. Εργασίες που παραδοσιακά περιορίζονταν σε επιτραπέζιους ή φορητούς υπολογιστές μπορούν πλέον να εκτελούνται απρόσκοπτα σε έξυπνες συσκευές (Jain et al., 2018).
- Με χωρητικότητα που ξεπερνά αυτή του σημερινού δικτύου 4G
- Η αναμενόμενη εκτίναξη του ρυθμού δεδομένων προβλέπεται να ξεπεράσει το 1GB ανά δευτερόλεπτο, υποσχόμενη αυξημένη ευρυζωνική πυκνότητα για τους χρήστες. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης μπαταρίας και της καθυστέρησης, με αποτέλεσμα την παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας για τις έξυπνες συσκευές και τη μείωση της χρήσης ενέργειας στα δίκτυα (Jain et al., 2018).
- Πρόσβαση σε πολλαπλές συνδέσεις ταυτόχρονα με υψηλό ρυθμό.
- Η αυξημένη φασματική απόδοση στο δίκτυο 5G παρέχει σημαντική βελτίωση στη χρήση, με αποτέλεσμα ταχύτερες ταχύτητες στα smartphones. Αυτό αντιπροσωπεύει μια σημαντική αλλαγή στον κλάδο των έξυπνων συσκευών, που προκλήθηκε από την έλευση της εικονικής πραγματικότητας. Διερεύνηση της

εφαρμογής της τεχνολογίας δικτύων 5G στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης (Jain et al., 2018):

- Τηλεϊατρική
- Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών
- Απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών από την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών
- Απομακρυσμένη εικονική πραγματικότητα και εικονική πραγματικότητα
- Αποκέντρωση του μοντέλου υγειονομικής περίθαλψης
- Μεταφορά μεγάλων αρχείων

Οι γιατροί θα έχουν τη δυνατότητα, με τη βοήθεια ενός δικτύου 5G, να συμμετέχουν σε τηλεδιασκέψεις με ασθενείς από απόσταση, επεκτείνοντας έτσι το πεδίο της ιατρικής περίθαλψης πέρα από τα όρια του νοσοκομείου. Μας προσφέρει τη δυνατότητα να λαμβάνουμε ιατρικές διαβουλεύσεις σε πραγματικό χρόνο με βίντεο υψηλής ποιότητας, και όλα αυτά χωρίς καμία επιβάρυνση του δικτύου. Με την τηλεϊατρική, μπορούμε να παρακολουθούμε από απόσταση τους ασθενείς, συμπεριλαμβανομένης της χορήγησης και της ρύθμισης της φαρμακευτικής αγωγής, ενώ αναλύουμε τα δεδομένα υγείας των ασθενών σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Επί του παρόντος, οι δυνατότητες της τηλεπαρακολούθησης παρεμποδίζονται σημαντικά λόγω της ανεπαρκούς χωρητικότητας του δικτύου για τη διαχείριση των δεδομένων. Θα δημιουργηθούν ισχυρές συνδέσεις με υποστήριξη δικτύου 5G για τη βελτιστοποίηση της μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας στους επαγγελματίες του ιατρικού κλάδου να λαμβάνουν άμεσα και με γνώση αποφάσεις υγειονομικής περίθαλψης για τους ασθενείς τους. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Adel Mahmood το 2017, τα άτομα με χρόνιες παθήσεις θα επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από αυτό.

Η τεχνολογία 5G έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στη φροντίδα των ασθενών και στην εκπαίδευση των κλινικών ιατρών, επιτρέποντας τη χρήση επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και εικονικής πραγματικότητας (VR). Ο ερευνητικός στόχος είναι να αντιμετωπιστεί η δυσφορία και το άγχος των ασθενών, αξιοποιώντας την υποστήριξη ενός δικτύου 5G για την απόσπαση της προσοχής των ασθενών μέσω ελκυστικού περιεχομένου. Προσφέρει τη δυνατότητα οπτικοποίησης

διαδικασιών και εκπαίδευσης, η οποία περιλαμβάνει πρακτική εκπαίδευση για νοσηλευτές, γιατρούς, εκπαιδευόμενους γιατρούς και προσωπικό νοσοκομείων. Αυτό καθίσταται εφικτό μέσω της χρήσης της τεχνολογίας AR/VR και της υποστήριξης 5G (Jain et al., 2018).

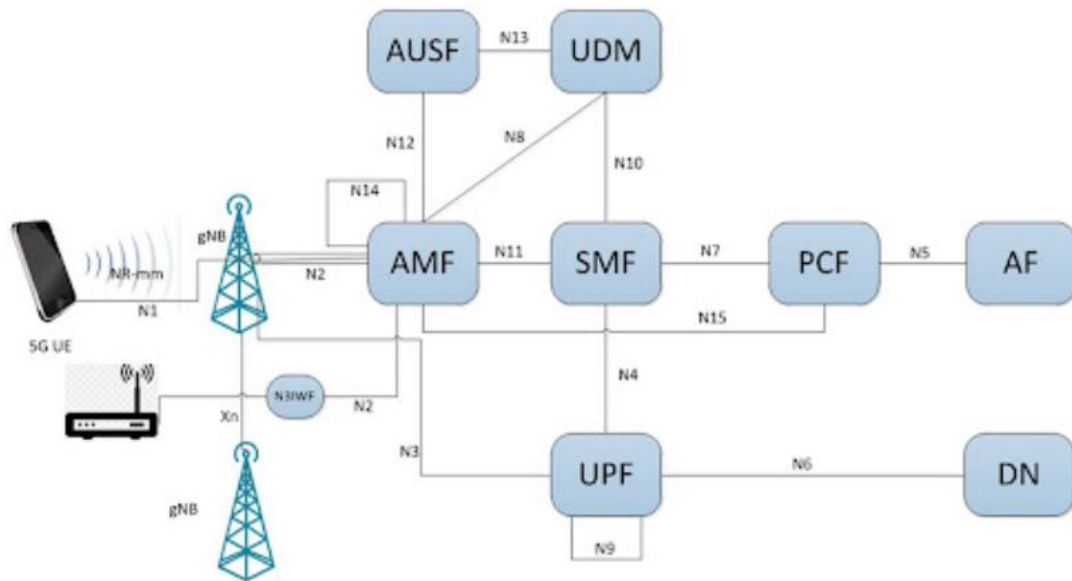
Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής ανταλλαγής πληροφοριών, καθώς και στη δυνατότητα πιο προηγμένων αναλύσεων. Μέσω της αξιοποίησης των έξυπνων συσκευών και των εφαρμογών τους, μπορεί να επιτευχθεί αυξημένη αποτελεσματικότητα και μειωμένο κόστος στη χρήση των δεδομένων υγειονομικής περίθαλψης. Οι έξυπνες συσκευές περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών θαυμάτων, όπως κινητά τηλέφωνα, συσκευές, αισθητήρες, μηχανήματα και συστήματα. Αυτές οι εντυπωσιακές δημιουργίες έχουν την ικανότητα να προσφέρουν τα περίπλοκα και ολοκληρωμένα δεδομένα που απαιτούνται για εφαρμογές αιχμής, όπως η εξ αποστάσεως διάγνωση, η εξ αποστάσεως χειρουργική και η έξυπνη νοσηλεία (Adebusola et al., 2020).

Αυτό θα επιταχύνει τη στροφή του κλάδου προς την παροχή φροντίδας των ασθενών εκτός νοσοκομείων, οδηγώντας στη δημιουργία κέντρων φροντίδας, κλινικών, χειρουργικών κέντρων και κατ' οίκον νοσηλείας. Η ευρεία υιοθέτηση των δικτύων 5G είναι ζωτικής σημασίας για την πρόοδο διαφόρων τομέων, όπως η ιατρική, η τεχνολογία, η υγειονομική περίθαλψη και ο καταναλωτισμός. Αυτό θα επιτρέψει στους επαγγελματίες του ιατρικού κλάδου να βελτιώσουν τις δυνατότητες απομακρυσμένης συνεργασίας τους, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη επικοινωνία και τη δυνατότητα εκτέλεσης ρομποτικών χειρουργικών επεμβάσεων με ελάχιστη καθυστέρηση. Στο πλαίσιο του σημερινού τεχνολογικού δικτύου, υπάρχει ένα αξιοσημείωτο ζήτημα με το περιορισμένο εύρος ζώνης, που οδηγεί σε παρατεταμένους χρόνους μεταφοράς δεδομένων και αρχείων. Υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως ο χρόνος διακοπής λειτουργίας του δικτύου, οι ασθενείς που αντιμετωπίζουν καθυστερήσεις στη λήψη θεραπευτικών λύσεων και οι πάροχοι υγειονομικής περίθαλψης που περιορίζονται στον αριθμό των ασθενών που μπορούν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα. Το δίκτυο 5G διαθέτει μοναδικές δυνατότητες που το διαφοροποιούν από τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύων. Έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την ταχύτερη μεταφορά ιατρικών εικόνων, δεδομένων και αποτελεσμάτων θεραπείας, παρέχοντας παράλληλα εξαιρετικές επιδόσεις (Adebusola et al., 2020).

2.2. Αρχιτεκτονική δικτύου 5G

Τα δίκτυα 5G δημιουργήθηκαν για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Στόχος είναι να εξορθολογιστεί η μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων δεδομένων και να προσδιοριστεί η πιο οικονομική προσέγγιση για τη μετάδοση πακέτων μεταξύ των δικτύων ασύρματης πρόσβασης (RAN) και των δικτύων πυρήνα πακέτων (PCN). Στη συνέχεια, θα εμβαθύνουμε στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5G. Παρ' όλα αυτά, όταν πρόκειται για πολύπλοκες καταστάσεις όπως το backhaul και το fronthaul, όπου μπορεί να είναι δύσκολο να καθοριστούν σαφείς απαιτήσεις και σενάρια ανάπτυξης, μια ρεαλιστική στρατηγική είναι η ενσωμάτωση ενός συνδυασμού διαφόρων τεχνολογιών (Sutton, 2018).

Αυτές οι νέες τεχνολογίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις διακριτές ομάδες. Η αρχική κατηγορία περιλαμβάνει ασύρματες τεχνολογίες, όπως τα μικροκύματα, το mm-Wave και τα οπτικά ασύρματα. Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου τα ενσύρματα δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα ή κατά την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων, όπως φαίνεται στο έργο Crosshaul. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τεχνολογίες που χρησιμοποιούν προϋπάρχουσες βάσεις και υποδομές οπτικών ινών (GPON, WDM) και χαλκού (G.fast, VDSL Bonding) στο δίκτυο πρόσβασης. Στον τομέα των τεχνολογιών οπτικών ινών διεξάγεται επί του παρόντος εκτεταμένη έρευνα για τη βελτίωση των δυνατοτήτων του δικτύου και τη μείωση του κόστους ανά Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Αυτό οφείλεται στην αξιοσημείωτη χωρητικότητα αυτών των τεχνολογιών (Sutton, 2018).



Εικόνα 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G

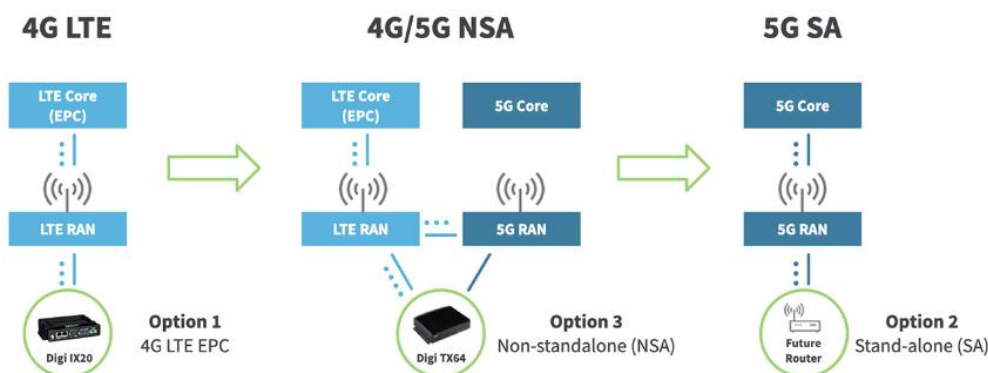
2.2.1. Ασύρματα δίκτυα 5G

Παρόμοια με άλλες αναδυόμενες τεχνολογίες, τα ασύρματα δίκτυα προκαλούν συχνά ερωτήματα σχετικά με την υλοποίησή τους και τις σχετικές δαπάνες. Το έργο 5G-Crosshaul παρέχει λύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Είναι σαφές ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα παγκοσμίως για την υιοθέτηση του 5G είναι δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς. Για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού του φάσματος έως και τη ζώνη συχνοτήτων mm-Wave, είναι ζωτικής σημασίας η δημιουργία αξιόπιστων συνδέσεων σημείου προς σημείο (P2P) για σκοπούς ασύρματου backhaul και fronthaul. Οι ερευνητές ασχολούνται ενεργά με τη διεξαγωγή διεξοδικών ερευνών σε υψηλότερες συχνότητες που κυμαίνονται από 50 έως 90 GHz. Αυτό οφείλεται στην ενδιαφέρουσα ανακάλυψη του κατακερματισμού που συμβαίνει σε συχνότητες κάτω των 50 GHz, όπως αναφέρθηκε από τους Mehrdad Shariat και συν. το 2019.

Επιπλέον, το ETSI τονίζει την ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη των δικτύων backhaul και fronthaul. Κατά συνέπεια, εισήχθησαν δύο επιπλέον ζώνες αποκλειστικά για τη μεταφορά mm-Wave: η ζώνη V (57 έως 66 GHz) και η ζώνη E (71 έως 76 GHz και 81 έως 86 GHz) (Mehrdad Shariat et al., 2019).

Επιπλέον, προέκυψε μια πρωτοποριακή καινοτομία με τη μορφή των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών (OWC). Αυτή η τεχνολογία αιχμής επιτρέπει την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε μικρές αποστάσεις μεταξύ δικτύων fronthaul/backhaul, εξασφαλίζοντας άψογη ορατότητα χωρίς απώλειες λόγω διευρυμένου οπτικού πεδίου (LOS). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO), παρέχοντας μια πιο συγκεκριμένη προσέγγιση. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιεί πομπούς λέιζερ για ασύρματες επικοινωνίες με υψηλή χωρητικότητα άνω των 200m. Επιπλέον, χρησιμοποιεί την τεχνολογία επικοινωνιών ορατού φωτός (VLC) για επικοινωνίες σε εσωτερικούς χώρους, χρησιμοποιώντας συστήματα LED υψηλής ισχύος (Mehrdad Shariat et al., 2019).

Η πυκνότητα ενός δικτύου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διάταξη και την εγγύτητα των κυβελών του. Ως ακαδημαϊκός, αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η απόσταση μεταξύ των κυβελών ορίζεται στα 150 μέτρα, η χωρητικότητα της περιοχής μπορεί να φτάσει σε εκατοντάδες Gbit/km². Όσον αφορά τη ζώνη συχνοτήτων, αυτή ποικίλλει με βάση τις συνδέσεις mm-Wave. Στη ζώνη E, τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις, που εκτείνονται σε πολλά χιλιόμετρα. Από την άλλη πλευρά, με τη ζώνη V, η εμβέλεια περιορίζεται στα 50 μέτρα έως 1 χιλιόμετρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο υλικό κεραίας που χρησιμοποιείται μπορεί να επηρεάσει την εμβέλεια εντός αυτού του εύρους αποστάσεων (Mehrdad Shariat et al., 2019).



Εικόνα 4 Αρχιτεκτονική 5G.

2.2.2. Δίκτυα σταθερής πρόσβασης

Με βάση την έρευνα που διεξήχθη από το έργο 5G-Crosshaul, ανακαλύφθηκε ότι τα παθητικά οπτικά δίκτυα (PON) μπορούν να καλύψουν αποτελεσματικά τις συνδέσεις backhaul και fronthaul χωρίς πρόσθετο κόστος για την κατασκευή σταθερών ή ασύρματων οπτικών δικτύων πρόσβασης. Διαθέτουν έντονη κατανόηση των συνεχιζόμενων επιδόσεων και είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένα σε τυχόν μεταβολές στις παραμέτρους του φυσικού στρώματος και του στρώματος διασύνδεσης του δικτύου.

Με την υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης, είμαστε σε θέση να επιταχύνουμε την επίλυση ενός ευρέος φάσματος ζητημάτων και να διασφαλίσουμε τη σωστή συντήρηση των βασικών υποδομών (Mehrddad Shariat et al., 2019).

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένα πλήθος τεχνικών για τον εντοπισμό και τη διόρθωση των ελαττωμάτων του συστήματος, που περιλαμβάνουν κρυπτογράφηση, υβριδική αποκωδικοποίηση, διόρθωση σφαλμάτων και διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC). Η ασφάλεια των δικτύων PON είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές για την αυθεντικοποίηση, τη διαχείριση κλειδιών και την κρυπτογράφηση δεδομένων (Mehrddad Shariat et al., 2019).

Επιπλέον, τα παθητικά οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν βασικές τεχνολογίες. Πρώτα απ' όλα, η τεχνολογία GPON χρησιμεύει ως μηχανισμός πρόσβασης από σημείο σε πολλαπλά σημεία (P2MP) για την απρόσκοπτη ενσωμάτωση παθητικών διαχειριστών (διαχωριστών) στο δίκτυο διανομής οπτικών ινών. Με τη χρήση αυτής της προσέγγισης, τα κεντρικά γραφεία του παρόχου διανέμουν αποτελεσματικά μία μόνο ίνα σε πολλά σπίτια και μικρές επιχειρήσεις. Η χωρητικότητα του εύρους ζώνης downstream αυτού του συστήματος είναι 2,5 Gbit/s, ενώ η χωρητικότητα upstream είναι 1,25 Gbit/s για μεταφορά μεταξύ χρηστών (32/64). Ωστόσο, η διεπαφή CPRI δείχνει ότι τα αποτελέσματα απόδοσης του GPON δεν είναι στο ύψος των περιστάσεων, παρόλο που είναι κατάλληλο για πυκνοκατοικημένες περιοχές με επικοινωνίες fronthaul κάτω από 1 Gbit/s (Saily et al., 2020). Η περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας 10G-PON σηματοδοτεί την εξέλιξη του GPON. Μέσω της αξιοποίησης αυτής της τεχνολογίας, μπορούμε να επιτύχουμε αυξημένη χωρητικότητα εύρους ζώνης και να αμβλύνουμε τη συμφόρηση, ενώ παράλληλα ενθαρρύνουμε περαιτέρω επενδύσεις σε υποδομές δικτύου. Υπάρχουν δύο πρότυπα που ενσωματώνονται στο 10G-PON:

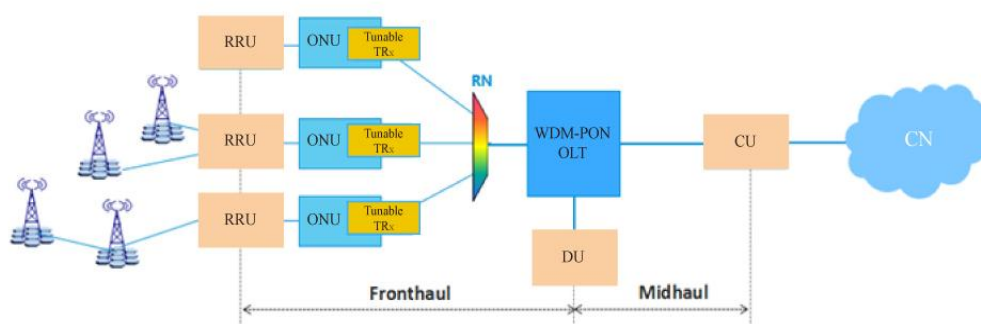
- το XG-PON είναι ένα ασύμμετρο 10G-PON που προσφέρει εύρος ζώνης 2,5 Gbit/s upstream και 10 Gbit/s downstream (Saily et al., 2020). Ενώ μπορεί να έχουν υπάρξει κάποιες βελτιώσεις στο upstream, το εύρος ζώνης εξακολουθεί να μην θεωρείται επαρκές σύμφωνα με το έργο 5G-Crosshaul.
- Το XGSPON είναι ένα συμμετρικό 10G-PON με χωρητικότητα 10 Gbit/s τόσο για upstream όσο και για downstream.

Η τεχνολογία NG-PON2 αναπτύχθηκε για να θέσει νέα πρότυπα και να διευρύνει ακόμη περισσότερο τα όρια. Η εφαρμογή αυτών των νέων δυνατοτήτων επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο τοπίο, ενισχύοντας τη φορητότητα του μήκους κύματος και τη σύνδεση καναλιών. Τα NG-PON2 χωρίζονται συνήθως είτε σε 4 είτε σε 8 μήκη κύματος, επιτρέποντας συνολική φορητότητα 40 GB. Μέσω της αξιοποίησης της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου και μήκους κύματος (TWDM), είμαστε σε θέση να επιτύχουμε βέλτιστη απόδοση εντός του εύρους μηκών κύματος στο οποίο εφαρμόζεται αυτή η τεχνική. Για τη χωρητικότητα ανάντη και κατόντη, τα ζεύγη έχουν ως εξής: (10Gbit/s/10 Gbit/s), (2,5Gbit/s/10 Gbit/s), (2,5Gbit/s/2,5 Gbit/s) (Saily et al., 2020).

Όπως αναμενόταν, τα δίκτυα PON εξελίχθηκαν τελικά σε WDM-PON. Χρησιμοποιώντας πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και τεχνολογία λέιζερ κατανεμημένης ανάδρασης (DFB), επιτυγχάνεται εντυπωσιακό εύρος ζώνης 1 Gbit/s σε διάφορες τοποθεσίες σε εκτεταμένες αποστάσεις που ξεπερνούν τα 100 km (Mehrddad Shariat et al., 2019).

2.2.3. Οπτικά δίκτυα

Τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί σημαντικά οι απαιτήσεις των χρηστών για βελτιωμένες δικτυακές υπηρεσίες. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη επίτευξης υψηλότερου εύρους ζώνης και ταχύτερων ρυθμών μετάδοσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων αναγνωρίζουν τη σημασία της ικανοποίησης αυτών των αναγκών και χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο την τεχνολογία οπτικών ινών. Ωστόσο, αυτό έχει οδηγήσει διάφορους παρόχους να αντιμετωπίζουν οικονομικές προκλήσεις στην ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών λόγω ανεπαρκούς υποδομής. Η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) προσφέρει λύσεις σε αυτό το πρόβλημα. Σε προηγούμενη ενότητα, η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την πολυπλεξία πολλαπλών οπτικών σημάτων σε μία μόνο ίνα χρησιμοποιώντας διάφορα χρώματα φωτός ή μήκη κύματος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συνήθως σε μεταγωγείς, δρομολογητές και διακομιστές, παρέχοντας υποστήριξη για ένα ευρύ φάσμα πρωτοκόλλων δικτύου (Saily et al., 2020).



Εικόνα 5 Εφαρμογή των οπτικών μονάδων στην αρχιτεκτονική 5G

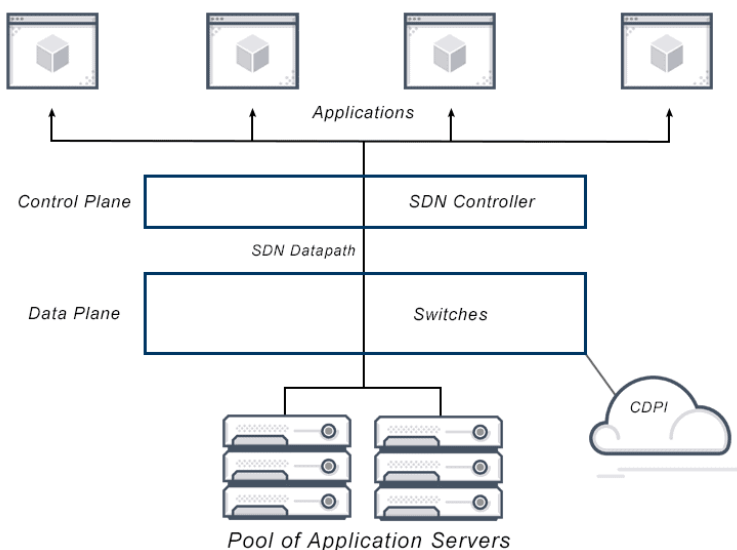
2.2.4. Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN

Το SDN είναι μια τεχνολογία που διαχωρίζει αποτελεσματικά τα επίπεδα δεδομένων από το επίπεδο δικτύου, επιτρέποντας τον αποτελεσματικότερο προγραμματισμό των λειτουργιών του δικτύου. Η αρχιτεκτονική SDN διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη δυνατότητα ευφών αναβαθμίσεων του δικτύου, ενισχυμένου ελέγχου και βελτιωμένων επιδόσεων, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση του κόστους. Η λειτουργία του δικτύου χωρίζεται σε τρία στρώματα σύμφωνα με την έρευνα που διεξήχθη από τους Mehrdad Shariat et al. το 2019:

- Το επίπεδο εφαρμογών περιλαμβάνει όλα τα προγράμματα που χειρίζονται επιχειρηματικές εφαρμογές σε υπηρεσίες δικτύου και παρουσιάζουν πληροφορίες σχετικά με τους πόρους τους σε προγραμματικό επίπεδο.
- Το επίπεδο ελέγχου είναι το κεντρικό στοιχείο που διέπει το δίκτυο και ασκεί άμεση εξουσία στα στοιχεία του επιπέδου δεδομένων.
- Το επίπεδο δεδομένων αποτελείται από το network element exchange (NES), το οποίο είναι υπεύθυνο για την αποτελεσματική δρομολόγηση της κίνησης των χρηστών με βάση τις οδηγίες που λαμβάνονται από τον ελεγκτή.

Οι εφαρμογές ασκούν πλήρη έλεγχο στη διαδικασία προώθησης στοιχείων δικτύου (NES) χρησιμοποιώντας τα υψηλού επιπέδου API που προσφέρονται από τους

ελεγκτές SDN. Υπάρχει συνεχής ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των στοιχείων δικτύου και των ελεγκτών SDN μέσω API χαμηλού επιπέδου, με χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας OpenFlow ή της διεπαφής γραμμής εντολών (CLI) (Mehrddad Shariat et al., 2019).



Εικόνα 6 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN

2.2.5. Εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών-NFV

Λόγω της εκθετικής αύξησης των χρηστών, η κίνηση του διακομιστή δικτύου έχει αυξηθεί σημαντικά. Αυτό οδήγησε στην εμφάνιση μιας νέας τεχνολογίας γνωστής ως Εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV). Αυτή η τεχνολογία μας δίνει τη δυνατότητα να προγραμματίζουμε αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών δικτύου. Η αρχιτεκτονική πάνω στην οποία βασίζεται κατέχει σημαντική σημασία, καθώς ενσωματώνει απρόσκοπτα την εικονικοποίηση στην πληροφορική, ενισχύοντάς την ώστε να μετατρέπει την εικονική ανταλλαγή δεδομένων, τα χρηματοοικονομικά εργαλεία, τις εικονικές συσκευές και τις εικονικές εφαρμογές που βασίζονται στο δίκτυο σε απτές πραγματικότητες. Δυστυχώς, αυτή η νέα τεχνολογία έχει οδηγήσει σε τριπλασιασμό του κόστους λειτουργίας και διαχείρισης των κινητών επικοινωνιών, ξεπερνώντας το κόστος κεφαλαίου. Σε αυτό το σημείο το έργο SELFNET H2020 παρέχει μια λύση. Έχει υλοποιήσει ένα αυτόνομο πλαίσιο διαχείρισης δικτύων, το οποίο αναβαθμίζει κάθε δίκτυο με δυνατότητες αυτο-οργάνωσης (SON) (Chayapathi et al., 2016).

2.2.6. Μικροκυματική ζώνη

Η ζώνη μικροκυμάτων είναι μια φασματική περιοχή που χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος στο επίπεδο των χιλιοστών. Μέσω της εφαρμογής αυτής της προηγμένης τεχνολογικής αρχιτεκτονικής, είμαστε σε θέση να επιτύχουμε ένα εντυπωσιακό εύρος ζώνης μετάδοσης άνω των 30 GHz. Επιπλέον, αυτό το αξιοσημείωτο επίτευγμα συνοδεύεται από την εξάλειψη τυχόν προβλημάτων συμφόρησης που συνήθως συνδέονται με συχνότητες αυτής της φύσης.

Εκτεταμένη έρευνα έχει διεξαχθεί παγκοσμίως για το θέμα της περιοχής συχνοτήτων 60 GHz, κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας ενός ελεύθερου εύρους ζώνης συχνοτήτων 3 GHz (59 - 62 GHz). Η δημιουργία του IEEE 802.11ad κρίθηκε αναγκαία από τους ειδικούς του χώρου λόγω των προκλήσεων που δημιουργεί το μικρό μέγεθος της κυψέλης του συστήματος, όπως οι απώλειες μετάδοσης και η διείσδυση σε τοίχους. Αυτό το πρωτόκολλο WLAN χρησιμοποιεί τεχνολογίες αιχμής για το ραδιοσήμα που μεταδίδεται μέσω μιας ίνας RoF, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης (Begishev et al., 2021).

Το πρωτόκολλο αυτό παρουσιάζει εξαιρετικές επιδόσεις στις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου, ιδίως στις προβληματικές περιοχές κάτω από τα 6 GHz (εξαιρουμένης της περιοχής των 2,4 GHz). Επιπλέον, ενσωματώνει ένα κατευθυντικό στρώμα πολλαπλών Gbit (Dmg) που αξιοποιεί αποτελεσματικά φασματικές περιοχές άνω των 45 GHz για κάθε κανάλι (Begishev et al., 2021).

Για την καλύτερη κατανόηση της αρχιτεκτονικής mm-Wave οι ερευνητές εφάρμοσαν δύο τρόπους:

- **Αυτόνομη (Standalone):** Η τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης mm-Wave (mm-Wave RAT), χρησιμοποιεί συχνότητες mm-Wave και ενισχυμένα σημεία πρόσβασης (AP) για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς και ελαττωματικής κάλυψης.
- **Μη αυτόνομος (Non Standalone):** εξέλιξη των κόμβων mm-Wave, σε κόμβους που χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες (Begishev et al., 2021).

2.3. Εγκαταστάσεις Φυσικής Δικτύωσης και Υπολογιστών

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η σημαντική αύξηση της κινητής κίνησης δεδομένων, είναι επιτακτική ανάγκη να μετατραπούν τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα μακροκυψελών σε αρχιτεκτονικές που ενσωματώνουν πολλαπλές μικρές κυψέλες, εκτός από τις μακροκυψέλες, για να εγγυηθούν εκτεταμένη κάλυψη. Τα παραδοσιακά δίκτυα ραδιοπρόσβασης αντιμετωπίζουν διάφορους περιορισμούς ως αποτέλεσμα της εγγύτητας των μονάδων βασικής ζώνης (BBUs) και των ραδιομονάδων. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτοί οι περιορισμοί και να αξιοποιηθούν τα οφέλη της συνάθροισης και του συντονισμού, οι μελετητές ανέπτυξαν την έννοια των δικτύων ραδιοπρόσβασης νέφους (C-RAN) σε συνδυασμό με τη δυνατότητα εύελικτων διαχωρισμών επεξεργασίας (Azodolmolky et al., 2013).

Η συνδεσιμότητα μεταφοράς υψηλού εύρους ζώνης είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων απομακρυσμένης επεξεργασίας για σκοπούς επιχειρηματικών δικτύων (C-RAN) και για την υποστήριξη ευρέος φάσματος υπηρεσιών υπολογισμού και αποθήκευσης τελικών χρηστών. Αυτή η συνδεσιμότητα πρέπει να τηρεί αυστηρά πρότυπα για την καθυστέρηση και τον συγχρονισμό μεταξύ των ραδιομονάδων και των απομακρυσμένων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων, όπως αναμένεται σε ένα ακαδημαϊκό περιβάλλον. Επιπλέον, η σωστή κατανομή των πόρων εντός του δικτύου μεταφοράς είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων της στατιστικής πολυπλεξίας (Azodolmolky et al., 2013).

2.4. Ενοποίηση Δυνατοτήτων Δικτύου

Η έννοια του 5G οραματίζεται ένα αρμονικό και περιεκτικό οικοσύστημα δικτύου, όπου διαφορετικές τεχνολογίες δικτύου συνδυάζονται απρόσκοπτα για την παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας. Αυτό περιλαμβάνει τόσο ασύρματες όσο και ενσύρματες λύσεις μεταφοράς που διευκολύνουν τη συνδεσιμότητα για ένα ευρύ φάσμα τελικών συσκευών και χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων. Αυτοί οι πόροι είναι απαραίτητοι για την ενεργοποίηση ενός ευρέος φάσματος υπηρεσιών τόσο για τους τελικούς χρήστες όσο και για τις

επιχειρήσεις, συμπεριλαμβανομένου του C-RAN και των διαφόρων επιλογών διαχωρισμού. Μπορούν να φιλοξενηθούν είτε σε μικροκέντρα δεδομένων (DC), που αναφέρονται επίσης ως Mobile Edge Computing (MEC), είτε σε απομακρυσμένα περιφερειακά και κεντρικά DC μεγάλης κλίμακας (Caraguay & Villalba, 2017). Το MEC παρέχει δυνατότητες υπολογισμού και υπολογιστικού νέφους στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) σε κοντινή απόσταση από τους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας, ενώ τα περιφερειακά και κεντρικά DC προσφέρουν συγκρίσιμες υπηρεσίες στις οποίες μπορεί να έχει πρόσβαση μέσω του RAN και του δικτύου μεταφοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, μια ενιαία υποδομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εποπτεία τόσο των υπηρεσιών για τους χρήστες όσο και των λειτουργικών δικτύων, με αποτέλεσμα την ενισχυμένη συνεργασία, τη βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων και συγκεκριμένα οφέλη όσον αφορά την αποδοτικότητα κόστους, την επεκτασιμότητα, τη βιωσιμότητα και τον εξορθολογισμό της διαχείρισης.

Η έννοια του ευέλικτου διαχωρισμού της επεξεργασίας διαφέρει από το συμβατικό καταναμημένο RAN, όπου όλη η επεξεργασία πραγματοποιείται τοπικά στο σημείο πρόσβασης (AP), στο πλήρως συγκεντρωτικό C-RAN, όπου όλη η επεξεργασία διεκπεραιώνεται από μια κεντρική μονάδα (CU). Ο βέλτιστος διαχωρισμός μπορεί να καθοριστεί με τη διεξαγωγή ενδεδειγμένης ανάλυσης, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου μεταφοράς, την τοπολογία και το μέγεθος του δικτύου, καθώς και τον ειδικό τύπο και όγκο των υπηρεσιών που πρέπει να φιλοξενηθούν. Η ευελιξία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση προγραμματιζόμενου ψηφιακού υλικού που μπορεί να υποστηρίξει την προσαρμοστική αναδιαμόρφωση των λειτουργιών που επιταχύνονται από το υλικό (HWA) και του λογισμικού βασικής ζώνης. Αυτό επιτρέπει τη διαίρεση διαφόρων επιπέδων για την εκπλήρωση διαφορετικών βασικών δεικτών απόδοσης (KPI). Είναι ζωτικής σημασίας η προσεκτική αξιολόγηση των καταλληλότερων επιλογών σύμφωνα με τους επιθυμητούς βασικούς δείκτες επιδόσεων (KPI), όπως τονίζεται στην έρευνα που διεξήγαγαν οι Zafeiropoulos και συν. (2019).

Για την αποτελεσματική διαχείριση και λειτουργία περίπλοκων και ποικίλων υποδομών, είναι ζωτικής σημασίας να διαθέτει κανείς υψηλό βαθμό ευελιξίας, ευκινησίας και προσαρμοστικότητας στις πολύπλευρες λειτουργίες που μπορεί να εκπληρώσει ένα δίκτυο. Ως εκ τούτου, έννοιες όπως η μηχανική λογισμικού δικτύων παρουσιάζουν μια ελπιδοφόρα πορεία προόδου. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, το όραμα

5G συνεπάγεται την ενσωμάτωση και τη συγχώνευση συγκεκριμένων τεχνικών στρατηγικών που υποστηρίζουν αυτό το παράδειγμα, όπως το SDN και το NFV. Στο SDN, το επίπεδο ελέγχου αποσυνδέεται από το επίπεδο δεδομένων και εποπτεύεται από έναν κεντρικά τοποθετημένο ελεγκτή που διαθέτει εκτεταμένη γνώση του δικτύου (Caraguay & Villalba, 2017).

Επιπλέον, μέσω της χρήσης τεχνικών εικονικοποίησης λογισμικού, το NFV δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης λειτουργιών δικτύου βασισμένων σε λογισμικό σε ευέλικτους διακομιστές, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση λειτουργιών HWA στο δίκτυο. Μέσω συνεργατικών προσπαθειών στις εξελίξεις των SDN και NFV, μαζί με την εφαρμογή διαφόρων λειτουργιών διαχείρισης και επιπέδου ελέγχου, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη. Τα οφέλη συνδέονται με την ευέλικτη, δυναμική και αποτελεσματική χρήση των πόρων της υποδομής, τη βελτιστοποίηση και την εποπτεία για αυξημένη επεκτασιμότητα, τη βιωσιμότητα και την παροχή πλήρως συντονισμένων υπηρεσιών. Μέσω της αξιοποίησης τεχνολογικών λύσεων αιχμής, μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά η υποστήριξη λειτουργικών και επιχειρηματικών μοντέλων, όπως το multi-tenancy, με την εφαρμογή τμηματοποίησης και εικονικοποίησης του δικτύου (Alcaraz et al., 2017).

2.5. Επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής 5G

Η αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες (SBA) είναι μια αρθρωτή αρχιτεκτονική που δίνει μεγάλη έμφαση στη χρήση υπηρεσιών για την εκπλήρωση συγκεκριμένων λειτουργιών. Μέσω της αξιοποίησης αυτών των υπηρεσιών και της ολοκλήρωσής τους, καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη πιο περίπλοκων και εξελιγμένων υπηρεσιών. Το κεντρικό σύστημα 5G ακολουθεί πλέον μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες, σύμφωνα με την υιοθέτηση από το 3GPP. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με το 4G, όπου η έλλειψη αρθρωτότητας φαινόταν ξεκάθαρα στα δικτυακά στοιχεία του κεντρικού δικτύου. Η SBA επιτρέπει την εφαρμογή της εικονικοποίησης, παρέχοντας αυξημένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στο δίκτυο πυρήνα (Brown, 2017).

Οι προγραμματιστές διασπούν ολοένα και περισσότερο τις εφαρμογές σε μικρότερα στοιχεία για να βελτιώσουν την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και τον δυναμισμό τους. Αυτά τα συστατικά έχουν τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε

διάφορες εφαρμογές και μπορούν να αναπτυχθούν, να δοκιμαστούν και να αναπτυχθούν αυτόνομα. Αυτές οι ενότητες είναι κοινώς γνωστές ως μικροπηρεσίες στους ακαδημαϊκούς κύκλους. Οι μικροπηρεσίες ενσωματώνουν ένα διαδομένο πρότυπο αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, γνωστό για τις εξαιρετικά συνεκτικές, χαλαρά συνδεδεμένες και μη εύθραυστες υπηρεσίες του. Κάθε μία από αυτές τις υπηρεσίες εκπληρώνει έναν ξεχωριστό σκοπό και λειτουργεί αυτόνομα. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπηρεσιών υλοποιούνται με τη χρήση τυποποιημένων ελαφρών διεπαφών, όπως οι αρχές REST, και άλλων παρόμοιων προσεγγίσεων. Η ιδέα αυτή, η οποία πρωτοεμφανίστηκε στη βιομηχανία λογισμικού, έχει εφαρμοστεί στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Σε αυτόν τον τομέα, τα στοιχεία του δικτύου αναλύονται στα επιμέρους στοιχεία τους, επιτρέποντας σε κάθε λειτουργία του δικτύου να εγγράφεται, να ανακαλύπτει και να χρησιμοποιεί ανεξάρτητα τις υπηρεσίες που παρέχονται από άλλες λειτουργίες. Οι λειτουργίες δικτύου και οι διεπαφές είναι προσεκτικά σχεδιασμένες ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές σε άλλα στοιχεία. Αυτό διασφαλίζει ότι η προσθήκη νέων λειτουργιών δικτύου ή η αναβάθμιση των υφιστάμενων λειτουργιών έχει ελάχιστες έως μηδαμινές επιπτώσεις στο συνολικό δίκτυο. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη και συνεχή ενημέρωση, αναβάθμιση και εισαγωγή νέων υπηρεσιών. Η προσέγγιση αυτή ακολουθεί την αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες. Ο σχεδιασμός του επιπέδου ελέγχου (CP) του 5GC έχει τις ρίζες του στις υπηρεσίες που παρέχονται από τις λειτουργίες δικτύου (NF) μέσω της χρήσης καινοτόμων διεπαφών βασισμένων σε υπηρεσίες (SBI) (Wang et al., 2022). Μόλις μια λειτουργία 5GC καταχωρίσει τις υπηρεσίες της με τις νέες λειτουργίες δικτύου κορμού 5G (NRF), εκθέτει βολικά τις υπηρεσίες που μπορούν να καταναλωθούν από οποιονδήποτε εξουσιοδοτημένο καταναλωτή, εξαλείφοντας την ανάγκη ορισμού μιας νέας διεπαφής σημείου-προς-σημείο και διαδικασιών μεταξύ των δύο λειτουργιών δικτύου, όπως απαιτείται από ένα EPC (GSA, 2019). Αυτό παρέχει στους φορείς εκμετάλλευσης αυξημένη ευελιξία και βελτιωμένη αποδοτικότητα, διαχωρίζοντας τον καταναλωτή υπηρεσιών από τον παραγωγό υπηρεσιών. Η αρχιτεκτονική με βάση τις υπηρεσίες παρέχει μια σειρά πλεονεκτημάτων στο πλαίσιο του 5G (Engin Zeydan et al., 2022):

- Η αυξημένη ευαισθησία επιτρέπει την απρόσκοπτη αναβάθμιση μεμονωμένων υπηρεσιών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις διαταραχές σε άλλες υπηρεσίες.

- Η ενεργοποίηση της συνεχούς ολοκλήρωσης μειώνει σημαντικά το χρόνο που απαιτείται για την εισαγωγή στην αγορά διορθώσεων σφαλμάτων και νέων λειτουργιών δικτύου και εφαρμογών φορέα εκμετάλλευσης.
- Οι αποδοτικές διεπαφές με βάση τις υπηρεσίες είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών.
- Το δίκτυο αποτελείται από αρθρωτές υπηρεσίες που αναδεικνύουν τις δυνατότητες του δικτύου και προσφέρουν βοήθεια για βασικά χαρακτηριστικά του 5G, όπως ο διαχωρισμός του δικτύου.
- Μια υπηρεσία μπορεί εύκολα να κληθεί από άλλες υπηρεσίες (με την κατάλληλη εξουσιοδότηση), επιτρέποντας τη μέγιστη επαναχρησιμοποίηση κάθε υπηρεσίας.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από διάφορες λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου, όπως η πιστοποίηση ταυτότητας, η εξουσιοδότηση και η λογιστική, οι πληροφορίες σχετικά με ένα δίκτυο 5G έχουν τη δυνατότητα να είναι εύκολα προσβάσιμες σε εξωτερικούς χρήστες, συμπεριλαμβανομένων τρίτων, μέσω μιας ειδικής υπηρεσίας χωρίς την ανάγκη περίπλοκης μετατροπής πρωτοκόλλου (Engin Zeydan et al., 2022).

2.6. Στρατηγικές Cloud

Από επιστημονικής άποψης, υπάρχουν τρεις πιθανές προσεγγίσεις για την υλοποίηση της NF: είτε ως ένα στοιχείο δικτύου σε εξειδικευμένο υλικό, είτε ως μια περίπτωση λογισμικού που λειτουργεί σε ειδικό υλικό, είτε ως μια εικονικοποιημένη/νεφελώδης λειτουργία που αναπτύσσεται σε μια κατάλληλη πλατφόρμα, όπως μια υποδομή νέφους. Μέσω της χρήσης τεχνολογιών λογισμικού νέφους, η αρχιτεκτονική NF του 3GPP επιτυγχάνει αυξημένη ευελιξία, προγραμματισιμότητα, αυτοματοποίηση και σημαντική μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας. Δεδομένης της πορείας του 3GPP, αναμένεται ότι οι λειτουργίες του κεντρικού δικτύου 5G θα μεταβούν σε εφαρμογές που βασίζονται στο νέφος και στην εικονικοποίηση. Η πλατφόρμα πυρήνα 5G θα προσφέρει ενισχυμένη προγραμματισιμότητα, επιτρέποντας την απρόσκοπτη δημιουργία, διαμόρφωση,

σύνδεση και ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος λειτουργιών στην απαραίτητη κλίμακα. Οι φορείς εκμετάλλευσης πρέπει να διαχειριστούν αποτελεσματικά την αυξημένη πολυπλοκότητα του δικτύου και της κινητής κυκλοφορίας, προκειμένου να παρέχουν το πλήθος των νέων περιπτώσεων χρήσης και υπηρεσιών που υπόσχεται το 5G, αποκομίζοντας έτσι τα εμπορικά οφέλη (GSA, 2019).

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η δημιουργία μιας ισχυρής υποδομής δικτύου που επιτρέπει την απρόσκοπτη ανάπτυξη, την αποτελεσματική διαχείριση και την αβίαστη διαμόρφωση νέων υπηρεσιών. Αυτή η απαίτηση αναγκάζει τις εταιρείες να αναπτύξουν λειτουργίες που είναι ειδικά σχεδιασμένες για περιβάλλοντα νέφους. Ο όρος "Cloud-Native" αναφέρεται σε μια προσέγγιση σχεδιασμού, ανάπτυξης και ανάπτυξης που ενισχύει την ευελιξία και την επεκτασιμότητα του συστήματος για εφαρμογές και εικονικές λειτουργίες. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει ένα σημαντικό επίπεδο αυτοματοποίησης. Η στρατηγική Cloud-Native επικεντρώνεται στον μετριασμό των τεχνικών κινδύνων. Στο παρελθόν, η τυπική μας στρατηγική για τον μετριασμό των κινδύνων ήταν να προχωρούμε με προσοχή και σχολαστικότητα. Η προσέγγιση Cloud-Native δίνει έμφαση στη σημασία της διατήρησης ενός γρήγορου ρυθμού με παράλληλη εφαρμογή προσεκτικών, σταδιακών και χαμηλού κινδύνου μέτρων (GSM, 2018).

Σύμφωνα με το Cloud Native Computing Foundation, οι cloud-native εφαρμογές χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι είναι containerized, διαχειρίζονται δυναμικά από έναν κεντρικό ενορχηστρωτή και σχεδιάζονται με μια προσέγγιση μικροπηρεσιών. Οι τεχνολογίες εμπορευματοκιβωτίων, όπως το Docker, το Kubernetes, το Mesosphere και άλλες, είναι κατάλληλες για cloud-native εφαρμογές λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν μια ελαφριά ατομική υπολογιστική μονάδα.

- Η δυνατότητα συλλογής, διατήρησης και προβολής αρχείων καταγραφής, μετρήσεων, ιχνών και άλλων σημείων δεδομένων είναι απαραίτητη για την ομαλή παρακολούθηση και λειτουργία.
- Η ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας όσον αφορά την αποθήκευση και την παροχή, καθώς και τη διαχείριση ταυτοτήτων, πιστοποιητικών και κλειδιών.
- Προκειμένου να υλοποιηθεί αποτελεσματικά η επιχειρησιακή λογική με τη χρήση stateless microservices, οι εγγενείς εφαρμογές Cloud συχνά απαιτούν τη συνδρομή υπηρεσιών υποστήριξης κρατήσεων για την ασφαλή αποθήκευση των δεδομένων

τους. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα έργα ανοικτού κώδικα για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων, όπως διάφορες τεχνολογίες βάσεων δεδομένων (GSM, 2018).

Η επίτευξη του στόχου της επαναχρησιμοποίησης λογισμικού μεγάλης κλίμακας και η αξιοποίηση έργων ανοικτού κώδικα έχει γίνει πολύ πιο εφικτή με την έλευση του παραδείγματος του εγγενούς νέφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τεχνολογία εμπορευματοκιβωτίων απομονώνει αποτελεσματικά τις διάφορες υπηρεσίες μεταξύ τους σε σημαντικό βαθμό. Οι εφαρμογές που δημιουργούνται και αναπτύσσονται με τη χρήση του παραδείγματος του εγγενούς νέφους μοιράζονται ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, τα οποία περιγράφονται παρακάτω (GSA, 2021):

- Είναι βασισμένη σε μικροπηρεσίες:

Κάθε εφαρμογή αποτελείται από μια σειρά μικρών υπηρεσιών που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα. Οι μικροπηρεσίες συνήθως υπάγονται στην αρμοδιότητα μεμονωμένων ομάδων ανάπτυξης, οι οποίες έχουν την αυτονομία να διαχειρίζονται τα δικά τους χρονοδιαγράμματα για την ανάπτυξη, την κλιμάκωση και την αναβάθμιση των υπηρεσιών (GSA, 2021).

- Με βάση τα εμπορευματοκιβώτια:

Οι cloud-native εφαρμογές συσκευάζονται σε κοντέινερ για τη δημιουργία απομονωμένων περιβαλλόντων για μικροπηρεσίες. Τα εμπορευματοκιβώτια διαθέτουν έναν αξιοσημείωτο συνδυασμό οικονομικής αποδοτικότητας, επεκτασιμότητας και φορητότητας, επιτρέποντας την ταχεία ανάπτυξη και αποσυναρμολόγηση σε διάφορα περιβάλλοντα. Αυτό το επίπεδο ευελιξίας τα καθιστά εξαιρετικά κατάλληλα για την ανάπτυξη και τη διαχείριση εφαρμογών που αποτελούνται από μικροπηρεσίες (GSA, 2021).

- Βασίζονται σε ένα μοντέλο συνεχούς παράδοσης:

Οι εγγενείς εφαρμογές στο νέφος αναπτύσσονται και εκτελούνται με τη χρήση ενός μοντέλου συνεχούς παράδοσης που διευκολύνει τους γρήγορους κύκλους κατασκευής, δοκιμής, ανάπτυξης, απελευθέρωσης και διάθεσης. Αυτό προωθεί τη συνεργασία μεταξύ των προγραμματιστών υπηρεσιών λογισμικού και των ομάδων

λειτουργίας υποδομών πληροφορικής για την αποτελεσματική δημιουργία, δοκιμή και απελευθέρωση ενημερώσεων λογισμικού χωρίς να προκαλούνται διακοπές για τους τελικούς χρήστες ή τους προγραμματιστές άλλων ομάδων. Ακολουθούνται οι αρχές DevOps, διασφαλίζοντας ότι υπάρχει συνεχής κατασκευή, δοκιμή και απελευθέρωση των υπηρεσιών. Οι cloud-native εφαρμογές διαχειρίζονται δυναμικά και συνήθως αναπτύσσονται και λειτουργούν σε σύγχρονες πλατφόρμες όπως το Kubernetes. Η ενσωμάτωση αυτής της αρχής στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών παρέχει παράλληλη ταχύτητα, προσαρμοστικότητα και ανθεκτικότητα στη διαδικασία ανάπτυξης και διαχείρισης υπηρεσιών. Βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα των προγραμματιστών και εξορθολογίζει τις λειτουργίες. Αυτό διευκολύνει την προώθηση νέων λειτουργιών. Τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών και των υπηρεσιών μπορούν να αναπτυχθούν απρόσκοπτα για χρήση από τους πελάτες κατά βούληση, χωρίς να υπάρχει ανησυχία για τις εργασίες άλλων ομάδων και χωρίς να επηρεάζεται η εμπειρία του τελικού χρήστη (GSA, 2021).

2.7. Τεμαχισμός δικτύου

Ο τεμαχισμός δικτύου συνεπάγεται τη δημιουργία προσαρμοσμένων δικτύων που είναι λογικά διαχωρισμένα και αποτελούνται από στοιχεία δικτύου προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένους σκοπούς. Η δημιουργία διαφόρων τεμαχίων μπορεί να εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς. Ένα τμήμα δικτύου είναι ένα δυναμικό και από άκρη σε άκρη λογικό δίκτυο που μπορεί να δημιουργηθεί, θυμίζοντας το έργο ενός ακαδημαϊκού. Ένας εξοπλισμός χρήστη (UE) μπορεί να δημιουργήσει συνδέσεις με πολλαπλά τμήματα μέσω ενός κοινού δικτύου πρόσβασης, όπως μια κοινή ραδιοδιεπαφή. Κάθε τμήμα διαθέτει τη δυνατότητα να προσφέρει μια εξειδικευμένη υπηρεσία, μαζί με μια αμοιβαία συμφωνημένη συμφωνία επιπέδου υπηρεσιών (SLA). Η αποτελεσματική εξυπηρέτηση διαφορετικών τύπων κίνησης είναι μια αξιοσημείωτη πτυχή από ακαδημαϊκή άποψη. Αυτό το συγκεκριμένο τμήμα είναι σχολαστικά σχεδιασμένο για να χειρίζεται τις απαιτήσεις της ενισχυμένης κινητής ευρυζωνικής κίνησης (eMBB), εξασφαλίζοντας εξαιρετικές επιδόσεις για κάθε χρήστη. Στη σφαίρα του μαζικού IoT (mIoT), υπάρχει ένα συγκεκριμένο τμήμα που εξυπηρετεί σημαντικό αριθμό συνδρομητών. Αυτοί οι συνδρομητές στέλνουν σποραδικά μικρές ποσότητες

δεδομένων, αλλά παράγουν σημαντικό όγκο κίνησης σηματοδοσίας ως αποτέλεσμα της μετάβασης από μια κατάσταση αδράνειας σε μια ενεργή κατάσταση (Zhou et al., 2016).

Μπορούν να δημιουργηθούν τμήματα για συνδρομητές διαφόρων φορέων εκμετάλλευσης, συμπεριλαμβανομένων των φορέων εκμετάλλευσης εικονικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας (MVNO) που είναι συνδεδεμένοι με τον πάροχο. Με παρόμοιο τρόπο, υπάρχουν δύο διακριτά τμήματα δικτύου, συγκεκριμένα το slice#2 και το slice #3, όπου οι πόροι δικτύου έχουν διαμορφωθεί σχολαστικά για να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Τόσο το slice #2 όσο και το slice #3 χρησιμοποιούν AMF για τις λειτουργίες τους, με τη διαχείριση συνόδου να γίνεται ξεχωριστά (Savic & Larsson, 2015).

Επιπλέον, υπάρχουν διαφορές στη λειτουργικότητα που είναι διαθέσιμη στον χρήστη σε κάθε slice. Το UE2 είναι εξοπλισμένο με πρόσβαση στο διαδίκτυο και ένα αποκλειστικό τμήμα δικτύου #1, το οποίο έχει διαμορφωθεί σχολαστικά ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη υποστήριξη της υπηρεσίας. Το Network Slicing, όπως περιγράφεται στο 3GPP TS 23.501, περιλαμβάνει τα διάφορα στοιχεία ενός δημόσιου δικτύου κινητής τηλεφωνίας (PLMN), όπως οι λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου του δικτύου και του επιπέδου χρήστη του δικτύου βάσης και του δικτύου επιπέδου χρήστη, μαζί με το δίκτυο πρόσβασης 5G (AN). Αν και η έννοια του slicing είναι μια σχετικά πρόσφατη εξέλιξη που συνδέεται με την άνοδο των δικτύων 5G, ανάλογες λειτουργίες υπήρχαν και εξελίχθηκαν από το EPS στο 5GS (5G System) (Savic & Larsson, 2015).

Το network slicing ενσωματώθηκε αρχικά στο 4G ως συστατικό στοιχείο της έκδοσης 3GPP. Στο EPS, η έκδοση 13 του 3GPP εισήγαγε ένα νέο χαρακτηριστικό που ονομάζεται "Decor" για τη διευκόλυνση των δικτύων Dedicated Core Networks (DCN). Η επιλογή της MME επηρεαζόταν από τη συνδρομή UE, συγκεκριμένα από μια παράμετρο γνωστή ως "UE Usage Type" στη συνδρομή. Στην έκδοση 14 του 3GPP, έγινε μια αξιοσημείωτη βελτίωση στα DCN, επιτρέποντας στο UE να διατηρεί βολικά το επιλεγμένο DCN ID και να το μοιράζεται με το RAN και το δίκτυο πυρήνα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συσχέτισης. Αυτό βελτιώνει τη βασική διαδικασία επιλογής δικτύου για το UE. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το μειονέκτημα της στήριξης στην υποστήριξη από το UE (GSA, 2019).

Οι περιορισμοί που συζητήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο επιλύονται αποτελεσματικά μέσω της εφαρμογής του slicing στο σύστημα 5G (5GS). Η τεμαχισμός του δικτύου αποτελεί βασική απαίτηση τόσο για τον εξοπλισμό των χρηστών όσο και για τα δίκτυα που υποστηρίζονται από το σύστημα 5G. Στο επίπεδο χρήστη, μια λειτουργία διαχείρισης συνόδου (SMF) και μια λειτουργία επιπέδου χρήστη (UPF) εξυπηρετούν κάθε σύνδεση δεδομένων εξοπλισμού χρήστη (UE) εντός της εκχωρημένης φέτας. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι ένα UE έχει τη δυνατότητα να εγκαθιστά συνδέσεις δεδομένων σε πολλαπλές φέτες. Παρ' όλα αυτά, μία μόνο AMF ορίζεται για την εγκαθίδρυση της σύνδεσης NAS του UE, επιτρέποντας την ανταλλαγή μηνυμάτων διαχείρισης συνόδου με SMFs σε διάφορα τμήματα. Σύμφωνα με το 3GPP TS 23.501, οι παρεχόμενοι ορισμοί των Network Mode, Slice και Slice Instance είναι οι ακόλουθοι (Savic & Larsson, 2015):

- Μια λειτουργία δικτύου αναφέρεται σε μια λειτουργία επεξεργασίας που είτε έχει εγκριθεί είτε έχει οριστεί από το 3GPP σε ένα δίκτυο. Αυτές οι λειτουργίες έχουν σαφώς καθορισμένη συμπεριφορά και διεπαφές όπως καθορίζονται από το 3GPP.
- Η τμηματοποίηση δικτύου είναι ένα λογικό δίκτυο που προσφέρει διακριτές δυνατότητες και χαρακτηριστικά δικτύου.
- Ένα στιγμιότυπο τεμαχισμού δικτύου αναφέρεται σε μια συλλογή από περιπτώσεις λειτουργίας δικτύου και τους απαραίτητους πόρους, όπως υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς πόρους, που αποτελούν ένα αναπτυγμένο τμήμα δικτύου.

Ένα τμήμα δικτύου προσδιορίζεται από τις πληροφορίες υποστήριξης ενιαίας επιλογής δικτύου (Single Network Selection Support Assistance Information - S-NSSAI), σύμφωνα με τις ακαδημαϊκές συμβάσεις. Το NSSAI, το οποίο αποτελείται από το πολύ οκτώ S-NSSAI, επιτρέπει σε ένα μεμονωμένο UE να εξυπηρετείται από έως και οκτώ φέτες δικτύου ταυτόχρονα. Το S-NSSAI που υποδεικνύεται από το UE στο δίκτυο επιτρέπει στο δίκτυο να εισέλθει επιλέγοντας μια συγκεκριμένη περίπτωση Network Slice. Ένας S-NSSAI αποτελείται από (GSA, 2021):

- Το Slice/Service Type (SST) αφορά την αναμενόμενη συμπεριφορά του Network Slice όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις υπηρεσίες του.
- Ένα Slice Differentiator (SD) είναι μια πρόσθετη πληροφορία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ πολλαπλών Network Slices του ίδιου

τύπου. Χρησιμεύει ως συμπλήρωμα των τύπων Slice/Service, παρέχοντας έναν τρόπο διαφοροποίησης μεταξύ τους.

Το S-NSSAI μπορεί να συνδέεται με ένα PLMN, όπως ένα PLMN ID, και μπορεί να διαθέτει ειδικές για το δίκτυο ή τυποποιημένες τιμές. Η τυποποίηση των τιμών SST στο 3GPP TS 23.501 εξασφαλίζει παγκόσμια διαλειτουργικότητα για το slicing ενσωματώνοντας τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους τύπους Slice/Service.

Αυτά είναι τα βασικά σημεία της δυνατότητας τεμαχισμού δικτύου στο 5GS, όπως περιγράφονται από τους Wijethilaka και Liyanage (2021):

- Το UE μπορεί να λάβει πολιτικές για την τμηματοποίηση εφαρμογών και τη συσχέτιση APN είτε κατά την εγγραφή είτε μέσω διαμόρφωσης. Όταν το αίτημα εγγραφής λαμβάνεται από το AMF, ανακτά τις φέτες που επιτρέπονται από τη συνδρομή του χρήστη. Στη συνέχεια, αλληλεπιδρά με τη λειτουργία επιλογής φέτες δικτύου (Network Slicing Selection Function - NSSF) για να επιλέξει την κατάλληλη περίπτωση φέτες δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το Allowed S-NSSAI, το PLMN ID και άλλα. Αυτό μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε τροποποίηση της AMF, εάν κριθεί απαραίτητο. Αυτές οι πολιτικές μπορούν να αναθεωρηθούν σε μεταγενέστερο χρόνο με τη χρήση διαδικασιών που έχουν θεσπιστεί από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών. Όλος ο εξοπλισμός χρήστη 5GS (UE) είναι ικανός να υποστηρίζει αυτές τις διαδικασίες. Διαδικασίες για EPS ή GPRS δεν είναι διαθέσιμες και βασίζονται σε διαδικασίες Open Mobile Alliance Device Management (OMA DM), οι οποίες ενδέχεται να μην υποστηρίζονται από όλα τα UE ή τα δίκτυα.
- Εντός του δικτύου, ο φορέας εκμετάλλευσης έχει τη δυνατότητα να συγκεντρώσει τις πολιτικές για την επιλογή τμήματος δικτύου χρησιμοποιώντας μια λειτουργία γνωστή ως Network Segmentation Selection Function (NSSF), ή μπορεί να επιλέξει να διαμορφώσει αυτές τις πολιτικές ξεχωριστά σε κάθε AMF. Με την ενοποίηση των πολιτικών δικτύου για την επιλογή τμήματος στη λειτουργία NSSF, ενισχύεται η λειτουργικότητα του δικτύου.
- Ο προσδιορισμός και η διερεύνηση των λειτουργιών δικτύου, όπως οι SMF, UPF και PCF, πραγματοποιούνται μέσω της χρήσης μιας εξειδικευμένης λειτουργίας που είναι γνωστή ως λειτουργία αποθήκης λειτουργιών δικτύου (NF) (NRF). Τα συγκεκριμένα βήματα και οι διαδικασίες που εμπλέκονται σε αυτή τη λειτουργία

περιγράφονται στο 3GPP TS 23.502. Η κατανομή της NRF μπορεί να ποικίλλει, είτε να είναι συγκεκριμένη για κάθε κομμάτι είτε να χωρίζεται σε φέτες. Η παρουσία ειδικής για κάθε τμήμα NRF επιτρέπει τον σαφή διαχωρισμό μεταξύ των τμημάτων, εξασφαλίζοντας ότι η διαμόρφωση του δικτύου ενός τμήματος παραμένει εντελώς ανεξάρτητη και κρυφή από τα άλλα τμήματα.

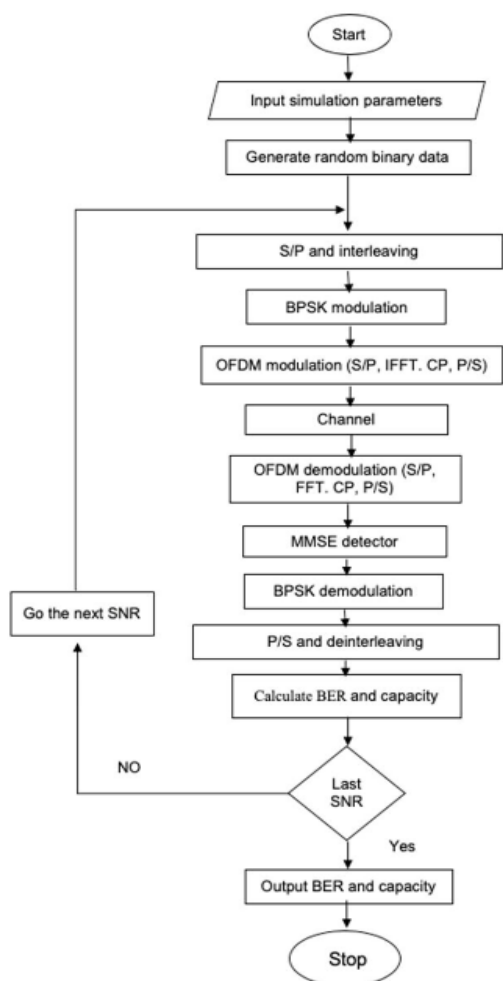
Στη σφαίρα του 5GS, υπάρχει ένα χαρακτηριστικό που είναι γνωστό ως RAN slicing. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την κατανομή των αναγνωριστικών τμημάτων συνόδου PDU στο RAN. Με τη βοήθεια αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης ραδιοπόρων, το RAN μπορεί στη συνέχεια να κατανέμει τους ραδιοπόρους ανοδικής και καθοδικής ζεύξης μεταξύ αυτών των τμημάτων, και όλα αυτά σύμφωνα με τη διαμόρφωση του φορέα εκμετάλλευσης (Wijethilaka & Liyanage, 2021).

2.8. Ανάλυση κυριάρχων τεχνολογιών

➤ Μαζική MIMO

Τα συστήματα μαζικής MIMO χρησιμοποιούν πολλαπλά στοιχεία κεραίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, όπως συνηθίζεται στην ακαδημαϊκή έρευνα. Πολλά σύγχρονα συστήματα MIMO χρησιμοποιούν συνήθως δύο έως τέσσερις κεραίες. Ο στόχος των συστημάτων μαζικής MIMO είναι να αξιοποιήσουν τις πιθανές βελτιώσεις χωρητικότητας που προκύπτουν από τη χρήση μεγαλύτερων συστοιχιών κεραίων. Στο SU-MIMO, ο αριθμός των κεραίων σε μια φορητή συσκευή χρήστη είναι περιορισμένος. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η έκδοση MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO), είναι απαραίτητο οι σταθμοί βάσης να είναι σε θέση να επικοινωνούν με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Από την αρχή της ανάπτυξης του LTE, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας MIMO έπαιξε καθοριστικό ρόλο, με τις φορητές συσκευές να ενσωματώνουν συνήθως δύο έως τέσσερις κεραίες, ενώ οι σταθμοί βάσης διαθέτουν οκτώ κεραίες. Για να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις απαιτήσεις των χρηστών τους, τα συστήματα δικτύων πέμπτης γενιάς έπρεπε να ωθήσουν την τεχνολογία MIMO σε νέα ύψη. Ήταν επιτακτική ανάγκη να διερευνηθεί μια παραλλαγή του πλαισίου όπου κάθε σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με σημαντικό αριθμό κεραίων, που ξεπερνά κατά πολύ τον αριθμό των ενεργών χρηστών. Αυτό θα οδηγούσε σε εκατοντάδες κεραίες ανά σταθμό βάσης. Αυτό είχε ως

αποτέλεσμα την υιοθέτηση συστημάτων κεραιών ευρείας περιοχής, τα οποία σήμερα αναφέρονται συνήθως ως μαζική MIMO (Alsharif & Nordin, 2016).



Εικόνα 7 Διάγραμμα ροής Massive MIMO.

➤ mmWave

Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων, συγκεκριμένα στην περιοχή από μερικές εκατοντάδες MHz έως μερικά GHz, αντιμετωπίζουν παραδοσιακά περιορισμούς λόγω του ότι η λειτουργία τους περιορίζεται σε μήκη κύματος που εκτείνονται από μερικά εκατοστά έως περίπου ένα μέτρο. Επί του παρόντος, το φάσμα συχνοτήτων που είναι γνωστό ως "φάσμα της παράκτιας ζώνης" χρησιμοποιείται εκτενώς, ιδίως σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Η αυξανόμενη ανάγκη για χωρητικότητα δικτύου δημιουργεί ένα αξιοσημείωτο παράδοξο, καθώς η αύξηση της μετάδοσης δεδομένων μέσω κινητής τηλεφωνίας επιδεινώνει την περιορισμένη διαθεσιμότητα του φάσματος. Η έλλειψη πόρων

καθίσταται σημαντικό εμπόδιο για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), δεδομένης της αυξανόμενης ζήτησης για μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Με την εφαρμογή νέων ρυθμιστικών διαδικασιών, υπάρχει μια πολύτιμη ευκαιρία να ενισχυθεί η αξιοποίηση του εύρους ζώνης στην παραλία. Σύμφωνα με την έρευνα που διεξήχθη από τους Mezzavilla και συν. (2018), διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη στρατηγική περιλαμβάνει την ενσωμάτωση συμπληρωματικών ζωνών φάσματος στο τρέχον εύρος ζώνης.

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Massive MIMO και της ζώνης συχνοτήτων που κυμαίνεται από 30 GHz έως 300 GHz, γνωστή ως millimetre wave (mmWave), έχει καταστεί κρίσιμο στοιχείο στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Αυτό το τεχνολογικό επίτευγμα διευκολύνει την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας πολλαπλών gigabit για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και βίντεο υπερ-υψηλής ευκρίνειας (UHDV). Η κύρια έμφαση δίνεται στη ζώνη λειτουργίας του προτύπου Wi-Fi WiGiG στα 60 GHz, μαζί με τη ζώνη των 28 GHz, τη ζώνη των 38 GHz και τη ζώνη E (71-76 GHz και 81-86 GHz). Η εκθετική πρόοδος της τεχνολογίας στα ολοκληρωμένα κυκλώματα συμπληρωματικού ημιαγωγού μετάλλων-οξειδίων-ημιαγωγών (CMOS) ραδιοσυχνοτήτων (RF) έχει ανοίξει νέες δυνατότητες για ηλεκτρονικά προϊόντα που λειτουργούν στη ζώνη mmWave (Yang et al., 2018).

2.9. Προβλήματα και προκλήσεις

➤ Τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις

Εκτός από τα οφέλη και τις προόδους που θα προσφέρουν τα επερχόμενα δίκτυα, είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωριστούν και να αντιμετωπιστούν διάφορα ζητήματα και εμπόδια. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις διακριτές κατηγορίες. Τα προβλήματα μπορεί να προκύψουν με διάφορες μορφές: τεχνικά, μη τεχνικά και σχετικά με τη συμβατότητα. Οι τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή των δικτύων πέμπτης γενιάς είναι οι εξής (Al-Falahy & Alani, 2017):

- Οι επικοινωνίες mmWave δημιουργούν προκλήσεις λόγω των εμποδίων του σήματος, όπως έπιπλα, τοίχοι, ακόμη και άνθρωποι, τα οποία μπορούν να εμποδίσουν τη μετάδοσή του. Επιπλέον, η κατασκευή των ολοκληρωμένων

κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων και των κεραιών επικοινωνίας που απαιτούνται για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας είναι ένα δύσκολο και αυστηρό έργο.

- Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών στις επικοινωνίες D2D (device-to-device) παρουσιάζει μια σημαντική πρόκληση: τον μετριασμό των παρεμβολών μεταξύ συσκευών και χρηστών κυψελών. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ρυθμίσεις, δεν υπάρχει ελεγκτής για την άμεση διαχείριση της επικοινωνίας, της παρεμβολής και της κατανομής πόρων. Επιπλέον, μια σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το θέμα της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας, δεδομένου ότι τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω μεσαζόντων.
- Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με την οπισθοδρόμηση στις κινητές επικοινωνίες, είναι απαραίτητο να δοθεί ένας ορισμός της οπισθοδρόμησης, έστω και συνοπτικά, καθώς θα αναλυθεί διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια. Η σύνδεση του σταθμού βάσης με το κεντρικό δίκτυο μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω οπτικών ινών είτε μέσω ασύρματων συνδέσεων σημείου προς σημείο. Η ανάπτυξη των συσκευών backhaul αποτελεί σημαντικό εμπόδιο, καθώς πρέπει να διαχειρίζονται αποτελεσματικά σημαντικές μεταφορές δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα ελάχιστη καθυστέρηση. Η δυσχέρεια αυτή προκύπτει κυρίως από την ανεπαρκή κάλυψη των δικτύων οπτικών ινών σε διάφορες περιοχές. Οι λύσεις που εξετάζονται είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν υφιστάμενα δίκτυα μεταφοράς όπως το Xρον, καθώς και τεχνολογίες αιχμής όπως το mmWave.
- Ασφάλεια: Το 5G χρησιμοποιεί τεχνολογίες αιχμής όπως η οπτικοποίηση, η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) και η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN). Στα δίκτυα 5G, οι πόροι μοιράζονται αντί να απομονώνονται μεταξύ τους, γεγονός που αποτελεί απόκλιση από τα παραδοσιακά δίκτυα. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να θεσπιστούν πρότυπα ασφαλείας για κάθε ξεχωριστή υπηρεσία που παρέχεται από το 5G, η κάθε μία με τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) απαιτεί χαμηλότερα πρότυπα ασφαλείας, ενώ η εφαρμογή εξαιρετικά αξιόπιστων κυψελοειδών δικτύων χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) για κρίσιμες εφαρμογές όπως οι απομακρυσμένες χειρουργικές διαδικασίες απαιτεί ισχυρά μέτρα ασφαλείας. Αυτό είναι ζωτικής

σημασίας για τη διασφάλιση της ιδιωτικής ζωής των ασθενών, η οποία περιλαμβάνει το χειρισμό ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων.

- Η εξέταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται από το δίκτυο 5G πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις επιδόσεων και χωρητικότητας.
- Η ωρίμανση του τεχνολογικού περιβάλλοντος είναι εμφανής στην ανάπτυξη διαφόρων καινοτόμων υπηρεσιών, όπως το URLLC. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι υπηρεσίες αυτές βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και απαιτούν περαιτέρω βήματα προτού μπορέσουν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες του 5G (Al-Falahy & Alani, 2017).

➤ Μη τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις

Τα μη τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των δικτύων πέμπτης γενιάς είναι τα εξής (Taheeribakhsh et al., 2020):

- Τα επιχειρηματικά μοντέλα βρίσκονται εδώ και καιρό στο επίκεντρο του κλάδου των τηλεπικοινωνιών, καθώς προσπαθούν να εξερευνήσουν νέους τομείς και ευκαιρίες για τη μεγιστοποίηση των κερδών τους. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας υποστηρίζουν ότι η εφαρμογή ενός νέου επιχειρηματικού μοντέλου είναι επιτακτική ανάγκη για την επίτευξη ικανοποιητικής απόδοσης των επενδύσεων σε υποδομές. Εάν διαταραχθεί η ευαίσθητη ισορροπία μεταξύ επενδύσεων και κέρδους, υπάρχει ο δυνητικός κίνδυνος αυτή η κατάσταση να εμποδίσει την πρόοδο της τεχνολογίας 5G. Επιπλέον, ένας επιτακτικός λόγος για την υιοθέτηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων έγκειται στη μετάβαση από την πελατοκεντρική σε μια πιο επιχειρηματοκεντρική προσέγγιση στα δίκτυα 5G. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη οι φορείς εκμετάλλευσης να είναι στενά συνδεδεμένοι με αυτό το αναδυόμενο παράδειγμα στην αγορά.
- Το Επενδυτικό κόστος. Για να διευκολυνθεί η ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής, όπως το SDN, το NFV και τα μικροκύτταρα, θα χρειαστεί να ανακατασκευαστεί η τρέχουσα υποδομή, συμπεριλαμβανομένων των κεραιών και του κεντρικού δικτύου. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός εκτεταμένου δικτύου σε αστικές περιοχές απαιτεί σημαντική κατανομή κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX)-

ωστόσο, ακόμη και σε αγροτικές περιοχές, αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, καθώς μπορεί να μην αποδώσει την αναμενόμενη απόδοση της επένδυσης. Επιπλέον, δεν πρέπει να αγνοείται η σημασία των λειτουργικών δαπανών (OPEX). Εν τέλει, η ανάπτυξη του backhaul απαιτεί επένδυση στην ανάπτυξη οπτικών ινών, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος. Είναι επιτακτική ανάγκη οι αρμόδιες αρχές να αναλύσουν διεξοδικά τις επενδύσεις για να διασφαλίσουν ότι το επιθυμητό αποτέλεσμα θα επιτευχθεί προς ικανοποίηση όλων των εμπλεκόμενων μερών.

- Ο τεχνολογικός αναλφαριθμητισμός μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις στην υιοθέτηση αναδυόμενων υπηρεσιών. Αυτό μπορεί να εκδηλωθεί με δυσκολίες στη χρήση των υπηρεσιών, ακόμη και με ψυχολογικά εμπόδια που εμποδίζουν τους χρήστες να αγκαλιάσουν τη νέα εποχή (Taheribakhsh et al., 2020).

➤ Ζητήματα διαχείρισης

Παραμένει αβέβαιο αν η εισαγωγή της τεχνολογίας μικροκυττάρων θα ανοίξει πραγματικά νέες δυνατότητες για τους τοπικούς και εξειδικευμένους παρόχους στην επαρχία. Αυτό οφείλεται στην πιθανή απαίτηση για τους κατόχους αδειών να καταβάλλουν σημαντικό τέλος σε καθιερωμένους ανταγωνιστές, όπως για υπηρεσίες backhaul. Επιπλέον, υπάρχει η ανησυχία ότι εάν οι άδειες ραδιοφάσματος δημοπρατηθούν, μπορεί να εδραιωθεί περαιτέρω η κυριαρχία των μονοπωλίων. Αυτό το σενάριο θα είχε ως αποτέλεσμα αυξημένο κόστος υπηρεσιών για τους χρήστες της υπαίθρου.

Με την πρόοδο του δικτύου 5G, η επέκταση των κεραιών μικροκυψελών καθίσταται επιτακτική. Αυτές οι κεραιές πρέπει να παράγουν σημαντικό εύρος ζώνης για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση. Σε αντίθεση με το 3G ή το 4G, οι αρχικές κυψέλες του 5G δεν μπορούν να καλύψουν τόσο μεγάλο χώρο, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη μεγαλύτερου αριθμού κεραιών. Προκύπτει μια διαχειριστική ανησυχία σχετικά με την αρχική κατανομή του κατασκευαστικού φόρτου. Ως εκ τούτου, σε περιοχές όπου η κατασκευή αναβάλλεται, οι χρήστες του 5G θα πρέπει να αναμένουν ότι η κάλυψή τους μπορεί να είναι λιγότερο εκτεταμένη, τουλάχιστον στην αρχή (Malathy et al., 2021).

➤ Μειονεκτήματα

Παρά τα πολυάριθμα οφέλη που προσφέρει, η εφαρμογή της τεχνολογίας δικτύου 5G επιφέρει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα και πιθανούς κινδύνους. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα είναι η έλλειψη ασφάλειας και τεχνολογικών εξελίξεων σε πολλές γεωγραφικές περιοχές. Επιπλέον, υπάρχει η πρόκληση των ξεπερασμένων έξυπνων συσκευών που δεν υποστηρίζονται πλέον, μαζί με το σχετικό κόστος αντικατάστασής τους. Αυτό απαιτεί μια σημαντική οικονομική επένδυση. Σε αρκετές χώρες, διεξάγεται έρευνα σχετικά με τις επιπτώσεις της στασιμότητας των υψηλών ταχυτήτων στη μετάδοση ραδιοκυμάτων. Η επένδυση στην υποδομή και την ανάπτυξη του δικτύου 5G απαιτεί σημαντικούς οικονομικούς πόρους. Επιπλέον, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τις πτυχές της ασφάλειας και της ιδιωτικής ζωής αυτής της τεχνολογίας. Οι εξειδικευμένοι μηχανικοί είναι απαραίτητοι για την εγκατάσταση και τη συντήρηση της υποδομής. Η κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους εκτείνεται έως και 2 μέτρα, ενώ η εξωτερική κάλυψη φτάνει τα εντυπωσιακά 300 μέτρα, όπως αναφέρουν οι Arora και συν. στην έρευνά τους.

Κατά τις αρχικές δοκιμές, το δίκτυο 5G απαιτεί συχνότητες περίπου 6GHz για τη μετάδοση δεδομένων. Δυστυχώς, οι περιοχές ραδιοσυχνοτήτων είναι ήδη κατειλημμένες από άλλα σήματα, με αποτέλεσμα την εκτεταμένη κάλυψη από πύργους του δικτύου 3G με ελάχιστες κυψέλες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται σημαντικό εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, το 4G εμφανίστηκε ως μια σημαντική εξέλιξη στην καθημερινή μας ύπαρξη. Το δίκτυο αυτό, ενώ προσφέρει αυξημένο εύρος ζώνης, δυστυχώς παρουσίασε μείωση της κάλυψης. Με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, έχει καταστεί αναγκαία η κατασκευή πρόσθετων πύργων και η ανάπτυξη περισσότερων κυψελών προκειμένου να εξυπηρετηθούν αποτελεσματικά οι αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης (Arora et al., 2020).

3. Ασύρματη τεχνολογία 5G

Η ασύρματη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας εξελίσσεται ραγδαία, με ιδιαίτερη έμφαση σε δύο βασικές βιομηχανικές εφαρμογές: την ασύρματη τεχνολογία τέταρτης γενιάς και την ασύρματη τεχνολογία πέμπτης γενιάς. Το 5G αντιπροσωπεύει μια πρωτοποριακή ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία πέμπτης γενιάς που βασίζεται στο αξιολογικό πρότυπο IEEE 802.11ac. Το 5G αναμένεται να παρέχει σημαντικά βελτιωμένες ταχύτητες και κάλυψη σε σύγκριση με την τρέχουσα τεχνολογία 4G. Το 5G λειτουργεί σε σήμα 5GHz και έχει σχεδιαστεί για να παρέχει αξιοσημείωτες ταχύτητες έως και 1Gb/s για σημαντικό αριθμό συνδέσεων ή δεκάδες Mb/s για μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Το 4G συνδέεται συχνά με την τεχνολογία Long Term Evolution (LTE), η οποία αποτελεί εξέλιξη του υφιστάμενου ασύρματου προτύπου 3G. Αναμφίβολα, το LTE σηματοδοτεί μια αξιοσημείωτη εξέλιξη από το 3G, καθώς εξελίσσεται από μια συγχώνευση δικτύων δεδομένων και φωνής σε ένα εξειδικευμένο δίκτυο IP αποκλειστικά για δεδομένα. Το LTE είναι σε θέση να επιτύχει υψηλότερη απόδοση δεδομένων σε σύγκριση με τα προηγούμενα δίκτυα 3G χάρη σε δύο κρίσιμες τεχνολογίες: τεχνολογία MIMO και OFDM. Η OFDM είναι μια τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιεί ένα πλήθος φορέων που τοποθετούνται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, οι οποίοι στη συνέχεια διαμορφώνονται σε χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων (Liang, 2017). Αυτό το σχήμα επιτρέπει τη μετάδοση υψηλών ρυθμών δεδομένων και επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται αποτελεσματικά ένα κοινό κανάλι, με αποτέλεσμα εξαιρετική φασματική απόδοση. Η αξιοποίηση πολλαπλών κεραιών τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη, που συνήθως αναφέρεται ως τεχνική πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO), βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της μετάδοσης δεδομένων και τη φασματική απόδοση. Χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, το σύστημα αυτό χειρίζεται αποτελεσματικά πολλαπλές ροές δεδομένων σε ένα μόνο κανάλι (Wong et al., 2017).

➤ Διπλή συνδεσιμότητα LTE - NR

Το πρότυπο LTE ενσωματώνει αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας (FDD) και αμφίδρομη διαίρεση χρόνου (TDD) για να επιτρέπει την αμφίδρομη λειτουργία. Τα δίκτυα LTE μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, με τον κύριο

παράγοντα διαφοροποίησης για τους καταναλωτές να είναι η θεωρητική ταχύτητα σε ιδανικές συνθήκες. Η τεχνολογία LTE-Advanced χρησιμεύει ως κρίσιμος σύνδεσμος μεταξύ του υφιστάμενου δικτύου 4G και του επερχόμενου δικτύου 5G LTE Advanced. Το LTE-A αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της αρχικής τεχνολογίας LTE, με στόχο την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Το LTE-A προσφέρει σχεδόν τριπλάσια ταχύτητα σε σχέση με το τυπικό δίκτυο LTE και αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία (Yilmaz et al., 2019):

- Συγκέντρωση φορέων (Carrier Aggregation).
- MIMO.
- Σταθμός αναμετάδοσης.
- Ετερογενές δίκτυο ή HetNet.
- S-δίκτυο ή HetNet.

Η συνάθροιση φορέων ή συνάθροιση καναλιών είναι ένα σχήμα μετάδοσης που επιτρέπει το συνδυασμό έως και 20 καναλιών από διάφορα φάσματα σε μια ενιαία ροή δεδομένων. Για τη βελτίωση της γραμμής MIMO, το LTE-A χρησιμοποιεί διαμορφώσεις κεραιών 8x8 για την αύξηση του αριθμού των ραδιοροών με την τεχνική της διεύθυνσης δέσμης (Hajlaoui et al., 2020).

Η συνεργατική MIMO ή CoMP επιτρέπει στις κινητές συσκευές να μεταδίδουν και να λαμβάνουν αποτελεσματικά ραδιοσήματα σε πολλαπλές κυψέλες. Αυτή η τεχνολογία αιχμής μειώνει αποτελεσματικά τις παρεμβολές από κοντινές κυψέλες και βελτιστοποιεί την απόδοση στα όρια των κυψελών. Αυτός ο κυψελοειδής σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με την τεχνολογία LTE-A, επιτρέποντάς του να χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές επικοινωνίας. Κύριος σκοπός του είναι η βελτίωση της ποιότητας του σήματος και η αποτελεσματική αναμετάδοση των αδύναμων σημάτων, ιδίως στα όρια των κυψελών. Το πιο κρίσιμο στοιχείο του δικτύου είναι το HetNet, ένα εξελιγμένο πολυεπίπεδο σύστημα επικαλυπτόμενων μεγάλων και μικρών κυψελών που έχει σχεδιαστεί σχολαστικά για να παρέχει αποτελεσματικά άφθονο εύρος ζώνης. Το HetNet, μια εξελιγμένη εξέλιξη της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής, εισάγει ένα εξαιρετικά περίπλοκο δίκτυο με την ενσωμάτωση πολλαπλών σημείων πρόσβασης μέσω μικρών κυψελών, τα οποία μπορεί να κυμαίνονται από εκατοντάδες έως και χιλιάδες. Η έννοια του αυτοοργανωμένου δικτύου (SON) είναι μια κρίσιμη τεχνολογία που διερευνάται επί του παρόντος για τις εφαρμογές LTE-A. Είναι ζωτικής σημασίας να τονιστεί ότι το πρότυπο LTE-A χρησιμεύει ως γέφυρα που συνδέει τους

τομείς 4G και 5G. Με επιστημονικό τρόπο, η έννοια HetNet λειτουργεί ως γέφυρα που συνδέει τους τομείς LTE-A και 5G. Σύμφωνα με τους ειδικούς της βιομηχανίας ασύρματων δικτύων, το ασύρματο 5G θεωρείται ευρέως ως μια βελτιωμένη επανάληψη του LTE-A. Η έννοια αυτή είναι λογική, καθώς επιδιώκει να ανυψώσει την έννοια του δικτύου μικρών κυψελών σε ένα πιο προηγμένο επίπεδο, δημιουργώντας ένα πυκνοκατοικημένο δίκτυο όπου μικροσκοπικές κυψέλες αναπτύσσονται σε κάθε δωμάτιο (Hajlaoui et al., 2020).

Η τεχνολογία NGMN περιγράφει το 5G ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα που επιτρέπει μια κοινωνία πλήρως κινητή και διασυνδεδεμένη. Στοχεύει στη βελτιστοποίηση της δημιουργίας αξίας για τους πελάτες και τους συνεργάτες μέσω της παροχής τόσο καθιερωμένων όσο και αναδυόμενων περιπτώσεων χρήσης, εξασφαλίζοντας μια συνεπή εμπειρία και υποστηριζόμενη από βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα. Ουσιαστικά, το LTE-A είναι το θεμελιώδες στοιχείο του δικτύου ραδιοπρόσβασης (RAN) 5G που λειτουργεί κάτω από τα 6GHz. Επιπλέον, η αξιοποίηση των συχνοτήτων μεταξύ 6GHz και 100GHz παρέχει μια σταθερή βάση για την πρόοδο και την εφαρμογή τεχνολογιών αιχμής. Στον τομέα της MIMO, οι εξελίξεις στην τεχνολογία 5G έχουν ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες της Massive MIMO. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση ενός ευρέος φάσματος στοιχείων ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα μια συστοιχία κεραιών που έχει φτάσει σε απaráμιλλες διαστάσεις, που κυμαίνονται από 1616 έως 256256 MIMO. Ο σχεδιασμός των πιλοτικών δικτύων 5G χαρακτηρίζεται από την αξιοποίηση της τεχνολογίας διαμόρφωσης δέσμης και των σταθμών βάσης μικρών κυψελών, παρουσιάζοντας μια επιστημονική προσέγγιση. Οι στόχοι της τεχνολογίας 5G μπορούν να συνοψιστούν επιγραμματικά δίνοντας έμφαση στις κρίσιμες πτυχές της αξίας (Hajlaoui et al., 2020):

- 1.000 x αύξηση της χωρητικότητας.
- 1,000,000.
- 100 δισεκατομμύρια δισεκατομμύρια συνδέσεις.
- Ταχύτητα 10Gbit/s έως 10Gbit/s. Καθυστέρηση 10Gbit/s κάτω από 1ms.

Στο πλαίσιο του έργου σύμπραξης 3ης γενιάς (3GPP), ο οδικός χάρτης για τη ραδιοπρόσβαση 5G περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές κατευθύνσεις. Το ένα εξετάζει την ανάπτυξη του LTE, ενώ το άλλο εμβαθύνει στη νέα ραδιοπρόσβαση (NR). Γίνονται συνεχείς βελτιώσεις στη συνιστώσα LTE (Ericsson, 2020), ώστε να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα αναγκών και εφαρμογών 5G. Η πορεία NR, από την

άλλη πλευρά, φέρνει αξιοσημείωτες εξελίξεις που δεν περιορίζονται από την απαίτηση για συμβατότητα προς τα πίσω με το LTE. Αυτές οι εξελίξεις περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση των χρονικών διαστημάτων μετάδοσης (TTI) για την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων, καθώς και τη δυνατότητα λεπτομερούς ρύθμισης της απόστασης μεταξύ των υποφορέων για την ενίσχυση της χωρητικότητας και του ρυθμού δεδομένων. Επιπλέον, η διαδρομή NR διευκολύνει τη χρήση συχνοτήτων υψηλού φάσματος, συμπεριλαμβανομένου του mm-Wave. Επιπλέον, οι τελευταίες ενημερώσεις (3GPP TR 38.913 v14.3.0, 2017) (Yilmaz et al., 2019) καταδεικνύουν σαφώς την ενσωμάτωση ποικίλων αρχιτεκτονικών αρίθμησης, κοπής δικτύου και διαχωρισμού.

Ωστόσο, για να επιταχυνθεί η ανάπτυξη των δικτύων 5G χωρίς την ανάγκη αναμονής για την ολοκλήρωση ολόκληρου του συστήματος NR, το 3GPP εισήγαγε το πλήρες σύστημα στενής ζώνης LTE-NR ήδη από τον Μάρτιο του 2018. Στη διεπαφή στενής ζώνης LTE-NR, η ενσωμάτωση μιας μη αυτόνομης (NSA) έκδοσης του NR συγχωνεύεται με το LTE σε λειτουργία διπλής συνδεσιμότητας (DC). Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει την απρόσκοπτη σύνδεση και των δύο τεχνολογιών στον προηγμένο πυρήνα πακέτων LTE (EPC). Το φαινόμενο αυτό αποτελεί παράδειγμα της περίπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ LTE και NR, αναδεικνύοντας το βάθος της σύνδεσής τους. Αυτό το φαινόμενο στην περίπτωση ENDC σηματοδοτεί ένα σημαντικό ορόσημο, καθώς συνεπάγεται την έναρξη ενός σεναρίου DC για δύο διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης 3GPP, κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές στα τεχνολογικά στοιχεία και τις δυνατότητες μεταξύ LTE και NR, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν από την ενσωμάτωση της πρώτης έκδοσης NR στην έκδοση 3GPP. Στο συνηθισμένο σενάριο EN-DC, το LTE ενεργεί ως η κύρια τεχνολογία που είναι υπεύθυνη για το χειρισμό της ασύρματης συνδεσιμότητας ενός εξοπλισμού χρήστη (UE), καθώς και για την εγκαθίδρυση της σύνδεσης του επιπέδου ελέγχου με το EPC. Το NR, από την άλλη πλευρά, βελτιώνει τη χωρητικότητα του UE χρησιμοποιώντας τη νέα διεπαφή και, εάν προτιμάται, εγκαθιδρύοντας απευθείας σύνδεση χρήστη με το EPC (Antonoli et al., 2018).

Η αρχική πρόταση που διατυπώθηκε από το 3GPP επεδίωκε να ολοκληρώσει την τυποποίηση του NR έως το 2020. Παρ' όλα αυτά, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επείγουσες απαιτήσεις της αγοράς που αναγνωρίστηκαν από τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, το 3GPP προέβη σε προσαρμογές στο χρονοδιάγραμμα του

5G για να εγγυηθεί τη διαθεσιμότητα του NR πριν από το 2020. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος του τεχνολογικού κατακερματισμού και της πρόωρης ανάπτυξης της τεχνολογίας 5G, το 3GPP έκανε τη στρατηγική επιλογή να χωρίσει τη διαδικασία τυποποίησης NR σε δύο κύριες φάσεις. Σύμφωνα με τη σχετική τεκμηρίωση (3GPP TS 38.801 v14.0.0, 2017), οι δύο φάσεις μπορούν να συνοψιστούν επιγραμματικά. Σε μια επιστημονική δημοσίευση των Pan και Wu το 2023:

- Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, το NR αναμένεται να χρησιμοποιήσει το υπάρχον δίκτυο ραδιοπρόσβασης LTE (RAN) και τις λειτουργίες του κεντρικού δικτύου (CN), οι οποίες θα τροποποιηθούν για να φιλοξενήσουν την ενσωμάτωση ενός νέου φορέα εκμετάλλευσης 5G. Η ανάπτυξη του NR NSA αναμένεται να πραγματοποιηθεί στα τέλη του 2018 ή στις αρχές του 2019.
- Παρ' όλα αυτά, το αυτόνομο (SA) NR: Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, θα δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο λειτουργιών CP και UP για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του 5G, σύμφωνα με τους στόχους που έχει θέσει η ITU. Επιπλέον, το 3GPP θα δημιουργήσει μια νέα αρχιτεκτονική CN για το 5G, διευκολύνοντας την εμφάνιση βελτιωμένων λειτουργιών όπως ο διαχωρισμός δικτύων. Μετά την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης, το NR θα διαθέτει ένα πλήρες φάσμα δυνατοτήτων 5G και δεν θα χρειάζεται πλέον να συνυπάρχει με το LTE (Pan & Wu, 2023).

3.1. Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (NFV)

Τα δίκτυα των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων είναι γεμάτα με ένα ευρύ φάσμα αποκλειστικών συσκευών υλικού, ο αριθμός των οποίων συνεχίζει να αυξάνεται. Η εισαγωγή μιας νέας υπηρεσίας δικτύου απαιτεί συχνά μια διαφορετική προσέγγιση, καθώς η εξεύρεση του απαραίτητου χώρου και της ισχύος για τη φιλοξενία αυτών των συσκευών γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Αυτό επιδεινώνεται περαιτέρω από τις κλιμακούμενες ενεργειακές δαπάνες, τις δυσκολίες στις κεφαλαιουχικές επενδύσεις και την έλλειψη τεχνογνωσίας που απαιτείται για το σχεδιασμό, την ενσωμάτωση και τη διαχείριση αυτών των όλο και πιο περίπλοκων συσκευών. Επιπλέον, οι συσκευές αυτές πλησιάζουν γρήγορα στο τέλος της διάρκειας ζωής τους, γεγονός που καθιστά αναγκαία την επανάληψη του κύκλου σχεδιασμού-ενσωμάτωσης-ανάπτυξης-

προμηθειών με ελάχιστο ή καθόλου οικονομικό κέρδος. Επιπλέον, ο ταχύς ρυθμός των τεχνολογικών εξελίξεων και της καινοτομίας των υπηρεσιών προκαλεί ολοένα και μικρότερο κύκλο ζωής του υλικού. Αυτό, με τη σειρά του, εμποδίζει τη δημιουργία νέων δικτυακών υπηρεσιών που παράγουν έσοδα και περιορίζει την καινοτομία σε δικτυοκεντρικά συνδεδεμένα περιβάλλοντα (Mijumbi et al., 2016).

Η τεχνολογία Network Functions Virtualization (NFV) στοχεύει να μετασχηματίσει τη διαδικασία δικτύωσης για τους φορείς εκμετάλλευσης, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία εικονικοποίησης της πληροφορικής για την ενοποίηση διαφορετικών συσκευών δικτύου σε διακομιστές, μεταγωγείς και αποθηκευτικούς χώρους μεγάλου όγκου που βρίσκονται συνήθως σε κέντρα δεδομένων, κόμβους δικτύου και χώρους τελικών χρηστών. Αυτό υποδηλώνει τη χρήση λειτουργιών δικτύου βασισμένων σε λογισμικό, οι οποίες μπορούν να αναπτυχθούν απρόσκοπτα σε διαφορετικό τυποποιημένο υλικό διακομιστή και να μεταφερθούν ή να διαμορφωθούν αβίαστα σε διάφορες τοποθεσίες δικτύου, εξαλείφοντας την ανάγκη εγκατάστασης πρόσθετου εξοπλισμού. Η εικονικοποίηση των δικτυακών λειτουργιών αποτελεί πολύτιμη προσθήκη στη δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (SDN), αλλά δεν εξαρτάται από αυτήν, και αντίστροφα. Η εικονικοποίηση μπορεί να υλοποιηθεί ξεχωριστά από το SDN, αν και η ενσωμάτωσή τους έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει την αξία τους. Οι στόχοι της εικονικοποίησης μπορούν να επιτευχθούν μέσω μηχανισμών μη SDN που ήδη χρησιμοποιούνται σε πολλά κέντρα δεδομένων. Οι προσεγγίσεις που ενσωματώνουν το διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και προώθησης δεδομένων, όπως προτείνεται από το SDN, υπόσχονται πολλά για την ενίσχυση των επιδόσεων, την ενίσχυση της συμβατότητας με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις και την απλούστευση των διαδικασιών λειτουργίας και συντήρησης. Η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου είναι υψίστης σημασίας για την υποστήριξη του SDN, καθώς παρέχει την απαραίτητη υποδομή για την εκτέλεση του λογισμικού SDN. Επιπλέον, η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου συνδέεται στενά με το SDN και δίνει έμφαση στη χρήση διακομιστών και μεταγωγέων για τη μετάδοση πακέτων πληροφοριών. Η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου εφαρμόζεται συνήθως σε διάφορα στάδια επεξεργασίας πακέτων και ελέγχου του επιπέδου δεδομένων τόσο σε κινητά όσο και σε σταθερά δίκτυα. Ακολουθούν μερικά πιθανά παραδείγματα στα οποία θα μπορούσε να γίνει αναφορά, χωρίς συγκεκριμένη σειρά (Casado et al., 2014):

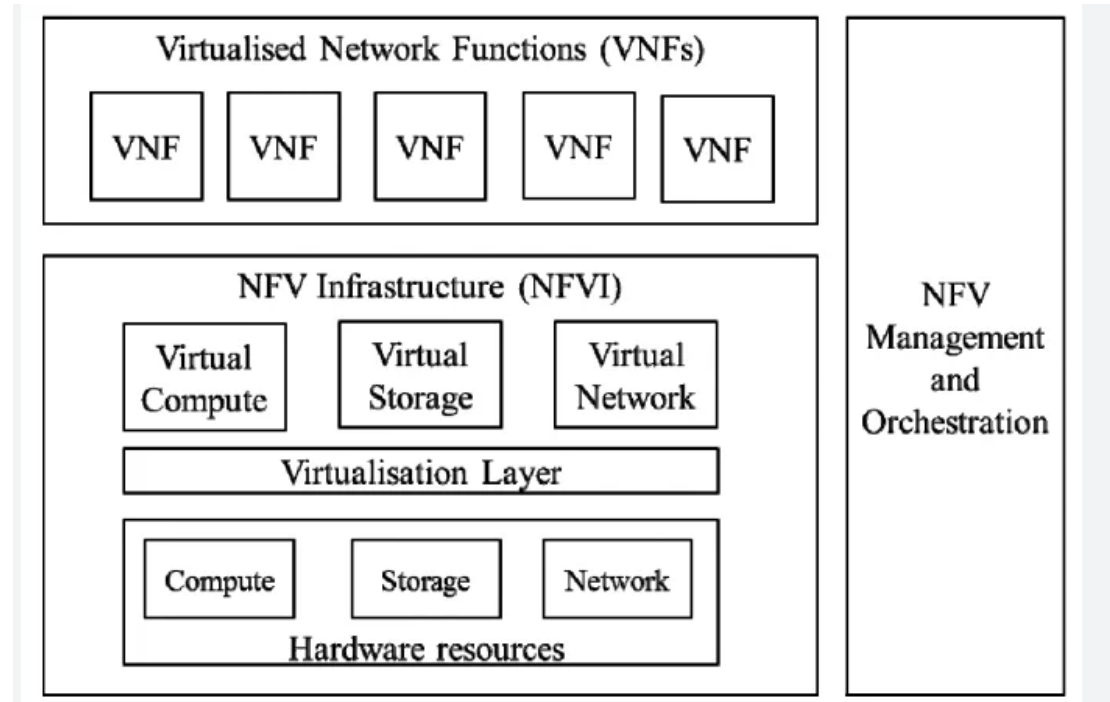
- Οι δρομολογητές μετάφρασης διευθύνσεων δικτύου (NAT) χρησιμοποιούνται συνήθως σε δίκτυα παρόχων υπηρεσιών για τη διατήρηση του χώρου διευθύνσεων IPv4. Οι δρομολογητές Carrier-Grade NAT (CG-NAT) είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να χειρίζονται τις απαιτήσεις NAT μεγάλης κλίμακας των παρόχων υπηρεσιών. Αυτοί οι δρομολογητές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση της κυκλοφορίας του δικτύου και στη διασφάλιση αποτελεσματικής επικοινωνίας στο δίκτυο.
- Κόμβοι σε κινητά δίκτυα.
- Λειτουργίες που βρίσκονται σε οικιακούς δρομολογητές και αποκωδικοποιητές που επιτρέπουν τη δημιουργία εικονικών οικιακών περιβαλλόντων.
- Τα στοιχεία για τις πύλες σήραγγας περιλαμβάνουν τις πύλες IPsec και SSL VPN.
- Η ανάλυση της κίνησης περιλαμβάνει τη χρήση του Deep Packet Inspection (DPI) και τη μέτρηση της ποιότητας εμπειρίας (QoE).
- Διασφάλιση υπηρεσιών, παρακολούθηση SLAs, διεξαγωγή δοκιμών και εκτέλεση διαγνωστικών ελέγχων.
- Σήμανση NGN: SBC, IMS.
- Η σύγκλιση και οι λειτουργίες σε όλο το δίκτυο περιλαμβάνουν μια σειρά στοιχείων, όπως διακομιστές AAA, πλατφόρμες ελέγχου πολιτικής και πλατφόρμες ελέγχου χρέωσης.
- Η βελτιστοποίηση σε επίπεδο εφαρμογών περιλαμβάνει την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών για τη βελτίωση των επιδόσεων. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση δικτύων παράδοσης περιεχομένου (CDN), διακομιστών κρυφής μνήμης, εξισορροπητών φορτίου και επιταχυντών εφαρμογών.
- Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας περιλαμβάνουν τείχη προστασίας, σαρωτές ιών, συστήματα ανίχνευσης εισβολών και προστασία από ανεπιθύμητη αλληλογραφία.

Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον προσδιορισμό των λειτουργιών του δικτύου για τις οποίες η εικονικοποίηση αποφέρει τα περισσότερα οφέλη. Οι περιπτώσεις χρήσης που ενδιαφέρουν τους χρήστες περιλαμβάνουν (Mijumbi et al., 2016):

- Μια λύση Deep Packet Inspection (DPI) βασισμένη σε λογισμικό που προσφέρει εξελιγμένη ανάλυση κίνησης και ολοκληρωμένες πολυδιάστατες αναφορές. Παρουσιάζει την ικανότητά της να λειτουργεί απρόσκοπτα σε τυπικό υλικό, επιτυγχάνοντας πραγματικούς ρυθμούς γραμμής. Μια λύση βαθιάς επιθεώρησης πακέτων (DPI) βασισμένη σε λογισμικό μπορεί να εφαρμοστεί εκτενώς σε όλο το δίκτυο, προσφέροντας βελτιωμένες δυνατότητες ανάλυσης και εξορθολογισμένες διαδικασίες για την ανάπτυξη, τις ενημερώσεις, τις δοκιμές και την κλιμάκωση για την προσαρμογή στους εξελισσόμενους φόρτους εργασίας.
- Υλοποιήσεις κόμβων IP που παρέχουν υποστήριξη για διάφορες λειτουργίες, όπως CG-NAT και δυνατότητες BRAS, σε τυπικούς διακομιστές υψηλών προδιαγραφών. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση του υλικού, καθώς η ζήτηση για αυτές τις δυνατότητες συνεχίζει να αυξάνεται.
- Η εικονικοποίηση των υπηρεσιών και των δυνατοτήτων που επί του παρόντος απαιτούν αποκλειστικές συσκευές υλικού στις τοποθεσίες των πελατών, από οικιακά περιβάλλοντα έως μικρά υποκαταστήματα και μεγάλες επιχειρήσεις, περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών. Αυτές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τείχος προστασίας, ασφάλεια ιστού, IPS/IDS, επιτάχυνση και βελτιστοποίηση WAN και λειτουργίες δρομολογητή. Η εικονικοποίηση του οικιακού περιβάλλοντος, που περιλαμβάνει δρομολογητές, κόμβους και αποκωδικοποιητές, έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την ομαλή και απλή μετάβαση στο IPv6. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την εξάλειψη της ανάγκης για υπερβολικές ενημερώσεις bloatware υλικού καθώς εξελίσσονται οι ευρυζωνικές εφαρμογές και υπηρεσίες.
- Η εικονικοποίηση των δικτύων διανομής περιεχομένου (CDN) σχεδιάστηκε αρχικά για να βελτιώσει την επέκταση και την επεκτασιμότητα των υπηρεσιών διανομής περιεχομένου. Επίσης, αποσκοπούσε στη βελτιστοποίηση της χρήσης υλικού στα σημεία παρουσίας (PoPs), επιτρέποντας την ανάπτυξη άλλων εφαρμογών παροχής υπηρεσιών, όπως η επιτάχυνση ιστού, ανάλογα με τις ανάγκες. Η εικονικοποίηση των CDN θα επιτρέψει επίσης τη φιλοξενία υπηρεσιών CDN από πιθανούς επιχειρηματικούς εταίρους, όπως εξωτερικούς παρόχους CDN.
- Η εικονικοποίηση ενός κεντρικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ιδιαίτερα αποδοτικού περιβάλλοντος παραγωγής. Αυτό επιτρέπει

στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να διαχειρίζονται αποτελεσματικά την αυξανόμενη ζήτηση κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση του δικτύου χωρίς την ανάγκη αντικατάστασης υλικού για αναβαθμίσεις κόμβων. Η εικονικοποίηση επιτρέπει επίσης την ενοποίηση υλικού, διευκολύνει την υποστήριξη πολλαπλών μισθώσεων και επιταχύνει τη διαμόρφωση νέων υπηρεσιών. Η εικονικοποίηση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη δικτύων πυρήνα στιγμιότυπων που είναι προσαρμοσμένα για συγκεκριμένες υπηρεσίες, όπως οι επικοινωνίες μεταξύ μηχανών (M2M) (Casado et al., 2014).

- Ο συντονισμός του νέφους και της δικτύωσης για τις επιχειρήσεις επιτρέπει την αποτελεσματική παροχή υπηρεσιών κατά παραγγελία και μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα του κεφαλαίου τόσο για τους πελάτες των επιχειρήσεων όσο και για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων.
- Οι υβριδικοί κόμβοι οπτικών ινών-DSL μπορούν να βρεθούν σε διάφορες τοποθεσίες σε όλο το υπαίθριο δίκτυο, όπως σε καφετέριες δρόμων, στο υπόγειο και σε στύλους. Για βέλτιστη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, είναι ζωτικής σημασίας οι κόμβοι αυτοί να διαθέτουν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και να απαιτούν ελάχιστη έως καθόλου συντήρηση. Η εικονικοποίηση έχει τη δυνατότητα να απλοποιήσει το υλικό στον απομακρυσμένο κόμβο, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας και την καλύτερη προσαρμοστικότητα σε μελλοντικές αλλαγές υπηρεσιών. Θα ήταν πιο οικονομικά αποδοτικό για αυτούς τους απομακρυσμένους κόμβους να προσφέρουν τόσο σταθερή όσο και ασύρματη πρόσβαση, εάν οι βασικές λειτουργίες εικονικοποιούνταν σε μια κοινή πλατφόρμα.
- Η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός ιδιαίτερα αποδοτικού περιβάλλοντος παραγωγής που μπορεί να αξιοποιηθεί από διάφορες εφαρμογές, χρήστες και ενοικιαστές. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη συνύπαρξη πολλαπλών εκδόσεων και παραλλαγών μιας υπηρεσίας δικτύου, συμπεριλαμβανομένων δοκιμαστικών και beta εκδόσεων (Casado et al., 2014).



Εικόνα 8 Network Functions Virtualization (NFV)

3.2. Πλεονεκτήματα τεχνολογίας NFV

Η εφαρμογή της εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου παρέχει πολλά οφέλη στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, συμβάλλοντας σε μια δραματική αλλαγή στο τοπίο του κλάδου των τηλεπικοινωνιών. Τα οφέλη που προβλέπουμε περιλαμβάνουν (Yousaf et al., 2017):

- Με την ενοποίηση του εξοπλισμού και την αξιοποίηση των οικονομιών κλίμακας στον κλάδο της πληροφορικής, έχουν επιτευχθεί σημαντικές μειώσεις στο κόστος του εξοπλισμού και στην κατανάλωση ενέργειας. Το 2011 στάλθηκαν περίπου 9,5 εκατομμύρια διακομιστές, ενώ οι προβλέψεις για το 2012 κάνουν λόγο για περίπου 1,5 εκατομμύρια δρομολογητές.
- Βελτίωση της ταχύτητας διάθεσης στην αγορά με τη μείωση του τυπικού κύκλου λειτουργίας των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων. Η ανάπτυξη με βάση το λογισμικό έχει καταστήσει παρωχημένη την ανάγκη για οικονομίες κλίμακας στα χαρακτηριστικά που βασίζονται στο υλικό, επιτρέποντας τη διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων για τη βελτίωση και την εξέλιξη των χαρακτηριστικών. Η

εικονικοποίηση επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να συντομεύσουν σημαντικά τον κύκλο ωριμότητας.

- Η λειτουργία εγκαταστάσεων παραγωγής, δοκιμών και υποβολής εκθέσεων στην ίδια υποδομή προσφέρει μια εξαιρετικά αποτελεσματική προσέγγιση για τη δοκιμή και την ολοκλήρωση. Αυτό όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση του κόστους ανάπτυξης, αλλά επιταχύνει επίσης τον χρόνο διάθεσης στην αγορά.
- Μπορεί κανείς να εστιάσει στρατηγικά στην εισαγωγή υπηρεσιών με βάση συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες ή στοχευμένα τμήματα πελατών. Οι υπηρεσίες μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν ώστε να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών ενισχύεται μέσω της απομακρυσμένης παροχής λογισμικού, εξαλείφοντας την ανάγκη για επιτόπιες επισκέψεις για την εγκατάσταση νέου υλικού.
- Με την προώθηση διαφορετικών οικοσυστημάτων και τη διαφάνεια, η αγορά εικονικών συσκευών γίνεται προσιτή σε νεοεισερχόμενους κατασκευαστές λογισμικού, μικρούς καταναλωτές και ακαδημαϊκούς φορείς. Αυτό ευνοεί ένα κλίμα καινοτομίας, επιτρέποντας την ταχεία εισαγωγή νέων υπηρεσιών και ροών εσόδων με μειωμένο κίνδυνο.
- Αποτελεσματική διαμόρφωση του δικτύου και της τοπολογίας σε πραγματικό χρόνο με την ανάλυση της τρέχουσας κυκλοφορίας, των προτύπων κινητικότητας και της ζήτησης υπηρεσιών. Ως ακαδημαϊκός, θα μπορούσε κανείς να εξετάσει τα πιθανά οφέλη της αυτόματης βελτιστοποίησης της θέσης και της κατανομής πόρων στις λειτουργίες του δικτύου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να προσφέρει ένα επίπεδο προστασίας από αστοχίες χωρίς την ανάγκη σχεδιασμού πλήρους ανθεκτικότητας.
- Επιτρέποντας την παροχή προσαρμοσμένων υπηρεσιών και συνδεσιμότητας για διάφορους χρήστες, εφαρμογές ή εσωτερικά συστήματα, καθώς και για άλλους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου, όλα στο ίδιο υλικό, εξασφαλίζοντας παράλληλα τον ασφαλή διαχωρισμό των διοικητικών τομέων.
- Με τη χρήση χαρακτηριστικών διαχείρισης ενέργειας σε τυποποιημένους διακομιστές και αποθηκευτικούς χώρους, καθώς και με την εφαρμογή ενοποίησης του φόρτου εργασίας και βελτιστοποίησης της τοποθεσίας, η κατανάλωση ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά. Ως ακαδημαϊκός, θα μπορούσε κανείς να

διερευνήσει τις δυνατότητες των τεχνικών εικονικοποίησης για τη βελτιστοποίηση του φόρτου εργασίας του διακομιστή. Με τη συγκέντρωση του φόρτου εργασίας σε μικρότερο αριθμό διακομιστών κατά τις ώρες μη αιχμής, όπως τη νύχτα, καθίσταται εφικτή η απενεργοποίηση ή η θέση των υπόλοιπων διακομιστών σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (Yousaf et al., 2017).

Βελτίωση της επιχειρησιακής απόδοσης με τη χρήση της συνεπούς και τυποποιημένης φυσικής πλατφόρμας δικτύου σε συνδυασμό με άλλες υποστηρικτικές πλατφόρμες (Hucaby, 2010):

- Οι μηχανισμοί ενορχήστρωσης ΤΠ επιτρέπουν την αυτοματοποίηση της ανάπτυξης και της κλιμάκωσης της χωρητικότητας, καθώς και την επαναχρησιμοποίηση των δομών εικονικών μηχανών (VM).
- Έτσι αποφεύγεται η ανάγκη για υλικό προσαρμοσμένο σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Η βάση δεξιοτήτων που απαιτείται για τη λειτουργία εξυπηρετητών ΤΠ μεγάλου όγκου είναι πιο εκτεταμένη και συνεκτική σε σύγκριση με τη βάση δεξιοτήτων που απαιτείται για τον ειδικό εξοπλισμό δικτύου τηλεπικοινωνιών.
- Βελτιστοποιημένη επιλογή εξοπλισμού για τον προγραμματισμό και την προμήθεια. Εάν δημιουργηθούν εργαλεία για την αυτοματοποίηση και τον χειρισμό της αυξανόμενης πολυπλοκότητας του λογισμικού εικονικοποίησης.
- Ικανότητα επίλυσης ζητημάτων με τη χρήση μηχανισμών ενορχήστρωσης ΤΠ για την απρόσκοπτη μεταφορά του φόρτου εργασίας του δικτύου σε διαθέσιμους πόρους, διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη λειτουργία. Αυτό έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα με την αυτόνομη αντιμετώπιση και επίλυση βλαβών, ανεξαρτήτως ώρας ή ημέρας.
- Πιθανή βελτίωση της αποδοτικότητας μεταξύ των λειτουργιών IT και δικτύου.
- Η υποστήριξη αναβαθμίσεων λογισμικού εν λειτουργία (ISSU) με απρόσκοπτη επαναφορά καθίσταται δυνατή με την εγκατάσταση της νέας έκδοσης ενός Virtual Network Appliance (VNA) ως νέας εικονικής μηχανής (VM). Με την προϋπόθεση ότι η κυκλοφορία μπορεί να μεταφερθεί απρόσκοπτα από την προηγούμενη εικονική μηχανή στη νέα εικονική μηχανή χωρίς καμία διακοπή των υπηρεσιών. Για ορισμένες εφαρμογές, μπορεί να είναι επιτακτική ανάγκη να εξασφαλιστεί ο συγχρονισμός της κατάστασης της νέας εικονικής μηχανής με την κατάσταση της προηγούμενης εικονικής μηχανής (Hucaby, 2010).

3.3. Δίκτυο καθοριζόμενο από το λογισμικό (SDN)

Η δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (SDN) περιλαμβάνει την έννοια της αποσύνδεσης του επιπέδου ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο προώθησης, επιτρέποντας την κεντρική διαχείριση πολυάριθμων συσκευών. Η τεχνική SDN είναι σχεδιασμένη για τον αποτελεσματικό χειρισμό ροών πληροφοριών που απαιτούν διαχωρισμό από την υποκείμενη υποδομή και τα συστήματα που είναι υπεύθυνα για την προώθηση των πληροφοριών. Το SDN είναι δομημένο έτσι ώστε να διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων, επιτρέποντας μια πιο ορθολογική διαχείριση και έλεγχο των στοιχείων του δικτύου (McKeown et al., 2008). Ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων καθιερώνεται μέσω μιας διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (API) που συνδέει τη συσκευή δικτύου και τον ελεγκτή SDN. Το πρωτόκολλο OpenFlow αποτελεί παράδειγμα ενός API. Ένας μεταγωγέας εξοπλισμένος με μια προγραμματιζόμενη διεπαφή επιτρέπει στον ελεγκτή να εγκαθιδρύσει επικοινωνία και να ορίσει κανονισμούς για τον μεταγωγέα. Ο διακόπτης OpenFlow διαθέτει την ευελιξία να λειτουργεί ως δρομολογητής, μεταγωγέας, τείχος προστασίας και μεταφραστής διευθύνσεων δικτύου (Benzekki et al., 2016).

3.3.1. Οι κόμβοι του SDN

Οι κόμβοι δημιουργούνται για να οριοθετήσουν τις σχετικές διεπαφές για την κατασκευή ενός αρθρωτού και επεκτάσιμου συστήματος. Ένα αρθρωτό σύστημα που διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση του κώδικα. Εάν η διεπαφή παραμένει αμετάβλητη, η τροποποίηση της υλοποίησης δεν θα έχει αντίκτυπο σε άλλα στοιχεία του συστήματος λογισμικού. Η δημιουργία ενός επεκτάσιμου συστήματος λογισμικού μπορεί να διευκολυνθεί σημαντικά με τη χρήση κόμβων. Είναι σημαντικό να δοθεί προτεραιότητα στην αρθρωτότητα μέσω της δημιουργίας κόμβων (McKeown et al., 2008). Η αφαίρεση του SDN μοιάζει πολύ με τη δομή των συμβατικών συστημάτων υπολογιστών, όπου ένα μοντέλο επιπέδων επιτρέπει την επιλογή συγκεκριμένων

χαρακτηριστικών σε κάθε επίπεδο, ενσωματώνοντας ιδιόκτητα λειτουργικά συστήματα, υλικό και λογισμικό. Το SDN παρέχει την απαραίτητη αφαίρεση για το επίπεδο ελέγχου, επιτρέποντας την αποτελεσματική διαχείριση και τον έλεγχο. Θα εισαχθούν τρεις κύριες στήλες για τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου (Benzekki et al., 2016):

- Ο κόμβος του επιπέδου προώθησης αποκρύπτει τις περιπλοκές της υλοποίησής του από τις αποφάσεις ελέγχου, παρουσιάζοντας μια απλοποιημένη διεπαφή. Οι συσκευές ενός δικτύου ελέγχονται μέσω μιας ανοικτής διεπαφής. Δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας σχετικά με κάποιον συγκεκριμένο προμηθευτή.
- Κόμβος που αντιπροσωπεύει την κατάσταση του δικτύου: Η πολυπλοκότητα της διαχείρισης και του ελέγχου των σύγχρονων δικτύων μπορεί να αποδοθεί στους περίπλοκους αλγορίθμους διανομής όπως το OSPF. Η ιδέα περιλαμβάνει την απλούστευση των λειτουργιών της εφαρμογής αντικαθιστώντας τον περίπλοκο αλγόριθμο με μια πιο απλή προβολή του δικτύου για τον ελεγκτή. Στην ακαδημαϊκή σφαίρα, ο ελεγκτής SDN χρησιμοποιεί ένα καθορισμένο πρωτόκολλο (όπως το OpenFlow) για την καθιέρωση επικοινωνίας με τις συσκευές δικτύου. Μέσω αυτής της επικοινωνίας, ο ελεγκτής συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο, επιτρέποντάς του να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη "άποψη" ή χάρτη της τοπολογίας του δικτύου. Οι διαμορφώσεις μεταδίδονται στους δρομολογητές και τους μεταγωγείς με σκοπό την προώθηση.
- Κόμβος υπεύθυνος για τη διαχείριση και τον έλεγχο των λειτουργιών του δικτύου. Ο ελεγκτής SDN προσφέρει διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών τις οποίες μπορούν να αξιοποιήσουν οι εφαρμογές. Οι εξωτερικές εφαρμογές έχουν τη δυνατότητα να χειρίζονται το δίκτυο χρησιμοποιώντας API μέσω του ελεγκτή, χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού όπως η Java ή η REST. Οι προγραμματιστές έχουν τη δυνατότητα να διαμορφώνουν και να ελέγχουν το δίκτυο χωρίς να χρειάζεται να δημιουργούν λογισμικό ειδικά σχεδιασμένο για να φιλοξενεί διάφορα υλικά και λογισμικά από διαφορετικούς προμηθευτές.

Μόλις υλοποιηθούν οι κόμβοι, ο ελεγκτής θα λειτουργεί ως λειτουργικό σύστημα δικτύου (NOS) και θα επικοινωνεί με τους μεταγωγείς μέσω του Southbound API. Οι εφαρμογές είναι κώδικες που γράφονται στον ελεγκτή χρησιμοποιώντας API που παρέχονται από το NOS, γνωστό ως Northbound API (Benzekki et al., 2016).

3.3.2. Τα επίπεδα του SDN

Η αρχιτεκτονική SDN χαρακτηρίζεται από ένα συνδυασμό επτά επιπέδων. Κάθε στρώμα εξυπηρετεί τους δικούς του ξεχωριστούς σκοπούς. Αρκετά στοιχεία είναι σταθερά παρόντα στην αρχιτεκτονική SDN, συμπεριλαμβανομένων του νότιου API, των λειτουργικών συστημάτων δικτύου, του βόρειου API δικτύου και των εφαρμογών δικτύου. Πρόσθετα στοιχεία μπορούν να εισαχθούν σε συγκεκριμένα πλαίσια, όπως ο hypervisor ή οι γλώσσες προγραμματισμού (Kreutz et al., 2015).

- Υποδομή: Τα συμβατικά φυσικά εργαλεία έχουν εξελιχθεί σε ένα σύστημα που επικεντρώνεται αποκλειστικά σε θεμελιώδεις έννοιες, χωρίς καμία σύνθετη ένθεση ή έλεγχο αποφάσεων. Τα σύγχρονα δίκτυα κατασκευάζονται με έμφαση στα ανοικτά και τυποποιημένα όρια, εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφόρων προμηθευτών. Επιπλέον, οι ανοικτές διεπαφές επιτρέπουν στις οντότητες ελέγχου να προγραμματίζουν ένα ευρύ φάσμα συσκευών προώθησης, ένα έργο που αποτελεί πρόκληση στα συμβατικά δίκτυα.
- Διεπαφές στη νότια περιοχή: Οι διεπαφές της νότιας περιοχής (SI) χρησιμεύουν ως οι κρίσιμοι σύνδεσμοι μεταξύ των εργαλείων ελέγχου και του δικτύου, διευκρινίζοντας την περίπλοκη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ των προηγμένων συσκευών και του επιπέδου ελέγχου. Το πρωτόκολλο αυτό περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο τα στοιχεία και οι πληροφορίες του επιπέδου ελέγχου αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, μοιάζοντας με την προσέγγιση ενός ακαδημαϊκού. Ωστόσο, αυτές οι διεπαφές API παραμένουν ασφαλείς για τις πολύπλοκες πτυχές της φυσικής ή εικονικής υποδομής, όπως θα περίμενε και ένας ακαδημαϊκός.
- Επόπτες δικτύου: Η εικονικοποίηση δικτύου περιλαμβάνει την έννοια του διαχωρισμού ενός δικτύου από τη φυσική του υποδομή, δημιουργώντας ένα αφηρημένο περιβάλλον δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται για να καταστεί δυνατή η λειτουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων από μια κοινή υποδομή, με κάθε εικονικό δίκτυο να έχει τη δική του ξεχωριστή τοπολογία αντί να βασίζεται στο υποκείμενο φυσικό δίκτυο. Το Flow Visor αναδείχθηκε ως η πρωτοποριακή προσπάθεια στο πεδίο της εικονικοποίησης SDN. Το Flow Visor χρησιμεύει ως μεσάζων μεταξύ του ελεγκτή και των εργαλείων δικτύου, προσφέροντας ένα εννοιολογικό επίπεδο που διευκολύνει την κοινή χρήση του επιπέδου δεδομένων

OpenFlow. Αυτό επιτρέπει σε πολλούς ελεγκτές να διαχειρίζονται ανεξάρτητα τα αντίστοιχα τμήματά τους. Το Flow Visor έχει τον κρίσιμο ρόλο του καθορισμού της κατανομής του ελέγχου πακέτων μεταξύ των ελεγκτών και της θέσπισης και διαχείρισης των κανόνων που ορίζονται από αυτούς τους ελεγκτές.

Το NOS διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αρχιτεκτονική SDN. Με τρόπο που αρμόζει σε έναν ακαδημαϊκό, ο ελεγκτής εξορθολογίζει την πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου ελεγκτών SDN, επιτρέποντας στις εφαρμογές να αλληλεπιδρούν απρόσκοπτα με τις συσκευές SDN, χωρίς προκαταλήψεις. Αυτός ο συγκεντρωτικός έλεγχος από το NOS αναμένεται να διευκολύνει τη διαχείριση του δικτύου και να απλοποιήσει την περίπλοκη διαδικασία επίλυσης ζητημάτων δικτύωσης. Ο ελεγκτής διαθέτει διάφορα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά, όπως τονίζεται από τους Kreutz et al. (2018):

1. Ανακάλυψη των συσκευών των τελικών χρηστών: Αυτό περιλαμβάνει φορητούς υπολογιστές, επιτραπέζιους υπολογιστές, κινητές συσκευές και άλλα.
2. Η ανακάλυψη συσκευών δικτύου περιλαμβάνει τον εντοπισμό διαφόρων συσκευών δικτύου, όπως μεταγωγείς, δρομολογητές και σημεία ασύρματης πρόσβασης, που αποτελούν την υποδομή του δικτύου.
3. Η διαχείριση της τοπολογίας περιλαμβάνει τη διατήρηση των λεπτομερειών διασύνδεσης μεταξύ των συσκευών δικτύου και των τελικών χρηστών.
4. Η διαχείριση ροών περιλαμβάνει τη συντήρηση μιας βάσης δεδομένων που περιέχει όλες τις ροές που διαχειρίζεται ο ελεγκτής. Περιλαμβάνει επίσης τη διαμόρφωση των συσκευών ώστε να διασφαλίζεται ο συγχρονισμός των εγγραφών ροής τους με αυτή τη βάση δεδομένων.

- Διασυνδέσεις προς βορρά:

Αυτή η έννοια επιτρέπει στις δικτυακές εφαρμογές να είναι ανεξάρτητες από συγκεκριμένες υλοποιήσεις, απλοποιώντας έτσι τον προγραμματισμό του δικτύου. Σε αντίθεση με τη νότια διεπαφή, η βόρεια διεπαφή είναι κυρίως ένα σύστημα λογισμικού που περιλαμβάνει τη δημιουργία εφαρμογών όπως η δρομολόγηση μέσω γλωσσών προγραμματισμού όπως η Python ή η Java. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ταχύτερη ανάπτυξη, μειωμένο κόστος επένδυσης και απλοποιημένη αντιμετώπιση προβλημάτων

σε σύγκριση με το νότιο API. Ο ελεγκτής παρέχει στην εφαρμογή πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Τα συμβάντα μπορούν να συσχετίζονται με ένα ξεχωριστό πακέτο που παράγεται από τον ελεγκτή ή με μια αλλαγή στην τοπολογία, όπως το ότι ένας σύνδεσμος καθίσταται ανενεργός. Οι εφαρμογές απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις ως απάντηση στο συμβάν. Μια πιθανή ενέργεια είναι η απόρριψη μιας τροποποίησης ή η προώθηση του πακέτου όταν συμβαίνει ένα συμβάν λαμβανόμενου πακέτου (Casado et al., 2014).

- Γλώσσες προγραμματισμού:

Οι γλώσσες προγραμματισμού είναι υψηλού επιπέδου APIs που επεκτείνουν μια έννοια του ίδιου του δικτύου, έτσι ώστε ο προγραμματιστής να μην χρειάζεται να ασχολείται με μεμονωμένες συσκευές, αλλά να ασχολείται ελαφρώς με το δίκτυο στο σύνολό του. Η Pyretic, η Python και η Frenetic μεταξύ πολλών άλλων γλωσσών προγραμματισμού έχουν προγραμματιστεί για SDN (Casado et al., 2014).

- Εφαρμογές δικτύου:

Οι εφαρμογές δικτύου ενσωματώνουν λογική ελέγχου για την αξιολόγηση της απόδοσης των συσκευών δικτύου και την υπαγόρευση της συμπεριφοράς τους. Η εφαρμογή δικτύου θεωρείται συχνά ως ο κεντρικός κόμβος του δικτύου, υπεύθυνος για τη συνολική λειτουργία και το συντονισμό του. Η εφαρμογή λειτουργεί ως ακροατής συγκεκριμένων γεγονότων, όπως ορίστηκε προηγουμένως. Όταν συμβαίνει ένα από αυτά τα συμβάντα, ο ελεγκτής ενεργοποιεί τη μέθοδο επανάκλησης της εφαρμογής. Επιπλέον, εφαρμόζει αυτά τα συμβάντα σε εξωτερικές εισόδους, όπως η εκτέλεση μεθόδων ασφαλείας. Αυτή η εφαρμογή επικεντρώνεται στη δρομολόγηση, συγκεκριμένα στη λογική πίσω από τον καθορισμό της διαδρομής που θα ακολουθήσουν τα πακέτα από το σημείο A στο σημείο B. Για την επιτυχή εκτέλεση μιας εφαρμογής δρομολόγησης, είναι επιτακτική ανάγκη να τηρείται η καθιερωμένη σύμβαση τοπολογίας. Αυτό συνεπάγεται τη λήψη μιας καλά ενημερωμένης απόφασης σχετικά με την καταλληλότερη διαδρομή και στη συνέχεια την εντολή στον ελεγκτή να αναθέσει τους κατάλληλους κανόνες προώθησης σε όλες τις σχετικές συσκευές προώθησης κατά μήκος της επιλεγμένης διαδρομής, που εκτείνεται από το σημείο A στο σημείο B (Badotra & Panda, 2020). Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες στις οποίες

εμπίπτουν οι περισσότερες εφαρμογές SDN, όπως η μηχανική της κυκλοφορίας, η κινητικότητα και η ασύρματη συνδεσιμότητα, η μέτρηση και η παρακολούθηση, η ασφάλεια και η αξιοπιστία και η δικτύωση κέντρων δεδομένων. Αυτές οι κατηγορίες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης (Kreutz et al., 2018).

3.4. Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου (Multi-access edge computing)

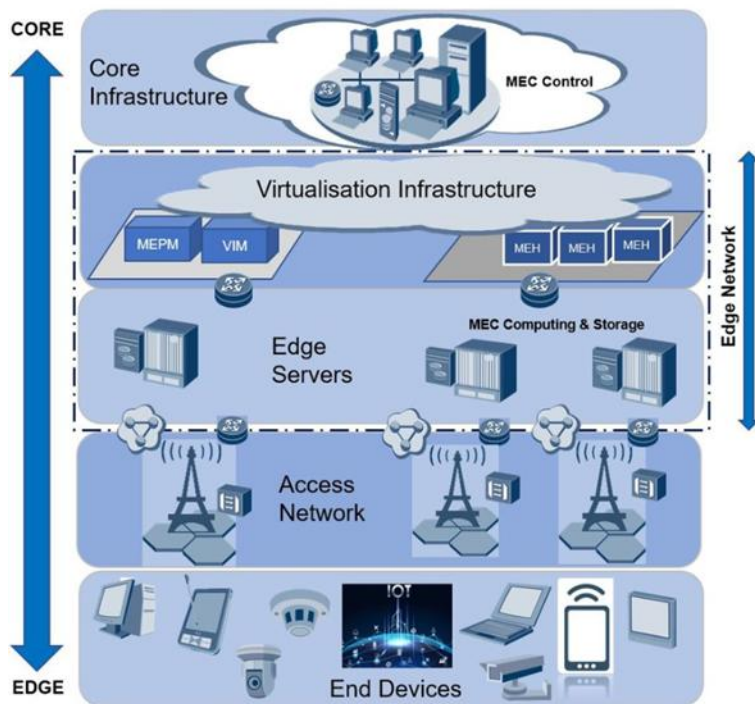
Το Multi-access Edge Computing (MEC) αντιπροσωπεύει μια δυναμική τεχνική λύση που αποσκοπεί στη μετεγκατάσταση των υπολογισμών και της αποθήκευσης που απαιτούνται για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης προς την άκρη του δικτύου, σε πιο κοντινή απόσταση από τους τελικούς χρήστες (J. Zhang et al., 2018). Η έννοια του MEC εισήχθη αρχικά το 2009 από τη Microsoft (Satyanarayanan et al., 2011). Κατά την τελευταία δεκαετία, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων έχουν αγκαλιάσει την πρόσθετη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες που προσφέρει το MEC. Η χρήση εφαρμογών και υπηρεσιών που προσφέρονται μέσω του Διαδικτύου έχει γίνει ένα συνηθισμένο μέρος της καθημερινής μας ζωής. Με την πάροδο του χρόνου, αυτές οι εφαρμογές, οι υπηρεσίες και τα δίκτυα που τις υποστηρίζουν έχουν υποστεί σημαντικές εξελίξεις. Ο πρωταρχικός στόχος του MEC είναι να βελτιώσει την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και την Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) για τους τελικούς χρήστες. Το MEC μπορεί να ταξινομηθεί ως μια μοναδική περίπτωση της μελλοντικής γενιάς του Mobile Cloud Computing (MCC) (Filali et al., 2020).

Το MEC είναι μια τεχνολογία αιχμής για τα κινητά δίκτυα 5G που χρησιμοποιεί μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική υπολογισμού. Αυτό επιτρέπει στους υπολογιστικούς πόρους και τις υπηρεσίες εφαρμογών να καλύπτουν ολόκληρη τη διαδρομή επικοινωνίας, από την πηγή δεδομένων έως το νέφος. Η εφαρμογή του MEC επιφέρει πολυάριθμα τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη απόδοση εφαρμογών, βελτιωμένη ιδιωτικότητα και ασφάλεια δεδομένων και αυξημένη χωρητικότητα στα δίκτυα οπισθοπορείας και πυρήνα. Παρόλο που μια αρχιτεκτονική ακραίων υπολογιστών που καθορίζεται από λογισμικό αντιμετωπίζει αποτελεσματικά προβλήματα κίνησης δεδομένων, όπως η καθυστέρηση και το τρεμούλιασμα στα δίκτυα πρόσβασης, επιφέρει επίσης νέα τρωτά σημεία, οδηγώντας σε ευρύτερη

επιφάνεια επίθεσης και πιθανούς κινδύνους ασφαλείας. Παρόλο που το MEC έχει κερδίσει αναγνώριση ως μέσο για την ενίσχυση της απόδοσης των συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών και τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, το ζήτημα της ασφάλειας εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην ανάπτυξη ενός προηγμένου οικοσυστήματος (Wong et al., 2017). τα διακριτικά χαρακτηριστικά του MEC σε ένα ευρύ φάσμα δομικών στοιχείων δημιουργούν πιθανούς κινδύνους, καθώς διευκολύνουν την ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθόδων για την εκφόρτωση υπολογισμών σε αρχιτεκτονικές δικτύων. Η διασφάλιση της προστασίας των θεμελιωδών στοιχείων είναι ζωτικής σημασίας, όπως και ο συντονισμός των διαφόρων μέτρων ασφαλείας για τη δημιουργία μιας συνολικής προοπτικής που επιτρέπει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση και συμβατότητα (Khan et al., 2020). Έτσι, όταν εξετάζεται η ασφάλεια των MEC, το έργο της παρακολούθησης του τοπίου των απειλών γίνεται όλο και πιο πολύπλοκο. Η αξιοποίηση κεντρικών διακομιστών προσφέρει μια βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Ως μελετητής, αξίζει να σημειωθεί ότι η ασφάλεια των διακομιστών MEC είναι λιγότερο ευάλωτη σε επιθέσεις λόγω της μικρής κλίμακας φύσης τους και της περιορισμένης συγκέντρωσης πολύτιμων πληροφοριών σε κατανεμημένες αναπτύξεις. Οι κόμβοι MEC είναι cloudlets που μπορούν να κατασκευαστούν ιδιωτικά, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο διαρροής πληροφοριών. Η διασφάλιση της ασφάλειας των στοιχείων και των διαύλων επικοινωνίας στο περιβάλλον MEC είναι εξαιρετικά σημαντική, όπως τονίζεται από τους Ndikumana και συν (2020).

Η ασφάλεια των δεδομένων και η προστασία της ιδιωτικής ζωής έχουν σημαντική σημασία στο πεδίο των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ICT). Η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα των δεδομένων έχουν ύψιστη σημασία στο περιβάλλον MEC λόγω της διασποράς των δεδομένων σε διάφορους κόμβους και συσκευές αποθήκευσης, όπως διακομιστές, υπολογιστές, κινητές συσκευές και αισθητήρες ασύρματων δικτύων. Η διασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των δεδομένων στο MEC παρουσιάζει μεγαλύτερο επίπεδο πολυπλοκότητας σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα πληροφοριών. Προκειμένου να προωθηθεί η ευρεία χρήση του MEC μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και των πελατών των επιχειρήσεων, είναι ζωτικής σημασίας να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες για την ασφάλεια και να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία του περιβάλλοντος MEC. Μια ουσιαστική πτυχή της υιοθέτησης νέων τεχνολογιών είναι η καθιέρωση μιας

αξιόπιστης αρχιτεκτονικής που εμπνέει εμπιστοσύνη στους χρήστες. Η ασφάλεια αποτελεί κρίσιμη πτυχή κατά το σχεδιασμό αρχιτεκτονικών και τρόπων λειτουργίας MEC. Η κατανόηση των κινδύνων ασφάλειας και η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού για το πρότυπο MEC αποτελεί βασικό τομέα εστίασης στην έρευνα και την ανάπτυξη MEC. Το παρόν έγγραφο αποσκοπεί στην παροχή μιας ολοκληρωμένης επισκόπησης της έρευνας σχετικά με το MEC και των στρατηγικών που αναπτύχθηκαν για τον μετριασμό των κινδύνων ασφαλείας που συνδέονται με αυτό (Ndikumana et al., 2020).



Εικόνα 9 Λειτουργική δομή MEC

4. Εφαρμογές τεχνολογίας 5G

Η εξασφάλιση ολοκληρωμένης συνδεσιμότητας σε διάφορες συσκευές αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την εφαρμογή της τεχνολογίας 5G. Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά έχουν τη δυνατότητα να επιτρέπουν την ασύρματη μετάδοση και να υποστηρίζουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς πληροφοριών. Όσον αφορά την υποδομή επικοινωνίας, το UAV ξεχωρίζει με την ευέλικτη ανάπτυξη, τις ισχυρές συνδέσεις, τη συνδεσιμότητα οπτικής επαφής και το πρόσθετο πλεονέκτημα της ελεγχόμενης κινητικότητας, δίνοντάς του περισσότερες επιλογές σχεδιασμού. Εδώ παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη έρευνα για την επικοινωνία UAV στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων 5G/B5G. Αρχικά, παρέχεται μια συνοπτική επισκόπηση του θεμελιώδους υπόβαθρου και των διασυνδεδεμένων δικτύων που περιλαμβάνουν το διάστημα, τον αέρα και το έδαφος. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι ερευνητικές προκλήσεις που σχετίζονται με την εκκολαπτόμενη αρχιτεκτονική των ολοκληρωμένων δικτύων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη ανάλυση των διαφόρων τεχνικών 5G σε πλατφόρμες UAV, οργανωμένη κατά διακριτούς τομείς, όπως το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο δικτύου και η κοινή επικοινωνία, οι υπολογισμοί και η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Επιπλέον, έχει περιγραφεί σχολαστικά ένα πλήθος ανοικτών ερευνητικών προβλημάτων και έχουν προσδιοριστεί ως δυνητικοί δρόμοι για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες (Dangi et al., 2021).

4.1. Μη επανδρωμένα συστήματα και UAVs

Το μέλλον των δικτύων ραδιοπρόσβασης πέμπτης γενιάς (5G) υπόσχεται πολλά, καθώς στοχεύει στην απρόσκοπτη και πανταχού παρούσα σύνδεση των πάντων. Προβλέπεται ότι θα διαχειρίζεται τουλάχιστον 1000 φορές μεγαλύτερο όγκο κίνησης, θα φιλοξενεί 100 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες ασύρματες συσκευές και θα ανταποκρίνεται σε ποικίλες απαιτήσεις, όπως η αξιοπιστία, η καθυστέρηση και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Πρόκειται για ένα σημαντικό άλμα σε σχέση με τις δυνατότητες των σημερινών κυψελοειδών δικτύων τέταρτης γενιάς (4G). Σήμερα, η

αλματώδης αύξηση της υιοθέτησης του IoT έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας για την επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων, γνωστή ως 5G και μετά (B5G). Με βάση πρόσφατα ερευνητικά ευρήματα, έχει προβλεφθεί ότι η παγκόσμια ανταλλαγή δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να φτάσει το εκπληκτικό ποσό του 1 zettabyte ανά μήνα μέχρι το έτος 2028 (X. Zhang et al., 2014). Αυτό θα επιβαρύνει σημαντικά την υπάρχουσα υποδομή, θα απαιτήσει σημαντικές αναβαθμίσεις της χωρητικότητας και θα επιφέρει σημαντική οικονομική επιβάρυνση στους φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιών όσον αφορά τις αυξημένες επενδύσεις κεφαλαίου και τα λειτουργικά έξοδα. Η προκαταρκτική έρευνα έχει επικεντρωθεί στα ετερογενή δίκτυα (HetNets), και συγκεκριμένα στην ανάπτυξη διαφορετικών μικρών κυψελών, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε αυτόν τον τομέα (Zeng et al., 2016).

Σε ορισμένες απρόβλεπτες ή επείγουσες περιστάσεις, όπως κατά τη διάρκεια προσπαθειών ανακούφισης από καταστροφές, η δημιουργία χερσαίων υποδομών καθίσταται ανέφικτη και δύσκολη. Αυτό οφείλεται κυρίως στα υπέρογκα λειτουργικά έξοδα που συνεπάγεται, καθώς και στην πολύπλοκη και απρόβλεπτη φύση αυτών των άγνωστων περιβαλλόντων. Μια πιθανή λύση για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας εξελιγμένης ετερογενούς αρχιτεκτονικής που αξιοποιεί μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), τα οποία αναφέρονται ευρύτερα ως μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση υπόσχεται πολλά για την ενεργοποίηση τριών θεμελιωδών σεναρίων χρήσης για τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα: ευρυζωνικότητα (eMBB) με αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης (URLLC) και μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC). Είναι προφανές ότι το UAV μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο σε διάφορα σενάρια. Μπορεί να συμβάλει αποτελεσματικά στην αποκατάσταση υπηρεσιών δικτύου σε περιοχές που έχουν πληγεί από καταστροφές, να ενισχύσει τα δίκτυα δημόσιας ασφάλειας και να χειριστεί αποτελεσματικά καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που απαιτούν URLLC. Το eMBB με τη βοήθεια UAV είναι μια πολύτιμη προσθήκη στα κυψελοειδή δίκτυα 5G. Τα UAV έχουν αναγνωριστεί ως κρίσιμο στοιχείο των ασύρματων τεχνολογιών 5G/B5G (Zeng et al., 2016).

Δεδομένης της ευελιξίας και της εξαιρετικής ευελιξίας τους, τα UAV χαμηλού ύψους έχουν βρει ευρεία χρήση σε μια σειρά από βιομηχανίες, εξυπηρετώντας ποικίλες εφαρμογές και εκπληρώνοντας διάφορους στόχους. Στον τομέα των ασύρματων

επικοινωνιών, τα UAV έχουν τη δυνατότητα να χρησιμεύσουν ως εναέριες πλατφόρμες επικοινωνίας. Με τον εξοπλισμό αυτών των μη επανδρωμένων αεροσκαφών με πομποδέκτες επικοινωνίας, μπορούν να λειτουργήσουν ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης ή κινητοί αναμεταδότες. Αυτό τους δίνει τη δυνατότητα να ενισχύσουν τις υπηρεσίες επικοινωνίας για επίγειους στόχους, ιδίως σε περιοχές με υψηλή ζήτηση ή συμφόρηση. Η έννοια αυτή είναι ευρέως γνωστή ως επικοινωνίες με τη βοήθεια UAV. Εναλλακτικά, τα UAV έχουν τη δυνατότητα να χρησιμεύουν ως εναέριοι κόμβοι, διευκολύνοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η παράδοση πακέτων και η επιτήρηση. Η έννοια αυτή είναι κοινώς γνωστή ως κινητές επικοινωνίες με τη βοήθεια UAV (Mozaffari et al., 2019). Ωστόσο, η πλειονότητα της τρέχουσας έρευνας επικεντρώνεται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) που υποστηρίζουν κυρίως κυψελοειδείς επικοινωνίες. Τα UAV στα σύγχρονα περιβάλλοντα είναι συχνά εξοπλισμένα με προηγμένες συσκευές επικοινωνίας και εξειδικευμένους αισθητήρες, επιτρέποντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Σε αυτές περιλαμβάνονται η επιτήρηση σε χαμηλό ύψος, οι επιχειρήσεις διάσωσης μετά από καταστροφές, η λογιστική υποστήριξη και η ενίσχυση των δομών επικοινωνίας σε περιόδους πιθανής υπερφόρτωσης του συστήματος. Επιπλέον, για την παροχή βοήθειας, οι ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες εξαρτώνται από την εκτεταμένη γεωγραφική κάλυψη. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας ομάδας μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) που σχηματίζουν ιπτάμενα δίκτυα Ad Hoc (FANET) και εγκαθιδρύουν συνδέσεις με επίγειους κόμβους. Οι έννοιες αυτές έχουν εξεταστεί διεξοδικά και επαληθευτεί μέσω θεωρητικής έρευνας και πρακτικών πειραμάτων πεδίου. Οι επικοινωνίες UAV διαθέτουν σημαντικά χαρακτηριστικά που τις καθιστούν περιζήτητη επιλογή για την αντικατάσταση ή την υποστήριξη επίγειων κυψελοειδών δικτύων (Shi et al., 2018).

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) που λειτουργούν χωρίς ανθρώπινο πιλότο έχουν το πλεονέκτημα της δημιουργίας συνδέσεων οπτικής επαφής (LoS), επιτρέποντάς τους να συνδέουν επίγειους χρήστες με απόλυτη αξιοπιστία ακόμη και σε σημαντικές αποστάσεις. Επιπλέον, τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν λεπτομερώς τις θέσεις αιώρησης τους, προκειμένου να διατηρούν την ακεραιότητα των συνδέσεών τους.

Δυνατότητα δυναμικής ανάπτυξης: Σε αντίθεση με τις σταθερές επίγειες υποδομές, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη προσφέρουν την ευελιξία να αναπτύσσονται με βάση τις ανάγκες σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ευπροσάρμοστα

στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Επιπλέον, οι εναέριες BS που χρησιμοποιούν UAV δεν απαιτούν την ενοικίαση χώρου εγκατάστασης, εξαλείφοντας έτσι την απαίτηση για πύργους και καλώδια.

Τα δίκτυα σμήνους που βασίζονται σε UAV επιτρέπουν το σχηματισμό κλιμακούμενων δικτύων πολλαπλών UAV, παρέχοντας πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα στους επίγειους χρήστες. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση επιτρέπει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των UAV σε ένα συνεκτικό δίκτυο. Το δίκτυο πολλαπλών UAV έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μια πρακτική λύση για την ενίσχυση της επικοινωνίας με γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο, χάρη στην εντυπωσιακή ευελιξία και τις δυνατότητες γρήγορης παράδοσης (Shi et al., 2018).

Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στη διερεύνηση διαφόρων μεθόδων για τη δημιουργία ποικίλων υποδομών, όπως πυκνά αναπτυγμένες μικρές κυψέλες, και στην εξεύρεση τρόπων ενσωμάτωσης διαφορετικών δικτύων επικοινωνίας, όπως διαστημικά, εναέρια και επίγεια δίκτυα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι ειδικοί στον τομέα χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές επικοινωνιών 5G, όπως μαζική μετάδοση πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (MIMO), μετάδοση mmWave, μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA), συσκευή-προς-συσκευή (D2D), οδοντωτή Native Radio (CR) και άλλες μεθόδους. Αυτές οι τεχνικές χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τόσο την αποδοτικότητα φάσματος όσο και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Όταν πρόκειται για κυψελοειδή δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV, το λειτουργικό κόστος, και συγκεκριμένα ο χρόνος αντοχής, έχει σημαντική σημασία. Δεδομένων των πιθανών πλεονεκτημάτων της, η συγκομιδή ενέργειας θα μπορούσε να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στην ενσωμάτωση των UAV. Εν τω μεταξύ, τα UAV μπορούν να λειτουργήσουν ως ελεγκτές δικτύου αιχμής για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των υπολογιστικών πόρων και της αποθήκευσης. Τα UAV έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ως πλατφόρμες υπολογισμού αιχμής, επιτρέποντάς τους να αναλαμβάνουν υπολογιστικά καθήκοντα από συσκευές IoT. Επιπλέον, μπορούν να αποθηκεύουν δημοφιλές περιεχόμενο, γεγονός που συμβάλλει στην ανακούφιση της επιβάρυνσης των δικτύων με την επαναμεταφορά των ίδιων πληροφοριών (Zhao et al., 2018).

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί πολλά ερευνητικά και εκπαιδευτικά εγχειρίδια, τα οποία επικεντρώνονται στις επικοινωνίες UAV. Αυτά τα σεμινάρια παρέχουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις των

δικτύων UAV, καθώς και την αντιμετώπιση βασικών θεμάτων επικοινωνίας, την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, τις τεχνικές ασύρματης φόρτισης και τη μοντελοποίηση καναλιών για τις επικοινωνίες UAV (Zhao et al., 2018).

Σε μια πρόσφατη μελέτη, ο Zhao και οι συνεργάτες του (2018) διεξήγαγαν μια ενδεδειγμένη εξέταση των διαφόρων εφαρμογών των δικτύων UAV σε μη στρατιωτικά περιβάλλοντα. Επικεντρώθηκαν στην ανάλυση αυτών των εφαρμογών από την άποψη της επικοινωνίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Πραγματοποιήθηκε μια έρευνα για την αντιμετώπιση των διαφόρων προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα δίκτυα επικοινωνίας UAV, με στόχο τη διασφάλιση μιας σταθερής και αξιόπιστης ασύρματης μετάδοσης. Στη μελέτη τους του 2016, ο Hossein Motlagh και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν μια ενδεδειγμένη έρευνα που τόνισε τις τεράστιες δυνατότητες αξιοποίησης των UAV χαμηλού υψομέτρου για την παροχή υπηρεσιών IoT. Το θέμα της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο για τα UAV εξετάστηκε διεξοδικά, με μια εκτενή συζήτηση τόσο για πραγματικές όσο και για προσομοιωμένες επιθέσεις. Επιπλέον, μια μελέτη που διεξήχθη από τους Arafat και Moh (2019) εξέτασε τα εξέχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης για UAVs και πραγματοποίησε μια σύγκριση επιδόσεων των υφιστάμενων κύριων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Μια ξεχωριστή μελέτη εξέτασε αποκλειστικά τη μέτρηση και τη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης αέρος-εδάφους. Διερεύνησαν επίσης διαφορετικές μεθόδους χαρακτηρισμού των υφιστάμενων καναλιών. Στον τομέα της μοντελοποίησης καναλιών, ο Khuwaja και οι συνεργάτες του παρείχαν μια ολοκληρωμένη ανάλυση της μοντελοποίησης καναλιών UAV με βάση τον LAP, εμβαθύνοντας στις ιδιαιτερότητες των μεθόδων μέτρησης και διερευνώντας μια σειρά χαρακτηριστικών καναλιών.

4.2. Αρχιτεκτονική B5G

Για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι ποικίλες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS) των διαφόρων υπηρεσιών IoT σε διαφορετικά σενάρια του πραγματικού κόσμου, όπως αστικές, αγροτικές και αραιοκατοικημένες περιοχές, είναι απαραίτητο να αξιοποιηθούν τα μοναδικά πλεονεκτήματα που προσφέρει κάθε παράδειγμα δικτύωσης. Είναι πραγματικά συναρπαστικό να βλέπεις τον περίπλοκο ιστό των επίγειων δικτύων σε αστικές περιοχές που επιτρέπουν την απρόσκοπτη

πρόσβαση σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Επιπλέον, τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας διαθέτουν την ικανότητα να προσφέρουν εκτεταμένη κάλυψη και αδιάλειπτη συνδεσιμότητα, ακόμη και στις πιο απομονωμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των επικοινωνιών UAV έχει τη δυνατότητα να ενισχύσει σημαντικά τις τρέχουσες κυψελοειδείς επικοινωνίες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αποκατάσταση των υπηρεσιών και να προσφέρει ανακούφιση σε περιοχές με έντονη συμφόρηση, διατηρώντας παράλληλα το κόστος υπό έλεγχο. Σήμερα, είναι προφανές ότι υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση από τις επιστημονικές κοινότητες για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής δικτύου που θα περιλαμβάνει το διαστημικό δίκτυο, το εναέριο δίκτυο και το επίγειο δίκτυο. Οι ελεγκτές δικτύωσης που καθορίζονται από λογισμικό προσφέρουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης συμπεριφορών δικτύου και διαχείρισης πόρων δικτύου με ευέλικτο και ευκίνητο τρόπο. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη διασύνδεση διαστήματος-αέρα-εδάφους, όπως τονίζεται από τους Liu και συν. (2015).

Δεδομένων των διακριτών χαρακτηριστικών των διαφόρων τμημάτων, συμπεριλαμβανομένων των μοναδικών προτύπων επικοινωνίας τους και των ποικίλων συσκευών δικτύου με συγκεκριμένες λειτουργίες, είναι επιτακτική ανάγκη οι διεπαφές ελέγχου και επικοινωνίας των ελεγκτών SDN να προσαρμόζονται ανάλογα σε κάθε τμήμα. Το διαστημικό δίκτυο αποτελείται από διάφορους δορυφόρους ή αστερισμούς που καταλαμβάνουν διαφορετικές τροχιές, συμπεριλαμβανομένης της γεωστατικής γήινης τροχιάς, της χαμηλής γήινης τροχιάς και της μέσης γήινης τροχιάς. Αυτές οι τροχιές κυμαίνονται σε απόσταση από 35786km έως 8000-20000km. Επιπλέον, το δίκτυο περιλαμβάνει επίγειους σταθμούς και κέντρα ελέγχου λειτουργίας του δικτύου. Δορυφόροι διαφόρων τροχιών, τύπων και ιδιοτήτων μπορούν να ενωθούν για να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο διαστημικό δίκτυο. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιεί διαδορυφορικές ζεύξεις, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής διανομής και μετάδοσης για να ενισχύσει τη συνολική χωρητικότητά του. Επιπλέον, μέσω της δημιουργίας συνδέσεων δορυφόρου-προς-UAV και δορυφόρου-προς-εδάφους, δημιουργούνται απρόσκοπτες συνδέσεις με γειτονικούς δορυφόρους και επίγεια κυψελοειδή δίκτυα. Το διαστημικό δίκτυο έχει τη δυνατότητα να προσφέρει εκτεταμένη παγκόσμια κάλυψη στη Γη, παρέχοντας βασικές υπηρεσίες διάσωσης έκτακτης ανάγκης, πλοήγησης, παρατήρησης της γης και επικοινωνίας/μεταφοράς. Μπορεί κανείς να φανταστεί ένα μέλλον στο οποίο η Γη θα περιβάλλεται από έναν

τεράστιο αριθμό δορυφόρων. Ωστόσο, η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των δορυφόρων και του επίγειου τμήματος παρουσιάζει σημαντικά εμπόδια, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών απωλειών διαδρομής στο ελεύθερο διάστημα και εξασθένησης στην τροπόσφαιρα, που οδηγούν σε αξιοσημείωτες καθυστερήσεις. Η αξιοποίηση υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων είναι απαραίτητη για την παροχή υπηρεσιών χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής ταχύτητας, όπως αποδεικνύεται από τη ζώνη C και τη ζώνη Ka (Zhao et al., 2018).

Η επικοινωνία μεταξύ του δορυφόρου και του UAV είναι εξαιρετικά σημαντική για τη δημιουργία του ολοκληρωμένου δικτύου διαστήματος-αέρος-εδάφους. Το κανάλι δορυφόρου προς UAV βασίζεται κυρίως στην επικοινωνία μέσω οπτικής επαφής και είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην εξασθένηση λόγω βροχής, ιδίως όταν λειτουργεί στη ζώνη Ka και σε υψηλότερες συχνότητες. Λαμβάνοντας υπόψη τις ποικίλες εφαρμογές και τον εξελιγμένο εξοπλισμό, το UAV διαθέτει την ικανότητα να εγκαθιστά επικοινωνία με δορυφόρους σε διάφορες τροχιές κατά την πλοήγηση. Συνήθως, ο γεωσύγχρονος δορυφόρος χρησιμοποιείται για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ δορυφόρων και UAV, χάρη στη σταθερή του θέση σε σχέση με τη γη. Προκειμένου να δημιουργηθεί μια απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ ενός UAV και ενός δορυφόρου, είναι επιτακτική ανάγκη η ακριβής ευθυγράμμιση της χωρικής δέσμης που εκπέμπεται από το UAV προς τον προοριζόμενο δορυφόρο, εξασφαλίζοντας ακριβή κατευθυντική ευθυγράμμιση. Ωστόσο, οι συνεχείς ελιγμοί των UAV έχουν ως αποτέλεσμα συχνές προσαρμογές στον προσανατολισμό τους, οι οποίες με τη σειρά τους έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ευθυγράμμιση της χωρικής δέσμης που συνδέει το UAV με τον δορυφόρο. Σε ορισμένα σενάρια, όπως η δορυφορική επικοινωνία με τη βοήθεια UAV, είναι επιτακτική ανάγκη το UAV να ευθυγραμμίζει σταθερά και με ακρίβεια τη δέσμη του με τον δορυφόρο-στόχο, ώστε να διασφαλίζεται η αδιάλειπτη επικοινωνία (Zhao et al., 2018).

Στη σφαίρα των εναέριων δικτύων, οι διάφορες μη επανδρωμένες ιπτάμενες πλατφόρμες, όπως τα UAV, τα αερόπλοια ή τα μπαλόνια, ενδέχεται να αντιμετωπίσουν περιορισμούς στα επιχειρησιακά τους ύψη λόγω των περιορισμών SWAP. Συνήθως, ένα UAV είναι εξοπλισμένο με πομποδέκτες για να προσφέρει ευέλικτη πρόσβαση στο διαδίκτυο σε μια συλλογικότητα επίγειων χρηστών, ενώ μια κυψέλη μη επανδρωμένου αεροσκάφους υποδηλώνει την αντίστοιχη περιοχή κάλυψης. Το μέγεθος της κυψέλης drone επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το υψόμετρο, η τοποθεσία, η

ισχύς μετάδοσης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του UAV. Επιπλέον, η έννοια της συστάδας UAV περιλαμβάνει τη δημιουργία συνδέσεων UAV προς UAV για τη διευκόλυνση της συνεργατικής παροχής υπηρεσιών. Το σύνθετο δίκτυο UAV επιτρέπει τη μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ των UAV για την αποφυγή συγκρούσεων και τον υπολογισμό των διαδρομών πτήσης. Επιπλέον, επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε κινητές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ορισμένα UAV είναι εξοπλισμένα με μια σειρά ραδιοδιεπαφών, όπως LTE ή WiFi, προκειμένου να εγκαθιδρύσουν επικοινωνία με υποδομές ή δορυφόρους. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία πυλών που συνδέουν πολυεπίπεδα δίκτυα UAV με άλλα δίκτυα. Το UAV διαθέτει τη δυνατότητα να εγκαθιδρύσει σύνδεση με δορυφόρους μέσω σύνδεσης sky-haul ή να συνδεθεί με το επίγειο σύστημα χρησιμοποιώντας σύνδεση backhaul. Στο επίγειο δίκτυο, το ποικίλο δίκτυο ραδιοπρόσβασης που αποτελείται από μακροκυψέλες και μικρές κυψέλες εξυπηρετεί κινητούς χρήστες όπως κινητά τηλέφωνα, αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, συσκευές IoT και άλλα για ασύρματα δίκτυα 5G (Alzenad et al., 2018).

Επιπλέον, η εκθετική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των κινητών συσκευών μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρωτοποριακή υπολογιστική κινητών άκρων (MEC), επιτρέποντας στα UAV να εκτελούν υπολογιστικές εργασίες, ενώ οι ενσωματωμένοι υπολογιστές αναλαμβάνουν αυτές τις εργασίες. Επιπλέον, οι πληροφορίες στις οποίες υπάρχει τακτική πρόσβαση μπορούν να αποθηκεύονται σε UAV ή σε επίγειες συσκευές και να μεταδίδονται μέσω κυψελών μη επανδρωμένων αεροσκαφών ή μέσω άμεσης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Υπάρχουν δύο τύποι καναλιών μετάδοσης που εμπλέκονται στην ενοποίηση του εναέριου δικτύου και του επίγειου δικτύου: η σύνδεση δεδομένων οπτικής επαφής (LoS) και η δορυφορική σύνδεση δεδομένων. Η ζεύξη δεδομένων οπτικής επαφής επιτρέπει την απευθείας μετάδοση πληροφοριών από το μη επανδρωμένο αεροσκάφος στον επίγειο σταθμό ελέγχου. Η μετάδοση ακολουθεί μια άμεση διαδρομή καθώς οι εκπομπές φωτός ταξιδεύουν χωρίς εμπόδια. Σε αυτόν τον συγκεκριμένο τρόπο μετάδοσης, τα κύματα είναι επιρρεπή στην εύκολη απορρόφηση από τα εμπόδια, γεγονός που την καθιστά μη βέλτιστη για στρατιωτικές εφαρμογές (Zhao et al., 2018).

4.3. Τεχνικές επικοινωνίας

Επί του παρόντος, υπάρχει μια αξιοσημείωτη εστίαση στην εξέταση των δικτύων επικοινωνίας που υποστηρίζονται από UAV, ειδικά στο πεδίο των απροσδόκητων ή προσωρινών συμβάντων. Με τη χρήση φορητών πομποδεκτών και προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, μπορούν να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες για την επίτευξη εκτεταμένης κάλυψης και την ενεργοποίηση πολλαπλών δυναμικών συνδέσεων στις επικοινωνίες UAV. Η βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος επικοινωνίας UAV σε δίκτυα 5G έχει μεγάλη σημασία, καθώς επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών UAV. Οι ειδικοί του τομέα αναγνωρίζουν ευρέως πέντε βασικές τεχνολογίες στο φυσικό επίπεδο. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν την επικοινωνία mmWave, τη μετάδοση NOMA, το γνωστικό ραδιόφωνο και τη συγκομιδή ενέργειας (Lagum et al., 2018).

4.3.1. UAV οδηγούμενα από κυψελωτά δίκτυα mmWave

Είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωρίσουμε ότι τα UAV έχουν τη δυνατότητα να συναντήσουν διαφορετικούς τύπους δεδομένων, όπως φωνή, βίντεο και μεγάλα αρχεία δεδομένων. Αυτό δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τις σημαντικές απαιτήσεις εύρους ζώνης. Η αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης, σε συνδυασμό με τη σπανιότητα του διαθέσιμου φάσματος, τροφοδοτεί την ανάγκη για νέες κατανομές συχνοτήτων. Σε αυτό το συγκεκριμένο πλαίσιο, οι επικοινωνίες mmWave αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως μια εφικτή επιλογή που μπορεί να αξιοποιήσει τους άφθονους μη αδειοδοτημένους πόρους φάσματος στη ζώνη συχνοτήτων mmWave (30-300GHz) για την εκπλήρωση των απαιτήσεων των ασύρματων δικτύων 5G. Δεδομένου του στόχου της διευκόλυνσης της ασύρματης κινητής πρόσβασης με τη βοήθεια UAV για κινητά δίκτυα στο φάσμα mmWave, προκύπτει μια κρίσιμη ανησυχία ως αποτέλεσμα των σημαντικών απωλειών διάδοσης. Σύμφωνα με το νόμο μετάδοσης του Friis, οι απώλειες διαδρομής στον ελεύθερο χώρο αυξάνονται εκθετικά με τη συχνότητα του φορέα, ακολουθώντας ένα πανκατευθυντικό μοτίβο. Ευτυχώς, το συμπαγές μέγεθος των σημάτων mmWave επιτρέπει την ενσωμάτωση πολλαπλών κεραιών σε ένα μικρό UAV, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες της προηγμένης

τεχνολογίας. Χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης δέσμης, μπορεί κανείς να δημιουργήσει με επιτυχία μια συγκεντρωμένη κατευθυντική δέσμη που αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις δυσκολίες που παρουσιάζονται από τις σημαντικές απώλειες διαδρομής και την ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει μια σημαντική διαφορά μεταξύ ενός κυψελοειδούς δικτύου UAV με υποστήριξη mmWave και ενός συμβατικού κυψελοειδούς δικτύου mmWave με σταθερό BS: την κινητικότητα ενός UAV-BS. Η αυξημένη κινητικότητα των UAV επιδεινώνει ορισμένες υφιστάμενες προκλήσεις. Είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωριστεί η σημασία της βελτίωσης του σχηματισμού δέσμης και της εκπαίδευσης παρακολούθησης ώστε να ληφθεί υπόψη η κίνηση των UAV. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να ληφθεί προσεκτικά υπόψη το φαινόμενο Doppler του καναλιού. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η θέση των UAVs και η ικανότητα εντοπισμού των χρηστών συνδέονται στενά μεταξύ τους, όπως τονίζουν οι Zhang και συν. στη μελέτη τους το 2019.

Στην πρωτοποριακή μελέτη τους, οι Xiao και συν. (2016) εισήγαγαν την έννοια του κυψελοειδούς δικτύου mmWave UAV, τονίζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του και προτείνοντας πιθανές λύσεις για μελλοντική εξέλιξη. Ανέλυσαν σχολαστικά μια ιεραρχική δομή βιβλίου κώδικα διαμόρφωσης δέσμης για αποτελεσματική εκπαίδευση και παρακολούθηση διαμόρφωσης δέσμης. Επιπλέον, διερεύνησαν τις δυνατότητες χωρικού διαμερισμού του mmWave πολλαπλής πρόσβασης, προκειμένου να αυξήσουν τη χωρητικότητα του κυψελοειδούς δικτύου. Σε μια πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη από τους Zhu και συν. (2018), ο πρωταρχικός στόχος ήταν να διερευνηθεί διεξοδικά η απόδοση μυστικότητας ενός δικτύου επικοινωνιών χιλιοστομετρικών κυμάτων που χρησιμοποιεί μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV). Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν κανάλια εξασθένησης Nakagami-m και εφάρμοσαν τη διαδικασία Matern Hardcore point για να δημιουργήσουν έναν αξιόπιστο διαχωρισμό μεταξύ τυχαία αναπτυγμένων UAV-BS. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια που παρουσιάζει το μικρό μήκος κύματος, η χρήση των UAV ως κινητών αναμεταδοτών είναι εξαιρετικά σημαντική στις επικοινωνίες mmWave. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης αναμετάδοσης για πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θέσει σημαντικές προκλήσεις.

Στην επιδίωξη αυτού του στόχου, οι Kong και συν. (2017) διεξήγαγαν μια εκτενή μελέτη σχετικά με μια πρωτοποριακή τεχνική αναμετάδοσης UAV που έχει σχεδιαστεί

ειδικά για επικοινωνίες mmWave. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη χρήση ενός UAV αναμετάδοσης για την ακριβή αξιολόγηση των δυναμικών χαρακτηριστικών ποιότητας της ζεύξης, παρέχοντας έτσι πολύτιμες πληροφορίες για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότερης τοποθέτησης της κεραίας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αναμετάδοση UAV παρείχε πιο ακριβείς και αποτελεσματικές λύσεις σε σύγκριση με την υπάρχουσα μέθοδο αναμετάδοσης. Προτάθηκε μια νέα μέθοδος παρακολούθησης καναλιού για ένα σύστημα επικοινωνίας mmWave UAV MIMO. Το σύστημα επικοινωνίας και το σύστημα ελέγχου σχεδιάστηκαν συνεργατικά, με τη διαμόρφωση ενός τρισδιάστατου μοντέλου καναλιού με βάση τις πληροφορίες για την κατάσταση κίνησης του UAV και τις πληροφορίες για το κέρδος του καναλιού.

4.3.2. UAV οδηγούμενα μέσω NOMA

Η NOMA έχει συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον ως κρίσιμη τεχνολογία για τα συστήματα επικοινωνιών 5G, επιτυγχάνοντας εντυπωσιακή φασματική απόδοση μέσω της ενσωμάτωσης της κωδικοποίησης υπέρθεσης στον πομπό και της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC) στους δέκτες. Όσον αφορά τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, το NOMA ξεχωρίζει με την αποτελεσματική φιλοξενία ενός ευρέος φάσματος χρηστών με διαφορετικά πρότυπα κίνησης. Σε αντίθεση με τα σχήματα ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης (OMA), το NOMA χρησιμοποιεί έξυπνα το πεδίο ισχύος για πολλαπλή πρόσβαση, με αποτέλεσμα μια μη ορθογώνια προσέγγιση. Αυτό προσφέρει μια εξορθολογισμένη προσέγγιση για τα UAV για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ενός ευρέος φάσματος επίγειων χρηστών με διαφορετικά επίπεδα ισχύος (Nasir et al., 2019).

Το θεμέλιο της υλοποίησης της NOMA περιστρέφεται γύρω από τη διαφορετικότητα των συνθηκών καναλιού μεταξύ των χρηστών. Πολυάριθμα έργα έχουν συμβάλει σημαντικά στην υλοποίηση της μετάδοσης NOMA για επικοινωνίες με τη βοήθεια UAV. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στο UAV-BS να εξυπηρετεί αποτελεσματικά πολλαπλούς χρήστες που λειτουργούν στον ίδιο φορέα συχνότητας, καθιστώντας το ιδιαίτερα πολύτιμο για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης με μεγάλο όγκο χρηστών. Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Sohail & Leow (2017), το επίκεντρο ήταν ο προσδιορισμός του ιδανικού ύψους ενός UAV-BS με περιστρεφόμενες πτέρυγες

σε ένα σενάριο NOMA δύο χρηστών. Ο στόχος ήταν η μεγιστοποίηση της δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών με ταυτόχρονη τήρηση του περιορισμού του ρυθμού του μεμονωμένου χρήστη. Η μελέτη ανέδειξε επίσης τα πλεονεκτήματα της NOMA έναντι της OMA όσον αφορά τα υποσχόμενα κέρδη. Επιπλέον, οι συγγραφείς ανέπτυξαν μια διατύπωση για το πρόβλημα του αθροιστικού ρυθμού με βάση την κατανομή ισχύος και το υψόμετρο του UAV. Έχουν επίσης εισαγάγει μια μεθοδολογία για περιορισμένη επέκταση της κάλυψης για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ύψους. Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Sharma & Kim (2017), ένα UAV σταθερής πτέρυγας χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη των αναγκών δύο επίγειων χρηστών μέσω της μετάδοσης NOMA στην καθοδική ζεύξη. Οι ερευνητές κατέληξαν στην πιθανότητα διακοπής και για τους δύο χρήστες και επέλεξαν προσεκτικά έναν τρόπο μετάδοσης που θα εξασφάλιζε καλύτερη πιθανότητα διακοπής, προωθώντας έτσι τη δικαιοσύνη των χρηστών. Η προσέγγιση αυτή υποστηρίχθηκε περαιτέρω από τα ευρήματα των Nasir και συν. (2019).

Κατά τη χρήση της μετάδοσης mmWave-NOMA σε σενάρια UAV-BS, το έργο της παρακολούθησης και της παροχής ανατροφοδότησης σε πληροφορίες κατάστασης πλήρους καναλιού μπορεί να θέσει σημαντικές προκλήσεις. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι ερευνητές έχουν επινοήσει συστήματα ανατροφοδότησης που βασίζονται στις πληροφορίες απόστασης και γωνίας του χρήστη για να εξακριβώσουν τη διάταξη του χρήστη. Τα αριθμητικά ευρήματα έδειξαν σαφώς ότι το σχήμα ανατροφοδότησης με βάση τη γωνία του χρήστη υπερτερεί του σχήματος ανατροφοδότησης με βάση την απόσταση του χρήστη. Στη μελέτη τους, οι Nasir και συν. (2019) χρησιμοποίησαν ένα UAV-BS εξοπλισμένο με μια μοναχική κεραία και χρησιμοποίησαν την τεχνική NOMA για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση ενός σημαντικού αριθμού επίγειων χρηστών. Αντιμετώπισαν το έργο της μεγιστοποίησης του ρυθμού με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένου του ύψους πτήσης του UAV, του εύρους δέσμης της κεραίας εκπομπής, της ισχύος και του εύρους ζώνης. Προκειμένου να αντιμετωπίσουν τη μη κυρτή φύση του προβλήματος, οι ερευνητές ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο εντοπισμού διαδρομής. Με επιστημονική προοπτική, οι ερευνητές παρουσίασαν ένα πλαίσιο που ενσωματώνει ένα UAV που χρησιμοποιεί την τεχνολογία MIMO-NOMA. Αυτό επιτρέπει σε ένα UAV με πολλαπλές κεραίες να εγκαθιδρύσει επικοινωνία με πολλούς χρήστες, καθένας από τους οποίους είναι εξοπλισμένος με το δικό του σύνολο κεραίων.

Χρησιμοποιώντας στοχαστική γεωμετρία, χρησιμοποιήθηκε μια χωρική τυχαία διαδικασία για την αποτελεσματική μοντελοποίηση των θέσεων των χρηστών του NOMA. Η προσέγγιση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή εκφράσεων κλειστής μορφής που υπολογίζουν με ακρίβεια την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ζευγαρωμένων χρηστών NOMA. Μια μελέτη που διεξήχθη από τους Y. Liu και συν. το 2019 χρησιμοποίησε μια μέθοδο για την προσομοίωση των θέσεων των UAV και των επίγειων χρηστών σε ένα δίκτυο UAV με χρήση της τεχνολογίας NOMA. Οι ερευνητές προχώρησαν στην αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Χρησιμοποίησαν ένα πλαίσιο μηχανικής μάθησης για να αντιμετωπίσουν το περίπλοκο έργο του προσδιορισμού της ακριβούς τοποθέτησης και κίνησης των UAV εντός ενός τρισδιάστατου χώρου. Πρόσφατα, μια ομάδα ερευνητών, με επικεφαλής τους Pan et al. (2018), ανέπτυξε ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης που ενσωματώνει κωδικοποίηση δικτύου για επικοινωνίες UAV. Το σύστημα επέδειξε υψηλότερο επίπεδο ανθεκτικότητας στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης σε σύγκριση με προηγούμενα πειραματικά ευρήματα. Επιπλέον, υλοποιήθηκε ένα συνεργατικό σύστημα NOMA σε ένα ασύρματο δίκτυο backhaul που χρησιμοποιεί UAVs ως ιπτάμενα BS μικρών κυψελών. Ο στόχος ήταν να βελτιωθούν οι θέσεις των UAVs, η σειρά αποκωδικοποίησης της διαδικασίας NOMA και η δέσμη μετάδοσης για Όπως αποδεικνύεται στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία, είναι προφανές ότι η NOMA είναι μια ευέλικτη και αποτελεσματική τεχνική για την πολυπλεξία πολλαπλών τελικών χρηστών στις επικοινωνίες UAV. Παρ' όλα αυτά, η επιτυχής ενσωμάτωση της NOMA στις επικοινωνίες UAV ενέχει ορισμένες συναφείς δυσκολίες και περιορισμούς, όπως περιγράφεται από τους Pan et al. (2018):

- Η NOMA, γνωστή για την αυξημένη φασματική της απόδοση, ξεχωρίζει ως μια εξελιγμένη τεχνική από την πλευρά του δέκτη που χρησιμοποιεί πολύπλοκο SIC.
- Σε ένα δίκτυο επικοινωνίας UAV, η κατανομημένη ισχύς για κάθε δέκτη και η σειρά αποκωδικοποίησης πρέπει να καθορίζονται με βάση τις πληροφορίες κατάστασης του καναλιού τόσο στους δέκτες όσο και στους πομπούς. Αυτή η διαδικασία εκτίμησης απαιτεί υψηλό επίπεδο ακρίβειας.
- Η πολυπλεξία NOMA πολλαπλών χρηστών στο πεδίο ισχύος αποτελεί πρόκληση όσον αφορά την παρεμβολή ενδιάμεσου επιπέδου. Είναι ζωτικής σημασίας να

αφιερωθούν πρόσθετες προσπάθειες για τον αποτελεσματικό μετριασμό αυτής της παρεμβολής στις επικοινωνίες UAV με NOMA.

- Δεδομένης της δυναμικής φύσης των UAV σε πρακτικά σενάρια, η απόσταση επικοινωνίας μεταξύ του UAV και των επίγειων χρηστών θα αλλάζει συνεχώς με βάση τις ανάγκες σε πραγματικό χρόνο. Η σειρά με την οποία πραγματοποιείται η αποκωδικοποίηση SIC καθορίζεται από τις λαμβανόμενες εντάσεις σήματος των διαφόρων χρηστών, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις θέσεις των UAV (Pan et al., 2018).

4.3.3. Γνωστικά δίκτυα UAV

Σήμερα, ένα πειστικό ζήτημα στα ασύρματα δίκτυα που βασίζονται σε UAV περιστρέφεται γύρω από την ηλικία του ραδιοφάσματος. Ακολουθούν διάφοροι λόγοι που είναι σχετικοί: Έχει αυξηθεί σημαντικά η χρήση σύγχρονων κινητών συσκευών, όπως τα smartphones και τα tablets, στο πεδίο. Επιπλέον, διάφορα ασύρματα δίκτυα, όπως Bluetooth, WiFi, LTE και κυψελοειδή δίκτυα, συνυπάρχουν στις ζώνες φάσματος που χρησιμοποιούνται από τα UAV. Ο έντονος ανταγωνισμός στη χρήση του φάσματος οδηγεί σε μια σημαντική πρόκληση για τις επικοινωνίες UAV: τη σπανιότητα του φάσματος. Συνεπώς, είναι επιτακτική ανάγκη για τις επικοινωνίες UAV να επεκτείνουν την πρόσβαση στο φάσμα τους, χρησιμοποιώντας δυναμικά τις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων (Ding et al., 2018).

Μέχρι σήμερα, πολυάριθμοι ερευνητές και ομάδες τυποποίησης έχουν προτείνει την ενσωμάτωση CR και συστημάτων επικοινωνίας UAV για την ενίσχυση των δυνατοτήτων του φάσματος, γνωστές ως γνωστικές επικοινωνίες UAV. Η έννοια αυτή παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει την απρόσκοπτη συνύπαρξη UAV και επίγειων κινητών συσκευών στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Οι επικοινωνίες UAV-εδάφους μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις παρεμβολής στις υπάρχουσες επίγειες συσκευές λόγω των ισχυρών συνδέσεων οπτικής επαφής που έχουν συνήθως τα UAV με τους επίγειους χρήστες (Ding et al., 2018).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμες επιστημονικές εργασίες που έχουν εξετάσει εκτενώς το σύστημα γνωστικής επικοινωνίας των UAVs. Ως ακαδημαϊκοί, εργάστηκαν για τη βελτιστοποίηση της τροχιάς και της κατανομής ισχύος μετάδοσης

ενός UAV για τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του στη γνωστική επικοινωνία. Στόχος τους ήταν να διασφαλίσουν ότι η παρεμβολή στους κύριους δέκτες παρέμενε κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο. Στη μελέτη τους, οι C. Zhang & Zhang (2016) εισήγαγαν μια μέθοδο διαμοιρασμού φάσματος που αντιμετωπίζει τη συνύπαρξη κυψελοειδών δικτύων μη επανδρωμένων αεροσκαφών και παραδοσιακών επίγειων κυψελοειδών δικτύων. Διερεύνησαν διάφορα σενάρια, συμπεριλαμβανομένου του διαμοιρασμού φάσματος σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο για κυψελοειδή συστήματα ενός σταδίου, καθώς και του διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ κυψελοειδών δικτύων μη επανδρωμένων αεροσκαφών και παραδοσιακών κυψελοειδών δικτύων δύο διαστάσεων (2D). Εφαρμόζοντας τις αρχές της θεωρίας της στοχαστικής γεωμετρίας, οι ερευνητές μπόρεσαν να εξάγουν ρητές εκφράσεις για την πιθανότητα κάλυψης των κυψελών των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Μέσω της ανάλυσής τους, προσδιόρισαν τη βέλτιστη πυκνότητα των UAV-BS για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης (Zhang & Zhang, 2016).

5. Μελλοντικές προοπτικές σε ασύρματα δίκτυα

Παρά τις δυνατότητες που παρέχει ο συνδυασμός των UAV με τις τεχνικές 5G, η έρευνα σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και πολλά ανοιχτά ζητήματα χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Σε αυτή την ενότητα, ρίχνουμε φως στις νέες ευκαιρίες στην αναδυόμενη αρχιτεκτονική δικτύων και επισημαίνουμε ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα για μελλοντικές κατευθύνσεις (Gharibi et al., 2016).

- Αποδοτικότητα φόρτισης - κατανάλωση ενέργειας

Ο ενεργειακός περιορισμός αποτελεί σημαντικό περιορισμό στα σενάρια επικοινωνίας UAV. Παρόμοια με τις εξελίξεις στις τεχνολογίες μπαταριών, όπως οι βελτιωμένες μπαταρίες ιόντων λιθίου και οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, η συλλογή ενέργειας αξιοποιείται για την παράταση της διάρκειας πτήσης με τη χρήση φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο, η απόδοση της συγκομιδής ενέργειας είναι συγκριτικά χαμηλότερη ως αποτέλεσμα της αυξημένης απόστασης και των απρόβλεπτων ενεργειακών αφίξεων. Η βελτίωση της αποδοτικότητας της φόρτισης έχει γίνει αντικείμενο σημαντικού ενδιαφέροντος, με τους ερευνητές να εστιάζουν σε νέες τεχνολογίες παροχής ενέργειας. Σε αυτές περιλαμβάνονται τεχνικές όπως η διαμόρφωση δέσμης ενέργειας μέσω μεθόδων πολλαπλών κεραιών και η κατανεμημένη ασύρματη μεταφορά ενέργειας πολλαπλών σημείων (Gharibi et al., 2016).

- Επικοινωνίες UAV προς UAV και δορυφόρου προς UAV

Προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπηρεσίες επικοινωνίας για ασύρματες συσκευές γείωσης σε μια τεράστια περιοχή, ένα σμήνος UAV κατασκευάζει ένα πολύπλοκο δίκτυο που επιτρέπει στις συσκευές να εκπέμπουν και να λαμβάνουν πακέτα, το καθένα με τη δική του τροχιά. Παρ' όλα αυτά, ως μελετητής στον τομέα αυτό, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η σύνδεση μεταξύ γειτονικών UAV μπορεί μερικές φορές να διακοπεί ως αποτέλεσμα της υψηλής ταχύτητας κινητικότητάς τους και της απαίτησης να διατηρούν συνεχή επικοινωνία με τους χρήστες εδάφους. Σε

αυτό το σενάριο, τα συμβατικά πρωτόκολλα δρομολόγησης αποδεικνύονται αναποτελεσματικά στο FANET. Ο έλεγχος της πτήσης των UAV για τη διασφάλιση της βέλτιστης παροχής υπηρεσιών είναι ένα πολύπλοκο και απαιτητικό έργο. Επιπλέον, η ασφαλής λειτουργία των UAV απαιτεί προσεκτική εξέταση της αποφυγής συγκρούσεων, ιδίως όταν πολλά UAV συνεργάζονται. Ωστόσο, τα σύγχρονα μοντέλα δορυφορικών καναλιών σε UAV δεν διαθέτουν ολοκληρωμένα αποτελέσματα διάδοσης. Η μελέτη των μοντέλων διάδοσης καναλιών για τις επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων και UAV βρίσκεται ακόμη στα σπάργαλα και συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος για μελλοντική διερεύνηση (Reka et al., 2019).

- Αλληλεπίδραση διαφορετικών μερών

Η διασφάλιση της απρόσκοπτης ολοκλήρωσης μεταξύ του διαστημικού δικτύου, του εναέριου δικτύου και του επίγειου κυψελοειδούς δικτύου αποτελεί κρίσιμο μέλημα για το ολοκληρωμένο δίκτυο διαστήματος-αέρα-εδάφους. Είναι επιτακτική ανάγκη να διερευνηθούν καινοτόμες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Είναι σημαντικό να εξεταστεί το ενδεχόμενο δημιουργίας κινήτρων για συνεργασία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων και η εφαρμογή σχεδίων πρωτοκόλλων πολλαπλών επιπέδων για την εξασφάλιση αξιόπιστων συνδέσεων. Σε ένα εξαιρετικά περίπλοκο περιβάλλον δικτύου, είναι ζωτικής σημασίας η δημιουργία προσαρμόσιμων και ευέλικτων διεπαφών για τα τμήματα αυτά ώστε να συνεργάζονται και να αλληλεπιδρούν αποτελεσματικά. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη ανταλλαγή πληροφοριών και τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών δικτύων, με αποτέλεσμα σημαντικά πλεονεκτήματα. Καθώς το φάσμα των υπηρεσιών συνεχίζει να διευρύνεται, ο ρόλος των UAV ως ενδιάμεσων μεταξύ των διαφόρων δικτύων καθίσταται κρίσιμος. Σε αυτό το περίπλοκο δίκτυο, είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν μηχανισμοί διασύνδεσης που να εγγυώνται την αξιοπιστία των συνδέσεων (Ansari et al., 2018).

- Συνέργεια μεταξύ UAVs και συστημάτων IoT

Η έννοια του Διαδικτύου των UAV (IoUAV) εισήχθη αρχικά από τους Zhu και συν. (2018). Διευκολύνει τη σύγκλιση του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs) μέσω μιας δυναμικής ολοκλήρωσης. Με την ταχεία ανάπτυξη, τον εύκολο προγραμματισμό, την πλήρως ελεγχόμενη κινητικότητα και την επεκτασιμότητά τους, τα IoUAVs προσφέρουν μια πολλά

υποσχόμενη λύση για το μελλοντικό οικοσύστημα IoT. Αυτό το πλαίσιο επιτρέπει την απρόσκοπτη αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων, UAVs και συσκευών IoT, επιτρέποντας την πανταχού παρούσα ανταλλαγή πληροφοριών και τον ακριβή συντονισμό μεταξύ ενός στόλου UAVs. Παρόλο που τα IoUAV έχουν τεράστια δυνητικά οφέλη, η αντοχή και η αξιοπιστία των επιδόσεών τους συχνά παρεμποδίζεται από την περιορισμένη χωρητικότητα των μπαταριών τους. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από πρακτικούς περιορισμούς SWAP, με αποτέλεσμα σχετικά μικρά μεγέθη μπαταριών. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα IoUAV απαιτούν πρόσθετη ενέργεια για την κινητικότητα και την αποφυγή συγκρούσεων. Αυτή η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικά υψηλότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παράδοση δεδομένων και βασίζεται σε συχνές αλλαγές τροχιάς, ιδίως στα βιομηχανικά IoUAV. Ως εκ τούτου, η καθιέρωση μιας αρμονικής ενεργειακής σχέσης μεταξύ των γωνιών UAV και των συστημάτων IoT είναι μια πολύπλοκη προσπάθεια. Μια άλλη κρίσιμη πτυχή αφορά την αξιοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της κινητικότητας των UAV και της κινητικότητας των χρηστών για την ενίσχυση της αποδοτικότητας και την ενίσχυση της κερδοφορίας των ασύρματων δικτύων. Επιπλέον, ο συνδυασμός του IoT και των UAV είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο μελλοντικής τεχνολογίας που θα μπορούσε να φέρει επανάσταση στον σημερινό τρόπο ζωής μας (Sanjab et al., 2017).

- Ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικής ζωής

Το ενσωματωμένο δίκτυο είναι ευάλωτο σε πιθανές κακόβουλες επιθέσεις, καθώς αποτελείται από ανοικτές συνδέσεις και δυναμικές τοπολογίες που καλύπτουν μια περιοχή κρίσιμης σημασίας. Αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν τον κίνδυνο σκόπιμης παρεμβολής ή αποσύνδεσης. Στα δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV, η διασφάλιση της ασφάλειας είναι υψίστης σημασίας λόγω της αφύλακτης φύσης των UAV, που τα καθιστά ευάλωτα σε σύλληψη ή επίθεση. Προκειμένου να μετριαστεί ο κίνδυνος μη εξουσιοδοτημένων αλλαγών, είναι επιτακτική ανάγκη να εφαρμοστεί ένας ισχυρός και αποτελεσματικός μηχανισμός ασφαλείας που να μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά διάφορες μορφές επιθέσεων, όπως η υποκλοπή και οι επιθέσεις man-in-the-middle. Προτείνονται λύσεις τεχνητής νοημοσύνης για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ασφαλείας σε περιπτώσεις χρήσης εφαρμογών κινητών UAV, ενώ παράλληλα υποστηρίζεται ένα παιχνίδι απαγόρευσης δικτύου μηδενικού αθροίσματος

για την προσομοίωση πραγματικών απειλών κυβερνοασφάλειας σε συστήματα παράδοσης UAV. Στην εκτεταμένη σφαίρα των ολοκληρωμένων δικτύων διαστήματος-αέρα-εδάφους, το κρίσιμο έργο της διαχείρισης των πόρων και του ελέγχου των λειτουργιών του δικτύου πέφτει στους ελεγκτές SDN. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να διασφαλιστούν αυτοί οι ελεγκτές από πλήθος κυβερνοεπιθέσεων, καθώς οι αντίπαλοι μπορούν να εκμεταλλευτούν ευπάθειες για να υποκλέψουν δεδομένα και να χειραγωγήσουν σήματα ελέγχου που μεταδίδονται μέσω των ραδιοζεύξεων των συστημάτων UAV. Οι κυβερνοεπιθέσεις σε συστήματα UAV και η κυβερνοασφάλεια αποτελούν σημαντική πρόκληση για την πρακτική εφαρμογή των UAV. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική η ανάγκη προληπτικού σχεδιασμού στρατηγικών και αντιμέτρων για την αποτελεσματική καταπολέμηση των κακόβουλων κυβερνοεπιθέσεων (Sanjab et al., 2017).

- Ολοκληρωμένα δίκτυα οχημάτων διαστήματος-αέρος-εδάφους

Η ενσωμάτωση των επικοινωνιών αέρος-εδάφους και χώρου-εδάφους στα δίκτυα οχημάτων προσφέρει τη δυνατότητα για αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες οχημάτων σε αστικές/προαστιακές περιοχές μέσω επίγειων δικτύων. Επιπλέον, επιτρέπει την απρόσκοπτη διασύνδεση μεταξύ οχημάτων σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές μέσω δορυφορικών δικτύων, ενώ παράλληλα επεκτείνει την κάλυψη των υποδομών και διευκολύνει τη συλλογή πληροφοριών δικτύου σε υποανάπτυκτες ή συμφορημένες περιοχές μέσω της χρήσης UAV. Προκειμένου να ενισχυθεί η απόδοση του συστήματος, διατυπώθηκε μια πρόταση για την ενσωμάτωση των UAV σε επίγεια δίκτυα οχημάτων. Στη σφαίρα των επικοινωνιών διαστήματος-αέρα-εδάφους, η δυναμική φύση των δορυφόρων και των UAVs θα επηρεάζει σταθερά το κανάλι διάδοσης, επηρεάζοντας παράγοντες όπως η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου και το φαινόμενο Doppler. Μια αποτελεσματικά σχεδιασμένη αρχιτεκτονική δικτύου είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των ζητημάτων διασύνδεσης μεταξύ δικτύων διαστήματος-αέρα-εδάφους και οχημάτων. Προκειμένου να ενισχυθεί η αποδοτικότητα της παράδοσης δεδομένων, είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθεί ένας ολοκληρωμένος μηχανισμός ελέγχου που διαχειρίζεται αποτελεσματικά την κατανομή του φάσματος, τον προγραμματισμό συνδέσεων και τον σχεδιασμό πρωτοκόλλων για το κανάλι διάδοσης διαστήματος-αέρα-εδάφους (Sanjab et al., 2017).

- Ενσωμάτωση της δικτύωσης, των υπολογιστών και της προσωρινής αποθήκευσης

Για να κατανοήσουμε πλήρως την πολυπλοκότητα της δικτύωσης, της πληροφορικής και της προσωρινής αποθήκευσης σε ασύρματα δίκτυα, είναι ζωτικής σημασίας να ακολουθήσουμε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που να εξετάζει και τις τρεις τεχνικές μαζί. Με τον προσεκτικό σχεδιασμό ενός συστηματικού πλαισίου, μπορούμε να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικά τις μοναδικές απαιτήσεις της επόμενης γενιάς του έξυπνου IoT. Αυτό περιλαμβάνει την εξεύρεση ισορροπίας μεταξύ του λειτουργικού κόστους, όπως η κατανάλωση ενέργειας, και των πλεονεκτημάτων απόδοσης, όπως η μείωση της καθυστέρησης. Έχει διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική για την ενσωμάτωση λογισμικού, που περιλαμβάνει τη δικτύωση, την προσωρινή αποθήκευση και τον υπολογισμό. Αυτή η αρχιτεκτονική περιγράφει σχολαστικά τα βασικά στοιχεία των επιπέδων δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης. Με επιστημονικό τρόπο, οι He και συν. (2017) διατύπωσαν μια πρόταση για μια προσέγγιση ενίσχυσης μεγάλων δεδομένων βαθιάς μάθησης. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στη διευκόλυνση της δυναμικής ενορχήστρωσης της δικτύωσης, της προσωρινής αποθήκευσης και των υπολογιστικών πόρων. Απώτερος στόχος είναι η ενίσχυση της απόδοσης των εφαρμογών έξυπνης πόλης. Οι τεχνολογίες δικτύωσης, υπολογισμού και προσωρινής αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν σημαντικά την υφιστάμενη ανάπτυξη του IoT. Ωστόσο, αυτά τα νέα χαρακτηριστικά δημιουργούν επίσης απρόβλεπτες προκλήσεις που δεν μπορούν να επιλυθούν αποτελεσματικά με τη χρήση συμβατικών μεθόδων που έχουν σχεδιαστεί για συστήματα IoT χαμηλής ταχύτητας. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική ενσωμάτωση των υφιστάμενων δυνατοτήτων για την αντιμετώπιση θεμελιωδών προβλημάτων στο έξυπνο IoT εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας (He et al., 2017).

- Περιβαλλοντική αβεβαιότητα

Δεδομένου ότι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα ενδέχεται να προσφέρουν μια ποικιλία πόρων επικοινωνίας, υπολογισμού και προσωρινής αποθήκευσης, καθίσταται ζωτικής σημασίας η εξασφάλιση της αποδοτικής χρήσης αυτών των πόρων, προκειμένου να υποστηριχθεί αποτελεσματικά μια σειρά εφαρμογών μεγάλων

δεδομένων. Στη μελέτη τους, οι Zhang και συν. (2018) εξέτασαν την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεγάλων δεδομένων και του οικοσυστήματος 5G, υπογραμμίζοντας τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται για να διευκολύνουν την ανάπτυξη υπηρεσιών, περιεχομένου και λειτουργιών στα άκρα του δικτύου και στα άκρα του δικτύου δεδομένων. Τόνισαν τη σημασία της απόκτησης δεδομένων και της προσωρινής αποθήκευσης περιεχομένου στα άκρα, αξιοποιώντας τη δύναμη των μεγάλων δεδομένων. Δεδομένων των δυνατοτήτων των μεγάλων δεδομένων δικτύου, είναι δυνατή η αξιοποίησή τους για την εκπαίδευση προγνωστικών μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια μελλοντικά συμβάντα δικτύου. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή προληπτικών μέτρων για την πρόληψη αποτυχιών ή διακοπών υπηρεσιών δικτύου. Για τη διευκόλυνση της βέλτιστης λήψης αποφάσεων και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, είναι ζωτικής σημασίας η ακριβής πρόβλεψη παραγόντων όπως η χωροχρονική κατανομή της κυκλοφορίας, η δημοτικότητα των υπηρεσιών/του περιεχομένου και η κινητικότητα των χρηστών (Zhang et al., 2018).

Επιπλέον, παραμένουν αρκετές άλυτες ανησυχίες σχετικά με τη σκοπιμότητα δημιουργίας επικοινωνιών με UAV, εκτός από τις προαναφερθείσες πτυχές. Σε ορισμένα σενάρια εφαρμογών, όπως σε δασικά περιβάλλοντα, μπορεί να υπάρχει πληθώρα εμποδίων και διασποράς που υπάρχουν μεταξύ του UAV και των επίγειων χρηστών. Συνεπώς, είναι ζωτικής σημασίας η διαμόρφωση ενός πιο εκτεταμένου μοντέλου καναλιού αέρα-εδάφους που λαμβάνει υπόψη μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος, το φύλλωμα και το αστικό περιβάλλον. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί μια συναρπαστική ευκαιρία για πρόσθετη έρευνα. Υπάρχει ένα αξιοσημείωτο κενό στην έρευνα όσον αφορά τη βέλτιστη ομαδοποίηση χρηστών και τους αλγορίθμους αντιστοίχισης χρηστών σε συστήματα NOMA πολλαπλών χρηστών που χρησιμοποιούν UAV. Επιπλέον, μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας η καθιέρωση νέων συστημάτων για τη διαχείριση της κυκλοφορίας μη επανδρωμένων αεροσκαφών, προκειμένου να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ο αυξανόμενος αριθμός UAV χαμηλού υψομέτρου. Τα συστήματα αυτά θα έχουν κρίσιμη λειτουργία στον συντονισμό του σχεδιασμού διαδρομής και στην αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ πολλαπλών UAV. Το σύστημα συστοιχίας κεραιών που βασίζεται σε UAV αντιπροσωπεύει μια σημαντική επανάσταση στον τομέα, παρέχοντας εξαιρετικούς ρυθμούς δεδομένων και ελάχιστο χρόνο εξυπηρέτησης. Αυτό το πρωτοποριακό σύστημα αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις προκλήσεις που θέτουν οι περιορισμοί

χώρου, καθώς επιτρέπει τη χρήση απεριόριστου αριθμού στοιχείων κεραίας, συγκεκριμένα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Η τεχνολογία blockchain, η οποία αναφέρεται ως aerial blockchain, έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει πλήρως τις μεθόδους διασφάλισης της ιδιωτικότητας και διασφάλισης της ακεραιότητας των δεδομένων στην επικοινωνία UAV. Παρέχει μια αξιόπιστη και ευέλικτη λύση για τη διατήρηση των προτιμήσεων απορρήτου στη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ UAV και GCS (Yang et al., 2018).

5.1. 5G σε ρομποτικές επικοινωνίες

Τα δικτυωμένα ρομποτικά συστήματα αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος στους ακαδημαϊκούς κύκλους. Στην παρούσα εργασία θα διερευνήσουμε την εφαρμογή των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) ή πέραν αυτής (B5G) σε ρομποτικά συστήματα, λαμβάνοντας υπόψη τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα που προσφέρουν. Τα χαρακτηριστικά του υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, της χαμηλής καθυστέρησης και της αξιόπιστης σταθερότητας στα δίκτυα 5G ή B5G παρουσιάζουν πολλά υποσχόμενες προοπτικές για την πρόοδο των δικτυωμένων ρομποτικών συστημάτων. Η συζήτησή μας ξεκινά με την ταξινόμηση των επίγειων ρομπότ και τις συγκεκριμένες καταστάσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται. Κατά την εξέταση των ρομποτικών δικτύων επικοινωνίας, είναι σημαντικό να σημειωθούν τα διακριτικά χαρακτηριστικά τους σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα (Liu et al., 2021):

Ολοκληρωμένη τοποθέτηση και επικοινωνία. Ο ρομποτικός εντοπισμός είναι μια κρίσιμη πτυχή που επιτρέπει στα ρομπότ να εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες, αποτελώντας ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο για τη νοημοσύνη των ρομπότ. Οι τρέχουσες μέθοδοι, αν και αποτελεσματικές, συχνά δίνουν προτεραιότητα στον εντοπισμό έναντι της πολυπλοκότητας του υλικού. Δυστυχώς, δεν έχει γίνει μεγάλη έρευνα σε στρατηγικές κυψελοειδούς υποστήριξης που μπορούν να επιτύχουν τόσο αποτελεσματικό εντοπισμό όσο και μείωση του κόστους. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ενσωματωθεί η επικοινωνία και η τοπική προσαρμογή, καθώς υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί και προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

1) Τα ρομπότ εργασίας έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε περιοχές με περιορισμένη ή καθόλου επικοινωνία.

2) Η μέθοδος εγκαθίδρυσης επικοινωνίας μεταξύ σταθμών βάσης (BS)/σημείων πρόσβασης (AP) και ρομπότ ενισχύει την ακρίβεια του εντοπισμού των ρομπότ, αντιμετωπίζοντας τα ζητήματα της συσσώρευσης σφαλμάτων και του υψηλού κόστους που σχετίζονται με τους ενσωματωμένους αισθητήρες.

3) Το επίπεδο επικοινωνίας μεταξύ ενός BS/AP και του ρομπότ παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του αριθμού των ανταλλαγών που μπορούν να πραγματοποιηθούν, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του υλικού του ρομπότ (Liu et al., 2021).

- Ενσωμάτωση της έννοιας του δυναμικού αυτοπροσδιορισμού. Στα ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας με δυνατότητα 5G/B5G, η ικανότητα των ρομπότ να προσαρμόζονται γρήγορα στο διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον τους είναι ζωτικής σημασίας, γεγονός που τα διαφοροποιεί από τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας. Είναι επιτακτική ανάγκη τα ρομπότ να λαμβάνουν αυτόνομα αποφάσεις, μαθαίνοντας από το άγνωστο περιβάλλον, προκειμένου να προσαρμόζουν γρήγορα τις στρατηγικές ελέγχου τους. Επιπλέον, η πολιτική λήψης αποφάσεων θα πρέπει να εστιάζει στην ανάπτυξη του υπερμετρικού δικτύου και όχι αποκλειστικά στην επιδίωξη άμεσων οφελών στα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας.
- Ποικίλη κινητικότητα και ποικίλες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Στα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνίας, η κινητικότητα των κινητών χρηστών συχνά δεν λαμβάνεται υπόψη και οι δυναμικές ανάγκες τους για ποιότητα υπηρεσιών (QoS) συνήθως απλοποιούνται ως σταθερή τιμή. Αυτό φυσικά μετατρέπει το δυναμικό σενάριο σε στατικό. Κατά την εξέταση των ποικίλων αναγκών κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσιών στα ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας, η συμπερίληψη του δυναμικού σχεδιασμού τροχιάς και της διαχείρισης πόρων προσθέτει ένα επίπεδο πολυπλοκότητας που απαιτεί ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων, σε αντίθεση με τα στατικά δίκτυα επικοινωνίας.
- Η ικανοποίηση των απαιτήσεων χαμηλής καθυστέρησης για τον τηλεχειρισμό μη επανδρωμένων ρομπότ είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση βέλτιστης απόδοσης και απρόσκοπτης λειτουργίας. Δεδομένης της δυσανεξίας στον κίνδυνο

και της ευαισθησίας στις καθυστερήσεις των ρομπότ με δυνατότητα 5G/B5G, καθίσταται ζωτικής σημασίας η εξασφάλιση αδιάλειπτης και πανταχού παρούσας συνδεσιμότητας. Αυτό είναι απαραίτητο για την παροχή εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών χαμηλής καθυστέρησης για επίγεια ρομπότ. Η διασφάλιση της αποφυγής συγκρούσεων και η διατήρηση της επιχειρησιακής ασφάλειας είναι υψίστης σημασίας, όπως τονίζεται από τους Liu και συν. (2021).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αξιοποίηση της τεχνολογίας 5G/B5G σε ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας έχει καταστεί κεντρικό σημείο ενδιαφέροντος στον τομέα της έρευνας στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Το πρώτο υπαίθριο ρομποτικό δίκτυο επικοινωνίας παρουσιάζει την εφαρμογή των δικτύων 5G/B5G σε περιβάλλον αυτόνομης παράδοσης. Βιομηχανικές εταιρείες όπως η Amazon, η DHL, η Jingdong και η UPS έχουν εφαρμόσει με επιτυχία αυτόνομα ρομπότ για την αποτελεσματική παράδοση αγαθών, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας. Στην παρούσα μελέτη, εμβαθύνουμε στη σφαίρα των δικτύων επικοινωνίας ρομπότ σε εξωτερικούς χώρους, εξετάζοντας συγκεκριμένα ένα σενάριο κινητής αυτόνομης οδήγησης. Η κύρια εστίασή μας είναι στις επικοινωνίες R2I, όπου χρησιμοποιούμε μονάδες στην άκρη του δρόμου ως μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση για τους παραδοσιακούς αισθητήρες και τα συστήματα ραντάρ επί του οχήματος. Το τρίτο υπαίθριο ρομποτικό δίκτυο επικοινωνίας παρουσιάζει ένα εξελιγμένο σενάριο επιτήρησης που χρησιμοποιεί επίγεια ρομπότ. Τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διασταύρωση για την παρακολούθηση των πληροφοριών κυκλοφορίας και τη μετάδοση των συλλεγόμενων δεδομένων στο κέντρο ελέγχου (Liu et al., 2021).

Επιπλέον, τα ρομπότ διαθέτουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε δημόσιους χώρους με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματος των πεζών ή τη συλλογή βιολογικών δειγμάτων για να βοηθήσουν στην παρακολούθηση πανδημιών. Επιπλέον, μπορούν να εξοπλιστούν με προηγμένες δυνατότητες αναγνώρισης προσώπου για να βοηθήσουν στην επιτήρηση και την πρόληψη εγκληματικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, τα ρομπότ διαθέτουν εξαιρετική ικανότητα να λειτουργούν ως ποιμενικά σκυλιά, επιτρέποντάς τους να λαμβάνουν ανεξάρτητες αποφάσεις. Η αρχική υλοποίηση ενός δικτύου επικοινωνίας ρομπότ εσωτερικού χώρου παρουσιάζει τη χρήση προηγμένης τεχνολογίας 5G/B5G για την άψογη επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών οικιακών ρομπότ. Αυτά τα ρομπότ περιλαμβάνουν μια ποικιλία

εφαρμογών, από ρομπότ καθαρισμού δαπέδων μέχρι ρομποτικούς σερβιτόρους σε εστιατόρια και ρομποτικούς ταξιθέτες σε εμπορικά κέντρα. Τα ρομπότ πρέπει να σχεδιάζουν σχολαστικά τις διαδρομές τους μέσα στο δυναμικό εσωτερικό περιβάλλον, ώστε να εγγυώνται μια αξιόπιστη σύνδεση επικοινωνίας με το σταθμό βάσης ή το σημείο πρόσβασης. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να αποφευχθούν τυχόν περιπτώσεις φυσικής επαφής μεταξύ των επίγειων ρομπότ ή μεταξύ των ρομπότ και των εμποδίων, ανεξάρτητα από τα δυναμικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (Liu et al., 2021).

Στη σφαίρα του δεύτερου δικτύου επικοινωνίας εσωτερικών ρομπότ, τα ρομπότ διαθέτουν τη δυνατότητα να αναλαμβάνουν εργασίες που ενδέχεται να θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ευημερία εντός του έξυπνου εργοστασίου. Επιπλέον, η χρήση των ρομπότ παλετοποίησης επιτρέπει υψηλότερο επίπεδο αποδοτικότητας και απρόσκοπτες λειτουργίες στην παραγωγική διαδικασία. Το τρίτο εσωτερικό δίκτυο επικοινωνίας ρομπότ παρουσιάζει μια πρωτοποριακή διαδικασία απομακρυσμένης χειρουργικής επέμβασης που εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Αυτή η πρωτοποριακή τεχνική χρησιμοποιεί ρομπότ παλετοποίησης και κυψελοειδή δίκτυα για την επίτευξη εξαιρετικών αποτελεσμάτων. Έτσι, οι γιατροί που απασχολούνται σε μητροπολιτικές ιατρικές εγκαταστάσεις μπορούν να πραγματοποιούν χειρουργικές επεμβάσεις σε άτομα που ζουν σε περιοχές όπου η εγκατάσταση καλωδίων διαδικτύου αποτελεί πρόκληση ή δεν είναι εφικτή. Επιπλέον, τα κινητά ρομπότ στα έξυπνα νοσοκομεία διαθέτουν την ικανότητα να λειτουργούν ως ρομποτικοί γιατροί, παρέχοντας ιατρική περίθαλψη και διεξάγοντας απομακρυσμένη παρακολούθηση. Αυτά τα ρομπότ έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν κρίσιμα βιολογικά δείγματα και δεδομένα από τους ασθενείς, όπως καρδιακό ρυθμό, θερμοκρασία σώματος και αρτηριακή πίεση (Liu et al., 2021).

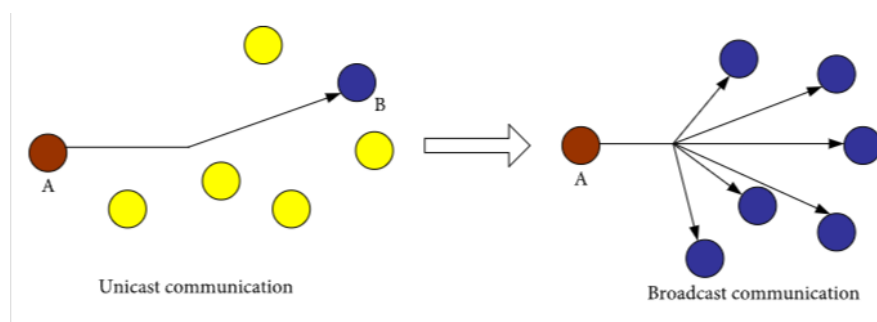
5.2. Επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή D2D

Η τεχνολογία D2D επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ τερματικών, ενισχύοντας τη συνδεσιμότητα και διευρύνοντας τις επιλογές πρόσβασης στο δίκτυο. Επί του παρόντος, η επικοινωνία D2D μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ συσκευών είτε με τη χρήση συσκευών δικτύου. Αρκετές

μέθοδοι επικοινωνίας D2D εξαρτώνται από συσκευές δικτύου για την αντιμετώπιση των περιορισμών των τερματικών. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G χρησιμοποιείται για την επίτευξη αυτής της λειτουργικότητας μεταξύ συσκευών. Η τεχνολογία D2D διευκολύνει την ταχεία μετάδοση δεδομένων εντός του τρέχοντος δικτύου κυψελοειδών επικοινωνιών, ιδίως όταν οι συσκευές βρίσκονται κοντά και οι συνθήκες καναλιού είναι άριστες. Επί του παρόντος, η τεχνολογία επικοινωνίας D2D έχει τη δυνατότητα να επιτύχει υψηλή απόδοση με την αξιοποίηση των πόρων συχνότητας του συστήματος πολυπλεξίας. Επιπλέον, η διαχείριση των παρεμβολών στην επικοινωνία D2D με το αρχικό κυψελοειδές σύστημα επικοινωνίας μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μέσω του ελέγχου ισχύος. Η επικοινωνία D2D βελτιώνει την ανθεκτικότητα των κινητών συσκευών και μειώνει την ισχύ μετάδοσης όταν βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Εν τω μεταξύ, οι παράμετροι δεδομένων μεταδίδονται απευθείας μεταξύ των συσκευών χωρίς να περνούν από τους σταθμούς βάσης. Αυτή η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να ελαφρύνει σημαντικά το βάρος της επικοινωνίας στους σταθμούς βάσης και να διευκολύνει την ταχεία μετάδοση δεδομένων σε μικρές αποστάσεις. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την απόδοση της κυψέλης και να μεγιστοποιήσει τη χρήση του φάσματος. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές χρήσεις για την τεχνολογία D2D. Το σύστημα κατανομής πόρων που προτείνεται από τους Botson και συν. (2014) επικεντρώνεται στην κατανομή πόρων με βάση την τοποθεσία για κινητές επικοινωνίες D2D σε εφαρμογές ασφαλείας αυτοκινήτων.

Σε μια επιστημονική εργασία, ο Wang (2016) πρότεινε μια αρχιτεκτονική εικονικοποίησης ασύρματου δικτύου που εστιάζει στην πληροφόρηση. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την κοινή χρήση υποδομών και περιεχομένου μεταξύ διαφόρων παρόχων υπηρεσιών μέσω της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών (D2D). Η τεχνολογία επικοινωνίας D2D είναι ζωτικής σημασίας για την ενεργοποίηση της τοπικής επικοινωνίας μεταξύ μηχανών (M2M), ιδίως για την αντιμετώπιση των σημαντικών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι μηχανές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Στο μέλλον, το 5G αναμένεται να μετατραπεί σε μια τεχνολογία επικοινωνίας αιχμής, προσφέροντας μειωμένη καθυστέρηση, ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης και βελτιωμένες επιχειρηματικές εμπειρίες. Θα διαθέτει επίσης τις ιδιότητες της ευρείας αντίληψης, της συνδεσιμότητας και της ευφυΐας. Η ανάπτυξη του 5G έχει τη δυνατότητα να διευκολύνει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση της πληροφορικής σε

διάφορες πτυχές της κοινωνίας, ιδίως τη σύγκλιση της κινητής πληροφορικής και της εκβιομηχάνισης. Με την έλευση του 5G, η απρόσκοπτη σύνδεση μεταξύ ατόμων και αντικειμένων θα ανοίξει το δρόμο για ευρεία συνεργασία και εξατομικευμένη προσαρμογή. Επιπλέον, θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση ενός νέου βιομηχανικού οικοσυστήματος (Wang et al., 2016).



Εικόνα 10 Μέθοδος επικοινωνίας ρομπότ.

5.3. M2M επικοινωνία και IoT

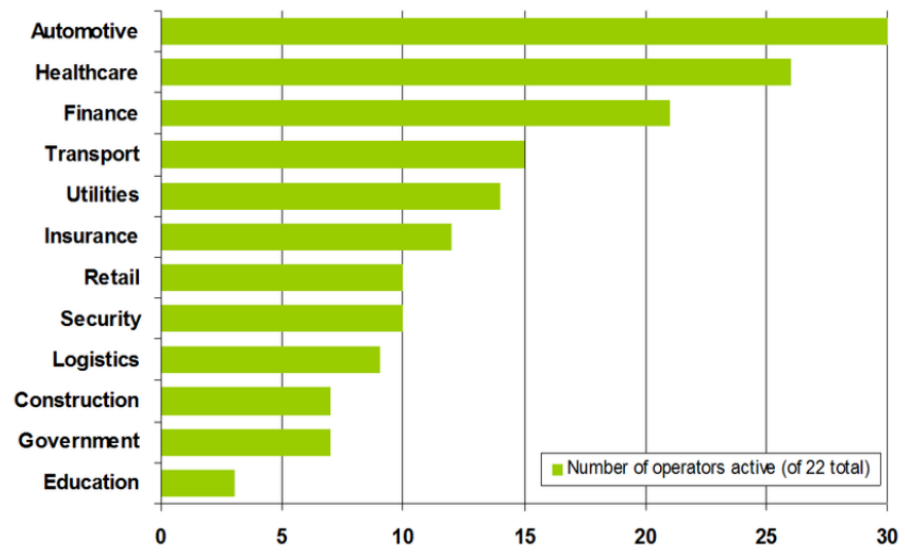
Η επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M) είναι ένας τύπος επικοινωνίας δεδομένων που περιλαμβάνει οντότητες και δεν βασίζεται στην ανθρώπινη αλληλεπίδραση ή παρέμβαση στη διαδικασία επικοινωνίας. Ο όρος M2M, γνωστός και ως επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (MTC) στο 3GPP, χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συσκευών. Αποκλίνει από τα σύγχρονα μοντέλα επικοινωνίας ενσωματώνοντας διάφορους τρόπους, όπως τονίζουν οι Verma και συν. (2016). Αυτοί οι τρόποι περιλαμβάνουν νέα ή διαφορετικά σενάρια της αγοράς.

Με τα πλεονεκτήματα των μειωμένων δαπανών και της ελάχιστης προσπάθειας, υπάρχει η δυνατότητα για μια σημαντική ποσότητα τερματικών επικοινωνίας. Επιπλέον, η κίνηση ανά τερματικό διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Συνήθως, η επικοινωνία M2M μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως δίκτυα GSM-GPRS ή CDMA EVDO. Όσον αφορά την επικοινωνία M2M, το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας λειτουργεί κυρίως ως δίκτυο μεταφοράς.

Με μια δυναμική αγορά περίπου 50 εκατομμυρίων συνδεδεμένων συσκευών, ο τομέας της τεχνολογίας M2M (machine-to-machine) παρουσιάζει μια πληθώρα συναρπαστικών δυνατοτήτων, καθώς και ξεχωριστά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν. Οι συσκευές αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, συμπεριλαμβανομένων εξαιρετικά κινητών οχημάτων που συμμετέχουν σε επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο

και σταθερών μετρητών ανάγνωσης που μεταδίδουν περιοδικά μικρές ποσότητες δεδομένων. Οι εφαρμογές των M2M περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τομέων και η τρέχουσα αξιοποίηση των M2M περιγράφεται παρακάτω (Verma et al., 2016):

- Ασφάλεια: Ειδικεύονται στον τομέα της επιτήρησης, των συστημάτων συναγερμού, του ελέγχου πρόσβασης και της ασφάλειας αυτοκινήτων/οδηγών. Η εξειδίκευσή τους έγκειται στην παροχή ολοκληρωμένων λύσεων για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας και προστασίας. Με τις γνώσεις και την εμπειρία τους, μπορούν να βοηθήσουν να εφαρμοστούν κορυφαία μέτρα ασφαλείας για τη διαφύλαξη των περιουσιακών στοιχείων και τη διατήρηση ενός ασφαλούς περιβάλλοντος.
- Παρακολούθηση και εντοπισμός: διαχείριση στόλου, διαχείριση παραγγελιών, εντοπισμός περιουσιακών στοιχείων, πλοήγηση, πληροφορίες κυκλοφορίας, δρόμα και βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας/δρομολόγησης.
- Οι μέθοδοι πληρωμής περιλαμβάνουν μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των συναλλαγών σε σημεία πώλησης, των αυτόματων πωλητών και των μηχανημάτων τυχερών παιχνιδιών.
- Υγεία: Παρακολούθηση ζωτικών σημείων, παροχή υποστήριξης σε ηλικιωμένους ή άτομα με ειδικές ανάγκες, δημιουργία σημείων πρόσβασης για τηλεϊατρική και διεξαγωγή διαγνωστικών εξετάσεων τηλεϊατρικής.
- Η εξ αποστάσεως συντήρηση/έλεγχος περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εργασιών, όπως η διαχείριση αισθητήρων, φωτισμού, αντλιών, βαλβίδων, ο έλεγχος ανελκυστήρων, ο έλεγχος αυτόματων πωλητών και η διάγνωση οχημάτων.
- Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο, το νερό, τη θέρμανση, τον έλεγχο δικτύων και τις βιομηχανικές μετρήσεις.
- Κατασκευή: Παρακολούθηση και αυτοματοποίηση της αλυσίδας παραγωγής.
- Διαχείριση εγκαταστάσεων: αυτοματισμοί για κατοικίες, κτίρια και πανεπιστημιακές πόλεις (Verma et al., 2016).



Εικόνα 11 Αριθμός φορέων εκμετάλλευσης M2M που δραστηριοποιούνται σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους

Συμπέρασμα

Η εξέλιξη των δικτύων ασύρματης επικοινωνίας, από τα αρχικά κυψελοειδή συστήματα έως τη σημερινή τεχνολογία 5G και πέραν αυτής, χαρακτηρίζεται από αξιοσημείωτες εξελίξεις και μετασχηματιστικές δυνατότητες. Το ιστορικό πλαίσιο έδωσε έμφαση στην εξέλιξη σε διάφορες γενιές, καθεμία από τις οποίες συνεισέφερε τις δικές της μοναδικές τεχνολογικές εξελίξεις. Η εξερεύνηση της τεχνολογίας πέμπτης γενιάς ή 5G αποκάλυψε τα μοναδικά χαρακτηριστικά της, που περιλαμβάνουν προηγμένες δυνατότητες όπως υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, χαμηλή καθυστέρηση και εκτεταμένη συνδεσιμότητα συσκευών. Η αρχιτεκτονική του δικτύου 5G παρουσίασε μια μετάβαση προς εξαιρετικά προσαρμόσιμες και ευέλικτες δομές, ενσωματώνοντας ασύρματα δίκτυα, δίκτυα σταθερής πρόσβασης, οπτικά δίκτυα και προηγμένες τεχνολογίες όπως το Software-Defined Networking (SDN) και το Network Functions Virtualization (NFV).

Η επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής 5G, σε συνδυασμό με τις στρατηγικές cloud και την έννοια του network slicing, αναδεικνύει την προσαρμοστικότητα και την ευελιξία που είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των ποικίλων απαιτήσεων των χρηστών και των εφαρμογών. Η εξέταση διακεκριμένων τεχνολογιών, όπως η Εικονικοποιημένη Λειτουργία Δικτύου (NFV), το Software Defined Networking (SDN) και το Multi-access Edge Computing, αναδεικνύει τους κρίσιμους ρόλους τους στη βελτίωση των δυνατοτήτων και της αποδοτικότητας των δικτύων 5G. Οι τεχνολογίες αυτές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση των δυνατοτήτων του δικτύου, οδηγώντας σε μια πιο συνεκτική και αποτελεσματική υποδομή επικοινωνιών.

Η εμβάθυνση στις εφαρμογές της τεχνολογίας 5G, ειδικά στον τομέα των μη επανδρωμένων συστημάτων και των UAV, κατέδειξε τις τεράστιες δυνατότητες για επαναστατικές εξελίξεις. Η ενσωμάτωση των τεχνικών 5G στις επικοινωνίες UAV, με οδηγό τα κυψελοειδή δίκτυα mmWave, τα NOMA, τα γνωστικά δίκτυα και τις ενεργειακά αποδοτικές προσεγγίσεις, τόνισε την επαναστατική επιρροή του 5G σε διάφορες βιομηχανίες και τομείς. Κατά την εξέταση του μέλλοντος, τα ασύρματα δίκτυα κοιτάζουν πέρα από το 5G και φαντάζονται έναν κόσμο όπου οι ρομποτικές επικοινωνίες, η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) και η επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M) αποτελούν βασικά στοιχεία. Η ταχεία εξάπλωση των συσκευών IoT

υπογραμμίζει την ανάγκη για συστήματα επικοινωνίας που μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο όγκο δεδομένων και να παρέχουν ευρεία συνδεσιμότητα, σύμφωνα με τις δυνατότητες που παρέχει η τεχνολογία 5G.

Βιβλιογραφία

- Adebusola, J. A., Ariyo, A. A., Elisha, O. A., Olubunmi, A. M., & Julius, O. O. (2020, March 1). *An Overview of 5G Technology*. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/ICMCECS47690.2020.240853>
- Adel Mahmud, S. (2017). 5G Wireless Technologies- Future Generation Communication Technologies. *International Journal of Computing and Digital Systemss*, 6(3), 139–147. <https://doi.org/10.12785/ijcds/060306>
- Ahmad, I., Shahabuddin, S., Kumar, T., Okwuibe, J., Gurtov, A., & Ylianttila, M. (2019). Security for 5G and Beyond. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2916180>
- Albreem, M. A. M. (2015). 5G wireless communication systems: Vision and challenges. *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*. <https://doi.org/10.1109/i4ct.2015.7219627>
- Alcaraz, M., Ioannis-Prodromos Belikaidis, Bernardos, C. J., Bisson, P., Didier Bourse, Bredel, M., Camps-Mur, D., Chen, T., Costa-Pérez, X., Panagiotis Demestichas, Doll, M., Salah Eddine Elayoubi, Ανδρέας Γεωργακόπουλος, Aarne Mämmelä, Mayer, H.-P., Payaró, M., Bessem Sayadi, Muhammad Shuaib Siddiqui, Tercero, M., & Wang, Q. (2017). Leading innovations towards 5G: Europe’s perspective in 5G infrastructure public-private partnership (5G-PPP). *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. <https://doi.org/10.1109/pimrc.2017.8292654>
- Al-Falahy, N., & Alani, O. Y. (2017). Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. *IT Professional*, 19(1), 12–20. <https://doi.org/10.1109/mitp.2017.9>
- Alsharif, M. H., & Nordin, R. (2016). Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells. *Telecommunication Systems*, 64(4), 617–637. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0195-x>
- Alzenad, M., Shakir, M. Z., Yanikomeroğlu, H., & Alouini, M.-S. (2018). FSO-Based Vertical Backhaul/Fronthaul Framework for 5G+ Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 218–224. <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1600735>
- Andrews, J. G., Bai, T., Kulkarni, M., Alkhateeb, A., Gupta, A., & Heath, R. W. (2016). Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2016.2618794>
- Ansari, R. I., Chrysostomou, C., Hassan, S. A., Guizani, M., Mumtaz, S., Rodriguez, J., & Rodrigues, J. J. P. C. (2018). 5G D2D Networks: Techniques, Challenges, and Future Prospects. *IEEE Systems Journal*, 12(4), 3970–3984. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2017.2773633>

Antonioli, R., Parente, G., Silva, C., Sousa, D., Rodrigues, E., Maciel, T., & Cavalcanti, F. (2018). Dual Connectivity for LTE-NR Cellular Networks: Challenges and Open Issues. *Journal of Communication and Information Systems*, 33(1), 282–294. <https://doi.org/10.14209/jcis.2018.28>

Arafat, M. Y., & Moh, S. (2019). Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks: A Survey. *IEEE Access*, 7, 99694–99720. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930813>

Arnon, S., Barry, J., & Karagiannidis, G. (2012). Advanced Optical Wireless Communication Systems. In *Google Books*. Cambridge University Press. https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=2OqldFkZpOYC&oi=fnd&pg=PR10&dq=wireless+communication+systems:&ots=MupIb8Dr7M&sig=HW_omTISoUuuvITf5fhPeIZki6M

Arora, S., Sharma, N., Bhushan, B., Kaushik, I., & Ahmad, A. (2020). *Evolution of 5G Wireless Network in IoT*. <https://doi.org/10.1109/csnt48778.2020.9115773>

Azodolmolky, S., Wieder, P., & Yahyapour, R. (2013). Cloud Computing networking: Challenges and Opportunities for Innovations. *IEEE Communications Magazine*, 51(7), 54–62. <https://doi.org/10.1109/mcom.2013.6553678>

Badotra, S., & Panda, S. N. (2020). Software-Defined Networking: A Novel Approach to Networks. *Handbook of Computer Networks and Cyber Security*, 313–339. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22277-2_13

Bakare, B., & Basse, E. (2021). A Comparative Study of the Evolution of Wireless Communication Technologies from the First Generation (1G) to the Fourth Generation (4G). *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 12, 2249-071. https://ijecce.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJECCE_4402_FINAL.pdf

Begishev, V., Sopin, E., Moltchanov, D., Pirmagomedov, R., Samuylov, A., Andreev, S., Koucheryavy, Y., & Samouylov, K. (2021). Performance Analysis of Multi-Band Microwave and Millimeter-Wave Operation in 5G NR Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(6), 3475–3490. <https://doi.org/10.1109/twc.2021.3051027>

Benzekki, K., El Fergougui, A., & Elbelrhiti Elalaoui, A. (2016). Software-defined networking (SDN): a survey. *Security and Communication Networks*, 9(18), 5803–5833. <https://doi.org/10.1002/sec.1737>

Blackman, C. (2019, April 3). *5G Deployment: State of play in Europe, USA and Asia*. Policycommons.net; European Parliamentary Research Service. <https://policycommons.net/artifacts/1335086/5g-deployment/1941308/>

Brown, G. (2017). Service-based architecture for 5g core networks. Huawei White Paper, 1.

- Caraguay, Á., & Villalba, L. (2017). Monitoring and Discovery for Self-Organized Network Management in Virtualized and Software Defined Networks. *Sensors*, 17(4), 731. <https://doi.org/10.3390/s17040731>
- Casado, M., Foster, N., & Guha, A. (2014). Abstractions for software-defined networks. *Communications of the ACM*, 57(10), 86–95. <https://doi.org/10.1145/2661061.2661063>
- Chayapathi, R., Hassan, S. F., & Shah, P. (2016). Network Functions Virtualization (NFV) with a Touch of SDN. In *Google Books*. Addison-Wesley Professional. <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=kl54DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT17&dq=Network+Functions+Virtualization-NFV&ots=9ys4E0EDNE&sig=mgOqkBCAEYoQK6VghLsJYz6D4I8>
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2020). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. In *Google Books*. Academic Press. <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=-bfjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Dahlman>
- Dangi, R., Lalwani, P., Choudhary, G., You, I., & Pau, G. (2021). Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(1), 26. <https://doi.org/10.3390/s22010026>
- Ding, G., Wu, Q., Zhang, L., Lin, Y., Tsiftsis, T. A., & Yao, Y.-D. (2018). An Amateur Drone Surveillance System Based on the Cognitive Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 29–35. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700452>
- Engin Zeydan, Josep Mangles-Bafalluy, Baranda, J., Requena, M., & Turk, Y. (2022). *Service Based Virtual RAN Architecture for Next Generation Cellular Systems*. 10, 9455–9470. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3144534>
- Filali, A., Abouaomar, A., Cherkaoui, S., Kobbane, A., & Guizani, M. (2020). Multi-Access Edge Computing: A Survey. *IEEE Access*, 8, 197017–197046. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3034136>
- Gharibi, M., Boutaba, R., & Waslander, S. L. (2016). Internet of Drones. *IEEE Access*, 4, 1148–1162. <https://doi.org/10.1109/access.2016.2537208>
- GSA. (2021). LTE and 5G in the Middle East and Africa –a snapshot.
- GSM Association. (2018). Road to 5G: Introduction and Migration. Official Document, April.
- Hajlaoui, E., Zaier, A., Khlifi, A., Ghodhbane, J., Hamed, M. B., & Sbita, L. (2020, September 1). *4G and 5G technologies: A Comparative Study*. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/ATSIP49331.2020.9231605>
- He, Y., Yu, F. R., Zhao, N., Leung, V. C. M., & Yin, H. (2017). Software-Defined Networks with Mobile Edge Computing and Caching for Smart Cities: A Big Data

Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Communications Magazine*, 55(12), 31–37. <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1700246>

Hossein Motlagh, N., Taleb, T., & Arouk, O. (2016). Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicles-Based Internet of Things Services: Comprehensive Survey and Future Perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6), 899–922. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2612119>

Hu, F. (2016). Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. In *Google Books*. CRC Press. https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=UcL1CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Fifth+generation+technology+or+5G+characteristic&ots=9HFLXwDs6S&sig=CqrwrV3dNRdVCJwGMleaW7sva_g

Hucaby, D. (2010). CCNP SWITCH 642-813 Official Certification Guide. In *Google Books*. Cisco Press. <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=1hyaay2eTIwC&oi=fnd&pg=PT26&dq=Hucaby>

Jain, A. Kr., Acharya, R., Jakhar, S., & Mishra, T. (2018, April 1). *Fifth Generation (5G) Wireless Technology “Revolution in Telecommunication.”* IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473011>

Khan, R., Kumar, P., Jayakody, D. N. K., & Liyanage, M. (2020). A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 196–248. <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2933899>

Khor, K.-C., Ting, C.-Y., & Phon-Amnuaisuk, S. (2010). A cascaded classifier approach for improving detection rates on rare attack categories in network intrusion detection. *Applied Intelligence*, 36(2), 320–329. <https://doi.org/10.1007/s10489-010-0263-y>

Kong, L., Ye, L., Wu, F., Tao, M., Chen, G., & Vasilakos, A. V. (2017). Autonomous Relay for Millimeter-Wave Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(9), 2127–2136. <https://doi.org/10.1109/jsac.2017.2720518>

Kreutz, D., Ramos, F. M. V., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2015). Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14–76. <https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2371999>

Kreutz, D., Yu, J., Esteves-Verissimo, P., Magalhaes, C., & Ramos, F. M. V. (2018). The KISS Principle in Software-Defined Networking: A Framework for Secure Communications. *IEEE Security & Privacy*, 16(5), 60–70. <https://doi.org/10.1109/msp.2018.3761717>

Kumar, Ashish;Aswal, Ankit;Singh, Lalit. (2014). 4G Wireless Technology: A Brief Review. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*,

3(2), 35–43.

<https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijemr&volume=3&issue=2&article=007>

Lagum, F., Bor-Yaliniz, I., & Yanikomeroglu, H. (2018). Strategic Densification With UAV-BSs in Cellular Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 384–387. <https://doi.org/10.1109/lwc.2017.2779483>

Liu, X., Qiu, M., Wang, X., Liu, W., & Zhang, J. (2015). *Optimization for Communication Energy Efficiency of Air-Based Information Network While Satisfying Timing Constraints*. <https://doi.org/10.1109/hpcc-css-icess.2015.155>

Liu, Y., Chen, H.-H., & Wang, L. (2017). Physical Layer Security for Next Generation Wireless Networks: Theories, Technologies, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 347–376. <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2598968>

Liu, Y., Liu, X., Gao, X., Mu, X., Zhou, X., Dobre, O. A., & Poor, H. V. (2021). Robotic Communications for 5G and Beyond: Challenges and Research Opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 59(10), 92–98. <https://doi.org/10.1109/MCOM.111.2001118>

Liu, Y., Qin, Z., Cai, Y., Gao, Y., Li, G. Y., & Nallanathan, A. (2019). UAV Communications Based on Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 52–57. <https://doi.org/10.1109/mwc.2018.1800196>

Malathy, S., Jayarajan, P., Ojukwu, H., Qamar, F., Hindia, M. N., Dimiyati, K., Noordin, K. A., & Amiri, I. S. (2021). A review on energy management issues for future 5G and beyond network. *Wireless Networks*, 27(4), 2691–2718. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02616-z>

Mehrdad Shariat, Bulakci, O., Antonio De Domenico, Mannweiler, C., Gramaglia, M., Wei, Q., Aravinthan Gopalasingham, Emmanouil Pateromichelakis, Fabrizio Moggio, Dimitris Tsolkas, Gajic, B., Marcos Rates Crippa, & Khatibi, S. (2019). *A Flexible Network Architecture for 5G Systems*. 2019, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2019/5264012>

Mezzavilla, M., Zhang, M., Polese, M., Ford, R., Dutta, S., Rangan, S., & Zorzi, M. (2018). End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3), 2237–2263. <https://doi.org/10.1109/comst.2018.2828880>

Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J.-L., Bouten, N., De Turck, F., & Boutaba, R. (2016). Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 236–262. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2477041>

Mladen Botsov, Klugel, M., Wolfgang Kellerer, & Fertl, P. (2014). *Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications*. <https://doi.org/10.1109/wcnc.2014.6952482>

- Muhammad Farhan Sohail, & Chee Yen Leow. (2017). *Maximized fairness for NOMA based drone communication system*.
<https://doi.org/10.1109/micc.2017.8311744>
- Nasir, A. A., Hoang Duong Tuan, Duong, T. Q., & H. Vincent Poor. (2019). UAV-Enabled Communication Using NOMA. *IEEE Transactions on Communications*, 67(7), 5126–5138. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2019.2906622>
- Ndikumana, A., Tran, N. H., Ho, T. M., Han, Z., Saad, W., Niyato, D., & Hong, C. S. (2019). Joint Communication, Computation, Caching, and Control in Big Data Multi-access Edge Computing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 1–1.
<https://doi.org/10.1109/tmc.2019.2908403>
- Ortiz, J. H. (2020). Mobile Computing. In *Google Books*. BoD – Books on Demand.
<https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=ABf9DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA37&dq=Fifth+generation+technology+or+5G+importance&ots=sxRvAhATE4&sig=Z4prF5Isehvh-Uka0l6ZM73NeZk>
- Palazzo, M., & Siano, A. (2021). Fifth-generation (5G) communication networks and sustainability: A research agenda. *CORPORATE GOVERNANCE and RESEARCH & DEVELOPMENT STUDIES*, 1, 55–73. <https://doi.org/10.3280/cgrds1-2021oa10459>
- Pan, H., Soung Chang Liew, Liang, J., Shao, Y., & Lu, L. (2018). *Network-Coded Multiple Access on Unmanned Aerial Vehicle*. 36(9), 2071–2086.
<https://doi.org/10.1109/jsac.2018.2864414>
- Pan, M.-S., & Wu, M.-Y. (2023). A genetic algorithm based flow control scheme for LTE-NR dual connectivity networks. *Wireless Networks*.
<https://doi.org/10.1007/s11276-023-03481-8>
- Rappaport, T. S., Xing, Y., MacCartney, G. R., Molisch, A. F., Mellios, E., & Zhang, J. (2017). Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6213–6230.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243>
- Reka, S. ., Dragičević, T., Siano, P., & Prabakaran, S. R. S. (2019). Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review. *Energies*, 12(11), 2140. <https://doi.org/10.3390/en12112140>
- Saily, M., Estevan, C. B., Gimenez, J. J., Tesema, F., Guo, W., Gomez-Barquero, D., & Mi, D. (2020). 5G Radio Access Network Architecture for Terrestrial Broadcast Services. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 66(2), 404–415.
<https://doi.org/10.1109/tbc.2020.2985906>
- Sanjab, A., Saad, W., & Basar, T. (2017). Prospect theory for enhanced cyber-physical security of drone delivery systems: A network interdiction game. *International Conference on Communications*.
<https://doi.org/10.1109/icc.2017.7996862>

Savic, V., & Larsson, E. G. (2015, September 1). *Fingerprinting-Based Positioning in Distributed Massive MIMO Systems*. IEEE Xplore.
<https://doi.org/10.1109/VTCSFall.2015.7390953>

Sharma, P. (2013). Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. *IJCSMC*, 2(8), 47–53.
http://chenweixiang.github.io/docs/Evolution_of_Mobile_Wireless_Communication_Networks.pdf

Shi, W., Zhou, H., Li, J., Xu, W., Zhang, N., & Shen, X. (2018). Drone Assisted Vehicular Networks: Architecture, Challenges and Opportunities. *IEEE Network*, 32(3), 130–137. <https://doi.org/10.1109/mnet.2017.1700206>

Shukurillaevich, U. B., Sattorovich, R. O., & Amrillojonovich, R. U. (2019, November 1). *5g Technology Evolution*. IEEE Xplore.
<https://doi.org/10.1109/ICISCT47635.2019.9011957>

Silva, M. M. da, & Guerreiro, J. (2020). On the 5G and Beyond. *Applied Sciences*, 10(20), 7091. <https://doi.org/10.3390/app10207091>

Sutton, A. (2018). *British Telecommunications plc 2017 5G Network Architecture: Enabling the Future Delivery and Consumption of Digital Media*.
https://engagingwithcommunications.com/events/fitce_congress_2018/Paper_session_1/fitce_paper_1_1.pdf

Suurs, R. A. A., & Hekkert, M. P. (2009). Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands. *Energy*, 34(5), 669–679.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.002>

Taheribakhsh, M., Jafari, A., Peiro, M. M., & Kazemifard, N. (2020). 5G Implementation: Major Issues and Challenges. *2020 25th International Computer Conference, Computer Society of Iran (CSICC)*.
<https://doi.org/10.1109/csicc49403.2020.9050110>

Underberg, L., Kays, R., Dietrich, S., & Gerhard Fohler. (2018). *Towards hybrid wired-wireless networks in industrial applications*.
<https://doi.org/10.1109/icphys.2018.8390804>

Verma, P. K., Verma, R., Prakash, A., Agrawal, A., Naik, K., Tripathi, R., Alsabaan, M., Khalifa, T., Abdelkader, T., & Abogharaf, A. (2016). Machine-to-Machine (M2M) communications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 66, 83–105. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.02.016>

Vijay Kumar Garg. (2007). *Wireless communications and networking*. Elsevier Morgan Kaufmann.

Wang, K., F. Richard Yu, & Li, H. (2016). Information-Centric Virtualized Cellular Networks With Device-to-Device Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(11), 9319–9329. <https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2518658>

Wang, X., Sun, T., Duan, X., Wang, D., Li, Y., Zhao, M., & Tian, Z. (2022). Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-advanced and beyond. *China Communications*, 19(1), 14–28. <https://doi.org/10.23919/jcc.2022.01.002>

Wijethilaka, S., & Liyanage, M. (2021). Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3067807>

Wong, V. W. S., Schober, R., & Ng, D. W. K. (2017). Key Technologies for 5G Wireless Systems. In *Google Books*. Cambridge University Press. <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=HdAoDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR16&dq=5G+wireless+technology&ots=YXy3kL0KAW&sig=ny5mWzRaxEVvITqzeq8wWwnQ8Zo>

Xiao, Z., Xia, P., & Xia, X. (2016). Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: potentials and approaches. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 66–73. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7470937>

Yang, B., Yu, Z., Lan, J., Zhang, R., Zhou, J., & Hong, W. (2018). Digital Beamforming-Based Massive MIMO Transceiver for 5G Millimeter-Wave Communications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(7), 3403–3418. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2018.2829702>

Yang, G., Lin, X., Li, Y., Cui, H., Xu, M., Wu, D., Rydén, H., & Redhwan, S. B. (2018). A Telecom Perspective on the Internet of Drones: From LTE-Advanced to 5G. *ArXiv:1803.11048 [Cs]*. <https://arxiv.org/abs/1803.11048>

Yilmaz, O. N. C., Teyeb, O., & Orsino, A. (2019). Overview of LTE-NR Dual Connectivity. *IEEE Communications Magazine*, 57(6), 138–144. <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800431>

Yousaf, F. Z., Bredel, M., Schaller, S., & Schneider, F. (2017). NFV and SDN—Key Technology Enablers for 5G Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(11), 2468–2478. <https://doi.org/10.1109/jsac.2017.2760418>

Zafeiropoulos, A., Gavras, A., Tzanakaki, A., Albanese, A., Kousaridas, A., Weit, A., Sayadi, B., Jou, B. T., Bernardos, C. J., Benzaid, C., Mannweiler, C., Camps-Mur, D., Breitgand, D., Estevez, D. G., Navratil, D., Mi, D., Lopez, D., Klondis, D., Mutafungwa, E., & Fotopoulou, E. (2019). 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture. In *The UWS Academic Portal: Vol. Version 3.0*. European Commission. <https://research-portal.uws.ac.uk/en/publications/5g-ppp-architecture-working-group-view-on-5g-architecture>

Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7470933>

Zhang, C., & Zhang, W. (2016). Spectrum Sharing for Drone Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/jsac.2016.2633040>

Zhang, L., Zhao, H., Hou, S., Zhao, Z., Xu, H., Wu, X., Wu, Q., & Zhang, R. (2019). A Survey on 5G Millimeter Wave Communications for UAV-Assisted Wireless Networks. *IEEE Access*, 7, 117460–117504. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2929241>

Zhang, P., Mimoza Durrresi, & Arjan Durrresi. (2018). Mobile Privacy Protection Enhanced with Multi-access Edge Computing. *Advanced Information Networking and Applications*. <https://doi.org/10.1109/aina.2018.00109>

Zhao, J., Gao, F., Ding, G., Zhang, T., Jia, W., & Arumugam Nallanathan. (2018). *Integrating Communications and Control for UAV Systems: Opportunities and Challenges*. 6, 67519–67527. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2879637>

Zhou, X., Li, R., Chen, T., & Zhang, H. (2016). Network slicing as a service: enabling enterprises' own software-defined cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(7), 146–153. <https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7509393>

Zhu, Y., Zheng, G., & Fitch, M. J. (2018). *Secrecy Rate Analysis of UAV-Enabled mmWave Networks Using Matérn Hardcore Point Processes*. 36(7), 1397–1409. <https://doi.org/10.1109/jsac.2018.2825158>