



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Χρήση Τεχνολογίας 5G και Εφαρμογές
σε Ρομποτικά και Μη Επανδρωμένα Συστήματα**

Συγγραφέας:

Βασίλειος Καρπέτας

ΑΜ: 252017045

Επιβλέπων: Μιχαήλ Παπουτσιδάκης (Καθηγητής)
Συνεπιβλέπουσα: Ελένη Συμεωνάκη (ΕΔΙΠ Α')

Αθήνα, October 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION ENGINEERING**

Diploma Thesis

5G Technology Implementation and Applications in Robotic and Unmanned Systems

Student name and surname: Vasileios Karpetas

Registration Number: 252017045

**Supervisors' name and surname:
Michail Papoutsidakis, Eleni Symeonaki**

Athens, October 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τεχνολογία 5G και εφαρμογές σε ρομποτικά και μη επανδρωμένα συστήματα

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/a	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΕΛΕΝΗ ΣΥΜΕΩΝΑΚΗ	ΕΔΙΠ Α'	
3	ΑΒΡΑΑΜ ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ	ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καρπέτας Βασίλειος του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 252017045 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Βασίλειος Καρπέτας

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
Ευχαριστίες	10
Περίληψη.....	11
Abstract	12
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 2 – Χαρακτηριστικά και σύγκριση τεχνολογιών	15
2.1 Χρήση της ασύρματης επικοινωνίας	15
2.1.1 Η ιδέα των κυβελωτών δικτύων	17
2.2 Διαδίκτυο συσκευών (IoT).....	19
2.2.1 Πρότυπα μοντέλα IoT	22
2.3 Τεχνολογία 0G – 0.5G.....	28
2.4 Τεχνολογία 1G.....	28
2.5 Τεχνολογία 2G.....	30
2.5.1 Ενδιάμεσες εκδόσεις 2G – 3G.....	32
2.6 Τεχνολογία 3G.....	34
2.6.1 Ενδιάμεσες εκδόσεις 3G – 4G.....	36
2.7 Τεχνολογία 4G.....	37
2.8 Τεχνολογία 5G.....	38
2.8.1 Εφαρμογές 5G.....	41
Κεφάλαιο 3 – Ασύρματη τεχνολογία 5G.....	43
3.1 Διπλή συνδεσιμότητα LTE - NR	43
3.2 Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (NFV).....	49
3.2.1 Πλεονεκτήματα τεχνολογίας NFV	52
3.3 Δίκτυο καθοριζόμενο από το λογισμικό (SDN)	55
3.3.1 Οι κόμβοι του SDN	55
3.3.2 Τα επίπεδα του SDN.....	56
3.4 Κινητή Υπολογιστική στα Άκρα του Δικτύου (Multi-access edge computing)	59
3.5 Συνάθροιση φορέων και χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm-wave)	62
3.6 Ασύρματα συστήματα πολλαπλών εισόδων-εξόδων.....	66
Κεφάλαιο 4 – Αρχιτεκτονική 5G	69
4.1 Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής 5G	69
4.2 Εγκαταστάσεις Φυσικής Δικτύωσης και Υπολογιστών.....	74
4.2.1 Ενοποίηση Δυνατοτήτων Δικτύου, Υπολογιστών και Αποθήκευσης.....	74
4.3 Αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες	77
4.4 Κοινό δίκτυο πυρήνα (cloud)	79
4.5 Τεμαχισμός δικτύου	81
Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογές τεχνολογίας 5G	86

5.1 Μη επανδρωμένα συστήματα και UAVs	86
5.1.1 Αρχιτεκτονική B5G: ολοκληρωμένα δίκτυα εδάφους-αέρα-διαστήματος.....	91
5.1.2 Πιθανές προκλήσεις	94
5.1.3 Τεχνικές επικοινωνίας φυσικού στρώματος.....	97
5.1.3.1 UAV οδηγούμενα από κυψελωτά δίκτυα mmWave	99
5.1.3.2 UAV οδηγούμενα μέσω NOMA.....	101
5.1.3.3 Γνωστικά δίκτυα UAV.....	104
5.1.3.4 Δίκτυα UAV και ενεργειακή απόδοση.....	105
5.2 Μελλοντική ερευνητική εστίαση.....	110
5.3 Χρήση 5G σε ρομποτικές επικοινωνίες.....	116
5.4 Επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή D2D	116
5.5 M2M επικοινωνία και IoT.....	120
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα	124
Κεφάλαιο 7 – Βιβλιογραφία.....	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Εξέλιξη της κινητής ασύρματης τεχνολογίας (RANI P. TIDKE, 2021).....	14
Εικόνα 2: Ιστορικό επικοινωνίας στην κινητή τηλεφωνία (Vignesh. C. R, 2016).....	15
Εικόνα 3: Παγκόσμια ανάπτυξη συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας (Md Hasan Mahmud, 2019).....	16
Εικόνα 4: Εξέλιξη της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας 1G σε 4G (Md Hasan Mahmud, 2019).....	17
Εικόνα 5: Γεωμετρία κυψέλης όπου φαίνεται η αποτελεσματικότητα συσκευασίας κύκλων και εξαγώνων (Hodara & Skaljo, 2021).....	19
Εικόνα 6: Τα προτεινόμενα μοντέλα για το IoT (CISCO, 2014).....	24
Εικόνα 7: Διαφορετικές εφαρμογές του IoT. (α) έξυπνα οχήματα, (β) έξυπνα κτίρια, (γ) παρακολούθηση της υγείας, (δ) διαχείριση ενέργειας, (ε) διαχείριση κατασκευών, (στ) παρακολούθηση του περιβάλλοντος, (ζ) διαχείριση γραμμής παραγωγής και συναρμολόγησης και (η) αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων (Mosenia & Jha, 2016).	25
Εικόνα 8: Έννοια του συστήματος τηλεϊδοποίησης (Md Hasan Mahmud, 2019).....	30
Εικόνα 9: Εξέλιξη από 1G σε 4G βάσει αναλογικών και ψηφιακών (Md Hasan Mahmud, 2019).....	35
Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική Συστήματος 4G (Md Hasan Mahmud, 2019).	38
Εικόνα 11: Δομικά στοιχεία LTE.	44
Εικόνα 12: Διεπιφάνειες και συνδεσιμότητα μεταξύ χρήστη και διαθέσιμων τεχνολογιών. .	47
Εικόνα 13: Σχέση εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου με SDN	49
Εικόνα 14: Λειτουργική Δομή MEC.	60
Εικόνα 15: Συγκέντρωση κινητής τηλεφωνίας (Pedersen et al., 2011b).....	65
Εικόνα 16: Διάγραμμα ροής συστημάτων MIMO.....	66
Εικόνα 17: Αποτελέσματα προσομοίωσης.	67
Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική 5G.	70
Εικόνα 19: Στοιχεία δικτύου και διεπαφές που βασίζονται στον λογικό διαχωρισμό CN/RAN, όπως στο (Metis, 2016).	72
Εικόνα 20: Πλαίσιο ελέγχου, διαχείρισης και ενορχήστρωσης λειτουργιών δικτύου.....	73
Εικόνα 21: Υποδομή 5G που υποστηρίζει ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις δικτύωσης και υπολογιστών.	75
Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική βάση των υπηρεσιών (SBA) (TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2020).	77
Εικόνα 23: Τεμαχισμός δικτύου.	82
Εικόνα 24: Απεικόνιση ολοκληρωμένων δικτύων χώρου-αέρα-εδάφους. Η εννοιολογική αρχιτεκτονική επικοινωνίας σε δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV αποτελείται από τρία	

επίπεδα: το διαστημικό στρώμα για τις δορυφορικές ζεύξεις δεδομένων, το στρώμα αέρα για τα UAV και τις ζεύξεις δεδομένων LoS και το στρώμα εδάφους για τις συσκευές τελικού χρήστη.	94
Εικόνα 25: Ένα υποδειγματικό σενάριο UAV ως εναέρια BS που εξυπηρετούν μια περιοχή στόχο, όπου κάθε UAV είναι εξοπλισμένο με ασύρματους πομποδέκτες που τους επιτρέπουν να επικοινωνούν με χρήστες εδάφους και επίσης με άλλα UAV (B. Li et al., 2019).	98
Εικόνα 26: Ένα διάγραμμα για το εξεταζόμενο σενάριο UAV NOMA. Ένα UAV εξυπηρετεί πολλαπλούς χρήστες εδάφους όπου τα σήματα των χρηστών 1 έως $k - 1$ ακυρώνονται στον k -ο χρήστη, ενώ τα σήματα των χρηστών $k + 1$ έως N λαμβάνονται ως παρεμβολές (B. Li et al., 2019).....	101
Εικόνα 27: Ένα σύστημα επικοινωνίας UAV με ηλιακή ενέργεια, όπου το UAV είναι εξοπλισμένο με ηλιακά πάνελ που μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από ηλιακή πηγή (B. Li et al., 2019).....	106
Εικόνα 28: Ένα τυπικό παράδειγμα ασύρματου τροφοδοτούμενου δικτύου με δυνατότητα UAV, όπου το UAV είναι σε θέση να μεταδίδει ενέργεια ή ταυτόχρονα να μεταδίδει δεδομένα και ενέργεια σε συσκευές επίγειων χρηστών μέσω σημάτων RF. Το τμήμα πράσινου χρώματος αντιπροσωπεύει τη ροή ενέργειας και το τμήμα κόκκινου χρώματος αντιπροσωπεύει τη ροή πληροφοριών (B. Li et al., 2019).	109
Εικόνα 29: Χρήση 5G σε ρομποτικές εφαρμογές. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική συστήματος M2M (Niraj Pandey, 2016). Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 2G, 2.5G και 2.75G (RANI P. TIDKE, 2021).	33
Πίνακας 2: Η ασύρματη απόδοση του 5G (Md Hasan Mahmud, 2019).	39

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους επιβλέποντες της διπλωματικής μου κ.κ. Μιχαήλ Παπουτσιδάκη και Ελένη Συμεωνάκη για τη συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου εργασίας, για την ενθάρρυνση καθώς και τα κίνητρα που μου έδωσαν ώστε να φτάσω σε αυτό το αποτέλεσμα.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Οι αναδυόμενες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας 5G διερευνώνται και κατηγοριοποιούνται από την οπτική γωνία όχι των παρόχων υπηρεσιών, αλλά και των τελικών χρηστών. Η ανάπτυξη των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας 5G βασίζεται σε μια εντατική ανάλυση των παγκόσμιων τάσεων στις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, περιγράφονται αρκετές απαραίτητες απαιτήσεις υπηρεσίας, απαραίτητες για την υλοποίηση των σεναρίων εξυπηρέτησης που παρουσιάζονται. Για να απεικονιστούν οι αλλαγές στις κοινωνίες και στην καθημερινή ζωή στην εποχή του 5G, πέντε μεγάλες τάσεις εξετάζονται, συμπεριλαμβανομένης της μεγιστοποίησης της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, της ταχείας αύξησης των συνδεδεμένων συσκευών, τα πάντα στο cloud, τα υπερρεαλιστικά μέσα για τις υπηρεσίες σύγκλισης και η γνώση ως υπηρεσία που ενεργοποιούνται από την ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Με βάση αυτές τις τάσεις, ταξινομούνται οι νέες υπηρεσίες 5G σε πέντε κατηγορίες όσον αφορά τους τελικούς χρήστες εμπειρία ως εξής: καθηλωτικές υπηρεσίες 5G, έξυπνες υπηρεσίες 5G, πανταχού παρούσες υπηρεσίες 5G, αυτόνομες υπηρεσίες 5G και δημόσιες υπηρεσίες 5G. Επιπλέον, παρουσιάζονται αρκετά σενάρια υπηρεσιών 5G σε κάθε κατηγορία υπηρεσιών και προτείνονται βασικές τεχνικές απαιτήσεις για την υλοποίηση των προαναφερθεισών υπηρεσιών 5G, καθώς και ανάλυση ανταγωνιστικότητας για τις βιομηχανίες υπηρεσιών/συσκευών/δικτύων 5G και την τρέχουσα κατάσταση των τεχνολογιών 5G. Στη συνέχεια γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην εφαρμογή του 5G στα μη-επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAV) και στο πως αυτά μπορούν να αποτελέσουν έναν καθοριστικό παράγοντα στην καθημερινή ζωή των επόμενων γενιών, απλοποιώντας πολλές χρονοβόρες καταστάσεις. Τέλος, δίνεται μια σύντομη αναφορά για χρήση 5G σε ρομποτικά συστήματα και επικοινωνία μηχανής προς μηχανή.

Abstract

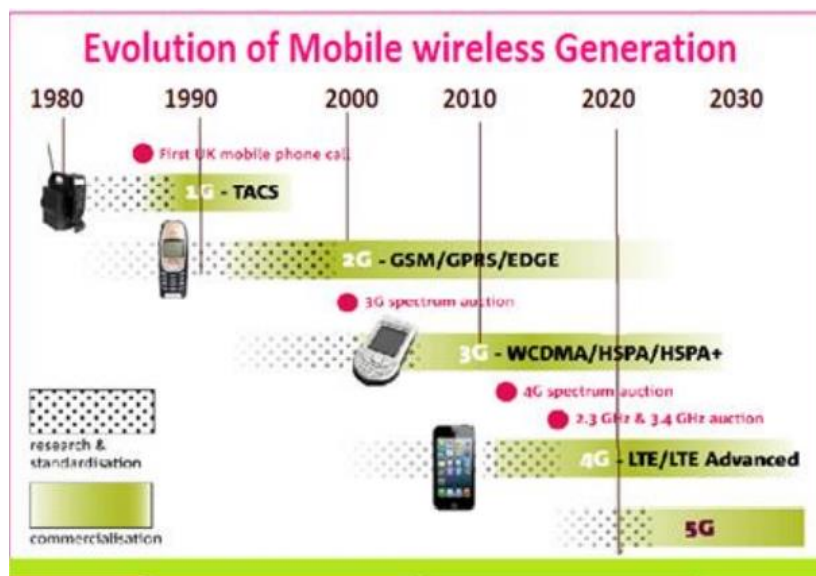
Emerging 5G mobile services are explored and categorized from the perspective of not only service providers, but also end users. The development of 5G mobile services is based on an intensive analysis of global trends in mobile services. In addition, several necessary service requirements are described, necessary for the implementation of the presented service scenarios. To illustrate the changes in societies and daily life in the 5G era, five major trends are examined, including the maximization of mobile data traffic, the rapid growth of connected devices, everything in the cloud, hyperreal media for convergence services, and knowledge as a service enabled by big data analysis. Based on these trends, new 5G services are classified into five categories in terms of end-user experience as follows: immersive 5G services, smart 5G services, ubiquitous 5G services, autonomous 5G services and public 5G services. In addition, several 5G service scenarios in each service category are presented and key technical requirements for the implementation of the 5G services are proposed, as well as a competitive analysis for the 5G service/device/network industries and the current state of 5G technologies. Then special reference is made to the application of 5G to unmanned aerial vehicles (UAVs) and how they can be a decisive factor in the daily life of the next generations, simplifying many time-consuming situations. Finally, a brief report is given on the use of 5G in robotic systems and machine-to-machine communication.

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Ως ασύρματη επικοινωνία ορίζεται η μεταφορά πληροφοριών σε απόσταση χωρίς τη χρήση ενισχυμένων ηλεκτρικών αγωγών ή «καλωδίων». Οι αποστάσεις που εμπλέκονται μπορεί να είναι μικρές (λίγα μέτρα όπως στο τηλεχειριστήριο τηλεόρασης) ή μεγάλες (χιλιάδες ή εκατομμύρια χιλιόμετρα για ραδιοεπικοινωνίες). Όταν το πλαίσιο είναι σαφές, ο όρος συχνά συντομεύεται σε "ασύρματο". Περιλαμβάνει διάφορους τύπους σταθερών, κινητών και φορητών αμφίδρομων ραδιοφώνων, κινητών τηλεφώνων, Personal Digital Assistants (PDA) και ασύρματης δικτύωσης. Η βιομηχανία ασύρματης κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησε τη δημιουργία τεχνολογίας, την επανάσταση και την εξέλιξή της από τις αρχές του 1970. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 η βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας γνώρισε εκρηκτική ανάπτυξη. Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας έχουν γίνει πολύ πιο διάχυτα από ό,τι θα μπορούσε να φανταστεί κανείς όταν πρωτοεμφανίστηκε η έννοια της κινητής τηλεφωνίας στις δεκαετίες του 1960 και του 1970. Οι συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας αυξάνονται κατά 40% ετησίως, και μέχρι το τέλος του 2030 θα υπάρχουν τέσσερις φορές περισσότερες συνδρομές κινητής τηλεφωνίας από τις σταθερές τηλεφωνικές γραμμές. Το 1895, ο Guglielmo Marconi άνοιξε το δρόμο για τις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες μεταδίδοντας τον κώδικα Morse με τρεις κουκκίδες για το γράμμα «S» σε απόσταση τριών χιλιομέτρων χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Mondal, 2015). Από αυτή την αρχή, οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν εξελιχθεί σε βασικό στοιχείο της σύγχρονης κοινωνίας. Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχουν παρακινήσει εξειδικευμένες μελέτες. Πρώτον, οι ασύρματες επικοινωνίες βασίζονται σε έναν σπάνιο πόρο - δηλαδή, το ραδιοφάσμα. Προκειμένου να προωθηθεί η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών (συμπεριλαμβανομένης της τηλεφωνίας και της ραδιοτηλεοπτικής μετάδοσης), αυτά τα περιουσιακά στοιχεία ιδιωτικοποιήθηκαν. Δεύτερον, η χρήση του φάσματος για ασύρματες επικοινωνίες απαιτούσε την ανάπτυξη βασικών συμπληρωματικών τεχνολογιών, ιδιαίτερα εκείνων που επέτρεψαν την αποτελεσματικότερη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων. Τέλος, λόγω της ιδιαιτερότητάς του, η αποτελεσματική χρήση του φάσματος απαιτούσε τη συντονισμένη ανάπτυξη προτύπων.

Το δίκτυο της κινητής ασύρματης επικοινωνίας πρώτης γενιάς (1G) χρησιμοποιήθηκε αναλογικό μόνο για φωνητικές κλήσεις. Η δεύτερη γενιά (2G) είναι ψηφιακή τεχνολογία και υποστηρίζει γραπτά μηνύματα. Η κινητή τεχνολογία τρίτης γενιάς (3G)

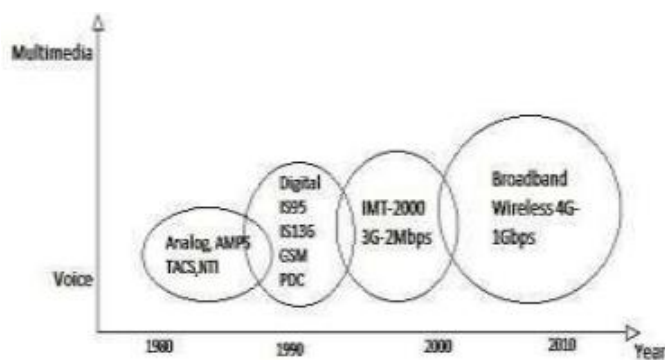
παρείχε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη χωρητικότητα και παρείχε υποστήριξη πολυμέσων (Smilarubavathy, 2016). Η τέταρτη γενιά (4G) ενσωματώνει το 3G με σταθερό διαδίκτυο για την υποστήριξη ασύρματου διαδικτύου για φορητές συσκευές, το οποίο αποτελεί εξέλιξη στην τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας και ξεπεράσε τους περιορισμούς του 3G. Αυξάνει επίσης το εύρος ζώνης και μειώνει το κόστος των πόρων. Το 5G σημαίνει τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς και πρόκειται να είναι μια νέα επανάσταση στην αγορά κινητής τηλεφωνίας που έχει αλλάξει τα μέσα χρήσης κινητών τηλεφώνων σε πολύ υψηλό εύρος ζώνης. Ο χρήστης δεν είχε ποτέ εμπειρία τόσο μεγάλης αξίας τεχνολογίας που περιλαμβάνει όλους τους τύπους προηγμένων χαρακτηριστικών. Η τεχνολογία 5G θα είναι πιο ισχυρή και με τεράστια ζήτηση στο εγγύς μέλλον.



Εικόνα 1: Εξέλιξη της κινητής ασύρματης τεχνολογίας (RANI P. TIDKE, 2021).

Κεφάλαιο 2 – Χαρακτηριστικά και σύγκριση τεχνολογιών

Μπορούμε να πούμε ότι τα πρότυπα επικοινωνίας των ασύρματων τηλεφώνων έχουν τη δική τους ιστορική διαδρομή, δεδομένου ότι καθόρισαν ολόκληρες γενιές ασύρματων συσκευών. Η εποχή που πρωτοεμφανίστηκε η τεχνολογία 1G αποτέλεσε μια επανάσταση στο χώρο της ασύρματης επικοινωνίας. Η τελευταία δεκαετία υπήρξε μάρτυρας μιας αξιοσημείωτης ανάπτυξης στον κλάδο των ασύρματων δικτύων, τόσο από την άποψη της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας όσο και των συνδρομητών της. Με όλες τις τεχνολογικές εξελίξεις και την ταυτόχρονη ύπαρξη των δικτύων 2G, 2.5G, 3G και 4G, ο αντίκτυπος των υπηρεσιών στην αποτελεσματικότητα του δικτύου έχει γίνει ακόμη πιο κρίσιμος. Και η πιο πρόσφατη προσθήκη σε αυτήν την ομάδα τεχνολογιών, είναι η τεχνολογία 5G, η οποία υπόσχεται μια πραγματική επανάσταση στο χώρο του διαδικτύου, όπως το ξέρουμε με αστραπιαίες γρήγορες ταχύτητες που ανοίγουν μια βεντάλια επιλογών στους χρήστες που δεν υπήρχε προηγούμενα. Το G σημαίνει Generation. Αναφέρεται στις τεχνολογικές εξελίξεις των γενεών στις κινητές τηλεπικοινωνίες που έλαβαν χώρα τα τελευταία πενήντα χρόνια. Αυτές οι προόδους καθορίζονται από πρότυπα απόδοσης που έχουν συμφωνηθεί από εθνικούς, διεθνείς και βιομηχανικούς οργανισμούς.



Εικόνα 2: Ιστορικό επικοινωνίας στην κινητή τηλεφωνία (Vignesh. C. R, 2016).

2.1 Χρήση της ασύρματης επικοινωνίας

Η ασύρματη τεχνολογία διαφοροποιείται με βάση το εύρος της. Ορισμένες συσκευές προσφέρουν συνδεσιμότητα σε απόσταση λίγων μέτρων. Το Bluetooth και άλλες τεχνολογίες καλύπτουν μεσαίου μεγέθους χώρο γραφείου. Το κινητό τηλέφωνο καλύπτει ολόκληρες ηπείρους (Erik G. Larsson, 2017). Η ασύρματη τεχνολογία προσφέρει στο ηλεκτρονικό εμπόριο πιο ευέλικτους και φθηνούς τρόπους αποστολής και λήψης δεδομένων. Τα βασικά οφέλη της ασύρματης τεχνολογίας είναι τα εξής:

1. Handoff: Η μεταβίβαση αναφέρεται στη διαδικασία μεταφοράς μιας ενεργής κλήσης ή μιας περιόδου σύνδεσης δεδομένων από μια κυψέλη σε ένα κυψελοειδές δίκτυο σε άλλη ή από ένα κανάλι σε μια κυψέλη σε άλλο. Μια καλά υλοποιημένη μεταβίβαση είναι σημαντική για την παροχή αδιάλειπτης υπηρεσίας σε έναν καλόντα ή χρήστη της περιόδου σύνδεσης δεδομένων (Akprakwu et al., 2018).

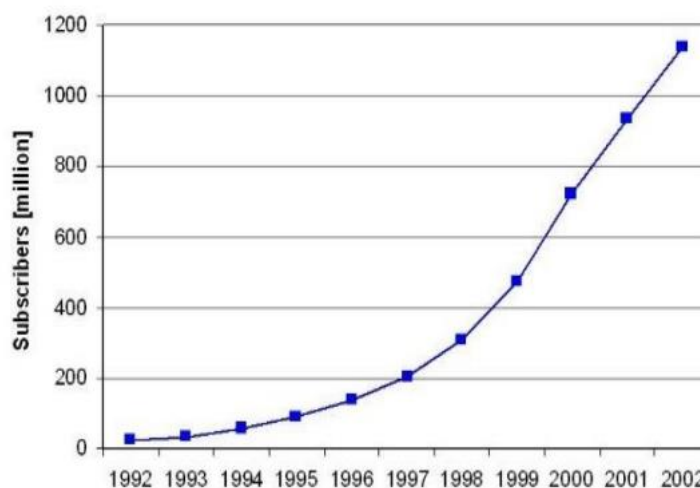
2. Τμηματοποίηση κυψέλης: Στην τμηματοποίηση κυψέλης, μια ενιαία πανκατευθυντική κεραία στο σταθμό βάσης αντικαθίσταται από πολλές κατευθυντικές κεραίες, καθεμία από τις οποίες ακτινοβολεί εντός ενός καθορισμένου τομέα.

3. Αυξημένη αποτελεσματικότητα: Τα συστήματα επικοινωνίας υψηλής τεχνολογίας οδηγούν σε ταχύτερη μεταφορά πληροφοριών εντός των επιχειρήσεων και μεταξύ των πελατών.

4. Σπάνια εκτός επαφής: Δεν χρειάζεται να μεταφέρετε καλώδια ή προσαρμογείς για πρόσβαση σε δίκτυα γραφείου.

5. Μεγαλύτερη ευελιξία για τους χρήστες: Οι ασύρματοι εργαζόμενοι στο γραφείο μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο χωρίς να κάθονται σε εξειδικευμένους υπολογιστές.

6. Μειωμένο κόστος: Τα ασύρματα δίκτυα είναι συνήθως φθηνότερα στην εγκατάσταση και τη συντήρηση από τα ενσύρματα δίκτυα.



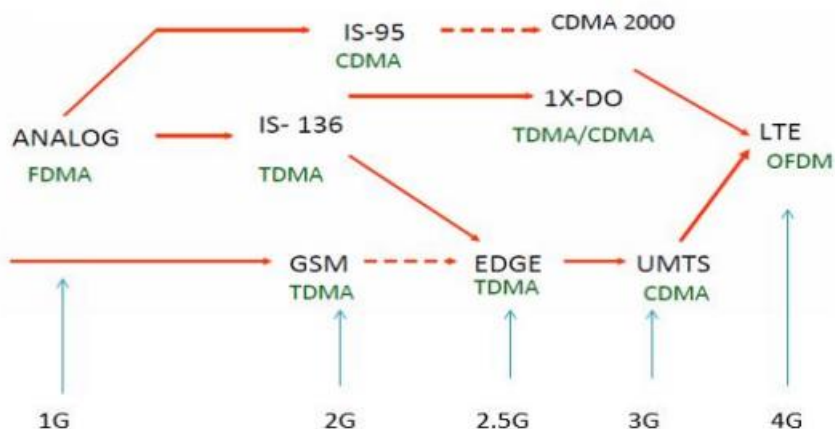
Note that the curve starts to flatten in 2000 – 2004: 1.5 billion users

Εικόνα 3: Παγκόσμια ανάπτυξη συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας (Md Hasan Mahmud, 2019).

Η παγκόσμια έκρηξη στις κινητές επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας ήταν πραγματικά εκπληκτική. Στα τέλη του 1998 υπήρχαν περισσότεροι από 300 εκατομμύρια συνδρομητές σε όλο τον κόσμο, από μόλις 11 εκατομμύρια το 1990. Μέχρι το τέλος αυτής της δεκαετίας θα υπάρχουν περισσότεροι από μισό δισεκατομμύριο χρήστες

κινητής τηλεφωνίας (T. S. Rappaport et al., 2017). Η κινητή ήδη αντιπροσωπεύει σχεδόν το ένα τρίτο όλων των τηλεφωνικών συνδέσεων. Φαίνεται πολύ πιθανό ότι ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας θα ξεπεράσει τις συμβατικές σταθερές γραμμές κατά την πρώτη δεκαετία της επόμενης χιλιετίας. Τόσο οι ανεπτυγμένες όσο και οι αναπτυσσόμενες χώρες συμμετέχουν σε αυτήν την επανάσταση: στις ανεπτυγμένες χώρες, οι χρήστες συρρέουν στην κινητή τηλεφωνία ως συμπλήρωμα στις υπάρχουσες σταθερές γραμμές. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, η κινητή τηλεφωνία αναδύεται ως υποκατάστατο των ελλείψεων σταθερών γραμμών. Η αύξηση των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως αυξάνεται μέρα με τη μέρα.

Η κινητή επικοινωνία έχει γίνει πιο δημοφιλής τα τελευταία χρόνια λόγω της γρήγορης μεταρρύθμισης από 1G σε 5G στην τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η μεταρρύθμιση οφείλεται στην απαίτηση τεχνολογιών μετάδοσης συμβατών με υπηρεσίες και στην πολύ υψηλή αύξηση των πελατών τηλεπικοινωνιών (Erik G. Larsson, 2017). Η παραγωγή αναφέρεται στην αλλαγή στη φύση της τεχνολογίας μετάδοσης συμβατής με υπηρεσίες και στις νέες ζώνες συχνοτήτων. Το 1980 ξεκίνησε η εποχή της κινητής τηλεφωνίας και από τότε οι κινητές επικοινωνίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές και έχουν γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη.



Εικόνα 4: Εξέλιξη της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας 1G σε 4G (Md Hasan Mahmud, 2019).

2.1.1 Η ιδέα των κυψελωτών δικτύων

Η έννοια της κυψελοειδούς δικτύωσης εισήχθη για πρώτη φορά από τον McDonald των Bell Telephone Laboratories (BTL) στη θεμελιώδη εργασία του το 1979, The Cellular Concept. Η ιδέα συνίσταται στη διαίρεση μιας περιοχής που καλύπτεται από έναν μεγάλο σταθμό πομπού σε μικρότερες περιοχές ή κυψέλες. Κάθε κυψέλη, με

χαμηλότερη ισχύ πομπού, επικοινωνεί ασύρματα μεταξύ χρηστών τηλεφώνου σε διαφορετικές κυψέλες, σε περιορισμένο αριθμό συχνοτήτων. Έτσι επιτυγχάνονται δύο σημαντικά αποτελέσματα.

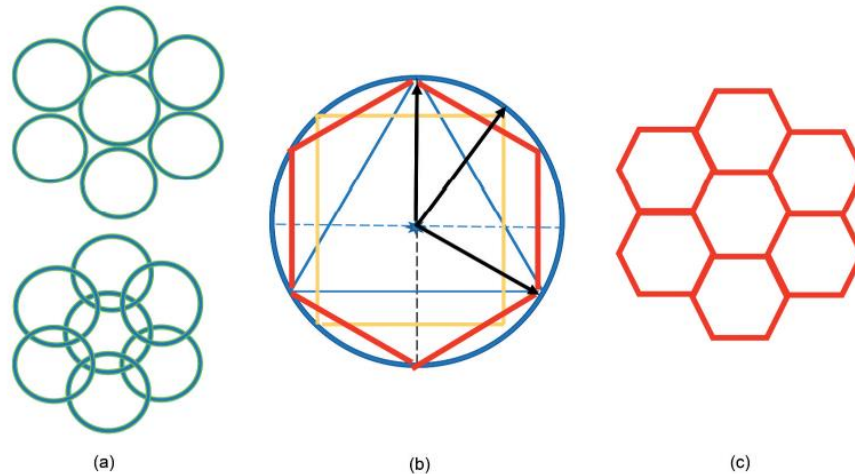
(1) Η ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ενός περιορισμένου αριθμού συχνοτήτων επιτρέπει σε μια περιοχή που περιλαμβάνει πολλές κυψέλες να χειρίζεται έναν αριθμό ταυτόχρονων κλήσεων πολύ μεγαλύτερο από τον αριθμό των εκχωρημένων συχνοτήτων καναλιού. Οι ίδιες συχνότητες χρησιμοποιούνται σε μη γειτονικά κελιά, αλλά είναι αρκετά χαμηλές ώστε να αποφεύγονται παρεμβολές με γειτονικά κελιά που λειτουργούν σε ένα σύνολο διαφορετικών συχνοτήτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ: Χωρητικότητα συστήματος ή αριθμός συνδρομητών ανά κατανομημένο αυξάνονται τα κανάλια. Όπως θα δούμε παρακάτω, η χωρητικότητα μεγεθύνεται από το πόσα υποσύνολα κυψελών διαφορετικών συχνοτήτων επαναχρησιμοποιούν το ίδιο σύνολο συχνοτήτων.

(2) Επιπλέον, το CELL SPLITTING είναι μια διαδικασία, όπως εάν μειωθεί το μέγεθος των κυψελών, επιτρέπει την αύξηση των ταυτόχρονων κλήσεων χωρίς την προσθήκη νέων συχνοτήτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ: Αυξάνεται η πυκνότητα συνδρομητών ή ο αριθμός των συνδρομητών ανά μονάδα επιφάνειας. Διατηρείται η ίδια κατανομή φάσματος, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φασματική απόδοση. Πριν συζητήσουμε τις δύο παραπάνω έννοιες, ας στραφούμε στην επιλογή της γεωμετρίας των κυττάρων.

Ένα κυκλικό κελί είναι η απλούστερη γεωμετρία για εφαρμογή. Η Εικόνα 5(α) παρακάτω, καθιστά σαφές ποιο είναι το πρόβλημα με μια τέτοια γεωμετρία. Το πάνω μέρος του σχήματος δείχνει σφιχτό «πακετάρισμα», αλλά με κενά. Η κάλυψη με ένα σύνολο διαφορετικών συχνοτήτων περιορίζεται εντός των ορίων κάθε κυψέλης. Έτσι, τα κενά μεταξύ των κυκλικών κυψελών δημιουργούν νεκρές ζώνες όπου δεν είναι δυνατή η επικοινωνία. Το κάτω μέρος της Εικόνας 5(α) δείχνει πώς να κάνετε τη συσκευασία πιο σφιχτή επικαλύπτοντας τις κυκλικές κυψέλες, αλλά αυτό οδηγεί σε παρεμβολή μεταξύ των κυψελών. Η Εικόνα 5(β) δείχνει τρεις διαμορφώσεις πολυγώνων εγγεγραμμένες στον κύκλο: Ισόπλευρο τρίγωνο, τετράγωνο και εξάγωνο, με ακτίνες (που ορίζονται ως η γραμμή από το κέντρο του σχήματος σε οποιαδήποτε από τις κορυφές του) ίση με αυτή του κύκλου. Από τα τρία πολύγωνα, το εξάγωνο έχει το μεγαλύτερο εμβαδόν. Η επιλογή πολυγώνων υψηλότερης τάξης για να έρθουν πιο κοντά στην επιφάνεια του κυκλικού κελιού φτάνει σε σημείο φθίνουσας απόδοσης.



Εικόνα 5: Γεωμετρία κυψέλης όπου φαίνεται η αποτελεσματικότητα συσκευασίας κύκλων και εξαγώνων (Hodara & Skaljo, 2021).

2.2 Διαδίκτυο συσκευών (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι μια εξελισσόμενη παγκόσμια τάση στην αρχιτεκτονική πληροφοριών που βασίζεται στο διαδίκτυο και βοηθά στην ανταλλαγή υπηρεσιών και αγαθών μέσω ενός δικτύου χωρίς να απαιτείται η αλληλεπίδραση ανθρώπου με άνθρωπο ή ανθρώπου με υπολογιστή. Έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στην αλληλεπίδραση του φυσικού κόσμου μεταξύ ατόμων και οργανισμών. Η εφαρμογή του IoT μπορεί να αναγνωριστεί σημαντικά σε πολλούς τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η διαχείριση πόρων, η μάθηση, η επεξεργασία γνώσης αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς. Η πρακτική υλοποίηση του IoT αντιμετωπίζεται με μια πληθώρα προκλήσεων ασφάλειας και απορρήτου που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή ανάπτυξη του IoT σε εμπορικά βιώσιμη μεγάλη κλίμακα. Αυτή η εργασία αναλύει τα ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με τα δίκτυα IoT μέσω μιας ανάλυσης των υπάρχουσών εμπειρικών ερευνών για να αποκτήσει μια εικόνα για τις απαιτήσεις ασφάλειας των δικτύων IoT. Τα ευρήματα της μελέτης αποκάλυψαν ότι οι απειλές για την ασφάλεια είναι μία από τις μεγαλύτερες και συνεχώς αυξανόμενες προκλήσεις για το IoT και είναι σημαντικό να μετριάστούν ουσιαστικά για την επιτυχία αυτής της πλατφόρμας.

Το IoT ορίζεται ως μια ενεργή παγκόσμια αρχιτεκτονική δικτύου που έχει ικανότητες αυτο-διαμόρφωσης βασισμένες σε τυπικά και διασυνδεδεμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπου τόσο τα εικονικά όσο και τα φυσικά αντικείμενα/πράγματα έχουν ταυτότητες, φυσικά χαρακτηριστικά και εικονική αναπαράσταση». Ο όρος «Internet of

Things» (IoT) επινοήθηκε από τον Kevin Ashton, το 1999 και αργότερα εισήχθη επίσημα το 2005 από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU). Είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο δίκτυο που δυνητικά θα μεταμορφώσει τις ανθρώπινες ζωές και αποτελεί την επόμενη μεγάλη εξέλιξη στην τεχνολογία του διαδικτύου. Η θεμελιώδης ιδέα του IoT είναι να προσαρτά ενσωματωμένους αισθητήρες ή μικροσκοπικές συσκευές σε καθημερινά αντικείμενα/πράγματα για να τα μετατρέψει σε έξυπνα αντικείμενα/πράγματα. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του IoT περιλαμβάνουν κινητικότητα, ασύρματη συνδεσιμότητα, ενσωματωμένους αισθητήρες, ευρύ φάσμα τεχνολογικής χρήσης και υποστήριξη για διάφορες συσκευές (Kermani et al., 2013). Το IoT αντιπροσωπεύει μια μητρική κλάση (το σύστημα στο οποίο συνδέονται πολλές συσκευές με τα δικά τους πρωτόκολλα επικοινωνίας) για εικονικά και φυσικά πράγματα στο περιβάλλον και επιτρέπει την έξυπνη επικοινωνία, ενσωματωμένη στο δίκτυο πληροφοριών. Τα τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά του IoT είναι η ανίχνευση, η πρόσβαση σε πληροφορίες με ετερογενής πρόσβαση, οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες και η ασφάλεια απορρήτου και απαιτούμενη εμπιστοσύνη (Su et al., 2011). Το IoT έχει γίνει απαραίτητο στο επιχειρηματικό περιβάλλον μέσα σε λίγο χρόνο και έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως η ικανότητά του να διευκολύνει τη λειτουργική διαδικασία των επιχειρήσεων και την άμεση επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων τους. Επιπρόσθετα, οι εφαρμογές του IoT σε διαφορετικούς τομείς της καθημερινής ζωής φαίνεται να αυξάνονται σημαντικά. Τα τελευταία χρόνια, η έννοια του IoT έχει εφαρμοστεί, μεταξύ άλλων, στην παρακολούθηση θερμοκηπίων, στην ανάγνωση έξυπνων ηλεκτρικών μετρητών, στην παρακολούθηση τηλεϊατρικής καθώς και στις έξυπνες μεταφορές (Khan et al., 2012). Η δυνατότητα του IoT να προσφέρει διασύνδεση «πραγμάτων» σε όλο τον κόσμο μέσω μικροσκοπικών συστημάτων και δικτύων αισθητήρων μπορεί να συμβάλλει αισθητά στην παγκόσμια επικοινωνία. Στον τομέα αυτό, εγείρονται ανησυχίες που σχετίζονται με θέματα ασφάλειας, απορρήτου και εμπιστοσύνης στη διαβίβαση λήψης των πληροφοριών.

Το IoT δεν έχει ένα μοναδικό ορισμό. Ωστόσο, μια ευρεία ερμηνεία του IoT είναι ότι παρέχει οποιαδήποτε υπηρεσία μέσω του παραδοσιακού διαδικτύου επιτρέποντας την επικοινωνία μεταξύ ανθρώπου με κάποιο αντικείμενο ή μεταξύ αντικειμένων. Το IoT αντιπροσωπεύει τη διασύνδεση ετερογενών οντοτήτων, όπου ο όρος οντότητα αναφέρεται σε άνθρωπο, αισθητήρα ή δυνητικά οτιδήποτε μπορεί να ζητήσει ή να παρέχει μια υπηρεσία. Η εμφάνιση του παραδείγματος IoT είναι ένα από τα πιο

θεαματικά φαινόμενα της τελευταίας δεκαετίας. Η ανάπτυξη διαφόρων πρωτοκόλλων επικοινωνίας, μαζί με τη σμίκρυνση των πομποδεκτών, παρέχει την ευκαιρία να μετατραπεί μια απομονωμένη συσκευή σε ένα πράγμα που επικοινωνεί. Επιπλέον, η υπολογιστική ισχύς, η ενεργειακή χωρητικότητα και οι δυνατότητες αποθήκευσης μικρών υπολογιστικών ή αισθητήριων συσκευών έχουν βελτιωθεί σημαντικά, ενώ τα μεγέθη τους έχουν μειωθεί δραστικά. Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις στα ηλεκτρονικά και την επιστήμη των υπολογιστών έχουν οδηγήσει σε εκθετική αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων στο διαδίκτυο συσκευών αντίληψης και υπολογιστών (γνωστές και ως έξυπνες συσκευές) που μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες περιορισμένες μόνο από την ανθρώπινη φαντασία (Mosenia & Jha, 2016). Ως παρενέργεια, ο αριθμός των πιθανών απειλών και πιθανών επιθέσεων κατά της ασφάλειας ή του απορρήτου ενός πράγματος ή ενός ατόμου έχει αυξηθεί δραστικά. Δυστυχώς, αυτές οι ανάγκες ασφαλείας δεν είναι ακόμη ευρέως αναγνωρισμένες. Επομένως, οι απειλές για την ασφάλεια της επικοινωνίας και οι κοινές ανησυχίες για την προστασία της ιδιωτικής ζωής πρέπει να μελετηθούν και να αντιμετωπιστούν σε βάθος. Αυτό θα απλοποιούσε σημαντικά την ανάπτυξη ασφαλών έξυπνων συσκευών που επιτρέπουν μια πληθώρα υπηρεσιών για τον άνθρωπο, που κυμαίνονται από τον αυτοματισμό κτιρίων, έως την παρακολούθηση της υγείας, όπου πολύ διαφορετικά πράγματα, π.χ. αισθητήρας θερμοκρασίας, αισθητήρας φωτός και ιατρικοί αισθητήρες, θα μπορούσαν να αλληλοεπιδράσουν το καθένα με κάποιο άλλο ή με έναν άνθρωπο που μεταφέρει μια έξυπνη υπολογιστική συσκευή, π.χ. smartphone, tablet ή φορητό υπολογιστή. Η ασφάλεια του IoT είναι ένα συνεχιζόμενο ερευνητικό θέμα που προσελκύει αυξανόμενη προσοχή στην ακαδημαϊκή, βιομηχανική καθώς και στην κυβερνητική έρευνα. Πολλοί οργανισμοί παγκοσμίως και πολυεθνικές εταιρείες εμπλέκονται στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων που βασίζονται στο IoT. Για την παροχή μεγάλου αριθμού αξιόπιστων υπηρεσιών, οι σχεδιαστές συναντούν αρκετές προκλήσεις, ιδίως σε ερευνητικούς τομείς που σχετίζονται με την ασφάλεια. Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες προσπαθούν επί του παρόντος να ανακαλύψουν πιθανές απειλές και να παράσχουν αντίμετρα εναντίον τους, πριν αυτές εξελιχθούν. Αυτή η έρευνα συνοψίζει αυτές τις απειλές και τα αντίμετρα για την ασφάλεια του IoT με τρόπο επίπεδο προς επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, αυτό:

- περιγράφει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αναφοράς του IoT,
- παρέχει στους αναγνώστες έναν ορισμό των απαιτήσεων οκτάβας

- πληροφοριών, διασφάλισης και ασφάλειας (IAS) στο πεδίο εφαρμογής του IoT,
- συνοψίζει τις απειλές στο επίπεδο άκρης του μοντέλου αναφοράς,
 - εξετάζει τα προτεινόμενα αντίμετρα για την αντιμετώπιση πιθανών απειλών και
 - εισάγει δύο αναδυόμενες προκλήσεις ασφάλειας που δεν έχουν ακόμη εξηγηθεί λεπτομερώς στην προηγούμενη υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να δώσει την ευκαιρία να διερευνηθούν ποιες επιθέσεις έχουν εξαπολυθεί, πώς αντιμετωπίστηκαν και ποιες απειλές εξακολουθούν να ελλοχεύουν.

2.2.1 Πρότυπα μοντέλα IoT

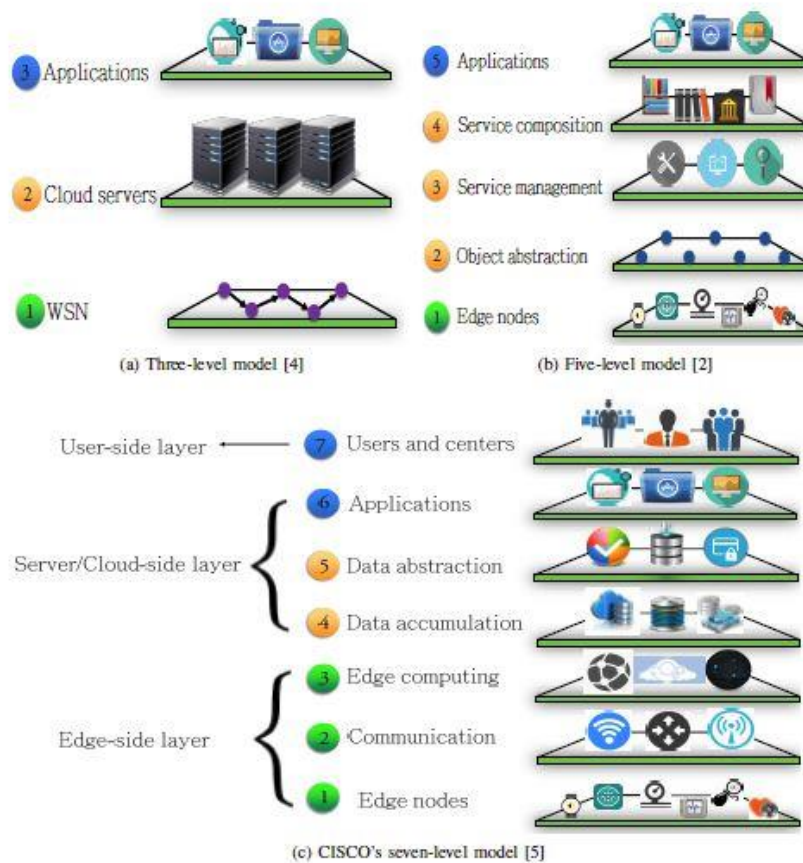
Τρία μοντέλα αναφοράς IoT έχουν συζητηθεί ευρέως σε ακαδημαϊκές και βιομηχανικές δημοσιεύσεις. Η Εικόνα 1 δείχνει αυτά τα μοντέλα και τα διαφορετικά επίπεδα που τα απαρτίζουν. Το μοντέλο τριών επιπέδων είναι από τα πρώτα μοντέλα αναφοράς που προτείνονται για το IoT (Gubbi et al., 2013). Απεικονίζει το IoT ως μια εκτεταμένη έκδοση ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN). Στην πραγματικότητα, μοντελοποιεί το IoT ως συνδυασμό WSN και διακομιστών cloud, οι οποίοι προσφέρουν διαφορετικές υπηρεσίες στον χρήστη. Το μοντέλο πέντε επιπέδων είναι μια εναλλακτική λύση που έχει προταθεί για τη διευκόλυνση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών τμημάτων μιας επιχείρησης αποσυνθέτοντας πολύπλοκα συστήματα σε απλοποιημένες εφαρμογές που αποτελούνται από ένα οικοσύστημα απλούστερων και καλά καθορισμένων στοιχείων. Το 2014, η CISCO πρότεινε μια ολοκληρωμένη επέκταση στα παραδοσιακά μοντέλα τριών και πέντε επιπέδων. Το μοντέλο επτά επιπέδων της CISCO έχει τη δυνατότητα να τυποποιηθεί και έτσι να δημιουργήσει ένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο αναφοράς για το IoT (CISCO, 2014). Σε αυτό το μοντέλο, η ροή δεδομένων είναι συνήθως αμφίδρομη. Ωστόσο, η κυρίαρχη κατεύθυνση της ροής δεδομένων εξαρτάται από την εφαρμογή. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα ελέγχου, τα δεδομένα και οι εντολές ταξιδεύουν από το πάνω μέρος του μοντέλου (επίπεδο εφαρμογών) στο κάτω μέρος (επίπεδο κόμβου ακμής), ενώ σε ένα σενάριο παρακολούθησης, η ροή είναι από κάτω προς τα πάνω. Προκειμένου να παρουσιασθούν συνοπτικά οι επιθέσεις ασφάλειας IoT και τα αντίμετά τους με τρόπο επίπεδο προς επίπεδο, χρησιμοποιείται το μοντέλο αναφοράς της CISCO. Στη συνέχεια, περιγράφεται εν συντομία κάθε επίπεδο αυτού του προτεινόμενου μοντέλου. Συσκευές επιπέδου 1: Το πρώτο επίπεδο αυτού του μοντέλου αναφοράς αποτελείται

συνήθως από υπολογιστικούς κόμβους, π.χ., έξυπνους ελεγκτές, αισθητήρες, συσκευές ανάγνωσης RFID, κ.λπ. και διαφορετικές εκδόσεις ετικετών RFID. Η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από αυτό το επίπεδο και πάνω.

Επίπεδο 2 - επικοινωνία: Το επίπεδο επικοινωνίας αποτελείται από όλα τα στοιχεία που επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφοριών ή εντολών: (i) επικοινωνία μεταξύ συσκευών στο πρώτο επίπεδο, (ii) επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων στο δεύτερο επίπεδο και (iii) μετάδοση πληροφοριών μεταξύ του πρώτου και του τρίτου επιπέδου (άκρο υπολογιστικό επίπεδο).

Υπολογισμός επιπέδου 3 - Άκρον: Ο υπολογισμός άκρων, που ονομάζεται επίσης και υπολογισμός fog, είναι το τρίτο επίπεδο του μοντέλου στο οποίο ξεκινά η απλή επεξεργασία δεδομένων. Αυτό είναι απαραίτητο για τη μείωση του υπολογιστικού φορτίου στο υψηλότερο επίπεδο καθώς και για την παροχή γρήγορης απόκρισης. Οι περισσότερες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο πρέπει να εκτελούν υπολογισμούς όσο το δυνατόν πιο κοντά στην άκρη του δικτύου. Η ποσότητα της επεξεργασίας σε αυτό το επίπεδο εξαρτάται από την υπολογιστική ισχύ των παρόχων υπηρεσιών, των διακομιστών και των κόμβων υπολογιστών. Συνήθως, εδώ χρησιμοποιούνται απλοί αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος και εκμάθησης.

Επίπεδο 4 - Συσσώρευση δεδομένων: Οι περισσότερες από τις εφαρμογές ενδέχεται να μη χρειάζονται άμεση επεξεργασία δεδομένων. Αυτό το επίπεδο επιτρέπει τη μετατροπή δεδομένων σε κίνηση σε δεδομένα σε κατάσταση ηρεμίας, δηλαδή, μας επιτρέπει να αποθηκεύουμε τα δεδομένα για μελλοντική ανάλυση ή να τα μοιραζόμαστε με υπολογιστές υψηλού επιπέδου. Οι κύριες εργασίες αυτού του επιπέδου είναι η μετατροπή της μορφής από πακέτα δικτύου σε πίνακες βάσεων δεδομένων, μειώνοντας τα δεδομένα μέσω φιλτραρίσματος και επιλεκτικής αποθήκευσης και προσδιορίζοντας εάν τα δεδομένα ενδιαφέρουν υψηλότερα επίπεδα.



Εικόνα 6: Τα προτεινόμενα μοντέλα για το IoT (CISCO, 2014).

Επίπεδο 5 - Αφαίρεση δεδομένων: Αυτό το επίπεδο παρέχει την ευκαιρία απόδοσης και αποθήκευσης δεδομένων έτσι ώστε η περαιτέρω επεξεργασία να γίνεται απλούστερη ή πιο αποτελεσματική. Τα κοινά καθήκοντα των οντοτήτων σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνουν την κανονικοποίηση, την αποκανονικοποίηση, την ευρετηρίαση και την ενοποίηση δεδομένων σε ένα μέρος και την παροχή πρόσβασης σε πολλαπλούς χώρους αποθήκευσης δεδομένων.

Επίπεδο 6 - Εφαρμογές: Το επίπεδο εφαρμογής παρέχει πληροφορίες ερμηνεία, όπου το λογισμικό συνεργάζεται με τα επίπεδα συσσώρευσης δεδομένων και αφαίρεσης δεδομένων. Οι εφαρμογές του IoT είναι πολυάριθμες και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις αγορές και τις βιομηχανικές ανάγκες.

Επίπεδο 7 - Χρήστες και κέντρα: Το υψηλότερο επίπεδο του IoT είναι το σημείο όπου βρίσκονται οι χρήστες. Οι χρήστες κάνουν χρήση των εφαρμογών και των αναλυτικών τους δεδομένων.



Εικόνα 7: Διαφορετικές εφαρμογές του IoT. (α) έξυπνα οχήματα, (β) έξυπνα κτίρια, (γ) παρακολούθηση της υγείας, (δ) διαχείριση ενέργειας, (ε) διαχείριση κατασκευών, (στ) παρακολούθηση του περιβάλλοντος, (ζ) διαχείριση γραμμής παραγωγής και συναρμολόγησης και (η) αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων (Mosenia & Jha, 2016).

Έξυπνα σπίτια και κτίρια, ηλεκτρονικά βοηθήματα υγείας και πιο έξυπνα οχήματα είναι μερικές μόνο από τις περιπτώσεις εφαρμογής του IoT. Κάθε έξυπνη συσκευή μπορεί να παρέχει πολλές υπηρεσίες για να επιτρέψει ένα πιο διαισθητικό περιβάλλον. Ωστόσο, δεν είμαστε καν κοντά στο να αξιολογήσουμε και να αξιοποιήσουμε τις πιθανές χρήσεις του IoT. Το IoT παρέχει την ευκαιρία να συνδυαστεί η ανίχνευση, η επικοινωνία, η δικτύωση, ο έλεγχος ταυτότητας, η αναγνώριση και ο υπολογισμός ενός συστήματος ή εκτίμησης μίας κατάστασης και επιτρέπει πολλές υπηρεσίες κατόπιν σχετικού αιτήματος, έτσι ώστε η πρόσβαση στις πληροφορίες οποιουδήποτε έξυπνου πράγματος να είναι δυνατή ανά πάσα στιγμή. Η Εικόνα 2 δείχνει διάφορες εφαρμογές του IoT, οι οποίες περιγράφονται παραπάνω.

1. Έξυπνα οχήματα: Τα έξυπνα οχήματα έχουν αρχίσει να φέρνουν επανάσταση στις παραδοσιακές μεταφορές. Τα μικρά συστήματα που βασίζονται στο IoT μπορούν να επιτρέψουν το απομακρυσμένο κλείδωμα/ξεκλείδωμα των αυτοκινήτων, τη λήψη οδικών χαρτών και την πρόσβαση σε πληροφορίες κυκλοφορίας. Επιπλέον, τα αυτοκίνητα που είναι συνδεδεμένα στο διαδίκτυο παρέχουν σημαντική προστασία τους κατά της κλοπής, με χρήση τεχνολογιών συνεχόμενου εντοπισμού της θέσης τους ή αυτόματης ειδοποίησης του ιδιοκτήτη τους σε περίπτωση εκκίνησης τους.

Επιπρόσθετα, με χρήση διάφορων αισθητήρων μπορούν να παρέχουν στον οδηγό μια πλειάδα πληροφοριών για τη θέση του οχήματος στο δρόμο, για την απόσταση μεταξύ των διερχόμενων οχημάτων. Αυτές με τη σειρά τους επικοινωνούνται στον εγκέφαλο του οχήματος και αυτός λαμβάνει τις πρέπουσες αποφάσεις.

2. Έξυπνα κτίρια: Τα έξυπνα σπίτια και τα κτίρια επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση ενέργειας. Για παράδειγμα, οι έξυπνοι θερμοστάτες, που διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες και αλγόριθμους ανάλυσης δεδομένων, μπορούν να ελέγχουν τα κλιματιστικά με βάση τις προτιμήσεις και τις συνήθειες των χρηστών. Επιπλέον, οι έξυπνοι ελεγκτές μπορούν να προσαρμόσουν το φωτισμό με βάση την καθημερινή χρήση του χρήστη. Πολλά είδη οικιακής χρήσης, π.χ. ψυγεία, τηλεοράσεις και συστήματα ασφαλείας, θα μπορούσαν να έχουν τις δικές τους μονάδες επεξεργασίας και να παρέχουν υπηρεσίες μέσω διαδικτύου. Αυτές οι έξυπνες συσκευές βελτιώνουν σημαντικά την άνεση των χρηστών αλλά και την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Οι τηλεχειριζόμενες συσκευές λαμβάνουν εντολές από τους χρήστες για την εκτέλεση ενεργειών που έχουν επίδραση στο περιβάλλον. Έτσι, οι επιθέσεις σε αυτές τις συσκευές μπορεί να οδηγήσουν σε φυσικές συνέπειες (λ.χ. αύξηση του ενεργειακού κόστους χρήσης) (Kermani et al., 2013).

3. Παρακολούθηση της υγείας: Πρόσφατες εξελίξεις στη βιοϊατρική ανίχνευση και την επεξεργασία σήματος, οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης και η ασύρματη επικοινωνία έχουν φέρει επανάσταση στην υγειονομική περίθαλψη. Τα συστήματα μακροχρόνιας παρακολούθησης της προσωπικής υγείας και παράδοσης φαρμάκων που βασίζονται στο IoT, στα οποία λαμβάνονται, αναλύονται και αποθηκεύονται διάφορα φυσιολογικά σήματα για μελλοντική χρήση, παρέχουν μια θεμελιωδώς νέα προσέγγιση στην υγειονομική περίθαλψη. Οι έξυπνες ιατρικές συσκευές χρησιμοποιούνται ήδη σε συστήματα φυσικής κατάστασης, διατροφής και παρακολούθησης της υγείας. Το μέλλον των συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης που βασίζονται στο IoT έγκειται στον σχεδιασμό προσωπικών οθονών υγείας που επιτρέπουν την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών για την έγκαιρη διάγνωση και θεραπεία τους πριν ο παθών εμφανίσει συμπτώματα.

4. Διαχείριση ενέργειας: Η χρήση έξυπνων συστημάτων που βασίζονται σε IoT, τα οποία ενσωματώνουν ενσωματωμένους αισθητήρες και στοιχεία ενεργοποίησης, επιτρέπει μια προληπτική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Ειδικότερα, οι πρίζες, οι λαμπτήρες, τα ψυγεία και οι έξυπνες τηλεοράσεις, που μπορούν να ελεγχθούν από απόσταση, αναμένεται να ανταλλάσσουν πληροφορίες

με εταιρείες παροχής ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στα έξυπνα σπίτια. Επιπλέον, τέτοια πράγματα επιτρέπουν στους χρήστες να τα ελέγχουν ή να τα διαχειρίζονται εξ αποστάσεως και επιτρέπουν τον προγραμματισμό τους, που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και σε σημαντικά μικρότερη φθορά της συσκευής από την αχρείαστη χρήση και λειτουργία της (π.χ. λειτουργία του κλιματιστικού όταν δεν είναι κανείς παρών).

5. Διαχείριση κατασκευών: Η παρακολούθηση και η διαχείριση της σύγχρονης υποδομής, π.χ., γέφυρες, φανάρια, σιδηροδρομικές γραμμές και κτίρια, είναι μία από τις βασικές εφαρμογές του IoT (Su et al., 2011). Το IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση τυχόν ξαφνικών αλλαγών στις δομικές συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε κινδύνους για την ασφάλειά τους. Μπορεί επίσης να δώσει τη δυνατότητα στις εταιρείες κατασκευής και συντήρησης να μοιράζονται πληροφορίες σχετικά με τα σχέδιά τους. Για παράδειγμα, μια κατασκευαστική εταιρεία μπορεί να ενημερώσει τις εταιρείες GPS για τα σχέδια συντήρησης των δρόμων και, με βάση το πρόγραμμα αυτό, οι έξυπνες συσκευές GPS μπορούν να επιλέξουν μια εναλλακτική διαδρομή, η οποία αποφεύγει τον υπό κατασκευή δρόμο.

6. Περιβαλλοντική παρακολούθηση: Η χρήση έξυπνων πραγμάτων με ενσωματωμένους αισθητήρες επιτρέπει την παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθώς και τον εντοπισμό καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, π.χ. πλημμύρας, που απαιτούν γρήγορη απόκριση. Επιπλέον, η ποιότητα του αέρα και του νερού μπορεί να εξεταστεί από συσκευές που βασίζονται στο IoT. Επιπλέον, η υγρασία και η θερμοκρασία μπορούν να παρακολουθούνται εύκολα με χρήση των κατάλληλων αισθητήρων (Lazarescu, 2013).

7. Διαχείριση γραμμής παραγωγής και συναρμολόγησης: Τα έξυπνα συστήματα που βασίζονται στο IoT επιτρέπουν την ταχεία κατασκευή νέων προϊόντων και μια διαδραστική απόκριση στις απαιτήσεις, επιτρέποντας την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και συστημάτων ελέγχου/παρακολούθησης (Fleisch, 2010). Επιπλέον, οι έξυπνες προσεγγίσεις διαχείρισης που χρησιμοποιούν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο μπορούν επίσης να επιτρέψουν τη βελτιστοποίηση της ενέργειας και τη διαχείριση της ασφάλειας. Στη σημερινή βιομηχανία είναι απαραίτητη η προμήθεια και χρήση παραγωγικών μηχανών που μπορούν να αξιοποιήσουν τις νέες τεχνολογίες απομακρυσμένου ελέγχου τους.

8. Τροφική αλυσίδα εφοδιασμού: Το μοντέλο της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων είναι βασικά διανεμημένο και εξελιγμένο. Το IoT μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες

για τους διαχειριστές αυτής της αλυσίδας. Αν και το IoT χρησιμοποιείται ήδη στα συστήματα διαχείρισης εφοδιασμού, τα τρέχοντα οφέλη του είναι περιορισμένα. Ένα από τα πιο προφανή και σημαντικά πλεονεκτήματα του IoT στη διαχείριση της προσφοράς είναι ότι διασφαλίζει την ασφάλεια των προϊόντων χρησιμοποιώντας την παρακολούθηση βασισμένη στο IoT (Tajima, 2007). Αυτές οι συσκευές μπορούν να προειδοποιήσουν το υπεύθυνο προσωπικό σε περίπτωση παραβίασης της ασφάλειας σε οποιοδήποτε μη εξουσιοδοτημένο επίπεδο του συστήματος διαχείρισης ανεφοδιασμού.

2.3 Τεχνολογία 0G – 0.5G

Το 0G αναφέρεται στην τεχνολογία προ-κυτταρικής κινητής τηλεφωνίας στη δεκαετία του 1970. Αυτά τα κινητά τηλέφωνα ήταν συνήθως τοποθετημένα σε αυτοκίνητα ή φορτηγά, αν και κατασκευάζονταν και μοντέλα χαρτοφύλακα (T. S. Rappaport et al., 2017). Τα συστήματα κινητής ραδιοτηλεφωνίας προηγήθηκαν της σύγχρονης τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας. Δεδομένου ότι ήταν οι προκάτοχοι της πρώτης γενιάς κινητών τηλεφώνων, τα συστήματα αυτά αναφέρονται μερικές φορές ως συστήματα 0G (μηδενικής γενιάς).

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε συστήματα 0G περιλαμβάνουν PTT (Push to Talk), MTS (Σύστημα κινητής τηλεφωνίας), IMTS (Βελτιωμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας), AMTS (Προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας), OLT (Δημόσια Κινητή Τηλεφωνία) και MTD.0.5G ομάδα τεχνολογιών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά από τις βασικές τεχνολογίες 0G (Swati Yadav, 2018). Αυτά τα πρώιμα συστήματα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να διακριθούν από τα προηγούμενα κλειστά ραδιοτηλεφωνικά συστήματα στο ότι ήταν διαθέσιμα ως εμπορική υπηρεσία που αποτελούσε μέρος του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής, με τους δικούς τους αριθμούς τηλεφώνου, παρά ως μέρος ενός κλειστού δικτύου όπως το αστυνομικό ραδιόφωνο ή σύστημα αποστολής ταξί.

2.4 Τεχνολογία 1G

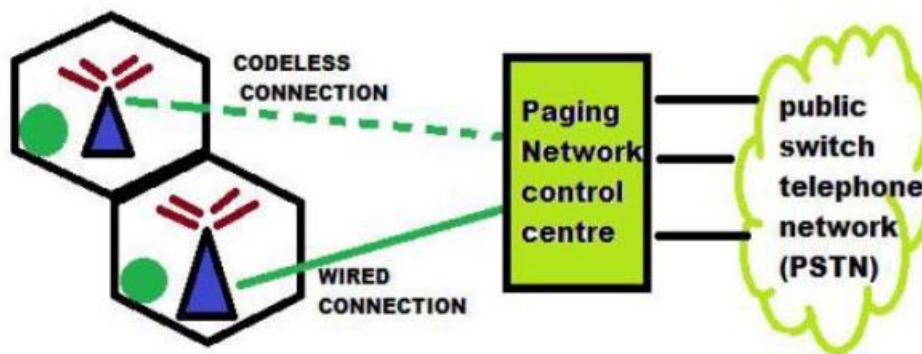
Το 1980 είχε ξεκινήσει η εποχή της κινητής τηλεφωνίας και από τότε οι κινητές επικοινωνίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές και έχουν γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη (Larsson et al., 2014). Τα κινητά συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες ομιλίας. Το 1979, το πρώτο κυψελοειδές σύστημα στον κόσμο τέθηκε σε λειτουργία από τη Nippon Telephone and Telegraph (NTT) στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Δύο χρόνια αργότερα, η κυψελοειδής εποχή

έφτασε και στην Ευρώπη. Τα δύο πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα ήταν τα Nordic Mobile Telephones (NMT) και τα Total Access Communication Systems (TACS). Εκτός από τα NMT και TACS, ορισμένα άλλα αναλογικά συστήματα εισήχθησαν επίσης τη δεκαετία του 1980 σε όλη την Ευρώπη (Nikhil Bhandari, 2017). Όλα αυτά τα συστήματα πρόσφεραν δυνατότητες παράδοσης και περιαγωγής, αλλά τα κυψελωτά δίκτυα δεν ήταν σε θέση να διαλειτουργήσουν μεταξύ των χωρών. Αυτό ήταν ένα από τα αναπόφευκτα μειονεκτήματα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς. Το σύστημα AMPS ήταν διαμορφωμένο στη συχνότητα και χρησιμοποιούσε πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA) με χωρητικότητα καναλιού 30KHz και ζώνη συχνοτήτων 824-894MHz. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Ταχύτητα-2,4kbps.
- Επιτρέπει φωνητικές κλήσεις σε 1 χώρα.
- Χρησιμοποιήστε αναλογικό σήμα.
- Κακή ποιότητα φωνής.
- Κακή διάρκεια ζωής της μπαταρίας.
- Μεγάλο μέγεθος τηλεφώνου.
- Περιορισμένη χωρητικότητα.
- Κακή αξιοπιστία μεταβίβασης.
- Κακή ασφάλεια.
- Προσφέρεται πολύ χαμηλό επίπεδο απόδοσης φάσματος.

Δίκτυα τηλεειδοποίησης

Αυτή είναι μια από τις παλαιότερες τεχνολογίες που περιλαμβάνει το άτομο ή τη συσκευή που καλεί και τον τηλεειδοποιητή. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι ένας καλών καλεί έναν τηλεειδοποιητή και αφήνει ένα σύντομο μήνυμα (Ms. Lopa J. Vora, n.d.). Η Εικόνα 8 δείχνει το δίκτυο τηλεειδοποίησης.



Εικόνα 8: Έννοια του συστήματος τηλεειδοποίησης (Md Hasan Mahmud, 2019).

Παράδειγμα τέτοιων δικτύων τηλεειδοποίησης αποτελεί το BellSouth Clamshell Pager με πληκτρολόγιο. Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα των δικτύων τηλεειδοποίησης:

- Είναι πολύ εύκολο να λειτουργήσει.
- Διεισδύει αποτελεσματικά μέσα από τα κτίρια.
- Οι χρήστες έχουν μια ανοιχτή επιλογή να το χρησιμοποιούν αριθμητικά, αλφαριθμητικά.
- Αποθήκευση μηνυμάτων.
- Καθόλου ακριβό.

Οι περιορισμοί των δικτύων τηλεειδοποίησης είναι οι εξής:

- Υπάρχει επιπλέον κόστος αμφίδρομης σελιδοποίησης.
- Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 1200bps, δηλαδή πολύ αργός.
- Προκαλείται επίσης υπερφόρτωση και καθυστέρηση.

2.5 Τεχνολογία 2G

Βασισμένο στην ψηφιακή μετάδοση, το κυψελοειδές δίκτυο 2G εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1980 (v. Savic, 2015). Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα του ψηφιακού συστήματος έναντι του αναλογικού συστήματος. Το 2G αναφέρεται στη δεύτερη γενιά που βασίζεται στο GSM και εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Χρησιμοποιεί ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής. Η κύρια εστίαση αυτής της τεχνολογίας ήταν στα ψηφιακά σήματα και παρέχει υπηρεσίες για την παράδοση μηνυμάτων κειμένου και εικόνας σε χαμηλή ταχύτητα (σε kbps) (L. Zeng, 2009). Χρησιμοποιούσε το εύρος ζώνης από 30 έως 200KHz. Δίπλα στο 2G, το σύστημα 2.5G χρησιμοποιεί τομέα μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής κυκλώματος και παρείχε

ταχύτητα δεδομένων έως και 144kbps. π.χ. GPRS, CDMA και EDGE. Τα κύρια χαρακτηριστικά του 2G:

- Η ταχύτητα δεδομένων ήταν έως 64kbps.
- Χρησιμοποιούσε ψηφιακά σήματα.
- Ενεργοποίησε υπηρεσίες όπως μηνύματα κειμένου, εικονομηνύματα και MMS (Μήνυμα πολυμέσων).
- Παρείχε καλύτερη ποιότητα και χωρητικότητα.
- Δεν ήταν δυνατός ο χειρισμός πολύπλοκων δεδομένων όπως βίντεο.
- Απαιτούνταν ισχυρά ψηφιακά σήματα για να βοηθήσουν τα κινητά τηλέφωνα να λειτουργούν. Εάν δεν υπάρχει κάλυψη δικτύου σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή, τα ψηφιακά σήματα ήταν αδύναμα.

Τα πλεονεκτήματα του 2G έναντι του προκατόχου του είναι ότι επιτρέπουν πολύ μεγαλύτερο τηλέφωνο. Η διείσδυση έχει επομένως πιο αποτελεσματικό φάσμα (A. Sayeed, 2008). Το κυψελοειδές δίκτυο 2G είναι ψηφιακά κρυπτογραφημένο. Τα μηνύματα κειμένου SMS και άλλες υπηρεσίες ξεκίνησαν με το κυψελοειδές δίκτυο 2G. Οι περιορισμοί των δικτύων 2G είναι οι εξής:

- Το ψηφιακό σύστημα 2G μερικές φορές παρουσιάζει εγκατάλειψη υπό ελαφρώς χειρότερες συνθήκες, ενώ το αναλογικό σύστημα είναι στατικό.
- Ιδιαίτερο πρόβλημα στο κυψελοειδές σύστημα 2G είναι ότι το ψηφιακό σύστημα είναι πιο ασφαλές σε σύγκριση με μερικές φορές το πιο αδύναμο ψηφιακό σύστημα μπορεί να μην φτάσει στο 1G που βασιζόταν στο αναλογικό σύστημα.
- Η ψηφιακή έχει μια οδοντωτή καμπύλη στέπας ενώ η αναλογική έχει μια ομαλή καμπύλη αποσύνθεσης.

Στα μειονεκτήματα του 2G περιλαμβάνονται ότι σε λιγότερο κατοικημένες περιοχές, το ασθενέστερο ψηφιακό σήμα που αναπτύσσεται σε υψηλότερες συχνότητες μπορεί να μην είναι αρκετό για να φτάσει σε έναν πύργο αναμετάδοσης. Τα αναλογικά σήματα έχουν μια ομαλή καμπύλη αποσύνθεσης, ενώ τα ψηφιακά έχουν μια κλιμακωτή. Αυτό θεωρήθηκε τόσο ως πλεονέκτημα όσο και ως μειονέκτημα. Υπό καλές συνθήκες, ο ψηφιακός ήχος ήταν καλύτερος. Κάτω από ελαφρώς κακές συνθήκες, η αναλογική παρουσίασε στατική, ενώ η ψηφιακή έχει περιστασιακές διακοπές. Καθώς οι συνθήκες χειροτέρευαν, τα ψηφιακά σήματα άρχισαν να αποτυγχάνουν εντελώς, ενώ τα

αναλογικά χειροτέρευαν σταδιακά, γενικά κρατώντας μια κλήση περισσότερο και επιτρέποντας τουλάχιστον μερικές λέξεις να περάσουν. Ενώ οι ψηφιακές κλήσεις τείνουν να είναι απαλλαγμένες από στατικό θόρυβο και θόρυβο περιβάλλοντος, η συμπίεση με απώλειες που χρησιμοποιείται από τους κωδικοποιητές επιβαρύνει το εύρος του ήχου που μεταφέρεται μειώνεται. Ακούτε λιγότερο την τονικότητα της φωνής κάποιου που μιλάει σε ψηφιακό κινητό τηλέφωνο, αλλά θα την ακούτε πιο καθαρά ([Http://2gprod.Com/What-Is-2g-Technologyanswer. Html](http://2gprod.Com/What-Is-2g-Technologyanswer.Html), n.d.).

2.5.1 Ενδιάμεσες εκδόσεις 2G – 3G

Το 2.5G, που σημαίνει "δεύτερη και μισή γενιά", είναι μια ασύρματη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκε μεταξύ του προκατόχου του, 2G, και του διαδόχου του, του 3G (D. Patron, 2013). Ο όρος "δεύτερη και μισή γενιά" χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα 2G που έχουν εφαρμόσει έναν τομέα μεταγωγής πακέτων εκτός από τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος. Το "2.5G" είναι ένας άτυπος όρος, που επινοήθηκε αποκλειστικά για σκοπούς μάρκετινγκ, σε αντίθεση με το "2G" ή το "3G" που είναι επίσημα καθορισμένα πρότυπα που βασίζονται σε αυτά που ορίζονται από τη Διεθνή Τηλεπικοινωνία (ITU). Το GPRS θα μπορούσε να παρέχει ταχύτητες δεδομένων από 56kbit/s έως 115kbit/s. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπηρεσίες όπως η πρόσβαση στο Πρωτόκολλο Ασύρματης Εφαρμογής (WAP), η Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων (MMS) και για υπηρεσίες επικοινωνίας στο Διαδίκτυο όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η πρόσβαση στον Παγκόσμιο Ιστό (Rappaport et al., 2013). Η μεταφορά δεδομένων GPRS συνήθως χρεώνεται ανά megabyte κίνησης που μεταφέρεται, ενώ η επικοινωνία δεδομένων μέσω παραδοσιακής μεταγωγής κυκλώματος χρεώνεται ανά λεπτό του χρόνου σύνδεσης, ανεξάρτητα από το εάν ο χρήστης χρησιμοποιεί πραγματικά τη χωρητικότητα ή βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Τα δίκτυα 2.5G ενδέχεται να υποστηρίζουν υπηρεσίες όπως WAP, MMS, παιχνίδια για κινητά SMS και αναζήτηση και κατάλογος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του 2G:

- Παρέχει τηλεφωνικές κλήσεις.
- Αποστολή/λήψη μηνυμάτων e-mail.
- Περιήγηση στο Web.
- Ταχύτητα: 64-144kbps.
- Τηλέφωνα με λειτουργία κάμερα.

Το EDGE (EGPRS) είναι μια συντομογραφία του Enhanced Data Rates για το GSM Evolution, είναι μια τεχνολογία ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας που λειτουργεί ως βελτιωμένη ενίσχυση στα δίκτυα 2G και 2,5G General Packet Radio Service (GPRS) (Swati Yadav, 2018). Το EDGE είναι μια επόμενη φάση μετά το GPRS. Ρυθμοί δεδομένων έως και 500kbps μπορούν να παραδοθούν από το EDGE. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του GPRS, έχει σχεδιαστεί το EDGE. Οι ρυθμοί δεδομένων στο GPRS είναι πολύ χαμηλότεροι από ό,τι στην πραγματικότητα εμφανίζουν ή διαφημίζουν, ωστόσο για να επιτευχθεί μετάδοση δεδομένων 172,2kbps, ένας μόνο χρήστης θα απαιτούσε και τις 8 χρονοθυρίδες. Το GPRS βασίζεται στο GMSK (Gaussian Modulation Shift Keying), ενώ το EDGE βασίζεται στο 8-PSK (Eight-Phase Shift Keying) (Chin et al., 2014). Αυτή η τεχνολογία λειτουργεί σε δίκτυα GSM. Το EDGE μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε δίκτυο με GPRS που έχει αναπτυχθεί σε αυτό, υπό την προϋπόθεση ότι ο πάροχος εφαρμόζει τις απαραίτητες αναβαθμίσεις.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 2G, 2.5G και 2.75G (RANI P. TIDKE, 2021).

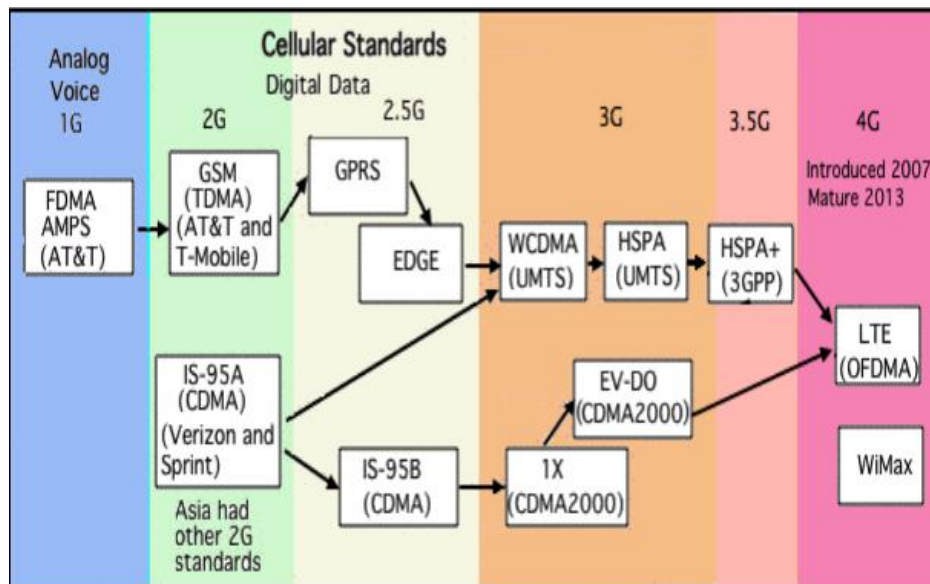
Έκδοση	2G	2.5G	2.75G
Έτος εισαγωγής	1990	2000	2003
Συχνότητα	850-1900MHz (GSM) 825-849MHz (CDMA)	850-1900MHz	850-1900MHz
Χωρητικότητα δεδομένων	10Kbps	200Kbps	473Kbps
Τεχνολογία	Ασύρματη-Ψηφιακή	GPRS	EDGE
Πρότυπο	CDMA / TDMA / GSM	TDMA / GSM	GSM / CDMA
Multiplexing	TDMA / CDMA		
Switching	Circuit Packet	Packet	Packet
Υπηρεσία	Voice data	MMS διαδίκτυο	-
Δίκτυο	PSTN	GSM / TDMA	WCDMA
Hand off	Οριζόντιο	-	-

Η τεχνολογία EDGE είναι μια εκτεταμένη έκδοση του GSM. Επιτρέπει τη σαφή και γρήγορη μετάδοση δεδομένων και πληροφοριών. Ονομάζεται επίσης ως IMT-SC ή απλός φορέας. Η τεχνολογία EDGE εφευρέθηκε και εισήχθη από την Cingular, η οποία είναι τώρα γνωστή ως AT& T. Η τεχνολογία EDGE προτιμάται έναντι του GSM λόγω της ευελιξίας της να μεταφέρει δεδομένα μεταγωγής πακέτων και δεδομένα μεταγωγή

κυκλώματος. Η χρήση της τεχνολογίας EDGE έχει αυξήσει τη χρήση των κινητών τηλεφώνων black berry, N97 και N95. Το EDGE μεταφέρει δεδομένα σε λιγότερα δευτερόλεπτα αν τα συγκρίνουμε με την τεχνολογία GPRS. Για παράδειγμα, ένα τυπικό αρχείο κειμένου 40KB μεταφέρεται σε μόλις 2 δευτερόλεπτα σε σύγκριση με τη μεταφορά από την τεχνολογία GPRS, που είναι 6 δευτερόλεπτα (Akraquw et al., 2018). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της χρήσης της τεχνολογίας EDGE είναι ότι δεν χρειάζεται να εγκαταστήσετε πρόσθετο υλικό και λογισμικό για να χρησιμοποιήσετε την τεχνολογία EDGE. Δεν υπάρχουν πρόσθετες χρεώσεις για την εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας. Εάν ένα άτομο είναι πρώην χρήστης της τεχνολογίας GPRS, μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτήν την τεχνολογία χωρίς να πληρώσει πρόσθετες χρεώσεις.

2.6 Τεχνολογία 3G

Το 3G αναφέρεται στην τρίτη γενιά τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας. Η τρίτη γενιά, όπως υποδηλώνει το όνομα, ακολουθεί τις δύο προηγούμενες γενιές. Η πρώτη γενιά (1G) ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με την εμπορική ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας Advanced Mobile Phone Service (AMPS). Τα πρώιμα δίκτυα AMPS χρησιμοποιούσαν πρόσβαση πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (FDMA) για τη μεταφορά αναλογικής φωνής μέσω καναλιών στη ζώνη συχνοτήτων των 800MHz (A. Guerra, 2015). Οι τεχνολογίες 3G επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να προσφέρουν στους χρήστες ένα ευρύτερο φάσμα πιο προηγμένων υπηρεσιών, επιτυγχάνοντας παράλληλα μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου μέσω βελτιωμένης φασματικής απόδοσης. Οι υπηρεσίες περιλαμβάνουν ασύρματη φωνητική τηλεφωνία ευρείας περιοχής, βιντεοκλήσεις και ευρυζωνικά ασύρματα δεδομένα, όλα σε περιβάλλον κινητής τηλεφωνίας. Οι πρόσθετες λειτουργίες περιλαμβάνουν επίσης δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας πρόσβασης πακέτων (HSPA) ικανές να προσφέρουν ταχύτητες έως και 14,4Mbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη και 5,8Mbit/s στην ανερχόμενη ζεύξη. Η φασματική απόδοση ή η απόδοση φάσματος αναφέρεται στην ποσότητα των πληροφοριών που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης σε ένα συγκεκριμένο ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας.



Εικόνα 9: Εξέλιξη από 1G σε 4G βάσει αναλογικών και ψηφιακών (Md Hasan Mahmud, 2019).

Το HSPA είναι μια συλλογή πρωτοκόλλων κινητής τηλεφωνίας που επεκτείνουν και βελτιώνουν την απόδοση των υφιστάμενων πρωτοκόλλων UMTS (Nikhil Bhandari, 2017). Η αξιολόγηση του 1G σε 4G δίνεται στην Εικόνα 9. Τα κύρια χαρακτηριστικά του 3G είναι:

- Ταχύτητα 2Mbps.
- Συνήθως ονομάζονται έξυπνα τηλέφωνα.
- Αυξημένο εύρος ζώνης και ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων για την υποδοχή εφαρμογών που βασίζονται στο διαδίκτυο και αρχείων ήχου και βίντεο.
- Παρέχει ταχύτερη επικοινωνία.
- Αποστολή/λήψη μεγάλων μηνυμάτων email.
- Ιστός υψηλής ταχύτητας/περισσότερη ασφάλεια/συνδιάσκεψη βίντεο/3D gaming.
- Μεγάλες χωρητικότητες και ευρυζωνικές δυνατότητες.
- Τηλεόραση ροής/κινητή τηλεόραση.
- Ακριβά τέλη για υπηρεσίες αδειών 3G.
- Ήταν πρόκληση η κατασκευή της υποδομής για 3G.
- Απαίτηση υψηλού εύρους ζώνης.
- Ακριβά τηλέφωνα 3G.
- Μεγάλα κινητά τηλέφωνα.

Το κινητό σύστημα 3G ονομαζόταν UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) στην Ευρώπη, ενώ το CDMA2000 είναι το όνομα της αμερικανικής

παραλλαγής 3G (Erik G. Larsson, 2017). Επίσης το IMT2000 έχει αποδεχτεί ένα νέο πρότυπο 3G από την Κίνα, δηλαδή το TD-SCDMA. Το WCDMA είναι η τεχνολογία διεπαφής αέρα για το UMTS. Αν και η τιμή χρήσης της τεχνολογίας 3G έχει μειωθεί σημαντικά από την έναρξή της λόγω της ευρύτερης υιοθέτησής της, εξακολουθεί να είναι πολύ δαπανηρή σε σύγκριση με τις τεχνολογίες 2G. Λόγω του υψηλού εύρους ζώνης μετάδοσης των τεχνολογιών 3G, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας της συσκευής. Η κατανάλωση δεδομένων του 3G κατά καιρούς γίνεται τόσο βαριά λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης που βάζει μεγάλο φορτίο στο δίκτυο. Για να μετριαστεί αυτό, πολλοί φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας εφάρμοσαν ανώτατα όρια χρήσης δεδομένων που ήταν μειονεκτήματα για τους πελάτες.

2.6.1 Ενδιάμεσες εκδόσεις 3G – 4G

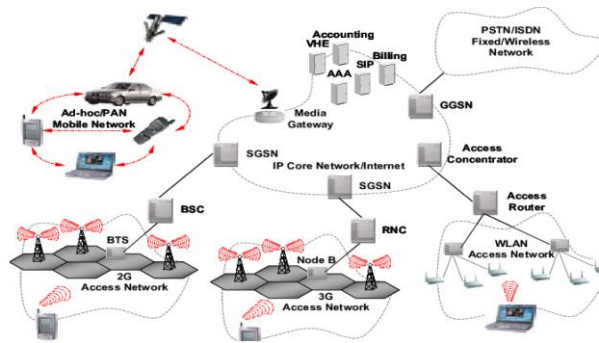
Το High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) είναι ένα πρωτόκολλο κινητής τηλεφωνίας, που ονομάζεται επίσης 3.5G, το οποίο παρέχει μια ομαλή εξελικτική διαδρομή για δίκτυα 3G που βασίζονται σε UMTS επιτρέποντας υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (Akraqu et al., 2018). Το HSDPA είναι μια υπηρεσία δεδομένων που βασίζεται σε πακέτα σε κατερχόμενη ζεύξη W-CDMA με μετάδοση δεδομένων έως 8-10Mbit/s (και 20Mbit/s για συστήματα MIMO) σε εύρος ζώνης 5MHz. Οι υλοποιήσεις HSDPA περιλαμβάνουν Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση (AMC), Multiple-Input Multiple Output (MIMO), Hybrid Automatic Request (HARQ), γρήγορη αναζήτηση κυψέλης και προηγμένο σχεδιασμό δέκτη.

Το 3.75G αναφέρεται σε τεχνολογίες πέρα από τις καλά καθορισμένες τεχνολογίες ασύρματης/κινητής τηλεφωνίας 3G. Η High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) είναι μια τεχνολογία εξέλιξης ανοδικής ζεύξης UMTS / WCDMA (T. S. Rappaport et al., 2017). Η τεχνολογία κινητών τηλεπικοινωνιών HSUPA σχετίζεται άμεσα με το HSDPA ενώ και τα δύο είναι δωρεάν σε μεταξύ τους επικοινωνίες. Το HSUPA ενισχύει τις προηγμένες εφαρμογές δεδομένων από άτομο σε άτομο με υψηλότερους και συμμετρικούς ρυθμούς δεδομένων, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο για κινητά και τα παιχνίδια από άτομο σε άτομο σε πραγματικό χρόνο. Οι παραδοσιακές χρήσιμες εφαρμογές μαζί με πολλές εφαρμογές καταναλωτών επωφελούνται από τη βελτιωμένη ταχύτητα upload (Larsson et al., 2014). Το HSUPA ενισχύει αρχικά την ανοδική σύνδεση UMTS / WCDMA έως και 1,4Mbps και σε μεταγενέστερες εκδόσεις έως και 5,8Mbps.

2.7 Τεχνολογία 4G

Το 4G αναφέρεται στην τέταρτη γενιά προτύπων κυψελοειδούς ασύρματης σύνδεσης. Είναι διάδοχος των οικογενειών προτύπων 3G και 2G (Akraqu et al., 2018). Η πρώτη ήταν η μετάβαση από την αναλογική (1G) του 1981 στην ψηφιακή (2G) μετάδοση το 1992. Το 4G προσφέρει ταχύτητα λήψης 100Mbps. Το 4G παρέχει την ίδια δυνατότητα με το 3G αλλά και επιπρόσθετες υπηρεσίες όπως οι εφαρμογές Πολυμέσων, για παρακολούθηση προγραμμάτων τηλεόρασης με μεγαλύτερη σαφήνεια και αποστολή δεδομένων πολύ πιο γρήγορα από προηγούμενες γενιές (Swati Yadav, 2018). Το LTE (Long Term Evolution) θεωρείται μέρος της τεχνολογία 4G. Το 4G αναπτύσσεται για να καλύψει τις απαιτήσεις QoS και ρυθμού που ορίζονται από μελλοντικές εφαρμογές όπως ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων (MMS), συνομιλία μέσω βίντεο, κινητή τηλεόραση, περιεχόμενο HDTV, ψηφιακή μετάδοση βίντεο (DVB), ελάχιστες υπηρεσίες όπως φωνή και δεδομένα, και άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν εύρος ζώνης (Nikhil Bhandari, 2017). Η λέξη «MAGIC» αναφέρεται επίσης στην ασύρματη τεχνολογία 4G που σημαίνει Mobile multimedia, Any-where, Global mobility solutions over, ολοκληρωμένες ασύρματες και προσαρμοσμένες υπηρεσίες. Τα κύρια χαρακτηριστικά του 4G είναι:

- Δυνατότητα παροχής ταχύτητας 10Mbps-1Gbps.
- Υψηλής ποιότητας ροή βίντεο.
- Συνδυασμός Wi-Fi και Wi-Max.
- Υψηλή ασφάλεια.
- Παρέχετε κάθε είδους υπηρεσία ανά πάσα στιγμή σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών οπουδήποτε.
- Διευρυμένες υπηρεσίες πολυμέσων.
- Χαμηλό κόστος ανά bit.
- Οι χρήσεις μπαταριών είναι περισσότερες.
- Δύσκολη εφαρμογή.
- Χρειάζεστε πολύπλοκο υλικό.
- Απαιτείται ακριβός εξοπλισμός για την υλοποίηση δικτύου επόμενης γενιάς.



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική Συστήματος 4G (Md Hasan Mahmud, 2019).

2.8 Τεχνολογία 5G

Το 5G (κινητά δίκτυα 5^{ης} γενιάς ή ασύρματα συστήματα 5^{ης} γενιάς) είναι ένα όνομα που χρησιμοποιείται σε ορισμένες ερευνητικές εργασίες και έργα για να υποδηλώσει την επόμενη μεγάλη φάση των προτύπων κινητών τηλεπικοινωνιών πέρα από τα επερχόμενα πρότυπα 4G, τα οποία αναμένεται να οριστικοποιηθούν περίπου μεταξύ 2019 και 2020 (Erik G. Larsson, 2017). Επί του παρόντος, το 5G δεν είναι όρος που χρησιμοποιείται επίσημα για κάποια συγκεκριμένη προδιαγραφή ή σε οποιοδήποτε επίσημο έγγραφο που έχει δημοσιοποιηθεί ακόμη από εταιρείες τηλεπικοινωνιών ή φορείς τυποποίησης όπως το 3GPP, το WiMAX Forum ή το ITU-R. Νέες εκδόσεις προτύπων 3GPP πέρα από το 4G και το LTE Advanced βρίσκονται σε εξέλιξη, αλλά δεν θεωρούνται νέες γενιές κινητής τηλεφωνίας (Swati Yadav, 2018). Τα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από τοποθεσίες κυψελών χωρισμένες σε τομείς που στέλνουν δεδομένα μέσω ραδιοκυμάτων. Η ασύρματη τεχνολογία Long-Term Evolution (LTE) τέταρτης γενιάς (4G) παρέχει τη βάση για το 5G. Σε αντίθεση με το 4G, το οποίο απαιτεί μεγάλους πύργους κινητής τηλεφωνίας υψηλής ισχύος για να εκπέμπουν σήματα σε μεγαλύτερες αποστάσεις, τα ασύρματα σήματα 5G θα μεταδίδονται μέσω μεγάλου αριθμού μικρών σταθμών κυψελών που βρίσκονται σε μέρη όπως στύλους φωτισμού ή στέγες κτιρίων. Η χρήση πολλαπλών μικρών κυψελών είναι απαραίτητη επειδή το φάσμα κυμάτων χιλιοστών η ζώνη φάσματος μεταξύ 30GHz και 300GHz στην οποία βασίζεται το 5G για τη δημιουργία υψηλών ταχυτήτων μπορεί να ταξιδέψει μόνο σε μικρές αποστάσεις και υπόκειται σε παρεμβολές από καιρικές συνθήκες και φυσικά εμπόδια, όπως κτίρια.

Οι προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας χρησιμοποιούσαν ζώνες φάσματος χαμηλότερων συχνοτήτων. Για να αντισταθμίσει τις προκλήσεις κυμάτων χιλιοστών που σχετίζονται με την απόσταση και τις παρεμβολές, η ασύρματη βιομηχανία εξετάζει

επίσης τη χρήση φάσματος χαμηλότερης συχνότητας για δίκτυα 5G, ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να μπορούν να χρησιμοποιήσουν το φάσμα που έχουν ήδη για να δημιουργήσουν τα νέα τους δίκτυα. Το φάσμα χαμηλότερης συχνότητας φθάνει σε μεγαλύτερες αποστάσεις αλλά έχει μικρότερη ταχύτητα και χωρητικότητα από το κύμα χιλιοστού. Η τεχνολογία 5G που είναι διαθέσιμο τηλέφωνο που προσφέρει περισσότερη ισχύ και δυνατότητες από τουλάχιστον 1000 σεληνιακές μονάδες (Guidi et al., 2016). Ένας χρήστης μπορεί επίσης να συνδέσει το κινητό του τηλέφωνο τεχνολογίας 5G με τον φορητό υπολογιστή του για να αποκτήσει οδική πρόσβαση στο διαδίκτυο (Azzouzi et al., 2011). Η τεχνολογία 5G έχει εξαιρετικές δυνατότητες δεδομένων και έχει την ικανότητα να συνδυάζει απεριόριστους όγκους κλήσεων και άπειρες μεταδόσεις δεδομένων στο πιο πρόσφατο λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία 5G έχει ένα λαμπρό μέλλον επειδή μπορεί να χειριστεί τις καλύτερες τεχνολογίες και να προσφέρει ανεκτίμητη συσκευή στους πελάτες της. Μπορεί τις επόμενες μέρες η τεχνολογία 5G να καταλάβει την παγκόσμια αγορά. Ο κύριος στόχος του 5G θα είναι ο παγκόσμιος ασύρματος Παγκόσμιος Ιστός (WWW). Είναι μια πλήρης ασύρματη επικοινωνία χωρίς περιορισμούς. Οι παράμετροι που ορίζουν την απόδοση του 5G συνοψίζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Η ασύρματη απόδοση του 5G (Md Hasan Mahmud, 2019).

Παράμετρος	Απόδοση
Χωρητικότητα δικτύου	10000 φορές
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	10Gbps
Ρυθμός δεδομένων αιχμής Cell Edge	100Mbps
Καθυστέρηση	< 1Mbps

Τα κύρια χαρακτηριστικά του 5G είναι:

- Υποστηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στο ασύρματο World Wide Web.
- Έχει υψηλή ταχύτητα και υψηλή χωρητικότητα.
- Παρέχει μεγάλη μετάδοση δεδομένων σε Gbps.
- Διαθέτει τεράστια ποικιλία εφημερίδων πολυμέσων και παρακολούθηση τηλεοπτικών προγραμμάτων με καθαρότητα (HD Clarity).
- Ταχύτερη μετάδοση δεδομένων σε σχέση με την προηγούμενη γενιά.
- Μεγάλη μνήμη τηλεφώνου, υψηλή ταχύτητα κλήσης και ευκρίνεια στον ήχο/βίντεο.

- Υποστήριξη διαδραστικών πολυμέσων, φωνής, ροής βίντεο, διαδικτύου και άλλα.
- Πιο αποτελεσματικό και ελκυστικό.

Η τρέχουσα τάση της τεχνολογίας 5G έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Καθυστέρηση μόνο ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Η καθυστέρηση είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταφερθούν οι πληροφορίες από την προέλευση στον προορισμό, κάτι που θα επιτρέψει μια αισθητή βελτίωση στην επικοινωνία.
- Κάλυψη 100% για την οποία θα χρειαστεί να γίνουν επενδύσεις εκατομμυρίων δολαρίων σε επίπεδο φυσικής υποδομής.
- Θα έχει εύρος ζώνης 1.000 ανά μονάδα επιφάνειας.
- Μια συσκευή IoT θα έχει διάρκεια ζωής 10 ετών με κατανάλωση χαμηλής ισχύος.
- Θα έχει υψηλή ταχύτητα, ανάλογα με τη συσκευή, έως και 10GB/s.
- Παρουσιάζει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο έως και 90%.
- Θα αυξήσει τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών από 10x σε 100x που υπολογίζεται κατά μέσο όρο σε 50.000 εκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές ταυτόχρονα.
- Έχει 99% διαθεσιμότητα δικτύου.
- Τα δίκτυα 5G θα χρησιμοποιούν τα πρότυπα ασφαλείας SE, HSM, OTA και KMS προκειμένου να μην υποκλαπούν οι πληροφορίες που αποστέλλονται.

Η κύρια διαφορά μεταξύ του 5G και των προηγούμενων γενεών κινητής τηλεφωνίας δίνονται παρακάτω:

- Τα δίκτυα 5G επεκτείνουν τις ευρυζωνικές ασύρματες υπηρεσίες πέρα από το κινητό διαδίκτυο σε IoT και κρίσιμα τμήματα επικοινωνιών.
- Τα δίκτυα 4,5G (LTE advanced) διπλασίασαν τις ταχύτητες δεδομένων από το 4G.
- Τα δίκτυα 4G έφεραν υπηρεσίες all-IP (Φωνή και Δεδομένα), μια γρήγορη ευρυζωνική εμπειρία διαδικτύου, με ενοποιημένες αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα δικτύων.
- Τα δίκτυα 3.5G έφεραν μια αληθινή πανταχού παρούσα εμπειρία διαδικτύου για κινητά, απελευθερώνοντας την επιτυχία των οικοσυστημάτων των εφαρμογών για κινητά.
- Τα δίκτυα 3G έφεραν μια καλύτερη εμπειρία διαδικτύου για κινητά αλλά με περιορισμένη επιτυχία για να απελευθερώσουν μαζική υιοθέτηση υπηρεσιών

δεδομένων.

- Τα δίκτυα 2.5G και 2.75G έφεραν μια μικρή βελτίωση στις υπηρεσίες δεδομένων, αντίστοιχα με το GPRS και το EDGE.
- Τα δίκτυα 2G παρείχαν ψηφιακές κυψελοειδείς υπηρεσίες φωνής και βασικές υπηρεσίες δεδομένων (SMS, περιήγηση στο διαδίκτυο WAP) – καθώς και υπηρεσίες περιαγωγής σε όλα τα δίκτυα.
- Τα δίκτυα 1G έφεραν την κινητικότητα στις αναλογικές φωνητικές υπηρεσίες.

Οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει το 5G αποτελούν:

1. Ενσωμάτωση διαφόρων προτύπων: Μία από τις μεγάλες προκλήσεις που αντιμετωπίζει το 5G είναι η τυποποίηση. Υπάρχουν ήδη πολλές ομάδες που εργάζονται για να βρουν πρότυπα σχετικά με τη διαλειτουργικότητα, τη συμβατότητα προς τα πίσω με παλαιότερες τεχνολογίες (4G, 3G) και τη διασφάλιση ότι το δίκτυο θα είναι ασφαλές για το μέλλον (Larsson et al., 2014).
2. Κοινή πλατφόρμα: Δεν υπάρχει κοινή αρχιτεκτονική για τη διασύνδεση διαφόρων πρακτικών μηχανικής. Ένα κοινό απαιτείται κυβερνητικό όργανο, το οποίο δημιουργεί μια κοινή πλατφόρμα για όλες τις μηχανικές πρακτικές για την τακτοποίηση των θεμάτων διασύνδεσης καθώς και της ανταλλαγής γνώσεων.
3. Δημιουργία της υποδομής: Είναι ένα τεράστιο έργο, με ζητήματα γύρω από το φάσμα και την εγκατάσταση νέων κεραιών. Το 5G είναι πιθανό να βασίζεται, τουλάχιστον εν μέρει, σε ζώνες υψηλότερης συχνότητας. Υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος χώρος σε αυτά τα ραδιοκύματα, αλλά σε τόσο υψηλές συχνότητες, τα σήματα δεν μπορούν να ταξιδέψουν όσο πιο μακριά μπορούν πάνω από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για το 4G, με αποτέλεσμα κακή σύνδεση (Guidi et al., 2016).
4. Εμπόδια: Όπως τα κτίρια, τα δέντρα και ακόμη και ο κακός καιρός μπορεί επίσης να προκαλέσουν παρεμβολές. Για να αντισταθμιστεί αυτό, οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να εγκαταστήσουν περισσότερους σταθμούς βάσης για να εξασφαλίσουν καλύτερη κάλυψη και να χρησιμοποιήσουν τεχνολογίες κεραιών όπως το MIMO.

2.8.1 Εφαρμογές 5G

Οι εφαρμογές του 5G είναι πραγματικά άπειρες. Ο χρήστης δεν είχε ποτέ εμπειρία τόσο

υψηλής αξίας τεχνολογίας που να περιλαμβάνει όλους τους τύπους προηγμένων χαρακτηριστικών. Μερικές από τις εφαρμογές του 5G είναι:

- Μπορούμε να φορτίσουμε το κινητό μας χρησιμοποιώντας τον δικό μας καρδιακό παλμό (Erik G. Larsson, 2017).
- Μπορούμε να νιώσουμε το επίπεδο ζάχαρης ενός ατόμου μας με το κινητό μας ή σχεδόν οποιαδήποτε άλλη βιομετρική παράμετρο.
- Μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή ώρα γέννησης του παιδιού μας σε νανοδευτερόλεπτα (Swati Yadav, 2018).
- Το κινητό μας δύναται να χτυπάει ανάλογα με τη διάθεσή μας.
- Μπορούμε να ψηφίσουμε από το κινητό μας.
- Μπορούμε να οπτικοποιήσουμε ζωντανούς όλους τους πλανήτες και το σύμπαν. Επίσης μπορούμε να πλοηγηθούμε σε ένα τρένο για το οποίο περιμένουμε.
- Μπορούμε να πληρώσουμε όλους τους λογαριασμούς μας με μία μόνο πληρωμή με το κινητό μας.
- Μπορούμε να αντιληφθούμε το τσουνάμι / σεισμό πριν συμβεί.
- Μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στο γραφείο μας, το φορητό υπολογιστή, το αυτοκίνητο, το ποδήλατο χρησιμοποιώντας το κινητό μας.
- Μπορούμε να αναγνωρίσουμε το κλεμμένο κινητό μας μέσα σε νανοδευτερόλεπτα.
- Το κινητό μας μπορεί να μοιραστεί τον φόρτο εργασίας μας, να εντοπίσει τον καλύτερο διακομιστή και επίσης να μας ενημερώσει προτού διακοπεί η κλήση.
- Μπορούμε να επεκτείνουμε την κάλυψή μας χρησιμοποιώντας κινητά τηλέφωνα.
- Μπορούμε να τροποποιήσουμε το κινητό μας σύμφωνα με την επιθυμία μας.

Κεφάλαιο 3 – Ασύρματη τεχνολογία 5G

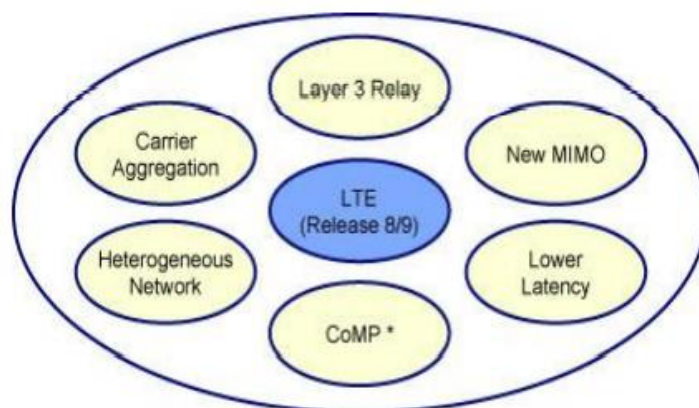
Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας κινείται με αμείλικτο ρυθμό και χτίζεται γύρω από δύο βιομηχανικές εφαρμογές: την ασύρματη τέταρτη γενιά και την ασύρματη πέμπτη γενιά. Το 5G είναι η επερχόμενη ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία πέμπτης γενιάς που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ac. Το 5G θα παρέχει καλύτερες ταχύτητες και κάλυψη από το τρέχον 4G. Το 5G λειτουργεί με σήμα 5GHz και έχει ρυθμιστεί να προσφέρει ταχύτητες έως και 1Gb/s για δεκάδες συνδέσεις ή δεκάδες Mb/s για δεκάδες χιλιάδες συνδέσεις. Το 4G είναι συνώνυμο με την τεχνολογία Long Term Evolution (LTE), η οποία αποτελεί εξέλιξη του υπάρχοντος ασύρματου προτύπου 3G. Στην πραγματικότητα, το LTE είναι μια προηγμένη μορφή 3G που σηματοδοτεί μια τολμηρή αλλαγή από τα υβριδικά δεδομένα και δίκτυα φωνής σε δίκτυο IP μόνο για δεδομένα. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν στο LTE να επιτυγχάνει υψηλότερη απόδοση δεδομένων από τα προηγούμενα δίκτυα 3G: η τεχνολογία MIMO και η OFDM. Ο πολυπλέκτης ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι μια τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό φέροντες σε κοντινή απόσταση που διαμορφώνονται με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων (Liang, 2017). Είναι ένα σχήμα φασματικής απόδοσης που επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι. Η τεχνική πολλαπλής εισόδου πολλαπλών εξόδων (MIMO) βελτιώνει περαιτέρω τη διεκπεραίωση αποστολής δεδομένων και τη φασματική απόδοση χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές στον πομπό και το δέκτη. Χρησιμοποιεί πολύπλοκη επεξεργασία ψηφιακού σήματος για τη ρύθμιση πολλαπλών ροών δεδομένων στο ίδιο κανάλι.

3.1 Διπλή συνδεσιμότητα LTE - NR

Το πρότυπο LTE χρησιμοποιεί και τις δύο μορφές λειτουργιών διπλής όψης: Duplex διαίρεσης συχνότητας (FDD) και duplex διαίρεσης χρόνου (TDD). Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες δικτύων LTE και από την πλευρά των καταναλωτών, διαφέρουν κυρίως ως προς τη θεωρητική ταχύτητα υπό ιδανικές συνθήκες. Η τεχνολογία LTE-Advanced αποτελεί μια γέφυρα μεταξύ 4G και 5G LTE Advanced. Η LTE-A είναι η εξέλιξη της αρχικής τεχνολογίας LTE προς ακόμη υψηλότερα εύρη ζώνης. Το LTE-A υπόσχεται σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη ταχύτητα από το βασικό δίκτυο LTE και αποτελείται από τα ακόλουθα πέντε δομικά στοιχεία:

1. Carrier Aggregation.
2. Αυξημένο MIMO.
3. Συντονισμένα πολλαπλά σημεία λήψης και/ή μετάδοσης (COMP).
4. Σταθμό αναμετάδοσης.
5. Ετερογενές Δίκτυο ή HetNet.
6. S δίκτυο ή HetNet.

Η συνάθροιση του φορέα ή η συνάθροιση των καναλιών είναι ένα σχήμα μετάδοσης που επιτρέπει έως και 20 κανάλια από διαφορετικά φάσματα να συνδυαστούν σε μια ενιαία ροή δεδομένων. Στη συνέχεια, το LTE-A αυξάνει τη γραμμή MIMO σε διαμορφώσεις κεραίας 8×8 για να αυξήσει τον αριθμό των ραδιοφωνικών ροών χρησιμοποιώντας την τεχνική beam steering (Hajlaoui et al., 2020).



Εικόνα 11: Δομικά στοιχεία LTE.

Το CoMP ή το συνεργατικό MIMO, επιτρέπει στις φορητές συσκευές να στέλνουν και να λαμβάνουν ραδιοφωνικά σήματα από πολλαπλές κυψέλες για να μειώσουν τις παρεμβολές από άλλες κυψέλες και να εξασφαλίσουν τη βέλτιστη απόδοση στα άκρα της κυψέλης. Ένας αυτόματος διακόπτης με μια ρύθμιση LTE-A είναι ένας σταθμός βάσης που χρησιμοποιεί επικοινωνίες πολλαπλών βημάτων στα άκρα της κυψέλης και λαμβάνει ένα αδύναμο σήμα το οποίο αναμεταδίδει με βελτιωμένη ποιότητα. Το πιο κρίσιμο σημείο του δικτύου είναι το HetNet, ένα πολυεπίπεδο σύστημα επικαλυπτόμενων μεγάλων και μικρών κυψελών για την άντληση φθηνού εύρους ζώνης. Το HetNet, αποτελεί μια σταδιακή εξέλιξη της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής, και είναι ένα πολύ πιο περίπλοκο δίκτυο, καθώς τα μικρά κελιά προσθέτουν εκατοντάδες ή και χιλιάδες σημεία εισόδου στο κυψελοειδές σύστημα. Η ιδέα του

αυτο-οργανωτικού δικτύου (SON) είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης που εξετάζονται για εφαρμογές LTE-A. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ το πρότυπο LTE-A δημιουργεί μια γέφυρα μεταξύ των κόσμων 4G και 5G, με πολλούς τρόπους, η έννοια του HetNet χρησιμεύει ως σημείο επαφής μεταξύ των κόσμων LTE-A και 5G. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πολλοί παρατηρητές της βιομηχανίας ασύρματων δικτύων αποκαλούν το ασύρματο 5G μια βελτιωμένη μορφή LTE-A. Αυτό είναι λογικό επειδή η κύρια ιδέα πίσω από τα συστήματα 5G είναι να επεκτείνουμε την ιδέα του δικτύου μικρών κυψελών σε ένα εντελώς νέο επίπεδο και να δημιουργήσουμε ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο που θα τοποθετεί μικροσκοπικά κύτταρα σε κάθε δωμάτιο.

Η τεχνολογία Επόμενης Γενιάς Κινητών Δικτύων (NGMN) ορίζει το 5G ως εξής: «Το 5G είναι ένα από άκρο σε άκρο οικοσύστημα που επιτρέπει μια πλήρως κινητή και συνδεδεμένη κοινωνία. Ενισχύει τη δημιουργία αξίας προς πελάτες και συνεργάτες, μέσω υφιστάμενων και αναδύομενων περιπτώσεων χρήσης που παρέχονται με σταθερή εμπειρία και επιτρέπονται από βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα». Ουσιαστικά, το LTE-A είναι το θεμέλιο του δικτύου ραδιοπρόσβασης 5G (RAN) κάτω από τα 6GHz, ενώ οι συχνότητες από 6GHz έως 100GHz θα αποτελούν παράλληλα πλατφόρμα εφαρμογής και εξέλιξης για νέες τεχνολογίες. Για παράδειγμα στο MIMO, όπου το 5G ανεβάζει τον πήχη στην τεχνολογία Massive MIMO, μια μεγάλη σειρά στοιχείων ακτινοβολίας που επεκτείνει τη μήτρα της κεραίας σε ένα νέο επίπεδο – 16×16 έως 256×256 MIMO. Το αρχικό σχέδιο των πιλοτικών δικτύων 5G αποτελείται κυρίως από τεχνολογία σχηματισμού δέσμης και σταθμούς βάσης μικρών κυψελών. Οι στόχοι της τεχνολογίας 5G μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία αξίας (Hajlaoui et al., 2020):

- 1.000 x αύξηση της χωρητικότητας.
- Υποστήριξη για 100 + δισεκατομμύρια συνδέσεις.
- Ταχύτητες έως 10Gbit/s.
- Καθυστέρηση κάτω από 1ms.

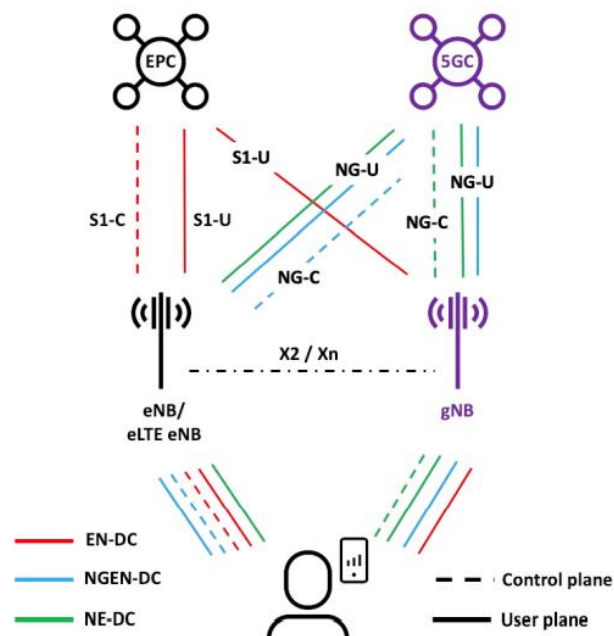
Στο 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ο οδικός χάρτης πρόσβασης ραδιοφώνου 5G αποτελείται από δύο ίχνη. Το ένα βασίζεται στην εξέλιξη του LTE και το άλλο στην πρόσβαση New Radio (NR). Στο κομμάτι του LTE (Ericsson, 2020), οι βελτιώσεις εξακολουθούν να βρίσκονται σε εξέλιξη προκειμένου να υποστηρίξονται

όσο το δυνατόν περισσότερες απαιτήσεις 5G αλλά και περιπτώσεις χρήσης. Η διαδρομή NR, από την άλλη πλευρά, χωρίς τους περιορισμούς συμβατότητας προς τα πίσω του LTE, εισάγει θεμελιώδεις αλλαγές, όπως χαμηλότερες καθυστερήσεις που δίνονται από τα σύντομα χρονικά διαστήματα μετάδοσης (TTI) αλλά και την ευέλικτη απόσταση μεταξύ των υποφορέων και την αυξημένη χωρητικότητα (και ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων), υποστηρίζοντας υψηλές συχνότητες φάσματος (mm-Wave). Επιπλέον, επιπρόσθετα νέα χαρακτηριστικά αντιπροσωπεύονται από την υποστήριξη διαφορετικών αριθμολογιών, κοπής δικτύου και αρχιτεκτονικών διαχωρισμού (3GPP TR 38.913 v14.3.0, 2017). Ωστόσο, προκειμένου να υπάρξει ταχεία ανάπτυξη των δικτύων 5G χωρίς απαραίτητα να περιμένουμε την ολοκλήρωση του πλήρους συστήματος NR (ραδιόφωνο, κεντρικό δίκτυο και άλλα υποστηρικτικά στοιχεία), η 3GPP έχει καθορίσει το πλήρες σύστημα στενής διασύνδεσης LTE-NR ήδη από το Μάρτιο του 2018. Σε στενή διασύνδεση LTE-NR, μια μη αυτόνομη (NSA) έκδοση του NR θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το LTE με τρόπο Διπλής Συνδεσιμότητας (DC), όπου και οι δύο τεχνολογίες συνδέονται με το LTE Evolved Packet Core (EPC). Μια τέτοια στενή αλληλεπίδραση μεταξύ LTE και NR ονομάζεται επίσης E-UTRAN NR Dual Connectivity (EN-DC). Σημειώνουμε ότι, σε περίπτωση ENDC, αυτή είναι η πρώτη φορά που ενεργοποιείται ένα σενάριο DC για δύο διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης 3GPP. Δεδομένου ότι τα υποκείμενα στοιχεία και οι δυνατότητες τεχνολογίας δεν είναι τα ίδια για το LTE και το NR, έχουν υπάρξει πολλές προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν πριν από την ολοκλήρωση της πρώτης έκδοσης NR στην έκδοση 3GPP. Στη γενική ρύθμιση του EN-DC, το LTE είναι η κύρια τεχνολογία ελέγχου της ασύρματης σύνδεσης ενός Εξοπλισμού Χρήστη (UE), καθώς και της σύνδεσης επιπέδου ελέγχου με το EPC. Το NR, αντί αυτού, παρέχει βελτιωμένη χωρητικότητα στο UE μέσω της νέας διεπαφής και (προαιρετικά) μια απευθείας σύνδεση χρήστη με το EPC.

Το αρχικό σχέδιο που διευθετήθηκε από το 3GPP ήταν να ολοκληρωθεί η τυποποίηση NR έως το 2020. Ωστόσο, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επείγουσες ανάγκες της αγοράς που επισημάνθηκαν από τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, η 3GPP επαναπρογραμματίισε το χρονοδιάγραμμα 5G για να καταστήσει το NR διαθέσιμο πριν από το 2020. Για να αποφευχθεί ο κατακερματισμός της τεχνολογίας και η ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G πριν οριστικοποιηθούν οι προδιαγραφές, η 3GPP αποφάσισε να χωρίσει τη διαδικασία τυποποίησης για το NR σε δύο κύριες φάσεις. Συγκεκριμένα, αυτές οι δύο φάσεις μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (3GPP TS 38.801 v14.0.0, 2017):

- Non-Standalone (NSA) NR: Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η NR αναμένεται να χρησιμοποιήσει τις υπάρχουσες λειτουργίες LTE Radio Access Network (RAN) και Core Network (CN) ανάλογα τροποποιημένες για να χειριστεί την προσθήκη ενός νέου φορέα 5G που στοχεύει στα τέλη του 2018 (ή αρχές του 2019) την ανάπτυξη του NR NSA.
- Αυτόνομη (SA) NR: Σε αυτή τη φάση, θα καθοριστεί ένα πλήρες σύνολο λειτουργιών CP και UP για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του 5G που οδηγούνται από τους στόχους της ITU. Επιπλέον, το 3GPP θα καθορίσει μια νέα αρχιτεκτονική CN για το 5G που θα επιτρέπει νέες δυνατότητες, όπως ο διαχωρισμός του δικτύου. Με την ολοκλήρωση της δεύτερης φάσης, η NR θα μπορεί να λειτουργεί με ένα πλήρες σύνολο δυνατοτήτων 5G χωρίς την ανάγκη της συνύπαρξης με το LTE.

Με βάση τις προαναφερθείσες κατηγορίες (δηλαδή, NSA και SA), κατά τη διάρκεια της έκδοσης 3GPP 15, εντοπίστηκαν πέντε κύριες επιλογές αρχιτεκτονικής 5G .



Εικόνα 12: Διεπιφάνειες και συνδεσιμότητα μεταξύ χρήστη και διαθέσιμων τεχνολογιών.

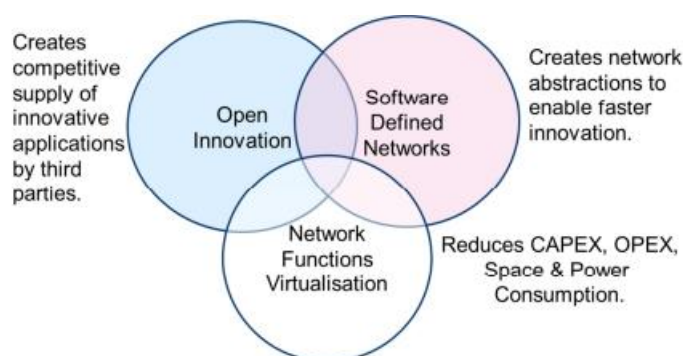
Ειδικότερα, ένα υποσύνολο αυτών των επιλογών αναφέρεται στην περίπτωση SA όπου είτε το LTE είτε το NR είναι συνδεδεμένο στον πυρήνα 5G (5GC), δηλαδή την Επιλογή 2 και Επιλογή 5 που απεικονίζονται στην Εικόνα 12, ενώ οι υπόλοιπες επιλογές π.χ. η επιλογή 3, η επιλογή 4 και η επιλογή 7 αντιπροσωπεύουν τις πιθανές περιπτώσεις όπου

το LTE και το NR συνεργάζονται για να παρέχουν πρόσβαση NR σε UE με δυνατότητα 5G, όπως στα smartphone ή στα tablet 5G. Στην Επιλογή 3, η οποία είναι επίσης γνωστή ως EN-DC (οι κόκκινες γραμμές που απεικονίζονται στην Εικόνα 12), τόσο ο σταθμός βάσης LTE, ο εξελιγμένος κόμβος B (eNB), όσο και ο σταθμός βάσης NR (gNB) συνδέονται στο LTE EPC. Η σύνδεση NR UP στο EPC γίνεται μέσω του eNB (Επιλογή 3) ή απευθείας (Επιλογή 3A). Στην πραγματικότητα, προβλέπεται ότι οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να εφαρμόσουν αυτήν την επιλογή αρχιτεκτονικής προτού καθοριστούν όλα τα στοιχεία του αυτόνομου NR RAN και του 5GC. Αντίστοιχα, το 3GPP είχε ολοκληρώσει την πρώτη πτώση των προδιαγραφών EN-DC τον Μάρτιο του 2018 και το είχε διαθέσει σε προμηθευτές δικτύου και UE προκειμένου να ξεκινήσουν με την εφαρμογή στα προϊόντα τους. Οι υπόλοιπες επιλογές αρχιτεκτονικής είναι κατά κάποιο τρόπο συνδεδεμένες η μία για την άλλη. Ειδικότερα, η επιλογή 4, η οποία απεικονίζεται μέσω των πράσινων γραμμών στην Εικόνα 12, αναφέρεται στο NR - E-UTRA Dual Connectivity (NE-DC) όπου και ένα αυτόνομο gNB ως εξελιγμένο LTE eNB (δηλαδή, eLTE eNB) συνδέονται με το νέο 5GC. Περαιτέρω, στην Επιλογή 7, επίσης γνωστή ως Επόμενη Γενιά-RAN E-UTRA-NR με Διπλή Συνδεσιμότητα (NGEN-DC), αντί για το eLTE eNB και το gNB (δηλαδή, παρόμοια με το EN -Επιλογή DC) συνδέονται στο 5GC (Yilmaz et al., 2019).

Για να αποτυπωθεί μια ιδέα σχετικά με τις πιθανές περιπτώσεις χρήσης για την ανάπτυξη των προαναφερθέντων επιλογών αρχιτεκτονικής 5G, τα EN-DC και NGEN-DC μπορούν να αναπτυχθούν για υπηρεσίες ευρυζωνικότητας κινητής τηλεφωνίας και χαμηλού λανθάνοντος χρόνου MTC, καθώς μπορούν να εγγυηθούν υψηλή ευρωστία συνδεσιμότητας (δηλαδή, με την ανάπτυξη LTE συχνοτήτων κάτω των 6GHz) και, ταυτόχρονα, χαμηλών καθυστερήσεων λόγω NR που αναπτύσσονται σε υψηλές συχνοτήτες (δηλαδή πάνω από 6GHz). Σημειώνουμε ότι το EN-DC και το NGEN-DC διαφέρουν ουσιαστικά από το διαφορετικό βασικό δίκτυο που χρησιμοποιείται. Στο EN-DC, χρησιμοποιείται το LTE EPC, ενώ στο NGEN-DC εφαρμόζεται το NR 5GC. Αντίθετα, για το NE-DC, η επιλογή αυτής της αρχιτεκτονικής μπορεί να αναπτυχθεί για ad-hoc λύσεις/συστήματα όπως αυτά που σχετίζονται με σενάρια εργοστασιακού αυτοματισμού. Εδώ, ο κύριος σκοπός είναι να εγγυηθούμε πολύ χαμηλές καθυστερήσεις, αναπτύσσοντας το NR ως κύριο κόμβο και, στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το LTE ως εναλλακτική λύση σε περίπτωση που η συνδεσιμότητα γίνει ανώμαλη ή ασταθής.

3.2 Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (NFV)

Τα δίκτυα των φορέων εκμετάλλευσης δικτύων είναι γεμάτα με μια μεγάλη και αυξανόμενη ποικιλία ιδιόκτητων συσκευών υλικού. Η έναρξη μιας νέας υπηρεσίας δικτύου απαιτεί συχνά μια άλλη ποικιλία και η εύρεση του χώρου και της ισχύος για να χωρέσουν αυτές οι συσκευές γίνεται όλο και πιο δύσκολη, σε συνδυασμό με το αυξανόμενο κόστος ενέργειας, τις προκλήσεις για επενδύσεις κεφαλαίων αλλά και τη σπανιότητα των δεξιοτήτων που είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό, την ενσωμάτωση και τη λειτουργία ολοένα και πιο περίπλοκων συσκευών. Επιπλέον, οι συσκευές αυτές φτάνουν γρήγορα στο τέλος της ζωής τους, απαιτώντας ένα μεγάλο μέρος του κύκλου προμηθειών σχεδιασμού-ενσωμάτωσης-ανάπτυξης να επαναλαμβάνεται με ελάχιστο ή καθόλου όφελος εσόδων. Ακόμη χειρότερα, οι κύκλοι ζωής του υλικού γίνονται συντομότεροι καθώς η καινοτομία της τεχνολογίας και των υπηρεσιών επιταχύνεται, εμποδίζοντας την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών δικτύου που αποφέρουν έσοδα και περιορίζοντας την καινοτομία σε δικτυοκεντρικούς συνδεδεμένους κόσμους.



Εικόνα 13: Σχέση εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου με SDN

Η τεχνολογία Network Functions Virtualisation (NFV) στοχεύει να μεταμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο οι χειριστές δικτύων δημιουργούν δίκτυα εξελίσσοντας την τυπική τεχνολογία εικονικοποίησης IT για την ενοποίηση πολλών τύπων εξοπλισμού δικτύου σε τυπικούς βιομηχανικούς διακομιστές μεγάλου όγκου, διακόπτες και αποθήκευση, που θα μπορούσαν να βρίσκονται σε Datacentres, Network Nodes και στις εγκαταστάσεις του τελικού χρήστη. Περιλαμβάνει την υλοποίηση λειτουργιών δικτύου σε λογισμικό που μπορεί να τρέξει σε μια σειρά από βιομηχανικά πρότυπα υλικού διακομιστή και που μπορεί να μετακινηθεί ή να δημιουργηθεί σε διάφορες τοποθεσίες του δικτύου όπως απαιτείται, χωρίς την ανάγκη για εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου είναι

σε μεγάλο βαθμό συμπληρωματική με τη δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN), αλλά δεν εξαρτάται από αυτήν (ή το αντίστροφο). Η εικονικοποίηση μπορεί να υλοποιηθεί χωρίς να απαιτείται SDN, αν και οι δύο έννοιες και λύσεις μπορούν να συνδυαστούν και να συγκεντρώσουν δυνητικά μεγαλύτερη αξία. Οι στόχοι εικονικοποίησης μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας μηχανισμούς που δεν είναι SDN, βασιζόμενοι στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή σε πολλά κέντρα δεδομένων. Αλλά προσεγγίσεις που βασίζονται στο διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και προώθησης δεδομένων όπως προτείνονται από το SDN μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση, να απλοποιήσουν τη συμβατότητα με τις υπάρχουσες αναπτύξεις και να διευκολύνουν τις διαδικασίες λειτουργίας και συντήρησης. Η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου είναι σε θέση να υποστηρίξει το SDN παρέχοντας την υποδομή πάνω στην οποία μπορεί να εκτελεστεί το λογισμικό SDN. Επιπλέον, η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου ευθυγραμμίζεται στενά με το SDN και στοχεύει στη χρήση διακομιστών και μεταγωγέων των πακέτων πληροφοριών. Η εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε λειτουργία επιπέδου επεξεργασίας πακέτων και ελέγχου επιπέδου δεδομένων σε κινητά και σταθερά δίκτυα. Τα πιθανά παραδείγματα που μπορούν να παρατίθενται περιλαμβάνουν (όχι αναγκαστικά με τη συγκεκριμένη σειρά) (Casado et al., 2014a):

- Δρομολογητές BNG, CG-NAT.
- Κόμβοι δικτύου κινητής τηλεφωνίας: HLR/HSS, MME, SGSN, GGSN/PDN-GW, RNC, Node B, eNode B.
- Λειτουργίες που περιέχονται σε οικιακούς δρομολογητές και set top boxes για τη δημιουργία εικονικοποιημένων οικιακών περιβαλλόντων.
- Στοιχεία πύλης σήραγγας: IPSec/SSL VPN gateways.
- Ανάλυση κυκλοφορίας: DPI, μέτρηση QoE.
- Εξασφάλιση υπηρεσιών, παρακολούθηση SLA, δοκιμή και διαγνωστικά.
- Σηματοδότηση NGN: SBC, IMS.
- Λειτουργίες σύγκλισης και σε όλο το δίκτυο: διακομιστές AAA, πλατφόρμες ελέγχου πολιτικής και χρέωσης.
- Βελτιστοποίηση σε επίπεδο εφαρμογής: CDN, Διακομιστές προσωρινής μνήμης, εξισορροπητές φόρτωσης, επιταχυντές εφαρμογών.
- Λειτουργίες ασφαλείας: Τείχη προστασίας, σαρωτές ιών, συστήματα ανίχνευσης εισβολών, προστασία από ανεπιθύμητα μηνύματα.

Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον εντοπισμό εκείνων των λειτουργιών του δικτύου για τις οποίες η εικονικοποίηση αποφέρει τα περισσότερα οφέλη. Οι περιπτώσεις χρήσης που ενδιαφέρουν τους χρήστες περιλαμβάνουν:

- Ένα DPI βασισμένο σε λογισμικό, που παρέχει προηγμένη ανάλυση κυκλοφορίας και πολυδιάστατες αναφορές και δείχνει τη δυνατότητα να λειτουργεί το υλικό εκτός ραφιού με πραγματικές τιμές γραμμής. Το DPI που βασίζεται σε λογισμικό μπορεί να αναπτυχθεί διάχυτα στο δίκτυο, παρέχοντας πολύ καλύτερες δυνατότητες ανάλυσης, καθώς και απλούστερους μηχανισμούς για ανάπτυξη, ενημέρωση, δοκιμή και κλιμάκωση σε μεταβαλλόμενο φόρτο εργασίας.
- Υλοποιήσεις κόμβων IP, που υποστηρίζουν - για παράδειγμα, αλλά δεν περιορίζονται σε: δυνατότητες CG-NAT και BRAS σε τυπικούς διακομιστές υψηλής τεχνολογίας, προσφέροντας την ευκαιρία για αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση του υλικού καθώς εξελίσσεται η ζήτηση για τέτοιες δυνατότητες.
- Η εικονικοποίηση των υπηρεσιών και των δυνατοτήτων που απαιτούν επί του παρόντος αποκλειστικές συσκευές υλικού σε χώρους πελατών (οικιακό περιβάλλον, έως μικρό υποκατάστημα, έως μεγάλες εταιρικές εγκαταστάσεις), συμπεριλαμβανομένων, ενδεικτικά, των εξής: τείχος προστασίας, ασφάλεια ιστού, IPS/IDS, επιτάχυνση και βελτιστοποίηση WAN και λειτουργίες δρομολογητή. Η εικονικοποίηση του οικιακού περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων των δρομολογητών, των διανομέων και των αποκωδικοποιητών θα επέτρεπε ενδεχομένως μια απλούστερη και απρόσκοπτη μετάβαση στο IPv6, θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και θα αποφύγει τη χρήση πλεονάζοντος διαδοχικού υλικού με ενημερώσεις καθώς εξελίσσονται οι ευρυζωνικές εφαρμογές και υπηρεσίες.
- Η εικονικοποίηση των Δικτύων Διανομής Περιεχομένου (CDN), με αρχικό στόχο την ευκολότερη επέκταση και κλιμάκωση των Υπηρεσιών Παράδοσης Περιεχομένου, καθώς και με στόχο τη μεγιστοποίηση της επαναχρησιμοποίησης υλικού σε PoP με τη δυνατότητα εγκατάστασης άλλων Εφαρμογών Παράδοσης Υπηρεσιών (π.χ. Web Επιτάχυνση) κατ' απαίτηση. Η εικονικοποίηση των CDN θα επιτρέψει επίσης τη φιλοξενία υπηρεσιών CDN από πιθανούς επιχειρηματικούς εταίρους, όπως εξωτερικούς παρόχους CDN.

- Η εικονικοποίηση ενός βασικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας που στοχεύει σε ένα πιο αποδοτικό περιβάλλον παραγωγής, το οποίο επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη ζήτηση κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και να οδηγήσουν σε καλύτερη χρήση των πόρων (συμπεριλαμβανομένης της εξοικονόμησης ενέργειας), ευέλικτη διαχείριση του δικτύου (δεν χρειάζεται αλλαγή υλικού για αναβαθμίσεις κόμβων), ενοποίηση υλικού, ευκολότερη υποστήριξη πολλαπλών μισθώσεων και ταχύτερη διαμόρφωση νέων υπηρεσιών. Η εικονικοποίηση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία στιγμιότυπων βασικών δικτύων βελτιστοποιημένων για συγκεκριμένες υπηρεσίες, π.χ. για επικοινωνίες μηχανής με μηχανή (M2M).
- Η συντονισμένη εφαρμογή cloud και δικτύωσης για επιχειρήσεις, επιτρέπει την προσφορά υπηρεσιών κατ' απαίτηση και παροχή κεφαλαιακής απόδοσης για εταιρικούς πελάτες και φορείς εκμετάλλευσης δικτύων.
- Οι κόμβοι υβριδικών ινών-DSL βρίσκονται βαθιά στο εξωτερικό δίκτυο σε καφάου δρόμοι, υπόγεια και σε στύλους. Αυτοί οι κόμβοι πρέπει να έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και πολύ χαμηλή/μηδενική συντήρηση για να είναι οικονομικοί. Η εικονικοποίηση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της πολυπλοκότητας του υλικού στον απομακρυσμένο κόμβο, εξοικονομώντας ενέργεια και παρέχοντας βελτιωμένο βαθμό μελλοντικής προστασίας καθώς οι υπηρεσίες εξελίσσονται. Αυτοί οι απομακρυσμένοι κόμβοι θα μπορούσαν να παρέχουν πιο οικονομικά τόσο σταθερή όσο και ασύρματη πρόσβαση, εάν οι βασικές λειτουργίες εικονικοποιούνταν σε μια κοινή πλατφόρμα.
- Η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ενός αποδοτικού περιβάλλοντος παραγωγής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνήθως από διαφορετικές εφαρμογές, χρήστες και ενοικιαστές, υποστηρίζοντας έτσι τη συνύπαρξη πολλών εκδόσεων και παραλλαγών μιας υπηρεσίας δικτύου (συμπεριλαμβανομένων των δοκιμαστικών εκδόσεων και των εκδόσεων beta).

3.2.1 Πλεονεκτήματα τεχνολογίας NFV

Η εφαρμογή της εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου φέρνει πολλά οφέλη στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, συμβάλλοντας σε μια δραματική αλλαγή στο τοπίο της

βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Τα οφέλη προβλέπουμε να συμπεριλάβουμε (όχι με κάποια συγκεκριμένη σειρά):

- Μειωμένο κόστος εξοπλισμού και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας μέσω της ενοποίησης του εξοπλισμού και της εκμετάλλευσης των οικονομιών κλίμακας της βιομηχανίας πληροφορικής (~9,5 εκατομμύρια διακομιστές που αποστέλλονται το 2011 σε σύγκριση με ~1,5 εκατομμύρια δρομολογητές που προβλέπονται για το 2012) (Hucaby, 2010).
- Αυξημένη ταχύτητα του Time to Market ελαχιστοποιώντας τον τυπικό κύκλο του χειριστή δικτύου. Οι οικονομίες κλίμακας που απαιτούνται για την κάλυψη επενδύσεων σε λειτουργίες βασισμένες σε υλικό δεν ισχύουν πλέον για ανάπτυξη που βασίζεται σε λογισμικό, καθιστώντας εφικτούς άλλους τρόπους εξέλιξης χαρακτηριστικών. Η εικονικοποίηση θα πρέπει να επιτρέπει στους χειριστές δικτύου να μειώσουν σημαντικά τον κύκλο ωρίμανσης.
- Η δυνατότητα λειτουργίας εγκαταστάσεων παραγωγής, δοκιμών και αναφοράς στην ίδια υποδομή παρέχει πολύ πιο αποτελεσματική δοκιμή και ενσωμάτωση, μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης και το χρόνο στην αγορά.
- Είναι δυνατή η στοχευμένη εισαγωγή υπηρεσιών με βάση τη γεωγραφία ή τα σύνολα πελατών. Οι υπηρεσίες μπορούν να κλιμακωθούν γρήγορα προς τα πάνω ή/και κάτω όπως απαιτείται. Επιπλέον, η ταχύτητα εξυπηρέτησης βελτιώνεται με την εξ αποστάσεως παροχή σε λογισμικό χωρίς να απαιτούνται επισκέψεις στον ιστότοπο για την εγκατάσταση νέου υλικού.
- Η ενεργοποίηση ευρείας ποικιλίας οικοσυστημάτων και ενθάρρυνση της διαφάνειας που ανοίγει την αγορά εικονικών συσκευών σε καθαρά εισερχόμενους λογισμικού, μικρούς καταναλωτές και ακαδημαϊκό κόσμο, ενθαρρύνοντας περισσότερη καινοτομία για να φέρει γρήγορα νέες υπηρεσίες και νέες ροές εσόδων με πολύ χαμηλότερο κίνδυνο.
- Βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης και/ή της τοπολογίας του δικτύου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο με βάση τα πραγματικά μοτίβα κίνησης/κινητικότητας και τη ζήτηση υπηρεσιών. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση της τοποθεσίας και η εκχώρηση πόρων στις λειτουργίες του δικτύου αυτόματα και σε σχεδόν πραγματικό χρόνο θα μπορούσε να παρέχει προστασία έναντι αστοχιών χωρίς να σχεδιάσει πλήρη ελαστικότητα.
- Υποστήριξη πολλαπλής μίσθωσης, επιτρέποντας έτσι στους φορείς

εκμετάλλευσης των δικτύων να παρέχουν προσαρμοσμένες υπηρεσίες και συνδεσιμότητα για πολλούς χρήστες, εφαρμογές ή εσωτερικά συστήματα ή άλλους φορείς εκμετάλλευσης δικτύου, που όλα συνυπάρχουν στο ίδιο υλικό με κατάλληλο ασφαλή διαχωρισμό διαχειριστικών τομέων.

- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας με την εκμετάλλευση των λειτουργιών διαχείρισης ενέργειας σε τυπικούς διακομιστές και αποθηκευτικούς χώρους, καθώς και ενοποίηση φόρτου εργασίας και βελτιστοποίηση τοποθεσίας. Για παράδειγμα, βασιζόμενοι σε τεχνικές εικονικοποίησης, θα ήταν δυνατό να συγκεντρωθεί ο φόρτος εργασίας σε μικρότερο αριθμό διακομιστών κατά τις ώρες εκτός αιχμής (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας), έτσι ώστε όλοι οι άλλοι διακομιστές να μπορούν να απενεργοποιηθούν ή να τεθούν σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας.
- Βελτιωμένη λειτουργική απόδοση αξιοποιώντας την υψηλότερη ομοιομορφία της φυσικής πλατφόρμας του δικτύου και την ομοιογένειά της με άλλες πλατφόρμες υποστήριξης:
 - Οι μηχανισμοί ενορχήστρωσης πληροφορικής παρέχουν αυτοματοποιημένη εγκατάσταση και κλιμάκωση της χωρητικότητας και επαναχρησιμοποίηση των δομών Virtual Machine (VM).
 - Εξάλειψη της ανάγκης για ειδικό υλικό για εφαρμογές. Η βάση δεξιοτήτων σε ολόκληρο τον κλάδο για τη λειτουργία τυπικών διακομιστών IT μεγάλου όγκου είναι πολύ μεγαλύτερη και λιγότερο κατακερματισμένη από ό,τι για το σημερινό εξοπλισμό δικτύου ειδικά για τις τηλεπικοινωνίες.
 - Μείωση ποικιλίας εξοπλισμού για προγραμματισμό και προμήθεια. Υποθέτοντας ότι έχουν αναπτυχθεί εργαλεία για την αυτοματοποίηση και την αντιμετώπιση της αυξημένης πολυπλοκότητας του λογισμικού της εικονικοποίησης.
 - Δυνατότητα προσωρινής επιδιόρθωσης βλαβών με αυτοματοποιημένη επαναδιαμόρφωση και μεταφορά φόρτου εργασίας δικτύου στην πλεονάζουσα χωρητικότητα χρησιμοποιώντας μηχανισμούς ενορχήστρωσης IT. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του κόστους των λειτουργιών οποιαδήποτε ώρα και ημέρα, μετριάζοντας αυτόματα τις βλάβες.
 - Δυνατότητα απόκτησης μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας μεταξύ των λειτουργιών πληροφορικής και δικτύου.

- Η δυνατότητα υποστήριξης της αναβάθμισης λογισμικού εντός υπηρεσίας (ISSU) με εύκολη επαναφορά με την εγκατάσταση της νέας έκδοσης μιας Εικονικής Συσκευής Δικτύου (VNA) ως νέας Εικονικής Μηχανής (VM). Υποθέτοντας ότι η κίνηση μπορεί να μεταφερθεί από το παλιό VM στο νέο VM χωρίς διακοπή της υπηρεσίας. Για ορισμένες εφαρμογές μπορεί να είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός της κατάστασης του νέου VM με το παλιό VM (Chiosi, 2020).

3.3 Δίκτυο καθοριζόμενο από το λογισμικό (SDN)

Η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN) είναι ο φυσικός διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου δικτύου από το επίπεδο προώθησης, όπου ένα μόνο επίπεδο ελέγχου ελέγχει πολλές συσκευές. Η τεχνική SDN είναι για τη διαχείριση των ροών πληροφορίας που πρέπει να διαχωριστούν από την άρρητη υποδομή και τα συστήματα που προωθούν την πληροφορία. Το SDN διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων και, στη συνέχεια, ενσωματώνει το επίπεδο ελέγχου, έτσι ώστε ένα πρόγραμμα ελέγχου να ελέγχει περισσότερα στοιχεία επιπέδου δεδομένων (McKeown et al., 2008). Ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων ορίζεται ως η διεπαφή του προγραμματισμού εφαρμογής (API) μεταξύ της συσκευής δικτύου και του ελεγκτή SDN. Το πρωτόκολλο OpenFlow είναι ένα παράδειγμα για ένα API. Ένας διακόπτης με προγραμματιζόμενη διεπαφή επιτρέπει στον ελεγκτή να επικοινωνήσει και να ορίσει κανόνες στο διακόπτη. Ο διακόπτης OpenFlow μπορεί να συμπεριφέρεται σαν δρομολογητής, μεταγωγέας, τείχος προστασίας και μεταφραστής διευθύνσεων δικτύου.

3.3.1 Οι κόμβοι του SDN

Οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των σχετικών διεπαφών για να σχηματίσουν ένα αρθρωτό επεκτάσιμο σύστημα. Ένα αρθρωτό σύστημα που επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του κώδικα. Η υλοποίηση μπορεί να τροποποιηθεί, αλλά εάν η διεπαφή παραμένει ίδια, δεν επηρεάζει άλλα μέρη του συστήματος λογισμικού. Οι κόμβοι έχουν μεγάλα πλεονεκτήματα για την κατασκευή ενός κλιμακούμενου συστήματος λογισμικού, απαιτείται σπονδυλωτότητα που βασίζεται στη δημιουργία κόμβων (McKeown et al., 2008). Η αφαίρεση SDN είναι παρόμοια με τα παραδοσιακά συστήματα υπολογιστών, τα οποία ενσωματώθηκαν με ιδιόκτητο λειτουργικό

σύστημα, υλικό και λογισμικό σε πολυεπίπεδο μοντέλο με δυνατότητα επιλογής του κατάλληλου χαρακτηριστικού σε κάθε επίπεδο. Το SDN συνοδεύεται από την κατάλληλη αφαίρεση για το επίπεδο ελέγχου. Τρεις κύριες στήλες εισάγονται για αποσύνδεση του επιπέδου ελέγχου:

- Κόμβος του επιπέδου προώθησης: ο κόμβος του επιπέδου προώθησης κρύβει την πολυπλοκότητα της εφαρμογής του από τις αποφάσεις ελέγχου. Μια ανοιχτή διεπαφή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των συσκευών δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι δε χρειάζεται να ανησυχείτε για έναν συγκεκριμένο προμηθευτή.
- Κόμβος της κατάστασης του δικτύου: Η αιτία πίσω από την πολυπλοκότητα της διαχείρισης και του ελέγχου των τρεχόντων δικτύων είναι οι περίπλοκοι αλγόριθμοι διανομής όπως το OSPF. Η ιδέα είναι η αφαίρεση του περίπλοκου αλγόριθμου και συνοδεύονται από μια γενική προβολή δικτύου για τον ελεγκτή για την απλοποίηση των λειτουργιών της εφαρμογής. Αντί να επιτρέπει στις συσκευές δικτύου να επικοινωνούν μεταξύ τους, ο ελεγκτής SDN χρησιμοποιεί συγκεκριμένο πρωτόκολλο (π.χ. OpenFlow) για να επικοινωνεί με συσκευές δικτύου με πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο για να σχηματίσει την «προβολή» ή τον χάρτη της τοπολογίας. Οι διαμορφώσεις αποστέλλονται στους δρομολογητές και στους διακόπτες για προώθηση.
- Κόμβος του επιπέδου ελέγχου: Ο ελεγκτής SDN παρέχει διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών στις οποίες έχουν πρόσβαση οι εφαρμογές. Οι εξωτερικές εφαρμογές μπορούν να χειριστούν το δίκτυο από τα API μέσω του ελεγκτή χρησιμοποιώντας Java ή REST. Οι προγραμματιστές μπορούν να διαμορφώσουν και να ελέγξουν το δίκτυο χωρίς να χρειάζεται να δημιουργηθεί λογισμικό για την υποστήριξη υλικού και λογισμικού πολλαπλών προμηθευτών.

Μετά την υλοποίηση των κόμβων, ο ελεγκτής θα λειτουργεί ως Λειτουργικό Σύστημα Δικτύου (NOS) και θα συνομιλεί με τους μεταγωγείς μέσω του API που είναι γνωστό ως Southbound API. Όπου οι εφαρμογές είναι κωδικοί γραμμένοι στον ελεγκτή, χρησιμοποιώντας API που παρέχονται από το NOS που ονομάζονται Northbound API.

3.3.2 Τα επίπεδα του SDN

Η αρχιτεκτονική SDN μπορεί να οριστεί ως μείγμα επτά επιπέδων. Κάθε στρώμα έχει τους δικούς του σκοπούς. Ορισμένα παρέχονται συνεχώς στην αρχιτεκτονική SDN,

όπως το Southern API, τα λειτουργικά συστήματα δικτύου, το Northern Network API και η εφαρμογή δικτύου. Άλλες μπορούν να εισαχθούν μόνο σε ορισμένες ρυθμίσεις, όπως hypervisor - ή γλώσσες προγραμματισμού. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει αυτά τα στρώματα.

- Υποδομή: Τα παραδοσιακά φυσικά εργαλεία έχουν γίνει απλά προχωρώντας βασικά στοιχεία χωρίς έλεγχο ένθετων ή για λήψη αποφάσεων. Τα νέα δίκτυα κατασκευάζονται πάνω από ανοιχτό και τυπικά όρια για εγγυήσεις συμβατότητας και διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών. Επιπλέον, οι ανοιχτές διεπαφές επιτρέπουν στις οντότητες ελεγκτών να προγραμματίζουν ετερογενείς συσκευές προώθησης, κάτι που είναι δύσκολο στα παραδοσιακά δίκτυα (Kreutz et al., 2018).
- Διεπαφές Southbound: Τα όρια Southbound (SI) είναι οι συνδέσεις μεταξύ των εργαλείων ελέγχου και δικτύου, το SI εξηγεί τη διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ προηγμένων συσκευών και ελέγχου επίπεδο. Αυτό το πρωτόκολλο καθιερώνει τη μέθοδο με την οποία αλληλοεπιδρούν τα στοιχεία του επιπέδου ελέγχου και των πληροφοριών. Από την άλλη πλευρά, αυτά τα API εξακολουθούν να είναι ασφαλισμένα στα προηγμένα στοιχεία της φυσικής ή εικονικής υποδομής.
- Υπερεπόπτες δικτύου: Η εικονικοποίηση δικτύου αντιπροσωπεύει την αφαίρεση ενός δικτύου που διαχωρίζεται από τον υποκείμενο φυσικό εξοπλισμό. Αυτό για να επιτρέψει σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα να εκτελούνται από πάνω κοινόχρηστη υποδομή, όπου κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να έχει μια τοπολογία του και όχι το σιωπηρό φυσικό δίκτυο. Το Flow Visor ήταν η αρχική προσπάθεια εικονικοποίησης του SDN. Το Flow Visor είναι ένα στάδιο που λειτουργεί ως αντικατάσταση μεταξύ του ελεγκτή και των εργαλείων δικτύου για να προσφέρει ένα επίπεδο έννοιας που μοιράζεται το επίπεδο δεδομένων OpenFlow, επιτρέποντας σε πολλούς ελεγκτές να ελέγχουν το δικό του τμήμα. Οι κύριες αρμοδιότητες του Flow Visor είναι να αποφασίζει ποιος θα ελέγχει τα πακέτα που προωθούνται από το μεταγωγέα και να ελέγχει και να καθορίζει τους κανόνες που θα οριστούν από τους ελεγκτές.

Το NOS είναι το βασικό στοιχείο στην αρχιτεκτονική SDN. Παρόμοια με ένα τρέχον λειτουργικό σύστημα, ο ελεγκτής αφαιρεί τις λεπτομέρειες του πρωτοκόλλου ελεγκτή SDN σε συσκευή όπου οι παραπάνω εφαρμογές μπορούν να επικοινωνούν με αυτές τις

συσκευές SDN χωρίς να γνωρίζουν τη διαφορά. Αυτός ο κεντρικός έλεγχος από τη NOS πρέπει να διευκολύνει τη διαχείριση του δικτύου και να απλοποιήσει το υπερβολικό βάρος της επίλυσης προβλημάτων δικτύωσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά του ελεγκτή περιλαμβάνουν:

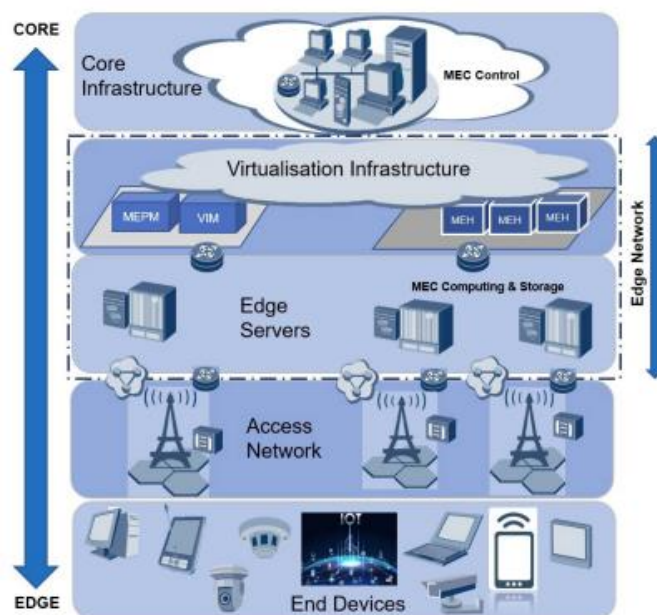
- 1) Ανακάλυψη συσκευών τελικού χρήστη: Ανακάλυψη συσκευών τελικού χρήστη όπως φορητοί υπολογιστές, επιτραπέζιοι υπολογιστές, κινητές συσκευές κ.λπ.
 - 2) Ανακάλυψη συσκευών δικτύου: Ανακάλυψη συσκευών δικτύου που περιλαμβάνουν την υποδομή του δικτύου, όπως διακόπτες, δρομολογητές και σημεία ασύρματης πρόσβασης.
 - 3) Διαχείριση Τοπολογίας: Διατήρηση πληροφοριών σχετικά με τις λεπτομέρειες διασύνδεσης των συσκευών δικτύου μεταξύ τους και με τον τελικό χρήστη.
 - 4) Διαχείριση ροής: Διατηρήστε μια βάση δεδομένων των ροών που διαχειρίζεται ο ελεγκτής και πραγματοποιήστε όλες τις απαραίτητες ρυθμίσεις με τις συσκευές για να εξασφαλίσετε συγχρονισμό των καταχωρήσεων ροής της συσκευής με αυτή τη βάση δεδομένων.
- Northbound Interfaces: Οι Northbound Interfaces είναι μια αφαίρεση που επιτρέπει στις εφαρμογές δικτύου να μην εξαρτώνται από συγκεκριμένες υλοποιήσεις για την απλοποίηση του προγραμματισμού του δικτύου. Αντίστροφα από τη διεπαφή με κατεύθυνση προς νότο, η διεπαφή με κατεύθυνση βορρά είναι κυρίως ένα σύστημα λογισμικού, όπου εφαρμογές όπως η δρομολόγηση δημιουργούνται μέσω προγραμματισμού από γλώσσες προγραμματισμού όπως η Python ή η Java, αυτό επιτρέπει ταχύτερη ανάπτυξη, χαμηλότερο κόστος επένδυσης και ευκολότερη αντιμετώπιση προβλημάτων σε σύγκριση με το Southbound API (Casado et al., 2014b). Ο ελεγκτής ειδοποιεί την εφαρμογή των διαδικασιών που συμβαίνουν στο δίκτυο. Τα συμβάντα μπορεί να αφορούν ένα ξεχωριστό πακέτο που έχει δημιουργηθεί από τον ελεγκτή ή μια αλλαγή κατάστασης στην τοπολογία, όπως μια σύνδεση που πέφτει. Οι εφαρμογές ζητούν διαφορετικές προσεγγίσεις ως απάντηση στο συμβάν. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει απόθεση τροποποίησης ή προώθηση του πακέτου σε περίπτωση λαμβανόμενου συμβάντος πακέτου.

- Γλώσσες προγραμματισμού: Οι γλώσσες προγραμματισμού είναι API υψηλού επιπέδου που επεκτείνουν μια έννοια του ίδιου του δικτύου, έτσι ώστε ο προγραμματιστής να μην χρειάζεται να ασχολείται με ξεχωριστές συσκευές αλλά ελαφρώς με το δίκτυο στο σύνολό του (Casado et al., 2014a). Pyretic, Python και Frenetic μεταξύ πολλών άλλων γλωσσών προγραμματισμού, έχουν προγραμματιστεί για SDN.
- Εφαρμογές δικτύου: Οι εφαρμογές δικτύου εφαρμόζουν τη λογική ελέγχου, η οποία μεταφράζεται σε, επαινεί εγκατεστημένες στις συσκευές δικτύου και καθορίζει τη συμπεριφορά τους. Η εφαρμογή δικτύου είναι θεωρείται ως ο «εγκέφαλος του δικτύου». Εγγράφεται ως ακροατής για ορισμένα συμβάντα όπως καθορίστηκαν προηγουμένως, στη συνέχεια ο ελεγκτής καλεί τη μέθοδο επανάκλησης της εφαρμογής όποτε συμβαίνει ένα τέτοιο συμβάν καθώς και τις εφαρμόζει σε εξωτερικές εισόδους, όπως η εκτέλεση μεθόδων ασφαλείας. Μια μέτρια εφαρμογή, δηλαδή δρομολόγηση, η λογική αυτής της εφαρμογής είναι να περιγράψει την διαδρομή μέσω της οποίας τα πακέτα θα εκτελούνται από ένα σημείο A σε ένα σημείο B. Για να επιτευχθεί μια εφαρμογή δρομολόγησης πρέπει, με βάση τη συμβολή της τοπολογίας, να αποφασίσει για τη διαδρομή που θα χρησιμοποιήσει και να δώσει εντολή στον ελεγκτή να συνδέσει τους σχετικούς κανόνες προώθησης σε όλες τις συσκευές προώθησης στην επιλεγμένη διαδρομή, από το A στο B (Badotra & Panda, 2020). Παρά τη μεγάλη ποικιλία περιπτώσεων χρήσης, οι περισσότερες εφαρμογές SDN μπορούν να συγκεντρωθούν σε μία από τις πέντε κατηγορίες: μηχανική κυκλοφορίας, κινητικότητα και ασύρματη σύνδεση, μέτρηση και παρακολούθηση, ασφάλεια και αξιοπιστία και δικτύωση κέντρων δεδομένων (Kreutz et al., 2018).

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

Το MULTI-ACCESS Edge Computing (MEC) είναι μια εξελισσόμενη τεχνική λύση που μεταφέρει τον υπολογισμό και την αποθήκευση που απαιτούνται για την υποστήριξη εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης, χαμηλής καθυστέρησης στην άκρη του δικτύου και πιο κοντά στους τελικούς χρήστες (J. Zhang et al., 2018). Το MEC προτάθηκε για πρώτη φορά το 2009 από τη Microsoft (Satyanarayanan et al., 2011) και την τελευταία δεκαετία, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων καλωσόρισαν την πρόσθετη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες που προσφέρει η MEC. Η αλληλεπίδραση με τις

εφαρμογές και τις υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω του Διαδικτύου έχει γίνει καθημερινή δραστηριότητα και με την πάροδο του χρόνου, οι εφαρμογές, οι υπηρεσίες και τα υποκείμενα δίκτυα έχουν εξελιχθεί. Το βασικό σκεπτικό για το MEC είναι να παρέχει στους τελικούς χρήστες βελτιωμένη Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) και Ποιότητα Εμπειρίας (QoE). Το MEC μπορεί να αναγνωριστεί ως ειδική περίπτωση της επόμενης γενιάς Mobile Cloud Computing (MCC) (Okwuibe et al., 2018).



Εικόνα 14: Λειτουργική Δομή MEC.

Το MEC είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G με αποκεντρωμένη υπολογιστική αρχιτεκτονική στην οποία οι υπολογιστικοί πόροι και οι υπηρεσίες εφαρμογών μπορούν να εκτείνονται σε όλη τη διαδρομή επικοινωνίας από την πηγή δεδομένων στο σύννεφο που προβάλλει τα τεχνικά οφέλη από τη βελτίωση της απόδοσης της εφαρμογής, την ικανοποίηση του απορρήτου δεδομένων και ανησυχίες για την ασφάλεια καθώς και βελτιώσεις χωρητικότητας στα δίκτυα backhaul και πυρήνα (Okwuibe et al., 2018). Ενώ μια αρχιτεκτονική υπολογιστικής άκρης που καθορίζεται από λογισμικό επιλύει πολλά ζητήματα κυκλοφορίας δεδομένων, όπως λανθάνουσα κατάσταση και jitter στα δίκτυα πρόσβασης (Khan et al., 2020), μπορεί επίσης να παρουσιάσει νέα τρωτά σημεία, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια επίθεσης και πιθανές απειλές ασφαλείας. Παρά την αυξανόμενη αποδοχή του MEC ως μηχανισμού για τη βελτίωση της απόδοσης των συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών και την εμπειρία του τελικού χρήστη, η ασφάλεια παραμένει μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για τη δημιουργία ενός οικοσυστήματος αιχμής (Liang, 2017).

Τα μοναδικά χαρακτηριστικά του MEC σε εξαιρετικά διαφορετικά δομικά στοιχεία που επιτρέπουν τις τεχνολογίες και τις τεχνικές για τη μεταφόρτωση υπολογιστών σε αρχιτεκτονικές δικτύου εισάγουν νέους κινδύνους. Είναι σημαντικό όχι μόνο να ασφαλιστούν τα δομικά στοιχεία, αλλά και να ενορχηστρωθούν διαφορετικοί μηχανισμοί ασφάλειας για τη δημιουργία μιας αυτόνομης άπονης που επιτρέπει την ενσωμάτωση και τη διαλειτουργικότητά τους (HandbooN, 2003). Επομένως, όταν εξετάζουμε την ασφάλεια MEC, η παρακολούθηση του τοπίου της απειλής γίνεται πιο δύσκολη. Η χρήση κεντρικών διακομιστών παρέχει μια ικανή λύση για την παράκαμψη αυτών των προκλήσεων. Για παράδειγμα, λόγω της μικρής κλίμακας φύσης των κατανεμημένων αναπτύξεων και της μειωμένης συγκέντρωσης πολύτιμων πληροφοριών, οι διακομιστές MEC είναι λιγότερο επιρρεπείς σε επίθεση ασφαλείας. Οι κόμβοι MEC θα μπορούσαν να είναι ιδιωτικά κατασκευασμένα cloudlets, τα οποία μειώνουν τον κίνδυνο διαρροής πληροφοριών. Η χρήση "ασφάλειας από το σχεδιασμό" είναι σημαντική για την ασφάλιση εξαρτημάτων και καναλιών επικοινωνίας εντός του περιβάλλοντος MEC (Ndikumana et al., 2020). Η ασφάλεια των δεδομένων και το απόρρητο αποτελούν σταθερά σημαντικό ζήτημα στον χώρο των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Η ασφάλεια και το απόρρητο δεδομένων γίνονται ιδιαίτερα σοβαρά στο περιβάλλον MEC (P. Zhang et al., 2018) επειδή τα δεδομένα είναι διάσπαρτα σε διαφορετικούς κόμβους και συσκευές αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων διακομιστών, υπολογιστών, φορητών συσκευών και αισθητήρων ασύρματου δικτύου. Η ασφάλεια και το απόρρητο δεδομένων στο MEC είναι πιο περίπλοκα από τα συμβατικά συστήματα πληροφοριών. Για να διευκολυνθεί η υιοθέτηση του MEC από φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και εταιρικούς πελάτες, οι ανησυχίες για την ασφάλεια θα πρέπει να διορθωθούν για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του περιβάλλοντος MEC. Μια αξιόπιστη αρχιτεκτονική είναι θεμελιώδης προϋπόθεση για την απόκτηση της εμπιστοσύνης των χρηστών κατά την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Η ασφάλεια έχει γίνει ένας ουσιαστικός παράγοντας στο σχεδιασμό των αρχιτεκτονικών και των τρόπων λειτουργίας MEC. Ο εντοπισμός των κινδύνων ασφαλείας και των στρατηγικών μετριασμού που μπορούν να εφαρμοστούν στο πρότυπο MEC αποτελεί κρίσιμο σημείο εστίασης για την έρευνα και την ανάπτυξη του MEC. Για το λόγο αυτό, αυτό το έγγραφο παρέχει μια ανασκόπηση της έρευνας που σχετίζεται με το MEC και την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού του κινδύνου ασφαλείας για το MEC. Η συμβολή αυτής της αναθεώρησης είναι:

- Διερευνήστε την αρχιτεκτονική MEC, τα λειτουργικά επίπεδα και τον εντοπισμό των προκλήσεων ασφάλειας.
- Παρέχετε μια ολοκληρωμένη έρευνα των τομέων ασφάλειας δεδομένων MEC και παρουσιάστε μια ολιστική επισκόπηση των σχετικών εργασιών σε κάθε τομέα. Ειδικότερα, έλεγχος πρόσβασης, ταυτότητα και έλεγχος ταυτότητας, εμπιστευτικότητα δεδομένων, ακεραιότητα δεδομένων, ασφάλεια επικοινωνίας και διατήρηση της ιδιωτικής ζωής.
- Προσδιορίστε και εξετάστε προηγούμενες εργασίες για την ασφάλεια MEC προκλήσεις, π.χ., φορείς απειλής και παράγοντες για λειτουργικά επίπεδα MEC και χαρτογράφηση των αντίστοιχων διασφαλίσεων και ελέγχων ασφαλείας.
- Συζητήστε τις ανοιχτές προκλήσεις και παρουσιάστε τις μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας, π.χ. τμηματοποίηση που καθορίζεται από λογισμικό, εγγενείς μηχανισμούς ασφαλείας στο cloud, ενορχήστρωση ασφαλείας, εφαρμογές και υπηρεσίες MEC και ολοκληρωμένη διαχείριση εμπιστοσύνης (Ali et al., 2021).

3.5 Συνάθροιση φορέων και χιλιοστομετρικών κυμάτων (mm-wave)

Η συνάθροιση φορέων είναι μια μέθοδος κατά την οποία οι αχρησιμοποίητοι φορείς ή το φάσμα θα ανιχνευθούν και θα προστεθούν με τον κύριο φορέα συνιστωσών (Pedersen et al., 2011a). Είναι μια τεχνική πολλαπλών φορέων που χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλότερης φασματικής απόδοσης και μέγιστης απόδοσης. Η μέγιστη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί σε κατερχόμενη και ανοδική ζεύξη και ως εκ τούτου υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων ανά χρήστη. Καθώς το 5G πρόκειται να κυκλοφορήσει πλήρως, εξακολουθούμε να χρησιμοποιούμε την τεχνική συνάθροισης παρόχων LTE–Advanced. Κάθε συνδυασμένος φορέας ονομάζεται φορέας συστατικού. Πρόκειται για συνδυασμό ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, μόνο κατερχόμενης ζεύξης αλλά όχι μόνο ανοδικής ζεύξης. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης φορέα 1,4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz και 20MHz. Σύμφωνα με το 3GPP, μπορούν να ομαδοποιηθούν ακραίος αριθμός φέρων πέντε συστατικών. Στο 5G αναμένονται έως και 32 πάροχους στο LTE Advanced Pro. Στο 5G NR μπορούν να συγκεντρωθούν φορείς 16 στοιχείων (Dahlman & Skold, 2018). Αλλά σήμερα δίνει 100MHz εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο για συνάθροιση παρόχων χρησιμοποιώντας το LTE Advanced για επέκταση εύρους ζώνης (Al-Shibly et al., 2012). Είναι δυνατό να επιτύχετε 640Mbps ανά χρήστη χρησιμοποιώντας το LTE advanced pro. Για να αυξηθεί ο ρυθμός δεδομένων ανά

χρήστη, εκχωρούνται πολλαπλά μπλοκ πόρων συχνότητας που ονομάζονται φορείς στοιχείων σε κάθε χρήστη. Κάθε μέγεθος μπλοκ είναι 110 ή 100. Καθώς αυξάνουμε, ο αριθμός των μπλοκ συχνότητας που εκχωρούνται ανά χρήστη θα αυξάνεται. Τροφοδοτείται από συντονιστές δικτύων ραδιοπρόσβασης για να επιτρέψει την πλήρη ελαστικότητα της υλοποίησης καθώς και την μη συμβιβαστική απόδοση του πελάτη. Έτσι, με τη συγκέντρωση, είναι δυνατό να εξυπηρετηθούν αυξανόμενες διαφορετικές απαιτήσεις. Η συνάθροιση παρόχου είναι έξυπνη λόγω του χαρακτηριστικού του συνάθροιση συνεχόμενων και μη συνεχόμενων φορέων και παρέχει συμβατότητα προς τα πίσω (Ratasuk et al., 2010). Το εύρος ζώνης μπορεί να αυξηθεί με τη συγκέντρωση χωριστού φάσματος. Ο ρυθμός bit μπορεί να αυξηθεί και ως εκ τούτου η απόδοση του δικτύου. Τα εξαρτήματα είναι βασικά δύο τύπων. Φορέας κύριου συστατικού (PCC) και φορέας δευτερεύοντος συστατικού (SCC). Οι κύριοι φορείς εξαρτημάτων δεν μπορούν να αλλάξουν παρά μόνο παράδοση. Αλλά δευτερεύοντα εξαρτήματα μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν όποτε απαιτείται. Αυτά απαιτούνται με βάση τη ζήτηση των χρηστών. Καθώς ικανοποιείται η απαίτηση των χρηστών, μπορούν να αφαιρεθούν. Όποτε υπάρχει απαίτηση φάσματος σε μια περιοχή του σταθμού βάσης και εάν έχει διαπιστωθεί ότι σε μια άλλη περιοχή σταθμού βάσης κάποιο φάσμα είναι πλεονάζον ή αχρησιμοποίητο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον άπορο σταθμό βάσης. Σε πέντε φορείς ένας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως PCC και τέσσερις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως SCC. Με βάση τη συνάθροιση φορέων PCC και SCC κατηγοριοποιούνται στους ακόλουθους τύπους (Chikhale et al., 2021):

- i) Συνεχόμενος εντός ζώνης: Όταν στοιχεία φορέων υπάρχουν στο παρόμοιο εύρος συχνοτήτων και κοντά το ένα στο άλλο στο πεδίο συχνοτήτων, ο τύπος της συσσωμάτωσης φέροντος ονομάζεται συνεχόμενος τύπος συσώρευσης φέροντος εντός ζώνης.
- ii) Μη συνεχόμενος εντός ζώνης: Όταν το στοιχείο των φορέων είναι παρόν στο παρόμοιο εύρος συχνοτήτων αλλά βρίσκονται σε απόσταση ο ένας από τον άλλο και όχι κοντά με τον καθένα στον τομέα συχνότητας, ο τύπος συνάθροισης φορέα ονομάζεται μη εντός ζώνης. - συνεχόμενος τύπος συνάθροισης φορέα.
- iii) Interband: Όταν το στοιχείο των φορέων δεν υπάρχει στο παρόμοιο εύρος συχνοτήτων και βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και δεν γειτνιάζουν μεταξύ τους στο πεδίο συχνοτήτων, ονομάζονται φορείς διαζωνικών συστατικών.

iv) Συμμετρική Ενδοζωνική: Όταν τα στοιχεία των φορέων βρίσκονται σε παρόμοιο εύρος συχνοτήτων, σε συνεχή απόσταση, επίσης ίδια σε αριθμό στην άνω και κάτω ζεύξη, ονομάζεται συμμετρική ενδοζωνική συνεχόμενη συσσώρευση φορέα.

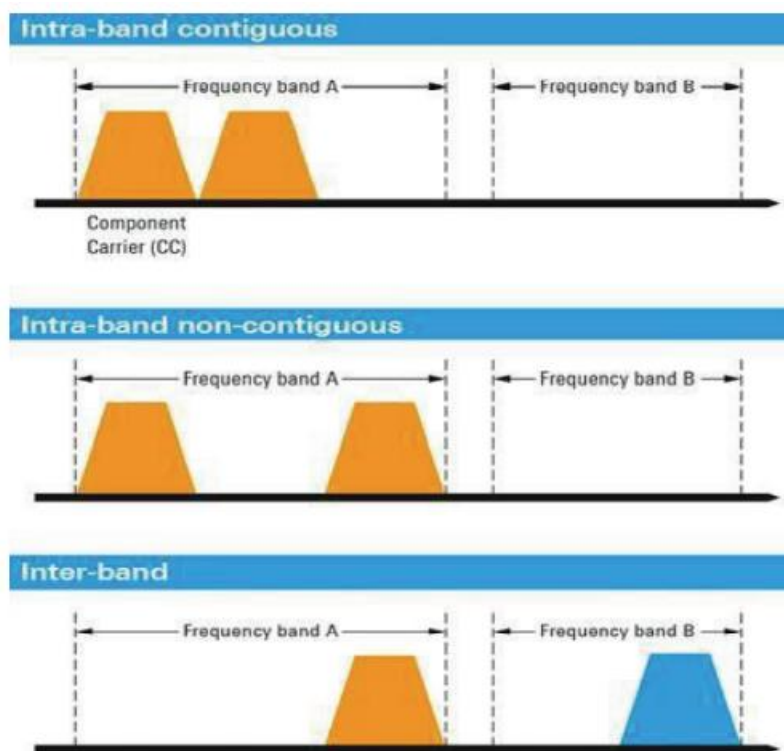
v) Μη συμμετρική ενδιάμεση ζώνη: Όταν οι φορείς συστατικών είναι στις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, συνεχόμενοι, μεγαλύτερος σε αριθμό στην κατερχόμενη ζεύξη και μικρότερος σε αριθμό στην ανοδική ζεύξη, ονομάζεται μη συμμετρική συνάθροιση φορέων διαζωνικής.

Η συνάθροιση φορέα χρησιμοποιείται για FDD και TDD. Στο FDD ο αριθμός των φορέων στην κατερχόμενη ζεύξη είναι πάντα μεγαλύτερος ή ίσος με την ανερχόμενη ζεύξη. Στην TDD ο αριθμός των φορέων στο UL και στο DL είναι παρόμοιος. Κάθε φορέας στοιχείων που χρησιμοποιείται στο LTE-A για μεταφορά δεδομένων ονομάζεται επίσης κυψέλη εξυπηρέτησης. Στη συνάθροιση φορέα, έχουμε πολλαπλά κελιά εξυπηρέτησης. Στην κατάσταση αναμονής, ο χρήστης ακούει μηνύματα εκπομπής πληροφοριών συστήματος μέσω της κύριας κυψέλης εξυπηρέτησης και στέλνει πληροφορίες ελέγχου ανοδικής ζεύξης μέσω του καναλιού ανόδου ζεύξης αυτού (PUCCH). Αυτά τα μηνύματα διαχειρίζεται ο κύριος πάροχος στοιχείων. Έλεγχος πόρων ραδιοφώνου Η σύνδεση θα γίνεται πάντα από την κύρια κυψέλη εξυπηρέτησης. Τα σήματα πολλαπλών φορέων δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ένα μόνο σήμα. Επομένως, απαιτεί έναν πιο προηγμένο πομποδέκτη στον εξοπλισμό χρήστη. Η έννοια της συγκέντρωσης κινητής τηλεφωνίας κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στη σχέση 10 για το LTE Advanced που αυξάνει την ευελιξία για τον προγραμματισμό στην ανοδική ζεύξη (H. Wang et al., 2010).

Το οποίο είναι συμβατό προς τα πίσω με το rel. 8 και rel. 9 του LTE. Το 2013, το 3GPP rel.11 επέκτεινε τις επιλογές ανάπτυξης και τις δυνατότητες της συνάθροισης παρόχων. Έχει εισαγάγει ενδοζωνική μη συνεχόμενη συσσώρευση φορέων. Έχει υποστηρίζει πολλαπλές χρονικές προόδους π.χ. κύτταρα που ανήκουν σε διαφορετικές θέσεις. Το 2014, ορίστηκε 3GPP rel.12 συσσώρευση φέροντος κινητής τηλεφωνίας μεταξύ ζώνης ανοδικής ζεύξης. Η απαίτηση των φορέων τριών συστατικών υπήρχε στην κάτω ζεύξη. Υποστηρίζει μέγιστο συγκεντρωτικό εύρος ζώνης 50MHz. Η πρώτη εμπορική συνάθροιση κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκε στη Νότια Κορέα και η UK. OPTUS στην Αυστραλία ήταν η πρώτη που ανέπτυξε τη συγκέντρωση κινητής τηλεφωνίας στο TD-LTE. Τεχνολογία συγκέντρωσης κινητής τηλεφωνίας που αναπτύσσεται σε όλο τον κόσμο. Αργότερα το εφάρμοσαν η Βόρεια Αμερική, η Κίνα, η Ιαπωνία και η Ινδία. Από

την άποψη των συσκευών παρέχει εύρος ζώνης έως και 100MHz που σημαίνει ότι οι χρήστες μπορούν να λάβουν περισσότερους ρυθμούς δεδομένων. Ωστόσο, η δραστηριότητα συγκέντρωσης φορέα απαιτεί περισσότερη δραστηριότητα και επεξεργασία του δέκτη. Άρα η κατανάλωση ρεύματος είναι μεγαλύτερη (Pedersen et al., 2011b).

Από τη σκοπιά του χειριστή δικτύου, η συνάθροιση φορέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκέντρωση κατακερματισμένης χρήσης εύρους ζώνης. Υποστηρίζει τον προγραμματισμό φέροντος πολλαπλών στοιχείων, στον οποίο η διαδρομή ελέγχου σε έναν φορέα μπορεί να επιτραπεί να εκχωρήσει πηγές σε διαφορετικό φορέα. Επομένως, είναι μια ισχυρή τεχνολογία για την αποτελεσματική χρήση ασύρματων πηγών. Έτσι, ο σταθμός βάσης macro θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες συστήματος, σηματοδότηση ελέγχου RRC.



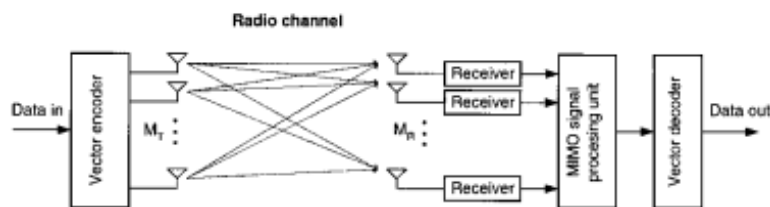
Εικόνα 15: Συγκέντρωση κινητής τηλεφωνίας (Pedersen et al., 2011b)

Μικρά κελιά όπως τα pico κύτταρα, τα femtocell θα εξυπηρετούσαν υψηλές απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων. Το LTE-A, το 5G NR και το LTE Advance Pro είναι τα τρία τεχνολογίες που έχουν ανοίξει το δρόμο για τη συγκέντρωση κινητής τηλεφωνίας 5G. Το 5G NR προτείνεται για 16 φορείς εξαρτημάτων όπου μπορεί να παρατηρηθεί βελτιωμένη απόδοση του δικτύου με βελτιστοποιημένη εμπειρία για τον τελικό

χρήστη. Υπάρχει δυναμική εναλλαγή ροής μεταξύ των φορέων εξαρτημάτων, κάνει τη διαχείριση της κυκλοφορίας απλή και αυξάνει την κατεχόμενη περιοχή δίνοντας έντονο χαρακτήρα σε ζωντανά δίκτυα. Και με άδεια και χωρίς άδεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλο το φάσμα των διαθέσιμων συχνοτήτων. Στα 60GHz στο εύρος χιλιοστών, επιτυγχάνονται ρυθμοί δεδομένων 640Mbps με τη χρήση της τεχνολογίας συνάθροισης φορέα (Chikhale et al., 2021).

3.6 Ασύρματα συστήματα πολλαπλών εισόδων-εξόδων

Το διάγραμμα ροής της πληροφορίας των συστημάτων MIMO φαίνεται στην Εικόνα 16. Η ροή δεδομένων κωδικοποιείται στον κωδικοποιητή φορέα και μεταδίδεται παράλληλα από πομπούς MT. Το ραδιοφωνικό κανάλι MIMO εισάγει παραμόρφωση στο σήμα. Τα μεταδιδόμενα σήματα MT λαμβάνονται από κεραίες MR. Κάθε δέκτης που είναι συνδεδεμένος στην κεραία δέκτη λαμβάνει σήματα από όλους τους πομπούς MT. Το λαμβανόμενο σήμα μετατρέπεται πρώτα στη ζώνη βάσης. Τα σήματα της ζώνης βάσης είναι εισοδοί στη μονάδα επεξεργασίας σήματος MIMO που εκτιμά τη ροή δεδομένων που μεταδίδεται. Στη συνέχεια, οι εκτιμήσεις μετατρέπονται στη ροή δεδομένων (Lee, 1995).



Εικόνα 16: Διάγραμμα ροής συστημάτων MIMO.

Υποθέτοντας ένα σύστημα επικοινωνίας σημείου προς σημείο ενός χρήστη με κεραίες εκπομπής και λήψης MR, υπάρχουν υποκανάλια MTMR μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Κάθε υποκανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμικό φίλτρο FIR διακριτού χρόνου. Το λαμβανόμενο σήμα στην κεραία λήψης j είναι:

$$y_j(k) = \sum_{i=1}^{M_T} \sum_{l=0}^{L_{i,j}} h_{i,j}(k, l) * x_i(k-l) + n_j(k)$$

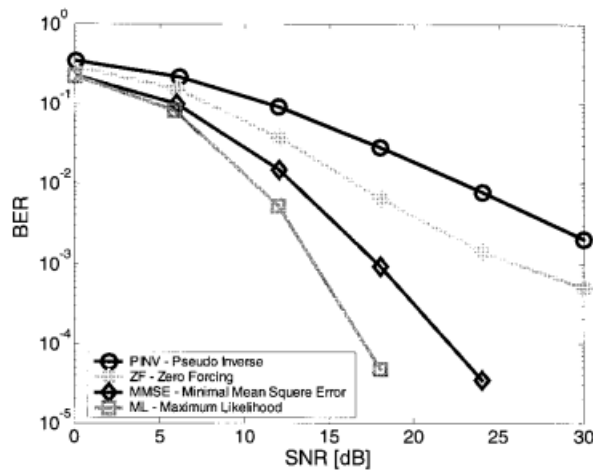
όπου $x_i(k)$ είναι το μεταδιδόμενο σήμα από την i κεραία τη στιγμή k και $y_j(k)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα στη j κεραία τη χρονική στιγμή k. Η μεταβλητή $n_j(k)$ υποδηλώνει

τα δείγματα κυκλικά του συμμετρικού μιγαδικού θορύβου με διακύμανση σ_n^2 . Το κανάλι εξασθένισης περιγράφεται ως ένα άθροισμα σύνθετων διαδρομών μεταξύ των κεραιών λήψης και εκπομπής $h_{ij}(k,l)$. Οι μιγαδικοί συντελεστές κέρδους $h_{ij}(k,l)$ υπακούουν στην κατανομή Gauss. Η μορφή μήτρας της προηγούμενης εξίσωσης είναι:

$$y(k) = \sum_{l=0}^{L-1} H(k,l) * x(k-l) + n(k)$$

όπου το μέγιστο εύρος του ISI είναι $L = \max \{L_{ij}\}$. Για επίπεδα κανάλια ξεθωριάσματος υπάρχει μόνο μία διαδρομή μεταξύ κάθε κεραιάς λήψης και εκπομπής. Οι εξισώσεις (1) και (2) απλοποιούνται θέτοντας το L στο μηδέν.

Η απόδοση του συστήματος MIMO προσομοιώθηκε για να εμφανιστεί η απόδοσή του στο κανάλι Gaussian. Τα σήματα QPSK μεταδόθηκαν σε τέσσερις κεραιές εκπομπής. Τέσσερις κεραιές λήψης έλαβαν τα μεταδιδόμενα σήματα. Η Εικόνα 17 δείχνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις. Η ανίχνευση μέγιστης πιθανότητας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 17: Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Η υποβάθμιση περίπου 3dB παρατηρείται όταν χρησιμοποιείται αντ' αυτού ο αλγόριθμος εκτίμησης ελάχιστου μέσου τετραγώνου V-BLAST. Ανακαλύψαμε ότι ο αλγόριθμος MMSE V-BLAST είναι πολύ ευαίσθητος στην εκτιμώμενη αναλογία σήματος προς θόρυβο. Η εσφαλμένη εκτίμηση του λόγου σήματος προς θόρυβο στο MMSE V-BLAST (Wolninsky et al., 2020) οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Όταν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος μηδενικής επιβολής αντί του MMSE, απαιτείται επιπλέον αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος κατά 7dB για

να διατηρηθεί το ίδιο BER. Η απόδοση του συστήματος είναι η χειρότερη όταν χρησιμοποιείται το ψευδοαντίστροφο του πίνακα καναλιών για την ανίχνευση των μεταδιδόμενων δεδομένων.

Ο βέλτιστος δέκτης για συστήματα MIMO είναι μια γενίκευση του γνωστού εκτιμητή ακολουθίας μέγιστης πιθανότητας SISO MLSE (Bjerke & Proakis, 2002). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης της βέλτιστης μέγιστης πιθανότητας αυξάνεται εκθετικά με πρόσθετες κεραιές και τη μνήμη καναλιών. Για ένα σχήμα δυαδικής διαμόρφωσης χωρίς μνήμη, ο αποκωδικοποιητής πλέγματος έχει 2 καταστάσεις LMT (Lee, 1995), όπου L είναι η μνήμη καναλιού. Αποδείχθηκε ότι το MIMO MLSE είναι ικανό να εκμεταλλευτεί την πλήρη ποικιλομορφία καναλιών, συμπεριλαμβανομένης της ρητής ποικιλότητας της κεραιάς καθώς και της σιωπηρής (διασποράς καναλιού). Η αποκωδικοποίηση χωροχρονικών κωδικών σε ένα επίπεδο κανάλι εξασθένισης μέσω MLSE είναι απλή. Η σημαντική ιδιότητα των κωδικών μπλοκ χωροχρόνου είναι η ορθογωνικότητα των στηλών στον πίνακα κώδικα. Έτσι, είναι δυνατός ο διαχωρισμός των συμβόλων που μεταδίδονται ταυτόχρονα από διαφορετικές κεραιές στον δέκτη με γραμμικό συνδυασμό και ανίχνευση μεμονωμένων ροών ξεχωριστά. Με την κωδικοποίηση μπλοκ χωροχρόνου, επιτυγχάνουμε μόνο τη διαφορετικότητα της κεραιάς, η οποία προκύπτει από τη μετάδοση των ίδιων πληροφοριών σε όλες τις κεραιές. Μπορούμε να συνδέσουμε τον κωδικοποιητή εσωτερικού μπλοκ με οποιονδήποτε εξωτερικό κωδικοποιητή για να επιτύχουμε ένα συγκεκριμένο κέρδος κωδικοποίησης. Ο εξωτερικός κωδικοποιητής μπορεί να χρησιμοποιήσει τον κωδικό turbo, τον κωδικό συνέλιξης ή τον κωδικό πλέγματος. Τα σφάλματα ριπής που παράγονται από το συσχετισμένο ξεθώριασμα μπορούν να μετριαστούν με την εισαγωγή ενός παρεμβολέα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού κωδικοποιητή. Λόγω της χρονικής διασποράς, το STBC χάνει την ορθογωνία του στο επιλεκτικό κανάλι συχνότητας και σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να εφαρμοστεί ένας ισοσταθμιστής (Vcelak et al., 2003).

Κεφάλαιο 4 – Αρχιτεκτονική 5G

Αυτή η ενότητα συζητά θέματα που σχετίζονται με τη συνολική αρχιτεκτονική 5G και τον αντίκτυπό της σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, σε φυσικές εγκαταστάσεις δικτύωσης και υπολογιστών, στη διαχείριση και ενορχήστρωση υπηρεσιών και υποδομής και σε συστήματα φιλοξενίας και ανάπτυξης. Τα δίκτυα 5G θεωρούνται ως εξαιρετικά ευέλικτες και εξαιρετικά προγραμματιζόμενες υποδομές σύνδεσης και υπολογισμού E2E οι οποίες είναι προσανατολισμένες στην εφαρμογή και στην παροχή υπηρεσιών με γνώμονα το χρόνο, τον τόπο και το περιεχόμενο του αιτήματος του κάθε τελικού χρήστη. Αντιπροσωπεύουν (Cosmas et al., 2019):

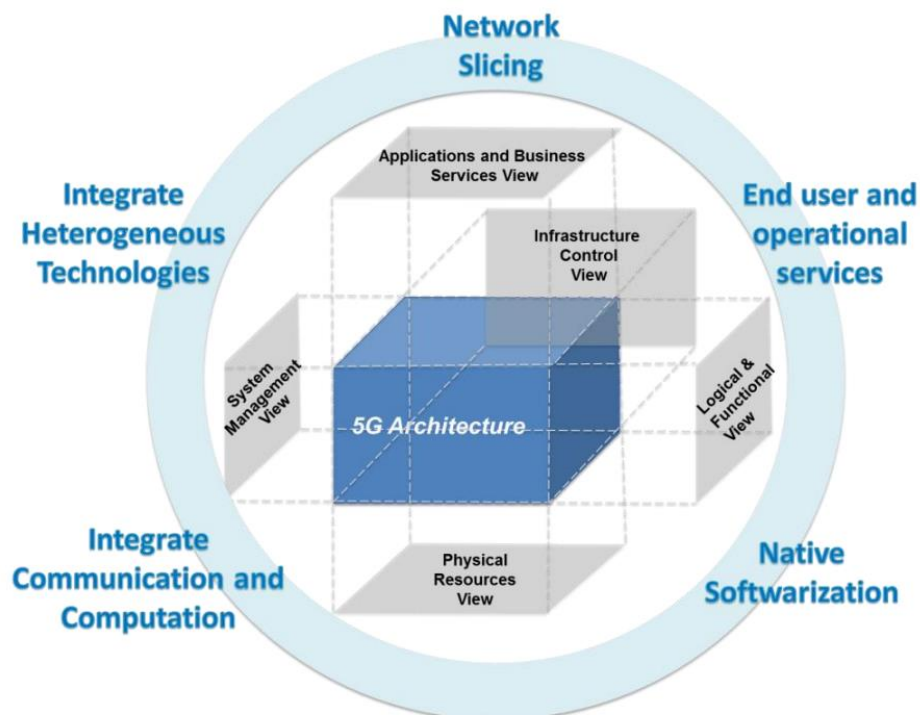
- μια εξέλιξη όσον αφορά τη χωρητικότητα, την απόδοση και την πρόσβαση στο φάσμα σε τμήματα ραδιοδικτύων και
- μια εξέλιξη της μετατροπής εγγενούς ευελιξίας και προγραμματισμού σε όλα τα τμήματα του δικτύου 5G εκτός εμβέλειας.

Η Αρχιτεκτονική 5G επιτρέπει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες που ικανοποιούν τις απαιτήσεις μιας μεγάλης ποικιλίας περιπτώσεων χρήσης, καθώς και επιτρέπει στο 5G να είναι μελλοντικό απόδειξη μέσω (i) υλοποίησης τεμαχισμού δικτύου με οικονομικό τρόπο, (ii) αντιμετώπισης τόσο των τελικών χρηστών όσο και των λειτουργικών υπηρεσιών, (iii) υποστήριξη του λογισμικού εγγενώς, (iv) ενοποίηση επικοινωνίας και υπολογισμού και (v) ενσωμάτωση ετερογενών τεχνολογιών (συμπεριλαμβανομένων των σταθερών και ασύρματων τεχνολογιών). Για να επιτευχθούν αυτές οι ευκαιρίες, θα χρειαστούν αλλαγές παραδειγμάτων και νέοι μηχανισμοί σε όλους τους τομείς του δικτύου (δηλαδή, δίκτυο ραδιοπρόσβασης, δίκτυο μεταφορών και πυρήνας). Εξίσου σημαντικό, τα δίκτυα 5G θα απαιτήσουν μια νέα προσέγγιση σχετικά με τον τρόπο ενορχήστρωσης, ανάπτυξης και διαχείρισης υπηρεσιών σε δίκτυα 5G (5GPPP Architecture Working Group, 2017).

4.1 Βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής 5G

Με βάση τους προαναφερθέντες νέους μηχανισμούς, τα δίκτυα 5G αναμένεται να παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα. Το ένα είναι ο υψηλός βαθμός ευελιξίας. Εξυπηρετούν πολύ διαφορετικούς τύπους επικοινωνίας – για παράδειγμα, μεταξύ ανθρώπων, μηχανών, συσκευών και αισθητήρων – με διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης. Επιβάλλουν επίσης τον απαραίτητο βαθμό ευελιξίας, όπου και όταν

χρειάζεται, όσον αφορά την ικανότητα, την ικανότητα, την ασφάλεια, την ελαστικότητα και την προσαρμοστικότητα. Τα δίκτυα 5G αντιπροσωπεύουν μια αλλαγή στα πρότυπα δικτύωσης: μια μετάβαση από το σημερινό «δίκτυο οντότητες» σε «δίκτυο λειτουργιών». Πράγματι, αυτό το «δίκτυο (εικονικών) λειτουργιών», που έχει ως αποτέλεσμα, σε ορισμένες περιπτώσεις, την αποσύνθεση των σημερινών μονολιθικών οντοτήτων δικτύου θα αποτελέσει τη μονάδα δικτύωσης για συστήματα επόμενης γενιάς. Αυτές οι συναρτήσεις θα πρέπει να μπορούν να συντίθενται σε βάση "κατ' απαίτηση", "on-the-fly". Στην πραγματικότητα, μια ερευνητική πρόκληση συνίσταται στο σχεδιασμό λύσεων που προσδιορίζουν ένα σύνολο στοιχειωδών συναρτήσεων ή μπλοκ για τη σύνθεση λειτουργιών δικτύου, ενώ σήμερα υλοποιούνται ως μονολιθικές (Kaloxylou et al., 2016).

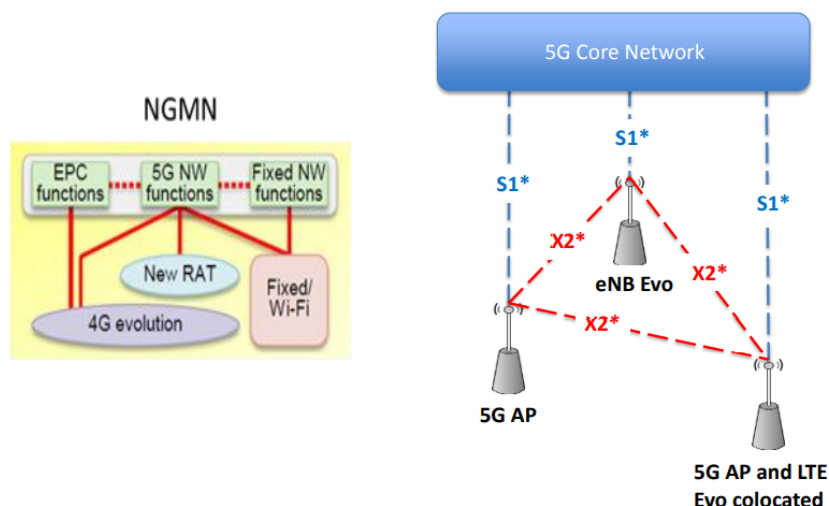


Εικόνα 18: Αρχιτεκτονική 5G.

Περαιτέρω πλεονεκτήματα προκύπτουν στους τομείς της διαχείρισης, του ελέγχου των συστημάτων και των πόρων. Τα δίκτυα 5G επιτρέπουν την ομοιόμορφη διαχείριση και λειτουργίες ελέγχου που αποτελούν μέρος του δυναμικού σχεδιασμού των αρχιτεκτονικών λογισμικού. Μπορούν να φιλοξενήσουν εκτελέσεις υπηρεσιών σε ένα ή περισσότερα slices. Η Εικόνα 18 παρουσιάζει τις διάφορες σχετικές απόψεις σχετικά με τα επικρατέστερα σχέδια 5G (Redana et al., 2019).

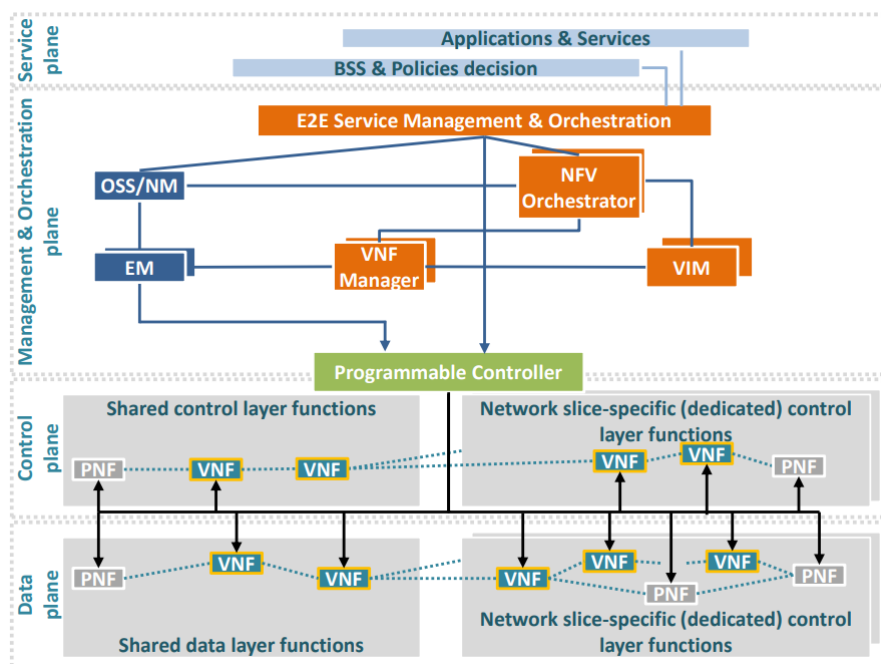
Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου κινητής τηλεφωνίας καθοδηγείται από την ανάγκη παροχής υπηρεσιών επικοινωνίας για μια ποικιλία εφαρμογών. Επιπλέον, ο διαχωρισμός δικτύου είναι επίσης ένα σημαντικό μέρος της συνολικής αρχιτεκτονικής 5G που αντιμετωπίζει την ανάπτυξη πολλαπλών λογικών δικτύων ως ανεξάρτητες επιχειρηματικές λειτουργίες σε μια κοινή φυσική υποδομή. Ένας από τους στόχους θα ήταν η παροχή τμημάτων δικτύου με ευελιξία που να ανταποκρίνονται στο ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης που θα απαιτήσει το χρονοδιάγραμμα του 2020 (CHARISMA, 2021). Για το σκοπό αυτό, ένα "slice 5G" θα μπορούσε να αποτελείται από μια συλλογή λειτουργιών δικτύου 5G (NF) και ειδικών ρυθμίσεων τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης (RAT) που συνδυάζονται μαζί για μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης ή/και επιχειρηματικό μοντέλο. Επιπλέον, δεδομένου ότι η έννοια του τεμαχισμού δικτύου είχε αρχικά προταθεί να υιοθετηθεί από το κεντρικό δίκτυο 5G (CN), το NGMN χρησιμοποιεί τον όρο «τεμαχισμός δικτύου από άκρο σε άκρο (E2E)» για να αναφερθεί στη συνολική ιδέα σχεδιασμού του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων και των δύο πτυχών SO και RAN. Σε αυτό το πλαίσιο, τα τμήματα δικτύου πρέπει να πληρούν ένα σύνολο απαιτήσεων, όπως η ανάγκη για κοινή χρήση και αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση πόρων (συμπεριλαμβανομένου του ραδιοφάσματος, της υποδομής και του δικτύου μεταφορών), διαφοροποίηση της κυκλοφορίας ανά κομμάτι· ορατότητα των φετών; μηχανισμοί προστασίας μεταξύ των φετών (γνωστός και ως απομόνωση φέτας), και υποστήριξη για διαχείριση συγκεκριμένων τμημάτων (Silva et al., 2016). Η υποστήριξη για τον τεμαχισμό δικτύου E2E εμφανίζεται ως μία από τις βασικές απαιτήσεις στο 3GPP, είναι ακόμα υπό συζήτηση πώς ακριβώς ο τεμαχισμός δικτύου θα επηρεάσει τον σχεδιασμό RAN, τόσο από την πλευρά του δικτύου πρόσβασης όσο και από την πλευρά του εξοπλισμού χρήστη (UE), αν και αυτές οι έννοιες βρίσκονται επί του παρόντος έρευνα (EU PROJECT 5G NORMA, 2015). Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επιβαλλόμενες απαιτήσεις 5G, προβλέπεται μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G που παρέχει τα μέσα για την υποστήριξη της αναμενόμενης ποικιλίας υπηρεσιών, ευέλικτες αναπτύξεις και τεμαχισμό δικτύου. Υπάρχει κοινή αντίληψη ότι οι βασικές τεχνολογικές επιλογές ως προς την ευελιξία είναι η χρήση προσαρμογής λειτουργιών δικτύου πολλαπλών υπηρεσιών και συνείδησης, προσαρμοστική σύνθεση και κατανομή λειτουργιών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, ο έλεγχος του δικτύου κινητής τηλεφωνίας που καθορίζεται από το λογισμικό και την κοινή βελτιστοποίηση πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας και λειτουργίες βασικού δικτύου (Rost et al., 2016). Η αρχιτεκτονική του

δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G θα περιλαμβάνει τόσο φυσικές όσο και εικονικές λειτουργίες δικτύου, καθώς και αναπτύξεις edge-cloud και central-cloud. Περαιτέρω, είναι σαφές ότι το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G πρέπει να ενσωματώσει την εξέλιξη LTE-A με νέες τεχνολογίες 5G σε επίπεδο RAN (σύμφωνα με τον τρέχοντα ορισμό του RAN), όπου η ενσωμάτωση σε επίπεδο RAN θα υπερέβαινε κατά πολύ την υπάρχουσα διασυνεργασία μεταξύ τεχνολογιών πρόσβασης, εκπληρώνοντας το όραμα αυτού που η NGMN αποκαλεί «οικογένεια RAT 5G». Προς το παρόν υποτίθεται από το 3GPP για την Αρχιτεκτονική Επόμενης Γενιάς ότι θα υπάρξει μια λογική διαίρεση CN/RAN (πιθανώς με κάποια αλλαγή στην ακριβή λογική διαίρεση μεταξύ RAN και CN), επιτρέποντας μια ανεξάρτητη εξέλιξη τόσο του RAN όσο και του CN, καθώς και για βελτιστοποιήσεις πολλαπλών επιπέδων σε ορισμένες αναπτύξεις όταν οι συναρτήσεις είναι συντοποθετημένες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3, αυτή η ρύθμιση θα μπορούσε να κάνει χρήση ενός S1* CN/ Διασύνδεση RAN και διεπαφή RAN μεταξύ κόμβου X2* όπως μελετήθηκε στο (EU PROJECT METIS-II, 2020). Υπάρχει επίσης συνεχής έρευνα (5GNorma Project, 2016) για έννοιες που στοχεύουν στην παροχή υψηλού βαθμού ευελιξίας αρχιτεκτονικής, π.χ. μια ευέλικτη εκχώρηση και ενοποίηση των λειτουργιών RAN και CN. Εστίαση του μέλλοντος με Η εργασία αναζήτησης είναι η ανάπτυξη όλων των επιλογών και η σύγκριση τους όσον αφορά την ευελιξία, την πολυπλοκότητα και το κόστος που συνεπάγεται η ικανοποίηση των απαιτήσεων των περιπτώσεων μελλοντικών χρήσεων.



Εικόνα 19: Στοιχεία δικτύου και διεπαφές που βασίζονται στον λογικό διαχωρισμό CN/RAN, όπως στο (Metis, 2016).

Η αρχιτεκτονική στην Εικόνα 20 δείχνει τόσο τη λειτουργικότητα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας όσο και τη λειτουργικότητα διαχείρισης και ενορχήστρωσης. Αυτό βασίζεται σε αρχές και οντότητες ETSI-NFV τις οποίες επεκτείνει με την εισαγωγή της ενότητας Διαχείρισης & Ενορχήστρωσης Υπηρεσιών E2E καθώς και ενός προγραμματιζόμενου ελεγκτή προκειμένου να διαμορφωθούν και να ελεγχθούν ευέλικτα οι εικονικές και φυσικές λειτουργίες δικτύου (VNF και PNF) (Selfnet, 2015). Ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου και του χρήστη, όπως εισήχθη μέσω της δικτύωσης που καθορίζεται από λογισμικό (SDN), θα επηρεάσει επίσης το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G, το οποίο μπορεί παρομοίως να χωρίσει τη λειτουργικότητα και να παρέχει αντίστοιχες διεπαφές. Εκτός από την ασύρματη πρόσβαση και το κεντρικό δίκτυο, το δίκτυο μεταφορών θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στο 5G για την ευέλικτη και δυναμική αντιμετώπιση των απαιτήσεων των μελλοντικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Προκειμένου να υποστηριχθεί η απαιτούμενη ευελιξία, απαιτείται ένα μοναδικό δίκτυο βασισμένο σε πακέτα. Τρεις κύριοι τύποι διεπαφής προβλέπονται: πακετοποιημένο CPRI, διεπαφή fronthaul επόμενης γενιάς (ένας νέος λειτουργικός διαχωρισμός εντός του RAN) και backhaul (5GPPP Architecture Working Group, 2017).



Εικόνα 20: Πλαίσιο ελέγχου, διαχείρισης και ενορχήστρωσης λειτουργιών δικτύου.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι διεπαφές, θα εισαχθούν έννοιες κατηγορίας κυκλοφορίας. Επιπλέον, για την αποτελεσματική υποστήριξη του τεμαχισμού δικτύου από το δίκτυο μεταφορών, οι έννοιες και τα συστήματα του SDN και της

εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (NFV) θα υποστηρίζονται από το δίκτυο μεταφορών, π.χ. με το διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων μέσω κοινής abstraction διαδρομής δεδομένων που βασίζεται σε πακέτα. Αυτό το ενοποιημένο επίπεδο δεδομένων και ελέγχου διασυνδέει κατανεμημένη ραδιοπρόσβαση 5G και λειτουργίες βασικού δικτύου, που φιλοξενούνται σε υποδομή cloud εντός δικτύου. Το δίκτυο μεταφορών 5G θα αποτελείται από ολοκληρωμένη υποδομή οπτικού και ασύρματου δικτύου. Η συμπερίληψη δορυφορικών συνδέσεων για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης 5G βρίσκεται επίσης υπό διερεύνηση από την ερευνητική κοινότητα.

4.2 Εγκαταστάσεις Φυσικής Δικτύωσης και Υπολογιστών

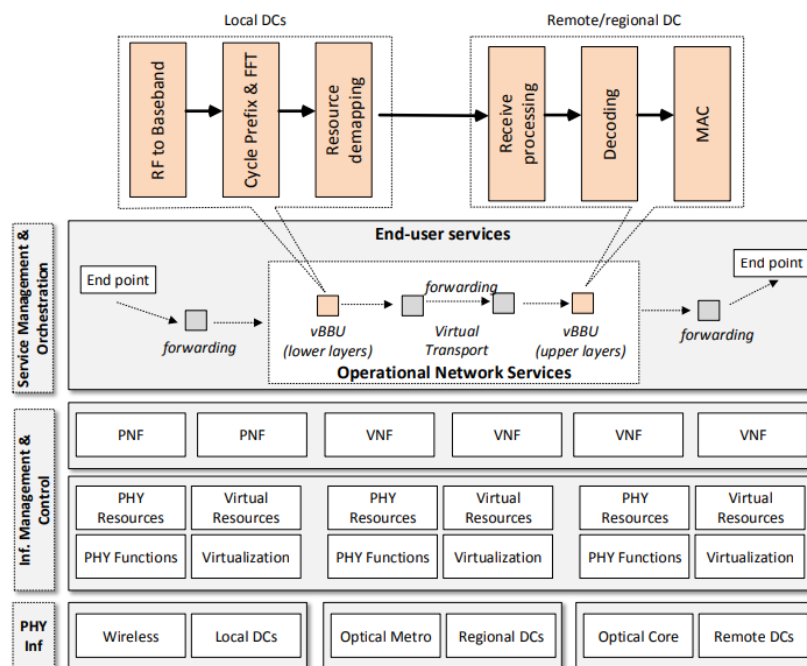
Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η τεράστια αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα μακρο-κυψελών πρέπει να μετατραπούν σε αρχιτεκτονικές που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό μικρών κυψελών που συμπληρώνονται με μακροστοιχεία για πανταχού παρούσα κάλυψη. Τα παραδοσιακά δίκτυα πρόσβασης ραδιοφώνου, όπου οι μονάδες βασικής ζώνης (BBUs) και οι μονάδες ραδιοφώνου συστεγάζονται, υφίστανται αρκετούς περιορισμούς. Με στόχο την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών και την αξιοποίηση των κερδών συγκέντρωσης και συντονισμού, έχουν προταθεί τα δίκτυα πρόσβασης ραδιοφώνου νέφους (C-RAN), με την επιλογή ευέλικτων διαχωρισμών επεξεργασίας.

Οι απαιτήσεις απομακρυσμένης επεξεργασίας για σκοπούς λειτουργικού δικτύου (C-RAN) μαζί με την ανάγκη υποστήριξης μιας μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών υπολογιστών και αποθήκευσης τελικού χρήστη, εισάγουν την ανάγκη για συνδεσιμότητα μεταφοράς υψηλού εύρους ζώνης, με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης και συγχρονισμού μεταξύ των ραδιοφωνικών μονάδων και τους πόρους απομακρυσμένου υπολογισμού και αποθήκευσης. Επιπλέον, η ελαστική κατανομή πόρων στο δίκτυο μεταφορών καθίσταται κρίσιμη για την πραγματοποίηση στατιστικών κερδών πολυπλεξίας (Fournogerakis, 2015).

4.2.1 Ενοποίηση Δυνατοτήτων Δικτύου, Υπολογιστών και Αποθήκευσης

Το συνολικό όραμα 5G περιλαμβάνει ένα συγκλίνον ετερογενές περιβάλλον δικτύου, ενσωματώνοντας μια μεγάλη ποικιλία δικτυακών τεχνολογιών για ασύρματη πρόσβαση με λύσεις ασύρματης και ενσύρματης μεταφοράς που διασυνδέουν έναν τεράστιο αριθμό πολύ διαφορετικών τελικών συσκευών και χρηστών,

συμπεριλαμβανομένων πόρων υπολογιστών και αποθήκευσης. Αυτοί οι πόροι καλούνται να υποστηρίξουν έναν συνδυασμό τελικού χρήστη και λειτουργικού υπηρεσίες όπως το C-RAN και οι σχετικές επιλογές διαχωρισμού, και μπορούν να φιλοξενηθούν είτε από Micro-Data Centers (DCs) - που αναφέρονται ως Mobile Edge Computing (MEC) - είτε σε απομακρυσμένα περιφερειακά και κεντρικά DC μεγάλης κλίμακας. Το MEC παρέχει δυνατότητες πληροφορικής και υπολογιστικού νέφους (Selfnet, 2015) εντός του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (RAN) σε κοντινή απόσταση από συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας, ενώ τα περιφερειακά και κεντρικά DC υποστηρίζουν τον ίδιο τύπο υπηρεσιών, αλλά μπορούν να προσπελαστούν μέσω του RAN και του δικτύου μεταφορών. Σε αυτό το περιβάλλον, μια κοινή υποδομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χειρισμό τόσο των υπηρεσιών τελικού χρήστη όσο και των λειτουργικών δικτύων, μεγιστοποιώντας τα σχετικά κέρδη κοινής χρήσης, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα στη χρήση των πόρων και παρέχοντας μετρήσιμα οφέλη όσον αφορά το κόστος, την επεκτασιμότητα, τη βιωσιμότητα και την απλοποίηση της διαχείρισης. Αυτή η ανάπτυξη υποδομής απεικονίζεται στο επίπεδο «Φυσική Υποδομή» στην Εικόνα 21 που ακολουθεί (Redana et al., 2019).



Εικόνα 21: Υποδομή 5G που υποστηρίζει ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις δικτύωσης και υπολογιστών.

Η εισαγωγή ευέλικτων διαχωρισμών επεξεργασίας κυμαίνεται μεταξύ της περίπτωσης «παραδοσιακού κατακευματισμένου RAN», όπου «όλη η επεξεργασία εκτελείται τοπικά στο σημείο πρόσβασης (AP)», έως την περίπτωση «πλήρως συγκεντρωμένων C-RAN»

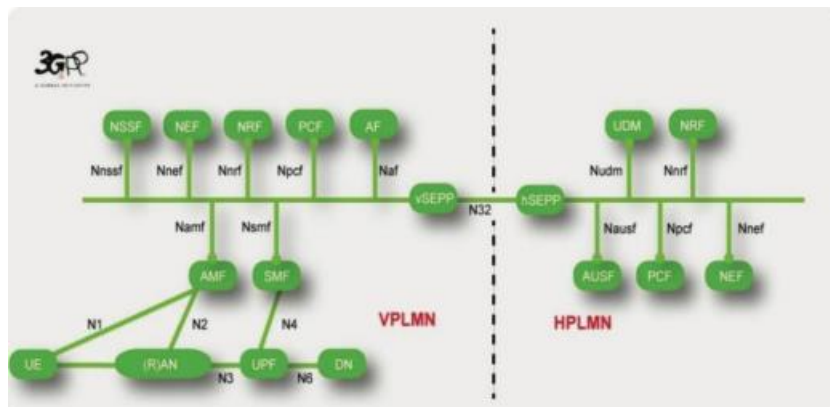
όπου «όλη η επεξεργασία εκχωρείται σε μια κεντρική μονάδα (CU)». Ο βέλτιστος διαχωρισμός μπορεί να αποφασιστεί δυναμικά, με βάση διάφορους παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του δικτύου μεταφορών, η τοπολογία και η κλίμακα του δικτύου, καθώς και ο τύπος και ο όγκος των υπηρεσιών που πρέπει να υποστηριχθούν. Η απαιτούμενη ευελιξία μπορεί να παρασχεθεί μέσω προγραμματιζόμενου ψηφιακού υλικού, ικανού να υποστηρίξει ευέλικτη αναδιαμόρφωση λειτουργιών με επιτάχυνση υλικού (HWA) και λογισμικού βασικής ζώνης, οι οποίες μπορούν να καταταμηθούν σε διαφορετικά επίπεδα προκειμένου να εξυπηρετούν τα περισσότερα διαφορετικά KPI. Σημειώστε ότι υπάρχουν προτιμώμενες επιλογές ανάλογα με το στοχευμένο KPI.

Για να αντιμετωπιστεί η πρόκληση της αποτελεσματικής διαχείρισης και λειτουργίας τέτοιων πολύπλοκων ετερογενών υποδομών, απαιτείται υψηλός βαθμός ευελιξίας, ευελιξίας και προσαρμοστικότητας στις λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει ένα δίκτυο. Επομένως, έννοιες όπως η λογισμικοποίηση δικτύου παρέχουν έναν πολλά υποσχόμενο δρόμο προς τα εμπρός. Ενόψει αυτού, το όραμα 5G περιλαμβάνει την υιοθέτηση και την ενσωμάτωση συγκεκριμένων τεχνικών προσεγγίσεων που υποστηρίζουν αυτό το παράδειγμα, όπως το SDN και το NFV. Στο SDN, το επίπεδο ελέγχου αποσυνδέεται από το επίπεδο δεδομένων και το διαχειρίζεται ένας λογικά κεντρικός ελεγκτής που έχει μια ολιστική άποψη του δικτύου.

Εκτός από την φυσική τοποθέτηση των λειτουργιών HWA στο δίκτυο, το NFV επιτρέπει την εκτέλεση λειτουργιών δικτύου βασισμένων σε λογισμικό σε υλικό βασικών προϊόντων (διακομιστές γενικής χρήσης) αξιοποιώντας τεχνικές εικονικοποίησης λογισμικού. Μέσω κοινών εξελίξεων SDN και NFV, υποστηρίζοντας ένα σύνολο λειτουργιών επιπέδου διαχείρισης και ελέγχου, όπως αυτές που απεικονίζονται στην Εικόνα 21, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη. Αυτά τα οφέλη συνδέονται με την ευέλικτη, δυναμική και αποτελεσματική χρήση των πόρων της υποδομής, την απλοποίησή της και της διαχείρισης της αυξημένης επεκτασιμότητας, βιωσιμότητας και την παροχή ενορχηστρωμένων υπηρεσιών από άκρο σε άκρο. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνολογικές λύσεις, μπορούν να υποστηριχθούν λειτουργικά και επιχειρηματικά μοντέλα, όπως η πολλαπλή μίσθωση, μέσω τεμαχισμού δικτύου και εικονικοποίησης (Kaloxylou et al., 2016).

4.3 Αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες

Το "Service-Based Architecture" (SBA) είναι μια αρθρωτή αρχιτεκτονική που επικεντρώνεται σε υπηρεσίες που μπορούν να εγγραφούν για να παρέχουν συγκεκριμένες υπηρεσίες και επίσης μπορούν να εγγραφούν σε άλλες υπηρεσίες και χρησιμοποιώντας αυτές ως δομικά στοιχεία, μπορούν να παρέχονται πιο σύνθετες υπηρεσίες. Το 3GPP έχει υιοθετήσει μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες του βασικού συστήματος 5G. Αυτό διαφέρει σημαντικά από το 4G, όπου δεν συμπεριλήφθηκε αυτή η σπονδυλωτότητα στα στοιχεία δικτύου που αποτελούν το κεντρικό δίκτυο. Το SBA βοηθά στην υιοθέτηση της εικονικοποίησης, παρέχει αυξημένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στο κεντρικό δίκτυο. Η αρχιτεκτονική που φαίνεται στην Εικόνα 22 αποτελείται από λειτουργίες δικτύου (NF) όπως NSSF, NEF, SMF κ.λπ. και σημεία αναφοράς που συνδέουν NF. Όλες αυτές οι διεπαφές είναι υποψήφιες για REST (Representational State Transfer) API και τα σημεία αναφοράς της αρχιτεκτονικής μπορούν απλά να αντικατασταθούν από έναν «διαύλου μηνυμάτων» σε ένα λογικό διάγραμμα, με κάθε NF να επικοινωνεί χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο HTTP2 (GSA, 2020).



Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική βάση των υπηρεσιών (SBA) (TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2020).

Για να γίνουν οι εφαρμογές πιο ευέλικτες, επεκτάσιμες και δυναμικές, οι εφαρμογές έχουν αποδομηθεί σε όλο και μικρότερα στοιχεία που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για άλλες εφαρμογές και μπορούν επίσης να αναπτυχθούν, να δοκιμαστούν και να αναπτυχθούν ανεξάρτητα. Αυτές οι μονάδες ονομάζονται μικροϋπηρεσίες. Οι μικροϋπηρεσίες είναι ένα μοτίβο αρχιτεκτονικού σχεδιασμού όπου το σύστημα αποτελείται από υπηρεσίες μικρής ευαισθησίας, υψηλής συνοχής και χαλαρά συζευγμένες υπηρεσίες. Κάθε μία από αυτές τις υπηρεσίες πληροί μια

συγκεκριμένη λειτουργικότητα και είναι αυτόνομη. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ υπηρεσιών εφαρμόζουν τυπικές διεπαφές ελαφρού βάρους (π.χ. αρχές ξεκούρασης κ.λπ.). Αυτή η ιδέα από τον κόσμο του λογισμικού έχει υιοθετηθεί στον τομέα των τηλεπικοινωνιών όπου κάθε στοιχείο δικτύου, το οποίο εκτελεί ορισμένες λειτουργίες, έχει αναλυθεί στα συστατικά μέρη και κάθε λειτουργία δικτύου μπορεί να καταχωρήσει, να ανακαλύψει και να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες που προσφέρονται από άλλες λειτουργίες. Οι λειτουργίες δικτύου και οι διεπαφές έχουν σχεδιαστεί για να έχουν ελάχιστο αντίκτυπο σε άλλους, έτσι ώστε η εισαγωγή νέων λειτουργιών δικτύου, η αναβάθμιση των υφιστάμενων λειτουργιών δικτύου κ.λπ. να μην επηρεάζει ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό καθιστά δυνατή τη συνεχή ενημέρωση, αναβάθμιση και εισαγωγή νέων υπηρεσιών. Αυτή είναι η προσέγγιση της Αρχιτεκτονικής που βασίζεται σε υπηρεσίες. Ο σχεδιασμός του επιπέδου ελέγχου 5GC (CP) βασίζεται σε υπηρεσίες που εκτίθενται από λειτουργίες δικτύου (NF) χρησιμοποιώντας νέες διεπαφές που βασίζονται σε υπηρεσίες (SBI). Μόλις μια συνάρτηση 5GC καταχωρήσει τις υπηρεσίες της με τη νέα λειτουργία 5G Core Network Functions (NRF), απλώς εκθέτει τις υπηρεσίες που μπορεί να καταναλώσει οποιοσδήποτε εξουσιοδοτημένος καταναλωτής, αντί να χρειάζεται να ορίσει μια νέα διασύνδεση από σημείο σε σημείο και τις διαδικασίες μεταξύ των δύο λειτουργιών δικτύου όπως απαιτεί ένα EPC (GSA, 2019). Αυτό προσφέρει στους χειριστές μεγαλύτερη ευελιξία και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αποσυνδέοντας τον καταναλωτή υπηρεσιών από τον παραγωγό υπηρεσιών. Η αρχιτεκτονική που βασίζεται σε υπηρεσίες προσφέρει τα ακόλουθα οφέλη στο 5G:

- Η λεπτότερη ευαισθησία επιτρέπει την αναβάθμιση μεμονωμένων υπηρεσιών με ελάχιστη επίδραση σε άλλες υπηρεσίες.
- Η διευκόλυνση της συνεχούς ενοποίησης μειώνει το χρόνο για την αγορά για την εγκατάσταση διορθώσεων σφαλμάτων και την κυκλοφορία νέων λειτουργιών δικτύου και εφαρμογών χειριστή.
- Απαιτούνται ελαφριές διεπαφές βασισμένες σε υπηρεσίες για την επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών.
- Το δίκτυο αποτελείται από δομοστοιχειωμένες υπηρεσίες που αντικατοπτρίζουν τις δυνατότητες του δικτύου και παρέχει υποστήριξη σε βασικά χαρακτηριστικά 5G, όπως ο διαχωρισμός δικτύου.

- Μια υπηρεσία μπορεί εύκολα να γίνει επίκληση από άλλες υπηρεσίες (με την κατάλληλη εξουσιοδότηση), επιτρέποντας σε κάθε υπηρεσία να επαναχρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο.
- Μαζί με ορισμένες λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου (π.χ. έλεγχος ταυτότητας, εξουσιοδότηση, λογιστική), οι πληροφορίες σχετικά με ένα δίκτυο 5G μπορούν εύκολα να εκτεθούν σε εξωτερικούς χρήστες όπως τρίτα μέρη μέσω μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας χωρίς περίπλοκη μετατροπή πρωτοκόλλου.

4.4 Κοινό δίκτυο πυρήνα (cloud)

Στην πράξη, υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι για την υλοποίηση των NF: είτε ως στοιχείο δικτύου σε ένα αποκλειστικό υλικό, είτε ως παράδειγμα λογισμικού που εκτελείται σε ένα αποκλειστικό υλικό, είτε ως εικονικοποιημένη / εγγενής στο cloud συνάρτηση που δημιουργείται σε μια κατάλληλη πλατφόρμα, π.χ. μια υποδομή cloud. Αξιοποιώντας τις τεχνολογίες λογισμικού cloud, η αρχιτεκτονική 3GPP NF οδηγεί σε μεγαλύτερη ευελιξία, δυνατότητα προγραμματισμού, αυτοματισμό και σημαντική μείωση κόστους/ενέργειας. Με την κατεύθυνση που ακολουθεί το 3GPP, αναμένεται τα NF του πυρήνα 5G να γίνουν εφαρμογές που βασίζονται σε cloud και εικονικοποίηση (GSA, 2020). Η βασική πλατφόρμα 5G θα είναι πιο προγραμματιζόμενη και θα επιτρέπει την κατασκευή, τη διαμόρφωση, τη σύνδεση και την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών λειτουργιών στην απαιτούμενη κλίμακα.

Το 5G υπόσχεται υποστήριξη για διάφορες νέες περιπτώσεις χρήσης και υπηρεσίες, αλλά για τους φορείς εκμετάλλευσης για να προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες και να αποκομίσουν εμπορικά οφέλη απαιτείται διαχείριση της αυξημένης πολυπλοκότητας του δικτύου και της κίνησης κινητής τηλεφωνίας. Ένας από τους τρόπους είναι να έχετε ένα δίκτυο στο οποίο οι νέες υπηρεσίες μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν, να διαχειριστούν και να ρυθμιστούν. Αυτή η απαίτηση αναγκάζει τις εταιρείες να σχεδιάζουν λειτουργίες "εγγενείς στο σύννεφο" (GSMA, 2018). "Cloud-Native" είναι το όνομα μιας προσέγγισης για το σχεδιασμό, τη δημιουργία και την εκτέλεση εφαρμογών/εικονικών λειτουργιών που οδηγούν σε μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα στο σύστημα. Αυτή η προσέγγιση υποστηρίζει πολύ υψηλό βαθμό αυτοματισμού. Η στρατηγική Cloud-Native αφορά τη μείωση του τεχνικού κινδύνου. Στο παρελθόν, η συνήθης προσέγγισή μας για την αποφυγή του κινδύνου ήταν να

κινούμαστε αργά και προσεκτικά. Η προσέγγιση Cloud-Native αφορά τη γρήγορη κίνηση, αλλά τη λήψη μικρών, αναστρέψιμων και χαμηλού κινδύνου βήματα.

Το Cloud Native Computing Foundation ορίζει το cloud-native ως συσκευασμένο σε κοντέινερ, δυναμική διαχείριση από έναν κεντρικό εντοπιστή και προσανατολισμένο στις μικροϋπηρεσίες. Οι τεχνολογίες εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων των Docker, Kubernetes, Mesosphere κ.λπ., είναι στην πραγματικότητα ιδανικές για εγγενείς εφαρμογές στο cloud, καθώς τα κοντέινερ προσφέρουν μια ελαφριά ατομική μονάδα υπολογιστών.

1. Η παρατηρησιμότητα για τη συλλογή, αποθήκευση και οπτικοποίηση αρχείων καταγραφής, μετρήσεων, ιχνών και άλλων σημείων δεδομένων, αποτελεί προϋπόθεση για απρόσκοπτη παρακολούθηση και λειτουργίες
2. Η ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας για την αποθήκευση και την παροχή, καθώς και για το χειρισμό ταυτοτήτων, πιστοποιητικών και κλειδιών.
3. Για να καταρρίψουν και να εφαρμόσουν την επιχειρηματική λογική χρησιμοποιώντας μικροϋπηρεσίες χωρίς πολιτεία, οι εγγενείς εφαρμογές Cloud πρέπει συνήθως να βασίζονται σε υπηρεσίες υποστήριξης κρατήσεων για την αποθήκευση των δεδομένων τους. Ένα πλήθος έργων ανοιχτού κώδικα στοχεύει στην αντιμετώπιση αυτών των αναγκών, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων τεχνολογιών βάσεων δεδομένων (GSMA, 2018).

Ενώ ο στόχος της μεγάλης κλίμακας επαναχρησιμοποίησης λογισμικού και της χρήσης έργων ανοιχτού κώδικα υπήρχε πολύ πριν από την εμφάνιση του εγγενούς παραδείγματος του cloud, είναι πολύ πιο πιθανό να επιτευχθεί τώρα. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνολογία εμπορευματοκιβωτίων απομονώνει τις διαφορετικές υπηρεσίες μεταξύ τους σε πολύ υψηλό βαθμό. Οι εφαρμογές που δημιουργούνται και αναπτύσσονται με το εγγενές μοτίβο του cloud έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω:

1. Βασίζεται σε μικροϋπηρεσίες: Κάθε εφαρμογή είναι μια συλλογή μικρών υπηρεσιών που μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Οι μικροϋπηρεσίες ανήκουν συχνά σε μεμονωμένες ομάδες ανάπτυξης που λειτουργούν με το δικό τους χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη, την ανάπτυξη κλίμακας και την αναβάθμιση υπηρεσιών.

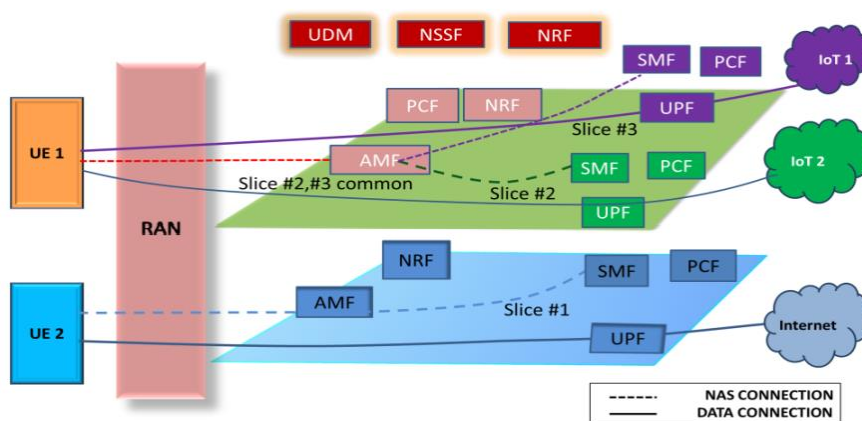
2. Βασισμένο σε κοντέινερ: Οι εγγενείς εφαρμογές του cloud συσκευάζονται σε κοντέινερ, με στόχο να παρέχουν περιβάλλοντα απομόνωσης για μικροϋπηρεσίες. Τα κοντέινερ είναι εξαιρετικά προσιτά, επεκτάσιμα και εύκολα φορητά από το ένα περιβάλλον στο άλλο και γρήγορα στη δημιουργία ή την αποκοπή. Αυτή η ευελιξία τα καθιστά ιδανικά για την κατασκευή και εκτέλεση εφαρμογών που αποτελούνται από μικροϋπηρεσίες.

3. Βασισμένο σε μοντέλο συνεχούς παράδοσης: Οι εγγενείς εφαρμογές στο cloud δημιουργούνται και εκτελούνται σε ένα μοντέλο συνεχούς παράδοσης που υποστηρίζει γρήγορους κύκλους κατασκευής, δοκιμής, ανάπτυξης, απελευθέρωσης και ανάπτυξης. Αυτό βοηθά τους προγραμματιστές υπηρεσιών λογισμικού και τις ομάδες λειτουργιών πληροφορικής υποδομής να συνεργάζονται μεταξύ τους για τη δημιουργία, τη δοκιμή και την κυκλοφορία ενημερώσεων λογισμικού μόλις είναι έτοιμες, χωρίς να επηρεάζονται οι τελικοί χρήστες ή οι προγραμματιστές άλλων ομάδων. Αυτό ακολουθεί τις αρχές του DevOps, οι υπηρεσίες συνεχούς δημιουργίας, δοκιμής και κυκλοφορίας συμβαίνουν. Οι εγγενείς εφαρμογές του cloud διαχειρίζονται δυναμικά, συχνά κατασκευάζονται και εκτελούνται σε σύγχρονες πλατφόρμες όπως η Kubernetes κ.λπ. Η υιοθέτηση αυτής της αρχής στον τομέα των τηλεπικοινωνιών μπορεί να φέρει άνευ προηγουμένου ταχύτητα, ευελιξία και ανθεκτικότητα στη διαδικασία ανάπτυξης και διαχείρισης υπηρεσιών. Αυξάνει σημαντικά την παραγωγικότητα του προγραμματιστή και απλοποιεί τις λειτουργίες. Αυτό επιτρέπει την προώθηση νέων χαρακτηριστικών. Οι νέες δυνατότητες και υπηρεσίες εφαρμογών μπορούν να προωθηθούν ζωντανά για χρήση από τους πελάτες όποτε είναι έτοιμοι, χωρίς να χρειάζεται να ανησυχείτε για τη δουλειά των άλλων ομάδων και μηδενικό αντίκτυπο στις εμπειρίες του τελικού χρήστη (GSA, 2021).

4.5 Τεμαχισμός δικτύου

Ο τεμαχισμός δικτύου αποτελεί μια έννοια της δημιουργίας λογικά διαχωρισμένων προσαρμοσμένων δικτύων που αποτελούνται από στοιχεία δικτύου αφιερωμένων σε αυτό το κομμάτι. Οι φέτες μπορούν να δημιουργηθούν για διαφορετικούς σκοπούς. Ένα τμήμα δικτύου θεωρείται ως ένα λογικό δίκτυο από άκρο σε άκρο που μπορεί να δημιουργηθεί δυναμικά. Ένας δεδομένος Εξοπλισμός Χρήστη (UE) μπορεί να έχει πρόσβαση σε πολλαπλά τμήματα μέσω του ίδιου Δικτύου Πρόσβασης (π.χ. μέσω της ίδιας διεπαφής ραδιοφώνου). Κάθε κομμάτι μπορεί να εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο τύπο υπηρεσίας με συμφωνημένη συμφωνία επιπέδου υπηρεσίας (SLA). Για

παράδειγμα, για την εξυπηρέτηση διαφορετικών τύπων επισκεψιμότητας: ένα τμήμα που έχει σχεδιαστεί για βελτιωμένη κίνηση ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας (eMBB) είναι σε θέση να χειρίζεται πολύ υψηλή απόδοση ανά χρήστη. Ένα άλλο κομμάτι, για το τεράστιο IoT (mIoT), μάλλον εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό συνδρομητών που μεταδίδουν μικρά δεδομένα σπάνια, αλλά παράγουν σημαντική κίνηση σηματοδότησης λόγω μεταβάσεων κατάστασης αδράνειας σε ενεργή. Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν Slices για την εξυπηρέτηση συνδρομητών που ανήκουν σε διαφορετικές επιχειρήσεις, π.χ. ένα τμήμα αφιερωμένο στους συνδρομητές για κάθε φορέα εκμετάλλευσης εικονικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MVNO) που φιλοξενείται από τον πάροχο. Η Εικόνα 23 δείχνει τον τεμαχισμό του δικτύου όπως εφαρμόζεται στο 5G εικονικά. Στην Εικόνα 23 το UE1 έχει πρόσβαση σε δύο διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών που αντιπροσωπεύονται από το IOT1 και το IOT2 με διαφορετικές απαιτήσεις από το δίκτυο. Αντίστοιχα, υπάρχουν δύο τμήματα δικτύου, το slice#2 και το slice #3, τα οποία πόροι δικτύου έχουν διαμορφωθεί για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις. Τα τμήματα #2 και #3 μοιράζονται το AMF, ενώ η διαχείριση συνεδρίας πραγματοποιείται ξεχωριστά (TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2020).



Εικόνα 23: Τεμαχισμός δικτύου.

Επιπλέον, η λειτουργία επιπέδου χρήστη και για τις δύο φέτες είναι διαφορετική. Το UE2 έχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο και ένα ξεχωριστό τμήμα δικτύου #1 έχει διαμορφωθεί κατάλληλα για να υποστηρίζει την υπηρεσία. Το Network Slicing, όπως ορίζεται στο 3GPP TS 23.501, ορίζεται σε ένα Δημόσιο Δίκτυο Κινητής Γης (PLMN) και περιλαμβάνει τις Λειτουργίες Δικτύου Επιπέδου Ελέγχου Βασικού Δικτύου και Επιπέδου Χρήστη καθώς και το Δίκτυο Πρόσβασης 5G (AN). Αν και το slicing ως

όρος είναι νέος και χρησιμοποιείται ειδικά με την έλευση των δικτύων 5G, παραλλαγές αυτής της λειτουργικότητας έχουν υπάρξει και έχουν εξελιχθεί από το EPS έως το 5GS (5G System).

Ο τεμαχισμός δικτύου εισήχθη αρχικά στο 4G στην Έκδοση 13 3GPP. Στο EPS, το 3GPP Release 13 πρόσθεσε μια δυνατότητα για την υποστήριξη των Dedicated Core Networks (DCN) που ονομάζεται "Decor". Η επιλογή του MME βασίστηκε εν μέρει στη συνδρομή του UE, συγκεκριμένα ένα " UE Usage Type» παράμετρος στη συνδρομή του UE. Στην Έκδοση 3GPP 14, μια βελτίωση (που ονομάζεται Enhanced Decor ή eDecor) στα DCN πρόσθεσε περαιτέρω τη δυνατότητα του UE να αποθηκεύει το επιλεγμένο αναγνωριστικό DCN και να το παρέχει στο RAN και στο κεντρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια της σύνδεσης. Αυτό απλοποιεί το έργο της επιλογής του βασικού δικτύου για την EE. Ωστόσο, αυξάνει επίσης την εξάρτηση από την υποστήριξη UE, κάτι που αποτελεί μειονέκτημα (GSA, 2019).

Οι περισσότεροι από τους περιορισμούς που εισήχθησαν στην προηγούμενη παράγραφο επιλύονται με τον τεμαχισμό στο Σύστημα 5G (5GS). Όλα τα UE και τα δίκτυα με δυνατότητα 5GS απαιτούνται για την υποστήριξη κοπής δικτύου. Στο επίπεδο χρήστη, κάθε σύνδεση δεδομένων του UE εξυπηρετείται από ένα SMF+UPF που ανήκει στο ίδιο εκχωρημένο slice. Ένα UE μπορεί να έχει συνδέσεις δεδομένων σε διαφορετικά τμήματα. Ωστόσο, υπάρχει ένα ενιαίο AMF που εκχωρείται για τον τερματισμό της σύνδεσης NAS της UE, η οποία μεταφέρει μηνύματα διαχείρισης περιόδου σύνδεσης προς και από SMF στα διάφορα τμήματα. Το 3GPP TS 23.501 ορίζει τη Λειτουργία δικτύου, το Slice και το Slice Instance ως εξής (TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2020):

α) Λειτουργία Δικτύου: Μια συνάρτηση επεξεργασίας εγκεκριμένη από 3GPP ή καθορισμένη από 3GPP σε ένα δίκτυο, η οποία έχει καθορισμένη λειτουργική συμπεριφορά και διεπαφές καθορισμένες από 3GPP.

β) Τεμαχισμός δικτύου: Ένα λογικό δίκτυο που παρέχει συγκεκριμένες δυνατότητες δικτύου και χαρακτηριστικά δικτύου.

γ) Στιγμιότυπο τεμαχισμού δικτύου: Ένα σύνολο παρουσιών Λειτουργίας Δικτύου και των απαιτούμενων πόρων (π.χ. υπολογισμός, αποθήκευση και πόροι δικτύωσης) που σχηματίζουν ένα αναπτυγμένο τμήμα δικτύου.

Ο προσδιορισμός ενός Τμήματος Δικτύου γίνεται μέσω των Πληροφοριών Βοήθειας Επιλογής Ενιαίου Δικτύου (S-NSSAI). Το NSSAI (Network Slice Selection Assistance

Information) είναι μια συλλογή έως και οκτώ (8) S-NSSAI, που σημαίνει ότι ένας μεμονωμένος UE μπορεί να εξυπηρετείται από το πολύ οκτώ Τμήματα Δικτύου κάθε φορά. Το S-NSSAI που σηματοδοτείται από το UE στο δίκτυο, βοηθά το δίκτυο να εισέλθει επιλέγοντας ένα συγκεκριμένο παράδειγμα Δικτύου Slice. Ένα S-NSSAI αποτελείται από (GSA, 2020):

α) Τύπος Slice/Service (SST), που αναφέρεται στην αναμενόμενη συμπεριφορά του Network Slice όσον αφορά τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες.

β) Ένα Slice Differentiator (SD), το οποίο είναι μια προαιρετική πληροφορία που συμπληρώνει τους τύπους Slice/Service για διαφοροποίηση μεταξύ πολλών Slice Network του ίδιου τύπου Slice/Service.

Το S-NSSAI μπορεί να συσχετίζεται με ένα PLMN (π.χ., PLMN ID) και να έχει τιμές ειδικές για το δίκτυο ή να έχει τυπικές τιμές. Οι τιμές SST έχουν τυποποιηθεί στο 3GPP TS 23.501 και αντικατοπτρίζουν τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους τύπους Slice/Service για βοήθεια η παγκόσμια διαλειτουργικότητα για τεμαχισμό.

Τα παρακάτω είναι μερικά από τα κύρια σημεία της δυνατότητας κοπής δικτύου που υποστηρίζεται στο 5GS:

1. Οι πολιτικές για τη σύνδεση εφαρμογών σε slices και APN μπορούν να παρέχονται στο UE κατά την εγγραφή ή μπορούν να διαμορφωθούν στο UE. Εάν παρέχεται κατά την εγγραφή, το AMF που λαμβάνει το αίτημα εγγραφής από το UE ανακτά τα τμήματα που επιτρέπονται από τη συνδρομή του χρήστη και αλληλεπιδρά με τη Λειτουργία Επιλογής Τεμαχισμού Δικτύου (NSSF) για να επιλέξει την κατάλληλη παρουσία του τμήματος δικτύου (π.χ. με βάση το Επιτρεπόμενο S- NSSAI, PLMN ID, κ.λπ.). Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αλλαγή του AMF εάν χρειαστεί. Αυτές οι πολιτικές μπορούν στη συνέχεια να ενημερωθούν αργότερα, χρησιμοποιώντας διαδικασίες NAS. Όλα τα 5GS UE υποστηρίζουν αυτές τις διαδικασίες. Τέτοιες διαδικασίες δεν υπάρχουν για EPS ή GPRS και βασίζονται π.χ. Ανοίξτε τις διαδικασίες Mobile Alliance Device Management (OMA DM) που δεν υποστηρίζονται από όλους τους UE ή τα δίκτυα.

2. Στο δίκτυο, οι πολιτικές χειριστή για την επιλογή τμημάτων δικτύου μπορούν να συγκεντρωθούν σε μια λειτουργία δικτύου που ονομάζεται Λειτουργία Επιλογής Τεμαχισμού Δικτύου (NSSF) ή μπορούν να διαμορφωθούν σε κάθε AMF. Η συγκέντρωση των πολιτικών δικτύου για την επιλογή τμημάτων στο NSSF βελτιώνει τη λειτουργικότητα του δικτύου.

3. Η ανακάλυψη λειτουργιών δικτύου (π.χ. SMF, UPF, PCF) πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση που ονομάζεται συνάρτηση αποθήκης Λειτουργίας Δικτύου (NF) (NRF) – οι λεπτομερείς διαδικασίες καθορίζονται στο 3GPP TS 23.502. Το NRF μπορεί να είναι συγκεκριμένο για κάθε κομμάτι ή να μοιράζεται σε φέτες. Η ύπαρξη NRF ειδικών τμημάτων επιτρέπει την απομόνωση μεταξύ των τμημάτων, με τη διαμόρφωση δικτύου ενός τμήματος να μην είναι ορατή σε άλλο τμήμα.

4. Στο 5GS υπάρχει υποστήριξη για τον τεμαχισμό RAN, όπου τα αναγνωριστικά τμημάτων της περιόδου λειτουργίας PDU παρέχονται στο RAN και το RAN μπορεί, μέσω αλγορίθμων προγραμματισμού και διαχείρισης πόρων ραδιοφώνου, να μοιράζεται ραδιοφωνικούς πόρους ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης μεταξύ των τμημάτων με βάση τη διαμόρφωση του χειριστή.

Η διαχείριση ενός πλήρους στιγμιότυπου τμήματος δικτύου (NSI) δεν είναι μόνο η διαχείριση όλων των λειτουργιών, αλλά και των πόρων που είναι απαραίτητοι για την υποστήριξη ορισμένων συνόλων υπηρεσιών επικοινωνίας και οι πτυχές διαχείρισης και ενορχήστρωσης καλύπτονται στο 3GPP TS23.501 (TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE, 2020).

Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογές τεχνολογίας 5G

Η παροχή καθολικής κάλυψης για τη συνδεσιμότητα σε διάφορους τύπους συσκευών είναι η βασική πρόκληση για το 5G. Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) αναμένεται να είναι μια σημαντική εφαρμογή των επερχόμενων ασύρματων δικτύων που μπορούν ενδεχομένως να διευκολύνουν την ασύρματη μετάδοση αλλά και να υποστηρίξουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών. Σε σύγκριση με τις επικοινωνίες με σταθερή υποδομή, το UAV έχει εξέχοντα χαρακτηριστικά, όπως ευέλικτη ανάπτυξη, ισχυρές συνδέσεις, σύνδεση οπτικής επαφής (LoS) και επιπλέον σχεδιαστικούς βαθμούς ελευθερίας με την ελεγχόμενη κινητικότητά του. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη έρευνα για την επικοινωνία UAV προς τα ασύρματα δίκτυα 5G/B5G. Αρχικά παρουσιάζεται εν συντομία το βασικό υπόβαθρο και τα ολοκληρωμένα δίκτυα χώρου-αέρα-εδάφους, καθώς και συζητούνται οι σχετικές ερευνητικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η αναδυόμενη αρχιτεκτονική των ολοκληρωμένων δικτύων. Στη συνέχεια, παρέχετε μια εκτενής ανασκόπηση των διαφόρων τεχνικών 5G που βασίζονται σε πλατφόρμες UAV, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανά διαφορετικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών επιπέδων, του επιπέδου δικτύου και της κοινής επικοινωνίας, των υπολογιστών και της προσωρινής αποθήκευσης. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλος αριθμός ανοιχτών ερευνητικών προβλημάτων που σκιαγραφούνται και προσδιορίζονται ως πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις της ερευνητικής προσπάθειας.

5.1 Μη επανδρωμένα συστήματα και UAVs

Το τοπίο των μελλοντικών δικτύων ραδιοπρόσβασης πέμπτης γενιάς (5G) αναμένεται να συνδέει απρόσκοπτα και πανταχού παρόντα τα πάντα και να υποστηρίζει τουλάχιστον 1000 φορές μεγαλύτερο όγκο κίνησης, 100 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες ασύρματες συσκευές και διαφοροποιημένες απαιτήσεις αξιοπιστίας, καθυστέρησης, διάρκεια ζωής μπαταρίας κ.λπ. σε αντίθεση με τα σημερινά κυψελωτά δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G). Σήμερα, η δημοτικότητα του IoT έχει προκαλέσει μια αύξηση στον αριθμό της κίνησης των δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας για τα επερχόμενα ασύρματα δίκτυα 5G και πέραν του 5G (B5G). Σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες, η παγκόσμια ανταλλαγή δεδομένων μέσω της κινητής τηλεφωνίας θα φτάσει το 1 zettabyte/μήνα μέχρι το 2028 (X. Zhang et al., 2014). Αυτό θα οδηγήσει την τρέχουσα υποδομή να αντιμετωπίσει μεγάλες απαιτήσεις χωρητικότητας και επίσης θα επιβάλει μεγάλο

βάρος στους τηλεπικοινωνιακούς φορείς όσον αφορά τις αυξημένες επενδύσεις κεφαλαίου και το λειτουργικό τους κόστος. Ορισμένες πρώτες προσπάθειες έχουν αφιερωθεί σε ετερογενή δίκτυα (HetNets) (δηλαδή, ανάπτυξη διαφόρων μικρών κυψελών) για την κάλυψη αυτών των αυξανόμενων απαιτήσεων. Ωστόσο, σε απροσδόκητες ή έκτακτες καταστάσεις (όπως η ανακούφιση από καταστροφές), η ανάπτυξη επίγειων υποδομών είναι οικονομικά ανέφικτη και δυσχερής λόγω των υψηλών λειτουργικών δαπανών, καθώς και των εξελιγμένων και ασταθών νέων περιβαλλόντων. Για τον χειρισμό αυτού του ζητήματος, η έξυπνη ετερογενής αρχιτεκτονική αξιοποιώντας μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) (ή κοινώς γνωστά ως drones) (Zeng et al., 2016) έχει θεωρηθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο νέο παράδειγμα για τη διευκόλυνση τριών κεντρικών σεναρίων χρήσης μελλοντικών ασύρματων δικτύων, π.χ. ευρυζωνική σύνδεση (eMBB) με εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC) που καταναλώνει εύρος ζώνης και μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC). Για παράδειγμα, το UAV μπορεί να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην παροχή ανάκτησης υπηρεσιών δικτύου σε μια περιοχή που έχει πληγεί από καταστροφή, στη βελτίωση των δικτύων δημόσιας ασφάλειας ή στη διαχείριση άλλων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης όταν απαιτείται URLLC. Ειδικότερα, το eMBB με τη βοήθεια των UAV μπορεί να θεωρηθεί ως σημαντικό συμπλήρωμα στα κυψελωτά δίκτυα 5G. Ως αποτέλεσμα, τα UAV αναγνωρίζονται ως σημαντικό στοιχείο των ασύρματων τεχνολογιών 5G/B5G.

Λόγω της ευελιξίας και της υψηλής κινητικότητας των UAV, τα UAV χαμηλού υψομέτρου χρησιμοποιούνται εκτενώς σε διάφορους τομείς για διαφορετικές εφαρμογές και σκοπούς. Όσον αφορά τις πτυχές της ασύρματης επικοινωνίας, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλατφόρμες εναέριας επικοινωνίας (π.χ. ιπτάμενες σταθμοί βάσης (BS) ή κινητά ρελέ) τοποθετώντας πομποδέκτες επικοινωνίας για την παροχή/βελτίωση υπηρεσιών επικοινωνίας σε στόχους εδάφους, σε υψηλή ζήτηση κυκλοφορίας ή και σε καταστάσεις υπερφόρτωσης, η οποίες αναφέρονται συνήθως ως επικοινωνίες με τη βοήθεια UAV. Από την άλλη πλευρά, τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι κόμβοι για να επιτρέψουν μια πληθώρα εφαρμογών που κυμαίνονται από την παράδοση πακέτων έως την επιτήρηση, η οποία συνήθως αναφέρεται ως UAV με κινητή σύνδεση (Mozaffari et al., 2019). Το μεγαλύτερο μέρος της υπάρχουσας εργασίας, ωστόσο, περιορίζεται στα UAV που έχουν τον ρόλο της υποβοήθησης των κυψελοειδών επικοινωνιών. Στα περισσότερα τρέχοντα περιβάλλοντα, τα UAV είναι εξοπλισμένα με συσκευές επικοινωνίας ή αποκλειστικούς

αισθητήρες που μπορούν να ενεργοποιήσουν μια μυριάδα εφαρμογών όπως η επιτήρηση χαμηλού υψομέτρου, η διάσωση μετά την καταστροφή, η εφαρμογή logistics και η βοήθεια στις δομές επικοινωνίας λόγω μιας πιθανής υπερφόρτωσης του συστήματος. Επιπλέον, για υποστήριξη οι ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες βασίζονται σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, σε ένα σμήνος UAV που σχηματίζουν Flying Ad Hoc Networks (FANETs) και δημιουργούν συνδέσεις με τους επίγειους κόμβους, ενώ έχουν μελετηθεί θεωρητικά και επικυρωθεί μέσω πειραμάτων πεδίου. Ως ένας επιθυμητός υποψήφιος για την υποκατάσταση ή την υποβοήθηση των επίγεια κυβελωτών δικτύων, οι επικοινωνίες UAV εμφανίζουν σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι (Shi et al., 2018):

- ✓ Σύνδεσμοι οπτικής επαφής: Τα UAV χωρίς ανθρώπινους πιλότους που πετούν στον ουρανό έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συνδέουν χρήστες εδάφους μέσω συνδέσεων οπτικής επαφής (LoS), γεγονός που διευκολύνει τις εξαιρετικά αξιόπιστες μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, τα UAV μπορούν να προσαρμόσουν τις θέσεις αιώρησής τους για τη διατήρηση της ποιότητας των συνδέσεών τους.
- ✓ Δυνατότητα Δυναμικής Ανάπτυξης: Σε σύγκριση με σταθερές υποδομές εδάφους, τα UAV μπορούν να αναπτυχθούν δυναμικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο, κάτι που είναι πιο προσαρμόσιμο έναντι των περιβαλλοντικών αλλαγών. Επιπλέον, τα UAV ως εναέρια BS δεν απαιτούν την ενοικίαση του χώρου εγκατάστασης, καταργώντας έτσι την ανάγκη για πύργους και καλώδια.
- ✓ Δίκτυα σμήνων που βασίζονται σε UAV: Ένα σμήνος από UAV είναι ικανά να σχηματίζουν κλιμακούμενα δίκτυα πολλαπλών UAV και να προσφέρουν πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα σε χρήστες εδάφους. Επωφελούμενο από την υψηλή ευελιξία και τα χαρακτηριστικά γρήγορης παροχής, το δίκτυο πολλαπλών UAV είναι μια εφικτή λύση για την ανάκτηση και επέκταση της επικοινωνίας με γρήγορους και αποτελεσματικούς τρόπους.

Στην πραγματικότητα, τα UAV διακρίνονται σύμφωνα με τον αυστηρό περιορισμό που επιβάλλεται από το μέγεθος, το βάρος και την ισχύ τους (SWAP), καθώς ο περιορισμός SWAP επηρεάζει άμεσα το μέγιστο λειτουργικό υψόμετρο, την επικοινωνία, την κάλυψη, τον υπολογισμό και τις δυνατότητες αντοχής κάθε UAV. Για παράδειγμα, οι πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (LAP) έχουν χαμηλή ισχύ και χαμηλή χωρητικότητα τόσο σε ωφέλιμο φορτίο όσο και σε αυτονομία. Αντίθετα, οι πλατφόρμες υψηλότερου

υψομέτρου (HAPs) παρέχουν ευρύτερη κάλυψη και μεγαλύτερη αντοχή. Καθώς αυξάνεται το υψόμετρο δράσης του UAV, αυξάνεται και η πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης LoS για επικοινωνία αέρος-εδάφους, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης πιθανότητας παρατήρησης ανεμπόδιστης διαδρομής. Εν τω μεταξύ, η απώλεια διαδρομής είναι πιο σοβαρή λόγω της αυξημένης απόστασης μεταξύ του UAV και των χρηστών εδάφους. Έτσι, οι δύο αντίθετες πτυχές στο υψόμετρο του UAV χρειάζονται μια θεμελιώδη αντιστάθμιση, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη μέγιστη κάλυψη του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ασύρματα δίκτυα 5G/B5G αναμένεται να παρουσιάζουν μεγάλες ετερογένειες στις υποδομές επικοινωνίας και τους πόρους για τη σύνδεση διαφορετικών συσκευών και την παροχή διαφορετικών υπηρεσιών (S. A. R. Naqvi et al., 2018). Οι ερευνητές αυτές τις μέρες επικεντρώνονται σε διάφορους τρόπους σχεδιασμού ετερογενών υποδομών όπως πυκνά αναπτυγμένες μικρές κυψέλες, ενώ προσπαθούν να ενσωματώσουν ετερογενή δίκτυα επικοινωνίας όπως τα διαστημικά, τα αεροπορικά και τα επίγεια δίκτυα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν πολυσχιδείς τεχνικές επικοινωνίας 5G όπως η μαζική πολλαπλή έξοδο πολλαπλών εισόδων (MIMO), τη μετάδοση μέσω κυμάτων (mmWave), τη μετάδοση της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA), τη μετάδοση από συσκευή σε συσκευή (D2D), τον οδοντωτό τροχό Nitive Radio (CR) και ούτω καθεξής, για τη βελτίωση της απόδοσης του φάσματος και της ενεργειακής απόδοσης. Όσον αφορά τα κυψελωτά δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV, το κόστος λειτουργίας (π.χ. χρόνος αντοχής) είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες. Για το λόγο αυτό, η συλλογή ενέργειας μπορεί να είναι μια βασική τεχνολογία που πρέπει να υπάρχει στα UAV. Εν τω μεταξύ, τα UAV μπορούν να χρησιμεύσουν ως ελεγκτές δικτύου αιχμής για την αποτελεσματική κατανομή υπολογιστικών πόρων και αποθήκευσης. Ειδικότερα, τα UAV μπορούν είτε να χρησιμεύσουν ως πλατφόρμες υπολογιστών αιχμής για την εκφόρτωση των υπολογιστικών εργασιών από συσκευές IoT, είτε να αποθηκεύσουν δημοφιλές περιεχόμενο για να μειώσουν την επιβάρυνση των δικτύων μέσω επαναφόρτωσης των ίδιων πληροφοριών (backhaul) (Cheng et al., 2018).

Μερικές έρευνες και εκπαιδευτικά σεμινάρια που σχετίζονται με τις επικοινωνίες UAV έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια και συμπεριλαμβάνουν θεμελιώδη στοιχεία με σκοπό την παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων των δικτύων UAV, των βασικών ζητημάτων επικοινωνίας τους, της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο, των τεχνικών ασύρματης φόρτισης και της μοντελοποίησης καναλιών για επικοινωνίες μέσω UAV κ.λπ.

Πιο συγκεκριμένα, οι (Zhao et al., 2018) εξέτασαν τις μη στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων UAV από επικοινωνιακή οπτική μαζί με τα χαρακτηριστικά τους. Μια έρευνα ανέπτυξε πολλά ζητήματα που συναντώνται στα δίκτυα επικοινωνίας UAV για να παρέχουν σταθερή και αξιόπιστη ασύρματη μετάδοση. Οι (Hossein Motlagh et al., 2016) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη έρευνα και τόνισαν τις δυνατότητες για την παροχή υπηρεσιών IoT που βασίζονται σε UAV χαμηλού υψομέτρου. Η κυβερνοασφάλεια για τα UAV αναθεωρήθηκε, όπου συζητήθηκαν πραγματικές και προσομοιωμένες επιθέσεις. Επιπλέον, οι (Arafat & Moh, 2019) ερεύνησαν τα πιο αντιπροσωπευτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για UAV και συνέκριναν την απόδοση των υπαρχόντων μεγάλων πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Μια άλλη έρευνα επικεντρώθηκε αποκλειστικά στη μέτρηση και τη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης από αέρα στο έδαφος. Συζήτησαν επίσης διάφορες προσπάθειες χαρακτηρισμού των υπαρχόντων καναλιών. Ενώ από άποψη μοντελοποίησης καναλιών, οι Khuwaja et al. ανέφεραν τις εκτενείς μεθόδους μέτρησης για τη μοντελοποίηση των καναλιών UAV με βάση τα LAP και συζητήθηκαν διάφορα χαρακτηριστικά των καναλιών. Οι (Lu et al., 2018) εισήγαγαν διάφορες διαδοσόμενες τεχνικές ασύρματης φόρτισης που σχεδιάστηκαν για τη βελτίωση του χρόνου αποστολής δεδομένων από τα UAV. Παρείχαν μια ταξινόμηση των τεχνικών ασύρματης φόρτισης, δηλαδή την οικογένεια των μη ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων και την οικογένεια των μεθόδων που βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά. Οι (Cao et al., 2018) ασχολήθηκαν με τους κύριους μηχανισμούς και τα πρωτόκολλα για το σχεδιασμό των αερομεταφερόμενων δικτύων επικοινωνίας λαμβάνοντας υπόψη τα δίκτυα επικοινωνίας που βασίζονται στο LAP, τα δίκτυα επικοινωνίας που βασίζονται στο HAP και τα ολοκληρωμένα δίκτυα επικοινωνίας. Επιπλέον, σε μια πιο πρόσφατη μελέτη οι (Mozaffari et al., 2019) παρείχαν ένα ολιστικό σεμινάριο για ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα UAV και εξέτασαν διάφορα αναλυτικά πλαίσια και μαθηματικά εργαλεία που σχεδιάστηκαν για την επίλυση θεμελιωδών ανοιχτών προβλημάτων.

Αν και οι προαναφερθείσες υπάρχουσες μελέτες παρείχαν πληροφορίες για διάφορες προοπτικές για τα δίκτυα επικοινωνίας UAV, αξίζει να αναλογιστούμε τα τρέχοντα επιτεύγματα προκειμένου να ρίξουμε φως στις μελλοντικές τάσεις της έρευνας για το 5G/B5G. Ως εκ τούτου, είναι μεγάλης σημασίας και αναγκαιότητας η παροχή μιας επισκόπησης των αναδυόμενων μελετών που σχετίζονται με την ενοποίηση των τεχνολογιών 5G με δίκτυα επικοινωνίας UAV. Αρχικά, πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στην αναδυόμενη και ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική

δικτύου χώρο-αέρα-εδάφους και τονίζεται η ποικιλία των ανοιχτών ερευνητικών προκλήσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια εξαντλητική ανασκόπηση της ενημερωμένης ερευνητικής προόδου που αφορά την ενοποίηση των επικοινωνιών των UAV με διάφορες τεχνολογίες 5G σε: (i) φυσικό επίπεδο, (ii) επίπεδο δικτύου και (iii) κοινή επικοινωνία, υπολογιστές και προσωρινή αποθήκευση. Τέλος, εντοπίζουμε πιθανές μελλοντικές τάσεις για τις επικοινωνίες UAV σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις.

5.1.1 Αρχιτεκτονική B5G: ολοκληρωμένα δίκτυα εδάφους-αέρα-διαστήματος

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε πρώτα την ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δικτύου χώρο-αέρα-εδάφους στις επερχόμενες ασύρματες επικοινωνίες 5G/B5G, όπου παρουσιάζεται και επεξηγείται συνοπτικά ένα συνεργατικό δίκτυο τριών επιπέδων. Στη συνέχεια, συζητάμε τις κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο σχεδιασμός του συστήματος.

Για να ικανοποιηθούν οι ποικίλες υπηρεσίες IoT με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS) σε διάφορα πρακτικά σενάρια (π.χ. αστικές, αγροτικές και αραιοκατοικημένες περιοχές), είναι επιτακτική ανάγκη να αξιοποιηθούν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα κάθε παραδείγματος δικτύωσης. Για παράδειγμα, τα πυκνά αναπτυγμένα επίγεια δίκτυα σε αστικές περιοχές μπορούν να υποστηρίξουν πρόσβαση σε υψηλό ρυθμό δεδομένων, τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας μπορούν να παρέχουν ευρεία κάλυψη και απρόσκοπτη συνδεσιμότητα στις πιο απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές, ενώ οι επικοινωνίες UAV μπορούν να βοηθήσουν τις υπάρχουσες κυψελωτές επικοινωνίες για την ταχεία ανάκτηση υπηρεσιών και προσφέρουν την εκφόρτωση της κυκλοφορίας των εξαιρετικά πολυσύχναστων περιοχών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο (X. Liu et al., 2015). Προς το παρόν, πιστεύεται ευρέως ότι το μεμονωμένα υπάρχον δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει την ανάγκη επεξεργασίας τεράστιων όγκων δεδομένων και εκτέλεσης σημαντικών εφαρμογών όπως το IoT, το cloud computing και τα μεγάλα δεδομένα. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση μεταξύ των επιστημονικών κοινοτήτων να αναπτύξουν μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δικτύου από το διαστημικό δίκτυο, το εναέριο δίκτυο και το επίγειο δίκτυο. Η συνολική αρχιτεκτονική του ολοκληρωμένου δικτύου διαστημικού αέρα-εδάφους παρουσιάζεται στην Εικόνα 24 για να παρέχει στις συσκευές χρήστη βελτιωμένες και ευέλικτες υπηρεσίες από άκρο σε άκρο, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε τρία τμήματα, δηλαδή, διαστημική, αεροπορική και επίγεια -

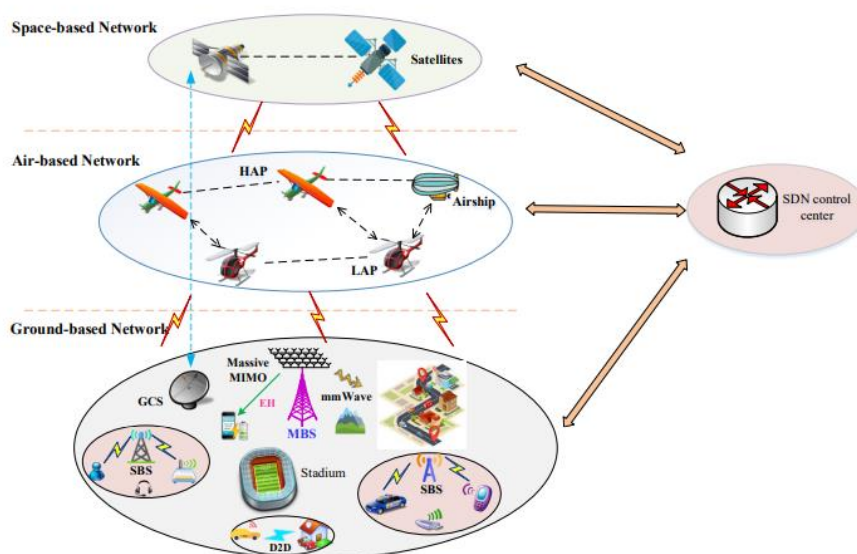
βασισμένα στρώματα. Σε αυτό, τα UAV αναπτύσσονται για τη δημιουργία ενός δικτύου UAV πολλαπλών επιπέδων, καθώς και της υποδομής ραδιοπρόσβασης, οι χρήστες κινητών και τα οχήματα που αποτελούν το επίγειο δίκτυο. Ταυτόχρονα, οι ελεγκτές δικτύωσης που ορίζονται από λογισμικό μπορούν να αναπτυχθούν για να ρυθμίσουν τις συμπεριφορές του δικτύου και να διαχειριστούν τους πόρους του δικτύου με ευέλικτο και ευέλικτο τρόπο (στο λογισμικό) για να διευκολύνουν τη διασύνδεση χώρου-αέρα-εδάφους. Λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά τμήματα που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως πρότυπα επικοινωνίας και διαφορετικές συσκευές δικτύου με διάφορες λειτουργίες, οι διεπαφές ελέγχου και επικοινωνίας των ελεγκτών SDN για κάθε τμήμα θα πρέπει να είναι αφιερωμένες στο αντίστοιχο τμήμα. Όσον αφορά το διαστημικό δίκτυο, αποτελείται από έναν αριθμό δορυφόρων ή αστερισμών διαφορετικών τροχιών (όπως γεωστατική γήινη τροχιά (35786km), χαμηλή γήινη τροχιά (700 - 2000km) και μεσαία γήινη τροχιά (8000 - 20000km)) , επίγειους σταθμούς και κέντρα ελέγχου λειτουργιών δικτύου. Οι δορυφόροι σε διαφορετικές τροχιές, τύπους και ιδιότητες μπορούν να σχηματίσουν ένα παγκόσμιο διαστημικό δίκτυο μέσω διαδορυφορικών συνδέσεων, οι οποίες με τη σειρά τους χρησιμοποιούν τις τεχνικές πολλαπλής μετάδοσης και εκπομπής για να βελτιώσουν τη χωρητικότητα του δικτύου. Εν τω μεταξύ, με τη δημιουργία των συνδέσεων δορυφόρου προς UAV και δορυφόρου προς έδαφος, δημιουργούνται οι συνδέσεις με τους γειτονικούς δορυφόρους και τα επίγεια κυψελωτά δίκτυα. Στη βάση, το διαστημικό δίκτυο μπορεί να παρέχει παγκόσμια κάλυψη στη γη με υπηρεσίες για έκτακτη διάσωση, πλοήγηση, παρατήρηση της γης και επικοινωνία/μεταφορά. Μπορούμε να φανταστούμε ότι η μελλοντική γη θα περιβάλλεται από μεγάλους όγκους δορυφόρων. Ωστόσο, η παράδοση δεδομένων μεταξύ των δορυφόρων και του εδάφους τμήματος επηρεάζεται από μεγάλες καθυστερήσεις μετάδοσης λόγω της μεγάλης απώλειας διαδρομής ελεύθερου χώρου και της τροποσφαιρικής εξασθένησης. Είναι επιτακτική η χρήση ζώνης υψηλότερης συχνότητας για την παροχή υπηρεσιών χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής απόδοσης, όπως η ζώνη C και η ζώνη Ka (Jiajia Liu State Key Laboratory of Integrated Services Networks, 2018).

Η επικοινωνία από δορυφόρο σε UAV είναι βασικό στοιχείο για τη δημιουργία του ολοκληρωμένου δικτύου διαστημικού-αέρα-εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κανάλι δορυφόρου προς UAV βασίζεται κυρίως στη σύνδεση LoS και επίσης υποφέρει από την εξασθένηση της βροχής σημαντικά κατά τη χρήση της ζώνης Ka και άνω. Υπό το πρίσμα των εφαρμογών και του εξοπλισμού του, το UAV μπορεί να επικοινωνεί με

τους δορυφόρους σε διαφορετικές τροχιές κατά την πλοήγηση με UAV. Γενικά, ο γεωσύγχρονος δορυφόρος χρησιμοποιείται για επικοινωνία δορυφόρου σε UAV, καθώς η θέση του σε σχέση με τη γη παραμένει αμετάβλητη. Για τη σύνδεση UAV με δορυφόρο, η προϋπόθεση για τη δημιουργία μιας επιτυχημένης σύνδεσης είναι η ευθυγράμμιση της χωρικής δέσμης από το UAV προς τον δορυφόρο στόχο (δηλαδή την κατεύθυνση). Ωστόσο, η συνεχής πλοήγηση των UAV θα είχε ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της στάσης όλη την ώρα, η οποία επηρεάζει άμεσα τη χωρική δέσμη που δείχνει για τη σύνδεση UAV-δορυφόρου. Ένα τυπικό σενάριο είναι η δορυφορική επικοινωνία με τη βοήθεια UAV, όπου το UAV πρέπει να προσαρμόζει συνεχώς τη δέσμη του προς τον δορυφόρο στόχο για να διατηρήσει τη σύνδεση επικοινωνίας (Zhao et al., 2018).

Στο δίκτυο που βασίζεται στον αέρα, μια μεγάλη ποικιλία μη επανδρωμένων ιπτάμενων πλατφορμών, συμπεριλαμβανομένων UAV, αερόπλοια ή αερόστατα μπορεί να περιορίζεται σε διαφορετικά επιχειρησιακά ύψη λόγω των περιορισμών SWAP. Γενικά, ένα UAV είναι εξοπλισμένο με πομποδέκτες για να παρέχει ευέλικτη πρόσβαση στο Διαδίκτυο για μια ομάδα χρηστών εδάφους και μια κυψέλη drone είναι η αντίστοιχη περιοχή κάλυψης. Το μέγεθος της κυψέλης drone κυριαρχείται από το υψόμετρο, τη θέση, την ισχύ μετάδοσης και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες του UAV. Επιπλέον, ένα σμήνος UAV συνδέεται με τη δημιουργία των συνδέσεων UAV-to-UAV για την παροχή υπηρεσιών συνεργατικά. Το δίκτυο UAV πολλαπλών επιπέδων όχι μόνο υποστηρίζει μηνύματα ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ των UAV για την αποφυγή συγκρούσεων και τον υπολογισμό των διαδρομών πτήσης, αλλά επίσης στέλνει δεδομένα σε κινητές συσκευές που έχουν πρόσβαση σε αυτά. Συγκεκριμένα UAV είναι εξοπλισμένα με ετερογενείς ραδιοδιεπαφές, όπως LTE ή WiFi, για επικοινωνία με υποδομές ή δορυφόρους, γεγονός που δημιουργεί πύλες μεταξύ δικτύων UAV πολλαπλών επιπέδων και άλλων δικτύων. Το UAV μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει μια σύνδεση sky-haul με τους δορυφόρους είτε να συνδεθεί στο επίγειο σύστημα μέσω μιας σύνδεσης backhaul (Alzenad et al., 2018). Στο επίγειο δίκτυο, το ετερογενές δίκτυο ραδιοπρόσβασης που αποτελείται από μακροστοιχεία και μικρές κυψέλες εξυπηρετεί τους χρήστες κινητών τηλεφώνων, όπως κινητά τηλέφωνα, αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα, συσκευές IoT κ.λπ. για ασύρματα δίκτυα 5G. Αυτό καλύπτει όλες τις υποσχόμενες κυψελοειδείς τεχνολογίες 5G, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης συχνοτήτων mmWave, της συλλογής ενέργειας, της μετάδοσης NOMA και της επικοινωνίας D2D, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, και έχει γίνει ένα σημαντικό

ερευνητικό θέμα πρόσφατα. Επιπλέον, η εκθετικά αυξανόμενη υπολογιστική ικανότητα των κινητών συσκευών μπορεί να συλληφθεί για φορητούς υπολογιστές αιχμής (MEC), όπου τα UAV μπορούν να προγραμματίσουν τις υπολογιστικές εργασίες ενώ οι ενσωματωμένοι υπολογιστές εκτελούν αυτές τις εργασίες. Και μαζί με αυτό, δημοφιλή περιεχόμενα μπορούν να αποθηκευτούν προσωρινά στα UAV ή σε συσκευές εδάφους και να μεταδοθούν μέσω των κυψελών drone ή της επικοινωνίας D2D μεταξύ των τελικών συσκευών. Ειδικότερα, υπάρχουν δύο είδη καναλιών μετάδοσης στην ενοποίηση του εναέριου δικτύου και του επίγειου δικτύου: η ζεύξη δεδομένων LoS και η ζεύξη δορυφορικών δεδομένων. Η σύνδεση δεδομένων LoS χρησιμοποιείται για απευθείας μετάδοση από το UAV στον σταθμό ελέγχου εδάφους (GCS), στον οποίο οι εκπομπές φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή. Σε αυτό το είδος μετάδοσης, τα κύματα μπορεί να απορροφηθούν εύκολα από εμπόδια, επομένως δεν είναι κατάλληλο για στρατιωτικά πεδία.



Εικόνα 24: Απεικόνιση ολοκληρωμένων δικτύων χώρου-αέρα-εδάφους. Η εννοιολογική αρχιτεκτονική επικοινωνίας σε δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV αποτελείται από τρία επίπεδα: το διαστημικό στρώμα για τις δορυφορικές ζεύξεις δεδομένων, το στρώμα αέρα για τα UAV και τις ζεύξεις δεδομένων LoS και το στρώμα εδάφους για τις συσκευές τελικού χρήστη. GCS, κέντρο κυβέρνησης/ασφάλειας (B. Li et al., 2019).

5.1.2 Πιθανές προκλήσεις

Αν και η σημασία του ολοκληρωμένου δικτύου μεταξύ διαστήματος-αέρα-εδάφους στις ασύρματες επικοινωνίες B5G αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου δικτύου αποτελεί μια σημαντική πρόκληση που περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των καναλιών αέρος-εδάφους, τη βέλτιστη ανάπτυξη, την ενεργειακή

απόδοση, τη διαδρομή του σχεδιασμού, τη διαχείριση πόρων, την ασφάλεια δικτύου, κ.λπ. Σε αυτήν την υποενότητα, συνοψίζονται λεπτομερώς οι βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα μελλοντικά ολοκληρωμένα δίκτυα διαστήματος-αέρα-εδάφους:

Μοντελοποίηση καναλιών: Λόγω των διακριτικών χαρακτηριστικών καναλιών του τμήματος αέρα (όπως ο τρισδιάστατος (3D) χώρος και η χρονική μεταβλητότητα), τα κανάλια των UAV για μετάδοση δεδομένων προς το έδαφος είναι πολύ περισσότερα πολύπλοκα από τα τρέχοντα επίγεια κανάλια επικοινωνίας (Bor-Yaliniz et al., 2018). Επίσης, τα κανάλια UAV-εδάφους είναι πιο επιρρεπή σε μπλοκάρισμα από ό,τι οι ζεύξεις επικοινωνίας αέρος-αέρος που παρουσιάζουν κυρίαρχο LoS. Ως εκ τούτου, τα συμβατικά μοντέλα συχνά δεν είναι κατάλληλα για τον χαρακτηρισμό των καναλιών εδάφους από UAV. Δεδομένου του ετερογενούς περιβάλλοντος, τα κανάλια UAV προς το έδαφος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το υψόμετρο και τον τύπο του UAV, τη γωνία ανύψωσης και τον τύπο του περιβάλλοντος διάδοσης. Σαφώς, η ακριβής σύνδεση μοντελοποίησης καναλιού είναι ζωτικής σημασίας για την σωστή αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, η εύρεση ενός γενικού μοντέλου καναλιού για επικοινωνίες UAV-εδάφους λαμβάνοντας υπόψη τέτοιους παράγοντες είναι πρόκληση, η οποία απαιτεί ολοκληρωμένες προσομοιώσεις και μετρήσεις σε διάφορα περιβάλλοντα. Επί του παρόντος, πολλές προσπάθειες μοντελοποίησης έχουν γίνει για τον χαρακτηρισμό των καναλιών UAV-εδάφους (Ye et al., 2017).

Ανάπτυξη: Η δορυφορική επικοινωνία μέσω UAV είναι βασικό συστατικό για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου δικτύου διαστήματος-αέρα-εδάφους. Η κινητικότητα των UAV και του δορυφόρου περιπλέκει τη λειτουργία του ολοκληρωμένου δικτύου. Από τη μία πλευρά, τα χαρακτηριστικά των καναλιών αέρος-εδάφους πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη βέλτιστη τρισδιάστατη ανάπτυξη των UAV, για τη μείωση της παράδοσης των δεδομένων και υπηρεσιών αλλά και την αποφυγή φυσικών συγκρούσεων μεταξύ τους ή με άλλα σταθερά ή κινητά αντικείμενα. Από την άλλη πλευρά, ένα δορυφορικό σύστημα είναι περιορισμένο σε ισχύ και εύρος ζώνης που πάσχει από μεγάλη μετάδοση καθυστέρηση και το κανάλι δορυφόρου προς έδαφος που εξασθενεί σε υψηλές συχνότητες είναι πολύ πιο σοβαρό, γεγονός που φαινομενικά το εμποδίζει από την πρακτική χρήση του.

Σχεδιασμός διαδρομής: Για ένα δίκτυο που βασίζεται στον αέρα που περιλαμβάνει το σμήνος UAV, καθένα από τα οποία έχει μια τροχιά που πετά πάνω από το έδαφος, για

να μειωθεί η καθυστέρηση επικοινωνίας, ένα UAV πρέπει να κινηθεί κοντά στους χρήστες εδάφους. Ωστόσο, λόγω της ανάγκης διατήρησης της διασύνδεσης με τα γειτονικά του UAV, δεν είναι πάντα δυνατό για ένα δεδομένο UAV να διατηρεί στενή σύνδεση με τους εξυπηρετούμενους χρήστες. Κατά συνέπεια, εάν ληφθεί υπόψη ένα σμήνος UAV, η εύρεση της βέλτιστης τροχιάς πτήσης για ένα UAV είναι μια επίπονη εργασία λόγω πρακτικών περιορισμών. Επομένως, απαιτείται επειγόντως η εκμετάλλευση μιας μεθόδου δυναμικού ελέγχου τροχιάς για τα UAV για να αυξηθεί η πιθανότητα συνδέσεων από άκρο σε άκρο διατηρώντας παράλληλα επαρκή κάλυψη ολόκληρης της περιοχής στόχου.

Λειτουργικό υψόμετρο: Λόγω περιορισμών SWAP, διαφορετικοί τύποι UAV ενδέχεται να περιορίζονται σε διαφορετικά επιχειρησιακά ύψη. Για παράδειγμα, οι κινητές συσκευές σε αστικά σενάρια μπορεί να απαιτούν υψηλότερη συνδεσιμότητα LoS, ενώ οι κινητές συσκευές σε σενάρια προαστίων μπορεί να χρειάζονται υψηλότερο βαθμό μείωσης απώλειας της αιτούμενης διαδρομής. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο υψόμετρο των UAV προάγει υψηλότερη συνδεσιμότητα LoS, έκτοτε η αντανάκλαση και η σκίαση μειώνονται, ενώ το χαμηλότερο υψόμετρο εξασφαλίζει μείωση της απώλειας διαδρομής. Επιλέγοντας διαφορετικά ύψη για UAV πολλαπλών επιπέδων, μπορεί να επιτευχθεί μια βέλτιστη αντιστάθμιση μεταξύ της συνδεσιμότητας LoS και της απώλειας διαδρομής.

Δυναμική παρεμβολών: Στα κατασκευασμένα HetNets πολλαπλών επιπέδων, το κυψελοειδές δίκτυο εδάφους και το κανάλι αέρος-εδάφους υποφέρουν από υψηλές παρεμβολές μεταξύ των καναλιών από τα ίδια και διαφορετικά τμήματα, γεγονός που θα καταστήσει σταδιακά ξεπερασμένη την τρέχουσα διεπαφή αέρα. Επιπλέον, η κινητικότητα του UAV δημιουργεί μετατόπιση Doppler, η οποία προκαλεί επίσης σοβαρές παρεμβολές μεταξύ των φορέων σε υψηλές συχνότητες. Ως εκ τούτου, λαμβανομένων υπόψη των χαρακτηριστικών της κινητής τηλεφωνίας, οι κατάλληλες παρεμβολές η διαχείριση στο ολοκληρωμένο δίκτυο γίνεται πιο δύσκολη.

Περιορισμένη ενέργεια: Δεδομένου ότι τα UAV βασίζονται κυρίως σε επαναφορτιζόμενη μπαταρία, η διάρκεια πλεύσης των UAV επηρεάζεται έντονα από την κατανάλωση ενέργειας των UAV, η οποία μπορεί να εξαρτάται από κινητικότητα, ισχύς μετάδοσης και κατανάλωση ισχύος κυκλώματος. Αυτή είναι μια πρωταρχική πρόκληση που περιορίζει σημαντικά τον χρόνο λειτουργίας τους. Φυσικά, είναι

ζωτικής σημασίας η παράταση της διάρκειας της υπηρεσίας ή ακόμη και η παροχή επίμονης εξυπηρέτησης κατά τη διάρκεια της αποστολής μέσω προηγμένων τεχνολογιών φόρτισης.

Κυβελώδη επικοινωνία Backhaul: Μια σημαντική διάκριση μεταξύ των επίγειων BS και των UAV BSs είναι το γεγονός ότι το δίκτυο backhaul χαρακτηρίζεται από ετερογενείς συνδέσεις. Συγκεκριμένα, τα BS γείωσης συνδέονται συνήθως με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενσύρματων συνδέσεων που έχουν μεγάλο εύρος ζώνης. Αντίθετα, τα UAV-BS που συνδέονται με τους σταθμούς βάσης macro (MBS) ή το κεντρικό δίκτυο χρειάζονται ασύρματες συνδέσεις backhaul υψηλής χωρητικότητας. Πρακτικά, τα περιορισμένα backhaul θα το κάνουν γίνονται το σημείο συμφόρησης και επηρεάζουν το QoS των χρηστών κινητής τηλεφωνίας.

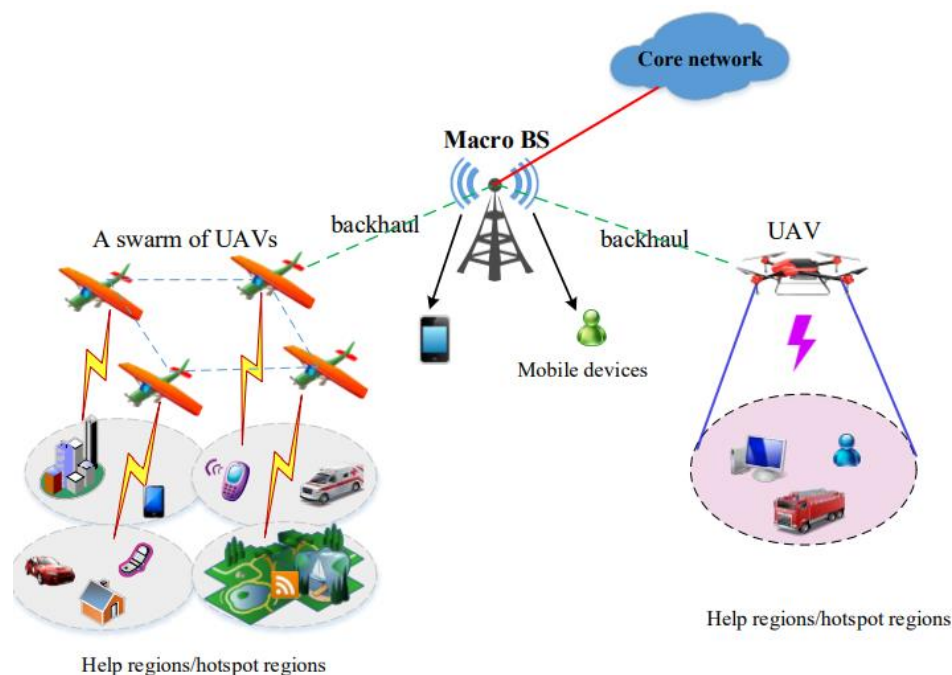
Ασφάλεια δικτύου: Καθώς το ενσωματωμένο δίκτυο δημιουργεί μια τοπολογία πολλαπλών επιπέδων όπου αναπτύσσονται πολλαπλοί κόμβοι με ανόμοια χαρακτηριστικά και τη φύση μετάδοσης της ασύρματης διάδοσης LoS, το ενσωματωμένο δίκτυο είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε κακόβουλες επιθέσεις. Ως αποτέλεσμα, οι στρατηγικές ή τα πρωτόκολλα διασφάλισης είναι υψίστης σημασίας. Επιπλέον, η ακριβής τοποθέτηση των UAV και η ανίχνευση μη εξουσιοδοτημένης εισβολής στον εναέριο χώρο είναι μια άλλη ανοιχτή πτυχή. Επιπλέον, οι ελεγκτές SDN είναι κυρίως υπεύθυνοι για τη διαχείριση πόρων και τον έλεγχο της λειτουργίας του δικτύου, η προστασία των ελεγκτών SDN από διαφορετικές επιθέσεις στον κυβερνοχώρο εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση στα ολοκληρωμένα δίκτυα.

Απαίτηση σε πραγματικό χρόνο: Οι δορυφόροι για διαφορετικές εργασίες ή υπηρεσίες έχουν διαφορετικές ταχύτητες και κάλυψη επικοινωνίας, οι ζεύξεις δεδομένων μεταξύ κόμβων μπορεί να είναι συχνές διακοπές λόγω του υψηλού ρυθμού σφάλματος bit και της καθυστέρησης μετάδοσης. Εφόσον η ζεύξη δορυφορικών δεδομένων υιοθετεί ένα ενσωματωμένο σύστημα δορυφορικής μετάδοσης για τη μετάδοση απομακρυσμένων δεδομένων, μια πρόκληση είναι πώς να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα γρήγορης απόκτησης δεδομένων και η δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο κατά τη μετάδοση δεδομένων στο GCS.

5.1.3 Τεχνικές επικοινωνίας φυσικού στρώματος

Επί του παρόντος, μια ποικιλία εργασιών αφορά κυρίως τα δίκτυα επικοινωνίας που

υποστηρίζονται από UAV, ειδικά σε απροσδόκητα ή προσωρινά συμβάντα (X. Zhou et al., 2018). Επωφελούμενοι από τη λειτουργικότητα του φορητού πομποδέκτη και τις προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, η επιτυχία των επικοινωνιών UAV μπορεί να πραγματοποιήσει πανταχού παρούσα κάλυψη και να υποστηρίξει μαζικές δυναμικές συνδέσεις. Η Εικόνα 25 απεικονίζει το σενάριο των UAV που λειτουργούν ως ιπτάμενα BS (δηλαδή, UAV-BS), όπου αυτά τα UAV είναι συνήθως εξοπλισμένα με διαφορετικά ωφέλιμα φορτία για λήψη, επεξεργασία και μετάδοση σημάτων, με στόχο να συμπληρώσουν προϋπάρχοντα κυψελωτά συστήματα παρέχοντας πρόσθετη χωρητικότητα στο hotspot. περιοχές κατά τη διάρκεια προσωρινών γεγονότων. Αυτό το σενάριο έχει θεωρηθεί ως ένα από τα πέντε βασικά σενάρια που αντιμετωπίζουν τα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα (Osseiran et al., 2014). Επίσης, τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της επικοινωνιακής υποδομής σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και δημόσιας ασφάλειας κατά τις οποίες το υπάρχον επίγειο δίκτυο είναι κατεστραμμένο ή δε λειτουργεί πλήρως (Lagum et al., 2018).



Εικόνα 25: Ένα υποδειγματικό σενάριο UAV ως εναέρια BS που εξυπηρετούν μια περιοχή στόχο, όπου κάθε UAV είναι εξοπλισμένο με ασύρματους πομποδέκτες που τους επιτρέπουν να επικοινωνούν με χρήστες εδάφους και επίσης με άλλα UAV (B. Li et al., 2019).

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος της επικοινωνίας UAV σε δίκτυα 5G, οι τεχνικές φυσικού επιπέδου προκαλούν μεγάλη ανησυχία καθώς επηρεάζουν σημαντικά τις εφαρμογές των UAV. Υπάρχουν κυρίως πέντε υποψήφιες βασικές τεχνολογίες στο φυσικό επίπεδο, δηλαδή επικοινωνία mmWave, η μετάδοση

NOMA, το CR και η συλλογή ενέργειας.

5.1.3.1 UAV οδηγούμενα από κυψελωτά δίκτυα mmWave

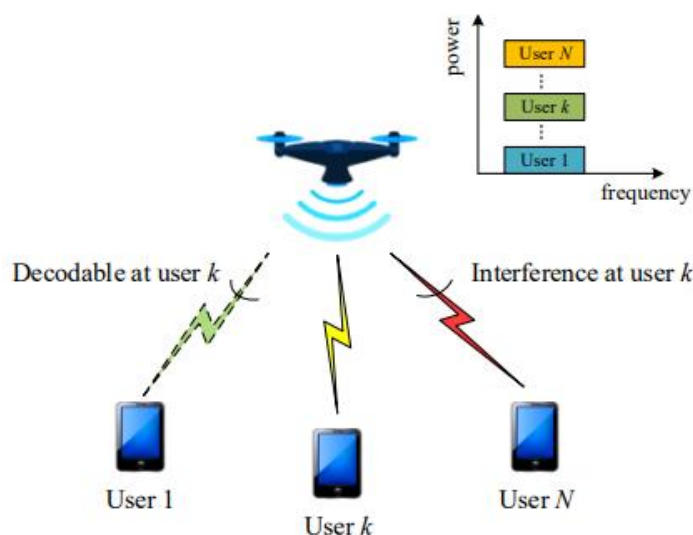
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα UAV μπορεί να έχουν να αντιμετωπίσουν διαφορετικούς τύπους δεδομένων, όπως φωνή, βίντεο και τεράστια αρχεία δεδομένων, γεγονός που δημιουργεί πρωτόγνωρες προκλήσεις όσον αφορά τις απαιτήσεις υψηλού εύρους ζώνης. Αυτή η αναμενόμενη ανάπτυξη μαζί με τον συνωστισμό του φάσματος ενθαρρύνει τη μετάβαση σε νέες κατανομές συχνοτήτων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι επικοινωνίες mmWave αναδεικνύονται ως κατάλληλος υποψήφιος που μπορεί να επωφεληθεί από μια τεράστια ποσότητα μη αδειοδοτημένων φασματικών πόρων στη ζώνη συχνοτήτων mmWave (πάνω από 30 - 300GHz) για την αντιμετώπιση των υψηλών απαιτήσεων για ασύρματα δίκτυα 5G. Με το όραμα της παροχής ασύρματης πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας με τη βοήθεια UAV σε φάσμα mmWave, μια άμεση ανησυχία είναι η εξαιρετικά υψηλή απώλεια διάδοσης, καθώς ο νόμος μετάδοσης του Friis ορίζει ότι η απώλεια πανκατευθυντικής διαδρομής ελεύθερου χώρου αυξάνεται με το τετράγωνο της φέρουσας συχνότητας. Ευτυχώς, το μικρό μήκος κύματος των σημάτων mmWave επιτρέπει πολλαπλές κεραίες να συσκευάζονται σε ένα μικρό UAV (Pi & Khan, 2011). Ως υποπροϊόν, η τεχνική διαμόρφωσης δέσμης μπορεί να αξιοποιηθεί για να κατασκευαστεί μια στενή κατευθυντική δέσμη και να ξεπεραστεί η υψηλή απώλεια διαδρομής ή οι πρόσθετες απώλειες που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική απορρόφηση και διασπορά. Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός κυψελοειδούς δικτύου υποβοηθούμενο από mmWave UAV και ενός συμβατικού κυψελοειδούς δικτύου mmWave με σταθερό BS είναι ότι ένα UAV-BS μπορεί να κινείται. Μερικές από τις υπάρχουσες προκλήσεις εντείνονται λόγω της κίνησης των UAV. Για παράδειγμα, απαιτείται πιο αποτελεσματική εκπαίδευση διαμόρφωσης δέσμης και παρακολούθηση για να ληφθεί υπόψη η κίνηση των UAV και το φαινόμενο Doppler του καναλιού χρειάζεται επιπλέον προσοχή, ενώ η θέση του UAV και η ανεύρεση του χρήστη είναι αλληλένδετα.

Επωφελούμενοι από το άφθονο εύρος ζώνης και το μικρό μήκος κύματος, οι (Xiao et al., 2016) εισήγαγαν για πρώτη φορά την έννοια του κυψελοειδούς δικτύου mmWave UAV μαζί με τα χαρακτηριστικά του και επεσήμανε πιθανές λύσεις στο μέλλον. Συγκεκριμένα, διερεύνησαν μια ιεραρχική δομή βιβλίου κωδίκων διαμόρφωσης δέσμης για εκπαίδευση και παρακολούθηση ταχείας διαμόρφωσης δέσμης και διερεύνησαν τη χρήση πολλαπλής πρόσβασης χωρικής διαίρεσης mmWave για τη

βελτίωση της χωρητικότητας του κυψελοειδούς δικτύου. Οι (Zhu et al., 2018) εξέτασε την απόδοση μυστικότητας ενός τυχαία αναπτυσσόμενου δικτύου επικοινωνίας mmWave με δυνατότητα UAV μέσω καναλιών εξασθένισης Nakagami-m, όπου εφαρμόστηκε η διαδικασία σημείου Matern Hardcore για τη διατήρηση της ελάχιστης απόστασης ασφαλείας μεταξύ των τυχαία αναπτυσσόμενων UAV-BS. Προκειμένου να παρακαμφθούν αυτά τα εμπόδια που δημιουργούνται από το μικρό μήκος κύματος όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα UAV ως κινητά ρελέ είναι ευρέως απαραίτητα στις επικοινωνίες mmWave. Για πραγματικές εφαρμογές, είναι δύσκολο να βρεθεί η βέλτιστη θέση ρελέ αυτόματα. Στοχεύοντας σε αυτό, οι (Kong et al., 2017) μελέτησαν μια νέα μέθοδο αναμετάδοσης UAV εξειδικευμένη για επικοινωνίες mmWave, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα ρελέ UAV για τη μέτρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της σύνδεσης σε πραγματικό χρόνο και η θέση της κεραίας σχεδιάστηκε αντίστοιχα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το UAV-relay ήταν ικανό να παρέχει περισσότερες λύσεις ακρίβειας και απόδοσης από την υπάρχουσα μέθοδο με χρήση ρελέ. Μια αποτελεσματική μέθοδος παρακολούθησης καναλιών προτάθηκε για ένα σύστημα επικοινωνίας mmWave UAV MIMO, όπου το σύστημα επικοινωνίας και ελέγχου σχεδιάστηκαν από κοινού, και το μοντέλο 3D καναλιού διαμορφώθηκε ως συνάρτηση των πληροφοριών κατάστασης κίνησης του UAV και των πληροφοριών απολαβής καναλιού. Οι (S. Naqvi et al., 2018) διαμόρφωσαν ένα HetNet πολλαπλών ζωνών υποβοηθούμενο από UAV, συμπεριλαμβανομένου επίγειου macro BS και dual-mode mmWave small BS, και πρότειναν ένα κοινό σχέδιο κατανομής υποφορέα και ισχύος για μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη την απόφραξη LoS από ανθρώπινα σώματα, οι (Gapeyenko et al., 2018) μελέτησαν την αποτελεσματική ανάπτυξη ενός mmWave-UAV-BS και εξήγαγε το αντίστοιχο ύψος και ακτίνα κυψέλης. Αντίθετα, οι (Khosravi et al., 2018) αξιολόγησαν την απόδοση της χρήσης της τεχνικής πύκνωσης μικρών κυττάρων σε συνδυασμό με UAV που λειτουργεί στη συχνή ζώνη mmWave και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση των περιορισμών διάδοσης. Για να το ολοκληρώσουμε, οι (Khawaja et al., 2017) πραγματοποίησαν τη μέτρηση διάδοσης για κανάλια mmWave αέρος-εδάφους για επικοινωνίες UAV χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις ανίχνευσης ακτίνων, αναλύθηκαν τέσσερις τύποι περιβαλλόντων όπως αστικό, προαστιακό, αγροτικό και υπερθαλάσσιο.

5.1.3.2 UAV οδηγούμενα μέσω NOMA

Το NOMA έχει πρόσφατα τραβήξει την προσοχή ως μία από τις βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης για συστήματα επικοινωνίας 5G, αποκομίζοντας υψηλή φασματική απόδοση μέσω της ενσωμάτωσης κωδικοποίησης υπέρθεσης στον πομπό με διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) στους δέκτες. Σε σύγκριση με τα ορθογώνια σχήματα πολλαπλής πρόσβασης (OMA), το NOMA εξυπηρετεί ένα πλήθος χρηστών με διαφοροποιημένα μοτίβα κυκλοφορίας με μη ορθογώνιο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τον τομέα ισχύος για πολλαπλή πρόσβαση. Αυτό παρέχει μια αποτελεσματική οδό για τα UAV για να διασφαλίσουν τις ανάγκες μαζικών χρηστών εδάφους σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος.



Εικόνα 26: Ένα διάγραμμα για το εξεταζόμενο σενάριο UAV NOMA. Ένα UAV εξυπηρετεί πολλαπλούς χρήστες εδάφους όπου τα σήματα των χρηστών 1 έως $k - 1$ ακυρώνονται στον k -ο χρήστη, ενώ τα σήματα των χρηστών $k + 1$ έως N λαμβάνονται ως παρεμβολές (B. Li et al., 2019).

Η βάση της υλοποίησης του NOMA βασίζεται στη διαφορά των συνθηκών καναλιού μεταξύ των χρηστών. Μέχρι τώρα, πολλά έργα έχουν συμβάλει στην υιοθέτηση της μετάδοσης NOMA για επικοινωνίες με υποβοήθηση UAV, στην οποία τα UAV-BS μπορούν να εξυπηρετούν πολλούς χρήστες που λειτουργούν ταυτόχρονα/φορέα συχνότητας, ειδικά για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης με μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Μια απλή απεικόνιση των εκπομπών NOMA σε ένα δίκτυο που βασίζεται σε UAV απεικονίζεται στην Εικόνα 26. Πιο συγκεκριμένα, για μια περίπτωση NOMA δύο χρηστών, η εργασία που παρουσιάστηκε από τους (Sohail & Leow, 2017) επικεντρώθηκε στην εύρεση του βέλτιστου υψομέτρου ενός UAV-BS με περιστροφικά φτερά για τη

μεγιστοποίηση της δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών υπό τον περιορισμό ατομικού ρυθμού χρήστη και το υποσχόμενο Τα κέρδη που επιτεύχθηκε από τη NOMA παρουσιάστηκαν έναντι της OMA. Επίσης, οι συγγραφείς διατύπωσαν περαιτέρω το πρόβλημα αθροιστικού ρυθμού ως συνάρτηση της κατανομής ισχύος και του ύψους UAV και μιας περιορισμένης κάλυψης προτάθηκε η μεθοδολογία επέκτασης για να βρεθεί το βέλτιστο υψόμετρο. Οι Sharma & Kim (2017) υιοθέτησαν ένα UAV σταθερής πτέρυγας για να εξυπηρετούν δύο χρήστες εδάφους χρησιμοποιώντας μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης NOMA, στο οποίο προέκυψε η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας και για τους δύο χρήστες εδάφους και επιλέχθηκε ένας αποτελεσματικός τρόπος μετάδοσης για να εγγυηθεί καλύτερη πιθανότητα διακοπής για την επίτευξη δικαιοσύνης χρήστη. Επιπλέον το NOMA η μετάδοση εφαρμόστηκε επίσης στα συστήματα αναμετάδοσης με τη βοήθεια UAV (Baek et al., 2018), όπου προτάθηκε ένας νέος αλγόριθμος βέλτιστης κατανομής πόρων για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των χρηστών εδάφους και επεκτείνεται το πραγματικό εύρος λειτουργίας του UAV. Για μια υπόθεση NOMA πολλών χρηστών, εισήχθη η μετάδοση NOMA στο UAV-BS που λειτουργεί σε συχνότητα mmWave σε ένα μεγάλο στάδιο, όπου πολλοί χρήστες εξυπηρετούνταν ταυτόχρονα στην ίδια δέσμη και προσδιορίστηκαν το βέλτιστο λειτουργικό υψόμετρο καθώς και η στρατηγική κατανομής ισχύος για τη βελτίωση του αθροίσματος των διακοπών εκτέλεση. Με τη μετάδοση mmWave-NOMA στο UAV-BS, η παρακολούθηση και η ανατροφοδότηση πληροφοριών κατάστασης πλήρους καναλιού καθίστανται δυσκίνητη, επομένως τα περιορισμένα σχήματα ανάδρασης αντιμετωπίστηκαν με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες απόστασης χρήστη και πληροφορίες γωνίας χρήστη για τον χρήστη παραγγελία. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι το προτεινόμενο σχήμα ανάδρασης με βάση τη γωνία χρήστη ήταν σημαντικά ανώτερο από το προτεινόμενο σχήμα ανάδρασης με βάση την απόσταση χρήστη. Οι Nasir et al. (2019) χρησιμοποίησαν μια τεχνική μονής κεραίας UAV-BS και NOMA για να εξυπηρετήσει μεγάλο αριθμό χρηστών εδάφους, όπου το πρόβλημα βελτιστοποίησης μέγιστου ρυθμού διαμορφώθηκε με από κοινού βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων (δηλαδή, ύψος πτήσης του UAV, πλάτος δέσμης κεραίας εκπομπής, και το ποσό της ισχύος και το εύρος ζώνης) και αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος που ακολουθεί τη διαδρομή για την επίλυση του μη κυρτού προβλήματος. Ως περαιτέρω πρόοδος, άλλοι ερευνητές πρότειναν ένα πλαίσιο UAV με τη βοήθεια MIMO-NOMA όπου ένα UAV πολλαπλών κεραιών επικοινωνεί με πολλούς χρήστες εξοπλισμένους με πολλαπλές κεραίες ο καθένας. Με την υιοθέτηση της στοχαστικής

γεωμετρίας, οι θέσεις των χρηστών NOMA μοντελοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες χωρικές τυχαίες διεργασίες και προέκυψαν οι εκφράσεις κλειστής μορφής για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA. Με αυτή την προσέγγιση, οι θέσεις των UAV και των χρηστών εδάφους μοντελοποιήθηκαν σε ένα δίκτυο UAV με δυνατότητα NOMA από τους (Y. Liu et al., 2019) και αξιολογήθηκε η απόδοση του συστήματος. Επίσης, εφάρμοσαν ένα πλαίσιο μηχανικής μάθησης για να λύσουν τη δυναμική τοποθέτηση και κίνηση των UAV σε έναν τρισδιάστατο χώρο. Πολύ πρόσφατα, οι Pan et al. (2018) ανέπτυξαν ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης με κωδικοποίηση δικτύου για επικοινωνίες UAV, το οποίο ήταν πιο ανθεκτικό έναντι των μεταβαλλόμενων συνθηκών καναλιών κατερχόμενης ζεύξης από τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ένα συνεργατικό σχήμα NOMA εφαρμόστηκε σε ένα ασύρματο δίκτυο backhaul όπου τα UAV χρησιμοποιήθηκαν ως πετώντας BS μικρών κυψελών για μεγιστοποίηση του αθροίσματος του ρυθμού όλων των χρηστών, βελτιστοποιώντας από κοινού τις θέσεις των UAV, τη σειρά αποκωδικοποίησης της διαδικασίας NOMA και τα διανύσματα διαμόρφωσης δέσμης μετάδοσης. Όπως συζητήθηκε στην προαναφερθείσα βιβλιογραφία, είναι προφανές ότι το NOMA είναι ευέλικτο και αποτελεσματικό στην πολυπλεξία ενός αριθμού τελικών χρηστών σε επικοινωνίες UAV. Ωστόσο, η επιτυχής λειτουργία του NOMA στις επικοινωνίες UAV απαιτεί πολλές σχετικές προκλήσεις και περιορισμούς για τους ακόλουθους λόγους:

- ✓ Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του NOMA με βελτιωμένες φασματικές αποδόσεις είναι ότι είναι πολύπλοκο χρησιμοποιείται τεχνική SIC στην πλευρά του δέκτη.
- ✓ Το SIC βασίζεται αποκλειστικά στις πληροφορίες της κατάστασης του καναλιού τόσο στους δέκτες όσο και στους πομπούς για να καθορίσει την εκχωρούμενη ισχύ για κάθε δέκτη και τη σειρά αποκωδικοποίησης, η οποία πρέπει να εκτιμηθεί σχετικά με ακρίβεια σε ένα δίκτυο επικοινωνίας UAV.
- ✓ Η πολυπλεξία πολλαπλών χρηστών NOMA στον τομέα ισχύος εισάγει παρεμβολές ενδιάμεσων επιπέδων, απαιτούνται περισσότερες προσπάθειες για την περαιτέρω εξάλειψη των παρεμβολών ενδιάμεσων επιπέδων που προκύπτουν στις επικοινωνίες UAV με το NOMA.
- ✓ Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή κινητικότητα των UAV στην πράξη, η απόσταση επικοινωνίας μεταξύ του UAV και των χρηστών εδάφους θα ποικίλλει συνεχώς ανάλογα με τις απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο, η σειρά αποκωδικοποίησης SIC που καθορίζεται από τις λαμβανόμενες δυνάμεις σήματος των διαφορετικών

χρηστών ποικίλλει ανάλογα με τις θέσεις των UAV.

5.1.3.3 Γνωστικά δίκτυα UAV

Στις μέρες μας, ένα κρίσιμο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα UAV είναι η μικρή ηλικία του ραδιοφάσματος. Πολλοί σχετικοί λόγοι παρατίθενται ως εξής: i) υπάρχει δραματική ανάπτυξη και χρήση νέων φορητών φορητών συσκευών στο έδαφος (όπως smartphone και tablet), ii) διαφορετικά ασύρματα δίκτυα (Bluetooth, WiFi, LTE και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας) συνυπάρχουν στις ζώνες φάσματος λειτουργίας των UAV. Αυτά οδηγούν σε έναν πολύ έντονο ανταγωνισμό στη χρήση του φάσματος και έτσι οι επικοινωνίες UAV θα αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της σπανιότητας του φάσματος. Επομένως, είναι απαραίτητο για τις επικοινωνίες UAV να αποκτήσουν περαιτέρω πρόσβαση στο φάσμα με δυναμική χρήση των υπαρχουσών ζωνών συχνοτήτων.

Μέχρι στιγμής, πολλοί ερευνητές και ομάδες τυποποίησης έχουν παρουσιάσει την ενσωμάτωση συστημάτων επικοινωνίας CR και UAV για την αύξηση των ευκαιριών φάσματος, η οποία αναφέρεται ως γνωστικές επικοινωνίες UAV (Ding et al., 2018). Αυτή η ιδέα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει τη συνύπαρξη UAV με επίγειες κινητές συσκευές που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Σε αυτήν την περίπτωση, οι επικοινωνίες UAV με έδαφος μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές συνέπειες παρεμβολές στις υπάρχουσες επίγειες συσκευές αφού τα UAV συνήθως έχουν ισχυρούς δεσμούς LoS με χρήστες εδάφους.

Σημειώστε ότι στη βιβλιογραφία, έχουν υπάρξει αρκετές εργασίες που μελέτησαν το γνωστικό σύστημα επικοινωνίας UAV. Για παράδειγμα, βελτιστοποίησαν από κοινού την τροχιά του UAV και την κατανομή ισχύος μετάδοσης με στόχο την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης ενός γνωστικού UAV επικοινωνίας, ενώ περιορίζει τις παρεμβολές που επιβάλλονται στους κύριους δέκτες κάτω από ένα ανεκτό επίπεδο. Οι (C. Zhang & Zhang, 2016) παρουσίασαν μια υποκείμενη μέθοδο κοινής χρήσης φάσματος μεταξύ του δικτύου κυψελών drone και του παραδοσιακού επίγειου κυψελοειδούς δικτύου υπό διαφορετικά σενάρια, δηλαδή κοινή χρήση φάσματος κυψελών μονής βαθμίδας σε τρισδιάστατο δίκτυο και κοινή χρήση φάσματος μεταξύ του δικτύου κυψελών drone και το παραδοσιακό δισδιάστατο (2D) κυψελοειδές δίκτυο. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της στοχαστικής γεωμετρίας, άντλησαν τις σαφείς εκφράσεις για την πιθανότητα κάλυψης κυψελών drone και πέτυχαν τη βέλτιστη πυκνότητα των UAV-BS για μεγιστοποίηση της απόδοσης. Ομοίως, οι Sboui et al. (2017) πρότειναν την

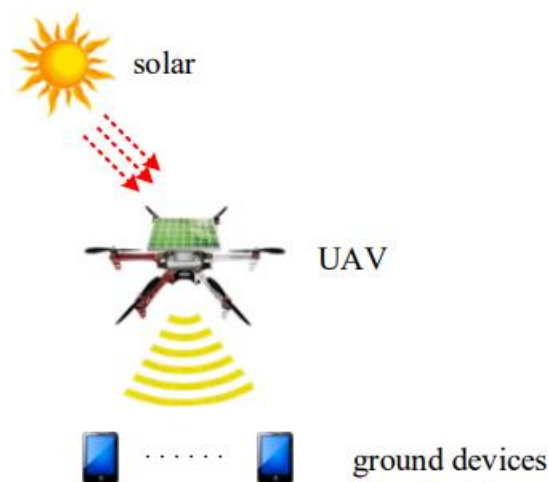
ενσωμάτωση ενός υποστρώματος CR σε ένα σύστημα UAV όπου το UAV ως δευτερεύων πομπός εκμεταλλευόταν ευκαιριακά και μοιράζονταν το πρωτεύον φάσμα για τη μετάδοση UAV προς το έδαφος. Ο στόχος ήταν να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση της μονάδας UAV, διασφαλίζοντας έτσι την αποτελεσματική και μακροχρόνια λειτουργία των UAV.

5.1.3.4 Δίκτυα UAV και ενεργειακή απόδοση

Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς επίγειους πομποδέκτες που συνδέονται με εξωτερικά τροφοδοτικά, το UAV τροφοδοτείται από μπαταρία περιορισμένης χωρητικότητας και έτσι οι επικοινωνίες που βασίζονται σε UAV αντιμετωπίζουν περιορισμένη διαθεσιμότητα ενέργειας για την εκτέλεση των διαφόρων λειτουργιών όπως ο έλεγχος πτήσης, η ανίχνευση/μετάδοση δεδομένων ή η εκτέλεση ορισμένων εφαρμογών. Όπως είναι γνωστό σε όλους, η πεπερασμένη ενσωματωμένη αποθήκευση ενέργειας των τυπικών UAV (η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι συνήθως μικρότερη από 30 λεπτά) περιορίζει τον χρόνο λειτουργίας τους (δηλαδή, χρόνο πτήσης ή χρόνο αιώρησης) και δεν είναι πάντα δυνατό τα UAV να επιστρέφουν στην αποθήκη για φόρτιση της μπαταρίας σε πυκνά χρονικά διαστήματα. Επομένως, αυτό αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο που συνεισφέρει στη δυσκολία για την εξασφάλιση σταθερών και βιώσιμων υπηρεσιών επικοινωνίας και ενδέχεται να λειτουργήσει ως εμπόδιο απόδοσης.

Ενεργειακή απόδοση: Για πολλές εφαρμογές UAV, η εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντική για την παράταση της διάρκειας ζωής ενός δικτύου UAV. Τα τελευταία χρόνια, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τους μηχανισμούς ανάπτυξης και λειτουργίας UAV με γνώμονα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι (K. Li et al., 2016) πρότειναν ένα ενεργειακά αποδοτικό πρόγραμμα προγραμματισμού μετάδοσης UAV σε ένα συνεργατικό δίκτυο αναμετάδοσης, έτσι ώστε η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας όλων των UAV να ελαχιστοποιηθεί και έτσι αναπτύχθηκε μια εφαρμόσιμη αλλά μη-βέλτιστη λύση με την ενέργεια που θα μπορούσε να εξοικονομηθεί έως και 50%. Αξιοποιώντας τη θεωρία της βέλτιστης μεταφοράς, οι (Mozaffari et al., 2016) ερεύνησαν την ενεργειακά αποδοτική ανάπτυξη πολλαπλών UAV-BS για την ελαχιστοποίηση της συνολικής απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης των UAV σύμφωνα με τις απαιτήσεις ρυθμού των χρηστών εδάφους. Οι (Zeng & Zhang, 2017) παρουσίασαν μια ενεργειακά

αποδοτική επικοινωνία UAV βελτιστοποιώντας την τροχιά του UAV με σταθερό υψόμετρο, όπου ελήφθη υπόψη η κατανάλωση ενέργειας πρόωσης του UAV σταθερής πτέρυγας και προέκυψε το θεωρητικό μοντέλο. Οι (Ghazzai et al., 2017) ανέπτυξαν ένα ενεργειακά αποδοτικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για μια επικοινωνία UAV ενσωματώνοντας τεχνολογία CR για την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του UAV, συμπεριλαμβανομένων των ενεργειών πτήσης και επικοινωνίας, όπου προτάθηκε ένας κοινός αλγόριθμος εμπνευσμένος από τη διατύπωση Weber για τη βελτιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης επίπεδο και τη θέση του γνωστικού UAV. Οι (C. H. Liu et al., 2018) πρότειναν ένα πλαίσιο που αξιοποίησε την εκμάθηση βαθιάς ενίσχυσης για τη μελέτη της κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιείται για κινήσεις UAV, διατηρώντας παράλληλα τη δίκαιη κάλυψη επικοινωνίας και τη συνδεσιμότητα δικτύου. Οι (Ruan et al., 2018) κατασκεύασαν ένα ενεργειακά αποδοτικό μοντέλο ανάπτυξης κάλυψης πολλαπλών UAV, στο οποίο το προτεινόμενο μοντέλο αποσυντέθηκε σε δύο υποπροβλήματα για να μειωθεί η πολυπλοκότητα της επιλογής στρατηγικής, δηλαδή, μεγιστοποίηση κάλυψης και ελαχιστοποίηση ισχύος.



Εικόνα 27: Ένα σύστημα επικοινωνίας UAV με ηλιακή ενέργεια, όπου το UAV είναι εξοπλισμένο με ηλιακά πάνελ που μπορούν να συλλέγουν ενέργεια από ηλιακή πηγή (B. Li et al., 2019).

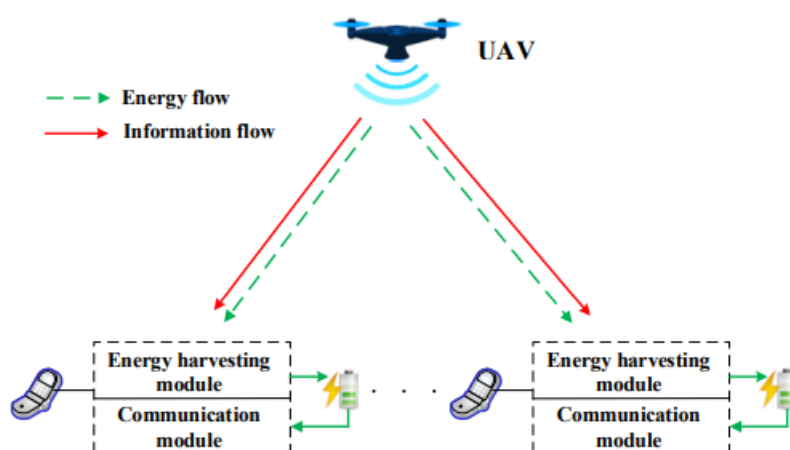
Συγκομιδή ενέργειας: Στην πραγματικότητα, η κατανάλωση ενέργειας του UAV που τροφοδοτείται από μπαταρίες συνήθως χωρίζεται σε ενέργεια που καταναλώνεται από τη μονάδα επικοινωνίας και σε ενέργεια που χρησιμοποιείται για το υλικό και την κινητικότητα των UAV. Ως εκ τούτου, το UAV συλλογής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την παράταση της διάρκειας πτήσης του χωρίς να προστεθεί σημαντική μάζα ή μέγεθος του συστήματος καυσίμου. Σε πρόσφατες εφαρμογές, είναι πολύ

πλεονεκτικό να συλλέγουμε ενέργεια από πηγές περιβάλλοντος για την επαναφόρτιση της μπαταρίας του UAV, το οποίο αναφέρεται ως ασύρματα δίκτυα UAV. Πολλές σχετικές εργασίες έχουν προχωρήσει για τη βελτίωση της αντοχής των ηλεκτροκίνητων UAV. Ειδικότερα, το UAV με ηλιακή ενέργεια έχει λάβει σημαντική προσοχή που συλλέγει ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκού φαινομένου για την πραγματοποίηση αέναης πτήσης, το μοντέλο του συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 27. Στην πραγματικότητα, η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση, το υψόμετρο, τον αριθμό των ωρών της ημέρας και την ημέρα του έτους. Τα πρωτότυπα UAV με ηλιακή ενέργεια αναπτύχθηκαν από μηχανικούς και αποκάλυψαν τη δυνατότητα συνεχούς πτήσης για 28 ώρες, οι (H. Wang & Shen, 2018) κατασκεύασαν το μοντέλο προσομοίωσης ηλιακής κυψέλης για UAV με ηλιακή ενέργεια μέσω λογισμικού MATLAB/Simulink και τα χαρακτηριστικά εξόδου των ηλιακών συλλεκτών σε τρεις τύπους καιρικών συνθηκών (δηλαδή, ελαφριά βροχή, συννεφιά και ηλιόλουστες μέρες) δοκιμάστηκαν στο Nanjing Πανεπιστήμιο Αεροναυτικής και Αστροναυτικής Nanjing. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών έδειξαν ότι η καμπύλη εξόδου ενός ηλιακού κυττάρου επηρεάστηκε κυρίως από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ένταση φωτός. Το Ινδικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας Kanpur πραγματοποίησε μια ημερήσια δοκιμή πτήσης μιας ηλιακής πλατφόρμας UAV τον Απρίλιο του 2017, όπου το UAV απογειώθηκε στις 9:30 π.μ. και προσγειώθηκε επιτυχώς στο 6:00 μ.μ. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι η παραγόμενη ισχύς έγινε μικρότερη από την ισχύ που απαιτείται από το σύστημα UAV περίπου από τις 3:30 μ.μ. έως τις 5:10 μ.μ. Η Ομάδα Σχεδιασμού Αεροσκαφών του Πανεπιστημίου Cranfield στο Ηνωμένο Βασίλειο εξέτασε την επίδραση της θερμοκρασίας και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες γωνίες ηλιακών μονάδων, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας τόσο για μη πλαστικοποιημένες όσο και για πλαστικοποιημένες ηλιακές μονάδες ήταν περίπου 45°C και η ηλιακή ενέργεια αυξήθηκε σχεδόν γραμμικά κατά μήκος της γωνίας κλίσης των ηλιακών ακτινών. Οι (Sun et al., 2018) έχουν επικαλεστεί τη σχεδίαση κατανομής πόρων για ένα ηλιακό σύστημα επικοινωνίας πολλαπλών φορέων UAV για μεγιστοποίηση της απόδοσης του αθροίσματος του συστήματος, όπου προτάθηκε ένας κοινός τρισδιάστατος αλγόριθμος κατανομής θέσης, ισχύος και υποφορέα χαμηλής πολυπλοκότητας για να βρεθεί η υποβέλτιστη λύση. Δεδομένου ότι η αεροδυναμική κατανάλωση ισχύος των ρεαλιστικών συστημάτων UAV εξαρτάται από την ταχύτητα πτήσης, η υπόθεση της

σταθερής αεροδυναμικής κατανάλωσης ισχύος δεν ισχύει στην πράξη. Για το λόγο αυτό, οι (Sun et al., 2019) μελέτησαν περαιτέρω ένα σύστημα επικοινωνίας UAV με ηλιακή ενέργεια πολλαπλών φορέων, λαμβάνοντας από κοινού υπόψη τη συλλογή ηλιακής ενέργειας, την αεροδυναμική κατανάλωση ενέργειας, τη δυναμική της ενσωματωμένης αποθήκευσης ενέργειας και τις απαιτήσεις QoS των χρηστών εδάφους. Ο στόχος ήταν να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του αθροίσματος του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το UAV μπορούσε να συλλέξει περισσότερη ηλιακή ενέργεια όταν πετούσε ακριβώς πάνω από τα σύννεφα. Οι (Hua et al., 2017) θεώρησαν ένα σενάριο αναμετάδοσης UAV περιορισμένης ενέργειας όπου το πρωτόκολλο αναμετάδοσης βασισμένο σε διαχωρισμό ισχύος υιοθετήθηκε σε ένα UAV για συλλογή ενέργειας και επεξεργασία πληροφοριών με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Στο αστικό περιβάλλον, οι (Wu et al., 2018) πρότειναν ένα πλαίσιο σχεδιασμού μονοπατιών UAV με ηλιακή ενέργεια που έλαβε υπόψη την κατάσταση των εμποδίων και τις σκιάδες περιοχές που προκαλούνται από ψηλά κτίρια. Ωστόσο, η ηλιακή ενέργεια για τη συλλογή με ηλιακά κύτταρα είναι συχνά εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες και είναι απρόβλεπτη, με αποτέλεσμα να υποφέρει από αβεβαιότητα που προκαλείται από τυχαίες αφίξεις ενέργειας. Οι περισσότερες τρέχουσες εργασίες δεν έλαβαν υπόψη αυτό το πρακτικό περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, η εργασία των (Sowah et al., 2015) παρουσίασαν έναν περιστροφικό συλλέκτη ενέργειας που βασίζεται σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες για τη συλλογή ενέργειας του περιβάλλοντος για την παράταση του χρόνου πτήσης σε εσωτερικούς χώρους του τετρακόπτερου, ενώ εφαρμόστηκε επίσης ένα πρωτότυπο του συστήματος περιστροφικής συλλογής ενέργειας. Οι (Long et al., 2018) πρότειναν την αρχιτεκτονική του ενεργειακού ουδέτερου διαδικτύου των UAV, όπου χρησιμοποιήθηκαν σταθμοί επαναφόρτισης για την ενεργοποίηση των UAV μέσω ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) με σήματα ραδιοσυχνότητας (RF), τα οποία επέτρεψαν σημαντικά την αύξηση στη διάρκεια ζωής συνεχούς λειτουργίας των UAV. Σε συστήματα αναμετάδοσης με υποβοήθηση UAV, οι (Yang et al., 2018) ανέλυσαν την απόδοση διακοπής της ενέργειας συλλογής UAV από το έδαφος BS, όπου λήφθηκαν υπόψη τόσο το σκιασμένο-Rician fading όσο και το σκιασμένο-Rayleigh fading αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, οι κινητές συσκευές (όπως οι αισθητήρες χαμηλού επιπέδου) συνήθως έχουν επίσης περιορισμό ενέργειας και οι ωφέλιμες ζωές περιορίζονται από τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Δεδομένου ότι τα UAV έχουν περισσότερη διαθέσιμη

ενέργεια από τις κινητές συσκευές και τα UAV στην πραγματικότητα παρέχουν υπηρεσίες σε συσκευές εδάφους, τα UAV ως πομποί εναέριας ενέργειας με πρόσθετη ευελιξία αναμένεται να παρέχουν πανταχού παρούσα ασύρματη παροχή ενέργειας σε μαζικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Αυτό σημαντικά βελτιώνει την απόδοση ασύρματης φόρτισης σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίγειους σταθμούς φόρτισης σε σταθερές τοποθεσίες, οι οποίοι αναφέρονται ως ασύρματα δίκτυα με δυνατότητα UAV.



Εικόνα 28: Ένα τυπικό παράδειγμα ασύρματου τροφοδοτούμενου δικτύου με δυνατότητα UAV, όπου το UAV είναι σε θέση να μεταδίδει ενέργεια ή ταυτόχρονα να μεταδίδει δεδομένα και ενέργεια σε συσκευές επίγειων χρηστών μέσω σημάτων RF. Το τμήμα πράσινου χρώματος αντιπροσωπεύει τη ροή ενέργειας και το τμήμα κόκκινου χρώματος αντιπροσωπεύει τη ροή πληροφοριών (B. Li et al., 2019).

Μια αναλυτική παράδειγμα της συλλογής ενέργειας από UAV παρουσιάζεται στην Εικόνα 28, όπου το UAV περιλαμβάνει μια μονάδα μεταφοράς ενέργειας για τη μετάδοση ενέργειας ραδιοσυχνότητας σε συσκευές επίγειων χρηστών. Η ιδέα έχει εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια. Για να είμαστε συγκεκριμένοι, οι Marano & Willett (2018) εξέτασαν τη βελτίωση της βιώσιμης λειτουργίας των αισθητήρων κατά το στάδιο ανίχνευσης στο πλαίσιο ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μέσω σήματος RF από ένα UAV. Άλλοι ερευνητές πρότειναν έναν κοινό αλγόριθμο βελτιστοποίησης χρόνου και ισχύος για μεγιστοποίηση της μέσης απόδοσης, όπου το UAV λειτουργούσε ως πηγή στατικής ενέργειας για την τροφοδοσία πολλαπλών ζευγών D2D και υιοθετήθηκε ένα πρωτόκολλο συγκομιδής-μετάδοσης-αποθήκης. Ωστόσο, αυτή η εργασία δεν έλαβε υπόψη την κινητικότητα των UAV. Αξιοποιώντας τη σχεδίαση τροχιάς του UAV, οι Xu et al. (2017) παρουσίασαν την πρώτη εργασία για τον χαρακτηρισμό της εφικτής ενεργειακής περιοχής των χρηστών εδάφους σε ένα σύστημα WPT δύο χρηστών με δυνατότητα UAV. Επίσης εξέτασαν περαιτέρω το σύστημα πολλαπλών

χρηστών WPT με δυνατότητα UAV στο, όπου τα προβλήματα της μεγιστοποίησης της ενέργειας και της ελάχιστης ενέργειας επινοήθηκαν αντίστοιχα με τη βελτιστοποίηση της τροχιάς του UAV υπό τον πρακτικό περιορισμό ταχύτητας. Στη συνέχεια, οι Nguyen et al. (2019) εξέτασαν το πρόβλημα ενεργειακής απόδοσης στις επικοινωνίες D2D που τροφοδοτούνται από WPT με τη βοήθεια UAV βελτιστοποιώντας από κοινού τον χρόνο συλλογής ενέργειας και την κατανομή ισχύος, και στη συνέχεια η απόδοση του δικτύου UAV αξιολογήθηκε από την ενσωματωμένη μονάδα βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκε στη γλώσσα Python. Ως περαιτέρω εξέλιξη, οι (Park et al., 2019) έχουν επικαλεστεί ένα ασύρματο τροφοδοτούμενο από UAV δίκτυο επικοινωνίας (WPCN) για τη μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόδοσης χρήστη, βελτιστοποιώντας από κοινού την τροχιά του UAV, τον έλεγχο ισχύος άνω ζεύξης και την κατανομή των πόρων χρόνου, όπου Τόσο τα σενάρια των ενσωματωμένων UAV όσο και των διαχωρισμένων UAV WPCN λήφθηκαν υπόψη αντίστοιχα. Οι Xie et al. (2019) αντιμετώπισαν ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης τροχιάς των UAV και της κατανομής των διαθέσιμων πόρων για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης ανοδικής ζεύξης σε μια εγκατάσταση WPCN με δυνατότητα UAV, διατηρώντας παράλληλα τον περιορισμό μέγιστης ταχύτητας του UAV και τους περιορισμούς ενεργειακής ουδετερότητας των χρηστών.

5.2 Μελλοντική ερευνητική εστίαση

Παρά τις δυνατότητες συνδυασμού UAV με τεχνικές 5G, η έρευνα για τα ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο και πολλά ανοιχτά ζητήματα χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Σε αυτήν την ενότητα, ρίχνουμε φως στις νέες ευκαιρίες στην αναδυόμενη αρχιτεκτονική δικτύων και επισημαίνουμε ενδιαφέροντα ερευνητικά θέματα για μελλοντικές κατευθύνσεις.

A. Αποδοτικότητα φόρτισης – κατανάλωσης ενέργειας

Ο περιορισμός ενέργειας είναι το σημείο συμφόρησης σε κάθε σενάριο επικοινωνιών UAV. Όπως οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες μπαταριών, όπως οι βελτιωμένες μπαταρίες ιόντων λιθίου και οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, η συλλογή ενέργειας χρησιμοποιείται για την παράταση των χρόνων πτήσης με τη χρήση πράσινων πηγών ενέργειας (όπως η ηλιακή ενέργεια). Ωστόσο, η απόδοση της συλλογής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλότερη λόγω της μεγαλύτερης απόστασης και των τυχαίων αφίξεων ενέργειας. Για τη βελτίωση της απόδοσης φόρτισης, οι νέες τεχνολογίες παροχής

ενέργειας, όπως η διαμόρφωση δέσμης ενέργειας μέσω τεχνικών πολλαπλών κεραιών και το καταμεμημένο WPT πολλαπλών σημείων, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον (Gharibi et al., 2016).

B. Επικοινωνίες UAV-to-UAV και Satellite-to-UAV Communications

Για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε ασύρματες συσκευές γείωσης σε μια σημαντικά ευρεία περιοχή, ένα σμήνος UAV κατασκευάζει ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων για να βοηθήσει τις συσκευές να στέλνουν και να παραλαμβάνουν πακέτα, καθένα από τα οποία έχει μια τροχιά. Ωστόσο, λόγω της υψηλής ταχύτητας κινητικότητας και της ανάγκης διατήρησης των στενών συνδέσεων επικοινωνίας με τους χρήστες εδάφους, η σύνδεση σύνδεσης με τα γειτονικά UAV αποσυνδέεται συχνά. Σε αυτήν την περίπτωση, όλα τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν μπορούν να λειτουργήσουν καλά στα FANET. Επομένως, το πώς να ελέγξετε την πτήση των UAV για να πραγματοποιήσετε μια καλή υπηρεσία είναι μια προκλητική κατεύθυνση. Επιπλέον, όταν συνεργάζονται πολλαπλά UAV, η αποφυγή σύγκρουσης γίνεται επίσης μια σημαντική εξέλιξη για την ασφαλή λειτουργία UAV. Από την άλλη πλευρά, τα υπερσύγχρονα μοντέλα καναλιών δορυφόρου σε UAV δεν διαθέτουν λεπτομερή αποτελέσματα διάδοσης. Η εκμετάλλευση των μοντέλων διάδοσης καναλιών για επικοινωνίες δορυφόρου σε UAV είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο και παραμένει ένα θέμα για μελλοντική έρευνα.

Γ. Αλληλεπίδραση Διαφορετικών Τμημάτων

Για το ολοκληρωμένο δίκτυο διαστημικού-αέρα-εδάφους, ένα σημαντικό ζήτημα είναι ο τρόπος αξιοποίησης των καινοτόμων τεχνικών για την εξασφάλιση απρόσκοπτης ενοποίησης μεταξύ του διαστημικού δικτύου, του δικτύου που βασίζεται στον αέρα και του κυψελοειδούς δικτύου εδάφους. Επομένως, είναι επιθυμητό να σχεδιαστούν ορισμένα κίνητρα συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τμημάτων και απαιτούνται αποκλειστικοί σχεδιασμοί πρωτοκόλλων πολλαπλών επιπέδων για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία της σύνδεσης. Σε ένα τόσο περίπλοκο περιβάλλον δικτύου, είναι επίσης σημαντικό να παρέχεται επεκτάσιμες και ευέλικτες διεπαφές για αυτά τα τμήματα ώστε να αλληλοεπιδρούν και να συνεργάζονται για την επίτευξη ελκυστικών οφελών, δηλαδή πώς να υλοποιείται η απρόσκοπτη ανταλλαγή πληροφοριών και μετάδοση δεδομένων μεταξύ ετερογενών δικτύων. Για παράδειγμα, η αυξανόμενη ποικιλία υπηρεσιών μπορεί να απαιτεί τα UAV να είναι οι πύλες μεταξύ διαφορετικών δικτύων, είναι σημαντικό σε ένα τόσο περίπλοκο δίκτυο να σχεδιάζονται μηχανισμοί

διασύνδεσης για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας της ζεύξης.

Δ. Συνέργεια UAV και συστημάτων IoT

Το Διαδίκτυο των UAV (IoUAVs) είναι μια έννοια που εισήχθη για πρώτη φορά από τους (Z. Zhou et al., 2018), το οποίο υποστηρίζει τη διασταύρωση και των δύο υπαρχόντων IoT με UAV σε μια δυναμική ενοποίηση. Λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών, όπως η γρήγορη ανάπτυξη, ο εύκολος προγραμματισμός, η πλήρως ελεγχόμενη κινητικότητα και η επεκτασιμότητα, τα IoUAV αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την υλοποίηση του πλαισίου του μελλοντικού οικοσυστήματος IoT όπου άνθρωποι, UAV και συσκευές IoT αλληλοεπιδρούν σε συνεργασία, κάτι που επιτρέπει πανταχού παρών διαμοιρασμός πληροφοριών και λεπτομερής συντονισμός μεταξύ ενός στόλου UAV. Παρά τα τεράστια πιθανά οφέλη των IoUAV, η απόδοση αντοχής και αξιοπιστίας περιορίζεται θεμελιωδώς από τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας, η οποία είναι γενικά μικρή λόγω των πρακτικών περιορισμών SWAP. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας για τα IoUAV για την υποστήριξη της κινητικότητας και την αποφυγή σύγκρουσης, η οποία είναι συνήθως αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από την ενέργεια που καταναλώνεται για την παράδοση δεδομένων και βασίζεται σε διακυμάνσεις τροχιάς στη χρονική κλίμακα των δευτερολέπτων, ειδικά σε βιομηχανικά IoUAV (Sanjab et al., 2017). Επομένως, ο τρόπος επίτευξης μιας ενεργειακής συνέργειας μεταξύ των γωνιών των UAV και των συστημάτων IoT δεν είναι ασήμαντο. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι ο τρόπος εκμετάλλευσης της συνέργειας μεταξύ της κινητικότητας των UAV και της κινητικότητας των χρηστών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την αύξηση της κερδοφορίας των ασύρματων δικτύων. Επιπλέον, η συνέργεια του IoT και των UAV παραμένει σε μεγάλο βαθμό ένα αναξιοποίητο πεδίο μελλοντικής τεχνολογίας που έχει τη δυνατότητα να επιφέρει δραστικές αλλαγές στον τρόπο που ζούμε σήμερα.

Ε. Ασφάλεια και Απόρρητο

Το ενσωματωμένο δίκτυο μπορεί να αντιμετωπίσει κακόβουλες επιθέσεις λόγω των ανοιχτών συνδέσμων και των δυναμικών τοπολογιών που καλύπτουν μια κρίσιμη για την αποστολή περιοχή με σκόπιμη εμπλοκή/διακοπή. Στα δίκτυα που υποστηρίζονται από UAV, η ασφάλεια είναι σημαντική, καθώς τα UAV είναι πάντα αφύλακτα, κάτι που τα αφήνει εύκολα να συλληφθούν ή να δέχονται επίθεση. Για να αποφευχθεί η κακόβουλη τροποποίηση, υπάρχει ανάγκη για έναν ασφαλή και ελαφρύ μηχανισμό για την πρόληψη επιθέσεων όπως η υποκλοπή, η επίθεση από τον άνθρωπο στη μέση και

ούτω καθεξής. Προτάθηκαν λύσεις τεχνητής νοημοσύνης για την αντιμετώπιση της ασφάλειας σε περιπτώσεις χρήσης εφαρμογών UAV συνδεδεμένων μέσω κινητής τηλεφωνίας, ενώ ένα παιχνίδι απαγόρευσης δικτύου μηδενικού αθροίσματος υποστηρίχθηκε για την καταγραφή των απειλών φυσικής ασφάλειας στον κυβερνοχώρο στα συστήματα παράδοσης UAV (Sanjab et al., 2017). Στη μεγάλη περιοχή κάλυψης των ολοκληρωμένων δικτύων διαστημικού-αέρα-εδάφους, οι ελεγκτές SDN είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των πόρων και τον έλεγχο της λειτουργίας του δικτύου, είναι επείγον να προστατεύονται οι ελεγκτές SDN από διαφορετικές κυβερνοεπιθέσεις όπου οι αντίπαλοι μπορούν να υποκλοπουν τα δεδομένα και να ελέγχουν σήματα που μεταδίδονται μέσω των ραδιοζεύξεων των συστημάτων UAV. Οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο στα συστήματα UAV και η κυβερνοασφάλεια εξακολουθεί να είναι μια σημαντική πρόκληση που πρέπει να ξεπεραστεί στην πραγματική χρήση των UAV. Ως εκ τούτου, απαιτείται ο σχεδιασμός έγκαιρων στρατηγικών και αντι-μηχανισμών για την αντιμετώπιση κακόβουλων επιθέσεων στον κυβερνοχώρο.

ΣΤ. Ολοκληρωμένα Δίκτυα Οχημάτων Διαστήματος-Αέρα-Εδάφους

Η ενσωμάτωση των επικοινωνιών διαστήματος-αέρα-εδάφους σε δίκτυα οχημάτων μπορεί να προσφέρει υψηλό ρυθμό δεδομένων για χρήστες οχημάτων σε αστικές/προαστιακές περιοχές μέσω επίγειου δικτύου, πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα μεταξύ οχημάτων σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές μέσω δορυφορικού δικτύου, καθώς και επέκταση κάλυψης υποδομών και πληροφοριών δικτύου συλλογή σε φτωχές ή συμφορημένες περιοχές από UAV. Για το λόγο αυτό, προτάθηκε ένα πλαίσιο υποβοηθούμενο από UAV για την ενοποίηση των UAV με επίγεια δίκτυα οχημάτων για αποτελεσματική αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Στο οικοσύστημα των επικοινωνιών διαστήματος-αέρα-εδάφους, η υψηλή κινητικότητα των δορυφόρων και των UAV θα αλλάζει συνεχώς την κατάσταση του καναλιού διάδοσης όσον αφορά την απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου και το φαινόμενο Doppler. Για να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα διασύνδεσης μεταξύ δικτύων διαστήματος-αέρα-εδάφους και δικτύων οχημάτων, απαιτείται αποτελεσματικά σχεδιασμένη αρχιτεκτονική δικτύου. Περαιτέρω, για να υποστηριχθεί η παράδοση δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία, πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω ένας ολοκληρωμένος μηχανισμός ελέγχου που συντονίζει την κατανομή του φάσματος, τον προγραμματισμό ζεύξης και το σχεδιασμό πρωτοκόλλου για το κανάλι

διάδοσης διάστημα-αέρα-εδάφους.

Z. Ενσωμάτωση Δικτύωσης, Υπολογιστών και Προσωρινής Αποθήκευσης

Παρά τις υπάρχουσες μελέτες που έχουν γίνει για τη δικτύωση, τον υπολογισμό και την προσωρινή αποθήκευση σε ασύρματα δίκτυα χωριστά, η κοινή εξέταση των τριών προηγμένων τεχνικών θα πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά με συστηματικό τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται στις εγγενείς απαιτήσεις του έξυπνου IoT επόμενης γενιάς, ακόμη και να κάνει εμπόριο με μείωση μεταξύ του κόστους λειτουργίας (π.χ. κατανάλωση ενέργειας) και των οφελών απόδοσης (π.χ. μείωση της καθυστέρησης). Έχει αναπτυχθεί μια αρχιτεκτονική για την ενοποίηση του λογισμικού καθόρισε τη δικτύωση, την προσωρινή αποθήκευση και τον υπολογισμό, και λεπτομερώς τα βασικά στοιχεία των επιπέδων δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης. Αργότερα, προτάθηκαν (He et al., 2017) μεγάλα δεδομένα προσέγγιση εκμάθησης βαθιάς ενίσχυσης για να επιτρέψει τη δυναμική ενορχήστρωση πόρων δικτύωσης, προσωρινής αποθήκευσης και υπολογιστών για τη βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών σε έξυπνες πόλεις. Η χρήση των τεχνολογιών δικτύωσης, υπολογιστών και προσωρινής αποθήκευσης μπορεί ουσιαστικά να συμπληρώσει την τρέχουσα ανάπτυξη του IoT, ωστόσο, τα νέα χαρακτηριστικά δημιουργούν επίσης απροσδόκητα προβλήματα που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν άμεσα μέσω των παραδοσιακών προσεγγίσεων που έχουν σχεδιαστεί για συστήματα IoT χαμηλής ταχύτητας. Έτσι, το πώς να ενσωματωθούν αποτελεσματικά οι υπάρχουσες δυνατότητες για την αντιμετώπιση των θεμελιωδών προβλημάτων στο έξυπνο IoT παραμένει θέμα για μελλοντική έρευνα.

H. Περιβαλλοντική Αβεβαιότητα

Δεδομένου ότι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα μπορούν να παρέχουν ετερογενείς πόρους επικοινωνίας, υπολογισμού και προσωρινής αποθήκευσης, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά αυτοί οι ετερογενείς πόροι για την υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών μεγάλων δεδομένων. Οι (N. Zhang et al., 2018) εστίασαν την προσοχή τους στα συνεργιστικά και συμπληρωματικά χαρακτηριστικά των μεγάλων δεδομένων και του οικοσυστήματος 5G που επέτρεψαν στους παρόχους υπηρεσιών, περιεχομένου και λειτουργιών να αναπτύξουν τις υπηρεσίες/περιεχόμενο/λειτουργίες τους στα άκρα του δικτύου και το δίκτυο δεδομένων υποβοηθούμενη από την απόκτηση δεδομένων και τη βοήθεια μεγάλων δεδομένων Παρέχονταν προσωρινή αποθήκευση περιεχομένου άκρης. Δεδομένου ότι τα τεράστια δεδομένα δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση

μοντέλων πρόβλεψης για την πρόβλεψη του μέλλοντος συμβάντα δικτύου, οι προληπτικές ενέργειες μπορούν να εκτελεστούν εκ των προτέρων για την αποφυγή σφαλμάτων δικτύου ή αποτυχιών υπηρεσιών. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται ακριβής πρόβλεψη, όπως η χωροχρονική κατανομή της κυκλοφορίας, η δημοτικότητα των υπηρεσιών/περιεχομένου και η κινητικότητα των χρηστών, για να διευκολυνθεί η βέλτιστη λήψη αποφάσεων και έτσι να βελτιώνεται η συνολική απόδοση του δικτύου.

I. Άλλα ενδιαφέροντα θέματα

Εκτός από τις προοπτικές που συζητήθηκαν παραπάνω, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά ανοιχτά ζητήματα που σχετίζονται με την πρακτικότητα της εκτέλεσης επικοινωνιών UAV. Για παράδειγμα, σε ορισμένα σενάρια εφαρμογών (όπως σε δάση), μπορεί να υπάρχουν εμπόδια και πλούσια διασπορά μεταξύ του UAV και των χρηστών εδάφους, επομένως ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο καναλιών αέρος-εδάφους που ενσωματώνει θερμοκρασία, άνεμο, φύλλωμα και αστικά περιβάλλοντα είναι ένα ενδιαφέρον πρόβλημα που αξίζει μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες. Επιπλέον, σε συστήματα NOMA πολλαπλών χρηστών με δυνατότητα UAV, έχει αποδειχθεί ότι οι βέλτιστοι αλγόριθμοι ομαδοποίησης χρηστών και σύζευξης χρηστών είναι πεδία που δεν έχουν διερευνηθεί. Επιπλέον, νέα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας μη επανδρωμένων αεροσκαφών μπορεί να είναι απαραίτητα για την ασφαλή διαχείριση της υψηλής πυκνότητας κίνησης UAV χαμηλού υψομέτρου (G. Yang, 2021), η οποία είναι υπεύθυνη για τον συνεργατικό σχεδιασμό διαδρομής και την αποφυγή σύγκρουσης πολλαπλών UAV. Το σύστημα συστοιχίας κεραιών που βασίζεται σε UAV είναι ένα άλλο αποτύπωμα για την παροχή υψηλού ρυθμού δεδομένων και χαμηλού χρόνου εξυπηρέτησης, καθώς ο αριθμός των στοιχείων κεραίας (δηλαδή ο αριθμός των UAV) δεν περιορίζεται από περιορισμούς χώρου. Για να αποφευχθεί η διαρροή απορρήτου της επικοινωνίας UAV και να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των δεδομένων που συλλέγονται από UAV, η τεχνολογία blockchain (δηλαδή, εναέρια blockchain) αναμένεται να είναι ένα νέο παράδειγμα για την ασφαλή και προσαρμοστική διατήρηση των προτιμήσεων απορρήτου κατά τη διαδικασία επικοινωνίας UAV και GCS.

5.3 Χρήση 5G σε ρομποτικές επικοινωνίες

Τα δικτυωμένα ρομποτικά συστήματα παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα πλεονεκτήματα, σε αυτή την εργασία εστιάζουμε στην εφαρμογή των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) ή πέραν αυτού (B5G) σε ρομποτικά συστήματα. Τα χαρακτηριστικά της υψηλής ταχύτητας δεδομένων, του χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και της αξιόπιστης σταθερότητας στα δίκτυα 5G ή B5G προσφέρουν ευκαιρίες για την επίτευξη καινοτομιών σε δικτυωμένα ρομποτικά συστήματα. Ξεκινάμε τη συζήτησή μας διακρίνοντας διαφορετικές κατηγορίες επίγειων ρομπότ και τα αντίστοιχα σενάρια εφαρμογής τους. Σε σύγκριση με τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα, τα ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

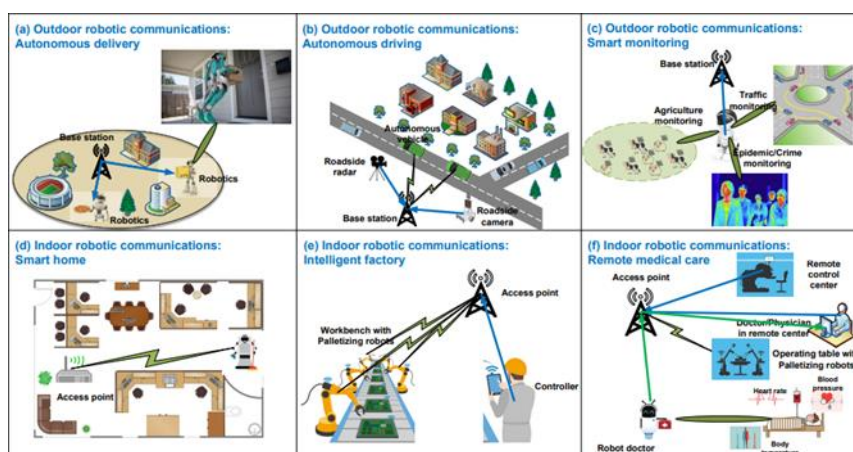
- Ολοκληρωμένη τοποποίηση και επικοινωνία. Η ρομποτική τοπική προσαρμογή είναι απαραίτητη για τα ρομπότ για την ολοκλήρωση ορισμένων εργασιών, γεγονός που παρέχει επίσης μια σταθερή βάση για την ευφυΐα των ρομπότ. Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις, ωστόσο, τείνουν να τονίζουν τον εντοπισμό εις βάρος του υλικού πολυπλοκότητα, ενώ οι στρατηγικές κυψελοειδούς βοήθειας που μπορούν ταυτόχρονα να εξασφαλίσουν αποτελεσματικό εντοπισμό και να μειώσουν το κόστος υλικού δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος. Έτσι, είναι επιθυμητή η ενσωμάτωση της επικοινωνίας και της τοπικής προσαρμογής, για την οποία οι περιορισμοί και οι προκλήσεις μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: 1) Τα ρομπότ εργασίας μπορούν να εισέλθουν σε νεκρές ζώνες επικοινωνίας. 2) Η προσέγγιση για την εγκαθίδρυση επικοινωνιών μεταξύ σταθμών βάσης (BS)/σημείων πρόσβασης (APs) και ρομπότ διεγείρει την ακρίβεια εντοπισμού για τα ρομπότ αφού συσσωρευση σφαλμάτων και υψηλό κόστος από ενσωματωμένους αισθητήρες σε αυτά. 3) Η ποιότητα των επικοινωνιών μεταξύ ενός BS/AP και του ρομπότ καθορίζει πόσες επικοινωνίες μπορούν να ανταλλάσσονται για πολυπλοκότητα υλικού στο ρομπότ.
- Δυναμική αυτοαπόφαση. Σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα επικοινωνίας, στα ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας με δυνατότητα 5G/B5G, τα ρομπότ πρέπει να εξουσιοδοτηθούν με την ικανότητα λήψης αποφάσεων για γρήγορη προσαρμογή στα δυναμικά περιβάλλοντά τους. Αυτό δείχνει ότι τα ρομπότ πρέπει να

λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς την παρέμβαση ανθρώπων μαθαίνοντας από το άγνωστο περιβάλλον να προσαρμόζουν στιγμιαία τις πολιτικές ελέγχου τους. Επιπλέον, η πολιτική απόφασης πρέπει να στοχεύει στην εξέλιξη του δικτύου υπερμετρίας αντί να χτυπά μυωπικά τα τρέχοντα οφέλη στα συμβατικά δίκτυα επικοινωνίας.

- Απαιτήσεις Ετερογενούς Κινητικότητας και Ετερογενούς Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS). Στα συμβατικά δίκτυα επικοινωνίας, όταν εξετάζεται η κίνηση των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, η κινητικότητα των χρηστών συνήθως αγνοείται και οι απαιτήσεις QoS της χρονικής τους παραλλαγής απλοποιούνται ως σταθερή τιμή. Αυτό φυσικά μειώνει το δυναμικό σενάριο σε στατικό. Ωστόσο, όταν εξετάζονται οι ετερογενείς απαιτήσεις κινητικότητας/QoS σε ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας, ο σχεδιασμός δυναμικής τροχιάς και η διαχείριση πόρων εισάγουν πιο σύνθετες παραμέτρους που πρέπει να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα σε σύγκριση με τα στατικά δίκτυα επικοινωνίας.
- Απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης για τηλεχειρισμό μη επανδρωμένων ρομποτικών. Δεδομένου ότι τα ρομποτικά με δυνατότητα 5G/B5G είναι δυσανεκτικά στον κίνδυνο και ευαίσθητα στις καθυστερήσεις, είναι απαραίτητη η αδιάλειπτη και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα προκειμένου να παρέχονται εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης για τα επίγεια ρομπότ. Αυτό είναι απαραίτητο για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις και να παρέχεται γενική ασφάλεια λειτουργίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ρομποτικά δίκτυα επικοινωνίας με δυνατότητα 5G/B5G ήταν το επίκεντρο του ερευνητικού πεδίου της αυτοκινητοβιομηχανίας για λίγο. Η Εικόνα 29 απεικονίζει τρία σενάρια ρομποτικής επικοινωνίας σε εξωτερικούς χώρους και τρία σενάρια ρομποτικής επικοινωνίας εσωτερικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο ρομποτικό δίκτυο επικοινωνίας εξωτερικού χώρου χαρακτηρίζει την εφαρμογή δικτύων 5G/B5G σε σενάριο αυτόνομης παράδοσης. Βιομηχανικές εταιρείες όπως η Amazon, η DHL, η Jingdong και η UPS, έχουν ήδη χρησιμοποιήσει αυτόνομα ρομπότ για την παράδοση εμπορευμάτων με τρόπο εξοικονόμησης χρόνου και ενέργειας. Στο δεύτερο υπαίθριο δίκτυο ρομποτικής επικοινωνίας, ένα κινητό-συνδεδεμένο συζητείται το σενάριο αυτόνομης οδήγησης, όπου εξετάζονται οι επικοινωνίες R2I που βασίζονται σε οδικές μονάδες αντί για

δαπανηρούς επί του σκάφους αισθητήρες και ραντάρ. Το τρίτο υπαίθριο δίκτυο ρομποτικής επικοινωνίας απεικονίζει το σενάριο έξυπνης παρακολούθησης που βασίζεται σε επίγεια ρομπότ. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ρομπότ στη διασταύρωση για την παρακολούθηση των πληροφοριών κυκλοφορίας και την αποστολή των συλλεγόμενων πληροφοριών στο κέντρο ελέγχου.



Εικόνα 29: Χρήση 5G σε ρομποτικές εφαρμογές.

Επιπλέον, τα ρομπότ μπορούν να αναπτυχθούν σε ανοιχτό δημόσιο χώρο για να λάβουν τη θερμοκρασία του σώματος των πεζών ή άλλα βιολογικά δείγματα για την παρακολούθηση της πανδημίας και μπορούν επίσης να έχουν τη λειτουργία αναγνώρισης προσώπου για την παρακολούθηση του εγκλήματος. Επιπλέον, τα ρομπότ μπορούν να λειτουργήσουν ως ποιμενικοί σκύλοι δίνοντάς τους τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων. Το πρώτο δίκτυο ρομποτικής επικοινωνίας εσωτερικού χώρου επιδεικνύει οικιακές ρομποτικές επικοινωνίες με δυνατότητα 5G/B5G, όπως ρομπότ καθαρισμού δαπέδου, ρομποτικούς σερβιτόρους στο εστιατόριο, καθώς και ρομποτικούς κλητήρες στο εμπορικό κέντρο. Αυτά τα ρομπότ πρέπει να σχεδιάσουν τις τροχιές τους στο δυναμικό εσωτερικό περιβάλλον για να εγγυηθούν τη σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ τους και των BS/AP. Επιπλέον, οι φυσικές συγκρούσεις μεταξύ επίγειων ρομπότ ή μεταξύ ρομπότ και εμποδίων πρέπει να αποφεύγονται ανεξάρτητα από το πώς αλλάζει το περιβάλλον. Στο δεύτερο δίκτυο ρομποτικής επικοινωνίας εσωτερικού χώρου, τα ρομπότ μπορούν να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο σε αποστολές που είναι επικίνδυνες στο έξυπνο εργοστάσιο. Επιπλέον, με τη βοήθεια ρομπότ παλετοποίησης, η κατασκευή μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική και χωρίς διακοπές. Το τρίτο δίκτυο ρομποτικής επικοινωνίας εσωτερικού χώρου απεικονίζει μια απομακρυσμένη χειρουργική

επέμβαση, η οποία μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια και ομαλά με την παλετοποίηση ρομπότ με τη βοήθεια κυψελοειδών δικτύων. Έτσι, οι γιατροί σε νοσοκομεία περιοχών υψηλής αστικοποίησης μπορούν να κάνουν μια επέμβαση σε ασθενείς σε περιοχές όπου τα καλώδια Διαδικτύου είναι δύσκολα ή δεν μπορούν να περάσουν. Επιπλέον, τα κινητά ρομπότ σε ευφυή νοσοκομεία μπορούν να είναι γιατροί ρομπότ για απομακρυσμένη ιατρική φροντίδα και παρακολούθηση συλλέγοντας βιολογικά δείγματα/δεδομένα ασθενών, όπως καρδιακός ρυθμός, θερμοκρασία σώματος και αρτηριακή πίεση.

5.4 Επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή D2D

Η τεχνολογία D2D όχι μόνο επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των τερματικών, αλλά επεκτείνει επίσης τις μεθόδους σύνδεσης και πρόσβασης στο δίκτυο. Προς το παρόν, η επικοινωνία D2D μπορεί να είναι είτε άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών είτε να ολοκληρωθεί με τη βοήθεια συσκευών δικτύου. Το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας επικοινωνίας D2D χρειάζεται τη βοήθεια συσκευών δικτύου λόγω των περιορισμών χωρητικότητας των τερματικών (Doppler et al., 2009). Ως εκ τούτου, η τεχνολογία 5G τίθεται σε χρήση για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας D2D. Η τεχνολογία D2D είναι να πραγματοποιήσει μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας στο υπάρχον δίκτυο κυψελοειδούς επικοινωνίας όταν η απόσταση μεταξύ των τερματικών είναι σχετικά κοντά, επομένως η ποιότητα του καναλιού είναι καλύτερη. Αυτή τη στιγμή, η τεχνολογία επικοινωνίας D2D με τους πόρους συχνότητας του συστήματος πολυπλεξίας μπορεί να επιτύχει μεγάλες διεκπεραιωτικότητες και την παρεμβολή στην επικοινωνία D2D προς το η αρχική κυψελοειδές επικοινωνία του συστήματος μπορεί να είναι καλά ελέγχεται από έλεγχο ισχύος. Η επικοινωνία D2D αυξάνει την αντοχή των κινητών τερματικών και μειώνει την ισχύ μετάδοσης πολύ κοντά. Εν τω μεταξύ, μεταδίδονται παράμετροι δεδομένων απευθείας μεταξύ συσκευών χωρίς διέλευση από τους σταθμούς βάσης. Μπορεί όχι μόνο να μειώσει το φορτίο επικοινωνίας των σταθμών βάσης και να πραγματοποιήσει τη μετάδοση υψηλού ρυθμού σε μικρή απόσταση, αλλά και να αυξήσει τη συνολική απόδοση της κυψέλης και να βελτιώσει τον ρυθμό χρήσης του φάσματος. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας D2D. Οι (Botson et al., 2014) πρότειναν ένα σχέδιο κατανομής πόρων που εξαρτάται από τη θέση για κινητές επικοινωνίες D2D για την ασφάλεια του αυτοκινήτου εφαρμογές. Οι (Lien et al., 2016) εισήγαγαν τις υπηρεσίες

εγγύτητας D2D που υποστηρίζουν απευθείας ανταλλαγές δεδομένων μεταξύ του εξοπλισμού των χρηστών. Οι (K. , Y. F. R. , L. H. Wang, 2016) πρότειναν ένα ασύρματο δίκτυο με επίκεντρο τις πληροφορίες αρχιτεκτονική εικονικοποίησης, όπου το D2D επιτρέπει την κοινή χρήση του υποδομής και περιεχομένου μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών. D2D η τεχνολογία επικοινωνίας παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη τοπική επικοινωνία μηχανής με μηχανή (M2M), ειδικά όταν πρόκειται για τα τεράστια προβλήματα που επιβαρύνουν τα μηχανήματα στη βιομηχανία περιοχή. Συνολικά, το 5G θα εξελιχθεί σε προηγμένο τεχνολογία επικοινωνίας με χαμηλότερη καθυστέρηση, υψηλότερη μετάδοση ποσοστό και καλύτερη επιχειρηματική εμπειρία, καθώς και τα χαρακτηριστικά της πανταχού παρούσας αντίληψης, συνδεσιμότητας και ευφυΐας. Η εξέλιξη του 5G μπορεί να προωθήσει τη βαθιά ενοποίηση της πληροφορικής και όλων των πτυχών της κοινωνικής ζωής, ιδιαίτερα τη σύγκλιση της πληροφορικής για κινητά και της εκβιομηχάνισης. Δεδομένου ότι το 5G θα συνδεθεί πλήρως μεταξύ ανθρώπων και πραγμάτων, θα γίνει γεγονός η επίτευξη πανταχού παρούσας βαθιάς συνεργασίας και εξατομικευμένης προσαρμογής, καθώς και η διαμόρφωση ενός νέου βιομηχανικού οικοσυστήματος.

5.5 M2M επικοινωνία και IoT

Η επικοινωνία από μηχανή με μηχανή (M2M) είναι μια μορφή επικοινωνίας δεδομένων που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες οντότητες που δεν απαιτούν απαραίτητα ανθρώπινη αλληλεπίδραση ή παρέμβαση στη διαδικασία της επικοινωνίας. Το M2M ονομάζεται επίσης ως Επικοινωνία Τύπου Μηχανής (MTC) στο 3GPP. Διαφέρει από τα τρέχοντα μοντέλα επικοινωνίας με τους τρόπους που περιλαμβάνει:

- νέα ή διαφορετικά σενάρια αγοράς,
- χαμηλότερο κόστος και προσπάθεια,
- ένα δυναμικά πολύ μεγάλο αριθμό τερματικών επικοινωνίας και
- μικρή κίνηση ανά τερματικό. Γενικά η επικοινωνία M2M θα μπορούσε να μεταφερθεί μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας (π.χ. δίκτυα GSM-GPRS, CDMA EVDO). Στην επικοινωνία M2M, ο ρόλος του δικτύου κινητής τηλεφωνίας περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό στο να χρησιμεύσει ως δίκτυο μεταφορών.

Με μια πιθανή αγορά πιθανώς 50 εκατομμυρίων συνδεδεμένων συσκευών, το M2M

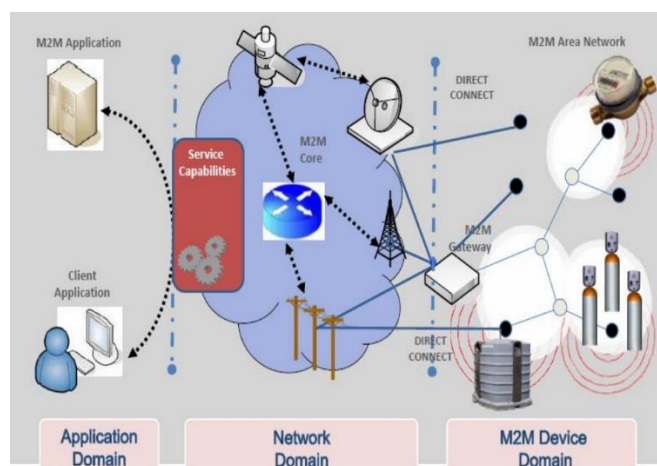
προσφέρει τεράστιες ευκαιρίες καθώς και μοναδικές προκλήσεις. Αυτές οι συσκευές ποικίλλουν από οχήματα υψηλής κινητικότητας που επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο, έως ακίνητες συσκευές ανάγνωσης μετρητών που στέλνουν μικρές ποσότητες δεδομένων σποραδικά. Οι εφαρμογές του M2M καλύπτουν πολλούς τομείς και οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται σήμερα το M2M δίνονται παρακάτω:

- Ασφάλεια: Παρατηρήσεις, συστήματα συναγερμού, έλεγχος πρόσβασης, ασφάλεια αυτοκινήτου/οδηγού.
- Παρακολούθηση και ιχνηλάτηση: Διαχείριση στόλου, διαχείριση παραγγελιών, παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων, πλοήγηση, πληροφορίες κυκλοφορίας, δρόμα, βελτιστοποίηση κυκλοφορίας/διεύθυνση.
- Πληρωμή: Σημείο πώλησης, αυτόματοι πωλητές, μηχανές τυχερών παιχνιδιών.
- Υγεία: Παρακολούθηση ζωτικών σημείων, υποστήριξη ηλικιωμένων ή ατόμων με ειδικές ανάγκες, σημεία τηλεϊατρικής πρόσβασης στο διαδίκτυο, απομακρυσμένη διάγνωση.
- Απομακρυσμένη συντήρηση/Έλεγχος: Αισθητήρες, Φωτισμός, αντλίες, βαλβίδες, έλεγχος ανελκυστήρα, έλεγχος μηχανημάτων αυτόματης πώλησης, διαγνωστικά οχημάτων.
- Μετρήσεις: Ρεύμα, αέριο, νερό, θέρμανση, έλεγχος δικτύου, βιομηχανική μέτρηση.
- Κατασκευή: Παρακολούθηση και αυτοματισμός της αλυσίδας παραγωγής.
- Διαχείριση Εγκαταστάσεων: Αυτοματισμός σπιτιού / κτιρίου / πανεπιστημιούπολης.

Η Εικόνα 30 δείχνει μια απλή αρχιτεκτονική συστημάτων M2M με τα επιμέρους στοιχεία του. Τα διάφορα στοιχεία και στοιχεία ενός συστήματος M2M περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

Συσκευή M2M: Συσκευή ικανή να απαντά σε αίτημα για δεδομένα που περιέχονται σε αυτές τις συσκευές ή ικανή να μεταδίδει δεδομένα αυτόνομα. Οι αισθητήρες και οι συσκευές επικοινωνίας είναι τα τελικά σημεία των εφαρμογών M2M. Γενικά, οι συσκευές μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο δίκτυο ενός χειριστή ή πιθανώς θα διασυνδεθούν χρησιμοποιώντας τεχνολογίες WPAN όπως το ZigBee ή το Bluetooth. Η επιστροφή στο δίκτυο ενός χειριστή επιτυγχάνεται μέσω πυλών που ενσωματώνουν και διαχειρίζονται όλες τις συσκευές. Κατά συνέπεια, η διευθυνσιοδότηση και η

αναγνώριση, π.χ., η δρομολόγηση, των συσκευών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις πύλες. Οι συσκευές που συνδέονται μέσω πυλών είναι συνήθως εκτός της ευθύνης του χειριστή, αλλά ανήκουν σε εφαρμογές M2M που παρέχονται από παρόχους υπηρεσιών ή εφαρμογών.



Εικόνα 30: Αρχιτεκτονική συστήματος M2M (Niraj Pandey, 2016).

Οι αισθητήρες και οι συσκευές που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο ενός χειριστή (μέσω ενσωματωμένης SIM, TPM και στοίβας ραδιοφώνου ή πρόσβασης σταθερής γραμμής) είναι τα τελικά σημεία του δικτύου. Επομένως, η ευθύνη όσον αφορά τη λογοδοσία, τις SLA κ.λπ., ανήκει στον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου (ή στο εικονικό φορέα εκμετάλλευσης δικτύου). Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όσον αφορά το TPM όπου είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι η μονάδα είναι πραγματικά τόσο αξιόπιστη και καλά προστατευμένη (Niraj Pandey, 2016).

Τοπικό δίκτυο M2M (Device Domain): Παρέχετε συνδεσιμότητα μεταξύ Συσκευών M2M και πυλών M2M π.χ. προσωπικό δίκτυο.

Πύλη M2M: Εξοπλισμός που χρησιμοποιεί δυνατότητες M2M για να εξασφαλίσει τη διασύνδεση και τη διασύνδεση των συσκευών M2M στο δίκτυο επικοινωνίας. Οι πύλες και οι δρομολογητές είναι τα τελικά σημεία του δικτύου του χειριστή σε σενάρια όπου οι αισθητήρες και οι συσκευές M2M δεν συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Έτσι, το έργο των πυλών και των δρομολογητών είναι διπλό. Πρώτον, πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι συσκευές του τριχοειδούς δικτύου μπορούν να προσεγγιστούν από έξω και αντίστροφα. Αυτές οι λειτουργίες αντιμετωπίζονται από τα εργαλεία πρόσβασης, όπως η αναγνώριση, η διεύθυνση, η λογιστική κ.λπ., από την πλατφόρμα του χειριστή και πρέπει να υποστηρίζονται και από την πλευρά της πύλης.

Έτσι, η πλατφόρμα και η πύλη σχηματίζουν ένα κατακεμημένο σύστημα, όπου οι γενικές και αφηρημένες δυνατότητες υλοποιούνται από την πλευρά της πύλης. Κατά συνέπεια, θα υπάρχει μια ροή ελέγχου μεταξύ της πύλης και της πλατφόρμας του χειριστή που πρέπει να διακρίνεται από το κανάλι δεδομένων που πρόκειται να μεταφέρει δεδομένα εφαρμογής M2M. Δεύτερον, μπορεί να υπάρχει η ανάγκη χαρτογράφησης ογκωδών πρωτοκόλλων Διαδικτύου με τα ελαφριά αντίστοιχά τους σε δίκτυα αισθητήρων χαμηλής ισχύος. Ωστόσο, η τελευταία εφαρμογή μπορεί να χάσει τη συνάφειά της καθώς υπάρχουν διαθέσιμες υλοποιήσεις IPv6 για δίκτυα αισθητήρων, που επιτρέπουν μια προσέγγιση all-IP.

Δίκτυα επικοινωνίας M2M (Τομέας δικτύου): Καλύπτει το επικοινωνίες μεταξύ της πύλης M2M και των εφαρμογών M2M, π.χ. xDSL, LTE, WiMAX και WLAN.

Εφαρμογές M2M: Περιέχει το επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού όπου τα δεδομένα περνούν από διάφορες υπηρεσίες εφαρμογών και χρησιμοποιούνται από τις συγκεκριμένες μηχανές επεξεργασίας επιχειρήσεων. Οι εφαρμογές M2M θα βασίζονται στα στοιχεία υποδομής (π.χ. ενεργοποιητές πρόσβασης) που παρέχονται από τον χειριστή. Οι εφαρμογές μπορεί είτε να στοχεύουν σε τελικούς χρήστες, όπως χρήστες μιας συγκεκριμένης λύσης M2M, είτε σε άλλους παρόχους εφαρμογών για να προσφέρουν πιο εκλεπτυσμένα δομικά στοιχεία με τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν πιο εξελιγμένες λύσεις και υπηρεσίες M2M π.χ. λειτουργικότητα εξυπηρέτησης πελατών, περίπλοκες λειτουργίες χρέωσης, κ.λπ. Αυτές οι υπηρεσίες ή ενεργοποιητές υπηρεσιών μπορεί να σχεδιάζονται και να προσφέρονται από έναν πάροχο εφαρμογής, αλλά μπορεί να προσφέρονται από τον χειριστή μέσω της ίδιας της πλατφόρμας χειριστή (Niraj Pandey, 2016).

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα

Ο αριθμός των φορητών συσκευών για το IoT αυξάνεται ραγδαία και πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα επικοινωνίας υψηλής χωρητικότητας και ευρυζωνικής συνδεσιμότητας που να μπορεί να υποστηρίξει αξιόπιστα πολλές συσκευές IoT. Η τεχνολογία του 5G που υιοθετήθηκε πρόσφατα αφήνει πολλές δυνατότητες για την αξιοποίηση όλων αυτών των δυνατοτήτων, με σκοπό να αλλάξουν την καθημερινή ζωή εκατομμύρια ανθρώπων προς το καλύτερο. Αυτό σημαίνει, όχι μόνο γρήγορη και εύκολη πρόσβαση σε προϊόντα, πληροφορίες και υπηρεσίες, αλλά αυτό θα πρέπει να γίνεται με τρόπο ασφαλής, αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα οφείλουν οι νέες τεχνολογίες όχι μόνο να είναι περιβαλλοντικά ουδέτερες, αλλά στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό, να έχουν ακόμη και θετικό αντίκτυπο προς το περιβάλλον. Για να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις, τα ιπτάμενα UAV προσέλκυσαν πρόσφατα ευρύ ερευνητικό ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν τρεις σημαντικές παράγοντες: Πρώτον, το ολοκληρωμένο δίκτυο διάστημα-αέρας-εδάφους για συστήματα επικοινωνίας B5G. Συζητήθηκαν οι σχετικές προκλήσεις σχεδιασμού που μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση αυτής της πρόσφατα εισαγόμενης αρχιτεκτονικής δικτύου. Δεύτερον, παρέχεται μια επισκόπηση των πρόσφατων ερευνητικών δραστηριοτήτων σχετικά με τις επικοινωνίες UAV που συνδυάζουν τις τεχνικές 5G από την άποψη του φυσικού επιπέδου, του επιπέδου δικτύου και της κοινής επικοινωνίας, του υπολογισμού και της προσωρινής αποθήκευσης. Στο τέλος, φάνηκαν αρκετά ανοιχτά ερευνητικά ζητήματα που επινοήθηκαν για μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις. Αυτό είναι ένα επίκαιρο και ουσιαστικό θέμα με την ελπίδα ότι μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα καλό σημείο εκκίνησης για τις εφαρμογές IoT του 5G/B5G.

Κεφάλαιο 7 – Βιβλιογραφία

- 3GPP TR 38.913 v14.3.0. (2017). *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies.*
- 3GPP TS 38.801 v14.0.0. (2017). *3rd Generation Partnership Project; NR; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14).*
- 5GNorma Project. (2016). *5G-NORMA – 5G Novel Radio Multiservice adaptive network Architecture.*
- 5GPPP Architecture Working Group. (2017). *View on 5G Architecture: Version 2.0.*
- A. Guerra, F. G. D. D. (2015). Position and orientation error bound for wideband massive antenna arrays. *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshop.*, 853–858.
- A. Sayeed, A. P. (2008). Secure wireless communications: Secret keys through multipath. *Acoustics Speech and Signal Processing 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference*, 3013–3016.
- Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*, 6, 3619–3647. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779844>
- Ali, B., Gregory, M. A., & Li, S. (2021). Multi-Access Edge Computing Architecture, Data Security and Privacy: A Review. *IEEE Access*, 9, 18706–18721. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053233>
- Al-Shibly, M. A. M., Habaebi, M. H., & Chebil, J. (2012). Carrier aggregation in Long Term Evolution-Advanced. *2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, 154–159. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC.2012.6287153>
- Alzenad, M., Shakir, M. Z., Yanikomeroglu, 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>
- 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>
- Azzouzi, S., Cremer, M., Dettmar, U., Kronberger, R., & Knie, T. (2011). New measurement results for the localization of UHF RFID transponders using an Angle of Arrival (AoA) approach. *2011 IEEE International Conference on RFID*, 91–97. <https://doi.org/10.1109/RFID.2011.5764607>
- Badotra, S., & Panda, S. N. (2020). Software-Defined Networking: A Novel Approach to Networks. In *Handbook of Computer Networks and Cyber Security* (pp. 313–339). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22277-2_13
- Baek, J., Han, S. I., & Han, Y. (2018). Optimal Resource Allocation for Non-Orthogonal Transmission in UAV Relay Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 356–359. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2778073>
- Bjerke, A., & Proakis, J. G. (2002). Equalization and Decoding for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Channels. *EURASIP JASP*, 2002(3).
- Bor-Yaliniz, I., Szyszkowicz, S. S., & Yanikomeroglu, H. (2018). Environment-Aware Drone-Base-Station Placements in Modern Metropolitans. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 372–375. <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2778242>
- Botsov, M., Klugel, M., Kellerer, W., & Fertl, P. (2014). Location dependent resource allocation for mobile device-to-device communications. *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1679–1684. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6952482>
- Cao, X., Yang, P., Alzenad, M., Xi, X., Wu, D., & Yanikomeroglu, H. (2018). Airborne Communication Networks: A Survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 1907–1926. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2864423>
- Casado, M., Foster, N., & Guha, A. (2014a). Abstractions for software-defined networks. *Communications of the ACM*, 57(10), 86–95. <https://doi.org/10.1145/2661061.2661063>

- Casado, M., Foster, N., & Guha, A. (2014b). Abstractions for software-defined networks. *Communications of the ACM*, 57(10), 86–95. <https://doi.org/10.1145/2661061.2661063>
- CHARISMA. (2021). *End to end virtualised security*. <https://www.charisma5g.eu/>
- Cheng, N., Xu, W., Shi, W., Zhou, Y., Lu, N., Zhou, H., & Shen, X. (2018). Air-Ground Integrated Mobile Edge Networks: Architecture, Challenges, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 56(8), 26–32. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1701092>
- Chikhale, D., Deosarkar, S., & Munde, M. (2021). Carrier Aggregation in 5g Using Millimeter Range Communication. *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GUCON50781.2021.9574017>
- Chin, W., Fan, Z., & Haines, R. (2014). Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(2), 106–112. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6812298>
- Chiosi, M. (2020). *Network Functions Virtualisation (NFV)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4110.2883>
- CISCO. (2014). *The Internet of Things reference model*.
- Cosmas, J., Jawad, N., Salih, M., Redana, S., & Bulakci, O. (2019). *5G PPP architecture working group view on 5G architecture*.
- D. Patron, H. P. A. M. D. P. K. D. (2013). Improved design of a crlh leaky-wave antenna and its application for doa estimation. *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) IEEE-APS Topical Conference*, 1343–1346.
- Dahlman, E., & Skold, J. (2018). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. In *Science directs*.
- 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>
- Doppler, K., Rinne, M., Wijting, C., Ribeiro, C., & Hugel, K. (2009). Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks. *IEEE Communications Magazine*, 47(12), 42–49. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5350367>
- Ericsson. (2020). Evolving LTE to Fit the 5G Future. *Ericsson Technology Review*.
- Erik G. Larsson. (2017, March). Massive MIMO for 5G. *Belgium IEEE 5G Tech*.
- EU PROJECT 5G NORMA. (2015). *Functional Network Architecture and Security Requirements*, https://5gnorma.5g-ppp.eu/wpcontent/uploads/2016/01/5G_NORMA_D3.1.pdf.
- EU PROJECT METIS-II. (2020). *EU PROJECT METIS-II, 5G RAN Architecture and Functional Design White Paper*, <https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/5G-PPP-METIS-II-5G-RANArchitecture-White-Paper.pdf>.
- Fleisch, E. (2010). What is the internet of things? An economic perspective. *Economics, Management, and Financial Markets*, 5(2), 125–157.
- Fournogerakis, P. (2015). *Welcome to the Flex5Gware project site*.
- G. Yang, X. L. Y. L. H. C. M. X. D. W. and H. R. abd S. B. R. (2021). *A telecom perspective on the internet of drones: From LTE-advanced to 5G*. 650.
- Gapeyenko, M., Bor-Yaliniz, I., Andreev, S., Yanikomeroglu, H., & Koucheryavy, Y. (2018). Effects of Blockage in Deploying mmWave Drone Base Stations for 5G Networks and Beyond. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403671>
- Gharibi, M., Boutaba, R., & Waslander, S. L. (2016). Internet of Drones. *IEEE Access*, 4, 1148–1162. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2537208>
- Ghazzai, H., ben Ghorbel, M., Kadri, A., Hossain, Md. J., & Menouar, H. (2017). Energy-Efficient Management of Unmanned Aerial Vehicles for Underlay Cognitive Radio Systems. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 1(4), 434–443. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2017.2750721>
- GSA. (2019). *5G Deployment, State of Play in Europe, USA and Asia, EU*.

- GSA. (2020). *Global Progress to 5G - Trials, Deployments and Launches*.
- GSA. (2021). *LTE and 5G in the Middle East and Africa –a snapshot*.
- GSMA. (2018). *Road to 5G: Introduction and Migration*.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
- Guidi, F., Guerra, A., & Dardari, D. (2016). Personal Mobile Radars with Millimeter-Wave Massive Arrays for Indoor Mapping. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 15(6), 1471–1484. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2467373>
- Hajlaoui, E., Zaier, A., Khelifi, A., Ghodhbane, J., Hamed, M. Ben, & Sbita, L. (2020). 4G and 5G technologies: A Comparative Study. *2020 5th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATSIP49331.2020.9231605>
- Handboon, I. (2003). *Security in telecommunications and information technology—an overview of issues and the deployment of existing itu-t recommendations for secure telecommunications*.
- 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>
- Hodara, H., & Skaljko, E. (2021). From 1G to 5G. *Fiber and Integrated Optics*, 40(2–3), 85–183. <https://doi.org/10.1080/01468030.2021.1919358>
- 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>
- <http://2gprod.com/what-is-2g-technologyanswer.html>. (n.d.).
- Hua, M., Li, C., Huang, Y., & Yang, L. (2017). Throughput maximization for UAV-enabled wireless power transfer in relaying system. *2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2017.8170970>
- Hucaby, D. (2010). CCNP SWITCH 642-813 Official Certification Guide. In *Cisco Press*.
- Jiajia Liu State Key Laboratory of Integrated Services Networks, S. of C. E. X. U. X. C. ; Y. S. Z. Md. F. N. K. (2018). Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 2714–2741.
- Kaloxyllos, A., Rost, P., Galis, A., & Marsch, P. (2016). *5G PPP Architecture Working Group View on 5G Architecture*.
- Kermani, M. M., Zhang, M., Raghunathan, A., & Jha, N. K. (2013). Emerging frontiers in embedded security. *2013 26th International Conference on VLSI Design and 2013 12th International Conference on Embedded Systems (Pp. 203-208)*. *IEEE*.
- Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R., & Khan, S. (2012). Future internet: the internet of things architecture, possible applications and key challenges. *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology (Pp. 257-260)*. *IEEE*.
- 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>
- Khawaja, W., Ozdemir, O., & Guvenc, I. (2017). UAV Air-to-Ground Channel Characterization for mmWave Systems. *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8288376>
- Khosravi, Z., Gerasimenko, M., Andreev, S., & Koucheryavy, Y. (2018). Performance Evaluation of UAV-Assisted mmWave Operation in Mobility-Enabled Urban Deployments. *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.8441321>
- 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., 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>
- L. Zeng. (2009). High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 27(9), 1654–1662.
- 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>
- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 186–195. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761>
- Lazarescu, M. T. (2013). Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 3(1), 45–54.
- Lee, W. C. Y. (1995). *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, Mc Graw-Hill.
- Li, B., Fei, Z., & Zhang, Y. (2019). UAV Communications for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2241–2263. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>
- Li, K., Ni, W., Wang, X., Liu, R. P., Kanhere, S. S., & Jha, S. (2016). Energy-Efficient Cooperative Relaying for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 15(6), 1377–1386. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2467381>
- Liang, B. (2017). “Mobile edge computing,” *Key technologies for 5G wireless systems*.
- Lien, S.-Y., Chien, C.-C., Liu, G. S.-T., Tsai, H.-L., Li, R., & Wang, Y. J. (2016). Enhanced LTE Device-to-Device Proximity Services. *IEEE Communications Magazine*, 54(12), 174–182. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1500670CM>
- Liu, C. H., Chen, Z., Tang, J., Xu, J., & Piao, C. (2018). Energy-Efficient UAV Control for Effective and Fair Communication Coverage: A Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 2059–2070. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2864373>
- 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. *2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems*, 553–558. <https://doi.org/10.1109/HPCC-CSS-ICSS.2015.155>
- 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>
- Long, T., Ozger, M., Cetinkaya, O., & Akan, O. B. (2018). Energy Neutral Internet of Drones. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 22–28. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700454>
- Lu, M., Bagheri, M., James, A. P., & Phung, T. (2018). Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension. *IEEE Access*, 6, 29865–29884. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841376>
- Marano, S., & Willett, P. (2018). Resource Allocation in Energy-Harvesting Sensor Networks. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, 4(3), 585–598. <https://doi.org/10.1109/TSIPN.2018.2800645>
- McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., & Turner, J. (2008). OpenFlow. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 38(2), 69–74. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
- Md Hasan Mahmud. (2019). Cellular Mobile Technologies (1G to 5G) and Massive MIMO.

- International Journal of Science and Research*, 8(7), 929–937.
- Metis. (2016). *Welcome to the EU project METIS-II*.
- Mondal, S. A. S. and J. Routh. (2015). A Survey on Evolution of Wireless Generations 0G to 7G. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering (IJARSE)*, 1(2), 5–10.
- Mosenia, A., & Jha, N. K. (2016). A comprehensive study of security of internet. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 5(4), 586–602.
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2016). Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510870>
- Mozaffari, M., Taleb Zadeh Kasgari, A., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). Beyond 5G With UAVs: Foundations of a 3D Wireless Cellular Network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(1), 357–372. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2879940>
- Ms. Lopa J. Vora. (n.d.). EVOLUTION OF MOBILE GENERATION TECHNOLOGY: 1G TO 5G AND REVIEW OF UPCOMING WIRELESS TECHNOLOGY 5G. *International Journal Modern Trends in Engineering and Research*.
- Naqvi, S. A. R., Hassan, S. A., Pervaiz, H., & Ni, Q. (2018). Drone-Aided Communication as a Key Enabler for 5G and Resilient Public Safety Networks. *IEEE Communications Magazine*, 56(1), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700451>
- Naqvi, S., Chakareski, J., Mastrorade, N., Xu, J., Afghah, F., & Razi, A. (2018). Energy Efficiency Analysis of UAV-Assisted mmWave HetNets. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422870>
- Nasir, A. A., Tuan, H. D., Duong, T. Q., & Poor, H. V. (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. (2020). Joint Communication, Computation, Caching, and Control in Big Data Multi-Access Edge Computing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19(6), 1359–1374. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2908403>
- Nguyen, M.-N., Nguyen, L. D., Duong, T. Q., & Tuan, H. D. (2019). Real-Time Optimal Resource Allocation for Embedded UAV Communication Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(1), 225–228. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2867775>
- Nikhil Bhandari, S. K. (2017). Evolution of Cellular Network: From 1G to 5G. *International Journal of Engineering and Techniques*, 3(5).
- Niraj Pandey. (2016). *M2M communication concept*.
- Okwuibe, J., Liyanage, M., Ahmad, I., & Ylianttila, M. (2018). Cloud and MEC security. In *Wiley*.
- Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., Kusume, K., Marsch, P., Maternia, M., Queseth, O., Schellmann, M., Schotten, H., Taoka, H., Tullberg, H., Uusitalo, M. A., Timus, B., & Fallgren, M. (2014). Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Communications Magazine*, 52(5), 26–35. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815890>
- Pan, H., Liew, S. C., Liang, J., Shao, Y., & Lu, L. (2018). Network-Coded Multiple Access on Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(9), 2071–2086. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2864414>
- Park, J., Lee, H., Eom, S., & Lee, I. (2019). UAV-Aided Wireless Powered Communication Networks: Trajectory Optimization and Resource Allocation for Minimum Throughput Maximization. *IEEE Access*, 7, 134978–134991. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2941278>
- Pedersen, K., Frederiksen, F., Rosa, C., Nguyen, H., Garcia, L. G., & Wang, Y. (2011a). Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 89–95. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783991>
- Pedersen, K., Frederiksen, F., Rosa, C., Nguyen, H., Garcia, L. G., & Wang, Y. (2011b).

- Carrier aggregation for LTE-advanced: functionality and performance aspects. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 89–95.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783991>
- Pi, Z., & Khan, F. (2011). An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 101–107.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783993>
- RANI P. TIDKE, P. S. U. D. S. D. U. J. T. (2021). A Literature Review On: Wireless Technologies From 0G to 7G. *ICONIC RESEARCH AND ENGINEERING JOURNALS*, 4(6), 59–64.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! *IEEE Access*, 1, 335–349.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- Ratasuk, R., Tolli, D., & Ghosh, A. (2010). Carrier Aggregation in LTE-Advanced. *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/VETECS.2010.5493902>
- Redana, S., Bulakci, Ö., Zafeiropoulos, A., Gavras, A., Tzanakaki, A., Albanese, A., ..., & Zhang, Y. (2019). *5G PPP architecture working group: View on 5G architecture*.
- Rost, P., Banchs, A., Berberana, I., Breitbach, M., Doll, M., Droste, H., Mannweiler, C., Puente, M., Samdanis, K., & Sayadi, B. (2016). Mobile Network Architecture Evolution towards 5G. *IEEE Communications Magazine*, 54(6).
- Ruan, L., Wang, J., Chen, J., Xu, Y., Yang, Y., Jiang, H., Zhang, Y., & Xu, Y. (2018). Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework. *China Communications*, 15(10), 194–209.
<https://doi.org/10.1109/CC.2018.8485481>
- Sanjab, A., Saad, W., & Basar, T. (2017). Prospect theory for enhanced cyber-physical security of drone delivery systems: A network interdiction game. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996862>
- Satyanarayanan, M., Bahl, V., Caceres, R., & Davies, N. (2011). The Case for VM-based Cloudlets in Mobile Computing. *IEEE Pervasive Computing*.
<https://doi.org/10.1109/MPRV.2009.64>
- Sboui, L., Ghazzai, H., Rezki, Z., & Alouini, M.-S. (2017). Energy-Efficient Power Allocation for UAV Cognitive Radio Systems. *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2017.8287971>
- Selfnet. (2015). *SELFNET: A FRAMEWORK FOR SELF-ORGANIZED NETWORK MANAGEMENT IN VIRTUALIZED AND SOFTWARE DEFINED NETWORKS*.
- Sharma, P. K., & Kim, D. I. (2017). UAV-Enabled Downlink Wireless System with Non-Orthogonal Multiple Access. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269066>
- 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>
- Silva, I., Mildh, G., & Kalokylos, A. (2016). Impact of Network Slicing on 5G Radio Access Networks. *EuCNC 2016, Athens*.
- Smilarubavathy, G. , et al. (2016). The Survey on Evolution of Wireless Network Generations. *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering*, 3(5), 22–27.
- Sohail, M. F., & Leow, C. Y. (2017). Maximized fairness for NOMA based drone communication system. *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 119–123. <https://doi.org/10.1109/MICC.2017.8311744>
- Sowah, R., Acquah, M. A., Ofoli, A. R., Mills, G. A., & Koumadi, K. M. (2015). Rotational energy harvesting to prolong flight duration of quadcopters. *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/IAS.2015.7356835>
- Su, K., Li, J., & Fu, H. (2011). Smart city and the applications. *In 2011 International*

- Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC) (Pp. 1028-1031). IEEE.*
- Sun, Y., Wing Kwan Ng, D., Xu, D., Dai, L., & Schober, R. (2018). Resource Allocation for Solar Powered UAV Communication Systems. *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/SPAWC.2018.8445944>
- Sun, Y., Xu, D., Ng, D. W. K., Dai, L., & Schober, R. (2019). Optimal 3D-Trajectory Design and Resource Allocation for Solar-Powered UAV Communication Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 67(6), 4281–4298. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2900630>
- Swati Yadav, S. S. (2018). Review Paper on Development of Mobile Wireless Technologies (1G to 5G). *International Journal of Computer Science and Mobile Computing, IJCSMC*, 7(5), 94–100.
- T. S. Rappaport et al. (2017). Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—with a focus on propagation models. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 65(12), 6213–6230.
- Tajima, M. (2007). Strategic value of RFID in supply chain management. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 13(4), 261–273.
- TELECOMMUNICATION ENGINEERING CENTRE. (2020). *5G CORE NETWORK*.
- v. Savic, E. G. L. (2015). Fingerprinting-based positioning in distributed massive MIMO systems. *Proc. IEEE 82nd Veh. Technol. Conf.*, 1–5.
- Vcelak, J., Javornik, T., Sykora, J., Kandus, G., & Plevel, S. (2003). Multiple Input Multiple Output wireless systems. *Electrotechnical Review*, 70(4), 234–239.
- Vignesh. C. R. (2016). Overview on Generations of Network: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR RESEARCH IN EMERGING SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 3(1), 214–220.
- Wang, H., Rosa, C., & Pedersen, K. (2010). Performance of Uplink Carrier Aggregation in LTE-Advanced Systems. *2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference - Fall*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VETEFCF.2010.5594543>
- Wang, H., & Shen, J. (2018). Analysis of the Characteristics of Solar Cell Array Based on MATLAB/Simulink in Solar Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Access*, 6, 21195–21201. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802927>
- Wang, K. , Y. F. R. , L. H. (2016). Information-centric virtualized cellular networks with device-To-device communications. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65(11), 9319–9329.
- Wolninsky, P. W., Foschini, G. J., Golden, G. D., & Valenzuela, R. A. (2020). V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel. In *Bell Labs Report*.
- Wu, J., Wang, H., Li, N., Yao, P., Huang, Y., & Yang, H. (2018). Path planning for solar-powered UAV in urban environment. *Neurocomputing*, 275, 2055–2065. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.10.037>
- 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>
- Xie, L., Xu, J., & Zhang, R. (2019). Throughput Maximization for UAV-Enabled Wireless Powered Communication Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 1690–1703. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2018.2875446>
- Xu, J., Zeng, Y., & Zhang, R. (2017). UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Region Characterization. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269097>
- Yang, L., Chen, J., Hasna, M. O., & Yang, H.-C. (2018). Outage Performance of UAV-Assisted Relaying Systems With RF Energy Harvesting. *IEEE Communications Letters*, 22(12), 2471–2474. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2876869>
- Ye, X., Cai, X., Yin, X., Rodriguez-Pineiro, J., Tian, L., & Dou, J. (2017). Air-to-Ground Big-Data-Assisted Channel Modeling Based on Passive Sounding in LTE Networks. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1–6.

- <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2017.8269204>
- 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>
- Zeng, Y., & Zhang, R. (2017). Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(6), 3747–3760. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>
- 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, J., Chen, B., Zhao, Y., Cheng, X., & Hu, F. (2018). Data Security and Privacy-Preserving in Edge Computing Paradigm: Survey and Open Issues. *IEEE Access*, 6, 18209–18237. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2820162>
- Zhang, N., Yang, P., Ren, J., Chen, D., Yu, L., & Shen, X. (2018). Synergy of Big Data and 5G Wireless Networks: Opportunities, Approaches, and Challenges. *IEEE Wireless Communications*, 25(1), 12–18. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700193>
- Zhang, P., Durrresi, M., & Durrresi, A. (2018). Mobile Privacy Protection Enhanced with Multi-access Edge Computing. *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 724–731. <https://doi.org/10.1109/AINA.2018.00109>
- Zhang, X., Zhang, Y., Yu, R., Wang, W., & Guizani, M. (2014). Enhancing spectral-energy efficiency for LTE-advanced heterogeneous networks: a users social pattern perspective. *IEEE Wireless Communications*, 21(2), 10–17. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6812286>
- Zhao, J., Gao, F., Ding, G., Zhang, T., Jia, W., & Nallanathan, A. (2018). Integrating Communications and Control for UAV Systems: Opportunities and Challenges. *IEEE Access*, 6, 67519–67527. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879637>
- Zhou, X., Guo, J., Durrani, S., & Yanikomeroglu, H. (2018). Uplink Coverage Performance of an Underlay Drone Cell for Temporary Events. *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403634>
- Zhou, Z., Zhang, C., Xu, C., Xiong, F., Zhang, Y., & Umer, T. (2018). Energy-Efficient Industrial Internet of UAVs for Power Line Inspection in Smart Grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(6), 2705–2714. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2794320>
- Zhu, Y., Zheng, G., & Fitch, M. (2018). Secrecy Rate Analysis of UAV-Enabled mmWave Networks Using Matérn Hardcore Point Processes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(7), 1397–1409. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2825158>