ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών στα δίκτυα 5G

Ζαχαριά Αθανασία
Α.Μ: 5295

Επίβλεψη: Καθηγητής Χ. Μπούρας

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους, που με μοναδικό τρόπο ο καθένας συντέλεσαν στην περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μπούρα, για τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση. Τα σχόλια και οι υποδείξεις του αποτέλεσαν πολύτιμα εφόδια.

Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.

Πέρα και πάνω από όλα όμως, ευχαριστώ την οικογένειά μου, τους φίλους και συναδέρφους μου, για την αμέριστη και ανιδιοτελή ψυχολογική στήριξη, όσο και όλους τους ανθρώπους που με βοήθησαν να φτάσω στο τέλος αυτής της περιπέτειας.

Περίληψη

Κεντρικός στόχος των δικτύων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G) είναι η παροχή συνεχούς σύνδεσης υψηλής ταχύτητας. Στους στόχους των δικτύων περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η μεγάλη ενεργειακή απόδοση με φιλικότητα προς το περιβάλλον, η ασφάλεια και η αξιοπιστία. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι σχεδιασμένα για να υποστηρίξουν το Διαδίκτυο των πραγμάτων, επιτρέποντας τη σύνδεση στο Διαδίκτυο αισθητήρων, ανιχνευτών και άλλων συσκευών.

Εκτιμάται ότι θα προσφέρουν στο συνδρομητή τεράστιες ταχύτητες mobile Internet, μεγαλύτερες ακόμη και από 1Gbps, σταθερή ποιότητα υπηρεσιών ακόμα και εν κινήσει με υπερ-υψηλές ταχύτητες και μεγαλύτερη αυτονομία. Παράλληλα, θα υποστηρίζουν τη σύγκλιση δικτύων, υπηρεσιών και εξοπλισμού καθώς και τεράστιες δυνατότητες διασύνδεσης συσκευών/συστημάτων/αισθητήρων στο Internet (Internet of Things), καθώς μία υποδομή θα καλύπτει τις αυξημένες απαιτήσεις σε τομείς όπως αυτοκίνηση, ενέργεια, διακυβέρνηση, ιατρική φροντίδα, κατασκευές και δημόσιες μεταφορές.

Λέξεις-κλειδιά: 5G-PPP, METIS II, C-RAN, QoS, MTC, KPIs, Fronthaul, Backhaul, COTS, VNF, SDN, HoN, SON, UDN, Cloud, AAA, Hotspot, mmWave, PON, CPRI, CWDM, DWDM, NSs, APIs.

Abstract

A key objective of the fifth-generation mobile communications networks (5G) is to provide continuous high-speed connection. The objectives of the network include among others the great energy efficiency with environmental friendliness, safety and reliability. The fifth-generation networks are designed to support the Internet of things, allowing the connection to Internet of sensors, detectors and other devices.

It is estimated that it will offer to the subscriber huge speed mobile Internet, larger even than 1Gbps, consistent quality service even on the go with ultra-high speed and greater autonomy. They will also support the convergence of networks, services and equipment and enormous potential device communication / Internet access systems / sensors (Internet of Things), as an infrastructure to meet the increased demands in areas such as automotive, energy, governance, health care, construction and public transport.

Keywords: 5G-PPP, METIS II, C-RAN, QoS, MTC, KPIs, Fronthaul, Backhaul, COTS, VNF, SDN, HoN, SON, UDN, Cloud, AAA, Hotspot, mmWave, PON, CPRI, CWDM , DWDM, NSs, APIs.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή 1
Κεφάλαιο 1 – Ιστορική αναδρομή 5
1.1 Πρώτη γενιά κυψελοειδών τηλεπικοινωνιακών δικτύων 5
1.2 Δίκτυα τρίτης γενιάς 3G/UMTS 7
1.3 Δίκτυα τέταρτης γενιάς 4G 11
1.3.1 Εφαρμογές και Υπηρεσίες δικτύων 4G 14
1.3.2 Τεχνολογία 4G 15
1.4 Προβλέψεις δικτύων τέταρτης γενιάς 4G 17
1.5 Πλεονεκτήματα δικτύων 4ης γενιάς 21
1.6 Συμπεράσματα 22
Κεφάλαιο 2 – Χαρακτηριστικά δικτύων 5ης γενιάς 23
2.1 Απαιτήσεις χρηστών που ικανοποιούνται με τα δίκτυα 4G 23
2.2 Διαδικασία οικοδόμησης των 5G δικτύων 24
2.3 Νέες απαιτήσεις και υπηρεσίες που αναμένεται να ικανοποιηθούν από την 5G τεχνολογία 25
2.4 Ρυθμιστικά θέματα φάσματος για δίκτυα 5G 28
2.5 Υποστηρικτικά εργαλεία και χαρακτηριστικά 5G υπηρεσιών 31
2.5.1. Εξαιρετικά αξιόπιστες συνδέσεις με χαμηλή καθυστέρηση 34
2.5.2. Εγγυημένοι μεταβαλλόμενοι ρυθμοί με χαμηλή καθυστέρηση 35
2.5.3. Ανθεκτική ασύρματη σύνδεση ως αντιστάθμισμα στην έλλειψη υποδομών 35
2.5.4. Επικοινωνία διαφορετικών συσκευών με κλιμακούμενες ταχύτητες 36
2.5.5. Ενεργειακή απόδοση 37
2.6 Συμπεράσματα 38
Κεφάλαιο 3 - 5G Public Private Partners 41
3.1 Εισαγωγή 41
3.2 Σύντομη περιγραφή των 5G – PPP projects 42
3.2.1 Euro – 5G 42
3.2.2 5G – Exchange (5GEX) 43
3.2.3 5G – Norma 44
3.2.4 5G – XHAUL 44
3.2.5 COGNET 47
3.2.6 COHERENT 48
3.2.7 FANTASTIC – 5G 49
3.2.8 FLEX5GWARE 49
3.2.9 METIS II 50
3.2.10 mm Magic 51
3.2.11 Selfnet 52
3.2.12 Speed - 5G 53
3.2.13. 5G – Ensure 56
3.2.14 Charisma 59
3.2.15 Superfluidity 60
3.2.16 Sonata 61
3.2.17 VirtuWind 63
3.2.18 Sesame 64
3.2.19 5G – Crosshaul 65
3.3. Case Studies 67
Κεφάλαιο 4 – Κατηγοριοποίηση των 5G-PPP projects 73
4.1 Με κριτήριο την ασφάλεια (security) 73
4.1.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ασφάλειας από το project 5G – Ensure 73

4.1.2. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ασφάλειας από το project 5G NORMA 78
4.2 Με κριτήριο την ενέργεια (energy) 80
4.2.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ενέργειας από το project Flex5Gware 80
4.2.2. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ενέργειας από το project Speed5G 84
4.3 Με κριτήριο την καθυστέρηση (latency) 87
4.3.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της καθυστέρησης από το Project 5G - Crosshaul 87
Κεφάλαιο 5 – Προτεινόμενες Αρχιτεκτονικές 5G δικτύων 93
5.1 Πρώτη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Fronthaul και Backhaul 93
5.1.1. 5G ασύρματα δίκτυα 93
5.1.2. 5G δίκτυα σταθερής πρόσβασης 96
5.1.3. 5G οπτικά δίκτυα 98
5.2 Δεύτερη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Συνδυασμός NFV και SDN 100
5.2.1. Αρχιτεκτονική NFV 100
5.2.2. Αρχιτεκτονική SDN 105
5.2.3. Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV 107
5.3 Τρίτη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Μικροκυματική ζώνη (mm – wave) 109
5.3.1. Mm-wave φυσικό επίπεδο 109
5.3.2. Mm-wave Backhaul και Fronthaul 112
5.3.3. Τεμαχισμός 5G δικτύου και πολλαπλή συνδεσιμότητα 114
Κεφάλαιο 6 –Συμπεράσματα και Μελλοντικές εξελίξεις 119
Βιβλιογραφία 123

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Τεχνολογία UMTS δικτύου 9
Εικόνα 2. Εξέλιξη ασύρματων δικτύων με βάση 4 διαφορετικά κριτήρια: Τεχνολογική εξέλιξη, Εξέλιξη αλληλεπίδρασης, Εξέλιξη υπηρεσιών και εξέλιξη καταναλωτών 12
Εικόνα 3. Στόχοι της 4G ασύρματης επικοινωνίας 14
Εικόνα 4. Αρχιτεκτονική 4G δικτύου 16
Εικόνα 5. Χρήση γραμμών κινητής τηλεφωνίας από την 4G τεχνολογία 18
Εικόνα 6. Μαζική MTC (massive MTC) και κρίσιμη MTC (critical MTC) 25
Εικόνα 7. Οι τρεις γενικές 5G υπηρεσίες 26
Εικόνα 8. Η ανάπτυξη κεντρικής βασικής ζώνης (πράσινο) συμπληρώνει μια κατανεμημένη ανάπτυξη βασικής ζώνης (μπλε) 29
Εικόνα 9. Παραδείγματα του δυαδικού ρόλου για μια 5G συσκευή 33
Εικόνα 10. Δύο παραδείγματα σεναρίων που απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστη σύνδεση με χαμηλή καθυστέρηση 34
Εικόνα 11. Περιπτώσεις όπου η αυξημένη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας είναι επωφελής ή ακόμη και αναγκαία για την παροχή του επιθυμητού επιπέδου υπηρεσιών 37
Εικόνα 12. Οι κύριοι στόχοι του 5G PPP 41
Εικόνα 13. Λογότυπα των επιμέρους project του 5G – PPP 42
Εικόνα 14. Αρχικό σενάριο κατηγοριοποίησης 54
Εικόνα 15. Κοινωνία πληροφορίας σε πυκνά αστικά δίκτυα 55
Εικόνα 16. Γραφείο εικονικής πραγματικότητας 55
Εικόνα 17. Εκτεταμένο σενάριο προαστίων 56
Εικόνα 18. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύωσης βασισμένη στην ITU – T X.805 58
Εικόνα 19. Ανάπτυξη εργοστασίου 5G 67
Εικόνα 20. Ολοκλήρωση μηχανισμών AAA συστήματος σε 5G συσκευή με δορυφορική κάλυψη 70
Εικόνα 21. Ολοκλήρωση μηχανισμών ενός AAA συστήματος με 5G περιαγωγή από δορυφορικά σε επίγεια δίκτυα. 72
Εικόνα 22. Αρχιτεκτονική ενοποιημένης πύλης δικτύου (Unifier Gateway) από άκρο σε άκρο. Η πύλη αυτή περιγράφεται με το πράσινο διακεκομμένο περίγραμμα 76
Εικόνα 23. Ο Bare-metal είναι ένας διακομιστής απλού ενοικιαστή, ο οποίος και έχει στη διάθεσή του όλους τους πόρους του. Σε σύγκριση με το μοντέλο υπολογιστικού νέφους όπου πολλαπλοί χρήστες διαμένουν στο ίδιο φυσικό επίπεδο, ο συγκεκριμένος διακομιστής έχει ένα πελάτη στο διακομιστή. 77
Εικόνα 24. Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου (HLD – High Level Diagram) του Παρόχου b<>com 78
Εικόνα 25. Hotspot κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της ημέρας 82
Εικόνα 26. Αρχιτεκτονική αναφοράς δίκτυο επικοινωνίας στον τομέα της ενέργειας 85
Εικόνα 27. Ενσωμάτωση τεχνολογιών Fronthaul και Backhaul 88
Εικόνα 28. Περίπτωση χρήσης της διανομής των μέσων ενημέρωσης 89
Εικόνα 29. Περίπτωση χρήσης της διανομής των μέσων ενημέρωσης 91
Εικόνα 30. Περίπτωση πυκνής αστικής χρήσης σε μια κοινωνία 91
Εικόνα 31. Τρία τεχνολογικά σενάρια στο δίκτυο 5G - Crosshaul 93
Εικόνα 32. Backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave 95
Εικόνα 33. Τεχνολογία 5G - Crosshaul κεντρικού δικτύου με (a) CWDM δύο οπτικών ινών και (b) CWDM μιας οπτικής ίνας 99
Εικόνα 34. SELFNET περιεχόμενο συστήματος 102
Εικόνα 35. Η βασική ιδέα του NFV 103
Εικόνα 36. Γράφος προώθησης (διαβίβασης) FG ενός δικτύου 104
Εικόνα 37. Πλήρης Αρχιτεκτονική ETSI NFV 105

Εικόνα 38. SDN δικτύωση 106
Εικόνα 39. SDN δικτύωση. Παράδειγμα δικτύου μεταφοράς..... 107
Εικόνα 40. Συνδυασμός αρχιτεκτονικών NFV και SDN 108
Εικόνα 41. Πλάνο ελεύθερων συχνοτήτων και ανάθεση συχνότητας ανά περιοχή 110
Εικόνα 42. Κατάλογος των σχετικών προγραμμάτων της ΕΕ που αφορούν την τεχνολογία mm-wave 111
Εικόνα 43. Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mm-wave 111
Εικόνα 44. Περιπτώσεις χρήσης τεχνολογίας mm-wave 114
Εικόνα 45. Τεμαχισμός Δικτύου (Network slicing) 116

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

3GPP	Third Generation Partnership Project
5G – PPP	5 G – Public Private Partners
AAA	Authentication, Authorization, Account
APs	Access Points
APIs	Application Programmable Interfaces
AWOL	Absent Without Leaving
BaaS	Broadcast-As-A-Service
BSS	Business Support Systems
BM/SC	Broadcast/Multicast Service Center
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code Division Multiple Access
CDN	Content Distribution Network
CESC	Cloud – Enabled Small Cell
CLI	Command Line Interface
CN	Core Network
CoMP	Cooperative Multipoint
COTS	Commercial Off The Shelf
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Centralized RAN
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
D2D	Device to Device
D-AMPS	Digital AMPS
DER	Distributed Energy Resource
DFB	Distributed Feedback
DL	Downlink
DLL	Data Link Layer
DMG	Directional Multi-Gigabit
DSA	Dynamic Spectrum Access
DWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
E2E	End-To-End
EAP	Extensible Authentication Protocol
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FBMC	Filter Bank Multi-Carrier
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FSO	Free Space Optics
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile
H2020	Horizon 2020
HLD	High Level Diagram
HetNet	Heterogeneous Networks
HoN	Health of Network
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access

IAC	Industrial Automation Control
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IoT	Internet Of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
KPIs	Key Performance Indicators
LA	Location Areas
LAT	Latency
LDPC	Low – Density Parity Check
LOS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MBB	Mobile Broadband Services
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MC	Multi-Carrier
MC	Multi-Connectivity
MDV	Mobile Data Volume
MEC	Mobile Edge Computing
METIS	Mobile And Wireless Communications Enablers For The Twenty – Twenty Information Society
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobile Management Entity
mMTC	massive MTC
MNO	Mobile Network Operator
MTC	Machine Type Communication
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
NEs	Network Elements
NFs	Network Functions
NFV	Network Function Virtualization
NGN	Next Generation Network
NoU	Number of supported Users
NRG	Energy Efficiency
NSs	Network Services
OAM	Operations Administration And Maintenance
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ONF	Open Networking Foundation
OSSs	Operational Support Systems
OTT	Over-The-Top
OWC	Optical Wireless Communications
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCS	Personal Communication Services
PDN	Public Data Network
PDP	Packet Data Protocol
PEA	Privacy Enhanced Attachment
PLS	Physical Layer Security
PNEs	Physical Network Elements
PNFs	Physical Network Functions
PONs	Passive Optical Networks
PSS	Personal Security Service
QoS	Quality of Service

RAN	Radio Access Network
RATs	Radio Access Technologies
RCDs	Resource-Constraint Devices
RFB	Reusable Functional Blocks
RNC	Radio Network Controller
ROADMs	Reconfigurable Add-Drop Multiplexers
RoF	Radio Over Fiber
RRH	Remote Radio Heads
RRU's	Remote Radio Units
SatNO	Satellite Network Operator
SCHProv	Separate Client and Hosting Service Providers
SDK	Software Development Kit
SDN	Software Defined Networks
SDOs	Standard Developing Organizations
SGCN	Smart Grid Communications Network
SIM	Subscriber Identity Module
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SON	Self-Organizing Network
TCO	Total Cost of Ownership
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
UDN	Ultra-Dense Networks
UDR	User Data Rate
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMB	Ultra Mobile Broadband
uMTC	ultrareliable MTC
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
V2X	Vehicle To Anything
vEPC	Virtual Evolved Packet Core
VHT	Very High Throughput
VIM	Virtual Infrastructure Management
VLANs	Virtual Lans
VLC	Visible Light Communications
VMs	Virtual Machines
VNEs	Virtual Network Elements
VNFs	Virtualized Network Functions
VoIP	Voice Over IP
VPNs	Virtual Public Networks
WCDMA	Wide Band Code Division Multiple Access
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
XCI	5G – Crosshaul Control Infrastructure
XFE	5G – Crosshaul Forwarding Element
xMBB	extreme Mobile BroadBand

Εισαγωγή

Η 5η γενιά (5G) θεωρείται μία ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη για το χώρο της κινητής τηλεφωνίας, δεδομένου ότι παρέχει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με την τέταρτη γενιά (4G). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αναμένεται να υπάρξει μια εντυπωσιακή αύξηση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες εκτιμάται ότι θα φθάνουν έως και τα 10 Gbps, Επίσης με το 5G θα είναι εφικτή η σύνδεση στο Διαδίκτυο εκατοντάδων χιλιάδων συσκευών που βρίσκονται στον ίδιο χώρο και ο χρόνος απόκρισης (latency) θα είναι πολύ μικρός, της τάξης του 1 msec.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά το επιστημονικό πεδίο της 5G ασύρματης δικτύωσης, η οποία αποτελεί μια πρωτοπόρα και αναπτυσσόμενη τεχνολογία στο χώρο των Τηλεπικοινωνιών. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη ξεκινήσει την εκτέλεση περισσότερων από 10 προγραμμάτων για να διερευνήσει τις διαθέσιμες τεχνολογικές επιλογές που μπορούν να οδηγήσουν στην μελλοντική γενιά των ενσύρματων (οπτικών) και ασύρματων επικοινωνιών, διαθέτοντας έως και πάνω από 50 εκατομμύρια Ευρώ για την έρευνα σχετικά με τις τεχνολογίες 5G, με σκοπό να αναπτυχθούν συστήματα επικοινωνιών με χρονικό ορίζοντα το έτος 2020. Αυτή η πρωτοβουλία ονομάζεται 5G - PPP (Public Private Partnership) και έχει ως στόχο να προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για τις πανταχού παρούσες υποδομές επικοινωνιών της επόμενης δεκαετίας.

Η αυτοκινητοβιομηχανία, η ενέργεια, οι μεταφορές, η υγεία, η μεταποίηση, τα μέσα επικοινωνίας και η διασκέδαση θα είναι οι πιο σημαντικοί τομείς της Οικονομίας που θα μεταλλαχθούν από την έλευση των ευρυζωνικών δικτύων πέμπτης γενιάς (5G). Η 5G τεχνολογία θα μεταμορφώσει τα δίκτυα σε συντονιστικές πλατφόρμες με απεριόριστη χωρητικότητα, θα ανοίξει τον δρόμο για νέα επιχειρηματικά μοντέλα και θα παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνιών σε πραγματικό χρόνο με ελάχιστη καθυστέρηση και χαμηλό κόστος διασύνδεσης των σημείων επαφής.

Η διπλωματική εργασία μελετά τις αρχιτεκτονικές και τις τεχνολογίες ορισμένων από τα πιο σημαντικά projects της πρωτοβουλίας 5G - PPP και τις κατηγοριοποιεί με βάση τρία κριτήρια που είναι η καθυστέρηση, η ασφάλεια και η ενέργεια. Το ολοένα και αυξανόμενο φάσμα χρήσης των κινητών επικοινωνιών, που έχει διεισδύσει σε μεγάλο μέρος της σύγχρονης καθημερινότητας, καθιστά τους χρήστες περισσότερο απαιτητικούς σε σχέση με το παρελθόν, αναφορικά με τις Τηλεπικοινωνίες και τις ταχύτητες που αυτές παρέχουν τόσο για τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων όσο και την κάλυψη σε ευρύτερο φάσμα των ασύρματων δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται αρχικά μια ιστορική αναδρομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και αναφέρονται με συντομία τα κυριότερα χαρακτηριστικά των γενιών των ασύρματων δικτύων, από τα δίκτυα της πρώτης γενιάς (1G) έως και της τέταρτης (4G). Παράλληλα γίνεται και μια αναφορά στις κυριότερες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές αυτών των γενιών, όπως π.χ. UMTS, PDN WiFi, WiMAX κ.λ.π. Έχει επίσης ενσωματωθεί και ένας πίνακας που περιγράφει την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων με 4 διαφορετικά κριτήρια που είναι η τεχνολογική εξέλιξη, η εξέλιξη αλληλεπίδρασης, υπηρεσιών και καταναλωτών.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται καταρχήν η διαδικασία οικοδόμησης της νέας ασύρματης γενιάς 5G και καθορίζονται οι νέες απαιτήσεις και υπηρεσίες που αναμένεται να ικανοποιηθούν από την τεχνολογία της γενιάς αυτής. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα ρυθμιστικά θέματα φάσματος για τα δίκτυα 5G καθώς απαιτείται η ανάπτυξη όχι μόνο κεντρικής αλλά και κατανεμημένης βασικής ζώνης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τα υποστηρικτικά εργαλεία και τα χαρακτηριστικά των 5G υπηρεσιών που μεταξύ άλλων θα πρέπει να είναι οι εξαιρετικά αξιόπιστες συνδέσεις με χαμηλή καθυστέρηση, η ανθεκτική ασύρματη σύνδεση ως αντιστάθμισμα στην έλλειψη υποδομών, η επικοινωνία διαφορετικών συσκευών με κλιμακούμενες ταχύτητες, η ενεργειακή απόδοση κ.λ.π.

Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει στο 5G – PPP (Public Private Partners), το οποίο αποτελεί μια συνεργασία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της βιομηχανίας και των ερευνητικών ιδρυμάτων στον τομέα των επικοινωνιών, προκειμένου να εξασφαλίσει την πρωτοκαθεδρία της Ευρώπης στο χώρο των δικτύων 5^{ης} γενιάς. Παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή των 5G – PPP projects (που είναι συνολικά 19) και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη μελέτη ορισμένων μελετών περιπτώσεων (case studies) για τα δίκτυα της γενιάς αυτής.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η προαναφερθείσα κατηγοριοποίηση των 5G-PPP projects με τα κριτήρια της ασφάλειας, της ενέργειας και της καθυστέρησης και σε κάθε κατηγορία μελετώνται διεξοδικά τα πιο σημαντικά από τα projects του 5G – PPP. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ενδεικτικά τα project 5G – Ensure και 5G NORMA, στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν ενδεικτικά τα projects Flex5Gware και Speed5G και τέλος στην τρίτη κατηγορία ανήκει ενδεικτικά το project 5G – Crosshaul.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται διάφορες προτεινόμενες αρχιτεκτονικές των 5G δικτύων. Αρχικά δίνεται έμφαση στις αρχιτεκτονικές Fronthaul και Backhaul, οι οποίες αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις, όπως η αύξηση της δυναμικότητας κατά 1000 φορές, η πύκνωση των small cells και η μείωση της επιτρεπόμενης καθυστέρησης μέχρι 1 ms. Επίσης αναφέρονται ορισμένα

σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά για τους σκοπούς του project 5G-Crosshaul που υποστηρίζει τις προαναφερόμενες αρχιτεκτονικές και περιγράφονται τεχνολογίες όπως οι WDM-PON, CWDM και DWDM. Στη συνέχεια του κεφαλαίου δίνεται έμφαση στο συνδυασμό των τεχνολογιών εικονικοποίησης των λειτουργιών του δικτύου (NFV) και της αρχιτεκτονικής SDN που σκοπεύει να καταστήσει τα ασύρματα δίκτυα απλούστερα, πιο ευέλικτα και περισσότερο προγραμματιζόμενα. Τέλος μια τρίτη προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποτελεί η μικροκυματική ζώνη που παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης (πάνω από τα 30GHz) και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα συμφόρησης, όπως στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα αναφορικά με τις επιδράσεις που αναμένεται να επιφέρει στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων η επικράτηση της τεχνολογίας 5G. Πιο συγκεκριμένα αναμένεται ότι η τεχνολογία αυτή θα προσφέρει πολλές νέες δυνατότητες σε όλο το εύρος των κλάδων της Παγκόσμιας Οικονομίας, επηρεάζοντας την επικοινωνία και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και επικοινωνούν οι επιχειρήσεις και οι άνθρωποι σε κάθε μορφή των δραστηριοτήτων τους.

Κεφάλαιο 1 – Ιστορική αναδρομή

1.1 Πρώτη γενιά κυψελοειδών τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Η ανάγκη για επικοινωνία αποτελούσε από τα παλιά χρόνια μια βασική επιδίωξη του ανθρώπου και οδήγησε στην ανακάλυψη πολλών διαφορετικών τρόπων που ξεκινούν από τα σήματα καπνού και τις φωτιές και φτάνουν μέχρι τα σημερινά δίκτυα Τέταρτης Γενιάς. Εφαλτήριο για την εμφάνιση της κινητής τηλεφωνίας αποτέλεσαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανακαλύφθηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Τα πρώτα συστήματα που προσέφεραν υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιήθηκαν το 1950 και προορίζονταν να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές.

Έπειτα από την εισαγωγή των πρώτων κυψελοειδών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, χρησιμοποιήθηκαν πολλά διαφορετικά πρότυπα δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Υπάρχουν πέντε διαφορετικές γενιές συστημάτων, γνωστές ως 1G, 2G, 2.5G, 3G και 4G και το τελευταίο διάστημα έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη δικτύων 5G. Τα συστήματα της πρώτης τεχνολογίας, 1G, χαρακτηρίζονται από τη χρήση αναλογικής τεχνολογίας και διαχώριζαν διαφορετικούς χρήστες στην ίδια κυψέλη, διανέμοντάς τους σε διαφορετικά κανάλια. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως FDMA (Frequency Division Multiple Access).

Η *πρώτη γενιά (1G)* συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη γενιά δεν αποτέλεσε το ξεκίνημα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Αντίθετα, από πιο πριν είχαν εμφανιστεί αρκετά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών, τα οποία όμως δεν είχαν τα χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων με τον τρόπο που τα εννοούμε σήμερα. Το βασικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κυψελωτή δομή του δικτύου. Τα πρώιμα αυτά δίκτυα είχαν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τα κυψελωτά. Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα ήταν η υποτυπώδης και προβληματική υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών. Η βασική ιδέα πίσω από τα κυψελωτά δίκτυα είναι η διαίρεση της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του δικτύου σε μικρότερες περιοχές, οι οποίες ονομάζονται κυψέλες ή κύτταρα (cells). Η μορφή τους εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία του εδάφους, αλλά για καθαρά υπολογιστικούς λόγους έχει υιοθετηθεί η αναπαράσταση μιας κυψέλης με εξάγωνο. Η κάθε μια από τις κυψέλες χρησιμοποιεί ένα σύνολο συχνοτήτων

Για τα κινητά δίκτυα *δεύτερης γενιάς (2G)* υπήρχαν τέσσερα κύρια πρότυπα: *το Global System for Mobile (GSM) communications*, το *Digital AMPS (D-AMPS)*, το *Code Division Multiple Access (CDMA) IS-95* καθώς και το *Personal Digital Cellular (PDC)*. Το GSM ήταν το πιο επιτυχημένο και διαδεδομένο σύστημα δεύτερης γενιάς και παρά το γεγονός ότι ξεκίνησε ως ένα ευρωπαϊκό σύστημα τελικά υιοθετήθηκε παγκοσμίως. Η μόνη ήπειρος στην οποία η διάδοση του

GSM υστερούσε ήταν η Αμερική. Το βασικό σύστημα GSM χρησιμοποιούσε τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz, όμως υπήρχαν και αρκετά παράγωγα τα οποία χρησιμοποιούσαν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz, καθώς παρατηρήθηκε έλλειψη χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 ή 1900 MHz μπορούσαν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η περιοχή κάλυψης όμως ήταν μικρότερη σε σχέση με τα συστήματα που λειτουργούσαν στη ζώνη των 900 MHz. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί και το πρότυπο GSM-400 που αναπτύχθηκε από το ίδρυμα European Telecommunications Standards Institute (ETSI) και το οποίο χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά των δικτύων GSM με υψηλότερες συχνότητες. Παρόλο που το σύστημα αυτό ήταν αρκετά αποδοτικό σε αραιοκατοικημένες και παράκτιες περιοχές, το πρότυπο GSM-400 δε χρησιμοποιείται πλέον.

Με τον όρο *γενιά 2.5G* αναφερόμαστε στο ευρύτερο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν πάνω στα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρείχαν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Παρόλο που η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς και αυτών της γενιάς 2.5 ήταν λεπτή, υπήρχαν ορισμένες τεχνολογίες, όπως η *High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD),* η *General Packet Radio Services (GPRS)* και η *Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE),* οι οποίες χαρακτήριζαν τη γενιά 2.5. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσίασαν οι αρχικές μορφές του GSM αυτής της γενιάς ήταν οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης στον αέρα που περιορίζονταν στα 9.6 Kbps. Αργότερα, τέθηκαν οι προδιαγραφές για τα 14.4 Kbps παρόλο που δε χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Η λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία HSCSD, η υλοποίηση της οποίας ήταν σχετικά απλή και φθηνή.

Καθώς αυξάνονταν οι απαιτήσεις το διαθέσιμο εύρος ζώνης έγινε σταδιακά περισσότερο συνωστισμένο, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητες τεχνικές που απαιτούσαν μικρότερο εύρος ζώνης. Τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν την τεχνική TDMA (Time Division Multiple Access) και πρόσφεραν περιορισμένες δυνατότητες δεδομένων. Για το λόγο αυτό εισήχθησαν συστήματα ρυθμού δεδομένων, τα λεγόμενα συστήματα *τρίτης γενιάς (3G),* για την παροχή μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η *GPRS (General Packet Radio Service)* με την οποία μπορούσαν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης της τάξης των 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι, αν αγνοηθεί η διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό που είχε μεγάλη σημασία ήταν ότι η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιούσε τεχνολογία μεταγωγής πακέτου και συνεπώς δέσμευε πόρους του δικτύου μόνο όταν υπήρχε ανάγκη για αποστολή/λήψη δεδομένων. Η υλοποίηση του GPRS ήταν αρκετά πιο ακριβή από αυτή του HSCSD και ενώ η τελευταία εμφάνιζε μεγαλύτερη συνέπεια

σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, η τεχνολογία GPRS προσέφερε πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την αποστολή δεδομένων μέσω των κινητών δικτύων.

1.2 Δίκτυα τρίτης γενιάς 3G/UMTS

Ο βασικός στόχος των συγκεκριμένων συστημάτων 3G ήταν η παροχή ενός μεγάλου αριθμού υπηρεσιών ως προς το χρήστη, χρησιμοποιώντας την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Με βάση αυτή την αρχή, οι υπηρεσίες παρέχονται με ενσύρματο, επίγειο ασύρματο ή δορυφορικό μέσο ανάλογα με την περίπτωση και ο χρήστης είναι δυνατό να μην γνωρίζει τη συγκεκριμένη τεχνολογία που χρησιμοποιεί. Παρά το γεγονός της υποστήριξης του πρωτοκόλλου IP, τα δίκτυα 3ης γενιάς έχουν το μειονέκτημα της ύπαρξης διαφορετικών προτύπων, κάτι που περιορίζει την εύκολη περιαγωγή μεταξύ δικτύων βασισμένα σε διαφορετικά πρότυπα και αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την κινητικότητα των χρηστών. Επιπλέον τα δίκτυα 3ης γενιάς παρέχουν στην καλύτερη περίπτωση ταχύτητες έως 2 Mbps.

Ο όρος UMTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *Universal Mobile Telecommunications System* που ερμηνεύεται ως Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο πρότυπο GSM και το σύστημα 3G λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2GHz και η επιλογή της συγκεκριμένης συχνότητας έγινε προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα καθώς και καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας.

Σήμερα, υπάρχουν περισσότερα από εξήντα 3G/UMTS δίκτυα σε 25 χώρες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία WCDMA[1]. Για την οργάνωση του όλου εγχειρήματος, έχει θεσπιστεί ένας ειδικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με ονομασία *3GPP (Third Generation Partnership Project),* ο οποίος έχει ως βασική αρμοδιότητα την παρακολούθηση και καθοδήγηση των εξελίξεων στη συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή.

Ο οργανισμός αυτός αποτελείται από επτά επιμέρους οργανισμούς ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών προτύπων (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC) οι οποίοι είναι γνωστοί και ως *Organizational Partners* και παρέχει στα μέλη του ένα σταθερό περιβάλλον παραγωγής αναφορών και προδιαγραφών που ορίζουν οι 3GPP τεχνολογίες. Ο 3GPP έχει θέσει ως standard δύο τεχνολογίες που είναι οι *HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)* και *HSUPA*

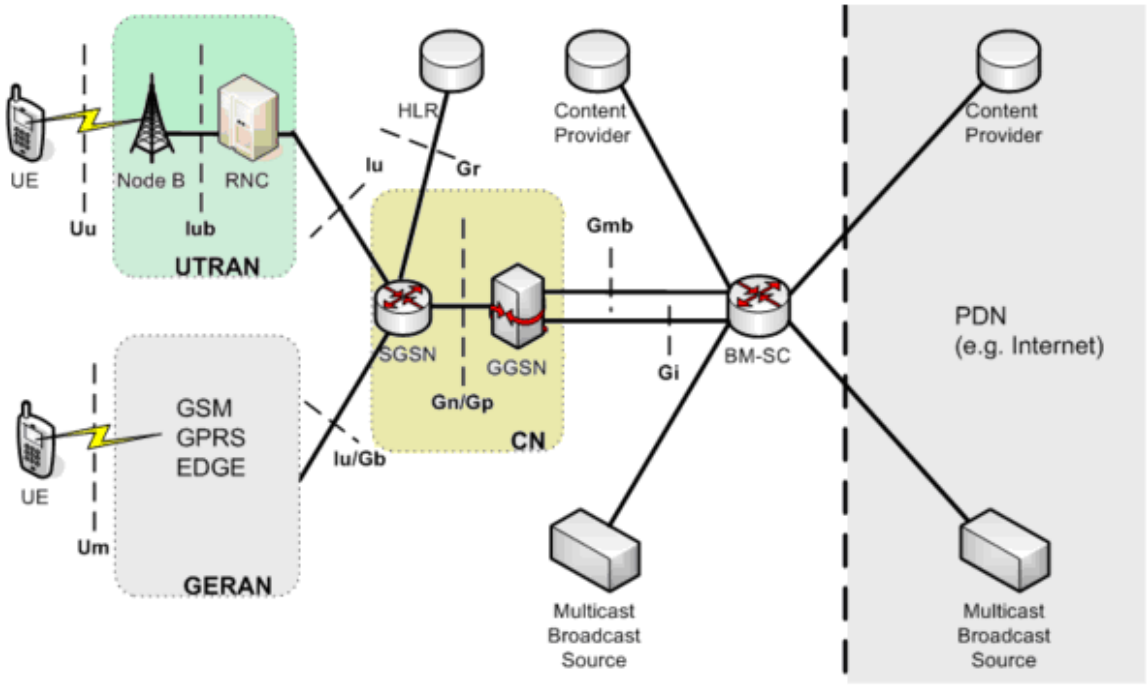
[1] Πρότυπο διασύνδεσης αέρα που βρίσκεται σε 3G κινητά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Υποστηρίζει τις συμβατικές υπηρεσίες κυψελοειδούς φωνής, κειμένου και MMS, αλλά μπορεί επίσης να μεταφέρει δεδομένα σε υψηλές ταχύτητες, επιτρέποντας φορείς εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών να παρέχουν εφαρμογές υψηλότερου εύρους ζώνης, συμπεριλαμβανομένων streaming και ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο.

(High Speed Uplink Packet Access), οι οποίες αποτελούν την εξέλιξη του UMTS, επειδή επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 14.4 Mbps στο Downlink (κατέβασμα δεδομένων) και 5.8 Mbps στο Uplink (ανέβασμα δεδομένων) και καλύπτει τεχνολογίες κυψελωτών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της ραδιοπροσπέλασης, του κεντρικού δικτύου μεταφορών και των δυνατοτήτων των υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων των εργασιών κωδικοποίησης, την ασφάλεια, την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS - Quality of Service) και ως εκ τούτου παρέχει πλήρεις προδιαγραφές συστημάτων.

Το UMTS επιτυγχάνει τη χρήση του επικοινωνιακού καναλιού με τρόπο πολύ αποδοτικό, με την ανάμειξη ενός πλήθους υπηρεσιών πολυμέσων, ώστε να παρέχει μειωμένο κόστος. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων των UMTS δικτύων, ξεχωρίζουν οι αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και η ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής, σε σχέση με τα δίκτυα 2G. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 Kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη, ενώ όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος, τότε οι ρυθμοί μετάβασης αυξάνουν, φτάνοντας στα 2 Mbps.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 1), παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός UMTS δικτύου [1]. Όπως φαίνεται σε αυτή, ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από δύο βασικές οντότητες που είναι το *δίκτυο κορμού CN (Core Network)* που είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των τηλεφωνημάτων και για τη μεταφορά δεδομένα προς εξωτερικά δίκτυα και το *δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)* που είναι υπεύθυνο για οτιδήποτε σχετίζεται με το ασύρματο μέρος του δικτύου. Το UTRAN αποτελείται από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης RNC (Radio Network Controller) που είναι το σημείο πρόσβασης για όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το UTRAN στο δίκτυο κορμού CN και το Node B το οποίο συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη UE (User Equipment) μέσω της διεπαφής Uu[2].

[2] Η ασύρματη διεπαφή είναι πάντοτε η πιο κρίσιμη διεπαφή κατά το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ενός κινητού δικτύου.



Εικόνα 1. Τεχνολογία UMTS δικτύου [πηγή: 1]

Στην ίδια εικόνα παρατηρείται και το εξωτερικό δημόσιο δίκτυο δεδομένων PDN (Public Data Network), όπου προτού ένας χρήστης ανταλλάξει δεδομένα με αυτό, πρέπει να εγκαθιδρύσει μια εικονική σύνδεση. Από την στιγμή που ο συγκεκριμένος χρήστης γίνει γνωστός στο δίκτυο, τα πακέτα μεταφέρονται μεταξύ αυτού και του δικτυού με βάση το πρωτόκολλο PDP (Packet Data Protocol) το οποίο αποτελεί το πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου του UMTS. Επιπλέον, υπάρχει ένας κόμβος σχετιζόμενος με τις υπηρεσίες εκπομπής (broadcast[3]) και πολυδιανομής (multicast[4]) που ονομάζεται *BM/SC (Broadcast/Multicast Service Center)*, ο οποίος λειτουργεί σαν το σημείο εισόδου για την παραλαβή δεδομένων για εσωτερικές πηγές [2].

Στη συνέχεια περιγράφονται διαφορετικές ταυτότητες, οι οποίες ενσωματώνονται στο πρότυπο του GSM με σκοπό να παρέχουν ευελιξία. Ένας αριθμός από αυτές τις ταυτότητες αποθηκεύεται σε μια κάρτα γνωστή ως *SIM (Subscriber Identity Module)*, η οποία εισάγεται μέσα στη συσκευή για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον συνδρομητή. Εκτός από την κάρτα SIM, η διεθνής ταυτότητα εξοπλισμού της συσκευής (IMEI – International Mobile Equipment Identity) είναι ένας δεκαπενταψήφιος αριθμός που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της συσκευής και

[3] Είδος εκπομπής που αναφέρεται στη αποστολή ενός μηνύματος - πακέτου σε όλους τους δέκτες που ανήκουν στο υποδίκτυο ενός δικτύου. Γενικά σε όλα τα δίκτυα υπάρχει μία διεύθυνση για εκπομπή μηνυμάτων broadcast. Όταν κάποιο μήνυμα απευθύνεται σε αυτήν τη διεύθυνση, θεωρείται ότι αφορά όλους τους κόμβους του αντίστοιχου δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία ξεχωριστού μηνύματος για κάθε κόμβο.

[4] Στην πολυδιανομή (multicast) ένα αντίγραφο του πακέτου αποστέλλεται σε όλα τα μέλη ενός ρητά προσδιορισμένου υποσυνόλου των κόμβων (όχι απαραίτητα «γειτονικών», όπως και αν ορίζεται κατά περίπτωση η γειτνίαση στο δίκτυο). Η πολυδιανομή συνήθως είναι δυσκολότερο να επιτευχθεί, ενώ τόσο σε αυτήν όσο και στην εκπομπή απαιτούνται πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι δρομολόγησης απ' ό,τι για τη συνήθη περίπτωση της μονοδιανομής.

τοποθετείται σε αυτή κατά την διάρκεια κατασκευής της και ελέγχεται όταν η συσκευή προσπαθεί να εισέλθει στο δίκτυο. Η διεθνής ταυτότητα συνδρομητή κινητής συσκευής (IMSI – International Mobile Subscriber Identity) αποτελεί έναν άλλο δεκαπενταψήφιο αριθμό, ο οποίος περιλαμβάνεται στην κάρτα SIM και επιτρέπει στη συσκευή να μπορεί να είναι παγκοσμίως αναγνωρίσιμη. Τέλος, το κλειδί πιστοποίησης (Authentication Key) αποθηκεύεται στην κάρτα SIM και χρησιμοποιείται για να υπολογίζει το κλειδί cipher, το οποίο χρησιμοποιείται στο κώδικα κρυπτογράφησης [3].

Σήμερα υπάρχουν διαφορετικές ασύρματες και κινητές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί μαζικά, όπως είναι τα κινητά δίκτυα 3G (UMTS, CDMA2000), η τεχνολογία *WiFi* (IEEE 802.11 ασύρματα δίκτυα), η τεχνολογία *WiMAX*[5] (IEEE 802.16 ασύρματα και κινητά δίκτυα) καθώς επίσης και συνοδευτικά δίκτυα, όπως είναι τα δίκτυα αισθητήρων ή τα δίκτυα προσωπικής περιοχής (Bluetooth).

Αν και η οικογένεια IEEE 802.16 προτύπων ονομάζεται επίσημα *WirelessMAN*, στην IEEE έχουν ονομαστεί *WiMAX (World Wide Interoperability for Microwave Access)* από μια ομάδα της βιομηχανίας που ονομάζεται WiMAX Forum. Η αποστολή του φόρουμ WiMAX είναι να προωθήσει και να πιστοποιήσει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα των ευρυζωνικών προϊόντων ασύρματης πρόσβασης. Το σύστημα WiMAX υποστηρίζει την κινητικότητα, καθώς το πρότυπο IEEE 802.16e αναφέρεται ως *Mobile WiMAX*. Πέραν του πλεονεκτήματος της ραδιοτεχνολογίας, το Mobile WiMAX χρησιμοποιεί επίσης μια απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύων που βασίζεται σε πρωτόκολλα IP [19].

Τα κινητά τερματικά περιλαμβάνουν μια ποικιλία από διεπαφές (interfaces), συμπεριλαμβανομένων των GSM, οι οποίες βασίζονται σε μεταγωγής κυκλωμάτων παλιάς τεχνολογίας. Όλα τα σημερινά ασύρματα και κινητά δίκτυα πηγαίνουν προς την αρχή *all – IP*, που σημαίνει ότι όλα τα δεδομένα καθώς και η σηματοδότηση θα μεταφερθούν μέσω IP στο επίπεδο δικτύου. Έτσι μπορούμε να έχουμε διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, αλλά το κοινό στοιχείο για όλες αυτές είναι το IP (Internet Protocol), το οποίο ενοποιεί την τεχνολογία. Ο όρος 4G συνδέεται με τους διαθέσιμους ρυθμούς bit στο σύνδεσμο πρόσβασης, κάτι που σημαίνει ότι περισσότερο από 1 Gbps τίθεται ως προϋπόθεση από την ITU[6] (International Telecommunication Union) για μια τεχνολογία που επισημαίνεται ως 4G [17]. Επίσης το *all – IP* είναι το χαρακτηριστικό της γενιάς 4G στη πρόσβαση και στο τμήμα του πυρήνα του δικτύου, που αναφέρονται στη συνέχεια. Από την άλλη πλευρά, γίνονται πολλές προσπάθειες για τον διαχωρισμό

[5] Βασισμένη στο standard IEEE 802.16, η τεχνολογία WiMAX έρχεται να γεφυρώσει το κενό ανάμεσα στις ασύρματες συνδέσεις και τις μεγάλες ταχύτητες των ενσύρματων συνδέσεων. Συχνά αποκαλείται Wireless Broadband γιατί υπόσχεται ταχύτητες αντίστοιχες με ADSL, Cable και T1 χωρίς καλώδια, σε μακρινές αποστάσεις.

[6] Ειδική υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών για τις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) που έχει ως στόχο να συνδέει όλους τους ανθρώπους του κόσμου - όπου κι αν ζουν και ανεξάρτητα από τις δυνατότητές τους, προστατεύοντας και υποστηρίζοντας το θεμελιώδες δικαίωμα του καθενός να επικοινωνεί.

των επιπέδων μεταφοράς και υπηρεσιών στα δίκτυα νέας γενιάς (NGN – Next Generation Network).

Η γενιά δικτύων 3G, παρά της προβλέψεις αποδείχτηκε αρκετά απογοητευτική. Στην πραγματικότητα τα τρέχοντα δίκτυα 3ης γενιάς δεν προσέφεραν την αληθινή 3G εμπειρία στους χρήστες, αλλά μάλλον αποτέλεσαν μια δοκιμαστική εκδοχή τους, με την πραγματική βελτίωση να περνά ουσιαστικά στα δίκτυα 4ης γενιάς.

1.3 Δίκτυα τέταρτης γενιάς 4G

Η μεγάλη ανάγκη για υπηρεσίες Διαδικτύου, ασύρματα δίκτυα διανομής καλωδιακής τηλεόρασης και πρόσβασης σε μεγάλο όγκο πληροφοριών, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη χρήσης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ευρείας ζώνης. Στην εποχή μας παρατηρείται μεγάλη ζήτηση για υπηρεσίες όπως η *Τηλεειδοποίηση (Paging)*, αναλογική και ψηφιακή κινητή τηλεφωνία και υπηρεσίες προσωπικών δεδομένων (PCS – Personal Communication Services).

Οι βασικοί λόγοι χρήσης ολοένα και υψηλότερων συχνοτήτων είναι αφενός ο κορεσμός των χαμηλότερων ζωνών συχνοτήτων και αφετέρου η ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης για εφαρμογές πολυμέσων, όπως η ασύρματη μετάδοση εικόνας και η πρόσβαση στο διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο. Τα δίκτυα 3ης γενιάς (3G) αντιμετώπιζαν πρόβλημα κορεσμού καθώς όλες οι προσφερόμενες υπηρεσίες τους δεν μπορούσαν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα πολλούς συνδρομητές. Αντίθετα, τα δίκτυα 4ης γενιάς (4G) υποστηρίζουν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών και υπηρεσιών.

Ο όρος 4G περιγράφει όχι απλά ένα πρότυπο, αλλά ένα περιβάλλον στο οποίο τα δίκτυα παρέχουν επικοινωνία χωρίς ασυνέχειες μεταξύ τους. Το όραμα της 4G τεχνολογίας έχει αναπτυχθεί με τη βοήθεια διαφορετικών απόψεων ανά τον κόσμο. Στην Ευρώπη αντιμετωπίζεται ως ένα δίκτυο μέσα σε άλλα δίκτυα που περιλαμβάνει διασύνδεση τόσο μεταξύ των δικτύων όσο και μεταξύ των συσκευών [4]. Στις ΗΠΑ αντιμετωπίζεται ως ο συνδυασμός του ασύρματου δικτύου τοπικής πρόσβασης (WLAN) και του IEEE 802.20 (ή MBWA – Mobile Broadband Wireless Access[7]).

Ολοκληρώνοντας μια πρώτη προσέγγιση με τα δίκτυα 4G, περιγράφεται στην Εικόνα 2 που ακολουθεί, η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων από την 1η έως την 4η γενιά, με βάση τέσσερα κριτήρια: την τεχνολογική εξέλιξη, την εξέλιξη αλληλεπίδρασης, την εξέλιξη των υπηρεσιών και τέλος την εξέλιξη καταναλωτών [5]. Είναι εμφανές τόσο το γεγονός της εξέλιξης όσο και το γεγονός της προσθήκης νέων υπηρεσιών από το πέρασμα μιας γενιάς στην επόμενη. Για

[7] Προδιαγραφή που έχει καθοριστεί από το IEEE για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που έχουν ασύρματη πρόσβαση Internet.

παράδειγμα, η 4η γενιά προσθέτει αλληλεπίδραση μεταξύ εφαρμογών – μηχανών, συμβάλει στην ανάπτυξη της επιστήμης της Τηλεματικής και απευθύνεται όχι μόνο σε ανθρώπους, αλλά και σε Παρόχους υπηρεσιών και λύσεων συγκεκριμένων κλάδων.

Εικόνα 2. Εξέλιξη ασύρματων δικτύων με βάση 4 διαφορετικά κριτήρια: Τεχνολογική εξέλιξη, Εξέλιξη αλληλεπίδρασης, Εξέλιξη υπηρεσιών και εξέλιξη καταναλωτών [πηγή 5]

Συνεχίζοντας με τα δίκτυα 4G, αναφέρουμε τα **κύρια χαρακτηριστικά** τους, που είναι τα εξής:

- *Ευρεία κάλυψη υπηρεσιών:* οι χρήστες απολαμβάνουν υπηρεσίες χωρίς χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς και επίσης χωρίς τους περιορισμούς που υπάρχουν στο ασύρματο δίκτυο. Η ευρεία κάλυψη μιας υπηρεσίας μετράται από την διαθεσιμότητά της σε μια περιοχή για ένα ελάχιστο αριθμό χρηστών.
- *Βελτιωμένη συνδεσιμότητα:* οι χρήστες όντας συνδεδεμένοι σε πιο ισχυρά – αναφορικά με τη χρήση πόρων - δίκτυα πρόσβασης, εξασφαλίζουν κάθε φορά τη ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS - Quality of Service)[8].
- *Συνεχής σύνδεση:* οι χρήστες είναι πάντα συνδεδεμένοι στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρές καθυστερήσεις στη πρόσβαση.
- *Υψηλός ρυθμός μετάδοσης:* ο ρυθμός αυτός κυμαίνεται από 20 έως 200Mbps.
- *Υποστήριξη διαφορετικών πρωτοκόλλων Internet:* η υποστήριξη πρωτοκόλλων νέας γενιάς

[8] Στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων υπολογιστών ο όρος ποιότητα υπηρεσιών αναφέρεται σε μηχανισμούς διασφάλισης της στατικής ανάθεσης δικτυακών πόρων σε συνδέσεις οι οποίες το απαιτούν. Η ποιότητα υπηρεσιών υλοποιείται με απόδοση προτεραιοτήτων στις διαφορετικές συνδέσεις ενός δικτύου, έτσι ώστε όσες χρειάζονται σταθερούς πόρους (π.χ. εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως βιντεοδιάσκεψη ή άλλες υπηρεσίες πολυμέσων) να είναι βέβαιο ότι τους διαθέτουν.

(IPv6[9]) και πολυμετάδοσης (Multicasting) είναι ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου. Η χρήση της τεχνολογίας μέσω πρωτοκόλλων IP επιτρέπει την ομαλή διασύνδεση με σταθερά και ασύρματα δίκτυα, καθώς και με συστήματα 3G.

- *Χρησιμοποίηση πολλαπλών κεραιών:* η χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στους σταθμούς βάσης όσο και στις κινητές συσκευές με χρήση του πρωτοκόλλου ορθογώνιας πολυπλεξίας συχνότητας *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*[10] αλλά και άλλων μεθόδων, επιτρέπει αξιόπιστη και γρήγορη μετάδοση δεδομένων.

- *Υψηλότερες χρησιμοποιούμενες συχνότητες:* στην περίπτωση της 4G ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιούνται υψηλότερες συχνότητες (έως 5GHz) με εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων (RF) ανά κανάλι 20 με 100MHz.

Ολοκληρώνοντας τη συγκεκριμένη ενότητα, συνοψίζονται στην Εικόνα 3 που ακολουθεί, οι στόχοι της 4G ασύρματης επικοινωνίας [18]. Όπως είναι εύκολο να διαπιστωθεί από μια μελέτη της συγκεκριμένης εικόνας, τα δίκτυα 4G έχουν ως βασικότερους στόχους την παροχή υψηλότερης χωρητικότητας δικτύου (περισσότεροι ταυτόχρονοι χρήστες ανά κελί) σε συνδυασμό με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων (τάξης 100Mbit/sec για κινητή και 1Gbit/sec για σταθερή επικοινωνία). Σημαντική επίσης είναι και η υψηλή ποιότητα υπηρεσιών για υποστήριξη πολυμέσων επόμενης γενιάς, όπως είναι η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDtv), αλλά και η διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα.

[9] Η έκδοση 6 του πρωτοκόλλου IP (Internet Protocol) είναι η πιο πρόσφατη και προορίζεται να αντικαταστήσει την τρέχουσα έκδοση IPv4. Παρέχει ένα σύστημα αναγνώρισης και εντοπισμού υπολογιστών σε δίκτυα καθώς και δρομολόγησης της κίνησης μέσου του Διαδικτύου.

[10] Σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος ψηφιακής διαμορφώσεως πολλών φορέων. Ένας μεγάλος αριθμός από διατεταγμένους ορθογώνιους φορείς σημάτων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν δεδομένα σε διάφορες παράλληλες ροές δεδομένων ή καναλιών.

Εικόνα 3. Στόχοι της 4G ασύρματης επικοινωνίας

1.3.1 Εφαρμογές και Υπηρεσίες δικτύων 4G

Πολλές από τις υπάρχουσες εφαρμογές και υπηρεσίες έχουν ήδη αρχίσει να επηρεάζονται από την έλευση της 4G ασύρματης επικοινωνίας και ο τομέα που προβλέπεται να επωφεληθεί περισσότερο είναι αυτός του ηλεκτρονικού εμπορίου. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες από τις υπηρεσίες που θα βελτιωθούν στο άμεσο μέλλον και θα αλλάξουν σε σημαντικό βαθμό την καθημερινότητα των ανθρώπων που είναι οι εξής:

- *Τηλεϊατρική:* λαμβάνοντας υπόψη την εκτιμώμενη αύξηση της γήρανσης του πληθυσμού ανά την υφήλιο, οι εφαρμογές 4G διαδραματίζουν και αναμένεται να διαδραματίσουν ένα ακόμη πιο κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο του διαρκώς αυξανόμενου κόστους της υγειονομικής περίθαλψης. Επίσης, θα επιτρέψει έγκαιρες και υψηλού επιπέδου λύσεις υγειονομικής περίθαλψης σε πολύ μεγαλύτερο πληθυσμό που περιλαμβάνει χωριά σε απομακρυσμένες περιοχές.
- *Ασφάλιση:* η τεχνολογία 4G βοηθά στη μέτρηση, παρακολούθηση, συλλογή και διάδοση δεδομένων αναφορικά με τα προφίλ ατόμων που είναι περισσότερο εκτεθειμένοι σε κινδύνους από άλλους, για τις ασφαλιστικές εταιρίες. Αυτό θα δημιουργήσει ευέλικτες επιλογές πριμοδότησης και επίλυση βασικών δυσαρμονιών των πελατών, καθότι δεν θα πρέπει όλοι να πληρώνουν τις ίδιες ασφαλιστικές εισφορές, από την στιγμή που όλοι οι άνθρωποι δεν είναι το ίδιο επιρρεπείς σε διαφορετικούς κινδύνους.

- *Μετάδοση και ασφάλεια δεδομένων:* με την συγκεκριμένη τεχνολογία αυξάνεται η ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ διαφορετικών μηχανών με πολλαπλούς τρόπους, κάτι που θα επιτρέψει την απομακρυσμένη επεξεργασία των δεδομένων [5] με εκπομπή εντολών για μηχανές (π.χ. για οχήματα). Παράλληλα θα βελτιωθεί και η ασφάλεια στην μετάδοση δεδομένων με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των ηλεκτρονικών τραπεζικών συναλλαγών.
- *Εκπαίδευση και εργασία εξ αποστάσεως:* η χρήση πολυμεσικού υλικού και φορητών πολυμεσικών συσκευών βελτιώνει την αποτελεσματικότητα τόσο της εκπαίδευσης όσο και της εργασίας, καταργώντας ακόμα περισσότερο τους χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς.

1.3.2 Τεχνολογία 4G

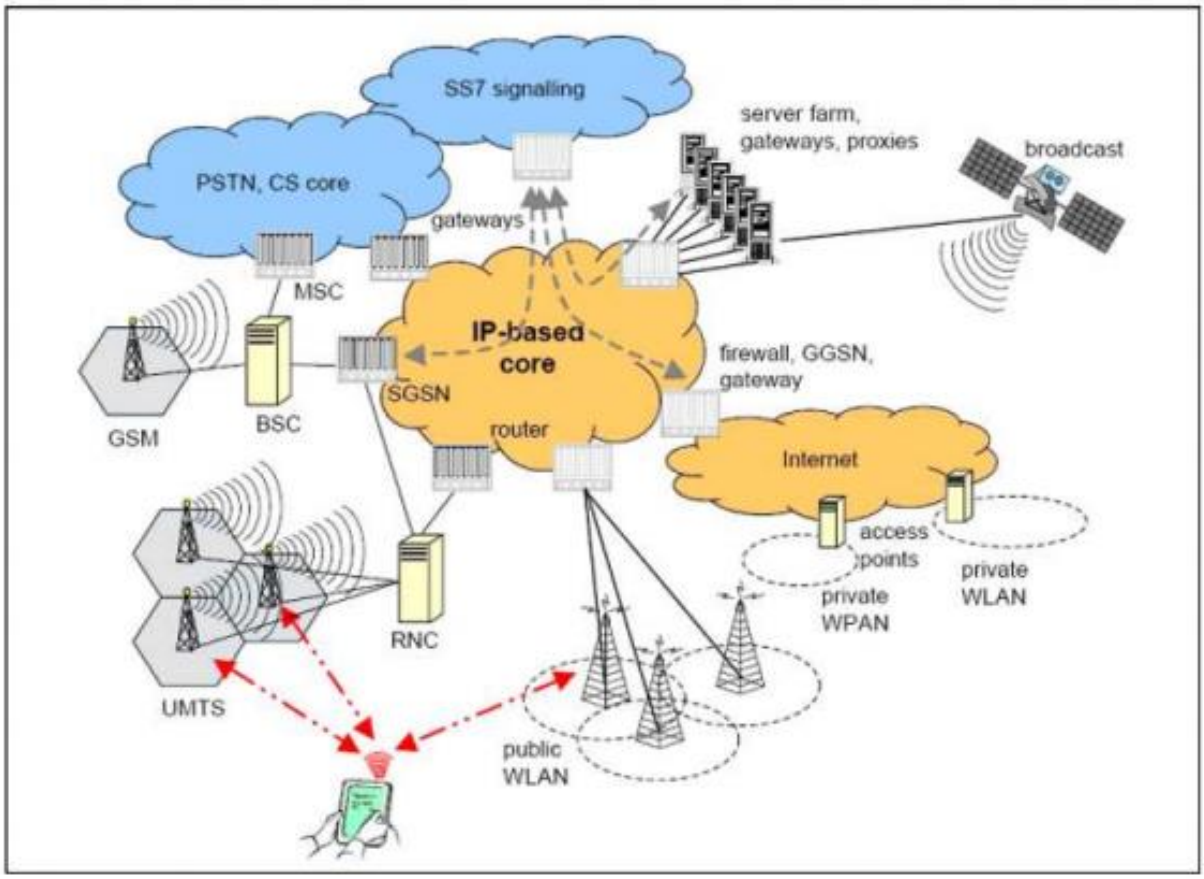
Τα δίκτυα 4G προσβλέπουν στην αδιάλειπτη και ενοποιημένη λειτουργικότητα υπαρχόντων ασύρματων τεχνολογιών όπως είναι το GSM, το WLAN και το Bluetooth[11]. Αποτελούν ουσιαστικά ένα σύνολο ετερογενών, αλλά IP – Based δικτύων που επιτρέπουν στο χρήστη να χρησιμοποιεί το σύστημα οπουδήποτε και οποτεδήποτε, ο οποίος διαθέτοντας ένα κατάλληλο τερματικό το οποίο μπορεί να λειτουργεί υπό διαφορετικούς τύπους δικτύων, θα μπορεί να χρησιμοποιεί υπηρεσίες που θα παρέχονται από διαφορετικά ασύρματα δίκτυα.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4, ο χρήστης επικοινωνεί μέσω της φορητής του συσκευής με κάποιο δημόσιο απομακρυσμένο δίκτυο (Public WLAN) με το παγκόσμιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών (UMTS). Το τελευταίο επικοινωνεί μέσω RNS (Radio Network Controller) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κόμβων που συνδέονται στο δίκτυο πυρήνα IP. Με το τελευταίο νοείται ένα μπλοκ δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μιας προγραμματιζόμενης συστοιχίας πυλών που θα επιτρέψουν τη διασύνδεση μεταξύ PSTN δικτύων και SS7 συστημάτων[12].

Για παράδειγμα, ένας χρήστης 4G που αναζητά πληροφορίες σχετικές με τις ταινίες που παίζονται σε κοντινούς με αυτόν κινηματογράφους, θα μπορεί να χρησιμοποιεί τη τερματική του συσκευή για να συνδέεται ασύρματα σε διάφορα δίκτυα, όπως π.χ. σε ένα δίκτυο GPS (ώστε να καθορίζεται η τρέχουσα θέση χρήστη) WLAN (ώστε να λαμβάνει μια προεπισκόπηση των ταινιών) και UMTS (για πραγματοποίηση κλήσεων σε κάποιον από αυτούς τους κινηματογράφους). Για να

[11] Ασύρματο πρότυπο που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή δεδομένων σε μικρές αποστάσεις από σταθερές και κινητές συσκευές και συντελεί στην κατασκευή δικτύων προσωπικής περιοχής.
[12] Σύστημα σηματοδότησης που αποτελεί ένα διεθνές πρότυπο τηλεπικοινωνιών που ορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα στοιχεία του δικτύου σε ένα δημόσιο δίκτυο μεταγωγής (PSTN) ανταλλάσσουν πληροφορίες πάνω από ένα ψηφιακό δίκτυο σηματοδότησης. Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο SS7 ονομάζονται σημεία σηματοδότησης.

καταστούν όλα τα ανωτέρω εφικτά, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα roaming[13] μεταξύ των διαφόρων ασύρματων δικτύων, που θα εξυπηρετήσει την κινητικότητα τερματικών μεταξύ απομακρυσμένων γεωγραφικών περιοχών.



Εικόνα 4. Αρχιτεκτονική 4G δικτύου [πηγή 11]

Υπάρχουν δύο βασικά ζητήματα αναφορικά με την κινητικότητα των τερματικών: *διαχείριση θέσης* και *διαχείριση μεταφοράς (handoff)*. Αναφορικά με το πρώτο ζήτημα θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα σημερινά δίκτυα χωρίζουν την επιφάνειά τους σε ένα πλήθος από περιοχές εντοπισμού (LA - Location Areas). Κάθε LA περιέχει έναν αριθμό κυψελών και κάθε τερματικό που εισέρχεται σε νέα LA εκτελεί μια ενημέρωση θέσης (location update).

Όταν καταφθάνει μια εισερχόμενη κλήση, το δίκτυο εντοπίζει το τερματικό στέλνοντας μικρά paging μηνύματα ταυτόχρονα σε όλες τις κυψέλες μέσα στο συγκεκριμένο LA. Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτής της διαδικασία εντοπισμού και σελιδοποίησης (paging) είναι ότι η απαίτηση από το δίκτυο να στέλνει μηνύματα σε όλες τις κυψέλες κάθε φορά που καταφθάνει μια κλήση, μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αύξηση του φορτίου στο δίκτυο. Επίσης οι μορφές κινητικότητας και άφιξης κλήσεων μπορούν να ποικίλλουν από τερματικό σε τερματικό, με αποτέλεσμα η επιλογή μεγέθους μιας LA που να ικανοποιεί όλους τους χρήστες, να είναι δύσκολη.

[13] Το roaming διασφαλίζει ότι μια κινούμενη ασύρματη συσκευή (π.χ. κινητό τηλέφωνο) διατηρείται συνδεδεμένη σε ένα δίκτυο χωρίς να υπάρχουν χρονικά διαστήματα δίχως πρόσβαση σε αυτό.

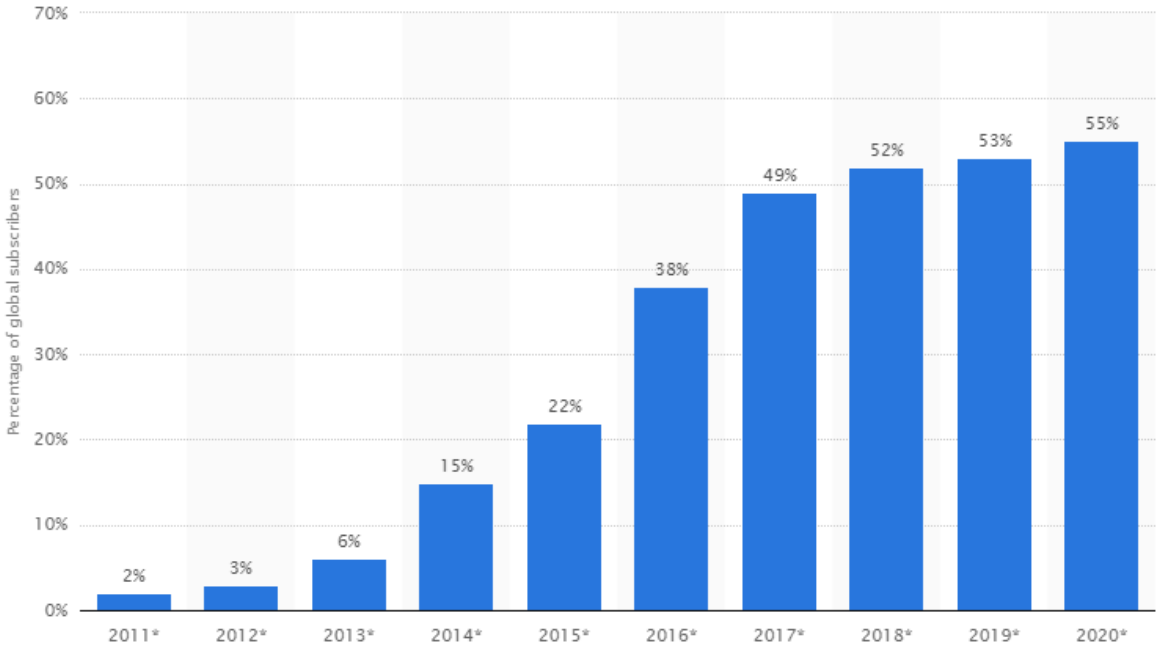
Αναφορικά με το δεύτερο ζήτημα, με τον όρο *διαχείριση μεταφοράς*, νοείται η διαδικασία μεταφοράς μιας κλήσης από τη δικαιοδοσία ενός σταθμού βάσης σε ενός άλλου και πρέπει να εκτελείται όσο το δυνατό πιο σπάνια. Το πρότυπο mobile IPv6 αποτελεί ένα νέο πρωτόκολλο επικοινωνίας για ασύρματα δίκτυα και σύμφωνα με αυτό, κάθε τερματικό διαθέτει μια IPv6 home address. Κάθε φορά που το τερματικό κινείται εκτός του δικτύου παύει να ισχύει η home address και το τερματικό αποκτά μια νέα διεύθυνση που ονομάζεται *care-off address* από το δίκτυο που έχει επισκεφθεί. Η αντιστοιχία μεταξύ *home address* και *care-off address* επιτυγχάνεται με την χρήση ενός πράκτορα (agent)[14] ώστε να υπάρχει συνεχής επικοινωνία.

1.4 Προβλέψεις δικτύων τέταρτης γενιάς 4G

Στη παράγραφο αυτή αναλύεται μια έκθεση του Yankee Group[15], σχετικά με τις προβλέψεις των 4G δικτύων, για το έτος 2011 με σκοπό να συγκρίνουμε τις αναμενόμενες βελτιώσεις από την έλευση των δικτύων αυτών με τις αντίστοιχες από την έλευση των 5G δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, τα σημαντικότερα σημεία της εν λόγω έκθεσης ήταν τα εξής:

Μέχρι το τέλος του 2011, η σημαντικότερη τεχνολογία 4G στον κόσμο (LTE – Long Term Evolution)[16] θα αντιπροσωπεύει μόνο το 0,04% του συνόλου των γραμμών κινητής τηλεφωνίας. Η πρόβλεψη αυτή τελικά δεν επαληθεύτηκε, αφού όπως φαίνεται στο σχετικό διάγραμμα της Εικόνας 5 που ακολουθεί, το έτος αυτό το 2% του συνόλου των γραμμών κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιήθηκε από την 4G τεχνολογία. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται επίσης και η αναμενόμενη χρήση γραμμών κινητής τηλεφωνίας μέχρι το έτος 2020 [6].

[14] Πρόγραμμα που εκτελεί κάποια συλλογή πληροφοριών ή επεξεργασία στο παρασκήνιο. Τυπικά, είναι μια μικρή και προκαθορισμένη διεργασία που επιτελεί ένα συγκεκριμένο έργο.
[15] Ανεξάρτητη εταιρία ερευνών και συμβούλων τεχνολογίας που ιδρύθηκε το 1970.
[16] Τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται από τον οργανισμό 3GPP.



Εικόνα 5. Χρήση γραμμών κινητής τηλεφωνίας από την 4G τεχνολογία [πηγή 3]

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα έκθεση, οι προβλέψεις για τα 4G δίκτυα για το έτος 2011 ήταν οι εξής:

- *Τα 4G δεν θα καταφέρουν να κερδίσουν τις επιχειρήσεις*: Σήμερα, λιγότερο από το ένα τρίτο των επιχειρήσεων πιστεύουν ότι τα 4G δίκτυα είναι σημαντικά. Ο αριθμός αυτός δεν θα αυξηθεί μέχρι το τέλος του έτους.

- *Κινέζοι ανταγωνιστές θα κερδίσουν την μάχη με τους υποστηρικτές των 3G*. Τόσο η Huawei όσο και η ZTE θα επιτύχουν στρατηγικές νίκες και εκτός Ασίας, εις βάρος των καθιερωμένων εταιριών. Σήμερα αυτή η πρόβλεψη έχει ικανοποιηθεί εν' μέρει, όπως δείχνουν σχετικές έρευνες στον Πίνακα 1 που ακολουθεί [20]. Η Samsung και η Apple είναι όπως αναμενόταν οι εταιρείες με τις περισσότερες πωλήσεις στη διάρκεια του 2014, πετυχαίνοντας μαζί πάνω από 580 εκατομμύρια πωλήσεις και συγκεντρώνοντας το 31,1% της παγκόσμιας αγοράς. Συγκεκριμένα, η Samsung με 392,5 εκατομμύρια πωλήσεων βρέθηκε για τα έτη 2013 – 2014 στην πρώτη θέση των κατασκευαστών, με ποσοστό 20,9% και η Apple, με 191,4 εκατομμύρια πωλήσεις στη δεύτερη θέση, με ποσοστό 10,2%. Στην τρίτη θέση βρίσκεται η Microsoft με 185,6 εκατομμύρια πωλήσεις και ποσοστό 9,9% επί των παγκόσμιων πωλήσεων. Ακολουθούν η Lenovo, η LG και η Huawei, με 84 εκατομμύρια, 76 εκατομμύρια και 70 εκατομμύρια πωλήσεις αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Παγκόσμιες πωλήσεις κινητών τηλεφώνων σε τελικούς χρήστες από τον προμηθευτή το 2014 (σε χιλιάδες μονάδες) [πηγή 20]

Εταιρεία	**Μονάδες (2014)**	**Μερίδιο αγοράς (2014)**	**Μονάδες (2013)**	**Μερίδιο αγοράς (2013)**
Samsung	392,546	20,9	444,472	24,6
Apple	191,426	10,2	150,786	8,3
Microsoft	185,660	9,9	250,835	13,9
Lenovo	84,029	4,5	66,463	3,7
LG Electronics	76,096	4,0	69,094	3,8
Huawei	70,499	3,8	53,296	2,9
TCL Communication	64,026	3,4	49,538	2,7
Xiaomi	56,529	3,0	13,423	0,7
ZTE	53,910	2,9	59,903	3,3
Sony	37,791	2,0	37,596	2,1
Micromax	37,094	2,0	25,431	1,4
Others	629,360	33,5	587,764	32,5
Σύνολο	1,878,968	100,0	1,808,600	100,0

- *Μια επίθεση denial-of-service[17] θα μπορούσε να ρίξει ένα 4G δίκτυο*: Προκειμένου να προλάβουν την κούρσα της ανάπτυξης της 4G τεχνολογίας οι φορείς δεν δίνουν την απαιτούμενη προσοχή στον τομέα της ασφάλειας. Σε αυτή την περίπτωση το τίμημα το αναλαμβάνουν οι χρήστες του δικτύου.
- *Οι συσκευές 4G θα αποτελούν hotspot*: Οι χρήστες θα επιζητούν την απλότητα και την εξοικονόμηση ενέργειας των hotspot[18], με αποτέλεσμα τη μείωση των 4G συνδρομών σε μακροπρόθεσμη βάση.
- *Ο ανταγωνισμός στις ΗΠΑ θα δημιουργήσει χάος στο Μάρκετινγκ*: Εκτιμάται ότι θα επικρατήσει σύγχυση στην αγορά, καθώς πολύ φορείς θα θελήσουν να χρησιμοποιήσουν τον όρο 4G, από το WiMAX (Worldwide Interoperability Microwave Access) και το LTE έως και το HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access)[19].

[17] Προσπάθεια με στόχο να καταστεί -προσωρινά ή επ' αόριστο- μια μηχανή (Η/Υ) ή ένα δίκτυο πόρων μη διαθέσιμο για τους χρήστες του.

[18] Για τους χρήστες των φορητών υπολογιστών εξοπλισμένων με ασύρματη σύνδεση, ένα hotspot είναι ένας κόμβος ασύρματου τοπικού δικτύου (LAN) που παρέχει σύνδεση στο διαδίκτυο καθώς και σε εικονικά δημόσια δίκτυα (VPNs – Virtual Public Networks). Για παράδειγμα, ένας ταξιδιώτης με laptop εξοπλισμένο για WiFi μπορεί να αναζητήσει ένα τοπικό hotspot, να επικοινωνήσει με αυτό και να συνδεθεί μέσω του δικτύου του στο διαδίκτυο με ασφαλή σύνδεση.

[19] Η συγκεκριμένη τεχνολογία διπλασιάζει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με το απλό HSPA, δίνοντας

- *Οι χρήστες 4G θα δαπανήσουν το διπλάσιο χρόνο πλοήγησης στο Web* από ότι οι χρήστες που δεν χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία: Οι εταιρίες που έχουν επενδύσει σε ιστοσελίδες για κινητά με δωρεάν ή σχεδόν δωρεάν πλούσιο περιεχόμενο πολυμέσων θα ωφεληθούν περισσότερο.

- *Το Διαδίκτυο δεν θα σώσει τους επιχειρηματίες στην αγορά εφαρμογών για κινητά*: Οι επιχειρηματίες πιστεύουν ότι το 4G θα τους βοηθήσει στην επίτευξη μεγαλύτερων κερδών στον τομέα των φορητών εφαρμογών (mobile apps), ωστόσο διαφαίνεται ότι η Google και η Apple θα συνεχίσουν να έχουν τα πρωτεία. Αυτή η πρόβλεψη δεν έχει επίσης επαληθευτεί, αφού όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1, τα πρωτεία στο χώρο των πωλήσεων κινητών τηλεφώνων τα κατέχει η εταιρεία Samsung.

- *Ο φορέας εικονικού κινητού δικτύου MVNO[20] (Mobile Virtual Network Operator) θα στηριχτεί στην διαφημιστική εκστρατεία, ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος αυτής δεν θα οδηγήσει πουθενά*: Το 4G MVNO θα αποτύχει για τον ίδιο λόγο που απέτυχαν και τα περισσότερα 2G και 3G MVNO.

- *Ο Φορέας (Carrier) VoIP[21] (Voice over IP) θα εξακολουθήσει να είναι AWOL[22](Absent without leaving)*: Η ταχύτητα και το εύρος ζώνης στα 4G δίκτυα είναι απαραίτητα χαρακτηριστικά για μετάδοση πολυμέσων, αλλά δεν αποτελούν αναγκαιότητα για την μετάδοση φωνής.

- *Η Google θα ηγηθεί των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας*: Μπορεί αυτή τη στιγμή η Google να βρίσκεται πίσω από την Apple και άλλες εταιρίες στο χώρο των κινητών, ωστόσο θα πάρει γρήγορα το προβάδισμα όσο περισσότερο διαδίδονται οι υπηρεσίες 4G. Το μεγαλύτερο εύρος ζώνης δίνει την δυνατότητα για μεγαλύτερη κίνηση των δεδομένων και η Google είναι η πιο επιτυχημένη εταιρία στην διαχείρισή τους, όπως αναφέρει το Yankee Group.

τη δυνατότητα στους Παρόχους της τεχνολογίας WCDMA να διαθέτουν πρόσβαση στο διαδίκτυο με πολύ χαμηλότερες χρεώσεις. Οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων φτάνουν μέχρι τα 42Mbps. Διαθέτει στον τελικό χρήστη χαμηλότερο latency (απαιτούμενος χρόνος που χρειάζεται να πάει το πακέτο από το ένα άκρο στο άλλο) και είναι η βέλτιστη λύση για μεμονωμένους και συναθροιζόμενους φορείς) στα 5 MHz.

[20] Ασύρματος Πάροχος υπηρεσιών επικοινωνίας που δεν διαθέτει τη δική υποδομή ασύρματου δικτύου για να παρέχει υπηρεσίες στους πελάτες της. Για το λόγο αυτό ένας Πάροχος MVNO εισέρχεται σε μια επιχειρηματική συμφωνία με ένα Πάροχο υπηρεσιών κινητού δικτύου, προκειμένου να αποκτήσει ένα μεγάλο μέρος της πρόσβασης σε υπηρεσίες δικτύου σε τιμές χονδρικής και στη συνέχεια θέτει τιμές λιανικής προκειμένου να πουλήσει τις υπηρεσίες πρόσβασης στους καταναλωτές.

[21] Μεθοδολογία και σύνολο τεχνολογιών για την παράδοση φωνητικών επικοινωνιών (voice communications) και συνόδων πολυμέσων (multimedia sessions) μέσω Internet Protocol (IP) δικτύων, όπως το Internet.

[22]Ενδειξη (συντομογραφία) ότι ο χρήστης είναι κοντά στον υπολογιστή, αλλά δεν τον χρησιμοποιεί για εκτέλεση προγραμμάτων/εφαρμογών, αλλά για επικοινωνία με άλλους χρήστες. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη συντομογραφία χρησιμοποιείται στο Internet και την ηλεκτρονική επικοινωνία, όπως e-mail, IRC, instant messaging, ή μέσω SMS.

1.5 Πλεονεκτήματα δικτύων 4ης γενιάς

Τα δίκτυα 4G σε συνδυασμό με το Cloud Computing (Υπολογιστική Νέφους) και άλλες προηγμένες τεχνολογίες, προσφέρουν πλεονεκτήματα και οφέλη που ξεπερνούν τον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η δημιουργικότητα που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ εφαρμογής, προγραμματιστών, αγορών και πρόσφατων αναπτυχθέντων υποδομών οδήγησε σε προσφορές που ανταποκρίνονταν στις ανάγκες των εγχώριων αγορών των κρατών και πολλές φορές προκαλούν το ενδιαφέρων αγορών του εξωτερικού.

Πιο συγκεκριμένα, τα επίπεδα των επενδύσεων και των οικονομικών αποδόσεων ξεκινούν με τα χαρακτηριστικά των δικτύων 4G. Από τεχνικής πλευράς, το 4G υποσχέθηκε τρία οφέλη σε σχέση με το 3G: αυξημένη απόδοση, χαμηλότερη καθυστέρηση και ισχυρότερη ασφάλεια. Η πρόοδος σε συναφής τομείς, διευρύνει αυτές τις δυνατότητες. Για παράδειγμα, υπάρχουν σχετικά νέες εξελίξεις αναφορικά με συσκευές απεικονίσεις, μικροαισθητήρες, επεξεργαστές και κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη τεχνολογία αποτέλεσε το *Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing),* η οποία κυριαρχεί σήμερα στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το έτος 2009 τα έσοδα από την συγκεκριμένη τεχνολογία για τις ΗΠΑ ήταν της τάξης των 35 δις δολαρίων, ενώ το έτος 2014 είχαν υπερδιπλασιαστεί και ήταν της τάξης των 76 δις δολαρίων. Οι υπηρεσίες που βασίζονται στο Cloud επιτρέπουν στις φορητές συσκευές να είναι πιο συμπαγείς και αποτελεσματικές, καθιστώντας τες με τον τρόπο αυτό περισσότερο χρήσιμες και ισχυρές. Εφαρμογές, αποθήκευση και υπολογιστική ισχύς μπορούν να διαμένουν στο νέφος, αλλά αυτό είναι δυνατό μόνο αν η συνδεσιμότητα είναι ισχυρή, αξιόπιστη και ασφαλής, συνεπώς έχει σημασία η αντιστοίχιση της 4G τεχνολογίας με το Cloud Computing. Ενδεικτικά αναφέρεται η εταιρία *Salesforce.com* που έχει αναπτύξει ως βασικό στοιχείο της στρατηγικής της κινητές τεχνολογίες Cloud Computing.

Η έλευση της ασύρματης χωρητικότητας υψηλής απόδοσης σε συνδυασμό με την υποδομή Cloud και άλλα πλεονεκτήματα, προκαλούν τον πολλαπλασιασμό νέων προσφορών και δυνατοτήτων που υπερβαίνουν τις δυνατότητες της τεχνολογίας 3G. Όχι μόνο οι καταναλωτές, αλλά και μια ποικιλία αμερικανικών βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων και μη κερδοσκοπικών και κυβερνητικών φορέων, χρησιμοποιούν συσκευές και υπηρεσίες που ενσωματώνουν τις δυνατότητες της τεχνολογίας 4G, για την καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών, των ασθενών, των φοιτητών κ.λ.π.

1.6 Συμπεράσματα

Υπάρχουν πολλά αλληλεξαρτώμενα και πολύπλοκα επιμέρους τμήματα που εργάζονται από κοινού για τα 4G δίκτυα. Τα οφέλη για τους Παρόχους υπηρεσιών και τους τελικούς χρήστες οδήγησαν στην έγκριση των υπηρεσιών 3G, που με τη σειρά τους, οδηγούν στην απαίτηση για ακόμα πιο προηγμένες υπηρεσίες. Η υλοποίηση των 4G γκρέμισε το τείχος που χωρίζει ασύρματες και ενσύρματες υπηρεσίες, το οποίο για αρκετά χρόνια αποτελούσε ένα δύσκολο εγχείρημα.

Με τη χρήση των προαναφερόμενων τεχνολογιών και τεχνικών, τα 4G δίκτυα επιτυγχάνουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν μεγάλη κινητικότητα μέσα στο δίκτυο παραμένοντας συνδεδεμένοι. Με την έμφασή τους στις πολυμεσικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, άνοιξαν ένα νέο παράθυρο δυνατοτήτων σε καταναλωτές και αγορές, προκειμένου να διευκολυνθούν οι on-line αγορές, οι οποίες άλλωστε τα τελευταία χρόνια έχουν σημειώσει και σημειώνουν μεγάλα άλματα προόδου. Τα δίκτυα 4ης γενιάς βρίσκονται στο χρονικό μεταίχμιο των δικτύων επικοινωνιών καθότι από τη μια μεριά αποτελούν τη βελτίωση των δικτύων 3ης γενιάς (από την άποψη του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, με αποτέλεσμα να είναι πιο προσιτές κάποιες υπηρεσίες που μέχρι πρότινος δεν ήταν εφικτές) και από την άλλη εισάγουν καινοτόμες τεχνολογίες όπως αυτο-οργάνωση κυψελών, χρήση Femtocell[23] κυττάρων, τα οποία χρησιμοποιούνται στα ετερογενή δίκτυα με στόχο τη χαμηλότερη σπατάλη ενέργειας για τους σταθμούς βάσης. Αυτά είναι ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία ο χρήστης δεν τα αντιλαμβάνεται, αποτελούν όμως τη βάση για τις επόμενες γενιές δικτύων.

[23] Τα Femtocell ή αλλιώς οι οικιακοί σταθμοί βάσης είναι μια τεχνολογία που σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί τις απαιτήσεις των χρηστών σε παροχή υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και υψηλής ποιότητας υπηρεσιών σε εσωτερικούς χώρους καθώς σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες περίπου το 65% των τηλεφωνημάτων και το 90% των υπηρεσιών δεδομένων που δέχεται ένα κυψελωτό δίκτυο κινητής τηλεφωνία είναι σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων. Μία φεμοκυψέλη ουσιαστικά επιτρέπει στον Πάροχο να επεκτείνει την κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, ιδιαίτερα όταν η κάλυψη του δικτύου είναι περιορισμένη.

Κεφάλαιο 2 – Χαρακτηριστικά δικτύων 5ης γενιάς

2.1 Απαιτήσεις χρηστών που ικανοποιούνται με τα δίκτυα 4G

Τα ασύρματα δίκτυα 4ης γενιάς υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με αυτά της 3ης γενιάς κατά μια τάξη μεγέθους (τουλάχιστον) και επίσης παρέχουν επαρκή ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων είναι περίπου 100 Mbps ή και μεγαλύτεροι με αποτέλεσμα την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων με χαμηλότερο κόστος. Μερικές από τις απαιτήσεις χρηστών που ικανοποιούνται από τα δίκτυα 4ης γενιάς περιγράφονται στην συνέχεια:

- *Βελτιωμένη συνδεσιμότητα (Improved Connectability):* ο χρήστης είναι συνέχεια συνδεδεμένος σε δίκτυα πρόσβασης που του εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη χρήση πόρων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται κάθε φορά η ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).
- *Συνεχής σύνδεση (Always On-Line):* ο χρήστης είναι πάντα συνδεδεμένος στο δίκτυο και για όσο διάστημα το τερματικό του είναι σε λειτουργία, μπορεί να συνδέεται στο δίκτυο και να έχει πολύ μικρή καθυστέρηση στην πρόσβαση. Τα δίκτυα 3ης γενιάς αντιμετώπιζαν πρόβλημα κορεσμού διότι οι υπηρεσίες που προσέφεραν δεν μπορούσαν να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα πολλούς πελάτες. Αντίθετα, τα δίκτυα 4ης γενιάς υποστηρίζουν έναν μεγάλο αριθμό χρηστών.
- *Κάλυψη υπηρεσιών ευρείας περιοχής (Ubiquitous Service Coverage):* ο χρήστης είναι σε θέση να χρησιμοποιεί υπηρεσίες χωρίς τους χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς που υπήρχαν στα δίκτυα 3ης γενιάς. Αυτή η κάλυψη μπορεί να μετρηθεί από την διαθεσιμότητά της σε μια περιοχή για έναν ελάχιστο αριθμό χρηστών. Το δίκτυο 4ης γενιάς προσφέρει τη δυνατότητα πρόσβασης σε ειδικές υπηρεσίες και ο Πάροχος μπορεί να προσαρμόζει τις δυνατότητες του δικτύου, έτσι ώστε να μην διακινδυνεύετε η κάλυψη μιας υπηρεσίας
- *Υποστήριξη πρωτοκόλλων internet νέας γενιάς (IPv6) και πολυμετάδοσης (multicasting):* ιδιαίτερα σημαντικά χαρακτηριστικά για εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας του αυξανόμενου αριθμού συσκευών που συνδέονται στο Διαδίκτυο, κρίθηκε αναγκαία η μετάβαση από το IPv4 στο IPv6. Με το IPv4 προβλεπόταν η σύνδεση στο διαδίκτυο 2^{32} διαφορετικών συσκευών, ενώ πλέον με το IPv6 ο αριθμός των εν δυνάμει συνδεδεμένων συσκευών εκτοξεύεται στο $3.4*10^{38}$.

Εκτός από τις προαναφερόμενες απαιτήσεις των χρηστών, θα πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι η έλευση των δικτύων 4ης γενιάς βοήθησε στην ανάπτυξη και στη βελτίωση παρεχόμενων υπηρεσιών σε τομής όπως η Τηλεϊατρική (γρήγορη μετάδοση δεδομένων ιστορικού ασθενών), η εκπαίδευση εξ ’αποστάσεως (με χρήση πολυμεσικού υλικού από χρήστες που είναι εν’ κινήσει), η διαδραστική ψυχαγωγία (τηλεόραση – video), η εικονική πλοήγηση για εύκολο εντοπισμό χώρων,

τοποθεσιών [2], βελτίωση της ασφάλειας στη μετάδοση δεδομένων (με αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση των τραπεζικών συναλλαγών) κ.λ.π. Ο τομέας που έχει επωφεληθεί στο μέγιστο βαθμό από την χρήση υπηρεσιών δικτύων 4ης γενιάς είναι το ηλεκτρονικό εμπόριο, καθότι οι πωλήσεις των ηλεκτρονικών καταστημάτων έχουν σημειώσει αλματώδη αύξηση τα τελευταία χρόνια.

2.2 Διαδικασία οικοδόμησης των 5G δικτύων

Η διαδικασία της οικοδόμησης μιας νέας ασύρματης γενιάς και συγκεκριμένα της 5G, απαιτεί μια συνεργασία μεταξύ τριών διαφορετικών επιπέδων:

Επίπεδο 1: απαιτήσεις και στόχοι, συχνά πολύ προχωρημένοι, που θέτουν τα ασύρματα συστήματα τόσο μεσοπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

Επίπεδο 2: έννοιες συστήματος που ευθυγραμμίζονται για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις και συγχρόνως να δημιουργήσουν το πλαίσιο για τεχνολογική καινοτομία.

Επίπεδο 3: λεπτομερείς τεχνολογικές συνιστώσες του νέου ασύρματου συστήματος.

Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί το project METIS[24], το οποίο είναι μεταξύ των μεγαλύτερων ερευνητικών προσπαθειών στον κόσμο, αφιερωμένο στην 5G ασύρματη τεχνολογία. Στο 1ο επίπεδο, το METIS προσδιορίζει πέντε 5G σενάρια: (1) εκπληκτικά γρήγορα (amazingly fast), (2) πολύ καλή εξυπηρέτηση σε ένα πλήθος ατόμων (great service in a crowd), (3) διάχυτη επικοινωνία αντικειμένων (ubiquitous things communicating), (4) καλύτερη εμπειρία (best experience follows you), (5) αξιόπιστες και σε πραγματικό χρόνο συνδέσεις (super real time and reliable connections). Το project METIS οριοθετεί τους ακόλουθους στόχους:

- 1000 φορές μεγαλύτερος όγκος δεδομένων κινητών δεδομένων (mobile data) ανά περιοχή.
- 10 έως 100 φορές υψηλότερος ρυθμός δεδομένων για ένα τυπικό χρήστη.
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών.
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για συσκευές χαμηλής ισχύος.
- 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση μεταξύ τελικών συσκευών (E2E).

Αναφορικά με το 2ο επίπεδο, ο στόχος είναι η μετατροπή των πολύ προχωρημένων στόχων του 1ου επιπέδου σε επιχειρησιακές απαιτήσεις που προσδιορίζονται με τη βοήθεια των συνιστωσών της ασύρματης τεχνολογίας. Επιπλέον, δείχνει πως οι τεχνολογικές συνιστώσες μπορούν να συνδυαστούν για να επιτευχθούν οι στόχοι του 1ου επιπέδου. Για παράδειγμα, μια από τις απαιτήσεις που προσδιορίζονται στο 1ο επίπεδο είναι η χρήση των ασύρματων συνδέσεων για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας [7]. Η αρχή του συστήματος που είναι καθοριστικής σημασίας για

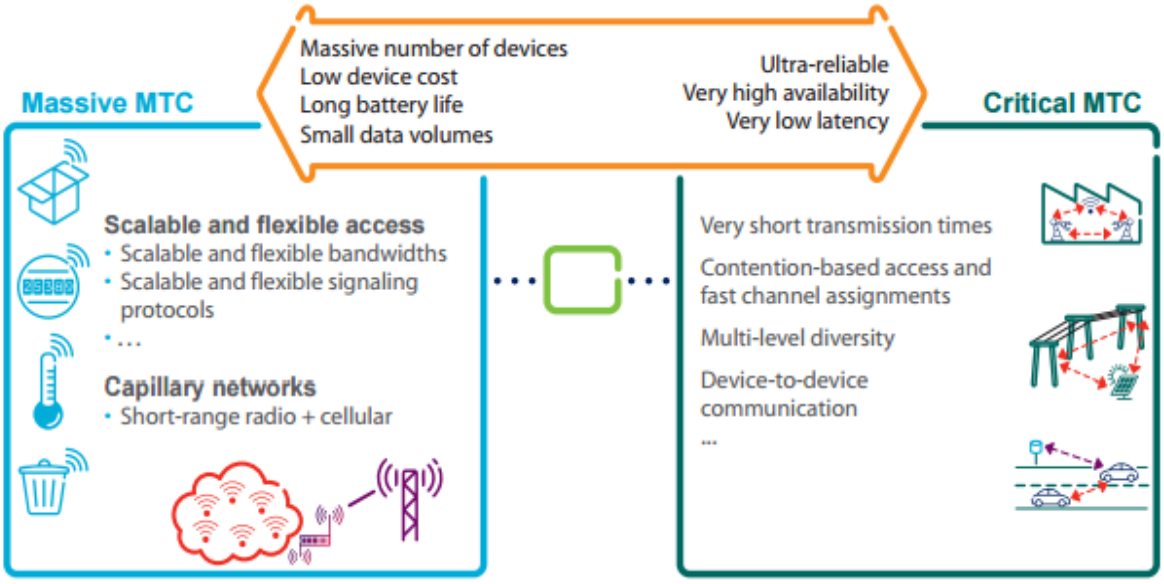
[24] Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty – twenty information society

την επίτευξη αξιόπιστης και μικρής καθυστέρησης σύνδεσης, είναι η χρήση επικοινωνίας συσκευής – προς – συσκευή (D2D, Device – to – Device) σε συνδυασμό με την επικοινωνία με κυψέλες (cellular communications). Αυτές οι έννοιες του 2ου επιπέδου δημιουργούν ένα πλαίσιο για την ενσωμάτωση και βελτιστοποίηση των τεχνολογικών συνιστωσών του επιπέδου 3 και έτσι υλοποιούν το σενάριο: *Αξιόπιστες και σε πραγματικό χρόνο συνδέσεις*.

Στο επίπεδο 3, το METIS λειτουργεί πάνω σε ένα μεγάλο αριθμό καινοτόμων τεχνολογικών συνιστωσών, όπως δομή πλαισίων, πρωτοκόλλων αναμετάδοσης, εκτίμηση καναλιών, που έχουν βελτιστοποιηθεί για να ικανοποιούν διαφορετικές προδιαγραφές, όπως ο μέσος ρυθμός, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία για ένα σταθερό ρυθμό κ.λ.π.

2.3 Νέες απαιτήσεις και υπηρεσίες που αναμένεται να ικανοποιηθούν από την 5G τεχνολογία

Εφαρμογές, όπως η κινητή τηλεφωνία και το κινητό εύρος ζώνης είναι στοχεύουν στην παροχή αποτελεσματικών υπηρεσιών επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων. Αντίθετα, πολλές από τις νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης που οδηγούν τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες της 5G τεχνολογία, είναι από άκρο σε άκρο (end – to - end επικοινωνία) μεταξύ μηχανών, με αποτέλεσμα συχνά να αποκαλούνται επικοινωνία τύπου - μηχανής (MTC – Machine Type Communication). Παρόλο που εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, οι εφαρμογές MTC μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες - *μαζική MTC (massive MTC)* και *κρίσιμη MTC (critical MTC)*, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις τους [8]. Στην Εικόνα 6 που ακολουθεί, φαίνονται οι δύο κύριες κατηγορίες MTC.

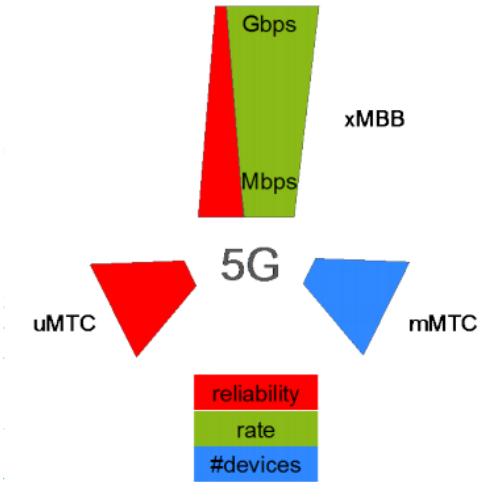


Εικόνα 6. Μαζική MTC (massive MTC) και κρίσιμη MTC (critical MTC) [πηγή 8]

Η **μαζική MTC** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις κλιμακούμενης και ευέλικτης προσπέλασης (scalable and flexible access) και αναφέρεται σε υπηρεσίες που συνήθως καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών, συνήθως αισθητήρες και ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες έχουν εξαιρετικά χαμηλό κόστος και καταναλώνουν πολύ χαμηλά ποσά ενέργειας, προκειμένου να διατηρήσουν μεγάλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σαφώς, η ποσότητα των δεδομένων που παράγονται από κάθε αισθητήρα είναι συνήθως πολύ μικρή και συνεπώς η πολύ χαμηλή καθυστέρηση δεν είναι μια κρίσιμη απαίτηση. Οι ενεργοποιητές έχουν επίσης περιορισμένο κόστος και μεγέθη ενέργειας που κυμαίνονται από πολύ χαμηλή έως μέτρια κατανάλωση ενέργειας.

Η **κρίσιμη MTC** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτούνται πολύ μικροί χρόνοι μετάδοσης, επικοινωνία D2D και ποικιλομορφία πολλαπλών επιπέδων. Αναφέρεται σε εφαρμογές όπως η κυκλοφοριακή ασφάλεια, ο έλεγχος των υποδομών ζωτικής σημασίας και η ασύρματη συνδεσιμότητα για βιομηχανικές διεργασίες. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν πολύ υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα από πλευράς ασύρματης συνδεσιμότητας, καθώς και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, το χαμηλό κόστος της συσκευής και η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι τόσο κρίσιμη, όπως για μαζικές εφαρμογές MTC. Ενώ ο μέσος όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται από και προς τις συσκευές μπορεί να μην είναι μεγάλος, είναι χρήσιμη η ύπαρξη μεγάλων στιγμιαίων ευρών ζώνης που θα είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις χωρητικότητας και χρόνου καθυστέρησης (latency).

Το METIS οραματίζεται τρείς γενικές υπηρεσίες: *extreme Mobile BroadBand (xMBB)*, *ultrareliable MTC (uMTC)*, και *massive MTC (mMTC)*, οι οποίες περιγράφονται στην Εικόνα 7, που ακολουθεί στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, για την υπηρεσία xMBB δίνεται έμφαση στους υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς και στην αύξηση της αξιοπιστίας καθώς ο ρυθμός μεταφοράς μειώνεται. Στην υπηρεσία uMTC δίνεται έμφαση στην πολύ υψηλή αξιοπιστία και τέλος στη υπηρεσία mMTC δίνεται έμφαση στο μεγάλο αριθμό των συσκευών.



Εικόνα 7. Οι τρεις γενικές 5G υπηρεσίες [πηγή 7]

Στη συνέχεια περιγράφονται διεξοδικά οι συγκεκριμένες υπηρεσίες:

- Η υπηρεσία **xMBB** (extreme Mobile Broadband) παρέχει αυξημένες ταχύτητες δεδομένων, αλλά και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoE – Quality of Service) μέσω αξιόπιστων προβλέψεων μεταβαλλόμενων (μέτριων) ρυθμών. Οι ρυθμοί μεγαλύτερων δεδομένων απαιτούνται από εφαρμογές όπως η διευρυμένη πραγματικότητα (σύνθεση εικονικής πραγματικότητας και φυσικού κόσμου) και η απομακρυσμένη παρουσία. Η βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών αρχικοποιείται μέσω της απαίτησης παροχής αξιόπιστων μεταβαλλόμενων ποσοστών (μεγαλύτερο του 99%) οπουδήποτε και οποτεδήποτε και της υποβάθμισης της απόδοσης όσον αφορά την ταχύτητα δεδομένων και την καθυστέρηση, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7, η υπηρεσία xMBB εκτείνεται από ρυθμούς αιχμής της τάξεως των Gbps έως μέτρια ποσοστά - της τάξεως των δεκάδων Mbps, όπου οι τελευταίοι προσφέρονται με πολύ υψηλή αξιοπιστία.

- Η υπηρεσία **mMTC** (massive - reliable MTC) παρέχει συνδεσιμότητα για ένα μεγάλο αριθμό συσκευών εξοικονόμησης κόστους και ενέργειας. Η ανάπτυξη αισθητήρων και ενεργοποιητών μπορεί να εκτείνεται σε μια ευρεία περιοχή για την επιτήρηση και τη μέτρηση των περιοχών που καλύπτουν, αλλά και παράλληλα μπορεί να συστεγάζεται με ανθρώπους, όπως συμβαίνει στα δίκτυα body-area[25]. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της υπηρεσίας είναι ο μαζικός αριθμός συνδεδεμένων συσκευών.

- Η υπηρεσία **uMTC** (ultra-reliable MTC) καλύπτει τις ανάγκες για υπηρεσίες εξαιρετικά αξιόπιστες και χρονικά κρίσιμες εφαρμογές, όπως π.χ. η εφαρμογή V2X[26] καθώς και βιομηχανικές εφαρμογές. Και στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις απαιτείται αξιόπιστη επικοινωνία και επιπρόσθετα η εφαρμογή V2X χρειάζεται γρήγορη εγκαθίδρυση της επικοινωνίας. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η υψηλή αξιοπιστία, ενώ ο αριθμός των συσκευών και οι απαιτούμενες ταχύτητες δεδομένων είναι σχετικά χαμηλές.

Οι υπηρεσίες αυτές έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τους ελάχιστους ρυθμούς δεδομένων, την κάλυψη, το μέγεθος του πακέτου δεδομένων κλπ. Θα εξακολουθήσουν να μοιράζονται δυναμικά τους ίδιους πόρους χρόνου – συχνότητας, επιτυγχάνοντας αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Κατά την εισαγωγή μιας νέας υπηρεσίας, δεν θα είναι αναγκαία η αγορά μιας

[25] Ένα δίκτυο body - area (BAN) είναι ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί υπολογιστικές συσκευές που μπορούν να ενσωματωθούν ως εμφυτεύματα στο εσωτερικό του σώματος ή να είναι επιφανειακά τοποθετημένες στο ανθρώπινο σώμα σε μια σταθερή θέση, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών υγείας, ιδιαίτερα για άτομα με επιβαρυμένο ιατρικό ιστορικό.

[26] Η εφαρμογή V2X (όχημα-προς-οτιδήποτε, Vehicle – to – anything) είναι ένα είδος επικοινωνίας που αναφέρεται σε ένα ευφυές σύστημα μεταφορών, όπου όλα τα οχήματα και τα συστήματα υποδομής διασυνδέονται μεταξύ τους. Αυτή η συνδεσιμότητα παρέχει περισσότερη ακριβή γνώση της κατάστασης της κυκλοφορίας σε όλο το οδικό δίκτυο, κάτι που θα βοηθήσει στη μείωση του αριθμού των ατυχημάτων, στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπου, στην μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και στην βελτιστοποίηση των ροών κυκλοφορίας

νέας μπάντας φάσματος συχνοτήτων και η ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης ασύρματης πρόσβασης, διότι με τη χρήση της 5G τεχνολογίας θα μπορούσε να εισαχθεί μια νέα υπηρεσία με επαναχρησιμοποίηση των κοινών συνιστωσών, όπως είναι η διαχείριση της φορητότητας, η λειτουργικότητα και η δυναμική επέκταση ραδιοσυχνοτήτων με την πάροδο του χρόνου.

2.4 Ρυθμιστικά θέματα φάσματος για δίκτυα 5G

Τα ευρυζωνικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας υπόκεινται σε συνεχή αναβάθμιση τόσο της τεχνολογίας τους όσο και της αρχιτεκτονικής τους. Με την ταχύτητα και τη πυκνότητα των δικτύων να αυξάνει δραματικά, καθώς και την εμφάνιση βελτιωμένων τοπολογιών RAN (π.χ. C-RAN ή αλλιώς Centralized RAN), γίνεται αναγκαία η βελτίωση τόσο του συντονισμού εντός των δικτύων όσο και της αποτελεσματικότητάς τους. Ένα κεντρικοποιημένο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, όπως το C-RAN, αποτελεί μια αρχιτεκτονική όπου οι ψηφιακές μονάδες (ή αλλιώς μονάδες βασικής ζώνης) τοποθετούνται σε μια κεντρική τοποθεσία και οι απομακρυσμένες μονάδες (RRU's - Remote Radio Units) σε αποστάσεις έως και αρκετών χιλιομέτρων μακριά από την τοποθεσία βασικής ζώνης. Η επικοινωνία από μια μονάδα βασικής ζώνης σε μια απομακρυσμένη ασύρματη μονάδα είναι συνήθως μια οπτική ίνα που αναφέρεται ως *fronthaul*[27] για να διαφοροποιηθεί από το *backhaul*[28], το οποίο συνδέει τη μονάδα βασικής ζώνης στο δίκτυο.

Για τη βελτίωση των επιδόσεων σε hotspots κυκλοφορίας όπως γραφεία, γήπεδα, πλατείες και μετακινούμενοι κόμβοι, οι κεντρικές αναπτύξεις βασικής ζώνης (baseband) έχουν γίνει όλο και πιο ενδιαφέρουσες για τους φορείς εκμετάλλευσης. Σε μια πλήρως κεντρική εγκατάσταση βασικής ζώνης (baseband), όλη η επεξεργασία βασικής ζώνης βρίσκεται σε μια κεντρική τοποθεσία που εξυπηρετεί πολλαπλές διαμοιρασμένες ασύρματες θέσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

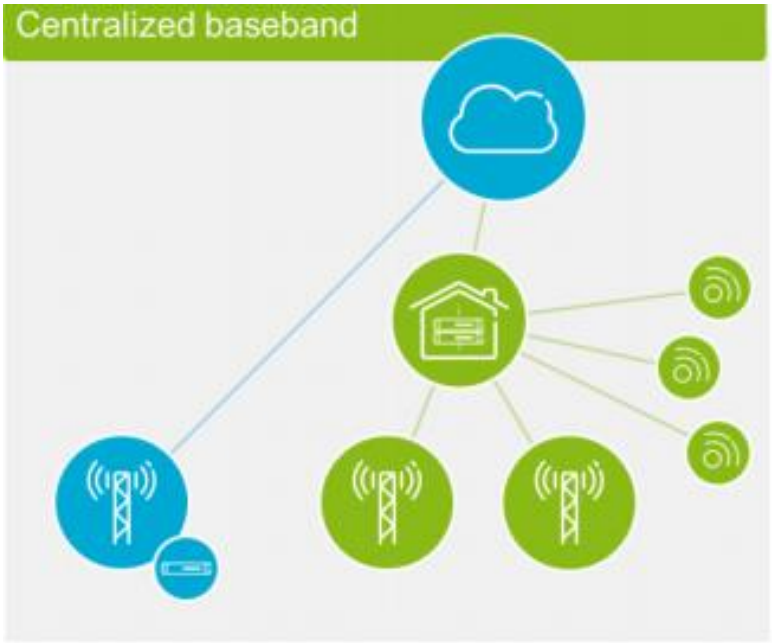
Οι συνδέσεις μετάδοσης μεταξύ των κεντρικών μονάδων baseband και των διαμοιρασμένων ασύρματων θέσεων χρησιμοποιούν fronthaul με βάση την κοινή δημόσια ασύρματη διεπαφή (CPRI - Common Public Radio Interface)[29] που απαιτεί μικρή καθυστέρηση και μεγάλα εύρη ζώνης πάνω από αφιερωμένες οπτικές ίνες.

---

[27] Αποτελεί δίκτυο βασικής ζώνης και η λειτουργία του είναι η ενεργοποίηση των μονάδων βασικής ζώνης (BBUs) προκειμένου αυτές να συνδέσουν με χρήση οπτικών ινών τα απομακρυσμένα ασύρματα τμήματα με το κεντρικό δίκτυο χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση.

[28] Σε ένα ιεραρχικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το τμήμα backhaul του δικτύου περιλαμβάνει τις ενδιάμεσες συνδέσεις μεταξύ του πυρήνα του δικτύου ή του δικτύου κορμού και των μικρών υποδικτύων που βρίσκονται στο κάτω μέρος της ιεραρχίας του δικτύου.

[29] Διεπαφή ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε από κοινού από όλες τις μεγάλες εταιρείες στο χώρο των δικτύων, όπως Ericsson, Huawei, Nokia κ.λ.π. Διευκολύνει πάρα πολύ την διαμοιρασμένη αρχιτεκτονική, αφού επιτρέπει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (10 Gbit/s), υψηλό συγχρονισμό και μικρό ρυθμό σφαλμάτων (10^{-12}) μεταξύ



Εικόνα 8. Η ανάπτυξη κεντρικής βασικής ζώνης (πράσινο) συμπληρώνει μια κατανεμημένη ανάπτυξη βασικής ζώνης (μπλε) [πηγή 7]

Οι τηλεπικοινωνιακοί φορείς που λειτουργούν ευρυζωνικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρειάζεται να ανταπεξέλθουν στις υψηλότερες ταχύτητες και στους Σταθμούς Βάσης διαφορετικών τεχνολογιών (GSM, HSPA+, LTE, LTE-A, etc.) που απαρτίζουν τα ολοένα και πιο πυκνά δίκτυα με μακροκυψέλες (macro cell) και στο άμεσο μέλλον τα υπέρ-πυκνά δίκτυα μικροκυψελών (small cell). Η ευελιξία στην παροχή υπηρεσιών αποτελεί βασικό παράγοντα μακροπρόθεσμης επιτυχίας στην αγορά. Ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος υποχρεώνεται πλέον να προσφέρει, με την ίδια ευκολία και σε μικρό χρονικό διάστημα, μεγάλη γκάμα υπηρεσιών τόσο σε συνδρομητές – όπως ιδιώτες και εταιρικούς πελάτες – όσο και σε άλλους Παρόχους υπηρεσιών.

Το δίκτυο backhaul αποτελεί ουσιαστικό τμήμα του συνολικού δικτύου, αφού οφείλει να υποστηρίζει χρήστες με πολλές και διαφορετικές ανάγκες, καθώς και πλήθος διαφοροποιημένων υπηρεσιών και εφαρμογών, κάτι που είναι ανέφικτο με τα δίκτυα παλαιάς σχεδίασης και αρχιτεκτονικής. Επιπλέον, απαιτητικές εφαρμογές όπως το οικιακό triple-play, το εταιρικό Ethernet και η ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία, ενδέχεται να προκαλέσουν σύντομα συμφόρηση στα υπάρχοντα δίκτυα. Στο μεταξύ, η κλασσική συνδρομητική κίνηση, που μέχρι πρότινος μεταδίδονταν πάνω από σταθερά κυκλώματα (π.χ. SDH, TDM), μετασχηματίζεται σταδιακά σε πακέτα (Ethernet). Όλα αυτά τα δεδομένα συνηγορούν στην ανάγκη μιας νέας προσέγγισης όπου τα δίκτυα backhaul είναι σε θέση να υποστηρίζουν πολλαπλά πρωτόκολλα καθώς και διαφορετικές

απλών κεραιών (RRH - Remote Radio Heads) μέσω των οποίων συνδέεται ο χρήστης στο RAN και συστημάτων υποστήριξης επιχειρήσεων (BSS - Business Support Systems).

τεχνολογίες. Το backhaul ετερογενών δικτύων (HetNet - Heterogeneous Networks) στις αστικές περιοχές θα αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό ζεύξεων, μικρών και μέσων αποστάσεων, με ταχύτητες λίγων εκατοντάδων Mbit/s και οι οποίες στο μεσοπρόθεσμο μέλλον ενδέχεται να ξεπεράσουν σε πολλές περιπτώσεις τα 1 Gbit/s. Η διασύνδεση δύο ή περισσότερων κόμβων σε σειρά ή σε δακτύλιο θα ανεβάσει τις ταχύτητες σε αρκετά Gbit/s. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αναμενόμενη κατά 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα κυκλοφορίας και ο 10 έως 100 φορές υψηλότερος ρυθμός δεδομένων χρηστών, απαιτείται ένα σημαντικά μεγαλύτερο φάσμα από ό,τι μέχρι σήμερα είναι διαθέσιμο για κινητά και ασύρματα συστήματα επικοινωνίας καθώς και ευρύτερο εύρος ζώνης.

Το METIS έχει αναπτύξει μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση των απαιτήσεων εύρους ζώνης. Επιπρόσθετα, έχουν αξιολογηθεί διάφορα σενάρια ανάπτυξης του δικτύου με βάση τα χαρακτηριστικά της ζήτησης της κυκλοφορίας, όπως ορίζεται για τις περιπτώσεις δοκιμής του METIS. Πιο συγκεκριμένα, για την υπηρεσία xMBB έχει προταθεί ένα μίγμα του φάσματος συχνοτήτων που περιλαμβάνει χαμηλότερες ζώνες για σκοπούς κάλυψης και υψηλότερες ζώνες με μεγάλο συνεχόμενο εύρος ζώνης για την αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής ικανότητας, συμπεριλαμβανομένων λύσεων backhaul.

Για την υπηρεσία mMTC, το φάσμα συχνοτήτων κάτω των 6 Hz είναι το πλέον κατάλληλο ενώ το φάσμα κάτω από 1 GHz είναι απαραίτητο για την παροχή μεγάλης κάλυψης και καλής διάχυσης. Το φάσμα συχνοτήτων που διαθέτει αδειοδότηση είναι το πλέον κατάλληλο για την υπηρεσία uMTC. Πραγματοποιήθηκαν αρχικές έρευνες ραδιοφάσματος για να υποστηρίξουν την αναγνώριση των ζωνών συχνοτήτων με μεγάλο και συνεχόμενο εύρος ζώνης και να δείξουν ότι οι ευκαιρίες φάσματος για επίγεια συστήματα κινητής τηλεφωνίας 5G υπάρχουν σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, παρόλο που το συνολικό ποσό του φάσματος είναι μεγαλύτερο στις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων απ' ότι σε χαμηλότερες. Η ζήτηση φάσματος μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Πρέπει να είναι διαθέσιμη επαρκής ποσότητα του φάσματος σε χαμηλές ζώνες του ραδιοφάσματος, προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση για την απρόσκοπτη κάλυψη των 5G υπηρεσιών xMBB και mMTC.
- Είναι απαραίτητη η ύπαρξη φάσματος κάτω των 6GHz για την αντιμετώπιση της κινητής κυκλοφορίας σε αστικές και ημιαστικές περιοχές και για περιπτώσεις μέσης πυκνότητας hotspots.
- Φάσμα άνω των 6GHz είναι απαραίτητο για την ενεργοποίηση ασύρματης πρόσβασης σε σενάρια χρήσης υψηλής πυκνότητας, δηλαδή για την εκπλήρωση της απαίτησης υψηλής

συνεχόμενες ζήτησης εύρους ζώνης για υπηρεσία xMBB και επίσης για ασύρματες λύσης haul για υψηλής χωρητικότητας δικτύων κυττάρων.

- Είναι απαραίτητη η αποκλειστική αδειοδότηση φάσματος συχνοτήτων για την επιτυχία του 5G, προκειμένου αυτό να παρέχει αναμενόμενα QoS και εξασφάλιση επενδύσεων.
- Η κοινή χρήση του ραδιοφάσματος μπορεί να θεωρηθεί ότι συνεισφέρει στην επίτευξη των προβλέψιμων QoS συνθηκών.

Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια απλοποιημένη επισκόπηση σχετικά με την καταλληλόλητα των ζωνών συχνοτήτων για γενικές υπηρεσίες 5G [10].

Πίνακας 2. Απλοποιημένη επισκόπηση καταλληλόλητας ζωνών συχνοτήτων για 5G υπηρεσίες [Πηγή: 10]

	Bands < 6 GHz	Bands > 6 GHz	Exclusive Bands	Shared Bands	License-free Bands
xMBB	☺	☺	☺	☺	☺
mMTC	☺	😐	☺	😐	😐
uMTC	☺	☹	☺	😐	☹

Η διαθεσιμότητα του πρόσθετου φάσματος με τις κατάλληλες ιδιότητες είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership – TCO)[30].

2.5 Υποστηρικτικά εργαλεία και χαρακτηριστικά 5G υπηρεσιών

Η ετερογένεια που υπάρχει μεταξύ των τριών προαναφερόμενων 5G υπηρεσιών, υπονοεί ότι τα συστήματα 5G θα πρέπει να ενσωματώσουν μια ποικιλία υπηρεσιών για κοινές λειτουργίες ελέγχου που θα επιτρέπουν την ενοποίηση των διαφορετικών συνιστωσών της διεπαφής, με τα δεδομένα που θα είναι ειδικά βελτιστοποιημένα για τις υπηρεσίες **xMBB, mMTC** και **uMTC**. Τα βασικά εργαλεία για τη δημιουργία ενός ευέλικτου 5G συστήματος είναι τα εξής:

- *Λεπτό επίπεδο ελέγχου συστήματος:* παρέχει αποτελεσματικά νέες πληροφορίες σηματοδότησης/ελέγχου που είναι αναγκαίες για να εξασφαλίσουν αξιοπιστία, υποστήριξη ευελιξίας φάσματος και μεγάλη ποικιλία συσκευών με πολύ διαφορετικές ικανότητες και διασφάλιση ενεργειακής απόδοσης.
- *Δυναμικό RAN (Radio Access Network):* αποτελεί μια αναθεώρηση των παραδοσιακών υποδομών ασύρματης πρόσβασης ώστε να συμπεριλάβει και δυναμικά στοιχεία, όπως η

[30] Είναι μια οικονομική εκτίμηση που προορίζεται να βοηθήσει τους αγοραστές και τους ιδιοκτήτες να καθορίσουν τις άμεσες και έμμεσες δαπάνες ενός προϊόντος ή ενός συστήματος. Είναι μια λογιστική έννοια της διαχείρισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήρη λογιστική κόστους, όπου περιλαμβάνει το κοινωνικό κόστος.

ταχεία ανάπτυξη σημείων πρόσβασης. Στη δυναμική προσπέλαση του RAN, μια ασύρματη συσκευή μπορεί να παρουσιάζει δυαδικότητα, με την έννοια ότι είναι σε θέση να λειτουργεί τόσο ως τερματικό όσο και ως κόμβος υποδομής. Υποστηρίζει υπερ-πυκνά δίκτυα (Ultra-Dense Networks - UDN) και επικοινωνία συσκευή προς συσκευή (D2D).

- *Τοπικές ροές περιεχομένων/κυκλοφορίας:* το συγκεκριμένο εργαλείο επιτρέπει συγκέντρωση και διανομή σε πραγματικό χρόνο των αποθηκευμένων περιεχομένων.
- *Εργαλειοθήκη φάσματος:* σύνολο εργαλείων που θα επιτρέπει στα 5G συστήματα να λειτουργούν με πρωτοφανή ευελιξία φάσματος σε υφιστάμενες και νέες μπάντες, με διαφορετικά σενάρια κατανομής του φάσματος.

Στη συνέχεια περιγράφεται ένα σύνολο χαρακτηριστικών (ιδιοτιμών) 5G, όπως αυτά προβλέπονται από το project METIS. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ήδη παρόντα σε δίκτυα 4G ή ακόμη και σε δίκτυα προηγούμενων γενεών, όπως η συνεχής τυποποίηση των συνδέσεων D2D. Ωστόσο, αναμένεται η ωρίμανση αυτών των χαρακτηριστικών μέσα στο 5G περιβάλλον και η υποστήριξη φιλόδοξων στόχων, που αντιστοιχούν στο επίπεδο 1. Στην πραγματικότητα, τα ασύρματα δίκτυα 5G θα περιλαμβάνουν τρεις τύπους χαρακτηριστικών:

1. *Ώριμα χαρακτηριστικά των εννοιών του συστήματος που μεταφέρονται από τις προηγούμενες γενιές*: αυτά θα εναρμονιστούν μέσω κατάλληλης προσαρμογής με τα συστήματα 5G. Ενδεικτικά αναφέρονται παραδείγματα, όπως η κάλυψη ευρείας περιοχής, η αποτελεσματική υποστήριξη της φορητότητας και η ενεργητικά αποδοτική λειτουργία τερματικών.
2. *Οι αναδυόμενες έννοιες του συστήματος*: ορισμένες από αυτές, έχουν ήδη αναπτυχθεί και λειτουργούν, αλλά αναμένεται να ωριμάσουν ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις 5G και την αρχιτεκτονική. Ενδεικτικά αναφέρονται παραδείγματα όπως το νέφος RAN, η μείωση του φορτίου μέσω τοπικών συνδέσεων κλπ.
3. *Νέες 5G έννοιες:* αυτές περιλαμβάνουν εξαιρετικά αξιόπιστες συνδέσεις για χρήσιμο έλεγχο, επικοινωνία D2D, μαζικές επικοινωνίες, ευελιξία και παραμετροποίηση σε ένα μεγάλο εύρος του ρυθμού μετάδοσης, απαιτήσεις (προδιαγραφές) αδράνειας κ.λ.π.

Παραδοσιακά, τα κινητά ασύρματα δίκτυα διαθέτουν δύο τύπους κόμβων: κόμβους υποδομής (σημεία πρόσβασης, σταθμοί βάσης) και τερματικούς κόμβους (κινητές συσκευές). Υπήρξε μια σαφής και προκαθορισμένη ιεραρχία των κόμβων υποδομής (master nodes) και των τερματικών κόμβων (slave nodes) που χαρακτήριζε κάθε πρωτόκολλο σχετικά με την εγκατάσταση, την χρήση και την συντήρηση μιας ασύρματης σύνδεσης.

Καθώς η ικανότητα επεξεργασίας και υπολογισμού των ασύρματων δικτύων αυξάνεται, τα δίκτυα 5G θα διαθέτουν κινητές ασύρματες συσκευές που θα είναι στην περιοχή μεταξύ καθαρών υποδομών και καθαρών τερματικών κόμβων. Το εργαλείο κλειδί είναι η άμεση D2D επικοινωνία, όπου συγκεκριμένες λειτουργίες ελέγχου του ασύρματου δικτύου μεταφέρονται στην συσκευή. Όπως προαναφέρθηκε, μια D2D συσκευή μπορεί να έχει ένα δυαδικό ρόλο (κόμβος υποδομής ή τερματικός κόμβος), όπως περιγράφεται στην Εικόνα 9 που ακολουθεί:

Εικόνα 9. Παραδείγματα του δυαδικού ρόλου για μια 5G συσκευή [πηγή 7]

Στη συγκεκριμένη εικόνα εμφανίζονται μεταξύ άλλων τα εξής:

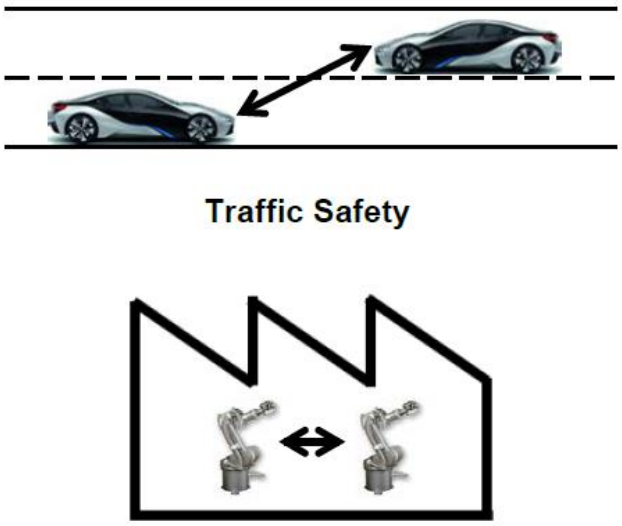
1. Ένα όχημα που ενεργεί ως τερματικό, αλλά και ως κόμβος πρόσβασης μιας ομάδας κυττάρων (cells). Η ομάδα κυττάρων αναπαριστάνεται με διαφορετικές κινητές συσκευές.
2. Προώθηση D2D επικοινωνίας για επέκταση φάσματος, βελτιωμένη ικανότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και περιορισμό της κυκλοφορίας στην περιοχή, αντί της χρησιμοποίησης των πόρων σε μια ευρεία περιοχή.
3. Προσωρινή αποθήκευση δημοφιλούς περιεχομένου σε κινητές συσκευές. Έτσι θα υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσουν αργότερα ως κόμβοι πρόσβασης για την ασύρματη διανομή του περιεχομένου.

Ο διπλός ρόλος της ασύρματης συσκευής παραλληλίζει την αναδυόμενη έννοια του παραγωγού – καταναλωτή (prosumer) στα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα, όπου ο χρήστης μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως καταναλωτής όσο και ως παραγωγός ενέργειας και αποδίδεται κατά κύριο ρόλο σε συσκευές που υποστηρίζουν πολύ μεγάλους ή πολύ αξιόπιστους μεταβαλλόμενους ρυθμούς, όπως στην υπηρεσία xMBB, δεδομένου ότι θα είναι παρόμοιοι τόσο σε μέγεθος όσο και

σε πολυπλοκότητα στους κόμβους υποδομής.

2.5.1. Εξαιρετικά αξιόπιστες συνδέσεις με χαμηλή καθυστέρηση

Τα συστήματα 5G θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις αναφορικά με την αξιοπιστία (reliability), τη διαθεσιμότητα (availability) και την επίτρεψη διαφόρων εφαρμογών, όπως είναι η ασφάλεια της κυκλοφορίας, τα αυτόματα συστήματα ελέγχου των τρένων και των βιομηχανικών αυτοματισμών καθώς και υπηρεσίες ηλεκτρονικής υγείας. Δύο τέτοια παραδείγματα απεικονίζονται στην Εικόνα 10 που ακολουθεί:



Εικόνα 10. Δύο παραδείγματα σεναρίων που απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστη σύνδεση με χαμηλή καθυστέρηση [πηγή 7].

Ορισμένες εφαρμογές οδικής ασφάλειας απαιτούν πακέτα πληροφοριών που πρέπει να παραδοθούν με επιτυχία και με πολύ μεγάλη πιθανότητα, εντός ορισμένης προθεσμίας. Η αποτυχία παράδοσης των συγκεκριμένων πακέτων, μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την υγεία των χρηστών, αναφορικά με την υπηρεσία της οδικής ασφάλειας. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο προσεκτικός σχεδιασμός του επιπέδου εφαρμογής και της ασύρματης σύνδεσης, για να είναι εγγυημένη η ασφάλεια, με παράλληλη διατήρηση αποδεκτού κόστους [11].

Ένα άλλο παράδειγμα που απαιτεί uMTC είναι ο βιομηχανικός έλεγχος και είναι σε θέση να χειριστεί διαφορετικά είδη κυκλοφορίας που χαρακτηρίζονται από περιοδικά και μεμονωμένα δεδομένα καθώς και μηνύματα διαμόρφωσης. Με τον όρο *περιοδικά ή σποραδικά δεδομένα (sporadic data)* νοούνται τα δεδομένα εκείνα που σχετίζονται με εισόδους και εξόδους των αλγορίθμων ελέγχου και πρέπει να παραδοθούν με υψηλή αξιοπιστία, μέσα σε συγκεκριμένη προθεσμία. Σε γενικές γραμμές, ένα τέτοιο τυπικό πακέτο δεδομένων είναι μικρό και το εύρος ζώνης ανά κόμβο είναι χαμηλό. Για παράδειγμα, τα σποραδικά δεδομένα που σχετίζονται. με

συναγερμούς, πρέπει να παραδοθούν εντός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου, που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την κρισιμότητα του συναγερμού. Τα μηνύματα διαμόρφωσης είναι συνήθως μη-πραγματικού χρόνου, αλλά απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία παράδοσης.

Προκειμένου να υποστηριχθούν αξιόπιστες και με χαμηλή καθυστέρηση (<10ms) συνδέσεις μέσα σε σχετικά μικρό εύρος, ασύρματα συστήματα 5G θα χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία D2D ελεγχόμενων δικτύων. Η χρήση δικτύων ευρείας περιοχής (WAN) κάνει αυτή τη μορφή επικοινωνίας D2D ριζικά διαφορετική από τις άλλες λειτουργίες σύνδεσης μικρής εμβέλειας, όπως η σύνδεση D2D σε μη αδειοδοτημένες ζώνες.

2.5.2. Εγγυημένοι μεταβαλλόμενοι ρυθμοί με χαμηλή καθυστέρηση

Το χαρακτηριστικό που συνδέεται πιο συχνά με την τεχνολογία 5G είναι η παροχή εξαιρετικά υψηλών ποσοστών σε κάθε χρήστη, που κυμαίνονται στην τάξη των Gbps. Ωστόσο, από τη σκοπιά του χρήστη, η αξιόπιστη τροφοδότηση μεταβαλλόμενων (κυμαινόμενων) ρυθμών της τάξης των 50-100 Mbps είναι τουλάχιστον εξίσου σημαντική με τη μεγιστοποίηση των ποσοστών αιχμής. Αυτό συχνά εκφράζεται ως παροχή ενός συγκεκριμένου ελάχιστου ρυθμού δεδομένων "παντού". Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό έχει τη δυνατότητα να εισάγει μια νέα κατηγορία υπηρεσιών, που έχει σχεδιαστεί με βάση την παραδοχή ότι η ασύρματη σύνδεση είναι «πάντα εκεί».

Η αξιόπιστη υποστήριξη για μεταβαλλόμενα ποσοστά είναι διαφορετική από τη σημερινή προέκταση διεπαφών αέρα για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, αφού π.χ. η τεχνολογία 4G μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνολογία βελτιστοποιημένη για υψηλά ποσοστά αιχμής. Οι νέες τεχνολογίες μετάδοσης, όπως είναι η μαζική MIMO[31] (Multiple Input Multiple Output) και η ανάπτυξη υπερ-πυκνών δικτύων (UDN) είναι καθοριστικής σημασίας για την παροχή ισχυρού ραδιοσήματος και τη διατήρηση της επιθυμητής αναλογίας σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (Signal – to – Interference – and – Noise Ratio - SINR). *Υψηλή αξιοπιστία* σημαίνει ότι τα μεταβαλλόμενα ποσοστά θα πρέπει να διατηρηθούν όταν δοκιμάζεται το ασύρματο δίκτυο σε πολυσύχναστα σενάρια ή κάτω από υψηλή κινητικότητα. Για παράδειγμα, σε πολυσύχναστα σενάρια, αξιόπιστοι μεταβαλλόμενοι ρυθμοί σημαίνει ότι το σύστημα είναι ικανό να υποβαθμίσει ικανοποιητικά την απόδοση του κάθε χρήστη, αντί να αρνείται υπηρεσίες σε ορισμένους από τους χρήστες.

2.5.3. Ανθεκτική ασύρματη σύνδεση ως αντιστάθμισμα στην έλλειψη υποδομών

Η έλλειψη υποστήριξης υποδομών σε γενικές γραμμές συμβαίνει λόγω: (1) της κινητικότητας

[31] Η χρήση της τεχνολογίας MIMO απαιτεί επιπρόσθετες κεραίες λήψης (συστοιχία κεραιών) καθώς και επιπλέον κεραίες μετάδοσης στους σταθμούς βάσης.

των χρηστών προς χώρους με χειρότερη ή ανύπαρκτη κάλυψη του δικτύου (2) βλάβη του εξοπλισμού ή ζημιές της υποδομής που οφείλονται σε λόγους, όπως οι φυσικές καταστροφές. Τα συστήματα 5G θα πρέπει να ενσωματώσουν τη συμπληρωματική χρήση των ελεγχόμενων δικτύων καθώς και καθαρή D2D ad-hoc[32] επικοινωνία, προκειμένου να προσφέρουν ελάχιστη συνδεσιμότητα σε σενάρια έκτακτης ανάγκης/καταστροφών και να ικανοποιήσει με αποτελεσματικό τρόπο τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας για κρίσιμες εφαρμογές (uMTC), όπως η οδική ασφάλεια και η δημόσια ασφάλεια.

Η επικοινωνία D2D ελεγχόμενου δικτύου παρέχει σημαντικά καλύτερη απόδοση από την καθαρή D2D ad-hoc επικοινωνία, ως αποτέλεσμα της καλύτερης κατανομής των πόρων και της διαχείρισης των παρεμβολών που μπορούν να επιτευχθούν με τη συμμετοχή ενός κεντρικού φορέα όπως είναι ο σταθμός βάσης [12]. Παρόλα αυτά, κρίσιμες εφαρμογές πρέπει να λειτουργούν σε κάποιο βαθμό κατά μήκος ολόκληρου του τομέα των υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα το οδικό δίκτυο στην περίπτωση εφαρμογών οδικής ασφάλειας. Συνεπώς είναι απαραίτητο να καταστεί μεταξύ των συσκευών δυνατή η χρήση της επικοινωνίας D2D ad-hoc ακόμη και σε περιστάσεις εκτός κάλυψης. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να διαθέτουν συστήματα επιλογής τρόπου διαχείρισης της μεταγωγής μεταξύ διαφορετικών τρόπων επικοινωνίας, όπως D2D λειτουργία είτε ad hoc είτε ελεγχόμενη από το δίκτυο. Το μελλοντικό δίκτυο 5G θα εργαστεί επίσης σε περίπτωση μερικής βλάβης του δικτύου που προκαλείται για παράδειγμα από μια φυσική καταστροφή. Με αυτόν τον τρόπο, οι σταθμοί βάσης ή ακόμα και οι συσκευές μπορούν να σχηματίσουν δίκτυα ad-hoc, και ως εκ τούτου να επιτρέπουν τοπική επικοινωνία, ακόμη και αν έχει διακοπεί η σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο.

2.5.4. Επικοινωνία διαφορετικών συσκευών με κλιμακούμενες ταχύτητες

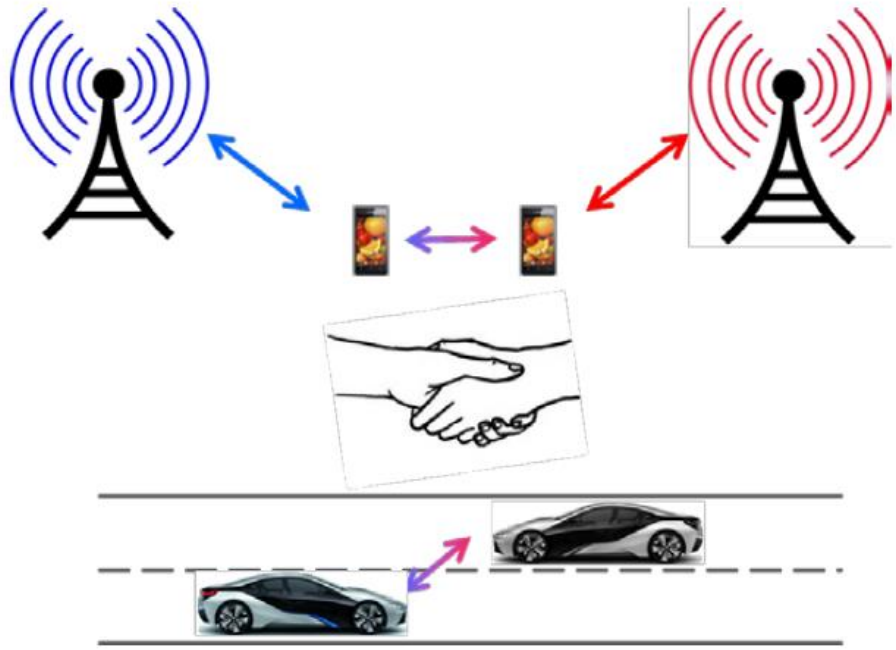
Οι υπηρεσίες 5G θα απαιτήσουν νέους και πιο σύνθετους τρόπους αλληλεπίδρασης και συνεργασίας μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Ας εξετάσουμε για παράδειγμα τις νέες υπηρεσίες που σχετίζονται με την επικοινωνία V2X (Vehicle – to – X Communication) και οι οποίες υποστηρίζονται από την ελεγχόμενη από το δίκτυο D2D επικοινωνία [13].

Σε σύγκριση με μία κανονική κυψελοειδή λειτουργία, η επικοινωνία D2D απαιτεί αλλαγές στις διαδικασίες λειτουργίας, λαμβάνοντας ιδιαίτερα υπόψη την επικοινωνία μεταξύ συσκευών από διαφορετικούς φορείς. Μόνο όταν οι φορείς μπορούν να συνεργαστούν πιο στενά και οι συσκευές

[32] Λύση σχεδιασμένη για ένα μη γενικεύσιμο συγκεκριμένο πρόβλημα ή έργο και δεν προορίζεται να είναι σε θέση να προσαρμόζεται για άλλους σκοπούς.

από αυτούς μπορούν να δημιουργήσουν άμεση επικοινωνία μεταξύ τους, η λύση που βασίζεται στο D2D μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικές επιδόσεις όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, όπου αναδεικνύονται περιπτώσεις στις οποίες η αυξημένη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας είναι επωφελής ή ακόμη και αναγκαία για την παροχή του επιθυμητού επιπέδου υπηρεσιών. Ένα άλλο παράδειγμα για την συνεργασία μεταξύ διαφορετικών φορέων εκμετάλλευσης είναι η περίπτωση κοινής χρήσης του ραδιοφάσματος για την βελτίωση της διαχείρισης των παρεμβολών.

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για να ενισχυθεί η συνεργασία μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Ένας τρόπος για λυθεί το πρόβλημα είναι μια μονάδα δικτύου η οποία λειτουργεί ανεξάρτητα με σκοπό την διαχείριση των θεμάτων μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου ταυτότητας, της άδειας παροχής υπηρεσιών κ.λ.π. Ένα άλλο παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η συνύπαρξη όπου ένας φορέας μπορεί να λάβει μια απόφαση με βάση την έκθεση μέτρησης μιας συσκευής, όπου η μέτρηση αυτή έχει γίνει από άλλο φορέα.



Εικόνα 11. Περιπτώσεις όπου η αυξημένη συνεργασία μεταξύ των διαχειριστών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας είναι επωφελής ή ακόμη και αναγκαία για την παροχή του επιθυμητού επιπέδου υπηρεσιών [πηγή 7]

2.5.5. Ενεργειακή απόδοση

Η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να ληφθεί υπόψη τόσο για την συσκευή όσο και για το δίκτυο συνολικά. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του διπλού ρόλου των κινητών ασύρματων 5G συσκευών, η διάκριση μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων θα είναι δύσκολη. Καθώς τα δίκτυα περιλαμβάνουν όλο και περισσότερες συσκευές, καθίσταται ολοένα και πιο σημαντικό η

δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των κόμβων του δικτύου ανάλογα με το φορτίο κυκλοφορίας ή εναλλακτικά η απενεργοποίηση μερικών από τους κόμβους του δικτύου σε καταστάσεις χαμηλής φόρτισης [14].

Η κατανάλωση ενέργειας στα σημερινά δίκτυα κυριαρχείται από την μετάδοση των εναέριων σημάτων όταν δεν μεταδίδεται κανένα δεδομένο χρήστη. Βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση των δικτύων μπορούν να επιτευχθούν μέσω νέων διαδικασιών σηματοδότησης, ενεργοποίησης/ απενεργοποίησης κόμβων του δικτύου και νέου σχεδιασμού διεπαφής αέρα[33]. Ένα σύστημα 5G θα ενσωματώσει κόμβους με μεγάλες και μικρές περιοχές κάλυψης που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες.

2.6 Συμπεράσματα

Περισσότερο από μια απλή μετεξέλιξη των δικτύων τέταρτης γενιάς, η επόμενη διαδικτυακή υποδομή mobile Internet θα έχει διαφορετική και πιο «ευέλικτη» αρχιτεκτονική, με αρκετά ακόμη οφέλη. Έτσι, θα βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο οποιαδήποτε φορητή συσκευή διατηρείται σε σύνδεση με τους διακομιστές από τους οποίους αντλεί δεδομένα. Κάτι που θα έχει αντίκρισμα στις βιντεοκλήσεις, αλλά και στην αναπαραγωγή βίντεο απευθείας από το Διαδίκτυο, που θα πραγματοποιούνται χωρίς να «παγώνει» ποτέ η εικόνα. Ακόμη βασικότερο πλεονέκτημά της, το οποίο θα ικανοποιήσει άλλες αναγκαιότητες, είναι το γεγονός ότι θα έχει 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα σημερινά δίκτυα [21].

Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στην περίπτωση των πυκνοκατοικημένων περιοχών, όπου συχνά παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, με συνέπεια τα σημερινά δίκτυα να δυσκολεύονται να ανταπεξέλθουν, με την περιορισμένη τους χωρητικότητα. Ένα πρόβλημα που θα γίνεται ολοένα μεγαλύτερο με το κύμα αστικοποίησης που παρατηρείται παγκοσμίως και το οποίο, σύμφωνα με εκτιμήσεις, θα έχει συνέπεια το 2050 το 70% του πληθυσμού του πλανήτη να κατοικεί σε πόλεις. Η πολλαπλάσια χωρητικότητα θα «απαντήσει» επίσης στην ολοένα μεγαλύτερη διακίνηση δεδομένων μέσω mobile Internet που, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, το 2020 θα έχει 30πλασιασθεί συγκριτικά με το 2010.

Ο όγκος των δεδομένων θα συνεχίσει να αυξάνεται, λόγω του *Internet of things*[34]*(IoT)*: καθώς τα αυτοκίνητα, οι αισθητήρες και διάφορα αξεσουάρ (όπως ρολόγια) θα αποκτήσουν έξυπνες

[33] Πρωτόκολλο μεταξύ του επιπέδου ζεύξης και φυσικού επιπέδου, δηλαδή ανάμεσα στο κινητό και το σταθμό βάσης.
[34] Είναι το δίκτυο των φυσικών αντικειμένων - συσκευές, οχήματα, κτίρια και άλλα αντικείμενα- ενσωματωμένα με την ηλεκτρονική, το λογισμικό, τους αισθητήρες και τη συνδεσιμότητα του δικτύου που επιτρέπει αυτά τα αντικείμενα να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένων. Το IoT επιτρέπει αντικείμενα που ανιχνεύονται και ελέγχονται εξ' αποστάσεως σε όλη την υπάρχουσα υποδομή του δικτύου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ακρίβειας και του οικονομικού οφέλους.

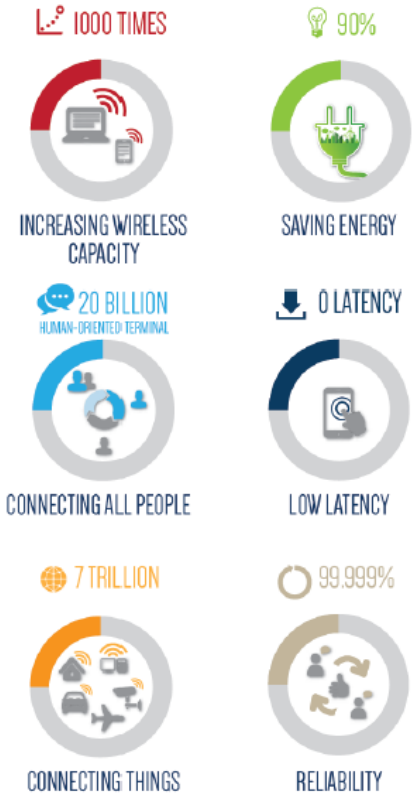
λειτουργίες, επικοινωνώντας ασύρματα μεταξύ τους και με τους χρήστες, τα δίκτυα θα πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν ως γέφυρες σύνδεσής τους. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως όταν τα αυτοκίνητα θα συνομιλούν μεταξύ τους για να προλάβουν τυχόν ατύχημα, τα δίκτυα θα πρέπει να αντιδρούν όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Μια παράμετρος που επίσης θα βελτιώσει η τεχνολογία 5G, περιορίζοντας παράλληλα την ενεργειακή κατανάλωση των συσκευών με σύνδεση στο Internet, αλλά και των ίδιων των δικτύων.

Κεφάλαιο 3 - 5G Public Private Partners

3.1 Εισαγωγή

Το 5G – PPP[35] αποτελεί μια συνεργασία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της βιομηχανίας και των ερευνητικών ιδρυμάτων στον τομέα των επικοινωνιών, προκειμένου να εξασφαλίσει την πρωτοκαθεδρία της Ευρώπης στο χώρο των δικτύων 5ης γενιάς που αποτελεί την εξέλιξη των κινητών δικτύων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, το 5G – PPP θα προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, νέες τεχνολογίες καθώς και πρότυπα. Η συγκεκριμένη πρωτοβουλία έχει αναληφθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση με στόχο την επίτευξη 10 - 100 φορές μεγαλύτερης επισκεψιμότητας ανά τελικό χρήστη, χωρίς να αυξηθεί το κόστος ή η χρήση ενέργειας, με παράλληλη παροχή ασφαλών και υψηλής ποιότητας υποδομών παροχής υπηρεσιών του H2020[36].

Στην Εικόνα 12 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια γραφική απεικόνιση των στόχων του προγράμματος 5G – PPP. Οι εργασίες στο πλαίσιο του συγκεκριμένου προγράμματος έχουν προγραμματιστεί έτσι ώστε να έχουν τρείς τουλάχιστον φάσεις, των περίπου 20 μεγάλων έργων.



Εικόνα 12. Οι κύριοι στόχοι του 5G PPP [πηγή 24].

[35] 5G – PPP: 5G – Public Private Partnership (5G υποδομή δημόσιου και ιδιωτικού τομέα).
[36] Horizon 2020: αποτελεί το μεγαλύτερο πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης με σχεδόν 80 τρις ευρώ χρηματοδότησης που διατίθεται για περισσότερα από 7 χρόνια (2014 – 2020). Υπόσχεται σημαντικές ανακαλύψεις και παγκόσμιες πρωτιές, εφαρμόζοντας ιδέες από το εργαστήριο στην αγορά.

Όπως εύκολα διαπιστώνεται από παρατήρηση της συγκεκριμένης Εικόνας, οι κύριοι στόχοι του 5G PPP είναι η αύξηση της ασύρματης χωρητικότητας (increasing wireless capacity), η εξοικονόμηση ενέργειας (saving energy), η διασύνδεση όλων των ανθρώπων μεταξύ τους (connecting all people), ο μικρός χρόνος αναμονής (low latency), η διασύνδεση αντικειμένων (connecting things)[37] και τέλος η αξιοπιστία (reliability). Το 5G – PPP περιέχει 19 συνολικά project (τα οποία επελέγησαν από 83 συνολικές προτάσεις που υπεβλήθησαν προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή), τα λογότυπα των οποίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 13 που ακολουθεί στη συνέχεια:

Εικόνα 13. Λογότυπα των επιμέρους project του 5G – PPP [πηγή 24].

3.2 Σύντομη περιγραφή των 5G – PPP projects

3.2.1 Euro – 5G

Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του project είναι να διευκολυνθεί η αποτελεσματική και αποδοτική συνεργασία και ολοκλήρωση μεταξύ όλων των project του 5G – PPP, της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του συνδέσμου υποδομών 5G. Οι μετρικές για την αξιολόγηση της επιτυχίας του 5G – PPP θα βασιστούν στα KPIs (Key Performance Indicators) που περιλαμβάνονται στη συμβατική ρύθμιση που υπογράφηκε από το σύνδεσμο υποδομών 5G εξ ονόματος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το Δεκέμβριο του 2013.

Το Euro – 5G θα προσπαθήσει να εξασφαλίσει την απρόσκοπτη ολοκλήρωση των Ευρωπαϊκών βιομηχανικών πολιτικών, ώστε τα αποτελέσματά του να είναι χρήσιμα και σχετικά στο μέτρο του δυνατού. Για το λόγο αυτό θα υποστηρίξει ενεργά το στόχο του 5G – PPP

[37] Σχετικό προς την κατεύθυνση αυτή αποτελεί η ανάπτυξη του Διαδικτύου των πραγμάτων (IOT – Internet of Things).

προκειμένου να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας ΤΠΕ και να διασφαλίσει μια Ευρωπαϊκή κοινωνία όπου ο καθένας θα μπορεί να απολαύσει τα οικονομικά και κοινωνικά οφέλη των μελλοντικών δικτύων. Θα παρακολουθεί και θα αναλύει τις διεθνής 5G δραστηριότητες και θα διευκολύνει αντίστοιχες δραστηριότητες.

3.2.2 5G – Exchange (5GEX)

Το συγκεκριμένο project θα επιτρέψει την αποτελεσματική εκμετάλλευση ή αλλιώς ενορχήστρωση επιχειρηματικών και τεχνικών υπηρεσιών. Μια τέτοια στρατηγική θα επιτρέψει την εμφάνιση δικτύων και υπηρεσιών απ' άκρη σε άκρη (end – to – end) για ετερογενή περιβάλλοντα τεχνολογικών πόρων. Προκειμένου να ξεπεραστεί ο παραδοσιακός διαχωρισμός των πόρων του δικτύου τόσο από υπολογιστική άποψη όσο και από άποψη αποθήκευσης, το συγκεκριμένο project θα προσφέρει σύνθετες υπηρεσίες, συνδυάζοντας απρόσκοπτα τη δικτύωση με την Πληροφορική και την αποθήκευση μεταξύ διαφορετικών πεδίων (τομέων). Η εξάπλωση των υπηρεσιών, η ενεργοποίηση καθώς και η περαιτέρω διαχείριση μπορεί να θεωρηθεί ως η αποτελεσματική χαρτογράφηση των υπηρεσιών πάνω σε αφαιρετικά μοντέλα που ανήκουν σε διαφορετικούς Παρόχους.

Ο στόχος του project 5GEX είναι η αυτοματοποιημένη ανάθεση και χαρτογράφηση των εικονικών ή αλλιώς εικονικοποιημένων στοιχείων της υπηρεσίας που αναπαριστούν την υπηρεσία και τις λειτουργίες δικτύου στους πόρους του φυσικού εξοπλισμού μεταξύ τομέων. Τα επιχειρηματικά μοντέλα του συγκεκριμένου project θα βελτιστοποιήσουν τις επιχειρηματικές και επιχειρησιακές πολιτικές καθώς και τους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs), συμπεριλαμβανομένου της μείωσης του λειτουργικού κόστους (OPEX[38]) και της μεγιστοποίησης των κερδών.

Επιπλέον το συγκεκριμένο project θα δημιουργήσει ευκαιρίες για τις επιχειρήσεις προκειμένου αυτές να αγοράζουν, να πωλούν και να ενσωματώσουν υπηρεσίες υποδομής με ένα αυτοματοποιημένο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Ολοκληρώνοντας τη σύντομη αναφορά μας στο 5GEX θα πρέπει να αναφέρουμε ότι θα οικοδομήσει ένα σύστημα που θα λειτουργεί από άκρο σε άκρο και συγχρόνως θα αναπτύξει ένα περιβάλλον δοκιμών που θα επιτρέψει νέους τρόπους πειραματισμού, διευκολύνοντας τη μετάβαση από τον πειραματισμό στην πιλοτική εφαρμογή και τη μετέπειτα λειτουργία στον πραγματικό κόσμο.

[38] Στην κατηγορία OPEX ανήκουν τα λειτουργικά έξοδα και οι λειτουργικές δαπάνες για την παραγωγή ενός προϊόντος. Το κόστος OPEX είναι μεταβλητό σε αντίθεση με τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) που αποτελούν ένα σταθερό κόστος.

3.2.3 5G – Norma

Η τεχνική προσέγγιση που ακολουθεί το project 5G Norma βασίζεται στην καινοτόμο ιδέα της προσαρμοστικής σύνθεσης/αποσύνθεσης και της κατανομής των λειτουργιών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, που αποσυνθέτει με ευελιξία τις λειτουργίες του και στη συνέχεια τοποθετεί τις προκύπτουσες λειτουργίες στην πλέον κατάλληλη θέση. Με τον τρόπο αυτό, τα δίκτυα πρόσβασης και πυρήνα, δεν είναι πλέον απαραίτητο να διαμένουν σε διαφορετική τοποθεσία, η οποία τώρα αξιοποιείται για τη βελτιστοποίηση της από κοινού λειτουργία τους, όποτε αυτό είναι δυνατό. Η προσαρμοστικότητα της αρχιτεκτονικής ενισχύεται περαιτέρω από τον καινοτόμο έλεγχο κινητών δικτύων προσδιοριζόμενων από το λογισμικό (Software – Define Mobile Network).

Ο βασικός στόχος του συγκεκριμένου project είναι η ανάπτυξη μιας καινοφανούς 5G αρχιτεκτονικής δικτύου κινητής τηλεφωνίας, η οποία θα επιτρέψει πρωτοφανή επίπεδα προσαρμοστικότητας δικτύου, εξασφαλίζοντας παράλληλα αυστηρή απόδοση, ασφάλεια, κόστος και ενεργειακές απαιτήσεις που θα πρέπει να πληρούνται, με στόχο και την οικονομική ανάπτυξη. Επιπλέον, θα παρέχει μια καθοδηγούμενη από διεπαφές προγραμματίσιμων εφαρμογών (APIs - Application Programmable Interfaces)[39] αρχιτεκτονική, τροφοδοτώντας με τον τρόπο αυτό την οικονομική ανάπτυξη μέσω της over-the-top (OTT)[40] καινοτομίας. Για να αναδείξει την αξία της αρχιτεκτονικής τόσο στην ασύρματη βιομηχανία όσο και στους χρήστες, το συγκεκριμένο project θα πραγματοποιήσει μια κοινωνικο-οικονομική ανάλυση για να αξιολογήσει και να ποσοτικοποιήσει τα οφέλη της 5G NORMA καινοτομίας.

3.2.4 5G – XHAUL

Το συγκεκριμένο project προτείνει μια συγκλίνουσα λύση οπτικής και ασύρματης μεταφοράς που είναι ικανή να συνδέσει τα ευέλικτα μικρά κύτταρα (small cells) με το δίκτυο πυρήνα. Αξιοποιώντας την κινητικότητα των χρηστών, η λύση επιτρέπει την δυναμική κατανομή των πόρων του δικτύου στα σημεία εκείνα που δίνουν πρόσβαση στο δίκτυο (hotspots). Για την υποστήριξη αυτών των νέων εννοιών, οι τεχνικές και ερευνητικές προκλήσεις είναι η ανάπτυξη:

- Πομπών μικροκυμάτων που είναι δυναμικά προγραμματιζόμενοι και διαθέτουν υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση.
- Κοινόχρηστο οπτικό δίκτυο που προσφέρει ελαστική κατανομή εύρους ζώνης, σε συνεργασία με προηγμένα παθητικά δίκτυα.

[39] Σύνολο από υπορουτίνες, πρωτόκολλα και εργαλεία για τη δημιουργία εφαρμογών λογισμικού. Ένα API καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οι διάφορες συνιστώσες του λογισμικού και χρησιμοποιούνται κατά τον προγραμματισμό συνιστωσών μιας γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI). Ένα καλό API καθιστά ευκολότερη την ανάπτυξη ενός προγράμματος, παρέχοντας όλα τα δομικά στοιχεία, τα οποία στη συνέχεια ένας προγραμματιστής τα τοποθετεί μαζί.

[40] Καινοτομία πέρα από τα συνηθισμένα όρια

- Επίπεδο ελέγχου προσδιοριζόμενο από το λογισμικό που είναι σε θέση να προβλέψει την ζήτηση της κυκλοφορίας στον χώρο και στον χρόνο και σύμφωνα με αυτές να επαναπροσδιορίσει τις συνιστώσες του δικτύου.

Σύμφωνα με το 5G – XHAUL, οι τεχνολογίες μικρών κελιών, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης υπολογιστικού νέφους (C – RAN)[41], τα δίκτυα που ορίζονται από το λογισμικό (SDN - Software Defined Networks[42]) και η εικονικοποίηση της λειτουργίας του δικτύου (NFV – Network Function Virtualization) αποτελούν τα σημεία κλειδιά για την αντιμετώπιση της ζήτησης ευρυζωνικής συνδεσιμότητας με χαμηλό κόστος και ευέλικτες υλοποιήσεις.

Στο σημείο αυτό παρατίθεται μια σύντομη αναφορά – επεξήγηση των διαφορών μεταξύ των όρων *Network Virtualization* (εικονικοποίηση δικτύου) και *SDN* (δικτύωση καθοριζόμενη από το λογισμικό). Ο πρώτος όρος αφορά κυρίως την εικονικοποίηση του διακομιστή. Κατά τη δημιουργία εικονικών servers για παράδειγμα σε ένα κέντρο δεδομένων (datacenter), μπορεί κανείς να ξεκινήσει με μια μεγάλη μηχανή (32 πυρήνες, 64 GB RAM, κ.λ.π) και στη συνέχεια να διαμορφώσει πολλαπλές εικονικές μηχανές που φιλοξενούν ίδιες ή διαφορετικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα τη μέγιστη αξιοποίηση του υλικού. Ομοίως, στην *εικονικοποίηση του δικτύου*, μπορεί κανείς να ξεκινήσει με ένα ενιαίο φυσικό δίκτυο (που αποτελείται από κόμβους και διακόπτες) και στη συνέχεια να διαμορφώσει πολλαπλά εικονικά δίκτυα, αναθέτοντας τη διαχείριση κάθε εικονικού δικτύου στην ίδια ή διαφορετική οντότητα.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι το ίδιο όπως με την εικονικοποίηση του διακομιστή, δηλαδή καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων και επίτευξη διαχωρισιμότητας μεταξύ των διακριτών εικονικών δικτύων. Συνοπτικά, οι βασικές έννοιες και τα πλεονεκτήματα της εικονικοποίησης του δικτύου επισημαίνονται στα ακόλουθα σημεία [44]:

- Χρήση υπολογιστικού υλικού COTS (Commercial off the shelf)[43] για την παροχή εικονικοποιημένων λειτουργιών δικτύου (VNFs - Virtualized Network Functions) μέσω

[41] Centralized Radio Access Network: προτεινόμενη αρχιτεκτονική για μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2010 στο Πεκίνο.

[42] Αποτελεί μια ανερχόμενη αρχιτεκτονική δικτύωσης υπολογιστών. Τα SDN δίκτυα μπορούν αν απλοποιήσουν σημαντικά την διαχείριση του δικτύου προσφέροντας στους προγραμματιστές απευθείας έλεγχο πάνω στους χρησιμοποιούμενους διακόπτες (switches) μέσω ενός ελεγκτή ου έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του δικτύου. Η βασική ιδέα της αρχιτεκτονικής SDN είναι η αποσύνδεση των επιπέδων ελέγχουν και δεδομένων και η δημιουργία μιας ανοικτής διεπαφής μεταξύ τους

[43] Με τον όρο αυτό υπονοούνται εμπορικά αντικείμενα (από το ράφι, όπως λέγεται) τα οποία δεν έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί ειδικά για συγκεκριμένες ανάγκες αλλά για μια ευρύτερη κατηγορία και περιλαμβάνουν από απλά εργαλεία έως σύνθετες και ολοκληρωμένες λύσεις. Σε κάθε περίπτωση διαπιστώνεται η παρουσία τριών κοινών χαρακτηριστικών δηλ. της δυναμικής του προϊόντος στην αγορά, των κανόνων που εφαρμόσθηκαν στη σχεδίασή του και της μεθοδολογίας του «μαύρου κουτιού» (black box) που ακολουθείται και που πρέπει να υιοθετηθεί από τον χρήστη. Ένα προϊόν COTS παρουσιάζει προκαθορισμένες δυνατότητες, αποκτάται μέσω της διαδικασίας υπογραφής συμβάσεως και χρησιμοποιείται «ως έχει» χωρίς π.χ. να παρέχεται ο πηγαίος κώδικας (source code) ή η τεχνογνωσία κατασκευής και με ανάληψη της ευθύνης για τη συντήρησή του από τον προμηθευτή. Η μεγάλη ποικιλία τέτοιων προϊόντων μπορεί να καλύψει ευρύ φάσμα απαιτήσεων εφαρμογών ενώ έχει τη δυνατότητα χρησιμοποιήσεως της σε

τεχνικών εικονικοποίησης του λογισμικού. Η χρήση των αντικειμένων COTS ευνοεί τη διαθεσιμότητα και ωριμότητα των προϊόντων, κάνει χρήση τελευταίας τεχνολογίας (state-of-the-art) και ενσωματώνει την υπάρχουσα εμπειρία και την παροχή εξωτερικής υποστήριξης.

- Διαμοιρασμός του υλικού και μείωση των διαφορετικών αρχιτεκτονικών υλικού.
- Αποσύνδεση λειτουργικότητας δικτύου από τη θέση που βρίσκεται το υλικό.
- Βελτιωμένη ευελιξία και προσαρμοστικότητα στην εκχώρηση εικονικοποιημένων λειτουργιών δικτύου στο υλικό και καλύτερη κλιμάκωση.
- Βελτιωμένες λειτουργικές αποδόσεις και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, η **δικτύωση που είναι καθοριζόμενη από το λογισμικό** είναι ένας τρόπος για τον έλεγχο του πως τα πακέτα δρομολογούνται μέσω του δικτύου σε ένα κεντρικό εξυπηρετητή με τη βοήθεια κανόνων. Κανονικά, τόσο η δρομολόγηση (κατασκευή πινάκων προώθησης/δρομολόγησης) όσο και η προώθηση γίνεται με το διακόπτη/router. Ωστόσο, στην SDN δικτύωση, το έργο της κατασκευής των πινάκων προώθησης/δρομολόγησης έχει ανατεθεί σε έναν κεντρικό server. Κάθε φορά που ένας δρομολογητής/διακόπτης παίρνει ένα πακέτο που δεν γνωρίζει τον τρόπο χειρισμού του, έρχεται σε επαφή με τον κεντρικό διακομιστή, ο οποίος εγκαθιστά στη συνέχεια είτε ένα «κανόνα» για το δρομολογητή/διακόπτη που καθορίζει το πώς θα γίνει ο χειρισμός των πακέτων ή απλά απαντά με μια θύρα στην οποία θα πρέπει να διαβιβαστεί το πακέτο.

Δεδομένου ότι, η συμπεριφορά του κεντρικού διακομιστή είναι υπό τον πλήρη έλεγχο του διαχειριστή, πολλά μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας SDN. Για παράδειγμα, ο διαχειριστής μπορεί να διατυπώσει το δικό του παραδοσιακό πρωτόκολλο δρομολόγησης (διαφορετικό από BGP/OSPF) ή μπορεί να εικονικοποιήσει το δίκτυο. Συνεπώς η εικονικοποίηση του δικτύου είναι μόνο μία από τις χιλιάδες εφαρμογές του SDN. Συνοπτικά, οι βασικές έννοιες και τα πλεονεκτήματα της SDN δικτύωσης επισημαίνονται στα ακόλουθα σημεία [44]:

- *Διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου (Control Plane) και δεδομένων (Data Plane).*
- *Κεντρικός έλεγχος και λογική άποψη του δικτύου*: Η υφιστάμενη υποδομή δικτύου αποκόπτεται από τις εφαρμογές και υπάρχουν κοινές διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (APIs).
- *Προγραμματισμός του δικτύου:* από εξωτερικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένου της διαχείρισης δικτύου και του ελέγχου.
- *Ανεξαρτησία από φορείς* όπως για παράδειγμα οι προμηθευτές εξοπλισμού δικτύου.
- *Τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί σε κέντρα δεδομένων του Cloud, καθώς και στη δικτύωση*.

μεγάλο αριθμό από διαφορετικές βάσεις υλικού (hardware).

- *Αυξημένη αξιοπιστία του δικτύου και ασφάλεια.*

Ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) αποτελεί μέρος ενός συστήματος κινητής επικοινωνίας και εφαρμόζει μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Εννοιολογικά, βρίσκεται ανάμεσα σε μια συσκευή όπως ένα κινητό τηλέφωνο, έναν υπολογιστή ή οποιαδήποτε μηχανή που ελέγχεται απομακρυσμένα και παρέχει σύνδεση με το δίκτυο κορμού του. Ωστόσο, τα μικρά κελιά, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες C – RAN, SDN και NFV που προαναφέρθηκαν, θέτουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις για το δίκτυο μεταφορών.

Το project 5G – XHAUL θα αναπτύξει ασύρματες λύσεις για δυναμικές backhaul και fronthaul αρχιτεκτονικές αποστάσεων, παράλληλα με οπτικές διασυνδέσεις πολύ υψηλής χωρητικότητας. Σε αρχιτεκτονικές C-RAN απαιτείται ασύρματη μεταφορά βασικής ζώνης (baseband[44]) ανάμεσα στις κεντρικές μονάδες βασικής ζώνης και τις απομακρυσμένες μονάδες. Αυτό το δίκτυο βασικής ζώνης -που όπως έχει ήδη προαναφερθεί ονομάζεται fronthaul- έχει ως λειτουργία να ενεργοποιήσει τις μονάδες βασικής ζώνης, προκειμένου αυτές να συνδέονται απρόσκοπτα με τις απομακρυσμένες ασύρματες μονάδες χωρίς να επηρεάζεται η ασύρματη απόδοση.

3.2.5 COGNET

Το project CogNet στοχεύει στην έρευνα και ανάπτυξη μιας πλατφόρμας διαχείρισης δικτύου σε πραγματικό χρόνο με την ικανότητα να κλιμακώνεται (επεκτείνεται) προκειμένου να αντιμετωπίζει τις απαιτήσεις του μελλοντικού 5G δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, το project αυτό έχει τους εξής στόχους:

- Συλλογή και προ – επεξεργασία μαζικών δεδομένων από το δίκτυο 5G.
- Ανάπτυξη ενός συστήματος για την αυτοδιαχείριση των κόμβων του δικτύου, ενώ υποστηρίζει ενιαία διαχείριση δικτύου.
- Εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την αντιμετώπιση:
    - Πρόβλεψης της ζήτησης και του εφοδιασμού, επιτρέποντας στο δίκτυο να αλλάξει το μέγεθός του χρησιμοποιώντας εικονικοποίηση.
    - Θεμάτων ανθεκτικότητας δικτύου, συμπεριλαμβανομένων εντοπισμού σφαλμάτων

[44] Τηλεπικοινωνιακό σύστημα στο οποίο οι πληροφορίες μεταφέρονται σε ψηφιακή μορφή σε ένα μόνο μη-πολυπλεγμένο κανάλι σήματος στο μέσο μετάδοσης. Αυτή η χρήση αφορά σε ένα δίκτυο βασικής ζώνης, όπως το Ethernet και τα Token Ring τοπικά δίκτυα.

δικτύου, βλαβών και συνθηκών όπως συμφόρηση δικτύου ή υποβάθμιση των επιδόσεων.

- Εντοπισμός (αναγνώριση) σοβαρών θεμάτων ασφαλείας όπως μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, παραβιασμένες συνιστώσες δικτύου ή χρήση συνιστωσών δικτύου που είναι σε κίνδυνο. Στη συνέχεια υπάρχει συνεργασία με την αυτόνομη διαχείριση του δικτύου για την λήψη των κατάλληλων μέτρων.

Οι τεχνικές και ερευνητικές προκλήσεις που προσπαθεί να ξεπεράσει το συγκεκριμένο project είναι οι εξής:

- Συλλογή και επεξεργασία μεγάλων δεδομένων από το 5G δίκτυο σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάπτυξη νέων αλγορίθμων που χρησιμοποιούν μηχανική μάθηση για να μάθουν από τα συλλεχθέντα δεδομένα και στη συνέχεια να εφαρμόσουν την αποκτηθείσα γνώση για τη διαχείριση δικτύου.
- Βελτίωση της επεκτασιμότητας, της αντοχής και της ασφάλειας των 5G δικτύων.
- Πραγματοποίηση μετρήσιμων βελτιώσεων στα δίκτυα, όπως αυτές αναγνωρίζονται μέσω των βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs).

3.2.6 COHERENT

Το project COHERENT στοχεύει στην έρευνα, ανάπτυξη και ανάδειξη ενός ενιαίου προγραμματιζόμενου πλαισίου ελέγχου για 5G δίκτυα ασύρματης ετερογενής πρόσβασης. Επικεντρώνεται σε τρείς καινοτομίες αναφορικά με τον έλεγχο και τον συντονισμό δικτύων 5G, οι οποίες αναπτύσσονται στην συνέχεια:

- *Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό* για δίκτυα ασύρματης πρόσβασης για την ενεργοποίηση πλαισίων συντονισμού καθώς και ενός κλιμακούμενου, ευέλικτου ελέγχου για πολύπλοκο συντονισμό πόρων και διαχείριση φάσματος σε 5G δίκτυα.
- *Αποτελεσματική μοντελοποίηση ασύρματων πόρων* και διαχείριση σε προγραμματίσιμα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, με σαφώς καθορισμένες διεπαφές ελέγχου και πρωτόκολλα για επίτευξη μιας σημαντικής απλοποίησης της διαχείρισης ετερογενών δικτύων κινητής τηλεφωνίας που θα πρέπει να επιβεβαιώνεται για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης 5G.
- *Ευέλικτη διαχείριση του ραδιοφάσματος*, βασιζόμενη στη γνώση χρήσης του ραδιοφάσματος μέσω του COHERENT πλαισίου ελέγχου, για την υποστήριξη διαφορετικών σχημάτων φάσματος, συμπεριλαμβανομένου αδειοδοτημένης

διαμοιραζόμενης προσπέλασης, υποβοηθούμενης προσπέλασης και ευελιξίας διπλής όψης σε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης 5G.

3.2.7 FANTASTIC – 5G

Η κύρια πρόκληση για το συγκεκριμένο project είναι η ανάπτυξη μιας σπονδυλωτής διεπαφής αέρα που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει όλες τις αναμενόμενες περιπτώσεις χρήσης, με την υψηλότερη δυνατή επεκτασιμότητα και απόδοση, χωρίς όμως να είναι υπερβολικά περίπλοκη από την πλευρά του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, το έργο θα αναπτύξει τις τεχνικές συνιστώσες της Τεχνητής Νοημοσύνης (ευέλικτη κυματομορφή και πλαίσιο σχεδιασμού, επεκτάσιμες διαδικασίες πολλαπλής πρόσβασης, προσαρμοστικά συστήματα αναμετάδοσης, προηγμένη ανίχνευση πολλαπλών χρηστών, διαχείριση ασύρματων πόρων πολλαπλών κελιών) και ενσωμάτωση αυτών μέσα σε ένα συνολικό πλαίσιο τεχνητής νοημοσύνης, όπου θα επιτευχθεί η προσαρμογή προς τον υψηλό βαθμό ετερογένειας που διέπει τα δίκτυα 5G.

Το project αυτό ασχολείται αποκλειστικά με συχνότητες χαμηλότερου φορέα (< 6GHz). Οι στόχοι του Fantastic – 5G είναι η ανάπτυξη μιας ευέλικτης και κλιμακούμενης διεπαφής αέρα πολλαπλών υπηρεσιών με πανταχού παρούσα κάλυψη και υψηλή χωρητικότητα, όπου και όταν χρειάζεται και ιδιαίτερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και πόρων. Επίσης η διεπαφή αυτή θα μπορεί να εκτελεί μελλοντικούς ελέγχους και να πραγματοποιεί αειφόρο παράδοση ασύρματων υπηρεσιών πολύ πέρα από το έτος 2020. Τέλος, θα αξιολογεί και θα επικυρώνει τις ανακαλυφθείσες έννοιες και θα δημιουργεί συναίνεση σε λογικές επιλογές για την τυποποίηση της τεχνολογίας 5G.

3.2.8 FLEX5GWARE

Το συγκεκριμένο project παρέχει ευέλικτες και αποτελεσματικές πλατφόρμες υλικού/λογισμικού για τα στοιχεία του δικτύου 5G και τις συσκευές. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιεί έρευνα, ανάπτυξη και προτυποποίηση σε βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου 5G αλλά και μεμονωμένες συσκευές τόσο από την άποψη του υλικού (hardware) όσο και από την άποψη του λογισμικού (software). Αυτές οι δραστηριότητες έρευνας, ανάπτυξης και προτυποποίησης δραστηριοτήτων συνεπάγονται πολλές προκλήσεις στον σχεδιασμό του συστήματος, που θα επιλυθούν μέσω αναλυτικών προσεγγίσεων και χρήση αναδυόμενων 5G αρχιτεκτονικών.

Στο συγκεκριμένο project θα πραγματοποιηθούν ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη αναλογικών συνιστωσών για την ενεργοποίηση συμπαγών MIMO (Multiple Input Multiple Output) σε ζώνες ραδιοφάσματος κυματισμού χιλιοστών (millimetre wave). Στα πεδία μικτού σήματος και σταδίων μετατροπής, θα πραγματοποιηθεί σημαντική έρευνα και θα ληφθούν αποτελέσματα που σχετίζονται με κρίσιμες 5G συνιστώσες, όπως αμφίδρομες επικοινωνίες (ταυτόχρονης μετάδοσης και λήψης), ευρυζωνικοί μετατροπείς υψηλής ταχύτητας κλπ. Στον ψηφιακό τομέα, θα επιτευχθεί δραστική πρόοδος στον τομέα της κατασκευής εξαρτημάτων υλικού για σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως FBMC (Filter Bank Multi-Carrier)[45] πομποδέκτες, LDPC (Low – Density Parity Check)[46], κωδικοί κ.λ.π. Επιπλέον, θα αναπτυχθεί μια εξελιγμένη πλατφόρμα λογισμικού ικανή να αποφασίζει τον βέλτιστο διαχωρισμό των λειτουργιών μεταξύ υλικού και λογισμικού. Αυτή θα αποδώσει ένα ισχυρό σύστημα υλικού/λογισμικού για ευέλικτο έλεγχο και διαχείριση μεταξύ ετερογενών ασύρματων συσκευών και δικτύων πρόσβασης.

Ο γενικός στόχος του project Flex5Gware είναι η παράδοση υψηλά επαναπροσδιοριζόμενων πλατφορμών υλικού μαζί με περιβάλλοντα λογισμικού, που στοχεύουν τόσο τα στοιχεία του δικτύου όσο και των συσκευών και λαμβάνουν υπόψη την ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας, μείωση της ενέργειας καθώς και επεκτασιμότητας για την ενεργοποίηση μιας ομαλής μετάβασης από τα 4G κινητά ασύρματα συστήματα στην 5G εποχή.

3.2.9 METIS II

Το project METIS II θα παρέχει ένα συνολικό 5G RAN σχεδιασμό, περιγράφοντας μια συνολική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου στοίβας με όλες τις λειτουργίες και διεπαφές που απαιτούνται για την εκπλήρωση του οράματος 5G. Ο συνολικός 5G RAN σχεδιασμός θα βασιστεί πάνω στους ακόλουθους άξονες:

- Ολιστική (σφαιρική) αρχιτεκτονική διαχείρισης του φάσματος.
- Ολιστικό πλαίσιο εναρμόνισης της διεπαφής αέρα.
- Ευέλικτη διαχείριση πόρων (Agile Resource Management - RM)
- Πλαίσιο πρόσβασης και κινητικότητας για προσπέλαση ανεξάρτητα από το επίπεδο (Cross-layer) και τη διεπαφή αέρα (cross – air - interface)
- Κοινό πλαίσιο ελέγχου και επιπέδου χρήστη.

[45] Συστήματα τέτοιου είδους αποτελούν μια υποκατηγορία των συστημάτων Multi-Carrier (MC), όπου η βασική τους αρχή είναι ο διαχωρισμός του φάσματος συχνοτήτων σε πολύ μικρότερα τμήματα.
[46] Γραμμικός κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων, μέθοδος μετάδοσης μηνύματος πάνω σε ένα κανάλι με θόρυβο.

Το Project METIS II επιδιώκει τους ακόλουθους βασικούς στόχους:

a) Ανάπτυξη του συνολικού 5G RAN σχεδιασμού, με εστίαση ιδιαίτερα στο σχεδιασμό της τεχνολογίας για μια αποτελεσματική ενσωμάτωση των εννοιών των δικτύων ασύρματης πρόσβασης (RAN) σε ένα ολιστικό σύστημα 5G.

b) Παροχή του πλαισίου συνεργασίας 5G μέσα στο 5G PPP για το 5G RAN σχεδιασμό και μια κοινή αξιολόγηση των 5G RAN εννοιών τόσο από την άποψη των επιδόσεων όσο και από τεχνο-οικονομική άποψη. Πιο συγκεκριμένα, το METIS II θα επαναπροσδιορίσει τα 5G σενάρια, τις απαιτήσεις και τους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs), και θα αναπτύξει ένα πλαίσιο αξιολόγησης και τεχνοοικονομικής απόδοσης και μια 5G αξιολόγηση ανοιχτού κώδικα καθώς και εργαλεία απεικόνισης για την επεξήγηση των βασικών 5G περιπτώσεων χρήσης και των RAN σχεδιαστικών λύσεων.

c) Προετοιμασία συντονισμένης δράσης προς την ρυθμιστική τυποποίηση και οικονομικά ελκυστική ανάπτυξη του 5G.

3.2.10 mm Magic

Η χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων για τις κινητές επικοινωνίες είναι δύσκολη, αλλά ταυτόχρονα και αναγκαία για την υποστήριξη ακραίων κινητών ευρυζωνικών 5G υπηρεσιών, οι οποίες απαιτούν πολύ υψηλούς (έως 10 Gbps) ρυθμούς δεδομένων και σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μικρούς end – to – end χρόνους καθυστέρησης.

Σε αυτό το project θα αναπτυχθούν κυματομορφές, δομή πλαισίων και αριθμολογία και θα σχεδιαστούν νέες προσαρμοστικές και συνεργατικές τεχνικές σχηματισμού δέσμης και παρακολούθησης για την αντιμετώπιση των ειδικών προκλήσεων των κινητών τηλεπικοινωνιών millimeter waves[47]. Θα προβεί σε εκτεταμένες μετρήσει ασύρματων καναλιών στην περιοχή 6 – 100GHz και θα αναπτύξει προηγμένα μοντέλα καναλιών για επικύρωση και ανάλυση σκοπιμότητας των προτεινόμενων εννοιών. Θα πραγματοποιηθεί απρόσκοπτη και ευέλικτη ενσωμάτωση με άλλες 5G ασύρματες διεπαφές μέσω του σχεδιασμού νέων λειτουργιών διαδικτύωσης και αρχιτεκτονικών συστατικών.

[47] Τα ραδιοκύματα που έχουν μήκη κύματος από 10 έως και 1 χιλιοστό ονομάζονται millimeter waves.

3.2.11 Selfnet

Το συγκεκριμένο project θα σχεδιάσει και θα υλοποιήσει ένα αυτόνομο πλαίσιο διαχείρισης δικτύου προκειμένου να πετύχει ικανότητες αυτό-οργάνωσης στη διαχείριση δικτυακών κατασκευών με αυτόματη ανίχνευση και μείωση των συνεπειών μιας ευρείας γκάμας κοινών (συνηθισμένων) δικτυακών προβλημάτων που προς το παρόν αντιμετωπίζονται χειροκίνητα από τους χειριστές δικτύων, πετυχαίνοντας με τον τρόπο αυτό μια σημαντική μείωση του λειτουργικού κόστους. Οι τεχνικές και ερευνητικές προκλήσεις με τις οποίες ασχολείται το συγκεκριμένο project, παρατίθενται στη συνέχεια [24]:

- Ενεργοποίηση και βελτιστοποίηση της ολιστικής χρήσης δικτύωσης βασισμένης σε λογισμικό και λειτουργία οπτικών δικτύων (NFV) υπολογιστική νέφους, τεχνητή νοημοσύνη και άλλες σχετιζόμενες τεχνολογίες για την επίτευξη νέων μη κοστοβόρων υπηρεσιών και αυτόνομη διαχείριση πραγματικού χρόνου σε δίκτυα 5G.
- Σχεδιασμός πολύ εύκολου στη χρήση μετρικών επιπέδου ευρωστίας του δικτύου (HoN – Health of Network) που μπορούν να αντικατοπτρίσουν με ακρίβεια τις τρέχουσες συνθήκες τόσο του δικτύου όσο και των συνθηκών λειτουργίας των υπηρεσιών σε σχέση με τις απαιτήσεις των βασικών δεικτών απόδοσης.
- Επινόηση καινοτόμων, αποτελεσματικών και προσαρμόσιμων δυναμικών αλγορίθμων για την επίλυση ή την άμβλυνση των πιθανόν ζητημάτων διαχείρισης του δικτύου.

Οι κύριοι στόχοι με σκοπό να ξεπεράσουν τις προαναφερόμενες προκλήσεις αναφορικά με τα κριτήρια του Selfnet είναι οι εξής:

- Υλοποίηση καταστάσεων αυτό – παρακολούθησης και ανίχνευσης, έγκαιρη ευαισθητοποίηση της υποδομής του δικτύου 5G και μετρικές HoN.
- Πραγματοποίηση εκτεταμένης και κατανεμημένης αυτο-οργάνωσης δικτύου 5G (SON – Self-Organizing Network) και αυτόνομη διαχείριση που βασίζεται σε προηγμένη τεχνητή νοημοσύνη και συναφής τεχνολογίες.
- Διαχείριση εικονικής υποδομής.
- Εφαρμογή πλαισίου Selfnet σε μια σειρά βασικών περιπτώσεων χρήσης 5G SON για την αντιμετώπιση σημαντικών προβλημάτων κατά την τρέχουσα διαχείριση του δικτύου.

3.2.12 Speed - 5G

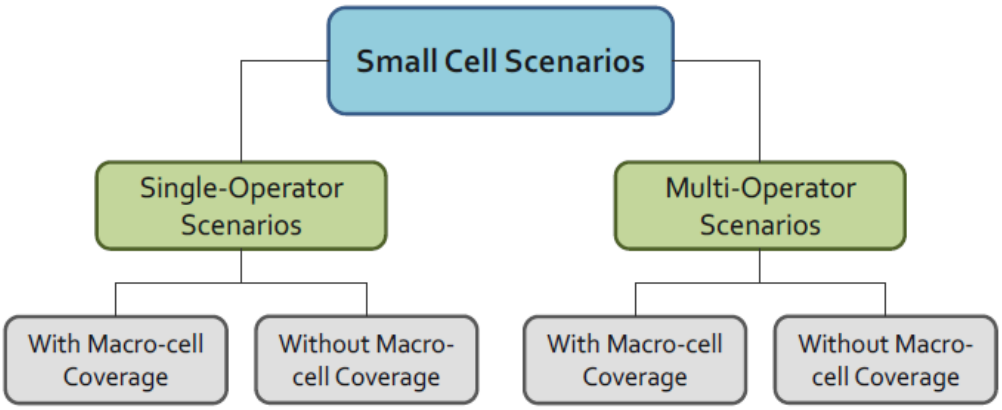
Η φιλοδοξία του Speed - 5G είναι να διαμορφώσει τον ορισμό της επικείμενης 5G αρχιτεκτονικής όταν εξετάζει την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων σε διάφορα σενάρια. Ειδικότερα, η Speed - 5G προσδιορίζει με σαφήνεια τις τεχνικές λύσης οι οποίες εκμεταλλεύονται την έξυπνη διαχείριση πόρων των πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs – Radio Access Technologies), και τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα (DSA – Dynamic Spectrum Access) για μια καλύτερη χρήση των μη συνεχόμενων τμημάτων φάσματος κάτω από διαφορετικά καθεστώτα άδειας, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά περιπτώσεις χρήσης 5G.

Το Speed - 5G έχει καθορίσει ένα οδικό χάρτη πορείας τις καινοτομίας και ένα σχέδιο διάδοσης πληροφοριών, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να διαδώσουν με τον καλύτερο τρόπο το όραμα του έργου και τα αποτελέσματα προς διαφορετικά ακροατήρια, όπως είναι οι επιστημονικές και βιομηχανικές κοινότητες. Ο στόχος του παρόντος εγγράφου είναι να παρουσιάσει το πώς η στρατηγική αυτή θα εφαρμοστεί στο έργο. Θα πρέπει να καταβληθεί ιδιαίτερη προσοχή για να διασφαλιστεί ότι η καινοτομία συλλαμβάνεται σωστά και ότι η βιομηχανική εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων που παράγονται στο έργο είναι κατάλληλα ασφαλισμένες. Ειδικά οι μικρές και μεσαίες επιχείρησης στο πλαίσιο της κοινοπραξίας Speed - 5G θα πρέπει να επωφεληθούν στο μέγιστο βαθμό από αυτές τις δραστηριότητες, καθώς μπορούν να ενδυναμώσουν την θέση τους στην αγορά, αποκτώντας μερίδιο αγοράς ή μεγαλύτερη επιρροή.

Επειδή ο ορισμός των συστημάτων 5G μόλις αρχίζει μέσα στους οργανισμούς τυποποίησης και τα βιομηχανικά fora, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να κρατήσει την πόρτα ανοιχτεί για να εξετάσει τεχνικές προσεγγίσεις. Μεταξύ άλλων το Speed - 5G αποτελεί μέρος της πρωτοβουλίας 5G PPP, προκειμένου να διαμορφώσουν από κοινού, μαζί με δεκαπέντε άλλα project, ένα συνεκτικό όραμα για την νέα αρχιτεκτονική του δικτύου επικοινωνιών και των βασικών τεχνικών προϋποθέσεων που θα είναι σε θέση να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις των 5G δικτύων, αναφορικά με την βελτίωση της ικανότητας και της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και της στήριξης ενός τεράστιου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών σε πυκνοδομημένες περιοχές. Κάτω από την ομπρέλα του 5G PPP θα συμβάλει στην παροχή Ευρωπαϊκής βιομηχανίας για την ανάπτυξη 5G προτύπων και τεχνολογίας.

Το project Speed - 5G επικεντρώνεται στην δυναμική πρόσβαση στο φάσμα (DSA) σε πυκνά και εξαιρετικά πυκνά δίκτυα μικροκυψελών, τόσο για σενάρια κλειστών χώρων (indoor) όσο και για σενάρια εξωτερικών χώρων (outdoor) αλλά και για μικτά σενάρια μικτών χώρων (indoor/outdoor). Στην Εικόνα 14 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα αρχικό σενάριο ταξινόμησης με κριτήριο τους φορείς εκμετάλλευσης των μικροκυψελών (small cells). Πιο συγκεκριμένα, για

κάθε μια από τις περιπτώσεις ενός και πολλαπλών φορέων εκμετάλλευσης, υπάρχουν οι επιλογές της κάλυψης/μη κάλυψης με μακροκυψέλες (macro cells).



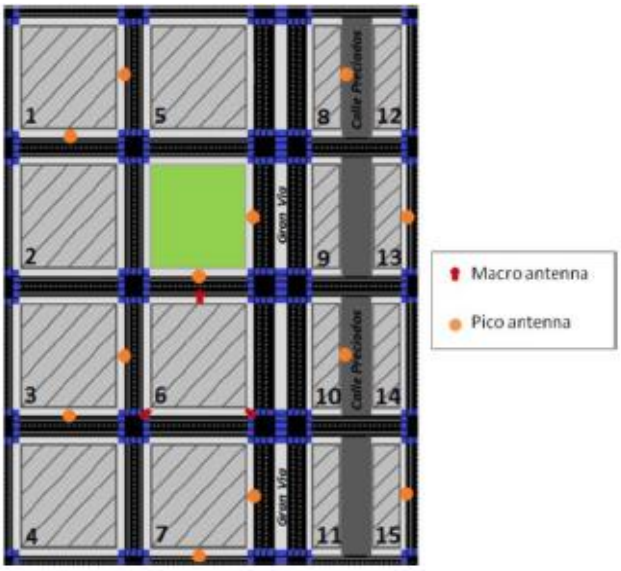
Εικόνα 14. Αρχικό σενάριο κατηγοριοποίησης [πηγή 22]

Το project Speed - 5G αποφάσισε να χρησιμοποιήσει το METIS ως πρώτη πηγή για ρεαλιστικά σενάρια. Πιο συγκεκριμένα:

- Οι βασικές παραδοχές του σεναρίου επιλογής είναι η ύπαρξη μικροκυψελών τόσο σε εσωτερικές, εξωτερικές ή μικτές αναπτύξεις, επιλέγοντας κάθε φορά την πιο κατάλληλη ανάλογα με την περίπτωση.
- Η καινοτομία του έργου προσομοίωσης χρησιμοποιεί την καινοτομία DSA της Speed – 5G σε συνδυασμό με τη χρήση FBMC, μια 5G κυματομορφή, για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας αυτής της προσέγγισης σε εξαιρετικά πολύπλοκα και απαιτητικά ρεαλιστικά σενάρια.
- Κινητικότητα των χρηστών (User Mobility) και πηγές κίνησης (Traffic Sources) προσανατολισμένες στις υπηρεσίες.

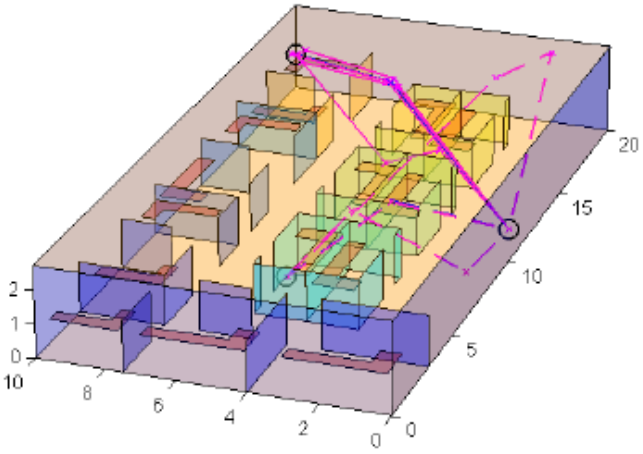
Στην Εικόνα 15 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πληροφοριακή υποδομή ενός πυκνού αστικού δικτύου όπως είναι αυτό της πόλης της Μαδρίτης. Το σενάριο αυτό χαρτογραφεί το UMB (Ultra Mobile Broadband)[48] και το IoT (Internet of Things) και μπορεί να διανείμει εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες για σενάρια υψηλής κινητικότητας. Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει ένα μίγμα από καθαρά εσωτερικούς και εξωτερικούς χρήστες καθώς και μικτούς χρήστες, καλύπτοντας έτσι τις περιπτώσεις χρήσης που υποστηρίζονται στο Speed – 5G και επιτρέπει την αξιολόγηση πυκνών δικτύων σε ένα ρεαλιστικό παράδειγμα τυπικής Ευρωπαϊκή πόλης.

48 Το Ultra Mobile Broadband (UMB) αναφέρεται στις τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G) που διαδέχεται το πρότυπο της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα κινητής τεχνολογίας του 2000 (CDMA2000) και επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων έως και 275 Mbps downlink και ταχύτητα 75Mbps στο uplink.



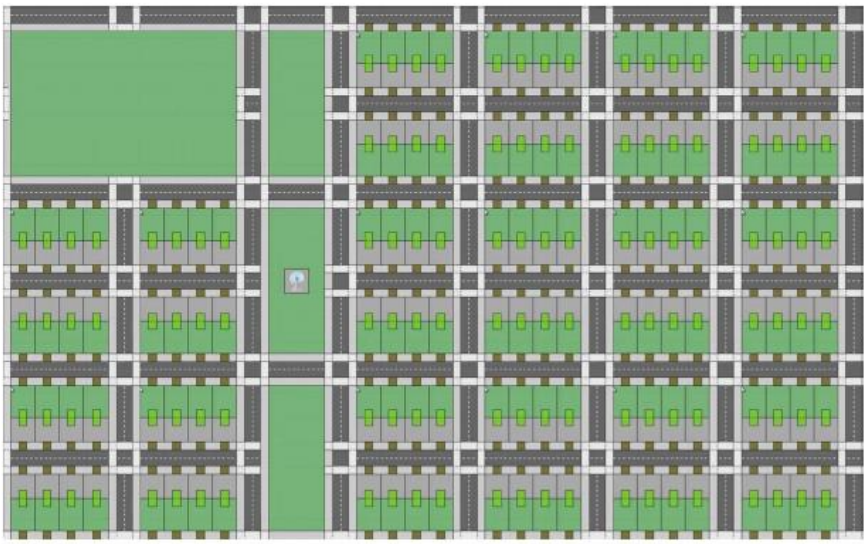
Εικόνα 15. Κοινωνία πληροφορίας σε πυκνά αστικά δίκτυα [πηγή 22]

Στην Εικόνα 16 που ακολουθεί, απεικονίζεται ένα γραφείο εικονικής πραγματικότητας το οποίο παρέχει ένα ιδανικό περιβάλλον επικύρωσης για το Speed – 5G σε αμιγώς σενάρια εσωτερικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα το σενάριο αυτό ασχολείται με UMB (Ultra Mobile Broadband) και υπερ-πυκνά δίκτυα (UDN).



Εικόνα 16. Γραφείο εικονικής πραγματικότητας [πηγή 22]

Στην Εικόνα 17 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα εκτεταμένο σενάριο των προαστίων της πόλης της Μαδρίτης. Πιο συγκεκριμένα, στην πόλη αυτή δεν εξυπηρετούνται όλα τα επιμέρους τμήματα των προαστίων με λεπτομερή σχεδιαγράμματα και για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός ασύρματου δικτύου που να μπορεί να εξυπηρετήσει όλες τις επικοινωνίες με εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης (Ultra – Broadband) και συγχρόνως να διευκολύνει την κίνηση των οχημάτων μέσα σε αυτά.



Εικόνα 17. Εκτεταμένο σενάριο προαστίων [πηγή 22]

3.2.13. 5G – Ensure

Το συγκεκριμένο project στοχεύει στο να δημιουργήσει μια αρχιτεκτονική ασφαλείας για τα 5G δίκτυα που να μπορεί αφενός να χρησιμοποιηθεί από όλα τα 5G projects και αφετέρου να υποστηρίξει τη χρήση του, παρέχοντας ένα χρήσιμο αρχικό σύνολο προϋποθέσεων ασφαλείας που αντιμετωπίζουν βασικά προβλήματα. Οι βασικές *δικλίδες ασφαλείας* του συγκεκριμένου project είναι οι εξής: AAA (Authentication, Authorization, Account), προστασία προσωπικών δεδομένων (Privacy), εμπιστοσύνη (Trust), παρακολούθηση ασφάλειας (Security Monitoring), διαχείριση δικτύου (Network Management) και τέλος απομόνωση της εικονικοποίησης (Virtualization Isolation).

Ο κύριος στόχος της διασφάλισης των προϋποθέσεων προστασίας προσωπικών δεδομένων είναι να εντοπιστούν οι 5G απαιτήσεις προστασίας της ιδιωτικής ζωής των χρηστών εκ των προτέρων και η παροχή μηχανισμών ασφαλείας, που θα είναι σε θέση να αποτρέψουν τις παραβιάσεις της ιδιωτικής ζωής με την υιοθέτηση μιας πολιτικής προστασίας. Για κάθε περίπτωση χρήσης 5G, ερευνήθηκε η τεχνολογία μετριασμού της ιδιωτικής ζωής (π.χ. ανωνυμία με χρήση προσωρινής ταυτότητας, μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης, νέο σύστημα κρυπτογράφησης κλπ.) ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Για το σκοπό αυτό προτείνονται λύσεις σε πολλά επίπεδα, και πιο συγκεκριμένα στο επίπεδο δικτύου (Network Layer) και στο επίπεδο εφαρμογής (Application Layer).

Η κατηγορία **Εμπιστοσύνη** θα παρέχει μοντέλα εμπιστοσύνης τα οποία θα αντιμετωπίζουν τις σύνθετες σχέσεις μεταξύ των πολλών φορέων σε δίκτυα 5G, συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων μηχανή προς μηχανή (Machine to Machine) που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα

επόμενης γενιάς. Το μοντέλο εμπιστοσύνης πρέπει να αντιμετωπίσει τις διάφορες πτυχές της εμπιστοσύνης μεταξύ αυτοματοποιημένων συστημάτων, μεταξύ των φορέων του χρήστη και του δικτύου καθώς και μεταξύ των χρηστών του δικτύου, καθότι ένα αυτοματοποιημένο σύστημα έχει χρήστες με τους οποίους αλληλοεπιδρά.

Το project 5G – Ensure στοχεύει περαιτέρω στην παροχή νέων καινοτόμων λύσεων, εξασφαλίζοντας το υψηλότερο επίπεδο ασφαλείας και ανθεκτικότητας στο δίκτυο 5G. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θα εξελιχθούν δραματικά με την 5η γενιά των δικτύων, ιδίως με νέες ιδέες και τεχνολογίες, όπως το IoT, η κατανομή των πόρων του δικτύου, νέες διεπαφές πρόσβασης και δυναμικές τοπολογίες δικτύου. Οι τεχνολογίες αυτές εισάγουν νέα ασφάλεια και ανθεκτικότητα και παρέχουν νέες ευκαιρίες για την εφαρμογή εκτεταμένων και ακριβών λύσεων ασφάλειας.

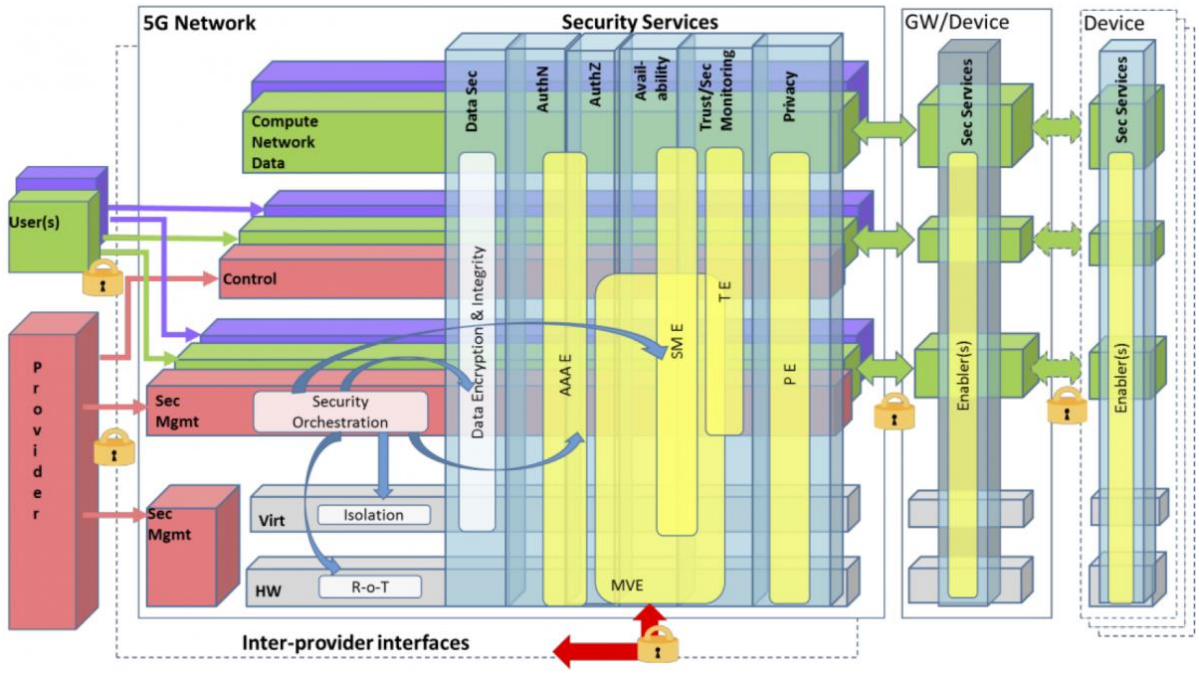
Η διαχείριση των δικτύων 5G θα αλλάξει ριζικά με την εφαρμογή της SDN (Software Defined Networks) δικτύωσης. Ενώ τα δίκτυα 4G έχουν ήδη ένα σαφή διαχωρισμό μεταξύ των επιπέδων δεδομένων και διαχείρισης, η υιοθέτηση της SDN δικτύωσης στα 5G δίκτυα θα αλλάξει την διαχείριση του δικτύου σε μια πιο συγκεντρωτική προσέγγιση. ο κεντρικός έλεγχος της συνολικής υποδομής του δικτύου συνεισφέρει σημαντικά στην απλούστευση της διαχείρισής του και στην προσφορά νέων, πιο πλούσιων και πιο ευέλικτων υπηρεσιών δικτύου. Επίσης το 5G – Ensure ορίζει και παραδίδει μια 5G αρχιτεκτονική ασφαλείας που έχει συμφωνηθεί από κοινού από τους διάφορους φορείς 5G. Καθορίζει και αναπτύσσει μια αρχική συλλογή χρήσιμων προϋποθέσεων ασφαλείας για το 5G. Το project 5G – Ensure αντιμετωπίζει μερικές από τις σημαντικότερες ανησυχίες για την ασφάλεια των δικτύων, προκειμένου να δημιουργήσει την εμπιστοσύνη που απαιτείτε για την τεχνολογία 5G που θα υιοθετηθεί ευρέος και έχει ως στόχο να παραδώσει αυτά που υπόσχεται μέσω καινοτόμων επιχειρηματικών εφαρμογών.

Η δικτύωση 5G είναι μια πλατφόρμα που πηγαίνει πέρα από τις σημερινές προσεγγίσεις τεχνολογίας πληροφορίας και προβλέπεται ότι θα είναι πολύ πιο αποσυνδεδεμένη από συγκεκριμένο υλικό και φυσικό έλεγχο του δικτύου. Αποτελεί μια βασική οικονομική κινητήρια δύναμη για την Ευρωπαϊκή Ένωση, ειδικότερα όταν πρόκειται για νέες επιχειρήσεις. Ωστόσο, για να συμβεί αυτό, είναι αναγκαία για την αρχιτεκτονική 5G να καταστεί ασφαλής από την αρχή, και επίσης να ενεργοποιηθούν ασφαλή συστήματα 5G. Το project 5G – Ensure θα καθορίσει και θα παραδώσει μια αρχιτεκτονική ασφαλείας 5G που θα έχει από κοινού συμφωνηθεί με τους διάφορους φορείς 5G, και θα υποστήριξη την χρήση του, παρέχοντας ένα χρήσιμο και ωφέλιμο αρχικό σύνολο των προϋποθέσεων ασφαλείας για την αντιμετώπιση βασικών ανησυχιών.

Η δικτύωση 5G σχετίζεται άμεσα με τα δίκτυα νέας γενιάς (NGN - Next Generation Networks) στα οποία απαιτείται μία αρχιτεκτονική ασφάλειας για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις

ασφάλειας των Παρόχων δικτύου και υπηρεσιών, των επιχειρήσεων και των καταναλωτών. Η αρχιτεκτονική ασφάλειας του NGN πρέπει να αντιμετωπίζει θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με τη διαχείριση, τον έλεγχο και τη χρήση της δικτυακής υποδομής, των υπηρεσιών και των εφαρμογών. Επίσης, θα πρέπει να έχει ως στόχο να παρέχει μία σαφή, από πάνω προς τα κάτω (top - down), διατερματική προοπτική της ασφάλειας δικτύου και να μπορεί να εφαρμόζεται σε δικτυακά στοιχεία, υπηρεσίες και εφαρμογές προκειμένου να ανιχνεύει, να προβλέπει και να διορθώνει αδυναμίες ασφάλειας

Στην Εικόνα 18 που ακολουθεί, φαίνονται οι υπηρεσίες ασφαλείας (Security Services) που υπεισέρχονται μεταξύ του 5G δικτύου και των συσκευών των χρηστών. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί ως βάση την αρχιτεκτονική ITU-T X.805, η οποία είναι ώριμη και έχει αποδειχτεί ότι θα επεκταθεί για να αποσυνδέσει την αρχιτεκτονική από φυσικές έννοιες όπως τοποθεσίες και κόμβοι. Η ITU με τη Σύσταση X.805 έχει ορίσει μία αρχιτεκτονική ασφάλειας, η οποία είναι εφαρμόσιμη στα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς και στοχεύει στην ικανοποίηση όλων των παραπάνω απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιεί μία αρχιτεκτονική ασφάλειας για το NGN. Επίσης, καθορίζει τα γενικά στοιχεία αρχιτεκτονικής που σχετίζονται με την ασφάλεια και είναι αναγκαία για την διασφάλιση διατερματικής ασφάλειας. Αντικειμενικός στόχος αυτής της σύστασης είναι να βοηθήσει, ως θεμέλιος λίθος, προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης λεπτομερών συστάσεων για επίτευξη διατερματικής ασφάλειας δικτύου.



Εικόνα 18. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύωσης βασισμένη στην ITU – T X.805

3.2.14 Charisma

Το συγκεκριμένο project προτείνει μια έξυπνη ιεραρχική δρομολόγηση καθώς και μια εικονικοποιημένη αρχιτεκτονική που ενώνει δύο σημαντικές έννοιες: μια υπηρεσία ασφαλείας που παρέχει το πλησιέστερο μονοπάτι από άκρη σε άκρη καθώς και μεταξύ τελικών χρηστών, η οποία πραγματοποιείται μέσω ενός φυσικού επιπέδου ασφαλείας (PLS – Physical Layer Security).

Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου project πληροί τους στόχους χαμηλής καθυστέρησης (<1ms) και ασφάλειας που απαιτούνται για την μελλοντική σύγκλιση της ασύρματης/ενσύρματης δικτύωσης. Αυτό παρέχει μια πλατφόρμα υποδομής cloud με αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα και βελτιωμένη απόδοση αναφορικά με τις διαπιστωμένες ανάγκες μετάδοσης αυξημένου όγκου δεδομένων καθώς και 10 – 100 φορές υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο project στοχεύει στην χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων.

Πλήρως ευθυγραμμισμένο και δεσμευμένο με τις βασικές αρχές του 5G – PPP και των KPIs, το συγκεκριμένο project συγκεντρώνει ασύρματη προσπέλαση 10G και σταθερή οπτική 100G μέσω ενός έξυπνου δικτύου C – RAN (ασύρματη πρόσβαση υπολογιστικού νέφους) και μιας έξυπνης πλατφόρμας RRH (Radio Remote Head[49]) με το πρωτόκολλο IPv6 που χρησιμοποιείται για την διαχείριση της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο.

Το συγκεκριμένο project παρέχει μια έξυπνη ιεραρχική αρχιτεκτονική δρομολόγησης, η οποία συνδυάζει τους ακόλουθους σημαντικούς στόχους:

- Ασφάλεια από άκρο σε άκρο κατά μήκος όλων των επιπέδων του δικτύου ανοιχτής πρόσβασης
- Φυσικό επίπεδο χαμηλής καθυστέρησης τόσο για ασύρματα όσο και για ανοιχτά, δυναμικά υψηλά διασυνδεδεμένα και αποκεντρωμένα 5G δίκτυα
- Υψηλό εύρος ζώνης (10Gb/s ασύρματης πρόσβασης και 100Gb/s σταθερής πρόσβασης), εξυπηρέτηση από άκρο σε άκρο χαμηλής καθυστέρησης καθώς ολοκληρωμένη προσπέλαση backhaul και fronthaul και δίκτυο πλέγματος D2D
- Κατασκευή δύο πιλοτικών επιδείξεων συμπεριλαμβανομένου 5G για την παροχή υποδομών ανοιχτής πρόσβασης πολλαπλών χρηστών και πολλαπλών τεχνολογιών με βάση το project Charisma.

[49] Απομακρυσμένος ασύρματος δέκτης που συνδέεται με ένα ασύρματο πίνακα ελέγχου μέσω ηλεκτρικής ή ασύρματης διασύνδεσης.

3.2.15 Superfluidity

Η αρχιτεκτονική του project Superfluidity θα στηριχθεί σε έναν κατάλληλο συνδυασμό ενός συνόλου αναδυόμενων τεχνολογιών σε διάφορους τομείς. Εκτός από την αξιοποίηση των πολλαπλών τεχνολογιών, η μεγάλη καινοτομία βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ενιαίο περιβάλλον, αξιοποιώντας τις συνέργειες μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, το project Superfluidity αξιοποιεί και προωθεί τα έργα που πραγματοποιούνται ξεχωριστά σε πολλά φόρουμ, όπως για παράδειγμα το ETSI NFV[50], το ETSI MEC[51], το ONF[52], το 3GPP και άλλα.

Το όραμα του συγκεκριμένου project αποτελεί το πέρασμα από τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις σε μια νέα, όπου οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να αποτελούνται από προγραμματιστικά δομικά στοιχεία (building blocks), οι οποίες θα αναπτύσσονται πάνω από τη βασική υποδομή του δικτύου και θα επιτρέπουν μια συνεχή βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Η ιδέα της αποσύνθεσης σχετικά πολύπλοκων λειτουργιών του δικτύου σε περισσότερα στοιχειώδη τμήματα δεν αποτελεί κάτι καινούργιο, αφού έχει ήδη διερευνηθεί σε πολλά σενάρια.

Το project Superfluidity στοχεύει στην κατασκευή 5G δικτύωσης για την αντιμετώπιση απαιτήσεων όπως η αύξηση της κινητικότητας και των απαιτήσεων εύρους ζώνης των τελικών χρηστών, η αντιμετώπιση της μεγάλης έκρηξης του IoT και η ενοποίηση των δικτυακών προσεγγίσεων, προσφέροντας μεταξύ άλλων τα εξής:

- *Ευελιξία:* γρήγορη και ευέλικτη δημιουργία νέων υπηρεσιών.
- *Κινητικότητα:* ευέλικτη τοποθέτηση και ταχεία μετάβαση των υπηρεσιών στις νέες τεχνολογίες.
- *Διαχείριση της ετερογένειας:* όχι μόνο μειώνεται η ετερογένεια, αλλά γίνεται προσπάθεια να αξιοποιηθεί.
- *Λειτουργική σύνθεση/αποσύνθεση:* οι υπηρεσίες κατασκευάζονται από τα επαναχρησιμοποιούμενα λειτουργικά μπλοκ (RFB – Reusable Functional Blocks[53]). Πιο

[50] Το ETSI NFV (Network Function Virtualization) αποτελεί τμήμα του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI - European Telecommunication Standards Institute) και είναι ένας ανεξάρτητος οργανισμός προτυποποίησης που έχει συμβάλει στην ανάπτυξη προτύπων για τις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) στην Ευρώπη.

[51] Το ETSI MEC (Mobile Edge Computing) προσφέρει στους προγραμματιστές εφαρμογών και τους Παρόχους περιεχομένου δυνατότητες Cloud-Computing και ένα περιβάλλον υπηρεσιών Πληροφορικής στα άκρα του κινητού δικτύου. Το περιβάλλον αυτό χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης, καθώς και από πρόσβαση που εκτελείται σε πραγματικό χρόνο σε ασύρματες πληροφορίες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τις εφαρμογές.

[52] Το ONF (Open Networking Foundation) αποτελεί ένα οργανισμό οδηγούμενο από το χρήστη που είναι αφιερωμένος στην προώθηση και την υιοθέτηση δικτύωσης βασιζόμενης στο λογισμικό (SDN) μέσω της ανάπτυξης ανοικτών προτύπων.

[53] Δυνατότητα η οποία θα οδηγήσει σε καινοτόμες περιπτώσεις χρήσης στο κινητό και θα ενδυναμώσει νέα

συγκεκριμένα, η αποσύνθεση των λειτουργιών υψηλού επιπέδου σε επαναχρησιμοποιούμενες συνιστώσες βασίζεται στην ιδέα των RFBs, τα οποία αποτελούν λογικές οντότητες που πραγματοποιούν ένα σύνολο λειτουργιών και διαθέτουν ένα σύνολο λογικών θυρών εισόδου/εξόδου. Γενικεύοντας θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα RFB μπορεί να κρατήσει πληροφορίες κατάστασης, έτσι ώστε η επεξεργασία της πληροφορίας που εισέρχεται στις λογικές θύρες του, να εξαρτάται από την κατάσταση αυτή.

- *Αποτελεσματική υλοποίηση RFB* με την βοήθεια επιτάχυνσης υλικού και λογισμικού, όταν χρειάζεται. Μια σημαντική ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου project είναι το γεγονός ότι η (από)σύνθεση εφαρμόζεται σε διαφορετικά ετερογενή περιβάλλοντα, από τη σύνθεση σε ολόκληρο το δίκτυο (network-wide) όλων των εικονικών λειτουργιών του, μέχρι τη σύνθεση σε επίπεδο κόμβου (node-level) των μπλοκ επεξεργασίας σήματος. Στην πραγματικότητα, είναι δυνατόν να λειτουργεί αναδρομικά στα διάφορα επίπεδα, για παράδειγμα υπηρεσίες σε όλο το εύρος του δικτύου μπορεί να αναλυθούν σε RFBs επιπέδου κόμβου, που μπορούν με τη σειρά τους να αποσυντεθούν σε μικρότερα RFBs επεξεργασίας πακέτου.
- *Ασφάλεια από τον σχεδιασμό:* τα RFBs επαληθεύονται για την ασφάλειά τους πριν από την ανάπτυξή τους.

3.2.16 Sonata

Το συγκεκριμένο project στοχεύει στην αντιμετώπιση της ανάπτυξης και της εξάπλωσης τεχνολογικών προκλήσεων για πολύπλοκες εφαρμογές και υπηρεσίες χρήστη για τα 5G δίκτυα, προτείνοντας μια εργαλειοθήκη ανάπτυξης λογισμικού (SDK – Software Development Kit) για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των λειτουργιών του δικτύου και των απαρτιζόμενων υπηρεσιών. Προσφέρει επίσης μια νέα πλατφόρμα υπηρεσιών για την διαχείριση της εξάπλωσης και εκτέλεσης υπηρεσιών.

Το Sonata βασίζεται στην εξάπλωση δύο θεμελιωδών νέων τεχνολογιών του Cloud Computing και της SDN δικτύωσης, οι οποίες έχουν ληφθεί υπόψη από τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών και της εικονικοποίησης δικτύου. Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν μηχανισμούς για την αυτοματοποίηση της επεξεργασίας των πόρων από τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Ωστόσο, από μόνες τους δεν είναι αρκετές για να οδηγήσουν αυτό το μετασχηματισμό. Η

επιχειρηματικά μοντέλα, επιτρέποντας το ξεδίπλωμα νέων υπηρεσιών και την μείωση του λειτουργικού κόστους. Η διάσπαση ομοιογενών λειτουργιών σε RFBs επιτρέπει ευέλικτη τοποθέτηση και ενσωμάτωση κατάλληλων τεχνικών εικονικοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη σε πραγματικό χρόνο τους υφιστάμενους περιορισμούς.

πλατφόρμα υπηρεσιών του συγκεκριμένου project πετυχαίνει ένα επίπεδο αυτοματισμού ικανό για την επίτευξη τόσο εξοικονόμησης κόστους όσο και νέων υπηρεσιών που είναι εφικτές σε όλο το φάσμα των διαδικασιών. Οι περιπτώσεις χρήσης θα διευκολύνουν την αναγνώριση των λειτουργικών και μη απαιτήσεων του πλαισίου Sonata, το οποίο με την σειρά του θα είναι απαραίτητο για το σχεδιασμό της αντίστοιχη αρχιτεκτονικής. Επιπλέον, αυτές οι περιπτώσεις χρήσης θα επιτρέψουν την πλήρη πρόσβαση του πλαισίου Sonata στις ΤΠΕ από την πλευρά των 5G δικτύων. Οι περιπτώσεις χρήσης είναι οι εξής:

- Το IoT αναδεικνύει τη σημασία του συγκεκριμένου project αναφορικά με την παρακολούθηση, ταξινόμηση και βελτίωση της λειτουργίας του.
- Η εγγυημένη, ανθεκτική και ασφαλής παροχή υπηρεσιών σε βιομηχανικά δίκτυα αντιπροσωπεύει βιομηχανικές υπηρεσίες δικτύου με στόχο τον ορισμό ενός προγραμματιστικού μοντέλου, τον σχεδιασμό του SDK και τον σχεδιασμό επίσης του περιβάλλοντος εκτέλεσης υπηρεσιών.
- *Virtual Evolved Packet Core (vEPC[54])* παρουσιάζει και εκτιμά την ανταγωνιστικότητα του συστήματος Sonata για να ενισχύσει μια εικονική EPC υπηρεσία σε ένα LTE κινητό δίκτυο.
- Η υπηρεσία *PSS (Personal Security Service)* στοχεύει στο δυναμικό του συγκεκριμένου project για να προσφέρει κατ' απαίτηση υπηρεσίες ασφάλειας του δικτύου και για να ενεργοποιήσει την ασφαλή πρόσβαση στο δίκτυο και την παρουσία στο διαδίκτυο.
- Οι Separate Client and Hosting Service Providers (SCHProv) αποδεικνύουν την υποστήριξη του συγκεκριμένου project για διαδικτύωση μεταξύ ενός φορέα παροχής υπηρεσιών πελάτη και ενός Παρόχου υπηρεσιών για την υλοποίηση μιας υπηρεσίας από άκρο σε άκρο.

Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών δικτύου που σχετίζονται με ποικίλα πεδία των ΤΠΕ, συμπεριλαμβανομένου του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), Δικτύων Διανομής Περιεχομένου (CDN[55]), βιομηχανικών δικτύων, κινητών δίκτυών LTE, της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο και Υποδομών ως Υπηρεσία (IaaS) κ.λ.π.

[54] Αποτελεί ένα απτό παράδειγμα για το πώς η οπτικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (NFV) μπορεί να είναι χρήσιμη στα δίκτυα μεταφοράς. Είναι μια σημαντική εφαρμογή που θα παρουσιάσει ουσιαστική πρόοδο για την τεχνολογία NFV, επειδή η ίδια η φύση της εφαρμογής προσφέρεται για εικονικοποίηση.

[55] Το Διαδίκτυο εξελίσσεται και λειτουργεί σε μεγάλο βαθμό χωρίς κάποιο κεντρικό συντονισμό, η έλλειψη του οποίου ήταν και είναι κρίσιμης σημασίας για την ταχεία ανάπτυξη και την εξέλιξή του. Επίσης το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου είναι περιορισμένο με αποτέλεσμα, η ποιότητα υπηρεσιών Internet να είναι σε μεγάλο βαθμό απρόβλεπτη και μη ικανοποιητική. Το Δίκτυο Περιεχομένου Διανομής (CDN - Content Distribution Network) αποτελεί μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών του Διαδικτύου.

3.2.17 VirtuWind

Το συγκεκριμένο project θα αναπτύξει και θα επιδείξει ένα SDN και NFV οικοσύστημα, βασισμένο σε ένα ανοικτό, αρθρωτό και ασφαλές πλαίσιο, επιδεικνύοντας ένα πρωτότυπο σενάριο σε πραγματικό αιολικό πάρκο, ως αντιπροσωπευτική περίπτωση χρήσης των βιομηχανικών δικτύων, για να επικυρώσει με τον τρόπο αυτό την οικονομική βιωσιμότητα του. Το δίκτυο ελέγχου αιολικού πάρκου έχει επιλεγεί ως μια επαγγελματική εφαρμογή στο project VirtuWind καθώς η αιολική ενέργεια έχει πλέον καθιερωθεί ως κύριος κορμός της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας. Στη συνέχεια περιγράφονται οι πέντε βασικοί στόχοι του συγκεκριμένου project:

- Πραγματοποίηση QoS βιομηχανικής ποιότητας για SDN λύση.
- Εγγύηση QoS για υποσύστημα βασισμένο σε SDN.
- Μείωση χρόνου και κόστους για την παροχή υπηρεσιών και τη συντήρηση του δικτύου.
- Εξασφάλιση της ασφάλειας κατά τον σχεδιασμό SDN και NFV υποσυστήματος.
- SDN και NFV πρωτότυπο δοκιμαστικού πεδίου τόσο εντός δικτύου όσο και μεταξύ διαφορετικών δικτύων.

Το συγκεκριμένο project θα προσαρμόσει την SDN δικτύωση σύμφωνα με τις απαιτήσεις των βιομηχανικών δικτύων, με την ανάπτυξη νέων SDN μηχανισμών για την εφαρμογή QoS βιομηχανικής ποιότητας και για την μείωση των κεφαλαιουχικών (CAPEX) και λειτουργικών δαπανών (OPEX) στο δίκτυο ελέγχου των αιολικών πάρκων. Η νέα αντίληψη για τα βιομηχανικά δίκτυα θα επωφεληθεί σε σημαντικό βαθμό από την μεταφορά των υφιστάμενων SDN εννοιών από άλλες ειδικότητες στο τομέα της βιομηχανικής δικτύωσης. Έχει επιλεγεί το δίκτυο αιολικού πάρκου ως μια επαγγελματική εφαρμογή της VirtuWind διότι η αιολική ενέργεια έχει πλέον καθιερωθεί ως ο κύριος κορμός της βιώσιμης παραγωγής ενέργειας. Με χαμηλότερα CAPEX και OPEX κόστη σε υποδομές δικτύου ελέγχου, η VirtuWind θα παίξει σημαντικό ρόλο στην παροχή βοήθειας στον τομέα της αιολικής ενέργειας για να επιτευχθεί μείωση του κόστους. Περαιτέρω εφαρμογή της λύσης VirtuWind σε άλλους βιομηχανικούς τομείς θα φέρει πολλαπλά οφέλη στα δίκτυα επικοινωνίας τους.

Με αναμενόμενη εκθετική αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών, τα μελλοντικά δίκτυα απαιτούν μια ανοιχτή αρχιτεκτονική λύσεων που να διευκολύνεται από τα πρωτότυπα και από ένα ισχυρό οικοσύστημα. Τέτοιες συσκευές χρειάζονται μια εύκολη διασύνδεση με το συνδεδεμένο δίκτυο, προκειμένου να ζητήσουν το είδος εκείνο της υπηρεσίας επικοινωνίας που εγγυάται υψηλό εύρος ζώνης, χαμηλή καθυστέρηση και εξάλειψη του φαινομένου απώλειας πακέτων. Σε απάντηση, το δίκτυο θα πρέπει να παρέχει του πόρους που του ζητούνται αυτόματα και να προγραμματίσει τις ενδιάμεσες συσκευές δικτύωσης με βάση το προφίλ της συσκευής. Παρόμοια απαίτηση προέρχεται

επίσης από επιχειρηματικές εφαρμογές, όπου η ίδια η αίτηση ζητά τους πόρους του δικτύου με βάση της ανάγκες της. Η δικτύωση SDN και η εικονικοποίηση NFV παρέχουν ένα πολλά υποσχόμενο συνδυασμό που οδηγεί σε συνδεσιμότητα, ταχεία παροχή και σύνδεση υπηρεσιών.

3.2.18 Sesame

Το συγκεκριμένο project στοχεύει σε καινοτομίες γύρω από τρία κεντρικά στοιχεία της 5G τεχνολογίας: τοποθέτηση νοημοσύνης δικτύου μέσω της λειτουργίας εικονικοποίησης δικτύου (NFV) και της τεχνολογίας Edge Cloud Computing[56]. Η σημαντική εξέλιξη της έννοιας των small cells – που αποτελεί μια επικρατούσα τάση στην 4G τεχνολογία – αναμένεται να τεθεί στο πλήρες δυναμικό της με την χρήση 4G σεναρίων. Τέλος η ενοποίηση του όρου software multi – tenancy[57] στις υποδομές επικοινωνιών, επιτρέπει σε πολλούς φορείς/Παρόχους υπηρεσιών να δημιουργήσουν νέα μοντέλα και παράλληλα να βελτιώσουν την ικανότητας πρόσβασης καθώς και τις δυνατότητες της τεχνολογίας Edge Computing.

Το Sesame προτείνει την τεχνολογία CESC (Cloud – Enabled Small Cell), η οποία ολοκληρώνει μια πλατφόρμα εικονικής εκτέλεσης για την ανάπτυξη της εικονικοποίησης δικτύου και εκτελεί καινοτόμες εφαρμογές και υπηρεσίες στο εσωτερικό της υποδομής του δικτύου πρόσβασης, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Light DC. Η τελευταία τεχνολογία θα διαθέτει επεξεργαστές χαμηλής ισχύος και επιταχυντές υλικού για κρίσιμες λειτουργίες αναφορικά με τον χρόνο και θα οικοδομήσει μια υψηλά διαχειρίσιμη υπολογιστική υποδομή στα άκρα του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει σε νέους ενδιαφερόμενους να εισέλθουν δυναμικά μέσα στην αλυσίδα των επικοινωνιών, ενεργώντας ως πάροχοι σε περιοχές υψηλής τεχνολογίας όπου η πύκνωση πολλαπλών δικτύων δεν είναι πρακτική.

Στη συνέχεια ενδιαφέρονται οι σημαντικότεροι στόχοι του συγκεκριμένου project:

- Προσδιορισμός και εξειδίκευση της αρχιτεκτονικής του συστήματος και των διεπαφών για την τροφοδότηση δικτύων small cells, βελτιστοποιημένη για διαφορετικά σενάρια και περιπτώσεις χρήσης.
- Προδιαγραφές, σχεδιασμός και υλοποίηση της τεχνολογίας CESC, υποστηρίζοντας τη δυνατότητα πολλαπλών μισθώσεων (multi – tenant) και υποδομών πρόσβασης πολλαπλών

[56] Η συγκεκριμένη τεχνολογία προωθεί τα όρια των υπολογιστικών εφαρμογών, των δεδομένων και των υπηρεσιών μακριά από κεντρικούς κόμβους προς τα λογικά άκρα ενός δικτύου και επιτρέπει την παραγωγή της γνώσης να συμβεί στην πηγή των δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί την αποδέσμευση πόρων που δεν μπορούν να συνδεθούν συνεχώς σε ένα δίκτυο, όπως είναι τα laptops, τα smartphones, τα tablets και οι αισθητήρες και μπορεί να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του υπολογιστικού νέφους.

[57] Αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική λογισμικού στην οποία μόνο ένα απλό στιγμιότυπο του λογισμικού εκτελείται σε ένα διακομιστή και εξυπηρετεί πολλές επιμέρους ομάδες χρηστών.

υπηρεσιών (multi – service).

- Προδιαγραφές, σχεδιασμός και υλοποίηση τεχνολογίας Light DC χαμηλού κόστους για την παροχή υποστήριξης της οπτικοποίησης του δικτύου και για την παροχή στήριξης σε απαιτητικές εφαρμογές και επίσης για την παροχή ασφαλών συνδέσεων και για την ελαχιστοποίηση του κόστους υποδομών και της κατανάλωσης ενέργειας.
- Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός πλαισίου για τον αποτελεσματικό προγραμματισμό των πόρων και την συνεκτική διαχείριση της τεχνολογίας των smallcells ως κατανεμημένη υποδομή της οπτικοποίησης του δικτύου.
- Διεξαγωγή ανάλυσης αγοράς και δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων, αναλυτική τεχνοοικονομική ανάλυση για την αξιοποίηση και εμπορική εκμετάλλευση από βιομηχανικούς εταίρους.
- Διάδοση των αποτελεσμάτων του project προς τους ενδιαφερόμενους και αξιολόγηση των ληφθέντων σχολίων. Δημιουργία και αξιοποίηση των συνεργιών με τα υπόλοιπα έργα 5G PPP και του Συνδέσμου για την οικοδόμηση μιας συνεκτικής εικόνας 5G.

3.2.19 5G – Crosshaul

Ο στόχος του project αυτού είναι η ανάπτυξη μιας προσαρμοστικής, κοινόχρηστης και οικονομικά αποδοτικής λύσης ενός δικτύου μεταφορών 5G που να ενσωματώνει τα τμήματα fronthaul και backhaul του δικτύου με παράλληλη στήριξη των υφιστάμενων και των νέων πρωτοκόλλων ασύρματης πρόσβασης που οραματίστηκε το 5G. Αυτό το δίκτυο μεταφορών θα διασυνδέσει με ευελιξία την κατανεμημένη 5G ασύρματη πρόσβαση και τις λειτουργίες δικτύου του πυρήνα, μέσω της εφαρμογής δύο νέων δομικών στοιχείων: α) ένα ενοποιημένο επίπεδο δεδομένων που περιλαμβάνει καινοτόμες τεχνολογίες μετάδοσης υψηλής χωρητικότητας και νέες αρχιτεκτονικές διακόπτη με τυχαία με ντετερμινιστική καθυστέρηση (5G – Crosshaul Forwarding Element, XFE) β) υποδομή ελέγχου χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο μοντέλο δικτύου για την ολοκλήρωση του επιπέδου ελέγχου (5G – Crosshaul Control Infrastructure, XCI) που επιτρέπει στους διαχειριστές να δημιουργήσουν εύκολα υπηρεσίες από άκρο σε άκρο που να είναι διαφανείς σε όλες τις βασικές τεχνολογίες στο επίπεδο των δεδομένων.

Σύμφωνα με τις τελευταίες προβλέψεις η κυκλοφορία κινητών δεδομένων μεταξύ των ετών 2013 – 2018 αναμένεται να αυξηθεί κατά 11 φορές. Οι τεχνολογίες 5G – RAN που εξυπηρετούν αυτό το μεγάλο όγκο δεδομένων θα απαιτήσουν λύσεις fronthaul και backhaul ανάμεσα στην

ασύρματη πρόσβαση του δικτύου και των πυρήνα του πακέτου, ικανές να ανταπεξέλθουν στο αυξημένο κυκλοφοριακό φορτίο.

Για να αυξηθεί η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των κινητών δικτύων και να επιτευχθούν οι απαιτούμενοι ρυθμοί δεδομένων 5G, πρέπει να παρέχεται εκτεταμένη υποστήριξη πάνω σε τεχνολογίες διεπαφής αέρα, όπως είναι οι τεχνολογίες Cooperative Multipoint (CoMP), Carrier Aggregation (CA) και Massive MIMO. Τέτοιες τεχνολογίες απαιτούν επεξεργασία πληροφοριών από πολλαπλούς σταθμούς βάσης ταυτόχρονα προς μια κοινή κεντρική οντότητα και επίσης ακριβή συγχρονισμό των διαφορετικών ασύρματων περιοχών. Δεδομένου ότι οι προαναφερόμενες προκλήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν από τους Παρόχους Υπηρεσιών (Service Providers) μέσα σε ένα επιχειρηματικό περιβάλλον, όπου η αύξηση των εσόδων ανάλογα με τον όγκο των δεδομένων είναι μη ρεαλιστική, απαιτείται μια οικονομικά αποδοτική ανάπτυξη του δικτύου και παράλληλα μια λειτουργική και εξελικτική στρατηγική.

Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες fronthaul και backhaul θα πρέπει να πληρούν τις πιο αυστηρές προδιαγραφές, όχι μόνο αναφορικά με τους ρυθμούς δεδομένων αλλά επίσης και από την άποψη της καθυστέρησης και των ρυθμών σφαλμάτων bits. Ως προτιμώμενη προσέγγιση για την αντιμετώπιση της πρόκλησης κόστους – αποτελεσματικότητας από την βιομηχανία, (ενδεικτικά αναφέρεται το ίδρυμα ETSI που αποτελεί έναν από τις πιο μεγάλους οργανισμούς τυποποίησης), αποτελεί η *εικονικοποίηση (virtualization)*, η οποία εκμεταλλεύεται την πολυπλεξία των λειτουργιών του λογισμικού δικτύων πάνω από τυποποιημένο υλικό. Από την πλευρά του ασύρματου δικτύου (RAN), αυτό έχει οδηγήσει στην έννοια του Cloud RAN, όπου οι κυψελοειδείς λειτουργίες του σταθμού βάσης φιλοξενούνται σε κέντρα Cloud Computing. Μόλις οπτικοποιηθούν, οι λειτουργίες του σταθμού βάσης μπορούν να διανεμηθούν ευέλικτα κατά μήκος των κέντρων δεδομένων, παρέχοντας έναν άλλο βαθμό ελευθερίας για την εξισορρόπηση του δικτύου.

Εκτός αυτού, οι λειτουργίες του σταθμού βάσης μπορούν να αναλυθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αναδεικνύοντας την επονομαζόμενη *ευέλικτη λειτουργική διάσπαση (flexible functional split)*, όπου ο διαχωρισμός μεταξύ των κεντρικών λειτουργιών καθώς και αυτών των απομακρυσμένων σταθμών βάσης μπορεί να ρυθμιστεί σε μια βάση περίπτωση – προς - περίπτωση. Στο πλαίσιο αυτό, η διαίρεση μεταξύ fronthaul και backhaul δικτύων μεταφοράς, θα εξασθένιζε, καθώς ποικίλα τμήματα της λειτουργικότητας των 5G δικτύων θα μεταφερόταν στο Cloud για λόγους εξοικονόμησης κόστους. Επίσης για οικονομικούς λόγους πρέπει να αντιμετωπιστεί η ετερογένεια του εξοπλισμού του δικτύου μεταφοράς με ενοποίηση των επιπέδων δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης κατά μήκος όλων των τεχνολογιών, όσο το δυνατό περισσότερο.

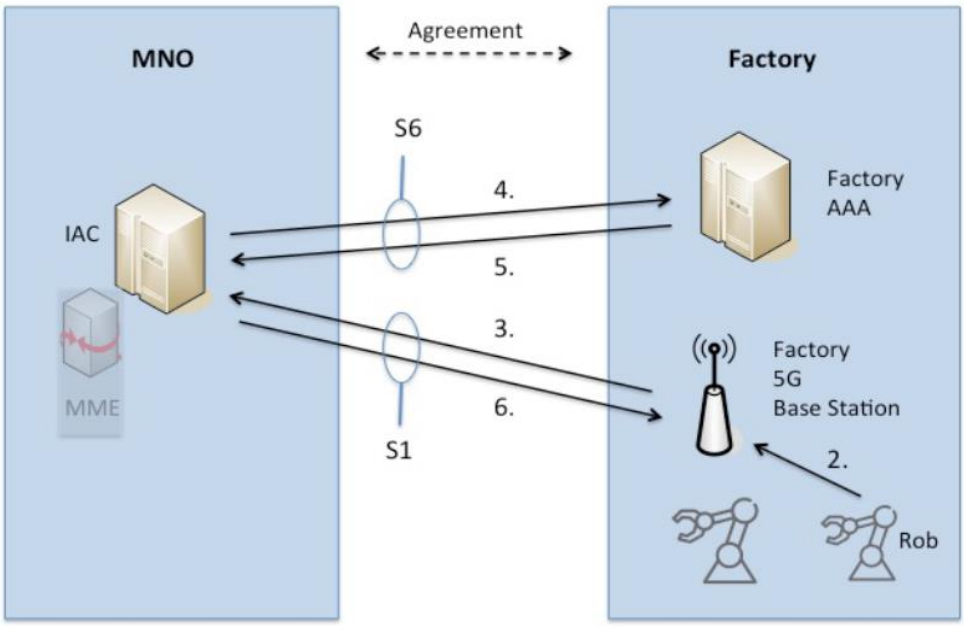
3.3. Case Studies

Στη συγκεκριμένη υποενότητα διερευνώνται διάφορες μελέτες περιπτώσεων(Case Studies), οι οποίες μελετούν διαφορετικές οπτικές γωνίες της 5G τεχνολογίας.

Α. Διαχείριση ταυτοτήτων (Identity Management): διαχείριση ταυτότητας συσκευής για 5G πρόσβαση.

Η βιομηχανία αυτοματισμού σήμερα, χρησιμοποιεί αποκλειστικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, όπως τα WLAN. Οι νέες 5G προσπελάσεις προβλέπεται να είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο για να προφέρουν ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα από την άποψη του κόστος, της ποιότητας των υπηρεσιών, της κινητικότητας κλπ., που τις καθιστά ελκυστικές για την αυτοματοποίηση της βιομηχανίας. Έτσι, στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι εργοστασιακά ρομπότ προσπελαύνουν ένα δικτυακό εργοστάσιο μέσω 5G συνδεσιμότητας χρησιμοποιώντας διαπιστευτήρια και AAA (Authentication, Authorization, Account), υποθέτοντας ότι το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (MNO – Mobile Network Operator) μπορεί να συμφωνήσει μια τέτοια ρύθμιση. Η ρύθμιση αυτή καλύπτει διάφορες πτυχές, όπως πολιτικές χρέωσης, πολιτικές ασφάλειας και δεδομένα διαμόρφωσης (πχ πιστοποιητικά).

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η ανάπτυξη εργοστασίου 5G. Οι βασικές συνιστώσες της συγκεκριμένης Εικόνας είναι η εταιρία κινητής τηλεφωνίας (MNO), οι χρήστες κινητών συσκευών Alice και Bob, ο κακόβουλος χρήστης Mallory, το εργοστασιακό ρομπότ (Rob), ο ιδιοκτήτης του εργοστασίου (FO), ο Πάροχος Υπηρεσιών (SP) και τέλος ο διαχειριστής του δορυφορικού δικτύου (SatNO).



Εικόνα 19. Ανάπτυξη εργοστασίου 5G [πηγή 23].

Ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Το εργοστάσιο διαθέτει το δικό του AAA Server για τα ρομπότ.
- Η εταιρία κινητής τηλεφωνίας διαθέτει έναν αφιερωμένο διακομιστή για αυτόματο βιομηχανικό έλεγχο (IAC – Industrial Automation Control) για να συνδέεται με τον AAA διακομιστή του εργοστασίου. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να περιλαμβάνει τμήματα του φορέα διαχείρισης κινητότητας (MME – Mobile Management Entity).
- Οι σταθμοί βάσης 5G ανήκουν και αναπτύσσονται στο εργοστάσιο, αλλά το τελευταίο δεν έχει κανένα άλλο βασικό εξοπλισμό του δικτύου 5G. Οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν κάποιο φάσμα που έχει παραχωρηθεί στην εταιρία κινητής τηλεφωνίας.
- Ο ιδιοκτήτης του εργοστασίου FO και η MNO έχουν μια συμφωνία που επιτρέπει τους σταθμούς βάσης εργοστασίου να συνδέονται με ασφάλεια στο δίκτυο πυρήνα της MNO πάνω από μια διεπαφή που ονομάζεται “S1” και επιτρέπει στον AAA διακομιστή του εργοστασίου να συνδέεται με ασφάλεια με το IAC της εταιρίας κινητής τηλεφωνίας μέσω μιας διεπαφής που δηλώνεται ως “S6”, προκειμένου να καθορίζει διαπιστευτήρια πρόσβαση στο δίκτυο.
- Η διεπαφή “S1” υποδηλώνει μια υποτιθέμενη 3GPP διασύνδεση ανάμεσα στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) και το κύριο δίκτυο (SN – Core network).
- Η διεπαφή “S6” υποδηλώνει μια 3GPP διασύνδεση στον MNO IAC και τον AAA διακομιστή. Τόσο η διεπαφή αυτή όσο και η προηγούμενη θεωρούνται ότι είναι ασφαλείς

Όταν ενεργοποιηθεί η ισχύς, ο Rob, ένα εργοστασιακό ρομπότ, συνδέεται με το δίκτυο του εργοστάσιο χρησιμοποιώντας τα διαπιστευτήρια του εργοστασίου και η βασική ροή των γεγονότων περιγράφεται στην συνέχεια:

1. Τροφοδοτείται ο Rob.
2. Ο Rob ζητά πρόσβαση στο 5G σταθμό του εργοστασίου, παρουσιάζοντας ένα αναγνωριστικό στον FO.
3. Ο Rob δεν έχει ακόμα επικυρωθεί και ο σταθμός βάσης έρχεται σε επαφή με τον MNO IAC μέσω της διεπαφής “S1”.
4. Ο IAC αναγνωρίζει (χρησιμοποιώντας ανάλυση χώρου ονόματος του αναγνωριστικού FO) ότι ο Rob ανήκει στο εργοστάσιο και συνδέεται με το εργοστάσιο με τον AAA Server μέσω της διεπαφής “S6”.
5. Ο AAA Server παρέχει, με βάση το αναγνωριστικό FO του Rob, προσωρινή διαπίστευση στο IAC που επιτρέπει στον IAC να επικυρώσει τον Rob για αυτή τη σύνοδο.

6. Πραγματοποιείται αμοιβαία αυθεντικοποίηση ανάμεσα στον Rob και της εταιρίας MNO. Ως αποτέλεσμα γίνονται διαθέσιμα κλειδιά κρυπτογράφησης με σκοπό την προστασία της σύνδεσης μεταξύ του ρομπότ και του σταθμού βάσης του εργοστασίου καθώς και μεταξύ του ρομπότ και του IAC.
7. Ο Rob παρέχει IP συνδεσιμότητα και κινητικότητα.

Ολοκληρώνοντας το συγκεκριμένο case study, αναφέρουμε μερικές αξιοσημείωτες ιδιότητες μιας λύσης:

a) **Ασφαλείς συνδέσεις μεταξύ του εργοστασίου και της εταιρίας MNO**, για παράδειγμα "S1" και "S6", όπου η συμφωνία μεταξύ των προαναφερθέντων θα πρέπει να περιέχει τα διαπιστευτήρια για την ίδρυση τέτοιων συνδέσεων.

b) **Αυθεντικοποίηση βασισμένη σε πρωτόκολλα EAP** (Extensible Authentication Protocol)[58] με τον AAA Server του εργοστασίου. Για το ποιες EAP μέθοδοι θα επιτρέπονται, μπορεί να προσδιοριστεί στη συμφωνία μεταξύ MNO και εργοστασίου, αλλά ασθενής μέθοδοι όπως τα password πιθανότατα δεν θα επιτρέπονται.

c) Διαδικασία αυθεντικοποίησης της 5G τεχνολογίας σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατή με οποιαδήποτε πιστοποιητικά χρησιμοποιούνται από το εργοστάσιο.

d) Η εταιρία MNO δεν διανέμει ποτέ τα διαπιστευτήρια του πελάτη σε τρίτους.

Β. Δορυφορική διαχείριση ταυτότητας για 5G πρόσβαση.

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωση διερευνά δύο περιπτώσεις διαχείρισης ταυτότητας που αφορούν δορυφορικά δίκτυα και μια διπλή δορυφορική και επίγεια 5G πρόσβαση: στην πρώτη περίπτωση η συσκευή 5G συνδέεται με το δορυφορικό δίκτυο και στην άλλη περίπτωση η συσκευή 5G αναγνωρίζεται είτε στο δορυφορικό είτε στο επίγειο δίκτυο και στη συνέχεια εκτελεί περιαγωγή στο άλλο δίκτυο.

Ως προϋποθέσεις για το συγκεκριμένο case study έχουμε ότι ο διαχειριστής δορυφορικού δικτύου (SatNO – Satellite Network Operator) έχει το δικό του AAA Server για τους συνδρομητές του και επίσης, το SatNO και η εταιρία MNO έχουν μια σύμβαση περιαγωγής που επιτρέπει στους χρήστες της μιας εταιρίας να περιφέρονται στο δίκτυο της άλλης.

Συνεχίζοντας με την περιγραφή του case study, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο Bob ανοίγει τον εξοπλισμό του (UE – User Equipment) τόσο στην δορυφορική όσο και στην επίγεια σύνδεση με

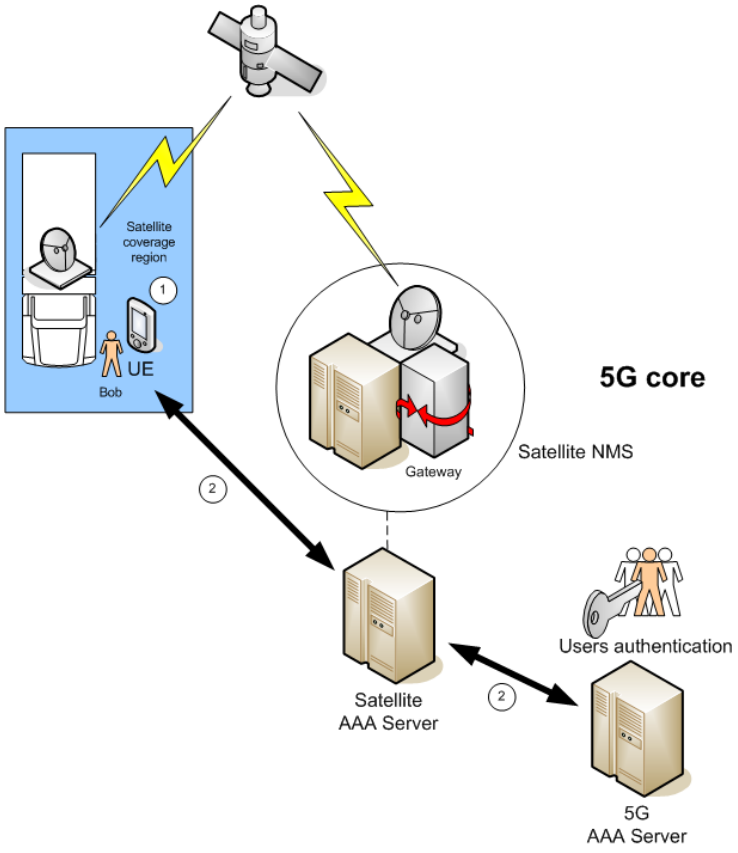
[58] Πλαίσιο αυθεντικοποίησης που χρησιμοποιείται συχνά σε συνδέσεις μεταξύ ασύρματων δικτύων και point to point κόμβων.

ένα σύνολο από διαπιστευτήρια που επιτρέπουν την πρόσβαση και στα δύο δίκτυα, και αρχικά συνδέεται με το δορυφορικό δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 που ακολουθεί. Λόγω ζητημάτων κάλυψης μπορεί να χρειαστεί να γίνει περιαγωγή μεταξύ δικτύων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι ΑΑΑ διακομιστές που απεικονίζονται στην συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζονται χωριστά για ευνόητους λόγους, αλλά η φυσική τους θέση μπορεί να είναι η ίδια, κάτι που σημαίνει ότι μπορεί να αποτελούν έναν ενιαίο ΑΑΑ διακομιστή.

Βασική ροή γεγονότων:

a) Ο βασικός εξοπλισμός του Bob, που βρίσκεται για παράδειγμα σε ένα κινούμενο φορτηγό σε μια απομονωμένη περιοχή, μπορεί να προσφέρει –όταν τον ανοίξει – συνδεσιμότητα μόνο στον Bob μέσω δορυφόρου.

b) Ο Bob επιλέγει να συνδέσει των εξοπλισμό του μέσω δορυφόρου και η διαδικασία αυθεντικοποίησης και εξουσιοδότησης πραγματοποιείται μεταξύ του εξοπλισμού του και του δορυφορικού ΑΑΑ διακομιστή καθώς επίσης και μεταξύ του δορυφορικού ΑΑΑ διακομιστή και του 5G ΑΑΑ διακομιστή.



Εικόνα 20. Ολοκλήρωση μηχανισμών ΑΑΑ συστήματος σε 5G συσκευή με δορυφορική κάλυψη [πηγή 23].

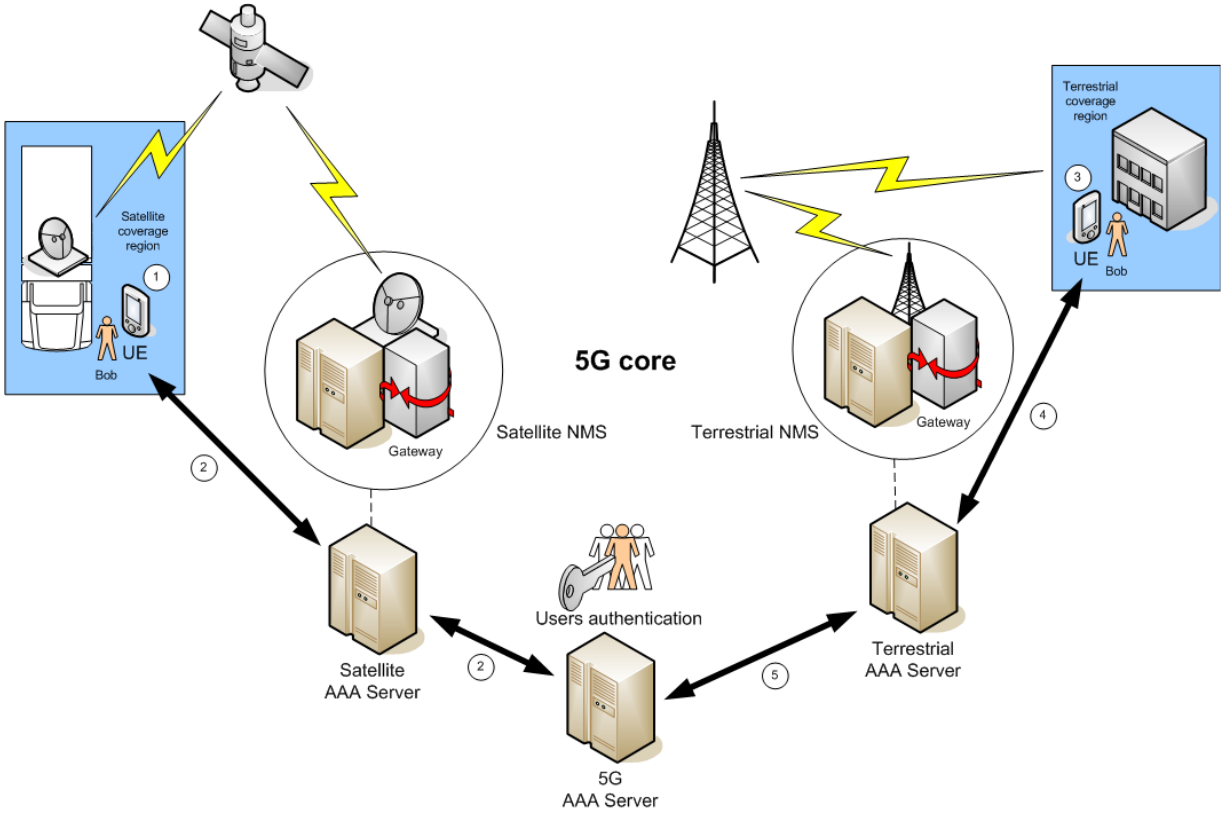
Εναλλακτική ροή γεγονότων:

Τα γεγονότα μπορεί να θεωρηθούν ως επέκταση της βασικής ροής, στην οποία έχει ενσωματωθεί η πτυχή της περιαγωγής.

1. Ίδιο με πριν
2. Ίδιο με πριν
3. Ο Bob παίρνει τον εξοπλισμό του (UE) μέσα σε ένα κτίριο υπό επίγεια κάλυψη που είναι συμβατή με την UE επίγεια συνδεσιμότητα.
4. Ο εξοπλισμός αποκολλάται από το δορυφορικό δίκτυο και προσπαθεί να συνδεθεί αυτόματα με το επίγειο δίκτυο, χρησιμοποιώντας τις σχετικές πιστοποιήσεις.
5. Τα διαπιστευτήρια μεταφέρονται με περιαγωγή από τον 5G AAA διακομιστή στον επίγειο AAA διακομιστή και το επίγειο δίκτυο δίνει πρόσβαση στον εξοπλισμό του Bob. Σε αυτό το σημείο η συσκευή 5G έχει ανακτήσει την συνδεσιμότητα μετά από μια διαδικασία περιαγωγής που είναι σχεδόν αδιάληπτη στον Bob

Όπως εξηγήθηκε στην βασική ροή των γεγονότων οι πολιτικές πρόσβασης που δίνουν έμφαση στις λεπτομέρειες στον 5G AAA διακομιστή επεξεργάζονται την αίτηση ελέγχου ταυτότητας από τον εξοπλισμό του Bob και ορίζουν ότι για τα διαπιστευτήρια που παρέχονται από τον Bob, η πρόσβαση μπορεί να χορηγηθεί στον εξοπλισμό προκειμένου αυτός να εισέλθει στο δορυφορικό δίκτυο με ένα επίπεδο αδειοδότηση A (το οποίο για παράδειγμα μπορεί να αποτελείται από συγκεκριμένο ρυθμό δεδομένων αιχμής, συγκεκριμένο σταθερό ρυθμό δεδομένων, συγκεκριμένες ενεργές υπηρεσίες κλπ.).

Τώρα, κατά την διαδικασία της περιαγωγής, φτάνει μια αίτηση περιαγωγής από τον επίγειο διακομιστή AAA στον 5G AAA διακομιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα διαπιστευτήρια ελέγχου ταυτότητας από τον εξοπλισμό του Bob και ορίζει ότι για τα παρεχόμενα διαπιστευτήρια, η πρόσβαση μπορεί να χορηγηθεί για τον βασικό εξοπλισμό μέσα στο επίγειο δίκτυο ένα επίπεδο αδειοδότησης B (το οποίο αποτελείται από τα ίδια στοιχεία με αυτά του επιπέδου αυθεντικοποίησης A). Στην Εικόνα 21 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ολοκλήρωση των μηχανισμών ενός AAA συστήματος με 5G περιαγωγή από δορυφορικά σε επίγεια δίκτυα.



Εικόνα 21. Ολοκλήρωση μηχανισμών ενός AAA συστήματος με 5G περιαγωγή από δορυφορικά σε επίγεια δίκτυα[πηγή 23].

Κεφάλαιο 4 – Κατηγοριοποίηση των 5G-PPP projects

4.1 Με κριτήριο την ασφάλεια (security)

Στη συγκεκριμένη ενότητα ομαδοποιούνται τα πιο σημαντικά 5G-PPP projects που αναφέρθηκαν με συντομία στο προηγούμενο κεφάλαιο, με κριτήριο την **ασφάλεια.** Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα project *5G – Ensure* και *5G Norma*, τα οποία αποτελούν ίσως τα πιο ενδεικτικά παραδείγματα ασφάλειας στο χώρο των 5G-PPP projects. Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κρίσιμες τεχνολογίες (enablers[59]) του project *5G – Ensure* ταξινομούνται σε επιμέρους κατηγορίες, όπως αυτές έχουν αναγνωριστεί για το 5G – PPP και το 5G – Security που είναι οι εξής: *Authentication* (Πιστοποίηση), *Authorization* (Εξουσιοδότηση) και *Accountability* (Λογοδοσία) - αυτές οι τρεις κατηγορίες αναφέρονται για λόγους συντομίας ως AAA-, *Privacy* (Ιδιωτικότητα); *Trust* (Εμπιστοσύνη), *Security Monitoring* και *Network Management* (Παρακολούθηση της ασφάλειας και της διαχείρισης) και Virtualization Isolation (απομόνωση της οπτικοποίησης).

4.1.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ασφάλειας από το project 5G – Ensure

Εκτός από τις κατηγορίες των κρίσιμων τεχνολογιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, άλλα κριτήρια ταξινόμησης των κινητήριων μοχλών αποτελούν το όραμα του προϊόντος (product vision), η τεχνολογική περιοχή στην οποία αναπτύσσονται (technology area), οι πτυχές και οι προκλήσεις της ασφάλειας (security aspects, security challenges). Ορισμένες από τις πιο *κρίσιμες τεχνολογίες ασφαλείας (security enablers)* που ονομάζονται εναλλακτικά και μοχλοί ασφαλείας, περιγράφονται στη συνέχεια:

- *Basic AAA enabler:* η συμβολή της συγκεκριμένης κρίσιμης τεχνολογίας ασφαλείας ξεπερνά τις σταδιακές βελτιώσεις στην ασφάλεια που θα περίμενε κανείς σε ένα δίκτυο επόμενης γενιάς. Το εξελισσόμενο δίκτυο 5G θα υποστηρίξει ένα απρόβλεπτο αριθμό συσκευών που οφείλονται στην έκρηξη του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Επιπλέον, έχει στόχο να ενσωματώσει τις λειτουργίες ελέγχου ταυτότητας και εξουσιοδότησης μεταξύ δορυφορικών και επίγειων συστημάτων.

- *Internet of Things – IoT:* η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι δυνατόν να αυξηθεί σημαντικά και το 5G αναμένεται να υποστηρίξει πλήρως τη συνδεσιμότητα των συσκευών IoT. Στο περιβάλλον του 5G, οι συσκευές IoT χαρακτηρίζονται από χαμηλή ενέργεια, χαμηλό κόστος, και μαζική επέκταση, και τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να υποστηρίζονται πλήρως από το δίκτυο 5G, τόσο ως σύνολο όσο και μεμονωμένα μέσα στο ίδιο το κελί.

[59] Εταιρείες που παρέχουν την υποδομή του δικτύου και συναφών υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα τα υποσυστήματα δικτύου, συστήματα υποστήριξης επιχειρήσεων, τροφοδοσίας, διαχείρισης, συστήματα υποστήριξης λειτουργίας κ.λ.π. σε φορείς εκμετάλλευσης κινητών εικονικών δικτύων (MVNO - Mobile Virtual Network Operators).

- *Fine-grained Authorization Enabler:* Ο ρόλος των διασυνδεδεμένων πόρων, όπως οι υπηρεσίες και οι συσκευές περιορισμού πόρων (RCDs - Resource-constraint devices), θα είναι καθοριστικής σημασίας για τα επόμενα χρόνια στις δυνατότητες που προσφέρονται από τα συστήματα. Σήμερα, πολλές τέτοιες συσκευές, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές, δορυφορικά modems και συσκευές IoT, υπάρχουν ήδη αλλά δεν έχουν ασφάλεια.
- *Federative authentication and identification enabler:* ο στόχος του είναι να διαδώσει, στο εσωτερικό των γραμμών παραγωγής, (i) κάποιο επίπεδο δέσμευσης και ευθύνης και (ii) την αξιολόγηση της εμπιστοσύνης των ειδικών λειτουργικών μπλοκ που χρησιμοποιούνται για την παροχή μιας υπηρεσίας ή ενός περιεχομένου. Για να υπάρχει από άκρο σε άκρο αξιολόγηση εμπιστοσύνης, οι πληροφορίες που ενοποιούνται για τις διάφορες λειτουργικά τμήματα είναι συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν από διαφορετικούς κόμβους (π.χ. τελικός χρήστης ή κόμβος του δικτύου).

Ο κύριος στόχος των *5G-Ensure Privacy enablers* για την προστασία των προσωπικών δεδομένων είναι να εντοπίσουν εκ' των προτέρων τις 5G απαιτήσεις προστασίας της ιδιωτικής ζωής των χρηστών και να παρέχουν μηχανισμούς ασφαλείας που να είναι σε θέση να αποτρέψουν τις παραβιάσεις της ιδιωτικής ζωής με την υιοθέτηση μιας προληπτικής, προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Αυτές οι κρίσιμες τεχνολογίες ασφαλείας πρέπει να ενσωματωθούν στο συνολικό σχεδιασμό της 5G αρχιτεκτονικής ασφάλειας έτσι ώστε να προϋπάρχουν στα 5G συστήματα, υπηρεσίες και επιχειρηματικές πρακτικές. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένοι από τους πιο *κρίσιμες τεχνολογίες ιδιωτικότητας (privacy enablers):*

- *Privacy Enhanced Identity Protection:* έχει ως στόχο να παρέχει προστασία κατά της γνωστοποίησης της ταυτότητας και της μη εξουσιοδοτημένης παρακολούθησης των χρηστών, με την πρόληψη ή την υπεράσπιση ενάντια σε διάφορους τύπους IMSI (International Mobile Subscriber Identity[60]) και αποτροπή επιθέσεων ιστοσελίδων. Ο κύριος στόχος του είναι να προσφέρει ισχυρότερη προστασία της ταυτότητας του χρήστη σε σχέση με την τρέχοντα δίκτυα 3G και 4G. Η βασική ιδέα είναι ότι η 5G πραγματική ταυτότητα δεν πρέπει να μεταφέρεται μέσω του δικτύου, αλλά θα πρέπει σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας να χρησιμοποιούνται μόνο τυχαία ψευδώνυμα.
- *End-to-end encryption:* έχει ως στόχο να παρέχει υποστήριξη κρυπτογράφησης end-to-end σε δίκτυα 5G για την προστασία των εμπιστευτικών δεδομένων του χρήστη και επίσης πρόληψη από επιθέσεις υποκλοπών σε όλες τις πιθανές διαδρομές που υπάρχει κυκλοφορία δεδομένων

[60] Χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του χρήστη ενός κυψελοειδούς δικτύου και είναι μια μοναδική ταυτοποίηση που συνδέεται με όλα τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αποθηκεύεται ως ένα 64 bit πεδίο και έχει σταλθεί μέσω τηλέφωνου στο δίκτυο.

χρήστη μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, έχει ως στόχο να προσφέρει ισχυρή προστασία των δεδομένων και πληροφοριών του χρήστη σε περιπτώσεις όπου ένας επισκέπτης - χρήστης δεν εμπιστεύεται το δίκτυο στο οποίο, δεδομένου ότι δεν έχει γνώση του μηχανισμού εφαρμοσμένης ασφαλείας.

- *Device identifier(s) privacy:* ο στόχος του είναι να παρέχει τεχνικές ανωνυμίας από άκρο σε άκρο σύμφωνα με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στη συσκευή του χρήστη, προσφέροντας βελτιωμένη προστασία προσωπικών δεδομένων (PEA - Privacy Enhanced Attachment), η οποία παρέχει προστασία έναντι της ταυτότητας της συσκευής (και ενδεχομένως και της ταυτότητας του χρήστη) καθώς και από μη εξουσιοδοτημένη παρακολούθηση συσκευών και χρηστών. Ο κύριος στόχος του είναι η προσφορά μεγαλύτερης προστασίας της ταυτότητας της συσκευής (και του σχετικού χρήστη) για τα τρέχοντα δίκτυα, σε σύγκριση με τον *Privacy Enhanced Identity Protection,* ο οποίος αποσκοπεί κυρίως στην προστασία της ταυτότητας του συνδρομητή. Επιπλέον, η πολιτική προστασίας της ιδιωτικής ζωής θα πρέπει να ελέγχεται άμεσα από τον ίδιο το χρήστη, στον οποίο πρέπει να παρέχονται εργαλεία για τη διαχείριση αυτής της πολιτικής.

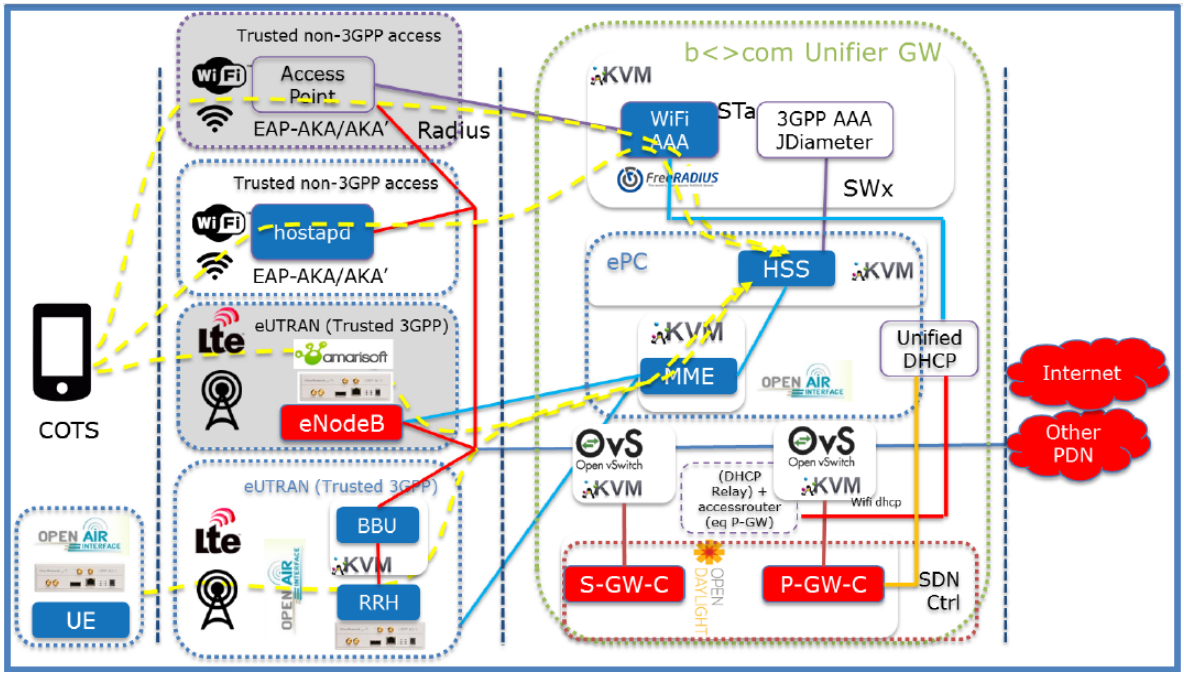
Αναφορικά με την αρχιτεκτονική ασφαλείας του μελετώμενου Project, αναλύονται στη συνέχεια οι απαιτήσεις -όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί από την έναρξη του Project 5G-ENSURE- για την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας δοκιμών (testbed) και της λειτουργίας της. Απώτερος στόχος αυτής της πλατφόρμας είναι η επικύρωση όχι μόνο των μοχλών ασφαλείας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αλλά και ολόκληρης της αρχιτεκτονικής του συγκεκριμένου project.

Αρχικά επεξηγούνται με συντομία όλοι οι χρήστες της πλατφόρμας δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο *Testbed User* αναφέρονται όλοι εκείνοι οι συνεργάτες που απαιτούν να εκτελέσουν δραστηριότητες ή να έχουν πρόσβαση στις επιχειρησιακές διαδικασίες της συγκεκριμένης πλατφόρμας. Με τον όρο *Testbed Owner* προσδιορίζονται όλοι εκείνοι οι συνεργάτες που παρέχουν τους κόμβους που φιλοξενούν την πλατφόρμα ασφαλείας του 5G-ENSURE, δηλαδή οι πάροχοι υπηρεσιών. Ως τέτοιοι θεωρούνται οι εταιρείες VTT and b<>com. Τέλος με τον όρο *Enabler Owner* αναφέρεται ένας κάτοχος μοχλού ασφαλείας (ουσιαστικά πρόκειται για μέλη της πλατφόρμας δοκιμών που συμμετέχουν σε ορισμένες ειδικές διαδικασίες αναφορικά με τη διαχείριση της ασφάλεια).

Προτείνεται μια αρχιτεκτονική πλατφόρμας δοκιμών από άκρο σε άκρο και χρησιμοποιείται ο Πάροχος που ονομάζεται b<>com για τη δημιουργία μιας ενοποιημένης πύλης δικτύου (Unifier Gateway[61]), η οποία παρέχει ένα επεκτάσιμο και κατανεμημένο έλεγχο πρόσβασης για ασύρματα

[61] Υλικό ή λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση ανάμεσα σε διαφορετικά δικτυακά περιβάλλοντα. Οι πύλες δικτύου μπορούν να λειτουργήσουν σε αρκετά από τα ανώτερα στρώματα του μοντέλου OSI, κυρίως στα στρώματα

δίκτυα που βασίζεται στις τεχνολογίες SDN και NFV που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η Εικόνα 22 που ακολουθεί, παρουσιάζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική, όπου διάφορες λειτουργίες δικτύου όπως MME, HSS, κ.λ.π. είναι εικονικές και τρέχουν σε διαφορετικές μηχανές ως λειτουργίες εικονικού δικτύου (VNFs – Virtual Network Functions). Είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι υπάρχουν αρκετές δυνατότητες ασύρματης πρόσβασης, καθώς υπάρχουν διαφορετικά σημεία πρόσβασης όπως COTS, UEs (User equipment's), eNodeB[62] και Wi-Fi. Στην ίδια Εικόνα φαίνεται επίσης ότι και η ενοποιημένη πύλη δικτύου του Παρόχου b<>com.



Εικόνα 22. Αρχιτεκτονική ενοποιημένης πύλης δικτύου (Unifier Gateway) από άκρο σε άκρο. Η πύλη αυτή περιγράφεται με το πράσινο διακεκομμένο περίγραμμα [πηγή 25]

Με τους δύο κόμβους πλατφόρμας δοκιμών (b<>com και VTT), το project 5G-ENSURE έχει τη δυνατότητα:

- να δοκιμάσει διαφορετικές εφαρμογές (RAN, ePC, κ.λ.π),
- να παρέχει περιβάλλον με πολλούς φορείς,
- να καταστεί δυνατό για τους ιδιοκτήτες των κινητήριων μοχλών να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα τους σε ένα πολυεπίπεδο περιβάλλον.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια εμβάθυνση πάνω στο πλαίσιο της πλατφόρμας δοκιμών του Παρόχου b<>com που -όπως προαναφέρθηκε- παρέχει τη δυνατότητα πολλαπλών μισθώσεων[63]. Το πλαίσιο αυτό παρέχεται με εργαλεία που θα επιτρέπουν τόσο την αρχικοποίηση

συνόδου, παρουσίασης και εφαρμογών. Συνήθως συσκευές πύλης παρεμβάλλονται μεταξύ του τοπικού δικτύου (LAN) μίας εταιρείας ή οργανισμού και του Διαδικτύου.

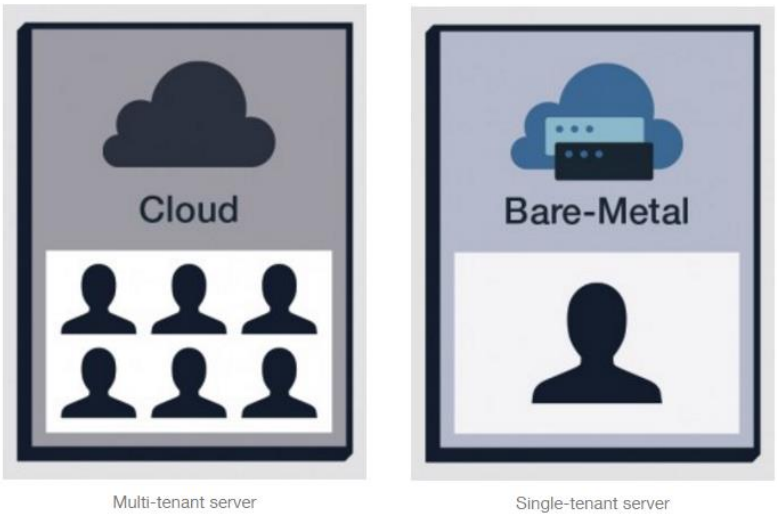
[62] Υλικό που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που επικοινωνεί απευθείας ασύρματα με κινητά τηλέφωνα ως ένας πομποδέκτης σταθμού βάσης (BTS) σε δίκτυα GSM.

[63] Θα πρέπει ο συγκεκριμένος Πάροχος να είναι σε θέση να παρέχει για κάθε μισθωτή μια ανεξάρτητη 5G ικανή υποδομή

όσο και τη διαχείριση των στιγμιοτύπων που εκτελούνται στο περιβάλλον. Επίσης θα πρέπει με τη σειρά του να παρέχει ένα κατάλογο με όλες τις κρίσιμες τεχνολογίες ασφαλείας του 5G – ENSURE καθώς και ένα εργαλείο διαχείρισης δοκιμών. Το πλαίσιο είναι συνδεδεμένο με το εταιρικό RAN (χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε από τις τεχνολογίες Wi – Fi ή LTE) επιτρέποντας την κράτηση ασύρματων πόρων κατά τη διάρκεια των συνεδριών δοκιμής. Ο στόχος του πλαισίου είναι ο εύκολος χειρισμός της ανάπτυξη των συνιστωσών του δικτύου και η διευκόλυνση της κλιμάκωσης. Τα εργαλεία διαχείρισης της διαμόρφωσης (configuration management tools) ισχύουν τόσο για την εικονικούς όσο και για τους bare-metal[64] εξυπηρετητές.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ενός τέτοιου εργαλείου είναι η συγκέντρωση των ενεργειών που πρέπει να εκτελεστούν σε όλο το εύρος της πλατφόρμας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, όπως για παράδειγμα η διατήρηση ενημερωμένων συνιστωσών και η επαναρύθμιση των συνιστωσών. Για παράδειγμα, εάν μια αλλαγή λειτουργεί με τους κανόνες της μηχανικής, μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα κλικ σε όλες τις συνιστώσες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι αναφορικά με τη διαχείριση ενός bare-metal εξυπηρετητή, οι οικοδεσπότες πρέπει να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ένα συγκεκριμένο μισθωτή, ακόμη και όταν εκτελούνται ως hypervisor (για εικονική φιλοξενία μηχανής). Η Εικόνα 23 που ακολουθεί, διευκρινίζει τη διαφορά ανάμεσα σε ένα Cloud και σε ένα Bare – Metal Server.



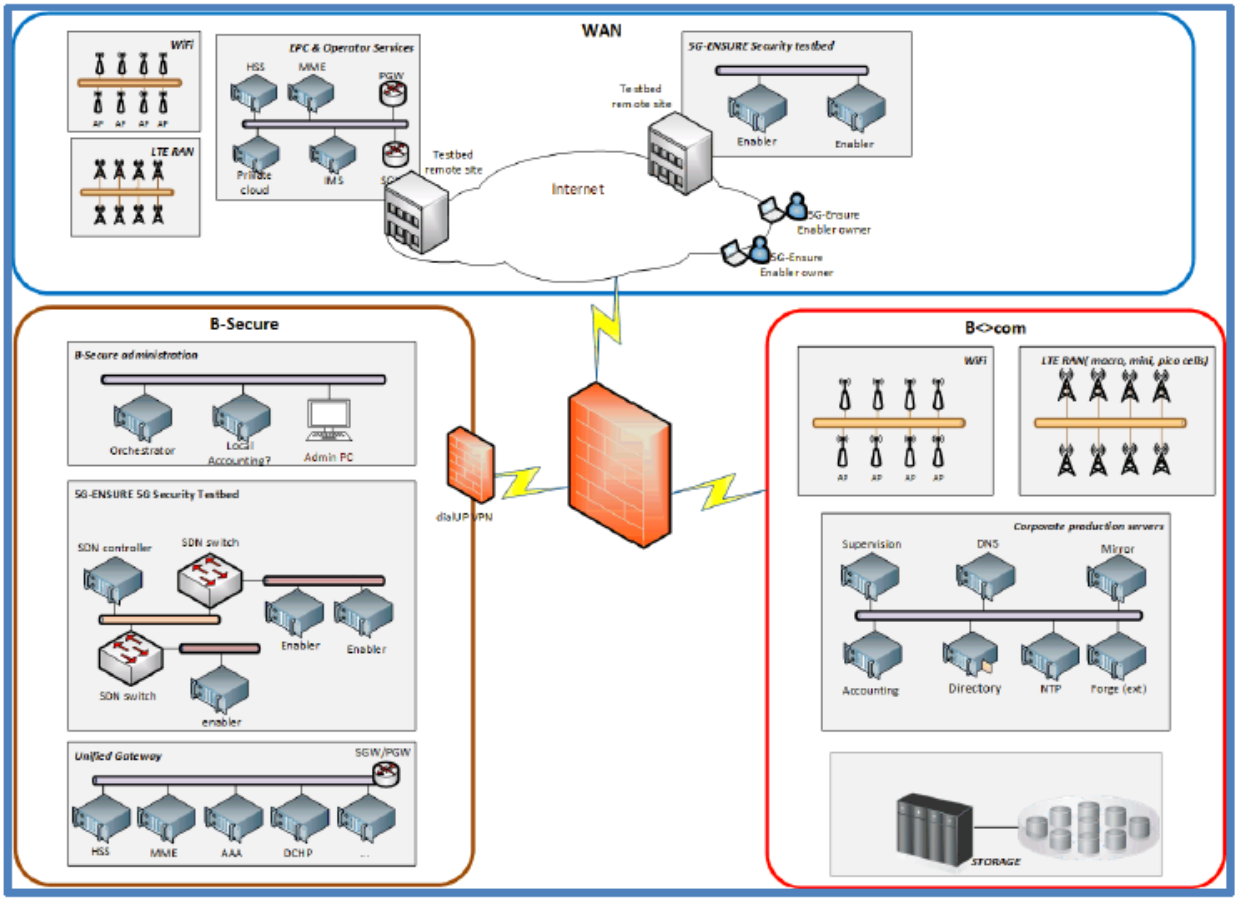
Εικόνα 23. Ο Bare-metal είναι ένας διακομιστής απλού ενοικιαστή, ο οποίος και έχει στη διάθεσή του όλους τους πόρους του. Σε σύγκριση με το μοντέλο υπολογιστικού νέφους όπου πολλαπλοί χρήστες διαμένουν στο ίδιο φυσικό επίπεδο, ο συγκεκριμένος διακομιστής έχει ένα πελάτη στο διακομιστή [πηγή 26].

Επίσης το πλαίσιο συνδέεται με εταιρικά εργαλεία που παρέχουν βασικές λειτουργίες, όπως είναι οι υπηρεσίες AAA και του δικτύου. Τέλος, έχει πρόσβαση σε μόνιμη αποθήκευση για τα αρχεία καταγραφής των δοκιμών (test logs) και των αποτελεσμάτων των συνεδριών (session

[64] Είναι ένας παραδοσιακός αποκλειστικός διακομιστής με νέα χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στη γενιά του υπολογιστικού νέφους. Αυτά είναι η παροχή πρόσβασης στην πλήρη επεξεργαστική ισχύ των αποκλειστικών διακομιστών για την κάλυψη των ιδιαίτερων απαιτήσεων που υπάρχουν για υψηλή απόδοση.

outputs) που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της περιόδου του project. Η Εικόνα 24 που ακολουθεί, παρουσιάζει το διάγραμμα της αρχιτεκτονικής υψηλού επιπέδου (HLD – High Level Diagram) του Παρόχου b<>com.

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, η αρχιτεκτονική αυτή απαρτίζεται από τρία κύρια μέρη που είναι ο προαναφερόμενος Πάροχος, το πλαίσιο **B-Secure** που παρέχει εξοπλισμό για όλα τα φιλοξενούμενα projects και το δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN), το οποίο απαρτίζεται από τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης WiFi και LTE, την πλατφόρμα δοκιμών ασφαλείας του 5G – ENSURE και το Διαδίκτυο που περιέχει απομακρυσμένες τοποθεσίες πλατφόρμας δοκιμών (Testbed remote site) και τους κατόχους εξοπλισμού της τεχνολογίας 5G –Ensure.



Εικόνα 24. Αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου (HLD – High Level Diagram) του Παρόχου b<>com [πηγή 25]

4.1.2. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ασφάλειας από το project 5G NORMA

Ο κύριος στόχος του συγκεκριμένου project είναι να προτείνει μια πολλαπλών υπηρεσιών αρχιτεκτονική δικτύου κινητής τηλεφωνίας που να προσαρμόζει τη χρήση των πόρων του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (RAN και CN) στις ανάγκες των παρεχόμενων υπηρεσιών και των απαιτήσεων της κυκλοφορίας με βάση το χρόνο, την τοποθεσία και την τοπολογία του δικτύου.

Η βασική ιδέα πίσω από το συγκεκριμένο project για την επίτευξη των παραπάνω στόχων είναι να αποσυνθέσει τις λειτουργίες του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών πρόσβασης και πυρήνα) και να τις κατανείμει με προσαρμοστικό τρόπο στο δίκτυο πρόσβασης ή το κεντρικό υπολογιστικό νέφος, ανάλογα με (i) τη συγκεκριμένη υπηρεσία και τις απαιτήσεις της, π.χ. το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση και (ii) τις δυνατότητες του δικτύου μεταφοράς (π.χ., διαθέσιμη front/backc - haul χωρητικότητα). Αυτή η προσαρμοστική κατανομή των λειτουργιών φέρνει πολλά πλεονεκτήματα:

- Όταν οι απαιτήσεις υπηρεσιών και η χωρητικότητα backhaul επιτρέπουν τη συγκέντρωση τη λειτουργικότητα στο υπολογιστικό νέφος, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη επεκτασιμότητα από τη μετακίνηση όλης της λειτουργικότητας στο σύννεφο.
- Όταν οι υπηρεσίες έχουν ειδικές απαιτήσεις ή περιορισμούς backhaul που δεν επιτρέπουν την πλήρη συγκέντρωση, μπορεί να επιτευχθεί κέρδος με τη χρήση μιας πλήρως ή μερικώς κατανεμημένης διαμόρφωσης με οφέλη, όπως οι μικρότερες καθυστερήσεις, η αυτόνομη λειτουργία των νεφών και η αποφόρτιση του backhaul.

Η ασφάλεια είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G και μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν αυτά έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την ασφάλεια από την αρχή. Πράγματι, ο σχεδιασμός της συνολικής αρχιτεκτονικής 5G δεν μπορεί να διαχωριστεί από τους μηχανισμούς ασφαλείας και την αρχιτεκτονική. Κατά συνέπεια, το 5G NORMA θα οδηγήσει την αποφάσεις για την αρχιτεκτονική του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες εκτιμήσεις για την ασφάλεια, συμπεριλαμβανομένων πιθανών απειλών και μέτρων προστασίας, και ως εκ τούτου οι εκτιμήσεις για την ασφάλεια θα επηρεάσουν τις αποφάσεις για την αρχιτεκτονική.

Ενώ γενικά θέματα ασφάλειας (όπως ευάλωτο λογισμικό) ισχύουν προφανώς για δίκτυα 5G, το 5G NORMA επικεντρώνεται σε ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής. Έτσι, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια που συνδέονται με τις νέες έννοιες και τις διαδικασίες που προτείνει το 5G NORMA (όπως η χρήση εικονικοποιημένου περιβάλλοντος, ο σχεδιασμός software-defined λογισμικού κ.λ.π.) θα πρέπει να αξιολογούνται και να μετριάζονται με τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας. Ένας σαφής στόχος του 5G NORMA είναι να παρέχει πιο ευέλικτα μέτρα ασφαλείας (σε σύγκριση με τα σημερινά δίκτυα LTE) που να μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες συγκεκριμένων υπηρεσιών.

4.2 Με κριτήριο την ενέργεια (energy)

4.2.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ενέργειας από το project Flex5Gware

Στη συγκεκριμένη ενότητα ομαδοποιούνται τα πιο σημαντικά 5G-PPP projects που αναφέρθηκαν με συντομία στο προηγούμενο κεφάλαιο, με κριτήριο την **ενέργεια.** Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα project *Flex5Gware* και *Speed-5G,* τα οποία αποτελούν ίσως τα πιο ενδεικτικά παραδείγματα ενέργειας μεταξύ των 5G - PPP projects. Ξεκινάμε αρχικά με το πρώτο project. Σε πολυσύχναστους χώρους, όπως είναι οι αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές, οι τελικοί χρήστες περιμένουν να έχουν υψηλή χωρητικότητα, απρόσκοπτες συνδέσεις με ασύρματες υπηρεσίες σχεδόν οπουδήποτε. Οι απαιτήσεις των χρηστών είναι μεταβαλλόμενες. Για παράδειγμα στο πλαίσιο μιας αστικής κοινωνίας, ως πολυσύχναστοι χώροι θεωρούνται συγκεκριμένοι χώροι όπου συγκεντρώνονται τεράστια πλήθη για ορισμένες χρονικές περιόδους, όπως π.χ. για δημόσια ή αθλητικά γεγονότα, συναυλίες κ.λ.π.

Επίσης το είδος της κυκλοφορίας είναι διαφοροποιημένο: οι χρήστες μπορούν να ενδιαφέρονται για συγκεκριμένες πληροφορίες κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης (βαθμολογίες, πληροφορίες σχετικά με τους αθλητές κ.λ.π). Επίσης μπορεί να θέλουν να παρακολουθήσουν HD βίντεο και φωτογραφίες στα κοινωνικά δίκτυα. Για το λόγο αυτό ο ρυθμός δεδομένων θα πρέπει να είναι υψηλότερος σε uplink (UL) και όχι σε downlink (DL) ζεύξη και πιο συγκεκριμένα διπλάσιος (προβλέπονται ρυθμοί 50Mbps και 25 Mbps αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό θα μπορούν τα δεδομένα να ανεβαίνουν πιο γρήγορα στο Διαδίκτυο και στη συνέχεια να διαμοιράζονται αποτελεσματικά μεταξύ των χρηστών.

Για την εξασφάλιση τέτοιων peaks, το υλικό πρέπει να αναπτυχθεί προς την κατεύθυνση της ενσωμάτωσης ευέλικτων λειτουργιών διπλής κατεύθυνσης (full duplex), όπως είναι για παράδειγμα μια ενοποιημένη σχεδίαση πλαισίου TDD/FDD (Time Division Duplex/ Frequency Division Duplex[65]), λαμβάνοντας στη συνέχεια υπόψη όλες τις προκλήσεις που σχετίζονται με το σχεδιασμό των τεχνικών καταστολής προηγμένων παρεμβολών. Μια λύση πολλαπλής τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης (RAT) ανάλογα με το είδος της κίνησης, την ποιότητα των υπηρεσιών, καθώς και το κυκλοφοριακό φορτίο, μπορεί γρήγορα να κάνει εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών έτσι ώστε να είναι σε θέση να διασφαλίσει την ομοιόμορφη κάλυψη και την καλύτερη εξυπηρέτηση για τους χρήστες.

Μια έξυπνη πόλη (smart city) είναι μια συλλογή από την καθημερινή ζωή των υπηρεσιών που προβλέπονται για τη βελτίωση της ζωής των πολιτών σε μια μεγάλη ποικιλία καταστάσεων. Έχουν γίνει προσπάθειες για την αναγνώριση, ταξινόμηση μετρήσιμων βασικών δεικτών απόδοσης

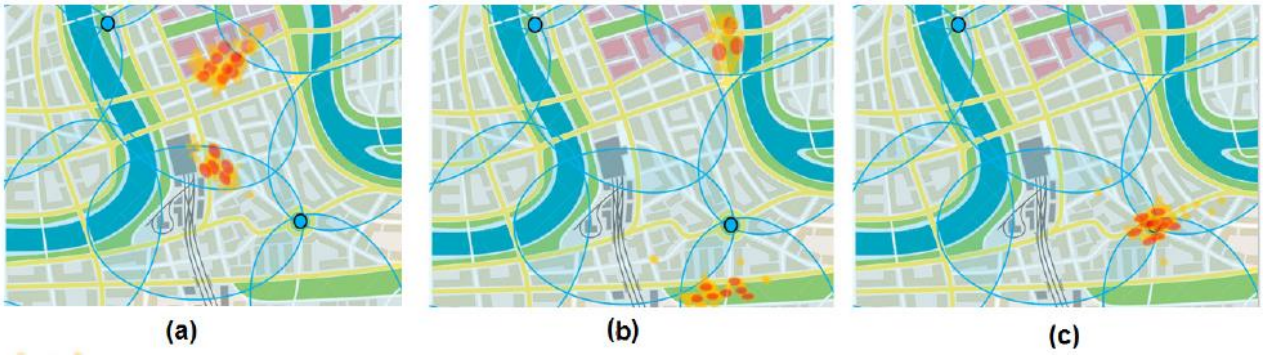
[65] Αποτελούν βασικές κατηγορίες του full duplexing. Στο TDD γίνεται διαχωρισμός στο χρόνο της μετάδοσης των δεδομένων μεταξύ δύο υπολογιστικών συστημάτων, ενώ στο FTD γίνεται διαχωρισμός στη συχνότητα της μετάδοσης των δεδομένων.

(KPIs), όπως είναι η ασφάλεια, η κάλυψη, ο αριθμός και η πυκνότητα των συσκευών, η διαθεσιμότητα, επεκτασιμότητα, ενεργειακή απόδοση και επεξεργασία του δικτύου. Στις πόλεις αυτές τόσο η λειτουργία Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D) όσο και οι τοπικές αρχές ενδιαφέρονται ολοένα και περισσότερο για την παρακολούθηση όλων των σχετικών και μετρήσιμων δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτή. Αυτό επηρεάζει τον αριθμό των ήδη αναπτυχθέντων στοιχείων που ελέγχουν βασικές παραμέτρους και κάνουν χρήση του κυψελοειδούς δικτύου για να στείλουν τα αποκτηθέντα δεδομένα σε διακομιστές επεξεργασίας των δεδομένων στο Διαδίκτυο.

Για την περίπτωση των πολυσύχναστων χώρων που προαναφέρθηκε, ο πιο κατάλληλος δείκτης απόδοσης αντιπροσωπεύεται από τον εξαιρετικά υψηλό αριθμό των χρηστών (NoU – Number of Users). Άλλοι δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ο ρυθμός δεδομένων χρήστη (UDR - User Data Rate), ο όγκος ασύρματων δεδομένων (MDV - Mobile Data Volume) και η καθυστέρηση (LAT – Latency).

Σε ένα πυκνό αστικό σενάριο, οι χρήστες συνήθως δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλη την περιοχή κάλυψης, αλλά ομαδοποιούνται με μεγαλύτερη πιθανότητα σε κάποια σημεία που ονομάζεται hotspots. Το hotspot είναι μια περιορισμένη περιοχή της περιοχής κάλυψης, όπου η ποσότητα της απαιτούμενης χωρητικότητας του δικτύου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη μέση χωρητικότητα του δικτύου. Οι τυπικές θέσεις αυτών των hotspots κυκλοφορίας θα μπορούσαν να είναι οι σταθμοί τρένων/λεωφορείων, επιχειρηματικά κέντρα, σχολεία, εμπορικά κέντρα, πάρκα, πλατείες ή άλλα δημοφιλή μέρη σε μια πόλη. Αυτά τα σημεία είναι πυκνοκατοικημένα μόνο για περιορισμένα χρονικά διαστήματα της ημέρας, ενώ στο υπόλοιπο της ημέρας η χωρητικότητα που ζητείται είναι παρόμοια με την πλειοψηφία των αστικών περιοχών.

Για να εξηγήσει αυτό το φαινόμενο, η Εικόνα 25 που ακολουθεί, παρουσιάζει ένα παράδειγμα της κατανομής της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της ημέρας: στο πρώτο μέρος της ημέρας (α) η πλειοψηφία της κίνησης είναι συγκεντρωμένη στο επιχειρηματικό κέντρο, στο σταθμό λεωφορείων/τρένων ή στους χώρους που χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους για να φτάσουν στη εργασία ή το σχολείο. Στο δεύτερο μέρος της ημέρας (β) η κίνηση του χρήστη συγκεντρώνεται στο πάρκο και τα εμπορικά κέντρα ή σε άλλους χώρους που προσεγγίζονται από τους ανθρώπους μετά από την εργασία ή το σχολείο και στο τελευταίο μέρος της ημέρας (γ) στο κέντρο της πόλης ή τις περιοχές με τα εστιατόρια.



Εικόνα 25. Hotspot κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της ημέρας [πηγή 26]

Στην περίπτωση των δυναμικών hotspots η κύρια πρόκληση είναι η κατανομή του υπολογιστικού φορτίου μόνο στην περιοχή εκείνη όπου αυξάνεται η απαίτηση για χωρητικότητα του δικτύου δεδομένου ότι σε περιορισμένο χώρο και χρόνο, το δίκτυο έχει να χειριστεί δυναμικά την παρουσία ενός πολύ υψηλού αριθμού συνδέσεων χρήστη και οι προτεινόμενες λύσεις που χρησιμοποιούνται αξιολογούνται με βάση την ευελιξία και την αναδιάρθρωσή τους.

Η ανάπτυξη του δικτύου γίνεται με χρήση διαφορετικών στρωμάτων κάλυψης Σε αυτή την περίπτωση χρήσης ένας βασικός δείκτης απόδοσης είναι η ευελιξία (FVR) που αποτελεί την ικανότητα μιας λύσης να λειτουργήσει σε διαφορετικές συνθήκες δικτύου (π.χ. υψηλή/χαμηλή κυκλοφορία δικτύου). Η απαίτηση είναι ο συγκεκριμένος δείκτης να είναι μικρότερος από 30 sec για να μπορέσει να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο αριθμό χρηστών αποτελεσματικά και γρήγορα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται εκ' νέου παραμετροποίηση (re-configuration) προκειμένου να εξασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα των υπηρεσιών σε περίπτωση αποτυχίας σημείου πρόσβασης ή πρέπει να προστεθούν νέα σημεία πρόσβασης.

Εάν ένα δίκτυο πρέπει να λειτουργήσει σε διαφορετικά σενάρια, η λύση πρέπει να εγγυηθεί ότι θα είναι σε θέση να συνεργαστεί με ένα μεταβλητό αριθμό ζωνών αναπτυχθεί κατά την υπό εξέταση σενάριο και ότι υποστηρίζεται ο συντονισμός μεταξύ μακρο- (macro-)[66] και μικροεπιπέδων (microlayer)[67]. Ένας άλλος δείκτης απόδοσης -σχετικός με το θέμα της ενέργειας- είναι η περιγραφή της ενεργειακής απόδοσης (NRG - energy efficiency) που χρησιμοποιείται

[66] Ένα macro layer χρησιμοποιείται για να εγγυηθεί την κάλυψη σε όλη την εξυπηρετησθείσα περιοχή και σε μερικές εφαρμογές για να επιτρέψει τη συνεχόμενη μετάδοση ενός στρώματος ελέγχου. Λόγω της σημαντικής συνεισφοράς τους αυτά τα είδη cell απενεργοποιούνται σπάνια έως καθόλου. Αυτό το layer συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας κόμβους εκπομπής υψηλής ισχύος οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί σε υψηλούς πύργους ή στις στέγες των κτηρίων. Οι συχνότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το είδος layer είναι οι χαμηλές συχνότητες μεταφοράς εξαιτίας των καλών χαρακτηριστικών διάδοσης των κυμάτων αυτών.

[67] Ένα micro layer: χρησιμοποιείται για να αυξήσει την χωρητικότητα του δικτύου σε μια μικρή περιοχή όπου ο αριθμός των χρηστών που απαιτούν υψηλή ταχύτητα δεδομένων μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλός. Αυτό το στρώμα συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό κόμβων χαμηλής εκπομπής ισχύος τοποθετημένων σε μέτρια ύψη (π.χ. 5 ή 10 m), προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους χρήστες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει τον όγκο των δεδομένων που διαβιβάζονται στους χρήστες χρησιμοποιώντας πιο αποδοτικές τεχνικές μετάδοσης (π.χ. αξιοποίηση της διαφοροποίησης με υψηλότερη πληθικότητα και/ή με την εισαγωγή τεχνικών beamforming).

επίσης και σε άλλα ευρωπαϊκά project όπως το METIS. Η ενεργειακή απόδοση ανά bit ορίζεται ως η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μετάδοση πληροφοριών και αντιπροσωπεύονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varepsilon_I = \frac{\text{Καταναλωθείσα ενέργεια (Energy Consumed)}}{\text{παραδοθείσα πληροφορία (Information delivered)}} = \frac{\text{Καταναλωθείσα ισχύ (Power consumed)}}{\text{ρυθμός παράδοτέων δεδομένων}}$$

Το μέγεθος ε_I μετριέται σε J/bit ή σε W/bps ανάλογα με το ποιο από τα κλάσματα χρησιμοποιείται. Η απαίτηση για το δείκτη NRG είναι να βρίσκεται σε ένα ποσοστό μεταξύ 40% και 60% και ο πιο κατάλληλος τρόπος για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας είναι η βελτίωση του τρόπου που δαπανάται η ενέργεια για την αξιοποίηση του δικτύου. Αυτό το KPI βασίζεται σε ένα ποσοστό της εξοικονόμησης συνολικής ενέργειας που λαμβάνεται χάρη στην αποτελεσματική ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του μικροεπιπέδου.

Μερικά KPI's που σχετίζονται με τις έξυπνες πόλεις είναι και πάλι ο δείκτης NRG που αποτελεί ένα σημαντικό στόχο για αυτή την περίπτωση χρήσης, τόσο όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής IoT και για τον αντίκτυπο στην υποδομή. Από την πλευρά του κόμβου, η ιδέα είναι να κρατήσει τη διάρκεια ζωής της συσκευής όσο το δυνατόν υψηλότερη προκειμένου να καθυστερήσει όσο το δυνατόν τις εργασίες συντήρησης. Επίσης ο αριθμός των υποστηριζόμενων χρηστών (NoU - Number of supported users) αποτελεί έναν επίσης βασικό δείκτη απόδοσης καθότι ο αριθμός των συσκευών IoT σε χρήση αναμένεται να αυξηθεί εκθετικά στο εγγύς μέλλον. Έτσι, το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να χειριστεί αυτή την αύξηση του αριθμού των συσκευών IoT μαζί με τους χρήστες μέσα στις πόλεις.

Ο σχετικός με το θέμα της ενέργειας δείκτης απόδοσης NRG σχετίζεται επίσης και με την απόδοση των συσκευών καθότι οι συσκευές υψηλής απόδοσης 5G αναμένεται να παρουσιάσουν σημαντική βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας σε σύγκριση με την 4G τεχνολογία. Επίσης ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) καταναλώνει ένα σημαντικό μερίδιο της συνολικής ενέργειας και η κατάσταση θα μπορούσε να γίνει ακόμη χειρότερη στην περίπτωση χρήσης του 50+ Mbps (όπου κάθε χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να βιώσει ένα ρυθμό δεδομένων τουλάχιστον 50 Mbps στο downlink και 25 Mbps στο uplink. Η απαίτηση αυτή έχει άμεσο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας τόσο από την πλευρά του δικτύου όσο και από αυτή των τερματικών.

Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες της υπόθεσης χρήσης, στον τομέα του υλικού, οι τεχνικές που μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση του ενισχυτή ισχύος (τόσο σε σταθμούς βάσης όσο και στα τερματικά των χρηστών) όπως μείωση του PAPR (Peak to Average Power Ratio), προ-παραμόρφωση και τεχνικές παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσουν σε βελτιώσεις μέχρι και 50% στο σταθμό βάσης και μέχρι 30% στο επίπεδο της συσκευής. Επιπλέον στο πεδίο του λογισμικού, εργαλεία διαχείρισης και ελέγχου των επιπέδων και ευέλικτες λύσεις λογισμικού

για περιβάλλοντα C-RAN που προσφέρουν ενεργειακή απόδοση μέσω του συντονισμού και της δυναμικής αναδιάταξης, μπορεί να προσφέρουν μια εξοικονόμηση ενέργειας 25-30% της ενέργειας που καταναλώνεται από την πλατφόρμα RRH και μια συνολική εξοικονόμηση ενέργειας που κυμαίνεται από 40 έως 60%, χάρη στην ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της πλατφόρμας αυτής.

4.2.2. Αντιμετώπιση του προβλήματος της ενέργειας από το project Speed5G

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και των αυξανόμενων ανησυχιών αναφορικά με το περιβάλλον και τη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αυξήθηκαν και οι καταναλωτές που στρέφονται όλο και περισσότερο σε prosumers (παραγωγούς ενέργειας). Ως αποτέλεσμα, ο μετασχηματισμός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε ένα πολύ πιο κατανεμημένο μοντέλο παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και σε μικρο-δίκτυα, κάτι το οποίο οδηγεί στην ανάδυση νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Το πρόβλημα είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα ελέγχου που εξαρτάται από την επικοινωνία που θα πρέπει να ικανοποιεί αυστηρές απαιτήσεις. Η αναμενόμενη απόδοση και ευελιξία του 5G θα επιτρέψει μια επικοινωνιακή υποδομή που θα είναι σε θέση να υποστηρίξει τις αναδυόμενες περιπτώσεις χρήσης ενέργειας από το 2020 και μετά. Τα δίκτυα επικοινωνιών για ευφυή δίκτυα, οι ευφυείς μετρητές και άλλες περιπτώσεις χρήσης όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (π.χ. e-αυτοκίνητα) θα πρέπει να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες διαφόρων εφαρμογών από την αυτόματη μέτρηση και τον έλεγχο των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων μέχρι την ενσωμάτωση των e-αυτοκίνητων στα ενεργειακά συστήματα.

Ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (SGCN - Smart Grid Communications Network[68]) αποτελείται από πολλαπλούς τομείς και κάθε ένας από αυτούς εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή, π.χ. ένα δίκτυο διανομής ή ένα δευτερεύοντα υποσταθμό που πραγματοποιεί μετασχηματισμό μεταξύ μέσης και χαμηλής τάσης και πρέπει να ανταποκρίνεται στις ατομικές ανάγκες των εφαρμογών που εξυπηρετεί. Η αρχιτεκτονική του δικτύου επικοινωνίας, οπτικοποιείται στην Εικόνα 26 και χαρτογραφείται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετεί.

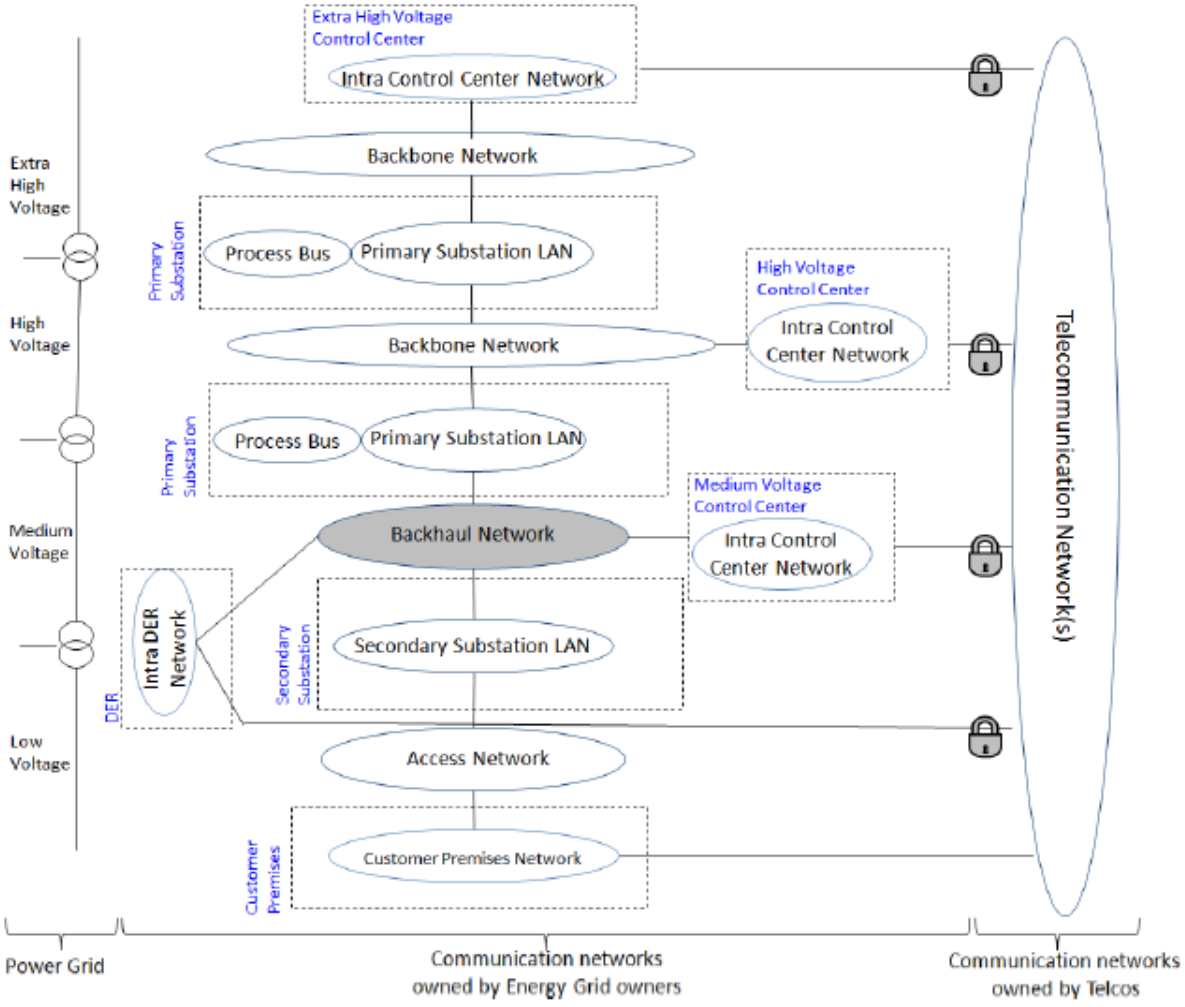
Τα στοιχεία στα σύνορα των επιπέδων τάσης της Εικόνας αυτής είναι μείζονος σημασίας για τους τομείς της επικοινωνίας Smart Grid, δεδομένου ότι έχουν τις δικές τους πολύ συγκεκριμένες απαιτήσεις που είναι:

68 Αναβαθμισμένο δίκτυο ενέργειας στο οποίο έχει προστεθεί αμφίδρομη ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ προμηθευτή και καταναλωτή, έξυπνα συστήματα μέτρησης, παρακολούθησης και ελέγχου.

- *Πρωτοβάθμιος (Κύριος) Υποσταθμός (Primary Substation):* η μέση τάση σε ένα σημείο μετασχηματισμού υψηλής τάσης και η υψηλή τάση σε ένα επιπλέον σημείο μετασχηματισμού υψηλής τάσης.
- *Δευτεροβάθμιος Υποσταθμός (Secondary Substation):* σημείο μετασχηματισμού χαμηλής τάσης σε μέση τάση.

Σε αυτό το δίκτυο επικοινωνίας μπορούν να διακριθούν τα παρακάτω τμήματα:

- *Grid Backbone Communication Network:* δίκτυο επικοινωνίας που συνδέει τα τοπικά δίκτυα του κύριου υποσταθμού με τα περιφερειακά και τα κεντρικά σημεία ελέγχου τους.
- *Primary Substation LAN:* ένας κεντρικός υποσταθμός LAN είναι αρκετά σύνθετος και απαιτεί τη δική του υποδομή επικοινωνίας. Βασίζεται κυρίως σε υποδομές Gigabit Ethernet
- *Grid Backhaul Communication Network:* δίκτυο επικοινωνιών που συνδέει το δευτερεύοντα υποσταθμό LAN με ένα κέντρο ελέγχου. Αυτό το πεδίο δικτύου μπορεί επίσης να συνδεθεί με τον αντίστοιχο κεντρικός υποσταθμός LAN.



Εικόνα 26. Αρχιτεκτονική αναφοράς δίκτυο επικοινωνίας στον τομέα της ενέργειας [πηγή 27]

- *Secondary Substation LAN*: δίκτυο μέσα στο δευτερεύοντα υποσταθμό.
- *Grid Access Communication Network:* επικοινωνιακό δίκτυο που συνδέει οι εγκαταστάσεις του πελάτη ή π.χ. τους αισθητήρες χαμηλής τάσης σε ένα συγκεκριμένο δευτερεύοντα υποσταθμό.
- *Customer Premises LAN:* εσωτερικό δίκτυο επικοινωνίας. Ένας πελάτης χαρακτηρίζεται από την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας (prosumer) και μπορεί να είναι παραγωγή ενέργειας για κατοικίες ή βιομηχανίες.
- *Intra DER (Distributed Energy Resource) Network:* για κατανεμημένους ενεργειακούς πόσους μεσαίου μεγέθους, όπως αιολικά και ηλιακά πάρκα, απαιτείται ένα αφιερωμένο LAN για λόγους ελέγχου, διαχείρισης και εποπτείας.
- *Intra-Control-Centre Network:* LAN με ένα κέντρο ελέγχου για τη διαχείριση του Συστήματος Λειτουργιών.
- *External Network:* φορέας σταθερού ή κινητού δικτύου επικοινωνίας που προσφέρει διάφορες υπηρεσίες σύνδεσης είτε μέσω ειδικών υπηρεσιών ή μέσω του Διαδικτύου.

Λαμβάνοντας ως παράδειγμα ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση για αποτελεσματικές και αξιόπιστες λύσεις επικοινωνίας αναμένεται να αυξηθεί λόγω της εμφάνισης των έξυπνων δικτύων, και η μερίδα του λέοντος θα πραγματοποιηθεί στην περιοχή μέσης και χαμηλής τάσης προς την κατεύθυνση των δευτερευόντων υποσταθμών και των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, καθώς και μεταξύ κύριων και δευτερευόντων υποσταθμών. Αυτά τα περιουσιακά στοιχεία σε ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν διαθέτουν εξοπλισμό επικοινωνίας ή μέτρησης και το 5G μπορεί να παρέχει οικονομικά βιώσιμες ασύρματες λύσεις, σε σχέση με καθαρά συστήματα επικοινωνίας με οπτικές ίνες, μέσω αποκέντρωσης των ενεργειακών δικτύων με αυξημένη ανθεκτικότητα συγκριτικά με την 4G τεχνολογία LTE.

Με αυτό τον τρόπο, το μέλλον των έξυπνων δικτύων μπορεί να παρέχεται με αυξημένη χρήση προστασίας, ελέγχου και παρακολούθησης που οδηγεί σε βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, λιγότερες διακοπές ρεύματος, μικρότερες περιοχές διακοπής ρεύματος και ευκολότερη ανάπτυξη δικτύου με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις αστικές περιοχές. Ως εκ τούτου, τα αποκεντρωμένα έξυπνα δίκτυα με αυξημένη ανθεκτικότητα θα επιτρέψουν έξυπνες λύσεις που θα καταστούν σημαντικές στην επαναφορά από κάποια συσκότιση.

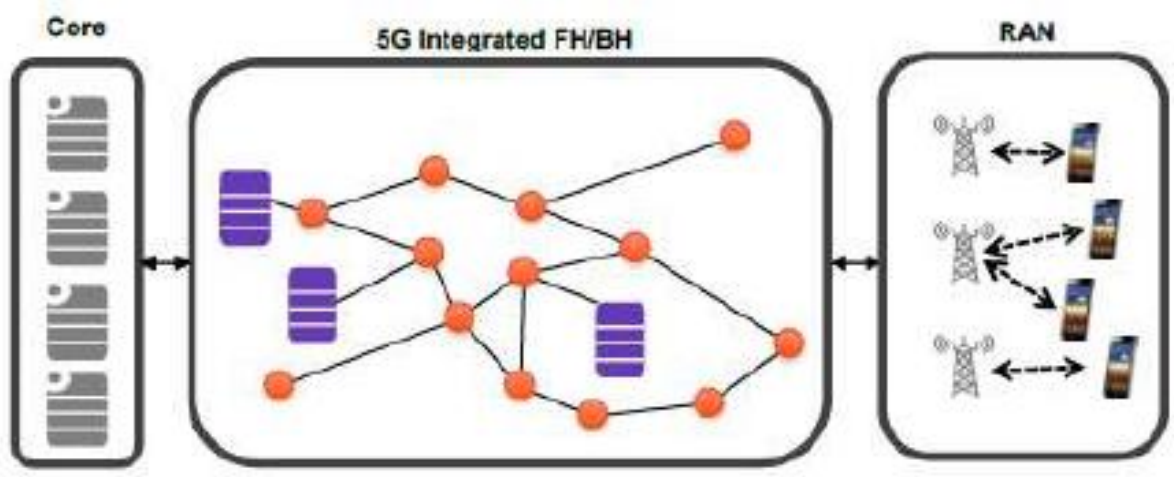
4.3 Με κριτήριο την καθυστέρηση (latency)

4.3.1. Αντιμετώπιση του προβλήματος της καθυστέρησης από το Project 5G - Crosshaul

Στη συγκεκριμένη ενότητα ομαδοποιούνται τα πιο σημαντικά 5G-PPP projects που αφορούν την καθυστέρηση στην επικοινωνία των δικτύων. Η εξέλιξη των κινητών δικτύων προς την κατεύθυνση 5G αντιμετωπίζει την αυξανόμενη ζήτηση για καλύτερη κινητή ευρυζωνική εμπειρία και τις μελλοντικές ακραίες επιδόσεις. Σε αντίθεση από την 4^{η} γενιά κινητών, η οποία προσαρμόζεται για να παρέχει υψηλής ταχύτητας κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, το σύστημα 5G θα σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί περισσότερες περιπτώσεις χρήσης. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του συστήματος 5G πρέπει να αντιμετωπίσει μια μεγάλη πρόκληση: να εισαγάγει σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά τις υπηρεσίες, την εμπειρία του χρήστη, τις υποδομές και την χωρητικότητα του δικτύου κ.λπ., διατηρώντας χαμηλό το συνολικό κόστος.

Τα Δίκτυα Πρόσβασης C-RAN έδειξαν ένα καλό δυναμικό για να λύσουν μια τέτοια πρόκληση και υπόσχονται σημαντικά οφέλη από την άποψη της απόδοσης και της ευελιξίας του δικτύου και θέτουν απαιτητικές προκλήσεις απαιτήσεις για τα fronthaul και backhaul δίκτυα μεταφοράς. Το δίκτυο μεταφοράς μπορεί να γίνει ένα εμπόδιο όσον αφορά την πολυπλοκότητα και το κόστος για την εφαρμογή του C-RAN. Στο 5G-Crosshaul, η ιδέα είναι να επιλύσει το πρόβλημα με την ενσωμάτωση δύο backhaul και fronthaul τμημάτων σε ένα ενιαίο, ευέλικτο δίκτυο SDN με βάση το δίκτυο μεταφοράς για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του ασύρματου δικτύου (RAN) και του πυρήνα του δικτύου με ένα προσαρμοστικό, οικονομικά αποδοτικό και κοινόχρηστο τρόπο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27.

Η πολυπλεξία της κυκλοφορίας backhaul και fronthaul είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική, αφού επιτρέπει τη χρήση της ίδιας υποδομής και ένα κοινό έλεγχο για πολλαπλούς σκοπούς, με επακόλουθη μείωση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TCO). Αυτό ισχύει ακόμη περισσότερο στο δίκτυο 5G, όπου τα νέα λειτουργικά συστήματα διάσπασης της ασύρματης διεπαφής προσθέτουν μια πληθώρα πιθανών ενδιάμεσων περιπτώσεων μεταξύ του καθαρού fronthaul και backhaul, που είναι αδύνατο να αντιμετωπιστούν με ειδική υποδομή για κάθε διάσπαση. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών fronthaul και backhaul θα επιτρέψει τη χρήση των ετερογενών πλατφορμών μεταφοράς και την αξιοποίηση νέων και παραδοσιακών τεχνολογιών για την αύξηση της ικανότητας ή της κάλυψης του δικτύου 5G.

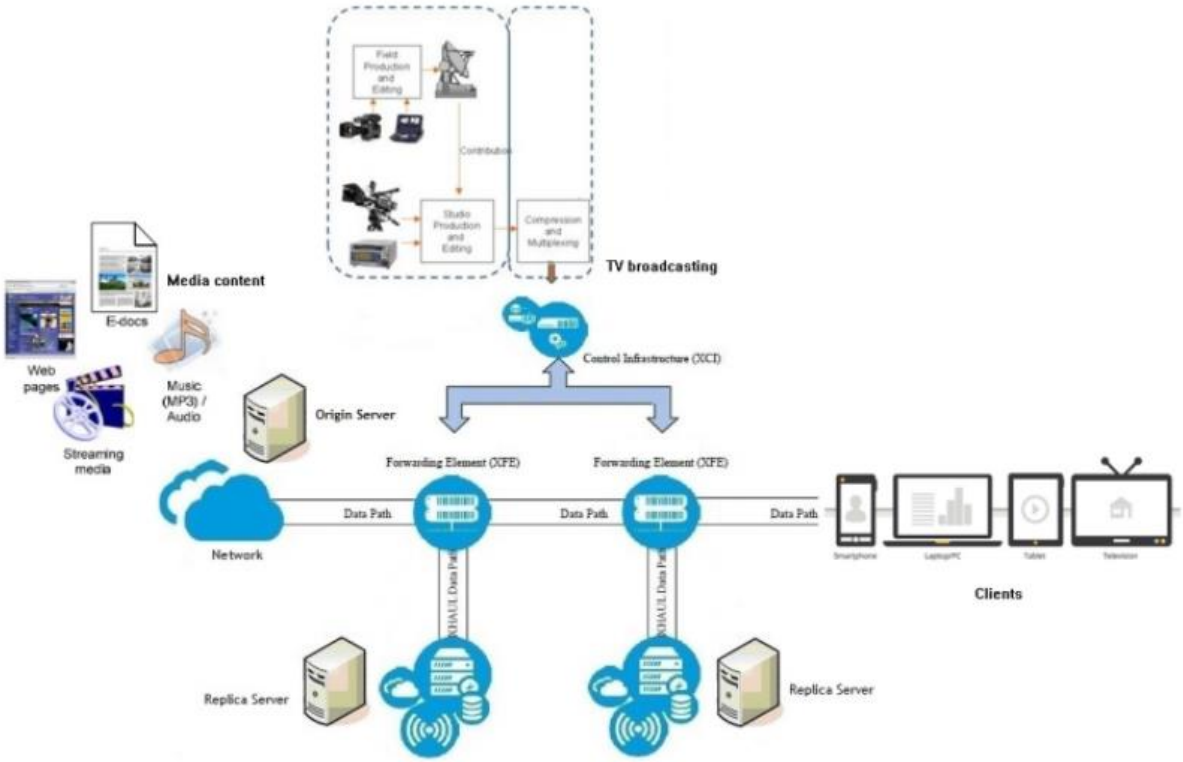


Εικόνα 27. Ενσωμάτωση τεχνολογιών Fronthaul και Backhaul [πηγή 28]

Μια δικτυακή υπηρεσία αποτελεί μια σύνθεση λειτουργιών του δικτύου και ορίζεται από τη συμπεριφορά και τις λειτουργικές προδιαγραφές της. Χαρακτηρίζεται από πολλές παραμέτρους, μεταξύ των οποίων μια από τις σημαντικότερες είναι η *μέγιστη καθυστέρηση (Max latency)*. Με τον τελευταίο όρο εννοείται ο απαιτούμενος από τα δεδομένα χρόνος προκειμένου να μεταφερθούν από ένα καθορισμένο σημείο σε ένα άλλο.

Η καθυστέρηση του δικτύου λαμβάνει υπόψη το χρόνο διάδοσης (propagation time), το χρόνο μετάδοσης (transmission time) και το χρόνο επεξεργασίας (processing time). Η διαφορά μεταξύ των δύο πρώτων προαναφερόμενων μεγεθών είναι ότι ο χρόνος διάδοσης αφορά το χρόνο μετάδοσης ενός δυαδικού ψηφίου από το ένα άκρο του μέσου μετάδοσης στο άλλο, ενώ ο χρόνος μετάδοσης αφορά το χρόνο μετάδοσης ολόκληρης της ακολουθίας δυαδικών ψηφίων. Επίσης η σημαντική αύξηση της χρήσης κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών όπως on - demand βίντεο και τα παιχνίδια απαιτούν προδιαγραφές εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (ultra - low latency).

Στην περίπτωση χρήσης αναφορικά με τη διανομή περιεχομένου των μέσων ενημέρωσης, όπως τα Δίκτυα Παράδοσης Περιεχομένου (CDNs – Content Delivery Networks) και τηλεοπτικής μετάδοσης μέσω των υπηρεσιών broadcast/multicast, θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή σχετίζεται με τη διανομή περιεχομένου σε πολυμεσική μορφή πάνω από 5G δίκτυα, ιδιαίτερα σε μορφή βίντεο. Η μορφή αυτή αναμένεται να συνεισφέρει στο μέγιστο βαθμό στην απαίτηση για κυκλοφορία κινητών δεδομένων, λόγω του ότι διανομή των μέσων ενημέρωσης κάνει ολοένα και πιο αισθητή την παρουσία της στην καθημερινή ανθρώπινη ζωή, χωρίς περιορισμούς στο χώρο και το χρόνο και σε περιβάλλοντα πολλαπλών συσκευών στον τελικό χρήστη. Αυτή η τάση θα αυξηθεί ακόμη περισσότερο και στα μελλοντικά δίκτυα 5G. Αυτή η περίπτωση χρήσης περιγράφεται στην Εικόνα 28 που ακολουθεί.



Εικόνα 28. Περίπτωση χρήσης της διανομής των μέσων ενημέρωσης [πηγή 29]

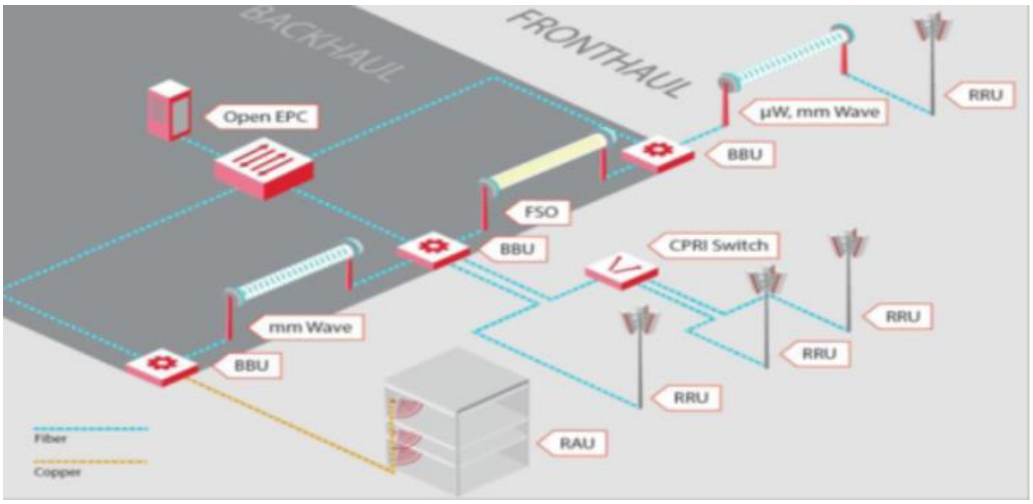
Ένα Δίκτυο Παράδοσης Περιεχομένου αντιγράφει περιεχόμενο από το διακομιστή προέλευσης σε διακομιστές προσωρινής αποθήκευσης, προκειμένου να παραδώσει το περιεχόμενο σε τελικούς χρήστες με αξιόπιστο τρόπο. Το CDN θα κάνει την παράδοση των μέσων ενημέρωσης, χρησιμοποιώντας το δίκτυο 5G-Crosshaul, με ανάπτυξη διακομιστών αντιγράφων που είναι κοντά στα στοιχεία προώθησης δεδομένων. Τα CDN τελικά σημεία μπορούν να διανεμηθούν σε όλο το δίκτυο εξοικονομώντας πόρους μεταφοράς και μειώνοντας την καθυστέρηση μετάδοσης. Τα αναμενόμενα KPIs μπορούν να φιλοξενήσουν πολύ υψηλότερο όγκο φορητών δεδομένων με οικονομικά αποδοτικό τρόπο και με ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσιών (QoE) στους τελικούς χρήστες.

Ένα άλλο σημαντικό σενάριο όπου έχει σημασία η διανομή των μέσων ενημέρωσης, είναι η περίπτωση των μέσων μαζικής ενημέρωσης/TV Broadcasting & multicasting, όπου τα επόμενα δίκτυα 5G θα αποτελέσουν μια καλή εναλλακτική λύση για τα κλασσικά ραδιοτηλεοπτικά δίκτυα, με την επιπλέον ικανότητα να αναμειγνύουν το περιεχόμενο των μέσων που δεν προέρχονται από τηλεοπτική εκπομπή, χρησιμοποιώντας το ίδιο δίκτυο και με μία ελεγχόμενη ποιότητα, χρησιμοποιώντας την υπηρεσία *Broadcast-as-a-Service (BaaS)*. Με τον τελευταίο όρο εννοείται η ενοικίαση υποδομών υπολογιστικού νέφους, όπως δικτύωση, κωδικοποίηση, αποκωδικοποίηση και αποθήκευση, σε ένα μοντέλο pay-as-you-go που αποτελεί μια μορφή προπληρωμένων υπηρεσιών. Η διανομή του περιεχομένου με την υπηρεσία BaaS αποτελεί το κλειδί για να επιτευχθεί πιο

αποτελεσματικός (από την άποψη της αποτελεσματικότητας του φάσματος, του κόστους και της απόδοσης) τρόπος διανομής που παρέχει στους διαχειριστές μια νέα ροή εσόδων που προέρχεται από τη διανομή τηλεόρασης χωρίς να χρειάζεται κάποιο ειδικό δίκτυο. Ο βασικός δείκτης απόδοσης KPI σε αυτή την περίπτωση είναι να διασφαλιστεί η παροχή σε πραγματικό χρόνο με τη χαμηλότερη δυνατή καθυστέρηση (latency).

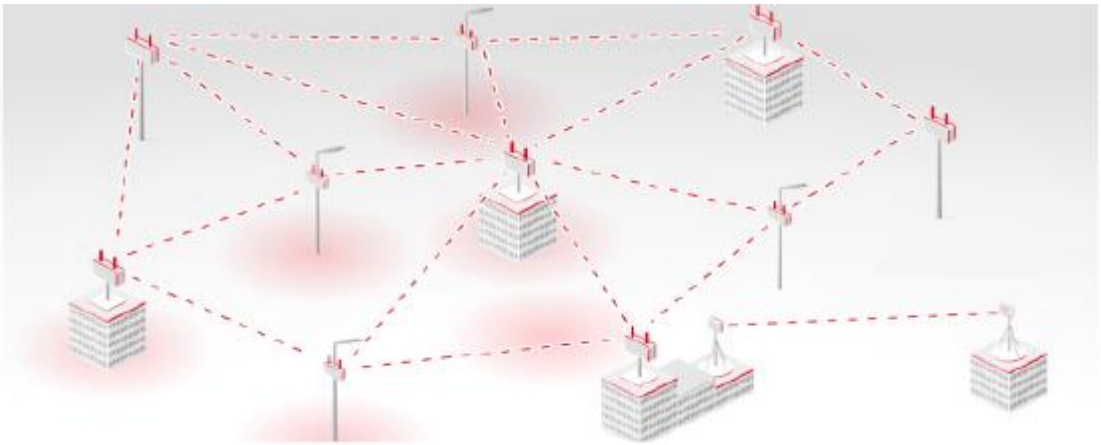
Μια άλλη περίπτωση χρήσης που απαιτεί χαμηλό latency είναι η πληροφόρηση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Αυτή λαμβάνει υπόψη τη συνδεσιμότητα που απαιτείται σε οποιοδήποτε μέρος και ανά πάσα στιγμή από το χρήστη που βρίσκεται σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Επίσης εξετάζει την κυκλοφορία μεταξύ των τελικών χρηστών καθώς και την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών τόσο μεταξύ τους όσο και με το περιβάλλον τους. Η ιδιαίτερη πρόκληση έγκειται στο γεγονός ότι οι χρήστες αναμένουν την ίδια ποιότητα της εμπειρίας στο χώρο εργασίας τους και σε δημόσιους χώρους, όπως Εμπορικά Κέντρα, Πανεπιστήμια, Νοσοκομεία και Αεροδρόμια.

Περαιτέρω, μια ιδιαίτερη πτυχή που προκύπτει σε αστικά περιβάλλοντα είναι ότι οι χρήστες τείνουν να συγκεντρώνονται σε «δυναμικά πλήθη» (π.χ. άνθρωποι περιμένουν στα φανάρια ή σε μια στάση λεωφορείου), γεγονός που οδηγεί σε ένα ξαφνικό peak στην τοπική ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Παρόμοιες περιπτώσεις θα μπορούσαν επίσης να προκύψουν σε εσωτερικούς χώρους με ένα παρορμητικό πλήθος. Η εσωτερική κάλυψη και η ικανότητα είναι συχνά ένα μεγάλο θέμα, λόγω της υψηλής απώλειας διείσδυσης από την εξωτερικό προσέγγιση. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται η ανάπτυξη εσωτερικών ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση χρήσης, διαφορετικές τοποθεσίες και τύποι κατασκευής όπως κτίρια, δρόμοι, πάρκινγκ, στάσεις λεωφορείων κ.λ.π. θα θεωρηθούν ότι βρίσκονται σε αστική περιοχή. Έτσι, ένα σενάριο ανάπτυξης ρεαλιστικού δικτύου θα περιλαμβάνει C-RAN, εικονική RAN, VRAN, micro-cells, pico-cells and femtocells κ.λ.π. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικά μέσα Backhaul/Fronthaul (ενσύρματα και ασύρματα) συμπεριλαμβανομένου οπτικών ινών, χαλκού, μWave, mmWave, κ.λ.π. Στην Εικόνα 29 περιγράφεται ένα παράδειγμα μια πυκνής κοινωνίας αστικών πληροφοριών με Backhaul/Fronthaul.



Εικόνα 29. Περίπτωση χρήσης της διανομής των μέσων ενημέρωσης [πηγή 29]

Η Εικόνα 30 απεικονίζει ένα σενάριο πυκνής αστικής ανάπτυξης όπου τα micro cells και τα macro cells συνδέονται για να σχηματίσουν ένα δικτυωτό Backhaul/Fronthaul δίκτυο από διάφορες ενσύρματες και ασύρματες συνδέσεις και συντονίζονται για την παροχή καλύτερων υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες και ευκολία της επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών και άλλων έξυπνων συσκευών. Για παράδειγμα, σε μια αστική περιοχή, ορισμένες συσκευές μπορεί να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον περιβάλλοντα χώρο των χρηστών με τη μέτρηση ενός συγκεκριμένου φαινομένου ή με την παροχή πληροφοριών σχετικά με την παρουσία ορισμένων αντικειμένων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως η κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 30. Περίπτωση πυκνής αστικής χρήσης σε μια κοινωνία [πηγή 29]

Με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από τις γύρω συσκευές και άλλες πηγές, ο εξοπλισμός χρήστη (UE) θα μπορούσε να παρέχει στο χρήστη συναφείς πληροφορίες με τέτοιο τρόπο ώστε να τους βοηθήσει να κατανοήσουν καλύτερα και να απολαύσουν το περιβάλλον τους. Ακόμη περισσότερο, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να φορτωθούν στο διακομιστή του υπολογιστικού νέφους και να διαμοιραστούν με άλλους χρήστες μέσα από το σύννεφο, όπου μια αυστηρή απαίτηση χαμηλής καθυστέρησης για συνδεσιμότητα θα είναι εξίσου σημαντική με τον υψηλό ρυθμό δεδομένων.

Ο στόχος είναι η διευκόλυνση της τοπικής ανάπτυξης C-RAN τεχνολογίας μέσω διαφορετικών ενσύρματων/ασύρματων μέσων και το σχεδιασμό επεκτάσιμων αλγορίθμων διαχείρισης πόρων για τη βελτίωση της KPIs για τη φιλοξενία 1.000 φορών υψηλότερου κινητού όγκου δεδομένων ανά περιοχή και τη σύνδεση 10-100 φορές υψηλότερου αριθμού κινητών συσκευών χρηστών και την επίτευξη 10-100 φορές υψηλότερου ρυθμού δεδομένων των χρηστών, καθώς και 5 φορές μικρότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.

Κεφάλαιο 5 – Προτεινόμενες Αρχιτεκτονικές 5G δικτύων

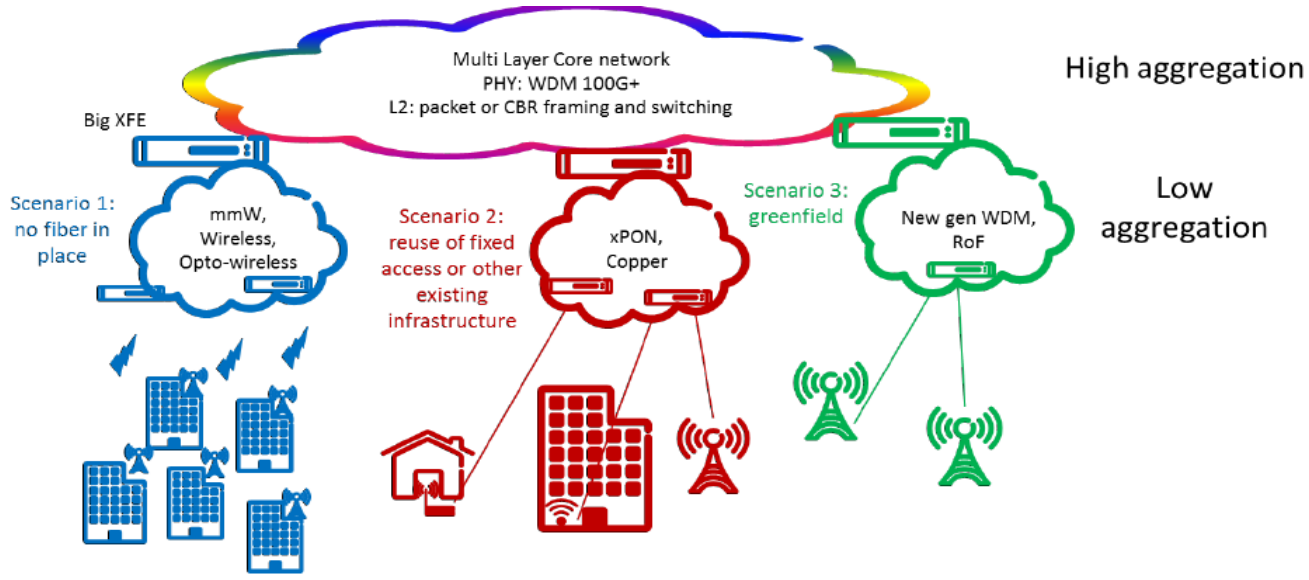
5.1 Πρώτη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Fronthaul και Backhaul

5.1.1. 5G ασύρματα δίκτυα

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια ποιοτική επισκόπηση των διαφόρων υποψήφιων τεχνολογιών που πληρούν τις ανάγκες μεταφοράς των δικτύων 5G. Η ποικιλία των απαιτήσεων και των σεναρίων ανάπτυξης καθιστά αδύνατη μια προσέγγιση που θα παραδώσει όλα τα backhaul, midhaul και fronthaul σε όλα τα δίκτυα, Ως εκ τούτου, απαιτείται ο συνδυασμός των διαφόρων τεχνολογιών για τη σύσταση του δικτύου μεταφορών 5G.

Οι τεχνολογίες αυτές κατατάσσονται σε τρεις ομάδες. Αρχικά σε ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες αναμένεται να παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και γρήγορη 5G Crosshaul ανάπτυξη. Δεύτερον, το 5G Crosshaul εξερευνά τις δυνατότητες της επαναχρησιμοποίησης της τρέχουσας εγκατεστημένης βάσης των υποδομών ινών και χαλκού στο δίκτυο πρόσβασης. Τέλος, επανεξετάζονται μεγάλης χωρητικότητας οπτικές τεχνολογίες για τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας (aggregation) από την άκρη έως τον πυρήνα του δικτύου.

Για κάθε τεχνολογία παρέχεται μια συζήτηση για τις συγκεκριμένες παραμέτρους με σκοπό να εκτιμηθεί η καταλληλότητα τους για την ανάπτυξη του project 5G – Crosshaul αλλά και παρόμοιων. Αυτές οι παράμετροι είναι η πυκνότητα του δικτύου, η ενεργειακή απόδοση, η απόσταση επιτεύξιμης σύνδεσης και ο προϋπολογισμός, ο συγχρονισμός και η καθυστέρηση, οι εκτιμήσεις κόστους, και διάφορες λειτουργικές πτυχές (π.χ. αξιοπιστία, αντιμετώπιση προβλημάτων, αυτόματη αναδιάρθρωση) καθώς και θέματα ανάπτυξης. Η Εικόνα 31 που ακολουθεί, παρουσιάζει τον τεχνολογικό χάρτη στο 5G – Crosshaul δίκτυο, αναγνωρίζοντας τρία τεχνολογικά σενάρια.



Εικόνα 31. Τρία τεχνολογικά σενάρια στο δίκτυο 5G - Crosshaul [πηγή 30]

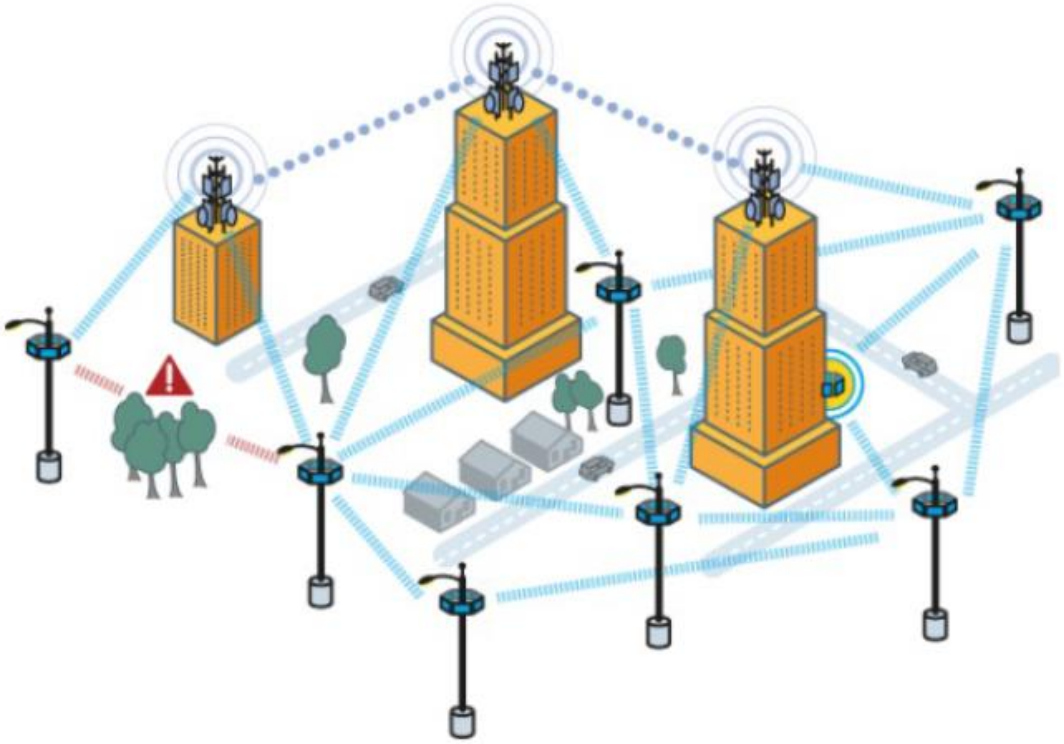
Αναφορικά με τις τεχνολογίες για 5G – Crosshaul ασύρματα δίκτυα, ο ρόλος των ασύρματων λύσεων είναι να καλύψουν εκείνες τις περιπτώσεις όπου οι ενσύρματες τεχνολογίες δεν μπορούν να αναπτυχθούν ή η ανάπτυξή τους είναι πάρα πολύ ακριβή. Οι συνδέσεις σταθερού σημείο-προς-σημείο ασύρματου backhaul και fronthaul με χρήση του φάσματος μέχρι τις ζώνες συχνοτήτων millimetre-wave[69], έχουν χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της τρέχουσας γενιάς (4G/3G/2G) της κινητής τηλεφωνίας δίκτυα υψηλής χωρητικότητας. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι απαιτήσεις για 5G αυξάνονται, οι ασύρματες backhaul και fronthaul τεχνολογίες αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις: μια αύξηση της δυναμικότητας κατά 1000 φορές, η πύκνωση των small cells και μια σημαντική μείωση της επιτρεπόμενης καθυστέρησης μέχρι 1 ms από άκρο σε άκρο για ορισμένα σενάρια.

Οι συχνότητες κάτω από τα 50 GHz είναι ήδη πολύ κατακερματισμένες με συνέπεια η σημερινή τάση στη βιομηχανία είναι να επικεντρωθεί στις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, 50 έως 90 GHz, όπου υπάρχουν μεγάλες αχρησιμοποίητες συνεχείς ζώνες. Κατά μήκος αυτής της γραμμής, το ίδρυμα *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* έχει πρόσφατα εγκαθιδρύσει μια ομάδα προδιαγραφών με έμφαση στην μετάδοση mmWave στο V-band (57-66 GHz) και E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz) [31], κατάλληλο για πυκνή ανάπτυξη των backhaul και fronthaul δικτύων.

Από την άλλη πλευρά, με μια δωρεάν άδεια ελεύθερου φάσματος και ασυλία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (OWC - Optical Wireless Communications) έχουν προσελκύσει πρόσφατα μεγάλο ενδιαφέρον. Δεδομένου ότι οι αποστάσεις σύνδεσης στα backhaul/fronthaul δίκτυα θα είναι μικρότερες, αυξάνεται η πιθανότητα του οπτικού πεδίου (LOS - Line-of-Sight) και η κακή ορατότητα θεωρείται ακίνδυνη. Ο όρος OWC περιλαμβάνει επικοινωνίες ελεύθερου χώρου οπτικής (FSO - Free Space Optics), όπου χρησιμοποιούνται laser πομποί για οικοδόμηση οπτικών ασύρματων συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας καθώς και η νέα τεχνολογία (VLC - Visible Light Communications) που χρησιμοποιεί συστήματα εξοπλισμένα με χαμηλού κόστους LED υψηλής ισχύος για την εσωτερική επικοινωνία.

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για small cells είναι ένα backhaul που χρησιμοποιεί ηλεκτρικά κατευθυνόμενες κεραίες για μετάδοση point-to-multipoint σε ένα φάσμα mmWave που - όπως προαναφέρθηκε- ορίζεται στη ζώνη συχνοτήτων 30 - 300 GHz. Ωστόσο, στη συνέχεια, επικεντρωνόμαστε στις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 50 - 90 GHz που είναι ευθυγραμμισμένες με το ίδρυμα ETSI. Η Εικόνα 32 παρουσιάζει στη συνέχεια το backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave.

[69] Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μεταξύ 30 – 300 GHz ονομάζονται έτσι τα ραδιοκύματα με μήκη κύματος από 19 έως 1 χιλιοστό.



Εικόνα 32. Backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave [πηγή 30]

Το επιτεύξιμο peak του ρυθμού δεδομένων κορυφή ενός συνδέσμου mmWave εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλεγμένη συχνότητα. Για παράδειγμα, στη ζώνη E-ζώνη πολλά εμπορικά προϊόντα είναι ικανά να πετύχουν ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων της τάξης 1-1.25 Gbit / s. Στη V-ζώνη, τα ποσοστά αυτά κυμαίνονται από 450 Mbit/s σε 1 Gbit/s, ενώ στο project 5G-Crosshaul φτάνει έως 4 Gbit/s ανά κόμβο [32].

Η πυκνότητα του δικτύου εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των κυψελών (ονομάζεται αλλιώς και ακτίνα κυψελών) και την τοπολογία. Σε γενικές γραμμές, σε μια ανάπτυξη πλέγματος με μια τυπική απόσταση μεταξύ των κυψελών περίπου 150 μέτρα, η χωρητικότητα της περιοχής κυκλοφορίας μπορεί να είναι της τάξης των μερικών δεκάδων Gbit/s/km^2, η οποία δίνει μια πυκνότητα χρηστών της τάξης των μερικών χιλιάδων ανά km^2 .

Η απόσταση μεταξύ των συνδέσμων του mmWave εξαρτάται επίσης από τη ζώνη συχνοτήτων. Στη ζώνη E-band οι αποστάσεις κυμαίνονται από εκατοντάδες μέτρων έως και πολλά χιλιόμετρα. Στη ζώνη V-band οι αποστάσεις αυτές είναι πολύ μικρότερες και κυμαίνονται από 50 m έως 1000 m. Οι αποστάσεις των συνδέσμων που κυμαίνονται από 50 m έως 600 m εξαρτώνται από την τεχνολογία της κεραίας.

Οι οπτικές ασύρματες συνδέσεις επιτρέπουν τη σύνδεση σε διαφορετικές αποστάσεις που κυμαίνονται από τη ζώνη ultra - short (που χρησιμοποιείται για διασυνδέσεις εντός του ολοκληρωμένου) έως τη ζώνη ultra - long (που χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ

δορυφόρων). Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των συνδέσμων, τόσο λιγότερο απαραίτητη είναι μια αποκλίνουσα δέσμη φωτός προκειμένου να διατηρηθεί η ισχύς έναντι στην ατμοσφαιρική εξασθένιση και να επιτευχθεί επαρκής πυκνότητα ισχύος στην πλευρά του δέκτη. Με τον έλεγχο της οπτικής δέσμης, οι οπτικές ασύρματες συνδέσεις που βασίζονται σε LED είναι εφικτές έως και αρκετές εκατοντάδες μέτρα, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις (πάνω από 200 μέτρα) απαιτούνται συνδέσεις με lazer.

5.1.2. 5G δίκτυα σταθερής πρόσβασης

Στο πλαίσιο του 5G-Crosshaul, η επικάλυψη των συνδέσμων backhaul και fronthaul πάνω από Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs - Passive Optical Networks) ενός – προς - πολλά σημεία (point-to-multipoint) και μπορεί να προσφέρει ένα οικονομικά αποδοτικό τρόπο για την πραγματοποίηση μια σταθερής - κινητής υποδομής οπτικού δικτύου πρόσβασης. Επί του παρόντος, υπάρχουν αρκετές υποψήφιες τεχνολογίες, όπως GPON, XG-PON, XGS-PON, NG PON2. Ωστόσο, οι τεχνολογίες PON εξελίσσονται και αναμένεται ότι η επόμενη γενιά των παθητικών δικτύων PON πρόκειται να βασίζεται σε πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM - Wavelength Division Multiplexing)[70].

Η τεχνολογία GPON χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή για οικιακή πρόσβαση και προσφέρει μια συνολική χωρητικότητα της τάξης των 2.5/1.25 Gbit/s για συνδέσεις downstream/upstream αντίστοιχα που μοιράζεται μεταξύ διαφορετικών χρηστών, συνήθως 32/64. Αυτά τα στοιχεία παραγωγικής ικανότητας δεν είναι επαρκή για συνδέσεις fronthaul με βάση την κοινή δημόσια ασύρματη διεπαφή (CPRI - Common Public Radio Interface). Πάντως, το GPON θα μπορούσε να θεωρηθεί ως κατάλληλη τεχνολογία για την επόμενη γενιά fronthaul διεπαφών π.χ. του 5G - Crosshaul σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές και ιδιαίτερα για συγκεκριμένες περιπτώσεις, στις οποίες απαιτούνται χαμηλές τιμές fronthaul κάτω του 1 Gb/s. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι η ικανότητα των διαφόρων μεθόδων εκχώρησης εύρους ζώνης (σταθερή, εξασφαλισμένη και μη εξασφαλισμένη) του επιπέδου MAC[71] των τεχνολογιών PON που βασίζονται στην πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM - Time Division Multiplexing[72]). Ωστόσο, αυτό είναι δύσκολο λόγω της αναμενόμενης καθυστέρησης για αυτούς τους fronthaul συνδέσμους που μπορεί να υποδηλώνουν

[70] Στην επικοινωνία οπτικών ινών, η πολυπλεξία διαίρεσης του μήκους κύματος (WDM) είναι μια τεχνολογία που πολυπλέκει μια σειρά οπτικών σημάτων σε μία μόνο οπτική ίνα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος (δηλαδή, χρώματα) φωτός λέιζερ. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας καθώς και τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας.

[71] Υπο-επίπεδο του δεύτερου επιπέδου (DLL - Data Link Layer) του μοντέλου OSI. Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων προς/από την κάρτα διεπαφής δικτύου και προς/από οποιοδήποτε απομακρυσμένα διαμοιραζόμενο κανάλι.

[72] Μέθοδος μετάδοσης και λήψης ανεξάρτητων πάνω από μια κοινή διαδρομή σήματος με τη βοήθεια συγχρονισμένων διακοπτών σε κάθε άκρο της γραμμής μετάδοσης, έτσι ώστε κάθε σήμα να εμφανίζει πάνω στη γραμμή μόνο ένα κλάσμα του χρόνου.

επίσης την ανάγκη για χαμηλότερους λόγους διάσπασης στην ανάπτυξη οπτικών ινών. Αυτό δεν είναι πολύ εφικτό για τις επιχειρήσεις που έχουν ήδη αναπτύξει την τεχνολογία GPON.

Η τεχνολογία XG-PON προσφέρει 2.5 Gbit/s για upstream και 10 Gbit/s για downstream. Σε αυτή την περίπτωση χρήσης η χωρητικότητα των 2.5G για upstream καθιστά το XG-PON μια πιο κατάλληλη τεχνολογία για την επόμενη γενιά fronthaul διασυνδέσεων του 5G-Crosshaul από το GPON. Ωστόσο, η πρόσφατη έγκριση για ένα νέο συμμετρικό πρότυπο 10G PON (XGS-PON) θα περιορίσει τις απαιτήσεις για τα συστήματα XG-PON. Συνοψίζοντας, οι τεχνολογίες GPON και XGPON δεν αποδείχτηκαν να είναι μακροπρόθεσμα κατάλληλες επιλογές για το δίκτυο 5G-Crosshaul, κυρίως λόγω της σχετικά περιορισμένης χωρητικότητάς τους.

Μια πιο κατάλληλη τεχνολογία για την επόμενη γενιά fronthaul διασύνδεσης των 5G-Crosshaul από την άποψη της χωρητικότητας είναι το NG-PON2. Η τυπική NG-PON2 διαμόρφωση τεχνολογίας περιλαμβάνει 4-8 ζεύγη καναλιών χρησιμοποιώντας πολυπλεξία τόσο στο χρόνο όσο και στο μήκος κύματος (TWDM – Time and Wavelength Division Multiplexing)[73]. Ανά ζεύγος καναλιών οι ρυθμοί bit για TWDM είναι 10 Gbit/s για downstream και 10 Gbit/s για upstream, 10 Gbit/s για downstream και 2.5 Gbit/s για upstream ή 2.5 Gbit/s για downstream και 2.5 Gbit/s για upstream, αντίστοιχα. Για να ολοκληρώσουμε την αξιολόγηση των τεχνολογιών PON, αξίζει να αναφέρουμε μια σειρά σημαντικών λειτουργικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών συντήρησης για τους σκοπούς του 5G-Crosshaul, και συγκεκριμένα:

- Μηχανισμοί για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, συμπεριλαμβανομένης της κρυπτογράφησης και της υβριδικής αποκωδικοποίησης διόρθωσης σφάλματος καθώς και προς τα εμπρός μηχανισμοί διόρθωσης σφάλματος (FEC - Forward Error Correction[74]) που υλοποιούνται με ισχυρούς κώδικες Reed-Solomon[75].
- Ασφάλεια Δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών για τον έλεγχο ταυτότητας, τη διαχείριση κλειδιών και την κρυπτογράφηση δεδομένων.
- Παρακολούθηση των επιδόσεων και συνεχή επίβλεψη των παραμέτρων του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου διασύνδεσης για τη διευκόλυνση της αντιμετώπισης προβλημάτων και τη συντήρηση των δικτύων PON.

[73] Η τεχνολογία TWDM-PON είναι το επόμενο βήμα για τα δίκτυα πρόσβασης οπτικών ινών. Αυτή η νέα τεχνολογία προσφέρει την ευκαιρία της εξέλιξης πέραν της GPON και της επίτευξης μεγαλύτερης ταχύτητας, ποικιλίας των υπηρεσιών και αποδοτικότητας του κόστους.

[74] Τεχνική που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο λαθών στη μετάδοση δεδομένων μέσω αναξιόπιστων ή θορυβωδών καναλιών επικοινωνίας. Η κεντρική ιδέα είναι ο αποστολέας να κωδικοποιεί το μήνυμα με τη χρήση ενός κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων (ECC).

[75] Αποτελούν μια ομάδα κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων που εισήχθησαν από τους Irving και Gustave με πολλές εφαρμογές. Οι πιο σημαντικές από αυτές περιλαμβάνουν τεχνολογίες ευρείας κατανάλωσης, όπως CDs, DVDs, Blu-ray Discs, QR Codes, τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων, όπως DSL και WiMAX, συστήματα μετάδοσης, όπως DVB και ATSC καθώς και συστήματα αποθήκευσης, όπως RAID 6. Χρησιμοποιούνται επίσης στη δορυφορική επικοινωνία.

Η τεχνολογία WDM-PON θα είναι η καλύτερη επιλογή με κριτήριο την καθυστέρηση σε σύγκριση με την τεχνολογία TDM και TWDM για σκοπούς του fronthaul στο 5G – Crosshaul. Ωστόσο, η τρέχουσα εμπορική τεχνολογία WDM-PON προσφέρει μόνο συμμετρικές συνδέσεις της τάξης του 1 Gbit/s στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω των περιορισμών των συνιστωσών. Είναι όμως δυνατόν να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί bit, χρησιμοποιώντας ένα ρυθμιζόμενο laser κατανεμημένης ανάδρασης (DFB - distributed feedback[76]) αντί για ανακλαστικά οπτικά εξαρτήματα. Υπό αυτό το πρίσμα, το ρυθμιζόμενο WDM-PON έχει προσελκύσει πρόσφατα την προσοχή των πωλητών και των επενδυτών [33] για την ανάπτυξη της ρυθμιζόμενης υψηλής χωρητικότητας WDM-PON συστημάτων επόμενης γενιάς, τα οποία είναι πολύ κατάλληλα για το 5G-Crosshaul.

5.1.3. 5G οπτικά δίκτυα

Αφήνοντας τα παραδοσιακά δίκτυα και προχωρώντας προς την πράσινη ανάπτυξη, τα οπτικά δίκτυα γίνονται όλο και πιο ελκυστικά, λόγω της συνολικής τους χωρητικότητας, της υψηλής απόστασης μεταξύ των συνδέσμων και της χαμηλής καθυστέρησης. Παθητικές λύσεις που βασίζονται στην τεχνολογία CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)[77] είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την οικονομικά αποδοτική εγκατάσταση σε εξωτερικούς χώρους με μέτρια συνολική χωρητικότητα. Η τεχνολογία DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)[78] παρέχει αντ' αυτού μια μελλοντική πλατφόρμα για την επέκταση της χωρητικότητας προς το συγκεντρωτισμό. Οι δύο τεχνολογίες παρατίθενται στη συνέχεια.

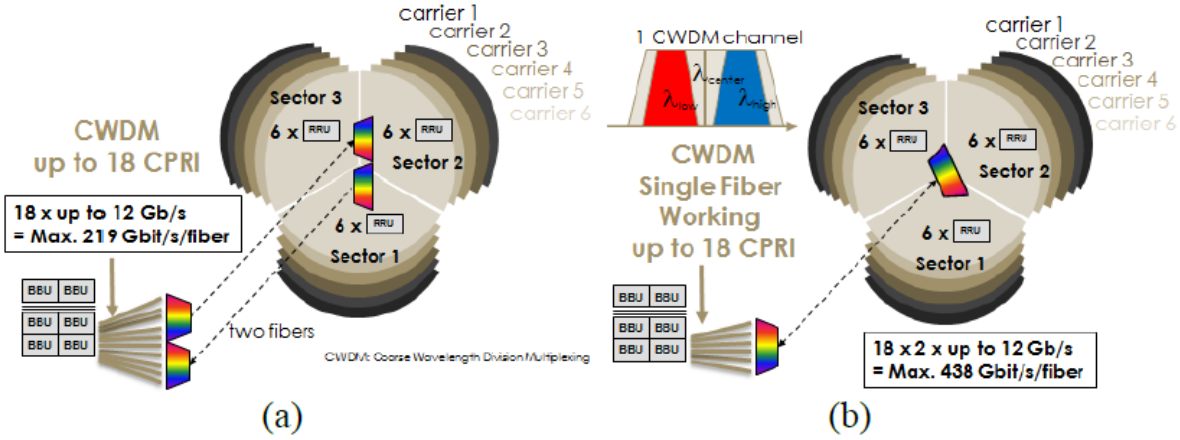
Η παθητική WDM αποτελείται από μια προσέγγιση πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας του μήκους κύματος και μπορεί να είναι τόσο CWDM όσο και DWDM, αναφορικά με τον αριθμό των μηκών κύματος που χρησιμοποιούνται και την απόσταση μεταξύ τους. Η τεχνολογία CWDM αποτελεί μια καλή επιλογή για εγκαταστάσεις με χαμηλή ή μέτρια συνολική χωρητικότητα καθώς είναι απλή στην εγκατάσταση και ιδιαίτερα αξιόπιστη. Από τη στιγμή που οι πομποδέκτες της τεχνολογίας αυτής σε συνεργασία με την CPRI Επιλογή 9 (12.16512 Gbit/s) είναι όλο και πιο κοινή στις μέρες μας, η συνολική χωρητικότητα της σύνδεσης μπορεί να ανέλθει περίπου στα 219 Gbit/s ανά ίνα με 18 CWDM κανάλια. Θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι οι κανονικές συσκευές CWDM

[76] Είδος διόδου λέιζερ ή λέιζερ οπτικής ίνας όπου η ενεργός περιοχή της συσκευής είναι περιοδικά δομημένη ως ένα φράγμα περίθλασης.

[77] Οπτική τεχνολογία πολυπλεξίας μήκους κύματος για πρόσβαση σε δίκτυα πόλεων. Η μετάδοση γίνεται με τη χρήση 16 καναλιών με μήκος κύματος μεταξύ 1270 nm και 1610 nm. Λόγω της απόστασης των καναλιών που είναι της τάξης των 20 nm, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οικονομικό laser.

[78] Οπτική τεχνολογία πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η χωρητικότητα των υφιστάμενων δικτύων οπτικών ινών. Λειτουργεί με το συνδυασμό και τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα σε διαφορετικά μήκη κύματος για την ίδια ίνα.

χρειάζονται δύο ίνες, μία για upstream και μια για downstream, όπως φαίνεται στην Εικόνα 33a. Η μετάδοση σε μια ενιαία ίνα χρησιμοποιώντας αμφίδρομους πομποδέκτες είναι επίσης δυνατή και βοηθά την απλοποίηση της λειτουργίας, αποφεύγοντας λανθασμένους τρόπους σύνδεσης. Οι πρόσφατες λύσεις οπτικών ινών βασίζονται σε μήκος κύματος που προκύπτει από υπο-πολυπλεξία πάνω από το πλέγμα CWDM, η οποία συνίσταται στη διαίρεση του πλάτους της υποδοχής του CWDM (+/- 6.5nm) σε δύο υπο-κανάλια, ένα για κάθε κατεύθυνση. Έτσι, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης bit ανά ίνα μπορεί να διπλασιαστεί [34] και να φτάσει έως και 438 Gbit/s (Εικόνα 33b)..



Εικόνα 33. Τεχνολογία 5G - Crosshaul κεντρικού δικτύου με (a) CWDM δύο οπτικών ινών και (b) CWDM μιας οπτικής ίνας [πηγή 30]

Η CWDM είναι η φθηνότερη τεχνολογία WDM και για τις δύο παθητικές συσκευές του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη και των πομποδεκτών. Η δυνατότητα *πληρωμής με την ανάπτυξη* ("pay as you grow") αποτελεί ένα άλλο πλεονέκτημα για τον πομποδέκτη, κάτι που σημαίνει ότι μόνο ο αριθμός των παθητικών θυρών του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη πρέπει να προγραμματιστεί εκ των προτέρων. Ένα βασικό πλεονέκτημα της CWDM είναι ότι αποτελεί μία από τις λίγες λύσεις συμβατές με συνθήκες εξωτερικού χώρου λειτουργίας (-40 / + 70 ° C) για ρυθμούς μετάδοσης έως 10 Gbit/s.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα πτυχή αποτελεί το γεγονός ότι οι παθητικές συσκευές CWDM μπορούν να είναι plug & play τόσο στον τρέχοντα όσο και στο μελλοντικό RAN εξοπλισμό, και επίσης να είναι συμβατές με Ethernet διασυνδέσεις. Ωστόσο, η καθαρά παθητική οπτική μεταφορά δεν παρέχει διαχείριση οπτικών ινών και καναλιών και στερείται βασικών λειτουργιών Διαχείρισης και Συντήρησης (OAM - Operations Administration and Maintenance), όπως είναι η παρακολούθηση και η απομακρυσμένη διαμόρφωση και διαχείριση σφαλμάτων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σχεδόν όλες οι παθητικές λύσεις έχουν προταθεί με οπτικούς αναμεταδότες που θα είναι σε θέση να διαχειριστούν και να αναφέρουν την κατάσταση του μήκους κύματος του κάθε ζεύγους καναλιού και της υποδομής οπτικών ινών.

Αναφορικά με την τεχνολογία DWDM, ο αριθμός των οπτικών καναλιών για εμπορικά συστήματα DWDM λειτουργεί πάνω από το CBand (1530-1565 nm) είναι 48, με 100 GHz απόσταση. Αυτό οδηγεί σε τεράστια συνολική χωρητικότητα πάνω από μία μόνο οπτική ίνα, που μπορεί να φτάσει σε 960 Gbit/s με κανάλια 100 Gbit/s σε απόσταση 50 GHz. Περαιτέρω αύξηση θα είναι δυνατή με την εισαγωγή καναλιών 1 Tbit/s [35]. Στην ακραία περίπτωση μετάδοσης της τάξης των Tbit/s τόσο μέσω της ζώνης συχνοτήτων C[79] όσο και της L[80], η συνολική χωρητικότητα μπορεί να φτάσει σε 67.2 Tbit/s σε μια ενιαία οπτική ίνα. Η υψηλή συνολική χωρητικότητα καθιστά την DWDM ιδιαίτερα κατάλληλη για την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών και πυκνοκατοικημένων περιοχών που πρέπει να υποστηρίξει το 5G.

Αποτελεί κοινή αντίληψη και ταυτόχρονα πεποίθηση το γεγονός ότι το κόστος αποτελεί το κύριο μειονέκτημα της τεχνολογίας DWDM. Οι προσπάθειες για να μειωθεί το κόστος των πομποδεκτών είναι σε εξέλιξη, με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών όπως αποδοτικές μορφές διαμόρφωσης [36], ρυθμιζόμενα laser χαμηλού κόστους [37] και νέες λύσεις για επαναδιαμορφώσιμους add-drop πολυπλέκτες (ROADMs - Reconfigurable Add-Drop Multiplexers[81]) που υπόσχονται να μειώσουν το κόστος κατά δύο τάξεις μεγέθους. Το υψηλότερο κόστος της τεχνολογίας DWDM οπτικών συσκευών αντισταθμίζεται ούτως ή άλλως από την ευκαιρία που προσφέρει για την αποθήκευση του κόστους του εξοπλισμού συνολικά. Όσον αφορά τις λειτουργικές πτυχές, η ικανότητα να υποστηρίζει πολλαπλές φυσικές τοπολογίες όπως linear, ring, point-to-multipoint κ.λ.π. χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία και κρατώντας μια λογική συνδεσιμότητα σημείο-προς-σημείο, αποτελεί είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας DWDM. Μια τέτοια ευελιξία αυξάνεται με τη διαθεσιμότητα των αναδιαρθρώσιμων συσκευών όπως το ρυθμιζόμενο laser και οι επαναδιαμορφώσιμοι add-drop πολυπλέκτες, που προσφέρουν επίσης την ευκαιρία να μειώσουν το κόστος του εξοπλισμού.

5.2 Δεύτερη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Συνδυασμός NFV και SDN

5.2.1. Αρχιτεκτονική NFV

Η εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (NFV) έχει ως στόχο την υλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου στο λογισμικό και διευκολύνει το μεγάλο όγκο κυκλοφορίας των τυπικών

[79] Όνομα που δίνεται σε ορισμένα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των μηκών κύματος των μικροκυμάτων που χρησιμοποιούνται για ασύρματες τηλεπικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Η IEEE C-band (4 έως 8 GHz) και μικρές παραλλαγές της περιέχουν περιοχές συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από πολλές μεταδόσεις δορυφορικών επικοινωνιών και από ορισμένες Wi-Fi συσκευές, ασύρματα τηλέφωνα και συστήματα ραντάρ καιρού.

[80] Η συγκεκριμένη μπάντα συχνοτήτων που ορίζεται από το IEEE, είναι το εύρος από 1 έως 2 GHz του ραδιοφάσματος.

[81] Μορφή οπτικού add-drop πολυπλέκτη (συνδυάζει διαφορετικές πολλαπλές ροές δεδομένων χαμηλότερου εύρους ζώνης σε μια ενιαία δέσμη φωτός) που προσθέτει τη δυνατότητα της απομακρυσμένης αλλαγής της κυκλοφορίας στο δίκτυο από ένα σύστημα πολυπλεξίας μήκους διαίρεσης κύματος (WDM) στο επίπεδο μήκος κύματος.

διακομιστών ενός δικτύου. Αποτελεί μια δικτυακή αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί την τεχνολογία της εικονικοποίησης της Τεχνολογίας της Πληροφορίας (IT) προκειμένου να εικονικοποιήσει ολόκληρες κατηγορίες των λειτουργιών κόμβου του δικτύου σε δομικά στοιχεία που μπορούν να συνδεθούν ή να λειτουργήσουν σε αλυσίδα για να δημιουργήσουν υπηρεσίες επικοινωνιών. Η τεχνολογία NFV βασίζεται, αλλά ταυτόχρονα διαφέρει από παραδοσιακές τεχνικές οπτικοποίησης του διακομιστή (server-virtualization) και μπορεί να αποτελείται από μια ή περισσότερες εικονικές μηχανές που εκτελούν διαφορετικό λογισμικό και διεργασίες πάνω σε τυπικούς διακομιστές υψηλής χωρητικότητας ή ακόμη και σε υποδομές υπολογιστικού νέφους, αντί να διαθέτουν προσαρμοζόμες συσκευές υλικού για κάθε λειτουργία του δικτύου.

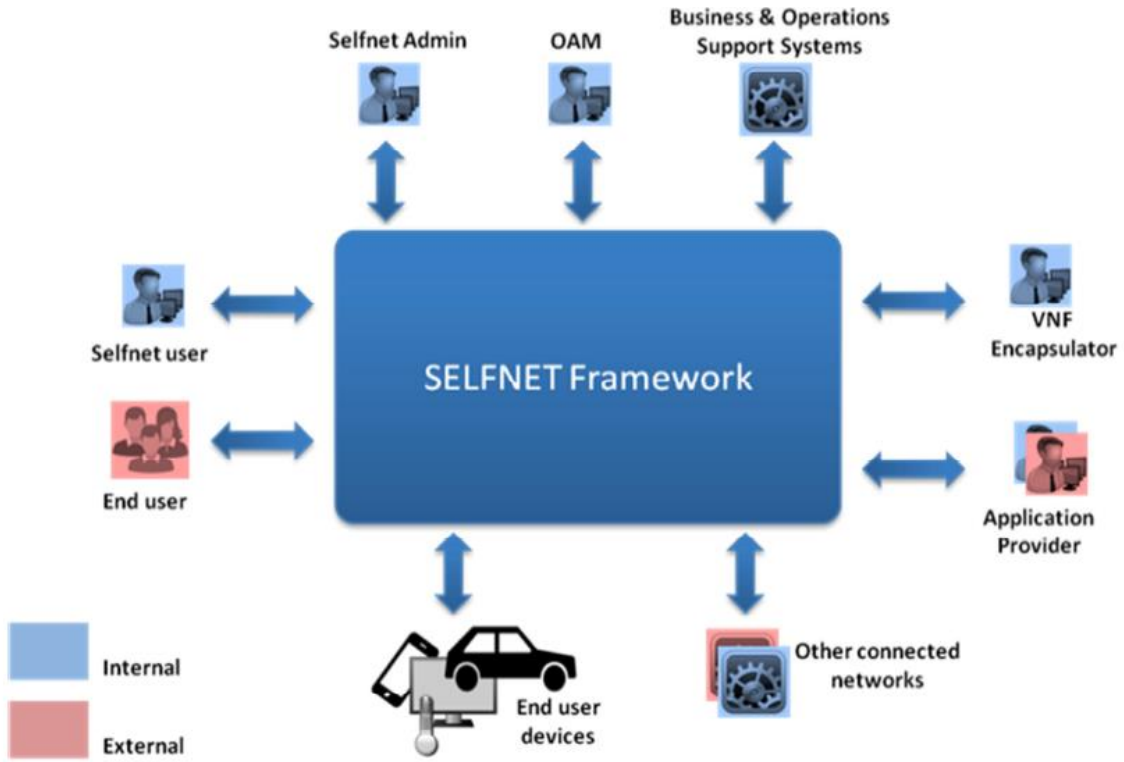
Οι εξελίξεις στις φορητές τεχνολογίες οδηγούν σε ένα ευρύ φάσμα νέων υπηρεσιών που απαιτούν μια νέα γενιά αποτελεσματικών μηχανισμών διαχείρισης δικτύου και αρχιτεκτονικών που θα είναι σε θέση να τις υποστηρίξουν. Επί του παρόντος, μιλώντας για χρηματοδοτικούς όρους, το κόστος για τους διαχειριστές φορητών επικοινωνιών το κόστος των λειτουργικών δαπανών (OPEX) είναι τριπλάσιο από αυτό των κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX). Κατά κύριο λόγο η ανισότητα αυτή είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της πολυπλοκότητα του συστήματος που χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση νέων, πιο γρήγορων προϊόντων δεδομένων, τεχνολογικών αναβαθμίσεων και λειτουργιών εξυπηρέτησης πελατών.

Στο πλαίσιο αυτό, το project SELFNET H2020 θα σχεδιάσει και θα εφαρμόσει ένα αυτόνομο πλαίσιο της διαχείρισης του δικτύου για να παρέχει έτσι δίκτυα που διαθέτουν ικανότητες αυτοοργάνωσης (SON - Self-Organizing Network)[82] σε νέες υποδομές δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G. Με την αυτόματη ανίχνευση και την άμβλυνση μιας σειράς κοινών προβλημάτων του δικτύου, που επί του παρόντος αντιμετωπίζονται από τους διαχειριστές του δικτύου, το project Selfnet θα παρέχει ένα πλαίσιο που θα μπορεί να μειώσει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, με ταυτόχρονη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

Με τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών (SDN, NFV, SON, AI, Cloud Computing κ.λ.π.), το Selfnet θα παρέχει ένα επεκτάσιμο και έξυπνο σύστημα διαχείρισης του δικτύου και το πλαίσιο λειτουργίας του θα βοηθήσει τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να εκτελούν τα βασικά καθήκοντα διαχείρισης όπως αυτόματη εγκατάσταση των εφαρμογών SDN/NFV, εφαρμογές που θα παρέχουν αυτοματοποιημένη παρακολούθηση, αυτόνομη συντήρηση δικτύου και προληπτικές ενέργειες για το μετριασμό των υφιστάμενων ή πιθανών νέων προβλημάτων του δικτύου.

[82] Είναι μια τεχνολογία αυτοματισμού που έχει σχεδιαστεί για να κάνουν το σχεδιασμό, τη διαμόρφωση, τη διαχείριση, τη βελτιστοποίηση και την αποκατάσταση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας απλούστερη και ταχύτερη.

Ως σύστημα, το πλαίσιο του project Selfnet περιλαμβάνει το (εικονικό) δίκτυο. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να εκπροσωπούνται όλοι οι φορείς που αλληλεπιδρούν με το δίκτυο, αλλά για λόγους απλότητας, σε αυτή την προσέγγιση επεξηγούνται μόνο εκείνοι που θεωρούνται σημαντικοί για την αυτό-οργάνωση του δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34 που ακολουθεί. Οι φορείς παρουσιάζονται ως εξωτερικοί ή εσωτερικοί ανάλογα με το αν είναι εντός ή εκτός από το επιχειρησιακό πεδίο εφαρμογής του πλαισίου λειτουργίας του project SELFNET.



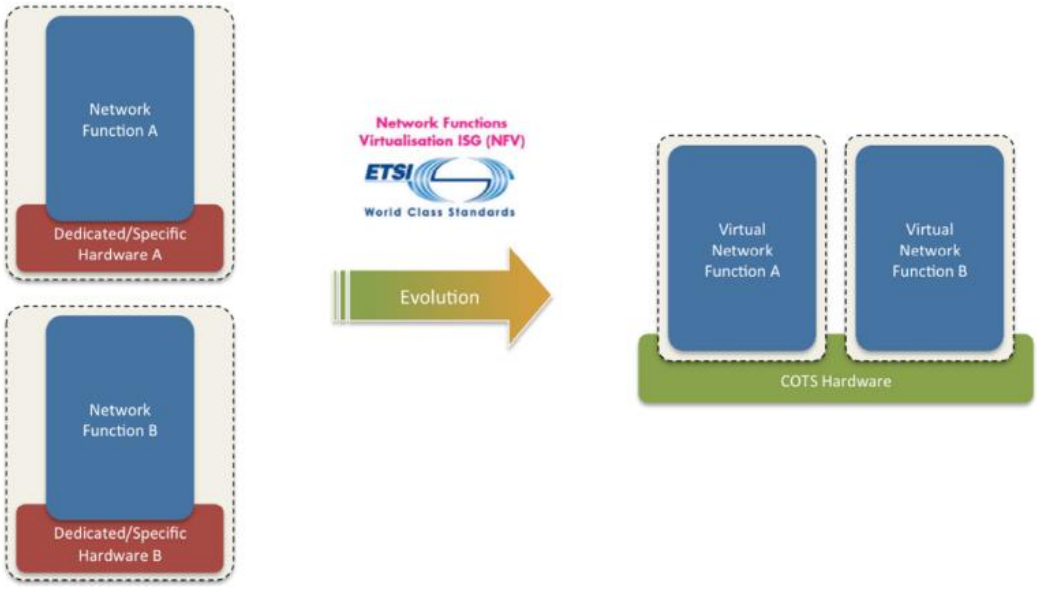
Εικόνα 34. SELFNET περιεχόμενο συστήματος [πηγή 38]

Ένας Πάροχος της εφαρμογής (Application Provider)[83] που παρέχει λειτουργίες εικονικού δικτύου (VNFs) για να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο των αυτονόμων διαδικασιών μπορεί να θεωρηθεί **εσωτερικός** αν οι λειτουργίες VNFs παράγονται εσωτερικά ή αντίστοιχα **εξωτερικός** αν οι λειτουργίες αποκτώνται στην αγορά. Ένας χρήστης του Selfnet (Selfnet user) θεωρείται εσωτερικός φορέας, διότι επιτρέπεται να έχει πρόσβαση σε εσωτερική πληροφόρηση σχετικά με την κατάσταση του πλαισίου λειτουργίας και να λαμβάνει δεδομένα απόδοσης. Αντίθετα ένας τελικός χρήστης (End user) συσκευής θεωρείται εξωτερικός φορέας, όπως εξωτερικοί φορείς θεωρούνται επίσης άλλα διασυνδεδεμένα δίκτυα. Τα συστήματα υποστήριξης επιχειρήσεων και λειτουργιών θεωρούνται εσωτερικοί φορείς διότι σχετίζονται με το πλαίσιο λειτουργίας του Selfnet στο πεδίο εφαρμογής των διαφόρων διαδικασιών της επιχείρησης.

[83] Επιχείρηση παροχής υπηρεσιών πληροφορικής που βασίζονται στους πελάτες μέσω ενός δικτύου, όπως η πρόσβαση σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή λογισμικού χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο πρωτόκολλο (όπως το HTTP).

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία της αρχιτεκτονικής ETSI NFV είναι η τοποθέτηση στο υπολογιστικό νέφος (cloudification) των λειτουργιών του δικτύου (NFs – Network Functions). Για το λόγο αυτό, η λειτουργία του δικτύου πρέπει να υλοποιηθεί ξεχωριστά από ένα εξειδικευμένο υλικό και να είναι σε θέση να τρέξει πάνω από COTS υλικό. Όπως αναφέρθηκε τα προϊόντα COTS [40] σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν και να διαλειτουργήσουν με τις υπάρχουσες συνιστώσες συστήματος. Σχεδόν όλο το λογισμικό που αγοράζεται από ένα μέσο χρήστη Η/Υ ταιριάζει στην κατηγορία COTS, όπως για παράδειγμα λειτουργικά συστήματα, λογισμικό εφαρμογών γραφείου, επεξεργαστές κειμένου και προγράμματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου κ.λ.π. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του λογισμικού COTS, το οποίο έχει μαζική παραγωγή, είναι το σχετικά χαμηλό κόστος του. Με τον όρο *COTS Hardware* αναφέρεται το υλικό στο οποίο εκτελείται λογισμικό COTS.

Τυπικά παραδείγματα VNFs αποτελούν οι κοινοί δρομολογητές ή τα τείχη προστασίας, αλλά μπορούν επίσης να είναι τόσο κινητά ή σταθερά στοιχεία, όπως P-GWS, eNBs ή OLTs. Η Εικόνα 35 απεικονίζει τη βασική ιδέα της NFV αρχιτεκτονικής.

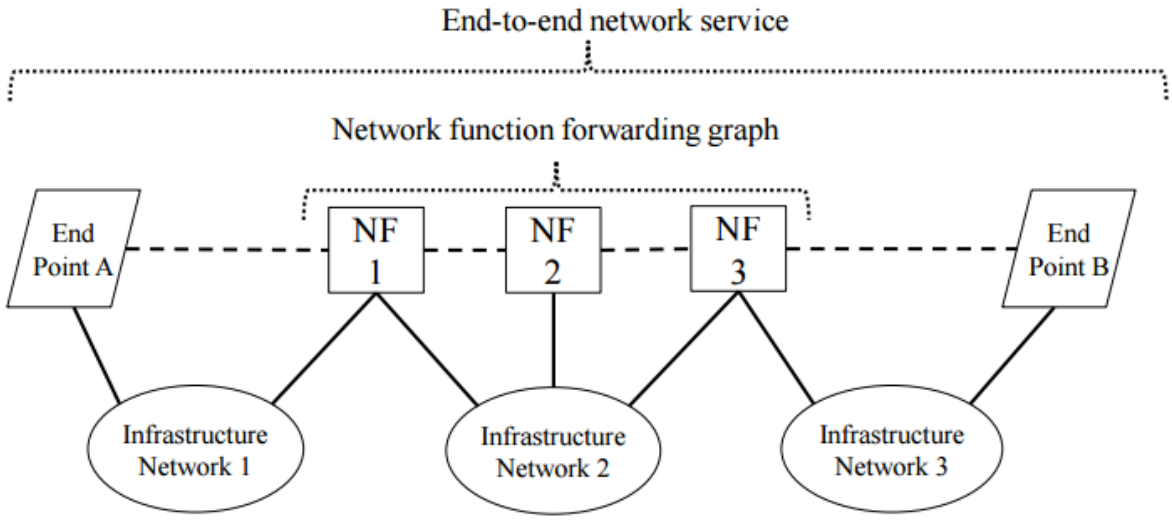


Εικόνα 35. Η βασική ιδέα του NFV [πηγή 38]

Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι το προκύπτον VNF διαθέτει τα ίδια χαρακτηριστικά, με αυτά που διαθέτουν οι λειτουργίες του φυσικού δικτύου (PNFs - Physical Network Functions). Ωστόσο, η δεδομένη αξιοποίηση και η ενίσχυση της χρήσης του υπολογιστικού νέφους (cloudification) μπορεί να οδηγήσει τους προμηθευτές να αναμορφώσουν τις προσφορές τους, προκειμένου να μπορούν να φιλοξενηθούν στο περιβάλλον του cloud οι λειτουργίες του φυσικού δικτύου. Με αυτό τον τρόπο, πολλαπλές PNFs μπορούν να συμπτυχθούν σε ένα ενιαίο VNF, ένας PNF μπορεί να διαχωριστεί σε πολλαπλές VNFs ή οποιοδήποτε άλλος N:M συνδυασμός. Αυτές οι

αλλαγές μπορούν να αποφασιστούν προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση των πόρων ή της διαχείριση της λειτουργίας.

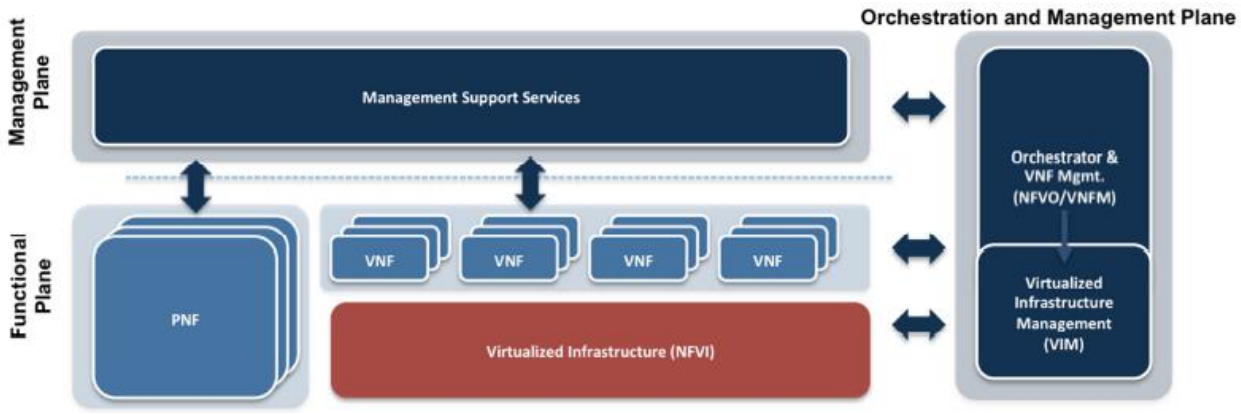
Η ενίσχυση της χρήσης του υπολογιστικού νέφους μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με τη χρήση της διαχείρισης και την εκμετάλλευση (ενορχήστρωση) του περιβάλλοντος. Σε μια τέτοια περίπτωση, η πλατφόρμα διαχειρίζεται ολόκληρο τον κύκλο ζωής των VNFs, πραγματοποιώντας όχι μόνο την ανάπτυξη αλλά και τη διαχείριση των εργασιών εκτέλεσης, με κλιμάκωση των εσωτερικών/εξωτερικών VNFs, ανάλογα με το φορτίο λειτουργίας, πραγματοποιώντας με τον τρόπο αυτό μια πιο αποδοτική χρήση των πόρων. Μια τέτοια πλατφόρμα είναι επίσης σε θέση να εκμεταλλευτεί συνδυασμούς VNFs σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο γράφο προώθησης (FG - Forwarding Graph)[84], με σκοπό τη δημιουργία πολύπλοκων υπηρεσιών δικτύου. Η Εικόνα 36 που ακολουθεί, περιγράφει ένα γράφο προώθησης (διαβίβασης) ενός δικτύου, ο οποίος συνδέει ένα τελικό σημείο του δικτύου (End Point A) με ένα άλλο (End Point B) μέσω διαφόρων υποδομών δικτύου (Infrastructure Network 1, 2, 3), οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους με λειτουργίες δικτύου (NF 1, 2, 3).



Εικόνα 36. Γράφος προώθησης (διαβίβασης) FG ενός δικτύου [πηγή 41]

Η Εικόνα 37 στη συνέχεια, απεικονίζει μια απλοποιημένη μορφή της πλήρους αρχιτεκτονικής ETSI NFV.

[84] Μια δικτυακή υπηρεσία από άκρο σε άκρο μπορεί να οριστεί ως ένας γράφος προώθησης των λειτουργιών του δικτύου και των τελικών σημείων/τερματικών.



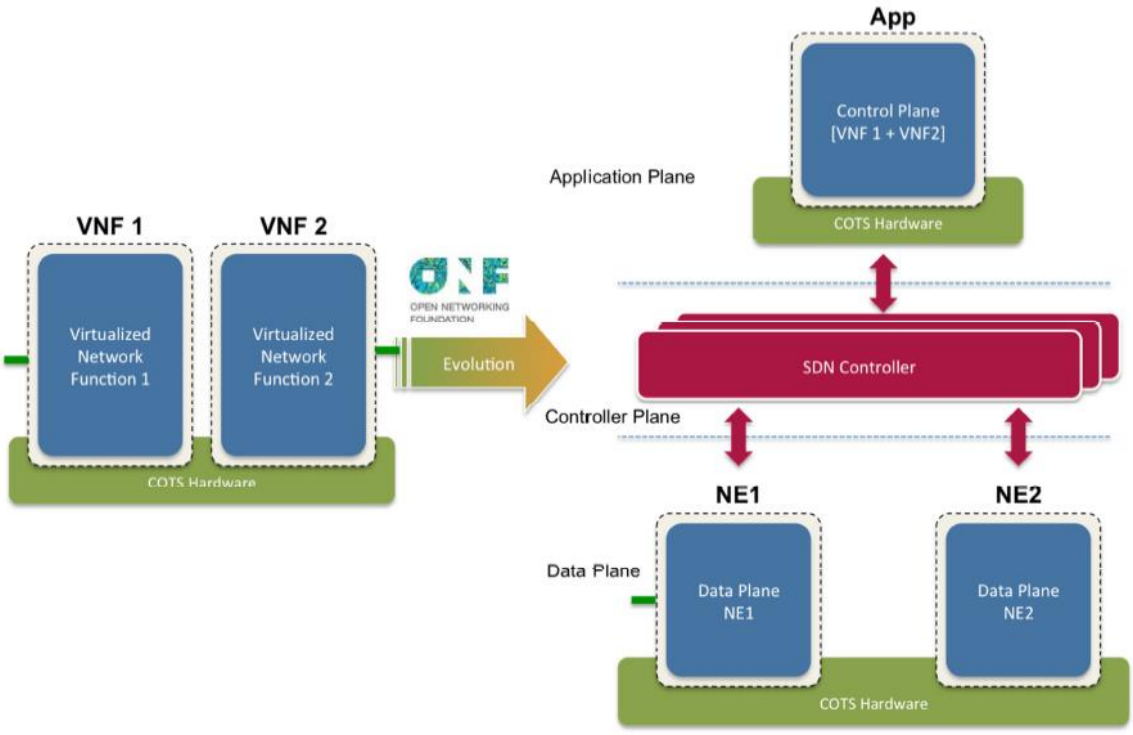
Εικόνα 37. Πλήρης Αρχιτεκτονική ETSI NFV [πηγή 38]

Στην αριστερή πλευρά της ανωτέρω εικόνας περιγράφονται οι εργασίες εκτέλεσης και ελέγχου, ενώ η δεξιά πλευρά δείχνει τη διαχείριση και την ενορχήστρωση. Το κάτω αριστερά τμήμα της παρουσιάζει την εικονική υποδομή, η οποία περιλαμβάνει τους πόρους του υλικού (COTS), το στρώμα virtualization, (π.χ. KVM, VMware hypervisors) και τους εικονικούς πόρους (π.χ. Virtual Machines - VMs, Virtual LANs - VLANs). Τα VNFs μπορεί να εκτελεστεί πάνω από μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές (VMs) και να χρησιμοποιήσει τους πόρους του δικτύου. Στην επάνω αριστερή γωνία της Εικόνας, οι Υπηρεσίες Υποστήριξης Διοίκησης που αποτελούνται από Συστήματα Υποστήριξης Λειτουργιών/Συστήματα Υποστήριξης Επιχειρήσεων (Operational Support Systems - OSSs/Business Support Systems - BSSs) αλληλεπιδρούν με τη Διοίκηση και την Ενορχήστρωση (δεξιά) και με τα VNFs. Στο κάτω δεξιά μέρος, η διαχείριση εικονικής υποδομής (Virtual Infrastructure Management - VIM) (π.χ. Open Stack) αλληλεπιδρά με το NFVI (hypervisor) για τη διαχείριση των πόρων. Στο επάνω δεξιά μέρος της Εικόνας, οι μονάδες Διαχείρισης και Ενορχήστρωσης διαχειρίζονται τον πλήρη κύκλο ζωής των VNFs και εκμεταλλεύονται τις υπηρεσίες δικτύου (Network Services – NSs).

5.2.2. Αρχιτεκτονική SDN

Η αρχιτεκτονική SDN σκοπεύει να κάνει το δίκτυο απλούστερο, πιο ευέλικτο και πιο προγραμματιζόμενο. Για το σκοπό αυτό διαιρεί τις λειτουργίες του δικτύου σε τρία μέρη: το *επίπεδο δεδομένων χρήστη (user-data plane)*, το *επίπεδο του ελεγκτή (user-data plane)* και το *επίπεδο ελέγχου (control plane)*. Πιο συγκεκριμένα, το *επίπεδο δεδομένων χρήστη* (ή επίπεδο δεδομένων – Data Plane) αποτελείται από απλή ανταλλαγή στοιχείων δικτύου (Network Elements - NEs) που είναι υπεύθυνα για την προώθηση της κυκλοφορίας του χρήστη σύμφωνα με τις βασικές εντολές που έλαβε από τη διεπαφή. Το *επίπεδο ελεγκτή* αποτελείται από SDN ελεγκτές, οι οποίοι παρέχουν τις βασικές εντολές στα δεδομένα χρήστη και από υψηλού επιπέδου διεπαφές προγραμμάτων που αποτελούν εφαρμογές (APIs) στο επίπεδο ελέγχου.

Η Εικόνα 38 απεικονίζει την έννοια της SDN δικτύωσης και γίνεται η υπόθεση ότι το αρχικό σημείο δεν αποτελεί μια παραδοσιακή δικτυακή λειτουργία (NF – Network Function) που να βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο υλικό, αλλά μια εικονικοποιημένη δικτυακή λειτουργία (VNF), όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Συνολικά, η διαδικασία προώθησης στοιχείων δικτύου ελέγχεται πλήρως από τις εφαρμογές, οι οποίες χρησιμοποιούν τα API υψηλού επιπέδου που παρέχουν οι ελεγκτές SDN. Οι ελεγκτές SDN αλληλεπιδρούν με τα NEs μέσω API χαμηλού επιπέδου, χρησιμοποιώντας περιβάλλον γραμμής εντολών (CLI - Command Line Interface) ή πρωτόκολλα όπως Netconf [42] ή το πιο πρόσφατο OpenFlow [43]. Οι ελεγκτές SDN παρέχουν μια διεπαφή η οποία αποσπά τον προγραμματιστή από τις λεπτομέρειες του δικτύου και καθιστά απλούστερη τη δημιουργία του δικτύου υπηρεσίας. Αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του μοντέλου SDN.

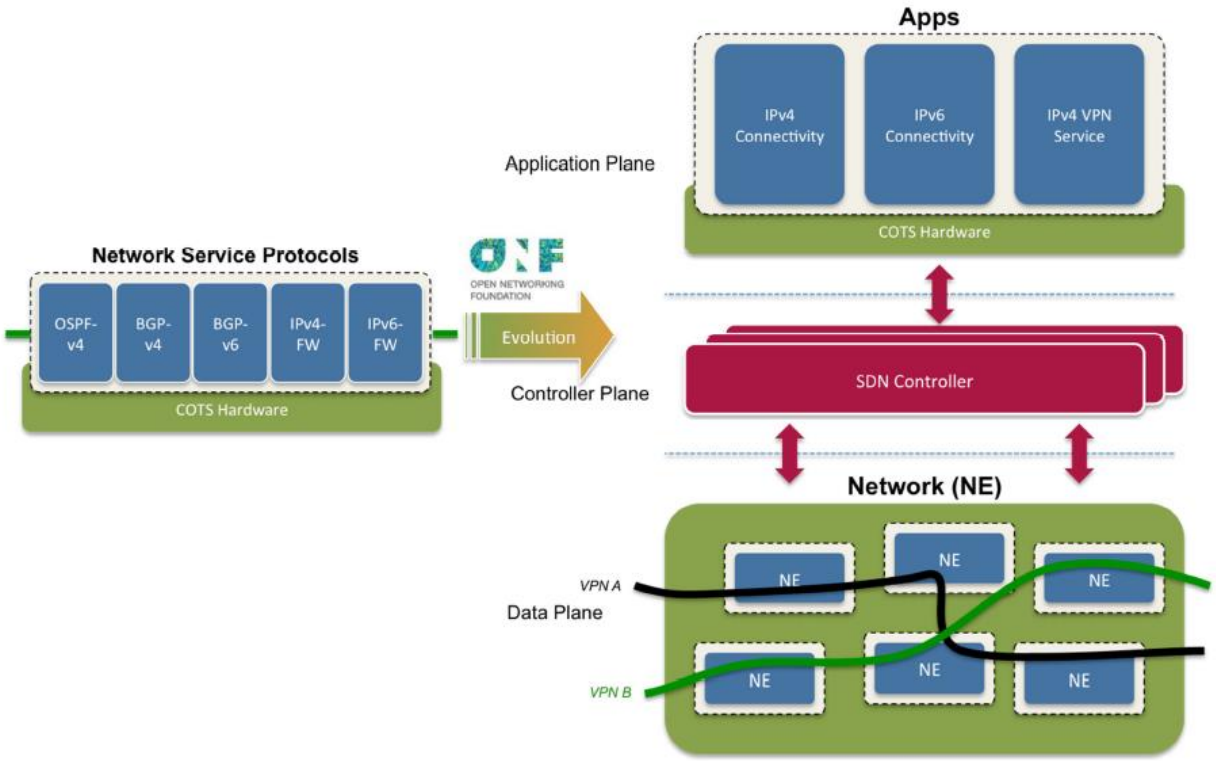


Εικόνα 38. SDN δικτύωση [πηγή 38]

Η Εικόνα 39 παρουσιάζει την εξέλιξη από ένα παραδοσιακό κόσμο προς μια SDN προσέγγιση. Μερικές φορές ο μετασχηματισμός δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί σε αναλογία 1:1. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μια VNF αρχιτεκτονική μπορεί να μην κινείται άμεσα προς το πρότυπο SDN, από τη διάσπαση της σε τρία μέρη. Στην πραγματικότητα, μια απλή VNF μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλές εφαρμογές ή/και πολλαπλά στοιχεία δικτύου (N:N). Αυτό διευκρινίζεται με το παράδειγμα που ακολουθεί στη συνέχεια:

Ένα αρχικό σενάριο (που περιγράφεται στην Εικόνα 39) είναι μια συλλογή από εικονικοποιημένους διακομιστές όπου κάθε ένας από αυτούς υποστηρίζει τόσο τα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6,

που αποτελούν μια παλιότερη και μια πιο πρόσφατη αναθεώρηση του πρωτοκόλλου IP, όσο και παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως OSPF, BGPv4 και BGPv6. Στην κορυφή αυτού του σεναρίου, δηλαδή στο επίπεδο εφαρμογών (application plane), οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να ρυθμίσουν τους δρομολογητές και να οικοδομήσουν υπηρεσίες όπως η IPv4 συνδεσιμότητα (IPv4 Connectivity), η IPv6 συνδεσιμότητα (IPv6 Connectivity) καθώς και επιχειρησιακά εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (IPv4 VPN Service). Προχωρώντας προς το παράδειγμα SDN, αποσυνδέονται τα επίπεδα ελέγχου και προώθησης. Στο κάτω μέρος, τα στοιχεία δικτύου αναπτύσσονται μόνο με δυνατότητες προώθησης που εφαρμόζονται σύμφωνα με τις πολιτικές που προβλέπονται από το επίπεδο του ελεγκτή (Controller Plane). Η λογική ελέγχου υλοποιείται στην κορυφή, π.χ. με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης OSPF, BGP. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχει μια N: N απεικόνιση μεταξύ του επιπέδου ελέγχου (SDN Apps) και του επιπέδου των δεδομένων – χρήστη (Data Plane) που εκφράζεται με τα στοιχεία δικτύου (NEs), δηλαδή με πολλαπλές εφαρμογές που υλοποιούν διαφορετικές υπηρεσίες πάνω σε ένα κοινό σύνολο από NEs που μπορεί να είναι εικονικοί διακόπτες λογισμικού.



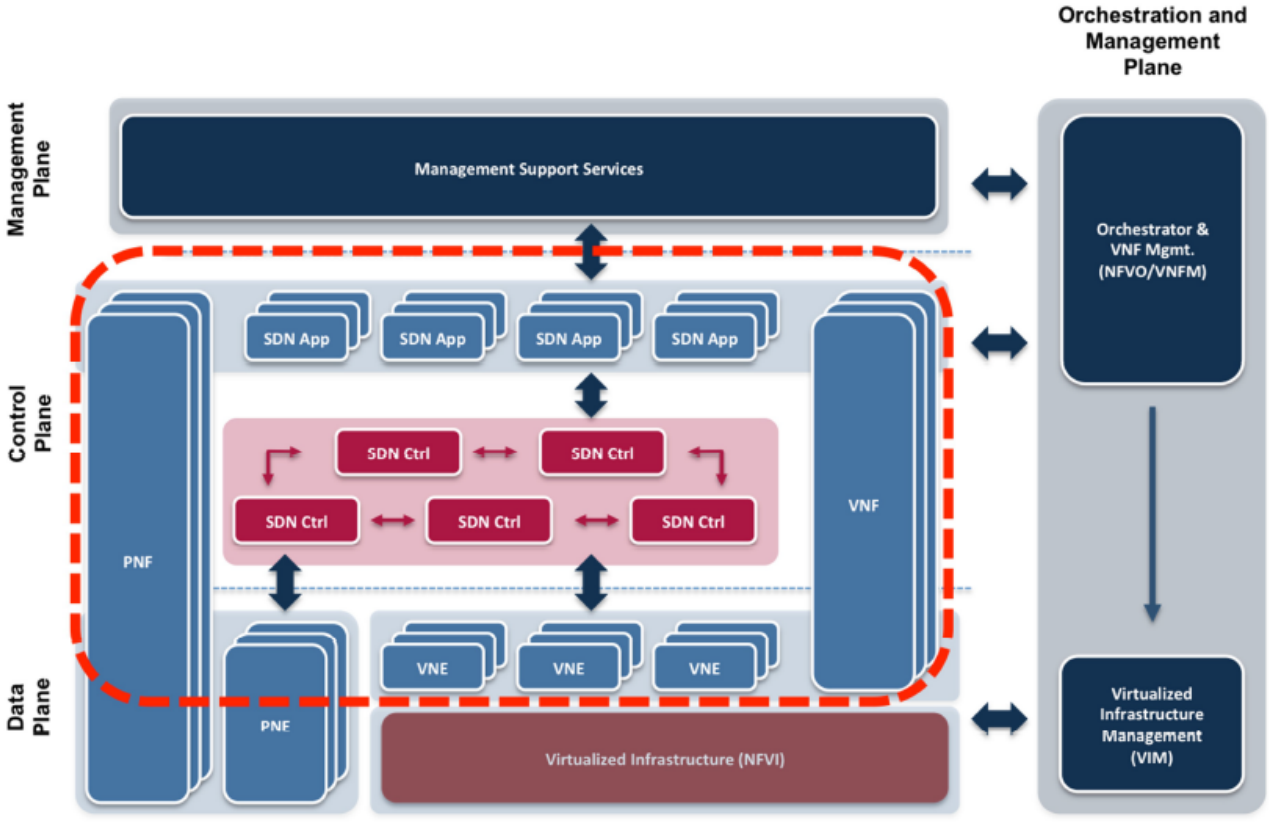
Εικόνα 39. SDN δικτύωση. Παράδειγμα δικτύου μεταφοράς [πηγή 38]

5.2.3. Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV

Παρά το γεγονός ότι οι αρχιτεκτονικές NFV και SDN έχουν προκύψει από διαφορετικές οπτικές γωνίες τυποποίησης, αποτελούν **συμπληρωματικές** τεχνολογίες και για το λόγο αυτό

αναφέρονται πολλές φορές ως NFV/SDN. Παρά το γεγονός ότι διαχωρίζονται, ο συνδυασμός τους δημιουργεί επιπλέον αξία. Η τεχνολογία NFV μεταφέρει την πιθανότητα της δημιουργίας νέων λειτουργιών του δικτύου κατ' απαίτηση, τις οποίες τοποθετεί στην πιο κατάλληλη θέση και χρησιμοποιεί την πλέον κατάλληλη ποσότητα από πόρους. Ωστόσο, αυτό απαιτεί την αρχιτεκτονική SDN να είναι σε θέση να ρυθμίσει αναλόγως το δίκτυο, ενεργοποιώντας την (επανα)διαμόρφωση και τον (επανα)προσδιορισμό της αλληλουχίας των λειτουργιών.

Καθώς οι αρχιτεκτονικές NFV και SDN προέρχονται από διαφορετικές τυπικές αναπτύξεις (SDOs - Standard Developing Organizations), καμία από αυτές δεν έχει συνδυάσει και τις δύο αρχιτεκτονικές σε μια ενιαία. Για το λόγο αυτό, η συγκεκριμένη ενότητα έχει ως στόχο την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των αρχιτεκτονικών NFV και της SDN για το SELFNET, λαμβάνοντας ως αρχικό σημείο την ETSI NFV αρχιτεκτονική -όπως αυτή περιγράφηκε νωρίτερα στην Εικόνα 37- και στη συνέχεια ενσωματώνοντας σε αυτή την αρχιτεκτονική της SDN -όπως αυτή περιγράφηκε νωρίτερα στην Εικόνα 38-. Η Εικόνα 40 παρουσιάζει το συνδυασμό των δύο αρχιτεκτονικών.



Εικόνα 40. Συνδυασμός αρχιτεκτονικών NFV και SDN [πηγή 38]

Η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική είναι συμβατή με αυτή που ορίζεται από το ETSI NFV [39] και οι αλλαγές εισάγονται αναφορικά με τα επιπρόσθετα επίπεδα. Η ονομασία των συνιστωσών είναι ένα άλλο ζήτημα που χρειαζόταν να αποφασιστεί, αφού παρόμοια κουτιά έχουν διαφορετικά

ονόματα, ανάλογα με το αν τα κοιτάξει κανείς από την NFV ή SDN προοπτική. Προκειμένου να εξεταστούν κληροδοτημένα από πριν συστατικά (συνιστώσες) που δεν είναι NFV και SDN, διατηρήθηκαν οι φυσικές λειτουργίες δικτύου (NFs) στην πιο αριστερή πλευρά του διακεκομμένου κόκκινου τετραγώνου της αρχιτεκτονικής, κάτι που σημαίνει ότι κάναμε μπορεί να έχουν φυσικές λειτουργίες δικτύου (Physical Network Functions - PNF), οι οποίες δεν εφαρμόζονται στα μοντέλα NFV και SDN. Με τον ίδιο τρόπο, μπορεί κανείς να έχει εικονικά NFs (VNFs), αλλά χωρίς δυνατότητες SDN. Για αυτά διατηρείται η ονοματοδοσία ως εικονικοποιημένες λειτουργίες δικτύου (VNF), όπως φαίνεται στη δεξιότερη πλευρά του του διακεκομμένου κόκκινου τετραγώνου της αρχιτεκτονικής.

Στο μέσο της αρχιτεκτονικής, όλα τα συστατικά έχουν *SDN-επίγνωση*, ένας όρος που υποδηλώνει ότι χωρίζονται σε τρία επίπεδα. Στο κάτω επίπεδο (επίπεδο χρήστη-δεδομένων), μπορεί κανείς να έχει φυσικά ή εικονικά στοιχεία δικτύου (NEs) που χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως PNEs (Physical Network Elements) ή VNEs (Virtual Network Elements). Σε αυτή την περίπτωση τα ονόματα επιλέγονται από τον κόσμο του SDN, διότι περιγράφουν τους ρόλους που εκτελούν με μεγαλύτερη σαφήνεια.

Στο επίπεδο ελέγχου (control plane) υποτίθεται ότι το project SELFNET μπορεί να διαθέτει πολλαπλούς ελεγκτές (controllers) σε διαφορετικά επίπεδα, τους οποίους ονομάζει *SDN Controllers (SDN Ctrl).* Αυτοί περιέχονται μέσα στο ορθογώνιο με το κόκκινο φόντο της Εικόνας 39. Επίσης χρησιμοποιείται και η ονομασία *SDN Application (SDN App)* για τις εφαρμογές του συγκεκριμένου επιπέδου. Για την περίπτωση του συγκεκριμένου δεν διευκρινίζεται αν είναι εικονική ή όχι, δεδομένου ότι μπορεί να είναι και τα δύο, αν και πιστεύεται ότι αυτό το επίπεδο θα περιέχει κυρίως εικονικές εφαρμογές, θεωρώντας ότι μειώνεται η συγκεκριμένη χρησιμοποίηση του υλικού.

5.3 Τρίτη προτεινόμενη αρχιτεκτονική – Μικροκυματική ζώνη (mm – wave)

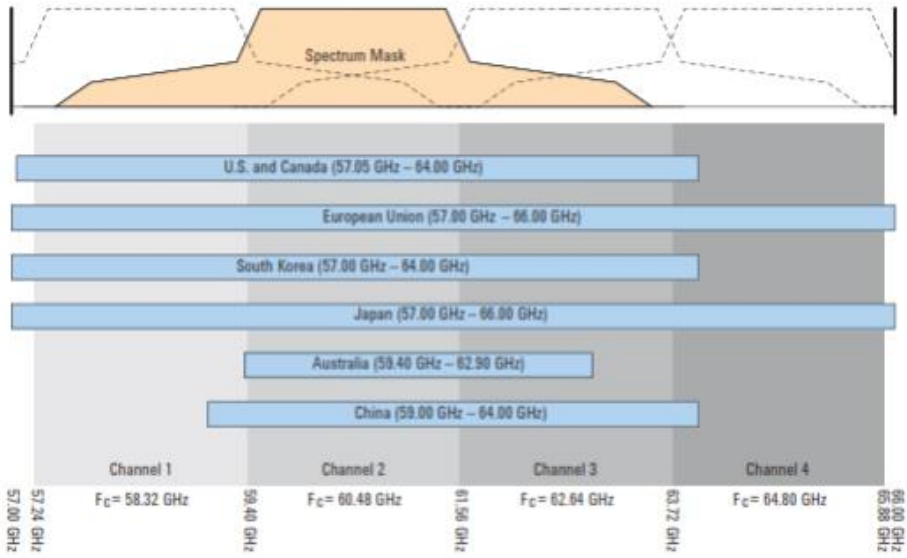
5.3.1. Mm-wave φυσικό επίπεδο

Μια από τις φασματικές περιοχές που έχουν προταθεί για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών στους χρήστες είναι αυτή που τα σήματα έχουν μήκος κύματος της τάξης του χιλιοστού ή όπως συνηθίζεται να αποκαλείται *mm-wave (millimetre - wavelength)* ζώνη. Παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης (πάνω από τα 30GHz) και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα συμφόρησης, όπως στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων. Από όλες τις mm-wave ζώνες πιο πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή γύρω από τα 60 GHz καθώς υπάρχει ελεύθερο ένα εύρος τιμών της τάξης των 3 GHZ (59-62 GHz) παγκοσμίως. Ωστόσο, εξαιτίας των υψηλών απωλειών διάδοσης και απωλειών διείσδυσης σε τοίχους, το μέγεθος της κυψέλης του συστήματος είναι πολύ μικρό.

Ένα WLAN πρωτόκολλο που θα λειτουργούσε σε αυτές τις συχνότητες, και θα μπορούσε να υιοθετήσει/εκμεταλλευτεί τις μεθόδους της τεχνολογίας RoF (Radio over Fiber) για αύξηση της χωρητικότητας και της κάλυψης ενός συστήματος είναι το IEEE 802.11ad.

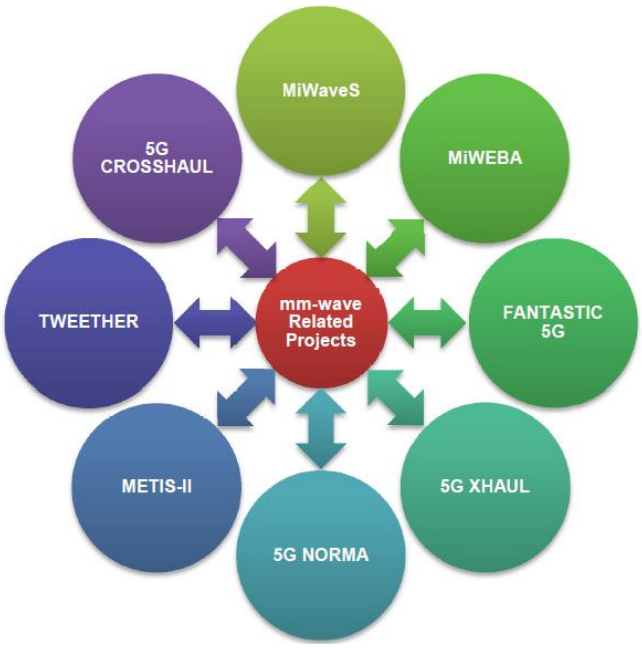
Στη συνέχεια παρατίθεται δίνεται μια σύντομη περιγραφή του mm-wave φυσικού επιπέδου, όπως αυτό ορίζεται στο IEEE 802.11ad πρωτόκολλο. Για την απλοποίηση της επεξήγησης της λειτουργίας του στο φυσικό επίπεδο, η IEEE εισήγαγε νέες ορολογίες για να προσδιορίσει το φυσικό επίπεδο των υψηλών ρυθμών μετάδοσης πρωτοκόλλων [46] που είναι οι εξής:

- *VHT (very high throughput):* κάθε φασματική περιοχή που ξεκινάει κάτω από τα 6 GHz, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η περιοχή γύρω από τα 2.4 GHz.
- *DMG (directional multi-gigabit):* αντιπροσωπεύει κάθε φασματική περιοχή που έχει ένα κανάλι, που ξεκινάει σε συχνότητα πάνω από τα 45 GHz. Χρησιμοποιώντας την νέα ορολογία, η παράγραφος του IEEE 802.11ad-2012 προσδιορίζει το DMG PHY (physical layer), που συνήθως υλοποιείται στα 60 GHz, ως την φασματική περιοχή 57-66GHz, και η οποία υπόκειται στους περιορισμούς της κάθε γεωγραφικής περιοχής, όπως αυτοί παρουσιάζονται στην Εικόνα 41.



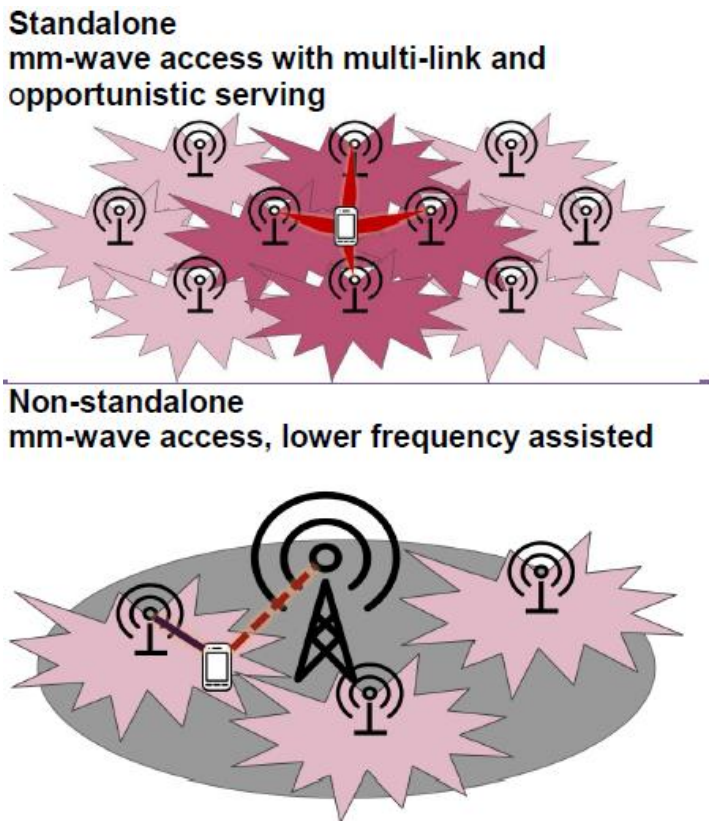
Εικόνα 41. Πλάνο ελεύθερων συχνοτήτων και ανάθεση συχνότητας ανά περιοχή [πηγή 45]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται οι ελεύθερες φασματικές περιοχές σε κάθε μία από τις περιοχές, καθώς και ο χωρισμός τον καναλιών όπως προτυποποιήθηκε από την ITU-R τον Νοέμβριο του 2011. Ακόμα η ITU-R όρισε το εύρος των καναλιών στα 2.16 GHz με κεντρικές συχνότητες τα 58.32 GHz, 60.48 GHz, 62.64 GHz και 64.80 GHz αντίστοιχα. Όπως φαίνεται λοιπόν δεν είναι ελεύθερα όλα τα κανάλια σε όλες τις περιοχές και συνεπώς ορίστηκε το Κανάλι 2 ως το βασικό για τον εξοπλισμό που δουλεύει σε αυτές τις συχνότητες [46]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναμένεται να χρησιμοποιηθεί ευρέως στο μελλοντικό σύστημα 5G και χρησιμοποιείται από αρκετά 5G – PPP projects (5G XHAUL, FANTASTIC 5G, METIS-II κ.λ.π.), όπως φαίνεται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42. Κατάλογος των σχετικών προγραμμάτων της ΕΕ που αφορούν την τεχνολογία mm-wave [πηγή 45]

Για τη μελέτη της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής θα χρησιμοποιηθούν δύο λειτουργικές εφαρμογές: αυτόνομη (standalone) και μη αυτόνομη (non-standalone), όπως φαίνεται στην Εικόνα 43.



Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και την επίλυση αναξιόπιστης (διακοπτόμενης) κάλυψης καθώς και θέματα φορητότητας.

Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την από κοινού ανάπτυξη των κόμβων mm-wave με κόμβους που λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες.

Εικόνα 43. Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mm-wave[πηγή 45]

Στο πρώτο σενάριο λειτουργίας, η τεχνολογία mm-wave ασύρματης πρόσβασης (mm-wave (RAT – Radio Access Technology), θα χρησιμοποιήσει μόνο τις mm-wave συχνότητες και την ανάπτυξη των σημείων προσπέλασης (APs - Access Points). Στο δεύτερο σενάριο (αυτόνομη ανάπτυξη) θα βελτιστοποιηθεί ο συντονισμός AP των σημείων προσπέλασης για τον περιορισμό της κάλυψης και των ζητημάτων της φορητότητας που σχετίζονται με τη διάδοση mm-κυμάτων.

5.3.2. Mm-wave Backhaul και Fronthaul

Με τη συνεχή εξέλιξη στην πύκνωση του δικτύου των small cells, πρέπει να αυξηθούν οι απαιτήσεις χωρητικότητας του backhaul (δηλαδή του οπισθοζευκτικού δικτύου που αφορά τη σύνδεση ενός απομακρυσμένου τόπου ή δικτύου με ένα κεντρικό τόπο) για την αποφυγή της συμφόρησης στο δίκτυο [47]. Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών ασύρματων συνδέσεων backhaul για τα μελλοντικά δίκτυα έχει καταστεί ένα δύσκολο έργο και αυτό διότι απαιτεί την πιο αποτελεσματική αξιοποίηση του δικτύου backhaul για τη διευκόλυνση της συγκριτικής αξιολόγησης διαφορετικών πτυχών όπως είναι η κάλυψη, ο ρυθμός διεκπεραίωσης διεργασιών, η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα, η υποστήριξη QoS, η ασφάλεια, κ.λ.π.

Στην περίπτωση μιας βασικής χρήσης που χρησιμοποιείται εμπειρία 5G σε στοχευμένα hotspots, ακόμη και αν οι μισοί από τους χρήστες χρειάζονται μόνο 100 Mbps ρυθμό δεδομένων ένα μικρό ποσοστό των χρηστών θα χρειαστεί ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 20 Gbps για την υποστήριξη UHD video[85] και 3D υπηρεσιών εικονικής πραγματικότητας και βίντεο, γεγονός που επιβάλλει πρωτοφανείς προκλήσεις στη σημερινή τεχνολογίες backhaul. Εν τω μεταξύ, το κόστος για τη σύνδεση κάθε small cell με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενσύρματης σύνδεσης backhaul θα μπορούσε να καταστεί σημαντική και ως εκ τούτου πρακτικά δύσκολη σε ορισμένες plug and play ή ad-hoc[86] αναπτύξεις. Για όλους τους παραπάνω λόγους, θα προτιμώνται ασύρματες λύσεις backhaul που θα είναι και πιο αποδοτικές. Οι ζώνες mm-wave μπορούν να υποστηρίξουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και επιτρέπουν ασύρματες λύσεις backhaul υψηλού ρυθμού. Ασύρματες συνδέσεις backhaul ή fronthaul επιτυγχάνονται σήμερα μέσω σταθερών ζεύξεων σημείου προς σημείο στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων έως 86 GHz, αλλά οι τρέχουσες τάσεις φαίνεται να επικεντρώνονται στη ζώνη V (57-66 GHz) και E (71-76 και 81- 86 GHz), όπου είναι διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα πόρων στις περισσότερες περιοχές του κόσμου.

[85] Πρότυπο που χρησιμοποιείται στις οθόνες απεικόνισης που απευθύνονται σε μη επαγγελματίες καταναλωτές με προσφερόμενη ανάλυση 3.840 x 2.160pixels

[86] Λύση σχεδιασμένη για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ή έργο, μη γενικεύσιμο και δεν προορίζεται να είναι σε θέση να προσαρμόζεται για άλλους σκοπούς.

Οι εκτεταμένες περιπτώσεις χρήσης επιβάλλουν διάφορες απαιτήσεις σε συνδέσμους backhaul. Στην επέκταση της κάλυψης, μπορεί να χρειαστεί δείγμα ανερχόμενης ζεύξης από *Coordinated MultiPoint*[87] για την υποστήριξη της κάλυψης, με αποτέλεσμα να πρέπει να δημιουργηθούν πολλαπλοί σύνδεσμοι backhaul. Σε αυτό το πλαίσιο απαιτείται το *in-band backhaul*, που σημαίνει διαμοιρασμό mm - wave συχνοτήτων μεταξύ του backhaul και της πρόσβασης. Το *in-band backhaul* μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ των σταθμών βάσης για συνεργατική επικοινωνία, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης backhaul δικτύου.

Η φορητότητα (κινητικότητα) που μελετάται για την περίπτωση μετακινούμενου hotspot, εισάγει επιπρόσθετες επιπλοκές στην κοινή χρήση του φάσματος και απαιτεί αυξημένο επίπεδο δυναμικών in-band backhaul δικτύων. Με την κεραία ή το ρελέ να έχει εγκατασταθεί σε ένα κινούμενο όχημα, η δυναμική ρύθμιση backhaul είναι υψίστης σημασίας. Προκειμένου να διατηρηθούν αξιόπιστες συνδέσεις backhaul, ένα κινούμενο ρελέ μπορεί να χρειαστεί επίσης να συνδεθεί με το δίκτυο πυρήνα μέσω πολλαπλών διαδρομών, έτρεξε απαιτώντας έτσι μια backhaul λύση συντονισμένων πολλαπλών σημείων (Coordinated MultiPoint)[88]. Η σχεδίαση backhaul δικτύου που διαθέτει επίγνωση πλαισίου (Context-aware) [48] που χρησιμοποιεί την πληροφορία τοποθεσίας, αποτελεί μια δυναμική λύση για τη βελτίωση της ποιότητας backhaul. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη προβλήματα όπως καλύτερες επιλογές συνδέσμων καθώς και δυναμική κατάτμηση του εύρους ζώνης μεταξύ της πρόσβασης RAN (σταθερά κελιά) και backhaul (κινούμενα κελιά).

Υπάρχουν όμως και άλλες απαιτήσεις, όπως οι αυστηρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης στο 5G, οι οποίες επιβάλλουν νέες προκλήσεις σε διάφορους τομείς. Για παράδειγμα, στο uplink CoMP, όπου τα small cells προωθούν το σήμα στα macro cells, όπου όλες οι διενέξεις από πολλαπλά small cells υποβάλλονται σε επεξεργασία από κοινού. Η ολοένα και πιο συμπυκνωμένη ανάπτυξη small cells mm - wave για την παροχή υψηλής χωρητικότητας έρχεται με το κόστος μιας πολύ υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και θα μπορούσε να υπονομεύσει τη βιωσιμότητα και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Η κατανάλωση backhaul ενέργειας δεν είναι πλέον αμελητέα όπως πριν και μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των small cells mm - wave. Σε αυτό το πλαίσιο, για την ολοκληρωμένη backhaul όπου η πρόσβαση και backhaul συνδυάζονται μέσα στην ίδια μονάδα, απαιτείται έξυπνη και δυναμική διαχείριση του δικτύου.

[87] Συντονισμένο πολλαπλό σημείο (multi – point) ή αλλιώς συνεργατικό MIMO είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες ιδέες για τη βελτίωση του ρυθμού δεδομένων του χρήστη και της φασματικής απόδοσης σε σχέση με τις πρώτες εκδόσεις του LTE ή WiMAX. Οι παρεμβολές μπορούν να αξιοποιηθούν ή να μετριαστούν με τη συνεργασία μεταξύ των τομέων ή διαφορετικές τοποθεσίες.

[88] Η συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων/λήψης Coordinated multi-point transmission/reception (CoMP) αποτελεί μία από τις υποψήφιες τεχνικές για LTE-προηγμένα συστήματα για την αύξηση του μέσου όρου των κυψελών και της διακίνησης χρήστη στο uplink και το downlink.

5.3.3. Τεμαχισμός 5G δικτύου και πολλαπλή συνδεσιμότητα

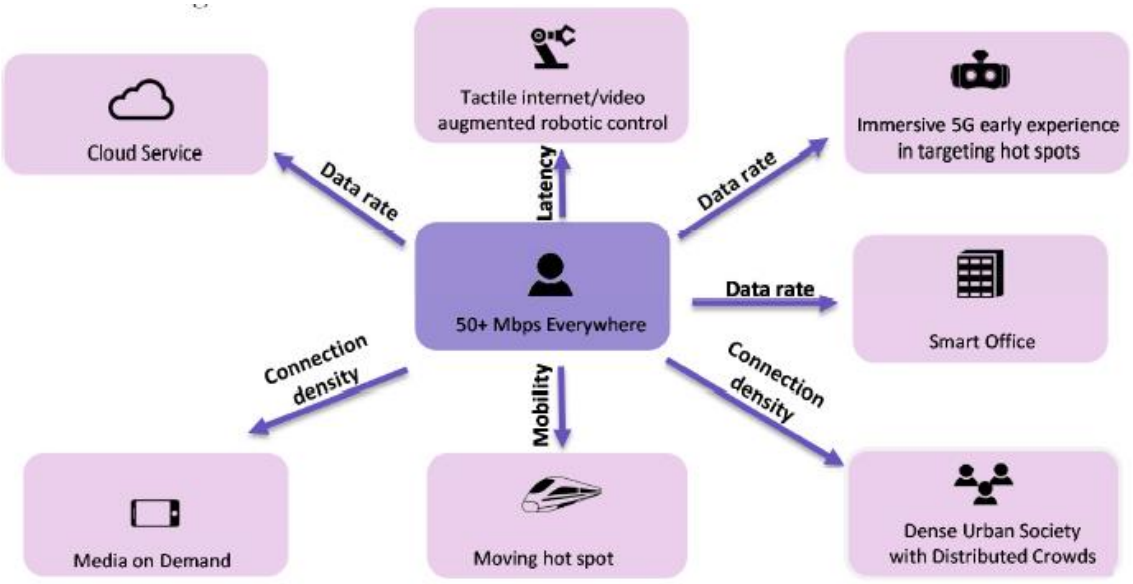
Το κύριο πεδίο του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να περιγράψει κάποιες από τις αρχικές έννοιες για την 5G αρχιτεκτονική mm-wave στη ζώνη συχνοτήτων 6-100 GHz. Επιπλέον εξετάζει προκλήσεις για τα συστήματα 5G σε σύγκριση με την LTE-A τεχνολογία, η οποία σε σχέση με την LTE εστιάζει σε υψηλότερη χωρητικότητα και παρέχει υψηλότερο ρυθμό αποστολής bit με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Τέλος προτείνει λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων σε τρεις βασικούς τομείς, και συγκεκριμένα: απόδοση, εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (διαχείριση δικτύου και παροχή backhaul), και ευκαμψία αρχιτεκτονικής. Οι προτεινόμενες έννοιες περιλαμβάνουν:

- *Τεμαχισμός Δικτύου (Network slicing)* για την αντιμετώπιση των αναγκών των περιπτώσεων χρήσης 5G με εξαιρετικά αποκλίνουσες απαιτήσεις, ορίζοντας ένα πολλαπλό λογικό δίκτυο εντός της ίδιας φυσικής υποδομής.

- *Πολλαπλή συνδεσιμότητα (Multi-connectivity)* με πολλαπλούς σταθμούς βάσης mm-wave ως τρόπος για να ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs – Radio Access Technologies).

- *Επιλογή των αρχικών πληροφοριών ελέγχου πρόσβασης*, οι οποίες σε περίπτωση πολλαπλής συνδεσιμότητα θα πρέπει να αποστέλλονται μέσω του συστήματος χαμηλής ζώνης (<6 GHz).

Για να προκύψει η αναγκαία αρχιτεκτονική του δικτύου και να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις σε διάφορες εφαρμογές 5G, ορίζεται ένας αριθμός περιπτώσεων χρήσης (use cases), όπως φαίνονται στην Εικόνα 44.



Εικόνα 44. Περιπτώσεις χρήσης τεχνολογίας mm-wave [πηγή 49]

Η πιο βασική περίπτωση χρήσης στο σύστημα 5G από αυτές που περιγράφονται στην Εικόνα 44 είναι η *50+ Mbps Everywhere*. Αυτή η περίπτωση χρήσης επιβάλλει μια αυστηρή απαίτηση άνω των 50 Mbps σε κάθε σενάριο, συμπεριλαμβανομένων των ακμών των κυψελών, όποτε αυτό απαιτείται. Η απαίτηση αυτή θεωρείται ζωτικής σημασίας και αποτελεί τη βάση για τις άλλες περιπτώσεις χρήσης. Κατά συνέπεια, ο υψηλός ρυθμός δεδομένων τόσο για downlink και uplink αναμένεται επίσης για την υπηρεσία του Cloud. Η υπόθεση αυτή αποσκοπεί στην ενίσχυση της προσαρμογής για τους χρήστες και εγγυάται την υψηλή διαθεσιμότητα των υπηρεσιών οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Στη συνέχεια, για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε πολυσύχναστες πόλεις, επιλέγεται η περίπτωση χρήσης που ονομάζεται *Dense Urban Society with Distributed Crowds*. Ο στόχος εδώ είναι η παροχή υψηλής χωρητικότητας, ευρωστίας, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού ρυθμού δεδομένων εντός κατανεμημένου πλήθος.

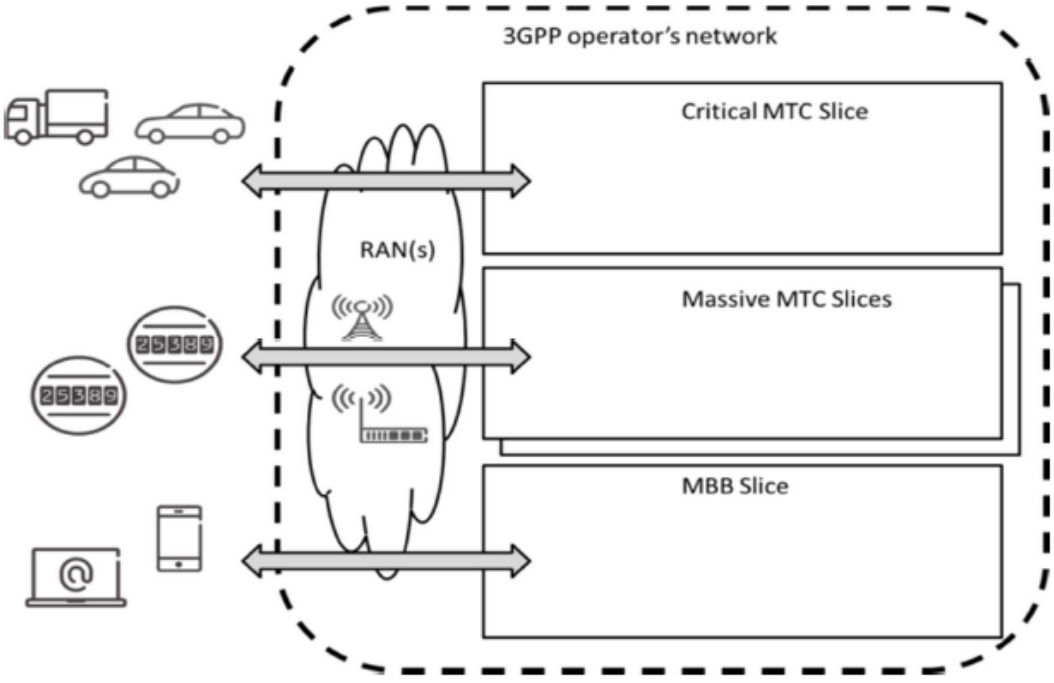
Στην περίπτωση χρήσης *Smart Office*, το δίκτυο αναμένεται να παρέχει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε downlink και uplink μεταδόσεις. Εκεί, γίνεται η παραδοχή για την κάλυψη μεγάλου αριθμού συσκευών με περιορισμένη κινητικότητα. Επιπλέον, το δίκτυο πρέπει να παρέχει υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση και προκειμένου να ικανοποιήσει τους συνδρομητές 5G, χρησιμοποιεί την περίπτωση χρήσης *Immersive 5G early experience in targeting hot spots*. Αυτή η περίπτωση χρήσης τονίζει τον υψηλό ρυθμό δεδομένων σε εξωτερικό σενάριο με σταθερά hot spots.

Η στήριξη των συχνοτήτων χαμηλής ζώνης μπορεί να είναι ευεργετική για την περίπτωση χρήσης *Moving hot spot*. Στην περίπτωση αυτή, οι συσκευές των χρηστών αναμένεται να κινούνται με μεγάλη ταχύτητα έως και 500 χιλιόμετρα/ώρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η βασική υπόθεση χρήσης "*50+ Mbps Everywhere* είναι κάπως χαλαρή είναι για *Media on Demand* και *Tactile Internet*. Η περίπτωση χρήσης *Media on Demand* επιβάλλει επιθυμητές απαιτήσεις απόδοσης σε ένα μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών, κάτι που συνεπάγεται την απαίτηση για δίκτυα υψηλής χωρητικότητας. Εδώ, η μετάδοση δεδομένων αναμένεται να είναι ισχυρή για μεγάλες περιόδους σύνδεσης Από την άλλη πλευρά, ο απομακρυσμένος έλεγχος εικονικών και πραγματικών αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπεται από την περίπτωση χρήσης *Tactile internet*. Αυτό έρχεται σε συνδυασμό με την υψηλή αξιοπιστία και τις χαμηλές απαιτήσεις σε καθυστέρηση. Σε ορισμένες εφαρμογές, οι οποίες είναι γνωστές ως **κρίσιμες εφαρμογές**, πρέπει να πληρούνται όλες οι απαιτήσεις, ενώ άλλες εφαρμογές είναι πιο χαλαρές σε τουλάχιστον μία από τις απαιτήσεις. Ως εκ τούτου, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των διάφορων περιπτώσεων χρήσης, προτείνεται μια σειρά νέων λύσεων. Οι λύσεις αυτές αναμένεται να ενεργοποιήσει το σύστημα 5G στο εγγύς μέλλον.

Μια σημαντική πτυχή του οικοσυστήματος 5G αποτελεί η έννοια του **τεμαχισμού του δικτύου**. Αυτό είχε αρχικά προταθεί για το κεντρικό δίκτυο 5G και στη συνέχεια επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN), το οποίο ορίζεται ως: *An end-to-end (E2E)*

network slice [50]. Προβλέπεται ότι ο τεμαχισμός θα οδηγείται από τις επιχειρήσεις και κάθε τμήμα θα υποστηρίζει μία ή περισσότερες υπηρεσίες επικοινωνίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 45, ενδεχομένως με ένα συγκεκριμένο τρόπο χειρισμού του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου χρήστη για τις υπηρεσίες αυτές.

Κάθε τμήμα του δικτύου πρέπει να είναι ικανό να υφίσταται διαχείριση από τον τελικό πελάτη ή τον ιδιοκτήτη του τμήματος ως ανεξάρτητο δίκτυο. Αντί για την ανάπτυξη ξεχωριστών υποδομών δικτύου για κάθε ξεχωριστό τμήμα του διαμερισμού του δικτύου, τα τμήματα θα πραγματοποιούνται με μια κοινή φυσική υποδομή, όπως το υλικό, η επεξεργασία, η αποθήκευση, οπισθοζευκτικό δίκτυο (backhaul) που αφορά τη σύνδεση ενός απομακρυσμένου τόπου ή δικτύου με ένα κεντρικό τόπο backhaul, ασύρματους πόρους, κ.λ.π χρησιμοποιώντας ένα εικονικό δίκτυο. Ακόμα κι αν το mm-wave RAT στοχεύει αρχικά τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες (MBB - Mobile Broadband Services) για ενισχυμένη κάλυψη και απόδοση, αυτό δεν αποκλείει ότι ορισμένα τμήματα μπορούν να υποστηρίξουν υπηρεσίες επικοινωνίας τύπου μηχανής (MTC - Machine Type Communication)[89] και η αρχιτεκτονική πρέπει να είναι σε θέση να τις υποστηρίζει.



Εικόνα 45. Τεμαχισμός Δικτύου (Network slicing) [πηγή 49]

[89] Η επικοινωνία αυτού του είδους χαρακτηρίζεται από την πλήρως αυτόματη δημιουργία δεδομένων, την ανταλλαγή, την επεξεργασία και την ενεργοποίηση μεταξύ ευφυών μηχανών, χωρίς ή με χαμηλή παρέμβαση των ανθρώπων. Με την ταχεία διείσδυση των ενσωματωμένων συσκευών, το MTC καθίσταται το κυρίαρχο πρότυπο επικοινωνίας για ένα ευρύ φάσμα των αναδυόμενων έξυπνων υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων της υγειονομικής περίθαλψης, της μεταποίησης, των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, των καταναλωτικών αγαθών και της μεταφοράς.

Καθώς διαφορετικά παράλληλα τμήματα δικτύου μπορούν να στοχεύουν σε μια ποικιλία περιπτώσεων χρήσης με πολύ αποκλίνουσες απαιτήσεις QoS, υπάρχουν ορισμένες βασικές παραδοχές που μπορούν να γίνουν στην αρχιτεκτονική 5G και το σχεδιασμό του RAN, οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

- Ο διαμοιρασμός των περισσότερων πόρων RAN μεταξύ πολλαπλών τμημάτων (slices) θεωρείται ως προεπιλογή.
- Η διαφοροποίηση της κυκλοφορίας μεταξύ τμημάτων είναι ενεργοποιημένη από μηχανισμούς αρχιτεκτονικής 5G.
- Απαιτείται η ορατότητα των τμημάτων στο 5G RAN για να υπάρχει η ικανότητα διάκρισης των τμημάτων.
- Απαιτείται προστασία των τμημάτων από το RAN 5G για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων μεταξύ τους.
- Θα πρέπει να υποστηρίζεται η διαχείριση της ανεξαρτησίας των από την αρχιτεκτονική 5G.

Η εναλλακτική λύση για τον τεμαχισμό του δικτύου θα είναι η ανάπτυξη ανεξάρτητων φυσικών δικτύων που θα οδηγήσουν το κόστος. Για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων, είναι σημαντικό ότι οι πόροι θα μοιράζονται όσο το δυνατόν περισσότερο, αλλά προκειμένου να εξασφαλιστεί η προστασία των τμημάτων, μπορεί να είναι αναγκαία η προσωρινά παροχή ειδικών φυσικών πόρων σε ορισμένα τμήματα, όπως π.χ. κρίσιμη επικοινωνία που εξασφαλίζει την εκπλήρωση των απαιτήσεων QoS. Ωστόσο, καθώς η ζήτηση κίνησης θα κυμανθεί ανάλογα με την πάροδο του χρόνου, οι ειδικοί πόροι πρέπει να απελευθερωθούν από το τμήμα από τη στιγμή που δεν χρειάζονται πλέον.

Για να συνοψίσουμε, ο τεμαχισμός του δικτύου αντιμετωπίζει με σχετικό τρόπο τις ανάγκες των περιπτώσεων χρήσης 5G με ιδιαίτερα αποκλίνουσες απαιτήσεις. Λειτουργώντας σε λογικά αντί για φυσικά στοιχεία του δικτύου, ο τεμαχισμός παρέχει ευελιξία αρχιτεκτονικής και δεδομένου ότι το 5G RAN πρέπει να έχουν επίγνωση της ροής της κυκλοφορίας στην ένωση των τμημάτων, είναι σημαντικό να σχεδιάσουμε ένα RAN μέρος ως τμήμα του RAT mm wave έτσι ώστε να είναι ανοιχτό για τον τεμαχισμό του δικτύου και για συγκεκριμένες περιπτώσεις βελτιστοποίησης της αρχιτεκτονικής.

Αναφορικά με την **πολλαπλή συνδεσιμότητα (multi-connectivity),** οι ιδιότητες διάδοσης των mm-κυμάτων αναμένεται να είναι πιο δύσκολη σε όρους απώλεια διάδοσης, μειωμένης περίθλασης, και αυξημένης απώλειας διείσδυσης κατά τη μετάβαση από εξωτερικό σε εσωτερικό χώρο. Θα είναι απαραίτητη η χρήση πολυσυνδεσιμότητας (MC - Multi-connectivity) για να εξασφαλιστεί πανταχού ευρεία και διαρκής κάλυψη για την απρόσκοπτη εμπειρία του τελικού χρήστη. Σε γενικές

γραμμές η πολυσυνδεσιμότητα αναφέρεται σε συσκευές χρηστών που συνδέονται ταυτόχρονα με πολλαπλές συνδέσεις. Αυτές οι συνδέσεις μπορούν να παρέχονται από έναν ή πολλαπλούς κόμβους του δικτύου πάνω σε έναν ή πολλαπλούς φορείς συχνοτήτων (intra - frequency/inter-frequency), χρησιμοποιώντας μια ή πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (intra/inter- RAT).

Ο σχεδιασμός MC λύσεων για 5G απαιτεί τη λήψη αρκετών αποφάσεων σχετικά με το επίπεδο της αρχιτεκτονικής RAN που θα έχουν επιπτώσεις στο σχεδιασμό τόσο του επιπέδου ελέγχου (π.χ. επιτρέποντας την ποικιλομορφία RRC ή πληροφορίες ελέγχου διαχωρισμού μεταξύ <6 GHz και mm Wave RTAs) όσο και του σχεδιασμού επίπεδου χρήστη (επικάλυψη δεδομένων ή διάσπαση). Η σχεδίαση MC λύσεων ενδο-συχνότητας (intra-frequency) περιλαμβάνει για παράδειγμα δίκτυα μονής συχνότητας, κοινή μετάδοση (JT - Joint Transmission), συντονισμένο COMP. Το JT δείγμα απαιτεί αυστηρό συγχρονισμό του χρόνου μεταξύ των κόμβων, κάτι που συνεπάγεται ιδανική fronthaul σύνδεση με την κεντρική μονάδα, ώστε να καταστεί δυνατή η συνεκτική λήψη.

Κεφάλαιο 6 –Συμπεράσματα και Μελλοντικές εξελίξεις

Οι τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) διεισδύουν ολοένα και περισσότερο στη ζωή των ανθρώπων, συνυπάρχουν σχεδόν σε κάθε προϊόν και υπηρεσία και είναι ελάχιστες οι παραγωγικές εργασίες που πραγματοποιούνται πλέον χωρίς τη συμβολή τους. Οι ΤΠΕ επεκτείνουν την παρουσία τους πέρα από τη βιομηχανική παραγωγή και την υποστήριξη της Διοίκησης των επιχειρήσεων στους τομείς της πρωτογενούς παραγωγής, όπως για παράδειγμα στην αγροτική παραγωγή, στις μεταφορές και τις υπηρεσίες υγείας. Ακόμη εξελίσσονται με ταχείς ρυθμούς, καθώς αποτελούν έναν από τους βασικούς τομείς έρευνας που συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον των ερευνητών διεθνώς. Σ' αυτό συμβάλλει και η ταχεία αξιοποίηση των επιτευγμάτων της επιστημονικής έρευνας από τις επιχειρήσεις που παράγουν και διαθέτουν σχετικά προϊόντα και υπηρεσίες.

Η Ευρώπη βρίσκεται αντιμέτωπη με οικονομικές και κοινωνικές προκλήσεις, όπως η γήρανση του πληθυσμού, η κοινωνική συνοχή, η βιώσιμη ανάπτυξη. Η εισαγωγή των ψηφιακών τεχνολογιών στην οικονομική και κοινωνική ζωή αποτελεί το κλειδί για την αντιμετώπισή των προαναφερόμενων προκλήσεων. Οι υποδομές δικτύων 5G θα είναι ένα βασικό εργαλείο για την υποστήριξη αυτού του κοινωνικού μετασχηματισμού, που θα οδηγήσουν την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει πολλαπλούς τομείς.

Η καθιέρωση της 5G τεχνολογίας αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας των σύγχρονων δικτύων, αφού παρουσιάζει σημαντικά οφέλη σε σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Θα βελτιώσει τον τρόπο με τον οποίο οποιαδήποτε φορητή συσκευή διατηρείται σε σύνδεση με τους servers από τους οποίους αντλεί δεδομένα, γεγονός που θα έχει αντίκρισμα στις διαδικτυακές βιντεοκλήσεις, αλλά και στην αναπαραγωγή βίντεο απευθείας από το Διαδίκτυο, που θα πραγματοποιούνται χωρίς να παγώνει η εικόνα. Επίσης θα ικανοποιήσει άλλες αναγκαιότητες, είναι το γεγονός ότι θα έχει 1.000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα σημερινά δίκτυα. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στην περίπτωση των πυκνοκατοικημένων περιοχών, όπου συχνά παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, με συνέπεια τα σημερινά δίκτυα να δυσκολεύονται να ανταπεξέλθουν, με την περιορισμένη τους χωρητικότητα.

Εν κατακλείδι, ο στόχος του mobile Internet 5^{ης} γενιάς [51] είναι να δώσει τη δυνατότητα στο χρήστη να έχει πρόσβαση στο Web και στις διασυνδεδεμένες συσκευές του από οποιοδήποτε τερματικό, χωρίς αυτό να σημαίνει πως οι ενσύρματες συνδέσεις θα σταματήσουν να παίζουν κι αυτές σημαντικό ρόλο στη δικτύωση. Απλώς αναμένεται να περιοριστεί ο ρόλος του με την πάροδο του χρόνου.

Συνεχίζοντας με τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας θα πρέπει αρχικά να αναφερθεί ότι η 5G δικτύωση καταφέρει να βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό το κρίσιμο θέμα της **ασφάλειας** στην ασύρματη επικοινωνία με τη χρήση των *Privacy enablers* που παρέχουν μηχανισμούς ασφαλείας που είναι σε θέση να αποτρέψουν τις παραβιάσεις της ιδιωτικής ζωής. Η βασική ιδέα είναι ότι η πραγματική ταυτότητα των χρηστών ενός δικτύου 5G δεν θα πρέπει να μεταφέρεται μέσω του δικτύου, αλλά θα πρέπει αντ' αυτού να χρησιμοποιούνται μόνο τυχαία ψευδώνυμα. Επίσης με τον κωδικοποίηση από άκρο σε άκρο (End - to- end encryption) θα υπάρχει προστασία από επιθέσεις υποκλοπών σε όλες τις πιθανές δικτυακές διαδρομές με μεγάλη κυκλοφορία δεδομένων. Προς το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται και η ιδιωτικότητα του αναγνωριστικού της συσκευής (device identifier privacy) που παρέχει τεχνικές ανωνυμίας από άκρο σε άκρο σύμφωνα με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στη συσκευή του χρήστη.

Στον τομέα της **ενέργειας** χρησιμοποιούνται δυναμικά hotspots που έχουν ως στόχο την κατανομή του υπολογιστικού φορτίου μόνο σε περιοχές όπου αυξάνεται η απαίτηση για χωρητικότητα του δικτύου. Χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες απόδοσης όπως η *περιγραφή της ενεργειακής απόδοσης* (NRG - energy efficiency) και ο *αριθμός των υποστηριζόμενων χρηστών* (NoU - Number of supported users). Επιπλέον στο πεδίο του λογισμικού, νέα εργαλεία διαχείρισης και ελέγχου των επιπέδων καθώς και ευέλικτες λύσεις για περιβάλλοντα κεντρικοποιημένων δικτύων ασύρματης πρόσβασης όπως το C-RAN, προσφέρουν ενεργειακή απόδοση μέσω του συντονισμού και της δυναμικής αναδιάταξης των συσκευών, που οδηγούν σε μια σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, της τάξης 25-30% σε σχέση με αυτή που καταναλώνεται από την πλατφόρμα RRH (Radio Remote Head) που μαζί με το πρωτόκολλο IPv6 χρησιμοποιείται για την διαχείριση της κυκλοφορίας μέσα στο δίκτυο.

Στον τομέα της **μείωσης της καθυστέρησης (latency)** χρησιμοποιούνται Δίκτυα Παράδοσης Περιεχομένου (CDN) που αντιγράφουν περιεχόμενο από το διακομιστή προέλευσης (source server) σε διακομιστές προσωρινής αποθήκευσης, προκειμένου οι τελευταίοι να παραδώσουν το περιεχόμενο σε τελικούς χρήστες με τρόπο αξιόπιστο. Τα CDN τελικά σημεία μπορούν να διανεμηθούν σε όλο το δίκτυο, εξοικονομώντας έτσι πόρους μεταφοράς και μειώνοντας την καθυστέρηση μετάδοσης. Επίσης με τη χρήση υπηρεσιών Cloud, όπως π.χ. η υπηρεσία BaaS, επιτυγχάνεται ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος διανομής περιεχομένου (όπως π.χ. ειδήσεις ή τηλεοπτικές εκπομπές) σε πραγματικό χρόνο και με τη χαμηλότερη δυνατή καθυστέρηση (latency). Μια άλλη περίπτωση ανάγκης χαμηλής καθυστέρησης αποτελεί η πληροφόρηση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, η οποία λαμβάνει υπόψη τη συνδεσιμότητα που απαιτείται σε οποιοδήποτε μέρος και ανά πάσα στιγμή. Οι χρήστες επιζητούν την ίδια ποιότητα τόσο στο χώρο εργασίας τους και σε δημόσιους χώρους.

Αναφορικά με τις αρχιτεκτονικές της 5G δικτύωσης, έχουν διερευνηθεί τρεις και πιο συγκεκριμένα αυτή που χρησιμοποιεί τη fronthaul και την backhaul δικτύωση, αυτή που συνδυάζει την **εικονικοποίηση** των λειτουργιών του δικτύου (NFV) και τη **δικτύωση** που είναι βασισμένο στο λογισμικό (SDN) και τέλος αυτή που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική μικροκυματικής ζώνης.

Όσον αφορά την **πρώτη αρχιτεκτονική,** διαπιστώθηκε ότι οι ασύρματες backhaul και fronthaul τεχνολογίες αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις όπως η αύξηση της δυναμικότητας κατά 1000 φορές, η πύκνωση των small cells και μια σημαντική μείωση της επιτρεπόμενης καθυστέρησης μέχρι 1 ms από άκρο σε άκρο. Επίσης οι οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (OWC) έχουν προσελκύσει πρόσφατα μεγάλο ενδιαφέρον και περιλαμβάνουν επικοινωνίες ελεύθερου χώρου οπτικής (FSO), όπου χρησιμοποιούνται laser πομποί για οικοδόμηση οπτικών ασύρματων συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας και συστήματα εξοπλισμένα με χαμηλού κόστους LED υψηλής ισχύος για την εσωτερική επικοινωνία. Για 5G δίκτυα σταθερής πρόσβασης χρησιμοποιείται η τεχνολογία GPON συνολική χωρητικότητα της τάξης των 2.5/1.25 Gbit/s για συνδέσεις downstream/upstream αντίστοιχα. Όσον αφορά τα οπτικά δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη συνολική χωρητικότητα, υψηλή απόσταση μεταξύ των συνδέσμων και χαμηλή καθυστέρηση, βασίζονται στις τεχνολογία CWDM και DWDM που είναι κατάλληλες για την οικονομικά αποδοτική εγκατάσταση σε εξωτερικούς χώρους με μέτρια συνολική χωρητικότητα.

Όσον αφορά τη **δεύτερη αρχιτεκτονική,** για την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, υπάρχει τοποθέτηση στο υπολογιστικό νέφος των λειτουργιών του δικτύου (NFs). Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εκτελεστούν πάνω από COTS υλικό, το οποίο σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει με τις υπάρχουσες συνιστώσες συστήματος. Άλλωστε σχεδόν όλο το λογισμικό που αγοράζεται από ένα μέσο χρήστη H/Y, όπως π.χ. λογισμικό εφαρμογών γραφείου, επεξεργαστές κειμένου, προγράμματα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου κ.λ.π. ανήκει στην κατηγορία COTS. Επίσης χρησιμοποιείται και η αρχιτεκτονική SDN που σκοπεύει να κάνει το δίκτυο απλούστερο, πιο ευέλικτο και πιο προγραμματιζόμενο και για το λόγο αυτό διαιρεί τις λειτουργίες του δικτύου σε τρία μέρη: το επίπεδο δεδομένων χρήστη (user-data plane), το επίπεδο του ελεγκτή (user-data plane) και το επίπεδο ελέγχου (control plane). Η SDN δικτύωση θεωρεί ότι οι λειτουργίες του δικτύου δεν βασίζονται σε κάποιο συγκεκριμένο υλικό, αλλά αποτελούν εικονικοποιημένες λειτουργίες.

Όσον αφορά την **τρίτη αρχιτεκτονική,** χρησιμοποιείται η μικροκυματική ζώνη (mm-wave band) που παρέχει μεγάλο εύρος μετάδοσης (πάνω από τα 30GHz) και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα συμφόρησης, όπως στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή γύρω από τα 60 GHz καθώς υπάρχει ελεύθερο ένα εύρος τιμών της τάξης των 3 GHZ (59-62 GHz) παγκοσμίως. Η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να λειτουργήσει με πολλά σενάρια,

όπως π.χ. mm-wave Backhaul και Fronthaul. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τεμαχισμός δικτύου για την αντιμετώπιση των αναγκών των περιπτώσεων χρήσης 5G με εξαιρετικά αποκλίνουσες απαιτήσεις, ορίζοντας ένα πολλαπλό λογικό δίκτυο εντός της ίδιας φυσικής υποδομής. Η εναλλακτική λύση για τον τεμαχισμό του δικτύου θα είναι η ανάπτυξη ανεξάρτητων φυσικών δικτύων που θα οδηγήσουν το κόστος. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλαπλή συνδεσιμότητα με πολλαπλούς σταθμούς βάσης mm-wave, ως τρόπος για να ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs).

Βιβλιογραφία

[1] Ευρυζωνικότητα: http://broadband.cti.gr/el/evrizonikotita/umts.php

[2] Μπιτζίδης Ν Γεώργιος, *Η μετάβαση από τις 3G στις 4G ασύρματες επικοινωνίες*, Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2011.

[3]Statista:http://www.statista.com/statistics/284202/mobile-phone-internet-user-penetration-worldwide/.

[4] Κουρτελής Αλέξιος, *Δίκτυα 4ης γενιάς (4G)*, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2009.

[5] Infosys, *White Paper, 4G – Unleashing Communication Service Innovation*.

[6] Market share of Asia/Pacific in global 4G mobile subscribers from 2010 to 2020: http://www.statista.com/statistics/226986/asias-market-share-of-global-4g-mobile-subscribers-since-2010/.

[7] *METIS System concept: The Shape of 5G to Come*, Hugo Tullberg, Petar Popovski, David Gozalvez-Serrano, Peter Fertl, Zexian Li, Andreas Höglund, Mikko A. Uusitalo, Heinz Droste, Ömer Bulakci, Joseph Eichinger, Krystian Pawlak.

[8] 5G radio access: http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf.

[9] P. Popovski, *Ultra-Reliable Communication in 5G Wireless Systems*, 1st Int. Conf. on 5G for Ubiquitous Connectivity, Levi, Finland, November 2014.

[10] Project Name: *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)*, Deliverable D8.4 METIS final project report.

[11] Σούτλης Κων/νος, *Ποιότητα Υπηρεσιών και Ασφάλεια σε Ασύρματα Δίκτυα 4ης Γενιάς (4G)*, Διπλωματική εργασία, Μάιος 2010.

[12] Ö. Bulakci, Z. Ren , C. Zhou, J. Eichinger, P. Fertl, and S. Stanczak, "Dynamic Nomadic Node Selection for Performance Enhancement in Composite Fading/Shadowing Environments," IEEE VTC 2014-Spring, Seoul, South Korea, May 2014.

[13] EARTH Deliverable D3.3 *Final Report on Green technologies*, EU-FP7 Project EARTH (INFSO-ICT-247733) Deliverable 3.3, July 2012.

[14] M. Olsson, C. Cavdar, P. Frenger, S. Tombaz, and R. Jantti, *5GrEEn: Towards Green 5G Mobile Networks*, IEEE Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2013), Lyon, France, Oct. 2013.

[15] METIS Deliverable D4.2. *Final report on trade-off investigations*, EU-FP7 Project METIS (ICT-317669) Deliverable 4.2, August 2014.

[16] Σιάμπου Δ Φωτεινή, *Διερεύνηση της διαδικασίας της κυψελοειδούς διάσπασης λόγω αύξησης της συνδρομητικής κίνησης σε αστικό περιβάλλον για δίκτυα 3ης γενιάς,* Πάτρα, Δεκέμβριος 2007.

[17] About ITU: http://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx.

[18] IEEE 4G Mobile Technologies. An IEEE Comsoc Indonesia Chapter Lecture: http://www.slideshare.net/kuncoro/4g-mobile-network-applications

[19] Λύκου Άννα Αικατερίνη, *Οι Γενιές των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας και Παρουσίαση των Συστημάτων 4ης Γενιάς LTE και LTE-Advanced*, Πτυχιακή Εργασία, Λάρισα 2014.

[20] Gartner (Μάρτιος 2015): 1,2 δις. πωλήσεις smartphones το 2014, Samsung και Apple στην κορυφή: http://www.myphone.gr/forum/showthread.php?t=412247.

[21] Η επανάσταση της «5ης γενιάς»: http://www.kathimerini.gr/780916/article/texnologia/ diadiktyo/h-epanastash-ths-5hs-genias.

[22] Óscar Carrasco, *Scenarios and models for 5G performance evaluation in SPEED-5G*, METIS II Workshop, 28-29 Sep. 2015, Kista, Sweden

[23] 5G Enablers for Network and System Security and Resilience, *5G – Ensure D2.1 Use cases*, 01/02/2016.

[24] *SELFNET – Framework for Self – Organized Network Management in Virtualized and Software Defined Network*, Jose M. Alcaraz calero & Qj Wang, University of the West of Scotland, Mario Joao Barros, Eurescom – Project Coordinator.

[25] 5G Enablers for Network and System Security and Resilience, *Deliverable D4.1 5G Security testbed architecture*, 30/06/2016.

[26] Bare metal vs. hypervisor: The evolution of dedicated servers http://www.internap.com/2015/02/26/bare-metal-vs-hypervisor/.

[27] Speed 5G quality of Service Provision and capacity Expansion through Extended-DSA for 5G, *Metric definition and preliminary strategies and algorithms for RM, Version: V1.0,* 15/7/2016.

[28] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D1.1: Initial specification of the system architecture accounting for the feedback received from WP2/3/4*.

[29] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D7.2 first periodic report from 1st July 2015 to 30th June 2016.*

[30] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D2.1 Detailed analysis of the technologies to be integrated in the XFE based on previous internal reports from WP2/3*

[31] IR3.2, «XFE/XCI design» April 2016.

[32] InterDigital, EgdeHaulTM Solution Datasheet, http://www.interdigital.com/data_sheets/.

[33] Jiannan Zhu, Stephan Pachnicke, Mirko Lawin, Stephen Mayne, Adrian Wonfor, Richard V. Penty, *First Demonstration of a WDM-PON System Using Full C-band Tunable SFP+ Transceiver Modules [Invited]*, J. Opt. Commun. Netw. 7, A28-A36 (2015).

[34] ITU-T G.metro Draft Recommendation: *Multichannel bi-directional DWDM applications with port agnostic single-channel optical interfaces*.

[35] IRIS, *Integrated Reconfigurable Silicon Photonic Switch EU project*, Reference: FP7-ICT-2013-11-619194.

[36] Chris Cole, Ilya Lyubomirsky, Ali Ghiasi and Vivek Telang: *Higher-Order Modulation for Client Optics*, IEEE Communications Magazine, March 2013.

[37] R. Urata, C. Johnson: *High performance, low cost, colorless* ONU for WDM-PON, NTh3E.4, OFC/NFOEC 2012.

[38] Selfnet. Deliverable 2.1, *Use Cases Definition and Requirements of the System and its Components.*

[39] "ETSI NFV," 2015. [Online]. Available: http://www.etsi.org/technologiesclusters/ technologies/nfv.

[40] COTS, MOTS, GOTS, and NOTS: **http://searchenterpriselinux.techtarget.com/definition/COTS-MOTS-GOTS-and-NOTS.**

[41] The NFV Move in Network Function/Service/Chaining/Graph/ https://www.ietf.org/proceedings/87/slides/slides-87-nsc-0.pdf.

[42] *NETCONF Protocol*, [Online]. Available: http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4741.txt.

[43] *OpenFlow*, [Online]. Available: https://www.opennetworking.org/sdnresources/openflow/.

[44] http://www.iaria.org/conferences2016/filesAICT16/AICT_2016_Expert_Panel.pdf.

[45] Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), Deliverable D3.1, Initial concepts on 5G architecture and integration.

[46] Διπλωματική Εργασία, Παπαϊωάννου Αντώνιος, *Μελέτη και επίδοση αρχιτεκτονικών μετάδοσης σε συστήματα Radio over Fiber (RoF)*, Αθήνα, 23 Δεκεμβρίου 2013.

[47] Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), Deliverable D5.1, *Initial multi-node and antenna transmitter and receiver architectures and schemes*.

[48] *Συστήματα Επίγνωσης Πλαισίου / Context Aware:* http://studentguru.gr/b/biboudis/archive/2009/01/16/context-aware.

[49] Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated

Communications (mmMAGIC), *Architectural aspects of mm-wave radio access integration with 5G ecosystem*.

[50] NGMN Alliance, "5G White Paper", February 2015.

[51] Η επανάσταση της «5ης γενιάς»: http://www.kathimerini.gr/780916/article/texnologia/diadiktyo/h-epanastash-ths-5hs-genias.