



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**"ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ"**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δίκτυα Υποδομής και Τεχνολογίες Δικτύωσης για Συστήματα  
5ης Γενιάς**

**Δημήτριος Γ. Κυριακίδης**

**Επιβλέπων: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δίκτυα Υποδομής και Τεχνολογίες Δικτύωσης για Συστήματα 5<sup>ης</sup> Γενιάς

**Δημήτριος Γ. Κυριακίδης**

**A.M.: M1376**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** **Λάζαρος Μεράκος**, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Οκτώβριος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημερινή εποχή με τις τεράστιες απαιτήσεις σε ευρος ζώνης, κινητικότητα και ταχύτητες σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, πλέον αρχίζει να μη μπορεί να εξυπηρετηθεί από τις υφιστάμενες τεχνολογίες. Ο κατακλυσμός της αγοράς από έξυπνες συσκευές, ταμπλέτες και διάφορες άλλες δικτυωμένες συσκευές δημιουργεί μεγαλύτερες απαιτήσεις από το δίκτυο. Το μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο καταγράφεται, όπως είναι φυσικό από τη μεταφορά δεδομένων, όπως υψηλής ανάλυσης βίντεο, online gaming και μια πληθώρα ακόμα από υπηρεσίες οι οποίες ακόμα και εν κινήσει θα πρέπει να εξυπηρετούνται. Επίσης, και η ποιότητα και η εμπειρία της υπηρεσίας για τον χρήστη θα πρέπει να είναι άριστη ακόμα και σε πολυσύχναστα σημεία και σε ώρες αιχμής. Όπως αντιλαμβανόμαστε η μετάβαση από τα σημερινά δίκτυα στα δίκτυα πέμπτης γενιάς καθιστάται επιβεβλημένη και γι' αυτό το λόγο, ερευνητικές ομάδες από διάφορα πανεπιστήμια και εταιρίες τηλεπικοινωνιών έχουν αναλάβει αυτό το δύσκολο έργο, ώστε να επιτευχθούν οι απαιτήσεις και οι στόχοι των 5G δικτύων.

Στην παρούσα διπλωματική, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα κίνητρα ανάπτυξης καθώς και στις απαιτήσεις των συστημάτων 5<sup>ης</sup> γενιάς δικτύων. Επίσης γίνεται αναφορά στην προτυποποίηση των συστημάτων όπως και στις παραμέτρους που πρέπει να ικανοποιηθούν και να ρυθμιστούν από τους αρμόδιους φορείς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορα χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα τα οποία στοχεύουν στην υλοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς οι αρχιτεκτονικές και οι τεχνολογίες που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση των 5G δικτύων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται εκείνα τα κομμάτια του δικτύου που αρχιτεκτονικά θα υλοποιούνται στα 5G δίκτυα. Επίσης δίνεται έμφαση στις ασύρματες τεχνολογίες όπου στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται μια σύγκριση αυτών.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Συστήματα Δικτύωσης 5<sup>ης</sup> Γενιάς

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** SDN, NFV, SDN, MIMO, C-RAN, mmWave, Fronthaul, Backhaul, FSO, VLC

## **ABSTRACT**

Nowadays, with huge bandwidth, mobility and speeds in virtually real time, it is no longer possible to be served by existing technologies. The cataclysm of smart devices, tablets and other networked devices creates greater demands on the network. The largest network load is recorded, as naturally by data transfer, such as high-resolution video, online gaming and a host of other services that even on the move should be served. Also, the quality and experience of the service for the user should be excellent even in busy places and at peak times. As we perceive the transition from today's networks to fifth-generation networks, it is confirmed and research teams from various universities and telecommunication companies have undertaken this difficult task to meet the requirements and goals of 5G networks.

In this diploma, in the first chapter, reference is made to the development motivations as well as to the requirements of the 5th generation networks. Reference is also made to the standardization of the systems as well as to the parameters to be met and regulated by the competent bodies. Next, various funded research projects are presented which aim at the implementation of 5th generation networks. The second chapter analyzes extensively the architectures and technologies that are expected to be used to implement the 5G networks. The third chapter presents and analyzes those parts of the network that will be architecturally implemented in 5G networks. Also, emphasis is placed on wireless technologies where at the end of the chapter a comparison is made.

**SUBJECT AREA:** 5<sup>th</sup> Generation Networking Systems

**KEYWORDS:** SDN, NFV, SDN, MIMO, C-RAN, mmWave, Fronthaul, Backhaul, FSO, VLC

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με την βοήθειά τους συνέβαλαν με το λιθαράκι τους ο καθένας ξεχωριστά για να φτάσω να γράφω σήμερα αυτό το πεδίο των ευχαριστιών. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτωρ Διονύση Ξενάκη καταρχάς για την πολύτιμη συμβολή και υπομονή για την παρούσα διπλωματική, αλλά κυρίως για την ψυχολογική και αμέριστη στήριξη του, που έδειξε μέχρι την τελευταία στιγμή, κατανοώντας τους δύσκολους ρυθμούς που ζούμε σήμερα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, από την οποία έλειπα για να καταφέρω να συνδυάσω όλα τα παραπάνω που απαιτεί η σύγχρονη κοινωνία που ζούμε.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (5G).....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5 <sup>ης</sup> γενιάς .....	12
1.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5ης γενιάς .....	12
<b>1.2 Προτυποποίηση συστημάτων 5<sup>ης</sup> γενιάς.....</b>	<b>14</b>
1.2.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union).....	14
1.2.2 Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες – 2020 (International Mobile Telecommunications IMT - 2020)	14
1.2.3 Παράμετροι ικανοποίησης IMT-2020 .....	14
1.2.4 Ρυθμίσεις Φάσματος .....	16
1.2.5 Η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογιών 5ης Γενιάς.....	16
<b>1.3 Προκλήσεις.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα για την ανάπτυξη συστημάτων 5ης γενιάς .....</b>	<b>21</b>
1.4.1 SPEED-5G (quality of Service Provision and capacity Expansion through Extended-DSA for 5G)	21
1.4.2 CHARISMA: Converged Heterogeneous Advanced 5G Cloud-RAN Architecture for Intelligent and Secure Media Access .....	21
1.4.3 5G MiEdge: Millimeter-wave Edge cloud as an enabler for 5G ecosystem.....	22
1.4.4 5G-Crosshaul: The 5G Integrated fronthaul/backhaul .....	22
1.4.5 MassLOC: Massive MIMO Localization for 5G Networks .....	22
1.4.6 5G-AURA .....	23
1.4.7 WiVi-2020.....	24
1.4.8 SPOTLIGHT .....	24
1.4.9 5G Wireless.....	25
1.4.10 FIWIN5G .....	25
1.4.11 mmMagic .....	25
1.4.12 5G-XHAUL .....	26
<b>2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 5ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1 Τεχνολογίες συστημάτων 5ης γενιάς .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2 Σενάρια αρχιτεκτονικής.....</b>	<b>31</b>
2.2.1 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου (network densification) .....	32
2.2.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου.....	34
2.2.3 Συνδυασμός NFV και SDN.....	34
2.2.4 Αρχιτεκτονική του Cloud-RAN.....	36

<b>2.3</b>	<b>Αποδοτικότερη χρήση του Φάσματος συχνοτήτων .....</b>	<b>38</b>
<b>2.4</b>	<b>Ανάλυση κυρίαρχων τεχνολογιών .....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Massive MIMO .....	39
2.4.2	Network Function Virtualization - NFV .....	40
2.4.3	Network Densification .....	46
2.4.4	Software Defined Network – SDN.....	47
2.4.5	mmWave .....	56
<b>3.</b>	<b>5G FRONTHAUL ΚΑΙ BACKHAUL .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>Fronthaul και Backhaul .....</b>	<b>60</b>
3.2.1	Fronthaul .....	60
3.2.2	Backhaul.....	62
<b>3.3</b>	<b>5G δίκτυα ασύρματης πρόσβασης .....</b>	<b>63</b>
3.3.1	Οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου .....	65
3.3.2	Επικοινωνίες Ορατού Φωτός .....	74
3.3.3	mmWave .....	79
<b>3.4</b>	<b>5G δίκτυα σταθερής πρόσβασης .....</b>	<b>92</b>
<b>3.5</b>	<b>Σύγκριση mmWave με λοιπές τεχνολογίες .....</b>	<b>93</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ .....</b>	<b>96</b>
	<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>100</b>
	<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>103</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 χρονοδιάγραμμα της IMT-2020.....	15
Εικόνα 2 Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G ..	19
Εικόνα 3 Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps	28
Εικόνα 4 Σύγκριση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G .....	29
Εικόνα 5 Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη .....	29
Εικόνα 6 Radar chart που απεικονίζει τις θεωρητικές δυνατότητες του 5G εν συγκρίσει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G.....	31
Εικόνα 7 Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification [7].....	33
Εικόνα 8 Συνδυασμός αρχιτεκτονικών NFVκαι SDN.....	35
Εικόνα 9 Μια Cloud-Based Αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G [15].....	37
Εικόνα 10 Cloud-RAN αρχιτεκτονική με κεντρική επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης και RRHs .....	38
Εικόνα 11 Μοντέλο Υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους και αντιστοίχιση τους στην Αρχιτεκτονική του NFV .....	41
Εικόνα 12 Ένα Περιβάλλον Εικονικών Δικτύων .....	42
Εικόνα 13 Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας.....	43
Εικόνα 14 Παραδείγματα Network Functions Virtualization .....	45
Εικόνα 15 Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης μέσω της τεχνολογίας Network Densification .....	46
Εικόνα 16 Τύποι κυψελών καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών .....	47
Εικόνα 17 Παράδειγμα αρχιτεκτονικής SDN για κινητό δίκτυο.....	50
Εικόνα 18 Η αρχιτεκτονική του OpenFlow .....	51
Εικόνα 19 Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN.....	52
Εικόνα 20 Λογικά Στρώματα σε μια SDN Αρχιτεκτονική.....	54
Εικόνα 21 Πρόταση για την Δομή του πλαισίου mmWave.....	58



Εικόνα 22 Η υλοποίηση όπου οι Base Station Controller (BSC) και Radio Network Controller (RNC) συγκεντρώνουν όλη την κίνηση του δικτύου από τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης τους[47].....	61
Εικόνα 23 Η υλοποίηση του Fronthaul σεναρίου σε ένα 5G δίκτυο [47] .....	61
Εικόνα 24 C-RAN Radio Network Architecture Based on NGFI (Next Generation Fronthaul Interface)[48] .....	62
Εικόνα 25 Έννοια των μικροκυβελών σε δίκτυα backhaul .....	63
Εικόνα 26 Backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave [51].....	64
Εικόνα 27 Εμπορικό σύστημα FSO της MRV .....	66
Εικόνα 28 Αρχιτεκτονικές FSO συστημάτων.....	68
Εικόνα 29 Ολοκληρωμένο Fiber, Wireless δίκτυο κινητών backhaul βασισμένο σε υβριδικό FSO σύστημα [57].....	70
Εικόνα 30 Εξοπλισμός ενός Attechron USP laser για FSO .....	71
Εικόνα 31 Υβριδικό σύστημα FSO/mmWave.....	72
Εικόνα 32 Backhaul δίκτυο το οποίο αποτελείται από 5 σταθμούς βάσης.....	73
Εικόνα 33 Ενδεικτικές εφαρμογές FSO [60].....	74
Εικόνα 34 Wavelength Division Multiplexing .....	75
Εικόνα 35 Hardware για ένα VLC σύστημα .....	76
Εικόνα 36 Τρέχουσες απαιτήσεις για φάσμα και εύρος [41] .....	79
Εικόνα 37 Πλάνο ελεύθερων συχνοτήτων και ανάθεση συχνότητας ανά περιοχή [65] ..	81
Εικόνα 38 Κατάλογος των σχετικών προγραμμάτων της ΕΕ που αφορούν την τεχνολογία mmWave .....	82
Εικόνα 39 Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mmWave [65] .....	82
Εικόνα 40 Περιπτώσεις χρήσης τεχνολογίας mmWave [67] .....	84
Εικόνα 41 Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) [67].....	86
Εικόνα 42 Τα χαρακτηριστικά των απωλειών σε διάφορες ζώνες των mmWave .....	88
Εικόνα 43 Παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης.....	89
Εικόνα 44 Ετερογενή δίκτυα στο πλαίσιο μιας μακροκυψέλης.....	90



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Σύγκριση ερευνητικών προγραμμάτων .....	27
Πίνακας 2 Σύγκριση Ασύρματων Τεχνολογιών για 5G Δίκτυα .....	93

## 1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 5ης ΓΕΝΙΑΣ (5G)

### 1.1 Εισαγωγή

#### 1.1.1 Κίνητρα ανάπτυξης συστημάτων 5<sup>ης</sup> γενιάς

Το LTE (Long Term Evolution) που ενσωματώνει τα συστήματα 4<sup>ης</sup> γενιάς (4G) έχει αναπτυχθεί και φθάνει στην ωρίμανσή του. Αφού μόνο ελάχιστες βελτιώσεις και μικρές ποσότητες νέου φάσματος μπορούν να εκχωρηθούν, είναι φυσικό για την ερευνητική κοινότητα να αναλογιστεί τι θα γίνει στο άμεσο μέλλον. Σε μεγάλο βαθμό πλέον τα έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), οι ταμπλέτες (tablets) και οι ροές βίντεο (video streaming) έχουν κατακλύσει τα δίκτυα και οι προβλέψεις που είχαν γίνει για το 2020 για τις απαιτήσεις του δικτύου θα ξεπεραστούν κατά πολύ. Σε μόλις μια δεκαετία η ποσότητα των IP δεδομένων που χειρίστηκαν τα ασύρματα δίκτυα έχουν αυξηθεί κατά πολύ πάνω από 100 φορές από το αναμενόμενο. Με όγκο δεδομένων κάτω από 3 Exabytes το 2010 και πάνω από 190 Exabytes το 2018 και αυτός ο αριθμός να ανεβαίνει όλο και πιο πολύ μέχρι το 2020, εκτιμάται ότι θα υπερβαίνει τα 500 Exabytes. Αυτή η πληθώρα κίνησης των δεδομένων, η οποία δημιουργείται κυρίως από βίντεο μέχρι στιγμής αλλά και νέες εφαρμογές, αναμένεται να δημιουργήσει έξτρα κίνηση μέχρι το 2020. Εκτός από τον όγκο δεδομένων, ο αριθμός των συσκευών και κατ' επέκταση και νέων δεδομένων θα συνεχίσει να αυξάνεται εκθετικά. Επίσης στις προηγούμενες 4 γενιές της κυψελωτής τεχνολογίας, η κάθε νέα τεχνολογία δεν ήταν συμβατή με την προηγούμενή της, με αποτέλεσμα να χρειάζεται σχεδόν πλήρης αντικατάσταση των υποδομών και της τεχνολογίας που χρησιμοποιούνταν από τους παρόχους. Εύλογα οι πάροχοι επιδιώκοντας τουλάχιστον την απόσβεση και το κέρδος από την ήδη υπάρχουσα τεχνολογική υποδομή αναζήτησαν από τις ερευνητικές κοινότητες μια πιο μακροπρόθεσμη και με διάρκεια εξοπλιστική υποδομή. Έτσι, ξεκινώντας από το LTE με το 4G, συνεχίζεται ακόμα πιο ολοκληρωμένα αυτή η απαίτηση με το 5G.

#### 1.1.2 Απαιτήσεις συστημάτων 5ης γενιάς

Το 5G θα πρέπει να περιέχει πολύ υψηλές συχνότητες με τεράστιο εύρος ζώνης, πολλούς σταθμούς βάσης, ανοχή στην πυκνότητα συσκευών και έναν πρωτοφανή για τα μέχρι τώρα δεδομένα αριθμό κεραιών. Επίσης σε αντίθεση με τις προηγούμενες 4 γενιές, το 5G θα είναι πολύ πιο ολοκληρωμένο, καθώς θα συνδέει κάθε διεπαφή και το φάσμα από κοινού μεταξύ LTE και WiFi για την παροχή καθολικής κάλυψης υψηλού επιπέδου. Για να υλοποιηθούν όμως όλα αυτά, θα πρέπει να πληρούνται πολλαπλές απαιτήσεις οι οποίες έχουν προκλήσεις σε πολλά επίπεδα και θα πρέπει να υλοποιούνται ταυτόχρονα, καθώς διάφορες εφαρμογές (applications) θα απαιτούν διαφορετικές επιδόσεις από το δίκτυο με ορισμένες από αυτές, ακόμα και αν το δίκτυο είναι στην αιχμή του, να χρειάζεται να δεσμεύσουν ακόμα περισσότερους πόρους. Θα δούμε αυτές τις απαιτήσεις, όπως αυτές αναφέρονται παρακάτω.

- 1) **Ρυθμός δεδομένων (Data rates):** Η ανάγκη για την υποστήριξη τεράστιων ρυθμών δεδομένων είναι αναμφισβήτητη η κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη του 5G. Ο ρυθμός δεδομένων μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους και σε διάφορα σημεία του δικτύου όπου θα πρέπει ο καθένας από αυτούς να υλοποιεί τους στόχους του 5G:
  - a) **Συνολικός ρυθμός δεδομένων (Aggregate data rate):** Αναφέρεται στη συνολική ποσότητα των δεδομένων του δικτύου που μπορούν να εξυπηρετηθούν και μετρείται σε μονάδες των bits/s/area.
  - b) **Ακραίος ρυθμός δεδομένων (Edge rate, or 5% rate):** είναι ο χειρότερος ρυθμός δεδομένων που ο χρήστης λογικά αναμένει να λάβει, όταν βρίσκεται

εντός της εμβέλειας του δικτύου και γι' αυτόν τον λόγο είναι σημαντική παράμετρος.

- c) **Ρυθμός αιχμής- Μέγιστος ρυθμός (Peak rate)**: είναι η καλύτερη περίπτωση ρυθμού δεδομένων, κατά την οποία ο χρήστης μπορεί να ελπίζει ότι θα έχει υπό οποιαδήποτε διαμόρφωση του δικτύου. Ο ρυθμός αυτός, είναι περισσότερο εμπορικός, παρ' ότι σημαίνει πολλά για τους μηχανικούς. Όμως σε κάθε περίπτωση, κατά πάσα πιθανότητα θα είναι στην περιοχή των δεκάδων Gbps.
- 2) **Χρόνος Καθυστερήσης (Latency)**: Άλλη μια πρόκληση που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι οι χρονικές καθυστερήσεις. Οι τρέχουσες χρονικές καθυστερήσεις απόκρισης του 4G είναι της τάξεως των 15 ms και βασίζονται στο χρονικό πλαίσιο του 1 ms για την δέσμευση πόρων και την πρόσβαση. Παρ' όλο που αυτή η χρονική καθυστέρηση είναι επαρκής για τις περισσότερες τρέχουσες υπηρεσίες, προβλέπεται ότι για το 5G θα απαιτείται μικρότερος χρόνος καθυστέρησης της τάξεως του 1 ms, καθώς οι διάφορες εφαρμογές θα έχουν περισσότερες απαιτήσεις.
- 3) **Ενέργεια και κόστος**: Καθώς κινούμαστε προς το 5G, το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας, ιδανικά, θα πρέπει να μειώνεται ή τουλάχιστον δεν θα πρέπει να αυξάνεται ανά σύνδεση. Δεδομένου ότι οι ρυθμοί δεδομένων ανά σύνδεση που προσφέρονται θα αυξάνονται περίπου x100 φορές, σημαίνει ότι και τα Joules ανά bit θα χρειαστεί να μειωθούν τουλάχιστον x100 φορές.
- 4) **Συμβατότητα**: Μια μακροκυψέλη θα κληθεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα μικρούς αλλά και μεγάλους ρυθμούς δεδομένων, γεγονός που απαιτεί αλλαγές στο κέντρο και το υπάρχον πλάνο διαχείρισης του δικτύου. Επίσης ο ερχομός της καινούργιας γενιάς δικτύων δεν σηματοδοτεί την παύση της χρήσης των προηγούμενων. Τα συστήματα της καινούργιας γενιάς θα συνεργάζονται αρμονικά και με εκείνα των προηγούμενων γενεών(3G,LTE) ενσωματώνοντας και την τεχνολογία του WIFI. Το δίκτυο επιπλέον θα κληθεί να εξυπηρετήσει διάφορων ειδών συσκευές, ενώ περιμένουμε επίσης και την ανάπτυξη των απευθείας επικοινωνιών μεταξύ μηχανών (D2D Communications).
- 5) **Εύρος ζώνης (Bandwidth) και χωρητικότητα δικτύου (Network capacity)**: Ο χώρος των συχνοτήτων που μπορούν σήμερα να χρησιμοποιηθούν στις επικοινωνίες είναι πολύ περιορισμένος. Εξετάζονται λοιπόν τεχνολογίες στην πέμπτη γενιά δικτύων, όπου θα χρησιμοποιούνται και άλλες συχνότητες πέρα από τις υπάρχουσες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το φάσμα που χρησιμοποιείται και κατ' επέκταση, το εύρος ζώνης και την ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης επί τάπητος έχει τεθεί το ζήτημα της αναθεώρησης της τοπολογίας των υποδομών του δικτύου και δημιουργίας μικρότερων σε έκταση αλλά περισσότερων σε αριθμό κυψελών. Πιο συγκεκριμένα στόχος των δικτύων πέμπτης γενιάς είναι οι σταθμοί βάσης να απέχουν λιγότερο από 100m σχηματίζοντας πικοκυψέλες (picocells) ή να βρίσκονται ακόμα πιο κοντά, σε απόσταση τέτοια ώστε να μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας WIFI, σχηματίζοντας φεμτοκυψέλες (femtocells). Έτσι αυξάνεται και ο αριθμός που μπορούν να εξυπηρετήσουν μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Τα συστήματα 5ης γενιάς (5G) θα πρέπει να υποστηρίζουν τουλάχιστον κάποιες δεκάδες Tbps/km<sup>2</sup> σε πυκνότητα όγκου δεδομένων και εκατομμύρια συνδέσεις ανά km<sup>2</sup> ταυτόχρονα για να είναι αποτελεσματική η πρόσβαση και να εξυπηρετεί τις απαιτήσεις των συσκευών τόσο στο mobile internet, όσο και στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things). Γενικά τα συστήματα 5<sup>ης</sup> γενιάς θα πρέπει να επιτύχουν 1000

φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος από τον προκάτοχό του, 10 φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση, 10 φορές μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και 10 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση (δηλαδή, η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων να αγγίζει τα 10 Gbps/s για χαμηλή κινητικότητα και μέγιστη ταχύτητα δεδομένων το 1 Gbps/s για υψηλή κινητικότητα). Επίσης, ο μέσος όρος της αποδοτικότητας της κυψέλης θα πρέπει να είναι 25 φορές μεγαλύτερος.

## **1.2 Προτυποποίηση συστημάτων 5<sup>ης</sup> γενιάς**

### **1.2.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union)**

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι μια ειδικευμένη οργάνωση του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) μέσα στην οποία κυβερνήσεις και ιδιωτικός τομέας συντονίζουν την ίδρυση και λειτουργία δικτύων και υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών. Η ένωση είναι υπεύθυνη για τη ρύθμιση, την τυποποίηση, το συντονισμό και την ανάπτυξη των διεθνών τηλεπικοινωνιών καθώς και για την εναρμόνιση των εθνικών πολιτικών. Διανέμει το παγκόσμιο ραδιοφάσμα καθώς και τις τροχιές των δορυφόρων, αναπτύσσει τις τεχνικές προδιαγραφές οι οποίες εξασφαλίζουν στα δίκτυα απρόσκοπτη διασύνδεση. Η ένωση έχει τη δέσμευση να συνδέει όλους τους ανθρώπους του κόσμου όπου και αν ζουν και ανεξάρτητα από τις δυνατότητες τους, καθώς και να υποστηρίζει το θεμελιώδες δικαίωμα του καθενός να επικοινωνεί. Με τη βοήθεια των μελών της, παγκοσμίως, η ITU φέρνει τα οφέλη των σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνίας στους ανθρώπους με έναν αποτελεσματικό, ασφαλή, εύκολο και προσιτό τρόπο. Το δίκτυο των μελών της είναι αρκετά μεγάλο, έτσι εκτός από τα 193 κράτη μέλη, μέλη της είναι πολλά κορυφαία ακαδημαϊκά ιδρύματα και περίπου 700 εταιρείες τεχνολογίας.

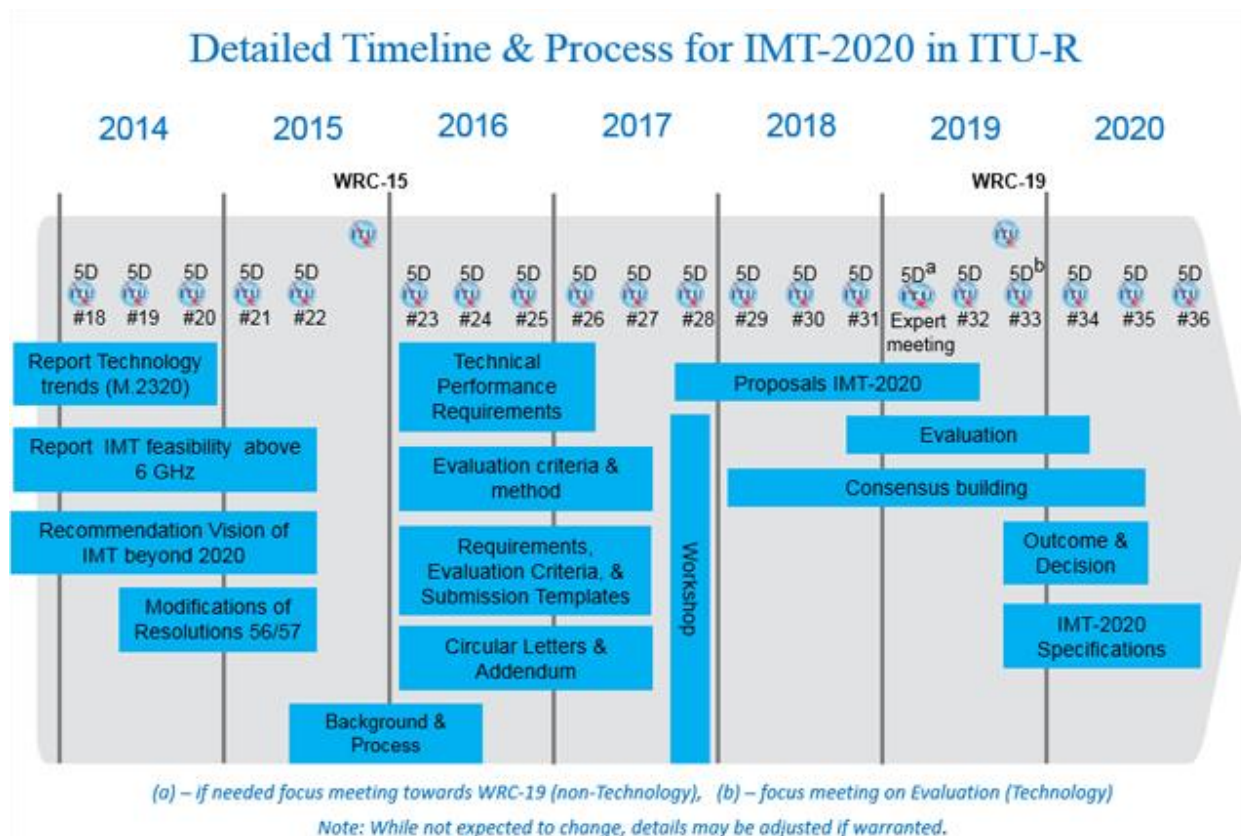
### **1.2.2 Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες – 2020 (International Mobile Telecommunications IMT - 2020)**

Στις αρχές του 2012 η ITU (International Telecommunication Union) ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη του προτύπου IMT – 2020 (International Mobile Telecommunications) θέτοντας τις βάσεις για ερευνητικές δραστηριότητες που θα χρειαζόταν για τα συστήματα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Έτσι, στόχος του προγράμματος είναι τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς (5G) να έρθουν σε επαφή με το κοινό μέχρι το 2020 φέρνοντας με αυτό τον τρόπο κοντά ανθρώπους, δεδομένα, εφαρμογές και μεταβάλλοντας τις πόλεις σε έξυπνα δικτυωμένα τηλεπικοινωνιακά περιβάλλοντα. Η ITU έχει μια πλούσια ιστορία στην ανάπτυξη προτύπων για τη διεπαφή του ραδιοφάσματος στις κινητές επικοινωνίες. Στο πλαίσιο δημιουργίας προτύπων για την IMT, δημιουργήθηκαν τα IMT-2000 και IMT-Advanced για τα συστήματα 3G και 4G αντίστοιχα. Το ίδιο αναμένεται να γίνει και με το IMT-2020 και τα 5G συστήματα. Έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιηθούν τα ίδια πλαίσια και διεργασίες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα IMT-2000 και IMT-Advanced ώστε να επωφεληθούμε από την προϋπάρχουσα δουλειά.

### **1.2.3 Παράμετροι ικανοποίησης IMT-2020**

Μέσα από τον ηγετικό ρόλο της ομάδας εργασίας 5D, ο τομέας ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU - Radiocommunication sector) έχει οριστικοποιήσει ένα χρονοδιάγραμμα για το IMT-2020. Η λεπτομερής έρευνα για τα βασικά στοιχεία της «5G» είναι ήδη σε εξέλιξη, χρησιμοποιώντας και πάλι την άκρως επιτυχημένη συνεργασία που έχει η ITU-R με την βιομηχανία των κινητών επικοινωνιών και το ευρύ φάσμα των ενδιαφερομένων στην κοινότητα «5G». Τον Σεπτέμβριο του 2015, η ITU-R οριστικοποίησε το «όραμα» της «5G» κινητής ευρυζωνικής συνδεδεμένης κοινωνίας. Αυτή η άποψη για το μέλλον της

κινητής τεχνολογίας θα συμβάλει στον καθορισμό της ημερήσιας διάταξης για την Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών (World Radiocommunication Conferences – WRCs) το 2019, όπου λαμβάνουν χώρα για την υποστήριξη της μελλοντικής ανάπτυξης των IMT. Τα WRCs γίνονται κάθε τρία με τέσσερα χρόνια. Στις αρμοδιότητές τους, συγκαταλέγονται, η αναθεώρηση των φασματικών ρυθμίσεων, όπου απαιτείται, και ο καθορισμός των τροχιών των δορυφόρων. Το χρονοδιάγραμμα της IMT-2020 για την τυποποίηση του 5G φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 1.



**Εικόνα 1 χρονοδιάγραμμα της IMT-2020**

Έτσι, η διεθνής κοινότητα των κινητών επικοινωνιών δουλεύει ασταμάτητα, ώστε έχοντας αναγνωρίσει πλέον τους παραμέτρους που πρέπει να ικανοποιηθούν για το IMT-2020, να δημιουργήσει πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών στο μέλλον. Στόχος λοιπόν είναι να προσφέρεται σε κάθε χρήστη του δικτύου[88].

- ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνεται στα 100 Mbit/s - 1 Gbit/s
- με τον μέγιστο ρυθμό να αγγίζει τα 20 Gbit/s
- επαρκής εξυπηρέτηση ακόμα και όταν κινείται μέχρι και με 500km/h
- καθυστέρηση 1ms.

Και κάθε κυψέλη:

- θα έχει 100 φορές καλύτερη απόδοση ενέργειας
- θα έχει 2 ή 3 ή 5 φορές καλύτερη φασματική αποδοτικότητα
- θα μπορεί να διεκπεραιώνει ποσότητα κίνησης έως και 10 Mbps/τετραγωνικό μέτρο.

### 1.2.4 Ρυθμίσεις Φάσματος

Εκτός από την ευέλικτη και αποτελεσματική χρήση όλου του διαθέσιμου φάσματος σε διαφορετικές λειτουργίες του δικτύου, η απελευθέρωση επιπλέον φάσματος θα πρέπει επίσης να υποστηρίξει αύξηση χιλιάδων φορών της δυναμικότητας έως το 2020 και ακόμη υψηλότερες αυξήσεις μέχρι το 2040. Διαμορφώνεται μια παγκόσμια γενική συμφωνία ότι απαιτείται από 500MHz με 1GHz εύρος ζώνης επιπλέον φάσματος, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει η διαθεσιμότητα ανά περιοχή και των τοπικών νόμων που διέπουν τη χρήση του φάσματος να εναρμονιστούν, ώστε η παγκόσμια κυκλοφορία να μην επηρεάζεται. Ενώ είναι μια μεγάλη πρόκληση η επίτευξη 10 Gb/s για κάθε τελικό χρήστη, υλοποιώντας το πώς όλες οι διαθέσιμες και νέες μπάντες θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό των συστημάτων 5G. Για να μεγιστοποιήσουμε επαρκώς την απόδοση φάσματος, η πρόσβαση σε όλο το φάσμα και η προγραμματιζόμενη τεχνολογία διασύνδεσης στον αέρα θα πρέπει να είναι ικανή να χαρτογραφεί τις απαιτήσεις σε υπηρεσίες, για να πετυχαίνει τους καλύτερους συνδυασμούς συχνότητας και εκμετάλλευσης φάσματος. Η συνεχής ολοκλήρωση των Δικτύων βασισμένα στο Λογισμικό (Software Defined Networks) και τεχνολογιών αρχιτεκτονικής νέφους (cloud) θα βοηθήσουν να συνειδητοποιήσουμε και θα διευκολύνουν την προσαρμογή στις απαιτήσεις τεχνολογιών δικτύου κινητής τηλεφωνίας, τα οποία θα εξασφαλίζουν καλύτερο QoS (Quality of Services), αύξηση δικτύου TVO (Total Value of Ownership), μείωση δικτύου TCO (Total Cost of Ownership) και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

### 1.2.5 Η εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογιών 5ης Γενιάς

Η νέα τεχνολογία 5G είναι πολύ σημαντική για την παγκόσμια υπολογιστική, αφού μία σειρά έργων έχει ανακοινωθεί για την έρευνα και τη δημιουργία των κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. Το 2008 δημιουργήθηκε το πρόγραμμα «5G συστήματα κινητών επικοινωνιών με βάση δέσμης πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση» σε συνεργασία με την ομάδα E & A της Νότιας Κορέας. Στην Ευρώπη, το 2008 ο Neelie Kroes, επίτροπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, διέταξε την δημιουργία κονδυλίου € 50.000.000 για την έρευνα της σύγχρονης τεχνολογίας, με σκοπό να παραδοθούν κινητά δίκτυα τεχνολογίας 5G το 2020. Ειδικότερα, το πρόγραμμα Metis 2020 δημιουργήθηκε από μία εταιρεία κατασκευής αυτοκινήτων και πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών και στοχεύει να επιτευχθεί παγκόσμια συναίνεση σχετικά με το μέλλον στο παγκόσμιο σύστημα κινητών και ασύρματων επικοινωνιών. Στη Metis, ο βασικός στόχος είναι να παραχθεί ένα ενιαίο σύστημα, που υποστηρίζει ακόμα και χίλιες φορές υψηλότερη φασματική απόδοση των κινητών επικοινωνιών σε σύγκριση με τις τρέχουσες υλοποιήσεις LTE, ενώ αντικειμενικός στόχος παραμένει η εξασφάλιση της έγκαιρης παγκόσμιας συναίνεσης σχετικά με αυτά τα συστήματα. Με άλλα λόγια, αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη συναίνεση μεταξύ όλων των ενδιαφερόμενων μερών, αρκετά πριν από τις παγκόσμιες δραστηριότητες τυποποίησης του προτύπου. Τον Οκτώβριο του 2012, το Πανεπιστήμιο του Ηνωμένου Βασιλείου του Surrey εξασφάλισε 35 εκατομμύρια λίρες, για το νέο ερευνητικό κέντρο 5G, η κοινή χρηματοδότηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ του ταμείου της βρετανικής κυβέρνησης Επενδύσεων (UKRPIF) και μιας κοινοπραξίας των βασικών διεθνών φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και παρόχων συμπεριλαμβανομένης των υποδομών των Huawei, Samsung, Telefonica Europe, Fujitsu Laboratories Europe, Rohde & Schwarz και Aircom International. Έτσι, θα προσφερθούν εγκαταστάσεις δοκιμών σε φορείς εκμετάλλευσης κινητών, οι οποίοι θα είναι πρόθυμοι να αναπτύξουν πρότυπο κινητών επικοινωνιών, που θα χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια και μικρότερο ραδιοφάσμα ενώ παράλληλα θα παρέχει ταχύτητα μεγαλύτερη από τις σημερινές ταχύτητες 4G. Αυτό το έργο αναμένεται να ολοκληρωθεί μέσα στην επόμενη δεκαετία. Επιπλέον, το 2013 ξεκίνησε ένα άλλο σημαντικό έργο, που ονομάζεται 5GrEEη και το



οποίο συνδέεται άρρηκτα με αυτό της Metis. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο νέο δίκτυο, το οποίο θα σχεδιαστεί να είναι πράσινο. Το τελευταίο επιδιώκει να αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές, έτσι ώστε η σύγχρονη τεχνολογία να στηρίζεται στις αρχές της ενεργειακής απόδοσης, της βιωσιμότητας και της οικονομίας. Ακόμα, το Φεβρουάριο του 2013, η ITU - R Ομάδα 5D ( 5D WP ) ξεκίνησε μελέτη για το IMT όραμα, από το 2020 και εξής, και σχετικά με τις μελλοντικές τάσεις της τεχνολογίας για επίγεια συστήματα IMT. Και οι δύο τομείς μελέτης στοχεύουν, στο να παρέχουν μια καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών τεχνικών πτυχών των κινητών επικοινωνιών προς τον ορισμό της επόμενης γενιάς κινητών. Επίσης, τον Μάιο του 2013, η Samsung Electronics δήλωσε ότι έχει αναπτύξει το πρώτο 5G σύστημα στον κόσμο. Η βασική τεχνολογία έχει μέγιστη ταχύτητα δεκάδων Gbps. Κατά τη δοκιμή, η μεταφορά ταχυτήτων για το 5G δίκτυο στέλνει δεδομένα 1.056 Gbps σε μια απόσταση μέχρι 2 χιλιόμετρα με τη χρήση ενός 8\*8 MIMO (Multiple Input and Multiple Output) συστήματος. Επιπρόσθετα, τον Ιούλιο του 2013, η Ινδία και το Ισραήλ συμφώνησαν να εργαστούν από κοινού για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G). Τον Νοέμβριο του 2013, η Huawei ανακοίνωσε τα σχέδιά της να επενδύσει τουλάχιστον 600 εκατομμύρια δολάρια για την επόμενη γενιά δικτύων 5G ικανή να αναπτύξει ταχύτητα 100 φορές πιο γρήγορη από ό, τι τα σύγχρονα δίκτυα LTE. Ένα από τα σημαντικότερα, αφού κατέχει πρωταρχικό ρόλο στην έρευνα για την πέμπτη γενιά είναι το PPP (Public-Private Partnership). Η αρχή της συζήτησης για τα νέα δίκτυα επικοινωνιών, με προσανατολισμό στο PPP έγινε τον Ιούλιο του 2012. Τότε, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή κάλεσε την ευρωπαϊκή βιομηχανία σε μια συζήτηση με θέμα τον προσανατολισμό προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση αυτής της νέας πρωτοβουλίας. Διοργανώθηκε Εβδομάδα Ανταγωνιστικότητας από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το Σεπτέμβριο του 2012. Αυτό το γεγονός υπήρξε ένα σημαντικό ορόσημο για τη συζήτηση των ερευνητικών προτεραιοτήτων για την Ευρώπη στο πλαίσιο της H2020 (Horizon 2020 – EU projects). Η ουσιαστική ανάπτυξη της επίσημης πρότασης, όμως, ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2013. Η πρόκληση, που τέθηκε για τη μελέτη και τη δημιουργία του 5G, ήταν η αφετηρία για μια ομάδα των εταιρειών του κλάδου και των σημαντικότερων κέντρων της ευρωπαϊκής Έρευνας & Ανάπτυξης (E&A) για την ανάπτυξη μιας πρότασης για την 5G υποδομή, τονίζοντας σαφώς, ότι το πρόγραμμα καλύπτει πολλά περισσότερα θέματα από μια νέα γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Η πρόταση για τις 5G υποδομές, που εκπονήθηκε κατά το πρώτο εξάμηνο του 2013 και υποβλήθηκε προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιούνιο του 2013, ακολούθησε με μια βελτιωμένη έκδοση, τον Σεπτέμβριο του 2013. Τα βασικά τμήματα, τα οποία διακρίνονται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι τα εξής:

- Συνολικά μακροπρόθεσμο όραμα των στρατηγικών και των ειδικών στόχων του PPP (τμήμα 1 ),
- Η έρευνα και η καινοτομία της στρατηγικής, ιδίως στο πεδίο εφαρμογής της E&A και της καινοτομίας προκλήσεων (τμήμα 2 )
- Αναμενόμενες επιπτώσεις ( τμήμα 3 ),
- Η διακυβέρνηση του προγράμματος (τμήμα 4 ).

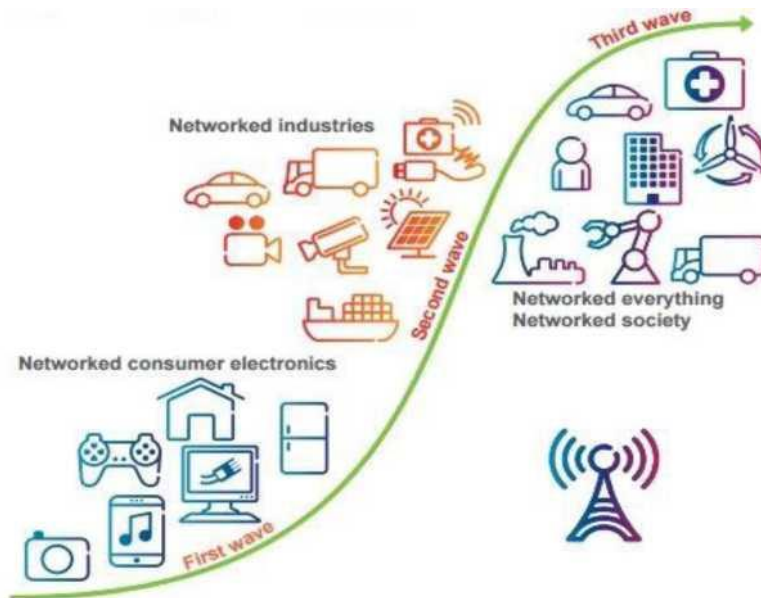
Το πρόγραμμα αναμένεται να προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για την διεθνή 5G υποδομή επικοινωνιών της επόμενης δεκαετίας. Οι βασικές προκλήσεις υψηλού επιπέδου θα πρέπει να παρέχονται από το πρότυπο και περιλαμβάνουν ικανότητα παροχής 1000 φορές μεγαλύτερη της ασύρματης περιοχής και πιο ποικίλες δυνατότητες των υπηρεσιών, σε σύγκριση με το 2010. Εξοικονόμηση έως και 90 % της ενέργειας, ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Η κύρια έμφαση πρέπει να δοθεί στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, όπου κυριαρχεί η κατανάλωση ενέργειας, η οποία προέρχεται από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Μείωση του μέσου όρου του χρονικού κύκλου της υπηρεσίας μεταβάλλεται από 90 ώρες σε 90 λεπτά. Δημιουργία

ενός ασφαλούς και αξιόπιστου Internet για την παροχή κάθε είδους υπηρεσιών. Διευκόλυνση πολύ πυκνών αναπτύξεων ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας, για τη σύνδεση πάνω από 7 τρισεκατομμύρια ασύρματες συσκευές, που είναι δυνατό να εξυπηρετήσουν πάνω από 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους. Ενεργοποίηση προηγμένου ελέγχου για την προστασία της ιδιωτικής ζωής. Τον Δεκέμβριο του 2013, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέγραψε τη σύμβαση ρύθμισης για το PPP με τους εκπροσώπους της ένωσης υποδομών για το 5G, η οποία περιγράφει την αμοιβαία δέσμευση των δύο μερών για την εταιρική σχέση όσον αφορά τις φιλοδοξίες υψηλού επιπέδου, τους βασικούς δείκτες απόδοσης και τον προβλεπόμενο και προσυπολογιζόμενο κονδύλιο για την οικονομική περίοδο 2014 έως 2020. Εφόσον, λοιπόν, η πρόταση έχει υποβληθεί και εγκριθεί μέσα στο έτος 2013 αναμένεται ότι θα ξεκινήσει η ανάπτυξη και η μελέτη μέσα στο 2014, έτσι ώστε να υπάρξει συνέπεια μεταξύ των δεσμεύσεων για τη νέα μορφή κινητής επικοινωνίας, που προβλέπει ότι θα είναι σε κυκλοφορία και ευρεία χρήση το 2020. Από την άλλη μεριά, για την Ευρώπη θεωρείται εξίσου σημαντικό να κερδίσει το χαμένο έδαφος, που άλλες χώρες έχουν πραγματοποιήσει και καταφέρει με τις προηγούμενες γενιές τηλεπικοινωνιών. Η απάντηση αν θα επιτευχθεί ο ευρωπαϊκός στόχος θα έρθει μέσα στα επόμενα χρόνια. Η εταιρία Samsung έχει αρχίσει ήδη να δημιουργεί 5G δίκτυα τα οποία όμως θα ολοκληρωθούν έως το 2017. Μετά την ολοκλήρωσή τους θα χρειαστεί να δοκιμαστούν για περίπου τρία χρόνια και έπειτα εφόσον είναι έτοιμα για ευρεία χρήση το 2020 θα διατεθούν στο εμπόριο. Γι' αυτόν ακριβώς τον λόγο η κυβέρνηση της Νότιας Κορέας αποφάσισε να διαθέσει 1,2 δισεκατομμύρια ευρώ για την δημιουργία των δικτύων αυτών. Στην εμπορική έκθεση CeBIT η οποία πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία και συγκεκριμένα στο Ανόβερο επικυρώθηκε η συμφωνία μεταξύ Γερμανίας και Μεγάλης Βρετανίας για την μελέτη και την δημιουργία 5G δικτύου. Ο David Cameron, ανακοίνωσε την χρηματοδότηση της έρευνας με 73 εκατομμύρια λίρες. Για την έρευνα και την υλοποίηση του δικτύου συνεργάζονται το πανεπιστήμιο της Δρέσδης, το πανεπιστήμιο King's College του Λονδίνου και το πανεπιστήμιο του Surrey.

### 1.3 Προκλήσεις

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των έξυπνων κινητών συσκευών, του όγκου δεδομένων και της αύξησης του ρυθμού διακίνησης δεδομένων, μας υποχρεώνουν να δούμε υπό διαφορετικό πρίσμα τα 5G κυψελωτά δίκτυα. Τα 5G δίκτυα με μια πρώτη ανάγνωση θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τρία βασικά γνωρίσματα: α) αδιάκοπη συνδεσιμότητα, β) ελάχιστο χρόνο καθυστέρησης και γ) πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Υπολογίζεται ότι το 2020 θα έχουμε περισσότερες από 50 δισεκατομμύρια συσκευές οι οποίες σκοπεύουν να χρησιμοποιούν τα κυψελωτά δίκτυα για τη διασύνδεσή τους. Αυτό θα αποτελέσει έκρηξη στον όγκο των διακινούμενων δεδομένων (data traffic) και θα οδηγήσει σε κατάρρευση το δίκτυο, αν παραμείνει με τη σημερινή του μορφή. Το παραπάνω γεγονός θα μας οδηγήσει στο να εξετάσουμε διαφορετικές και προσανατολισμένες στο λογισμικό (software) τεχνικές για να υλοποιήσουμε τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ανάγκη αυτή φαίνεται και από το γεγονός ότι το 5G δεν θα είναι απλά μια επέκταση του 4G όπως οι προηγούμενες γενιές των κυψελωτών δικτύων, αλλά θα εισαγάγει πολλές νέες τεχνολογίες όπως π.χ. NFV (Network Function Virtualization), SDN (Software Defined Network), επικοινωνία βασισμένη σε τεχνολογίες νέφους (cloud-based communication) κ.α. Η εποχή του 5G αναμένεται να φέρει επαναστατικές αλλαγές στον κόσμο των επικοινωνιών, υποστηρίζοντας πάρα πολύ υψηλές ταχύτητες, πάρα πολύ μικρές καθυστερήσεις, αποδοτική εκμετάλλευση τόσο του φάσματος, όσο και της ενέργειας του δικτύου, ενώ θα κάνει πραγματικότητα και το λεγόμενο IoT (Internet of Things). Το IoT συνδέει τις έξυπνες συσκευές στο Internet. Μπορεί να εγκαθιδρύσει την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ των συσκευών και πηγαινεί την διασύνδεση των συσκευών σε άλλο επίπεδο. Η

Cisco εκτιμά, ότι το IoT θα αποτελείται από 50 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο Internet έως το 2020, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2 που ακολουθεί. Με άλλα λόγια βλέπουμε το 5G ως το μέσο το οποίο θα εξασφαλίσει ένα καθολικό περιβάλλον επικοινωνίας και θα ανοίξει το δρόμο για την ενασχόληση με νέες καινοτομίες στο χώρο των μεταφορών, της ενέργειας και των αυτοματισμών. Αυτά θα πραγματοποιηθούν, σχεδιάζοντας τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς με δυνατότητες όπως ευελιξία (flexibility), προγραμματισιμότητα (programmability), μειωμένα κεφαλαιακά και λειτουργικά κόστη, καθώς και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



**Εικόνα 2 Τα τρία «κύματα» των μελλοντικά συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο 5G**

Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με τα 4G κυψελωτά δίκτυα, τα 5G δίκτυα, σύμφωνα με τον οργανισμό 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G-PPP) θα πρέπει να ικανοποιούν:

1. 10-100 φορές μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών.
2. 1000 φορές υψηλότερο εύρος ζώνης ανά περιοχή.
3. 10-100 φορές υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
4. Χρόνο καθυστέρησης 1 millisecond.
5. 99.99% διαθεσιμότητα δικτύου.
6. 100% κάλυψη.
7. 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιήσουν τα 5G κυψελωτά δίκτυα είναι μεγάλες. Η ικανοποίησή τους από τα 4G δίκτυα καθίσταται αδύνατη αλλά ούτε και μια επέκταση του δικτύου -κατά τα πρότυπα των προηγούμενων γενεών- είναι ικανή για την ικανοποίηση αυτών των στόχων. Καταρχάς, δεν υποστηρίζονται «εκρήξεις» (bursts) κατά τη διακίνηση δεδομένων. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές οι οποίες κατά την εκτέλεσή τους μπορούν να στείλουν σήμα ζητώντας ένα μεγάλο αριθμό πόρων (π.χ. ρυθμό μετάδοσης) για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Όταν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο κατά τη μετάδοση, έχουμε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας της συσκευής του χρήστη και επίσης λόγω της έκρηξης υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθούν προβλήματα στο βασικό δίκτυο. Επομένως το γεγονός ότι δεν υπάρχει πρόβλεψη στη σηματοδότηση ελέγχου ανάλογα με την κίνηση που δημιουργείται και η απουσία μηχανισμού για δυναμική δέσμευση πόρων ανάλογα με την κίνηση αποτελεί ένα πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του 5G. Δεν υπάρχει βέλτιστη χρησιμοποίηση της επεξεργαστικής ισχύος του σταθμού βάσης. Στα

σημερινά κυψελωτά δίκτυα, η επεξεργαστική ισχύς του σταθμού βάσης χρησιμοποιείται μόνο από τους χρήστες που συνδέονται με αυτόν και διαμοιράζεται ομοιόμορφα σε αυτούς. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει διακύμανση στην κίνηση που ανατίθεται στους σταθμούς βάσης π.χ. σε κάποιες ώρες τις μέρας κάποιοι σταθμοί μπορεί να έχουν μεγάλη κίνηση ενώ κάποιοι άλλοι να παρουσιάζουν μηδενική κίνηση. Ωστόσο, ανεξαρτήτως της κίνησης σε ένα σταθμό, οι σταθμοί καταναλώνουν το ίδιο ποσό ενέργειας πράγμα το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος δικτύου. Επιπλέον τα συμβατικά κυψελωτά δίκτυα, χρησιμοποιούν δύο ξεχωριστά κανάλια, ένα για ανερχόμενη σύνδεση (uplink) όπου υπάρχει μετάδοση από το χρήστη στο σταθμό βάσης και ένα για κατερχόμενη σύνδεση (downlink) που πραγματοποιείται το αντίστροφο. Ωστόσο η χρήση δύο διαφορετικών καναλιών για έναν χρήστη δεν αποτελεί βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης μπάντας συχνοτήτων, ενώ το πρόβλημα με την έλλειψη διαθέσιμου φάσματος στα κυψελωτά δίκτυα είναι καιρίο. Από την άλλη, αν και τα δύο κανάλια λειτουργούν στην ίδια συχνότητα τότε υπάρχει το πρόβλημα των παρεμβολών, πράγμα το οποίο παρεμποδίζει την εγκατάσταση πολλών σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή, η οποία σκοπό έχει να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου. Ακόμη και στα σημερινά δίκτυα το διαθέσιμο φάσμα δεν χρησιμοποιείται με το βέλτιστο τρόπο. Επομένως, είναι απαραίτητο για το 5G να υλοποιήσουμε μια μέθοδο πρόσβασης η οποία θα λαμβάνει υπόψη την βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η διεύρυνση του φάσματος πάνω από τα 3 GHz. Τέλος, στα 4G δίκτυα, για να αποκτήσει ένας χρήστης πρόσβαση στον «καλύτερο» διαθέσιμο σταθμό βάσης, απαιτούνται μερικές εκατοντάδες milliseconds, γεγονός το οποίο δεν εξυπηρετεί το μηδενικό χρόνο καθυστέρησης που θέλουμε να πετύχουμε στο 5G. Τα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα, προορίζονται για να τρέχουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες με διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (όσο αφορά το εύρος ζώνης, τον χρόνο καθυστέρησης, τα χαμένα πακέτα). Για το λόγο αυτό, τα 5G δίκτυα πρέπει να σχεδιαστούν με προοπτική για μηδενικό χρόνο καθυστέρησης στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό.

## 1.4 Χρηματοδοτούμενα ερευνητικά έργα για την ανάπτυξη συστημάτων 5ης γενιάς

### 1.4.1 SPEED-5G (quality of Service Provision and capacity Expansion through Extended-DSA for 5G)

Ο στόχος του SPEED-5G είναι η έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών που αντιμετωπίζουν τις γνωστές προκλήσεις της προβλεπόμενης ανάπτυξης στον τομέα των κινητών επικοινωνιών. Μια σημαντική πρόκληση είναι το κόστος υποδομών και εγκατάστασης. Σήμερα, η έλλειψη δυναμικού ελέγχου στους πόρους του ασύρματου δικτύου, οδηγεί σε μη ισορροπημένη χρήση φάσματος και συμφόρηση στη χωρητικότητα. Αυτά τα ζητήματα εξετάζονται από το SPEED-5G και επιλύονται μέσω extended DSA (Dynamic Spectrum Access), η οποία αποτελεί διαχείριση πόρων με τρεις βαθμούς ελευθερίας: αύξηση της πυκνότητας σταθμών βάσης, ορθολογική κατανομή της κυκλοφορίας σε ετερογενείς ασύρματες τεχνολογίες, και καλύτερη εξισορρόπηση της κίνησης σε όλο το διαθέσιμο φάσμα. Το έργο θα επικεντρωθεί σε δύο μεγάλες καινοτομίες: τεχνικές διαχείρισης πόρων μεταξύ τεχνολογικών «σιλό», και τεχνολογίες πρόσβασης μέσου (Media Access Control) για την αντιμετώπιση της αύξησης της πυκνότητας. Στα πλαίσια του έργου θα γίνει αξιοποίηση ευέλικτων τεχνολογιών φυσικής μετάδοσης που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 5G.

### 1.4.2 CHARISMA: Converged Heterogeneous Advanced 5G Cloud-RAN Architecture for Intelligent and Secure Media Access

Το έργο CHARISMA εστιάζει σε δυο βασικές ερευνητικές διαστάσεις των μελλοντικών επικοινωνιακών δικτύων: στην ασφάλεια και στη χαμηλή καθυστέρηση. Προς την κατεύθυνση αυτή, το έργο πραγματεύεται καινοτόμα σχήματα end-to-end και διαστρωματικά (cross-layer) ασφάλειας, ασφάλειας στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer Security) και αποκεντρωμένης αποφόρτωσης (offloading), κοντά στους τελικούς χρήστες. Επιπλέον, κάνοντας χρήση λύσεων ασύρματης πρόσβασης 10G (μέσω mm-wave/60-GHz) και 100G (μέσω οπτικών OFDM-PON), στο έργο θα αναπτυχθούν μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης των δικτύων, σε σύμπτωση με τους στόχους που έχουν τεθεί για τα 5G δίκτυα και πιο συγκεκριμένα επίτευξη μετάδοσης όγκου δεδομένων κατά 1000 φορές υψηλότερου από τα 4G δίκτυα υπό την παρουσία 10-100 φορές περισσότερων κινητών συσκευών, εν μέσω μειωμένης καθυστέρησης στις συνδέσεις οπισθόζευξης (back-hauling) και εμπροσθόζευξης (front-hauling). VirtuWind: Virtual and programmable industrial network prototype deployed in operational Wind park. Οι αρχιτεκτονικές SDN και NFV είχαν προταθεί αρχικά για την αποτελεσματική διαχείριση των δικτύων νέφους και αρχίζουν να αξιοποιούνται στα δίκτυα των ISPs (Internet Service Providers). Δεν είναι σαφές ωστόσο, πώς οι αρχιτεκτονικές αυτές επηρεάζουν γενικά το QoS των δικτύων και ειδικότερα τα βιομηχανικά δίκτυα, π.χ. εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου. Το VirtuWind στοχεύει στην εισαγωγή των αρχιτεκτονικών SDN και NFV σε τέτοια δίκτυα, για να επιτευχθεί ντετερμινιστική (ή σχεδόν-ντετερμινιστική) απόδοση για εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου. Ένα πρωτότυπο σύστημα θα αναπτυχθεί και θα δοκιμαστεί σε ένα αιολικό πάρκο, ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των βιομηχανικών δικτύων. Η Intracom Telecom επιβλέπει το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος που θα εξασφαλίζει τον έλεγχο του αιολικού πάρκου μεταξύ πολλών δικτύων ISPs.

### 1.4.3 5G MiEdge: Millimeter-wave Edge cloud as an enabler for 5G ecosystem

Τα προβλήματα που αφορούν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης mmWave στα 5G δίκτυα για να επιτύχουμε eMBB (enhanced Mobile Broadband) υπηρεσίες είναι αρκετά, ενώ συγχρόνως η τεχνολογία MEC (Mobile Edge Computing) έχει τραβήξει πολύ προσοχή ως η τεχνολογία κλειδί για να αναπτυχθούν εφαρμογές με μικρό χρόνο καθυστέρησης καθορίζοντας χώρο και υπολογιστικούς πόρους στην διάθεση του δικτύου και παρακάμπτοντας την περιορισμένη χωρητικότητα των δικτύων οπισθόζευξης.

Σε αυτό το πρόγραμμα τα mmWave και η MEC συνδυάζονται ως ένα ιδανικό δίδυμο τεχνολογιών που καλύπτει το ένα τις αδυναμίες του άλλου. Το νέο σύστημα καλείται MiEdge. Για να υλοποιηθεί το MiEdge, ο δεύτερος στόχος του προγράμματος είναι να αναπτυχθεί ένα νέο επίπεδο ελέγχου δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στο οποίο ένα πλαίσιο πληροφοριών (τοποθεσία, κυκλοφορία, κατηγορίες εφαρμογών κλπ) των χρηστών συλλέγονται και υφίστανται επεξεργασία για την πρόβλεψη των αιτήσεων κυκλοφορίας των χρηστών, προκειμένου να καταστεί δυνατή η δυναμική κατανομή των πόρων. Αυτό το επίπεδο ελέγχου ονομάζεται ρευστό RAN C-επίπεδο, δεδομένου ότι οι υπηρεσίες και οι συνδέσεις μπορούν να ακολουθήσουν τους χρήστες ευέλικτα όπως ένα ρευστό. Τέλος, οι χρήστες ή οι πάροχοι εφαρμογών να χρησιμοποιούν το MiEdge για να δημιουργήσουν ένα χρήστο ή εφαρμογό -κεντρικό δίκτυο 5G που υποστηρίζει τόσο eMBB και εφαρμογές με χαμηλό χρόνο καθυστέρησης. Το έργο θα συμβάλει στην τυποποίηση της πρόσβασης mmWave και ρευστών RAN C-επιπέδων στο 3GPP και το IEEE. Στο τέλος, το έργο θα επιδείξει 5G δοκιμές στην πόλη του Βερολίνου και το 2020 στο Ολυμπιακό Στάδιο του Τόκιο.

### 1.4.4 5G-Crosshaul: The 5G Integrated fronthaul/backhaul

Η κυκλοφορία κινητών δεδομένων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 11 φορές μεταξύ 2013 και 2018. Τα δίκτυα 5G που θα εξυπηρετούν αυτόν τον τεράστιο όγκο δεδομένων θα απαιτούν λύσεις εμπροσθόζευξης και οπισθόζευξης μεταξύ του RAN και του πυρήνα ικανές να αντιμετωπίσουν αυτό το αυξημένο κυκλοφοριακό φορτίο, εκπληρώνοντας αυτές τις νέες απαιτήσεις με οικονομικά αποδοτικά τρόπο.

Το έργο 5G-Crosshaul στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου 5G δικτύου μεταφορών εμπροσθόζευξης και οπισθόζευξης που επιτρέπει μια ευέλικτη και καθορισμένη από το λογισμικό αναδιαμόρφωση όλων των στοιχείων δικτύωσης σε ένα πολλαπλής μίσθωσης και προσανατολισμένο στην παροχή υπηρεσιών ενοποιημένο περιβάλλον διαχείρισης. Το δίκτυο μεταφορών 5G-Crosshaul θα αποτελείται από μεταγωγείς υψηλής χωρητικότητας και ετερογενής μετάδοσης συνδέσεις (π.χ., ίνες ή ασύρματα οπτικά, χαλκό υψηλής χωρητικότητας, mmWave), μονάδες επεξεργασίας τεχνολογίας σύννεφου και σημεία- παρουσίας των βασικών δικτύων ενός ή περισσότερων παρόχων υπηρεσιών. Αυτό το δίκτυο με ευελιξία θα διασυνδέει κατανομημένη ασύρματη πρόσβαση 5G και βασικές λειτουργίες δικτύου, που θα φιλοξενούνται σε σύννεφα κόμβους μέσα στο δίκτυο. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με την υλοποίηση: 1) μιας υποδομής ελέγχου χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο, αφηρημένο μοντέλο του δικτύου για την ολοκλήρωση του επιπέδου ελέγχου (Υποδομή 5G-Crosshaul XCI), 2) ενός ενοποιημένου επιπέδου δεδομένων που περιλαμβάνει καινοτόμες τεχνολογίες μετάδοσης υψηλής χωρητικότητας και νέων αρχιτεκτονικών μεταγωγείς με καθορισμένο χρόνο καθυστέρησης (5G-Crosshaul XFE).

### 1.4.5 MassLOC: Massive MIMO Localization for 5G Networks

Τα δίκτυα δεδομένων 5G υπόσχονται σημαντικά κέρδη από την άποψη ότι προσφέρουν την δυνατότητα να φιλοξενήσουν περισσότερους χρήστες σε υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων με την καλύτερη αξιοπιστία, ενώ καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Για να

πληρούν μια τέτοια πρόκληση τα συστήματα massive MIMO έχουν προταθεί για να επιτρέψουν βελτίωση μεγέθους στην φασματική και την ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας σχετικά απλή επεξεργασία. Η βασική ιδέα είναι να εξοπλίσουμε τους σταθμούς βάσης κυψελών με ορθογώνιες συστοιχίες, κάθε μία από αυτές να αποτελείται από πολύ μεγάλο αριθμό κεραιών. Οι επιπλέον κεραιές βοηθάνε την εστίαση της ενέργειας σε όλο και μικρότερες περιοχές του χώρου πράγμα που θα φέρει τεράστιες βελτιώσεις στην απόδοση και την εκπνευόμενη ενεργειακή απόδοση. Άλλα οφέλη περιλαμβάνουν μειωμένο χρόνο καθυστέρησης, απλούστευση του στρώματος ελέγχου πρόσβασης μέσου, και την δυσκολία να πραγματοποιηθούν εκ προθέσεως παρεμβολών. Ένα ανεξερεύνητο και ακούσιο επακόλουθο της χρήσης ενός πολύ μεγάλου αριθμού των κεραιών σε συνδυασμό με υψηλές συχνότητες φορέα, είναι η ικανότητα να εντοπίσουμε τη θέση του χρήστη με υψηλή ακρίβεια. Αυτό το πρόγραμμα στοχεύει να αναπτύξει αρκετά αναλυτικά εργαλεία προκειμένου να διαμορφώσει και να σχεδιάσει συστήματα massive MIMO-OFDM από την άποψη του εντοπισμού, και να εξασφαλίσει την εγκυρότητα του μέσα από πειραματικά σύνολα δεδομένων. Τελικά, ο ευρύς στόχος του προγράμματος είναι να συλλάβει μια ιδέα- έρευνα της μηχανικής, και στη συνέχεια να μεταβεί σε καινοτόμες εφαρμογές που μπορούν να αναπαραχθούν σε πραγματικό κόσμο στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

#### 1.4.6 5G-AURA

Το όραμα για τα μελλοντικά 5G δίκτυα περιλαμβάνει ένα ετερογενές τοπίο επικοινωνίας στο οποίο οι υπάρχοντες RATs θα επιτυγχάνονται με αναπτυσσόμενες ασύρματες τεχνολογίες και συστήματα, αρχιτεκτονικές δικτύου σχεδιασμένες για λογισμικό και υπηρεσίες σύννεφου. Ο κύριος στόχος του έργου 5G-AURA είναι η αποτελεσματική αξιοποίηση του δυναμικού όλων αυτών των καινοτόμων και ετερογενών χαρακτηριστικών και η παροχή ενός προγραμματιζόμενου αρχιτεκτονικού πλαισίου δικτύου πολλαπλής-μίσθωσης. Αντί να ασχοληθεί ξεχωριστά για τη βελτιστοποίηση των διαφόρων τεχνολογικών και αρχιτεκτονικών στοιχείων, οι προσπάθειές του προγράμματος επικεντρώνουν στην παροχή ενός ενοποιητικού πλαισίου που θα στηρίξει τη συνύπαρξη και τον συντονισμό των τεχνολογιών δικτύωσης, λογισμικού και σύννεφου, τη διασφάλιση προγραμματισμού δικτύου και την αποτελεσματική ενορχήστρωση των πόρων, την ελαχιστοποίηση του εναέριου ελέγχου και σηματοδότησης, την υποστήριξη πολλαπλής-μίσθωσης, και να προωθήσει την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων για τις αναδυόμενες υπηρεσίες. Για την επίτευξη αυτών των στόχων αποτελεσματικά, το 5G-AURA έχει εντοπίσει 12 ειδικές ερευνητικές προκλήσεις που έχουν χαρτογραφηθεί σε 14 επιμέρους έργα και θα πραγματοποιηθούν από 14 ESRs (Early Stage Researcher). Η κοινοπραξία του έργου, που αποτελείται από τέσσερα ακαδημαϊκά ιδρύματα και τέσσερις βιομηχανικούς εταίρους, διαθέτει την απαραίτητη τεχνογνωσία και τις διαθέσιμες υποδομές για να σχηματίσει ένα δίκτυο κατάρτισης υψηλής ποιότητας σε πολλούς κλάδους, τομείς και χώρες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι 5G είναι σήμερα σε μια πρώιμη ανάπτυξη και υπάρχουν πολλά ανοιχτά ζητήματα σχετικά με τα πρωτόκολλα 5G, αρχιτεκτονικές δικτύων και των τεχνολογιών και των προσπαθειών τυποποίησης, η στιγμή που αναπτύσσεται το 5G-AURA είναι τέλεια, και το έργο έχει μεγάλες δυνατότητες να έχει σημαντική επίπτωση στην ακαδημαϊκό χώρο και της βιομηχανίας και την ενίσχυση της ευρωπαϊκής ικανότητας καινοτομίας από την άποψη των τεχνικών εισφορών, της διατομεακής κατάρτισης των επιστημόνων και των επαγγελματικών και νέων επιχειρηματικών ευκαιριών.

### 1.4.7 WiVi-2020

Το WiVi-2020 έχει ως στόχο να αναπτύξει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο και τους αντίστοιχους μηχανισμούς για την επόμενη γενιά των κινητών / ασύρματων επικοινωνιών. Ο στόχος είναι να διερευνηθεί η ανάπτυξη των ετερογενών RAT χρησιμοποιώντας τις προόδους του SDN με συγκεκριμένο σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεων των διαφοροποιημένων υπηρεσιών υιοθετώντας την έννοια της καθορισμένης από εφαρμογές δικτύωσης. Η ανάγκη για την πρόοδο προς την κατεύθυνση αυτή απαιτεί άνοδο των προσπαθειών έρευνας και ανάπτυξης, με ιδιαίτερη έμφαση στις βιομηχανικές απαιτήσεις που ανοίγουν το δρόμο προς το 5G. Το WiVi-2020 κινητοποιεί μια κοινή βιομηχανία-ομάδα ακαδημαϊκών προς την εκπαίδευση της επόμενης γενιάς των ερευνητών (ή "οραματιστών") σε διεπιστημονικές περιοχές, θέτοντας τα θεμέλια για το μέλλον των κινητών επικοινωνιών. Σε αυτό το πλαίσιο, το WiVi-2020 θα εξελιχθεί από την παραδοσιακά εξειδικευμένη εκπαίδευση σε μια στενή περιοχή υιοθετώντας ένα ισχυρό διδακτορικό πρόγραμμα έρευνας και εκπαίδευσης με την άμεση συμμετοχή της βιομηχανίας για την καλύτερη κάλυψη των αναγκών του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Με αυτό τον τρόπο, το WiVi-2020 θα δημιουργήσει ερευνητές που έχουν υψηλή εξειδίκευση στην παραγωγή νέων βασικών γνώσεων, με την ικανότητα τόνωσης της επιχειρηματικότητας, της δημιουργικότητας και της καινοτομίας.

### 1.4.8 SPOTLIGHT

Η διαχείριση της πρωτοφανής ζήτησης κυκλοφορίας δεδομένων, διαφορετικών προμηθευτών, φορέων και ερευνητικών προγραμμάτων το SPOTLIGHT έχει ως στόχο να αναπτύξει RATs που ενισχύουν την χωρητικότητα του φυσικού στρώματος σύνδεσης, την χρησιμοποίηση mmWave, ή την περαιτέρω πύκνωση του δικτύου. Αξιοσημείωτα βήματα έχουν γίνει επίσης για την μετατόπιση της βασικής ζώνης από την (επί του παρόντος) UDN σε μια κεντρική τοποθεσία όπου θα πραγματοποιηθεί συντονισμένη διαχείριση των πόρων. Παρ' όλα αυτά, το σημερινό οικοσύστημα κινητών δικτύων περιλαμβάνει πολύ ετερογενή, με επικάλυψη και πλήρως απομονωμένα (σε λειτουργία) σημεία προσάρτησης που εξακολουθούν να χειρίζονται ανεξάρτητα τις περισσότερες από τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την επικοινωνία δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Με στόχο να ανταποκριθεί και να ξεπεράσει τις απαιτήσεις το δίκτυο δεδομένων κινητής τηλεφωνίας 5G, στο SPOTLIGHT θα δημιουργήσουν ένα πλήρως ολοκληρωμένο και διεπιστημονικό δίκτυο από ESRs , που θα αναλύσει, σχεδιάσει και τη βελτιστοποιήσει την απόδοση μιας νέας αρχιτεκτονικής δικτύου κινητής τηλεφωνίας: η αρχιτεκτονική SPOTLIGHT. Αυτή η αρχιτεκτονική υπόσχεται να σπάσει τους ισχύοντες περιορισμούς απόδοσης στο χαλαρά διασυνδεδεμένο, κατακερματισμένο σε πότους και απομονωμένο οικοσύστημα δικτύου κινητής τηλεφωνίας, με τη μετατροπή των σημερινών ετερόκλητων και πολυεπίπεδων RATs σε ένα συνασπισμό μαζικά διανεμημένων υποσυστημάτων κεραίας που είναι βέλτιστα εννορηστροωμένος από ένα δίκτυο πυρήνα που στηρίζεται σε τεχνολογία σύννεφου. Πρωταρχικός στόχος του προγράμματος είναι να υποστηρίξει, για πρώτη φορά αυτο-συμπεριλαμβανομένων αλλά και εξαιρετικά αξιόπιστων ραδιοεπικοινωνιών ως την άκρη του δικτύου. Για την περαιτέρω μείωση του χρόνου απόκρισης και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου, όλες οι λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τις κινητές επικοινωνίες θα είναι αντικείμενο i) μαζικού παραλληλισμού σε πλατφόρμες σύννεφο στον πυρήνα του δικτύου και ii) μεγάλης ανάλυσης των δεδομένων που εκτελείται σε μια εικονική «πισίνα» διαμοιραζόμενης ενέργειας, υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων στο δίκτυο.



### 1.4.9 5G Wireless

Το 5G Wireless είναι το πρώτο ολοκληρωμένο και διεπιστημονικό δίκτυο ESRs που εκπαιδεύονται μέσω της έρευνας και επόπτες απόλυτα αφοσιωμένους στην επανασχεδίαση των αρχών του τωρινού δικτύου κινητής στοχεύοντας να γίνει πραγματικότητα το 5G. Το πρόγραμμα έχει στόχο να ορίσει και να βελτιστοποιήσει τις νέες αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες, έτσι οδηγείται σε μια εκ νέου διαμόρφωση των αρχών της κινητής δικτύωσης, της τοπολογίας δικτύων, των τεχνολογιών μετάδοσης και των μεθόδων ανάλυσης, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης. Θα προσλάβει 15 ESRs με την προοπτική να διεξάγουν κορυφαία έρευνα σε εθνικό, Ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο. Οι ESRs θα λάβουν εξατομικευμένη εκπαίδευση και θα διεξάγουν θεωρητική και εφαρμοσμένη έρευνα στις θεμελιώδεις προκλήσεις για την ανάπτυξη των συστημάτων και των δικτύων 5G. Ικανούς να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις των 5G δικτύων όπως έχουν οριστεί από την 5GPPP.

#### 1.4.10 FIWIN5G

Αυτό το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Κατάρτισης στοχεύει στην παραγωγή της επόμενης γενιάς των ερευνητών που θα επιτρέψει στην Ευρώπη να αναλάβει ηγετικό ρόλο στην ανάπτυξη των μελλοντικών συσκευών, συστημάτων και δικτύων που υποστηρίζουν την 5G υψηλής ταχύτητας ασύρματη σύνδεση στο internet. Για να γίνει αυτό, οι ερευνητές θα πρέπει να είναι σε θέση να εργαστούν σε διεπιστημονικές ομάδες, να μοιράζονται την εμπειρία τους και να προωθούν το όραμα μιας τεχνολογίας ασύρματων και οπτικών συσκευών και δικτύων που θα υποστηρίζει αποτελεσματικά τις απαιτήσεις σε υπηρεσίες και εφαρμογές. Ένας μεγάλος αριθμός συσκευών και τεχνολογιών θα πρέπει να συνεργάζονται προκειμένου να πραγματοποιηθεί το όραμα αποτελεσματικά και οικονομικά αποδοτικά. Ένας βασικός τομέας σε αυτή την σπασοκεφαλιά είναι η ολοκλήρωση των δικτύων οπτικών ινών και δικτύων σε συχνότητες mmWave, για την παροχή υπηρεσιών front/ backhaul υψηλού εύρους ζώνης και να επιτρέπουν επεκτάσιμα και διαχειρίσιμα δίκτυα χωρίς ιδιαίτερα πολύπλοκη δομή διασύνδεσης και πολυεπίπεδα πρωτόκολλα. Το FIWIN5G έχει ως στόχο να παρέχει σε διδακτορικούς φοιτητές την έκθεση στο φάσμα των δεξιοτήτων που είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση αυτών των προκλητικών απαιτήσεων. Βαθιά τεχνικές γνώσεις, αλλά και βασικές δεξιότητες κοινές στον τομέα της επιχειρηματικότητας, της διαχείρισης, της χρηματοδότησης, καθώς και την επικοινωνιακή κατάρτιση. Ενώ οι φοιτητές θα γίνονται ειδικοί σε ένα συγκεκριμένο υποτομέα, θα πρέπει να κατανοήσουν το ευρύτερο πλαίσιο της εργασίας τους, είτε πρόκειται για μηχανικούς συστημάτων / δικτύων και την κατανόηση των συσκευών και τεχνολογιών που συνθέτουν τα δίκτυα ή οι μηχανικοί συσκευών να κατανοήσουν τα δίκτυα στα οποία οι συσκευές τους θα λειτουργήσουν.

#### 1.4.11 mmMagic

Το έργο mmMagic θα αναπτύξει και σχεδιάσει νέες ιδέες για την τεχνολογία RAT για την εγκατάσταση ζώνης mmWave. Αυτό προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ως βασική συνιστώσα του 5G RAT οικοσυστήματος και θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για την παγκόσμια τυποποίηση. Το έργο θα επιτρέψει έτσι υπερταχείες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες για τους χρήστες κινητών, υποστηρίζοντας UHD / 3D ροής, καθηλωτικές εφαρμογές και υπερ-ευέλικτων υπηρεσιών σύννεφου.

Η κοινοπραξία συγκεντρώνει μεγάλες πωλητές υποδομής (Samsung, η Ericsson, Alcatel-Lucent, η Huawei, η Intel, η Nokia), μεγάλες ευρωπαϊκές επιχειρήσεις (Orange, Telefonica), κορυφαία ερευνητικά ινστιτούτα και πανεπιστήμια (Fraunhofer HHI Ινστιτούτο, CEA-LETI, IMDEA Networks, Πανεπιστήμια Aalto, Μπρίστολ, Chalmers και Δρέσδης), προμηθευτές εξοπλισμού μέτρησης (Keysight Technologies, Rohde &

Schwarz) και μία MME (Qamcom). Για να συμπληρώσει την ισχυρή πρωτοπορία της της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής αριστείας, το έργο έχει ένα γνωμοδοτικό συμβούλιο που προέρχεται από μεγάλες ρυθμιστικές αρχές της Ευρωπαϊκής τηλεπικοινωνιών στη Γερμανία, τη Γαλλία, τη Φινλανδία, τη Σουηδία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Το έργο θα αναλάβει εκτεταμένες μετρήσεις στο ραδιοφωνικό κανάλι στην περιοχή 6-100 GHz, και θα αναπτύξει και επικυρώσει προηγμένα μοντέλα καναλιού που θα χρησιμοποιούνται για την αυστηρή επικύρωση και την ανάλυση σκοπιμότητας των προτεινόμενων ιδεών συστημάτων, καθώς και για χρήση σε ρυθμιστικά φόρουμ. Η φιλοδοξία του προγράμματος είναι να προετοιμάσει το έδαφος για μια ευρωπαϊκή πρωτοπορία στα πρότυπα 5G, συμπεριλαμβανομένων 3GPP, και να εξασφαλίσει βασικά δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας για την ευρωπαϊκή βιομηχανία, την ενίσχυση της ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας.

#### 1.4.12 5G–XHAUL

Το συγκεκριμένο project παρουσιάζει μια συγκλίνουσα λύση οπτικής και ασύρματης μεταφοράς η οποία έχει τη δυνατότητα να συνδέσει τα ευέλικτα μικρά κύτταρα (small cells) με το δίκτυο πυρήνα. Η κατανομή των πόρων για τους κινητούς χρήστες είναι δυναμική και πραγματοποιείται στα σημεία εκείνα που δίνουν πρόσβαση στο δίκτυο (hotspots). Για την υποστήριξη των παραπάνω είναι απαραίτητη η ανάπτυξη των παρακάτω :

- Πομπών μικροκυμάτων οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα του προγραμματισμού σε πραγματικό χρόνο και διαθέτουν υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση.
- Κοινόχρηστο οπτικό δίκτυο το οποίο παρέχει ελαστική κατανομή εύρους ζώνης, σε συνεργασία με προηγμένα παθητικά δίκτυα.
- Επίπεδο ελέγχου το οποίο έχει τη δυνατότητα να προβλέψει την ζήτηση της κυκλοφορίας στον χώρο και στον χρόνο και βάσει αυτών να παραγοντοποιεί δυναμικά τις συνιστώσες του δικτύου.

Σύμφωνα με το 5G–XHAUL, για την κάλυψη της ζήτησης για ευρυζωνική συνδεσιμότητα και παράλληλα η διατήρηση του κόστους σε χαμηλά επίπεδα τεχνολογίες κλειδιά είναι οι

- οι τεχνολογίες μικρών κελιών,
- το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης υπολογιστικού νέφους (C–RAN),
- τα δίκτυα που ορίζονται από το λογισμικό (SDN-Software Defined Networks) και
- η εικονικοποίηση της λειτουργίας του δικτύου (NFV–Network Function Virtualization)

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε μία σύντομη αναφορά – επεξήγηση των παραπάνω τεχνολογιών.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών από τα ερευνητικά έργα που αναφέρουμε παραπάνω.

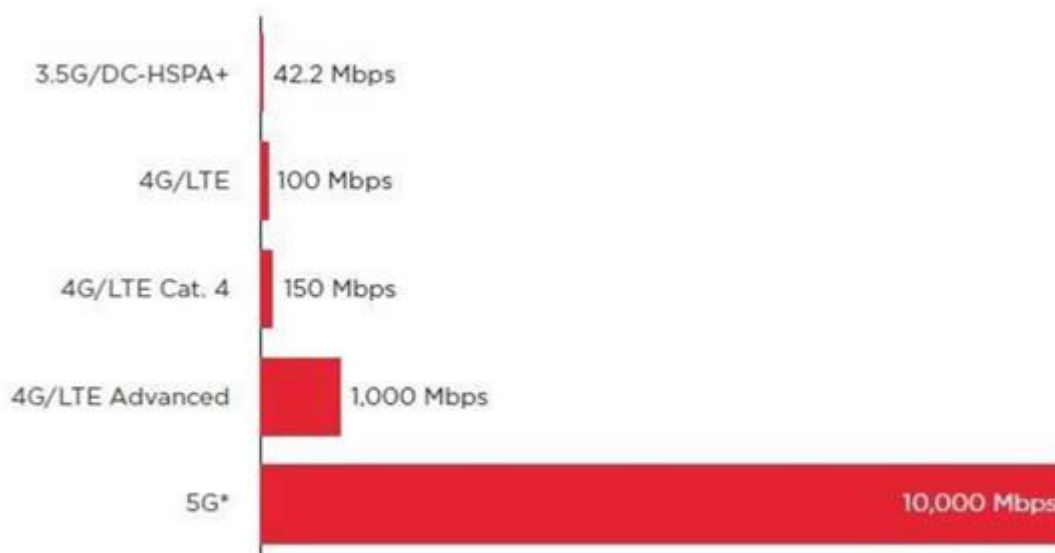
**Πίνακας 1 Σύγκριση ευρευνητικών προγραμμάτων**

	C-RAN	MIMO	NFV	SDN	mmWave
SPEED-5G		✓		✓	
CHARISMA	✓				
VirtuWind			✓	✓	
5G MiEdge	✓				✓
5G-Crosshaul	✓		✓	✓	
MassLOC		✓			
5G-AURA					
WiVi-2020			✓	✓	
SPOTLIGHT	✓		✓	✓	
5G Wireless					
FIWIN5G					✓
mmMagic					✓
5G-Xhaul	✓		✓	✓	

## 2. Αρχιτεκτονική συστημάτων 5ης γενιάς

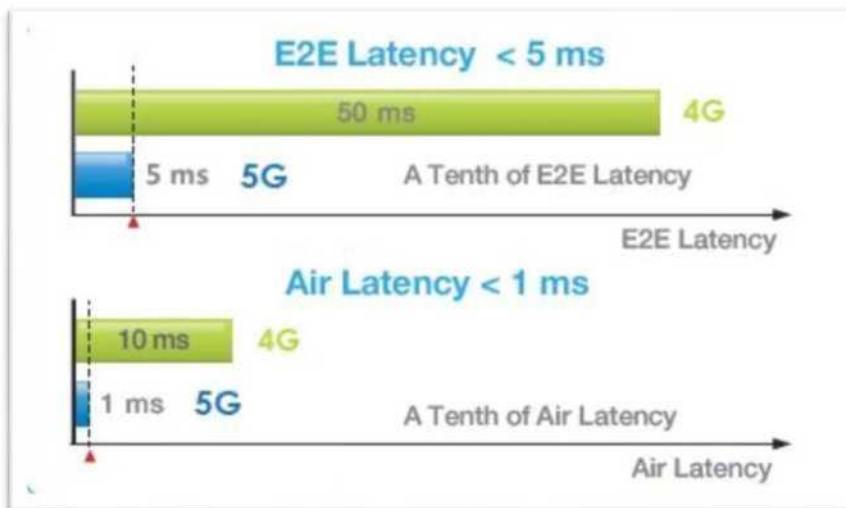
### 2.1 Τεχνολογίες συστημάτων 5ης γενιάς

Το 5G-PPP αποτελεί μια συντονισμένη ευρωπαϊκή προσπάθεια της ICT (Information and Communication Technology) βιομηχανίας για να συνεισφέρει στην έρευνα για τη νέα εποχή των ICT υποδομών, προκειμένου να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην παγκόσμια αγορά. Σύμφωνα λοιπόν με το 5G-PPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι στόχοι των 5G δικτύων αναμένεται να είναι η αύξηση του όγκου των δεδομένων που διακινούνται μέσω των κινητών δικτύων ανά γεωγραφική περιοχή. Εκτιμάται ότι το ποσό αυτό θα είναι της τάξης του 10TB/s/km<sup>2</sup>. Επίσης θα υπάρχει μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Υπολογίζεται ότι θα έχουμε 1.000.000 συνδεδεμένα τερματικά ανά km<sup>2</sup>. Αλλά και αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, πιάνοντας ταχύτητες από 1-10 Gb/s. Στην εικόνα 3, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των προηγούμενων τεχνολογιών σε σχέση με το 5G.



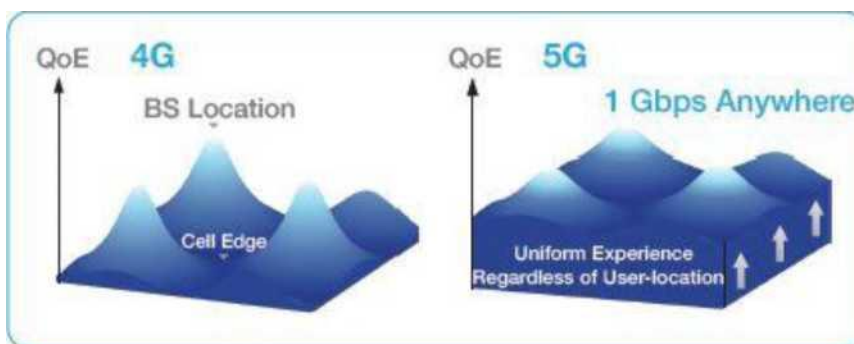
Εικόνα 3 Σύγκριση της ταχύτητας μετάδοσης για κινητά δίκτυα επικοινωνιών σε Mbps

Επίσης προβλέπεται 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε σχέση με το 2010, 80% μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX) και σημαντική μείωση του χρόνου καθυστέρησης στις End to End συνδέσεις αλλά και στις καθυστερήσεις μέσω αέρα σε τιμές <5ms και <1ms αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.



**Εικόνα 4 Σύγκριση του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ του δικτύου 4G και της πρόβλεψης για το 5G**

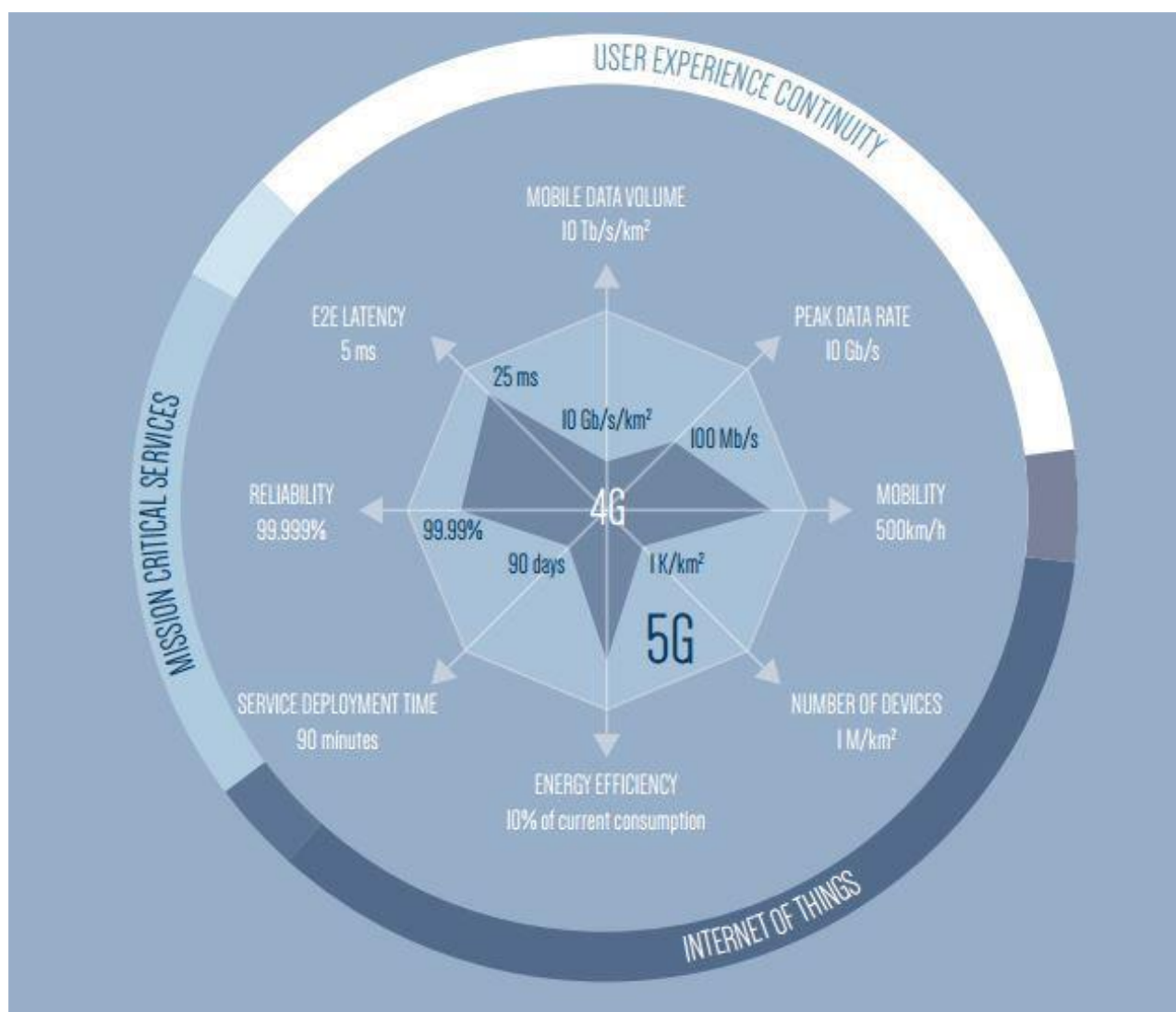
Τέλος εκτιμάται ότι θα μπορούμε να δημιουργήσουμε εξ' αρχής μια υπηρεσία και να την παραδώσουμε σε λειτουργική μορφή σε λιγότερο από 90 λεπτά. Η πραγματοποίηση των παραπάνω στόχων μεταφράζεται σε προκλήσεις και ανάγκη για αλλαγές στα σημερινά δίκτυα, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι λεγόμενοι δείκτες απόδοσης KPIs (Key Performance Indicators) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Προκειμένου να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα κρίνεται απαραίτητο να ικανοποιούνται κάποιες βασικές κατευθύνσεις. Η ποιότητα των υπηρεσιών ( Quality of Services – QoS) θα αλλάξει, αφού προκειμένου βελτιστοποιήσουμε την εμπειρία του χρήστη, ενώ το δίκτυο πρέπει να προσφέρει τις δυνατότητες του (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρό χρόνο καθυστέρησης κλπ.) ανεξαρτήτως της γεωγραφικής θέσης που βρίσκεται ο χρήστης. Στα σημερινά δίκτυα, υπάρχουν περιπτώσεις που η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται σε ένα χρήστη, εξαρτάται από το πόσο κοντά βρίσκεται στο σταθμό βάσης, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5. Αυτό όμως απαιτεί, το δίκτυο να έχει ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και καλή κάλυψη έχοντας πάντα ως γνώμονα το TCO να μην είναι απαγορευτικά μεγάλο.



**Εικόνα 5 Σύγκριση των δικτύων 4G και 5G σχετικά με την ομοιόμορφη κάλυψη**

Θα υπάρχει δυνατότητα Πολλαπλής Μίσθωσης (Multi-tenancy). Τα 5G δίκτυα πρέπει να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους σε όλες τις φυσικές υποδομές ανεξαρτήτως αν ανήκουν σε έναν ή περισσότερους παρόχους και να μπορούν να εκμεταλλεύονται αποδοτικά τα ήδη υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα περιορίζοντας τις μεταξύ τους παρεμβολές. Η πυκνότητα (Density) χρησιμοποίησης του δικτύου θα μεγιστοποιηθεί αφού οι απαιτήσεις των 5G δικτύων για μεγαλύτερη χωρητικότητα το καθιστούν απαραίτητο. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κυψελών, παρατηρείται το φαινόμενο των παρεμβολών

μεταξύ των κυψελών (inter-cell interference) γεγονός που μειώνει την απόδοση του συστήματος, ειδικά όσο πλησιάζουμε στα όρια της κυψέλης. Ο έλεγχος αυτών των παρεμβολών, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση CoMP (Coordinated MultiPoint), είτε με συντονισμένη κωδικοποίηση πριν την αποστολή ή με άλλους αλγορίθμους συντονισμού των κυψελών που έχουν προταθεί [1]. Στο σχεδιασμό του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές οι οποίες θα εξασφαλίζουν τον απομακρυσμένο συντονισμό των λειτουργιών του δικτύου και θα απαιτούν τη λιγότερο δυνατή συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα. Αυτό, πέρα από την ευκολία της κεντρικής διαχείρισης (Manageability), μας δίνει και τη δυνατότητα να μειώσουμε το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Επιπλέον αναλόγως την υπηρεσία (network, data κλπ.) και αναλόγως την περίπτωση κάθε φορά (π.χ. σε περίπτωση αυξημένης κίνησης) η δυναμική διαχείριση πόρων (Resource management) είναι απαραίτητη στα 5G δίκτυα, έτσι ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα και έλεγχο για τον βέλτιστο διαμορισμό των πόρων. Να υπάρχουν δυνατότητες εξέλιξης αφού θα πρέπει να έχουμε προνοήσει για την εύκολη εγκατάσταση και δημιουργία νέων υπηρεσιών, απαγκιστρώνοντας τους παρόχους από τις μεγάλες επενδύσεις σε συγκεκριμένους παρόχους υλικού υπολογιστή (hardware) και ευνοώντας τις ανοιχτού λογισμικού (open-source) λύσεις δημιουργώντας έτσι ευκαιρία για να εισέλθουν νέοι παίκτες στην αγορά, αλλά και να μειώσουμε το κεφαλαιακό μας κόστος (CAPEX). Οι ετερογενείς συσκευές, υπηρεσίες και τα ετερογενή δίκτυα πρόσβασης που πρέπει το 5G να υποστηρίζει, αναμφισβήτητα θα οδηγήσουν σε δραστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Προκειμένου να μπορέσουμε να ανταπεξέλθουμε σε αυτές τις ετερογένειες, η ευελιξία του δικτύου θα είναι σημείο κλειδί για τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ευελιξία του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί κατά το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες όπως το SDN, το NFV(Network Function Virtualization) και το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing) [1],[2]. Τέλος είναι απαραίτητη η υποστήριξη των προηγούμενων γενεών δικτύων (backward-compatibility). Το 5G θα συναθροίζει τις νέες τεχνολογίες κινητών δικτύων και ασύρματης πρόσβασης με τα δίκτυα προηγούμενων γενεών, προκειμένου να επιτυγχάνει την εκ νέου εκμετάλλευσή τους. Η συμβατότητα (Legacy Support), ανέκαθεν ήταν πρόβλημα όταν θέλαμε να εγκαταστήσουμε μια νέα τεχνολογία. Όλα αυτά τα συστήματα πρέπει να συνεργάζονται και να εξασφαλίζουν αδιάκοπη διαλειτουργικότητα. [3] Στα 5G δίκτυα αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία Εικονικών Δικτύων (Network Virtualization), καθώς νεότερες και προηγούμενες εκδόσεις μπορούν να συνυπάρξουν, βλέποντας τις προηγούμενες εκδόσεις ως ιδεατά δίκτυα μέσα στο δίκτυο αυτό. [4] Στην εικόνα 6 φαίνονται οι θεωρητικές δυνατότητες του 5G σε σχέση με τις υπάρχουσες δυνατότητες του 4G.



Εικόνα 6 Radar chart που απεικονίζει τις θεωρητικές δυνατότητες του 5G εν συγκρίσει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του 4G

## 2.2 Σενάρια αρχιτεκτονικής

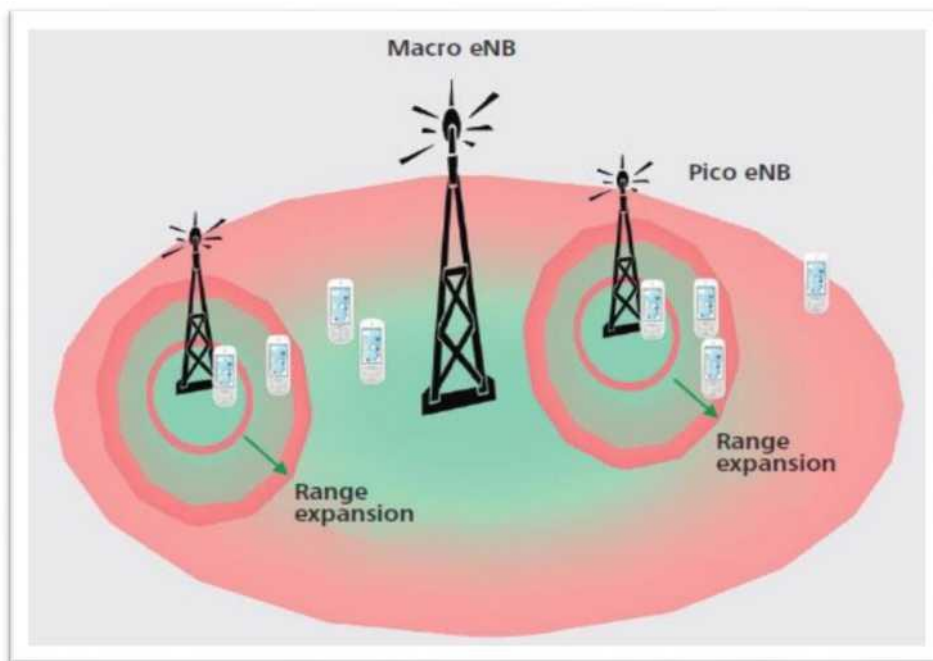
Το 5G σύστημα αποτελείται από το τερματικό 5G (που κατέχει τον κύριο ρόλο στην αρχιτεκτονική) και από ένα πλήθος ανεξάρτητων, αυτόνομων και διαφορετικών ραδιοτεχνολογιών RAT (Radio Access Technologies), όπου με τη σειρά τους μπορούν να είναι συνδεδεμένες με διάφορους διακομιστές (servers) ή στο ευρύτερο διαδίκτυο. Το τερματικό και κάθε RAT έχει δική του IP σύνδεση για τους ευρύτερους χρήστες του διαδικτύου. Κάθε RAT έχει τη δική του διεπαφή για το τερματικό. Για παράδειγμα για να υπάρχει πρόσβαση σε τέσσερα διαφορετικά RATs, χρειάζονται να δημιουργηθούν τέσσερις διαφορετικές διεπαφές στο τερματικό. Είναι γνωστό πως για να επικοινωνήσει ένας χρήστης με έναν διακομιστή χρησιμοποιώντας το IP πρωτόκολλο, πρέπει να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ των δύο. Σε έναν κινητό χρήστη, ο οποίος αλλάζει RATs, χρειάζεται για κάθε αλλαγή να δημιουργείται και μια καινούργια σύνδεση. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι ευέλικτη για τα 5G συστήματα και εφαρμόζεται στη τωρινή αρχιτεκτονική συστημάτων, για την πρόσβασή τους στο διαδίκτυο. Για να βελτιωθεί αυτή η περίπλοκη λειτουργία προτείνεται η δημιουργία ενός καινούργιου επιπέδου δικτύου, το οποίο θα διαχειρίζεται τα σημεία πρόσβασης δικτύου από τα διάφορα RATs και θα τα μεταφέρει σε ανώτερα επίπεδα της στοιβάς πρωτοκόλλου (Network Level of Abstraction). Η επινόηση του καινούργιου αυτού επιπέδου θεωρείται ουσιαστικό και

κρίσιμο στην αρχιτεκτονική των 5G δικτύων. Για την ολοκλήρωση της παραπάνω αρχιτεκτονικής χρησιμοποιείται και μια μονάδα ελέγχου όπου συνεργάζεται με το τερματικό, διαχειρίζεται τις διεργασίες - εφαρμογές, δρομολογεί πακέτα και όλα αυτά κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές (policies). Την ίδια στιγμή η μονάδα αποτελεί τη βασική αρχή που καθορίζει το QoS σε κάθε μετάδοση. Βρίσκεται μεταξύ χρήστη και διαδικτύου [1] και αντιπροσωπεύει ένα ιδανικό σύστημα όπου εξετάζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των διαφόρων RATs. Είναι σε θέση να προβάλει μια ρεαλιστική εικόνα ποιότητας που αντιστοιχεί σε κάθε εφαρμογή χρήστη που απευθύνεται σε κάποιον διακομιστή. Το νέο αυτό αφηρημένο επίπεδο δικτύου παρέχεται με τη δημιουργία IP tunnel με βάση τις διασυνδέσεις (interfaces) των IP για κάθε RAT. Στη πράξη σε μια σύνδεση μεταξύ χρήστη και τερματικού, θα δημιουργούνται tunnels μεταξύ τερματικού και της μονάδας ελέγχου, τον επονομαζόμενο δρομολογητή πολιτικών (Policy Router), ο οποίος αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των πακέτων κάτω από συγκεκριμένες πολιτικές, που καθορίζει το πρωτόκολλο. Ο χρήστης θα θέτει μία IP διεύθυνση από τη μεριά του και θα δημιουργούνται τόσα tunnels, όσες είναι και οι RATs που συνδέεται. Από εκεί και πέρα θα αναλαμβάνει το πρωτόκολλο για τα περαιτέρω. Έτσι επιτυγχάνεται και η αφαίρεση του δικτύου, μεταξύ σύνδεσης χρήστη και τερματικού.

### **2.2.1 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην πυκνοποίηση του δικτύου (network densification)**

Ακολουθώντας την τακτική πυκνοποίησης του δικτύου (network densification) θα δημιουργήσουμε πολύ πυκνές κυψέλες εγκαθιστώντας πολλούς σταθμούς βάσης επιτυγχάνοντας υψηλό εύρος ζώνης, μικρό χρόνο καθυστέρησης κ.α. Η πυκνή τοποθέτηση κυψελών έχει ήδη αποφέρει πολλά κέρδη στις συχνότητες κάτω από τα 6Hz. Οι πάροχοι αποφασίζουν πού θα εγκαταστήσουν τις νέες κυψέλες με γνώμονα το κόστος προετοιμασίας της περιοχής που θα εγκατασταθεί να σταθμίζεται με το όφελος που θα δημιουργείται από την κάλυψη που θα παρέχει στη γεωγραφική περιοχή η κυψέλη αυτή [5]. Η τεχνική πυκνοποίησης του δικτύου περιλαμβάνει τη χωρική πυκνότητα (densification over space) όπου εγκαθιστούμε σε μεγάλη πυκνότητα νέες μικρές κυψέλες (Small Cells) και τη συχνотική πυκνότητα (densification over frequency) όπου χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες περιοχές του ραδιοφάσματος σε διαφορετικές συχνότητες. Στην εικόνα 7 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη μιας κυψέλης με τη χρήση της τεχνολογίας πυκνοποίησης του δικτύου. Κατά την χωρική πύκνωση αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών ανά κόμβο, αυξάνουμε την πυκνότητα των εγκατεστημένων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή και προσπαθούμε να διανέμουμε ομοιόμορφα τους χρήστες στους σταθμούς βάσης. Κατά την συχνотική πύκνωση χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 500 MHz ως τις υπερχαμηλές συχνότητες (30-300Mhz) [6].





**Εικόνα 7** Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification [7]

Η αύξηση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων εξαρτιόταν ανέκαθεν από τους εξής τρεις παράγοντες:

- i. Αύξηση του αριθμού των ασύρματων κόμβων του δικτύου.
- ii. Βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.
- iii. Βελτίωση της αποδοτικότητας των συνδέσεων.

Το εύρος ζώνης κάθε σταθμού βάσης, μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας επιπλέον φάσμα το οποίο οδηγεί σε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας [7],[8]. Όσο αφορά την κίνηση που δέχεται κάθε κόμβος, μπορούμε να την μειώσουμε εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και φροντίζοντας να διαμοιράζεται το φορτίο του δικτύου όσο καλύτερα γίνεται σε κάθε κόμβο. Τα UDN (Ultra Dense Network) θεωρούνται προαπαιτούμενα για την εξισορρόπηση του φόρτου εργασίας μεταξύ των σταθμών βάσης αλλά και για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Τα UDNs αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πύκνωσης της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των ραδιοσυνδέσεων και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Τα UDNs γίνονται και θα γίνονται όλο και πυκνότερα, γεγονός το οποίο θα αυξήσει τις μεταξύ τους παρεμβολές αλλά και το κόστος για κάθε κόμβο πρόσβασης [9]. Εφαρμόζοντας την κλασική τεχνική της πυκνοποίησης του δικτύου, μπορούμε να λύσουμε το θέμα της αυξημένης κίνησης στη μετάδοση δεδομένων, όμως αυτό θα σήμαινε πολύ μεγάλο κόστος για την επένδυση σε υποδομές. Ακόμη, οι επιπλέον σταθμοί βάσης θα συνεπάγονταν και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του λειτουργικού κόστους του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου είναι ανάλογη του αριθμού των εγκατεστημένων σταθμών βάσης. Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάζεται με την τεχνική αυτή, είναι το γεγονός ότι η μεγάλου εύρους μετάδοση των μακροκυψελών (Macrocells), συρρικνώνει σημαντικά την κάλυψη των μικροκυψελών οδηγώντας σε μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων τους. Ακόμα και αν οι μικροκυψέλες έχουν τοποθετηθεί μέσα στο δίκτυο με το βέλτιστο τρόπο, είναι πιθανό να μην χρησιμοποιούνται, αντίστοιχα, με το βέλτιστο τρόπο λόγω διακυμάνσεων στην κίνηση των δεδομένων. Επομένως εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και

πυκνώνοντας ακόμα περισσότερο τις υπάρχουσες κυψέλες αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση [9][10], οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και το συνολικό κόστος επενδύσεων πράγμα το οποίο αντιτίθεται στους στόχους του 5G [11]. Αυτός ο διαμοιρασμός πόρων που περιγράφουμε πιο πάνω απαιτεί ένα μηχανισμό συγχρονισμού και σηματοδότησης ελέγχου μεταξύ των σταθμών, πράγμα το οποίο θα μας οδηγήσει αργότερα να εισάγουμε «νοημοσύνη» στο δίκτυο μας.

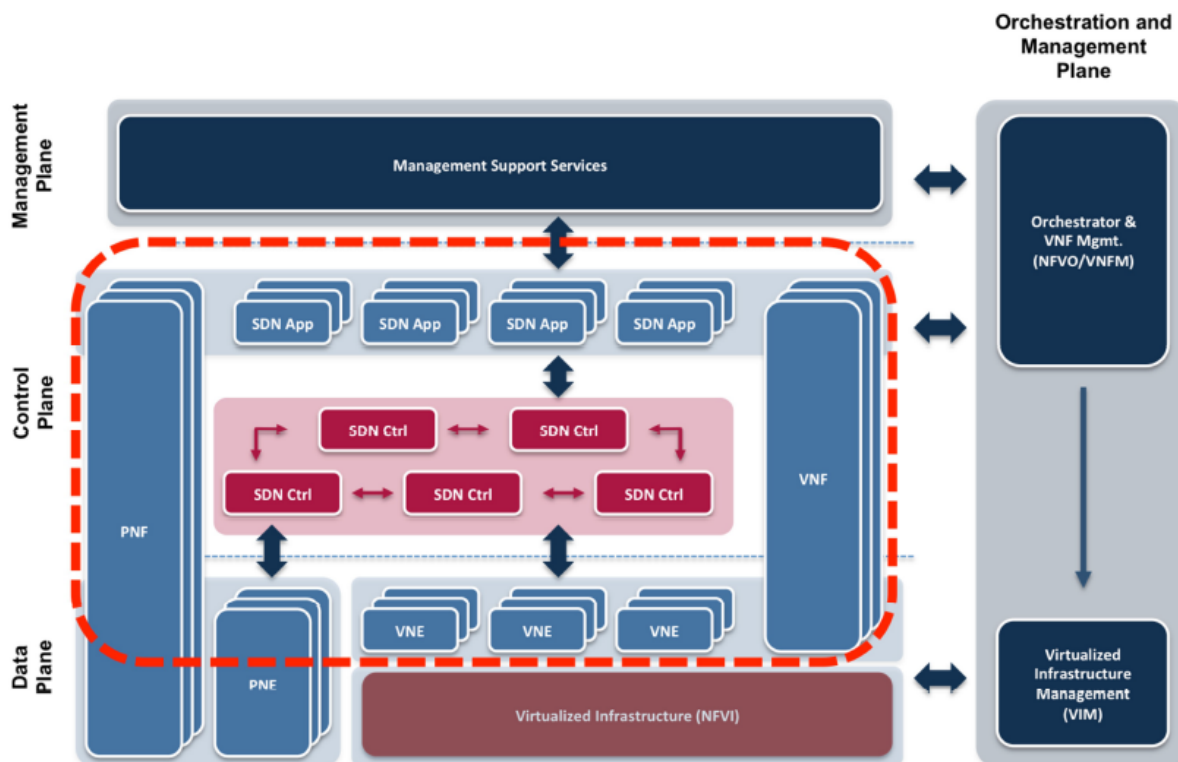
## 2.2.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στην εικονικοποίηση του δικτύου

Οι παραδοσιακές φυσικές υποδομές, περιορίζονται από τον αριθμό των πόρων που μπορούν να αξιοποιήσουν, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να αποτελέσει περιορισμό για το 5G. Επιπλέον, το κόστος των υπολογιστικών συσκευών καθώς και των διαθέσιμων πόρων τους (αποθηκευτικός χώρος, CPU κλπ.) επιβάλλει την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στο σχεδιασμό του δικτυακού μοντέλου. Ακόμη, είναι αναγκαίο στα υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα, να υπάρχει συντονισμένη συνεργασία για την παροχή των πόρων κατά την ανάπτυξη υπηρεσιών. Η υλοποίηση των υπηρεσιών στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, πραγματοποιείται παραδοσιακά από τους παρόχους με την εγκατάσταση φυσικών συσκευών και φυσικού εξοπλισμού οι οποίοι υλοποιούν κάποια συνάρτηση για την λειτουργία κάποιας υπηρεσίας. Οι υπηρεσίες αυτές που περιγράφουμε, απαιτούν συνεργασία μεταξύ των συναρτήσεων που τις υλοποιούν, πράγμα το οποίο πρέπει να αντικατοπτρίζεται και στην τοπολογία του δικτύου και στον εντοπισμό των συσκευών που υλοποιούν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Αυτοί οι περιορισμοί σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις του 5G για υψηλή ποιότητα και σταθερότητα, οδηγούν σε μεγάλους κύκλους ανάπτυξης προϊόντων (product-cycles), σε πολύ χαμηλή ταχύτητα δημιουργίας νέων υπηρεσιών καθώς και άμεση εξάρτηση από εξειδικευμένο - άρα και ακριβό - υλικό υπολογιστή. Οι λόγοι αυτοί, μας επιβάλλουν να πραγματοποιήσουμε το επόμενο βήμα στο σχεδιασμό των δικτύων [12]. Τα δίκτυα, εξελίσσονται προς ένα πολύ δυναμικό και ευέλικτο περιβάλλον που θα αποτελούνται από εικονικούς πόρους (virtual resources), οι οποίοι θα μπορούν να δημιουργούνται στιγμιαία και να παρέχονται κατ' απαίτηση του πελάτη προκειμένου να αναπτύξει τις υπηρεσίες του ή κατ' απαίτηση του παρόχου προκειμένου να μπορέσει να εκτελέσει τις εσωτερικές του λειτουργίες. Αυτές οι εικονικές λειτουργίες (virtual functions) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους προκειμένου να μπορούν να αλληλοεπιδρούν και να συνεργάζονται, με εικονικές συνδέσεις (virtual links) τα οποία επίσης μπορούν να δημιουργηθούν δυναμικά για να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες δικτύου [13]. Λαμβάνοντας υπόψιν τα ετερογενή δίκτυα, τα οποία θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων και το γεγονός ότι οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές των δικτύων θα πρέπει να συνυπάρχουν, να μοιράζονται πόρους και να συνεργάζονται στο περιβάλλον του δικτύου, κατανοούμε ότι θα πρέπει να υπάρχει μια ενιαία διαχείριση [14].

## 2.2.3 Συνδυασμός NFV και SDN

Παρά το γεγονός ότι οι αρχιτεκτονικές NFV (Network Function Virtualization) και SDN (Software Defined Networking) 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 από 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 παρακάτω εικόνα και στη συνέχεια ενσωματώνοντας σε αυτή την αρχιτεκτονική της SDN. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το συνδυασμό των δύο αρχιτεκτονικών.



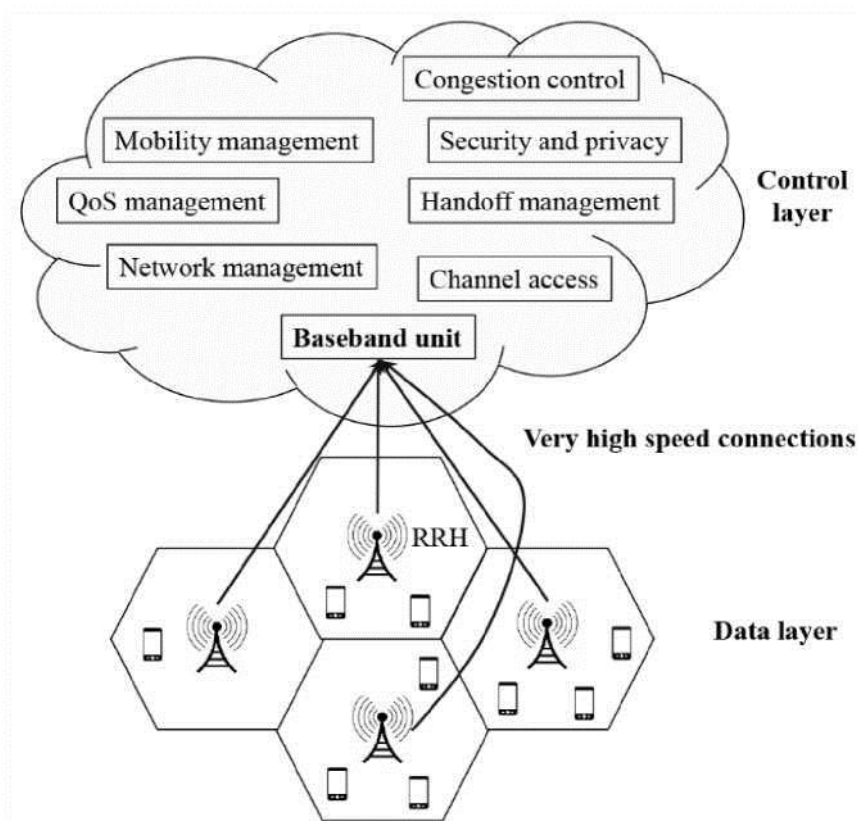
Εικόνα 8 Συνδυασμός αρχιτεκτονικών NFV και SDN

Η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική είναι συμβατή με αυτή που ορίζεται από το ινστιτούτο ETSI (European Telecommunications standards Institute) NFV [6] 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 κοιτάζει 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 (Physical Network Functions PNFs) στην πιο αριστερή πλευρά του διακεκομμένου κόκκινου τετραγώνου της αρχιτεκτονικής, κάτι που σημαίνει ότι κάναμε μπορεί να έχουν φυσικές λειτουργίες δικτύου οι οποίες δεν εφαρμόζονται στα μοντέλα NFV και SDN. Με τον ίδιο τρόπο, μπορεί κανείς να έχει εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNFs), αλλά χωρίς δυνατότητες SDN. Για αυτά, διατηρείται η ονοματολογία 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 (Network Elements - 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 έργο (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 παραπάνω εικόνας. 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 ει-κονικές εφαρμογές, θεωρώντας ότι μειώνεται η συγκεκριμένη χρησιμοποίηση του υλικού.

## 2.2.4 Αρχιτεκτονική του Cloud-RAN

Τα Ασύρματα Δίκτυα Πρόσβασης (Radio Access Network), αποτελούν το πιο δαπανηρό μέρος του δικτύου (70%-80% του συνολικού κόστους [15]) τόσο σε ενέργεια όσο και σε πόρους. Τα κεντροποιημένα RANs που βασίζονται σε τεχνολογίες Cloud, οδηγούν στη μείωση του κόστους όσο αφορά πολύ πυκνά δίκτυα όπως αναμένεται να είναι τα 5G δίκτυα, αφού εναποθέτουν τις υπολογιστικές διαδικασίες (π.χ. δρομολόγηση, δέσμευση πόρων κλπ.) στο Cloud. Ο συνδυασμός του Cloud Computing και της κεντροποιημένης αρχιτεκτονικής του RAN, είναι ιδανικός για τον προγραμματισμό του διαμοιρασμού των κοινών δικτυακών πόρων ραδιοπρόσβασης, για τον χειρισμό των παρεμβολών μεταξύ των κοντινών κυψελών και για την γρήγορη και εύκολη αναβάθμιση του δικτύου. Η βασική ιδέα πίσω από το C-RAN (Cloud Based-Radio Access Network), είναι η εκτέλεση των περισσότερων λειτουργιών ενός σταθμού βάσης στο Cloud, χωρίζοντας έτσι τη λειτουργία του σε ένα επίπεδο ελέγχου (Control Layer) και ένα επίπεδο δεδομένων (Data Layer). Οι λειτουργίες που αφορούν το Control Layer εκτελούνται στο Cloud, ενώ οι λειτουργίες που αφορούν το Data Layer εκτελούνται στους σταθμούς βάσης. Πιο συγκεκριμένα, η βασική ιδέα είναι να χωρίσουμε τις μονάδες επεξεργασίας των σημάτων (Baseband Units - BBUs) από τους σταθμούς βάσης των σημερινών κυψελών και να τους μεταφέρουμε στο Cloud προκειμένου να επιτύχουμε κεντρική επεξεργασία και διαχείριση των σημάτων [13][16]. Στην εικόνα 9, παραθέτουμε ένα παράδειγμα αρχιτεκτονικής η οποία ενσωματώνει την τεχνολογία C-RAN.

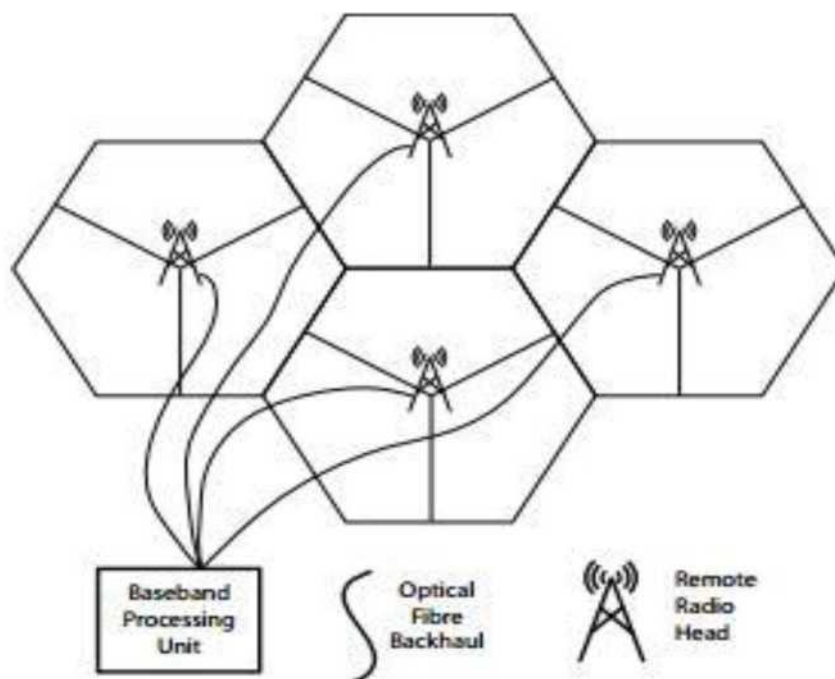


Εικόνα 9 Μια Cloud-Based Αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G [15]

Πιο συγκεκριμένα, το C-RAN αντικαθιστά τους σταθμούς βάσης σε κάθε κόμβο πρόσβασης με ένα κοινόχρηστο χώρο απομακρυσμένων διαμοιραζόμενων πόρων που αφορούν τη ραδιοπρόσβαση [17]. Τα βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής του C-RAN αναφέρονται παρακάτω:

- **Base Station Pool:** Παραλληλίζεται με τον εγκέφαλο του δικτύου, όπου αποτελεί τον κεντροποιημένο χώρο των κοινόχρηστων υπολογιστικών πόρων και εκτελεί λειτουργίες όπως ο έλεγχος σηματοδότησης και ο συντονισμός των επιμέρους λειτουργιών των κυψελών.
- **Optical Fronthaul:** Οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ψηφιοποιημένων αναπαραστάσεων των σημάτων βασικής ζώνης από τα BBUs (Baseband Units) στο RAN.
- **Remote Radio Heads (RRHs):** Απλές κεραίες μέσω των οποίων συνδέεται ο χρήστης στο RAN. Είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν παντού. Εν συγκρίσει με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης όπου χρειαζόνταν περισσότερες υποδομές και κόστος, αφού εκεί γίνονταν και η εγκατάσταση των BBUs, στο C-RAN απαιτείται μόνο ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση της κεραίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα RRHs μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση οποιασδήποτε κυψέλης ανεξαρτήτως του μεγέθους της (Picocell, Femtocell, Macrocell).

Στην εικόνα 10, απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική του C-RAN που περιγράψαμε παραπάνω.



**Εικόνα 10** Cloud-RAN αρχιτεκτονική με κεντρική επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης και RRHs

### 2.3 Αποδοτικότερη χρήση του Φάσματος συχνοτήτων

Το φάσμα αποτελεί την κύρια πηγή πόρων για τις ραδιοεπικοινωνίες. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία προοδεύει συνεχώς στην κατεύθυνση της αποδοτικότερης εκμετάλλευσης του φάσματος (π.χ. με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, με την επαναχρησιμοποίηση φάσματος), ωστόσο η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος παραμένει αμετάβλητη. Αυτό το γεγονός, δημιουργεί ένα φυσικό φράγμα στο ρυθμό μετάδοσης bit και στην αποδοτικότητα των καναλιών που μπορεί να επιτευχθεί σε πραγματικές συσκευές με φυσικούς περιορισμούς. Για να συμβαδίσει το 5G με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, πρέπει να λυθεί το πρόβλημα του φάσματος. Υπάρχει ένα μέρος του φάσματος που αυτή τη στιγμή υποχρησιμοποιείται στην mmWave μπάντα συχνοτήτων, το οποίο ίσως να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση αφού μπορεί να προσφέρει μέχρι και 100 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τα σημερινά 4G κυψελωτά δίκτυα. Οι mmWave μπάντες συχνοτήτων είχαν απορριφθεί για τη χρήση σε κυψελωτά δίκτυα, κυρίως λόγω της μικρής ακτίνας τους και λόγω προβλημάτων κάλυψης[3]. Πρόσφατες δημοσιεύσεις έχουν δείξει ότι η mmWave μπάντα συχνοτήτων πολύ πιθανό να αποτελέσει μέρος των 5G δικτύων [18]. Στα 4G δίκτυα, η ανάγκη επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου πραγματοποιήθηκε εν μέρη μέσω της επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Τα μελλοντικά δίκτυα απαιτείται να σχεδιάζονται πολύ πιο πυκνά και επομένως θα γίνουν και πολύ πιο ετερογενή από ότι τα σημερινά. Ένα αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων θα είναι η πυκνή τοποθέτηση μικρών κυψελών, τα οποία θα συνυπάρχουν με μικροκυψέλες (Microcells) και μακροκυψέλες αλλά και με άλλα συστήματα όπως WiFi, LTE/A (Long Term Evolution/Advanced) και HSPA (High Speed Packet Access) δημιουργώντας έτσι ετερογενή δίκτυα (HetNets). Τα ετερογενή δίκτυα, είναι πολυεπίπεδες κυψέλες, οι οποίες περιλαμβάνουν υψηλής ισχύος macrocells και χαμηλής ισχύος πολύ πυκνές μικρές κυψέλες (small cells).

## 2.4 Ανάλυση κυρίαρχων τεχνολογιών

### 2.4.1 Massive MIMO

#### 2.4.1.1 Ορισμός

Καθιερώθηκε από τη στιγμή που αναπτύχθηκε το LTE, και ήταν ένα εγγενές συστατικό αυτού, με δύο προς τέσσερις κεραιές ανά κινητή μονάδα και οκτώ ανά τομέα σταθμού βάσης, όπου φαινόταν ότι, λόγω της μορφής του και άλλων προφανών περιορισμών, θα ήταν μεγάλη η έκταση στην οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το MIMO. Η συμβολή του Thomas Marzetta ήταν καθοριστική γιατί διαμόρφωσε τον στόχο στον οποίο ο αριθμός των κεραιών, κατάφερε και αυξήθηκε κατά περισσότερο από μια τάξη μεγέθους. Η πρόταση ήταν να εξοπλίσει τους Σταθμούς Βάσης με μια σειρά από κεραιές πολύ μεγαλύτερες από τον αριθμό των ενεργών χρηστών ανά συχνότητα σηματοδότησης, και δεδομένου των φυσιολογικών μεταδόσεων, η προϋπόθεση αυτή ανεβάζει τον αριθμό των κεραιών ανά σταθμό βάσης σε εκατοντάδες. Αυτή η τολμηρή ιδέα, αρχικά ονομάζεται «συστήματα μεγάλης κλίμακας κεραιών», αλλά τώρα είναι πιο ευρέως γνωστό ως «Massive MIMO»

#### 2.4.1.2 Πλεονεκτήματα massive MIMO

Προσθέτοντας πολλαπλές κεραιές, μπορούμε να επιτύχουμε ένα μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας, πέρα από τα πλαίσια του χρόνου και του φάσματος, και στα ασύρματα κανάλια, ούτως ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων. Ως εκ τούτου μια σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί όσον αφορά την αξιοπιστία, φασματική απόδοση, και την ενεργειακή απόδοση των δικτύων. Χρησιμοποιώντας την massive MIMO τεχνολογία μπορούμε να πετύχουμε τεράστιες βελτιώσεις στη φασματική και ενεργειακή απόδοση, χωρίς να είναι αναγκαία η αυξημένη πύκνωση των σταθμών βάσης. Φυσικά όπως είναι εύκολο να καταλάβουμε, ένας συνδυασμός αυτών των δύο θα έδινε μεγάλη ευελιξία στα δίκτυα πέμπτης γενιάς ως προς το ζήτημα της φασματικής αποδοτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση της massive MIMO τεχνολογίας οι επιπτώσεις του θορύβου και της γρήγορης εξασθένησης του σήματος εξαφανίζονται, ενώ οι παρεμβολές στα πλαίσια μιας κυψέλης μπορούν να μετριαστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους απλής γραμμικής προκωδικοποίησης και ανίχνευσης. Με τη σωστή χρήση του multiuser MIMO (MU-MIMO) σε massive MIMO συστήματα, το επίπεδο του μέσου ελέγχου πρόσβασης (Media Access Control) μπορεί να απλοποιηθεί με την αποφυγή πολύπλοκων αλγορίθμων προγραμματισμού, και επίσης ο σταθμός βάσης μπορεί να στείλει ξεχωριστά σήματα για μεμονωμένους χρήστες που χρησιμοποιούν στον ίδιο χρόνο τις ίδιες συχνότητες [19],[20]. Επίσης, εξομαλύνονται οι αποκρίσεις του καναλιού λόγω της τεράστιας χωρικής ποικιλομορφίας. Στην ουσία όλη η μικρή κλίμακας τυχαιότητα υποχωρεί, καθώς ο αριθμός των παρατηρήσεων του καναλιού μεγαλώνει. Τα συστήματα της εκπομπής και της λήψης των δεδομένων γίνονται λιγότερο πολύπλοκα λόγω της φύσης των καναλιών μεταξύ των σταθμών βάσης και της χρήσης της ίδιας πηγής σηματοδότησης από μια ομάδα χρηστών. Για ένα δεδομένο αριθμό ενεργών χρηστών, όσο ο αριθμός των κεραιών μεγαλώνει τόσο η ορθογωνιότητα του σήματος αυξάνεται και τόσο πιο βέλτιστα λειτουργούν οι απλοί γραμμικοί πομποδέκτες και οι διαμορφωτές του σήματος ανά χρήστη. Η υπόσχεση αυτών των παροχών έχει ανεβάσει το massive MIMO σε κομβική θέση για το 5G [21], με προβλεπόμενο ρόλο να παρέχει μια μεγάλης χωρητικότητας ομπρέλα πανταχού κάλυψης με υποστήριξη από υποστρώματα μικρών κυψελών.

#### 2.4.1.3 Προκλήσεις massive MIMO

Ωστόσο, για να γίνει πραγματικότητα το massive MIMO, πρώτα πρέπει να ξεπεραστούν αρκετές σημαντικές προκλήσεις. Οι μεταδόσεις μπορούν να γίνουν με ορθογώνια



σηματοδότηση μεταξύ των χρηστών των ίδιων κυψελών, για να επιτύχουν καθαρότερο κανάλι [22], αλλά θα πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται σε κυψέλες, διαφορετικά όλοι οι διαθέσιμοι πόροι θα καταναλώνονται. Αυτό αναπόφευκτα προκαλεί παρεμβολές μεταξύ των καναλιών σε διαφορετικές κυψέλες και ως εκ τούτου βάζει ένα ταβάνι για την ποιότητα των καναλιών. Αυτή η παρέμβαση, λεγόμενη και «μόλυνση καναλιού» (pilot contamination) δεν εξαφανίζεται καθώς ο αριθμός των κεραιών μεγαλώνει. Ωστόσο, η μόλυνση καναλιών είναι σχετικά δευτερεύων παράγοντας για όλα, εκτός από τον κολοσσιαίο αριθμό των κεραιών [23]. Επιπλέον, διάφορες μέθοδοι για τη μείωση, ακόμη και εξάλειψη της μόλυνσης καναλιών μέσω χαμηλής έντασης Σταθμών Βάσης έχουν ήδη σχεδιαστεί. Ακόμα, μια προσεκτική σχεδίαση των δομών των καναλιών απαιτείται για να αποφύγουμε την έκρηξη σε επιβάρυνση. Οι ιδέες που εξετάζονται για να κυριαρχήσουμε στις επιβαρύνσεις των καναλιών περιλαμβάνουν χωρικές συσχετίσεις, έτσι ώστε να μοιραστούν σύμβολα ανάμεσα σε κεραιές και επίσης διαχωρισμό των καναλιών σε κατηγορίες τέτοια ώστε καθετί να μπορεί να μεταδοθεί στο αναγκαίο ρυθμό, και όχι πιο γρήγορα. Μια πιο σοβαρή πρόκληση για την υλοποίηση του στόχου του massive MIMO έχει να κάνει με την αρχιτεκτονική του. Απαιτεί ριζικά διαφορετικές δομές Σταθμών Βάσης όπου, αντί για λίγους υψηλής ισχύος ενισχυτές, με λίγες κεραιές ανά τομέα, θα έχουμε μια πληθώρα από μικροσκοπικές κεραιές που τροφοδοτούνται από αντίστοιχα χαμηλής ισχύος ενισχυτές. Κάθε κεραιά θα πρέπει πιθανότατα να ενσωματωθεί με το δικό της ενισχυτή. Κλιμακωτά, οι συσχετίσεις κεραιών, οι αμοιβαίες ζεύξεις και το κόστος είναι μερικά από τα ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν. Την ίδια στιγμή, δημιουργούνται ευκαιρίες για καινοτόμες τοπολογίες όπως σύμμορφες συστοιχίες κατά μήκος στεγών ή προσόψεων κτιρίων. Μέσα σε αυτό το ειδικό θέμα, [24] διερευνάμε εναλλακτικές και έναν ιδιαίτερα καινοτόμο σχεδιασμό κεραιών, που βασίζεται στην αξιοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής εστίασης των κεραιών.

## 2.4.2 Network Function Virtualization - NFV

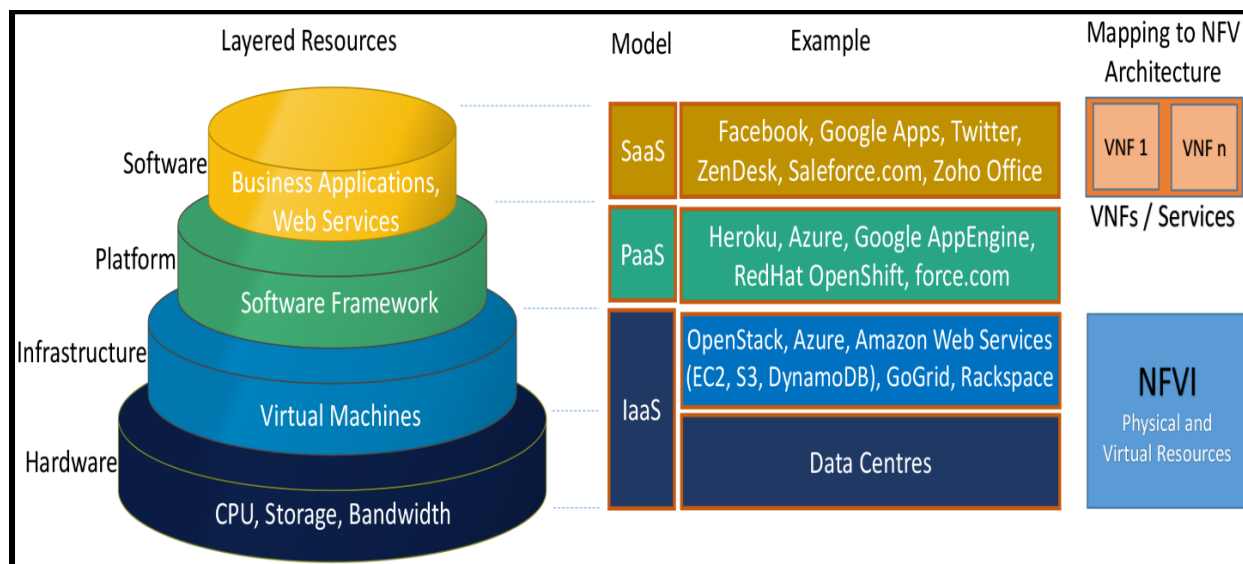
### 2.4.2.1 Ορισμός

Η Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (Network Function Virtualization) προσφέρει μεγαλύτερη δυνατότητα διαχείρισης, προωθεί την ετερογένεια του δικτύου και αυξάνει την ευκολία εγκατάστασης νέων τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, μας δίνεται η δυνατότητα μέσω της χρήσης της παραπάνω τεχνολογίας να υλοποιούμε και να τρέχουμε διαφορετικά στιγμιότυπα εικονικών λειτουργιών και υπηρεσιών χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή «γενικού σκοπού», ο οποίος διαμοιράζεται μεταξύ διάφορων χρηστών. Αυτό είναι και το πρώτο βήμα για τη συνεργασία του τομέα των δικτύων και της πληροφορικής και εκ προοιμίου παρατηρούνται μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως: α) σημαντική μείωση του κεφαλαιακού κόστους και του λειτουργικού κόστους, αφού ένας υπολογιστής γενικού σκοπού είναι φθηνότερος από τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών, β) επίσης μειωμένος θα είναι και ο λεγόμενος χρόνος διάθεσης προς την αγορά (time-to-market), δηλαδή ο χρόνος να δημιουργήσουμε μια υπηρεσία και να είναι έτοιμη για εμπορική χρήση, γ) και μεγαλύτερη ευκολία όσο αφορά την αναβάθμιση των υπάρχουσών υπηρεσιών [12]. Επιπλέον, μια άλλη προοπτική που μας παρέχει η τεχνολογία NVF, είναι η δημιουργία εικονικών δικτύων, δηλαδή δικτύων τα οποία είναι ανεξάρτητα από το υπάρχων υλικό του υπολογιστή. Ακόμη, μπορούμε να πάμε ένα βήμα πιο πέρα, συγχωνεύοντας εικονικούς κόμβους, εικονικές συνδέσεις ή ακόμα και ολόκληρα εικονικά δίκτυα και εγκαθιδρύοντας ενιαία διαχείριση. Παράλληλα, παρέχεται η δυνατότητα για δημιουργία νέων δικτυακών υπηρεσιών και εφαρμογών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις διαφορετικών πελατών.



### 2.4.2.2 Αρχιτεκτονική NFV

Η τεχνολογία NFV εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ μιας δικτυακής λειτουργίας (Network Function) με τον απαραίτητο εξειδικευμένο υπολογιστή για την υλοποίηση της -όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά φυσικά δίκτυα, δημιουργώντας ένα περιβάλλον εκτέλεσης και διαχείρισης των διασυνδέσεων για τις εικονικές δικτυακές λειτουργίες (virtual network functions). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμοιρασμό του υλικού του υπολογιστή από διαφορετικές VNFs (virtual network functions) με την μορφή των VMs (Virtual Machines). Επιπλέον, η συγκέντρωση του συνολικού υλικού του υπολογιστή ευνοεί τον μαζικό και εύκολο διαμοιρασμό της NFV υποδομής, σχηματίζοντας τους πόρους NFVI (Network Function Virtualization Infrastructure), φαινόμενο που παρατηρείται και στο υπολογιστικό νέφος όπως απεικονίζεται στην εικόνα 11 που ακολουθεί. Όπως και με τις υπηρεσίες του υπολογιστικού νέφους, η τεχνολογία NFV δημιουργεί επιχειρηματικά μοντέλα και ευκαιρίες αντίστοιχα των IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) και SaaS (Software as a Service) του νέφους [25]. Για παράδειγμα, ο πάροχος μιας VNF δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιοκτήτης της VNF υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση και τη λειτουργία της VNF [26].

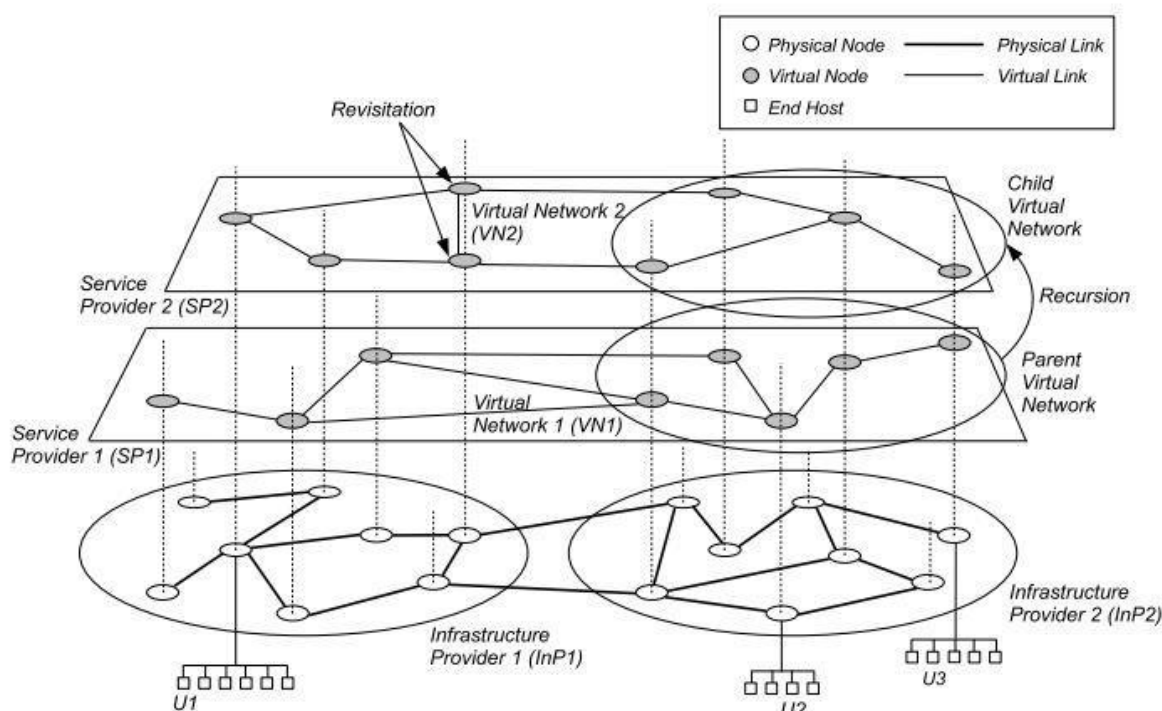


**Εικόνα 11 Μοντέλο Υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους και αντιστοίχιση τους στην Αρχιτεκτονική του NFV**

Με την τεχνολογία Εικονικών Δικτύων, διαχωρίζεται ο ρόλος των παραδοσιακών παρόχων ίντερνετ (Internet Service Providers) και δημιουργούνται δύο νέα επιχειρηματικά πεδία ανεξάρτητα μεταξύ τους: α) οι InPs (Infrastructure Providers), οι οποίοι διαχειρίζονται τη φυσική υποδομή του δικτύου και οι β) SPs (Service Providers), οι οποίοι δημιουργούν εικονικά δίκτυα συναθροίζοντας πόρους από διαφορετικούς InPs και προσφέροντας ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα [4],[12] οι InPs εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου, με τη μορφή κέντρων δεδομένων (data centers) και φυσικών δικτύων. Πάνω σε αυτούς τους πόρους, υλοποιούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι προσφέρονται σε διαφορετικούς SPs μέσω μιας προγραμματιζόμενης διασύνδεσης. Επίσης οι InPs, μπορούν να αποφασίσουν με ποιο τρόπο θα διατεθούν οι διαθέσιμοι διαμοιραζόμενοι πόροι στους SPs. Ένας InP μπορεί να χρησιμοποιεί δημόσια κέντρα δεδομένων ή ιδιωτικούς διακομιστές όπως διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι. Αν ένας InP δεν είναι ικανός να προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε έναν SP για να υλοποιήσει την υπηρεσία του, μπορούν να γίνουν συμφωνίες έτσι ο SP να λαμβάνει πόρους από 2 διαφορετικούς InPs προκειμένου να συμπληρώσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων. Οι SPs νοικιάζουν πόρους από πολλαπλούς InPs προκειμένου να δημιουργήσουν και να εγκαταστήσουν

εικονικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας τους διαμοιραζόμενους πόρους που τους δόθηκαν για να προσφέρουν στους πελάτες τους ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελείται από εικονικούς κόμβους οι οποίοι συνδέονται με εικονικές συνδέσεις. Ένας εικονικός κόμβος είναι ένα στοιχείο λογισμικού που εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης. Μια εικονική σύνδεση είναι μια λογική σύνδεση μεταξύ 2 εικονικών κόμβων, η οποία διαθέτει δυνατότητα να αλλάζει με δυναμικό τρόπο τις ιδιότητες της. Κάθε εικονικός κόμβος φιλοξενείται σε ένα φυσικό κόμβο ενώ κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα εικονικά δίκτυα, διαμοιράζοντας τους πόρους τους σε άλλους SPs δίνοντας τους την εικόνα ότι πρόκειται για έναν εικονικό InP. Ένας SP μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε άλλους SPs. Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών προσφέρουν υλοποιήσεις λογισμικού για NFs (Network Functions).

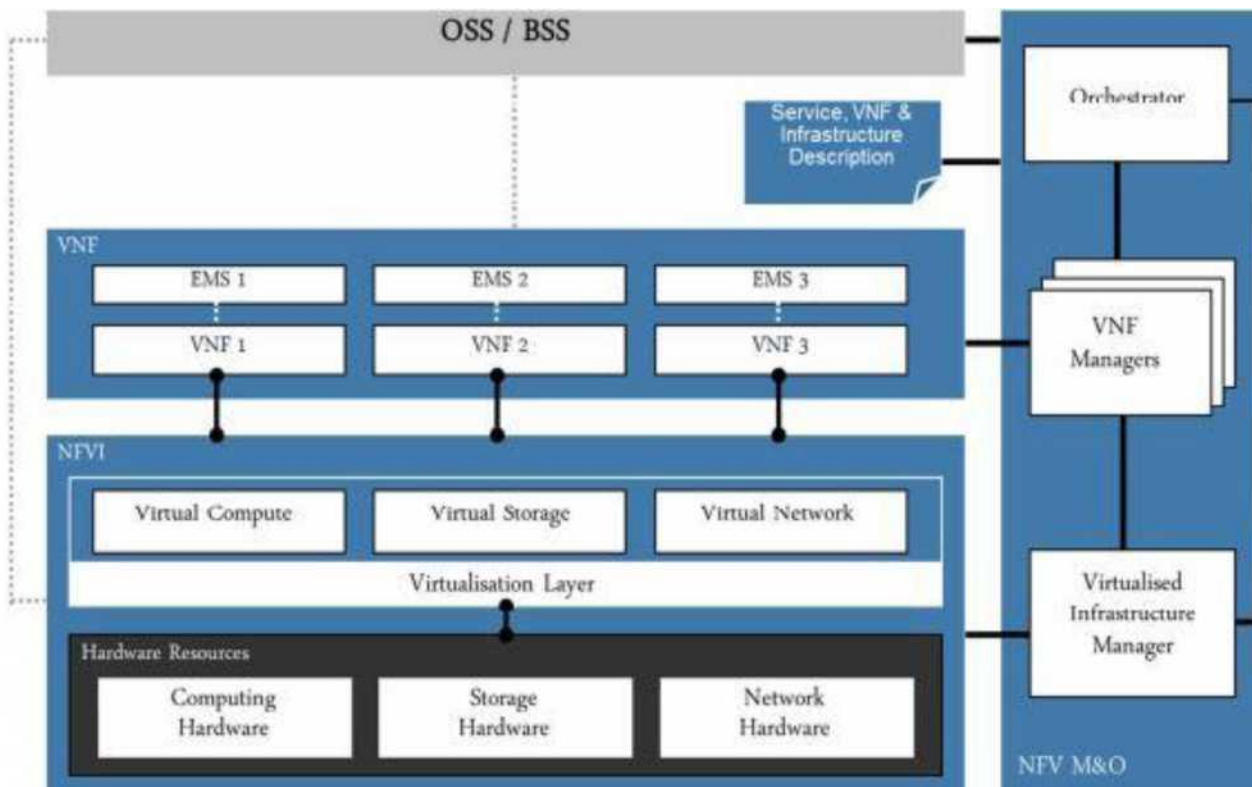
Στην εικόνα 12, μπορούμε να δούμε ένα περιβάλλον Εικονικών Δικτύων, που περιλαμβάνει τόσο φυσικούς όσο και εικονικούς παρόχους καθώς και τις σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους.



**Εικόνα 12 Ένα Περιβάλλον Εικονικών Δικτύων**

Επιπροσθέτως, η δυνατότητα να εγκαθιστούμε και να τρέχουμε εξ' αποστάσεως VNFs χρησιμοποιώντας τις NFV υποδομές που προσφέρονται από διαφορετικούς SPs, επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών σε παγκόσμιο επίπεδο αφού δεν υπάρχουν χωροταξικοί περιορισμοί. Σύμφωνα με το ινστιτούτο ETSI (European Telecommunication Standards Institute), η αρχιτεκτονική του NFV αποτελείται από 3 επίπεδα: α) NFVI, β) VNFs και γ) NFV MANO (Management and Orchestration). Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των επιπέδων της αρχιτεκτονικής του NFV [12] [26]. Το NFVI αποτελείται από πόρους είτε υπό τη μορφή λογισμικού είτε υπό τη μορφή υλικού του υπολογιστή, οι οποίοι συγκεντρώνονται προκειμένου να σχηματίσουν το περιβάλλον στο οποίο θα εγκατασταθούν οι VNFs. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν COTS (Commercial off the Shelf) υλικό υπολογιστή, αποθηκευτικούς χώρους και δικτυακά στοιχεία, τα οποία συγκεντρώνονται προκειμένου να προσφέρουν υπολογιστική ισχύ, συνδεσιμότητα και αποθηκευτικό χώρο στις VNFs. Οι εικονικοί πόροι δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ένα στρώμα εικονοποίησης (Virtualization Layer), το οποίο βασίζεται σε έναν επόπτη (hypervisor) ο οποίος υλοποιεί τους

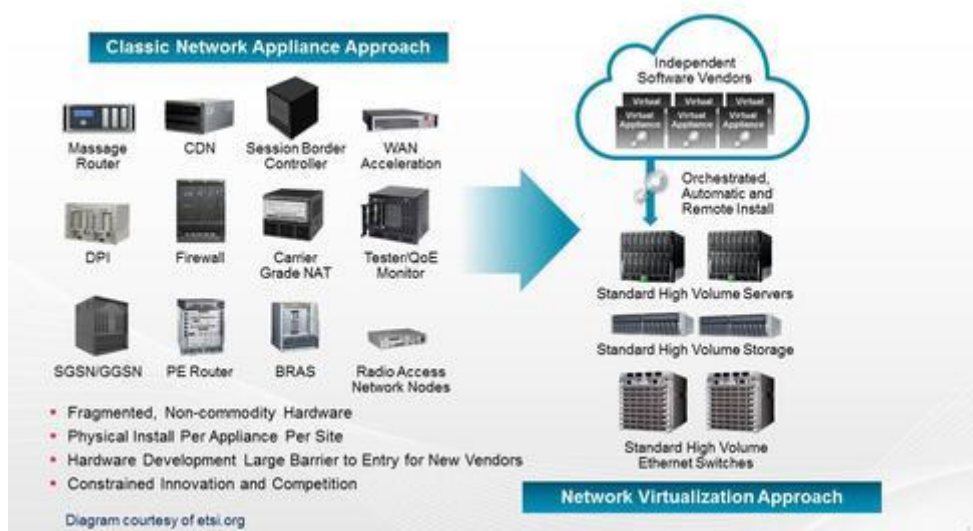
εικονικούς πόρους χρησιμοποιώντας την υποδομή φυσικών πόρων του από κάτω επιπέδου. Σε ένα κέντρο δεδομένων, οι πόροι αναπαρίστανται με τη μορφή μιας ή περισσοτέρων VMs, ενώ τα εικονικά δίκτυα αποτελούνται από εικονικούς κόμβους και συνδέσεις. Η VNF είναι υλοποίηση υπό μορφή λογισμικού μιας λειτουργίας του δικτύου. Αυτή η υλοποίηση τρέχει βασιζόμενη στην NFVI υποδομή, δηλαδή είναι υλοποίηση μιας NF όπου εγκαθίσταται σε εικονικούς πόρους π.χ. μια VM. Συνήθως οι VNFs συνοδεύονται από ένα EMS (Element Management System), το οποίο διαχειρίζεται τη συγκεκριμένη VNF. Η VNF έρχεται να εκτελέσει τις λειτουργίες ενός παραδοσιακού κόμβου δικτύου υπό τη μορφή λογισμικού, απαλλάσσοντας τους από το υλικό του υπολογιστή. Μια VNF μπορεί να υλοποιείται χρησιμοποιώντας παραπάνω από μια VMs, όπου σε αυτή την περίπτωση κάθε VM φιλοξενεί ένα διαφορετικό συστατικό στοιχείο της VNF. Μια υπηρεσία που προσφέρεται από έναν SP, αποτελείται από την σύνθεση μίας ή περισσότερων VNFs οι οποίες τρέχουν σε VMs. Το NFV MANO προβλέπει και διαχειρίζεται τους απαραίτητους πόρους για τον εφοδιασμό των VNFs καθώς και λειτουργίες όπως οι τροποποιήσεις αυτών των VNFs ή τροποποιήσεις στις υποδομές που αυτές χρησιμοποιούν. Περιλαμβάνει επίσης την οργάνωση και τη διαχείριση των φυσικών/εικονικών πόρων και συνεισφέρει στην εικονικοποίηση (virtualization) της φυσικής υποδομής. Επιπλέον, περιλαμβάνονται βάσεις δεδομένων οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση πληροφοριών και μοντέλων, τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες των VNFs και των εικονικών πόρων, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Γενικότερα, το NFV MANO εστιάζει στις εργασίες διαχείρισης που αφορούν την εικονοποίηση ενός δικτύου. Ακόμη, καθορίζει διασυνδέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ των εσωτερικών μηχανισμών του MANO αλλά και για την επικοινωνία και τη συνεργασία με τα συστήματα διαχείρισης των παραδοσιακών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τα OSS (Operating Support Systems) και τα BSS (Business Support Systems), επιτρέποντας έτσι για διαχείριση τόσο των VNFs αλλά και των λειτουργιών που τρέχουν στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα. Στην εικόνα 13, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ενός VNF περιβάλλοντος εργασίας.



Εικόνα 13 Η αρχιτεκτονική ενός NFV περιβάλλοντος εργασίας

### 2.4.2.3 Σενάρια Χρήσης

Η τεχνολογία NFV στοχεύει στην αλλαγή του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζονται παραδοσιακά τα δίκτυα, προτείνοντας τη χρήση τεχνολογιών για την υλοποίηση εικονικών συναρτήσεων που επιτελούν λειτουργίες δικτυακών συσκευών και τοποθέτηση τους σε μεγάλους απλούς διακομιστές. Η διαδικασία αυτή, φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 14 που ακολουθεί. Αυτοί οι διακομιστές με τη σειρά τους, μπορούν να τοποθετηθούν σε κέντρα δεδομένων ή σε κόμβους του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία NFV αφορά την υλοποίηση των δικτυακών λειτουργιών σε λογισμικό, το οποίο μπορεί να εγκαθίστανται και να τρέχει πάνω σε απλό υλικό υπολογιστή. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα οι δικτυακές λειτουργίες αυτές να μπορούν να μετακινούνται ή να δημιουργούνται σε διάφορα σημεία του δικτύου όταν αυτό απαιτείται, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εγκατάσταση νέου εξειδικευμένου εξοπλισμού. Έτσι λοιπόν, καταλαβαίνουμε πώς η τεχνολογία NFV μειώνει το κόστος για τους δικτυακούς παρόχους, αφού ούτε χρειάζεται να επενδύσουν σε εξειδικευμένους διακομιστές/ υλικό υπολογιστή για το στήσιμο του δικτύου αλλά ούτε κατά την αναβάθμισή του [14],[27]. Η τεχνολογία NFV, υπόσχεται στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών περισσότερη ευελιξία στο να διευρύνουν τις δυνατότητες του δικτύου τους και τις υπηρεσίες που προσφέρουν στους πελάτες τους. Επίσης, τους προσφέρει τη δυνατότητα να εγκαθιστούν νέες υπηρεσίες δικτύου ή να αναβαθμίζουν παλαιότερες πιο γρήγορα και φθηνότερα. Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση του δικτύου κάποιες κατευθύνσεις [12]. Να επιτευχθεί αποσύνδεση του λογισμικού με το υλικό του Υπολογιστή. Εφόσον τα στοιχεία του δικτύου πλέον δεν θα αποτελούνται από μία σύνθεση ειδικού υλικού υπολογιστή και λογισμικού, η υλοποίηση και η εξέλιξη του καθενός θα είναι ανεξάρτητη από του άλλου. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη διαφορετικών χρονοδιαγραμμάτων για την εγκατάσταση και συντήρηση του λογισμικού και του υλικού του υπολογιστή. Να υπάρχει ευέλικτη εγκατάσταση NFs, αφού η απόσχιση του λογισμικού από το υλικό του υπολογιστή ευνοεί την ανακατανομή και το διαμοιρασμό των πόρων της κοινής υποδομής, επιτρέποντας παράλληλα στο υλικό του υπολογιστή και το λογισμικό να εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες σε ποικίλες χρονικές στιγμές. Αυτό βοηθάει τους παρόχους να δημιουργήσουν νέες υπηρεσίες γρήγορα πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, υπηρεσίες ή μέρος των υπηρεσιών αυτών μπορούν να δημιουργηθούν σε οποιαδήποτε συσκευή η οποία υποστηρίζει NFV και οι μεταξύ τους συνδέσεις να υλοποιηθούν με ευέλικτο τρόπο. Να υποστηρίζεται δυναμική δυνατότητα κλιμάκωσης (Dynamic Scaling). Η δυνατότητα υλοποίησης της λειτουργίας μιας NF με μορφή λογισμικού προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον δυναμικό εφοδιασμό με πόρους μιας VNF, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το δίκτυο κάθε στιγμή.



Εικόνα 14 Παραδείγματα Network Functions Virtualization

#### 2.4.2.4 Οφέλη και προκλήσεις υιοθέτησης της NFV τεχνολογίας

Το NFV σύμφωνα με το ινστιτούτο ETSI, θα αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στους παρόχους που θα υιοθετήσουν την τεχνολογία αυτή και μερικά από αυτά θα αναφερθούν παρακάτω [6]:

- Η ενοποίηση και ο διαμοιρασμός των πόρων του υλικού του υπολογιστή (φυσικών και εικονικών), οδηγούν σε μείωση του κόστους για την απόκτηση και συντήρηση εξοπλισμού καθώς και μείωση σε ενεργειακά κόστη.
- Η τεχνολογία NFV, επιτρέπει τον διαμοιρασμό των δικτυακών πόρων μεταξύ διαφορετικών VNFs με πολύ πιο εύκολο και προσαρμοστικό τρόπο, ενώ οι πόροι που ανατίθενται σε κάθε VNF μπορεί να αναδιανέμονται με δυναμικό τρόπο. Αυτή η δυνατότητα, ανοίγει το δρόμο για τη δημιουργία εξειδικευμένων υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις των πελατών.
- Το NFV προσφέρει τη δυνατότητα για γρηγορότερη και πιο εύκολη υλοποίηση NFs σε αρκετά μικρότερο κόστος και με πολύ μικρότερο ρίσκο. Με άλλα λόγια μιλάμε για μικρότερο χρόνο διάθεσης προς την αγορά.
- Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του NFV είναι το γεγονός πως υποστηρίζει την ετερογένεια των παρατάξεων που θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των 5G δικτύων. Η τεχνολογία αυτή εξαλείφει τους περιορισμούς που προκύπτουν από την ανάγκη ιδιοκτησίας εξειδικευμένου υλικού του υπολογιστή για την υποστήριξη υπηρεσιών.

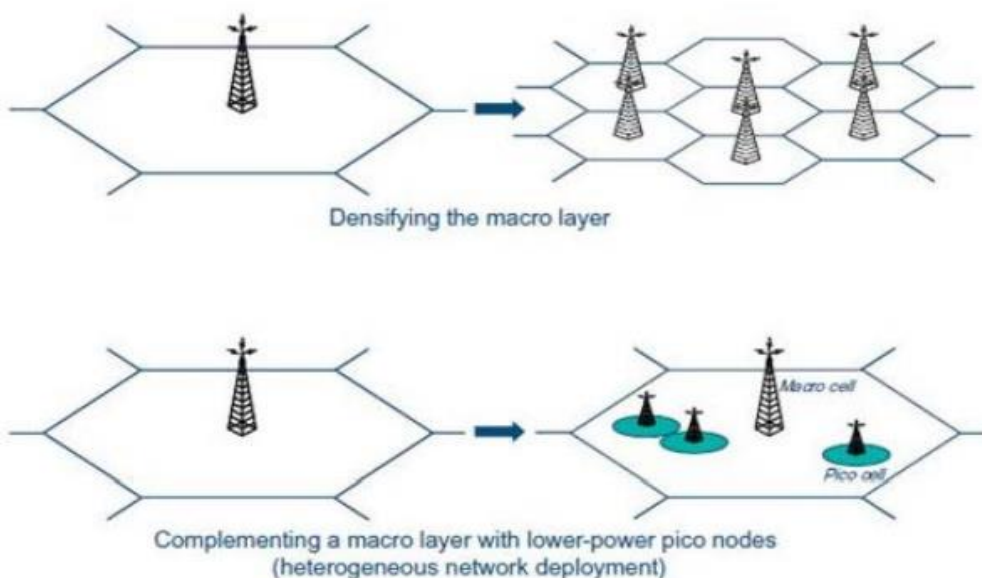
Οποιοσδήποτε μπορεί εύκολα, μόνο και μόνο από τον ορισμό του NFV, να αντιληφθεί τα τεράστια οφέλη που έχει για δίκτυα[6],[12]. Οι εικονικοποιημένες τροποποιήσεις που προτείνει δεν χρειάζονται νέο εξοπλισμό για να πραγματοποιηθούν. Αυτό κατ' επέκταση σημαίνει αναβάθμιση του δικτύου δηλαδή καλύτερη παροχή υπηρεσιών στους χρήστες του, χωρίς να χρειάζεται οι πάροχοι να βάλουν βαθιά το χέρι στην τσέπη. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι είναι εφικτό να εφαρμοστούν λειτουργίες δικτύου σε χαμηλού κόστους υλικό, όπως σε πλατφόρμες βασισμένες σε επεξεργαστές γενικού σκοπού π.χ. για την επεξεργασία σήματος στο φυσικό επίπεδο. Επίσης σε ένα ακόμα παράδειγμα οι πάροχοι θα μπορούν να τρέξουν ένα τείχος προστασίας, που βασίζεται σε λογισμικό ανοιχτού κώδικα, σε μια Virtual Machine (VM) πλατφόρμας x86. Παράλληλα η μείωση του υλικού εξοπλισμού σημαίνει μείωση και στην καταναλισκόμενη ενέργεια άρα και μείωση στους παραγόμενους ρύπους. Όπως θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια, το NFV θα παίξει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των 5G δικτύων τόσο όσον αφορά το Δίκτυο Κορμού (Evolved Packet Core) όσο και το RAN. Η ανάγκη για υπηρεσίες



πραγματικού χρόνου και on-demand υπηρεσίες και γενικότερα η ικανοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του 5G πιέζει προς την κατεύθυνση της αλλαγής του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζουμε τα δίκτυα. Η ανεξαρτητοποίηση του λογισμικού από το υλικό του υπολογιστή των δικτυακών συσκευών αποτέλεσε το προοίμιο για την δημιουργία μιας νέας τεχνολογίας η οποία διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο μετάδοσης δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε SDN και σε συνδυασμό με το NFV και το υπολογιστικό νέφος θα παίξουν πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5G, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια.

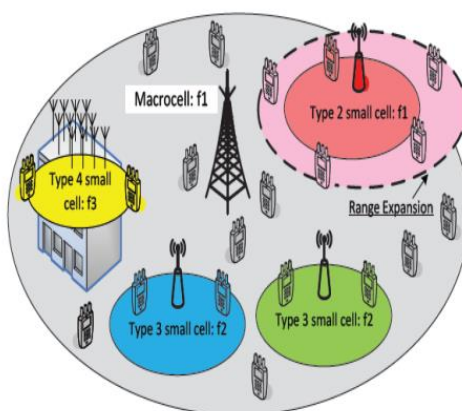
### 2.4.3 Network Densification

Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των 5G δικτύων, σε ένα κομμάτι του δικτύου θα υπάρχει πυκνή τοποθέτηση (network densification) μικρών κυψελών (Small Cells), οι οποίες θα συνυπάρχουν με Microcells και Macrocells αλλά και με άλλα ετερογενή συστήματα όπως WiFi, LTE/A και HSPA. Η τεχνική του network densification έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών πυκνών κυψελών, την ύπαρξη μεγάλου αριθμού σταθμών βάσεων με αποτέλεσμα την ύπαρξη υψηλού εύρους ζώνης, μικρή καθυστέρηση κ.α.



**Εικόνα 15** Επέκταση της κάλυψης μιας κυψέλης μέσω της τεχνολογίας Network Densification

Οπότε τα δίκτυα 5G θα περιέχουν μια σειρά από μικρές κυψέλες με διαφορετικούς τύπους small cell BSs με αποτέλεσμα την μείωση των παρεμβολών και την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος. Οι διαφορετικοί τύποι των small cell BSs χρησιμοποιούνται ανάλογα το περιβάλλον και την κίνηση. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων κυψελών.



Cell Type No.	Cell Type	Spectrum	Relationship with the Macrocell Tier	Typical Use Case
1	low-frequency macrocell tier	around 1~2GHz, licensed	-	umbrella coverage
2	low-frequency small cell tier	around 1~2GHz, licensed	co-channel deployment, CRE & ABS	capacity enhancement in hotspots
3	mid-frequency small cell tier	around 5GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	high traffic offloading
4	high-frequency small cell tier	>10GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	very high traffic offloading

**Εικόνα 16 Τύποι κυψελών καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών**

Συνοψίζοντας, η χρήση της πύκνωσης δικτύων έχει ως αποτέλεσμα τη :

- Μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης μέσω της κατάτμησης του χώρου σε μικρές κυψέλες.
- Μείωση των απωλειών μετάδοσης με την τοποθέτηση της υποδομής του δικτύου πρόσβασης σε μικρότερη απόσταση από τον χρήστη.

## 2.4.4 Software Defined Network – SDN

### 2.4.4.1 Ορισμός

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω οι στόχοι που έχουν τεθεί για τα 5G δίκτυα, απαιτούν την εισαγωγή νέων τεχνολογιών που αφορούν τον σχεδιασμό αλλά και την διαχείριση των ασύρματων δικτύων. Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των έξυπνων συσκευών, η ανάγκη για αποδοτική εκμετάλλευση των υπάρχοντων πόρων, το IoT κ.α., καθιστούν επιτακτική ανάγκη την πραγμάτωση σημαντικών αλλαγών στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις τηλεπικοινωνίες μέχρι σήμερα. Η χρήση μικρών κυψελών και της τεχνολογίας UDN είναι το πρώτο βήμα προς την ικανοποίηση των απαιτήσεων του 5G σε πόρους και σε RANs. Όπως αναφέραμε πιο πάνω, οι μικρές κυψέλες λειτουργούν σαν σταθμοί βάσης χαμηλής κατανάλωσης, όπου τοποθετούνται μαζί με τις παραδοσιακές μακροκυψέλες σε περιοχές όπου βρίσκονται πολλοί χρήστες, προκειμένου να αυξήσουν τον αριθμό των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετούνται στις περιοχές αυτές. Ωστόσο, η τεχνολογία των μικρών κυψελών παρά την επέκταση του διαθέσιμου φάσματος που επιτυγχάνει, εισάγει και προβληματισμούς σχετικά με την διαχείριση των πόρων ασύρματης πρόσβασης καθώς και με τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών τα οποία δεν είναι στατικά ούτε ομογενή. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να προκληθούν παρεμβολές μεταξύ των μικρών κυψελών και των μακροκυψελών ή ακόμα παρεμβολές και μεταξύ μικρών κυψελών. Τα μελλοντικά δίκτυα και οι διατιθέμενες από αυτά υπηρεσίες, θα πρέπει όχι απλώς να ορίζονται με τη χρήση λογισμικού αλλά να μπορούν να προγραμματίζονται και να είναι ικανά να υποστηρίξουν πολλούς διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών στους οποίους θα

ανατίθενται δυναμικά πόροι, ενώ παράλληλα θα απλοποιείται η διαχείριση της ετερογενούς υποδομής του δικτύου. Η ανάγκη να αντιμετωπίσουμε τα παραπάνω προβλήματα αλλά και να έχουμε αποδοτική εφαρμογή μικρών κυψελών, μας οδήγησε στο σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής όπου οι σταθμοί βάσης του δικτύου θα είναι άμεσα προγραμματιζόμενοι και θα υπάγονται υπό το λογικό έλεγχο ενός κεντροποιημένου ελεγκτή. Με γνώμονα την παραπάνω «διάταξη» δημιουργήθηκε η τεχνολογία SDN η οποία έρχεται για να επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που σχεδιάζαμε τα δίκτυα έως σήμερα. Πιο συγκεκριμένα η κύρια ιδέα πίσω από το SDN είναι να μετακινηθεί το επίπεδο ελέγχου έξω από τους μεταγωγείς (switches) και να γίνεται ο έλεγχος των δεδομένων εξωτερικά, μέσω μιας λογικής οντότητας λογισμικού που ονομάζεται ελεγκτής. Περιγράφει τα στοιχεία, τις παρεχόμενες λειτουργίες και το πρωτόκολλο για τη διαχείριση του επιπέδου προώθησης από τον ελεγκτή μέσω ενός ασφαλούς καναλιού. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφονται οι κοινές απαιτήσεις των πινάκων προώθησης για την πλειοψηφία των switches και των πινάκων ροής τους. Αυτή η συγκεντρωτική δομή κάνει τον ελεγκτή κατάλληλο να εκτελέσει τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω του κεντροποιημένου επιπέδου ελέγχου. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών NFV και SDN, φαίνεται ότι οδηγεί στη διαμόρφωση ενός νέου επιχειρηματικού περιβάλλοντος δημιουργώντας ευκαιρίες για δικτυακούς παρόχους, SPs, προγραμματιστών ιστοσελίδων και για παρόχους εξοπλισμού. Πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε, ότι οι τεχνολογίες SDN και NFV, η οποίες αποτελούν έναν τρόπο για την δημιουργία εικονικών λειτουργιών του δικτύου και εκτελούνται σε απλούς διακομιστές, δεν πρέπει να μπερδεύονται. Ο συνδυασμός τους μπορεί να αποφέρει πολλά οφέλη τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια ωστόσο οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι μεταξύ τους διαφορετικές και ανεξάρτητες [28],[4].

#### 2.4.4.2 Αρχιτεκτονική SDN

Ο διαχωρισμός του ελέγχου από τις συσκευές προώθησης πακέτων, όπου μέχρι πρότινος ήταν στενά συνδεδεμένος με τις δικτυακές συσκευές, επιτρέπει την αξιοποίηση των δικτυακών συσκευών ανεξαρτήτως της φυσικής τους υπόστασης, την απομακρυσμένη διαχείρισή τους και τον χειρισμό τους ως εικονικές οντότητες. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων (network operators) να διαχωρίζουν σε κομμάτια το υπάρχον δίκτυο και να δημιουργούν λογικές υπό-οντότητες του δικτύου (virtual networks). Ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου (Control Plane) και του επιπέδου δεδομένων (Data Plane) αίρει πολλούς περιορισμούς που δημιουργούνταν από την παραδοσιακή αρχιτεκτονική των δικτύων όπως [29] η κλειστή αρχιτεκτονική, καθώς κάθε συσκευή διαθέτει δικό της λογισμικό, δικούς της μηχανισμούς διαμόρφωσης και δικές του παραμέτρους. Η καινοτομία είναι περιορισμένη, γιατί είναι δύσκολο να εισάγεται συνεχώς νέο λογισμικό ή να προσφέρονται νέες υπηρεσίες χωρίς την επένδυση του παρόχου. Οι ίδιοι οι πάροχοι ελέγχουν το ρυθμό της καινοτομίας, ενώ παράλληλα ενυπάρχει και το πρόβλημα να επιτευχθεί διαλειτουργικότητα μεταξύ των υποδομών όλων των διαφορετικών παρόχων. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του δικτύου και ο μικρός βαθμός ευελιξίας αποτελεί εμπόδιο, αφού για εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών απαιτούνται αλλαγές σε χιλιάδες συσκευές γεγονός που αυξάνει πολύ το κόστος. Η ανάγκη λοιπόν για την επικράτηση του SDN γίνεται όλο και πιο επιτακτική γεγονός που οδήγησε στην δημιουργία ενός προτύπου αρχιτεκτονικής σύμφωνα με τον οργανισμό ONF (Open Networking Foundation), η αρχιτεκτονική του SDN μπορεί να χωριστεί σε τρία επίπεδα [30]:

- Επίπεδο υποδομής (Infrastructure Layer): Το επίπεδο αυτό αποτελείται από πολλές δικτυακές συσκευές όπως δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches) κλπ. Αυτές οι συσκευές απαιτείται να μπορούν να υποστηρίξουν την τεχνολογία SDN προκειμένου να μπορεί να λαμβάνει σήματα και να επικοινωνεί με το παραπάνω



επίπεδο. Δεν υπάρχει μεταξύ των δικτυακών συσκευών καμία ανταλλαγή σήματος, αφού όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται από τον SDN-ελεγκτή (controller).

- Επίπεδο ελέγχου (Control Layer): Το επίπεδο αυτό αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος, αφού εδώ υλοποιείται ο SDN-ελεγκτής. Πολλοί αλγόριθμοι υλοποιούνται σε έναν ελεγκτή του δικτύου, ο οποίος λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν τη δρομολόγηση, τη δυνατότητα καταμερισμού της κίνησης (traffic engineering) κλπ.

- Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer): Το πεδίο αυτό περιέχει τις διεπαφές που ανταποκρίνονται στις ανάγκες του χρήστη με τη μορφή εφαρμογών.

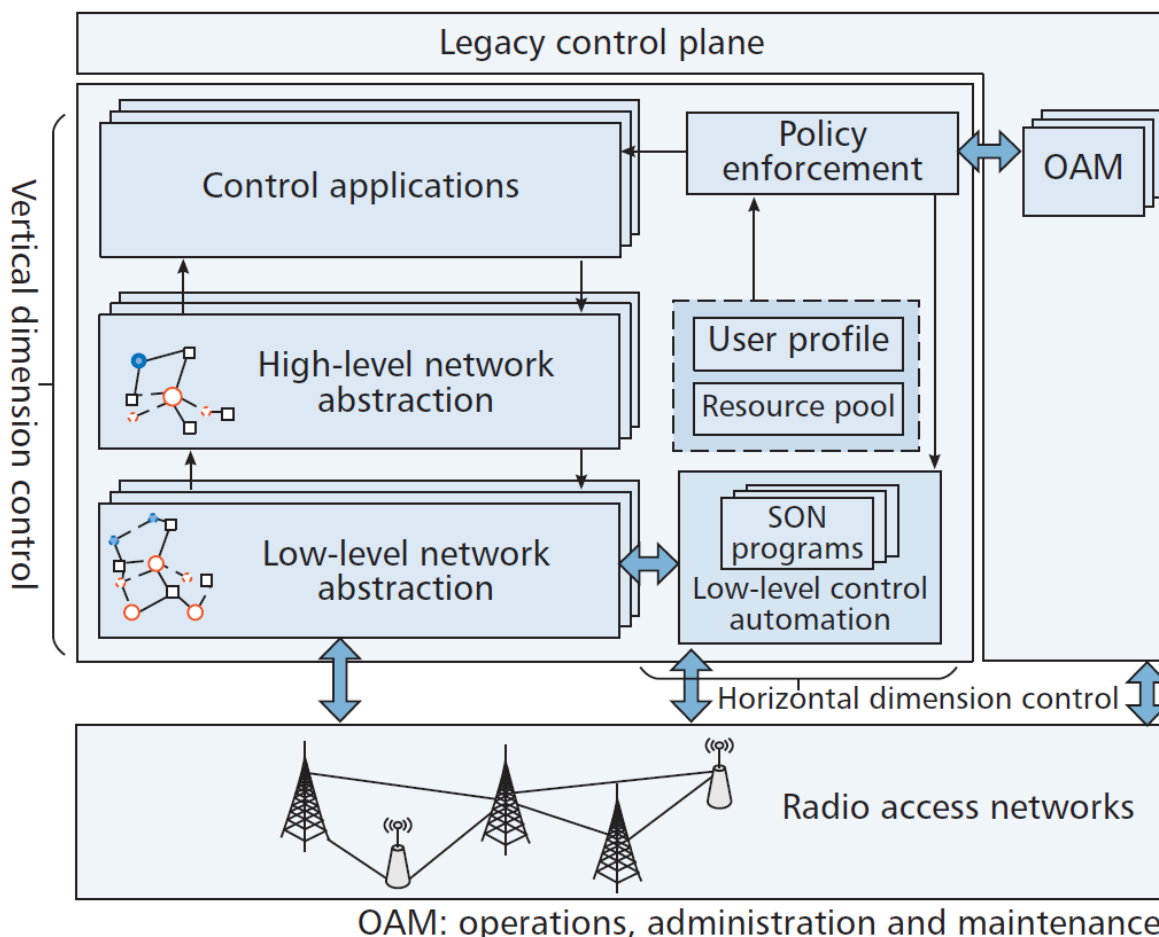
Ωστόσο στις περισσότερες αναφορές είδαμε τα επίπεδα του SDN να χρησιμοποιούν διαφορετικές ονομασίες. Για αυτό μια πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση των επιπέδων του SDN θα μπορούσε να είναι [12] [29] [30]:

- SDN-Ελεγκτής: Ασχολείται με τις λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου, όπως για παράδειγμα διάφορα APIs (Application Programming Interfaces), το λειτουργικό σύστημα του δικτύου και τη συντήρηση της πλήρους εικόνας για την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο.

- Νότιο Μέρος (Southbound part): Προσφέρει μια διεπαφή και ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και της διαθέσιμης υποδομής προώθησης πακέτων, δεδομένου ότι η υποδομή υποστηρίζει την τεχνολογία SDN. Το πιο γνωστό πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και του νότιου μέρους είναι το OpenFlow. Το πρωτόκολλο OpenFlow είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συγκεκριμένων μεταγωγών προκειμένου να δημιουργηθεί η προεπιλεγμένη από τον ελεγκτή διαδρομή δρομολόγησης και γενικότερα είναι το μέσο χάρη στο οποίο ο SDN-ελεγκτής αποκτά πρόσβαση στα φυσικά μέσα ή στους εικονικούς μεταγωγείς, δρομολογητές κλπ. Το OpenFlow ήταν το πρώτο πρωτόκολλο επικοινωνίας που δημιουργήθηκε για την επικοινωνία μεταξύ ελεγκτή και των επιπέδων προώθησης πακέτων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για να ανιχνευτούν οι ροές δεδομένων προκειμένου ο ελεγκτής να μπορεί να βγάλει συμπεράσματα για την κίνηση που επικρατεί στο δίκτυο τη δεδομένη στιγμή και να μπορέσει δυναμικά να επέμβει προκειμένου να λειτουργήσει πιο αποδοτικά το δίκτυο.

- Βόρειο Μέρος (Northbound part): Προσφέρει μια διεπαφή μεταξύ ελεγκτή και εφαρμογών SDN, οι οποίες τρέχουν πάνω από αυτόν. Οι εφαρμογές αυτές είναι το μέσο που χρησιμοποιείται για να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών.

Στην εικόνα 17 απεικονίζεται η συνολική αρχιτεκτονική του SDN..

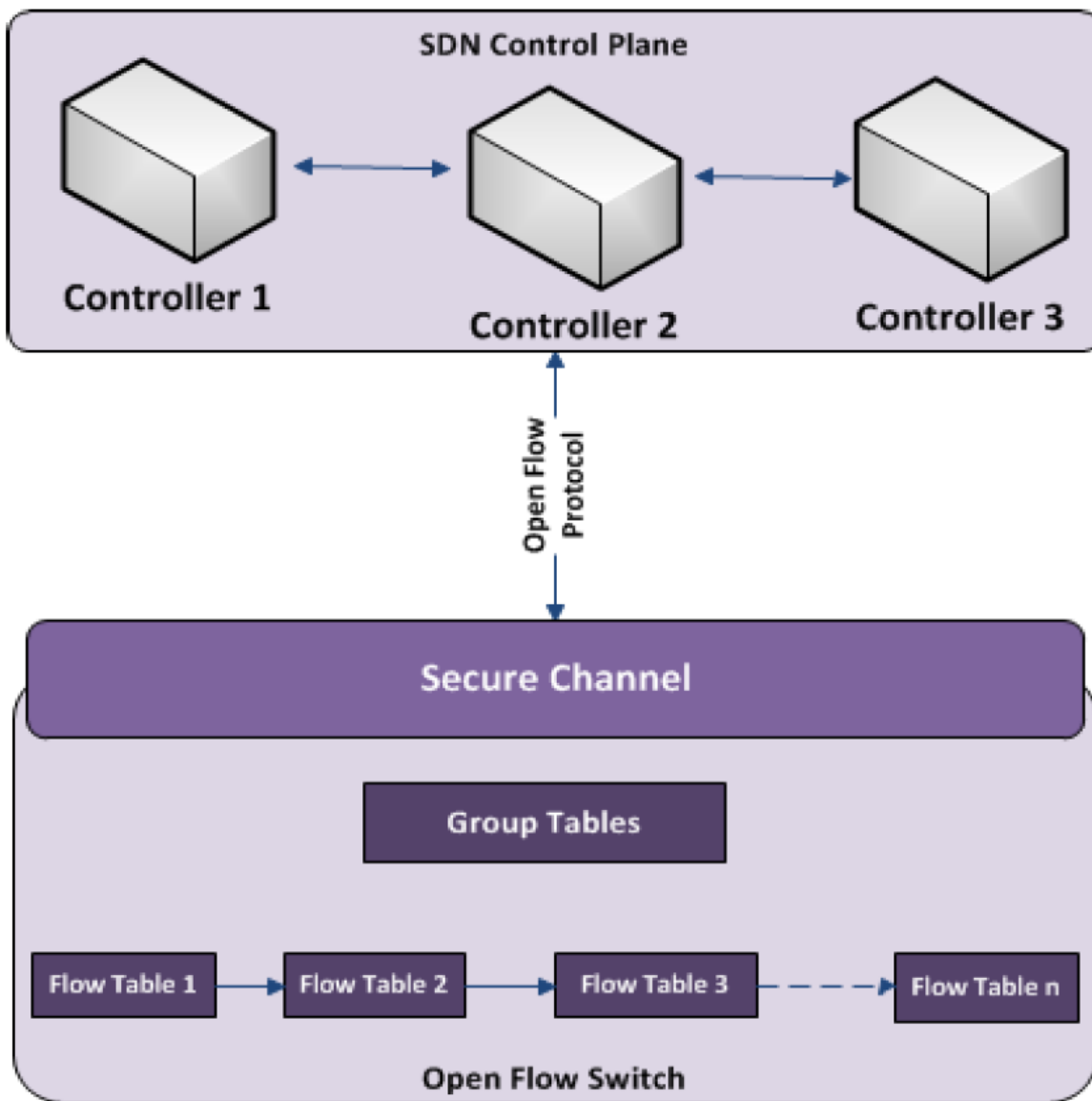


Εικόνα 17 Παράδειγμα αρχιτεκτονικής SDN για κινητό δίκτυο

### 2.4.4.3 Το πρωτόκολλο Openflow

Ο οργανισμός ONF (Open Network Foundation) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που χρηματοδοτείται από μεγάλες εταιρείες όπως η Deutsche Telekom, η Microsoft, η Google κ.α., οι οποίες μέσω του ONF στοχεύουν στη βελτίωση των δικτυακών υπηρεσιών με τη χρήση του SDN και την τυποποίηση του πρωτοκόλλου OpenFlow [31]. Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, σε ένα SDN δίκτυο η διαχείριση του δικτύου (που βασίζεται στο λογισμικό) και τα επίπεδα προώθησης δεδομένων (που βασίζονται στο υλικό του υπολογιστή) διαχωρίζονται, με σκοπό η υποδομή του δικτύου να είναι ανεξάρτητη από τις λειτουργίες του δικτύου [4]. Πιο συγκεκριμένα, το SDN διαχωρίζει το επίπεδο διαχείρισης του δικτύου από το επίπεδο προώθησης των πακέτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η διαχείριση του δικτύου να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας προγραμματιζόμενης διεπαφής (π.χ. OpenFlow) και η υποδομή του υλικού του υπολογιστή του δικτύου να αποτελείται απλώς από συσκευές προώθησης πακέτων, οι οποίες μπορούν να προγραμματιστούν. Το επίπεδο διαχείρισης του SDN μπορεί να υλοποιηθεί με τη μορφή λογισμικού το οποίο τρέχει σε απλούς διακομιστές, ενώ το επίπεδο προώθησης ίσως να απαιτεί εξειδικευμένο υλικό υπολογιστή. Η τεχνολογία SDN ωστόσο δίνει τη δυνατότητα το επίπεδο προώθησης πακέτων κατά περιπτώσεις να υλοποιηθεί σε μη εξειδικευμένο υλικό υπολογιστή, όπως π.χ. εικονικοί μεταγωγείς [12]. Το επίπεδο διαχείρισης του δικτύου, επιτρέπει κεντρική διαχείριση και αλληλεπίδραση με τους μεταγωγείς του επιπέδου προώθησης πακέτων μέσω ενός API, το οποίο καλείται "Southbound API". Επιπλέον, μέσω του "Northbound API", όπου βρίσκεται «πάνω» από τον κεντρικό ελεγκτή του δικτύου είναι δυνατή η υλοποίηση λειτουργιών δικτύου με τη μορφή SDN εφαρμογών. Στη συνέχεια θα

αναλύσουμε περαιτέρω την αρχιτεκτονική του SDN καθώς και τα πολλαπλά οφέλη που θα αποφέρει η ενσωμάτωση του στο σχεδιασμό των 5G δικτύων [32][28]. Η αρχιτεκτονική OpenFlow αποτελείται από πολυάριθμα κομμάτια εξοπλισμού μεταγωγής, τα οποία διαχειρίζονται ένας ή περισσότεροι ελεγκτές OpenFlow, όπως φαίνεται και στην εικόνα 18.



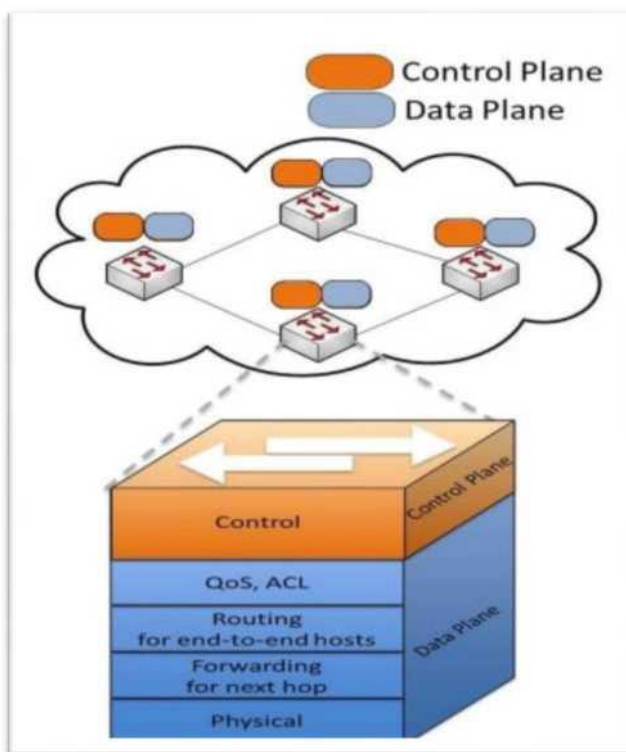
Εικόνα 18 Η αρχιτεκτονική του OpenFlow

Σε ένα SDN δίκτυο για παράδειγμα, οι αποφάσεις που αφορούν διαχείριση των διαθέσιμων πόρων ή την αλληλεπίδραση με τους μεταγωγείς του επιπέδου προώθησης πακέτων λαμβάνονται από τον SDN-ελεγκτή, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο του δικτύου και επικοινωνεί με τους μεταγωγείς μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow. Οι λειτουργίες του πρωτοκόλλου σχετίζονται κυρίως με τις ροές δεδομένων, με τη διαχείριση των ουρών και με την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση θηρών, ενώ οι εφαρμογές οι οποίες τρέχουν «πάνω» από τον ελεγκτή όπως αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να υλοποιηθούν από διαφορετικούς παρόχους. Παρά τις αρχικές του προδιαγραφές, το SDN εξελίχθηκε προκειμένου να προσφέρει στο δίκτυο μεγαλύτερη απόδοση, απομακρυσμένη διαχείριση και να προσφέρει δυνατότητες προγραμματισμού σε φυσικούς ή ιδεατούς σταθμούς βάσης. Στόχος του ONF είναι το SDN να μπορέσει να ανταποκριθεί σε απαιτήσεις όπως η επεκτασιμότητα, η απόδοση και η δυνατότητα να προσαρμόζεται σε ένα περιβάλλον στο οποίο διαφορετικοί SDN-

ελεγκτές διαφορετικά SDN-δίκτυα θα μπορούν να συνυπάρχουν. Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, το SDN έρχεται για να ανατρέψει την στατική αρχιτεκτονική των σημερινών δικτύων η οποία αποτελεί τροχοπέδη στην ανάγκη για δυναμική δέσμευση πόρων και το διαμοιρασμό τους, τα οποία είναι απαραίτητα χαρακτηριστικά των 5G δικτύων.

#### 2.4.4.4 Σενάρια Χρήσης

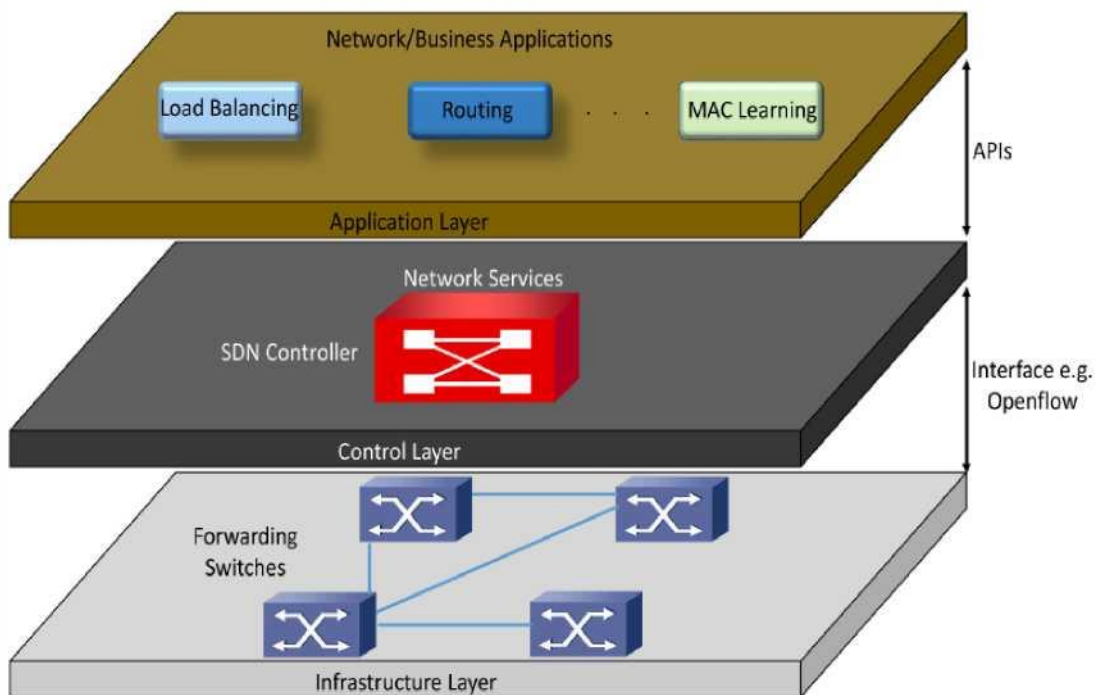
Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στα 5G δίκτυα είναι αναπόφευκτη, λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας αλλά και της διαρκούς ανάγκης για μείωση του συνολικού κόστους του δικτύου, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος μέσω της χρήσης απλοποιημένων υπολογιστών, της χρήσης λογισμικού αλλά και με την ανάπτυξη νέων τεχνικών διαχείρισης του δικτύου. Η τεχνολογία SDN όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω βασίζεται στο διαχωρισμό του επιπέδου διαχείρισης του δικτύου από το επίπεδο προώθησης των πακέτων δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19 που ακολουθεί, το επίπεδο διαχείρισης ασχολείται με διαδικασίες όπως η εγκαθίδρυση ή η επιλογή της κατάλληλης διαδρομής για να γίνει δρομολόγηση των δεδομένων, ή η εγκαθίδρυση και συντήρηση νέων συνόδων. Το επίπεδο προώθησης δεδομένων αποτελείται από τις συσκευές προώθησης πακέτων π.χ. μεταγωγείς, είτε αυτοί είναι φυσικές συσκευές είτε αυτοί είναι εικονικοί [29].



Εικόνα 19 Control και Data Plane χωρίς τη χρήση της τεχνολογίας SDN

Ένα νέο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας SDN είναι το γεγονός ότι η νοημοσύνη του δικτύου βρίσκεται λογικά κεντροποιημένη στον SDN-ελεγκτή, ο οποίος λαμβάνει το ρόλο του εγκεφάλου του δικτύου διατηρώντας παράλληλα μια ολιστική εικόνα της γεωγραφίας του δικτύου. Ο κεντρικός έλεγχος του δικτύου αποτελεί κλειδί για τον εύκολο προγραμματισμό των διαδικασιών που πρέπει να επιτελέσει το δίκτυο, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αλλαγή πολιτικών δρομολόγησης κατά τη λειτουργία (on the fly) και ανοίγει το δρόμο για την εισαγωγή της δυνατότητας καταμερισμού της κίνησης κατά την μετάδοση πακέτων προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του δικτύου. Όσο αφορά την επικοινωνία μεταξύ του SDN-ελεγκτή και των μεταγωγείς (Επίπεδο Δεδομένων), αυτή πραγματοποιείται μέσω της χρήσης του πρωτοκόλλου OpenFlow,

όπου αποτελεί μια διεπαφή η οποία ελέγχει εξ 'αποστάσεως τους πίνακες δρομολόγησης των μεταγωγών, των δρομολογητών και των άλλων συσκευών δρομολόγησης. Βλέπουμε λοιπόν ότι η ευθύνη για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη δρομολόγηση των πακέτων, μεταφέρεται από τις συσκευές δρομολόγησης και κατ' επέκταση από το επίπεδο προώθησης δεδομένων, στο επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης, γεγονός που θα αναλυθεί περισσότερο παρακάτω που θα παρουσιάσουμε τη γενική αρχιτεκτονική ενός SDN δικτύου [31] [33]. Σύμφωνα με τον οργανισμό ONF, ορίζονται βασικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες που πρέπει να ικανοποιεί μια SDN αρχιτεκτονική [12][33]. Καταρχάς, η τεχνολογία SDN κάνει τον έλεγχο και τη διαχείριση του δικτύου άμεσα προγραμματιστική, αφού οι λειτουργίες που αφορούν τη διαχείριση του δικτύου έχουν διαχωριστεί από τις λειτουργίες που αφορούν την προώθηση των πακέτων δεδομένων. Αυτή η δυνατότητα προγραμματισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της διαμόρφωσης του δικτύου, αφού οι διαχειριστές του δικτύου θα μπορούν να τρέχουν εφαρμογές SDN οι οποίες θα έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων υπηρεσιών του δικτύου. Επίσης ο διαχωρισμός του ελέγχου από την προώθηση των πακέτων δίνει στους διαχειριστές ευκινησία (Agility). Τη δυνατότητα δηλαδή να ρυθμίζεται δυναμικά η ροή κυκλοφορίας δεδομένων διαμέσου του δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες και την κατάσταση που βρίσκεται το δίκτυο κάθε στιγμή. Επιπλέον, το γεγονός ότι πλέον ο έλεγχος του επιπέδου προώθησης δεδομένων πραγματοποιείται υπό τη μορφή λογισμικού που τρέχει σε απλούς διακομιστές, δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στους διαχειριστές αφού αναβαθμίζονται πολύ πιο εύκολα και έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από εξειδικευμένες συσκευές «κλειστού» υλικού υπολογιστή. Αυτό έχει και σαν αποτέλεσμα τη μείωση, τόσο του κεφαλαιακού όσο και του λειτουργικού κόστους διαχείρισης του δικτύου, αφού η απαγκίστρωση από εξειδικευμένες συσκευές ανοίγει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες και κάνει την αγορά πιο ανταγωνιστική. Απαραίτητη είναι η λογική της Κεντρικής Διαχείρισης (Centrally Managed). Η νοημοσύνη του δικτύου βρίσκεται κεντροποιημένη σε SDN-ελεγκτές μέσω των οποίων υπάρχει ενιαίος έλεγχος των διαθέσιμων πόρων (π.χ. επεξεργαστική ισχύς, μνήμη κλπ.) και δίνεται η δυνατότητα για δυναμική δέσμευση πόρων κατά τη λειτουργία αλλά και για εύκολη διαχείριση χιλιάδων συσκευών. Τέλος θα πρέπει το SDN να είναι βασισμένο σε Ανοιχτά Πρότυπα (Open standards-based). Αφού όταν υλοποιείται με χρήση ανοιχτού λογισμικού, το SDN απλοποιεί τη σχεδίαση και τη λειτουργία του δικτύου, επειδή οι αποφάσεις λαμβάνονται κεντρικά από τους SDN-ελεγκτές αντί για πολλούς και διαφορετικούς παρόχους, διαφορετικές συσκευές και διαφορετικά πρωτόκολλα. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το SDN και το NFV έχουν πολλά κοινά αφού και οι δύο τεχνολογίες κινούνται προς την κατεύθυνση υιοθέτησης ανοιχτού λογισμικού και συμβατικού υλικού υπολογιστή δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, με τον ίδιο τρόπο που το NFV στοχεύει στο να τρέχουν NFs σε συμβατικό υλικό υπολογιστή, στο SDN το επίπεδο διαχείρισης μπορεί να υλοποιηθεί υπό τη μορφή λογισμικού που τρέχει σε συμβατικό υλικό υπολογιστή. Το SDN θα επιταχύνει την εγκαθίδρυση του NFV προσφέροντας έναν ευέλικτο και αυτοματοποιημένο τρόπο συσχέτισης των λειτουργιών του δικτύου με τον αποδοτικό διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων. Στην Εικόνα 18, παρουσιάζεται μια απεικόνιση των λογικών στρωμάτων του SDN έτσι ώστε να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί.



Εικόνα 20 Λογικά Στρώματα σε μια SDN Αρχιτεκτονική

#### 2.4.4.5 Πλεονεκτήματα της SDN Αρχιτεκτονικής

Εφόσον αναλύσαμε τα βασικά χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική, πρέπει να δούμε και τα οφέλη που προσδοκούμε από την υιοθέτηση της τεχνολογίας SDN στη σχεδίαση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Τα οφέλη της τεχνολογίας SDN θα είναι ακόμη πιο ορατά σε συνδυασμό με τις άλλες τεχνολογίες που αναφέραμε πιο πάνω, δηλαδή το C-RAN και το NFV. Πιο συγκεκριμένα όμως, η υιοθέτηση της τεχνολογίας SDN προσφέρει προγραμματισιμότητα, δυνατότητα αλλαγών (Openness), συνεργατικότητα (Cooperativeness) και δυνατότητες εικονικών δικτύων [29][34]. Οι SD-μεταγωγείς (Software Defined Switches) μπορούν να επαναπρογραμματίζονται στη λειτουργία με το να τους ανατίθενται δυναμικά δικτυακοί πόροι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα, να μειώνονται τα σφάλματα και να αποφεύγονται τα μπερδέματα όσο αφορά τη διαμόρφωση των συσκευών. Επιπλέον, απλοποιείται η εγκατάσταση, η συντήρηση αλλά και η αναβάθμιση του δικτύου. Τέλος, είναι δυνατή η δημιουργία νέων εφαρμογών χωρίς την ανάγκη για την πραγματοποίηση επενδύσεων από την πλευρά του παρόχου, ενώ ενισχύεται και η καινοτομία. Το SDN όπως αναφέραμε και πιο πάνω, είναι μια τεχνολογία επιχειρηματικά ουδέτερη η οποία δημιουργεί πολλές νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες λόγω του γεγονότος ότι απαγκιστρώνει το λογισμικό από τα στενά πλαίσια του υπολογιστή και έτσι μπορούν εξειδικευμένες λειτουργίες να τρέχουν σε συμβατικούς διακομιστές οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι σε κέντρα δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τόσο τη μείωση του κεφαλαιακού κόστους όσο και τη μείωση του κόστους για συντήρηση του δικτύου. Τόσο οι βόρειες όσο και οι νότιες διεπαφές του SDN-ελεγκτής είναι καθορισμένες αλλά δεν αποτελούν κλειστό λογισμικό. Οι αποφάσεις που αφορούν τις λειτουργίες του δικτύου όπως π.χ. δρομολόγηση όλων των SD-μεταγωγών, πραγματοποιούνται στον SDN-ελεγκτή. Αυτή η κεντρική διαχείριση έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση στο συντονισμό των SD-μεταγωγών προκειμένου αυξηθεί η απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, ενισχύεται η καθολική εικόνα που έχει ο ελεγκτής για την κατάσταση του δικτύου κάθε στιγμή, δίνοντάς του τη δυνατότητα να εκτιμά την κίνηση στο δίκτυο και να αποσυμφορεί κάποιες εικονικές συνδέσεις ή να προσφέρει ακόμη περισσότερους πόρους προκειμένου να διασφαλίζεται το QoS.

Πολλαπλά εικονικά δίκτυα (VNs) μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα μοναδικό SDN. Κάθε VN έχει τον έλεγχο των δικών του λειτουργιών και λειτουργεί με τα δικά του πρωτόκολλα, χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση με τα άλλα VNs. Σε κάθε VN ανατίθενται δυναμικά οι πόροι που απαιτούνται κάθε στιγμή.

#### 2.4.4.6 Προκλήσεις

Η αφαιρετικότητα του δικτύου θα έχει ουσιαστική σημασία για τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής SDN. Για αυτό πρέπει δομηθεί μια θεωρητική βάση για το δίκτυο με τις αρχές ελέγχου του SDN [35] [36] [37] [38]. Κατ' αρχάς ο διαμοιρασμός του φάσματος στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πρέπει να γίνεται σε ένα υψηλότερο επίπεδο συντονισμού. Επίσης θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο οι λειτουργίες ελέγχου να επιτελούνται με διαφορετικά χρονοδιαγράμματα. Επιπλέον στην ιδανική περίπτωση που εφαρμοστεί το SDN στο επίπεδο ελέγχου, πρέπει να συμπεριφέρεται σαν ένα λειτουργικό σύστημα, όπου οι εφαρμογές χαμηλού στρώματος ενθυλακώνονται και μπορούν να γίνουν προσβάσιμες από το υψηλό επίπεδο ελέγχου μέσω διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API). Αυτό δημιουργεί ένα γενικό προγραμματιζόμενο πλαίσιο ελέγχου σε διαφορετικές φυσικές οντότητες. Ο προγραμματιζόμενος έλεγχος σε συνδυασμό με την εικονικοποίηση του δικτύου θα επιτρέψει πιο ευέλικτες λειτουργίες ελέγχου για διάφορες ομάδες οντοτήτων δικτύου ή τους τελικούς χρήστες. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη γρήγορη εφαρμογή νέων αλγορίθμων ελέγχου και υπηρεσιών. Η αποσύνδεση των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων στο SDN πρέπει να εξετάσει διαφορετικά χρονοδιαγράμματα στην διαχείριση των πόρων ραδιοσυχνοτήτων. Ο προγραμματισμός σε ένα BBS (Baseband Station) συμβαίνει σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, ενώ η εκχώρηση ραδιοφάσματος σε μικρές κυψέλες μπορεί να χρειαστεί ώρες, ειδικά στις βεβαρυσμένες ώρες χρήσης του δικτύου. Η διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων πρέπει γίνει προσεκτικά είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα, ώστε να ταιριάζει με τη νέα αρχιτεκτονική δικτύου. Το πρώτο βήμα είναι να διαμορφωθούν συμπεριφορές για το φυσικό και το επίπεδο σύνδεσης έτσι ώστε να είναι εφικτή η δόμηση ενός ανοιχτού και συγκεκριμένου πλαισίου ελέγχου για τα διάφορα RANs. Το γεγονός αυτό προσθέτει ακόμα μια τεράστια απαίτηση στη διαχείριση των πόρων των ραδιοσυχνοτήτων, γιατί ο τεμαχισμός του δικτύου για την υποστήριξη των RAN δεν σημαίνει και απλό τεμαχισμό του φάσματος. Η πρόκληση λοιπόν είναι στο πώς θα εφαρμοστεί σωστά η αφαιρετικότητα στην κοινή χρήση του φάσματος, έτσι ώστε το υψηλό επίπεδο του πλαισίου ελέγχου να είναι σε θέση να διαμοιράζει τους πόρους του ραδιοφάσματος των εικονικών δικτύων, προσφέροντας και εγγυημένες υπηρεσίες. Οι λύσεις που προσφέρει το SDN για τα RANs, τον πυρήνα του δικτύου της κινητής, και το Internet έχουν διαφορετικούς στόχους ελέγχου. Για τα RANs ο κύριος στόχος είναι να συντονίζει και να ελέγχει τους πόρους των ραδιοσυχνοτήτων, για τον πυρήνα των RRHs είναι να συντονίζει την επεξεργασία των πακέτων για την κινητικότητα και την χρέωση των χρηστών, ενώ για το διαδίκτυο ο κύριος στόχος είναι η αποτελεσματική και αποδοτική προώθηση των πακέτων. Λόγω λοιπόν των διαφορετικών απαιτήσεων ελέγχου, η ενσωμάτωση του SDN σε διαφορετικά τμήματα του δικτύου προς εύρεση μιας E2E (exchange-to-exchange) λύσης είναι εξαιρετικά προκλητική. Ωστόσο η υψηλή ζήτηση σε διαφορετικές υπηρεσίες, και ειδικότερα σε υπηρεσίες ευαίσθητες στον χρόνο βάζει ακόμα μεγαλύτερες προκλήσεις στα δίκτυα. Το κλειδί για μπορέσουν οι E2E SDN λύσεις να γίνουν εφαρμόσιμες, έγκειται στο σχεδιασμό που βασίζεται στο λογισμικό, προκειμένου να ενσωματωθούν συστηματικά οι διαφορετικές λύσεις SDN. Εκτός από τα SONs (Self Organizing Networks), πολύ σημαντική είναι και η ευφυΐα του δικτύου για την υποστήριξη αυτοματισμού του SDN. Στόχος είναι να ενσωματωθεί σε πολλαπλά επίπεδα. Στο υψηλό επίπεδο του πλαισίου ελέγχου, η νοημοσύνη του δικτύου, και ιδιαίτερα η εκτεταμένη μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη, είναι πολύ σημαντική για την πρόβλεψη της κυκλοφορίας και την δυναμική χρήση των πόρων του δικτύου. Αυτή η νοημοσύνη μπορεί να χτιστεί μαθαίνοντας από



το περιβάλλον, τα σχέδια κυκλοφορίας από στατιστικά δεδομένα κίνησης, ακόμα και από τις συμπεριφορές των χρηστών κατά την πρόσβαση στο δίκτυο. Στο πλαίσιο ελέγχου θα πρέπει να παρέχονται ανοικτές διασυνδέσεις με δυνατότητα υποστήριξης πληροφοριών από δίκτυο σε δίκτυο σε διαφορετικά επίπεδα. Άλλη μια βασική πρόκληση για την επιτυχή ανάπτυξη του SDN είναι η διασφάλιση της διαλειτουργικότητας με τα υπάρχοντα δίκτυα. Υπάρχει μια τεράστια εγκατεστημένη βάση των παραδοσιακών δικτύων που υποστηρίζει κρίσιμες επιχειρηματικές δραστηριότητες. Η απότομη αντικατάστασή τους με απόλυτο τρόπο δεν μπορεί να συμβεί χωρίς να προκαλεί μαζικές διακοπές του δικτύου με αποτέλεσμα να μην γίνεται εξυπηρέτηση των χρηστών του δικτύου. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο η ανάπτυξη του SDN να συμβαίνει σταδιακά και να υπάρχει στενή και άμεση συνεργασία με τα υπάρχοντα δίκτυα. Παρά το γεγονός ότι μεγάλη προσοχή έχει δοθεί ως προς το πώς μπορεί το SDN να αναπτυχθεί με επιτυχία και να συνεργάζεται άψογα με τα υπάρχοντα δίκτυα, τεράστια σημασία έχει και η ασφάλεια των δικτύων που το χρησιμοποιούν. Για παράδειγμα κάποιος μπορεί να υπερφορτώσει τον ελεγκτή SDN και να πειράξει την μνήμη του με την εισαγωγή πολλών νέων και άγνωστων ροών. Ο ελεγκτής δεν θα είναι σχεδιασμένος να τις χειρίζεται προκαλώντας διακοπές και άρνηση εξυπηρέτησης. Επίσης αν κάποιος εντοπίσει τα τρωτά σημεία του ελεγκτή μπορεί να αποκτήσει τον πλήρη έλεγχο του δικτύου. Ένα ακόμα τρωτό σημείο είναι ότι πολλαπλοί κόμβοι πρόσβασης συνδέονται σε έναν ενιαίο ελεγκτή ή ένας μόνο κόμβος που συνδέεται με πολλούς ελεγκτές, γεγονός που κάνει τη δυναμική μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση περισσότερο εφικτή. Τέλος το SDN χρησιμοποιεί ανοικτές διεπαφές και γνωστά πρωτόκολλα για την απλούστευση της δικτύωσης, τα οποία μπορεί να αξιοποιηθούν από κάποιον κακόβουλο, ώστε να αποκτήσει πλήρη έλεγχο του δικτύου. Εάν ο ελεγκτής SDN έχει κάποιο πρόβλημα αυτό θα διαταράξει το σύνολο του δικτύου με αποτέλεσμα να μην μπορέσει να εξυπηρετήσει τους χρήστες του. Έτσι, είναι απαραίτητο να υπάρξει ένα σύμπλεγμα ενεργών stand-by ελεγκτών για να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών στους χρήστες. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί μια αρχιτεκτονική με καταναμημένους SDN ελεγκτές προκειμένου να γίνεται εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης ανάμεσά τους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.

## 2.4.5 mmWave

### 2.4.5.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία mmWave, είναι σαφώς μια τεχνολογία η οποία θα πρωταγωνιστήσει μεταξύ άλλων στη δικτύωση των backhaul συνδέσεων που θα αναλύσουμε και παρακάτω σε άλλη ενότητα. Είναι χρήσιμο να εξετάσουμε την αναγκαιότητα για τη χρήση της mmWave τεχνολογίας, αλλά και την ανάγκη υλοποίησης ενός μοντέλου δικτύων όπου θα έχει την αρχιτεκτονική fronthaul, backhaul και τα σενάρια της μεταξύ τους διασύνδεσης. Έχει πολλές πτυχές η ανάπτυξη μιας backhaul αρχιτεκτονικής και θα είναι επιτακτική ανάγκη η εφαρμογή της για τη μετάβαση στα 5G δίκτυα καθώς το εύρος των δεδομένων και η ετερογένεια των δικτύων δύσκολα θα μπορεί να καλυφθεί, από την ήδη υπάρχουσα υποδομή. Τα οφέλη θα είναι πολυδιάστατα, από οικονομικής και ενεργειακής άποψης μιας και οι κεραιές που θα χρησιμοποιούνται στα small cells θα είναι πολύ πιο χαμηλού κόστους και όχι τόσο ενεργοβόρες όπως αυτές των macrocells. Παρακάτω θα αναλύσουμε την mmWave τεχνολογία η οποία θα είναι μια από τις επικρατέστερες στο backhaul δίκτυο.

### 2.4.5.2 Ορισμός και αναγκαιότητα

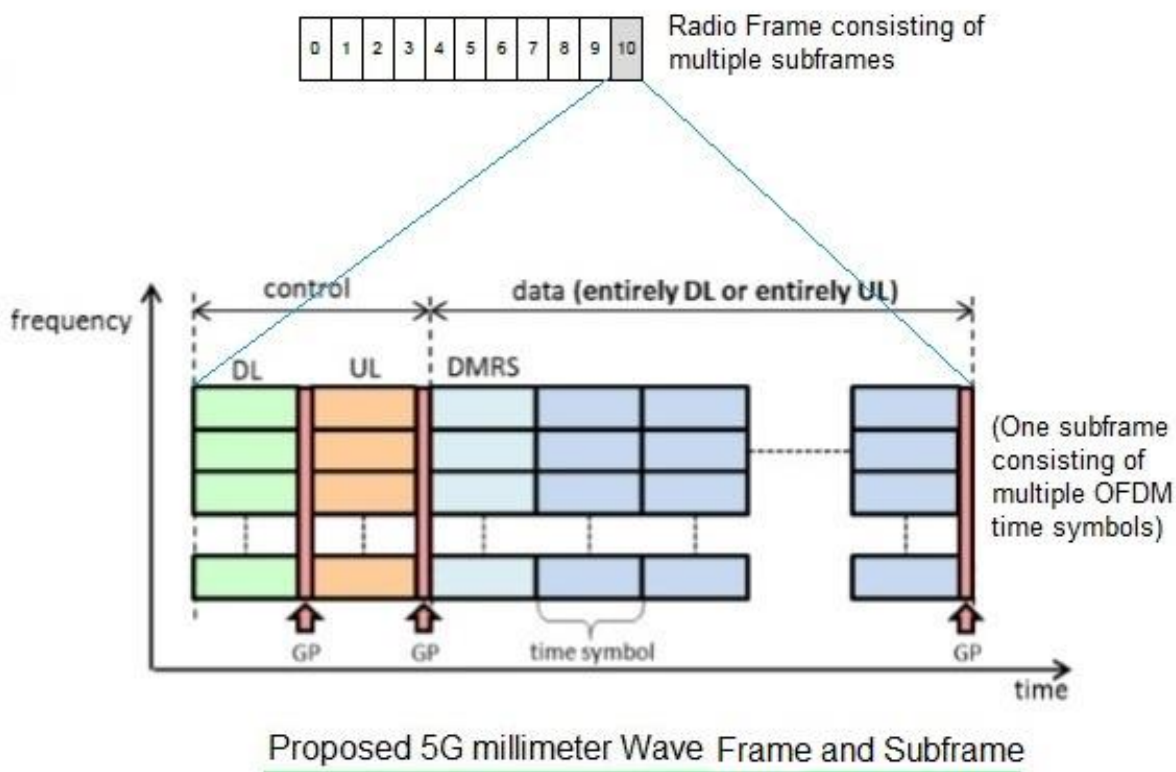
Τα επίγεια συστήματα ασύρματης επικοινωνίας έχουν σε μεγάλο βαθμό περιορίσει τη λειτουργία τους στο σχετικά μικρό εύρος των μικροκυμάτων συχνοτήτων που εκτείνεται από αρκετές εκατοντάδες MHz σε μερικά GHz και αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μερικών



εκατοστών μέχρι περίπου ένα μέτρο [39],[40]. Μέχρι τώρα όμως αυτή η φασματική ζώνη, που συχνά αποκαλείται και "beachfront spectrum», έχει γίνει σχεδόν πλήρως απασχολημένη, ιδίως σε ώρες αιχμής. Με την εκρηκτική αύξηση της κίνησης από την κινητή μετάδοση δεδομένων, η αντίφαση μεταξύ της ανάγκης για μεγάλη χωρητικότητα του δικτύου και η έλλειψη φάσματος γίνεται ολοένα και πιο έντονη. Το εμπόδιο αυτής της έλλειψης γίνεται ένα βασικό πρόβλημα για τα 5G δίκτυα αφού πολύ περισσότερο εύρος ζώνης απαιτείται. Αν και με την χρήση καινούργιων ρυθμιστικών διαδικασιών θα μπορούσε να γίνει καλύτερη αξιοποίηση του beachfront εύρους ζώνης, ένας ακόμη πιο αποδοτικός τρόπος θα ήταν να προσθέσουμε νέες ζώνες φάσματος στο ήδη υπάρχον. Η ζώνη συχνοτήτων από 30 GHz έως 300 GHz, γνωστή και ως millimeter wave (mmWave) έχει προταθεί να γίνει ένα σημαντικό μέρος της πέμπτης γενιάς δικτύων, για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας multi-gigabit, για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και για υπέρ-υψηλής ευκρίνειας βίντεο (UHDV). Η βασικής εστίαση γίνεται στη ζώνη λειτουργίας του WiFi (με το πρότυπο WiGiG στα 60 GHz), όπως και στη ζώνη 28 GHz, τη ζώνη 38 GHz και το E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz). Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συμπληρωματικά metal-oxide-semiconductor (CMOS) radio frequency (RF) ολοκληρωμένα κυκλώματα ανοίγει το δρόμο για τα ηλεκτρονικά προϊόντα προς την ζώνη των mmWave. Το κίνητρο πίσω από ένα νέο πρότυπο είναι η εκθετική αύξηση της ασύρματης σύνδεσης. Μιλάμε για δισεκατομμύρια χρήστες, δισεκατομμύρια συσκευές και δισεκατομμύρια συνδέσεων. Όλα αυτά, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν από νέο πρότυπο, διότι το 4G δεν πρόκειται και δεν μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματικό για να χειριστεί μια τέτοια ανάπτυξη, με μεγάλο μέρος της να είναι η ευρεία κυκλοφορία βίντεο από έξυπνα τηλέφωνα, υπολογιστές ταμπλέτες, ιστότοπους κοινωνικής δικτύωσης τα οποία συντέλεσαν στο να γίνει η κυκλοφορία βίντεο περισσότερο από το ήμισυ του συνόλου της κινητής κυκλοφορίας.

### 2.4.5.3 Πρόταση Δομής των Συστημάτων mmWave

Το φάσμα συχνοτήτων του mmWave ορίζει τον τρόπο που οι μεταδόσεις από τους 5G σταθμούς βάσης και τους τερματικούς χρήστες θα αναμεταδίδονται στο περιβάλλον του αέρα. Η παρακάτω εικόνα 21 απεικονίζει ένα πλαίσιο. Αυτό θα επαναλαμβάνεται όσο διαρκεί μια ασύρματη 5G μετάδοση. Ως εκ τούτου θα υπάρξουν περισσότερα πλαίσια σε ένα φάσμα του mmWave.



**Εικόνα 21 Πρόταση για την Δομή του πλαισίου mmWave**

Ένα 5G mmWave πλαίσιο ακολουθεί την διαμόρφωση TDD (Time Division Duplex). Η διάρκεια του καρέ είναι περίπου 10ms. Το πλαίσιο συνίσταται σε μικρότερο μέγεθος πλαισίων (διάρκειας 1ms). Το πλαίσιο αποτελείται από OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) σύμβολα. Στην ανοδική ζεύξη και στην κατερχόμενη ζεύξη κατανέμονται διαφορετικές χρονικές περιπτώσεις πλαισίων. Ανοδικές και καθοδικές συνδέσεις χρησιμοποιούν ίδιες συχνότητες σε τοπολογία TDD σε διαφορετικές χρονικές αυλακώσεις. Θα υπάρξει ένα χρονικό διάστημα ασφαλείας ή κενό, μεταξύ των διαφόρων τμημάτων των χρόνο-πλαisiών για την αποφυγή παρεμβολών. Το πλαίσιο είναι χωρισμένο στα μέρη αναφοράς, ελέγχου και τα δεδομένα. Σήματα αναφοράς μεταφέρονται σε κάθε πλαίσιο και χρησιμοποιούνται για να αποδιαμορφώσουν τα δεδομένα της κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης. Τμήμα ελέγχου μεταφέρει τα μηνύματα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σύνδεσης και διαχείριση μεταξύ eNB (Evolved node b) και UE (User Equipment). Τμήμα δεδομένων μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο δεδομένων σύμφωνα με την εφαρμογή της χρήσης από διάφορα UEs στο σύστημα 5G. Το πλαίσιο διαιρείται περαιτέρω βάσει κατερχόμενων συνδέσεων μόνο (Downlink), ανερχόμενων μόνο (Uplink) και αμφίδρομη χρησιμοποίηση από UEs και eNB.

#### 2.4.5.4 Πλεονεκτήματα mmWave

Το 5G mmWave παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ως εκ τούτου μπορεί να φιλοξενηθεί μεγαλύτερος αριθμός συνδρομητών. Λόγω λιγότερου εύρους ζώνης στο φάσμα χιλιοστών, είναι πιο ευνοϊκό για την εγκατάσταση μικρότερων κυψελών. Η κάλυψη δεν περιορίζεται στην γραμμή της όρασης. Η βολιδοσκόπηση του καναλιού (Channel sounding) χρησιμοποιείται για να φροντίζει διαφορετικούς τύπους απωλειών σε συχνότητες των mmWave, έτσι ώστε το 5G δίκτυο να λειτουργεί ικανοποιητικά. Η βολιδοσκόπηση του καναλιού αναφέρεται σε μέτρηση ή εκτίμηση των χαρακτηριστικών του καναλιού που βοηθά στην επιτυχή σχεδιασμό, ανάπτυξη και εγκατάσταση του

δικτύου 5G. Το μέγεθος της κεραίας είναι μικρό, ως εκ τούτου μεγάλος αριθμός κεραιών μπορεί να συσκευαστεί σε μικρό μέγεθος. Αυτό οδηγεί σε χρήση massive MIMO σε eNB/AP για να ενισχύσει την χωρητικότητα. Ο δυναμικός σχηματισμός δέσμης μετριάζει τις υψηλότερες απώλειες διαδρομής σε συχνότητες mmWave.[41] Τα 5G mmWave δίκτυα υποστηρίζουν πολλαπλών-gigabit backhaul μέχρι 400 μέτρα και πρόσβαση κινητής τηλεφωνίας μέχρι 200-300 μέτρα. Αυτά τα πλεονεκτήματα κάνουν το mmWave στο 5G ως ένα από τους πιο ισχυρούς υποψηφίους για το μέλλον του τομέα των κινητών επικοινωνιών.

#### 2.4.5.5 Προκλήσεις mmWave

Χτίζοντας ένα κυψελωτό σύστημα από στενές και επικεντρωμένες δέσμες δεν είναι καθόλου εύκολο και αλλάζει σε μεγάλο βαθμό τον παραδοσιακό τρόπο που σχεδιάζουμε ένα κυψελωτό σύστημα. Οι mmWave ακτίνες κινούνται σε πολύ μικρότερες γωνίες γεγονός που αλλάζει τελείως τον τρόπο μετάδοσης και την ευαισθησία σε μη σωστά κατευθυνόμενες ακτίνες. Η παρεμβολή αποκτά μια πιο δυαδική συμπεριφορά όπου οι περισσότερες ακτίνες δεν τέμνονται, αλλά ισχυρές παρεμβολές συμβαίνουν ανά διαστήματα. Στην πραγματικότητα η έννοια της κυψέλης αλλάζει σε ένα σύστημα με mmWave, αφού όχι η απόσταση, αλλά κυρίως το μπλοκάρισμα θα είναι συχνά το βασικό που θα επηρεάζει το εισερχόμενο κύμα. Μια βασική δυσκολία για τις στενές δέσμες είναι να εγκατασταθούν οι συσχετίσεις μεταξύ χρηστών και Σταθμών Βάσης. Για να βρουν ο ένας τον άλλο θα πρέπει να σκανάρουν διαφορετικές γωνίες για να βρουν κάποια στενή ακτίνα ή να εφαρμοστεί κάποια μέθοδος που θα στενεύει μια πιο φαρδιά και άτονη ακτίνα σε μια σταδιακή διαδικασία. Λύσεις σε αυτό το πρόβλημα, λαμβάνοντας υπ' όψη την υψηλή κινητικότητα, θα είναι ένα σπουδαίο ερευνητικό θέμα, αξιοποιώντας την κληρονομιά δικτύων 4G. Μια ταυτόχρονη αξιοποίηση στις συχνότητες μικροκυμάτων και mmWave θα μπορούσε να πάει πολύ μακριά για να ξεπεραστούν ορισμένα από τα ανωτέρω εμπόδια. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση από την άποψη αυτή είναι η έννοια της «κυψέλης φάντασμα» (ή «μαλακή κυψέλη» στο 3GPP) [39][40] όπου θα πρέπει να απασχολούνται συχνότητες mmWave για μετάδοση δεδομένων από σταθμούς Βάσης μικρών κυψελών, ενώ ο έλεγχος θα λειτουργεί σε συχνότητες μικροκυμάτων από μακρινούς σταθμούς Βάσης. Αυτό θα εξασφαλίσει σταθερές συνδέσεις και αξιόπιστο έλεγχο, με βάση την οποία απίστευτα γρήγορη μετάδοση δεδομένων μπορεί να κανονιστεί για συνδέσεις μικρής εμβέλειας mmWave [42]. Σποραδικές διακοπές από αυτές τις mmWave συνδέσεις, θα είναι πολύ λιγότερο απωθητικές, αφού οι συνδέσεις ελέγχου θα παραμείνουν στη θέση τους και θα είναι δυνατή η ανάκτηση δεδομένων που χάθηκαν μέσω αναμεταδόσεων. Παρά την πρόοδο που σημειώθηκε στα συστήματα mmWave Wi-Fi, θέματα υλικού μη τετριμμένα παραμένουν, και σε ορισμένες περιπτώσεις θα επηρεάσουν άμεσα το πώς σχεδιάζονται οι πτυχές της επικοινωνίας. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η κατανάλωση ενέργειας που ιδιαίτερα τα αναλογικά σε ψηφιακά (Analog to Digital) αλλά επίσης το ψηφιακά σε αναλογικά (Digital to Analog) από τους μετατροπείς, χρειάζονται για μεγάλο εύρος ζώνης. Μια κύρια συνέπεια είναι ότι, παρά το γεγονός ότι απαιτούνται μεγάλες κεραίες και υψηλός δέκτης σε ευαισθησίες ώστε να ασχολείται με το χάσιμο των συνδέσεων και να έχουμε πλήρως ψηφιακό διαμορφωτή ακτινών για κάθε κεραία, φαίνεται να είναι ανέφικτο. Περισσότερο πιθανό είναι να παραμείνουν οι δομές που βασίζονται στους παραδοσιακούς αναλογικούς μετατροπείς ή, ίσως, υβριδικές δομές όπου οι ομάδες των κεραιών μοιράζονται τα A/D (Analog to Digital) και D/A (Digital to Analog) [43] [44] [45] [46]. Από την άλλη πλευρά, προσφέροντας κάποια ανακούφιση από τις δυσκολίες αυτές, τα κανάλια είναι αραιότερα και έτσι διευκολύνεται η απόκτηση πληροφοριών για την κατάσταση του καναλιού.

### 3. 5G Fronthaul και Backhaul

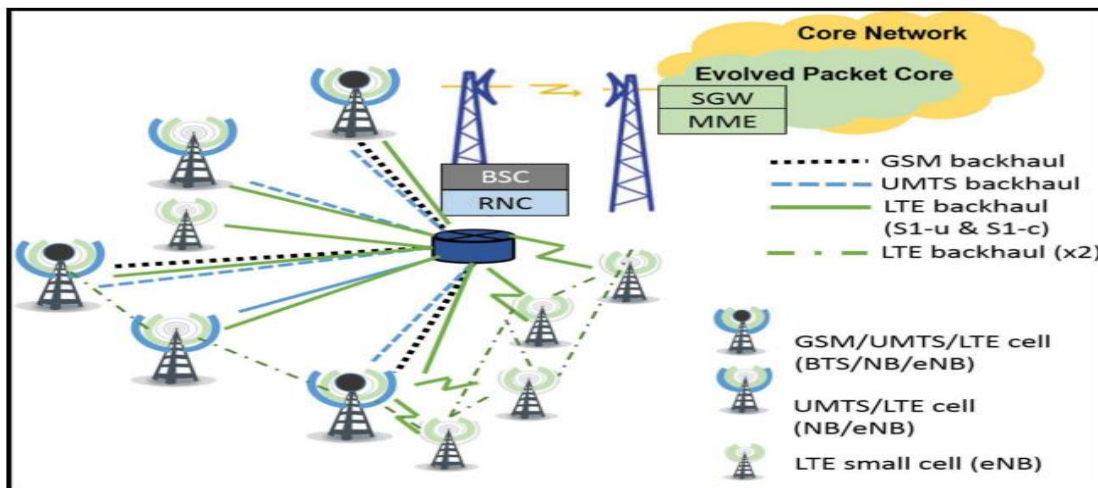
#### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξηγήσουμε τι είναι το fronthaul και το backhaul, καθώς και ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτά τα τμήματα του δικτύου. Θα επικεντρωθούμε στο backhaul τμήμα και κυρίως στις ασύρματες τεχνολογίες που μπορούν να υλοποιηθούν. Επί του παρόντος, [FH&BH req] τα LTE δίκτυα χρησιμοποιούν δύο εντελώς διαφορετικές αρχιτεκτονικές στις οποίες, η πρώτη είναι μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική (Distributed-RAN) στην οποία οι σταθμοί βάσης (BSs) υλοποιούν όλες τις διεργασίες του RAN και η άλλη, η συγκεντρωτική αρχιτεκτονική, όπου οι διεργασίες του RAN υλοποιούνται από κεντρικές μονάδες βασικής ζώνης (Baseband Units – BBUs). Η τελευταία αρχιτεκτονική είναι γνωστή και ως Centralized RAN που έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην κατακεντρωμένη περίπτωση, δηλαδή στην αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, οι σταθμοί βάσης συνδέονται με backhaul συνδέσεις στο δίκτυο κορμού, όπως και μεταξύ τους. Στην C-RAN περίπτωση οι Remote Radio Heads (RRHs) συγκεντρώνουν όλη την κίνηση και την στέλνουν στις κεντρικές BBUs. Το κομμάτι της σύνδεσης μεταξύ των RRHs και των BBUs λέγεται fronthaul που θα δούμε και εκτενέστερα παρακάτω.

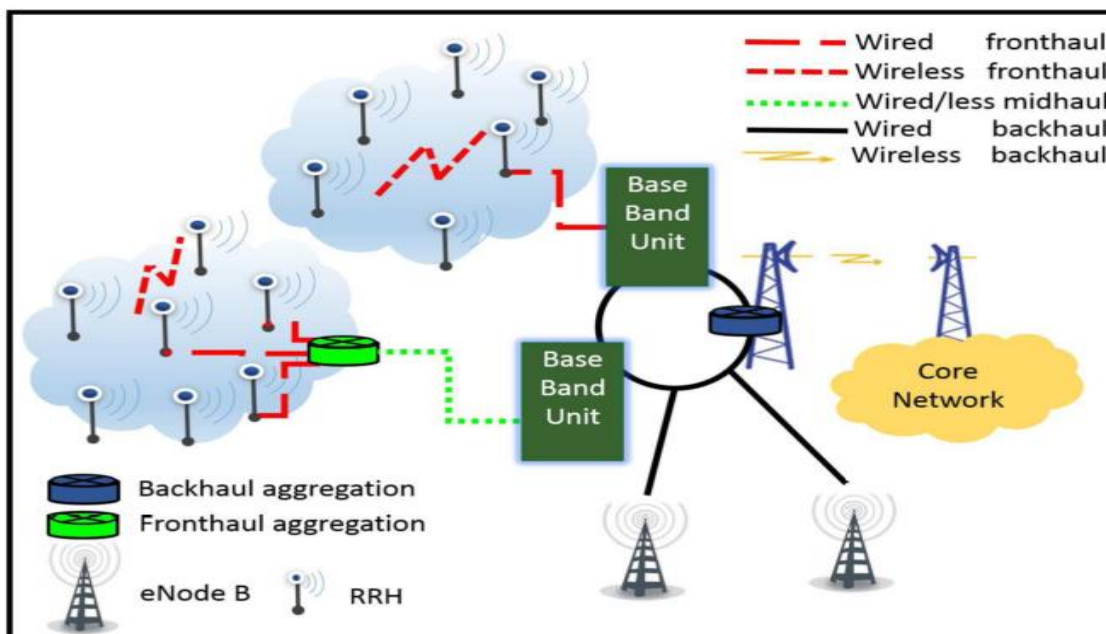
#### 3.2 Fronthaul και Backhaul

##### 3.2.1 Fronthaul

Όπως είδαμε και πιο πάνω, ανάλογα με την αρχιτεκτονική που θα διαλέξουμε στο δίκτυο πρόσβασης (RAN), αν είναι δηλαδή D-RAN ή C-RAN αναλόγως αναλύεται και το κομμάτι του δικτύου που ονομάζεται Fronthaul. Εδώ εμείς, θα ασχοληθούμε με το την αρχιτεκτονική του C-RAN (για 5G δίκτυα) όπου όλη η κίνηση εξυπηρετείται από τους RRHs (ή RRUs αλλιώς – Remote radio Units) οι οποίοι RRHs στέλνουν την κίνηση προς επεξεργασία και δρομολόγηση σε ένα σημείο συγκέντρωσης (Fronthaul Aggregation) το οποίο με τη σειρά του, στέλνει όλα τα δεδομένα στις Baseband Units – BBUs, σε αντίθεση με προγενέστερες τεχνολογίες GSM/UMTS/LTE όπου όλη η δρομολόγηση, επεξεργασία γινόταν αντίστοιχα από τους BSs/NB/eNB. Δεδομένου του κόστους εγκατάστασης όλων αυτών των «έξυπνων» κεραιών να είναι σαφώς μεγαλύτερο από το να εγκαταστήσεις πολλές μικρές κεραιές (RRHs) χωρίς τόσο μεγάλη υπολογιστική ευφυΐα, είναι πιο αποδοτικό πλέον να διαχωρίσουμε το δίκτυο σε μια τέτοιου είδους λογική [47]. Τα παραπάνω μπορούμε να τα δούμε στις δυο εικόνες παρακάτω.



Εικόνα 22 Η υλοποίηση όπου οι Base Station Controller (BSC) και Radio Network Controller (RNC) συγκεντρώνουν όλη την κίνηση του δικτύου από τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης τους[47]



Εικόνα 23 Η υλοποίηση του Fronthaul σεναρίου σε ένα 5G δίκτυο [47]

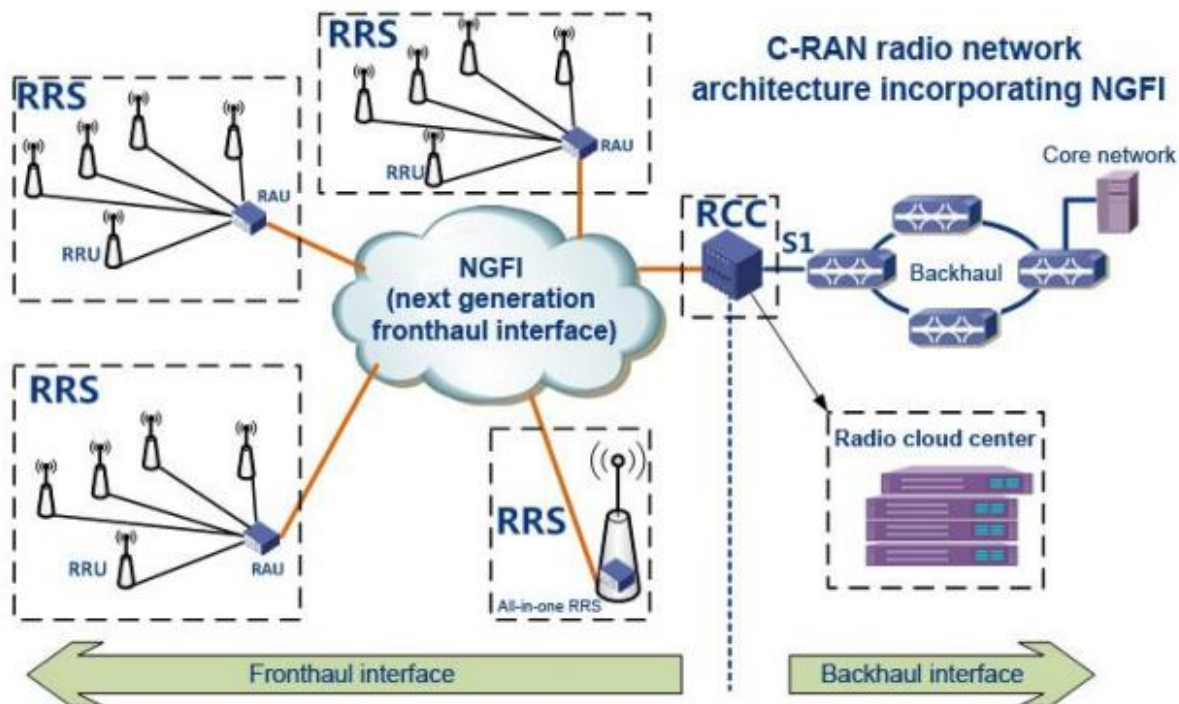
Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι fronthaul συνδέσεων οι οποίοι ταξινομούνται (με κριτήριο την πρόσβαση) σε access-specific & access-agnostic. Για την λειτουργία ενός 5G συστήματος (όπως στην εικόνα 24) είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας fronthaul διεπαφής η οποία συνδέει αυτά τα διαφορετικά επίπεδα. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα η διεπαφή fronthaul τοποθετείται ανάμεσα στις ραδιομονάδες και στις μονάδες ζώνης συχνοτήτων και είναι υπεύθυνη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του δικτύου σε εύρος ζώνης, καθυστέρηση και συγχρονισμό. Οι φυσικές διεπαφές του fronthaul ακολουθούν τα πρότυπα του Common Public Radio Interface (CPRI), του Open Base Architecture Initiative (OBSAI) και του Open Radio Interface (ORI). Το CPRI είναι το πιο δημοφιλές και διαδεδομένο πρότυπο. Με τη χρήση της ανανεωμένης διεπαφής Next Generation Fronthaul Interface (NGFI) επαναπροσδιορίζονται οι λειτουργίες των BBUs και RRUs με αποτέλεσμα οι λειτουργίες του BBU να εκτελούνται στο Radio Cloud Center (RCC), και του RRU εκτελούνται στο Radio Remote System (RRS). Επιπλέον στα 5G δίκτυα, το fronthaul δεν θεωρείται πια σημείο προς σημείο



(point-to-point) σύνδεση, αλλά θεωρείται, πολλά προς πολλά (many-to-many) σημεία δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί πρωτόκολλα ανταλλαγής πακέτων. [48]

Οι βασικές αρχές της λειτουργίας του fronthaul είναι

- Statistical multiplexing (στατιστική πολυπλεξία)
- Προσαρμοσμένη διαμόρφωση εύρους ζώνης σε απόκριση του ωφέλιμου φορτίου
- Αποσύνδεση της κίνησης της διεπαφής από τον αριθμό των κεραιών του RRU
- Ουδετερότητα σε σχέση με την τεχνολογία της διεπαφής αέρα
- Βελτιστοποίηση των RRS-RCC συνδέσεων

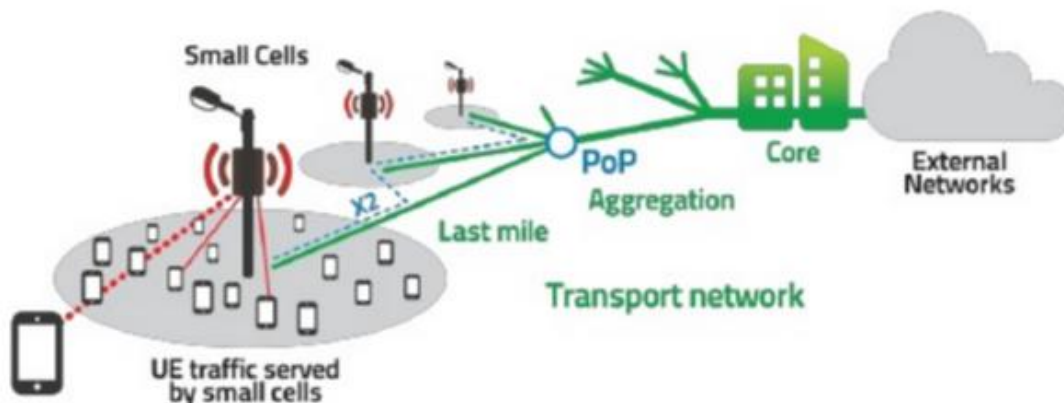


Εικόνα 24 C-RAN Radio Network Architecture Based on NGFI (Next Generation Fronthaul Interface)[48]

### 3.2.2 Backhaul

Τα δίκτυα backhaul, αποτελούν ουσιαστικό τμήμα του συνολικού δικτύου, αφού οφείλουν να υποστηρίζουν χρήστες με πολλές και διαφορετικές ανάγκες καθώς και πλήθος διαφοροποιημένων υπηρεσιών και εφαρμογών κάτι που είναι ανέφικτο με τα δίκτυα παλαιάς σχεδίασης και αρχιτεκτονικής. Στις μέχρι πρότινος τεχνολογίες το backhaul κομμάτι δικτύου αναφέρεται στην μεταφορά δεδομένων μεταξύ του σταθμού βάσης (base station) και του κεντρικού δικτύου (core network) μέσω εναλλακτικής ασύρματης σύνδεσης όταν δεν υπάρχει παρουσία οπτικής ίνας ή χαλκού. Η πιο κοινή μέθοδος της ασύρματης σύνδεσης στο δίκτυο περιλαμβάνει τα μικροκυματικά συστήματα ενώ και οι δορυφόροι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αλλά σε μικρότερη έκταση. Όπως είδαμε και στην εικόνα 23, στο 5G δίκτυο, όλα τα δεδομένα συγκεντρώνονται από τους BBUs σε ένα σημείο που ονομάζεται backhaul aggregation. Το κομμάτι του δικτύου από αυτό το σημείο μέχρι το δίκτυο κορμού, ονομάζεται backhaul. Υπάρχουν δυο κατηγορίες προσβάσεων σε αυτό το κομμάτι δικτύου, οι ασύρματες και οι ενσύρματες. Δεδομένου ότι το κόστος λειτουργίας για τις ενσύρματες τεχνολογίες όπως αυτές των οπτικών ινών και εγκατάστασης τους, είναι αρκετά υψηλό και η ταχύτητα του χαλκού δεν αρκεί, οι ασύρματες τεχνολογίες, όπως οι μικροκυματικές ζεύξεις αποτελούν μια οικονομική λύση στα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Έτσι η ασύρματη σύνδεση backhaul αναφέρεται στη χρήση της υψηλής απόδοσης ασύρματης

σημειακής πρόσβασης (point-to-point) συγκρίσιμης με την οπτική ώστε να επεκταθεί η σύνδεση μεταξύ δύο τοποθεσιών, για παράδειγμα δύο σταθμών βάσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι λύσεις πολυσημειακής ασύρματης σύνδεσης (point to multipoint) για κοντινές αποστάσεις, που συνδέονται άμεσα με την αναμενόμενη ανάπτυξη των μικρών κυψελών (small cells) που αναμένεται να υποστηρίξουν οι macrocells με πρόσθετη χωρητικότητα (βλ. εικόνα παρακάτω).



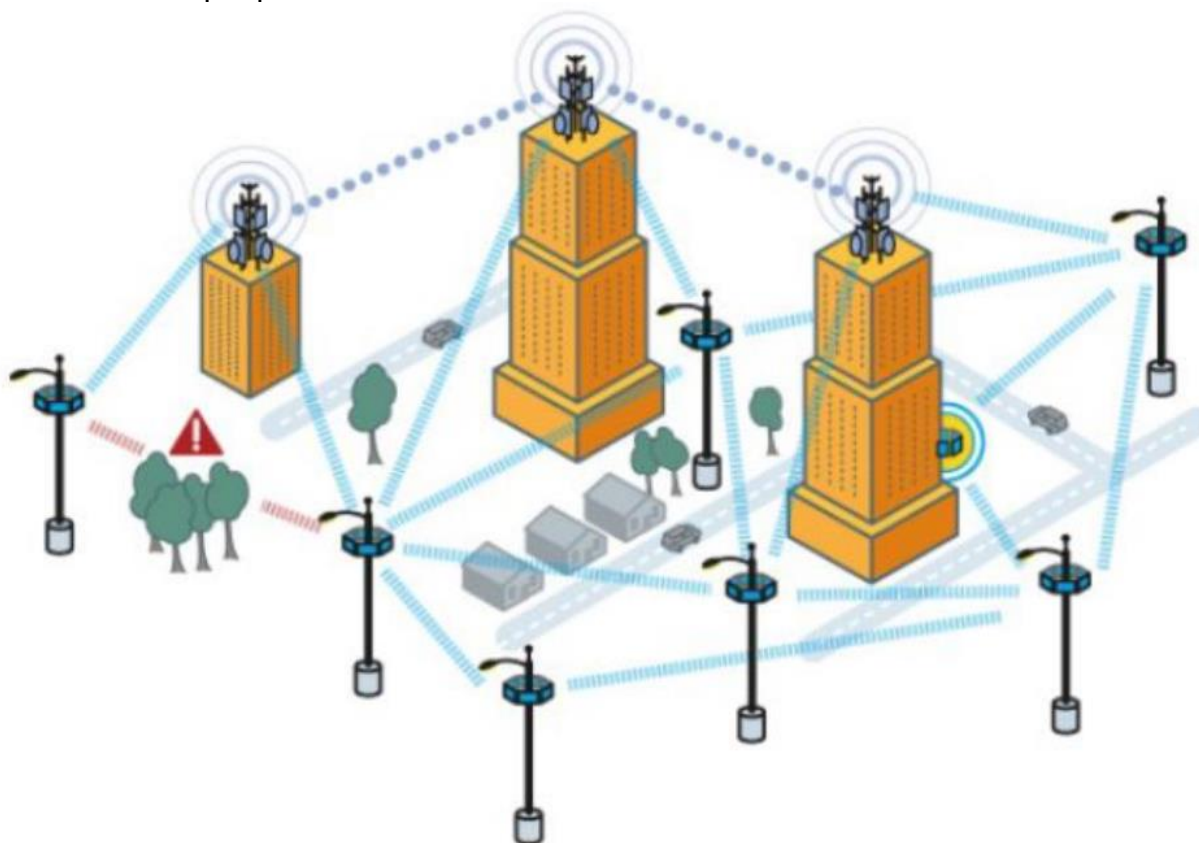
Εικόνα 25 Έννοια των μικροκυψελών σε δίκτυα backhaul

Επίσης, υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης τις οποίες θα δούμε παρακάτω. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε σύντομα και κάποιες τεχνολογίες ενσύρματης πρόσβασης στο backhaul κομμάτι δικτύου. Όπως είδαμε και πιο πάνω, οι παραδοσιακές τεχνολογίες σύνδεσης backhaul δικτύων, είναι οι συνδέσεις χαλκού, οι ασύρματες ζεύξεις RF (ραδιοσυχνοτήτων) και οι οπτικές ίνες (OF). Οι γραμμές χαλκού είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία.[49] Όμως είναι ακατάλληλη για την χρήση σε επόμενες γενιές backhaul συστημάτων (π.χ. 5G) όπου οι απαιτήσεις για ταχύτητες διάδοσης δεδομένων είναι υψηλότερες. Οι ραδιοσυχνότητες (RF) είναι η δεύτερη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για ασύρματες backhaul ζεύξεις, καθώς αυτή αντιπροσωπεύει το 6% των συνδέσεων. Τα πλεονεκτήματά της είναι η ταχεία και ευέλικτη ανάπτυξη, το μειωμένο κόστος και υψηλές σχετικά αποδόσεις. Η τεχνολογία αυτή είναι μια καλή εναλλακτική λύση έναντι αυτής του χαλκού, ειδικά σε περιοχές όπου η ανάπτυξη καλωδιακών συνδέσεων είναι προβληματική. Μειονεκτήματά της είναι η ανάγκη για καλύτερο σχεδιασμό του φάσματος, το ετήσιο κόστος της άδειας του φάσματος, η αύξηση των παρεμβολών μεταξύ των κελιών αλλά και η ανάγκη για χρήση κεραιών που υποστηρίζουν μικρά κελιά. Οι οπτικές ίνες (OF) για backhaul συνδέσεις προβάλλουν ως η λύση με υψηλές ταχύτητες διάδοσης δεδομένων για μεγάλες αποστάσεις, π.χ. 155.52 Mbps για τη σύγχρονη μονάδα μεταφοράς (Synchronous Transport Module – 1, STM-1), 622 Mbps για STM-4, 2.4 Gbps για STM-16 και 9.9 Gbps για STM-64. Παρόλο αυτά, η εν λόγω τεχνολογία είναι ακριβή λύση αφού για την ανάπτυξη της απαιτούνται υψηλές επενδύσεις. Περίπου αντιπροσωπεύουν το 4% των συνδέσεων backhaul [49].

### 3.3 5G δίκτυα ασύρματης πρόσβασης

Οι ασύρματες backhaul και fronthaul τεχνολογίες πρέπει να ικανοποιήσουν τις νέες προκλήσεις των 5G δικτύων όπως μια αύξηση της δυναμικότητας κατά 1000 φορές, η πύκνωση των small cells και το γεγονός ότι η επιτρεπόμενη καθυστέρηση ισούται με 1 ms (από άκρο σε άκρο) για ορισμένα σενάρια. Λόγω του κατακερματισμού που παρατηρείται σε συχνότητες κάτω των 50 GHz, οι έρευνες επικεντρώνονται σε συχνότητες από 50 έως 90 GHz, όπου υπάρχουν μεγάλες αχρησιμοποίητες συνεχείς

ζώνες. Κατά μήκος αυτής της γραμμής, το 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) [50], (το παραπάνω εύρος, έχει χωριστεί σε δυο μπάντες, με την ονοματολογία V-band και E-band με την E-band να κατέχει από τα 70 GHz και άνω) 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. Λόγω του γεγονότος ότι οι αποστάσεις σύνδεσης στα backhaul/fronthaul δίκτυα θα είναι σχετικά μικρές, στις περισσότερες περιπτώσεις το οπτικό πεδίο (LOS - Line-of-Sight) και η κακή ορατότητα δεν επηρεάζουν την ποιότητα των επικοινωνιών. Με τον όρο OWC αναφερόμαστε σε επικοινωνίες οπτικής, όπως (FSO - Free Space Optics), όπου κύρια συστατικά είναι οι laser πομποί για δημιουργία οπτικών ασύρματων συνδέσεων υψηλής χωρητικότητας καθώς και η νέα τεχνολογία (VLC - Visible Light Communications) που λειτουργεί με χαμηλού κόστους LED υψηλής ισχύος για την εσωτερική επικοινωνία. Μια άλλη τεχνολογία με πολλαπλά οφέλη που χρησιμοποιεί τα small cells είναι ένα backhaul δίκτυο, το οποίο λειτουργεί με ηλεκτρικά κατευθυνόμενες κεραιές για μετάδοση point-to-multipoint σε ένα φάσμα mmWave που ορίζεται στη ζώνη συχνοτήτων 30 - 300 GHz. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα 5G δίκτυα και σύμφωνα με τις νόρμες του ινστιτούτου ETSI επικεντρωνόμαστε στις ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 50 - 90 GHz. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει στη συνέχεια το backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave.



Εικόνα 26 Backhaul πλέγμα για small cells στο φάσμα mmWave [51]



### 3.3.1 Οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου

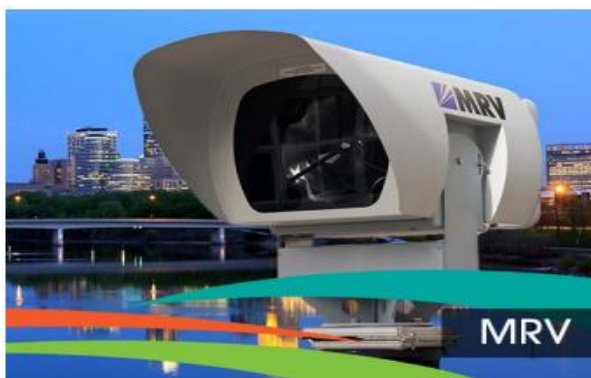
#### 3.3.1.1 Εισαγωγή

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free Space Optics - FSO) είναι μία τεχνολογία η οποία βασίζεται στην οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Αν και η ορολογία παραπέμπει σε κάτι σύγχρονο, αυτός ο τρόπος μεταφοράς πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε σε απλούστερα συστήματα σε προηγούμενες εποχές για την μετάδοση σύντομων μηνυμάτων σε μικρές αποστάσεις. Πολύ απλά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούσαν σήματα φωτιάς και ανακλαστικά κάτοπτρα μπορούν να εκληφθούν ως ο πρόγονος των οπτικών επικοινωνιών. Αυτά ήταν γνωστά από την εποχή της αρχαίας Ελλάδας με το όνομα φρυκτωρίες. Εικάζεται ιστορικά ότι χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να μεταδοθεί γρήγορα στις Μυκήνες η είδηση της πτώσης της Τροίας κάνοντας χρήση αρκετών ενδιάμεσων σταθμών συμπεριλαμβανομένης της Λήμνου και του όρους Άθως. Είναι αυτονόητο ότι οι επιδόσεις τους μπορούσαν να είναι μόνο πολύ περιορισμένες λόγω της ακαταλληλότητας των πηγών φωτός που ήταν διαθέσιμες (πυρσοί ή μεγάλες φωτιές), της απαίτησης για γραμμή οπτικής επαφής (line of sight) καθώς και από τη σημαντική όπως και ανεξέλεγκτη απόσβεση του φωτός κατά τη διάδοση μέσα στην ατμόσφαιρα λόγω των καιρικών φαινομένων (βροχή, ομίχλη, χιόνι κτλ). Στα σύγχρονα συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου, με την βοήθεια της τεχνολογίας, κατέστη δυνατή η αντικατάσταση του πομπού και του δέκτη με ηλεκτρονικά συστήματα υψηλής χρονικής αναλυτικότητας. Αυτό οδήγησε σε καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας. Αναφορικά τα σύγχρονα συστήματα επιτυγχάνουν ταχύτητες των Gbps σε αποστάσεις μερικών χιλιομέτρων. Όπως σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έτσι και στις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου είναι απαραίτητα ένας πομπός, ένας δέκτης και ένα μέσο διάδοσης του σήματος. Ως πομπός χρησιμοποιείται μία πηγή φωτός που εκπέμπει ακτίνες φωτός χαμηλής ενέργειας οι οποίες διαδίδονται μέσω του καναλιού, το οποίο είναι συνήθως ο ατμοσφαιρικός αέρας, με κατεύθυνση προς τον δέκτη. Ο δέκτης υλοποιείται με ένα οπτικό σύστημα το οποίο εστιάζει την διαδιδόμενη δέσμη φωτός πάνω σε έναν αισθητήρα. Ο δέκτης μπορεί να θεωρηθεί σαν μία κάμερα η οποία είναι προσανατολισμένη προς τον πομπό και έχει άμεση οπτική επαφή με αυτόν. Προκειμένου να έχουμε αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν πομποδέκτες οι οποίοι υλοποιούν τις λειτουργίες του πομπού και του δέκτη ταυτόχρονα. Τρεις χρήσιμες εφαρμογές των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου είναι η διασύνδεση:

- μεταξύ δύο δορυφόρων
- μεταξύ δύο επίγειων θέσεων
- συσκευών μέσα σε κτίρια

Η εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου τα τελευταία χρόνια οφείλεται στην υπεροχή που παρουσιάζουν σε κάποιους τομείς των τηλεπικοινωνιών σε σχέση με τις επικοινωνίες RF και οπτικών ινών. Οι επικοινωνίες RF αντίθετα με τις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου έχουν πολύ περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας. Ενώ οι RF επικοινωνίες επιτυγχάνουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μερικών εκατοντάδων Mbps, οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης 600 Mbps με προοπτική μερικών Gbps αν οι συνθήκες επικοινωνίας είναι ευνοϊκές. Το κόστος υλοποίησης και εξοπλισμού για τις RF επικοινωνίες αλλά και για τις οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τις τελευταίες να υπερτερούν λόγω της δυνατότητας γρήγορης εγκατάστασής τους. Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η εγκατάσταση οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου δεν χρειάζεται αδειοδότηση από κάποια αρχή.

Σε αντίθεση, η χρήση του φάσματος των RF επικοινωνιών χρειάζεται αδειοδότηση στις περισσότερες περιπτώσεις. Τέλος, η ασφάλεια των RF επικοινωνιών είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου, αφού στις τελευταίες η παρεμβολή μπορεί να ανιχνευθεί. Επίσης, οι οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις επικοινωνίες οπτικών ινών. Η εγκατάσταση ενός δικτύου οπτικών ινών είναι χρονοβόρα και αρκετά δαπανηρή σε σχέση με τις οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου. Ακόμη, μία τέτοια εγκατάσταση απαιτεί σχετική άδεια από τις πολεοδομικές αρχές για την τοποθέτηση των οπτικών ινών. Τέλος, όπως και στις επικοινωνίες ελευθέρου χώρου η περίπτωση παρεμβολής και παρακολούθησης είναι αρκετά δύσκολη [52]. Οι FSO ή αλλιώς οπτικές ασύρματες επικοινωνίες (Optical Wireless), για την μετάδοση τους χρησιμοποιούν διαμορφωμένες κατάλληλα δέσμες φωτός στην περιοχή του υπέρυθρου (300 GHz – 300 THz , 1mm – 800nm ) αλλά και του ορατού φάσματος (400nm - 800nm) χρησιμοποιώντας ως κανάλι την ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιούν τα lasers για την μετάδοση της πληροφορίας όπως οι οπτικές ίνες, αλλά αντίθετα η μια τεχνολογία χρησιμοποιεί την ίνα ως κανάλι μετάδοσης ενώ τα FSO τον ελεύθερο χώρο. Τα FSO συστήματα λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως το τηλεχειριστήριο της TV (υπέρυθρη λειτουργία). Στην ακόλουθη εικόνα παραθέτουμε ένα εμπορικό σύστημα FSO.



**Εικόνα 27 Εμπορικό σύστημα FSO της MRV**

Αυτή η τεχνολογία, προσελκύει ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον των εταιριών λόγω των εντυπωσιακών χαρακτηριστικών που συγκεντρώνει σε σχέση με τις υπόλοιπες υπάρχουσες τεχνολογίες κάποια από αυτά είναι :

- i. Τεράστιο εύρος ζώνης : Το οπτικό φέρον περιλαμβάνει συχνότητες στις περιοχές του ορατού (visible), του υπέρυθρου και του υπεριώδους φάσματος οι οποίες είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που χρησιμοποιούν τα μικροκυματικά συστήματα RF. Έτσι το μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος ζώνης των δεδομένων, μπορεί να φτάσει το 20 % της φέρουσας συχνότητας. Χρησιμοποιώντας οπτικό φέρον με συχνότητες μεταξύ  $10^{12}$  –  $10^{16}$  Hz αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει μέχρι και 2000 THz εύρος ζώνης το οποίο είναι πρακτικά “άπειρο”. Ενώ το αντίστοιχο εύρος ζώνης στις RF συχνότητες είναι περιορισμένο σε ένα μέγεθος της τάξης  $10^5$  Hz. Έτσι οι οπτικές επικοινωνίες εγγυώνται αυξημένη χωρητικότητα της πληροφορίας στο κανάλι.
- ii. Στενή διάμετρο δέσμης: Η οπτική ακτινοβολία υπερτερεί λόγω τις εξαιρετικά στενής δέσμης (narrow beam) που χρησιμοποιεί. Η δέσμη ενός τυπικού laser έχει απόκλιση περίθλασης που εκτοξεύει (diffraction limit divergence) την γωνία ανοίγματος της δέσμης μεταξύ  $0.5$  –  $3$  mrad. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ότι η μεταδιδόμενη ισχύς είναι συγκεντρωμένη σε μια πάρα πολύ στενή περιοχή (very narrow area). Έτσι εξασφαλίζεται η προστασία από παρεμβολές (interferers) από άλλα παρόμοια συστήματα. Αυτή η τόσο λεπτή-περιορισμένη δέσμη φωτός των laser επιτρέπει την

ομαλή λειτουργία πολλών οπτικών δεσμών σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους χωρίς να επηρεάζει (interference) η μια την άλλη. Από την άλλη πλευρά η στενότερη δέσμη απαιτεί αποτελεσματικότερη ευθυγράμμιση των φακών εστίασης.

iii. Μη αδειοδοτημένο φάσμα: Λόγω της συμφόρησης του φάσματος των RF, η παρεμβολή (interference) από κοντινές συχνότητες σε μια φέρουσα είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί των ασύρματων επικοινωνιών. Για τον περιορισμό των παρεμβολών, οι ρυθμιστικές αρχές (ΕΕΤΤ στην Ελλάδα) βάζουν αυστηρούς κανονισμούς για την ισχύς των συστημάτων εκπομπής. Για την διάθεση μιας ζώνης φάσματος (RF spectrum) απαιτείται ένα αρκετά μεγάλο ποσό από τον πάροχο με αρκετούς μήνες αναμονή για την διαδικασία αδειοδότησης. Από την άλλη η οπτική περιοχή είναι ελεύθερη από αυτή την διαδικασία μέχρις στιγμής.

iv. Χαμηλού κόστους εγκατάστασης: Το κόστος εγκατάστασης (deployment) των FSO είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό των RF . Τα FSO μπορούν να μεταφέρουν το ίδιο bandwidth με αυτό της οπτικής ίνας (optical fiber) αλλά χωρίς τα επιπλέον κόστη για την αδειοδότηση και το κόστος εκσκαφής του δρόμου που αυτή περνά. Στην Ελλάδα το κόστος εγκατάστασης των οπτικών ινών βάση οικονομικών στοιχείων απαιτείται το ποσό των 40euro/μέτρο εκσκαφής και αποτελεί περίπου το 80% του κόστους του συνολικού έργου της επένδυσης (Τεχνοοικονομικός Σχεδιασμός για FTTH).

v. Εύκολη Εγκατάσταση/Απεγκατάσταση: Ο χρόνος που απαιτείται για μια ζεύξη FSO ώστε να γίνει πλήρως λειτουργική, ξεκινώντας από την εγκατάσταση έως την σύνδεση με το δίκτυο κορμού, είναι εξαιρετικά μικρός και διαρκεί περίπου 4 ώρες. Το κλειδί της επιτυχίας αυτού του στόχου είναι η οπτική επαφή (line of sight) που πρέπει να εξασφαλίζεται χωρίς εμπόδια μεταξύ πομπού-δέκτη σε συνδυασμό με την ευκολία μεταφοράς αυτού του εξοπλισμού (μικρό βάρος) καθιστούν την όλη διαδικασία εγκατάστασης εύκολη υπόθεση.

vi. Εξάρτηση από τις Καιρικές Συνθήκες: Η απόδοση των επίγειων (terrestrial) FSO εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι όπως: η ομίχλη , το χιόνι, η βροχή, η υγρασία κλπ. Αυτό είναι και το μεγάλο στοίχημα που καλείται να επιλύσει αυτή η τεχνολογία αν και το πρόβλημα αυτής της εξάρτησης δεν είναι μόνο χαρακτηριστικό των FSO αλλά και των mmWave. Επίσης, άλλες ζεύξεις που επίσης επηρεάζονται από τα καιρικά φαινόμενα είναι οι δορυφορικές ζεύξεις όπου διακόπτονται σε συνθήκες έντονης βροχής και θυελλώδους καιρού (stormy weather). Πέρα από αυτά τα κύρια πλεονεκτήματα άλλα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά των FSO είναι:

- Τα οφέλη που έχουν από την χρήση ίδιας τεχνολογίας με αυτή της οπτικής ίνας (fiber optics).
- Είναι ανεξάρτητη και δεν προκαλεί ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) σε άλλα συστήματα (electromagnetic interference) RF.
- Σε αντίθεση με τις οπτικές ίνες έχει το πλεονέκτημα της φορητότητας (mobility) δηλαδή της γρήγορης απεγκατάστασης και μεταφοράς του συστήματος σε άλλο σημείο.
- Η ακτινοβολία που παράγεται από τα άλλα ασύρματα συστήματα πρέπει να είναι μέσα στα όρια ασφαλείας που ορίζουν Διεθνείς Οργανισμοί, η υπέρυθρη ακτινοβολία με χαμηλή ισχύς είναι ασφαλής.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μπορεί να τροφοδοτηθεί και από φωτοβολταϊκά.
- Επιτυγχάνουν εξαιρετικά μικρό αριθμό σφαλμάτων (BER  $\leq 10^{-6}$ )
- Υποστηρίζουν πλήρως αμφίδρομη (full duplex) λειτουργία.
- Η λειτουργία τους είναι ανεξάρτητη από την κάλυψη ή μη των Fresnel Zones (Ζώνη στην οποία οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες όταν εξασφαλίζεται ότι τουλάχιστον το

80% αυτής της ζώνης, είναι χωρίς εμπόδια) και για την ομαλή λειτουργία τους απαιτείται οπτική επαφή μεταξύ πομπού – δέκτη καθώς και ακριβής ευθυγράμμιση (alignment) ως αποτέλεσμα της στενής δέσμης laser που χρησιμοποιούν τα FSO.

- Παρέχουν υψηλή ασφάλεια λόγω της πολύ μικρής κατευθυντήριας δέσμης.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταφορά ισχύος (power devices). Λόγω των ανωτέρω χαρακτηριστικών τα FSO αποτελούν μια πολύ ελκυστική και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και γι' αυτό πολλοί κατασκευαστές έχουν προσανατολιστεί στην έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων [53] [54] [55] [56]

### 3.3.1.2 Βασικές Αρχιτεκτονικές

Υπάρχουν τέσσερις βασικές αρχιτεκτονικές εγκατάστασης ενός δικτύου οπτικής επικοινωνίας ελευθέρου χώρου [53]:

από σημείο σε σημείο (point to point)

πλέγμα ή δίκτυο (mesh)

δαχτυλίδι (ring)

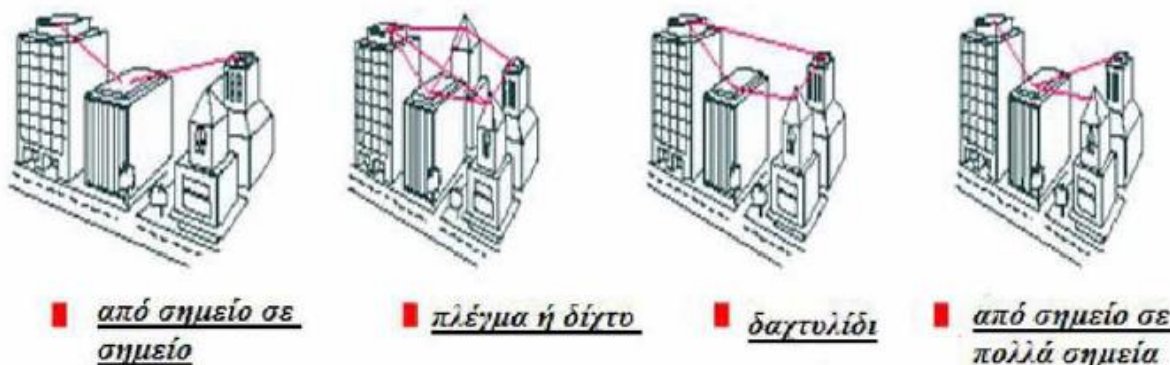
από σημείο σε πολλά σημεία (point to multipoint)

#### **Από σημείο σε σημείο (Point to Point)**

Υπάρχει καθορισμένη σύνδεση με οπτική επαφή (clear line of sight) μεταξύ δύο κτηρίων. Είναι ο πιο απλός τύπος σύνδεσης. Αν κοπεί μία ζεύξη επηρεάζεται μόνο αυτή και όχι οι υπόλοιπες.

#### **Πλέγμα (Mesh)**

Το κάθε κτήριο του δικτύου συνδέεται με την αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο με κάθε άλλο κτήριο. Χρησιμοποιείται κυρίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, για μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Όταν ο αριθμός των κτηρίων είναι δύο τότε έχουμε περίπτωση αρχιτεκτονικής από σημείο σε σημείο, αν είναι τρία τότε έχουμε περίπτωση αρχιτεκτονικής δαχτυλιδιού. Η αρχιτεκτονική αυτή αν και παρέχει μεγάλη ασφάλεια έχει μεγάλη δυσκολία και κόστος εγκατάστασης λόγω των πολλών οπτικών ζεύξεων που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 28 Αρχιτεκτονικές FSO συστημάτων

#### **Δαχτυλίδι (Ring)**

Όλα τα κτίρια συνδέονται συνεχόμενα σε σχήμα δαχτυλιδιού. Κάθε κτίριο συνδέεται με την αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο μόνο με τα δύο 2 γειτονικά του και με κανένα άλλο. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει ευκολία εγκατάστασης. Ωστόσο, αν διακοπεί σε

κάποιο σημείο η επικοινωνία, και σπάσει το δαχτυλίδι, είναι πιθανή η κατάρρευση του δικτύου.

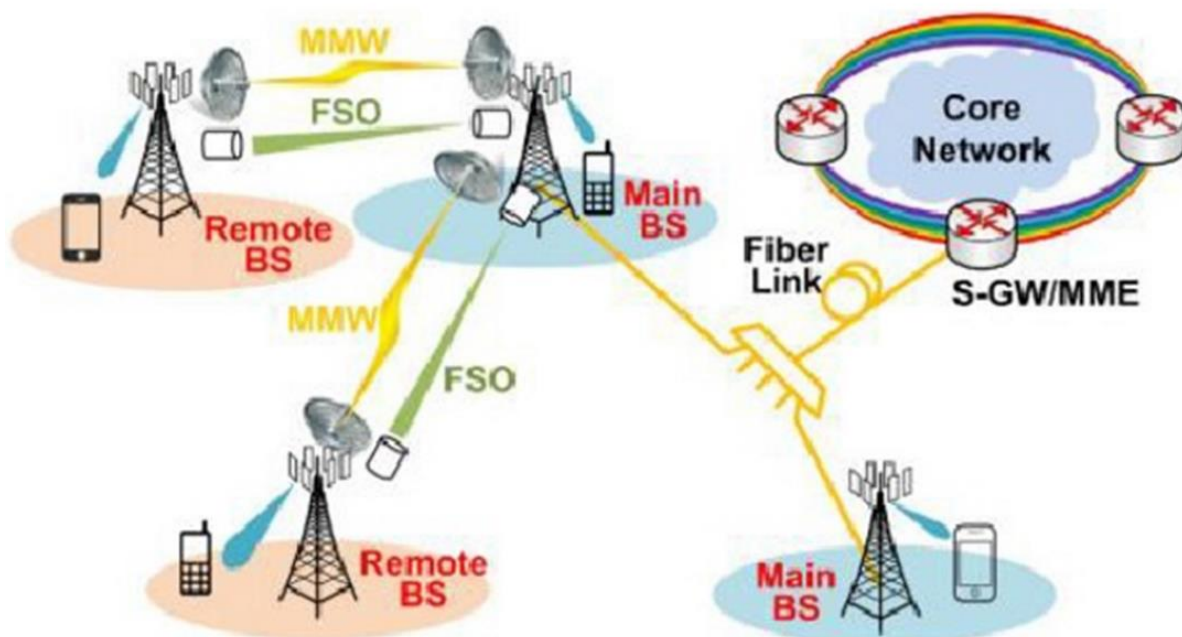
### **Από σημείο σε πολλά σημεία (Point to Multipoint)**

Σύνδεση δηλαδή από σημείο σε σημείο μεταξύ ενός κεντρικού κτιρίου και όλων των άλλων κτηρίων του δικτύου. Εφαρμόζεται κυρίως όταν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ του κεντρικού κτιρίου και των υπόλοιπων κτηρίων του δικτύου ώστε τα δεδομένα να στέλνονται χωρίς προβλήματα και λάθη. Εξασφαλίζει σχετικά μεγάλη αυτοδυναμία. Όλα τα παραπάνω αρχιτεκτονικά σενάρια τα βλέπουμε στην εικόνα 28.

#### **3.3.1.3 Υβριδική Λύση των FSO/RF**

Πρόσφατα, η FSO τεχνολογία εφαρμόζεται σε backhaul δίκτυα. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η ταχεία και εύκολη ανάπτυξή της, το μειωμένο κόστος σε σχέση με την εφαρμογή οπτικών ινών, οι υψηλές αποδόσεις (25 φορές πιο υψηλές απ' αυτές των ραδιοσυχνοτήτων) παρόμοιες με αυτές των οπτικών ινών και η μη απαιτούμενη αδειοδότηση. Από την άλλη όμως η FSO τεχνολογία δεν λειτουργεί αξιόπιστα σε καιρικές συνθήκες όπως ομίχλη, χιόνι κ.α. σε αντίθεση με τις πιο αξιόπιστες, σε αυτό το θέμα, τεχνολογίες RF και OF. Ως εκ τούτου η αξιοπιστία που είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό δικτύων backhaul μειονεκτεί στην περίπτωση χρήσης FSO τεχνολογίας. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό της αξιοπιστίας προτείνεται η υβριδική RF/FSO τεχνολογία η οποία συνδυάζει αξιοπιστία, χαμηλό κόστος. Η RF/FSO λύση έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει δεδομένα ταυτόχρονα και από τις δύο ζεύξεις. Όταν οι καιρικές συνθήκες είναι άσχημες τα δεδομένα μεταδίδονται μόνο μέσω των RF. Επιπλέον, οι πομποδέκτες του υβριδικού RF/FSO συστήματος μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν για αρκετά χιλιόμετρα και να συνδυαστούν με τις OF ζεύξεις. Η χρήση των FSO ζεύξεων είναι μια ελκυστική, συμπληρωματική, εναλλακτική λύση για υπηρεσίες backhaul. Όπως έχουμε αναφέρει, για μια FSO ζεύξη απαιτείται καταρχάς ανεμπόδιστη οπτική επαφή (LoS) μεταξύ ενός ζεύγους πομποδεκτών για τη μεταφορά δεδομένων. Η δέσμη φωτός μιας FSO ζεύξης έχει μήκος κύματος της τάξης των nm, παρέχοντας έτσι πλεονεκτήματα όσον αφορά την ελεύθερη χρήση, μηδενικές παρεμβολές, αντίθετα με τα RF, μεγάλο εύρος ζώνης κ.α. Τέτοια FSO συστήματα είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκαθίδρυση οπτικών ζεύξεων που υποστηρίζουν την μεταφορά πολλών Gbps σε μία απόσταση μερικών χιλιομέτρων, με ευκολία στην εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος. Οι FSO ζεύξεις είναι πιο αποδοτικές από τις οπτικές ίνες. Τόσο οι FSO ζεύξεις όσο και οι οπτικές ίνες μπορούν εύκολα να συνδυαστούν σε δίκτυα καθώς έχουν παρόμοιους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Λόγω των πλεονεκτημάτων της, η FSO τεχνολογία αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για τις παραδοσιακές ασύρματες ραδιοτεχνολογίες. Παρόλα αυτά όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν εγγενείς δυσκολίες για την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος. Μία FSO ζεύξη είναι λειτουργική όταν και οι δύο κόμβοι έχουν LoS (Line Of Sight) και η ζεύξη δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Έτσι η αξιοπιστία είναι θέμα μείζονος σημασίας κατά την ανάπτυξη ενός δικτύου βασισμένο στο FSO σύστημα. Για την αντιμετώπισή του αναπτύχθηκαν τα RF/FSO συστήματα.

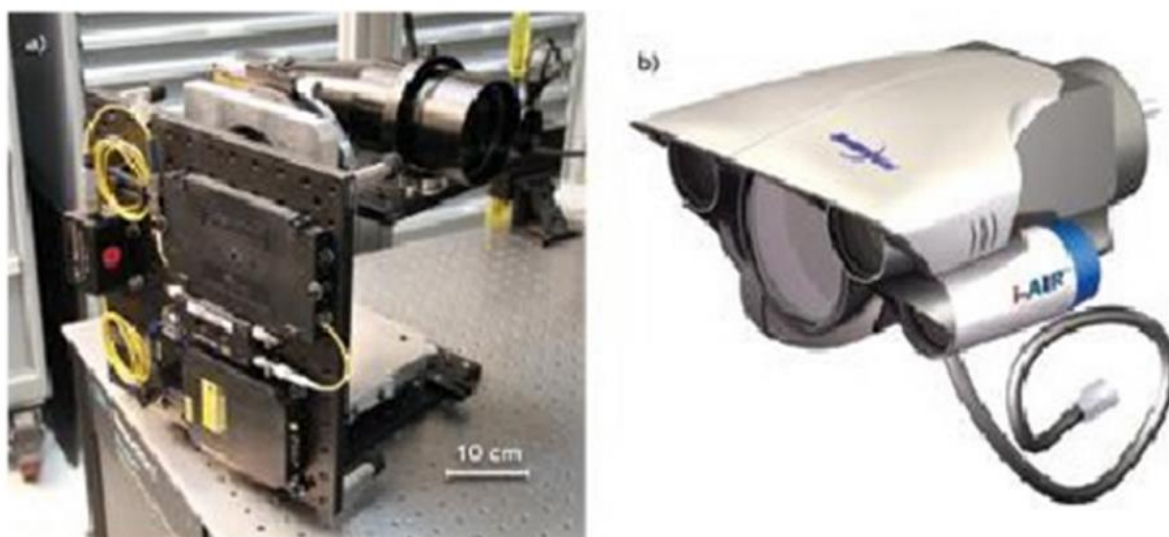




Εικόνα 29 Ολοκληρωμένο Fiber, Wireless δίκτυο κινητών backhaul βασισμένο σε υβριδικό FSO σύστημα [57]

### 3.3.1.4 Ασύρματα δίκτυα 5G βασισμένο σε FSO Τεχνολογία

Μία εκ των τεχνικών προτάσεων για την ικανοποίηση του υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται από τα 5G δίκτυα είναι η εξαιρετικά πυκνή εφαρμογή πυκνών σταθμών βάσης χαμηλής ισχύος, σχηματίζοντας ένα πολυεπίπεδο ετερογενές δίκτυο (HetNet). Με μία αρκετά πυκνή ανάπτυξη των small cells, οι χρήστες έρχονται πιο κοντά στο σταθμό βάσης εξυπηρέτησης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη περιοχή κάλυψης φασματικής απόδοσης (λόγω επαναχρησιμοποίησης του διαθέσιμου φάσματος). Σε τέτοιου είδους δίκτυα είναι σημαντική πρόκληση ο σχεδιασμός ενός backhaul/fronthaul δικτύου υψηλής απόδοσης. Στο ασύρματο backhaul/fronthaul δίκτυο η μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στα small cells πραγματοποιείται μέσω mmWave ή FSO ζεύξεων. Τα mmWave backhaul δίκτυα είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία. Επιπλέον τα FSO συστήματα επανεξετάζονται σήμερα για την εφαρμογή τους σε backhaul/fronthaul τεχνολογίες λόγω της ελεύθερης χρήσης των συχνοτήτων χωρίς αδειοδότηση, τη γρήγορη και εύκολη εγκατάστασή της και η λεπτή Point-to-Point δέσμη laser που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ των ζεύξεων. [58] [59] Όπως ήδη προαναφέρθηκε τα FSO σήματα μπορούν να υποβαθμιστούν λόγω της παρουσίας ομίχλης και ατμοσφαιρικών αναταράξεων (π.χ. στροβιλισμών) κάτι που εμποδίζει την ομαλή ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη σε μία backhaul ζεύξη. Λόγω ότι τα 5G τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν όλο και πιο αυξανόμενη απαίτηση για backhaul χωρητικότητα αναπτύχθηκε FSO τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί λέιζερ υπερβραχέως παλμού (ultrashort pulse laser - USP laser). Αυτή η βελτίωση στα FSO συστήματα αποσκοπεί στην αξιοπιστία των ασύρματων επικοινωνιών υψηλού εύρους ζώνης σε όλες τις καιρικές συνθήκες για backhaul ζεύξεις μεταξύ 2-3 km. Παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος είναι το σύστημα που έχει αναπτυχθεί από την Attochron και παρέχει backhaul δυναμικότητα 1 Gbps και 10 Gbps στο μέλλον.



Εικόνα 30 Εξοπλισμός ενός Attechron USP laser για FSO

### 3.3.1.5 Υβριδική Λύση των FSO/mmWave

Η Υβριδική λύση που προτείνεται είναι η συμπλήρωση του FSO με ένα mmWave (RF) σύστημα όπου το τελευταίο θα λειτουργεί ως εφεδρικό του πρώτου με απώτερο σκοπό την βελτίωση της αξιοπιστίας του συνολικού συστήματος. Στην ακόλουθη εικόνα 31 βλέπουμε αυτά τα συστήματα χωριστά και παρακάτω κάποια βασικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών:

- Πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης (up to 10Gbps)
- Δυναμικό Κανάλι (burst channel)
- Must have clear/haze conditions
- Έχουν μικρότερη εξάρτηση από την βροχή σε σχέση με τα mmWave
- Μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης (up to 1000Mbps)
- Σταθερό Κανάλι (Stable)
- Επηρεάζεται λιγότερο από την ομίχλη/σύννεφα
- Εξαρτάται έντονα από την βροχή



**Εικόνα 31 Υβριδικό σύστημα FSO/mmWave**

Τα υβριδικά συστήματα όπως παραθέτουμε στην εικόνα 31 αξιοποιούν το εύρος ζώνης που προσφέρουν τα FSO συνδυάζοντας την αξιοπιστία των mmWave (RF) στις πιο δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως ομίχλη, χιόνι, βροχή με διαθεσιμότητα να φτάνει έως και τα 99.999%. Συνεπώς τα Υβριδικά FSO/mmWave συστήματα :

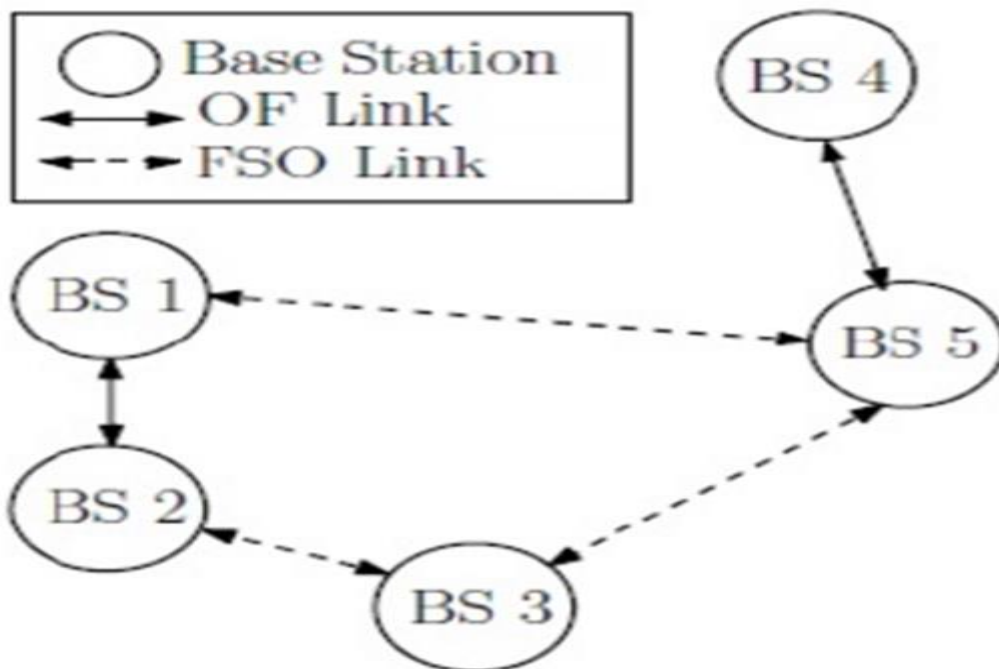
Βελτιώνουν την διαθεσιμότητα και την ποιότητα Υπηρεσιών (QoS) της ζεύξης. Αντιμετωπίζουν από κοινού τις επιδράσεις από το κανάλι και αντισταθμίζουν με τον βέλτιστο τρόπο τις απώλειες λόγω καιρικών φαινομένων. Η διαφόριση που υποστηρίζεται στο κανάλι μετάδοσης βελτιώνει τα σφάλματα μετάδοσης. Χρησιμοποιούν την ίδια πηγή τροφοδοσίας , βάση στήριξης (bracket) κλπ. Αποτελούν οικονομικά συμφέρουσα λύση σε σχέση με τις δυνατότητές τους. Επιτρέπουν την ομαλή μετάβαση της FSO ζεύξης μέσα στο κανάλι της RF ζεύξης. Όλες οι ασύρματες τεχνολογίες συμπεριλαμβανομένων των RF και των μικροκυματικών εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Για τις RF επικοινωνίες γενικότερα η βροχή είναι η κύρια πηγή εξασθένησης και γι' αυτό η ζεύξη σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζονται οι ανακλάσεις από πλευρικούς λοβούς, οι σκεδάσεις λόγω πολυδιόδευσης (multipath scattering) ακόμα και η ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (electromagnetic interference - EMI) που επηρεάζουν το σύστημα. [53] [54] [55] [56]

### **3.3.1.6 Σχεδίαση δικτύου backhaul με OF και υβριδικές RF/FSO ζεύξεις**

Λόγω του χαμηλού κόστους η υβριδική RF/FSO τεχνολογία είναι μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική οικονομική λύση για backhaul δίκτυα τα οποία παραδοσιακά χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες (RF) και οπτικές ίνες (OF). Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους ανάπτυξης ενός backhaul δικτύου μπορεί να επιλυθεί με την ταυτόχρονη σύνδεση των σταθμών βάσεων είτε μέσω οπτικών ινών είτε μέσω RF/FSO συστημάτων. Βασική προϋπόθεση είναι η εγγύηση της συνδεσιμότητας του δικτύου, η οποία επιτυγχάνεται με συνδέσεις κάθε ζεύγους κόμβων του δικτύου. Το κόστος ανάπτυξης των υβριδικών RF/FSO ζεύξεων εξαρτάται κυρίως από το κόστος των πομποδεκτών του συστήματος RF/FSO, ενώ το κόστος ανάπτυξης των OF ζεύξεων



εξαρτάται από την απόσταση των κόμβων. Επιπροσθέτως, οι ζεύξεις οπτικών ινών επιτυγχάνουν τον στόχο της σχεδιαζόμενης ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, ενώ η απόδοση των υβριδικών RF/FSO ζεύξεων εξαρτάται από την απόσταση και τον αριθμό των εγκαταστημένων συνδέσεων. Παρακάτω βλέπουμε μια τέτοια υλοποίηση με ένα δίκτυο backhaul με  $B = \{b, \dots, b_m\}$  συνδέσεις και με  $M$  σταθμούς βάσης. Θεωρείται ότι όλοι οι κόμβοι έχουν οπτική επαφή (LoS). Κάθε κόμβος μπορεί να συνδεθεί με τον άλλο είτε με OF ζεύξη ή με υβριδική FSO λύση



Εικόνα 32 Backhaul δίκτυο το οποίο αποτελείται από 5 σταθμούς βάσης

### 3.3.1.7 Εφαρμογή FSO

Τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα όπως αναφέραμε που προσφέρει αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για διάφορες εφαρμογές. Η τεχνολογία των FSO μπορεί εύκολα να αποτελέσει συμπλήρωμα ή και αντικατάσταση σε άλλες τεχνολογίες όπως είναι τα ενσύρματα και ασύρματα point-to-point δίκτυα και η τεχνολογία (Fiber to the X - FTTx). Ειδικότερα όμως κάποιες από τις άμεσες εφαρμογές των FSO είναι:

Συμπληρωματικά των OF: Οι ζεύξεις FSO μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να εξασφαλίσουν backup links όταν υπάρχει απώλεια δεδομένων ή ακόμα στην ανεπάρκειας ζεύξης των οπτικών ινών στην περίπτωση που αυτές έχουν υποστεί βλάβες και είναι μη διαθέσιμες.

Προσωρινές ζεύξεις: Χρησιμοποιούνται για την προσωρινή αντικατάσταση των οπτικών ινών λόγω του πολύ μικρού χρόνου εγκατάστασης μέσα σε λίγες μόνο ώρες.

Κρίσιμες τοπολογίες δικτύου: Τα συστήματα οπτικών ελεύθερου χώρου αποτελούν ελκυστική λύση για ζεύξεις οι οποίες διασχίζουν ποτάμια ή άλλες περιοχές όπου η εκσκαφή είναι πολύ δύσκολο εγχείρημα. (π.χ. συνδέσεις point-to-point με οπτική επαφή)

Ασφαλείς στρατιωτικές επικοινωνίες: Λόγω της πολύ συγκεντρωμένης δέσμης που εκπέμπουν αυτά τα συστήματα είναι αδύνατο να υποκλαπούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ύψιστης ασφάλειας από το στρατό.

Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών: Παροχή ταχύτερων υπηρεσιών. Με την FSO τεχνολογία οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μπορούν να παρέχουν άμεση

εξυπηρέτηση των πελατών τους έως ότου ολοκληρωθεί η εγκατάσταση οπτικής ίνας η οποία απαιτεί χρόνο, έχει δηλαδή μεγάλο παράγοντα time-to-market.

Last mile access: Η FSO είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία σε ότι αφορά την σύνδεση τελικών χρηστών (end-users) με παρόχους υπηρεσιών ή με άλλα υπάρχοντα δίκτυα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι πολλά εμπορικά κτήρια σε διάφορες πόλεις ανά τον κόσμο, όπως η Νέα Υόρκη, όπου έχουμε προβολή διαφημιστικών μηνυμάτων σε γιγαντοοθόνες με την χρήση FSO εξοπλισμού. Σε υπηρεσίες backhaul, κυψελοειδή μετάδοση (cellular backhaul), hotspot backhaul [60]

M



Εικόνα 33 Ενδεικτικές εφαρμογές FSO [60]

### 3.3.2 Επικοινωνίες Ορατού Φωτός

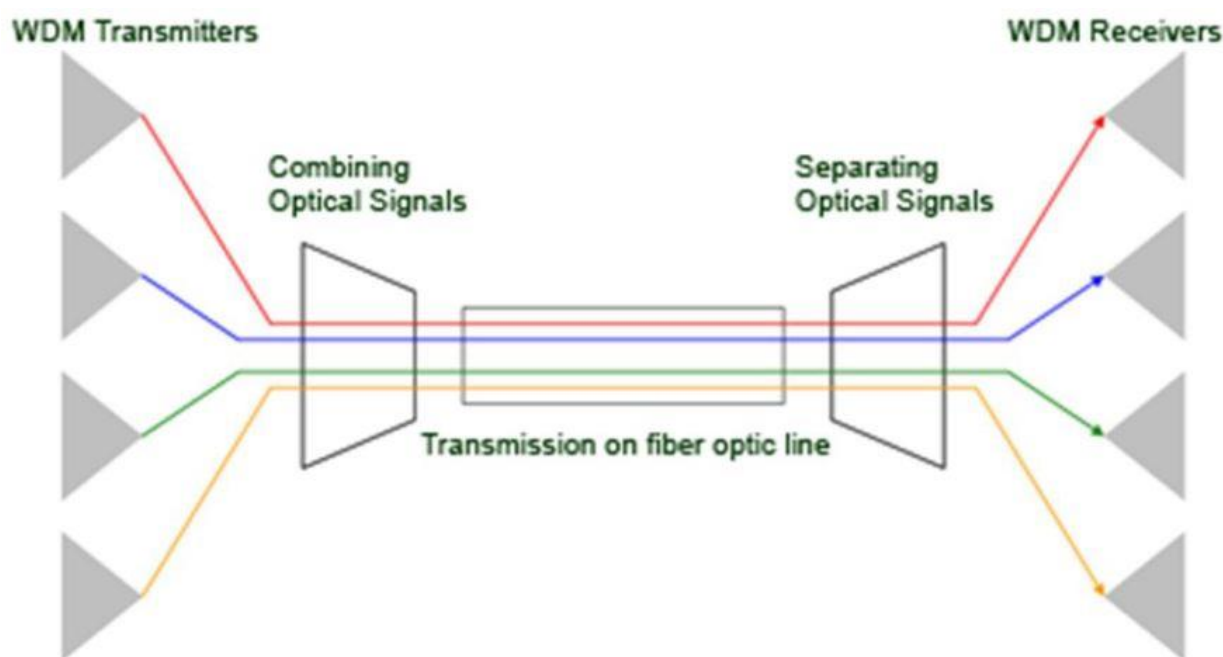
#### 3.3.2.1 Ορισμός

Οι επικοινωνίες ορατού φωτός (Visible Light Communications – VLC) είναι ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το οποίο καταφέρνει να καλύψει ταυτόχρονα τις ανάγκες για φωτισμό και για μεταφορά δεδομένων, που προκύπτουν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Δηλαδή όπως μαρτυρά και το όνομα, στο σύστημα αυτό το ορατό φως, πέραν του ότι φωτίζει τα αντικείμενα που θέλει να δει ο άνθρωπος, χρησιμοποιείται και για μεταφορά δεδομένων με πολύ μεγάλες ταχύτητες.[52] Η γρήγορη μετάδοση πληροφοριών έχει γίνει αδιαπραγμάτευτη ανάγκη και δυνατότητα, στην ζωή των ανθρώπων. Καθημερινά, στην εργασία μας και στο ελεύθερό μας χρόνο, ερχόμαστε σε επαφή και χρησιμοποιούμε διάφορα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας και τηλεπικοινωνιακά μέσα, με γνωστότερα το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο, την τηλεόραση και το διαδίκτυο. Με τη βοήθεια των μέσων αυτών έχουμε την ευχέρεια να επικοινωνήσουμε σχεδόν ακαριαία με άτομα που μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές ηπείρους, να διεκπεραιώνουμε καθημερινές μας υποθέσεις και συναλλαγές και να παίρνουμε πληροφορίες για διάφορες εξελίξεις και γεγονότα οπουδήποτε και αν συμβαίνουν στον κόσμο. Είναι αδύνατον λοιπόν να φανταστούμε σήμερα έναν κόσμο χωρίς τηλέφωνο, διαδίκτυο και τηλεόραση. Και να σκεφτεί κανείς ότι τα πιο πολλά από τα σημερινά συστήματα και μέσα επικοινωνίας έχουν εφευρεθεί και αναπτυχθεί κατά την διάρκεια του περασμένου αιώνα. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι ο σύγχρονος άνθρωπος μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας, αναζητά συνεχώς πιο αξιόπιστα συστήματα για πιο γρήγορη μεταφορά πληροφορίας. Αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς αναζήτησης είναι και το VLC το οποίο ανήκει σε μία μεγαλύτερη κατηγορία τηλεπικοινωνιακών μέσων τις Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου χώρου (Free Space

Communication). Έχουν προταθεί διάφορα σενάρια στη βιβλιογραφία για το VLC ως προς την αρχιτεκτονική, την απόδοσή του, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και τον έλεγχο της φωτεινότητας. Ωστόσο, το VLC έχει ένα αρκετά υψηλό ποσοστό δεδομένων (100 Mbps) σε μια μέση απόσταση των 100 μέτρων. Έτσι το VLC αποτελεί μια κατάλληλη εναλλακτική εκεί όπου οι RF τεχνολογίες αποτυγχάνουν, είτε λόγω περιορισμών στο εύρος ζώνης, είτε από φυσικούς περιορισμούς.

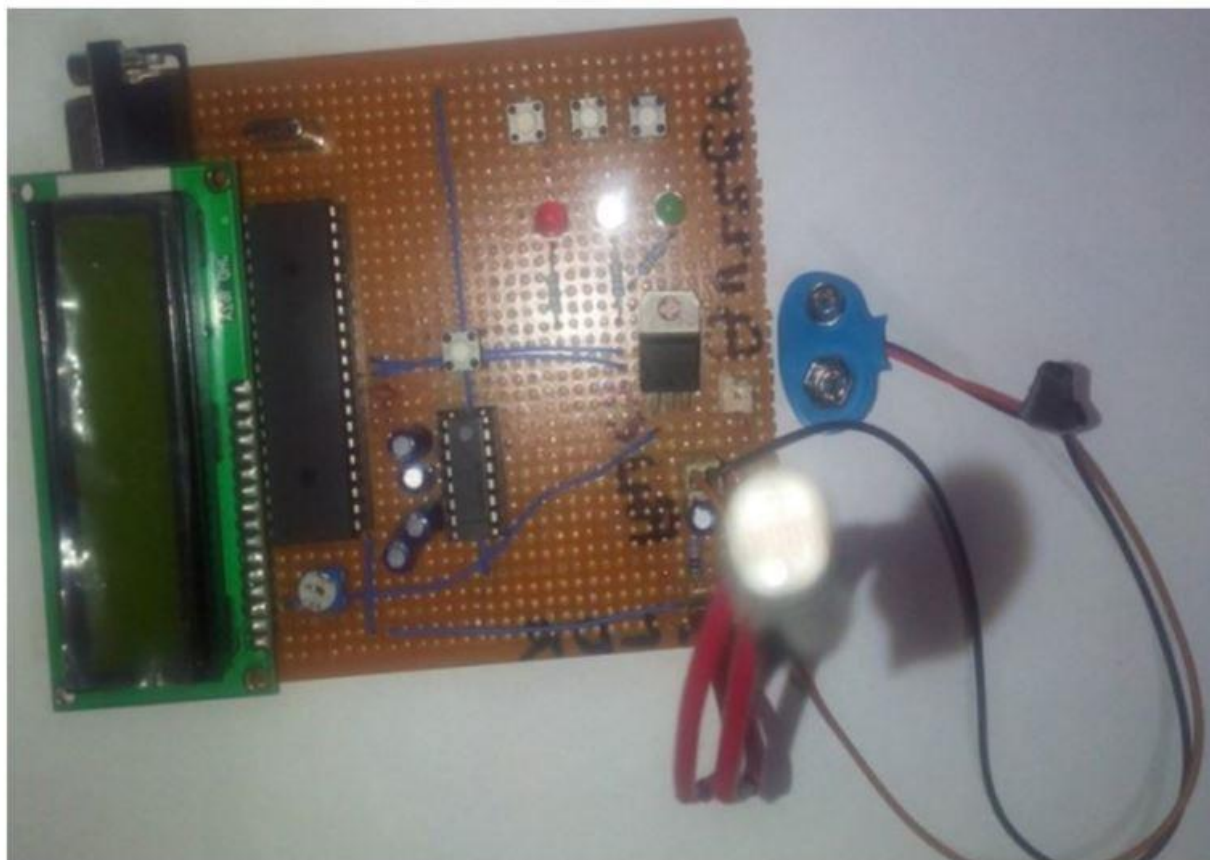
### 3.3.2.2 Αρχιτεκτονική VLC

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα δούμε ποιες τεχνικές και τι αρχιτεκτονική μπορεί να υλοποιηθεί για ένα VLC σύστημα. Μια τεχνική πολυπλεξίας που συναντάμε και στις οπτικές ίνες είναι η διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) την οποία εν τάχει θα αναλύσουμε ώστε να έχουμε καλύτερη εικόνα του αντικειμένου των οπτικών επικοινωνιών. Οπότε, στις επικοινωνίες των οπτικών ινών, το WDM είναι μια τεχνολογία η οποία πολυπλέκει πολλαπλά σήματα οπτικών φορέων σε μια μόνο οπτική ίνα, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος (χρώματα) φωτός laser για τη μεταφορά διαφορετικών σημάτων. Αυτός ο τρόπος μας επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας, εκτός από την ενεργοποίηση αμφίδρομων επικοινωνιών σε μία μόνο ίνα. Στην ουσία, είναι μια μορφή πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM), αλλά στις οπτικές επικοινωνίες καλείται WDM. Ο όρος πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος χρησιμοποιείται συνήθως σε ένα οπτικό φορέα, ο οποίος τυπικά περιγράφεται από το μήκος κύματός του, ενώ στην FDM το φέρον σήμα περιγράφεται συνήθως από τη συχνότητα. [61]



Εικόνα 34 Wavelength Division Multiplexing

Ένα προτεινόμενο σύστημα VLC που χρησιμοποιεί το WDM για τη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων ταυτόχρονα, είναι το παρακάτω, όπως φαίνεται στην εικόνα 35. Διακριτά μήκη κύματος χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση κάθε ροής δεδομένων χρησιμοποιώντας πηγές LED διαφορετικών χρωμάτων.



Εικόνα 35 Hardware για ένα VLC σύστημα

### 3.3.2.3 Πιθανές εφαρμογές του VLC

Οι εφαρμογές αυτή της τεχνολογίας είναι απεριόριστες λόγω του γεγονότος ότι το φως είναι ίσως η ασφαλέστερη πηγή ενέργειας που υπάρχει. Ενδεικτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έξυπνους φωτισμούς έξυπνων σπιτιών παρέχοντας την υποδομή για τον φωτισμό, τον έλεγχο και την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών, μειώνοντας δραματικά την καλωδίωση και την κατανάλωση ενέργειας του σπιτιού. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μεταφορές, όπου όλοι οι σηματοδότες, οι λάμπηρες δρόμων υιοθετώντας την VLC τεχνολογία μπορούν εύκολα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, λόγω της κατευθυντικής στενής δέσμης που έχουν οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου, είναι αρκετά ασφαλής τρόπος μετάδοσης δεδομένων, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορου τύπου αμυντικά συστήματα και γενικά σε εφαρμογές που χρήζουν ασφάλειας. Στις τηλεπικοινωνίες, έχει αρκετά πλεονεκτήματα μιας και μπορεί να μεταφέρει αρκετά γρήγορα, μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Έτσι μια συσκευή μέσα σε μια κυψέλη θα μπορεί να συνδεθεί με μια άλλη (φυσικά στο οπτικό πεδίο της) στοχεύοντας το οπτικό φως αμφοτέρων, χωρίς να χρειάζονται τον σταθμό βάσης για τις κλασικές λειτουργίες που παρέχει στις συσκευές. Έτσι στις D2D επικοινωνίες, θα μπορούσε να έχει μια καλή δυναμική.[61] Ότι αφορά το θέμα της υποδομής, όλα δείχνουν ότι τα ασύρματα ετερογενή πυκνά δίκτυα (HetNets) είναι το μέλλον των κινητών επικοινωνιών, καθώς ολοένα και μικρότερες κυψέλες χρησιμοποιούνται για να αποφορτίσουν το δίκτυο και να περιορίσουν την κίνηση σε πιο τοπικό επίπεδο. Έτσι, ακόμα μικρότερες VLC κυψέλες, atto-cells, είναι μια λογική προσέγγιση ώστε να μπορούμε να παρέχουμε μεγαλύτερη χωρητικότητα. Δυο είναι τα κύρια ζητήματα που πρέπει να εξετάσουμε στις μικρές κυψέλες, το πρώτο είναι ο συντονισμός με τις μακροκυψέλες (macrocells), ενώ το δεύτερο, η ενσωμάτωση των δυνατοτήτων του Wi-Fi με τις τεχνολογίες που είναι προτυποποιημένες από το 3GPP

όπως για παράδειγμα, η αυτόματη σύνδεση των χρηστών στα Wi-Fi APs βάσει των στοιχείων ελέγχου ταυτότητας που τηρούνται στη βάση δεδομένων των κινητών τηλεφώνων. Σε αυτή τη λογική, ο όρος Οπτική πιστότητα (Light Fidelity – Li-Fi) είναι ένα υποσύνολο των VLC, που είναι υψηλών ταχυτήτων αμφίδρομων επικοινωνιών και έχει αρχίσει ήδη να προωθείται αρκετά. Το Li-Fi, προβλέπεται να έχει έναν (τουλάχιστον αρχικά) συμπληρωματικό ρόλο με το Wi-Fi, ώστε να αποφορτίσουν την κίνηση, από τους σταθμούς βάσης των μακροκυβελών. Το κλειδί για ένα σύστημα υψηλής απόδοσης, δεν είναι απλά να αυξηθεί η φασματική απόδοση του επιπέδου σύνδεσης, αλλά να εξεταστεί μια πιο σχετική πτυχή για τον πάροχο, όπως είναι η φασματική απόδοση περιοχής (area spectral efficiency – ASE), για παράδειγμα, τι ποσοστά δεδομένων κινητής τηλεφωνίας μπορούν να προσφερθούν σε κάθε χρήστη. Σε αυτό το πλαίσιο, φαίνεται ότι το Li-Fi παρέχει βελτίωση τουλάχιστον μιας μονάδας τάξης μεγέθους στο ASE [62]. Βέβαια, για όλα τα παραπάνω, θα πρέπει η τυποποίηση του VLC, να λάβει υπόψη της, κάποια συγκεκριμένα προβλήματα που προκύπτουν, όπως το τρεμόπαιγμα εντός και μεταξύ των πλαισίων, τη μείωση του φωτισμού (dimming), μοτίβα ορατότητας κ.α. Το νέο πρότυπο, το οποίο βασίζεται στην ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal frequency division multiplexing – OFDM) θα μπορούσε να ορίσει ότι για τη διαμόρφωση μόνο οι υποφορείς (subcarriers) πάνω από μια συγκεκριμένη συχνότητα θα χρησιμοποιούνται και έτσι με αυτόν τον τρόπο το σύστημα θα αποφεύγει πάντα τα προβλήματα «τρεμοπαίγματος». Ομοίως, η μείωση της φωτεινότητας μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας τη μέση ισχύ σήματος. Αυτό διευκολύνει την ταχεία ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνολογίας Li-Fi συμπληρωματικά προς τους σημερινούς RF σταθμούς βάσης με μοναδικά πλεονεκτήματα, για παράδειγμα, μεγάλο ASE, ασφάλεια, απουσία ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής κ.α. Σε αυτό το βαθμό, η μελλοντική εφαρμογή της τεχνολογίας VLC πρέπει να επικεντρωθεί στη διατήρηση των αρχιτεκτονικών των υπάρχοντων συστημάτων και να σχεδιαστεί έτσι ώστε να συμμορφώνεται με αυτά τα πρότυπα.[62] Οπότε, ένα καλά σχεδιασμένο HetNet θα πρέπει να κάνει χρήση των στοιχείων του με αποδοτικό τρόπο, όπως π.χ κάθε σύνδεση στο δίκτυο να χρησιμοποιείται μόνο όταν σχετίζεται με κάποια αντίστοιχη εργασία. Όπως οι οπτικές ίνες και τα ενσύρματα δίκτυα, ενδείκνυνται για γρήγορες συνδέσεις σε backbone επίπεδα δικτύου και τα RF ασύρματα δίκτυα για APs με αρκετά καλή κάλυψη, έτσι και οι VLC επικοινωνίες ενδείκνυνται απόλυτα για πολύ υψηλού επιπέδου αποστολή όγκου δεδομένων και ασφάλεια μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός κινητού χρήστη. Όπως γενικά έχει παρατηρηθεί, μια συσκευή, τον περισσότερο χρόνο μένει αδρανής, αναμένοντας για μια εισερχόμενη μετάδοση δεδομένων ή για μια εξερχόμενη μετάδοση που έχει ζητήσει ο χρήστης. Για να επιτυγχάνεται όμως μια συνεχής στιχομυθία μεταξύ των παραπάνω, θα πρέπει να υπάρχει μια σταθερή σύνδεση, όπου μια τέτοια θα μπορεί να είναι μια RF σύνδεση. Το μεγάλο φορτίο της μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας μπορεί στη συνέχεια να κατανεμηθεί στο VLC δίκτυο. Εάν μια VLC σύνδεση για κάποιο λόγο δεν καταστεί εφικτή, τότε ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω RF επικοινωνίας, μέχρι να βρεθεί ένα εναλλακτικό ασύρματο οπτικό μονοπάτι. Τέλος, η πιο διαδεδομένη μέχρι στιγμής εφαρμογή για VLC τεχνολογίες, είναι οι κλασικές δίοδοι εκπομπής φωτός (light-emitting diodes – LEDs), αλλά αναδύονται και άλλες LED τεχνολογίες με βάση τη βιολογική τεχνολογία, micro LEDs, συντονισμένης κοιλότητας LEDs κ.α. οι οποίες στην ουσία είναι ηλεκτρονικές συσκευές που μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα. Έτσι, η ερευνητική κοινότητα επενδύει σημαντικές προσπάθειες για την κατασκευή συσκευών που μπορούν ταυτόχρονα να φωτίζουν και να επικοινωνούν.

### 3.3.2.4 Προκλήσεις πρακτικής εφαρμογής και ενσωμάτωσης

Στο επίπεδο διαμόρφωσης, η υλοποίηση των VLC ως οπτικά συστήματα άμεσης ανίχνευσης και διαμόρφωσης έντασης (intensity – modulation direct – detection, IM-DD)



σημαίνει ότι μόνο θετικά και πραγματικά σήματα μπορούν να μεταδοθούν με επιτυχία περιορίζοντας τα σχήματα διαμόρφωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρώιμες έρευνες και εργασίες υποδείκνυαν την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση (on-off keying, OOK) και την διαμόρφωση θέσης παλμών (PPM) ως βιώσιμες τεχνικές. Ωστόσο, το εύρος ζώνης του εμπρόσθιου άκρου (front-end) και του οπτικού καναλιού είναι περιορισμένο. Αυτό οδηγεί στην απαίτηση για συστήματα πολλαπλών επιπέδων, όπως η διαμόρφωση εύρους παλμών (pulse-amplitude modulation, PAM) προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση. Καθώς αυξάνονται οι ταχύτητες επικοινωνίας, το περιορισμένο εύρος ζώνης οδηγεί σε παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων (inter-symbol interference, ISI) με αποτέλεσμα ένα πιο πολύπλοκο σχέδιο διαμόρφωσης όπως είναι το OFDM γίνεται ο κύριος υποψήφιος για τις VLC επικοινωνίες. Στο επίπεδο της πολλαπλής προσβασιμότητας, όπως σε κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα, η ικανότητα να εξυπηρετούνται πολλαπλοί χρήστες είναι βασικό. Τόσο η πολλαπλή πρόσβαση χρονικής διαίρεσης (Time division multiple access, TDMA) όσο και η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (code division multiple access, CDMA) είναι λύσεις για την αντιμετώπιση του περιορισμού της πολλαπλής πρόσβασης του Li-Fi. Το TDMA χρησιμοποιεί τον οπτικά ασύρματο έλεγχο πρόσβασης μέσου (media access control, MAC) ενώ το οπτικό CDMA χρησιμοποιεί κώδικες για να διαχωρίσει τους χρήστες μέσω του καναλιού. Έτσι κατανοούμε ότι το υποκείμενο σχήμα διαμόρφωσης, δεν παίζει ρόλο για την ενεργοποίηση της πολλαπλής πρόσβασης σε ένα οπτικό ασύρματο σύστημα. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, δεδομένου ότι το OFDM θεωρείται ευρέως η πιο βιώσιμη τεχνική διαμόρφωσης για τις VLC επικοινωνίες η OFDMA είναι η φυσική επέκταση για την παροχή πολλαπλής πρόσβασης. Το OFDMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα VLC σύστημα με παρόμοιο τρόπο όπως με τις RF επικοινωνίες, στις οποίες κάθε χρήστης λαμβάνει ένα τμήμα του συνόλου των διαθέσιμων υποφορέων σε κάθε χρονική θυρίδα (time slot). Επιπλέον, οι κατανομές των φορέων μπορούν να ματαβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, έτσι ώστε να μπορούν να ικανοποιηθούν οι δυναμικά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις σε εύρος δεδομένων και των συνθηκών του καναλιού. Οι προκλήσεις στο επίπεδο της τυποποίησης επίσης πρέπει να εξεταστούν, ώστε να μπορεί να προχωρήσει γρήγορα και εμπορικά αυτή η τεχνολογία. Ήδη κάποιες ερευνητικές ομάδες δουλεύουν προς αυτόν τον στόχο προτυποποιώντας τις VLC επικοινωνίες. Η κυριότερη είναι αυτή του IEEE 802.15.7 για οπτικές ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας χρησιμοποιώντας ορατό φως όπου καθορίζονται τα φυσικά (physical-PHY), MAC και λογικά επίπεδα ελέγχου (logical link control, LLC). Παρά την ανάγκη για τυποποίηση, οι εταιρείες έχουν αρχίσει ήδη να δουλεύουν εμπορικά την VLC τεχνολογία μιας και η VLC αγορά προβλέπεται να αυξηθεί καθώς ο φωτισμός LED γίνεται ολοένα και πιο γόνιμος. [62]

### 3.3.3 mmWave

#### 3.3.3.1 Εισαγωγή

Η αλματώδης αύξηση και ανάγκη για δεδομένα στους χρήστες και η ολοένα αυξανόμενη χρήση των κινητών συσκευών αποτελούν πρόκληση για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους. [63] [64] Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα το φάσμα συχνοτήτων περιορίζεται στο εύρος των 700 MHz and 2.6 GHz. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι χρησιμοποιούν συχνότητες έως τα 780MHz και συνήθως έχει εκχωρηθεί σε αυτούς ένα εύρος 200Hz. Πρόκληση για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους είναι η ταυτόχρονη παροχή υπηρεσίας σε χρήστες με ανομοιογενή χαρακτηριστικά. (π.χ. διαφορετικά εύρη συχνοτήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης δεδομένων και απώλειες λόγω αστικού περιβάλλοντος) αυτό συνεπάγεται ότι οι σταθμοί βάσης πρέπει να εξυπηρετούν όλα τα διαφορετικά δίκτυα (2G, 3G, 4G, LTE.) [65][66] Η κύρια πρόκληση για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους είναι η υποστήριξη των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων για δεδομένα με την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης η οποία να συνδυάζεται με διαθέσιμότητα φάσματος.

Band	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Carrier Bandwidth (MHz)
700 MHz	746-763	776-793	1.25 5 10 15 20
AWS	1710-1755	2110-2155	1.25 5 10 15 20
IMT Extension	2500-2570	2620-2690	1.25 5 10 15 20
GSM 900	880-915	925-960	1.25 5 10 15 20
UMTS Core	1920-1980	2110-2170	1.25 5 10 15 20
GSM 1800	1710-1785	1805-1880	1.25 5 10 15 20
PCS 1900	1850-1910	1930-1990	1.25 5 10 15 20
Cellular 850	824-849	869-894	1.25 5 10 15 20
Digital Dividend	470-854		1.25 5 10 15 20

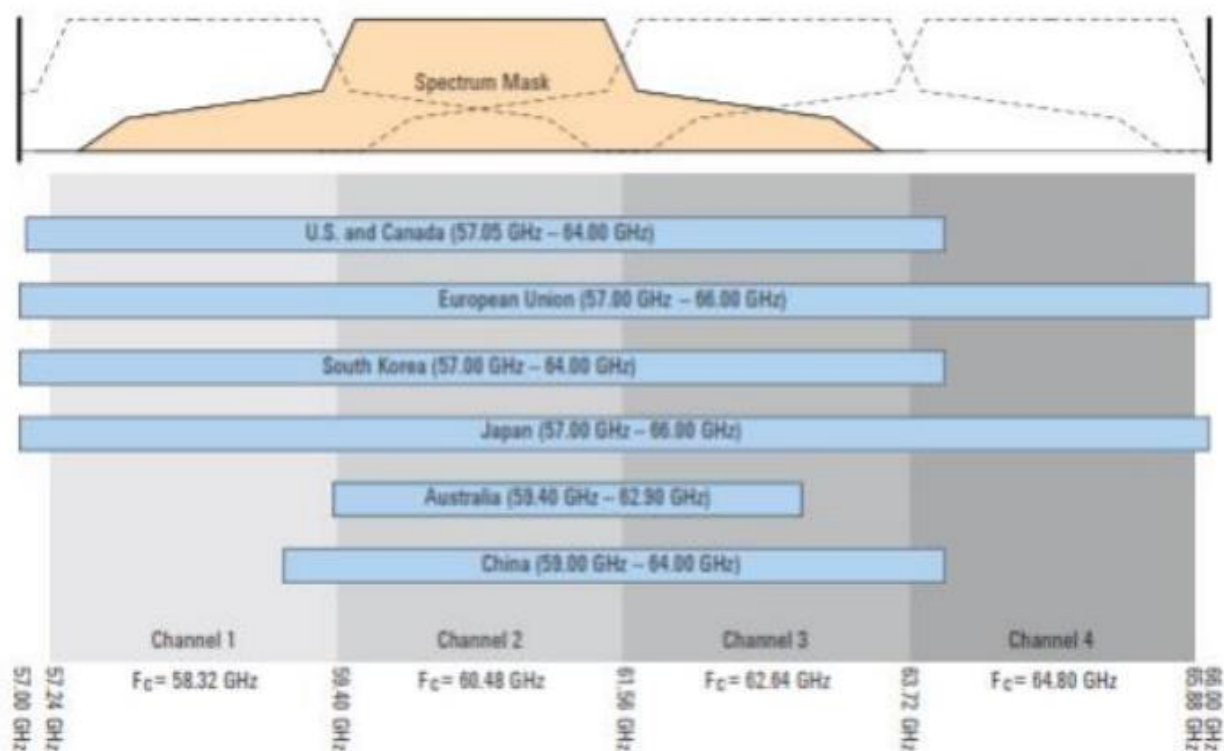
Εικόνα 36 Τρέχουσες απαιτήσεις για φάσμα και εύρος [41]

### 3.3.3.2 Αρχιτεκτονική mmWave

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 mmWave (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 mmWave 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 μια σύντομη περιγραφή του mmWave 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 [65] που είναι οι εξής:

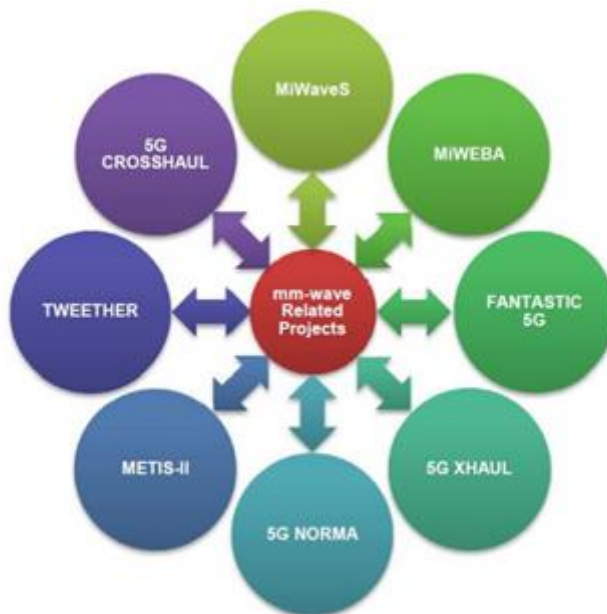
- Πολύ υψηλή απόδοση (very high throughput - VHT): αντιπροσωπεύει κάθε φασματική περιοχή που ξεκινάει κάτω από τα 6 GHz, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η περιοχή γύρω από τα 2.4 GHz.
- Κατευθυντικό επίπεδο πολλαπλών Gigabit (directional multi-gigabit - DMG): αντιπροσωπεύει κάθε φασματική περιοχή που έχει 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 37.





**Εικόνα 37** Πλάνο ελεύθερων συχνοτήτων και ανάθεση συχνότητας ανά περιοχή [65]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται οι ελεύθερες φασματικές περιοχές σε κάθε μία από τις περιοχές, καθώς και ο χωρισμός των 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 [66]. 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 38.



**Εικόνα 38** Κατάλογος των σχετικών προγραμμάτων της ΕΕ που αφορούν την τεχνολογία mmWave

Για τη μελέτη της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής θα χρησιμοποιηθούν δύο λειτουργικές εφαρμογές: αυτόνομη (standalone) και μη αυτόνομη (non-standalone), όπως φαίνεται στην Εικόνα 39.

**Standalone mm-wave access with multi-link and opportunistic serving**



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

**Non-standalone mm-wave access, lower frequency assisted**



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

**Εικόνα 39** Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mmWave [65]

Στο πρώτο σενάριο λειτουργίας, η τεχνολογία mmWave ασύρματης πρόσβασης (RAT – Radio Access Technology), θα χρησιμοποιήσει μόνο τις mmWave συχνότητες και την ανάπτυξη των σημείων προσπέλασης (APs - Access Points). Στο δεύτερο σενάριο (αυτόνομη ανάπτυξη) θα βελτιστοποιηθεί ο συντονισμός των AP σημείων προσπέλασης

για τον περιορισμό της κάλυψης και των ζητημάτων της φορητότητας που σχετίζονται με τη διάδοση mm κυμάτων.

### 3.3.3.3 mmWave Backhaul και Fronthaul

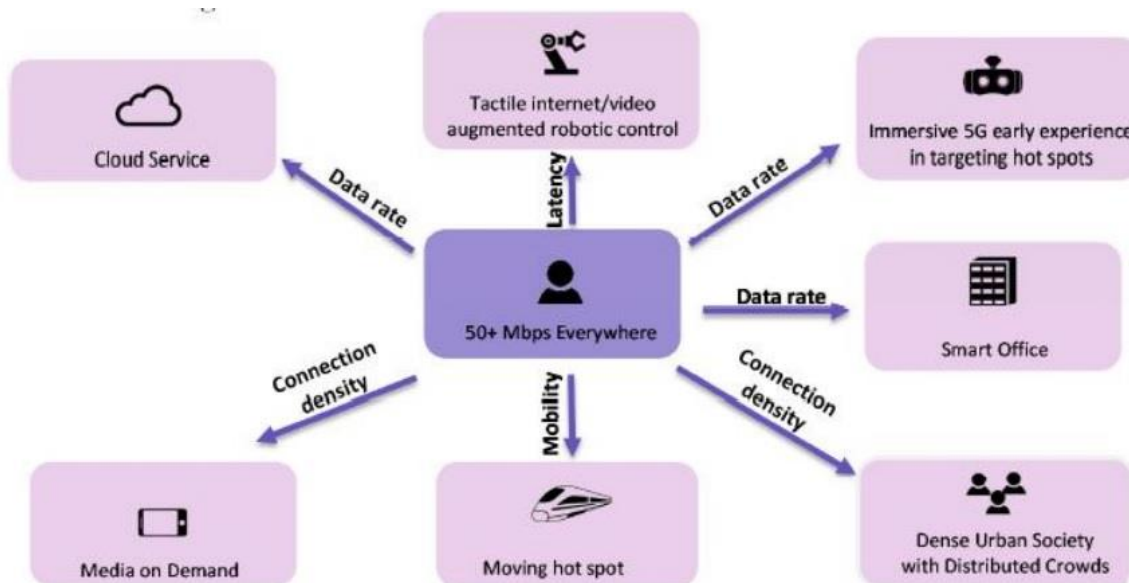
Με τη συνεχή εξέλιξη στην πύκνωση του δικτύου των small cells, πρέπει να αυξηθούν οι απαιτήσεις χωρητικότητας του backhaul (δηλαδή του δικτύου που αφορά τη σύνδεση ενός απομακρυσμένου τόπου ή δικτύου με ένα κεντρικό τόπο) για την αποφυγή της συμφόρησης στο δίκτυο [67]. Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών ασύρματων 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 Ultra High Definition (UHD) video85 και 3D υπηρεσιών εικονικής πραγματικότητας και βίντεο, γεγονός που επιβάλλει πρωτοφανείς προκλήσεις στις σημερινές 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 ανάπτυξη. Για όλους τους παραπάνω λόγους, θα προτιμώνται ασύρματες λύσεις backhaul που θα είναι και πιο αποδοτικές. Οι ζώνες mmWave 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. Οι εκτεταμένες περιπτώσεις χρήσης επιβάλλουν διάφορες απαιτήσεις σε συνδέσεις backhaul. Στην επέκταση της κάλυψης, μπορεί να χρειαστεί δείγμα ανερχόμενης ζεύξης από Coordinated MultiPoint (CoMP) [68] για την υποστήριξη της κάλυψης, με αποτέλεσμα να πρέπει να δημιουργηθούν πολλαπλοί σύνδεσμοι backhaul. Σε αυτό το πλαίσιο απαιτείται το inband backhaul, που σημαίνει διαμοιρασμό mmWave συχνοτήτων μεταξύ του backhaul και της πρόσβασης. Το inband 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 inband backhaul δικτύων. Με την κεραία να έχει εγκατασταθεί σε ένα κινούμενο όχημα, η δυναμική ρύθμιση backhaul είναι υψίστης σημασίας. Η σχεδίαση ενός backhaul δικτύου που διαθέτει επίγνωση πλαισίου (Context-aware) [69] 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 και backhaul. 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 στις macro cells, όπου όλες οι διενέξεις από πολλαπλά small cells υποβάλλονται σε επεξεργασία από κοινού. Η ολοένα και πιο συμπυκνωμένη ανάπτυξη small cells mmWave 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

ενέργειας δεν είναι πλέον αμελητέα όπως πριν και μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των small cells mmWave.

### 3.3.3.4 Τεμαχισμός 5G δικτύου και πολλαπλή συνδεσιμότητα

Το κύριο πεδίο του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να περιγράψει κάποιες από τις αρχικές έννοιες για την 5G αρχιτεκτονική mmWave 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 την ενσωμάτωση πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (RATs – Radio Access Technologies).
- Επιλογή των αρχικών πληροφοριών ελέγχου πρόσβασης, οι οποίες σε περίπτωση πολλαπλής συνδεσιμότητας θα πρέπει να αποστέλλονται μέσω του συστήματος χαμηλής ζώνης.

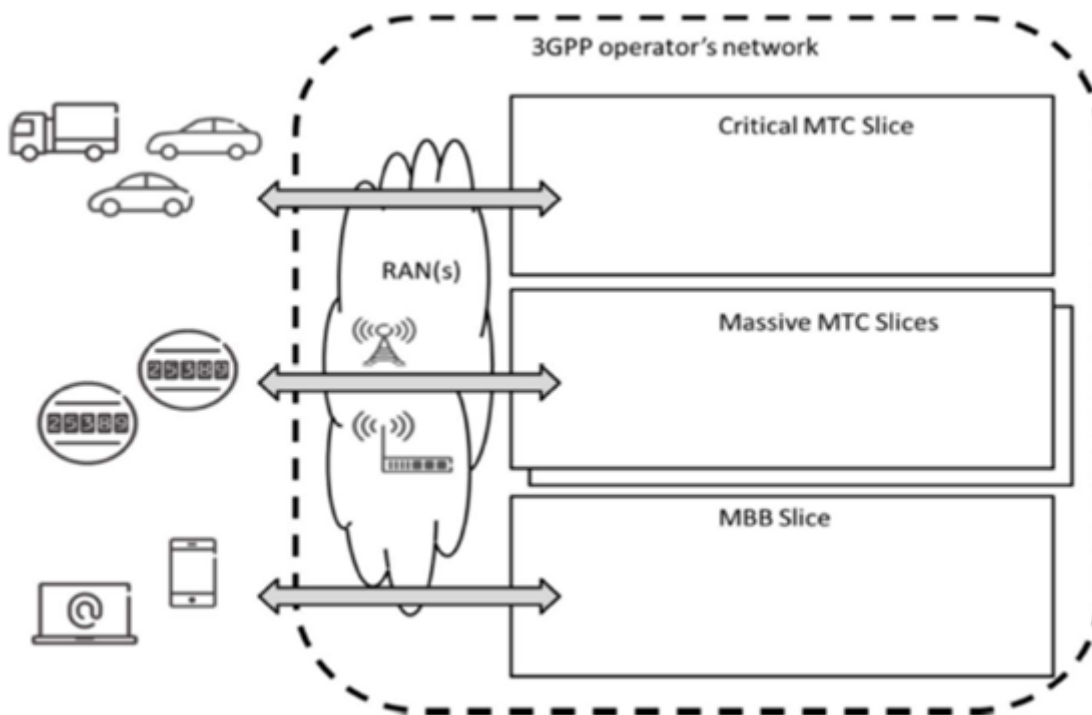


Εικόνα 40 Περιπτώσεις χρήσης τεχνολογίας mmWave [67]

Η πιο βασική περίπτωση χρήσης στο σύστημα 5G από αυτές που περιγράφονται στην Εικόνα 40 είναι η 50+ Mbps παντού (Everywhere). Αυτή η περίπτωση χρήσης επιβάλλει μια αυστηρή απαίτηση άνω των 50 Mbps σε κάθε σενάριο, συμπεριλαμβανομένων των άκρων 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

πυκνή αστική κοινωνία με καταναμημένα πλήθη (Dense Urban Society with Distributed Crowds). Ο στόχος εδώ είναι η παροχή υψηλής χωρητικότητας, ευρωστίας, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού ρυθμού δεδομένων εντός καταναμημένου πλήθους. Στην περίπτωση χρήσης έξυπνων γραφείων (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, κάνει χρήση μιας εντυπωσιακής πρωτοπορίας του 5G ως προς τα 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 κινούμενων 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 όπως για μέσα κατ' απαίτηση (Media on Demand) και άψογο διαδίκτυο (Tactile Internet). Η περίπτωση χρήσης Media on Demand επιβάλλει απαιτήσεις απόδοσης σε ένα μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών, κάτι που συντεμάχεται με 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 ενεργοποιήσουν το 5G στο εγγύς μέλλον. Μια σημαντική πτυχή του 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: από άκρο σε άκρο τεμαχισμός δικτύου (An end-to-end (E2E) network slice) [70]. Προβλέπεται ότι ο τεμαχισμός θα οδηγείται από τις επιχειρήσεις και κάθε τμήμα θα υποστηρίζει μία ή περισσότερες υπηρεσίες επικοινωνίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 41, 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, backhaul δίκτυο 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 mmWave 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) και η αρχιτεκτονική πρέπει να είναι σε θέση να τις υποστηρίξει.





Εικόνα 411 Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) [67]

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 διαμορισμός 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 σε μεγαλύτερο 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 τα 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 mmWave 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 περιθλάσης, 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).

### 3.3.3.5 Προκλήσεις mmWave

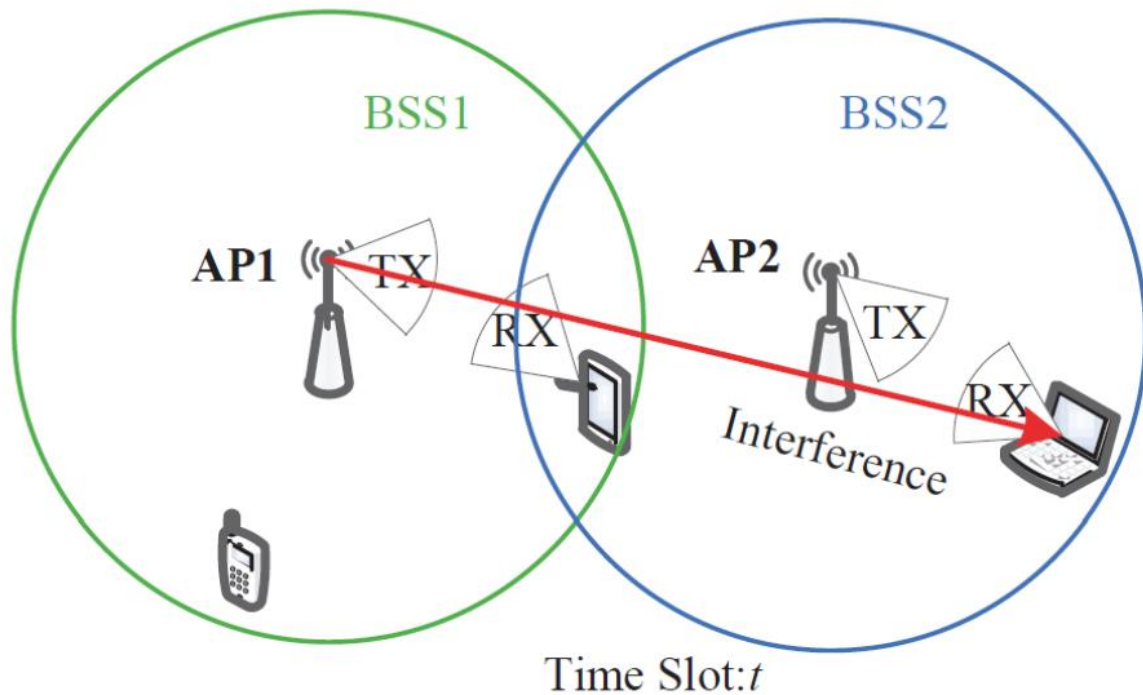
Αν και στο παρελθόν είχε εξεταστεί η εκδοχή της χρήσης των mmWave ζωνών για τις κινητές επικοινωνίες, εν τέλει απορρίφθηκε και κρίθηκε ακατάλληλη κυρίως λόγω της χαμηλής ποιότητας διάδοσης [70] [68]. Πλέον όμως η ανάγκη για περισσότερους πόρους φάσματος προκειμένου τα δίκτυα της πέμπτης γενιάς να πετύχουν τους στόχους τους, σε χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης, επέφερε την αναγκαστική στροφή στις mmWave ζώνες. Έτσι προκύπτει ένα πλήθος προκλήσεων που πρέπει να υπερκεραστούν συμπεριλαμβανομένων του ισχυρού pathloss, της υψηλής κατευθυντικότητας των κυματομορφών, της ατμοσφαιρική σκέδασης, της απορρόφηση από τη βροχή, της χαμηλής περιθλάσης γύρω από τα εμπόδια, της χαμηλής διείσδυσης μέσα από αντικείμενα, και, περαιτέρω, λόγω του ισχυρού θορύβου φάσης και του υπέρογκου κόστους εξοπλισμού. Επιπλέον προκλήσεις προστίθενται λόγω των θεμελιωδών διαφορών μεταξύ των mmWave επικοινωνιών και των ήδη υφιστάμενων συστημάτων επικοινωνίας, που λειτουργούν στη μικροκομματική ζώνη (π.χ., 2.4 GHz και 5 GHz), ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις στο φυσικό επίπεδο (PHY), στο επίπεδο του μέσου ελέγχου πρόσβασης (MAC) και στη δρομολόγηση των στρωμάτων των mmWave επικοινωνιών στα ασύρματα δίκτυα 5G. Για να επιτευχθεί επίσης υψηλή απόδοση του δικτύου, χρειάζεται να υιοθετήσουμε αποτελεσματικούς και αποδοτικούς μηχανισμούς για τη διαχείριση των παρεμβολών, το προγραμματισμό της μετάδοσης, τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών και την διαμόρφωση του σήματος. Βλέπουμε λοιπόν πως απαιτούνται νέες σκέψεις και ιδέες σε αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις. Οι mmWave επικοινωνίες υποφέρουν από τεράστιες απώλειες μετάδοσης, σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας χαμηλότερες συχνότητες φορέα. Η εξασθένηση από τη βροχή, την ατμοσφαιρική σκέδαση και την απορρόφηση περιορίζουν το εύρος τους. Η απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας του φέροντος. Βλέπουμε πως με μήκος κύματος περίπου 5 mm, η απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου στα 60 GHz είναι 28 dB περισσότερα σε σχέση με την ζώνη των 2,4 GHz. Εκτός αυτού, η απορρόφηση από το οξυγόνο στη ζώνη 60 GHz κυμαίνεται από 15 έως 30 dB/km. Η None-line-of-sight (NLOS) επικοινωνία υποφέρει από υψηλότερη εξασθένηση σε σχέση με την line-of-sight (LOS). Επίσης υλικά στον εξωτερικό χώρο, όπως φιμέ τζάμια ή τούβλα προκαλούν πολύ περισσότερες απώλειες σε σχέση με υλικά εσωτερικού χώρου, όπως απλό τζάμι και γυψοσανίδα, ενώ και η ανθρώπινη δραστηριότητα σε έναν εσωτερικό χώρο συμβάλει στην αύξηση των παρεμβολών.

Frequency Band	PLE		Rain Attenuation@200 m		Oxygen Absorption @200 m
	LOS	NLOS	5 mm/h	25 mm/h	
28 GHz	1.8~1.9	4.5~4.6	0.18 dB	0.9 dB	0.04 dB
38 GHz	1.9 ~2.0	2.7~3.8	0.26 dB	1.4 dB	0.03 dB
60 GHz	2.23	4.19	0.44 dB	2 dB	3.2 dB
73 GHz	2	2.45~2.69	0.6 dB	2.4 dB	0.09 dB

**Εικόνα 422 Τα χαρακτηριστικά των απωλειών σε διάφορες ζώνες των mmWave**

Λόγω της υψηλής συχνότητας του φορέα και του μεγάλου εύρους ζώνης, υπάρχουν αρκετές τεχνικές προκλήσεις στο σχεδιασμό στις κεραίες για τις mmWave επικοινωνίες. Στην ζώνης των 60 GHz, η μετάδοση υψηλής ισχύος και το τεράστιο εύρος ζώνης μπορεί να προκαλέσει σοβαρή μη γραμμική παραμόρφωση των ενισχυτών. Κάποια ακόμα σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ο θόρυβος φάσης. Ωστόσο με την πύκνωση του δικτύου και τα μικρότερα μεγέθη κυψελών που εφαρμόζονται για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης, η εξασθένηση από τη βροχή και την ατμοσφαιρική σκέδαση δεν δημιουργούν σημαντική πρόσθετη απώλεια διαδρομής για μεγέθη κυψελών της τάξεως των 200m. Για την καταπολέμηση των σοβαρών απωλειών διάδοσης και των πολλαπλών διαδρομών (multipathing) χρησιμοποιούνται συστοιχίες κατευθυντικών κεραιών κυκλικής πόλωσης και μικρού πλάτους δέσμης που έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται, τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, με στόχο την επίτευξη ενός υψηλού κέρδους της κεραίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται έλεγχος της φάσης του σήματος που μεταδίδεται από κάθε στοιχείο της κεραίας και στη συνέχεια γίνεται περιστροφή προς την κατεύθυνση του πομπού προκειμένου να επιτευχθεί ένα υψηλό κέρδος προς αυτή την κατεύθυνση, προσφέροντας παράλληλα ένα πολύ χαμηλό κέρδος σε όλες τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Για να κάνουμε τον πομπό και το δέκτη να κατευθύνουν τις κεραίες τους, ο ένας προς τον άλλο είναι απαραίτητοι πολύπλοκοι αλγόριθμοι δέσμης που θα μειώνουν την χρονική διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Στην LOS επικοινωνία προτείνεται από την IEEE το πρότυπο 802.11ad, όπου η άμεση διαδρομή περιέχει σχεδόν όλη την ενέργεια και σχεδόν εξαλείφεται το φαινόμενο του multipathing. Στην περίπτωση αυτή, το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κανάλι με προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN). Στην NLOS επικοινωνία δεν υπάρχει άμεση διαδρομή και έτσι ο αριθμός των διαδρομών με σημαντική ενέργεια είναι μικρός. Η επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων και η μεγιστοποίηση της απόδοσης ισχύος στις mmWave επικοινωνίες βασίζονται κυρίως στις LOS μετάδοση. Οι παρεμβολές στο δίκτυο μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μέρη, τις παρεμβολές από χρήστες του δικτύου που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη και τις παρεμβολές από χρήστες που βρίσκονται σε άλλες κυψέλες. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εφαρμοστούν μηχανισμοί διαχείρισης παρεμβολών, όπως ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης και ο συντονισμός μετάδοσης, προκειμένου να αποφευχθεί η σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης. Με την αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών, η ταυτόχρονη μετάδοση (spatial reuse) θα πρέπει να υποστηρίζεται τόσο μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης όσο στο χώρο που εξυπηρετεί ένας σταθμός βάσης.

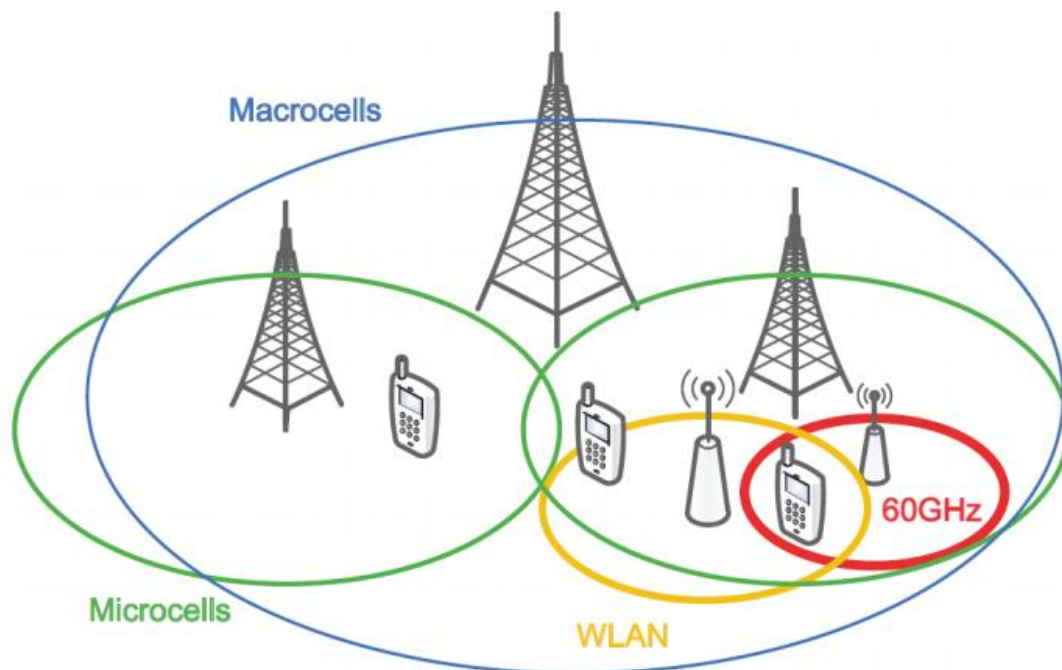




Εικόνα 433 Παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης

Η κινητικότητα των χρηστών θέτει επίσης πολλές προκλήσεις στην mmWave επικοινωνία. Κατ' αρχάς η κινητικότητα των χρηστών θα επιβαρύνει με σημαντικές αλλαγές την κατάσταση του καναλιού. Όταν οι χρήστες μετακινούνται, η απόσταση μεταξύ του πομπού (TX) και του δέκτη (RX) ποικίλλει, και η κατάσταση του καναλιού ποικίλλει επίσης αντίστοιχα. Επίσης η χωρητικότητα του καναλιού ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την απόσταση. Ως εκ τούτου η επιλογή διαφορετικών συστημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) θα πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με την κατάσταση του καναλιού ούτως ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της mmWave επικοινωνίας. Επιπλέον λόγω των μικρών περιοχών κάλυψης των σταθμών βάσης, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους, η κινητικότητα των χρηστών θα προκαλέσει σημαντικές και ταχείες διακυμάνσεις του φόρτου απασχόλησης σε κάθε σταθμό βάσης. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να γίνεται έξυπνη αντιστοίχιση των χρηστών με τους σταθμούς βάσης και αποδοτικό handover. Τα υπάρχοντα πρότυπα των mmWave επικοινωνιών, όπως το IEEE 802.11ad και IEEE 802.15.3c, αντιστοιχίζουν τους χρήστες με τους σταθμούς βάσης με γνώμονα την Ένδειξη Έντασης Σήματος (received signal strength indicator - RSSI) γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική χρήση των πόρων. Παρόλο που μια μεγάλη ποικιλία πρωτοκόλλων έχει προταθεί για να βελτιστοποιεί μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή μια συγκεκριμένη κατάσταση του καναλιού, είναι απαραίτητο να είναι εφικτή η κατάλληλη και έξυπνη εναλλαγή μεταξύ τους ή ακόμα και ο έξυπνος συνδυασμός τους ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Ανοικτά προβλήματα είναι ο τρόπος που θα συνδυαστεί έξυπνα το TDMA και το CSMA/CA σε μια ποικιλία εφαρμογών, ο τρόπος που θα επιλεγθεί κάποιο MCS (Modulation and coding scheme) ανάλογα με τις χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις του καναλιού. Επιπλέον σημαντικό ρόλο στην απόδοση των δικτύων, θα έχει η απόκτηση πληροφοριών για τις καταστάσεις που βρίσκεται το δίκτυο με αποτελεσματικούς μηχανισμούς μέτρησης. Σε μια από τις ενδεχόμενες εκδοχές χρησιμοποιείται τόσο η μικροκυματική όσο και η mmWave επικοινωνία. Πιο συγκεκριμένα οι διαδικασίες διαχείρισης πραγματοποιούνται στη ζώνη των 2,4 GHz με πανκατευθυντικές κεραίες ενώ οι μεταδόσεις των δεδομένων πραγματοποιούνται στη ζώνη των 60 GHz με κατευθυντικές κεραίες, για να μειωθεί ο χρόνος ανακάλυψης κάποιου γείτονα και η κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο οι

περισσότεροι από τους τρέχοντες μηχανισμούς επικεντρώνονται στη μέτρηση πληροφοριών κατάστασης εντός ενός μόνο σταθμού βάσης. Για να επιτύχουμε ομαλό handover και αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών χρειαζόμαστε και μετρήσεις από περιοχές που έχουν εμβέλεια για παράδειγμα δύο σταθμοί βάσης, Έτσι μπορώντας να μετρήσουμε την παρεμβολή μεταξύ των διαφόρων σταθμών βάσης όσο το δυνατόν ακριβέστερα θα μπορέσουμε να μεγιστοποιήσουμε την ταυτόχρονη μετάδοση μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης. Όλοι αυτοί οι έλεγχοι στο δίκτυο θα πρέπει να γίνονται σε πραγματικό χρόνο και να ολοκληρώνονται το συντομότερο δυνατόν. Βλέπουμε λοιπόν πως η χρήση αποτελεσματικών μηχανισμών μέτρησης είναι ανοικτό πρόβλημα, το οποίο πρέπει να διερευνηθεί εκτενώς για να διευκολύνει την περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων επικοινωνίας mmWave στο μέλλον. Τα mmWave συστήματα επικοινωνιών πρέπει να συνυπάρχουν με άλλα συστήματα, όπως το LTE και το WiFi. Η μεγάλη χωρητικότητα που προσφέρουν οι mmWave επικοινωνίες μπορεί να μειώσει την κυκλοφορία από τις μακροκυψέλες και να κάνει εφικτή την παροχή καλύτερων υπηρεσιών διακίνησης των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, τα handover μεταξύ σταθμών βάσης της μακροκυψέλης και των και APs στην mmWave ζώνη εγείρει προβλήματα όπως η εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης, η διαχείριση της κινητικότητας και των παρεμβολών. Η αλληλεπίδραση και η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ειδών δικτύων είναι το κλειδί για να διευρυνθούν οι δυνατότητες των ετερογενών δικτύων. Το επίπεδο ολοκλήρωσης μεταξύ τους έχει σημαντικό αντίκτυπο σχετικά με την απόδοση του συστήματος. Έντονη σύζευξη (strong coupling) σημαίνει καλύτερη απόδοση, ενώ η χαλαρή σύζευξη (weak coupling) έχει λιγότερη περιπλοκότητα. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης σε ετερογενή δίκτυα όπως φαίνεται και στην εικόνα 44.



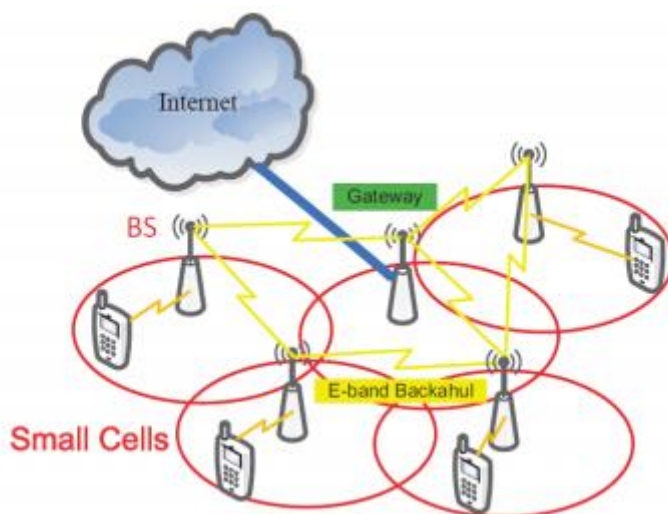
**Εικόνα 44** Ετερογενή δίκτυα στο πλαίσιο μιας μακροκυψέλης

Μια ακόμα βασική πρόκληση στις mmWave επικοινωνίες είναι η χρήση στενών δεσμών και η δυσκολία στη δημιουργία συσχετίσεων μεταξύ των χρηστών και σταθμών βάσης, τόσο για την αρχική πρόσβαση όσο και για την απώθηση. Τόσο ο σταθμός βάσης όσο και ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί να κάνει σαρώσεις σε διάφορες γωνίες που θα μπορούσε ενδεχομένως να βρεθεί μια στενή δέσμη ή να αναπτύξει μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία κωδικοποίησης σε μια πλατιά δέσμη και στην συνέχεια συμπίεσή

της σε μια στενή. Η ανάπτυξη λύσεων σε αυτό το πρόβλημα, και ιδιαίτερα στο πλαίσιο της υψηλής κινητικότητας, αποτελεί μια σημαντική ερευνητική πρόκληση.

### 3.3.3.6 Πλεονεκτήματα mmWave

Για να συμβαδίσουν τα δίκτυα νέας γενιάς με την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης έξυπνων συσκευών, εξετάζεται η μαζική πύκνωση των κυψελών προκειμένου να επιτευχθεί 10 000 φορές αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου μέχρι το 2030 [70][68]. Κάθε μακροκυψέλη θα αποτελείται από πολλές μικρότερες, όπως WLAN (wireless local area networks) ή WPAN (wireless personal area networks). Αυτή είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ενίσχυση της χωρητικότητας των 5G δικτύων και σε συνδυασμό με τις mmWave ζώνες, ιδίως των 28 GHz, 38 GHz, 71-76 GHz και 81-86 GHz ενισχύεται κατά πολύ η τοπική πρόσβαση. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε πολλές μικρές κυψέλες με τεράστιο εύρος ζώνης, ικανές να παρέχουν στον χρήστη ρυθμούς πολλών gigabit για εφαρμογές πολυμέσων, όπως υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ συσκευών, π.χ. φωτογραφικών μηχανών, laptops, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας σε πραγματικό χρόνο (HDTV), ασύρματο gigabit Ethernet, ασύρματο gaming και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) σε ρυθμούς έως και 3 Gb/s. Επίσης πέρα από την πύκνωση του δικτύου εξακριβώθηκε ότι η χωρητικότητα του μπορεί να βελτιωθεί και από τη χρήση εξελιγμένων και κατευθυντικών κεραιών στην ζώνη των mmWave. Μελέτες έδειξαν πως με τη χρήση αυθαίρετων γωνιών σε κατευθυντικές κεραιές πετυχαίνουμε 20 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ό, τι στα δίκτυα 4G, ενώ υπάρχουν ακόμα περισσότερα περιθώρια βελτίωσης όταν χρησιμοποιηθούν πλήρως κατευθυντικές κεραιές από και προς τα σημεία μετάδοσης και λήψης. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) είναι μια πολύ οικονομική λύση, από πλευράς ενέργειας, και προσφέρει μια πολύ καλή ευκαιρία για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας των κυψελών. Τα δίκτυα μπορούν να αξιοποιήσουν αυτή την ευκαιρία και να χρησιμοποιήσουν τις D2D επικοινωνίες στις ζώνες των mmWave, επιτρέποντας σε κάθε συσκευή να βρίσκει και να επικοινωνεί με κάποια κοντινή της δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα μέσα από αυτή την επικοινωνία να κάνει χρήση εφαρμογών ακόμα και ευαίσθητου περιεχομένου. Σε ένα τόσο πυκνό δίκτυο, η σύνδεση των σταθμών βάσεων μεταξύ τους με τη χρήση οπτικών ινών βασισμένων στο backhaul είναι αρκετά δαπανηρή. Κάπου εδώ έρχονται τα mmWave για να δώσουν λύση. Στις ζώνες των 60 GHz (V-band) και E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz) μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ταχύτητας ασύρματο backhaul, πιο αποδοτικό, ευέλικτο και πιο εφαρμόσιμο. Παρέχει μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης, καθώς και μια πολλά υποσχόμενη λύση για backhaul σε μικρές κυψέλες. Τα παραπάνω τα βλέπουμε στην εικόνα 45.



Εικόνα 45 Εφαρμογή E-band Backhaul για μικρές και πυκνές κυψέλες

### 3.4 5G δίκτυα σταθερής πρόσβασης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφέρουμε κάποιες τεχνολογίες που έχουν να κάνουν με σταθερής πρόσβασης δίκτυα. Η κάλυψη των backhaul και fronthaul δικτύων πάνω από Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (PONs - Passive Optical Networks) ενός – προς - πολλά σημεία (point-to-multipoint) μπορεί να παρέχει 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). Η τεχνολογία GPON συνήθως εφαρμόζεται 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 (στο σύνολο 32/64) χρηστών. Όμως η χωρητικότητα αυτή δεν είναι επαρκής για συνδέσεις fronthaul με βάση την 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 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 των τεχνολογιών PON που βασίζονται στην πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM - Time Division Multiplexing). Ωστόσο, αυτό είναι δύσκολο λόγω της αναμενόμενης καθυστέρησης για αυτούς τους fronthaul συνδέσμους που μπορεί να υποδηλώνουν 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 παρέχει 2.5 Gbit/s για upstream και 10 Gbit/s για downstream. Υπό αυτό το πρίσμα, η τεχνολογία XG-PON θεωρείται πιο κατάλληλη τεχνολογία για την επόμενη γενιά fronthaul διασυνδέσεων του 5G-Crosshaul από το GPON. Όμως, η απαίτηση για ένα νέο συμμετρικό πρότυπο 10G PON (XGS-PON) θα περιορίσει τις απαιτήσεις για τα συστήματα XG-PON. Τέλος, οι τεχνολογίες GPON και XGPON δεν θα επιλεγούν ως οι πιο κατάλληλες επιλογές για το δίκτυο 5G, λόγω της σχετικά περιορισμένης χωρητικότητάς τους. Μια πιο κατάλληλη τεχνολογία για την επόμενη γενιά fronthaul διασύνδεσης των 5G δικτύων υπό το πρίσμα της χωρητικότητας είναι το NG-PON2. Η NG-PON2 διαμόρφωση τεχνολογίας συνήθως αποτελείται από 4-8 ζεύγη καναλιών στα οποία εφαρμόζεται η πολυπλεξία τόσο στο χρόνο όσο και στο μήκος κύματος (TWDM – Time and Wavelength Division Multiplexing). 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.

Συνοψίζοντας, τα σημαντικότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών PON σχετικά με τα 5G δίκτυα, είναι:

- Μηχανισμοί για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, όπως η κρυπτογράφηση και η υβριδική αποκωδικοποίηση διόρθωσης σφάλματος καθώς και προς τα εμπρός μηχανισμοί διόρθωσης σφάλματος (FEC - Forward Error Correction) που υλοποιούνται με ισχυρούς κώδικες Reed-Solomon.
- Ασφάλεια Δικτύων, δηλαδή των διαδικασιών οι οποίοι είναι απαραίτητοι 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.

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. Από την άλλη μεριά όμως, η επικρατούσα εμπορική τεχνολογία WDM-PON παρέχει μόνο συμμετρικές συνδέσεις της τάξης του 1 Gbit/s στις πιο πολλές περιπτώσεις, λόγω των περιορισμών των συνιστωσών. Η επίτευξη υψηλότερων ρυθμών bit, επιτυγχάνονται με τη χρήση ενός ρυθμιζόμενου laser κατανεμημένης ανάδρασης (DFB - distributed feedback) σε αντικατάσταση ανακλαστικών οπτικών εξαρτημάτων. Λόγω του παραπάνω περιορισμού το ρυθμιζόμενο WDM-PON θεωρείται ως το πιο κατάλληλο για την ανάπτυξη της ρυθμιζόμενης υψηλής χωρητικότητας WDM-PON συστημάτων επόμενης γενιάς, τα οποία μεγιστοποιούν την επίδοση του 5G.[71]

### 3.5 Σύγκριση mmWave με λοιπές τεχνολογίες

Σε αυτήν την ενότητα θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των ασύρματων τεχνολογιών για τα δίκτυα 5G που εξετάσαμε, με σημείο αναφοράς την τεχνολογία mmWave. Παρακάτω, παρουσιάζεται ένας πίνακας στον οποίο συγκρίνουμε τις παραπάνω τεχνολογίες ως προς κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που θεωρούνται βασικά για την υλοποίηση μιας ασύρματης ζεύξης.

Πίνακας 2 Σύγκριση Ασύρματων Τεχνολογιών για 5G Δίκτυα

	mmWave	FSO	VLC
Εύκολη ενσωμάτωση στα ήδη υφιστάμενα συστήματα		✓	✓
Κόστος Εγκατάστασης		✓	✓
Αδειοδότηση Φάσματος	✓		
Κατανάλωση Ενέργειας		✓	✓
Εύρος Ζώνης	✓	✓	✓
Διαχείριση Παρεμβολών	✓		
Απώλειες Μετάδοσης (λόγω απόστασης κ.λ.π)	✓		
Εξάρτηση από Καιρικές Συνθήκες	✓	✓	✓
LoS	✓	✓	✓
NLoS	✓		
Ασφάλεια		✓	✓
Υποστήριξη Κινητικότητας	✓		

Εξετάζοντας τον παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε ως προς την ενσωμάτωση στις ήδη υπάρχουσες υποδομές η mmWave τεχνολογία υστερεί σε σχέση με τις άλλες δυο, καθώς χρειάζεται πολύ μεγαλύτερος χρόνος, κόστος και υλικά για υλοποιήσουμε mmWave ζεύξεις. Ένα άλλο σημείο στο οποίο υστερεί αυτή η τεχνολογία είναι ότι χρειάζεται και ένα έξτρα κόστος και γραφειοκρατικές διαδικασίες που δεν το έχουν οι FSO και VLC, την αδειοδότηση φάσματος. Βέβαια με τη χρήση της τεχνολογίας mmWave, θα υπάρξει μείωση του κόστους λειτουργίας του δικτύου σε μεγάλο βαθμό, μιας και θα χρησιμοποιούνται small cells, οπότε θα είναι οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικότερες σε σχέση με τις macrocells. Μικρότερες κυψέλες σημαίνει επίσης και μικρότεροι σταθμοί βάσης, με συνέπεια να μην χρειάζεται το ίδιο δαπανηρό κόστος των σταθμών βάσης των macrocells, οι οποίοι κάνουν πολύπλοκες διεργασίες, μιας και αυτές έχουν μεταφερθεί σε άλλο πιο κεντροποιημένο σημείο. Ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας, υπάρχουν και εκεί ζητήματα που πρέπει να λυθούν, καθώς και εκεί υστερεί σε σύγκριση με τις άλλες δυο τεχνολογίες. Το κύριο πρόβλημα γενικά στις RF επικοινωνίες και στην mmWave φυσικά εστιάζεται στους ενεργειακά υπερκαταναλωτικούς από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (analog-to-digital - A/D) και από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα (digital-to-analog - D/A) μετατροπείς. Οι άλλες δυο τεχνολογίες μπορούν να τροφοδοτηθούν ακόμα και από μικρές πηγές ενέργειας, ακόμα και φωτοβολταϊκά. Ο χώρος των συχνοτήτων που μπορούν σήμερα να χρησιμοποιηθούν στις επικοινωνίες είναι πολύ περιορισμένος. Έτσι, η χρησιμοποίηση συχνοτήτων πέραν αυτών που έχουν κορεστεί, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, είναι επιτακτική ανάγκη ώστε να αυξηθεί το φάσμα και και κατ' επέκταση, το εύρος ζώνης και την ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες μια δεδομένη χρονική στιγμή. Όπως βλέπουμε και στον πίνακα 2, αυτό το κριτήριο το πληρούν και οι 3 ασύρματες τεχνολογίες που αναλύσαμε. Οι μεν FSO και VLC μπορούν να μεταφέρουν τεράστιο όγκο δεδομένων μιας και πλησιάζουν το εύρος ζώνης των οπτικών ινών, αλλά και η mmWave, μιας και στα 5G δίκτυα, οι σταθμοί βάσης θα απέχουν λιγότερο από 100m σχηματίζοντας picocells ή όταν βρίσκονται ακόμα πιο κοντά, σε απόσταση τέτοια ώστε να μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας WIFI, σχηματίζοντας femtocells. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται και ο αριθμός που μπορούν να εξυπηρετήσουν μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης για την επίτευξη καλύτερης φασματικής απόδοσης για την mmWave τεχνολογία μπορεί να υλοποιηθεί αύξηση της μεταδιδόμενης ποσότητας πληροφορίας ανά κόμβο με την βοήθεια της MIMO τεχνολογίας. Ενώ ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας στην αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας είναι η κυριαρχία του OFDMA σε συνδυασμό με TDMA στην χρήση των συχνοτήτων και για τις 3 ασύρματες τεχνολογίες. Ως προς τις απώλειες μετάδοσης τα mmWave χαρακτηρίζονται από την ευαισθησία στην περίθλαση (όπως όλα τα μικροκυματικά σήματα), βέβαια όχι στον βαθμό των κλασικών μικροκυματικών σημάτων, σε σύγκριση με τις FSO και VLC τεχνολογίες οι οποίες δεν υποφέρουν από τέτοιες απώλειες καθώς το φως μεταφέρεται κατευθυντικά. Οι καιρικές συνθήκες (βροχή, ομίχλη, υγρασία κ.α) επηρεάζουν αρκετά και τις 3 τεχνολογίες, όχι βέβαια στον ίδιο βαθμό, καθώς το φως επηρεάζεται σαφώς περισσότερο σε συνθηκές ομίχλης ή έντονης βροχόπτωσης. Οι FSO και VLC τεχνολογίες σε κατάσταση NLoS δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε αντίθεση με τις mmWave τεχνολογίες που μπορούν να μεταφέρουν το σήμα από διαφορετικά μονοπάτια και στον δέκτη με διάφορες τεχνικές να τα επανασυνθέσουν. Η ασφάλεια, ένα από τα κορυφαίτερα στοιχεία της σημερινής εποχής πρέπει να είναι βασικό χαρακτηριστικό σε όλες τις τεχνολογίες. Σαφώς και στις τρεις τεχνολογίες που εξετάσαμε είναι παρών, αλλά στις FSO και VLC το επίπεδο ασφαλείας είναι μεγαλύτερο καθώς η πληροφορία μεταφέρεται μέσω του φωτός σε μια πολύ μικρή ακτίνα, όπου είναι και δύσκολο να υπακλαπούν πληροφορίες σε αντίθεση με τις RF και συγκεκριμένα της mmWave που το μέσο είναι μεν και εδώ ο αέρας, αλλά μεταφέρεται σαν ραδιοσυχνότητα. Για την υποστήριξη της



κινητικότητας, μέχρι και σήμερα, ο ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων παράγεται από τους στατικούς χρήστες. Όμως, η υποστήριξη της κινητικότητας και της always-on συνδεσιμότητας είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στα κινητά δίκτυα που είναι σχετικά με το WiFi. Οι παραπάνω τεχνολογίες που εξετάσαμε, δεν είναι βέβαια μονοδιάστατες ως προς την υλοποίησή τους. Όπως είδαμε και σε προηγούμενες ενότητες, εάν τις συνδυάσουμε, μπορούμε να καλύψουμε τα κενά της μιας από την άλλη. Επομένως, το μέλλον μας επιφυλάσσει μια πληθώρα από συνδυαστικές τεχνολογίες, οι οποίες αν και αρχικά είχαν παρουσιαστεί μεμονομένα, οι ευρευνητικές ομάδες για την υλοποίηση των 5G δικτύων καταφέρνουν και ομογενοποιούν αυτές τις τεχνολογίες για την βέλτιστη ως προς την απόδοση και χρήση των μελλοντικών δικτύων. Κάθε συσκευή ακόμα και μέσα στο σπίτι θα επικοινωνεί με τον υπόλοιπο κόσμο για την διευκόλυνση των ανθρώπων ώστε να μπορούν απομακρυσμένα να χειρίζονται τα πάντα. Το μέλλον το φέρνει η 5<sup>η</sup> γενιά δικτύων, με αυτό που ονομάζουμε Internet of Things (IoT).



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενογλωσσος Όρος	Ελληνικός Όρος
Smartphones	Έξυπνα Τηλέφωνα
Tablets	Υπολογιστές Ταμπλέτες
Video Streaming	Ροές Βίντεο
Applications	Εφαρμογές
Data rates	Ρυθμός Δεδομένων
Aggregate data rate	Συνολικός Ρυθμός Δεδομένων
Edge Rate	Ρυθμός Δεδομένων στο άκρο της Κυψέλης
Peak Rate	Μέγιστος Ρυθμός μετάδοσης
Latency	Χρόνος Καθυστέρησης
International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
International Mobile Telecommunications	Διεθνής Κινητές Τηλεπικοινωνίες
Software Defined Networks	Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό
Cloud	Νέφος
Data traffic	Όγκος Διακινούμενων Δεδομένων
Software	Λογισμικό
Cloud-based Communication	Επικοινωνία βασισμένη σε Τεχνολογίες Νέφους
Flexibility	Ευελιξία
Programmability	Προγραμματισιμότητα
Bursts	Εκρήξεις
OPEX	Λειτουργικό Κόστος Δικτύου
Key Performance Indicators	Δείκτες Απόδοσης
Multitenancy	Πολλαπλή Μίσθωση
Density	Πυκνότητα
Inter-cell Interference	Παρεμβολές μεταξύ των Κυψελών
Manageability	ευκολία κεντρικής διαχείρισης
Resource Management	Διαχείριση Πόρων
Hardware	Υλικό του Υπολογιστή
CAPEX	Κεφαλαιακό Κόστος
Cloud Computing	Υπολογιστικό Νέφος
Backward-Compatibility	Υποστήριξη προηγούμενων γενεών
Legacy support	Συμβατότητα

Network Virtualization	Τεχνολογία Εικονικών Δικτύων
Server	Διακομιστής
Network Level of Abstraction	Ανώτερο Επίπεδο της Στοιβάς Πρωτοκόλλου
Policy	Πολιτική
Network Densification	Πυκνοποίηση Δικτύου
Densification over space	Χωρική Πυκνότητα
Densification over Frequency	Συχνотική Πυκνότητα
Small-cells	Μικρές Κυψέλες
Macrocells	Μακροκυψέλες
Products cycles	Κύκλος Ανάπτυξης Προϊόντων
Virtual Resources	Εικονικοί Πόροι
Virtual Functions	Εικονικές Λειτουργίες
Virtual Links	Εικονικές Συνδέσεις
Microcells	Μικροκυψέλες
Picocells	Πολύ μικρές κυψέλες
Femtocells	Πάρα πολύ μικρές κυψέλες
Hetnets	Ετερογενή Δίκτυα
Multiple-input and Multiple-output	Συμπαγείς κεραίες πολλαπλής εισόδου-εξόδου
Beamforming	Δίκτυο Σχηματισμού Δέσμης
Pilot contamination	Μόλυνση Καναλιού
Interfaces	Διασυνδέσεις
Data centers	Κέντρα Δεδομένων
Virtualization Layer	Στρώμα Εικονικοποίησης
Hypervisor	Επόπτης
Virtualization	Εικονικοποίηση
Routers	Δρομολογητές
Switches	Μεταγωγείς
Infrastructure Layer	Επίπεδο Υποδομής
Control layer	Επίπεδο Ελέγχου
Application Layer	Επίπεδο Εφαρμογών
Traffic Engineering	Δυνατότητα Καταμερισμού της Κίνησης
Southbound Part	Νότιο Μέρος
Northbound Part	Βόρειο Μέρος
Data Plane	Επίπεδο Δεδομένων

On-the-fly	Στη λειτουργία
Agility	Ευκινησία
Centrally Managed	Κεντρική Διαχείριση
Open standards based	Βασισμένο σε Ανοιχτά Πρότυπα
Openness	Ανοιχτό σε Αλλαγές
Cooperativeness	Συνεργατικότητα
Cross-Layer	Διαστρωματικά
Physical Layer Security	Ασφάλεια στο Φυσικό Επίπεδο
Offloading	Αποφόρτωση
Backhaul	Οπισθόζευξη
Fronthaul	Εμπροσθόζευξη
Uplink	Ανερχόμενη Σύνδεση
Downlink	Κατερχόμενη Σύνδεση
Channel Sounding	Βολιδοσκόπηση Καναλιού
Control Plane	Επίπεδο Ελέγχου
Radio Controllers	Ραδιοελεγκτές
Centralized Baseband Units	Κεντροποιημένων βασικών μονάδων
Remote Radio Heads	Κινητών μονάδων
Aggregation	συγκέντρωση της κυκλοφορίας
Optical Wireless Communications	οπτικές ασύρματες επικοινωνίες
Free space optics	Οπτική ελεύθερου χώρου
Passive Optical Networks	Παθητικά Οπτικά Δίκτυα
point-to-multipoint	Ένα-προς-πολλά σημεία
Wavelength Division Multiplexing	Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος
Common Public Radio Interface	Κοινή δημόσια ασύρματη διεπαφή
Time Division Multiplexing	Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου
Pay as you grow	Δυνατότητα πληρωμής με την ανάπτυξη
Physical Network Elements	Φυσικά στοιχεία δικτύου
Virtual Network Elements	Εικονικά στοιχεία δικτύου
Context-aware	Επίγνωση πλαισίου
hot spot	Σημείο ασύρματης πρόσβασης
Multiple Connectivity	Πολλαπλή συνδεσιμότητα
Machine Type Communication	Επικοινωνία τύπου μηχανής
Joint Transmission	Κοινή Μετάδοση

Intra- frequency	ενδο-συχνότητα
narrow beam	Στενή δέσμη ακτίνας
Handoff	Μεταφορά σύνδεσης
Strong coupling	Ισχυρή Σύνδεση

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
ITU	International Telecommunication Union
IMT	International Mobile Telecommunications
SDN	Software Defined Network
QoS	Quality of Services
TVO	Total Value of Ownership
TCO	Total Cost of Ownership
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
mmWave	Milimetre wave
PPP	Public Private Partnership
NFV	Network Function Virtualization
ICT	Information and Communication Technology
KPI	Key Performance Indicators
CoMP	Coordinated MultiPoint
RAT	Radio Access Technologies
UDN	Ultra Dense Network
CPU	Central Prossecing Unit
VM	Virtual Machine
TCP/IP	Transimission Controll Protocol/Internet Protocol
OSI	Open Systems Inteconnections
LTE/A	Long Term Evolution/Advanced
HSPA	High Speed Packet Access
VNF	Virtual Network Function
IaaS	Infrastructure as a Service
PaaS	Platform as a Service
SaaS	Software as a Service
ISP	Internet Service Provider
SP	Service Provider
InP	Infrastructure Providers
NF	Network Function
MANO	Management and Orchestration
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
COTS	Commercial off the Self
EMS	Element Management System

OSS	Operating Support Systems
BSS	Business Support Systems
ETSI	European Telecommunication Standarts Institute
RAN	Radio Access Network
IoT	Internet of Things
API	Application Programming Interfaces
ONF	Open Networking Foundation
C-RAN	Cloud Radio Access Network
DSA	Dynamic Spectrum Access
MAC	Media Access Control
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
UE	User Equipment
eNB	Evolved node B
BBU	BaseBand Unit
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
DAS	Distributed Antenna System
A/D	Analog to Digital
D/A	Digital to Analog
UL	Uplink
TDD	Time Division Duplex
MEC	Mobile Edge Computing
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ESR	Early Stage Researcher
XCI	Crosshaul Control Infrastructure
XFE	Crosshaul Packet Forwarding Element
WAN	Wide area network
WLAN	Wireless Local Area Network
VLC	Visible Light Communications
PON	Passive Optical Networks
WDM	Wavelength Division Multiplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing

MC	Multiple Connectivity
JT	Joint Transmission
SU-MIMO	Single User MIMO
FD-MIMO	Full Dimension MIMO
LOS	Line of sight
NLOS	Non Line of sight
HDTV	High Definition Television
UHDTV	Ultra High Definition Television
FSO	Free Space Optics
PAM	Pulse-amplitude modulation
RSSI	Received signal strength indicator
MTC	Machine Type Communication



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] “Huawei White Papper. 5G: A Technology Vision,” 2013.
- [2] R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, and D. Soldani, “SDN-based 5Gmobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility.Transactions on Emerging Telecommunications Technologies Special Issue. Enabling 5G: energy and spectrally efficient communication systems.,” vol. 26, no. 1, pp. 82–92.
- [3] D. Trossen and D. Soldani, “What is 5G (Really) About?,” *White Pap.*, no. NetWorld 2020 ETP, 2014.
- [4] A. Manzalini *et al.*, “Software-Defined Networks for Future Networks and Services Main Technical Challenges and Business Implications,” Trento 11th–13th November, 2013, 2014.
- [5] GSMA, G. Intelligence, GSMA, and G. Intelligence, “Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile,” *GSMA Intell. Underst. 5G*, no. December, pp. 3–15, 2014.
- [6] I. Giannoulakis, E. Kafetzakis, G. Xylouris, G. Gardikis, and A. Kourtis., “On the Applications of Efficient NFV Management Towards 5G Networking.,” *IEEE 5G Ubiquitous Connect.*, vol. 1st Intern, 2014.
- [7] A. Damnjanovic *et al.*, “Network densification: The dominant theme for wireless evolution into 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 82–89, 2014.
- [8] J. Turkka, M. Costa., and P. Kela, “Borderless Mobility in 5G Outdoor Ultra-Dense Networks,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1462–1476, 2015.
- [9] B. Timus *et al.*, “Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications : The Vision of the METIS Project Scenarios for the 5G M obile and Wireless Communications .,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. January 2016, pp. 26–35, 2014.
- [10] F. Richter, A. Fehske, and G. Fettweis, “Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks.,” *Veh. Technol. Conf. Fall (VTC 2009-Fall)*, vol. IEEE 70th, 2009.
- [11] K. Samdanis *et al.*, “Energy efficiency benefits of RAN-as-a-service concept for a cloud-based 5G mobile network infrastructure,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1586–1597, 2015.
- [12] R. Mijumbi, J. Serrat, J. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba, “Network Function Virtualization : State-of-the- art and Research Challenges Network Function Virtualization : State-of-the-art and Research Challenges,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. SEPTEMBER, pp. 236–262, 2015.
- [13] A. Azcorra and U. Carlos, “Network and Service Virtualization.,” *NetWorld 2020 ETP*, p. White Paper, 2014.
- [14] V. Jungnickel, C. Bock, J. Ferrer, D. Levi, T. Mendes, and M. Parker, “Software-defined Architecture for 5G Front- and Backhaul over Heterogeneous Access Networks,” *Work. Radio Access Spectr. Innov. 5G*, no. March, 2014.
- [15] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, “A Survey on 5G : The Next Generation of Mobile Communication A Survey on 5G : The Next Generation of Mobile Communication \*,” *Elsevier Phys. Commun.*, no. March, 2016.
- [16] R. L. Aguiar, “NetWorld 2020 ETP, Mobility/Connectivity and Networking Layer,” *White Pap.*, 2014.
- [17] A. Dawson, M. William, K. Mahesh, and F. J. Garcia, “On the benefits of RAN virtualisation in C-RAN based mobile networks,” in *Proceedings - 2014 3rd European Workshop on Software-Defined Networks, EWSDN 2014*, 2014, pp. 103–108.
- [18] F. Boccardi, A. Lozano, U. P. Fabra, T. L. Marzetta, and B. Labs, “Five Disruptive Technology Directions for 5G.pdf,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. February, pp. 74–80, 2014.
- [19] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO in the UL / DL of Cellular Networks : How Many Antennas Do We Need ?,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, 2013.
- [20] F. Rusek *et al.*, “Scaling up MIMO : Opportunities and Challenges with Very Large Arrays Scaling up MIMO : Opportunities and Challenges with Very Large Arrays,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2011.
- [21] B. Daneshrad and B. Hochwald, “How much training is needed in multiple antenna wireless links?,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 4, pp. 951–963, 2003.

- [22] N. Jindal and A. Lozano, “A Unified Treatment of Optimum Pilot Overhear in Multipath Fading Channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 10, pp. 2939–2948, 2010.
- [23] H. Huh, A. M. Tulino, and G. Caire, “Network MIMO with linear zero-forcing beamforming: Large system analysis, impact of channel estimation, and reduced-complexity scheduling,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 5, pp. 2911–2934, 2012.
- [24] Y. Zeng, R. Zhang, and Z. N. Chen, “Electromagnetic lens-focusing antenna enabled massive MIMO: Performance improvement and cost reduction,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1194–1206, 2014.
- [25] “[https://blogs.oracle.com/cloud/entry/what\\_s\\_driving\\_the\\_cloud](https://blogs.oracle.com/cloud/entry/what_s_driving_the_cloud).”
- [26] ETSI, “Network Function Virtualisation Updated White Paper,” Frankfurt-Germany, 2013.
- [27] S. Perrin and S. Hubbard, “White Paper Practical Implementation of SDN & NFV in the WAN Prepared by,” no. October, 2013.
- [28] C. Giraldo, F. Gil-Castineira, C. Lopez-Bravo, and F. J. Gonzalez-Castano, “A Software-Defined Mobile Network Architecture.,” in *The First International Workshop on Cooperative Wireless Networks IEEE*, 2014.
- [29] I. F. Akyildiz, S. C. Lin, and P. Wang, “Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation,” *Comput. Networks*, vol. 93, no. 1, pp. 66–79, 2015.
- [30] J. Q. Wang, H. Fu, and C. Cao, “Software defined networking for telecom operators: Architecture and applications,” in *2013 8th International ICST Conference on Communications and Networking in China, CHINACOM 2013 - Proceedings*, 2013, pp. 828–833.
- [31] R. Jain, “OpenFlow, Software Defined Networking (SDN) and Network Function Virtualization (NFV),” *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1–102, 2014.
- [32] R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, and D. Soldani, “SDN-based 5G mobile networks: Architecture, functions, procedures and backward compatibility,” *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 82–92, 2015.
- [33] A. C. Risdianto and E. Mulyana, “Implementation and analysis of control and forwarding plane for SDN,” in *2012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, TSSA 2012*, 2012, pp. 227–231.
- [34] I. F. Akyildiz, P. Wang, and S.-C. Lin, “SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems,” *Comput. Networks*, vol. 85, pp. 1–18, 2015.
- [35] T. Chen, M. Matinmikko, X. Chen, X. Zhou, and P. Ahokangas, “Software Defined Mobile Networks : Concept , Survey , and Research Directions,” *IEEE Commun. Mag.*, no. November, 2015.
- [36] W. Braun and M. Menth, “Software-Defined Networking Using OpenFlow: Protocols, Applications and Architectural Design Choices,” University of Tuebingen, 2014.
- [37] A. Hakiri and P. Berthou, “Leveraging SDN for the 5G Networks: Trends, Prospects, and Challenges,” Univ de Toulouse, 2015.
- [38] C. Koliass, S. Ahlawat, C. Ashton, M. Cohn, S. Manning, and S. Nathan, ““OpenFlow-Enabled Mobile and Wireless Networks,”” *Open Netw. Found.*, 2013.
- [39] Q. C. Li, H. Niu, G. Wu, and R. Q. Hu, “Anchor-booster based heterogeneous networks with mmWave capable booster cells,” in *2013 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2013*, 2013, pp. 93–98.
- [40] H. Ishii, Y. Kishiyama, and H. Takahashi, “A novel architecture for LTE-B:C-plane/U-plane split and Phantom Cell concept,” in *2012 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2012*, 2012, pp. 624–630.
- [41] THEODORE S. RAPPAPORT; SHU SUN; RIMMA MAYZUS; HANG ZHAO; YANIV AZAR; KEVIN WANG; GEORGE N. WONG; JOCELYN K. SCHULZ; MATHEW SAMIMI; FELIX GUTIERREZ, “Millimeter Wave Wireless Communications for 5G Cellular: It will work!,” pp. 335–349, 2013.
- [42] B. T and Heath R. W., “Analysis of millimeter wave cellular networks with overlaid microwave communication,” in *ASILOMAR Conf. Sig. Sys. Comput., Pacific Grove CA. USA*, 2014.
- [43] X. Zhang, A. F. Molisch, and S. Y. Kung, “Variable-phase-shift-based RF-baseband codesign for

- MIMO antenna selection,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 11, pp. 4091–4103, 2005.
- [44] J. Wang *et al.*, “Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 8, pp. 1390–1399, 2009.
- [45] V. Venkateswaran and A. J. Van Der Veen, “Analog beamforming in MIMO communications with phase shift networks and online channel estimation,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 8, pp. 4131–4143, 2010.
- [46] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, “Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 10, pp. 4391–4403, 2013.
- [47] M. Jaber, M. A. Imran, R. Tafazolli, and A. Tukmanov, “5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1743–1766, 2016.
- [48] H. Jinri and Y. Yannan, “White Paper of Next Generation Fronthaul Interface,” 2015.
- [49] A. Douik, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M. S. Alouini, “Hybrid Radio/Free-Space Optical Design for Next Generation Backhaul Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 6, pp. 2563–2577, 2016.
- [50] “InterDigital, EgdeHaul™ Solution Datasheet.” [Online]. Available: [http://www.interdigital.com/data\\_sheets/](http://www.interdigital.com/data_sheets/).
- [51] “5G Crosshaul: The 5G Integrated fronthaul/backhaul,” in *D2.1 Detailed analysis of the technologies to be integrated in the XFE based on previous internal reports from WP2/3*, 2015.
- [52] “Visible Light Communication,” in *IEEE Communications Society*.
- [53] Z. Saleem and W. Ishaq, “Free space optical ( FSO ) link design under diverse weather conditions COMSATS Institute of IT WAH Campus,” in *5th WSEAS International Conference on Microelectronics*, 2006, vol. 2006, pp. 97–104.
- [54] S. S. Muhammad, P. Kohldorfer, and E. Leitgeb, “Channel modeling for terrestrial free space optical links,” in *Proceedings of 2005 7th International Conference Transparent Optical Networks, 2005.*, 2005, vol. 1, pp. 407–410.
- [55] A. K. Majumdar, “Free-space laser communication performance in the atmospheric channel,” *J. Opt. Fiber Commun. Reports*, vol. 2, no. 4, pp. 345–396, 2005.
- [56] O. Henniger, H. Wilfert, “An Introduction to Free Space Optical Communications,” *Radioengineering*, vol. 19, no. 2, pp. 203–212, 2010.
- [57] *et. al.* Isaac Kim, “Advances in Communications: FSO provides reliable 10Gbits/s and beyond backhaul connections,” 2017.
- [58] L. Clouds, “Free Space Optics in Next Generation Wireless Networks,” *Technol. Dig. Bull. telecom Technol.*, no. 8, 2017.
- [59] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroğlu, and M.-S. Alouini, “FSO-based Vertical Backhaul/Fronthaul Framework for 5G+ Wireless Networks,” King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, 2016.
- [60] M. Alouini, “Spectrum Scarcity and Optical Wireless Communications,” King Abdullah University of Science and Technology, 2015.
- [61] R. Sagotra and R. Aggarwal, “Visible Light Communication,” *Int. J. Comput. Trends Technol.*, vol. 4, no. April, pp. 906–910, 2013.
- [62] H. Burchardt, N. Serafimovski, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, “VLC: Beyond point-to-point communication,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 7, pp. 98–105, 2014.
- [63] T. S. Rappaport, J. N. Murdock, and F. Gutierrez, “State of the Art in 60-GHz Integrated Circuits and Systems for Wireless Communications,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 8, pp. 1390–1436, 2011.
- [64] Z. Pi and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, 2011.
- [65] X. Ioannis, “Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output ( MIMO ) Simulations,” *A Ray Tracing Simulator Based 3GPP TR 25.996 v.6.1.0*, vol. 10, pp. 1–46, 2008.
- [66] Report ITU-R M.2135-1, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT advanced,” *Evaluation*, vol. 93, no. 3, 2009.

- [67] M. Nekovee *et al.*, “Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC),” *Deliv. D5.1*.
- [68] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, “A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges,” 2015.
- [69] P. Fernandes, “Context aware,” 2011. [Online]. Available: <http://studentguru.gr/b/biboudis/archive/2009/01/16/context-aware>.
- [70] J. G. Andrews *et al.*, “What Will {5G} Be?,” *IEEE jsac Spec. issue 5g Wirel. Commun. Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [71] J. Zhu *et al.*, “First Demonstration of a WDM-PON System Using Full C-band Tunable SFP+ Transceiver Modules [Invited],” in *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, vol. 7, no. 1, p. A28.