



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών

**Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και καταναμημένων
Συστημάτων,**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και ανάλυση σύγχρονων τεχνικών mobile Fronthaul σε
δίκτυα 5G**

**Καταχανάς Νικόλαος AM: mcse19012
Κορρές Κωνσταντίνος AM :mcse19007**

Εισηγητής: Δρ Αντώνης Μπόγγρης, Καθηγητής

Τίτλος εργασίας

Μελέτη και ανάλυση σύγχρονων τεχνικών mobile Fronthaul σε δίκτυα 5G

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κ. Αντώνης Μπόγγρης	Καθηγητής	
2	Κ. Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης	Λέκτορας εφαρμογών	
3	Κ. Νικόλαος Μυριδάκης	Επίκουρος Καθηγητής	

(Κενό φύλλο)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και ανάλυση σύγχρονων τεχνικών mobile Fronthaul σε δίκτυα 5G

Καταχανάς Νικόλαος Α.Μ. MCSE19012

Κορρές Κωνσταντίνος Α.Μ. MCSE19007

Εισηγητής:

Δρ Αντώνης Μπόγρης, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή:

Κ. Αντώνης Μπόγρης, Καθηγητής

Κ. Κωνσταντίνος Μαυρομάτης, Λέκτορας εφαρμογών

Κ. Νικόλαος Μυριδάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης:

08 Δεκεμβρίου 2021

(Κενό φύλλο)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η
του....., με αριθμό μητρώου φοιτητής/τρια του Προγράμματος
Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος
.....της Σχολής..... του

Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Κενό φύλλο)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε θερμά, πρωτίστως τον εισηγητή και καθοδηγητή μας κ. Αντώνη Μπόγρη που μας παρείχε, εξ' αρχής αλλά και καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μας εργασίας, αμέριστη υποστήριξη.

Οι χρήσιμες παρεμβάσεις αλλά και οι πολύτιμες συμβουλές του κατηύθυναν κάθε μας βήμα, ανατροφοδοτώντας μας συνεχώς και καθιστώντας την όλη μας προσπάθεια μια ενδιαφέρουσα πρόκληση.

Επιπροσθέτως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς αλλά και τους φίλους μας, για την υποστήριξη και την ενθάρρυνση που αφειδώς μας παρείχαν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση σύγχρονων τεχνικών mobile Fronthaul στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Αρχικά θα κάνουμε μία αναδρομή στην εξέλιξη των κινητών δικτύων έως και σήμερα. Έπειτα θα αναφέρουμε σημαντικά χαρακτηριστικά, προκλήσεις και περιορισμούς στα δίκτυα 5G. Ακολούθως θα αναλύσουμε προτεινόμενες αρχιτεκτονικές που εφαρμόζονται από το συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών. Επιπρόσθετα θα κάνουμε μία σημαντική ανάλυση της αρχιτεκτονικής και των τεχνικών σε mobile Fronthaul. Τέλος θα γίνει ανασκόπηση της πολιτικής διαφόρων παρόχων για το Fronthaul.

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is the presentation of modern Fronthaul mobile techniques in the fifth generation networks. We will first take a look back at the evolution of mobile networks to date. We will then mention important features, challenges and limitations of 5G networks. Next we will analyze proposed architectures applied by the combination of different technologies. In addition we will make an important analysis of the architecture and techniques in mobile Fronthaul. Finally, the policy of various providers for Fronthaul will be reviewed.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: 5G, mobile Fronthaul, C-RAN, RoF, CPRI

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	24
Κεφάλαιο 1 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	27
1.1 Εισαγωγή	27
1.2 Συστήματα προκυτταρικής - 0G	28
1.3 1G	29
1.4 2G	30
1.4.1 2.5G.....	31
1.5 3G	33
1.5.1 3.5G ή 3G+.....	35
1.6 4G	36
1.6.1 LTE.....	37
Χαρακτηριστικά 4G.....	38
Τεχνολογίες για το 4G	40
1.6.2 LTE Advanced (4G+)	40
Κεφάλαιο 2 5G	43
2.1 Εισαγωγή	43
2.2 Χαρακτηριστικά	45
2.2.1 Χαμηλή ζώνη φάσματος (<1GHz)	45
2.2.2 Μεσαία ζώνη φάσματος (<6GHz).....	46
2.2.3 Υψηλή ζώνη φάσματος (24GHz-40GHz)	47
2.3 Δυνατότητες	48
2.4 Προβλήματα και προκλήσεις	52
2.4.1 Τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις	52
2.4.2 Μη τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις.....	53
2.4.3 Ζητήματα διαχείρισης	55
Κεφάλαιο 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G	56
3.1 Εισαγωγή	56
3.2 Ασύρματα δίκτυα 5G	57
3.3 Δίκτυα σταθερής πρόσβασης	59
3.4 Οπτικά δίκτυα	61

3.5 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN	67
3.6 Εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών-NFV	69
3.7 Συνδυασμός αρχιτεκτονικής SDN/NFV	71
3.8 Μικροκυματική ζώνη	72
Κεφάλαιο 4 Αρχιτεκτονική και τεχνικές mobile fronthaul	75
4.1 Εισαγωγή.....	75
4.2 C-RAN	75
4.3 A-RoF και D-RoF	80
4.3.1 A-RoF.....	81
4.3.2 D-RoF.....	84
4.4 CPRI και eCPRI.....	87
4.5 Δίκτυο fronthaul	90
4.5.1 Οπτικά δίκτυα	91
4.5.1.1 Dedicated fiber	91
4.5.1.2 Passive WDM.....	92
4.5.1.3 Active WDM.....	94
4.5.1.4 OTN (Optical Transmission Network).....	94
4.5.2 Μικροκυματική τεχνολογία.....	96
4.5.3 FSO (Free Space Optical).....	97
4.5.4 Υβριδικό FSO/RF	99
4.5.5 Ethernet.....	101
4.5.6 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό (SDN) στο fronthaul	105
4.6 Καθυστέρηση μεταφοράς (latency) και αποστάσεις RRH-BBU	106
Κεφάλαιο 5 Μελέτες και υλοποιήσεις παρόχων και εταιρειών	111
5.1 Εισαγωγή.....	111
5.2 Εταιρείες	111
5.2.1 ADVA.....	112
5.2.2 Huawei	113
5.2.3 Ericsson.....	114
5.2.4 Nokia	115
5.2.5 Cisco	117
5.3 Πάροχοι και O-RAN alliance	118
5.4 Edge computing και TSN	120
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1.1 Γενιές Δικτύων	28
Εικόνα 1.2 Η ανάγκη για βελτίωση ταχύτητας.....	37
Εικόνα 1.3 Χαρακτηριστικά 4G.....	39
Εικόνα 1.4 Σύγκριση Small Cells	41
Εικόνα 2.1 Στόχος 5G	44
Εικόνα 2.2 Ζώνες φάσματος 5G.....	45
Εικόνα 2.3 3D αναπαράσταση ζωνών φάσματος	48
Εικόνα 2.4 Τεχνολογική ανάπτυξη	51
Εικόνα 3.1 Συνδυασμός τεχνολογιών δικτύου 5G	56
Εικόνα 3.2 Πλέγμα backhaul για small cells στο φάσμα mm-Wave	58
Εικόνα 3.3 Κατηγορίες παθητικών οπτικών δικτύων(PON).....	60
Εικόνα 3.4 Multiplexer/ Demultiplexer	62
Εικόνα 3.5 Optical Add Drop Multiplexer(OADM).....	62
Εικόνα 3.6 WDM transceiver.....	63
Εικόνα 3.7 Τεχνική CWDM και DWDM	64
Εικόνα 3.8 DWDM transceiver	66
Εικόνα 3.9 Επίπεδα SDN	68
Εικόνα 3.10 Δικτύωση SDN	69
Εικόνα 3.11 Αρχιτεκτονική ETSI NFV	70
Εικόνα 3.12 Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV.....	71
Εικόνα 3.13 Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση.....	73
Εικόνα 3.14 Ελεύθερες συχνότητες και εφαρμογή τους ανά περιοχή	74
Εικόνα 4.1 Σύγκριση αρχιτεκτονικής C-RAN και παραδοσιακών τεχνικών για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	77
Εικόνα 4.2 Σύγκριση μεταξύ παραδοσιακής αρχιτεκτονικής (επάνω) και νέας D-ROF fronthauling (κάτω)	78
Εικόνα 4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος Radio over Fiber	81
Εικόνα 4.4 Σύστημα αναλογικής μετάδοσης σε ίνα A-RoF	82
Εικόνα 4.5 Σύστημα ψηφιακής μετάδοσης σε ίνα D-RoF	84
Εικόνα 4.6 Σύστημα RoMCF	86
Εικόνα 4.7 Στοιβές πρωτοκόλλου για δίκτυα eCPRI για δίκτυα 4G ή 5G..	90
Εικόνα 4.8 Σύνδεση οπτικών ινών σε υποδοχές SFP για RRH και BBU ..	92
Εικόνα 4.9 Ρόλος οπτικού πολυπλέκτη OADM.....	92

Εικόνα 4.10 Ρόλος active αναμεταδότη.....	94
Εικόνα 4.11 Εφαρμογή OTN στο Fronthaul	95
Εικόνα 4.12 Υβριδική τεχνολογία RF / FSO	99
Εικόνα 4.13 Αναπαράσταση καιρικών συνθηκών για RF / FSO	100
Εικόνα 4.14 Δομή πακέτων ethernet	102
Εικόνα 4.15 Ανάλυση φορτίου ethernet	102
Εικόνα 4.16 Αποστολή/Λήψη δεδομένων σε C-RAN	107
Εικόνα 5.1 Συσκευή OSA 5410	113
Εικόνα 5.2 Fronthaul 6000 passive	115
Εικόνα 5.3 Fronthaul 6000 active	115
Εικόνα 5.4 NCS540 Fronthaul Routers	118

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1 Μέθοδοι οπτικού Fronthaul.....	96
Πίνακας 4-2 Τύπος πακέτων RoE.....	103
Πίνακας 4-3 Υλοποίηση διαδικασίας δικτύου fronthaul.....	108
Πίνακας 4-4 Τιμές των καθυστερήσεων σε δίκτυο fronthaul	108

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

3GPP	Third Generation Partnership Project	Έργο Συνεργασίας Τρίτης Γενιάς
5G – PPP	5 G – Public Private Partners	5 G - Δημόσιοι Ιδιωτικοί Συνεργάτες
8PSK	8 Phase Shift Keying Modulation	Διαμόρφωση Πλήκτρων Αλλαγής Φάσης 8
ACK	Acknowledgment	Αναγνώριση
AMPS	Advanced Mobile Phone Service	Προηγμένη Υπηρεσία Κινητού Τηλεφώνου
APIs	Application Programmable Interfaces	Προγραμματιζόμενες Διεπαφές Εφαρμογών
APs	Access Points	Σημεία Πρόσβασης
BBUs	Baseband Units	Μονάδες Βασικής Ζώνης
BEA	Bit Error Rate	Ποσοστό Σφάλματος Bit
BS	Base Station	Σταθμός Βάσης
CAPEX	Capital Expense	Έξοδα Κεφαλαίου
CLI	Command Line Interface	Διεπαφή Γραμμής Εντολών
CN	Core Network	Δίκτυο Πυρήνα
CO	Central Office	Κεντρικό Γραφείο
CPRI	Common Public Radio Interface	Κοινή Δημόσια Ράδιο-Διεπαφή
C-RAN	Centralized RAN	Κεντρικό RAN
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Διαίρεση Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος Με Αραιή Παράθεση
D2D	Device to Device	Συσκευή Σε Συσκευή
DFB	Distributed Feedback	Κατανεμημένη Ανάδραση
DL	Downlink	Κατερχόμενη Ζεύξη
DMG	Directional Multi-Gigabit	Κατευθυντική Multi-Gigabit
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Διαίρεση Πολυπλεξίας Μήκους Κύματος Με Πυκνή Παράθεση
E2E	End-To-End	Από Άκρη Σε Άκρη
EDCH	Enhanced Dedicated Channel	Ενισχυμένο Αφιερωμένο Κανάλι
EDGE	Enhanced Data Rates for	Βελτιωμένοι Ρυθμοί Δεδομένων

	Global Evolution	Για Παγκόσμια Εξέλιξη
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Προτύπων Τηλεπικοινωνιών
FDD	Frequency Division Duplex	Αμφιδρόμηση με Διαίρεση Συχνοτήτων
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση μέσω Διαίρεσης Συχνοτήτων
FEC	Forward Error Correction	Εμπρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων
FSO	Free Space Optics	Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου
GMSK	Gaussian Prefiltered Minimum Shift Keying	Gaussian Prefiltered Minimal Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Services	Γενικές Υπηρεσίες Ραδιοπακέτων
GSM	Global System for Mobile	Παγκόσμιο Σύστημα Για Κινητά
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request	Υβριδική Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης
HFC	Hybrid Fiber Coaxial	Υβριδική χρήση οπτικής ίνας – ομοαξονικού καλωδίου
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data	Δεδομένα Μεταγωγής Κυκλώματος Υψηλής Ταχύτητας
HSPA	High Speed Packet Access	Πρόσβαση Σε Πακέτα Υψηλής Ταχύτητας
IDEN	Intergraded Digital Enhanced Network	Διαβαθμισμένο Ψηφιακό Βελτιωμένο Δίκτυο
IoT	Internet Of Things	Διαδίκτυο Των Πραγμάτων
IP	Internet Protocol	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
ITU	International Telecommunication Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
LOS	Line-of-Sight	Οπτική επαφή
LTE	Long Term Evolution	Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη
MAC	Media Access Control	Έλεγχος Πρόσβασης Πολυμέσων
MEC	Mobile Edge Computing	Κινητή Υπολογιστική άκρου
MFH	Mobile Fronthaul	Κινητό Fronthaul

MIMO	Multiple Input Multiple Output	Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος
NACK	Negative Acknowledgment	Αρνητική Επιβεβαίωση
NEs	Network Elements	Στοιχεία Δικτύου
NFs	Network Functions	Λειτουργίες Δικτύου
NFV	Network Function Virtualization	Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου
NMT	Nordic Mobile Telephone	Nordic Κινητό Τηλέφωνο
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	Οπτικός Πολυπλέκτης Προσθήκης/Απομάστευσης
OAM	Operations Administration and Maintenance	Διαχείριση Και Συντήρηση Λειτουργιών
OBSAI	Open Base Station Architecture Initiative	Πρωτοβουλία Αρχιτεκτονικής Ανοικτού Σταθμού Βάσης
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογώνια Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας
OPEX	Operating Expense	Λειτουργικά Έξοδα
OTN	Optical Transmission Network	Δίκτυο Οπτικής Μετάδοσης
OWC	Optical Wireless Communications	Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες
PDC	Professional Darts Corporation	Professional Darts Corporation
PNEs	Physical Network Elements	Στοιχεία Φυσικού Δικτύου
PNFs	Physical Network Functions	Λειτουργίες Φυσικού Δικτύου
PONs	Passive Optical Networks	Παθητικά Οπτικά Δίκτυα
POTS	Plain Old Telephony Services	Απλές Παλαιές Υπηρεσίες Τηλεφωνίας
QoS	Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσίας
RAN	Radio Access Network	Δίκτυο Ράδιο-Πρόσβασης
RATs	Radio Access Technologies	Τεχνολογίες Ραδιοπρόσβασης
RE	Radio Equipment	Ραδιοεξοπλισμός
RF	Radio Frequency	Ραδιοσυχνότητα
RoE	Radio over Ethernet	Ραδιό-μετάδοση Μέσω Ethernet
RoF	Radio Over Fiber	Ραδιο-μετάδοση μέσα Από οπτική

		Ίνα
RRH	Remote Radio Heads	Απομακρυσμένες Ράδιο-κεφαλές
RRU's	Remote Radio Units	Απομακρυσμένες Ράδιο-μονάδες
RTT	Round Trip Time	Χρόνος Μετ 'Επιστροφής
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία
SDN	Software Defined Networks	Δικτύωση Ορισμένη Από Λογισμικό
SDONs	Software Defined Optical Networks	Οπτικά Δίκτυα Καθορισμένα Από Λογισμικό
SFP	Small Form Factor Pluggable	Μικρής Μορφής Συνδεόμενος πομποδέκτης
SIM	Subscriber Identity Module	Subscriber Identity Module
SON	Self-Organizing Network	Αυτό-οργανωμένο Δίκτυο
SONET	Synchronous Optical Networking	Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο
TACS	Total Access Communication System	Σύστημα Επικοινωνίας Πλήρους Πρόσβασης
TDM	Time Division Multiplexing	Πολυπλεξία μέσω Χρονικής Διαίρεσης
TDMA	Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση μέσω χρονικής διαίρεσης
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing	Διαίρεση Πολυπλεξίας Σε Χρόνο Και Μήκος Κύματος
UDN	Ultra-Dense Networks	Εξαιρετικά Πυκνά Δίκτυα
UE	User Equipment	Εξοπλισμός Χρήστη
UL	Uplink	Ανερχόμενη ζεύξη
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Cellular	Εξαιρετικά Αξιόπιστη – χαμηλής καθυστέρησης κινητής υπηρεσίας
VHT	Very High Throughput	Πολύ Υψηλή Ρυθμαπόδοση
VIM	Virtual Infrastructure Management	Διαχείριση Εικονικής Υποδομής
VLC	Visible Light Communications	Επικοινωνίες Ορατού Φωτός
VMs	Virtual Machines	Εικονικές Μηχανές

VNEs	Virtual Network Elements	Στοιχεία Εικονικού Δικτύου
VNFs	Virtualized Network Functions	Εικονικές Λειτουργίες Δικτύου
VoIP	Voice Over IP	Voice Over Ip
WCDMA	Wide Band Code Division Multiple Access	Ευρυζωνική Διαίρεση Πολλαπλής Πρόσβασης
WDM	Wavelength Division Multiplexing	{Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα Για Πρόσβαση Μικροκυμάτων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία είναι κάτι που απασχολεί το κοινωνικό σύνολο από την αρχαιότητα. Με την πάροδο των αιώνων, η ανθρωπότητα συνεχώς αναζητούσε τρόπους για όλο και πιο γρήγορη, μη λανθάνουσα, και οικονομική επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων.

Το πιο δυναμικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, που στη συνέχεια οδήγησε στις ασύρματες επικοινωνίες όπως τις ξέρουμε σήμερα, το έκανε ο Ιταλός εφευρέτης G. Marconi, ο οποίος απέστειλε το γράμμα 'S' σε απόσταση χιλιομέτρων, χρησιμοποιώντας τον κώδικα Morse, με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι στις κοινωνίες του σήμερα, αλλά και του μέλλοντος. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 που ξεκίνησε η ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, φτάσαμε σήμερα στην τεχνολογία των έξυπνων συσκευών και στα ασύρματα συστήματα Πέμπτης Γενιάς (5G).

Οι κινητές επικοινωνίες έχουν αλλάξει με την πάροδο των ετών, από ένα σύστημα ικανό να μεταδίδει φωνητικές συνομιλίες σε περιορισμένο αριθμό συσκευών, σε ένα σύστημα που υποστηρίζει τρισεκατομμύρια συσκευές, μεταφέροντας κυρίως δεδομένα.

Η εκθετική αύξηση των τηλεφωνικών συσκευών ανά τον κόσμο, η ζήτηση για ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων υψηλής ταχύτητας, καθώς και η συνεχής ανάπτυξη καινοτόμων ασύρματων τεχνολογιών, υπηρεσιών και εφαρμογών, έχουν ασκήσει σημαντική πίεση στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Το Ultra Dense Network (UDN), πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για την κάλυψη των απαιτήσεων της ολοένα και αυξανόμενης κυκλοφορίας δεδομένων στις κινητές επικοινωνίες πέμπτης γενιάς (5G). Ορισμένοι ερευνητές από την πλευρά τους έχουν εξετάσει τη χρήση των μη αδειοδοτημένων ζωνών 2,4 GHz και 5 GHz, που χρησιμοποιούνται από το Wi-Fi για τα συστήματα 5G, επίσης γνωστά ως συστήματα LTE-Unlicensed (LTE-U). Για παράδειγμα, μέλη της επιστημονικής

κοινότητας διερεύνησαν τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των συστημάτων LTE-U με άδεια χρήσης. Αξιοποιώντας την εν λόγω τεχνολογία LTE-U, προτάθηκε να διατεθούν ορισμένοι πόροι φάσματος χωρίς άδεια στο σύστημα LTE, προκειμένου να εξυπηρετήσουν ακόμα περισσότερους χρήστες WiFi.

Εκτός από το LTE-U, το cloud radio access network (CRAN) είναι επίσης μια τεχνολογία που θέτει σοβαρή υποψηφιότητα για συστήματα 5G. Σε ένα CRAN, η επεξεργασία βασικής ζώνης συγκεντρώνεται σε μια ομάδα Baseband Units (BBU) και η επεξεργασία ραδιοσυχνοτήτων γίνεται σε remote radio heads (RRHs). Η BBU αποτελείται από επεξεργαστές υψηλής απόδοσης που εκτελούν λειτουργίες όπως, ο έλεγχος πόρων ραδιοφώνου, ο έλεγχος πρόσβασης πολυμέσων, ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, η χαρτογράφηση μπλοκ πόρων, η διαμόρφωση, η κωδικοποίηση κ.λπ, ενώ τα RRH παρέχουν ασύρματη κάλυψη σήματος για τον εξοπλισμό του χρήστη. Η ομάδα BBU αποτελείται από μονάδες μεγάλης κλίμακας, που συνδέονται με δίκτυο οπτικών ινών.

Συνεπώς, το C-RAN είναι μια αρχιτεκτονική, στην οποία πολλές φυσικές λειτουργίες, αλλά και λειτουργίες επιπέδου δικτύου, που είχαν προηγουμένως εφαρμοστεί σε σταθμούς βάσης (BS), μετακινούνται (και έτσι συγκεντρώνονται) στα Κεντρικά Γραφεία (CO).

Η αρχιτεκτονική και ο τρόπος που είναι δομημένο ένα CRAN, αποφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα εξής:

- Χαμηλή πολυπλοκότητα του υλικού, αλλά και του λογισμικού της κεραίας.
- Καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα, λόγω συγκεντρωτισμού και εικονικοποίησης της λειτουργίας.
- Οι τεχνικές συνεργασίας πολλαπλών σημείων που προτείνονται για το 5G, μπορούν να εφαρμοστούν πολύ πιο αποτελεσματικά, χάρη στην κεντρική επεξεργασία φυσικών λειτουργιών και λειτουργιών επιπέδου δικτύου για αρκετές τοποθεσίες κεραιών.

Από την άλλη πλευρά, το C-RAN απαιτεί πολύ μεγαλύτερη μεταφορά πληροφοριών από το CO στις τοποθεσίες κεραιών, σε σύγκριση με τις

παραδοσιακές αρχιτεκτονικές που βασίζονταν στο Back-hauling, απαιτώντας έτσι αποκλειστικούς συνδέσμους υψηλής χωρητικότητας στα δίκτυα σταθερής πρόσβασης, που πρέπει να υποστηρίξουν το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή αυτών των συνδέσμων στο C-RAN, υποδεικνύονται συνήθως ως "fronthauling" και ως επί τω πλείστον, απαιτούν δίκτυα σταθερής πρόσβασης που βασίζονται σε οπτικές ίνες.

Τί είναι όμως το fronthaul και το backhaul και ποιά η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών σε σχέση με το C-RAN;

Με λίγα λόγια, το backhaul αναφέρεται ως ο σύνδεσμος μεταξύ ενός σταθμού βάσης και του πυρήνα ενσύρματου δικτύου, ενώ το fronthaul χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σύνδεση μεταξύ των remote radio heads (RRH) και των Baseband Units (BBU).

Παρακάτω, αφού πρώτα πραγματοποιηθεί μια αναδρομή στην εξέλιξη των κινητών δικτύων έως και σήμερα και μία ανάλυση πάνω στα χαρακτηριστικά του 5G, όσον αφορά τις τεχνικές απαιτήσεις, τις υποψήφιες τεχνολογίες προς εφαρμογή, καθώς και τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές, θα αναλυθούν λεπτομερώς διάφορες τεχνικές mobile fronthaul, ενώ τέλος, θα παρουσιαστεί μια ανασκόπηση της πολιτικής των παρόχων για το fronthaul.

Κεφάλαιο 1 Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

1.1 Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, είναι σύνηθες να θεωρούνται «βασικός» δίαυλος πρόσβασης στο διαδίκτυο οι ευρυζωνικές συνδέσεις. Η βιομηχανία των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει επιτύχει σημαντική ανάπτυξη και αποτελεί πλέον ένα μεγάλο «παράθυρο» στον παγκόσμιο ιστό.

Τα πρώτα δειλά βήματα της κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησαν αμέσως μετά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο, με τις πρώτες προσπάθειες Σουηδών, Φινλανδών και Αμερικανών να δημιουργήσουν μια συσκευή, που δεν θα εξαρτάται από ενσύρματη σύνδεση με το δίκτυο παροχής τηλεφωνίας, ούτε από κάποια τοπική ασύρματη συσκευή εκπομπής ραδιο-σήματος χαμηλής συχνότητας.

Η λειτουργία του 1ου δικτύου κινητής τηλεφωνίας τελικά ξεκίνησε στις αρχές του 1980 στην Σκανδιναβία. Τα κινητά τηλέφωνα της εποχής, λόγω του όγκου τους, ήταν εγκατεστημένα κυρίως σε αυτοκίνητα και φορτηγά. Από το 1980 που ξεκίνησε η εξέλιξη των κινητών δικτύων 1^{ης} γενιάς (1G) , φτάσαμε σήμερα στην τεχνολογία των έξυπνων συσκευών και στα ασύρματα συστήματα Πέμπτης Γενιάς (5G). Παρ'όλα αυτά, η 1η γενιά δεν αποτέλεσε το ξεκίνημα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Αντίθετα, από πιο πριν είχαν εμφανιστεί αρκετά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών, τα οποία όμως δεν είχαν τα χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων με τον τρόπο που τα εννοούμε σήμερα. Η μεγαλύτερη διαφορά ήταν η κυψελωτή δομή του δικτύου.

Τα κυψελωτά δίκτυα βασίζουν τη λειτουργία τους, στη διαίρεση της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του δικτύου σε μικρότερες περιοχές, οι οποίες ονομάζονται κυψέλες (cells). Η μορφή των κυψελών αυτών εξαρτάται κυρίως από τη μορφολογία του εδάφους. Παρ'όλα αυτά, για καθαρά υπολογιστικούς λόγους έχει υιοθετηθεί η αναπαράσταση μιας κυψέλης με το σχήμα του εξαγώνου. Η κάθε μια κυψέλη εξυπηρετείται από τον δικό της σταθμό βάσης, που αποτελείται από κεραία, δέκτη, πομπό, και έχει τα δικά της κανάλια. Οι κυψέλες έχουν δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κεραίες να απέχουν περίπου ίση απόσταση μεταξύ τους (εξάγωνο).

Τα πλεονεκτήματα των κυψελοειδών συστημάτων αντισταθμίζουν τις ελλείψεις των παλιών παραδοσιακών συστημάτων και καλύπτουν τις απαιτήσεις της αγοράς, σχετικά με τη χωρητικότητα του δικτύου, την καλή διαχείριση συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος, τη συμβατότητα όσον αφορά το υλικό και το λογισμικό, την προσαρμογή στην εμφανιζόμενη πυκνότητα επικοινωνιακής κίνησης, το βαθμό ποιότητας επικοινωνίας, τη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών προστασίας, την ανταπόκριση με αξιοπιστία και ταχύτητα σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, την ευαισθησία στις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και τέλος το συνδρομητικό κόστος.

Σχεδόν κάθε δέκα χρόνια παρατηρείται ότι η κυψελοειδής ασύρματη γενιά αλλάζει, κυρίως όσον αφορά την τεχνολογία μετάδοσης και τις ζώνες συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι εφαρμογές που αναπτύσσονται, απαιτούν κινητικότητα, υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλή καθυστέρηση.

1G	2G	3G	4G	5G
1981	1992	2001	2010	2020(?)
2 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	100 Mbps	10 Gbps
Basic voice service using analog protocols	Designed primarily for voice using the digital standards (GSM/CDMA)	First mobile broadband utilizing IP protocols (WCDMA / CDMA2000)	True mobile broadband on a unified standard (LTE)	'Tactile Internet' with service-aware devices and fiber-like speeds
				

Εικόνα 1.1 Γενιές Δικτύων [πηγή 67]

1.2 Συστήματα προκυτταρικής - 0G

Τα κινητά ραδιοτηλεφωνικά συστήματα ήταν ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα, που προηγήθηκαν της σύγχρονης κυψελοειδούς κινητής τηλεφωνικής τεχνολογίας. Δεδομένου του ότι ήταν οι πρόγονοι της πρώτης γενιάς κυψελοειδών τηλεφώνων,

τα συστήματα αυτά αναφέρονται μερικές φορές αναδρομικά, ως συστήματα προκυτταρικής (ή μερικές φορές μηδενικής παραγωγής), δηλαδή 0G.

Αυτά τα πρώιμα συστήματα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να διακριθούν από τα παλαιότερα κλειστά συστήματα ραδιοτηλεφώνων, δεδομένου ότι ήταν διαθέσιμα ως εμπορική υπηρεσία, που ανήκε στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής και είχαν τους δικούς τους αριθμούς τηλεφώνου, και όχι ως τμήμα κλειστού δικτύου.

1.3 1G

Όπως προαναφέρθηκε, τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έκαναν την εμφάνιση τους την δεκαετία του 1980. Τα 1G δίκτυα ήταν τα πρώτα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, που υλοποιήθηκαν για εμπορική χρήση και στα οποία στηρίχθηκαν όλες οι επόμενες εξελίξεις δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αναλογική τεχνολογία. Στην σημερινή εποχή, παρόλο που η εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες έχει εστιαστεί στα κινητά δίκτυα 4ης και 5ης γενιάς, υπάρχουν ακόμη αρκετά δίκτυα 1ης γενιάς που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία. Ασφαλώς, στις χώρες που διαθέτουν αξιόλογες υποδομές στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα αυτά έχουν εγκαταλειφθεί, καθώς θεωρείται ότι σπαταλούν πολύτιμο φάσμα συχνοτήτων, το οποίο τα σύγχρονα ψηφιακά κινητά δίκτυα επικοινωνιών εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της πρώτης γενιάς (1G) ήταν ότι όλα αυτά τα συστήματα προσέφεραν δυνατότητες μετάδοσης και περιαγωγής, αλλά τα κυψελοειδή δίκτυα δεν ήταν σε θέση να διαλειτουργούν μεταξύ των διαφορετικών χωρών. Επιπλέον, τα συστήματα 1ης γενιάς, λόγω της εφαρμογής των αναλογικών συστημάτων παρουσίαζαν χαμηλή ποιότητα μετάδοσης της φωνής, με πολλά προβλήματα σύνδεσης και χαμηλό επίπεδο ασφάλειας.

Γενικά, όσον αφορά την εφαρμογή, δεν υπήρξε κάποιο πρότυπο που να επικράτησε. Αντιθέτως, υπήρξαν αρκετά πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως, όπως το Nordic Mobile Telephone (NMT), το Total Access Communication System (TACS) στην Ασία και στην Ευρώπη και μεταγενέστερα το Advanced Mobile Phone Service (AMPS) στις ΗΠΑ. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στη πρώτη γενιά

ήταν η διαμόρφωση συχνότητας (FD), η πολυπλεξία συχνότητας (FDMA), η αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση συχνότητας (FDD), καθώς και χρήση ίδιου καναλιού για τη μετάδοση του σήματος.

Συνολικά λοιπόν, η 1^η γενιά μπορούσε απλά να υποστηρίξει 'plain old telephony services' (POTS), δηλαδή φωνή με κάποιες επιπρόσθετες απλές υπηρεσίες. Χρειάστηκε να περάσουν μόλις λίγα χρόνια για να αλλάξουν και πάλι οι ισορροπίες στον τομέα των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών. Αυτό συνέβη με την υλοποίηση του project GSM, ή αλλιώς 'Global System for Mobile Communications' και την μετάβαση στη 2^η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

1.4 2G

Η ανάγκη για ένα νέο σύστημα επόμενης γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας, που θα παρέχει μετάδοση δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, σε σχέση με τα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης προϋπάρχοντα αναλογικά δίκτυα, οδήγησε στην μετάβαση από την 1^η γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας στη 2^η.

Βασική διαφοροποίηση των δύο αυτών γενεών ήταν η αλλαγή από αναλογική σε ψηφιακή μετάδοση της πληροφορίας. Αυτή η αλλαγή διαφοροποίησε προς το καλύτερο τα 2G δίκτυα, σε σχέση με τα προγενέστερα δίκτυα, σε 3 βασικούς άξονες:

- Την ψηφιακή κρυπτογράφηση των τηλεφωνικών συνομιλιών.
- Το αποτελεσματικότερο φάσμα.
- Την εισαγωγή νέων υπηρεσιών στις τηλεφωνικές συσκευές, όπως το Short Message Services ή SMS.

Παρά την εξέλιξη των γενεών των δικτύων, τα δίκτυα 2G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα περισσότερα μέρη του κόσμου έως και σήμερα.

Το πρότυπο ανάπτυξης της 2G γενιάς, που αρχικά ξεκίνησε στην Ευρώπη, αλλά στην συνέχεια υιοθετήθηκε παγκοσμίως, ονομάζεται Global System for Mobile Communications ή GSM. Πρόκειται για ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας, που βασίστηκε στην τεχνική Time-Division Multiple Access (TDMA).

Χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα και την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε ένα αριθμό καναλιών και την διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για την μετάδοση σημάτων.

Το GSM χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 25MHz και τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Όμως υπάρχουν και αρκετά παράγωγα, τα οποία χρησιμοποιούν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz. Ο βασικότερος λόγος ήταν η έλλειψη χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 ή 1900 MHz μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Πέρα από τις βασικές υπηρεσίες που προσφέρει, όπως η συνομιλία, οι επείγουσες κλήσεις, το fax, τα SMS, η αναγνώριση, η φραγή και η αναμονή κλήσεων κ.λ.π. και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν, όπως η πολύ καλή ποιότητα ομιλίας και το χαμηλό κόστος, προσφέρει και την δυνατότητα διαμόρφωσης ταυτότητας των συνδρομητών μέσω της προσωπικής κάρτας SIM.

Εκτός του GSM, υπήρχαν και ορισμένα άλλα πρότυπα ανά τον κόσμο, όπως το PDC στην Ιαπωνία, το iDEN στις ΗΠΑ και τον Καναδά, αλλά και το AMPS, που ξεκίνησε αρχικά στη Αμερική, αλλά σταδιακά αντικαταστάθηκε από το GSM.

Κατά διάρκεια της μετάβασης από την 1η γενιά στην 2^η γενιά όμως, πραγματοποιήθηκε παράλληλα μια ραγδαία αύξηση του ρυθμού της εξέλιξης της ψηφιακής τεχνολογίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την προσπάθεια κάλυψης, των ολοένα και αυξανόμενων αναλογικά αναγκών των συνδρομητών, που τα 2G δίκτυα, τα οποία υλοποιήθηκαν κυρίως για φωνητικές υπηρεσίες και αργή διαβίβαση δεδομένων, δεν ήταν σε θέση πλέον να καλύψουν.

Αυτό οδήγησε στα δίκτυα 2.5G και στο GPRS, όπου ήταν ουσιαστικά αναβάθμιση των δικτύων 2G και αποτέλεσαν "σκαλοπάτι" για τα δίκτυα 3G.

1.4.1 2.5G

Το κυριότερο πρόβλημα που παρατηρήθηκε στις αρχικές μορφές του GSM, ήταν οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης, της τάξεως του 9,6 kbps, με αποτέλεσμα να υπάρχει περιορισμός στις υπηρεσίες που μπορούσαν να προσφερθούν.

Η λύση που προτάθηκε και που βασίστηκαν τα πρότυπα τα οποία εκδόθηκαν, ήταν ανάθεση σε κάθε χρήστη περισσότερων από μίας (που χρησιμοποιούταν μέχρι τότε) χρονοθυρίδας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, καθώς η ταχύτητα πλέον ήταν ίση με το γινόμενο του αριθμού των χρονοθυρίδων επί τον ρυθμό μετάδοσης για μια από αυτές. Το πρότυπο που εφάρμοσε πρώτο αυτή την τεχνική, ονομάζεται HSCSD. Παρ όλα αυτά, έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιεί την λογική της μεταγωγής κυκλώματος, δηλαδή ότι ένα πλήρες κύκλωμα αλλάζει για έναν συγκεκριμένο χρήστη. Αυτό δεν ήταν αποτελεσματικό, καθώς υπήρχε μεγάλη σπατάλη πόρων του δικτύου, αφού οι χρονοθυρίδες δεσμεύονταν ακόμα και όταν η χωρητικότητά τους δεν χρησιμοποιούνταν.

Αυτό το πρόβλημα ήρθε να λύσει μια νέα προσέγγιση, που οδήγησε σε ένα νέο εξελιγμένο πρότυπο στις αρχές της δεκαετίας του 90'. Το πρότυπο General Packet Radio Service (GPRS).

Ουσιαστικά το πρότυπο αυτό, έδωσε την λύση στην ανούσια σπατάλη των χρονοθυρίδων, αντιστρέφοντας την διαδικασία. Δηλαδή, αντί τα κυκλώματα να είναι αφιερωμένα σε έναν συγκεκριμένο χρήστη, δρομολόγησε μεμονωμένα πακέτα δεδομένων από τον πομπό προς τον δέκτη, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του ίδιου κυκλώματος από πολλούς χρήστες. Η προσέγγιση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την αρτιότερη χρήση των κυκλωμάτων και τη μέτρηση των φορτίων σύμφωνα με τα δεδομένα που μεταφέρονται, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης έφτανε ακόμα και τα 115 Kbps. Η εν λόγω τεχνολογία ονομάζεται μεταγωγή πακέτου και αποτέλεσε καθοριστικό βήμα στην εξέλιξη των δικτύων προς το 3G.

Το τελευταίο βήμα εξέλιξης της 2ης γενιάς πριν τη μετάβαση στη 3η, ήταν η τεχνολογία Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE). Ήταν μια εξέλιξη ουσιαστικά του GPRS, που δεν μπορεί να σταθεί αυτόνομα, ενώ δεν χρειάστηκε εγκατάσταση νέου εξοπλισμού από τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας, παρά μόνον βελτίωση και αναβάθμιση του ήδη υπάρχοντος.

Η ειδοποιός διαφορά με τα προηγούμενα πρότυπα βρίσκεται στην διαδικασία κωδικοποίησης των δεδομένων (διαμόρφωση), που ονομάζεται 8PSK (8 Phase Shift Keying modulation). Με αυτή την διαδικασία κάθε σύμβολο (παλμός)

μεταφέρει 3 bit αντί για ένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με τη μέθοδο GMSK (Gaussian pre-filtered Minimum Shift Keying), που παρέχουν τα απλά δίκτυα GSM, η οποία βασίζεται στη μέθοδο Gauss για την εκθετική μείωση των πιθανοτήτων λάθους κατά τη μεταφορά των δεδομένων, να επιτυγχάνονται ταχύτητες μετάδοσης 384Kbps ή ακόμα και 768kbps ασφαλούς πληροφορίας.

Αυτή η ραγδαία αύξηση την ταχύτητας μετάδοσης ασφαλούς πληροφορίας, ήταν η απαρχή μιας νέας σειράς υπηρεσιών (video streaming, πραγματικό Internet browsing κτλ), που προέκυψαν με την μετάβαση στα 3G δίκτυα.

1.5 3G

Η τρίτη γενιά δικτύων ήταν μία πραγματική επανάσταση σε σύγκριση πάντα με τις προηγούμενες. Πέρα από την συνεχή ανάγκη για υψηλότερες ταχύτητες, η 3G γενιά εισήγαγε κάτι ρηξικέλευθο, που δεν είχε προηγούμενο στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Αυτό ήταν η παροχή των κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» και «οποτεδήποτε». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς, μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς, αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Ο χρήστης δηλαδή μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα μεγάλο εύρος ασύρματων δικτύων, όπως τα οικιακά ασύρματα δίκτυα, τα κυβελωτά ή ακόμη και τα δορυφορικά.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας τρίτης γενιάς είναι τόσα πολλά σε σχέση με τους προκατόχους της, που χρειάζονται αρκετές σελίδες κειμένου, ώστε να περιγραφούν αναλυτικά. Ωστόσο, είναι σημαντικό να απαριθμήσουμε τα σημαντικότερα οφέλη της τεχνολογίας 3G:

- Βίντεο-κλήσεις.
- Υψηλές ταχύτητες ασύρματης μεταφοράς δεδομένων.
- Η σύνδεση στο Internet είναι άμεση και απρόσκοπτη.

- Δυνατότητα video-streaming, καθώς το αυξημένο bandwidth επιτρέπει τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο, κινούμενης εικόνας και ήχου υψηλής ανάλυσης.
- Online gaming σε πραγματικό χρόνο και ταυτόχρονα με άλλους παίκτες.
- Αρτιότερη αξιοποίηση υπηρεσιών εύρεσης θέσεως (GPS).

Το 3G δίκτυο, χρησιμοποιείται κατά κόρον σήμερα ανά την υφήλιο. Στα πλαίσια της εξέλιξης των ήδη υπάρχοντων δικτύων 2ης γενιάς, προέκυψε το Wideband-CDMA (W-CDMA) ή αλλιώς Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων που προσφέρει το UMTS (ρυθμοί που ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps), εισήχθη ένας νέος όρος στα ασύρματα δίκτυα, οι υπηρεσίες πολυμέσων. Με τον όρο υπηρεσίες πολυμέσων αναφερόμαστε σε υπηρεσίες, κατά τις οποίες υπάρχει συνδυασμός εικόνας, ήχου και κειμένου σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ψηφιακό περιβάλλον. Ουσιαστικά το UMTS μπορεί να χαρακτηριστεί ως η εξέλιξη των GSM δικτύων. Πέρα από το UMTS, χρησιμοποιήθηκε και το CDMA2000 κυρίως στη Β.Αμερική και το NTT Docomo στην Ιαπωνία.

Η προτυποποίηση του WCDMA συνεχίστηκε παράλληλα σε διάφορα standards groups μέχρι το τέλος του 1998, όταν το Third Generation Partnership Project(3GPP) σχηματίστηκε ως κοινοπραξία επιχειρήσεων και οργανισμών από όλο τον κόσμο.

Παρά τις καινοτομίες που έφερε η 3G γενιά, οι προσδοκίες ήταν αρκετά υψηλότερες, με αποτέλεσμα να μην ικανοποιήσει τους χρήστες στο βαθμό που θα περίμεναν. Αυτό συνέβη, διότι η λειτουργία του ήταν βασισμένη σε τεχνολογίες 2G γενιάς, όπως η μεταγωγή κυκλώματος αντί για μεταγωγή πακέτου. Επιπλέον, οι ταχύτητες μετάδοσης της 3ης γενιάς ήταν χαμηλότερες από αυτές που είχαν προβλεφθεί. Επίσης, τροχοπέδη αποτέλεσε και η ύπαρξη αρκετών προτύπων ανά τον κόσμο αντί να υπάρχει ένα παγκόσμιο.

Αναμφίβολα, το πιο γενναίο βήμα προς τις επικοινωνίες, όπως τις γνωρίζουμε σήμερα, πραγματοποιήθηκε με την εξέλιξη της 3G γενιάς σε 3.5G γενιά ή 3G+.

1.5.1 3.5G ή 3G+

Οι υπηρεσίες των ασύρματων δικτύων 3ης γενιάς, απαιτούν διαφορετικό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, ως προς το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, την καθυστέρηση, το ρυθμό σφαλμάτων, την χωρητικότητα και την κάλυψη. Για τον λόγο αυτό, το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ανέπτυξε την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA), μια εξέλιξη του UMTS βασισμένη στην τεχνολογία W-CDMA.

Η HSPA αποτελεί μία νέα τεχνολογία, η οποία σχεδιάστηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα καταρχάς του downlink (HSDPA) και σε δεύτερη φάση του uplink (HSUPA) για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Το HSDPA υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 14 Mbps ανά χρήστη, ενώ το HSUPA δίνει τη δυνατότητα υποστήριξης μέχρι και 5.8 Mbps. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA μπορούν υλοποιηθούν στο ίδιο εύρος ζώνης με το UMTS, γεγονός που επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία τόσο του HSPA όσο και του κλασσικού UMTS.

Το πλεονέκτημα του HSDPA είναι ότι δεν χρησιμοποιεί ξεχωριστά κανάλια για την αποστολή των πακέτων, αλλά ένα κανάλι (Downlink Shared Channel ή DSCH), το οποίο είναι διαμοιραζόμενο και μέσω αυτού γίνεται η μεταφορά των πακέτων των χρηστών. Στην ουσία λοιπόν, η τεχνολογία αυτή έρχεται να επέμβει στην μετάδοση των πακέτων από το σταθμό βάσης προς το χρήστη, με αποτέλεσμα έναν ρυθμό μετάδοσης πέντε φορές μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο του UMTS και δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο από εκείνον του GPRS. Μετεξέλιξη του είναι το HSDPA+, που επιτυγχάνει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στην κάτω ζεύξη μέχρι 42 Mbps, αξιοποιώντας την τεχνολογία κεραιών MIMO.

Από την άλλη το HSUPA χρησιμοποιεί το κανάλι E-DCH (Enhanced - Dedicated Channel), το οποίο αξιοποιεί τεχνικές προσαρμογής της ζεύξης, παρόμοιες αυτές του πρωτοκόλλου downlink HSDPA, όπως τα μικρότερα διαστήματα μεταξύ μεταδόσεων, η ταχεία υβριδική επανεκπομπή πακέτων και ο ταχύς προγραμματισμός.

Είναι γεγονός βέβαια, ότι η τεχνική HSPA δεν είναι κατάλληλη για όλα τα είδη υπηρεσιών. Αντίθετα, η χρήση του HSPA ενδείκνυται προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου σε σημεία με υψηλή κίνηση δεδομένων.

Η φυσική εξέλιξη των πραγμάτων, σε συνδυασμό με την ολοένα και αυξανόμενη κατανάλωση των χρηστών σε χρήσεις πολυμέσων, έδωσαν κίνητρο στην 3rd Generation Partnership Project (3GPP) να εργαστεί για κάτι καινούριο και ρηξικέλευθο, όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα. Αυτό ήταν η παροχή της δυνατότητας σε κινητούς χρήστες να απολαμβάνουν υπηρεσίες, που μέχρι τώρα παρέχονταν μόνο σε χρήστες με ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Έτσι οδηγηθήκαμε στο πρότυπο LTE, που σηματοδοτεί την μετάβαση από την 3G γενιά στην 4G.

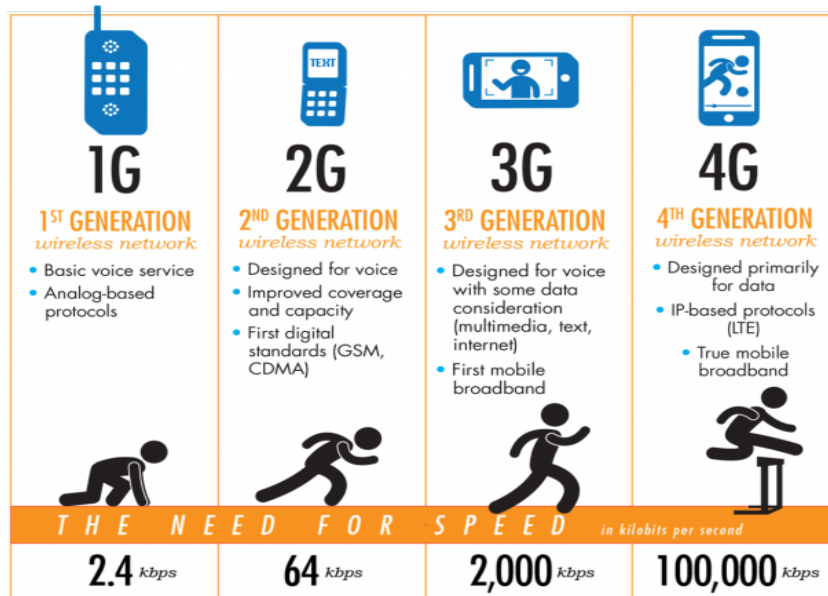
1.6 4G

Με την εξέλιξη της επιστήμης και τις απαιτήσεις των χρηστών, μεταβαίνουμε σε μία καινούργια τεχνολογία τέταρτης γενιάς (4G). Ο σχεδιασμός της νέας τεχνολογίας, που βασίστηκε σε ένα δίκτυο εναλλαγής πακέτων IP, ξεκίνησε το 2000 και υλοποιήθηκε το 2010.

Τα δίκτυα 4G, καλύπτουν ταχύτητες 100 Mbit/s σε περιπτώσεις μεγάλης κινητικότητας και σε περιπτώσεις χαμηλής κινητικότητας ή ακινησίας μέχρι 1 Gbit/s. Η διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), εφάρμοσε κάποιες βασικές προδιαγραφές θέτοντας δύο πρότυπα όπως το mobile WiMax και το Long term evolution (LTE).

Το WiMax (IEEE 802.16), είναι ουσιαστικά το πρώτο μεγάλο πρότυπο για σταθερή πρόσβαση που αναπτύχθηκε από το IEEE το 2004. Με την χρήση του WiMax, επιτυγχάνεται μεταφορά δεδομένων Voice over IP (VoIP), υλοποιείται ευκολότερα η συνδεσιμότητα του διαδικτύου, προσφέρεται ασύρματη επικοινωνία με σκοπό την αποφυγή χρήσης καλωδίων και παρέχεται φορητή ευρυζωνική σύνδεση σε κινητή τηλεφωνία, σε οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκεται ο χρήστης. Μετά από ένα έτος αναπτύχθηκε το mobile Wi Max (IEEE 802.16 e) και έτσι βοηθήθηκε περαιτέρω η ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Με τη χρήση του

μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες ταχύτητες downlink 128 Mbit/s και uplink 56 Mbit/s σε εύρος καναλιού 20 MHz.



Εικόνα 1.2 Η ανάγκη για βελτίωση ταχύτητας [πηγή 66]

1.6.1 LTE

Από την άλλη πλευρά έχουμε το Long-Term Evolution (LTE), με την δημιουργία του να γίνεται πραγματικότητα το 2005. Το πρότυπο αυτό, ουσιαστικά αυξάνει την ταχύτητα και τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων δεδομένων, χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος(DSP) με δυνατότητα downlink 300 Mbit /s και uplink 75 Mbit/s.

Το LTE όπως αναφέρθηκε και παραπάνω βασίζεται στις IP. Για να μπορέσουν οι ερευνητές να επιτύχουν την αναβάθμιση, έπρεπε η αρχιτεκτονική του δικτύου να απλουστευτεί και να αναδιαμορφωθεί. Επιπροσθέτως η συγκεκριμένη τεχνολογία υποστηρίζει Frequency Division Duplexing(FDD) και Time Division Duplexing(TDD) βοηθώντας έτσι τους φορείς να θεμελιώσουν την κλιμάκωση στην ευρυζωνικότητα (1.4 MHz έως 20 MHz).

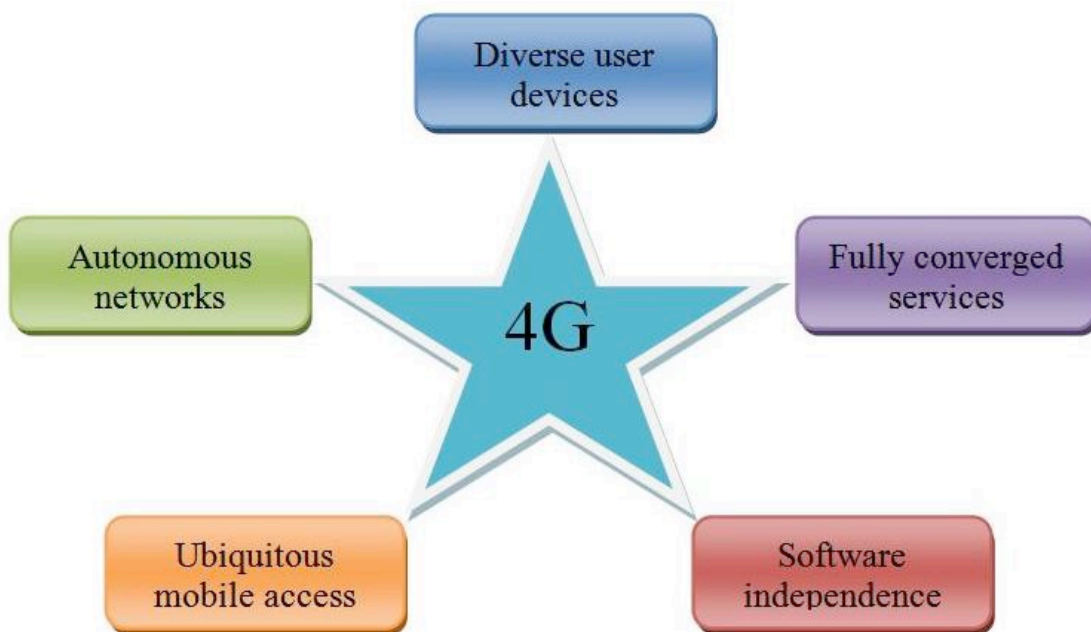
Παρακάτω θα αναφερθούν – αναλυθούν, κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία εξηγούν τους λόγους μετάβασης από τα δίκτυα 3G.

Χαρακτηριστικά 4G

- **Υψηλή απόδοση:** Με την υλοποίηση των δικτύων αυτών, μπορούμε να επιτύχουμε 50 φορές καλύτερες ασύρματες λήψεις στον τομέα της ταχύτητας σε σύγκριση με τα δίκτυα 3G.
- **Διαλειτουργικότητα και εύκολη περιαγωγή:** Με το 4G εφαρμόζεται ένα πρότυπο σε όλο τον κόσμο, με αποτέλεσμα να προσφέρεται μία συνολική κινητικότητα για ευκολότερη περιαγωγή και διαλειτουργικότητα σε διάφορα δίκτυα. Επεξηγώντας, για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα στις συνθήκες κάλυψης, το ποσοστό απωλειών, τον λανθάνοντα χρόνο και τον ρυθμό δεδομένων, τα δίκτυα 4G περιέχουν πολλά είδη τερματικών για παροχή υπηρεσιών είτε έχουν αυτή την ικανότητα, είτε όχι.
- **Πλήρως Συγκλίνουσες υπηρεσίες:** Το 4G δίνει ποικιλία προσβάσεων στο χρήστη, μέσω κινητών τηλεφώνων και φορητών υπολογιστών, προσφέροντας μία ευέλικτη και έξυπνη συνδεσιμότητα για την υποστήριξη τηλεφωνίας νοір, την περιήγηση στο διαδίκτυο, τις υπηρεσίες GPS κλπ.
- **Χαμηλό κόστος:** Με την εξέλιξη των δικτύων, οι πάροχοι μπόρεσαν να εφαρμόσουν τα δίκτυα επόμενης γενιάς, πάνω στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα της προηγούμενης γενιάς. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης, αλλά ταυτόχρονα και την αποφυγή της αγοράς επιπρόσθετου φάσματος αλλά και την αποφυγή επιπλέον τροποποιήσεων από τους εξειδικευμένους τεχνικούς, στον τομέα της εφαρμογής των νέων τεχνολογιών.
- **Φιλικές για τον χρήστη συσκευές:** Τα δίκτυα 4G χρησιμοποιούν αυτοματισμούς επικοινωνώντας με το περιβάλλον . Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μία πιο διαδραστική και οπτική εμπειρία.
- **Αναβαθμισμένο GPS:** Αυτή η τεχνολογία, δημιουργεί την ψηφιακή παρουσία του χρήστη σε πολλές τοποθεσίες .
- **Επεκτασιμότητα:** Τα δίκτυα 4G μπορούν να επεκταθούν πολύ εύκολα, επειδή χρησιμοποιούν IP στον πυρήνα του 4G. Αυτό διευκολύνει τον

συνεχή έλεγχο και συντονισμό των υπηρεσιών και των χρηστών καθώς κλιμακώνονται με την πάροδο του χρόνου.

- **Διαχείριση εφαρμογών σε περίπτωση κρίσης:** Οι φυσικές καταστροφές είναι ο μεγαλύτερος φόβος των εταιρειών, όσον αφορά τις εγκαταστάσεις τους. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, πραγματοποιείται μεταφορά δεδομένων με ασύρματες επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας ευρείας ζώνης, με σκοπό την μείωση του χρόνου επισκευής από μερικές εβδομάδες σε λίγες ώρες.



Εικόνα 1.3 Χαρακτηριστικά 4G [πηγή 19]

Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα 4G ανάλογα την λειτουργία εκτέλεσης τους, χωρίζονται σε τρία επίπεδα. Το επίπεδο πρόσβασης, το επίπεδο παρόχου και το επίπεδο ελέγχου υπηρεσίας.

Ακόμη, για να γίνει αρτιότερη η αξιοποίηση και κατ' επέκτασιν η χρήση της εν λόγω νέας γενιάς επικοινωνιών, δημιουργήθηκαν ανάγκες για την ύπαρξη και την αξιοποίηση νέων καινοτόμων τεχνολογιών. Παρακάτω θα αναλυθούν κάποιες από αυτές

Τεχνολογίες για το 4G

- **Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας(OFDM):** Το OFDM, είναι ένας τύπος ψηφιακής μετάδοσης αλλά και μία τεχνική για κωδικοποίηση ψηφιακών δεδομένων σε συχνότητες του φορέα. Επεξηγηματικά, το κανάλι χωρίζεται σε έναν αριθμό ορθογώνιων υποκαναλιών. Ακολούθως το σήμα των δεδομένων υψηλής ταχύτητας τροποποιείται σε παράλληλες ροές υποδεδομένων χαμηλής ταχύτητας ενώ τέλος, όλη αυτή η τροποποίηση μεταφέρεται σε κάθε υποκανάλι.
- **Ραδιο-σήμα καθορισμένο από λογισμικό(SDR):** Ο όρος SDR αναφέρεται στο ότι το ψηφιακό σήμα, μπορεί να καθοριστεί ή να τροποποιηθεί από το λογισμικό. Έτσι, γίνεται έλεγχος από μία κοινή πλατφόρμα υλικού (Hardware) και όποτε απαιτείται επέμβαση (τροποποίηση, φιλτράρισμα, επιλογή συχνότητας) σε οποιαδήποτε τοποθεσία, παρέχεται η δυνατότητα άμεσου ελέγχου.
- **Έξυπνες κεραιές:** Οι έξυπνες κεραιές, αποτελούνται από κεραιές πολλαπλών σημάτων καθώς και ευπροσάρμοστες ακτίνες σημάτων. Αρχικά η κεραιά χρησιμοποιεί μεγάλη ποσότητα σταθερών σημάτων σε ένα τομέα και στη συνέχεια λαμβάνει μεγάλη ποσότητα σημάτων που ελέγχονται και συγχέονται έτσι ώστε να παραχθεί το μέγιστο σήμα. Δηλαδή, γίνεται σύγκριση του επιπέδου του επιθυμητού σήματος, με το επίπεδο του θορύβου περιβάλλοντος.

- **Multiple input and Multiple output (MIMO):**

Το MIMO, είναι μία μέθοδος πολλαπλασιασμού της χωρητικότητας μιας σύνδεσης, χρησιμοποιώντας πολλαπλές αποστολές και λήψεις σε κεραιές, με σκοπό την επίτευξη πολλαπλών διαδρομών για τη βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας.

1.6.2 LTE Advanced (4G+)

Με τη πάροδο των χρόνων και καθώς πλησιάζουμε στην σημερινή εποχή δημιουργήθηκαν υψηλότερες απαιτήσεις. Συνεπώς, υπήρξε η ανάγκη για μία

καλύτερη και βελτιωμένη τεχνολογία. Έτσι, γεννήθηκε το LTE Advanced ή 4G+ που είναι μια εξέλιξη του 4G. Επιτυγχάνει μεγαλύτερη κάλυψη και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης πάνω από 1 Gb/s. Το LTE Advanced δημοσιεύτηκε από την ITU – R το 2008 και πήρε έγκριση ότι τηρεί τις IMT- ADVANCED προϋποθέσεις το 2009, με την εφαρμογή του να γίνεται πραγματικότητα το 2011

Παρακάτω παρατίθενται τα πλεονεκτήματα που προσέφερε αυτή η εξέλιξη:

- Πραγματοποιεί τροποποίηση ετερογενών δικτύων με ανάμιξη macrocells, με χαμηλή κατανάλωση κόμβων picocells, femtocells, relay κόμβων

Cell type	Typical Cell Size	Data Rate Limitation
Macro	1-30 km	Propagation
Micro	500 m-2 km	Capacity and propagation
Pico	4-200 m	Capacity and propagation
Femto	10 m	Broadband connection and Handset

Εικόνα 1.4 Σύγκριση Small Cells [πηγή 21]

- Προσφέρει μεγάλη βελτίωση απόδοσης.
- Διαθέτει αυξημένη χωρητικότητα και κάλυψη
- Το δίκτυο είναι φιλικό προς τον χρήστη
- Προσφέρει υποστήριξη multicarrier για χρήση μεγάλου εύρους ζώνης (έως 100MHz φάσματος)

Συνοπτικά, το 4G και η εξέλιξη του το 4G+, ανοίξανε νέες προοπτικές στον τομέα της επικοινωνίας αλλά και εν γένει της τεχνολογίας καθώς αποτελέσανε προπομποί για όλες τις συναρπαστικές υπηρεσίες που ανατέλλουν δειλά δειλά με το 5G, όπως η εξύπνη πόλη, το IoT, το έξυπνο σπίτι κ.ο.κ. Δημιούργησαν δηλαδή το πρόσφορο έδαφος, για όλες τις θαυμαστές νέες τεχνολογίες που θα απασχολήσουν τον

πλανήτη τα επόμενα χρόνια και που θα φέρουν επανάσταση στην καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου.

Κεφάλαιο 2 5G

2.1 Εισαγωγή

Αναμφίβολα, βρισκόμαστε στην γενιά της τεχνολογίας και της ανάπτυξης. Η δημιουργία μια κοινωνίας συνδεδεμένης στο διαδίκτυο με συνεχή πρόσβαση στην πληροφορία και στο διαμοιρασμό της μας οδηγεί σε νέες τεχνολογίες. Ως απότοκο μερικοί από τους στόχους που θα πρέπει να επιτευχθούν είναι η αύξηση της χωρητικότητας, ο βελτιωμένος ρυθμός δεδομένων και η καλύτερη ποιότητα στην παροχή υπηρεσιών, οι πολύ υψηλές ταχύτητες και νέες δυνατότητες για τους ιδιώτες αλλά και για τις επιχειρήσεις.

Τα ασύρματα συστήματα 5ης γενιάς, με συντομογραφία 5G, είναι μια ιδιαίτερως βελτιωμένη τεχνολογία ασύρματων δικτύων σε σχέση με τους προκατόχους του που βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης φέρνοντας μια νέα εποχή στον κόσμο του διαδικτύου. Είναι η εξέλιξη των σημερινών δικτύων 4G και σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει τη μεταφορά ακόμη πιο μεγάλων ποσοτήτων data, αλλά κυρίως τη διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών, μέσω του Internet of Things (IoT).

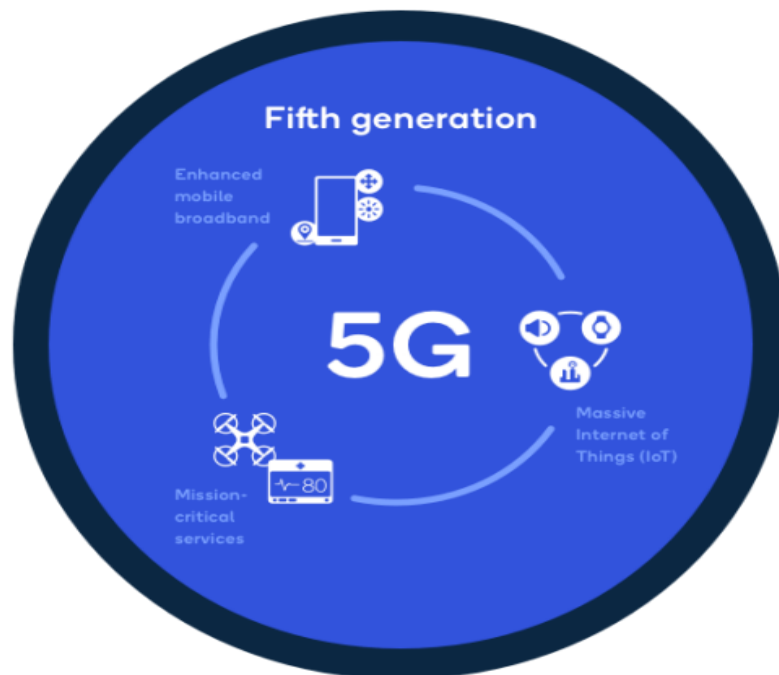
Το δίκτυο 5G χρησιμοποιεί κεραιές τεχνολογίας MIMO (multiple input, multiple output), που έχουν τη δυνατότητα να στέλνουν και να λαμβάνουν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων ταυτόχρονα σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Ουσιαστικά είναι μια τεχνολογία που χιλιάδες κεραιές στον σταθμό βάσης (M), εξυπηρετούν εκατοντάδες χρήστες (K) με τον ίδιο πόρο συχνότητας.

Στόχος λοιπόν του 5G, είναι η γρήγορη, αποδοτική και οικονομική συνδεσιμότητα δεδομένων με το ελάχιστο δυνατό κόστος εγκατάστασης και την επίτευξη της μέγιστης ενεργειακής αποδοτικότητας. Για παράδειγμα, η χρησιμοποίηση του massive MIMO στα ασύρματα δίκτυα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έχει την δυνατότητα να επιτύχει σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα δίκτυα 5G πλεονεκτούν ως προς την ταχύτητα άλλα μειονεκτούν ως προς την πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα αυτή βέβαια έχει ως αποτέλεσμα, να αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός μικρών κυψελών με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της

κάλυψης τόσο σε επίπεδο οικίας, όσο και στον τομέα των επιχειρήσεων. Αυτό σε συνδυασμό με το πρόσθετο φάσμα που μπορεί να προκύψει μέσω της προσέγγισης των ετερογενών δικτύων που βασίζεται στην λογική της αύξησης του φάσματος, μέσω της μείωσης του μεγέθους των κελιών και της ταυτόχρονης αύξησης τους αριθμητικά, αλλά και τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης μέσω της χρησιμοποίησης προηγμένων δεκτών, κεραιών , και πολυκυτταρικής μετάδοσης, μπορεί να παρέχει έως και 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ότι σήμερα.

Ένα σημείο που πρέπει να διευκρινιστεί φυσικά, είναι ότι το 5G θα απαιτήσει μεν περισσότερα συστήματα κεραιών αλλά επειδή το δίκτυο θα είναι πιο πυκνό, η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα είναι και σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τα επίπεδα που συναντάμε στα υπάρχοντα δίκτυα 4G/3G/2G. Επιπλέον όσο πυκνότερο είναι ένα δίκτυο κινητής τόσο μικρότερη είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που απαιτείται για να συνδεθεί μία συσκευή με το δίκτυο.

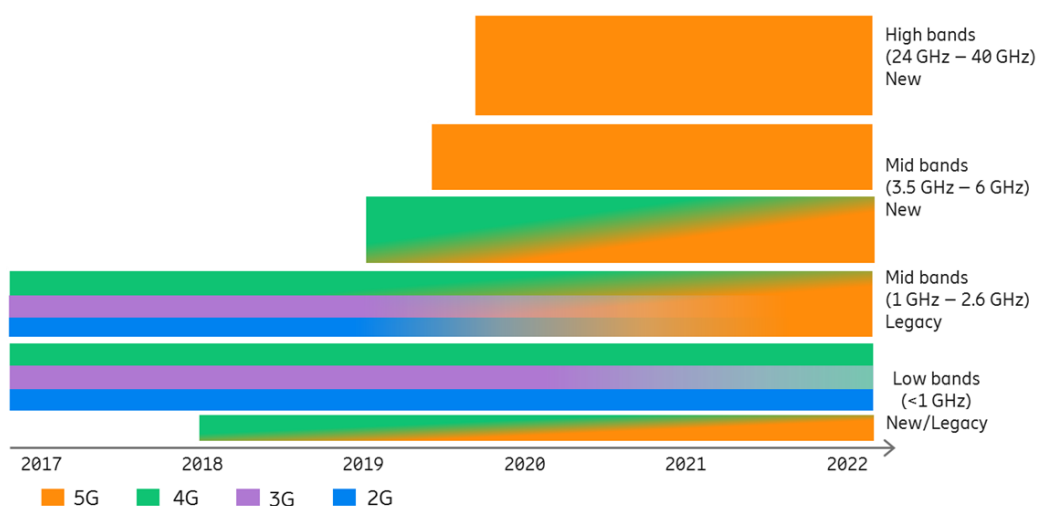


Εικόνα 2.1 Στόχος 5G [πηγή 62]

2.2 Χαρακτηριστικά

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν δεδομένα, από κινητά τηλέφωνα μέχρι ψυγεία και αυτοκίνητα. Η ταχύτητα μειώνεται κατακόρυφα όταν πολλά άτομα βρίσκονται σε έναν χώρο και χρησιμοποιούν τα δεδομένα του κινητού τους. Λόγω αυτής της ραγδαίας αύξησης κρίθηκε απαραίτητη η χρήση νέων συχνοτήτων που δεν χρησιμοποιούνται πολύ, ώστε να υποστηρίζονται περισσότερες συσκευές και να μπορεί να υλοποιηθεί ο στόχος του διαδικτύου των πραγμάτων.

Το σημείο που το 5G κάνει την διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες από αυτό τεχνολογίες είναι ότι λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες φάσματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 2.2 Ζώνες φάσματος 5G [πηγή 61]

2.2.1 Χαμηλή ζώνη φάσματος (<1GHz)

Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του φάσματος λειτουργίας είναι ότι επιτρέπει κάλυψη πολύ μεγάλης περιοχής με μεγάλη αξιοπιστία. Το μειονέκτημα του, είναι ότι η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων που μπορεί να μεταφέρει δεν θα ξεπεράσει τα 100Mbps. Δηλαδή, η χαμηλότερη ταχύτητα που θα μπορεί να δώσει το 5G, είναι ίση με την μεγαλύτερη σχεδόν ταχύτητα που έχουμε αυτή την στιγμή στην χώρα μας.

Έτσι με αυτή την ζώνη φάσματος θα πραγματοποιηθεί ευρεία κάλυψη της υπαίθρου. Η λειτουργία σε αυτό το φάσμα (κάτω από 1GHz) θα επιτρέψει λοιπόν την χρήση του 5G με όλα τα πλεονεκτήματα που διαθέτει από χιλιάδες ανθρώπους στην επαρχία σε απομακρυσμένες περιοχές, με μια και μόνο κεραία.

Συμπερασματικά, το χειρότερο σενάριο για το χαμηλό φάσμα λειτουργίας, θα είναι λίγο καλύτερο από άποψη ταχύτητας από ότι καλύτερο μπορεί να προσφέρει το 4G, με την εγγύηση της ευρείας κάλυψης αλλά και την ικανότητα λόγω της χαμηλής συχνότητας (600MHz-700MHz) να διαπερνά παράθυρα, τοίχους και κάθε λογής αντικείμενο.

Οριοθετείται λοιπόν ως σημείο εκκίνησης, όπου από αυτό το σημείο και έπειτα τα πράγματα γίνονται πολύ καλύτερα.

2.2.2 Μεσαία ζώνη φάσματος (<6GHz)

Το μεσαίο εύρος ζώνης παρέχει γρηγορότερες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση από τη χαμηλή ζώνη. Εντούτοις, αποτυγχάνει να διεισδύσει στα κτίρια τόσο αποτελεσματικά όσο ένα φάσμα χαμηλής ζώνης. Αναμένονται μέγιστες ταχύτητες έως 1Gbps στο φάσμα των μέσων ζωνών.

Η μεσαία ζώνη ονομάζεται και “sub-6GHz”, επειδή περιλαμβάνει ραδιοσυχνότητες που κυμαίνονται από 1GHz έως 6GHz, και μοιράζονται τα χαρακτηριστικά όσον αφορά την απόδοση και την απόσταση. Όσον αφορά τις κεραίες που έχουν κατασκευαστεί για συστήματα εκπομπής μεσαίας ζώνης, μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων. Αναμφίβολα μικρότερη ακτίνα βέβαια από την χαμηλή ζώνη αλλά με αρκετά καλύτερη ταχύτητα.

Συνεπώς, η μεσαία ζώνη φάσματος θα χρησιμοποιείται κυρίως σε αστικές περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη για μεγάλη ταχύτητα υπηρεσιών ενώ όσον αφορά την κάλυψη δεν θα υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς λόγω της δομής των σύγχρονων πόλεων, ο κάθε συνδρομητής θα βρίσκεται κοντά σε μια κεραία.

2.2.3 Υψηλή ζώνη φάσματος (24GHz-40GHz)

Είναι αυτό που οι περισσότεροι άνθρωποι σκέφτονται όταν σκέφτονται 5G. Συχνά αναφέρεται ως mmWave. Το φάσμα υψηλών συχνοτήτων μπορεί να προσφέρει μέγιστες ταχύτητες μέχρι 10Gbps και έχει πολύ χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση. Το κύριο μειονέκτημα της υψηλής ζώνης είναι ότι έχει χαμηλή περιοχή κάλυψης, αλλά και μεγάλες δυσκολίες όσον αφορά τη δυνατότητα να διαπερνά παράθυρα και τοίχους, κάτι που καλύπτεται με πυκνότερες μικρές κυψέλες, παρέχοντας εξαιρετικές ταχύτητες με χαμηλή καθυστέρηση.

Το παραπάνω μπορεί να υλοποιηθεί από κεραιές σε κοντινές αποστάσεις που θα αναπτυχθούν σε "πυκνά αστικά" περιβάλλοντα και δημόσια κέντρα συγκέντρωσης που συχνά εξυπηρετούν τεράστιο αριθμό ανθρώπων. Τέτοιοι χώροι είναι τα γήπεδα, είτε χρησιμοποιούνται για συναυλίες είτε για ένα αθλητικό γεγονός είτε διάφορα συνεδριακά κέντρα και τα συναφή.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν την υψηλή ζώνη, θα εξυπηρετηθούν σημαντικά hotspots σε όλη την Ελλάδα που με τις υπάρχουσες τεχνολογίες είναι πολύ δύσκολο να καλυφθούν οι ανάγκες τους.

Όλη η παραπάνω πληροφορία, που αφορά τις ζώνες λειτουργίας, τα μειονεκτήματα, τα πλεονεκτήματα τα χαρακτηριστικά τους και τις περιοχές αξιοποίησης τους δίνεται από την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.3 3D αναπαράσταση ζωνών φάσματος [πηγή 58]

Συγκεκριμένα οι ζώνες συχνότητας, παρουσιάζονται ως επίπεδα μιας 'τούρτας' όπου η διάμετρος του κάθε επιπέδου μας δείχνει την κάλυψη κάθε ζώνης όσον αφορά την απόσταση ενώ το ύψος μας δείχνει την ταχύτητα και την ποιότητα υπηρεσίας.

2.3 Δυνατότητες

Ενώ στο παρελθόν οι κοινωνίες θεωρούσαν τη συνδεσιμότητα ως κάτι που είναι βοηθητικό, σήμερα είναι απαραίτητη για τα πάντα, με πρωταγωνιστικό ρόλο στον τρόπο που οι άνθρωποι και οι επιχειρήσεις επικοινωνούν, αλληλοεπιδρούν και εργάζονται. Σε συνδυασμό με την οπτική ίνα και τις υπόλοιπες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες, το 5G θα αποτελέσει τον ακρογωνιαίο λίθο των υποδομών της ψηφιακής εποχής.

Ενώ το 4G μας έφερε μεγαλύτερες ταχύτητες και αξιοπιστία δικτύου, το 5G έρχεται να προσφέρει νέες πολλαπλές δυνατότητες, με τη δημιουργία Gigabit δικτύων, επεκτείνοντας τη δύναμη του Internet of Things και υποστηρίζοντας τη σύνδεση εκατομμυρίων "έξυπνων" συσκευών στο διαδίκτυο. Η παρουσία του 5G εκτείνεται πέρα από την απλή χρήση κινητών συσκευών σε μια άλλη κλίμακα και επηρεάζει καθοριστικά όλους τους σημαντικούς τομείς της κοινωνίας μας, αλλά και

τον τρόπο λειτουργίας των επιχειρήσεων, αφού όλοι οι επιχειρηματίες θα έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν μακροπρόθεσμα υπηρεσίες χαμηλού κόστους, σε πολυάριθμες συσκευές, συλλέγοντας δεδομένα και ανιχνεύοντας τις τάσεις, που θα τους βοηθήσουν να προσαρμόζονται.

Συγκεκριμένα, οι τομείς που θα υποστούν ριζικές αλλαγές και εν γένει βελτιώσεις όσον αφορά τη λειτουργία τους, είναι οι εξής:

- **Εμπειρία χρήσης:** Είναι αυτό που θα ζήσει το μεγαλύτερο κομμάτι των χρηστών, καθώς οι πολύ μεγάλες ταχύτητες θα αλλάξουν τον τρόπο χρήσης του διαδικτύου. Η ταχύτητα θα παραμένει υψηλή όταν συνδέονται πολλοί χρήστες την ίδια στιγμή σε μια κυψέλη, ενώ το κατέβασμα ταινιών και σειρών, το gaming και το live streaming θα είναι σχεδόν ακαριαία.
- **Οχήματα:** Βασική παράμετρος της λειτουργίας των αυτόνομων οχημάτων, είναι η δυνατότητα να μπορούν να στέλνουν και να δέχονται εντολές και να επεξεργάζονται δεδομένα σε μηδενικό χρόνο. Από τη στιγμή που κινούνται ανάμεσα σε ανθρώπους και άλλα οχήματα, θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα της άμεσης επικοινωνίας με όλα τα συστήματα, κάτι που δεν μπορεί να γίνει μαζικά με τα σημερινά συστήματα. Αυτό μπορεί να γίνει υλοποιήσιμο με την εφαρμογή του 5G.
- **Έξυπνες πόλεις:** Η νέα πραγματικότητα όσον αφορά τα αστικά περιβάλλοντα φαντάζει βγαλμένη από ταινίες επιστημονικής φαντασίας. Αυτό που θα μας επιτρέψει να κάνουμε το 5G, είναι ο έλεγχος μιας σειράς αισθητήρων, συνδεδεμένων με ένα κεντρικό σημείο ελέγχου, οι οποίοι θα μετράνε ότι μπορεί να φανταστεί κανείς, από το ακριβές φως της ημέρας για να ανάψουν μόνες τους οι λάμπες στους δρόμους, τα φανάρια που θα αλληλοεπιδρούν με τα έξυπνα οχήματα, μέχρι το πόσα αυτοκίνητα είναι παρκαρισμένα σε κάθε σημείο για να οργανώνουν τα δημόσια parking.
- **Δημόσια ασφάλεια και προστασία του πολίτη:** Ο συγκεκριμένος τομέας αποτελεί προέκταση των έξυπνων πόλεων αλλά αξίζει να αναφερθεί ξεχωριστά καθώς δεν αφορά αποκλειστικά τα αστικά περιβάλλοντα. Αισθητήρες σε γέφυρες, δάση, ποτάμια, υπονόμους και

δρόμους, θα μπορούν να στέλνουν κάθε λεπτό πληροφορίες για την κατάσταση τις συνθήκες και τα προβλήματα σε κάθε υποδομή, σαν να υπάρχουν σε κάθε σημείο μηχανικοί οι οποίοι εξετάζουν το κάθε κτίριο και υποδομή και στέλνουν αναφορές.

- **Έξυπνα σπίτια:** Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, θα φέρουν την επανάσταση όσον αφορά την διαβίωση σε ένα έξυπνο σπίτι, σε τρεις βασικούς άξονες. Στην ασφάλεια, την άνεση και την ψυχαγωγία. Έλεγχος συσκευών εξ αποστάσεως, συστήματα ασφαλείας που θα μεταδίδουν τα πάντα στο κινητό μας στο γραφείο, έξυπνες συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους, όλα αυτά θα μπορούν να γίνουν πραγματικότητα με τις ταχύτητες και το εύρος που προσφέρει το 5G. Σε συνδυασμό με την αυξημένη ευρυζωνικότητα, το έξυπνο σπίτι μπορεί να γίνει άνετα ένα κέντρο πολυμέσων, και ψυχαγωγίας χωρίς καμία καθυστέρηση στην μετάδοση και λήψη πληροφοριών και περιεχομένου διασκέδασης
- **Βιομηχανία και άλλοι εργασιακοί κλάδοι:** Η βιομηχανία θα είναι ένας από τους κλάδους που θα ωφεληθεί πάρα πολύ από το 5G, καθώς η διεύρυνση του “καναλιού επικοινωνίας” με τα μηχανήματα της επιτρέπει τον εξ αποστάσεως έλεγχο και χειρισμό τους. Ο έλεγχος ενός μηχανήματος ή η ρύθμιση του, δε θα απαιτεί από ένα τεχνικό να ταξιδέψει σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου για να το κάνει, καθώς θα μπορεί να το κάνει από το γραφείο του. Αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί κορωνίδα σε κάθε επίδειξη συστήματος 5G μέχρι τώρα καθώς η παραγωγή προϊόντων αναμένεται να πολλαπλασιάσει τα οφέλη της. Αντίστοιχα οφέλη θα υπάρχουν στην κτηνοτροφία αλλά και στην γεωργία καθώς όπως θα συμβαίνει και σε μια βιομηχανική ζώνη οι αγρότες και οι κτηνοτρόφοι θα μπορούν να παρακολουθούν τα πάντα σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και να έχουν ζωντανή σύνδεση με κάθε πιθανό σημείο της παραγωγής τους, μετρώντας τα πάντα, από την θερμοκρασία, την υγρασία, την χημική σύσταση του εδάφους, τις ποσότητες νερού, τροφής και τις καιρικές συνθήκες.

- **Ιατρική:** Τέλος, ένας άλλος τομέας που θα αλλάξει ριζικά προς το καλύτερο στον τομέα της παροχής υπηρεσιών είναι η Ιατρική. Με τη χρήση του 5G θα είναι δυνατόν να γίνονται επεμβάσεις από απόσταση, κάτι που θα σώσει ζωές σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε επείγοντα περιστατικά. Οι κάτοικοι απομακρυσμένων περιοχών θα έχουν πρόσβαση στις υπηρεσίες όλων σχεδόν των ιατρικών κλάδων, κάτι που σήμερα φαντάζει ουτοπία, ενώ σε έκτακτες περιπτώσεις ή δύσκολα περιστατικά, η πρόσβαση στις γνώσεις ειδικών γιατρών θα είναι πολύ πιο εύκολη. Με το 5G ούτε ο γιατρός ούτε ο ασθενής θα χρειάζεται να φοβάται για προβλήματα σύνδεσης, τα οποία σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσαν να είναι μοιραία.

Σίγουρα, οι αλλαγές που προμηνύονται στην καθημερινότητα μας, είναι κολοσσιαίες και παρουσιάζουν τρομερό ενδιαφέρον. Παρ' όλα τα θετικά όμως, υπάρχουν και αρκετά προβλήματα αλλά και διάφοροι κίνδυνοι που προκύπτουν από αυτή την τεχνολογική επανάσταση που αποτελεί την νέα πραγματικότητα.



Εικόνα 2.4 Τεχνολογική ανάπτυξη [πηγή 64]

2.4 Προβλήματα και προκλήσεις

Μαζί με τα πλεονεκτήματα και τις καινοτομίες που θα φέρει η νέα γενιά δικτύων, καλείται να διαχειριστεί και ορισμένα προβλήματα και προκλήσεις. Αυτά τα προβλήματα, μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες. Τα αμιγώς τεχνικά προβλήματα, τα μη-τεχνικά προβλήματα και τα προβλήματα συμβατότητας.

2.4.1 Τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις

Τα τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της πέμπτης γενιάς δικτύων είναι τα εξής:

- **Επικοινωνίες mmWave:** Τα προβλήματα αφορούν αρχικά την δυσκολία που έχει το σήμα όσον αφορά τα εμπόδια που πρέπει να ξεπεράσει είτε αυτά αφορούν έπιπλα και τοίχους, είτε ακόμα και ανθρώπους. Επιπροσθέτως, παρουσιάζει δυσκολίες, και αποτελεί πρόκληση, η κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συστημάτων μεταφοράς των υψηλών συχνοτήτων αλλά και κεραιών επικοινωνίας, που χρειάζονται, για την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας.
- **Επικοινωνίες D2D (συσσκευή με συσκευή):** Κύρια πρόκληση όσον αφορά την επικοινωνία συσκευής με συσκευή, είναι ο περιορισμός των παρεμβολών μεταξύ των συσκευών και των χρηστών των κελιών, καθώς δεν υπάρχει κάποιος controller για την άμεση επικοινωνία τους, την διαχείριση των παρεμβολών αλλά και την κατανομή των πόρων. Επιπλέον ακόμα ένα θέμα προς μελέτη, είναι η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας, καθώς η δρομολόγηση δεδομένων γίνεται μέσω τρίτων χρηστών.
- **Backhaul:** Για να αναφερθούμε στις προκλήσεις που αφορούν το backhaul στις κινητές επικοινωνίες πρέπει να υπάρχει ένας ορισμός του, έστω επιγραμματικά αφού θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενα κεφάλαια. Είναι λοιπόν ο σύνδεσμος του σταθμού βάσης με το δίκτυο πυρήνα είτε με οπτική ίνα είτε με ασύρματες point to point συνδέσεις. Η υλοποίηση λοιπόν των backhaul διατάξεων που πρέπει να υποστηρίζουν μεγάλη

μεταφορά δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση, αποτελεί μεγάλη πρόκληση λόγω των μη επαρκών δικτύων οπτικών ινών σε αρκετούς τομείς. Η λύσεις που εξετάζονται είναι ποικίλες και αφορούν ακόμα και ήδη υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς όπως το Χρον ή ακόμα και τεχνολογίες όπως το mmWave.

- **Ασφάλεια:** Το 5G χρησιμοποιεί νέες και καινοτόμες τεχνολογίες όπως η οπτικοποίηση, η εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization, NFV) και η δικτύωση οριζόμενη από το λογισμικό (SDN). Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα που τα στοιχεία είναι απομονωμένα μεταξύ τους, στο 5G οι πόροι διαμοιράζονται. Συνεπώς υφίσταται ανάγκη για εφαρμογή προτύπων ασφαλείας, για κάθε διαφορετική υπηρεσία που προσφέρει το 5G και με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το Ιοt για παράδειγμα χρειάζεται πρότυπα χαμηλής ασφάλειας ενώ στα Ultra-Reliable Low Latency Cellular Networks (URLLC) που θα χρησιμοποιούνται λόγω χάρη για απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις, απαιτούνται πρότυπα ισχυρής ασφάλειας καθώς υπάρχει το ιατρικό απόρρητο του ασθενούς που αποτελεί ευαίσθητο προσωπικό δεδομένο.
- **Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (EMF):** Θα πρέπει να επιτευχθεί μια ισορροπία ανάμεσα στην αποδοτικότητα και την απαιτούμενη χωρητικότητα του 5G δικτύου σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- **Ωρίμανση συνθηκών σε τεχνολογικό επίπεδο:** Οι διάφορες καινοτόμες υπηρεσίες όπως το URLLC βρίσκονται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο εξέλιξης και πρέπει να γίνουν αρκετά βήματα ακόμα για να φτάσουν να μπορούν να εκμεταλλευτούν το 5G στο έπακρο.

2.4.2 Μη τεχνικά προβλήματα και προκλήσεις

Τα μη τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της πέμπτης γενιάς δικτύων είναι τα εξής:

- **Επιχειρηματικά μοντέλα:** Διαχρονική επιδίωξη της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών είναι η εύρεση νέων πεδίων και περιοχών με σκοπό το μεγαλύτερο κέρδος. Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας θεωρούν ότι είναι αναγκαίο να υλοποιηθεί ένα νέο επιχειρηματικό μοντέλο ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητικό κέρδος σε σχέση με την επένδυση που θα γίνει στις υποδομές. Αν αυτή η ισορροπία μεταξύ επένδυσης και κέρδους διαταραχθεί τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος η κατάσταση αυτή να αποτελέσει τροχοπέδη στην εξέλιξη του 5G. Επιπλέον, ένας άλλος λόγος που επιτάσσει την χρησιμοποίηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων, είναι ότι σε αντίθεση με τα προηγούμενα δίκτυα που οι υπηρεσίες ήταν πελατοκεντρικές, στο 5G αφορούν και τις επιχειρήσεις. Ως εκ τούτου, οι φορείς εκμετάλλευσης πρέπει να είναι συνυφασμένοι με την νέα αυτή τάξη πραγμάτων όσον αφορά την αγορά.
- **Επενδυτικά κόστη:** Για να είναι εφαρμόσιμες οι νέες τεχνολογίες όπως τα SDN, τα NFV και οι μικροκυψέλες θα πρέπει να υπάρξει ανακατασκευή των υπάρχοντων εγκαταστάσεων όσον αφορά τις κεραιές και το δίκτυο πυρήνα. Για παράδειγμα η δημιουργία ενός πυκνού δικτύου σε αστικές περιοχές απαιτεί μεγάλη σπατάλη κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX). Ακόμα όμως και στην επαρχία μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα καθώς μπορεί να μην ικανοποιούν τα προσδοκώμενα έσοδα σε σχέση με την επένδυση. Επιπλέον δεν πρέπει να παραλείψουμε και την ύπαρξη των λειτουργικών εξόδων (OPEX). Τέλος, για την ανάπτυξη του backhaul, υπάρχει ανάγκη επένδυσης στην εγκατάσταση οπτικών ινών, η οποία προστίθεται στο υπάρχον κόστος. Από αυτήν την άποψη, οι επενδύσεις πρέπει να είναι εξεταστούν διεξοδικά από τα αρμόδια τμήματα για να φτάσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα που να ικανοποιεί όλους τους εμπλεκόμενους.
- **Τεχνολογικός αναλφαβητισμός:** Η έλλειψη εμπειρίας αλλά και τεχνολογικών δυνατοτήτων από ένα κομμάτι της κοινωνίας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην υιοθέτηση των νέων υπηρεσιών που θα προκύψουν είτε αυτά αφορούν την αυτή καθαυτή δυσκολία χρήσης των υπηρεσιών ή ακόμα και θέματα που αφορούν την ψυχολογική ετοιμότητα των χρηστών για την είσοδο στη νέα εποχή.

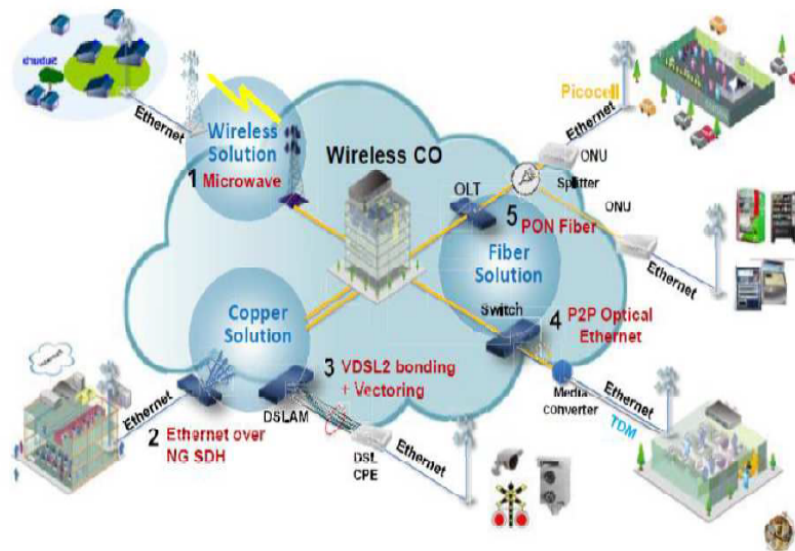
2.4.3 Ζητήματα διαχείρισης

- **Διαχείριση φάσματος:** Παρά την δυνατότητα που προσφέρει η τεχνολογία των μικροκελιών, όσον αφορά την είσοδο τοπικών και εξειδικευμένων παρόχων, είναι ασαφές το κατά πόσο αυτή η διαδικασία θα δημιουργήσει νέες ευκαιρίες στην επαρχία. Αυτό συμβαίνει γιατί, οι κάτοχοι αδειών, ενδέχεται να χρειάζεται να καταβάλουν μεγάλο χρηματικό αντίτιμο στους ήδη υφιστάμενους ανταγωνιστές, λόγω χάρη για backhaul. Επιπλέον υπάρχει κίνδυνος, αν οι άδειες φάσματος μπουν σε διαδικασία πλειστηριασμού, να διαιωνιστεί η κυριαρχία των μονοπωλίων. Μια τέτοια κατάσταση θα κρατήσει ψηλά το κόστος των υπηρεσιών για τους χρήστες της υπαίθρου
- **Διαχείριση κατασκευής υποδομών:** Καθώς το δίκτυο 5G εξελίσσεται, όλο και περισσότερες κεραιές μικροκυττάρων θα πρέπει να παράγουν τεράστιο εύρος ζώνης. Τα αρχικά κελιά δεν μπορούν να καλύψουν τόσο χώρο όπως στο 3G ή το 4G, έτσι θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερα. Κατά συνέπεια προκύπτει θέμα διαχείρισης που αφορά το σε ποιες περιοχές θα πέσει το βάρος των κατασκευών αρχικά. Στις περιοχές λοιπόν που θα καθυστερήσουν η κατασκευές, οι χρήστες 5G θα πρέπει να αναμένουν ότι η κάλυψή τους ενδέχεται να μην είναι τόσο διαδεδομένη στην αρχή τουλάχιστον.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες και μελέτες που αφορούν την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων και η κοινωνία μπορεί να ατενίζει το μέλλον με αισιοδοξία αναφορικά με την αντιμετώπιση τους από τους αρμόδιους φορείς.

Κεφάλαιο 3 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G

3.1 Εισαγωγή



Εικόνα 3.1 Συνδυασμός τεχνολογιών δικτύου 5G [πηγή 65]

Τα δίκτυα 5G, δημιουργήθηκαν για να αντιμετωπίσουν τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής. Στόχος τους, είναι η μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων και η επιλογή αποστολής πακέτων μεταξύ ασύρματων δικτύων πρόσβασης (RAN) και πακέτων κορμού (Packet Core) με οικονομικότερο τρόπο. Παρακάτω θα αναφερθούν προτεινόμενες τεχνολογίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5G. Επειδή όμως δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις και τα σενάρια ανάπτυξης σε περιπτώσεις όπως το backhaul και fronthaul, αναγκαστικά τείνουμε προς την κατεύθυνση του συνδυασμού πολλών τεχνολογιών.

Οι νέες αυτές τεχνολογίες χωρίζονται σε τρεις ομάδες. Στην πρώτη ομάδα ανήκουν οι ασύρματες τεχνολογίες (Microwave, mm-Wave, Optical Wireless), οι οποίες αξιοποιούνται όταν δεν υπάρχει κάλυψη ενσύρματων δικτύων ή σε περίπτωση ανάπτυξης ασύρματου δικτύου (Crosshaul project). Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τεχνολογίες που επαναχρησιμοποιούν τις υπάρχουσες βάσεις και υποδομές ινών (GPON, WDM) και του χαλκού (G.fast, VDSL Bonding) στο δίκτυο πρόσβασης. Στην τρίτη ομάδα υπάγονται οι τεχνολογίες οπτικών ινών, στις οποίες

γίνονται έρευνες για την αναβάθμιση του δικτύου και την ελάττωση του κόστους ανά Gigabit per second, λόγω μεγάλης χωρητικότητας.

3.2 Ασύρματα δίκτυα 5G

Όπως συμβαίνει με κάθε νέα τεχνολογία, έτσι και στα ασύρματα δίκτυα δημιουργούνται ερωτήματα ως προς την εξέλιξη, αλλά και το κόστος δημιουργίας τους. Λύσεις για τέτοια ζητήματα δίνει το 5G-Crosshaul project.

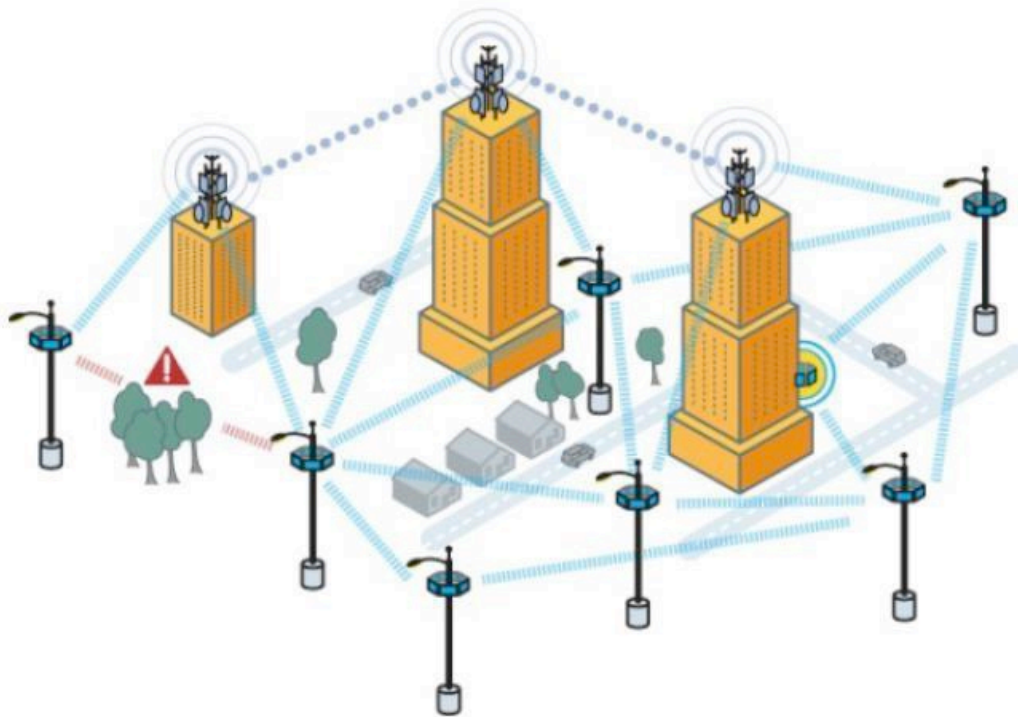
Στο δρόμο για τη μετάβαση στο 5G, παρατηρούμε πως οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται παγκοσμίως είναι δεύτερης, τρίτης και τέταρτης γενιάς. Για να μπορούν όμως να αξιοποιήσουν φάσμα μέχρι τη ζώνη συχνοτήτων mm-Wave, πρέπει να εφαρμοστούν συνδέσεις σταθερού σημείου προς σημείο (P2P), σε ασύρματα backhaul και fronthaul. Ακολουθώντας, διαπιστώνοντας ότι υπάρχει κατακερματισμός σε συχνότητες κάτω των 50 GHz, οι επιστήμονες συνεχίζουν τις έρευνες τους με σκοπό την εκμετάλλευση νέων μεγαλύτερων συχνοτήτων (50 έως 90 GHz).

Επιπλέον, σύμφωνα με το Ινστιτούτο ETSI, η εξέλιξη των δικτύων backhaul και fronthaul έπρεπε να προχωρήσει ακόμα πιο μακριά. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκαν δύο νέες ζώνες: η V-band (57 έως 66 GHz) και η E-band (71 έως 76 GHz και 81 έως 86 GHz) για μεταφορά σε mm-Wave.

Συνεχίζοντας, μία νέα τεχνολογία που δημιουργήθηκε είναι αυτή των Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών (OWC), η οποία καλύπτει μικρές αποστάσεις μεταξύ των δικτύων fronthaul/backhaul και επιτυγχάνει μηδενική απώλεια ορατότητας λόγω αύξησης οπτικού πεδίου (LOS). Αναλυτικότερα, η συγκεκριμένη τεχνολογία ενσωματώνει οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO). Έτσι, γίνεται χρήση πομπών laser για ασύρματες επικοινωνίες υψηλής χωρητικότητας (άνω των 200m) και τεχνολογίας επικοινωνιών ορατού φωτός (VLC) για εσωτερική επικοινωνία με συστήματα LED υψηλής ισχύος.

Προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία της τεχνολογίας μικρών κυψελών είναι το δίκτυο backhaul. Κύριος ρόλος του είναι η χρήση ηλεκτρικά κατευθυνόμενων κεραιών με σκοπό την αποστολή σήματος από ένα σημείο σε πολλά (P2MP) σε

φάσμα mm-Wave (30 έως 300 GHz). Στην εικόνα που εμφανίζεται παρακάτω βλέπουμε ένα πλέγμα backhaul με χρήση μικρών κυψελών στο φάσμα mm-Wave.



Εικόνα 3.2 Πλέγμα backhaul για small cells στο φάσμα mm-Wave [πηγή 5]

Επιπρόσθετα, ανάλογα τη συχνότητα που εφαρμόζουμε μπορούμε να επιτύχουμε εντυπωσιακά αποτελέσματα στον μέγιστο αριθμό δεδομένων. Επιγραμματικά, στη ζώνη E τα προϊόντα που βρίσκονται στο εμπόριο είναι ικανά να φτάσουν σε ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 1 έως 1,25 Gbit /s. Προχωρώντας στη ζώνη V, τα προϊόντα κατάφεραν να αξιοποιήσουν εύρος ταχυτήτων από 450 Mbit/s έως 1 Gbit/s, με το 5G-Crosshaul project να βελτιώνει την απόδοση σε κάθε κόμβο έως τα 4 Gbit/s.

Η πυκνότητα του δικτύου έχει άμεση σχέση με την τοπολογία και την απόσταση μεταξύ των κυψελών. Για παράδειγμα, σε μία απόσταση 150 μέτρων ανάμεσα στις κυψέλες παίρνουμε τη χωρητικότητα περιοχής σε εκατοντάδες Gbit/km². Όσο για τη ζώνη συχνοτήτων, αυτή εξαρτάται από τους συνδέσμους mm-Wave, αφού στη ζώνη E μπορούμε να μεταφέρουμε δεδομένα σε πολλά χιλιόμετρα, ενώ με τη ζώνη V από 50 μέτρα ως 1 χιλιόμετρο (50 έως 600 μέτρα ικανοποιούνται μέσω διαφορετικού υλικού κεραίας).

3.3 Δίκτυα σταθερής πρόσβασης

Σύμφωνα με τις έρευνές του 5G-Crosshaul project, διαπιστώθηκε ότι οι σύνδεσμοι backhaul και fronthaul μπορούν να καλυφθούν από παθητικά οπτικά δίκτυα (PONs), χωρίς να αυξησουν το κόστος κατασκευής σταθερών ή ασύρματων οπτικών δικτύων πρόσβασης.

Παρακάτω θα αναφέρουμε μερικά σημαντικά πράγματα που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα PON. Συγκεκριμένα, έχουν συνεχή επίγνωση των επιδόσεων αλλά και των αλλαγών στις παραμέτρους που ανήκουν στο φυσικό επίπεδο και το επίπεδο διασύνδεσης του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνουμε γρηγορότερη επίλυση διαφόρων θεμάτων αλλά και την αναγκαία συντήρηση υποδομών.

Συνεχίζοντας, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι οι οποίες έχουν ως στόχο την εύρεση και επίλυση των σφαλμάτων στο σύστημα, όπως είναι αυτές της κρυπτογράφησης, της υβριδικής αποκωδικοποίησης, της διόρθωσης σφάλματος, αλλά και της εμπρόσθιας διόρθωσης σφαλμάτων (FEC). Τέλος, η ασφάλεια των δικτύων PON παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, αφού αξιοποιεί τεχνικές για τον έλεγχο ταυτότητας, τη διαχείριση κλειδιών και την κρυπτογράφηση δεδομένων.

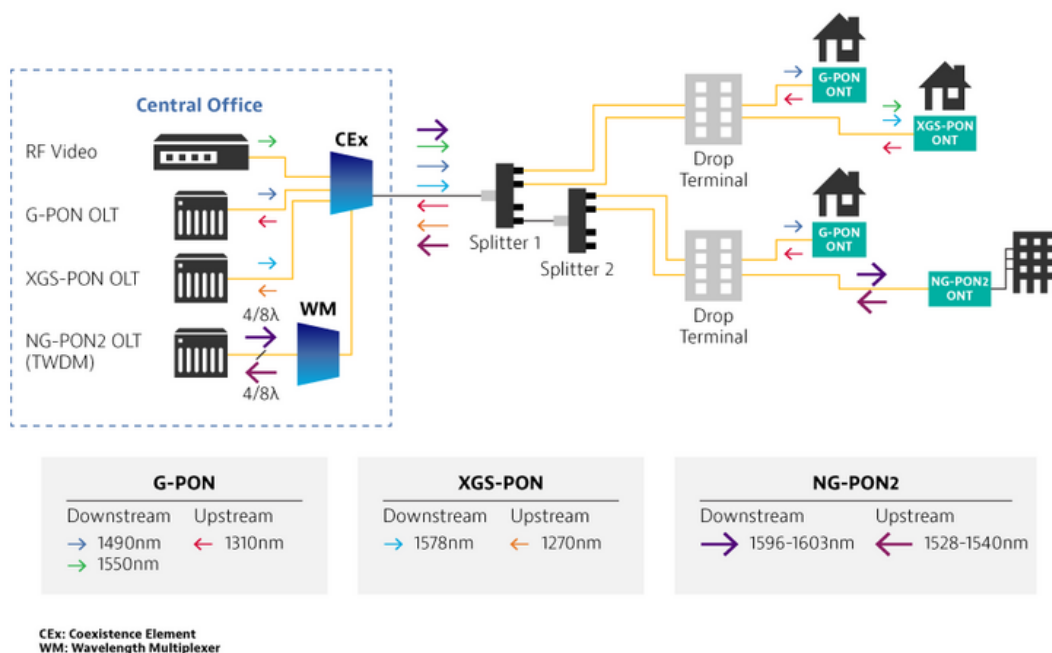
Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικές τεχνολογίες που αξιοποιούνται στα παθητικά οπτικά δίκτυα. Αρχικά, η τεχνολογία GPON είναι ένας μηχανισμός πρόσβασης σημείου προς πολλά σημεία (P2MP), που έχει ως στόχο την εφαρμογή παθητικών διαχειριστών (splitters), στο δίκτυο διανομής ινών. Με αυτόν τον τρόπο τα κεντρικά γραφεία (CO) του παρόχου δίνουν τη δυνατότητα σε μία και μοναδική ίνα να εξυπηρετήσει πάρα πολλές οικίες και μικρές επιχειρήσεις. Το μέγιστο εύρος ζώνης που μπορεί να καλύψει για downstream είναι 2,5 Gbit/s και για upstream 1,25 Gbit/s για μεταφορά ανάμεσα στους χρήστες (32/64). Σύμφωνα όμως με τη διεπαφή CPRI, τα αποτελέσματα των επιδόσεων του GPON δεν είναι ικανοποιητικά, παρόλο που σαν τεχνολογία είναι ιδανική για πυκνοκατοικημένες περιοχές (επικοινωνίες fronthaul χαμηλότερες από 1 Gbit/s).

Η τεχνολογία 10G-PON που δημιουργήθηκε μεταγενέστερα, είναι η εξέλιξη της GPON. Χρησιμοποιώντας την, επιτυγχάνουμε μεγαλύτερο και χωρίς συμφόρηση

εύρος ζώνης, αλλά και καλύτερες επενδύσεις σε δικτυακές υποδομές. Η 10G-PON περιλαμβάνει 2 πρότυπα:

- **To XG-PON**, το οποίο είναι ένα ασύμμετρο 10G-PON που δίνει εύρος ζώνης upstream 2,5 Gbit/s και downstream 10 Gbit /s. Μπορεί να έχει βελτιωμένο upstream, αλλά και πάλι δεν θεωρείται αρκετό το εύρος ζώνης σύμφωνα με το 5G-Crosshaul project.
- **το XGSPON**, το οποίο είναι ένα συμμετρικό 10G-PON, του οποίου η χωρητικότητα για upstream είναι 10 Gbit /s και για downstream 10 Gbit /s.

Ανεβάζοντας τον πήχη ακόμα πιο ψηλά, δημιουργήθηκε η τεχνολογία NG-PON2. Με την εφαρμογή της αλλάζουν τα δεδομένα, αφού προστίθενται νέες ικανότητες όπως φορητότητα μήκους κύματος και η σύνδεση καναλιού. Τα NG-PON2 χωρίζονται σε 4 (συνολική φορητότητα 40 GB) ή 8 μήκη κύματος. Με την βοήθεια, όμως, της διαίρεσης πολυπλεξίας σε χρόνο και μήκος κύματος (TWDM) αποκτούμε μέγιστη απόδοση επάνω στο μήκος κύματος που εφαρμόζουμε αυτή την τεχνική. Έτσι για χωρητικότητα upstream και downstream έχουμε τα εξής ζεύγη: (10Gbit/s/10 Gbit/s), (2.5Gbit/s/10 Gbit/s) , (2.5Gbit/s/2.5 Gbit/s)



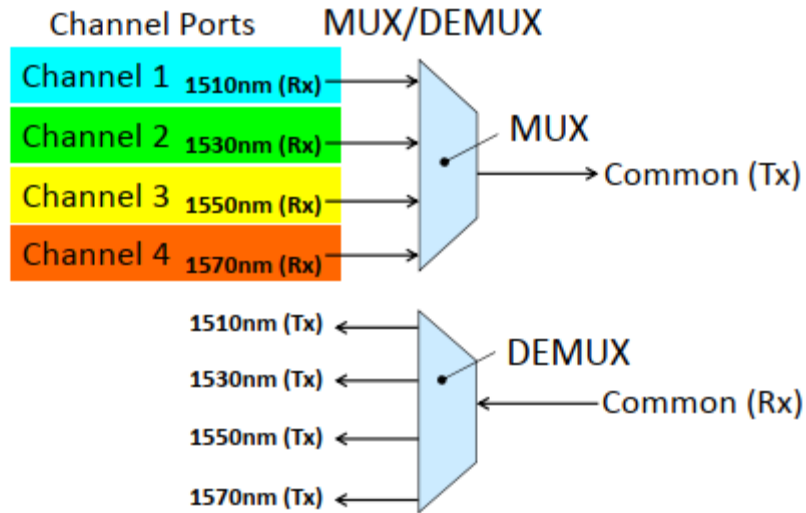
Εικόνα 3.3 Κατηγορίες παθητικών οπτικών δικτύων(PON) [πηγή 44]

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δίκτυα PON εξελίχθηκαν τελικά στα WDM-PON. Έτσι, στηριζόμενα στην τεχνολογία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) και με τη χρήση laser κατανεμημένης ανάδρασης (DFB) παρέχουν υψηλότερο εύρος ζώνης (1 Gbit /s) σε πολλά σημεία για μακρινές αποστάσεις άνω 100 km.

3.4 Οπτικά δίκτυα

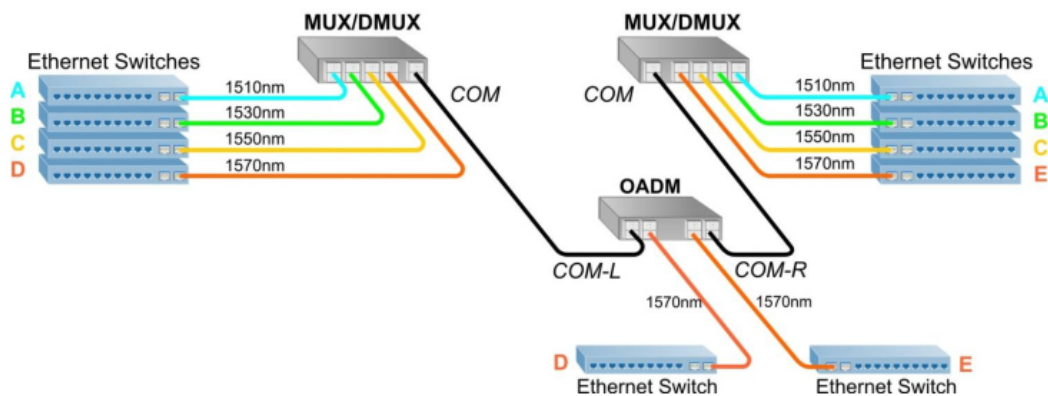
Με την πάροδο των ετών, οι απαιτήσεις των χρηστών για καλύτερες υπηρεσίες δικτύου αυξάνονται κατακόρυφα, αφού πρέπει να ικανοποιηθούν οι στόχοι για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και γρηγορότερους ρυθμούς μετάδοσης σε πιο μακρινές αποστάσεις. Οι διαχειριστές των δικτύων λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις ανάγκες, αξιοποιούν όλο και περισσότερο την τεχνολογία οπτικών ινών. Αυτό όμως, έχει ως αποτέλεσμα διάφοροι πάροχοι να έχουν οικονομικό πρόβλημα στην τοποθέτηση ίνας όταν υπάρχει έλλειψη υποδομής.

Λύσεις σε αυτό το πρόβλημα δίνει η διαίρεση μήκους κύματος (WDM). Όπως είχαμε αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα, αυτή τεχνολογία πολυπλέκει πολλά οπτικά σήματα σε μία ίνα μέσω διαφορετικών χρωμάτων φωτός ή μήκους κύματος. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται σε switches, routers και servers ενώ υποστηρίζει οποιοδήποτε πρωτόκολλο δικτύου.



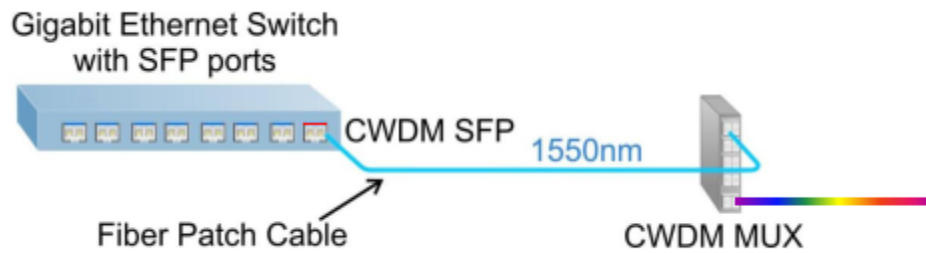
Εικόνα 3.4 Multiplexer/ Demultiplexer [πηγή 59]

Ο WDM Multiplexer (MUX) συνδυάζει μήκη κύματος από διαφορετικό εξοπλισμό δικτύου ενώ ο Demultiplexer (DEMUX) χωρίζει τα μήκη κύματος σε πολλούς προορισμούς. Κάθε μήκος κύματος είναι ένα ανεξάρτητο κανάλι δεδομένων το οποίο μεταφέρει διαφορετικά πρωτόκολλα και Data rates.,



Εικόνα 3.5 Optical Add Drop Multiplexer (OADM) [πηγή 59]

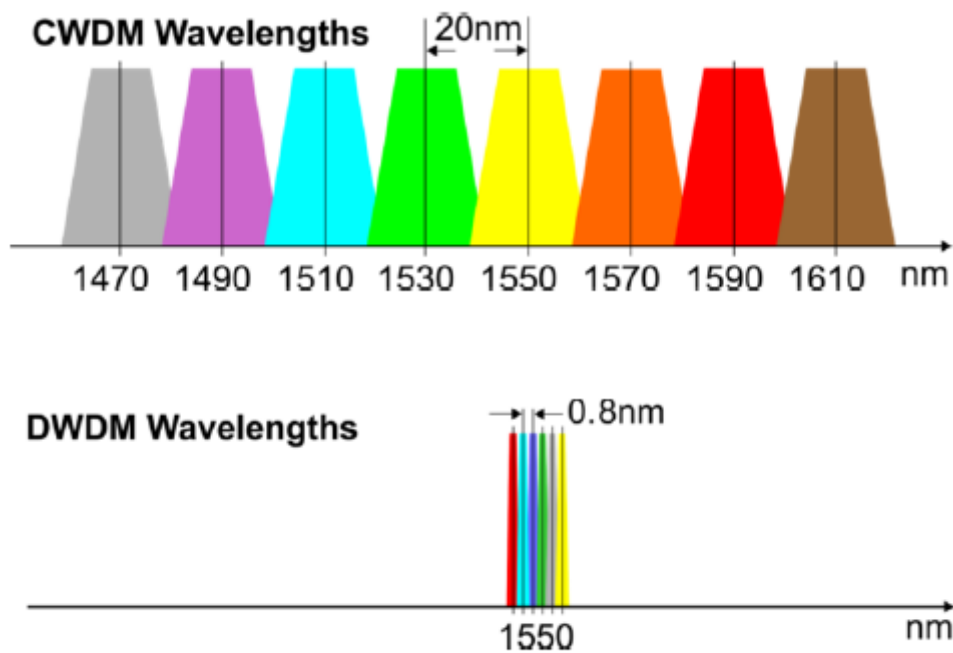
Ακολουθώντας γίνεται χρήση του Optical Add-Drop Multiplexer (OADM) ο οποίος χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ή την αφαίρεση μηκών κύματος σε οποιοδήποτε σημείο στην WDM Common Line. Επίσης στους Ethernet switches υπάρχουν οι WDM πομποδέκτες που χρησιμοποιούνται με SFP switches για να μετατρέψουν τα απλά μήκη κύματος Σε αυτά των WDM.



Εικόνα 3.6 WDM transceiver [πηγή 59]

Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- 1) Αύξηση χωρητικότητας σε υπάρχουσες υποδομές.
- 2) Η παθητική πολυπλεξία και απο-πολυπλεξία διαχειρίζεται οποιοδήποτε πρωτόκολλο ή ταχύτητα.
- 3) Η εγκατάσταση είναι plug & play και δεν χρειάζεται διαμόρφωση.
- 4) Μείωση δαπανών για τροποποίηση ινών ή παραλαβή νέων.



Εικόνα 3.7 Τεχνική CWDM και DWDM [πηγή 59]

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε οδήγησε σε δύο νέες τεχνολογικές επιλογές:

1. **Διαίρεση με πολυπλεξία μήκους κύματος με αραιή παράθεση καναλιών (CWDM):** Η CWDM, είναι μία τεχνική η οποία μεταφέρει 16 κανάλια σε μία ίνα, ελαχιστοποιώντας την απόσταση καναλιού μεταξύ των μηκών κύματος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί point-to-point τοπολογίες σε διάφορες εταιρείες και δίκτυα πρόσβασης Τηλεπικοινωνιών. Αξιοποιεί περιορισμένο αριθμό καναλιών σε ring networks με OADMs, ενώ έχει την ικανότητα για μεταφορά σήματος από 40 έως 80 χιλιόμετρα ανάλογα την ικανότητα του πομποδέκτη και του ρυθμού δεδομένων. Επιπλέον, ο CWDM εξοπλισμός είναι Passive και χρειάζεται πομποδέκτες από έναν active εξοπλισμό για μεταφορά δεδομένων. Δηλαδή σε κάθε μήκος κύματος γίνεται ενίσχυση CWDM η οποία πραγματοποιείται από αναμεταδότες. Ουσιαστικά, η CWDM είναι μία ευέλικτη τεχνολογία όπου οι πολυπλέκτες είναι ικανοί για διάθλαση του φωτός σε οποιαδήποτε ταχύτητα δικτύου χωρίς περιορισμό πρωτοκόλλου. Επεξηγηματικά εφαρμόζεται πάνω σε Single fiber που λειτουργεί με αμφίδρομα μήκη κύματος (BIDI 1310nm/1550 nm) αλλά και dual fiber στην οποία η CWDM εφαρμόζει το ίδιο μήκος κύματος πάνω σε δύο ίνες (μία για μετάδοση και μία για λήψη). Ο Διπλασιασμός του bit rate προσφέρει μία νέα

λύση στη CWDM όπου παίρνει το μήκος κύματος και το υπο-πολυπλέκει με αποτέλεσμα να διαιρείται το πλάτος της υποδοχής του CWDM σε 2 sub-channels. Πρόκληση βέβαια αποτελεί για τους διαχειριστές δικτύων, η ευθυγράμμιση και σύνδεση καλωδίων διόρθωσης από κατάλληλο οπτικό μήκος κύματος στη σωστή θύρα σε κάθε άκρη του συνδέσμου.

Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα της τεχνικής CWDM:

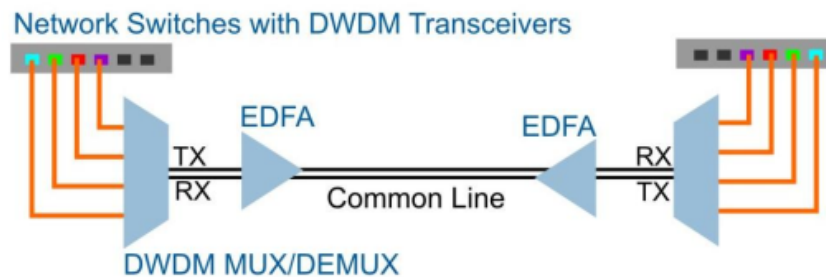
- 1) Διαφάνεια πρωτοκόλλου.
- 2) Αύξηση χωρητικότητας με μηδενικό ή ελάχιστο κόστος.
- 3) Μικρότερες δαπάνες συγκριτικά με τη DWDM.
- 4) Μηδενική ηλεκτρική ισχύ για passive εξοπλισμό.
- 5) Εύκολη χρήση και εγκατάσταση.
- 6) Μεγαλύτερη ανεκτικότητα σε θερμοκρασίες – 40 έως 70 βαθμούς Κελσίου.

Τα συνεπακόλουθα μειονεκτήματά της είναι:

- 1) Μη παραμετροποιήσιμος passive εξοπλισμός.
- 2) Μικρότερες αποστάσεις.
- 3) Πιθανότητα μικρού αριθμού καναλιών.

2. Διαίρεση με πολυπλεξία μήκους κύματος με πυκνή παράθεση καναλιών (DWDM): Η τελευταία τεχνολογία που αξιοποιείται σήμερα είναι η DWDM. Χρησιμοποιείται σε Data Centers και αναπτύσσεται συχνά σε τοπολογίες δακτυλίου. Κάθε DWDM κανάλι μεταφέρει πάνω από 100 Gbit/s με τους οπτικούς ενισχυτές να μπορούν να ικανοποιήσουν αποστάσεις άνω των 1000 χιλιομέτρων. Λειτουργεί κυρίως στη ζώνη C(1530 nm έως 1565 nm) επιτυγχάνοντας ταχύτητες 960 GB/s με εξαίρεση τη ζώνη I σε περιπτώσεις αυξημένης χωρητικότητας (Tbit/s) σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επιπρόσθετα, για να γίνει πραγματικότητα η εξυπηρέτηση μεγάλων αριθμών χρηστών σε μακρινές αποστάσεις είναι απαραίτητη η χρήση των αναβαθμισμένων ενισχυτών σε συνδυασμό με το μεγάλο όγκο

καναλιών. Δυστυχώς, όμως, αυτές οι παροχές επιβαρύνουν σημαντικά τη διαχείριση και το σχεδιασμό στο δίκτυο.



Εικόνα 3.8 DWDM transceiver [πηγή 59]

Συνεχίζοντας η εύκολη διαχείριση στους πομποδέκτες DWDM, τους καθιστά ιδιαίτερα σημαντικούς για την υποστήριξη συγκεκριμένου καναλιού σε DWDM οπτικό δίκτυο. Αναλυτικότερα επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να αλλάξουν απομακρυσμένα τα μήκη κύματος (διαδρομές καναλιού) μέσω προγραμματισμού (ανακατεύθυνση εύρους ζώνης, παράκαμψη σφαλμάτων, αναβάθμιση/επαναδιαμόρφωση κυκλοφορίας μοτίβων και υπηρεσιών).

Η εφαρμογή τους γίνεται σε:

- Αναμεταδότες: λαμβάνουν σήμα και εκπέμπουν διαφορετικό σήμα σε απόκριση
- optical switches: δημιουργούν ανακατεύθυνση καναλιών φωτός ανάμεσα στις θύρες χωρίς μετατροπή Optical Electrical Optical(OEO)
- Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers(ROADMs): με τη χρήση του προγραμματισμού μπορούμε να ανακατευθύνουμε τα μήκη κύματος σε ένα δίκτυο, δηλαδή να ελέγχουμε ποια κανάλια απορρίπτονται και ποια προχωράνε μέσω DWDM Common line.

Η τεχνολογία DWDM χωρίζεται σε δύο εκδόσεις με την αρχή να κάνει η active DWDM. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αξιοποιεί πάνω από 160 κανάλια και έχει ως στόχο τη διαχείριση μήκους κύματος σε μία ίνα. Γίνεται εφαρμογή οπτικών ενισχυτών (OA) σε διάφορα σημεία στην common line με σκοπό την ενίσχυση σε όλα τα μήκη κύματος ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται long haul οπτική μεταφορά . Από την άλλη μεριά έχουμε την passive έκδοση, η οποία πλησιάζει πιο πολύ στην τεχνολογία CWDM και είναι ικανή για μεταφορά σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 80 χιλιομέτρων. Εδώ ουσιαστικά εκμεταλλευόμαστε πάνω από 32 κανάλια, τα οποία συνήθως δεν αξιοποιούμε, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται έξτρα χρεώσεις.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας έχουν ως εξής:

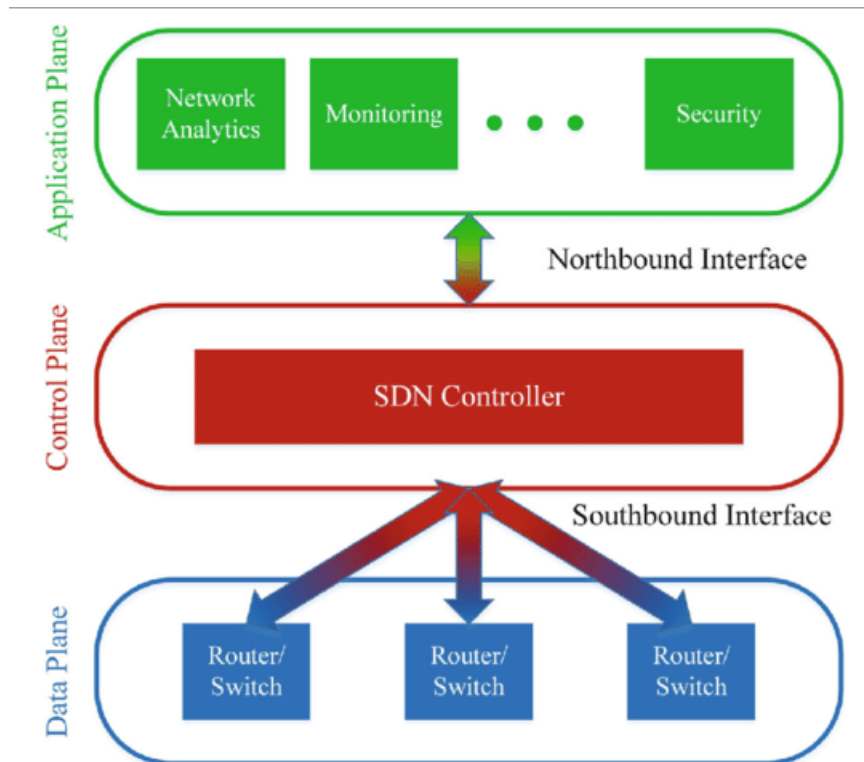
- 1) Η active έκδοση χρησιμοποιεί πάνω από 160 κανάλια και η passive πάνω από 32.
- 2) Η active έκδοση αξιοποιεί οπτικούς ενισχυτές.

Ακολουθως, τα μειονεκτήματά της είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η passive έκδοση απαιτεί μεγάλη ισχύ.
- 2) Η active έκδοση αυξάνει τις δαπάνες για εγκατάσταση και διαμόρφωση.
- 3) Η τεχνολογία DWDM δημιουργεί αυξημένα κόστη στις εταιρείες.

3.5 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό-SDN

Με τον όρο SDN, εννοούμε μία τεχνολογία η οποία διαχωρίζει τα επίπεδα των δεδομένων από το επίπεδο δικτύου, με στόχο τον προγραμματισμό των λειτουργιών των δικτύων. Η αρχιτεκτονική του SDN είναι πολύ σημαντική, διότι επιτυγχάνει όχι μόνο την αναβάθμιση των δικτύων με έξυπνο τρόπο, αλλά και τον καλύτερο έλεγχο και την απόδοση, που μειώνει σημαντικά το κόστος.

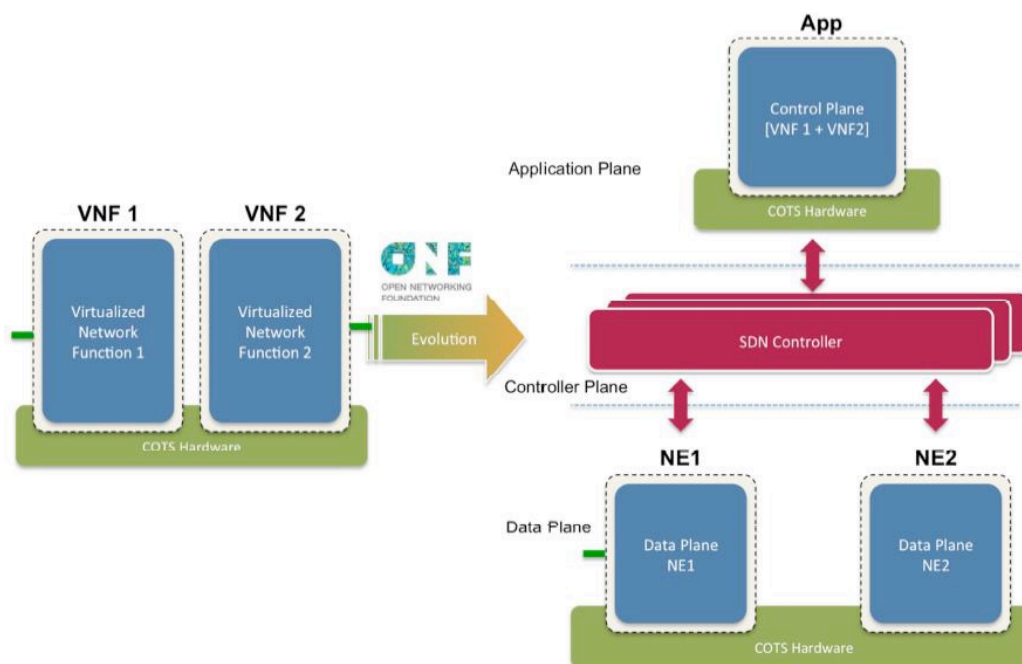


Εικόνα 3.9 Επίπεδα SDN [πηγή 63]

Η νέα αυτή τεχνολογία χωρίζει τη λειτουργία του δικτύου σε τρία επίπεδα:

- 1) Επίπεδο εφαρμογής (Application Plane):** αφορά όλα τα προγράμματα που ασχολούνται με επιχειρησιακές εφαρμογές σε υπηρεσίες δικτύου και εμφανίζουν πληροφορίες των πόρων του σε προγραμματιστικό επίπεδο.
- 2) Επίπεδο ελέγχου (Control Plane):** ουσιαστικά είναι ο εγκέφαλος του δικτύου και έχει άμεσο έλεγχο των στοιχείων που βρίσκονται στο επίπεδο δεδομένων.
- 3) Επίπεδο δεδομένων (Data Plane):** αποτελείται από την ανταλλαγή στοιχείων δικτύου (NES), που έχουν ως ρόλο την προώθηση της κυκλοφορίας του χρήστη, σύμφωνα με τις βασικές εντολές που έλαβε από το Controller.

Παρακάτω βλέπουμε μία εικόνα, στην οποία αντικατοπτρίζεται η δικτύωση SDN μέσω εικονικοποιημένης διαδικτυακής λειτουργίας VNF.



Εικόνα 3.10 Δικτύωση SDN [πηγή 11]

Οι εφαρμογές έχουν πλήρη έλεγχο στην διαδικασία προώθησης στοιχείων δικτύου (NES) χρησιμοποιώντας API υψηλού επιπέδου που τους τα προμηθεύουν οι ελεγκτές SDN.

Εδώ μπορούμε να δούμε τη διαρκή επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του δικτύου και των ελεγκτών SDN μέσω API χαμηλού επιπέδου, αξιοποιώντας πρωτόκολλο επικοινωνιών OpenFlow ή διεπαφή γραμμής εντολών (CLI) .

3.6 Εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών-NFV

Με τη ραγδαία αύξηση των χρηστών, ο όγκος της κυκλοφορίας στους διακομιστές (servers) των δικτύων ανέβηκε κατακόρυφα. Αυτό έδωσε το έναυσμα για μία νέα τεχνολογία, που ονομάζεται εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization, NFV).

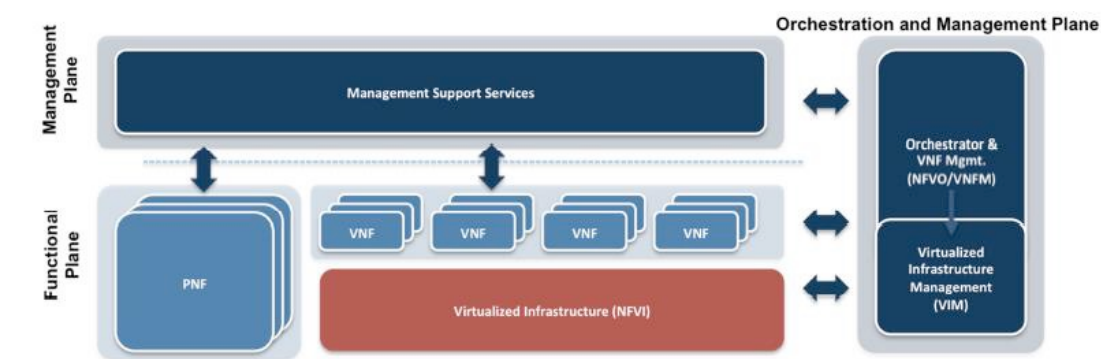
Αυτή η τεχνολογία, μας δίνει τη δυνατότητα να προγραμματίσουμε όλες τις λειτουργίες του δικτύου. Η αρχιτεκτονική στην οποία βασίζεται είναι πολύ σημαντική, διότι εφαρμόζει εικονικοποίηση στον τομέα της πληροφορικής με έναν

πολύ εύκολο τρόπο και τη βελτιώνει, ώστε η εικονική ανταλλαγή στοιχείων, τα οικονομικά εργαλεία, οι εικονικές συσκευές και η εικονική εφαρμογή στο δίκτυο να μπορούν να γίνονται πραγματικότητα.

Δυστυχώς όμως, αυτή η νέα τεχνολογία αύξησε κατά τρεις φορές περισσότερο το κόστος λειτουργικών δαπανών και διαχείρισης φορητών επικοινωνιών σε σχέση με τις κεφαλαιουχικές δαπάνες. Εδώ έρχεται ως λύση το SELFNET project H2020, το οποίο υλοποίησε ένα αυτόνομο πλαίσιο διαχείρισης δικτύου, αναβαθμίζοντας έτσι το κάθε δίκτυο με αυτο-οργάνωση (SON).

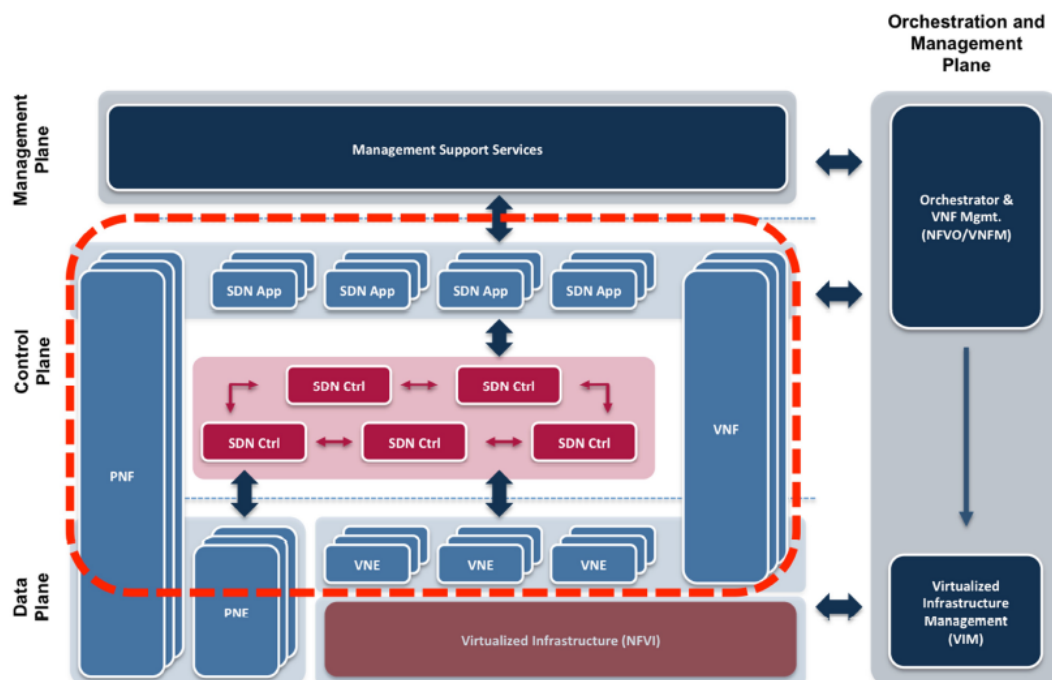
Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε την αρχιτεκτονική NFV, σύμφωνα με το Ινστιτούτο ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Στο αριστερό τμήμα κύριο ρόλο έχουν οι εργασίες ελέγχου και εκτέλεσης, ενώ στο δεξί οι εργασίες της ενορχήστρωσης και διαχείρισης.

Αναλυτικότερα, κάτω αριστερά βλέπουμε την εικονική υποδομή (πόροι υλικού, επίπεδο εικονικοποιήσεων, εικονικοί πόροι), με τα VNFs να αξιοποιούν πόρους του δικτύου με τη χρήση εικονικών μηχανών. Επάνω αριστερά βρίσκονται οι υπηρεσίες υποστήριξης διοίκησης, που είναι το σύνολο των συστημάτων υποστήριξης λειτουργιών/ επιχειρήσεων, και οι οποίες είναι σε διαρκή επικοινωνία με το τμήμα της ενορχήστρωσης και διαχείρισης VNF (πάνω δεξιά). Τέλος, ερχόμαστε στο κάτω δεξιά τμήμα, όπου η διαχείριση εικονικής υποδομής (VIM) έχει αμφίδρομη επικοινωνία με την εικονικοποιημένη υποδομή (NFVI), προσφέροντας καλύτερη αξιοποίηση πόρων.



Εικόνα 3.11 Αρχιτεκτονική ETSI NFV [πηγή 11]

3.7 Συνδυασμός αρχιτεκτονικής SDN/NFV



Εικόνα 3.12 Συνδυασμός αρχιτεκτονικών SDN και NFV [πηγή 11]

Παρόλο που οι τεχνολογίες SDN και NFV δημιουργήθηκαν για διαφορετικούς στόχους, συχνά συναντώνται ως SDN/NFV, διότι είναι συμπληρωματικές. Ωστόσο, δεν έχει γίνει ποτέ συνδυασμός των δύο αυτών αρχιτεκτονικών, διότι ανήκουν σε διαφορετικά πρότυπα αναπτυξιακών οργανισμών (βλ. SDOs).

Όπως αναφέραμε και στην τεχνολογία NFV, έτσι και εδώ, το SELFNET project καταφέρνει να συνδυάσει τις δύο αυτές αρχιτεκτονικές σε μία νέα, βασισμένο στην αρχιτεκτονική ETSI NFV, ώστε να επιτύχει απόλυτη συμβατότητα.

Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν νέα επίπεδα, τα οποία δημιούργησαν σύγχυση στην ονομασία των παραγόντων, καθώς ανάλογα την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε (SDN ή NFV), τα κουτιά δέχονται άλλες ονομασίες. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η διατήρηση των φυσικών λειτουργιών δικτύου NFV, όπως φαίνεται στην εικόνα κάτω αριστερά.

Μπορεί να υπάρχουν όμως και φυσικές εικονικές λειτουργίες (PNFs), οι οποίες να μην αξιοποιούνται από τις τεχνολογίες SDN και NFV. Αυτό μας βοηθάει να καταλάβουμε την ύπαρξη εικονικών λειτουργιών δικτύου (VNFs), χωρίς τις παροχές

του SDN, για αυτό και οι VNF διατηρούν το ίδιο όνομα, όπως φαίνεται στο σχήμα κάτω δεξιά στήλη.

Όλοι οι παράγοντες που είναι στο μέσο της εικόνας έχουν SDN και επίγνωση (Awareness) με αποτέλεσμα να χωρίζονται σε τρία μέρη:

- 1) **Το κάτω μέρος χρήστη - δεδομένων:** χρήση στοιχείων δικτύου, έννοιες που ανάλογα με τον στόχο που εξυπηρετούν ονομάζονται από το SDN φυσικά στοιχεία δικτύου (PNEs) ή εικονικά στοιχεία δικτύου (VNEs)
- 2) **Το επίπεδο ελέγχου (Control Plane):** το SELFNET project προσφέρει πολλούς ελεγκτές (Controllers) σε ξεχωριστά επίπεδα, οι οποίοι ονομάζονται SDN ελεγκτές (SDN Controllers).
- 3) **Το επίπεδο εφαρμογών (SDN Application):** περιλαμβάνει τις εφαρμογές και κατά βάση υποθέτουμε ότι είναι εικονικές στην περίπτωση που μειωθεί η συγκεκριμένη χρήση του υλικού.

3.8 Μικροκυματική ζώνη

Με τον όρο μικροκυματική ζώνη εννοούμε μία φασματική περιοχή, στην οποία το μήκος του κύματος της είναι σε επίπεδο χιλιοστού. Με την αρχιτεκτονική αυτής της τεχνολογίας επιτυγχάνουμε εύρος ζώνης μετάδοσης μεγαλύτερο των 30 GHz, ενώ ταυτόχρονα μηδενίζουμε τη συμφόρηση σε αυτού του είδους τις συχνότητες.

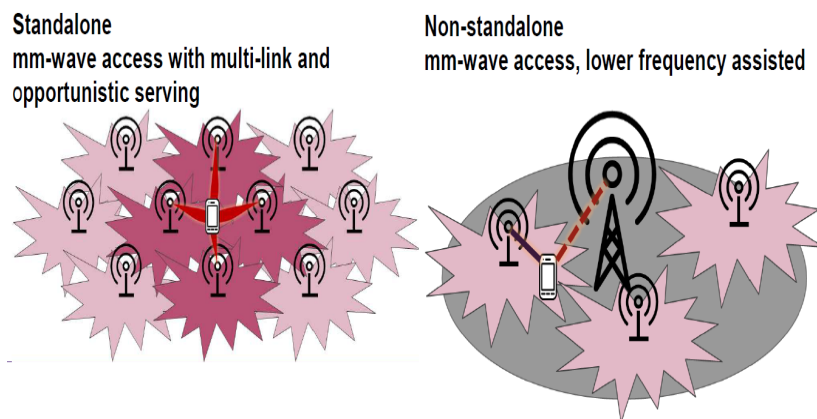
Μεγάλο αντικείμενο για έρευνα σε όλο τον κόσμο προκάλεσε η περιοχή γύρω από τα 60 GHz, διότι σε εκείνο το σημείο μπορεί να γίνει χρήση του ελεύθερου εύρους συχνοτήτων 3 GHz (59 - 62 GHz). Το IEEE έκρινε πως είναι αναγκαία η δημιουργία του IEEE 802.11ad, λόγω του μικρού μεγέθους κυψέλης συστήματος (απώλειες μεταφοράς, εισχώρηση σε τοίχους). Πρόκειται για ένα WLAN πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τεχνολογίες ραδιοσήματος πάνω από μια ίνα RoF για καλύτερη απόδοση.

Τα χαρακτηριστικά αυτού του πρωτοκόλλου για τη λειτουργία του σε φυσικό επίπεδο είναι, η πολύ υψηλή απόδοση VHT για όλες τις προβληματικές περιοχές που είναι μικρότερες των 6 GHz (εξαιρείται περιοχή 2.4 GHz) και το κατευθυντικό

επίπεδο πολλαπλών Gbit (Dmg) , που αφορά φασματικές περιοχές του κάθε καναλιού με συχνότητα πάνω από 45 GHz.

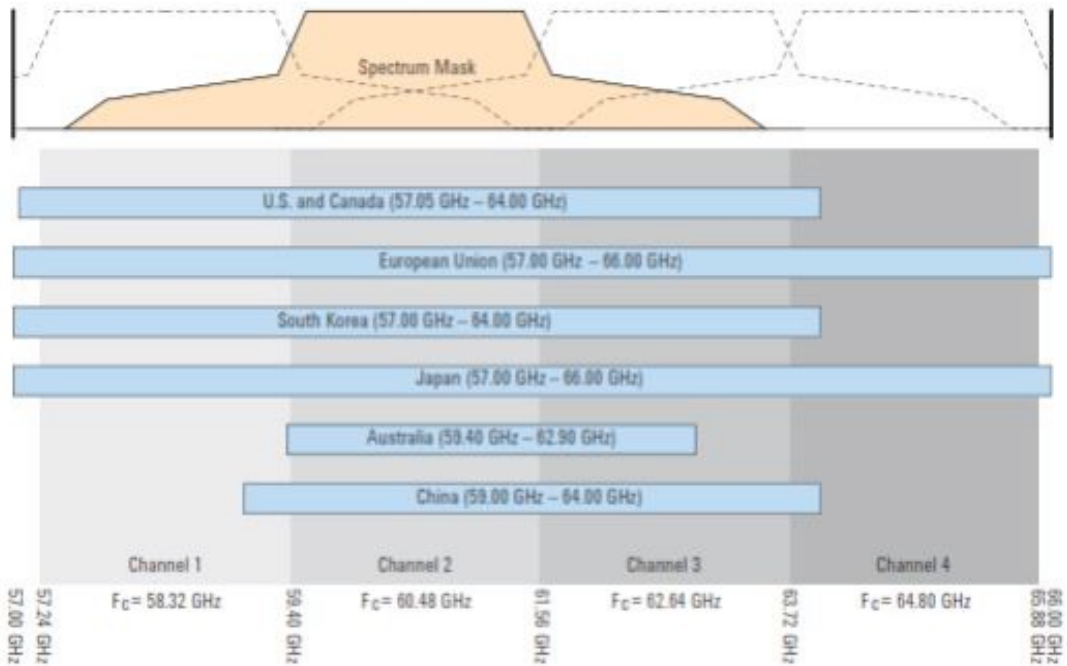
Για να καταλάβουν καλύτερα οι ερευνητές την αρχιτεκτονική mm-Wave εφάρμοσαν δύο λειτουργίες:

1. **Αυτόνομη (Standalone):** η τεχνολογία mm-Wave ασύρματης πρόσβασης (mm-Wave RAT), αξιοποιεί mm-Wave συχνότητες και βελτιωμένα σημεία πρόσβασης (AP) με στόχο την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς και ελαττωματικής κάλυψης.
2. **Μη αυτόνομη (Non Standalone):** εξέλιξη κόμβων Mm-Wave, σε κόμβους για χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων.



Εικόνα 3.13 Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση [πηγή 13]

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται κεντρικά οι ελεύθερες φασματικές περιοχές για τις εμφανιζόμενες χώρες.



Εικόνα 3.14 Ελεύθερες συχνότητες και εφαρμογή τους ανά περιοχή [πηγή 13]

Το 2011 η ITU-R έκανε ένα διαχωρισμό των καναλιών με εύρος 2,16 Gigahertz. Στο κάτω μέρος της εικόνας είναι οι τέσσερις κεντρικές συχνότητες. Επειδή όμως δεν χρησιμοποιούνται για όλες τις περιοχές ως λύση, τοπιοθετήθηκε το κανάλι 2 ως βασικό.

Κεφάλαιο 4 Αρχιτεκτονική και τεχνικές mobile fronthaul

4.1 Εισαγωγή

Στο δίκτυο πρόσβασης της εποχής μας, (4G και μετέπειτα στα 5G) οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών επιδιώκουν να μειώσουν το εύρος CAPEX και OPEX. Για να επιτύχουν τη μείωση των εξόδων αυτών, στρέφονται στην τεχνική Cloud (ή Centralized) Radio Access Network (C-RAN).

Γενικότερα, ένα δίκτυο ραδιο-πρόσβασης (Radio Access Network, RAN) είναι μια τεχνολογία που συνδέει μεμονωμένες συσκευές με άλλα μέρη ενός δικτύου, μέσω ασύρματων συνδέσεων και αποτελεί πολύ σημαντικό μέρος των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών. Το RAN αντιπροσωπεύει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, τον εξοπλισμό που συνδέεται με κεραιές, επεξεργάζεται το σήμα και το στέλνει στο κεντρικό δίκτυο.

4.2 C-RAN

Η τεχνική C-RAN αποτελεί ουσιαστικά μία αρχιτεκτονική στην οποία πολλές φυσικές λειτουργίες και λειτουργίες επιπέδου δικτύου που είχαν προηγουμένως εφαρμοστεί σε σταθμούς βάσης (BS), προωθούνται στα Κεντρικά Γραφεία. Η αρχιτεκτονική C-RAN, επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης τηλεπικοινωνιακών δικτύων να εκτελούν συγχρόνως λειτουργίες RAN μαζί με άλλες λειτουργίες δικτύου σε ένα περιβάλλον κέντρου δεδομένων, παρέχοντάς τους τη δυνατότητα να προσφέρουν πιο γρήγορα νέες υπηρεσίες μέσω του ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι απαιτεί πολύ μεγαλύτερη μεταφορά πληροφοριών από τα CO στις τοποθεσίες κεραιών σε σύγκριση με προηγούμενες λύσεις που βασίζονται σε backhauling, απαιτούνται αποκλειστικοί σύνδεσμοι υψηλής χωρητικότητας στα δίκτυα σταθερής πρόσβασης, που πρέπει να υποστηρίζουν το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή αυτών των συνδέσμων στο C-RAN, υποδεικνύονται ως "fronthauling"

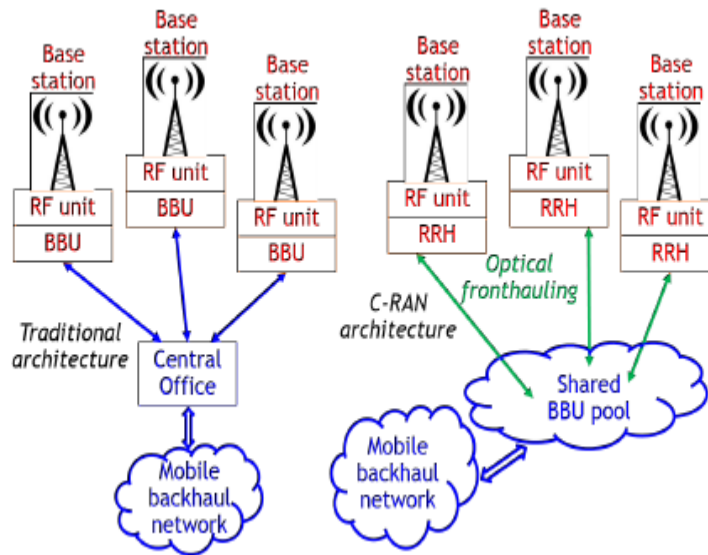
και συνήθως βασίζονται σε οπτικές ίνες. Το "fronthauling" περιγράφεται και ως "σταθερή κινητή σύγκλιση" και στηρίζεται στην κοινή λειτουργία δικτύου σταθερής πρόσβασης με βάση τις ίνες και δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Στο σημείο αυτό, θα παρουσιαστούν τα βασικότερα στοιχεία της αρχιτεκτονικής fronthauling C-RAN:

- 1)** Η απομακρυσμένη ραδιο-κεφαλή (remote radio head ή RRH) αποτελεί το τμήμα των λειτουργιών υλικού αλλά και λογισμικού που παραμένουν στην τοποθεσία της κεραιάς. Η φιλοσοφία του C-RAN είναι να παραμείνει στο RRH μόνο το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων (RF) και ένα πολύ απλό πρωτόκολλο επικοινωνίας για τη διασύνδεσή του με τη σύνδεση fronthauling. Η τεχνική fronthauling βασίζεται στη λειτουργία ενός συνόλου ανεξάρτητων απομακρυσμένων κεφαλών, οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε απομακρυσμένες περιοχές που μπορεί να απέχουν και δεκάδες χιλιόμετρα μεταξύ τους.
- 2)** Οι περισσότερες από τις λειτουργίες επεξεργασίας ψηφιακού σήματος βασικής ζώνης που συνήθως υπάρχουν στην "παραδοσιακή" αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης μετακινούνται σε μονάδες επεξεργασίας βάσης ζώνης (baseband unit ή BBU), όπου τα BBUs συγκεντρώνονται σε μια ομάδα στο CO.
- 3)** Στο "true" Cloud RAN, τα BBU οργανώνονται σε μια κοινόχρηστη ομάδα BBU, είτε σε ένα CO είτε σε περισσότερα. Εκεί, χρησιμοποιώντας τη στατιστική πολυπλεξία που προκύπτει από τη συγκέντρωση των υπηρεσιών για πολλά BBU πραγματοποιείται εικονικοποίηση των λειτουργιών. Η συγκέντρωση BBU pool στο Κεντρικό Γραφείο επιτρέπει επίσης την εξισορρόπηση του φορτίου και του φάσματος σε διάφορες RRHs. Η παράμετρος εξισορρόπησης φορτίου θεωρείται κρίσιμη για την υλοποίηση της προσδοκίας της τεχνολογίας 5G.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σύγκριση της προσέγγισης C-RAN, σε σχέση με παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Στις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές φαίνεται η ξεχωριστή χρήση BBU από καθεμία απομακρυσμένη

κεφαλή RRH, ενώ αντίθετα στη C-RAN υπάρχει μία κοινόχρηστη BBU για όλες τις κεφαλές:



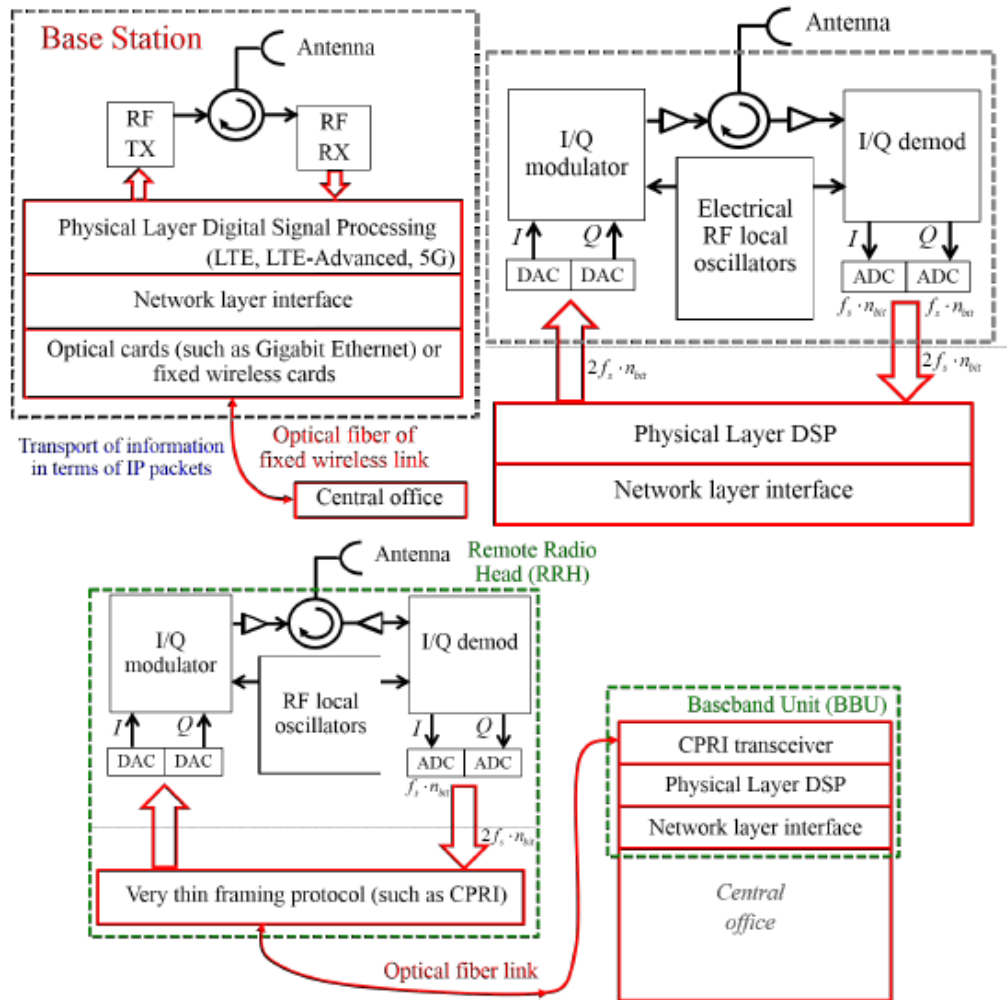
Εικόνα 4.1 Σύγκριση αρχιτεκτονικής C-RAN και παραδοσιακών τεχνικών για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [πηγή 24]

Έτσι το mobile fronthaul (MFH), είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου στην οποία οι λειτουργίες επεξεργασίας σήματος βασικής ζώνης των BS συγκεντρώνονται, προκειμένου να απλοποιηθεί η λειτουργία απομακρυσμένων κεραιών και να επιτευχθεί προηγμένη συνεργασία μεταξύ κυψελών. Το MFH χωρίζεται σε ψηφιακό mobile fronthaul και αναλογικό. Στο ψηφιακό mobile fronthaul (d-MFH), η μετάδοση μεταξύ των BBU και RRH βασίζεται στη τεχνολογία του ψηφιακού radio over fiber (D-ROF) για αποδοτικότητα κόστους και διαφάνεια κυματομορφής.

Στην επόμενη Εικόνα παρουσιάζονται διαγράμματα, με σκοπό να γίνουν πιο ευδιάκριτες οι διαφορές ανάμεσα στις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές και την DROF fronthauling τεχνική την οποία μελετάμε. Στο πάνω αριστερό γράφημα φαίνεται η παραδοσιακή αρχιτεκτονική ανασυγκρότησης, όπου η σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του CO φέρει τα ίδια πακέτα που ρέουν στην ασύρματη δομή (με επιπλέον απαραίτητες πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης).

Τα πάνω δείχνουν την τεχνική μεγέθυνσης των RF και BBU, ενώ το κάτω γράφημα αναπαριστά την αρχιτεκτονική DRoF fronthauling. Η βασική φιλοσοφία

της προσέγγισης D-RoF είναι η μεταφορά μέσω των ινών fronthauling, συνδέοντας το πρωταρχικό ραδιοσήμα, αλλά χρησιμοποιώντας μια ψηφιοποιημένη μέθοδο της έκδοσης βασικής ζώνης του σήματος. Το ραδιοφωνικό σήμα που λαμβάνεται από την κεραία, υποβάλλεται σε επεξεργασία στο RRH με υλικό αποδιαμόρφωσης RF I/Q μετατρέποντάς το σε δύο σήματα ζώνης I και Q.



Εικόνα 4.2 Σύγκριση μεταξύ παραδοσιακής αρχιτεκτονικής (επάνω) και νέας D-RoF fronthauling (κάτω) [πηγή 24]

Τα δύο σήματα βασικής ζώνης ψηφιοποιούνται από ένα ζεύγος μετατροπέων αναλογικού σε ψηφιακό ADC (Analog to Digital Converters). Εάν ο αριθμός bits του ADC αποτελείται από n bits και ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι f_s , τότε ο αριθμός bits στην έξοδο του ADC προκύπτει ως $n \cdot f_s$. Επομένως, ο συνολικός αριθμός bit που πρέπει να μεταφερθεί στον σύνδεσμο fronthauling είναι $2 \cdot n \cdot f_s$, σύμφωνα με τον θεώρημα δειγματοληψίας (Shannon).

Με δεδομένο λοιπόν ότι, το αρχικό ραδιοσήμα ψηφιοποιείται πριν περάσει στο οπτικό κανάλι μεταφοράς, ένας DAC (Digital to Analog Converter) τοποθετείται πριν την κεφαλή, ώστε να μετατρέψει τα εισερχόμενα σήματα από BBU σε αναλογικά, πριν την μετάδοση. Το BBU λειτουργεί με ραδιοσήματα σε ψηφιακή μορφή και έπειτα τα κατευθύνει σε μία οπτική διεπαφή (interface) για επεξεργασία και μετάδοση μέσω του συνδέσμου fronthaul.

Έπειτα οι απαραίτητες πληροφορίες ελέγχου προστίθενται στην ψηφιακή ροή της εξόδου του ADC, μέσω ενός απλού προτύπου για τη σύνδεση του BBU στα RRHs. Αυτό είναι το Common Public Radio Interface (CPRI). Έτσι αυξάνεται περαιτέρω ο ρυθμός μετάδοσης bits. Κατόπιν, η ψηφιακή ροή μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος μεταφοράς, οπτικών ινών στο CO και το BBU.

Μελλοντικά αναμένεται να ενσωματωθούν κανάλια 100 MHz με M-MIMO, τα οποία θα έχουν ως αποτέλεσμα την τεράστια ανάγκη επιπλέον χωρητικότητας στο fronthaul. Αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο για τις τεχνολογίες οι οποίες βασίζονται στο CPRI και μπορεί να οδηγήσει στην εφαρμογή της συμβατικής τεχνολογίας analog radio over fiber (A-RoF) και των μεθόδων της, που εμπίπτουν στην κατηγορία του αναλογικού mobile fronthaul (a-MFH).

Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι τα παρακάτω:

- Η κυματομορφή μεταφέρεται απευθείας στην ίνα με την αρχική της συχνότητα και χωρίς να υποστεί καμία μετατροπή. Αυτή είναι η πιο παραδοσιακή προσέγγιση στην μεταφορά μέσω οπτικών ινών. Στο εμπόριο συναντάται σε περιπτώσεις απομακρυσμένων κεραιών ή κατανεμημένων συστημάτων κεραιών (Distributed Antenna Systems).
- Η κυματομορφή μεταφέρεται στην ίνα αφού έχει υποστεί μετατροπή σε μία χαμηλότερη συχνότητα. Αυτή η μέθοδος ακολουθείται συνήθως, όταν θέλουμε να συσσωρεύσουμε πολλές κυματομορφές στην ίδια ίνα, μέσω Frequency Division Multiplexing (FDM)
- Άλλες μέθοδοι, οι οποίες περιορίζονται προς το παρόν σε επίπεδο έρευνας.

Από τις τρεις παραπάνω προσεγγίσεις, φαίνεται πως αυτή που ταιριάζει περισσότερο στις απαιτήσεις fronthauling για 5G δίκτυα είναι η δεύτερη μέθοδος (αναφέρεται και ως IF-over-Fiber), καθώς επιτρέπει την πολυπλεξία πολλών ραδιο-καναλιών, μέσω της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (digital signal process-DSP) και συσσωμάτωσης στην ίνα.

4.3 A-RoF και D-RoF

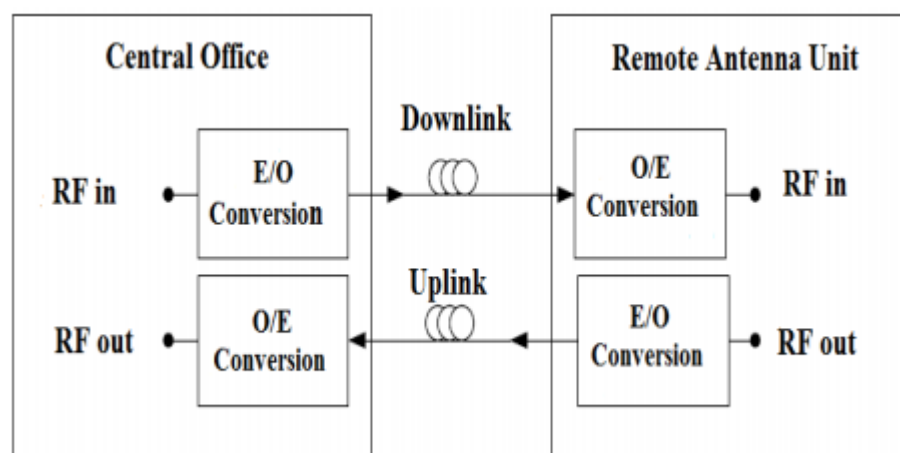
Δίχως καμία αμφιβολία αξίζει να αναφερθούμε εκτενώς, σε έναν βασικό τρόπο μετάδοσης, την μετάδοση μέσω οπτικής ίνας (Radio over Fiber-RoF). Το RoF χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, το A-RoF που υλοποιήθηκε πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 90 και το D-RoF που αναπτύχθηκε στις αρχές του 2000 αξιοποιώντας τους συνδέσμους μετάδοσης μεταξύ των απομακρυσμένων σταθμών βάσης και των κεραιών.

Η εκθετική αύξηση των συσκευών νέας γενιάς σε συνδυασμό με τον ολοένα και αυξανόμενο αριθμό των χρηστών όπως έχει προαναφερθεί, δημιουργεί μία κολοσσιαία αύξηση της κίνησης στα δίκτυα κινητής. Η παροχή αξιόπιστων ασύρματων συνδέσμων υψηλής χωρητικότητας, αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους παρόχους και σε τεχνολογικό αλλά και σε οικονομικό επίπεδο.

Ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος για να συμβεί αυτό, σύμφωνα με τον τομέα της τεχνολογίας και της έρευνας, είναι η μείωση του μεγέθους του κάθε κελιού, έτσι ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα στο δίκτυο κινητής. Μια τέτοια προσέγγιση όμως θα έχει μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο όσον αφορά την υλοποίηση του εγχειρήματος.

Για τους παραπάνω λόγους η βιομηχανία στράφηκε στις τεχνικές RoF, που αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση στα υφιστάμενα προβλήματα. Η μετάδοση μέσω οπτικής ίνας, ουσιαστικά σημαίνει ότι πραγματοποιείται μετάδοση πληροφοριών μέσω της ίνας, διαμορφώνοντας το φως με το ραδιο-σήμα. Αυτή η διαμόρφωση μπορεί να γίνει απευθείας με το ραδιο-σήμα ή σε μια ενδιάμεση συχνότητα. Η ανάγκη για αυξημένη χωρητικότητα οδηγεί σε υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας (πάνω από 6 GHz) και σε μικρότερα κελιά, ειδικά σε εσωτερικές

εφαρμογές που οι υψηλές συχνότητες λειτουργίας αντιμετωπίζουν μεγάλες απώλειες λόγω των τοίχων του εκάστοτε κτιρίου.



Εικόνα 4.3 Αρχιτεκτονική συστήματος Radio over Fiber [πηγή 37]

4.3.1 A-RoF

Είναι γνωστό ότι η υλοποίηση του Fronthaul, έχει τις βάσεις της πλέον στην τεχνολογία του Digital Radio over Fiber (ψηφιοποιημένη μετάδοση σε ίνα, D-RoF), το οποίο αποτέλεσε βασικό παράγοντα στη ανάπτυξη και την εξέλιξη του CPRI. Παρόλα αυτά, ένα μείζον πρόβλημα με αυτήν την τεχνολογία είναι η ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση εύρους ζώνης, ειδικά αν ληφθεί υπ' όψιν ότι για την μετάδοση ψηφιοποιημένων κυματομορφών, χρησιμοποιεί τους διαθέσιμους πόρους.

Μία εναλλακτική μέθοδος υλοποίησης του Fronthaul λοιπόν, είναι η τεχνική μετάδοσης αναλογικού RF σήματος μέσω ίνας (αναλογική μετάδοση σε ίνα, A-RoF) που έχει το πλεονέκτημα ότι προσφέρει απεριόριστο εύρος ζώνης, εξοικονόμηση κόστους και περιορισμό της καθυστέρησης αφού μειώνεται η χρήση δαπανηρών ψηφιακών διεπαφών και απλοποιείται το σύστημα στην πλευρά της μονάδας RRU.

Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στην λογική της απόσχισης του φυσικού εξοπλισμού επεξεργασίας σήματος από τις κεραίες και η εγκατάστασή τους σε μία η περισσότερες απομακρυσμένες τοποθεσίες στο backhaul. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η δημιουργία μονάδων κινητών σταθμών βάσης, για τις οποίες δαπανηρές συσκευές όπως ταλαντωτές ραδιοσυχνοτήτων, μπορούν να συγκεντρωθούν μεταξύ πολλαπλών κελιών.

Το A-RoF χρησιμοποιεί γραμμικούς συνδέσμους οπτικών ινών για τη μετάδοση και τη διανομή σημάτων ραδιοσυχνοτήτων (RF) από το CO. Αυτό επιτρέπει υλοποιήσεις των κεραιών να είναι εξαιρετικά απλές, επειδή πρέπει να περιέχουν μόνο οπτικοηλεκτρονικές συσκευές μετατροπής και ενισχυτές.

Αναλυτικότερα το αναλογικό σήμα που μεταδίδεται μέσω της ίνας μπορεί να είναι ραδιοκυματικής συχνότητας(RF), ενδιάμεσης συχνότητας(IF) ή και βασικής ζώνης(BB). Το σήμα θα διαμορφωθεί με άμεση ή εξωτερική διαμόρφωση και θα μεταδοθεί μέσω της ίνας.



Εικόνα 4.4 Σύστημα αναλογικής μετάδοσης σε ίνα A-RoF [πηγή 70]

Το σχήμα καθιστά φανερή την απλότητα σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος καθώς απουσιάζουν μετατροπείς από αναλογική σε ψηφιακή μορφή και αντίστροφα καθώς και μετατροπείς συχνότητας.

Έχει ενδιαφέρον να σταθούμε λίγο πιο αναλυτικά στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εν λόγω τεχνολογία. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι:

- **Κόστος:** Η ηλεκτρική διανομή σημάτων μικροκυμάτων υψηλής συχνότητας, είτε σε ελεύθερο χώρο, είτε μέσω γραμμών μεταφοράς είναι προβληματική και δαπανηρή. Επομένως, η διανομή ραδιοσημάτων υψηλής συχνότητας ηλεκτρικά σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί ακριβό εξοπλισμό. Αυτό λύνεται με την μετατροπή και μετάδοση σε οπτικό σήμα.
- **Μεγάλο εύρος ζώνης:** Οι οπτικές ίνες προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης. Υπάρχουν τρία κύρια παράθυρα μετάδοσης, τα οποία προσφέρουν χαμηλή εξασθένηση, δηλαδή τα μήκη κύματος 850 nm, 1310 nm και 1550 nm.

- **Ανοσία σε παρεμβολές:** Η ανοσία έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι μια πολύ ελκυστική ιδιότητα των οπτικών ινών επικοινωνίας, ειδικά για μετάδοση μικροκυμάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή τα σήματα μεταδίδονται με τη μορφή φωτός μέσω της ίνας. Λόγω αυτής της ανοσίας, τα καλώδια ινών προτιμώνται ακόμη και για βραχείες συνδέσεις σε mm-Waves.
- **Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση:** Σε συστήματα A-RoF, ο πολύπλοκος και ακριβός εξοπλισμός διατηρείται στην αρχή της υλοποίησης, καθιστώντας έτσι τις κεραιές απλούστερες. Συγκεκριμένα, ο εξοπλισμός διαμόρφωσης και αλλαγής διατηρείται σε μια απομακρυσμένη περιοχή και μοιράζεται από πολλές κεραιές. Αυτή η λογική οδηγεί σε μικρότερα και πιο απλά συστήματα, μειώνοντας αποτελεσματικά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος.

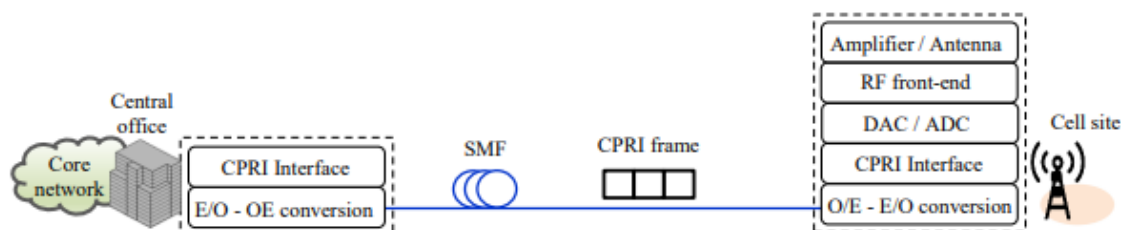
Παρά τα, αρκετά είναι η αλήθεια, πλεονεκτήματα του A-RoF υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί. Δεδομένου ότι το A-RoF περιλαμβάνει αναλογική διαμόρφωση και ανίχνευση φωτός, είναι ουσιαστικά ένα αναλογικό σύστημα μετάδοσης. Επομένως, οι βλάβες σήματος όπως ο θόρυβος και η παραμόρφωση λόγω της εμφάνισης γραμμικών και μη γραμμικών φαινομένων που αλλοιώνουν την ποιότητα του σήματος, είναι σημαντικές στα συστήματα A-RoF. Οι παραμορφώσεις αυτές επηρεάζουν τη χρωματική διασπορά της ίνας, ενώ τα μη γραμμικά προϊόντα συχνοτικής εξάρτησης περιορίζουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι βλάβες τείνουν να περιορίζουν το δυναμικό εύρος (DR) των συνδέσεων A-RoF. Το DR είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για κινητά συστήματα επικοινωνίας όπως παραδείγματος χάριν το GSM, επειδή η ισχύς που λαμβάνεται στον σταθμό βάσης από τους χρήστες κινητών ποικίλλει ευρέως. Δηλαδή, η ισχύς RF που λαμβάνεται από έναν χρήστη που είναι κοντά στον σταθμό βάσης μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από την ισχύ RF που λαμβάνεται από έναν χρήστη που βρίσκεται αρκετά χιλιόμετρα πιο μακριά, αλλά χρησιμοποιεί το ίδιο κελί.

4.3.2 D-RoF

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, το A-RoF παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σε μια υλοποίηση, έχει και κάποια πολύ σημαντικά μειονεκτήματα όπως η περιορισμένη ποιότητα μετάδοσης και η απόσταση, τα οποία καθιστούν δύσκολη την ανταπόκριση στις απαιτήσεις για εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων υψηλής χωρητικότητας, όπως το Fronthaul, επειδή οι υλοποιήσεις με A-RoF έχουν πολύ περιορισμένο δυναμικό εύρος και επηρεάζονται σημαντικά από μη γραμμικές διαταραχές του συστήματος.

Αντίθετα, το D-RoF παρέχει ψηφιακά ραδιοσήματα μέσω ινών, τα οποία είναι λιγότερο ευαίσθητα στις μη γραμμικές παραμορφώσεις και επομένως επιτρέπουν μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης και καλύτερη ποιότητα σήματος. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ψηφιοποίηση του RF σήματος και άρα περιλαμβάνεται η διαδικασία της δειγματοληψίας. Η διαμόρφωση του ψηφιακού σήματος ελαχιστοποιεί τις μη γραμμικότητες που προέρχονται από τις μετατροπές οπτικού σε ηλεκτρικό. Το δυναμικό εύρος διατηρείται και είναι ανεξάρτητο του μήκους διάδοσης. Όλες οι λειτουργίες μπορούν και πάλι να συγκεντρωθούν στους κεντρικούς σταθμούς και οι σταθμοί βάσης να έχουν απλό σχεδιασμό και άρα χαμηλό κόστος. Επιπλέον έχοντας το σήμα σε ψηφιακή μορφή μπορεί αυτό να υποστεί άμεσα Digital Signal Processing (DSP) χωρίς πρόσθετες μετατροπές ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η συμβατότητα με άλλα συστήματα.



Εικόνα 4.5 Σύστημα ψηφιακής μετάδοσης σε ίνα D-RoF [πηγή 70]

Από τη άλλη πλευρά το αρνητικό αυτού του συστήματος είναι η μεγάλη πολυπλοκότητα που έχουν τα ηλεκτρικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται τόσο πριν από τη διάδοση στην ίνα όσο και μετά. Επιπροσθέτως υπάρχει χαμηλή απόδοση εύρους ζώνης, δεδομένου ότι το σύστημα χρησιμοποιεί τους διαθέσιμους

πόρους για τη μετάδοση ψηφιοποιημένων κυματομορφών. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα που έχει προταθεί, είναι η χρήση αλγορίθμων συμπίεσης του CPRI, οι οποίοι όμως αυξάνουν κι άλλο την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ακόμα η χρήση συσκευών υψηλής απόδοσης DAC (Digital-to-Analog) και ADC (Analog-to-Digital) που βρίσκονται στα BBU και τα RRH συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση του κόστους της D-RoF υλοποίησης.

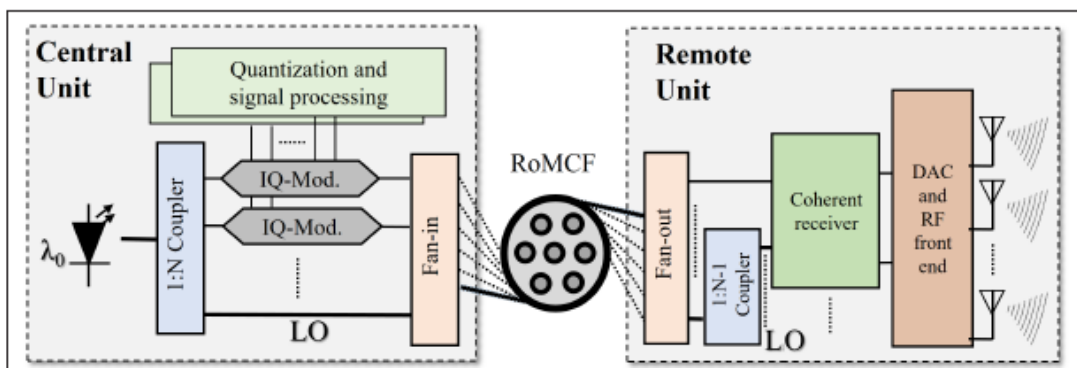
Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι κατά την τοποθέτηση λειτουργιών επεξεργασίας σήματος στην κεντρική μονάδα, το σύστημα απαιτεί υψηλή χωρητικότητα μετάδοσης λόγω του μεγάλου αριθμού των bit. Για παράδειγμα, ένας ιστότοπος με 25 κανάλια 5G απαιτεί ρυθμό σύνδεσης 101,38 Gb / s για CPRI σε ασύρματες επικοινωνίες. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα χρειάζεται μεγάλη χωρητικότητα για τη συγκέντρωση των καναλιών.

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι λύσεων για την επίλυση του προβλήματος χωρητικότητας ενός ψηφιακού συστήματος RoF που χρησιμοποιεί κωδικοποίηση παλμού (π.χ. CPRI):

- Υλοποίηση συνδέσμου μετάδοσης υψηλής ταχύτητας (A-RoF)
- Χρήση συμπιεσμένης κωδικοποίησης για τη μείωση των γενικών εξόδων που προκαλούνται από την κωδικοποίηση και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του φάσματος. (D-RoF)

Από την άλλη στις μελλοντικές ευρυζωνικές ραδιοφωνικές υπηρεσίες όπου το Massive MIMO (multiple-input multiple-output) αναμένεται να εφαρμόσει active phased array antennas (APPA) με μέγεθος συστοιχίας κεραιών 128 και άνω, οι αντίστοιχοι ρυθμοί στο CPRI θα φθάσουν τα 0,5 Tb / s ανά τομέα. Επιπροσθέτως, για τον λόγο του ότι μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από ένας τομέας ανά κελί, ανάλογα με το σενάριο ανάπτυξης, ο απαιτούμενος ρυθμός στο CPRI μπορεί εύκολα να φθάσει στο επίπεδο terabit, το οποίο σχεδόν δεν υποστηρίζουν οι υπάρχουσες ψηφιακές λύσεις RoF. Η έρευνα λοιπόν για ένα ψηφιακό σύστημα RoF terabit, έχει μεγάλη σημασία για τη μελλοντική παροχή υπηρεσιών.

Η λύση που προκρίνεται είναι το ψηφιακό Radio over Multi-Core fiber (RoMCF). Το Multicore fiber (MCF), παρέχει πολύ υψηλότερη πυκνότητα εύρους ζώνης σε σύγκριση με τις συμβατικές ίνες ενός πυρήνα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το προτεινόμενο ψηφιακό σύστημα RoMCF, το οποίο διανέμει τα ραδιοσήματα από την κεντρική μονάδα στην απομακρυσμένη μονάδα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται το downstream ενώ το upstream ακολουθεί την ίδια αρχή λειτουργίας, αλλά με την αντίθετη σειρά.



Εικόνα 4.6 Σύστημα RoMCF [πηγή 33]

Η λογική λειτουργίας είναι η εξής: Στο CO, από τη στιγμή που τα σήματα ψηφιοποιούνται, κατανέμονται σε διαφορετικούς οπτικούς διαμορφωτές εξοπλισμένους με διαφορετικά μήκη κύματος και διαφορετικούς πυρήνες MCF. Τα ψηφιακά σήματα συνδέονται με τη μονάδα Fan-in που είναι συνδεδεμένη στο MCF και μεταδίδονται μέσω του MCF στην απομακρυσμένη μονάδα. Στην απομακρυσμένη μονάδα, τα σήματα SDM αποπλέκονται πρώτα μέσω της μονάδας Fan-out και στη συνέχεια προωθούνται σε διαφορετικές διεπαφές ραδιοσυχνότητας.

Με την ψηφιοποίηση ραδιοφωνικών σημάτων, τα αποτελέσματα επιδείνωσης της παρεμβολής και της εξασθένησης από τη σύνδεση των ινών μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Επιπροσθέτως οι προηγμένες μονάδες επεξεργασίας σήματος για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και του συντονισμού μπορούν να τοποθετηθούν στην κεντρική μονάδα, την οποία μοιράζονται οι απομακρυσμένες μονάδες στο δίκτυο.

Τέλος για την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, η διαίρεση μήκους κύματος (WDM) θα μπορούσε επίσης να εισαχθεί στο σύστημα RoMCF, με την εγκατάσταση ενός πολυπλέκτη μήκους κύματος και ενός αποπολυπλέκτη. Με αυτόν τον τρόπο, συγκεκριμένα μήκη κύματος και πυρήνες μπορούν να εκχωρηθούν σε διαφορετικούς τελικούς χρήστες (π.χ. απομακρυσμένες ραδιοφωνικές μονάδες σε 4G και 5G) για σύνδεση με το CO.

Για τους παραπάνω λόγους η υλοποίηση του Fronthaul, βασίζεται ως επί το πλείστον στο ψηφιακό RoF και κατ'επέκτασιν στο CPRI. Παρακάτω θα αναλυθεί εκτενώς το πρωτόκολλο του CPRI που βασίζεται σε παλμούς κωδικοποίησης και έχει τυποποιηθεί για τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων μεταξύ της κεντρικής μονάδας και της απομακρυσμένης μονάδας.

4.4 CPRI και eCPRI

Η κεντροποιημένη λογική, διευκολύνει την εγκατάσταση ασύρματων BS σε διαφορετικά μέρη. Η σύνδεση μεταξύ των BBU και των RRH, πραγματοποιείται κανονικά μέσω της ψηφιακής ραδιοεπαφής που επιτρέπει τη μετάδοση σήματος μέσω της οπτικής ίνας. Τα RRH συνδέονται με τα BBU μέσω ενός πρωτοκόλλου υψηλής ταχύτητας, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των ψηφιακών κυματομορφών των ασύρματων σημάτων.

Τα δύο διαθέσιμα de-facto πρότυπα που έχουν γραφτεί από δύο διαφορετικές κοινοπραξίες του κλάδου, ονομάζονται CPRI (Common Public Radio Interface) και OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative). Στη συγκεκριμένη εργασία, θα ασχοληθούμε κυρίως με το CPRI, καθώς αποτελεί την ευρέως υιοθετημένη προδιαγραφή για τη διεπαφή fronthaul, λόγω των αποτελεσματικών μεθόδων χαρτογράφησης.

Με λίγα λόγια, το CPRI είναι μια διεπαφή ανοιχτού κώδικα, που αναπτύχθηκε από κοινού από όλες τις μεγάλες εταιρείες στο χώρο των δικτύων, το οποίο διευκολύνει πάρα πολύ την διαμοιρασμένη αρχιτεκτονική, αφού επιτρέπει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (10 Gbit/s), υψηλό συγχρονισμό και μικρό

ρυθμό σφαλμάτων (10-12) μεταξύ απλών κεραιών (RRH - Remote Radio Heads), μέσω των οποίων συνδέεται ο χρήστης στο RAN.

Το CPRI, λοιπόν, καθορίζει τις προδιαγραφές, όσον αφορά τη διεπαφή μεταξύ του Radio Equipment Control (REC) και του Radio Equipment (RE) και σε φυσικό επίπεδο (L1) και σε επίπεδο δεδομένων (L2) για τη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ τους. Ολόκληρες οι παραπάνω λειτουργίες, καθώς και οι περισσότερες από αυτές του PHY, εκτελούνται από το REC. Διαδικασίες όπως, η παραγωγή ράδιο-σήματος, η δειγματοληψία και η μετάδοση των δεδομένων που προκύπτουν στο RE εκτελούνται επίσης από το REC. Η λειτουργική διαίρεση REC / RE διασφαλίζει ότι ουσιαστικά δεν απαιτούνται λειτουργίες ψηφιακής επεξεργασίας στα RRHs. Έτσι, αυτή η προσέγγιση καθιστά τα RRHs πολύ οικονομικά. Επιπλέον, η κεντρική επεξεργασία σήματος στο BBU διευκολύνει την υιοθέτηση προηγμένων σχημάτων όπως το CoMP, το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη επεξεργασία ράδιο-σήματος πολλών RRH.

Τέλος, το CPRI ως ψηφιακό πρωτόκολλο δεν βασίζεται σε πακέτα, αλλά σε πολυπλεξία σημάτων χαμηλής καθυστέρησης. Οπότε, το CPRI προσφέρει σχεδόν μηδενικό jitter, όπου jitter είναι οι στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος, σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στον χρόνο, ενώ επιπλέον με το CPRI το BER (Bit Error Rate) τείνει στο μηδέν.

Έτσι λοιπόν η χρήση η ενός απλού πρωτοκόλλου όπως είναι το CPRI ή το OBSAI για το DRoF επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνικής C-RAN, θέτοντας όμως ως αντίβαρο τις πολύ υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης στους οπτικούς συνδέσμους. Για τις μελλοντικές ζώνες κύματος χιλιοστών των 5G δικτύων, οι οποίες θα χρησιμοποιούν ράδιο-ζώνες αρκετών εκατοντάδων MHz και τεράστια MIMO, η χρήση CPRI κρίνεται ως μη βιώσιμη. Για τον λόγο αυτό, έπρεπε να διερευνηθούν νέες εναλλακτικές, οι οποίες είναι εστιασμένες κατά βάση στη μείωση του απαιτούμενου ρυθμού bit στον σύνδεσμο fronthauling.

Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση είναι η λύση του "λειτουργικού διαχωρισμού" (functional split) η οποία έχει καθιερωθεί με το ακρωνύμιο eCPRI.

Αναφέροντας μόνο τη βασική αρχή της προσέγγισης split, χωρίς να μπούμε σε λεπτομέρειες, η φιλοσοφία εστιάζεται στη μετακίνηση μόνο ενός μέρους του πρωτοκόλλου βασικής ζώνης από το RRH στα BBU και όχι στη μετακίνηση ολόκληρης της στοίβας. Έτσι, διαχωρίζονται οι λειτουργίες που πρέπει να παραμείνουν στο RRH, και εκείνες που μετακινούνται στα BBU.

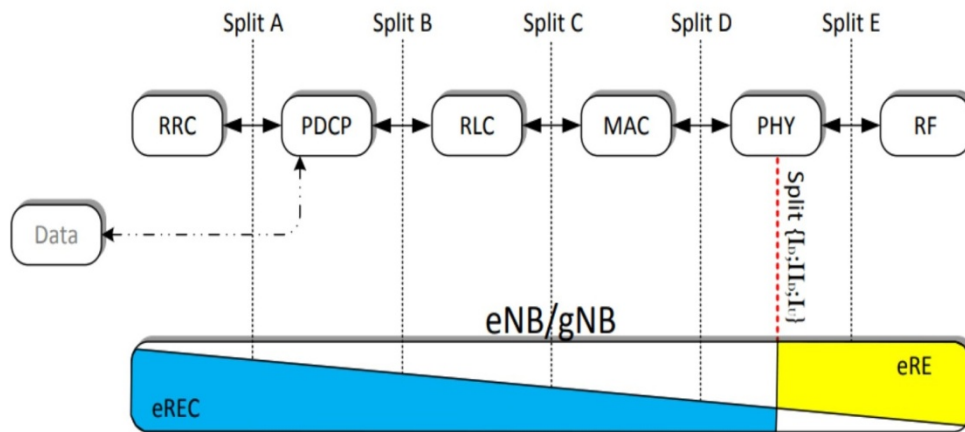
Από τη φιλοσοφία αυτή εξήχθη και ο χαρακτηρισμός "λειτουργικός διαχωρισμός". Το πρωτόκολλο eCPRI, αποσυνθέτει τη στοίβα του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί η βασική ζώνη, ξεκινώντας από το ανώτερο επίπεδο και συνεχίζει έως το φυσικό επίπεδο. Τα στρώματα τα οποία ακολουθεί, είναι τα εξής:

- Έλεγχος ράδιο-πόρων (RRC)
- Πακέτο Πρωτοκόλλου σύγκλισης δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol-PDCP)
- Έλεγχος ραδιο-συνδέσμου (RLC)
- Έλεγχος πρόσβασης (MAC)
- Φυσικό επίπεδο (PHY) που είναι το κατώτερο στρώμα που σχετίζεται με το C-RAN και που διασυνδέεται απευθείας με το επίπεδο Radio Functions (RF)

Όπως φαίνεται, η προσέγγιση eCPRI προϋποθέτει πέντε πιθανούς λειτουργικούς διαχωρισμούς (με την ονομασία "Split A" έως "Split E") που είναι λογικά τοποθετημένες κάτω από καθένα από τα προαναφερθέντα επίπεδα, κατ' αντιστοιχία.

Για παράδειγμα, ο διαχωρισμός "Split E" εφαρμόζεται λογικά κάτω από το στρώμα PHY και συμπίπτει με την προσέγγιση CPRI, με βάση την οποία η πλήρης στοίβα μετακινείται στο κεντρικό BBU. Το "Split C" αντίστοιχα κάνει διαχωρισμό, αφήνει τα PHY και MAC στο RRH και μετακινεί προς τα κεντρικά BBU μόνο τα επίπεδα RLC, PDPC και RRC.

Η χρήση του πρωτοκόλλου eCPRI μπορεί να μειώσει απαιτούμενο εύρος ζώνης μέχρι και στο 10% σε σχέση με τις απαιτήσεις του CPRI.



Εικόνα 4.7 Στοίβες πρωτοκόλλου για δίκτυα eCPRI για δίκτυα 4G ή 5G [πηγή 23]

4.5 Δίκτυο fronthaul

Το δίκτυο fronthaul, χρησιμοποιεί ένα εύρος τοπολογιών όσον αφορά τη σύνδεση μεταξύ BBU και RRH. Η σύνδεση αυτών των δύο μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων τεχνολογιών, όπως τα δίκτυα οπτικών ινών, η επικοινωνία κυβελών και η επικοινωνία μέσω κυμάτων.

Στην αρχιτεκτονική CRAN, το fronthaul δύναται να υλοποιηθεί και πάνω στην ήδη υπάρχουσα RAN υποδομή. Για να συμβεί αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως το OTN και το Ethernet. Εδώ, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει διαχωρισμός όσον αφορά τους τρόπους μετάδοσης στο fronthaul, σε ενεργές και παθητικές με βάση το αν η υποδομή απαιτεί ενεργειακή κατανάλωση ή όχι. Αν η υποδομή δεν απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό, που καταναλώνει ενέργεια σε οποιοδήποτε σημείο του fronthaul δικτύου, ονομάζεται παθητική λύση και έχει ως παράγωγο τα χαμηλά κόστη υλοποίησης και συντήρησης. Από την άλλη, η ενεργή λύση απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό σε διάφορα σημεία με αποτέλεσμα την ανάγκη υλοποίησης και συντήρησης.

Παρακάτω, παρατίθενται διάφοροι τρόποι και υποψήφιες τεχνολογίες αναφορικά με την σύνδεση RRH και BBU βασισμένες στο πρότυπο CPRI.

4.5.1 Οπτικά δίκτυα

Η επικρατούσα τάση, αναφορικά με την σύνδεση RHH και BBU είναι η τεχνολογία D-RoF, με την χρησιμοποίηση των οπτικών μέσων. Επιπροσθέτως, η πολυπλεξία μήκους κύματος WDM (Wavelength Division Multiplexing), μπορεί να εφαρμοστεί ως λύση στο πρόβλημα των αρκετών D-RoF συνδέσεων στην εκάστοτε κεραία.

Οι επιλογές οπτικών συνδέσεων που θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι εξής:

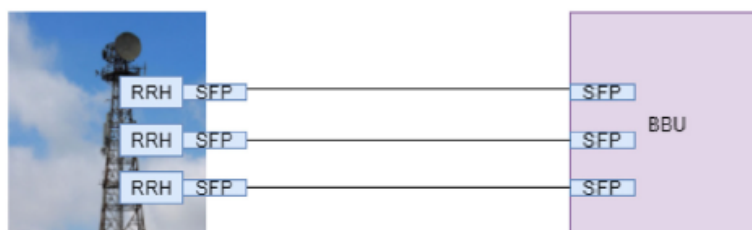
- Dedicated fiber
- Παθητικό WDM
- Ενεργό WDM
- OTN (Optical transmission network)

4.5.1.1 Dedicated fiber

Στην εν λόγω μέθοδο, κάθε Remote Radio Head συνδέεται στο Baseband Unit, μέσω μίας αποκλειστικής οπτικής ίνας με σύνδεση "σημείο προς σημείο" (Point-to-Point). Δύναται να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε πρότυπο όσον αφορά το fronthauling, αν και συνήθως προτιμάται το CPRI. Η μέθοδος αυτή κατηγοριοποιείται ως παθητική μέθοδος. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη βάση διαθέσιμων οπτικών συνδέσεων, αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται κατά κόρον. Από την άλλη πλευρά, το κόστος εφαρμογής νέων οπτικών συνδέσεων αλλά και η διαθεσιμότητα οπτικών ινών αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την συγκεκριμένη υλοποίηση.

Γενικότερα, διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα με κύριο το ότι δεν απαιτεί κάποιον επιπλέον εξοπλισμό στο δίκτυο, με αποτέλεσμα και την αποφυγή επιπλέον κόστους αλλά και την απλότητα της υλοποίησης. Λόγω αυτού, οι καθυστερήσεις μετάδοσης (latency) που προκαλούνται από το fronthaul δίκτυο είναι μηδενικές. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν μεγάλες προκλήσεις, αναφορικά με τον επιπλέον εξοπλισμό που χρειάζεται για την παρακολούθηση (monitoring), ενώ ο αριθμός οπτικών ινών που απαιτούνται είναι πάρα πολύ μεγάλος.

Παρακάτω, παρουσιάζεται σχηματικά, η μέθοδος που αναλύθηκε πιο πάνω, με οπτικές ίνες να συνδέονται στις αντίστοιχες υποδοχές SFP (Small Form-Factor Pluggable), σε RRH και BBU. Λόγω των ανασταλτικών παραγόντων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η συγκεκριμένη μέθοδος δε χρησιμοποιείται συχνά στην πλειοψηφία των C-RAN υλοποιήσεων.

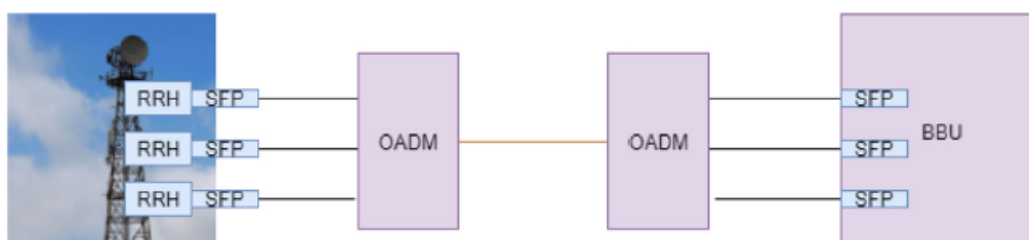


Εικόνα 4.8 Σύνδεση οπτικών ινών σε υποδοχές SFP για RRH και BBU [πηγή 26]

4.5.1.2 Passive WDM

Η μέθοδος passive WDM, εφαρμόζει την τεχνολογία της WDM δικτύωσης στο fronthaul δίκτυο. Η κίνηση δηλαδή, πραγματοποιείται σε ξεχωριστά κανάλια μήκους κύματος μέσω πομπών WDM, σύμφωνα με τους όρους της WDM τεχνολογίας.

Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η μαζική μετάδοση ενός μεγάλου αριθμού πολυπλεγμένων μηκών κύματος, μέσω ενός ελάχιστου αριθμού οπτικών ινών, χρησιμοποιώντας έναν παθητικό WDM πολυπλέκτη σε κάθε πλευρά. Όπως παρατηρούμε και στο παρακάτω σχήμα, με την εκπομπή να ξεκινάει στα RRH, τα μήκη κύματος πολυπλέκονται μέσω ενός οπτικού πολυπλέκτη OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) και μεταφέρονται μέσω μιας οπτικής ίνας, σε έναν άλλο πολυπλέκτη OADM, όπου με τη σειρά του αποπολυπλέκει τα μήκη κύματος και τα στέλνει σε ξεχωριστά SFP στο BBU.



Εικόνα 4.9 Ρόλος οπτικού πολυπλέκτη OADM [πηγή 26]

Ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μέθοδοι, όσον αφορά την WDM πολυπλεξία. Το CWDM (Coarse Wavelength

Division Multiplexing) και το DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Διαφέρουν σε διάφορα πράγματα όπως την κατανομή των καναλιών, την απόσταση μετάδοσης, το κόστος κ.ο.κ. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω του ότι είναι μια point to point μετάδοση, προτιμάται το CWDM, ενώ το DWDM χρησιμοποιείται κυρίως για μητροπολιτικά δίκτυα.

Το CWDM λοιπόν, μπορεί να πολυπλέξει και να μεταδώσει μέχρι και 16 κανάλια μήκους κύματος, μέσω μιας και μόνο οπτικής ίνας. Σε σχέση με την μετάδοση μέσω οπτικών ινών που αναλύθηκε προηγουμένως, η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πιο συμφέρουσα, καθώς μειώνονται οι οπτικές ίνες με αποτέλεσμα την μεγάλη μείωση του κόστους και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω παραθέτονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της WDM τεχνολογίας στο fronthauling.

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος της CWDM τεχνολογίας.
- Δεν χρειάζονται active εξαρτήματα, με συνέπεια να μην χρειάζεται περαιτέρω ενέργεια. Αυτό, κάνει την τοπολογία αξιόπιστη και κατάλληλη για εφαρμογή σε εξωτερικούς χώρους, όπου είναι και το ζητούμενο.
- Συντριπτική ελάττωση του αριθμού των οπτικών ινών που χρησιμοποιούνται.
- Μετάδοση 16 καναλιών μέσω μιας και μόνο οπτικής ίνας.

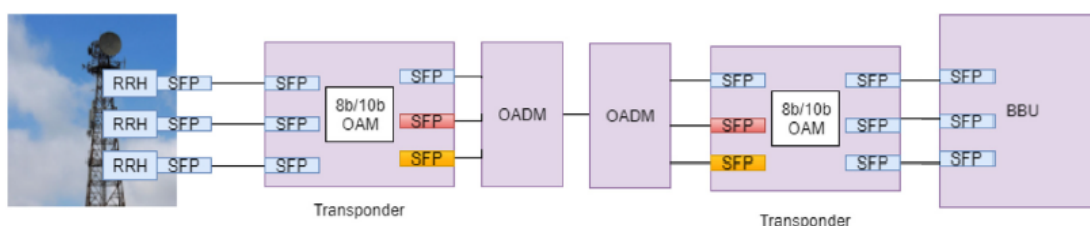
Μειονεκτήματα:

- Μη αμφίδρομη. Για κάθε σύνδεσμο επικοινωνίας, χρειάζονται δύο οπτικές ίνες.
- Αδυναμία παρεμβατικότητας σε σχέση με την διαχείριση, την λειτουργία και την συντήρηση (Operations, Administration and Maintenance, OAM). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ιχνηλάτηση, η απομόνωση και η αντιμετώπιση των σφαλμάτων, να είναι δύσκολη και ακριβή.

- Δυσκολία διάκρισης των ορίων, μεταξύ του ασύρματου σημείου πρόσβασης και του εξοπλισμού του fronthaul.

4.5.1.3 Active WDM

Στο ίδιο μήκος κύματος με το passive WDM, το active WDM βασίζεται στην ίδια λογική, όσον αφορά το fronthauling, με την μόνη διαφορά να είναι η ύπαρξη ενός ενεργού αναμεταδότη σε κάθε πλευρά, για να διευκολυνθεί η παρεμβατικότητα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.10 Ρόλος active αναμεταδότη [πηγή 26]

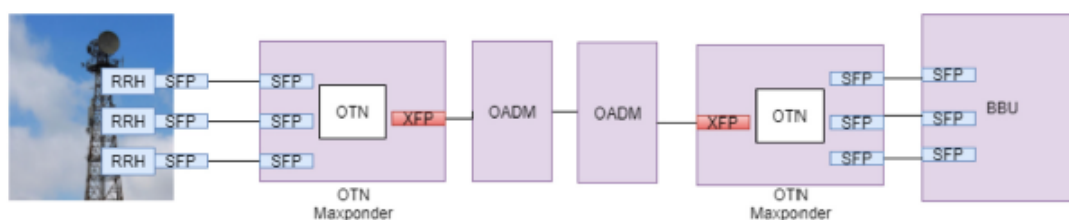
Με αυτόν τον τρόπο λύνεται το πρόβλημα της απομόνωσης και επίλυσης σφαλμάτων, με παράγωγο όμως την ανάγκη για παροχή ενέργειας αλλά και την παραγωγή ασύμμετρων καθυστερήσεων (latency) στο uplink και στο downlink. Επιπροσθέτως απαιτούνται δύο οπτικές υποδοχές για τις συνδέσεις του uplink και του downlink.

4.5.1.4 OTN (Optical Transmission Network)

Η εφαρμογή του οπτικού δικτύου μεταφοράς (OTN) στο fronthaul, έφερε ένα νέο πρότυπο, όσον αφορά την μεταφορά διαφορετικών πρωτοκόλλων μέσω του οπτικού δικτύου. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται στην μετάδοση TDM-over-WDM για την χαρτογράφηση από άκρη σε άκρη (End-to-End) της κίνησης των μηκών κύματος στο fronthaul δίκτυο.

Στο παρακάτω σχήμα που περιγράφει το fronthauling χρησιμοποιώντας το OTN, βλέπουμε ότι και μετά τα RRH και πριν το BBU χρησιμοποιούνται αναμεταδότες όπως και στο ενεργό WDM, με την διαφορά ότι οι συγκεκριμένοι αναμεταδότες (Muxponders) έχουν τη δυνατότητα, σήματα τα οποία έχουν κατανεμηθεί ιεραρχικά σε υποδοχείς χαμηλού επιπέδου, να τα πολυπλέκουν (και κατ' επέκταση να

αποπολυπλέκουν), να τα μετατρέπουν σε σήματα υψηλότερου επιπέδου, και να τα μεταφέρουν μέσω καναλιών μήκους κύματος.



Εικόνα 4.11 Εφαρμογή OTN στο Fronthaul [πηγή 26]

Η αρχιτεκτονική ομοιάζει με την ενεργή WDM, με δύο διαφορές. Το OTN βασίζεται σε προτυποποιημένη τεχνολογία (από τη διεθνή ένωση τηλεπικοινωνιών ITU), ενώ επιπροσθέτως εφαρμόζει την τεχνολογία της πολυπλεξίας σημάτων με σκοπό την μείωση των μηκών κύματος που απαιτούνται για μια μετάδοση.

Συνολικά, στο OTN γίνεται μεγαλύτερη χρήση οπτικών ινών αλλά υπάρχει μείωση των οπτικών συσκευών. Ακόμη, δίνεται η δυνατότητα της ιχνηλάτησης σφαλμάτων ανά σήμα (OAM), αλλά και του FEC (Forward Error Correction), κάτι που επιτρέπει την εφαρμογή πομποδεκτών χαμηλού κόστους. Παρέχει την δυνατότητα υποστήριξης πολλών υπηρεσιών, κάνοντας δυνατή την εφαρμογή πολλών προτύπων όπως τα CPRI, Gigabit Ethernet, Synchronous Optical Network (SONET)/ Synchronous Digital Hierarchy (SDH) κ.ο.κ. στην ίδια υλοποίηση.

Επιπλέον, μπορεί να υποστηρίξει και DWDM μετάδοση, όπου μέσω μίας και μόνο οπτικής ίνας μπορούν να μεταδοθούν μέχρι και 90 μήκη κύματος αμφίδρομα.

Από την άλλη πλευρά, όπως και στη μετάδοση με ενεργό WDM, υπάρχει πρόβλημα στη παραγωγή ασύμμετρων καθυστερήσεων (latency) από τον υφιστάμενο εξοπλισμό, κάτι που αποτελεί μεγάλη πρόκληση στη συγκεκριμένη μέθοδο. Επίσης, η ενέργεια που απαιτείται αλλά και τα εν γένει κόστη των OTN συσκευών, αποτελούν ισχυρούς ανασταλτικούς παράγοντες ως προς την εφαρμογή αυτής της μεθόδου από τους εμπλεκόμενους φορείς, ειδικά για μικρότερες σε μέγεθος υλοποιήσεις. Παρ' όλα αυτά, το OTN είναι μία μέθοδος που έχει προοπτική εξέλιξης μακροπρόθεσμα και μπορεί υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις να αποτελέσει επιλογή.

Συνοπτικά, παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τις μεθόδους οπτικού fronthaul που αναλύθηκαν, για τα θετικά και τα αρνητικά τους.

Πίνακας 4-1 Μέθοδοι οπτικού Fronthaul [πηγή 26]

Optical fronthaul/transport options.			
Fronthaul options	Technology description	pros	cons
Dedicated fiber	<ul style="list-style-type: none"> Data signals are transported without encapsulation Passive solution 	<ul style="list-style-type: none"> No additional cost for transmission equipment No need for power supply at the radio site 	<ul style="list-style-type: none"> Requires a lot of fibers Extra equipment for monitoring
Passive CWDM	<ul style="list-style-type: none"> Use colored SFP at the BBU and RRH together with CWDM to channelize the fiber 	<ul style="list-style-type: none"> Use few fibers No power is needed (high reliability and suited for outdoor deployment) low cost for CWDM 	<ul style="list-style-type: none"> No native Operations, Administration and Maintenance (OAM) Not bidirectional (2 fibers per link)
Active WDM	<ul style="list-style-type: none"> Use WDM transponders or muxponders to extend the supportable distance 	<ul style="list-style-type: none"> Offer ring or point-to-point with additional protection schemes 	<ul style="list-style-type: none"> Need special attention to synchronization support and latency for correct transportation
OTN	<ul style="list-style-type: none"> Use OTN muxponders to transport fronthaul flows 	<ul style="list-style-type: none"> Bidirectional High efficiency fiber sharing 	<ul style="list-style-type: none"> Power supply required Risk on performance (latency and performance)

4.5.2 Μικροκυματική τεχνολογία

Τα μικροκύματα μπορούν να είναι μια υποψήφια τεχνολογία, για CPRI μετάδοση κοντινών αποστάσεων μεταξύ RRH και BBU, όταν δεν είναι διαθέσιμες οι οπτικές ίνες. Αποτελούν μία αναδυόμενη και ελπιδοφόρα προσέγγιση, όσον αφορά τα ετερογενή δίκτυα. Η μετάδοση πραγματοποιείται σε συχνότητες 70-80 GHz. Λόγω των υψηλών συχνοτήτων, η μετάδοση δεν μπορεί να γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά με δεδομένο ότι οι συστάδες μικροκελιών σε αστικά περιβάλλοντα βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα.

Η λογική βασίζεται στα άλματα μικρού μήκους μεταξύ των συστάδων μικροκελιών των κεραιών και βρίσκει πεδίο υλοποίησης σε περιοχές όπως τα στάδια, οι πανεπιστημιούπολεις και τα συναυλιακά κέντρα, μέρη δηλαδή που δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί υλοποίηση με οπτική ίνα.

Εν συγκρίσει με άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες, η μέθοδος C-RAN με μικροκύματα, διακρίνεται για την ταχύτητα της υλοποίησης, το συνολικό κόστος της ιδιοκτησίας, καθώς και για την μεγάλη ευελιξία. Η πλειονότητα των νέων υπηρεσιών και εφαρμογών, έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις στον τομέα της χωρητικότητας, αλλά

και της μετάδοσης “σημείο προς σημείο” ως προς την ταχύτητα. Συγκεκριμένα στο LTE είναι της τάξης των 10ms, ενώ στο δίκτυο 5G πέφτει στο 1ms.

Επιπροσθέτως, η υλοποίηση όλο και περισσότερων κελιών, η εισαγωγή νέας αρχιτεκτονικής και τοπολογίας και η χρήση όλο και μεγαλύτερου φάσματος, για λόγους χωρητικότητας και αποφυγής ασύμμετρων καθυστερήσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, η μικροκυματική τεχνολογία θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται κατά κόρον και με την ίδια επιτυχία για πολλές δεκαετίες ακόμα.

Παρά ταύτα, υπάρχουν και κάποιες προκλήσεις στην προσέγγιση αυτή. Αυτές είναι οι εξής:

- Χαμηλό εύρος κάλυψης/απόστασης: 1km η και λιγότερο.
- Εύρος ζώνης (bandwidth) : Δύναται να υποστηρίξει έως και το επίπεδο 3 του CPRI (Rate-3).
- Εξωτερικοί παράγοντες επιρροής: Μεγάλη ευαισθησία σε καιρικές συνθήκες.

Μαζί με την εξέλιξη των ασύρματων δικτύων όπως το 5G, η μικροκυματική τεχνολογία έχει ραγδαία και συνεχή εξέλιξη στους τομείς του bandwidth, του συνολικού κόστους και της καθυστέρησης. Μέχρι και πρόσφατα, μέσω μικροκυμάτων μπορούσε να γίνει μεταφορά 2.5 Gbps CPRI σε C-RAN δίκτυο, ενώ στο μέλλον μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10 Gbps.

4.5.3 FSO (Free Space Optical)

Το FSO είναι μια εναλλακτική οπτική τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κινητό fronthaul.

Σε αντίθεση με την τεχνολογία της μετάδοσης μέσω οπτικών ινών, που η εφαρμογή της εξαρτάται ως επί τω πλείστων από την διαθεσιμότητα των εγκατεστημένων καλωδίων οπτικής ίνας, η τεχνολογία FSO εκμεταλλεύεται τον ελεύθερο ενδιάμεσο χώρο που δημιουργείται κατά την μετάδοση, αλλά και την λήψη για την μετάδοση σημάτων RF. Έτσι, με γνώμονα το ότι δεν χρειάζεται κάτι

περαιτέρω από άποψη υποδομής, η τεχνολογία αυτή είναι πλεονεκτική σε σύγκριση με μια τυπική τεχνολογία οπτικών ινών στους τομείς του κόστους και του χρόνου.

Εξάλλου, ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του FSO είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές, όπου η σύνδεση μέσω καλωδίων οπτικών ινών δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη ή σε αγροτικές περιοχές που δεν διαθέτουν υποδομές οπτικών ινών. Λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων του όπως, η ευκολία εφαρμογής, το υψηλό bit rate, η διπλή μετάδοση, η ασφάλεια μετάδοσης κ.ο.κ, έχει αναγνωριστεί ως τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης που δύναται να καλύψει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης διαφόρων υπηρεσιών των κυψελοειδών συστημάτων. Επιπλέον, στο κομμάτι που μας ενδιαφέρει, αποτελεί ελκυστική λύση για το fronthaul και το backhaul σε ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο σύστημα, η μετάδοση γίνεται στον ελεύθερο χώρο, επομένως, η μεταδιδόμενη οπτική δέσμη ενδέχεται να αντιμετωπίσει ως ένα βαθμό προβλήματα απορρόφησης. Επιπλέον υπάρχει και η ατμοσφαιρική απορρόφηση, η οποία είναι συνάρτηση του μήκους κύματος. Κατά συνέπεια, το μήκος κύματος μετάδοσης κυμαίνεται στα 750-850 nm και 1520-1600 nm με συγκριτικά ελάχιστες απορροφήσεις που αμβλύνουν τις απώλειες απορρόφησης της ατμόσφαιρας. Επιπροσθέτως, οι ζώνες αυτές δεν έχουν άδεια (license-free) και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

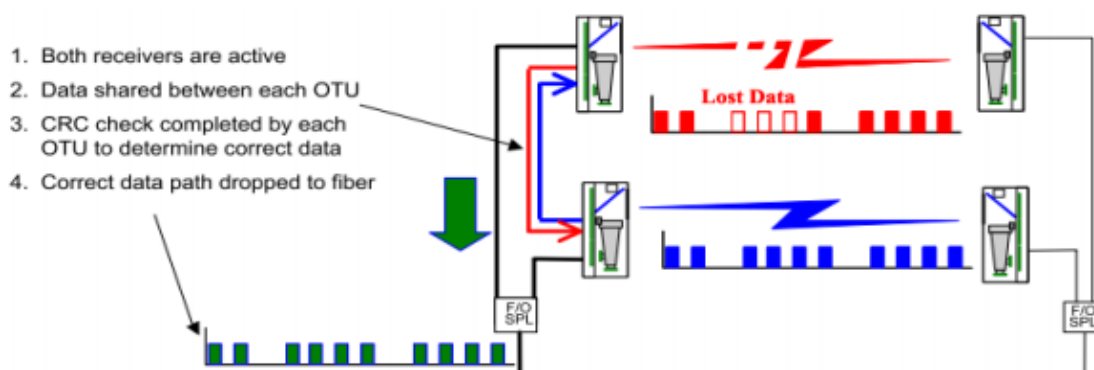
Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί που εμποδίζουν το FSO από το να είναι μια αποτελεσματική αυτόνομη λύση για το fronthaul. Είναι ευαίσθητο στις τοπικές καιρικές συνθήκες και στις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής αναταραχής, όπως ο σπινθηρισμός (μια λάμψη φωτός, η οποία παράγεται σε ένα διαφανές υλικό, από τη διέλευση ενός σωματιδίου) που επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος. Η ατμοσφαιρική αναταραχή οφείλεται στις διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης του αέρα κατά μήκος της διαδρομής μετάδοσης, που τελικά οδηγεί στη διακύμανση της λαμβανόμενης οπτικής έντασης. Κατά συνέπεια, αυτοί οι παράγοντες κάνουν την οπτική ασύρματη τεχνολογία να μην είναι τόσο αξιόπιστη, όσο μια τυπική τεχνολογία οπτικών ινών.

4.5.4 Υβριδικό FSO/RF

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρά το γεγονός ότι το FSO αποτελεί μια ελκυστική τεχνολογία με πληθώρα πλεονεκτημάτων, η ισορροπία μεταξύ των επιθυμητών υψηλών ρυθμών δεδομένων και των περιορισμών της ατμόσφαιρας αποτελεί μείζον ζήτημα και πρόκληση που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία της εφαρμογής του στα δίκτυα πρόσβασης και κατά συνέπεια και στο να είναι μια αποτελεσματική αυτόνομη λύση για το fronthaul.

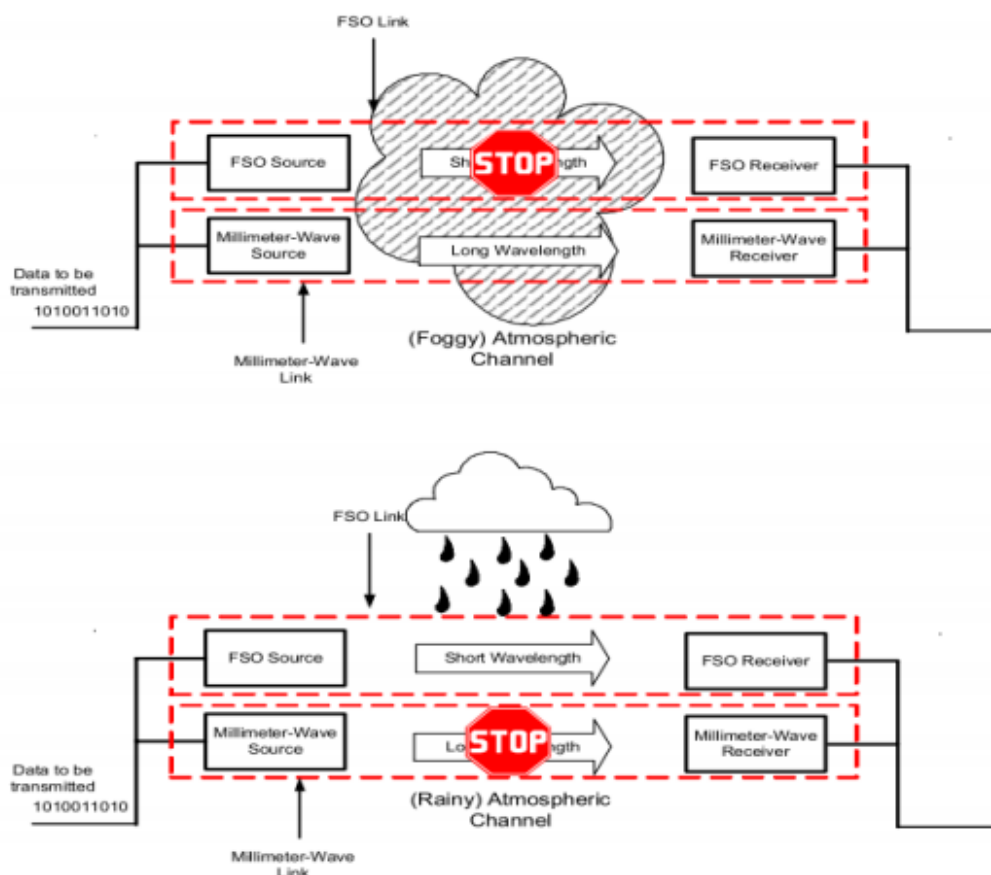
Μία ελκυστική λύση, διαθέσιμη και εμπορικά, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων διαθεσιμότητας του FSO, είναι η υλοποίηση υβριδικών πομποδεκτών. Οι υβριδικοί πομποδέκτες, αποτελούνται από ένα κλασικό πομποδέκτη FSO και από ένα δεύτερο RF. Το πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι πως σε περίπτωση διακοπής του FSO συστήματος ενεργοποιείται η RF ζεύξη, η οποία παρότι δεν μπορεί να αποδώσει του ρυθμούς μετάδοσης ενός FSO συστήματος, λόγω της ανοσίας σε καιρικά φαινόμενα, παρέχει την διαθεσιμότητα του καναλιού με μειωμένη απόδοση μέχρι την αποκατάσταση της FSO ζεύξης.

Παρακάτω, απεικονίζεται σχηματικά η υβριδική τεχνολογία RF / FSO στην οποία υπάρχουν δύο παράλληλοι σύνδεσμοι μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Θα παρατηρήσουμε ότι υπάρχει και ένας ελεγκτής CRC (Cyclic Redundancy check), όπου δουλειά του είναι να κάνει έλεγχο στα εισερχόμενα δεδομένα. Σε περίπτωση που εντοπιστεί ένα λάθος αλλάζει τη διαδρομή από το ένα σύστημα στο άλλο και αντίστροφα. Οι αλλαγές γίνονται χωρίς την απώλεια ούτε ενός bit, ενώ βάσει αυτής της τεχνικής, αντιμετωπίζονται προβλήματα αλλαγής καιρικών συνθηκών, προσωρινά εμπόδια, λάθη ευθυγράμμισης κ.ο.κ.



Εικόνα 4.12 Υβριδική τεχνολογία RF / FSO [πηγή 69]

Η λογική λοιπόν του υβριδικού συστήματος RF / FSO, είναι η ταυτόχρονη αντιμετώπιση των σχετικών αδυναμιών και η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων και των δύο τεχνολογιών. Από τη στιγμή λοιπόν που και οι δύο παράλληλοι σύνδεσμοι που προσφέρει η υβριδική τεχνολογία, είναι ικανοί να μεταδίδουν δεδομένα, τότε ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, δύναται να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους συνδέσμους για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο παρακάτω σχήμα, που συνοψίζει την λειτουργία του συστήματος σε δύο τελείως διαφορετικές καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 4.13 Αναπαράσταση καιρικών συνθηκών για RF / FSO [πηγή 68]

Επιπλέον πλεονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης, είναι πως μπορεί να γίνει συντήρηση σε κάποια από τις μονάδες χωρίς να χαθεί ποτέ η επικοινωνία, ενώ όλη η διαδικασία είναι μη αντιληπτή για τον χρήστη. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Τέτοια είναι η υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης, ειδικά στο σημείο του ελεγκτή, η ασυμφωνία των ρυθμών μετάδοσης μεταξύ FSO και RF, με το FSO να είναι ικανό για πολύ μεγάλους ρυθμούς δεδομένων, καθώς τέλος και η μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση λόγω της διπλής υλοποίησης.

Τα υβριδικά συστήματα είναι πολλά υποσχόμενα λόγω της αποτελεσματικής αντιμετώπισης των φαινομένων αποδυνάμωσης, μέχρι σημείου εξαφάνισης των οπτικών ζεύξεων λόγω καιρικών φαινομένων. Έχουν γίνει υλοποιήσεις οι οποίες παρουσίασαν την επιθυμητή διαθεσιμότητα 99,999% για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε ικανοποιητικές αποστάσεις. Συνεπώς αποτελούν ισχυρό υποψήφιο για τον τομέα του fronthauling, λαμβάνοντας υπόψιν βέβαια τα μειονεκτήματα και τις προκλήσεις που προκύπτουν.

4.5.5 Ethernet

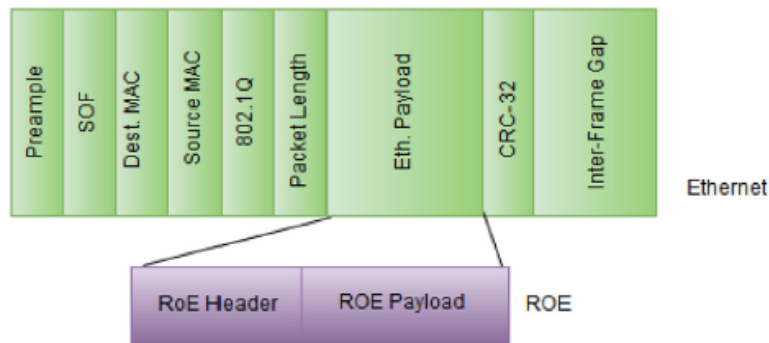
Στοχεύοντας στην ελαστικότητα του BBU-RRH fronthaul, απαιτείται ένα πρότυπο και μια τοπολογία που βασίζεται στην μεταγωγή πακέτων. Το κίνητρο πίσω από την εφαρμογή της μετάδοσης μέσω ethernet (Radio Over Ethernet-RoE), είναι η δυνατότητα μετάδοσης διαφορετικών τύπων σημάτων όπως οι τηλεφωνικές κλήσεις, το σήμα της τηλεόρασης, του ραδιοφώνου κ.ο.κ.

Τα τρέχοντα πρότυπα όπως το CPRI, ορίστηκαν αρχικά σαν μια εσωτερική διασύνδεση στον σταθμό βάσης για τη μεταφορά με ραδιοκύματα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διαμόρφωση πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, με αντιστοίχιση του μήκους των δειγμάτων, με τα δείγματα του ασύρματου συστήματος.

Για την ενθυλάκωση και κατ' επέκτασιν την μεταφορά ψηφιακών δειγμάτων ραδιοσυχνοτήτων fronthaul μέσω ethernet, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι ενθυλάκωσης. Η αγνωστικιστική μέθοδος και η ενήμερη (structure-agnostic, structure-aware). Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι στην αγνωστικιστική μέθοδο, το ψηφιακό δείγμα ραδιοσυχνοτήτων ενθυλακώνεται χωρίς να υπάρχει γνώση, όσον αφορά τα δεδομένα που μεταφέρονται, σε αντίθεση με την ενήμερη μέθοδο, που υπάρχει γνώση αναφορικά με τα δεδομένα που μεταφέρονται. Και στις δύο περιπτώσεις, η κεφαλίδα ενθυλάκωσης είναι η ίδια.

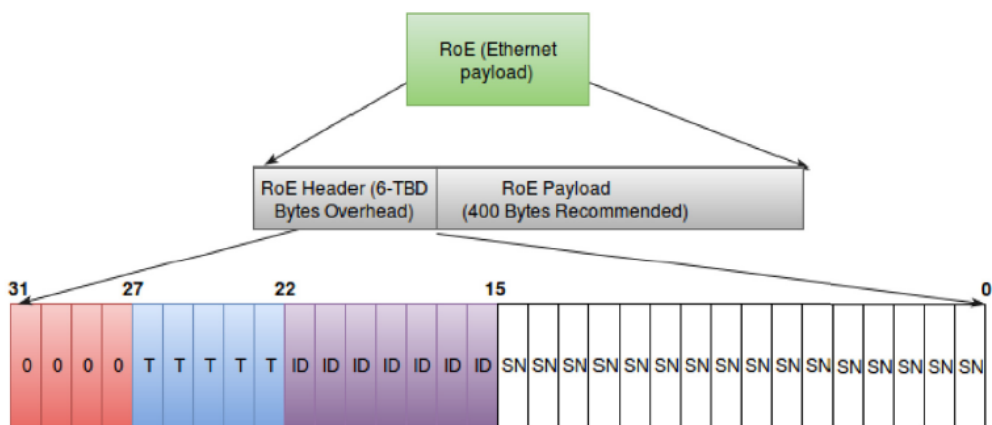
Η περίπτωση που θα εξετάσουμε, είναι η αγνωστικιστική μέθοδος. Ας ξεκινήσουμε με το fronthaul downlink, όπου τα δεδομένα ενθυλακώνονται μαζί με την κεφαλίδα ethernet στο BBU και μετά τη μετάδοση, απομπλέκεται στο RRH. Από την άλλη πλευρά, στο uplink γίνεται η αντίστροφη διαδικασία, όπου η κεφαλίδα

ethernet ενθυλακώνεται στο RRH, πραγματοποιείται η μεταφορά και απομπλέκεται από το ethernet στο BBU. Στην εικόνα παρακάτω, φαίνεται η δομή των πακέτων ethernet, ως προς την δυνατότητα υποστήριξης μετάδοσης ψηφιακών ραδιοσημάτων.



Εικόνα 4.14 Δομή πακέτων ethernet [πηγή 26]

Όπως καταδεικνύει και το παραπάνω σχήμα, ένα πακέτο στο ethernet, περιλαμβάνει το κομμάτι του φορτίου όπου μέσα, περικλείονται το RoE φορτίο και η κεφαλίδα. Αν προχωρήσουμε στην ανάλυση του φορτίου Ethernet προκύπτει το παρακάτω.



Εικόνα 4.15 Ανάλυση φορτίου ethernet [πηγή 26]

Το RoE προσθέτει κατ' ελάχιστο 6 bytes στο πακέτο ethernet. Στην παραπάνω εικόνα αναπαρίσταται η RoE μέθοδος ενθυλάκωσης, με την κεφαλίδα να είναι 32-bits σε κάθε πακέτο ethernet. Αν λάβουμε υπ' όψη, την ταυτόχρονη ύπαρξη της

επικεφαλίδα αλλά και του RoE φορτίου, σε κάθε πακέτο υφίσταται bytes ενός εύρους μεταξύ 48 και 98.

Παρακάτω, αναλύονται τα πεδία που βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα.

Έκδοση(Version): Το πεδίο version του RoE αντικατοπτρίζει την κεφαλίδα που χρησιμοποιείται. Η συγκεκριμένη προδιαγραφή, ορίζει τη τιμή στο μηδέν, όπως παρατηρείται και στο σχήμα, από το bit 31 στο bit 28. Ωστόσο, σε μελλοντικές προδιαγραφές μπορούν να οριστούν νέες εκδόσεις κεφαλίδας.

Τύπος Πακέτου (Packet type): Αυτό το πεδίο παρέχει πληροφορίες για τον τύπο των πακέτων στο RoE. Για παράδειγμα, ο τύπος πακέτου 0x00 (σε δεκαεξαδικό) είναι δεσμευμένος για τα πακέτα ελέγχου. Τα bits από 27 έως 23, όπως φαίνεται στο σχήμα, δείχνουν τον τύπο του πακέτου, που καθορίζει ποια τιμή είναι δεσμευμένη για μελλοντική επέκταση και ποια δεσμευμένη από το φορτίο. Υπάρχουν 32 διαφορετικοί τύποι διαθέσιμοι, ενώ μερικοί από αυτούς διαθέτουν επιπλέον κεφαλίδες. Από τους 32, στον παρακάτω πίνακα, αναφέρονται μερικοί δειγματοληπτικά.

Πίνακας 4-2 Τύπος πακέτων RoE [πηγή 26]

pkt_type(in hexadecimal)	Function
0x00	Control packet
0x01	Structure agnostic packet
0x02	Antenna flow
0x03	Vendor specific flow
0x04	Antenna control
0x05	Slow C and M

Αριθμός αναγνώρισης ροής (flow ID): Το πεδίο αναγνώρισης ροής, περιέχει έναν αριθμό αναγνώρισης για την ροή των πακέτων RoE. Αναπαρίσταται ως ακέραιος αριθμός μεταξύ 0x0 και 0x7f. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν 128 διαθέσιμοι αριθμοί αναγνώρισης στην κεφαλίδα του RoE. Το σημαντικό πλεονέκτημα που παρέχει η ύπαρξη του πεδίου αυτού, αφορά την πολυπλεξία μεμονωμένων ροών RoE μεταξύ του ζεύγους διευθύνσεων πηγής και προορισμού. Για παράδειγμα υπάρχει δυνατότητα πολλαπλές κεραιές, να υπάγονται πίσω από μία και μόνο διεύθυνση MAC. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπεται η διάσπαση των πολυπλεγμένων

ρών από το υποκείμενο δίκτυο, με την προϋπόθεση ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μηχανισμός πολυπλεξίας. Δεν υπάρχουν πληροφορίες δρομολόγησης στο επίπεδο ethernet, ενώ αναγνωρίζεται και ερμηνεύεται μόνο από τις εφαρμογές τελικού σημείου. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή και προορισμός, είναι στο ίδιο επίπεδο αριθμητικά όσον αφορά τους αριθμούς αναγνώρισης ροής.

Αριθμός ακολουθίας (Sequence number): Το πεδίο αυτό αποτελείται από πακέτα 32 bit. Αρχικοποιείται από το 0 και αυξάνεται κατά ένα σε κάθε αποστολή πακέτου ανεξάρτητα από το περιεχόμενο. Αυτό σημαίνει ότι οι αριθμοί ακολουθίας δεν περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία των δεδομένων στη ροή, αλλά μεταφέρουν τις πληροφορίες μέσα στο πλαίσιο. Ένας τυπικός τρόπος καθορισμού του αριθμού ακολουθίας, είναι ένας μετρητής byte, στον οποίο η τιμή μετρητή σχετίζεται με το πρώτο byte στο πακέτο. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται εφικτή η κατανόηση των δεδομένων που υφίσταται μέσα στο πλαίσιο.

Φορτίο (Payload): Το περιεχόμενο αυτού του πεδίου ποικίλει ανάλογα με τον τύπο RoE. Η μορφή και το περιεχόμενο του πακέτου εξαρτάται από τον τύπο του πακέτου (Packet type).

Παρά τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου, υπάρχουν και ορισμένα προβλήματα και προκλήσεις που είναι αναγκαίο να διευθετηθούν ώστε να αποτελέσει ρεαλιστική επιλογή για το fronthaul.

Ειδικότερα, με το ethernet τα δεδομένα μεταδίδονται διακεκομμένα χωρίς να υπάρχει σταθερή ροή. Κατά την μετάδοση λοιπόν, ένας σύνδεσμος ethernet μπορεί να παραμείνει αδρανής όταν δεν υπάρχει πλαίσιο προς επεξεργασία. Έτσι, ο συγχρονισμός των κόμβων στον σύνδεσμο ethernet με σκοπό την εκμετάλλευση των στιγμών αδράνειας, αποτελεί μεγάλη πρόκληση στο κινητό fronthaul.

Επίσης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το RoE προσθέτει το λιγότερο 6 bytes σε ένα πακέτο ethernet. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός πλαισίων ανά πακέτο ethernet συμβάλει καθοριστικά στην αύξηση της επιβάρυνσης (overhead). Όταν ο αριθμός των πλαισίων ανά πακέτο είναι μεγαλύτερος από τα μικρά πακέτα ethernet, υπάρχει πολύ μεγάλη επιβάρυνση. Λαμβάνοντας υπόψιν και τις κεφαλίδες που προστίθενται από το ethernet και το RoE, είναι πιθανόν να υπάρχει ένα σύνολο από

48 έως 98 bytes ανά πακέτο (εξαρτάται και από την επιβάρυνση που προστίθεται από το RoE).

4.5.6 Δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό (SDN) στο fronthaul

Η δικτύωση ορισμένη από το λογισμικό, είναι μία αναδυόμενη τεχνολογία, που διαχωρίζει το επίπεδο των δεδομένων από το επίπεδο του ελέγχου, με σκοπό την παροχή του ελέγχου του δικτύου σε έναν ελεγκτή SDN. Ο διαχωρισμός αυτός, δημιουργεί μια δυναμική, προσαρμόσιμη, οικονομική και εύκολα διαχειρίσιμη αρχιτεκτονική που παρέχει στους διαχειριστές πρωτοφανή αυτοματισμό και έλεγχο.

Το SDN θεωρείται ως ένας από τους πολύ σημαντικούς παράγοντες για τα δίκτυα 5G από τους εμπλεκόμενους, καθώς διευκολύνει την εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου (Virtualization of Network Function-VNF). Αυτό παρέχει την δυνατότητα της λειτουργίας πολλών εικονικών δικτύων, πάνω σε μία εγκατεστημένη φυσική υποδομή.

Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο των οπτικών δικτύων, καθορισμένων από το λογισμικό (Software Defined Optical Networks-SDONs), επικεντρώθηκαν στο επίπεδο της υποδομής, στο επίπεδο του ελέγχου και στο επίπεδο των εφαρμογών. Προσδιόρισαν τις προκλήσεις και τα προβλήματα του SDON και σκιαγράφησαν τις μελλοντικές κατευθύνσεις σε αυτόν τον τομέα. Για την υποστήριξη, λοιπόν, και του λειτουργικού δικτύου και της υπηρεσίας του τελικού χρήστη οι μελετητές κατέληξαν σε μία συγκλίνουσα 5G δικτυακή υποδομή, όπως προτάθηκε από το EU 5G PPP στη μελέτη 5G-XHaul.

Για την υλοποίηση ενός οικονομικά αποδοτικού, ευέλικτου και ευμετάβλητου μέλλοντος στο εν λόγω πεδίο, προτάθηκε ένα σύστημα 5G, το 5G-Crosshaul. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εφαρμόζει μια διαχείριση βασισμένη σε SDN, έναν φορέα ενορχήστρωσης και έναν φορέα προώθησης πακέτων βασισμένο στο ethernet που υποστηρίζει μια ποικιλία προφίλ ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) κίνησης στα πεδία fronthaul και του backhaul.

Ακόμη, έχει προταθεί ένα ενοποιημένο δίκτυο πρόσβασης που περιλαμβάνει τόσο καλωδιακά, αλλά και ασύρματα δίκτυα πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας και

χρησιμοποιεί την υβριδική υποδομή δικτύου καλωδιακών ινών (Hybrid Fiber Coaxial-HFC). Ο όρος αυτός αναφέρεται στην βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, ως ένα ευρυζωνικό δίκτυο, που συνδυάζει οπτικές ίνες και ομοαξονικό καλώδιο. Έτσι, η συγκεκριμένη υποδομή χρησιμοποιείται σαν δίκτυο οπτικού fronthaul για ασύρματες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας.

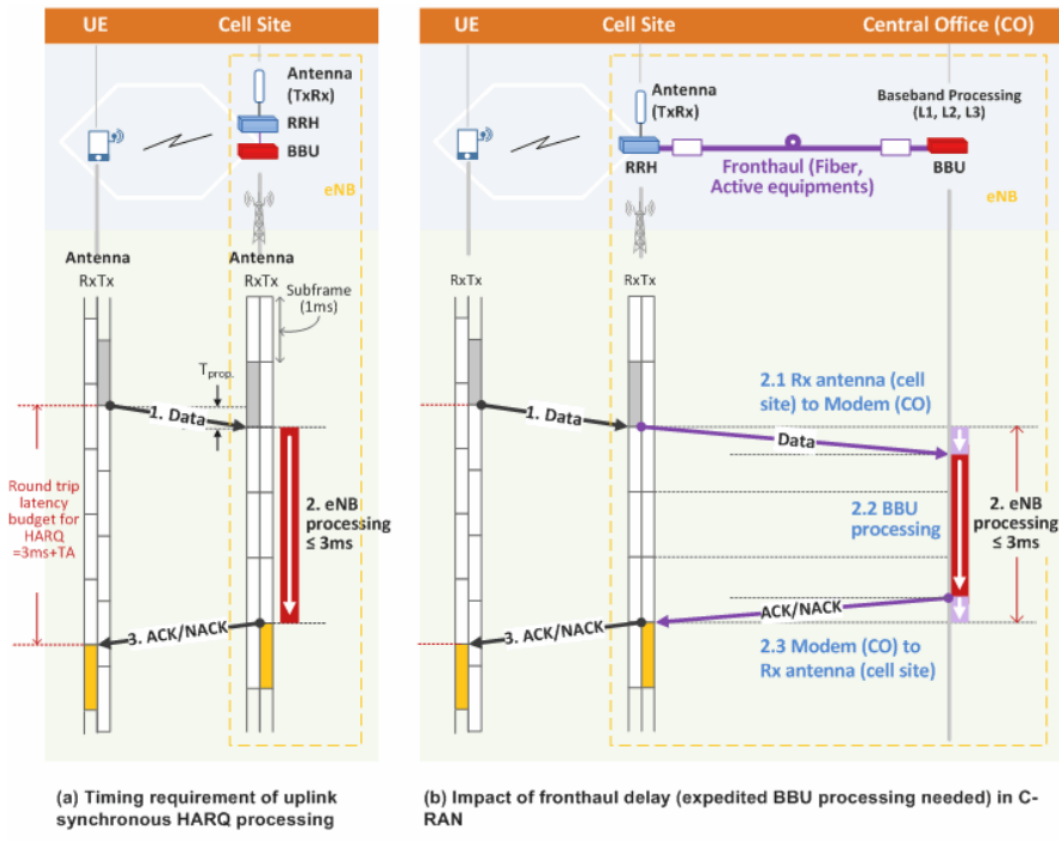
Επιπλέον, μια άλλη έρευνα εξέτασε εις βάθος τη σύγκλιση του μελλοντικού κινητού fronthaul, με το δίκτυο πρόσβασης. Στη συγκεκριμένη έρευνα, παρουσιάστηκε ο τρόπος μεταφοράς του σήματος CPRI μέσω του C-RAN και αναλύθηκαν οι λύσεις πάνω σε αυτό. Ενώ επιπροσθέτως, παρουσιάστηκε ένας νέος διαχωρισμός μεταξύ RRH και BBU αναφορικά με την λειτουργία τους, κάτι που αποτελεί σημαντική καινοτομία στο πεδίο της επέκτασης των υφιστάμενων τεχνολογιών.

4.6 Καθυστέρηση μεταφοράς (latency) και αποστάσεις RRH-BBU

Παρουσιάζει σίγουρα ενδιαφέρον, το να επεκταθούμε σε κάποια αριθμητικά δεδομένα όσον αφορά τον χρόνο αποστολής δεδομένων σε ένα σύστημα, τις καθυστερήσεις που προκύπτουν και του λόγους για τους οποίους γίνεται αυτό, αλλά και τις αποστάσεις που μπορούν να υπάρχουν μεταξύ RRH και BBU.

Σε ένα C-RAN, όσο περισσότερα RRH καλύπτονται από ένα CO, τόσο λιγότερα COs απαιτούνται και ταυτόχρονα όλο και περισσότερα BBU χρειάζονται. Επομένως, στόχος είναι η αρτιότερη αξιοποίηση των BBU, με αποτέλεσμα το κόστος (CAPEX/OPEX) να μειώνεται. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντική η απόσταση μεταξύ RRH και BBU. Η απόσταση αυτή επηρεάζεται από τους χρονικούς περιορισμούς που επιβάλλει το HARQ (Hybrid Automatic Repeat request), το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο που συνδυάζει το FEC (forward Error Correction) και τον έλεγχο λαθών με το ARQ (Automatic Repeat request).

Έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε σχηματικά την διαδικασία.



Εικόνα 4.16 Αποστολή/Λήψη δεδομένων σε C-RAN [πηγή 42]

Παρατηρούμε παραπάνω και σε συμφωνία με τον χρονικό περιορισμό που προαναφέρθηκε, ότι ο χρήστης (UE) πρέπει να λάβει το ACK/NACK από την υλοποίηση, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και συγκεκριμένα σε 3 υποπλαίδια (subframes) από τη στιγμή της αποστολής των δεδομένων. Σε περίπτωση υπέρβασης χρόνου, ο χρήστης ξαναστέλνει τα δεδομένα. Το ACK (acknowledgement) είναι ένα σήμα που δηλώνει αναγνώριση ή λήψη μηνύματος, ως μέρος ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας, ενώ το NACK (negative-acknowledgement) είναι ένα σήμα που δηλώνει την ύπαρξη κάποιου προβλήματος σε σχέση με το μήνυμα.

Αν υποθέσουμε για παράδειγμα ότι το uplink (UL) πακέτο φτάνει στο RRH στο subframe n , τότε το BBU πρέπει να στείλει το ACK/NACK στο subframe $n+3$. Έτσι το χρονικό περιθώριο καθυστέρησης στο RRH-BBU είναι 3ms. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονισθεί ότι στο C-RAN, τα RRH και BBU μπορεί να απέχουν μεταξύ τους έως και δεκάδες χιλιόμετρα. Κατά συνέπεια, προκύπτουν επιπλέον καθυστερήσεις, όπως η καθυστέρηση μετάδοσης μέσω οπτικής ίνας, ο χρόνος

επεξεργασίας των ενεργών στοιχείων στο fronthaul δίκτυο (πχ ενεργό WDM) κατά τη μεταφορά των δεδομένων από το RRH στο BBU και αντίστροφα κ.ο.κ.

Επομένως, για να μην υπάρχει υπέρβαση των χρονικών περιορισμών, η καθυστέρηση που οφείλεται στο fronthaul πρέπει να ενταχθεί και αυτή στο όριο των 3ms. Έτσι η επεξεργασία και η αποστολή του ACK/NACK στο BBU, πραγματοποιείται σε χρόνο 2.75ms, ώστε τα υπόλοιπα 250μs να αφιερωθούν στο δίκτυο fronthaul. Η εξίσωση που δείχνει τον συνολικό χρόνο ενός ολοκληρωμένου κύκλου αποστολής και λήψης (RTT) είναι η εξής:

$$RTT_{\text{BBU-RRH}} = 2\tau + t_{\text{RRH,UL}} + t_{\text{BBU,UL}} + t_{\text{BBU,DL}} + t_{\text{RRH,DL}} \leq 3\text{ms}$$

Όπου τ είναι οι καθυστερήσεις που προκύπτουν από το δίκτυο fronthaul. Παρακάτω, παρουσιάζονται δύο αναλυτικοί πίνακες, οι οποίοι παρέχουν όλη την πληροφορία αναφορικά με τις καθυστερήσεις που προκύπτουν από όλα τα κομμάτια της υλοποίησης, αλλά και τις τιμές που αφορούν τις καθυστερήσεις στο δίκτυο fronthaul

Πίνακας 4-3 Υλοποίηση διαδικασίας δικτύου fronthaul [πηγή 42]

1. RRH to BBU	2. BBU/CPRI processing	3. BBU to RRH
1.1. RRH/RF processing(UL)	2.1. BBU processing	3.1. Transmission delay (RRH to BBU)
1.2. RRH/CPRI/tx/rx processing(UL)	2.2. L1: UL frame decoding	3.2. Active equipment processing(node processing)
1.3. Transmission delay (RRH to BBU)	2.3. L2: ACK/NACK creation	3.3. RRH/CPRI/tx/rx processing(DL)
1.4. Active equipment processing(node processing)	2.4. L1: DL frame creation	3.4. RRH/RF processing(DL)
	2.5. BBU/CPRI processing	

Πίνακας 4-4 Τιμές των καθυστερήσεων σε δίκτυο fronthaul [πηγή 42]

Delay components	Description	Typical values
1. Round trip RRH/RF processing time(RRH)	1.1 + 3.4	~25-40 μs
2. Round trip RRH/CPRI processing time(RRH, BBU)	1.2 + 2.1 + 2.5 + 3.3	~10 μs
3. BBU round trip processing	2.2 + 2.3 + 2.4	~2700 μs
4. Fronthaul latency (due to fronthaul equipments)	1.4 + 3.2	~40 μs(OTN encapsulation, ~few μs(Non OTN encapsulation)

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες, αλλά και τον χρονικό περιορισμό των 3ms, μπορεί να υπολογιστεί η καθυστέρηση που προκύπτει από το fronthaul, αλλά και η μέγιστη και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ RRH και BBU σε διάφορες υλοποιήσεις στο fronthaul όπως για παράδειγμα το ενεργό WDM ή η οπτική ίνα. Για το WDM συγκεκριμένα, αν αντικαταστήσουμε στην πιο πάνω εξίσωση τις τυπικές τιμές που περιέχει ο παραπάνω πίνακας και λαμβάνοντας υπόψιν την OTN

ενθουλάκωση, τότε η καθυστέρηση που θα προκύψει στην για Round trip RRH/RF processing time=40μs είναι:

$$\text{Min RTT (fronthaul)} = 3\text{ms} - (40\ \mu\text{s} + 10\ \mu\text{s} + 2700\ \mu\text{s} + 40\ \mu\text{s}) = 210\ \mu\text{s}$$

Άρα, αν διαιρεθεί το Min RTT με την καθυστέρηση που προκύπτει από τον κάθε σύνδεσμο, τότε προκύπτει η ελάχιστη απόσταση που μπορούν να απέχουν τα RRH-BBU.

$$\text{Minimum fiber distance} = 210\ \mu\text{s} / 10\ \mu\text{s/km} = 21\ \text{km},$$

Αντίστοιχα, για Round trip RRH/RF processing time=25μs, μπορεί να βρεθεί το Max RTT (fronthaul) και η μέγιστη απόσταση RRH-BBU.

$$\text{Max RTT (fronthaul)} = 3\text{ms} - (25\ \mu\text{s} + 10\ \mu\text{s} + 2700\ \mu\text{s} + 40\ \mu\text{s}) = 225\ \mu\text{s}$$

και

$$\text{Maximum fiber distance} = 225\ \mu\text{s} / 10\ \mu\text{s/km} = 22,5\ \text{km}$$

Τα αποτελέσματα επίσης μπορούν να διαφοροποιηθούν, αν για παράδειγμα δεν υπάρχει η καθυστέρηση που αφορά την ενθουλάκωση OTN. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης, αν λόγου χάριν αντί για 40μs, υπάρχει καθυστέρηση της τάξεως των 3-4μs σε αυτό το κομμάτι. Από την άλλη, στην υλοποίηση με οπτική ίνα (dedicated fiber) δεν υπάρχει καθυστέρηση μετάδοσης, καθώς δεν διαθέτει κάποιον επιπλέον εξοπλισμό στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, οι σχέσεις για την υλοποίηση με οπτική ίνα παίρνουν την εξής μορφή.

$$\text{Min RTT (fronthaul)} = 3\text{ms} - (40\ \mu\text{s} + 10\ \mu\text{s} + 2700\ \mu\text{s} + 0\ \mu\text{s}) = 250\ \mu\text{s}$$

και

$$\text{Minimum fiber distance} = 250\ \mu\text{s} / 10\ \mu\text{s/km} = 25\ \text{km}$$

Για άλλες υλοποιήσεις και συγκεκριμένα για το ethernet, η καθυστέρηση επηρεάζεται από άλλες παραμέτρους, όπως ο χρόνος διάδοσης των πακέτων στον σύνδεσμο, ο χρόνος που απαιτούν οι διεργασίες που εμπλέκονται στην προώθηση πακέτων (π.χ. ενθουλάκωση) ή οι καθυστερήσεις που προκύπτουν από την ουρά εξόδου των πακέτων μέχρι να αποσταλούν. Συνεπώς, η καθυστέρηση στο ethernet

είναι μεταβαλλόμενη. Όταν ένα πακέτο δεν συναντήσει κανένα άλλο στην ουρά, τότε η καθυστέρηση είναι η μικρότερη δυνατή ή αλλιώς Delay min και δίνεται από το άθροισμα της καθυστέρησης που αφορά τις διεργασίες και την καθυστέρηση που εμπίπτει στη διάδοση πακέτων στον σύνδεσμο. Αν τελικά το πακέτο συναντήσει ένα ή περισσότερα πακέτα στην ουρά, η καθυστέρηση αυτή προστίθεται στο άθροισμα και από το εν λόγω άθροισμα προκύπτει το Delay max.

Συνοψίζοντας λοιπόν και με βάση ό,τι αναλύθηκε παραπάνω, το μέλλον στον τομέα του fronthauling φαντάζει λαμπρό, καθώς με τις νέες μελέτες που πραγματοποιούνται καθημερινά, προκύπτουν λύσεις στα υφιστάμενα προβλήματα και προκλήσεις αλλά και νέες προοπτικές για την αξιοποίηση εναλλακτικών τεχνολογιών στον τομέα αυτό.

Κεφάλαιο 5 Μελέτες και υλοποιήσεις παρόχων και εταιρειών

5.1 Εισαγωγή

Αναμφίβολα, εκτός από την επιστημονική έρευνα που έχει οδηγήσει σε ρηξικέλευθες προτάσεις και καινοτόμες λύσεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, σημείο αναφοράς αποτελεί και η ιδιωτική πρωτοβουλία των σύγχρονων εταιρειών αλλά και των πάροχων τηλεπικοινωνιών.

Εταιρείες όπως η ADVA, η Ericsson, η Cisco, η Huawei και η Nokia έχουν επενδύσει χρόνο και χρήματα στην μελέτη, την ανάπτυξη και την αξιοποίηση των ήδη υφιστάμενων τεχνολογιών σε διάφορους τομείς των τηλεπικοινωνιών και πιο συγκεκριμένα στο κομμάτι του fronthaul. Οι προσπάθειες των εταιρειών σε συνδυασμό με τους ερευνητές από τα διάφορα επιστημονικά ιδρύματα και οργανισμούς, φέρνουν όλο και πιο κοντά ένα μέλλον, που σε ό,τι αφορά τον τεχνολογικό τομέα αλλά και τις δυνατότητες που θα προσφέρονται, θα είναι πέρα από κάθε φαντασία.

Εκτός από τις εταιρείες βέβαια, καίρια βήματα στην τηλεπικοινωνιακή εξέλιξη, έχουν πραγματοποιήσει και διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι ανά την υφήλιο. Πάροχοι όπως, η Deutsche Telecom, η AT&T, η Orange και η Turk Telekom στέκονται αρωγοί στην έρευνα για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών και την μετάβαση της στην νέα εποχή.

Παρακάτω, θα γίνουν επισημάνσεις στις επιμέρους ενέργειες των εκάστοτε εταιρειών αλλά και πάροχων, ενώ επιπροσθέτως θα αναλυθούν όροι όπως οι time deterministic, time sensitive networks και edge computing και το πώς αυτοί σχετίζονται με την τελευταία γενιά δικτύων 5G.

5.2 Εταιρείες

Παρακάτω θα αναφερθούν οι ενέργειες ορισμένων εταιρειών που έχουν συμβάλει ενεργά στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών, ενώ ορισμένες από αυτές έχουν βραβευτεί για τις ενέργειες που έχουν πραγματοποιήσει.

5.2.1 ADVA

Η ADVA Optical Networking SE, όπως είναι το πλήρες όνομα της, είναι ένας ευρωπαϊκός προμηθευτής τηλεπικοινωνιών που παρέχει εξοπλισμό δικτύου για υπηρεσίες δεδομένων, αποθήκευσης, ήχου και βίντεο. Ιδρύθηκε το 1994 από τον Brian Protiva και εδρεύει στο Martinsried της Γερμανίας.

Πολύ πριν την εμφάνιση του 5G και πιο συγκεκριμένα στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, οι ιδρυνοτες της ADVA είχαν στρέψει την προσοχή τους στο κομμάτι του fronthaul, αναφέροντας ότι τα δίκτυα fronthaul θα αποτελέσουν σε συνεργασία με το Backhaul ένα ουσιαστικό βήμα προς τα πραγματικά αυτοκαθορισμένα RAN.

Στα μέσα λοιπόν της δεκαετίας και ενώ τα σχέδια για το Backhaul και κυρίως για το fronthaul περιοριζόντουσαν από την προηγούμενη γενιά δικτύων (4G-LTE), ιδρύθηκε το 5G Infrastructure Public Private Partnership ή αλλιώς 5G PPP από την Ευρωπαϊκή Ένωση, με σκοπό την παροχή προτάσεων, λύσεων, προτύπων και εφαρμογών στον τομέα του δικτύου τηλεπικοινωνιών. Η κοινοπραξία αυτή αποτελείται από κατασκευαστικές εταιρείες, εταιρείες τηλεπικοινωνιών, τηλεπικοινωνιακούς παρόχους αλλά και ανεξάρτητους ερευνητές.

Η ADVA ως μέλος αυτής της κοινοπραξίας, στοχεύει στην παροχή βοήθειας αναφορικά με τη θέσπιση πρότυπων και κατευθυντήριων γραμμών, αλλά και στην συγγραφή από κοινού ορισμένες φορές με τους υπεύθυνους της εκάστοτε εργασίας στον τομέα της έρευνας.

Μέσα από αυτή την διαδρομή, η ADVA κέρδισε το 2018, το βραβείο “ECOC award with pioneering Ethernet technology for 5G fronthaul”, από το ευρωπαϊκό συμβούλιο οπτικών επικοινωνιών (ECOC), σε συνεργασία με την TransPacket, για την παρουσίαση της αναφορικά με την δοκιμαστική πρόταση που κατέθεσε για ένα δίκτυο ελάχιστης καθυστέρησης, όσον αφορά την κίνηση fronthaul και backhaul 10Gbit/s μέσω ενός απλού συνδέσμου Ethernet 100GbE. Για το λόγο του ότι απαιτείται ακριβής συγχρονισμός αναφορικά με την αποστολή και την λήψη, η Oscilloquartz, η οποία είναι εταιρεία της ADVA, δημιούργησε το OSA 5410, μια οικονομική αλλά αποτελεσματική συσκευή διανομής και διασφάλισης χρόνου.



Εικόνα 5.1 Συσσκευή OSA 5410 [πηγή 48]

Η συσκευή αυτή σε συνδυασμό με το fushion ip της transpacket's, κατέστησε δυνατή την χρησιμοποίηση του συνδέσμου Ethernet καθώς καλύφθηκαν οι προϋποθέσεις αναφορικά με την καθυστέρηση (latency) στο 5G fronthaul.

5.2.2 Huawei

Η Huawei Technologies είναι μια κινέζικη εταιρεία πολυεθνικής δικτύωσης και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και υπηρεσιών, η οποία εδρεύει στο Σενζέν της Γκουανγκντόνγκ. Είναι ο μεγαλύτερος κατασκευαστής τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού στον κόσμο, έχοντας ξεπεράσει την Ericsson το 2012. Ιδρύθηκε το 1987 από τον Ρεν Τσενγκφεί, πρώην μηχανικό του Λαϊκού Απελευθερωτικού Στρατού.

Η εταιρεία, παρά τα προβλήματα που έχει αντιμετωπίσει από τις ΗΠΑ στο πρόσφατο παρελθόν, έχει καταφέρει να εισέλθει με επιτυχία στην ευρωπαϊκή αγορά, με πιο πρόσφατο παράδειγμα αυτό του Μαΐου, όπου η ιταλική μονάδα της Vodafone έλαβε την προκαταρκτική έγκριση των αρχών της Ρώμης, για τη χρήση εξοπλισμού της κινεζικής Huawei στην εγκατάσταση δικτύου 5G στην χώρα. Η ιταλική κυβέρνηση ενέκρινε τη συμφωνία της Vodafone με την Huawei στα μέσα Μαΐου. Σημειώνεται πως οι ΗΠΑ έχουν στείλει μηνύματα τόσο στην Ιταλία, όσο και σε άλλες χώρες της Ε.Ε. να αποφύγουν τη συνεργασία με τις κινεζικές εταιρείες για την ανάπτυξη του δικτύου 5G.

Συγκεκριμένα στον τομέα του fronthaul η Huawei προτείνει λύσεις ανάλογες με αυτές που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, αναφορικά με την σύνδεση BBU και RRH. Λύσεις όπως το active και passive WDM, το OTN, αλλά και η οπτική ίνα προκρίνονται προς χρήση από την εταιρεία.

Εντός συνόρων, η Huawei στάθηκε αρωγός στη προσπάθεια της κινέζικης εταιρείας τηλεπικοινωνιών Liaoning για την κατασκευή ενός 5G C-RAN δικτύου fronthaul, με την χρήση του blade OTN. Το blade OTN ήρθε να δώσει λύση στο υπαρκτό πρόβλημα του κόστους εφαρμογής πολλαπλών οπτικών ινών σε ένα δίκτυο fronthaul. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία turbo WDM της Huawei και υποστηρίζει έως και 15 κανάλια πρόσβασης CPRI, καθώς εφαρμόζει την συσσωμάτωση πολλαπλών καναλιών με ελάχιστο κόστος, βοηθώντας έτσι την Liaoning Telecom να μειώσει το κόστος εφαρμογής οπτικών ινών έως και 90%.

Έτσι, η Huawei αποτελεί έναν από τους πιο δυνατούς παράγοντες σε ό,τι αφορά το 5G και το fronthaul και για την Κίνα αλλά και για τον υπόλοιπο κόσμο.

5.2.3 Ericsson

Η Telefonaktiebolaget LM Ericsson (εμπορική επωνυμία:Ericsson) είναι Σουηδική πολυεθνική εταιρεία δικτύωσης και τηλεπικοινωνιών, η οποία εδρεύει στην Στοκχόλμη. Η εταιρεία προσφέρει υπηρεσίες, λογισμικό και υποδομή στην πληροφορική και τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία για πάροχους υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών, παραδοσιακές τηλεπικοινωνίες και εξοπλισμό δικτύωσης, κινητές και σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες, υπηρεσίες υποστήριξης λειτουργιών και επιχειρήσεων, καλωδιακή τηλεόραση κ.ο.κ. Το 2018 η Ericsson είχε μερίδιο 27% στην αγορά υποδομής κινητής δικτύωσης 2G/3G/4G. Ιδρύθηκε το 1876 από τον Λαρς Μάγκνους Έρικσον.

Σε συνεργασία με την Juniper και την ECI, η εταιρεία έχει προτείνει λύσεις στους τομείς των μικροκυμάτων του routing και των οπτικών επικοινωνιών, μέσω ενός μεγάλου εύρους μηχανημάτων που έχει λανσάρει. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα του οπτικού fronthauling, το οποίο υπάγεται στο πλαίσιο των υποδομών και των υπηρεσιών που προσφέρει η Ericsson, ανέπτυξε την σειρά fronthaul 6000 που χωρίζεται σε ενεργή και παθητική.

Το fronthaul 6000 passive προσφέρει DWDM φίλτρα για 24 υπηρεσίες μέσω μιας και μόνο ίνας, υποστηρίζει κάθε τοπολογία δικτύου, ενώ καλύπτει τις απαιτήσεις κόστους. Περιέχει τα μηχανήματα fronthaul 6681, 6683, 6689, 6387, 6389, 6585, 6587, 6589.



Εικόνα 5.2 Fronthaul 6000 passive [πηγή 51]

Το fronthaul 6000 active από την άλλη πλευρά παρέχει πομπούς με την δυνατότητα παρέμβασης, κομμάτια υψηλής ευαισθησίας, υποστήριξη στα πρότυπα CPRI, OBSAI και Ethernet, ταχύτητα έως 25Gbit/s, ενώ ικανοποιεί τις απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση (<0,5 μs). Περιέχει τα μηχανήματα fronthaul 6622, 6624, 6626, 6322.



Εικόνα 5.3 Fronthaul 6000 active [πηγή 51]

5.2.4 Nokia

Η Nokia Oyj, είναι Φινλανδική πολυεθνική εταιρεία επικοινωνίας και τεχνολογίας. Ιδρύθηκε από τους Φρέντρικ Ίντεσταμ και Λέο Μέχελιν το 1865 και εδρεύει στο Κίλο

της Φινλανδίας. Η εταιρεία επικεντρώνεται σήμερα σε υποδομές μεγάλης κλίμακας των τηλεπικοινωνιών, της τεχνολογικής ανάπτυξης και της αδειοδότησης, καθώς και τις online υπηρεσίες χαρτογράφησης. Η Nokia είναι επίσης ένας σημαντικός σύμβουλος στον κλάδο της κινητής τηλεφωνίας, αφού βοήθησε στην ανάπτυξη των προτύπων GSM και ήταν, για μια περίοδο, η μεγαλύτερη εταιρεία κινητών τηλεφώνων στον κόσμο.

Για τον τομέα των τηλεπικοινωνιών και εν γένει του 5G, η Nokia διαλαλεί ότι πρόκειται για μια επανάσταση στις τηλεπικοινωνίες. Για αυτό τον λόγο αναφέρουν ότι τα δίκτυα 5G θα πρέπει να σχεδιάζονται με την λογική end-to-end, πέρα από την κινητή πρόσβαση. Μόνο τότε η ανθρωπότητα θα καταφέρει να κερδίσει το 100% από την νέα αυτή γενιά δικτύων.

Όπως έχει αναφέρει ο Τάμας Μανταράζ, marketing manager στον τομέα του Mobile Network Solutions της εταιρείας, με το 5G και αυτά που προσφέρει, το fronthaul πρέπει αντίστοιχα να προσφέρει τεράστια χωρητικότητα. Όπως τονίζει, αν για παράδειγμα το 2025 η εικονική πραγματικότητα αποτελέσει αιχμή του δόρατος για τις εταιρείες τεχνολογίας, όπως αναμένεται, δίκτυα fronthaul θα πρέπει να μπορούν να εξυπηρετήσουν χωρητικότητες επιπέδου 6,000 GB ανά χρήστη. Συνεχίζοντας, αναφέρεται και στον τομέα των καθυστερήσεων που πρέπει να μένουν σε χαμηλά έως ελάχιστα επίπεδα, αλλά και στον τομέα του κόστους.

Έχοντας εις γνώσιν λοιπόν, αναφορικά με το τι απαιτεί η σύγχρονη εποχή αλλά και το τι θα απαιτηθεί στο μέλλον, η εταιρεία επενδύει σε τεχνολογίες και λύσεις που βελτιώνουν την υφιστάμενη κατάσταση στον τομέα του fronthaul. Μία τέτοια λύση είναι και το AirFrame Fronthaul Gateway (FHGW), ένα στοιχείο του δικτύου που επιτρέπει στον χειριστή να διαχειρίζεται τις ροές κίνησης, τις συνδέσεις, την παραμετροποίηση των εκπομπών, τον συγχρονισμό, καθώς και την γενική διαχείριση πρωτοκόλλων 4G-5G, συμπεριλαμβανομένων και των CPRI, OBSAI. Ακόμη, η ανάγκη για οπτικές ίνες είναι μικρότερη, προσφέρει κεντροποιημένη λογική νέφους, ενώ επιπροσθέτως η εφαρμογή του παρουσιάζει ευελιξία, αφού μπορεί να υπαχθεί χωρικά σε ένα τυπικό C-RAN data center.

5.2.5 Cisco

Η Cisco Systems, Inc. είναι μια πολυεθνική εταιρεία με βάση το Σαν Χοσέ της Καλιφόρνια των ΗΠΑ, η οποία σχεδιάζει και εμπορεύεται ηλεκτρονικά προϊόντα, συσκευές δικτύωσης υπολογιστών και προϊόντα και υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Ιδρύθηκε το 1984 στο Σαν Φρανσίσκο, από τους Λεν Μπόσακ, Σάντι Λέρνερ, Ρίτσαρντ Τροϊάνο.

Ως κολοσσός στον τομέα της καινοτομίας και εξέλιξης των συσκευών δικτύου και αντιλαμβανόμενη την εξέλιξη των δικτύων εν γένει, η εταιρεία αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει μεγάλη πίεση στους παρόχους τηλεπικοινωνιών, για ικανοποίηση των ολόένα και αυξανόμενων απαιτήσεων της σύγχρονης εποχής σε συνάρτηση με το κόστος.

Κινούμενη λοιπόν με γνώμονα τα παραπάνω, η Cisco προτείνει την λύση της συγκεντρωτικής SDN αρχιτεκτονικής, που απλοποιεί το δίκτυο με την συσσωμάτωση των υπηρεσιών σε μια αυτόματη υποδομή που παρέχει ευελιξία, επεκτασιμότητα με σκοπό την παροχή υπηρεσιών για την εποχή του 5G αλλά και μεταγενέστερα. Τα fronthaul Routers της Cisco αποτελούν σημαντικότερα στοιχεία της αρχιτεκτονικής αυτής.

Πιο συγκεκριμένα, η σειρά NCS540 fronthaul routers υποστηρίζει υποδομές fronthaul που βασίζονται στην μεταγωγή πακέτων και προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα.

- Προώθηση πακέτων με υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση, για να ικανοποιηθούν οι ανάλογες απαιτήσεις.
- Συσσωμάτωση υπηρεσιών, για την αποφυγή δημιουργίας κίνησης πακέτων.
- Ευέλικτη και επεξεργάσιμη αρχιτεκτονική, για να μπορεί να ακολουθηθεί ενδεχόμενη εξέλιξη.
- Δυνατότητα ακριβούς συγχρονισμού.

- Αξιόπιστο end-to-end IP δίκτυο, για την απλοποίηση των διαδικασιών.
- Δυνατότητα αυτόματης διαχείρισης.
- Χαμηλό κόστος.



Εικόνα 5.4 NCS540 Fronthaul Routers [πηγή 55]

5.3 Πάροχοι και O-RAN alliance

Εκτός από τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας, παροχής τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού αλλά και τεχνολογικού εξοπλισμού γενικότερα, σημαντικό ρόλο στη ανάπτυξη, την εξέλιξη και την πρόταση λύσεων αναφορικά με το fronthaul, έχουν παίξει οι διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι ανά την υφήλιο. Εταιρείες όπως η Orange, η At&t, η China mobile και η Deutsche Telecom, η NTT DACOMO, αλλά και αρκετές ακόμα ανά τον κόσμο, έχουν επενδύσει τεράστια κεφάλαια στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, αλλά και στην βελτίωση των ήδη υπαρχόντων με σκοπό την παροχή όσο το δυνατό αρτιότερων υπηρεσιών στον πελάτη, με ταυτόχρονη αύξηση των κερδών τους φυσικά.

Κινούμενες λοιπόν προς αυτή την κατεύθυνση, οι παραπάνω εταιρείες σύνηψαν το 2018, την ORAN alliance. Η σύμπραξη αυτή, αποτελεί μια παγκόσμια προσπάθεια που έχει σκοπό να διευκολύνει την πρόσβαση στο RAN των μελλοντικών γενιών δικτύων. Επιπλέον, λόγω της ολοένα αυξανόμενης κίνησης στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών, τα δίκτυα αλλά και ο εξοπλισμός πρέπει να γίνουν

πιο ενεργειακά αποδοτικά, οδηγούμενα από το λογισμικό, εικονικοποιημένα και ευέλικτα. Έτσι, οι βασικές αρχές που καθορίζουν την ORAN alliance είναι οι εξής:

- Να οδηγήσει την βιομηχανία σε ανοικτές, δυσλειτουργικές διεπαφές και εικονικοποιημένο RAN.
- Η μεγιστοποίηση της χρήσης υλικών και πυριτίου με την λογική της κοινοκτημοσύνης και όχι ιδιοκτησίας.
- Ο καθορισμός εφαρμογών, η υιοθέτηση προτύπων οδήγησης καθώς και η εκμετάλλευση και χρήση ανοικτού κώδικα κατά περίπτωση.

Η σύναψη αυτής της συμμαχίας οδήγησε την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών σε μεγαλύτερη ανάπτυξη από την προβλεπόμενη και αναμφίβολα επηρέασε και τον τομέα του fronthauling.

Πιο συγκεκριμένα, για παράδειγμα, η Αμερικάνικη AT&T, η οποία είναι η μεγαλύτερη εταιρεία τηλεπικοινωνιών και ο μεγαλύτερος πάροχος υπηρεσιών κινητής και σταθερής τηλεπικοινωνίας συνολικά, διαθέτει επιστημονικά εργαστήρια αφιερωμένα αποκλειστικά στο 5G, που εδρεύουν στο Ρεντμοντ των ΗΠΑ και το 2019 δημιούργησε την πρώτη eCPRI (enhanced Common Public Radio Interface) σύνδεση για mmWave, χρησιμοποιώντας εξοπλισμό από την Nokia και την Samsung. Αυτό βοήθησε στην μείωση του κόστους λόγω της μείωσης των οπτικών ινών, κάνοντας τις υλοποιήσεις με mmWave πιο αποδοτικές.

Η Orange με τη σειρά της, από τα δικά της εργαστήρια στο Λαννιόν της Γαλλίας, εξέδωσε μια νέα έρευνα στις αρχές του 2021 που προτείνει μια λογική διαχωρισμού για ένα αξιόπιστο fronthaul, που θα οδηγήσει στην μείωση του εύρους ζώνης αλλά και στην ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων.

Τα παραπάνω παραδείγματα, είναι μόνο δύο από τα δεκάδες που υπάρχουν στην σύγχρονη εποχή της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών και αποτελούν παράγωγα, αν όχι αποκλειστικά σίγουρα σε μεγάλο βαθμό, της O-RAN alliance, η οποία όσο περνάει ο καιρός απαριθμεί όλο και περισσότερες εταιρείες-μέλη.

5.4 Edge computing και TSN

Εκτός από τις ενέργειες των εμπλεκόμενων παρόχων, αλλά και των εταιρειών τεχνολογίας αναφορικά με το 5G, αλλά και το fronthaul, ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποιοι όροι, πρότυπα και γενικότερα τάσεις που αξίζει να επισημανθούν .

Αναλυτικότερα, αξίζει να αναφερθεί το edge computing, το οποίο είναι ένα πρότυπο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Αναφέρεται αρκετές φορές ως Mobile Edge Computing, MEC ή Multi-Access Edge Computing και στόχος του είναι η εκτέλεση των διαδικασιών υπολογισμού και αποθήκευσης δεδομένων να πραγματοποιούνται, όσο είναι δυνατόν πιο κοντά στον τελικό χρήστη, είτε αυτός είναι ένας απλός χρήστης κινητής, είτε είναι μια εταιρεία, είτε αφορά την έξυπνη πόλη κ.ο.κ.

Λόγω του μεγάλου εύρους χρήσης, απαιτεί διάφορες εφαρμογές να αναπτύσσονται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Σε τέτοια σενάρια είναι χρήσιμη η λύση του cloud (distributed), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα περιβάλλον εκτέλεσης για εφαρμογές σε πολλά σημεία, συμπεριλαμβανομένης της συνδεσιμότητας.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του προτύπου, ή αλλιώς τοπολογίας όπως χαρακτηρίζεται, είναι ότι λόγω της μείωσης της απόστασης από τον τελικό χρήστη, οι καθυστερήσεις σχεδόν μηδενίζονται, το bandwidth είναι υψηλό ενώ επιπλέον οι διαδικασίες και η αποθήκευση δεδομένων πραγματοποιούνται με μεγαλύτερη ασφάλεια.

Ένας ακόμη όρος που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το κομμάτι της βιομηχανίας κυρίως, είναι το TSN ή αλλιώς Time Sensitive Networking. Σε Βιομηχανικό επίπεδο, η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ζήτημα υψηλότατης σημασίας όσον αφορά την αποστολή και λήψη δεδομένων.

Λόγω της εξέλιξης των συσκευών που μεταφέρουν ολοένα και περισσότερα δεδομένα διαφορετικού τύπου (τυπικά δεδομένα, πληροφορίες για ενεργειακή κατανάλωση, στατιστικά στοιχεία, ενημερώσεις για ενδεχόμενη συντήρηση κ.ο.κ) μέσω ενός δικτύου ethernet, αυξήθηκε κατά κόρον ο όγκος δεδομένων που

απαιτείται να μεταφερθούν. Έτσι, ελλοχεύει ο κίνδυνος κρίσιμα δεδομένα, τα οποία θα πρέπει να μεταφερθούν σε συγκεκριμένο χρόνο, να καθυστερήσουν επειδή το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα την δίνει το TSN. Με αυτό, γίνεται δυνατός ο έλεγχος των δεδομένων επικοινωνίας, ο συγχρονισμός και η παροχή προτεραιότητας στα δεδομένα κατά το δοκούν. Έτσι εξασφαλίζεται, όχι μόνο η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο αλλά και η ασφάλεια και πιο συγκεκριμένα η μη παρεμβολή άσχετων δεδομένων στην εύρωστη λειτουργία μιας εφαρμογής.

Το TSN, τέλος, εξασφαλίζει την αξιοπιστία και διαθεσιμότητα του δικτύου πράγμα καίριο στην σύγχρονη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας, θα κάνουμε μία σύντομη αναφορά στην κατάσταση που επικρατεί ως προς την αναβάθμιση των υποδομών στη χώρα μας, σε μία περίοδο που υποδέχεται την τεχνολογία 5G. Όπως αναφέραμε στις παραπάνω ενότητες, στις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητών επικοινωνιών, ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους ήταν σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα από τα σταθερά δίκτυα. Στα δίκτυα 5ης γενιάς είναι σημαντική η αλληλεπίδραση τους με τα σταθερά δίκτυα οπτικών ινών, καθώς οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που θα παρέχονται στους τελικούς χρήστες και η πολύ μεγάλη πυκνότητα των συνδεδεμένων ασύρματων συσκευών, θέτουν υψηλές απαιτήσεις για fronthauling, που θα πρέπει να εξυπηρετηθεί και από σταθερές δικτυακές υποδομές.

Επομένως, η ύπαρξη ενός σταθερού δικτύου οπτικών ινών, όσο το δυνατό πυκνότερου, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη και λειτουργία ενός 5G δικτύου. Συνεπώς, οι υφιστάμενες υποδομές δικτύων ηλεκτρονικών επικοινωνιών στην Ελλάδα θα πρέπει να ενισχυθούν προκειμένου να υποστηριχθούν όλα τα στάδια υλοποίησης των δικτύων 5G. Αυτό αναμένεται να αντιμετωπιστεί μέσω επενδυτικών προγραμμάτων των παρόχων, κάποια από τα οποία βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη, σε συνδυασμό με στοχευμένες δράσεις δημόσιας παρέμβασης (οι οποίες είναι σχεδιασμένες με τρόπο μεταξύ τους συμπληρωματικό). Ο συνδυασμός αυτός θα εξασφαλίσει το απαιτούμενο υπόβαθρο για την ανάπτυξη και λειτουργία των δικτύων 5G.

Επιπλέον, ο συνδυασμός σταθερών και 5G δικτύων, λόγω του γεγονότος ότι η Ελλάδα υλοποιεί αυτή τη στιγμή τα δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, αναμένεται να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση πόρων. Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για λογαριασμό του FTTH (Fiber to the Home) Council Europe, το πρόσθετο κόστος που απαιτείται, ώστε ένα υπό κατασκευή FTTH δίκτυο να μπορέσει να φιλοξενήσει και τις υποδομές 5G κυμαίνεται από 1% έως 7%, ενώ θεωρητικά το όφελος στο κόστος υλοποίησης των δικτύων 5G, λόγω του από κοινού σχεδιασμού σταθερών δικτύων και δικτύων 5G, μπορεί να υπερβεί το 65 %.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] About ITU: <http://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>.
- [2] *SELFNET – Framework for Self – Organized Network Management in Virtualized and Software Defined Network*, Jose M. Alcaraz calero & Qj Wang, University of the West of Scotland, Mario Joao Barros, Eurescom – Project Coordinator.
- [3] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D1.1: Initial specification of the systemarchitecture accounting for the feedback received from WP2/3/4*.
- [4] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D7.2 first periodic report from 1st July 2015 to30th June 2016*.
- [5] 5G-Crosshaul. The 5G Integrated Fronthaul/Backhaul, *D2.1 Detailed analysis of the technologies to be integrated in the XFE based on previous internal reports from WP2/3*
- [6] Jiannan Zhu, Stephan Pachnicke, Mirko Lawin, Stephen Mayne, Adrian Wonfor, Richard V. Penty, *First Demonstration of a WDM-PON System Using Full C-band Tunable SFP+ Transceiver Modules [Invited]*, J. Opt. Commun. Netw. 7, A28-A36 (2015).
- [7] ITU-T G.metro Draft Recommendation: *Multichannel bi-directional DWDM applications with port agnostic single-channel optical interfaces*.
- [8] IRIS, *Integrated Reconfigurable Silicon Photonic Switch EU project*, Reference: FP7-ICT-2013-11- 619194.
- [9] Chris Cole, Ilya Lyubomirsky, Ali Ghiasi and Vivek Telang: *Higher-Order Modulation for Client Optics*, IEEE Communications Magazine, March 2013.
- [10] R. Urata, C. Johnson: *High performance, low cost, colorless ONU for WDM-PON*, NTh3E.4, OFC/NFOEC 2012.
- [11] Selfnet. Deliverable 2.1, *Use Cases Definition and Requirements of the System and its Components*.
- [12] “ETSI NFV,” 2015. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/technologiesclusters/technologies/nfv>.

- [13] Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), Deliverable D3.1, Initial concepts on 5G architecture and integration.
- [14] Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC), Deliverable D5.1, *Initial multi-node and antenna transmitter and receiver architectures and schemes*.
- [15] Zbigniew Zakrzewski, *D-RoF and A-RoF Interfaces in an All-Optical Fronthaul of 5G Mobile Systems*, Institute of Telecommunications and Computer Science, UTP University of Science and Technology, Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland, February 2020
- [16] Jonathan Rodriguez, *Fundamentals of 5G mobile networks*, Instituto de Telecomunicações, Aveiro, Portugal, (2015)
- [17] R. N. Mitra and D. P. Agrawal, *5G Mobile Technology: A Survey*, ICT Express, Vol.1, Issue.3, pp. 132-137, Dec 2015.
- [18] Isiaka Ajewale Alimi , António Luís Teixeira, Paulo Pereira Monteiro, *Toward an Efficient C-RAN Optical Fronthaul for the Future Networks: A Tutorial on Technologies, Requirements, Challenges, and Solutions*, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 20, no. 1, first quarter (2018)
- [19] Afaq H. Khan, Mohammed A. Qadeer, Juned A. Ansari, Sariya Waheed, *4G as a Next Generation Wireless Network*, Department of Computer Engineering, 2009 International Conference on Future Computer and Communication
- [20] Parul Datta and Sakshi Kahiushal, *Exploration and Comparison of Different 4G Technologies Implementations: A Survey*, Panjab University Chandigarh, March 2014
- [21] Hesham A. Salman, Lamiaa Fattouh Ibrahim, Zaki Fayed, *Overview of LTE-Advanced Mobile Network Plan Layout*, 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems
- [22] Seyed Hossein Ahmadpanah, Abdullah Jafari Chashmi, Majidreza Yadollahi, *4G Mobile Communication Systems: Key Technology and Evolution*, 2016
- [23] Official public web page for CPRI specification <http://www.cpri.info/spec.html>

- [24] Roberto Gaudino, *Overview on Optical Fronthauling Technologies for Fixed-Mobile Convergence*, politecnico di torino, pp. 99-108. (2018)
- [25] Morteza Taheribakhsh, AmirHossein Jafari, Mahdi Moazzami Peiro, *5G Implementation: Major Issues and Challenges*, 25th International Computer Conference, Computer Society of Iran (CSICC), Tehran, Iran (2020)
- [26] Dawit Hadush Hailu, Berihu G. Gebrehaweria, Samrawit H. Kebede, Gebrehiwot G. Lema, Gebremichael T. Tesfamariam, *Mobile fronthaul transport options in C-RAN and emerging research directions: A comprehensive study*, School of Electrical and Computer Engineering, Ethiopian Institute of Technology-Mekelle (EiT-M), Mekelle University, Ethiopia (2018)
- [27] Haijun Zhang, Yanjie Dong, Julian Cheng, Md. Jahangir Hossain, Victor C. M. Leung, *Fronthauling for 5G LTE-U Ultra Dense Cloud Small Cell Networks*, 24 Jul 2016
- [28] Amol Delmade, Deepa Venkitesh, Ravinder D Koilpillai, *Performance comparison of optical fronthauling techniques for centralized radio access network*, Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology (2016)
- [29] Antonio de la Oliva, Jose Alberto Hernandez, David Larrabeiti, and Arturo Azcorra, *An Overview of the CPRI Specification and Its Application to C-RAN-Based LTE Scenarios*, IEEE Communications Magazine, 54 (2), pp.152-159. (2016)
- [30] Pooja jangra, Saroj behal, Manisha bangar, *Advantages and Limitation of Radio over Fiber System*, IJCSMC, Vol. 4, Issue. 5, pg.506 – 511, May 2015
- [31] Govind P.Agrawal, *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ*, Τζιόλα 2014
- [32] Χ.Καψαλης, Π.Κωττης, *ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ*, Τζιόλα 2011
- [33] Lu Zhang, Aleksejs Udalcovs, Rui Lin, Oskars Ozolins, Xiaodan Pang, Lin Gan, Richard Schatz, Ming Tang, Songnian Fu, Deming Liu, Weijun Tong, Sergei Popov, Gunnar Jacobsen, Weisheng Hu, Shilin Xiao, and Jiajia Chen, *Toward Terabit Digital Radio over Fiber Systems: Architecture and Key Technologies*, IEEE Communications Magazine, April 2019

- [34] Ahmed Haddad and Maurice Gagnaire, *Radio-over-Fiber (RoF) for Mobile Backhauling: a technical and economic comparison between Analog and Digitized RoF*, 19-22 May, Stockholm, Sweden, ONDM 2014
- [35] Zbigniew Zakrzewski, *Fronthaul optical networks working with use of the hybrid analog and digital radio-over-fiber techniques*, UTP University of Science and Technology, Institute of Telecommunications and Computer Science (2017)
- [36] D. Apostolopoulos, G. Giannoulis, N. Argyris, N. Iliadis, K. Kanta and H. Avramopoulos, *Analog Radio-over-Fiber Solutions in Support of 5G*, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece (2018)
- [37] R. Karthikeyan, S. Prakasam, *A Survey on Radio over Fiber (RoF) for Wireless Broadband Access Technologies*, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 64– No.12, February 2013
- [38] Charoula Mitsolidou, Christos Vagionas, Agapi Mesodiakaki, Pavlos Maniotis, George Kalfas, Chris G. H. Roelozen, Paul W. L. van Dijk, Ruud M. Oldenbeuving, Amalia Miliou, Nikos Pleros, *A 5G C-RAN Optical Fronthaul Architecture for Hotspot Areas Using OFDM-Based Analog IFoF Waveforms*, Department of Informatics, Aristotle University of Thessaloniki Thessaloniki, Greece- LioniX International B.V., 7500 AL Enschede, The Netherlands (2019)
- [39] Ivo Sousa , Nuno Sousa, Maria Paula Queluz, António Rodrigues Portugal, *Fronthaul Design for Wireless Networks*, Instituto de Telecomunicações, IST, University of Lisbon, 1049-001 Lisbon (2020)
- [40] Myrtil Simkó, Mats-Olof Mattsson, *5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz*, Int J Environ Res Public Health. 2019 Sep
- [41] Ajung Kim , K. Cho, J. Choi, *optical techniques for fronthaul networks*, Asia Pacific Journal of Contemporary Education and Communication Technology (APJCECT), Volume: 3, Issue: 1, (2017)
- [42] Harrison J. Son, S.M. Shin, *Fronthaul Size: Calculation of maximum distance between RRH and BBU*, NMC Consulting Group, April 01, 2014
- [43] Pankaj Sharma, *Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G*

- as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network*,
IJCSMC, Vol. 2, Issue. 8, pg.47 – 53, August 2013
- [44] Viani Solutions,2021. *What is Fronthaul*. [online] available at:<https://www.viavisolutions.com/en-us/fronthaul>
- [45] In, 2021, *Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του 5G*. [online] available at:https://www.in.gr/2019/12/05/b-science/5g-ti-einai-kai-poia-ta-xarakteristika-tou/?fbclid=IwAR0kk1mbYOEAskKCkdHZWvXiHvaKKxr9MXAZ4_jA5_X6buThTHzRubHCs7c
- [46] The president, 2019, *5G :9 + 1 πράγματα που θα αλλάξει στη ζωή μας*. [online] available at: https://www.thepresident.gr/2019/07/22/5g-9-1-pragmata-poy-tha-allaxei-sti-zoi-mas/?fbclid=IwAR1Ni3YNiBDKGb0yqztInxYP-xvfor_76eWsy-WmpRJ6HKi4lqa9hbVE0jY
- [47] Blog ADVA ,2016, *Fronthaul* . [online] available at: <https://www.blog.adva.com/en/tag/fronthaul>
- [48] ADVA,2018,*ADVA scoops ecoc award with Pioneer Ethernet technology* . [online] available at: <https://www.adva.com/en/newsroom/press-releases/20181018-adva-scoops-ecoc-award-with-pioneering-ethernet-technology-for-5g-fronthaul>
- [49] Huawei ,2021, *5G Fronthaul solution* . [online] available at: https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/33_5G_front_haul.html
- [50] China Telecom Americas,2021, *Huawei assist China Telecom to build 5G* . [online] available at: <https://www.ctamericas.com.cn/huawei-china-telecom-build-c-ran-fronthaul-network/>
- [51] Ericsson,2021,*Optical Fronthaul* . [online] available at: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/networks/ericsson-radio-system/mobile-transport/optical-fronthaul>
- [52] Ericsson, 2019, *Deutsche telekom and Ericsson top 100 Gbps*. [online] available at:<https://www.ericsson.com/en/press-releases/2019/5/deutsche-telekom-and-ericsson-top-100gbps-over-microwave-link>
- [53] Tamas Madarasz, 2020, *Putting Fronthaul at the Centre of 5G networks*. [online] available at:<https://www.nokia.com/blog/putting-fronthaul-center-5g-networks/>
- [54] Nokia, 2021 , *Airframe Fronthaul gateway*. [online] available at:<https://www.nokia.com/networks/products/airframe-fronthaul-gateway/>

- [55] Cisco, 2021, *Cisco NCS 540 Fronthaul router*. [online] available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/network-convergence-system-540-series-routers/at-a-glance-c45-743315.html>
- [56] Kevin Wollenweber, , 2020, *Evolution to Cloud Ran made easy with ciscos Fronthaul*. [online] available at: <https://blogs.cisco.com/sp/evolution-to-cloud-ran-made-easy-with-ciscos-fronthaul-solution>
- [57] O-RAN,2020, *O-RAN alliance is transforming the radio access networks industry*. [online] available at: <https://www.o-ran.org/>
- [58] Teoco, 2020, *The 5G party is about to start*. [online] available at: <https://www.teoco.com/blog/the-5g-party-is-about-to-start-whos-bringing-the-cake/>
- [59] Ty Estes, *Expanding fiber capacity with CWDM and DWDM*, Bisci fall conference and exhibition, September 2017
- [60] Ζαχαριά Αθανασία, *Μελέτη και αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνολογιών στα δίκτυα 5G*, Διπλωματική εργασία, 2016
- [61] PCMag, 2019, *5G: Νέα τεχνολογία και ανησυχίες*. [online] available at: <https://gr.pcmag.com/network/31435/5g-nea-tekhnologia-kai-anesukhies>
- [62] Qualcomm, 2020, *Everything you need to know about 5G*. [online] available at: <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>
- [63] Ayman Hoggag, *Network optimization for improved performance and speed for SDN and security analysis of SDN vulnerabilities*, Electronics technology department, Helwan University, May 2019
- [64] EMF Explained, 2013, *5G explained-How 5G works*. [online] available at: <http://www.emfexplained.info/?ID=25916#5G%20Spectrum>
- [65] Andrew Mounir Farid, Esraa Sobhy Hassan, Mohamed Ahmed Abd Elhalim, Sherif Mohamed Mahmoud, *Proposed 5G deployment scenario in Egypt*, Network planning department, Ministry of communication and information technology, May 2015
- [66] Sbmedia1, *Do you know the meaning of G, E, 2G, 3G, H, 4G mobile internet symbol* [online] available at: <http://www.sbmedia1.com/2016/11/do-you-know-meaning-of-g-e-2g-3g-h-4g>.

- [67] Pranit Eaghmare, 2019, *Mobile phone generations*
<https://educateindia.home.blog/2019/01/23/39/>
- [68] T. Kamalakis, I. Neokosmidis, a Tsipouras, S. Pantazis, and I. Andrikopoulos, “*Hybrid Free Space Optical / Millimeter Wave Outdoor Links for Broadband Wireless Access Networks*,” Pers. Indoor Mob. Radio Commun. 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th Int. Symp., pp. 1–5, 2007.
- [69] S. Bloom, C. T. Officer, and W. S. Hartley, “*The Last-Mile Solution: Hybrid FSO Radio*” no. May, pp. 1–20, 2002.
- [70] C. Liu, J. Wang, L. Cheng, M. Zhu, and G. Chang, “*Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks*”, | J. Lightw. Technol., vol. 32, no. 20, pp. 3452-3460, Oct. 2014.