



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνολογίες Radio-Over-Fiber για συστήματα 5G

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λυδία Κωστικήδου

Επιβλέπων: Αβραμόπουλος Ηρακλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος, 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνολογίες Radio-Over-Fiber για συστήματα 5G

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λυδία Κωστικίδου

Επιβλέπων: Αβραμόπουλος Ηρακλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος, 2016

.....
Λυδία Κωστικήδου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Λυδία Κωστικήδου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η τεχνολογία Radio-over-Fiber(RoF), οι απαιτήσεις που οδήγησαν στην εμφάνιση της και η αξιοποίηση της στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G. Δίνεται έμφαση στην αξιολόγηση της απόδοσης μίας συγκεκριμένης υλοποίησης σε συνθήκες διάδοσης στο πεδίο. Η πειραματική αυτή μελέτη αποτελεί τον πυρήνα της διπλωματικής.

Αρχικά μελετάται θεωρητικά η τεχνολογία RoF. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της, παρουσιάζεται η δομή ενός RoF δικτύου, εξηγούνται οι τεχνικές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται, γίνεται διάκριση σε αναλογικό και ψηφιακό RoF και αναφέρεται η βασική εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής.

Στη συνέχεια μελετώνται διαφορετικά σενάρια διάδοσης για διαφορετικά μήκη ινών και διαφορετικά σήματα προς μετάδοση. Οι μετρήσεις έγιναν τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον, στο εργαστήριο Κινητών Επικοινωνιών του ΕΜΠ όσο και σε συνθήκες πεδίου σε συνεργασία με τον ΟΤΕ. Τα σήματα πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν είτε κωδικοποιημένα με NRZ παλμούς διαφορετικών συχνοτήτων είτε προέρχονταν από HP γεννήτρια (με χρησιμοποιούμενα σχήματα διαμόρφωσης GFSK,GMSK και DQPSK) ή Gigabit Media Converter και οι αποστάσεις διάδοσης για τις οποίες έγιναν οι μελέτες ήταν 7-8m στο εργαστήριο και 250m και 45km στο ΟΤΕ Academy. Η αξιολόγηση των σεναρίων διάδοσης έγινε μέσω διαγραμμάτων φάσματος, eye diagrams αλλά και αριθμητικό προσδιορισμό των απωλειών διάδοσης. Έτσι δημιουργήθηκε μία εικόνα για την επιρροή της διασποράς και του θορύβου στο εκάστοτε σενάριο.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετώνται η χρήση της RoF τεχνολογίας (και της οπτικής τεχνολογίας ευρύτερα) στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G. Αναλύονται οι τεράστιες δυνατότητες που θα προσφέρουν και το πλήθος εφαρμογών για τις οποίες είναι απαραίτητα. Εξηγούνται οι περιορισμοί των σύγχρονων ασύρματων δικτύων που πρέπει να ξεπεραστούν και η συνεισφορά της φωτονικής τεχνολογίας ως προς αυτό. Επίσης, αναλύονται οι σχεδιαστικές αρχές και η αρχιτεκτονική των δικτύων 5G. Το συνολικό συμπέρασμα που προκύπτει για τα δίκτυα 5G είναι ότι με χρήση οπτικών λύσεων για την παροχή αυξημένου εύρους ζώνης στον τελικό χρήστη και εξαιρετικά μικρών χρόνων απόκρισης του δικτύου μεταξύ άλλων, είναι σε θέση να προσφέρουν μία πρωτοφανή ευελιξία που θα αλλάξει τελείως τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα.

Λέξεις Κλειδιά

Radio-over-Fiber(RoF), Αναλογικό/Ψηφιακό RoF (ARoF/DRoF), Ασύρματα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς 5G, Softwarization, Virtualization, Ευελιξία Δικτύου

Abstract

The purpose of this thesis is to examine Radio-over-Fiber(RoF) technology, the requirements that led to its development and its use for the creation of next generation wireless networks 5G. Emphasis is placed on evaluating the performance of a particular implementation in propagation conditions in the field. This experimental study is the core of this thesis.

The thesis begins with the theoretical examination of RoF technology. The basic issues that are presented are: advantages and limitations of this technology, main RoF network structure, modulation and multiplexing techniques that are used, discrimination of RoF technology to analog and digital and basic application of this technology.

The next chapter is about the experimental examination of RoF technology and it consists of different propagation scenarios for different optical fiber's length and different transmitted signals. Measurements were made both at experimental environment specifically at NTUA's Mobile Communications Laboratory and in field conditions in cooperation with OTE. The information signals that were used were either encoded with NRZ pulses or generated by HP Digital Signal Generator (with used modulation formats: GFSK,GMSK and DQPSK) or Gigabit Media Converter and the propagation distance was 7-8m for the laboratory study and 450m and 45km for the OTE Academy study. The evaluation of the propagation scenarios was made through spectral and eye diagrams as well as numerical determination of propagation losses. In this way somebody can see how dispersion and noise affect each propagation scenario.

The last topic of this thesis is about the use of RoF technology (and generally optical technology) at the wireless networks of fifth generation. These networks will offer huge capabilities and will help the development of a great number of applications. This thesis also describes the limitations of today's mobile networks, how photonic technology will help to overcome them and the design principles and architecture of 5G networks. The general conclusion that comes up is that next generation mobile networks combined with optical solutions for the provision of increased bandwidth to the end user and extremely small network response times among others, is able to offer unprecedented flexibility that will completely change the current state of technology .

Key Words

Radio-over-Fiber(RoF), Analog/Digital RoF (ARoF/DRoF), Next Generation Wireless Networks 5G, Softwarization, Virtualization, Network Flexibility

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία αυτή συντάχθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στον τομέα των συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κύριο Αβραμόπουλο που μου έδωσε μέσα από αυτήν την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα στον τομέα των οπτικών και ασύρματων επικοινωνιών.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Διδάκτορες Δημήτρη Αποστολόπουλο και Γιάννη Γιαννούλη για την παροχή γνώσεων και συνολικής καθοδήγησης καθ'όλη τη διάρκεια της δημιουργίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας και κυρίως για την διάθεση που υπέδειξαν για την προσφορά βοήθειας για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε κωλύματος σχετικού με αυτή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και τη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για την προσφορά χρήσιμων γνώσεων κατά τη διάρκεια όλων των χρόνων φοίτησης σε αυτό αλλά και τους γονείς και φίλους μου που ήταν μαζί μου τα χρόνια αυτά.

Περιεχόμενα

1 Η μετάβαση από τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα στα δίκτυα επόμενης γενιάς.....	
1.1 Αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης.....	15
1.2 Εντοπισμός προβλήματος στο access δίκτυο.....	18
1.3 Επίλυση προβλήματος.....	18
1.4 Επίκεντρο παρούσας διπλωματικής.....	20
2 Radio-over-Fiber τεχνολογία.....	
2.1 Τι είναι η Radio-over-Fiber(RoF) τεχνολογία;.....	21
2.2 Αίτια εμφάνισης τεχνολογίας.....	24
2.3 Πλεονεκτήματα.....	25
2.4 Μειονεκτήματα-Περιορισμοί.....	27
2.5 Δομή RoF δικτύου.....	27
2.6 Τεχνικές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας.....	29
2.6.1 Διαμόρφωση οπτικών με RF.....	29
2.6.1.1 Intensity Modulation-Direct Detection.....	29
2.6.1.2 Remote Heterodyne Detection.....	30
2.6.2 Πολυπλεξία οπτικών σημάτων σε RoF.....	31
2.6.2.1 Sub-Carrier Multiplexing.....	31
2.6.2.2 Wavelength Division Multiplexing.....	32
2.6.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing.....	32
2.7 Μορφές RoF.....	33
2.7.1 Αναλογικό RoF(ARoF).....	33
2.7.2 Ψηφιακό RoF(DRoF).....	34
2.8 Εφαρμογές RoF.....	35
3 Πειραματικές μετρήσεις.....	
3.1 Πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών.....	38
3.1.1 Αξιολόγηση για NRZ παλμούς 0.25/0.5/1GHz.....	38
3.1.1.1 Πειραματική διάταξη.....	39
3.1.1.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	42
3.1.2 Αξιολόγηση για σήματα από HP γεννήτρια.....	51
3.1.2.1 Πειραματική διάταξη.....	51
3.1.2.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	51
3.2 Πειραματικές μετρήσεις στο OTE Academy.....	59
3.2.1 Αξιολόγηση για NRZ παλμούς 0.25/0.5/1GHz.....	59
3.2.1.1 Διαδρομή: OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy.....	59
3.2.1.2 Διαδρομή: OTE Academy-NTUA-OTE Academy.....	61
3.2.2 Αξιολόγηση για σήματα που παράγονται από Gigabit Media Converter.....	64
3.2.2.1 Μεταβολή στην απόσταση των κεραιών.....	65
3.2.2.2 Μεταβολή στην τιμή των οπτικών απωλειών.....	67
4 Ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G.....	

4.1 Τι είναι το 5G και ποιος ο ρόλος της οπτικής τεχνολογίας σε αυτό;.....	69
4.2 Χρήσεις και δυνατότητες του 5G.....	70
4.3 Απαιτήσεις για την υλοποίηση του 5G.....	73
4.4 Σχεδιαστικές αρχές δικτύου 5G.....	78
4.4.1 Πύκνωση δικτύου.....	78
4.4.2 Softwarization και Virtualization δικτύου.....	79
4.4.3 Διαμοιρασμένοι πόροι και διαχείριση δικτύου.....	80
4.5 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G.....	81
4.6 Προκλήσεις.....	86
5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα.....	
5.1 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης 5G.....	87
5.2 Αξίζει η επένδυση στο 5G;	90
5.3 Τι θα ακολουθήσει;.....	90

Εικόνες

Illustration 1: Analysis of the growth in core network traffic since the dawn of Internet era.....	15
Illustration 2: Drivers for future traffic increase.....	16
Illustration 3: Ποικιλία αρχιτεκτονικών FTTX ανάλογα με την απόσταση μεταξύ της οπτικής ίνας και του τελικού χρήστη.....	19
Illustration 4: Συνεργασία ασύρματου δικτύου με οπτικό.....	20
Illustration 5: Λειτουργία RoF τεχνολογίας.....	22
Illustration 6: Networks hierarchy: access network, backhaul network and core network.....	23
Illustration 7: Βασικά τμήματα RoF δικτύου.....	24
Illustration 8: Basic Optical Frequency Multiplication Scheme.....	26
Illustration 9: Radio Over Fiber System.....	27
Illustration 10: Basic Configuration of SCM.....	32
Illustration 11: Wavelength Division Multiplexing System.....	32
Illustration 12: Analog RoF System.....	34
Illustration 13: Digital RoF System.....	34
Illustration 14: Architecture of RoF with an optical WDM MAN.....	36
Illustration 15: Στάδια μετάδοσης σήματος κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.....	37
Illustration 16: Πειραματική διάταξη για μετάδοση σήματος με κωδικοποίηση NRZ παλμών.....	39
Illustration 17: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 1 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps.....	43
Illustration 18: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 1 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα.....	44
Illustration 19: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 2 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps.....	45
Illustration 20: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 2 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα.....	45
Illustration 21: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps.....	46
Illustration 22: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα.....	47
Illustration 23: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 4 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps.....	48
Illustration 24: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 4 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα.....	48
Illustration 25: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 5 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 1Gbps αντίστοιχα.....	49
Illustration 26: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 6 της	

διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 500Mbps αντίστοιχα.....	49
Illustration 27: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 6 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps.....	50
Illustration 28: Πειραματική διάταξη για μετάδοση σήματος που παράγεται από HP γεννήτρια.....	51
Illustration 29: Φάσμα αδιαμόρφωτου σήματος στο σημείο 1 της διάταξης.....	53
Illustration 30: Φάσμα αδιαμόρφωτου σήματος μετά τη μετάδοση μέσω ίνας, την ασύρματη εκπομπή και την ενίσχυση.....	54
Illustration 31: Eye diagram αδιαμόρφωτου σήματος μετά τη μετάδοση μέσω ίνας, την ασύρματη εκπομπή και την ενίσχυση.....	54
Illustration 32: Χαρακτηριστικά eye diagram.....	55
Illustration 33: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 2 της διάταξης για GFSK διαμόρφωση.....	56
Illustration 34: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 3 της διάταξης για GFSK διαμόρφωση.....	56
Illustration 35: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 2 της διάταξης για GMSK διαμόρφωση.....	57
Illustration 36: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 3 της διάταξης για GMSK διαμόρφωση.....	57
Illustration 37: Constellation diagram στο σημείο 2 της διάταξης για $\pi/4$ DQPSK διαμόρφωση.....	58
Illustration 38: Constellation diagram στο σημείο 3 της διάταξης για $\pi/4$ DQPSK διαμόρφωση.....	58
Illustration 39: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy	60
Illustration 40: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy	60
Illustration 41: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy	61
Illustration 42: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου.....	62
Illustration 43: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου.....	62
Illustration 44: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου.....	63

Illustration 45: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy, για αποστάσεις κεραιών 1m, 3m και 5m.....	64
Illustration 46: Φάσμα για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter στο σημείο 1 της διάταξης.....	65
Illustration 47: Φάσμα για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter στο σημείο 3 της διάταξης για αποστάσεις κεραιών 1m, 2m και 5m.....	66
Illustration 48: Διάγραμμα ισχύος/πυκνότητας ισχύος-οπτικών απωλειών.....	67
Illustration 49: Απώλειες ανά coupler.....	68
Illustration 50: Δυνατότητες τεχνολογίας 5G.....	70
Illustration 51: Χρήσεις τεχνολογίας 5G.....	72
Illustration 52: Απαιτήσεις τεχνολογίας 5G.....	73
Illustration 53: Εξέλιξη κυψελών.....	79
Illustration 54: Βασική αρχιτεκτονική του SDN.....	80
Illustration 55: Αρχιτεκτονική ευφών προγραμματιζόμενων δικτύων.....	81
Illustration 56: Network Slicing.....	83
Illustration 57: Λεπτομερές χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G.....	88

Πίνακες

Table 1: Comparison of different multiplexing methods.....	33
Table 2: Τιμές παραμέτρων για PPG.....	42
Table 3: Τιμές παραμέτρων για το οπτικό τμήμα μετάδοσης.....	42
Table 4: Τιμές παραμέτρων για τις κεραίες.....	42
Table 5: Τιμές παραμέτρων για την γεννήτρια του σήματος.....	42
Table 6: Τιμές παραμέτρων για το οπτικό τμήμα μετάδοσης.....	52
Table 7: Τιμές παραμέτρων για τις κεραίες.....	52
Table 8: Αποτελέσματα OTDR για τη διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy.....	59
Table 9: Αποτελέσματα OTDR για τη διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy.....	61
Table 10: Αποτελέσματα OTDR για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter.....	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

1.1 Αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης

Στη σύγχρονη καθημερινότητα εμφανίζεται όλο και συχνότερα η απαίτηση για διαδικτυακή κάλυψη και παροχή υπηρεσιών ανά πάσα στιγμή, οπουδήποτε και μάλιστα με ένα εξασφαλισμένο επίπεδο ποιότητας. Η απαίτηση αυτή καλύπτεται όσο υπάρχει σύγκλιση μεταξύ σταθερών και κινητών επικοινωνιών και όσο η τεχνολογία των χρησιμοποιούμενων συσκευών και μηχανημάτων εξελίσσεται. Μέχρι το 2021 εκτιμάται πως θα υπάρχουν 28 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο διαχωρισμός των χρονικών περιόδων με βάση τη μεταφορά δεδομένων που υπήρχε τότε. Αναφέρεται το ποσό δεδομένων που μεταφερόταν ανά χρονικό διάστημα στην κάθε περίοδο καθώς οι βασικές εφαρμογές που αφορούσαν τα δεδομένα αυτά. Τέλος γίνεται μία πρόβλεψη για την ποσότητα των δεδομένων που αναμένεται να διακινηθούν στα επόμενα χρόνια συγκεκριμένα μέχρι το 2020.

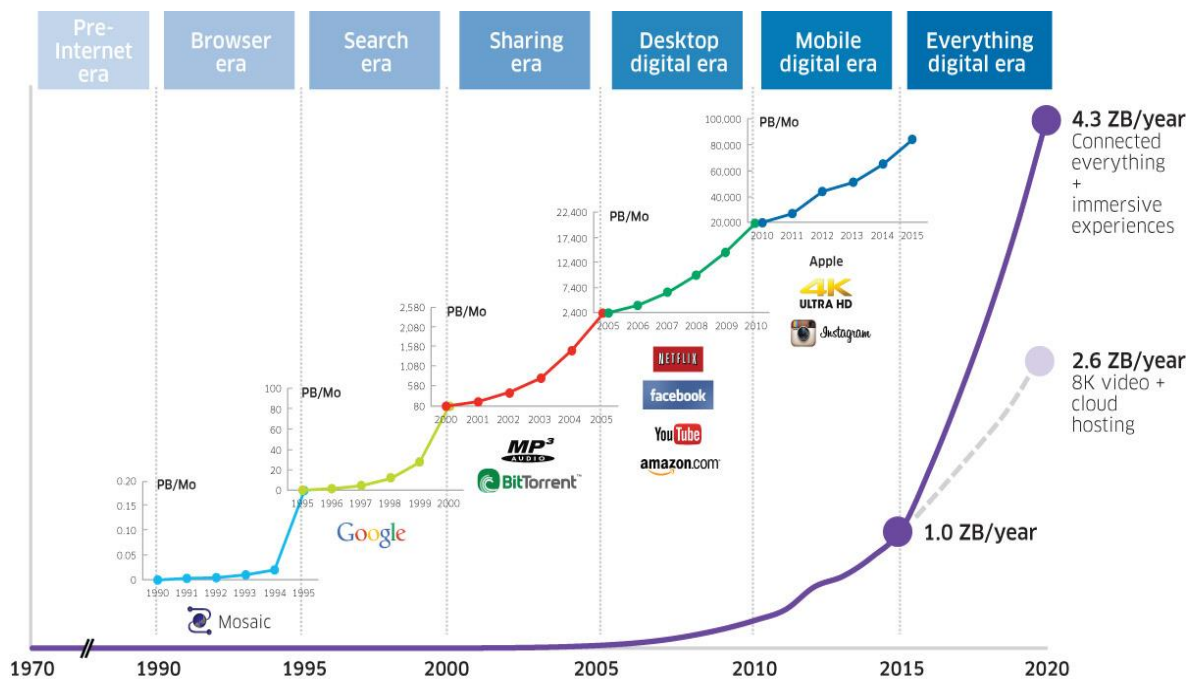


Illustration 1: Analysis of the growth in core network traffic since the dawn of Internet era

Είναι φανερό πως ο όγκος των δεδομένων που θα διακινείται καθημερινά μέσω ασύρματων δικτύων θα είναι πολύ μεγαλύτερος συγκριτικά με σήμερα. Παρακάτω συνοψίζο-

νται σχηματικά και έπειτα αναλύονται τα αίτια αυτής της συνεχώς αυξανόμενης ροής δεδομένων.

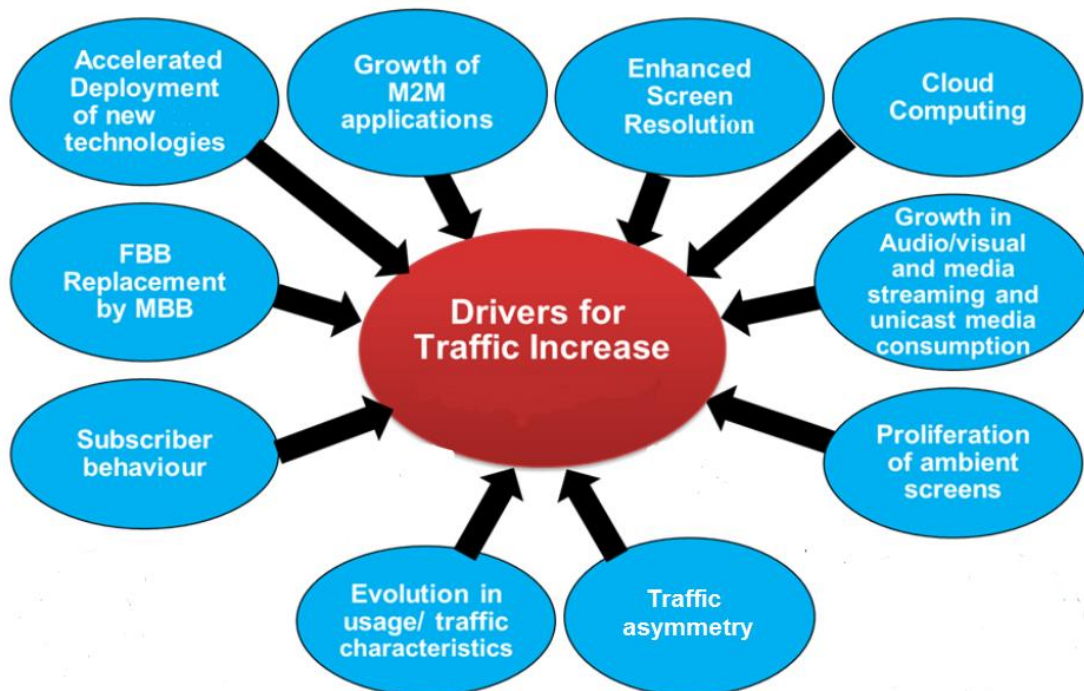


Illustration 2: Drivers for future traffic increase

- **Επιταχυνόμενη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών**
Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται και η εξέλιξη των παλαιότερων επιτρέπουν την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων και την παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσιών. Έτσι αυξάνεται η ζήτηση των υπηρεσιών ενώ παράλληλα μειώνεται το κόστος για την παροχή τους πράγμα που επιφέρει περεταίρω αύξηση της ζήτησης.
- **Επικοινωνία μεταξύ μηχανών(Machine-to-Machine/M2M)**
Τα δεδομένα που θα διακινούνται μεταξύ μηχανών θα συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική ροή δεδομένων. Δισεκατομμύρια μηχανών θα χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα για να έχουν πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες και να επικοινωνούν μεταξύ τους. Ο αριθμός των συνδέσεων M2M προβλέπεται να γίνει μεγαλύτερος από τον συνολικό παγκόσμιο πληθυσμό κατά αρκετές τάξεις.
- **Συνεχόμενη αύξηση χρήσης οπτικοακουστικών υπηρεσιών**
Σε καθημερινή βάση πλέον και για ποικίλους λόγους(επικοινωνία, ψυχαγωγία, ενημέρωση) οι χρήστες των ασύρματων δικτύων διαχειρίζονται και ανταλλάσσουν οπτικοακουστικό υλικό.
- **Cloud computing**
Πρόκειται για μία δομή, με την οποία μας δίνεται η δυνατότητα να έχουμε πρόσβαση και να χρησιμοποιούμε web εφαρμογές χωρίς να τις διαθέτουμε στον υπολογιστή μας ή σε κάποια άλλη συσκευή που είναι διασυνδεδεμένη με το ίντερνετ. Σε αυτή τη δομή η εφαρμογή βρίσκεται σε ένα server και ο χρήστης τη χρησιμοποιεί χωρίς να χρειάζεται να την εγκαταστήσει στον υπολογιστή του. Όλο και περισσό-

τεροι χρήστες χρησιμοποιούν υπηρεσίες που επιθυμούν να είναι διαθέσιμες όπου και αν αυτοί βρίσκονται. Υπάρχει συνεπώς και μία αύξηση στη ροή δεδομένων του δικτύου που οφείλεται στη σύνδεση των χρηστών με το cloud.

- Βελτίωση ανάλυσης οθονών
Η βελτίωση της ανάλυσης των χρησιμοποιούμενων οθονών σε συνδιασμό με τη μεγάλη ζήτηση για παρακολούθηση και κατέβασμα βίντεο οπουδήποτε και αν βρίσκεται ο χρήστης, αυξάνει σημαντικά την κίνηση δεδομένων στα ασύρματα δίκτυα.
- Πολλαπλασιασμός των χρησιμοποιούμενων οθονών
Όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται οθόνες με πρόσβαση στο διαδίκτυο για την παροχή ενημερωμένων ανά πάσα στιγμή πληροφοριών. Οθόνες σε ανελκυστήρες, σε τρένα κτλ παρέχουν πληροφορίες, ειδήσεις αυξάνοντας έτσι και αυτές τη ροή δεδομένων.
- Αντικατάσταση σταθερών ευρυζωνικών δικτύων με κινητά
Η παροχή υπηρεσιών με ασύρματο τρόπο αποτελεί από μόνη της πλέον μία απαίτηση του καταναλωτικού κοινού, ακόμα και σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει και ενσύρματο δίκτυο. Ο ασύρματος τρόπος δικτυακής σύνδεσης παρέχει ευελιξία και έχει γίνει πλέον κομμάτι της καθημερινότητας των χρηστών.
- Εξέλιξη στα χαρακτηριστικά χρήσης υπηρεσιών και διακίνησης δεδομένων
Οι ανάγκες που καλύπτουν τα ασύρματα δίκτυα αλλάζουν και αυξάνονται. Υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που σχετίζονται με υγεία και ασφάλεια αναμένεται να είναι διάθεσιμες στα επόμενα χρόνια. Ζητήματα τέτοιου είδους απαιτούν ακρίβεια και αξιοπιστία έννοιες που συνδέονται με τη μεγαλύτερη ροή δεδομένων στα δίκτυα.
- Ασυμμετρία κίνησης
Η ασυμμετρία ροής δεδομένων με το downlink να κυριαρχεί αυξάνει τις απαιτήσεις των ασυρμάτων δικτύων καθώς δεν υπάρχει ισοκατανομή στην κίνηση. Μάλιστα προβλέπεται η ασυμμετρία αυτή να ενισχυθεί μελλοντικά.
- Δυναμική συμπεριφορά του χρήστη
Οι χρήστες των ασυρμάτων δικτύων δεν είναι στατικοί. Κινούνται και απαιτούν να έχουν δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο όπου και αν αυτοί βρίσκονται τη δεδομένη στιγμή. Γίνεται κατανοητό ότι τα δεδομένα που πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί το δίκτυο μπορεί ξαφνικά να αυξηθούν. Σε ένα γήπεδο εν ώρα αγώνα, σε έναν συναυλιακό χώρο, σε ένα αεροδρόμιο κτλ μπορούν να συνυπάρξουν χιλιάδες άνθρωποι που ταυτόχρονα και ενώ βρίσκονται σε πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους λαμβάνουν και αποστέλλουν δεδομένα.

Τα ασύρματα δίκτυα εξελίσσονται γιατί η ανάγκη για περισσότερο εύρος ζώνης, μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και φορητότητα το επιβάλλουν. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται η πλήρης διασύνδεση όλων των χρηστών και μηχανών με ασύρματο τρόπο και η επέκταση των δυνατοτήτων των ασυρμάτων δικτύων. Συνεπώς η αύξηση της ροής των δεδομένων θα συνεχιστεί και μάλιστα με μεγάλους ρυθμούς.

1.2 Εντοπισμός προβλήματος στο δίκτυο πρόσβασης

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρος ζώνης απαιτεί εξελιγμένες τεχνολογίες για να καλυφθεί. Όσον αφορά το δίκτυο πρόσβασης (access), δηλαδή το κομμάτι που συνδέει τους συνδρομητές με τους σταθμούς βάσης, οι επικρατούσες τεχνολογίες βασίζονται σε χάλκινα καλώδια τα οποία έχουν θεμελιώδεις περιορισμούς σε ότι αφορά το εύρος ζώνης. Το access δίκτυο αρχικά σχεδιάστηκε για μετάδοση φωνής και άρα δεν υπήρχε η απαίτηση μεγάλων ταχυτήτων μετάδοσης. Συνεπώς το κομμάτι αυτό του δικτύου (που αποκαλείται “last mile” από τους παρόχους υπηρεσιών αλλά από την πλευρά του χρήστη είναι το “first mile”) προκαλεί τις καθυστερήσεις στην πρόσβαση και το “κατέβασμα” δεδομένων από το διαδίκτυο. Τα δίκτυα πρόσβασης μπορεί να χρειάζεται να φτάσουν σε εκατομμύρια χρήστες στον καθένα ξεχωριστά. Για να εξασφαλισθεί η ευρεία ανάπτυξη του δικτύου σε συνδιασμό με προσιτές τιμές για τους χρήστες θα πρέπει το κόστος συντήρησης και ανάπτυξης του δικτύου να είναι χαμηλό. Αυτός είναι ο λόγος που τα συμβατικά δίκτυα πρόσβασης αξιοποιούν τα ήδη υπάρχοντα καλώδια χαλκού.

1.3 Επίλυση προβλήματος

Οι περιορισμοί που εισάγει το δίκτυο πρόσβασης στην μετάδοση δεδομένων μπορούν να αντιμετωπιστούν με:

- Την επέκταση του οπτικού δικτύου ώστε να φτάνει πιο κοντά στον τελικό χρήστη. Πρόκειται για τις τεχνολογίες FTTx (Fiber To The x όπου x μπορεί να είναι Node, Curb, Building ή Home ανάλογα με το που σταματάει η οπτική ίνα) που μπορούν να αυξήσουν το εύρος ζώνης του access δικτύου καθώς πλέον η μετάδοση σε μεγαλύτερο κομμάτι του συνολικού δικτύου γίνεται μέσω οπτικής ίνας. Οι τεχνολογίες αυτές φαίνεται να αποτελούν την ιδανική τεχνολογική λύση και η προσοχή πλέον συγκεντρώνεται στην αξιοποίηση τους για τη δημιουργία ενός δικτύου με οικονομικά βιώσιμη λειτουργία και ανάπτυξη.

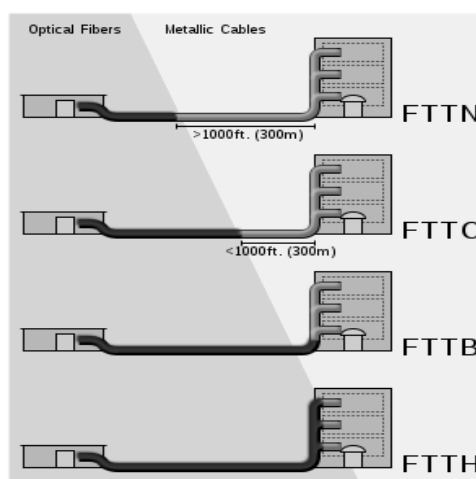


Illustration 3: Ποικιλία αρχιτεκτονικών FTTx ανάλογα με την απόσταση μεταξύ της οπτικής ίνας και του τελικού χρήστη

- Την συνεργασία του οπτικού δικτύου με το ασύρματο.
Πρόκειται για τις τεχνολογίες RoF(Radio-over-Fiber) που μεταδίδουν πληροφορία μέσω οπτικής ίνας διαμορφώνοντας το φως με ένα ραδιοκύμα και έπειτα μπορούν να μεταδώσουν ασύρματα την πληροφορία αυτή. Ένα τυπικό δίκτυο RoF αποτελείται από έναν κεντρικό σταθμό όπου γίνονται όλες οι σύνθετες λειτουργίες και ένα οπτικό δίκτυο που συνδέει πολλές απλές λειτουργικά κεραίες μέσω των οποίων γίνεται η ασύρματη διανομή του σήματος.

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει παραστατικά τον συνδιασμό των δύο λύσεων που προαναφέρθηκαν.

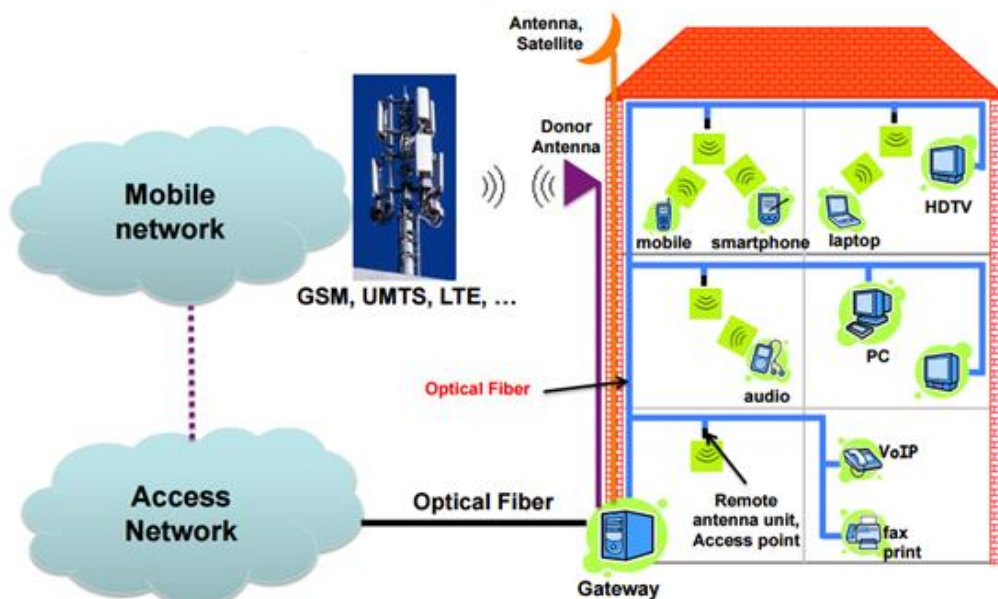


Illustration 4: Συνεργασία ασύρματου δικτύου με οπτικό

1.4 Επίκεντρο παρούσας διπλωματικής

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρος ζώνης, που αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, καθιστά την τεχνολογία Radio-over-Fiber μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα λύση για την περαιτέρω εξέλιξη των ασύρματων δικτύων και την ανταπόκριση τους στις σύγχρονες απαιτήσεις. Αυτός είναι ο λόγος που οδήγησε στην θεωρητική και πειραματική μελέτη της τεχνολογίας αυτής.

Μέσα από την παρούσα διπλωματική ο αναγνώστης εισάγεται στις βασικές αρχές της τεχνολογίας RoF. Κατανοεί τον τρόπο λειτουργίας της, την σημασία της αλλά και τους περιορισμούς της.

Δίνεται έμφαση στην πειραματική μελέτη RoF υλοποιήσεων. Συγκεκριμένα μελετάται η απόδοση της τεχνολογίας RoF σε εργαστηριακές συνθήκες αλλά και σε συνθήκες πεδίου. Ο αναγνώστης αποκτά μία εικόνα για το πως η εξασθένιση και η διασπορά επιδρούν στα διαφορετικά μεταδιδόμενα σήματα στην τεχνολογία RoF. Στόχος εδώ είναι να εντοπιστούν

τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για να καλυφθούν οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες και να γίνει το πέρασμα στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G.

Τα δίκτυα αυτά μελετώνται στο τέλος της διπλωματικής εργασίας. Η ανάπτυξη και αξιοποίηση τους αποτελεί μεγάλη πρόκληση, ωστόσο οι δυνατότητες που θα παρέχουν είναι τεράστιες και δίνουν έτσι επαρκές κίνητρο για να ξεπεραστεί η πρόκληση αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

RADIO-OVER-FIBER ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η Radio-over-Fiber (RoF) τεχνολογία. Πρόκειται για μία τεχνολογία που συνδιάζει τη μετάδοση οπτικού και ασύρματου σήματος εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματα και των δύο. Το οπτικό σήμα μπορεί να διαδοθεί μέσω ίνας σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες και αφού μετατραπεί σε ραδιοκύμα μέσω του κατάλληλου δικτυακού εξοπλισμού να διαδοθεί ασύρματα μέσω κεραίας.

Αφού εξηγηθεί τι ακριβώς είναι η τεχνολογία αυτή και πώς εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο, θα αναφερθούν οι τεχνολογικές ανάγκες που οδήγησαν στην εμφάνιση της. Θα ακολουθήσουν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία αυτή αλλά και οι περιορισμοί στους οποίους έγκειται. Έπειτα θα αναλυθεί η δομή του RoF δικτύου με περιγραφή των επιμέρους στοιχείων. Θα αναλυθούν ακόμα οι βασικές τεχνικές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας που συνδιάζονται με την τεχνολογία αυτή καθώς και τα είδη RoF που υπάρχουν. Το κεφάλαιο θα κλείσει με τις βασικές εφαρμογές της RoF τεχνολογίας στην σύγχρονη τεχνολογική πραγματικότητα καθώς και με τις μελλοντικές προκλήσεις που αναμένεται να εμφανιστούν.

2.1 Τι είναι η Radio-over-Fiber(RoF) τεχνολογία;

Πρόκειται για έναν συνδυασμό ασύρματης και οπτικής τεχνολογίας σε μία ενιαία διάταξη επικοινωνιών. Η βασική αρχή της τεχνολογίας είναι η διαμόρφωση του φωτός από ένα ραδιοκύμα και η μετάδοση του μέσα από οπτική ίνα, πράγμα που διευκολύνει την ασύρματη μετάδοση που ακολουθεί. Οποιοδήποτε ραδιοκύμα μπορεί να μεταδοθεί μέσα από την οπτική ίνα. Μία μόνο κεραία είναι αρκετή για να λάβει και να εκπέμψει ασύρματα όλα τα ραδιοκύματα που μεταδίδονται μέσω μιας οπτικής ίνας. Αυτό έρχεται σε αντιδιαστολή με τον παραδοσιακό τρόπο εκπομπής που απαιτούσε διαφορετικό εξοπλισμό για την εκπομπή κάθε διαφορετικού τύπου σήματος.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται παραστατικά η μετάδοση μέσω RoF τεχνολογίας. Το αρχικό ραδιοκύμα ανεβαίνει σε μία ενδιάμεση συχνότητα (παρακάτω θα δούμε ότι αυτό το στάδιο δεν υπάρχει πάντα) και από εκεί γίνεται ένα upconversion συχνότητας για να μπορέσει το σήμα να μεταδοθεί ασύρματα δηλαδή να εκπεμφθεί από την κεραία-πομπό. Το σήμα αυτό θα ληφθεί από μία άλλη κεραία (κεραία-δέκτης) και θα διαμορφώσει το οπτικό σήμα που παράγεται από την πηγή φωτός (συνήθως laser). Στη συνέχεια θα ακολουθήσει η μετάδοση μέσω της οπτικής ίνας.

Στην εικόνα δίνεται και μία ποιοτική περιγραφή του φασματικού περιεχομένου του σήματος σε κάθε στάδιο.

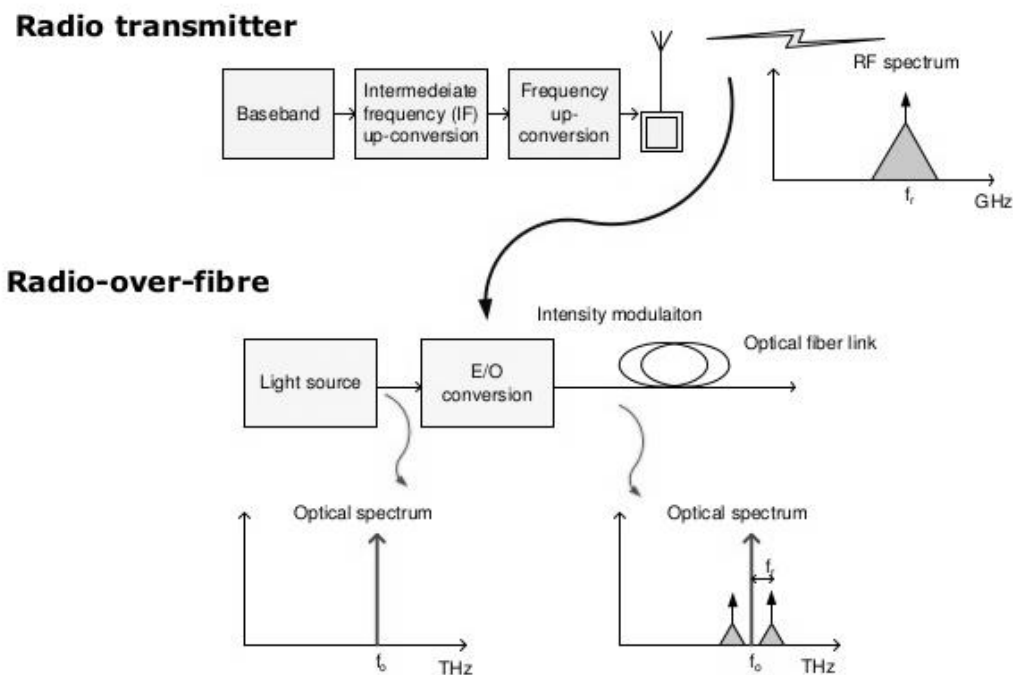


Illustration 5: Λειτουργία RoF τεχνολογίας

Αξίζει να αναφερθεί ότι στα συστήματα RoF είναι δυνατό όλες οι λειτουργίες (upconversion, πολυπλεξία, διαμόρφωση) να γίνονται σε κάποιον κεντρικό σταθμό και στη συνέχεια τα σήματα να διανέμονται στους σταθμούς βάσης/Base Stations(BS) ή Base Transeiver Stations(BTS) μέσω οπτικών ινών. Έτσι απλοποιείται πολύ η λειτουργία των σταθμών βάσης στους οποίους πλέον γίνεται μόνο η μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό, η ενίσχυση και η εκπομπή.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μια μικρή αναφορά στην ιεραρχία των δικτύων και την εφαρμογή της τεχνολογίας RoF σε αυτή. Αρχικά θα εξηγηθούν ορισμένοι όροι και έπειτα θα παρουσιαστεί το συνολικό δίκτυο:

- Base Transeiver Station(BTS) ή Base Station(BS): Πρόκειται για ένα κομμάτι δικτυακού εξοπλισμού που διευκολύνει την ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε μία συσκευή και το δίκτυο. Περιλαμβάνει κεραιές εκπομπής/λήψης και ηλεκτρονικά κυκλώματα για την διαχείριση των σημάτων. Συνδέεται με ένα Mobile Switching Center(MSC).
- Base Station Controller(BSC): Σημαντικό κομμάτι ασύρματου δικτύου που ελέγχει έναν ή περισσότερους BSs. Είναι υπεύθυνο για τη διανομή των ραδιοπύρων και τα handovers μεταξύ των BSs που ελέγχει. Αποτελεί τον ενδιάμεσο ανάμεσα στα BSs και το MSC.
- Mobile Switching Center(MSC): Αποτελεί το κομμάτι του δικτύου που ελέγχει τα στοιχεία του υποδικτύου μεταγωγής, δηλαδή φροντίζει η πληροφορία που στέλνει ένας σταθμός αφού περάσει από διάφορους κόμβους του δικτύου να φτάσει στον

κόμβο προορισμού. Επίσης φροντίζει για τα handovers μεταξύ των BSs που βρίσκονται υπό τον έλεγχο διαφορετικών BTSs.

- Core/Backbone δίκτυο: Είναι το κεντρικό τμήμα ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου που προσφέρει ποικίλες υπηρεσίες στους πελάτες που συνδέονται μέσω του δικτύου access. Το δίκτυο αυτό συνδέει τους τοπικούς παρόχους υπηρεσιών μεταξύ τους.
- Access δίκτυο: Είναι το τμήμα του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που συνδέει τους συνδρομητές με τον πάροχο των υπηρεσιών.
- Backhaul δίκτυο: Είναι το δίκτυο που μεσολαβεί ανάμεσα στο δίκτυο κορμού και τους σταθμούς βάσης.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στην εικόνα που ακολουθεί:

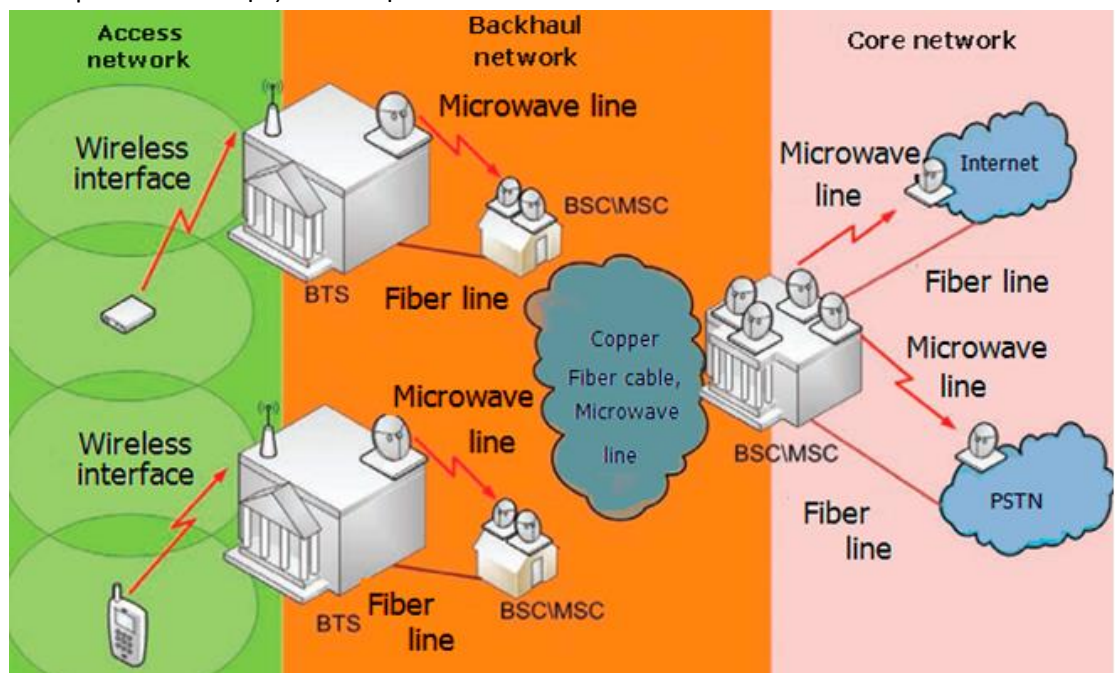


Illustration 6: Networks hierarchy: access network, backhaul network and core network

Το σενάριο της RoF μετάδοσης αντιστοιχίζεται στα παραπάνω ως εξής:

- Η ασύρματη εκπομπή μέσω κεραιών αφορά το τμήμα του access δικτύου. Οι σταθμοί βάσης περιλαμβάνουν τις κεραιές εκπομπής/ λήψης.
- Η διάδοση στο οπτικό περιβάλλον δηλαδή μέσω ίνας αφορά το τμήμα του backhaul δικτύου και ίσως και του core.

2.2 Αίτια εμφάνισης τεχνολογίας

Τα αίτια εμφάνισης της RoF τεχνολογίας κινούνται γύρω από δύο βασικούς άξονες:

- Αύξηση χωρητικότητας καναλιών μετάδοσης
- Αύξηση ασύρματης κάλυψης

Η σύγχρονη ανάγκη για συνδεσιμότητα και επικοινωνία παντού έχει αύξησει τις απαιτήσεις από τις ασύρματες επικοινωνίες τόσο σχετικά με την χωρητικότητα όσο και με την κάλυψη. Η έρευνα έχει στραφεί στις υψηλότερες συχνότητες της τάξεως των GHz οι οποίες παρέχουν το αυξημένο εύρος ζώνης που απαιτείται, ωστόσο έχουν μεγάλες απώλειες κατά την ασύρματη διάδοση τους. Η αναζήτηση του κατάλληλου μέσου για τη διάδοση αυτών των κυμάτων οδήγησε στην χρήση της οπτικής ίνας. Τα χάλκινα καλώδια δεν αποτελούν σύγχρονη λύση μετάδοσης καθώς πέρα από το μεγάλο κόστος τους, έρχονται σε αντίθεση με την αρχή της φορητότητας με την οποία είναι συνυφασμένη η σύγχρονη τεχνολογική πραγματικότητα. Τα ασύρ-ματα δίκτυα που αξιοποιούν τις RoF τεχνολογίες αποτελούν μία πολύ αποδοτική επιλογή. Με αυτή την τεχνική καθίσταται δυνατή η συγκέντρωση όλης της επεξεργασίας των RF σημάτων σε έναν κεντρικό σταθμό και από εκεί η διανομή του σε διάφορους υποσταθμούς μέσω οπτικών ινών. Έτσι στο κομμάτι της ασύρματης εκπομπής οι διεργασίες περιορίζονται στην οπτοηλεκτρονική μετατροπή και την ενίσχυση.

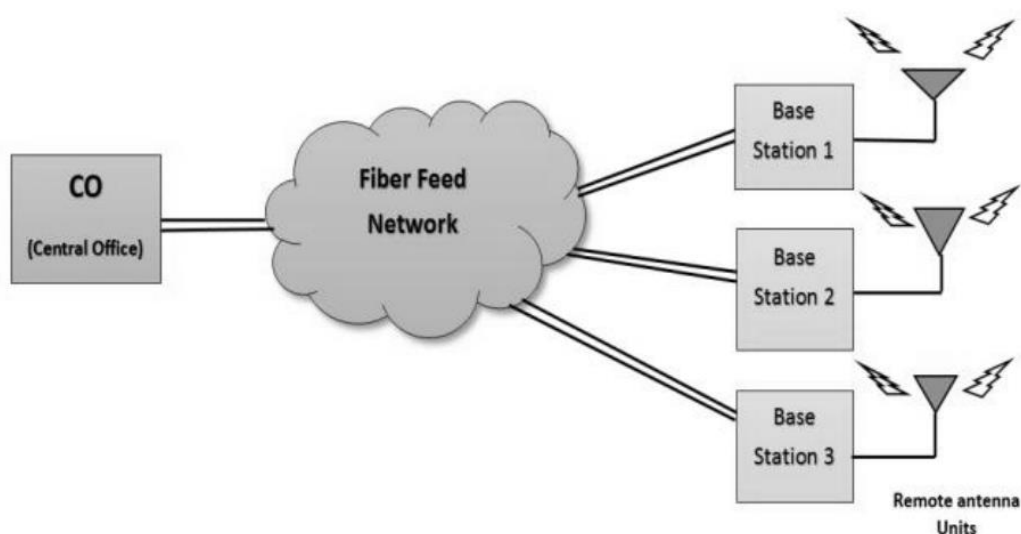


Illustration 7: Βασικά τμήματα RoF δικτύου

Συνολικά λοιπόν ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν πληρέστερη τοπική κάλυψη, ενώ το μέγεθος των υποσταθμών μειώνεται καθώς οι λειτουργίες τους είναι περιορισμένες. Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα που συνδυάζει την ασύρματη κάλυψη με το απαιτούμενο εύρος ζώνης ενώ ταυτόχρονα έχει μία οικονομικά αποδοτική δομή και λειτουργία.

2.3 Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία RoF αξιοποιεί όλα τα πλεονεκτήματα της διάδοσης μέσω ίνας τα οποία είναι:

- Χαμηλές απώλειες 0.2dB/km στα 1.55μm. Σε κανένα άλλο είδος καλωδίου δεν συναντώνται χαμηλότερες απώλειες. Στην πραγματικότητα η διάδοση σημάτων υψηλών συχνοτήτων στον αέρα είναι δύσκολη διότι αυξάνονται δραματικά οι απώλειες ελεύθερου χώρου ενώ στις γραμμές μεταφοράς αυξάνεται η σύνθετη αντίσταση. Συνεπώς μέσω οπτικής ίνας μπορεί ένα σήμα να μεταδοθεί σε μεγαλύτερη απόσταση χωρίς να χρειαστεί επαναλήπτης.
- Τεράστιο εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση αρκετών Tbit/s. Ένα χάλκινο καλώδιο έχει εύρος ζώνης μερικών εκατοντάδων KHz εξαρτώμενο από τη διάμετρο του. Η διαφορά λοιπόν με την οπτική ίνα είναι τεράστια. Ωστόσο μέχρι σήμερα δεν έχει γίνει δυνατή η αξιοποίηση όλου του εύρους ζώνης των οπτικών ινών. Το πρόβλημα πολλές φορές είναι ότι απαιτείται η συνδισασμένη λειτουργία οπτικών και ηλεκτρικών στοιχείων αλλά τα ηλεκτρικά έχουν ταχύτητα λειτουργίας της τάξεως των μερικών δεκάδων Gbit/s. Στην κατεύθυνση της βέλτιστης αξιοποίησης του εύρους ζώνης έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας όπως η ηλεκτρονική πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (ETDM) όπου ροές δεδομένων χαμηλότερης ταχύτητας πολυπλέκονται σε ένα ταχύτερο ηλεκτρικό σήμα και διαμορφώνουν το οπτικό φέρον, η οπτική πολυπλεξία διαίρεση χρόνου (OTDM) όπου οπτικά σήματα χαμηλότερης ταχύτητας πολυπλέκονται σε ένα ταχύτερο οπτικό σήμα, η οπτική πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) όπου γίνεται ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων με χρήση πολλαπλών οπτικών φερόντων.

- Ανοσία στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή
Το σήμα μέσα στην ίνα μεταδίδεται με τη μορφή φωτός και έτσι είναι ανεπηρέαστο στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που μπορεί να υπάρχουν. Η ίνα είναι ένα ασφαλές μέσο μετάδοσης κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται μέγιστη ασφάλεια και υπάρχει κίνδυνος υποκλοπών και κακόβουλων ενεργειών καθώς και βιομηχανικά περιβάλλοντα.
- Επιπλέον οι οπτικές ίνες έχουν μικρό βάρος.

Ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών η τεχνολογία RoF ενισχύει το δίκτυο με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απλοποίηση και μείωση κόστους σταθμών βάσης
Οι λειτουργίες των σταθμών βάσης περιορίζονται στις απολύτως απαραίτητες ενώ οι συνθετότερες όπως η διαμόρφωση, η πολυπλεξία και η μεταγωγή αναθέτονται στους κεντρικούς σταθμούς. Οι σταθμοί βάσης αποτελούνται πλέον μόνο από μία φωτοδίοδο, ένα RF ενισχυτή και μία κεραία. Συνεπώς μειώνεται το μέγεθος, το βάρος των σταθμών βάσης καθώς και η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία τους και τελικά το κόστος εγκατάστασης αλλά και συντήρησης όλου του δικτύου. Παράλληλα έτσι δεν εμφανίζονται προβλήματα που αφορούν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.
- Δυναμική εκχώρηση πόρων
Η συγκέντρωση των βασικών λειτουργιών στους κεντρικούς σταθμούς κάνει την εκχώρηση πόρων πιο ευέλικτη. Σε μία περιοχή ενός δικτύου π.χ για GSM κίνηση μπορεί να εκχωρηθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα την ώρα αιχμής, ενώ η ίδια χωρητικότητα μπορεί να αξιοποιηθεί από άλλες περιοχές όταν οι απαιτήσεις της πρώτης περιοχής μειωθούν.
- Ταυτόχρονη υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών
Η τεχνολογία RoF μπορεί να προσφέρει λειτουργική ευελιξία στο σύστημα καθώς μπορεί να υποστηρίξει τη διαφάνεια ως προς τη μορφή του διαδιδόμενου σήματος. Ο οπτικός σύνδεσμος μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός RAU (Remote Antenna Unit), ως ένα σύστημα αναλογικής μετάδοσης, δεν πρέπει να τροποποιεί τη μορφή του ραδιοσήματος που μεταδίδεται αλλά αντίθετα να το παραδίδει στην κεραία με

τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες RoF τεχνικές για τη δημιουργία μικροκυματικών συχνοτήτων και τη μετάδοση ασύρματων σημάτων στα RAUs. Μία από αυτές η OFM(Optical Frequency Multiplication) βασίζεται στη δημιουργία αρμονικών συνιστωσών και στην μετατροπή FM-IM(Frequency Modulation-Intensity Modulation). Σύμφωνα με αυτή το φως διαμορφώνεται από ένα περιοδικό σήμα συχνότητας f_{sw} ενώ το σήμα πληροφορίας εισάγεται με διαμόρφωση έντασης. Το σήμα περνάει από ένα περιοδικό ζωνοπερατο φίλτρο και έπειτα φτάνει στη φωτο-δίοδο. Στην έξοδο της υπάρχει φασματικό περιεχόμενο σε κάθε αρμονική της f_{sw} . Συνεπώς τα υψιλόσυχα μικροκυματικά σήματα σε συχνότητες πολλαπλάσια της f_{sw} που μεταφέρουν διαφανώς τα σήματα πληροφορίας που έχουν εισαχθεί με τη διαμόρφωση έντασης, μπορούν να αποκτηθούν με τη δημιουργία οπτικών σημάτων διαμορφωμένων από χαμηλές σχετικά συχνότητες(f_{sw}).

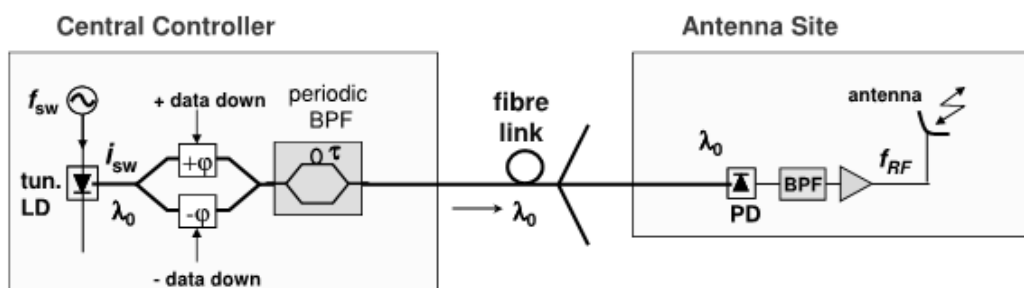


Illustration 8: Basic Optical Frequency Multiplication Scheme

2.4 Μειονεκτήματα-Περιορισμοί

Τα μειονεκτήματα της RoF τεχνικής σχετίζονται με την αναλογική της φύση καθώς περιλαμβάνει αναλογική διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του φωτός. Ως αναλογικό σύστημα επηρεάζεται σημαντικά από το θόρυβο και τη διασπορά. Κάθε σύστημα έχει ένα δυναμικό εύρος λειτουργίας το οποίο σχετίζεται με την ευαισθησία των επιμέρους στοιχείων του από τη μία και τον τρόπο διαχείρισης ισχυρών σημάτων ή μεγάλου αριθμού σημάτων από την άλλη. Το πρόβλημα δημιουργείται όταν δύο τερματικά λαμβάνουν διαφορετικά επίπεδα ισχύος από τον σταθμό βάσης γιατί απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από αυτόν.

Τα βασικά είδη θορύβου που έχει να αντιμετωπίσει το σύστημα είναι θόρυβος RIN (Relative Intensity Noise) του laser, ο θόρυβος φάσης του laser, ο θόρυβος βολής της φωτοδίοδου και ο θερμικός θόρυβος του ενισχυτή. Όσον αφορά τη διασπορά στις μονορυθμικές ίνες επικρατεί η χρωματική διασπορά η οποία και θέτει τους περιορισμούς που σχετίζονται με το μέγιστο μήκος μετάδοσης ενώ στις πολυρυθμικές ίνες επικρατεί η διασπορά τρόπων διάδοσης που θέτει τα όρια για την απόσταση αλλά και το εύρος ζώνης.

2.5 Δομή RoF δικτύου

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η δομή ενός τυπικού RoF δικτύου.

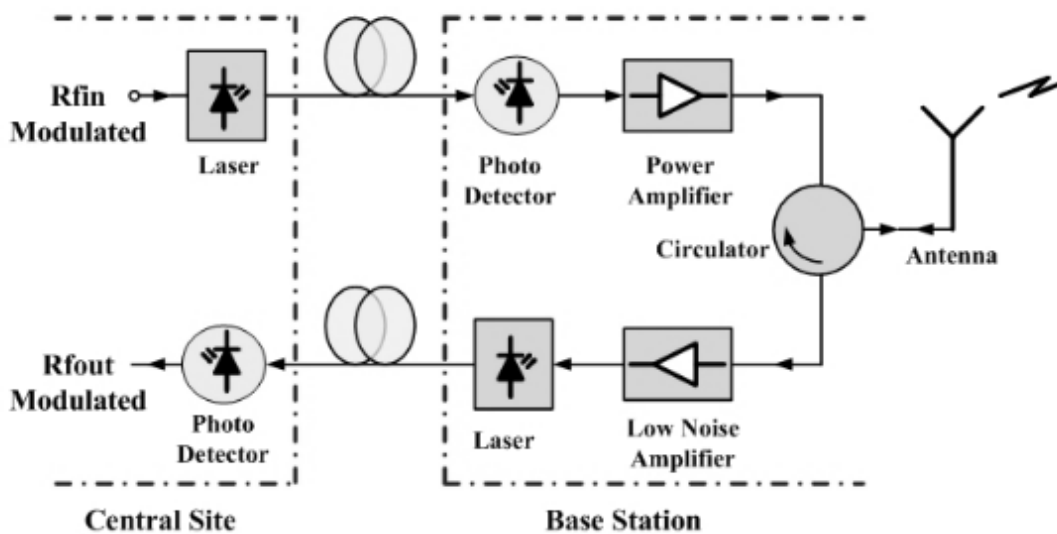


Illustration 9: Radio Over Fiber System

Το RF σήμα διαμορφώνει (οδηγεί) απευθείας το laser στον κεντρικό σταθμό, έπειτα μεταδίδεται μέσω οπτικής ίνας στο BS όπου το σήμα ανακτάται μέσω DD (direct detection) σε μια PIN φωτοδίοδο και στη συνέχεια εκπέμπεται μέσω της κεραίας. Αντίστοιχα υλοποιείται η άνω ζεύξη. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτό το δίκτυο λέγεται IM-DD (Intensity Modulation – Direct Detection) και αποτελεί την απλούστερη υλοποίηση ενός RoF συστήματος (οι μέθοδοι διαμόρφωσης θα μελετηθούν στην επόμενη ενότητα).

Ας δούμε αναλυτικά τα στοιχεία της διάταξης:

- **Laser :** Παράγει το οπτικό σήμα το οποίο θα διαμορφωθεί από το RF σήμα. Χρησιμοποιούνται διάφορα είδη lasers που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.
 - **Fabry Perot Laser:** Δεν είναι αυστηρά μονοχρωματικό και έχει μέτρια απόδοση από άποψη θορύβου και παραμόρφωσης
 - **Distributed Feed Back Laser (laser κατανεμημένης ανατροφοδότησης):** Μπορεί να θεωρηθεί ως μονοχρωματική πηγή και προκαλεί χαμηλό θόρυβο και παραμόρφωση.
 - **VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser):** Η σύζευξη του με την ίνα είναι πολύ απλή αλλά προκαλεί μεγαλύτερο θόρυβο και παραμόρφωση σε σχέση με τα προηγούμενα.
- **Φωτοανιχνευτής:** Λαμβάνει το οπτικό σήμα μετά τη διάδοση του στην ίνα και το ετατρέπει σε ηλεκτρικό για να μπορέσει να εκπέμψει από την κεραία. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι φωτοδιόδους PIN που δεν έχουν εσωτερικό κέρδος ενώ σε πιο απαιτητικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν φωτοδιόδους χιονοστιβάδας που έχουν ένα πρόσθετο εσωτερικό κέρδος αλλά και μεγαλύτερο κόστος.
- **Ενισχυτής ισχύος:** Χρησιμοποιείται για να ισοσταθμιστούν οι απώλειες που προκλήθηκαν από τη διάδοση στην ίνα.

- Circulator(κυκλοφορητής): Πρόκειται για ένα παθητικό στοιχείο, στη συγκεκριμένη περίπτωση τριών θυρών στο οποίο ένα ραδιοκύμα που εισέρχεται από μία θύρα, εξέρχεται μόνο από τη διπλανή (υπάρχει συγκεκριμένη φορά).
- Κεραία: Φροντίζει για την εκπομπή στον ελεύθερο χώρο του ραδιοκύματος που λαμβάνει
- Ενισχυτής χαμηλού θορύβου: Ο συγκεκριμένος ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει το σήμα χωρίς να αυξήσει το θόρυβο που αυτό έχει. Τοποθετείται μετά τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο γιατί τότε το σήμα έχει αλλοιωθεί σημαντικά καθώς οι απώλειες και ο θόρυβος στον ελεύθερο χώρο είναι μεγάλες.
- Ίνα: Είναι το μέσο διάδοσης του οπτικού σήματος.
- Το στοιχείο που δεν φαίνεται στο σχήμα αλλά υπάρχει είναι ο οπτικός διαμορφωτής: Πρόκειται για τη διάταξη που τοποθετεί ένα σήμα πάνω σε μία φωτεινή δέσμη. Για την αποστολή ενός σήματος μέσω φωτεινής δέσμης πρέπει να αλλάξουν να χαρακτηριστικά της δέσμης. Τα μεταβλητά χαρακτηριστικά είναι η ισχύς, η συχνότητα, η πόλωση, η φάση και η κατεύθυνση της δέσμης. Συνήθως μεταβάλλεται η ισχύς ή η συχνότητα, η πόλωση χρησιμοποιείται για ενδιάμεσα στάδια διαμόρφωσης ενώ η φάση και η κατεύθυνση χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο.

2.6 Τεχνικές διαμόρφωσης και πολυπλεξίας

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι οι RoF τεχνολογίες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. RFoF(Radio Frequency over Fiber)
Ένα RF σήμα υψηλής συχνότητας (πάνω από 10GHz) διαμορφώνεται με ένα οπτικό σήμα
2. IFoF(Intermediate Frequency over Fiber)
Ένα RF σήμα με συχνότητα κάτω από 10GHz διαμορφώνεται με άμεση ή εξωτερική διαμόρφωση με ένα οπτικό σήμα πριν τη διάδοση στην ίνα. Έτσι πριν την εκπομπή του σήματος μέσω της κεραίας του RAU απαιτείται να γίνει upconversion συχνότητας στο RF επίπεδο.
3. BBoF(Baseband signal Over Fiber)
Ένα σήμα βασικής ζώνης διαμορφώνεται με ένα οπτικό και διαδίδεται μέσω ίνας. Και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται να γίνει upconversion συχνότητας στο RF επίπεδο πριν την ασύρματη εκπομπή.

2.6.1 Διαμόρφωση οπτικών με RF

Με βάση την τεχνική διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης του φωτός υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών δημιουργίας και μετάδοσης RF σημάτων. Οι κατηγορίες είναι:

- Intensity Modulation-Direct Detection (IM-DD)
- Remote Heterodyne Detection (RHD)

2.6.1.1 Intensity Modulation-Direct Detection

Προκειται για τεχνική RFOF, αφού στέλνουμε το σήμα στη συχνότητα που θέλουμε να εκπεμφθεί στο RAU. Στην κατηγορία αυτή υπάρχει η περεταίρω διάκριση σε άμεση ή εξωτερική διαμόρφωση. Εδώ η ένταση της πηγής φωτός διαμορφώνεται από το RF σήμα και ένας φωτοανιχνευτής χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του σήματος. Στην άμεση διαμόρφωση το RF σήμα εφαρμόζεται κατευθείαν πάνω στην έξοδο του laser και διαμορφώνει το οπτικό σήμα ενώ στην εξωτερική χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός διαμορφωτής (π.χ. MZM) για την διαμόρφωση του οπτικού σήματος, ο οποίος οδηγείται από το RF σήμα. Στον δέκτη, το σήμα προσπίπτει στον ανιχνευτή ο οποίος αποκρίνεται μόνο στην ένταση της ακτινοβολίας. Η μόνη παράμετρος που μπορεί να διαμορφωθεί σε αυτή τη μέθοδο είναι η ένταση. Το ρεύμα λοιπόν της φωτοδίοδου είναι αυτό που μεταφέρει την πληροφορία. Αυτό το ρεύμα θα περάσει από έναν μετατροπέα ρεύματος σε τάση και μετά θα τροφοδοτήσει την κεραία από όπου θα εκπεμφθεί το σήμα.

Γίνεται κατανοητό ότι αυτή η μέθοδος είναι η απλούστερη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης είναι δυνατή η γραμμικοποίηση του συστήματος υπό συνθήκες και άρα μπορεί να επιτευχθεί διαφάνεια ως προς την τεχνική διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Τέλος αυτή η τεχνική είναι συμβατή με το SCM που θα συζητηθεί παρακάτω.

Ωστόσο η μέθοδος αυτή είναι ευαίσθητη στην χρωματική διασπορά η οποία μειώνει τον σηματοθορυβικό λόγο. Η μείωση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται η συχνότητα του RF σήματος και το μήκος της ίνας. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία εφαρμογής της για σήματα της τάξεως των nm. Αυτό συμβαίνει γιατί για να δημιουργηθούν τόσο μεγάλης συχνότητας σήματα πρέπει και το RF που θα τροφοδοτηθεί στην ίνα να είναι επίσης μεγάλης συχνότητας. Για την πρώτη τεχνική διαμόρφωσης που αναφέραμε κάτι τέτοιο είναι αδύνατο λόγω του περιορισμένου εύρους και της μη γραμμικότητας του laser. Μπορεί ωστόσο να επιτευχθεί με χρήση MZM, ο οποίος μπορεί να αποκριθεί σε υψηλές συχνότητες, όμως και πάλι απαιτείται υψηλή τάση οδήγησης του modulator, που σημαίνει αυξημένο κόστος για το κύκλωμα οδήγησης.

2.6.1.2 Remote Heterodyne Detection

Στην ετερόδυνη ανίχνευση το σήμα που φέρει την πληροφορία αναμειγνύεται με ένα σήμα που προέρχεται από έναν τοπικό ταλαντωτή. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ένα σήμα σε συχνότητα ίση με τη διαφορά συχνοτήτων των δύο σημάτων και μπορεί να φέρει την πληροφορία στο πλάτος, την συχνότητα ή και την φάση. Το τελικό σήμα δηλαδή βρίσκεται σε χαμηλότερη και άρα πιο εύκολα διαχειρίσιμη συχνότητα. Οι οπτικές συχνότητες είναι πολύ γρήγορες για να μετρηθούν και να επεξεργαστούν από τα διαθέσιμα ηλεκτρικά στοιχεία συνεπώς πρέπει πρώτα να μεταφερθούν στο ηλεκτρικό περιβάλλον. Η αρχική ανίχνευση των οπτικών σημάτων βασίζεται στην απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων που είναι ανάλογη με το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και άρα είναι ξεκάθαρα μία μη γραμμική διαδικασία.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη δημιουργία RF σημάτων υψηλών συχνοτήτων με μοναδικό περιορισμό το εύρος της φωτοδίοδου. Επίσης προσφέρει υψηλότερη ισχύ

και σηματοθορυβικό λόγο αφού στην ισχύ του παραγόμενου σήματος συμβάλλουν οι ισχείς δύο σημάτων. Επιπλέον αν μόνο το ένα από τα δύο οπτικά φέροντα έχει πληροφορία, μειώνεται σημαντικά η ευαισθησία του συστήματος στην χρωματική διασπορά. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει τη διαμόρφωση χαμηλόσυχνων RF σημάτων στον κεντρικό σταθμό, τα οποία αργότερα μετατοπίζονται σε υψηλότερη συχνότητα μέσω της ετερόδυνης αποδιαμόρφωσης. Έτσι αποφεύγεται η χρήση οπτοηλεκτρικού εξοπλισμού μεγάλου κόστους στον κεντρικό σταθμό και η τάση που χρειάζεται ο modulator για να λειτουργήσει είναι αρκετά μικρότερη αφού λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες. Τέλος η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας σημάτων με βάθος διαμόρφωσης 100%.

Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη επίδραση του θορύβου φάσης του laser και οι διακυμάνσεις των οπτικών συχνοτήτων που επηρεάζουν την καθαρότητα και σταθερότητα του παραγόμενου RF σήματος. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό να υπάρχει καθώς στην πραγματικότητα δεν μπορεί να κατασκευαστεί laser απόλυτα μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

2.6.2 Πολυπλεξία οπτικών σημάτων σε RoF

Οι τεχνικές πολυπλεξίας είναι πολύ σημαντικές για την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος. Συνεπώς η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής που θα εξασφαλίζει υψηλή φασματική απόδοση και θα έχει την χαμηλότερη δυνατή πολυπλοκότητα είναι εξαιρετικά σημαντική για τα συστήματα RoF. Οι τρεις κατηγορίες πολυπλεξίας που θα παρουσιαστούν είναι:

- Sub-Carrier Multiplexing (SCM)
- Wavelength Division Multiplexing (WDM)
- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

2.6.2.1 Sub-Carrier Multiplexing

Σε αυτή την τεχνική πολλαπλά σήματα πολυπλέκονται στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων και μεταδίδονται μέσω ενός μήκους κύματος στο οπτικό πεδίο. Η βασική ιδέα είναι ο συνδιασμός δύο επιπέδων διαμόρφωσης σε διαφορετικά πεδία. Στο πρώτο επίπεδο που αφορά το RF κομμάτι, αρκετά RF σήματα πολυπλέκονται χωρίς να απαιτείται μεγάλη φασματική απόσταση μεταξύ τους. Στο δεύτερο επίπεδο διαμόρφωσης που γίνεται στο οπτικό περιβάλλον το συνολικό σήμα που αποτελείται από τα επιμέρους διαμορφώνεται με τη χρήση ενός laser και ενός οπτικού διαμορφωτή. Πρόκειται για μία απλή και φθηνή μέθοδο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της είναι η δυνατότητα να τοποθετεί διαφορετικά οπτικά φέροντα αρκετά κοντά. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μικροκυματικές και οι RF συσκευές είναι πολύ πιο ανεπτυγμένες από τις οπτικές. Ο μικροκυματικός ταλαντωτής είναι πολύ πιο σταθερός από τον οπτικό (laser) και η επιλεκτικότητα ενός μικροκυματικού φίλτρου είναι πολύ καλύτερη από ενός οπτικού. Συνολικά λοιπόν η SCM αξιοποιεί αποδοτικότερα το εύρος που παρέχει μία ίνα σε σχέση για παράδειγμα με την WDM που θα αναλυθεί παρακάτω ενώ δεν περιορίζεται από την χρωματική διασπορά όπως η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου. Το αρνητικό στοιχείο της μεθόδου είναι ότι περιλαμβάνει αναλογική διαμόρφωση και άρα επηρεάζεται σημαντικά από τον θόρυβο που παράγεται από το laser.

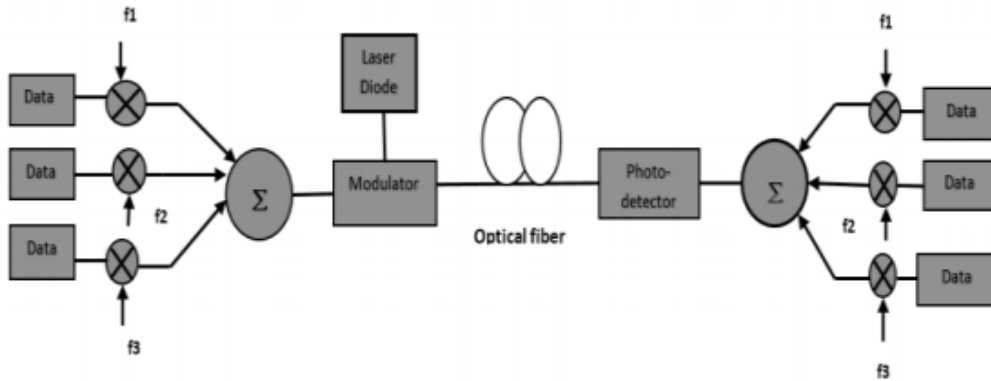


Illustration 10: Basic Configuration of SCM

2.6.2.2 Wavelength Division Multiplexing

Στα WDM συστήματα το φως διαμορφώνεται είτε άμεσα είτε με τη χρήση ενός εξωτερικού διαμορφωτή. Σε μία ίνα μεταφέρονται διαφορετικά μήκη κύματος τα οποία αντιμετωπίζονται ως διαφορετικά κανάλια που μεταφέρουν διαφορετικά δεδομένα. Ο WDM πολυπλέκτης είναι ένα παθητικό στοιχείο που συνδιάζει τα διαφορετικά μήκη κύματος σε μία οπτική ίνα. Η τεχνική αυτή βοηθάει στην καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης που παρέχει μία ίνα ενώ πλέον έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) που απαιτούν μικρότερες “αποστάσεις” μεταξύ των διαφορετικών καναλιών και άρα υποστηρίζουν μεγαλύτερο αριθμό.

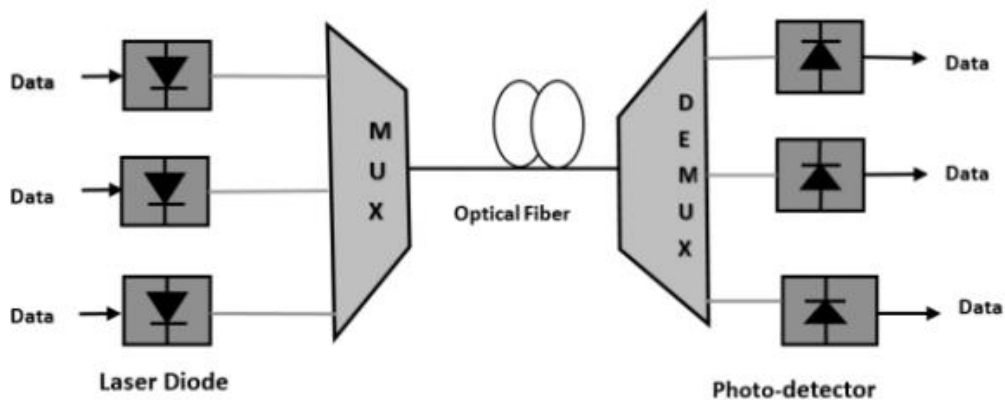


Illustration 11: Wavelength Division Multiplexing System

2.6.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας αριθμός subcarriers(υποφέρουσες) για ταυτόχρονη μεταφορά ροών δεδομένων χαμηλού ρυθμού. Οι subcarriers διαμορφώνονται με PSK (Phase Shift Keying) ή QAM (Quadrature Amplitude Modulation) και υπάρχει η απαίτηση της ορθογωνιότητας μεταξύ τους. Ο συνδιασμός αυτής της τεχνικής διαμόρφωσης με τις RoF τεχνολογίες οδηγεί σε ασύρματες επικοινωνίες με υψηλή ταχύτητα και μεγάλη κάλυψη. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ ευαίσθητη στον θόρυβο φάσης και εμφανίζει υψηλό peak-to-

average power ratio (PAPR) πράγμα που περιορίζει τον RF ενισχυτή. Ο ενισχυτής θα πρέπει να λειτουργήσει σε χαμηλή ισχύ ώστε να μην υπάρξει παραμόρφωση των κορυφών του σήματος που απέχουν αρκετά από τη μέση τιμή του.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε συγκριτικά τις ιδιότητες των μεθόδων που παρουσιάστηκαν καθώς και των συνδιασμών τους.

	SCM	WDM	OFDM	SCM-WDM	OFDM-WDM
Spectral Efficiency	Medium	Low	Medium	High	High
Transmitter side Electrical Complexity	Medium	Low	High	Medium	High
Transmitter side Optical Complexity	Low	Medium	Medium	Medium	Medium
Receiver side Electrical Complexity	Low	Low	Medium	Low	High
Receiver side Optical Complexity	Low	Low	Medium	Low	Medium

Table 1: Comparison of different multiplexing methods

2.7 Μορφές RoF

Σε αυτήν την ενότητα θα χωρίσουμε τις τεχνολογίες RoF σε δύο κατηγορίες τις οποίες θα εξετάσουμε ξεχωριστά.

2.7.1 Αναλογικό RoF (ARoF)

Σε αυτή την τεχνολογία 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. Το πλεονέκτημα εδώ είναι ο απλοποιημένος σχεδιασμός του σταθμού βάσης και το μειονέκτημα η επιρροή της χρωματικής διασποράς και των φαινομένων ενδοδιαμόρφωσης.

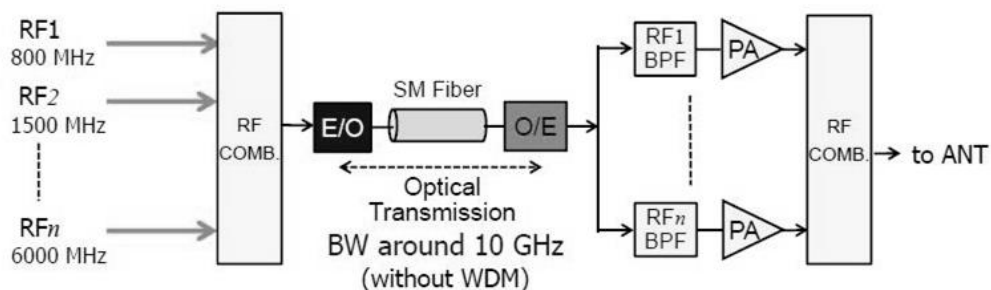


Illustration 12: Analog RoF System

Το σχήμα καθιστά φανερό την απλότητα σχεδιασμού ενός τέτοιου συστήματος καθώς απουσιάζουν μετατροπές από αναλογική σε ψηφιακή μορφή και αντίστροφα καθώς και μετατροπές συχνότητας. Η ευαισθησία στις μη γραμμικότητες προκαλείται από την παρου-

σία πολλαπλών φερόντων. Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι στο ARoF το δυναμικό εύρος του οπτικού συνδέσμου μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας γεγονός που οφείλεται στην απόσβεση που αυτή παρουσιάζει.

2.7.2 Ψηφιακό RoF (DRoF)

Πρόκειται για μία εναλλακτική για τα RoF συστήματα της επόμενης γενιάς. 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.

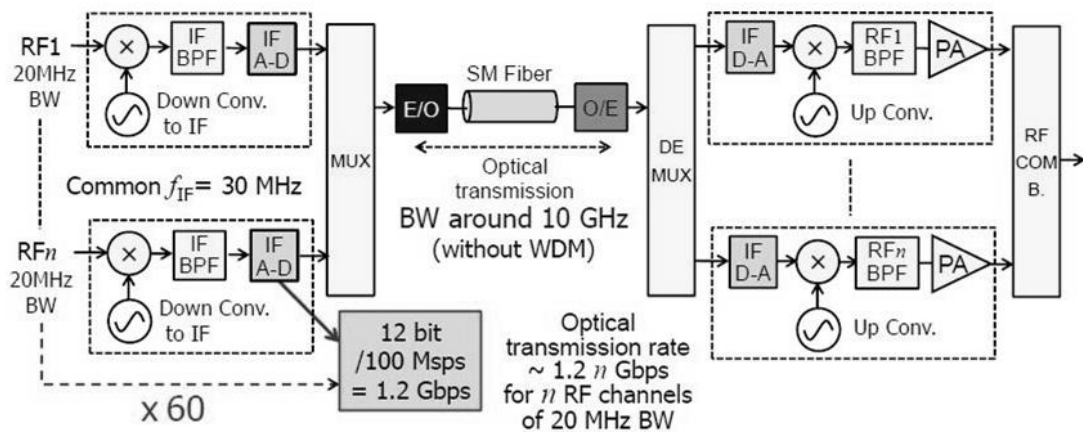


Illustration 13: Digital RoF System

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.

2.8 Εφαρμογές RoF

Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες ζητούν κανάλια μετάδοσης με μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και τη δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης πολλαπλών και διαφορετικού είδους σημάτων (broadband). Παράλληλα η απαίτηση για ασύρματη σύνδεση και φορητότητα γίνεται όλο και πιο συχνή. Οι τεχνολογίες RoF είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών σε εφαρμογές που αφορούν την παροχή λύσεων σχετικών με το τελευταίο μίλι, με την αύξηση κάλυψης και χωρητικότητας καθώς και με το backhaul δίκτυο.

Τα πρώτα RoF συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για μετάδοση μικροκυματικών σημάτων. Τα διαμορφωμένα μικροκυματικά σήματα έφταναν στους απομακρυσμένους σταθμούς αφού

πρώτα είχαν μετατραπεί σε οπτικά. Εκεί γινόταν αναγέννηση του μικροκυματικού κύματος και εκπομπή του μέσω κεραίας.

Τα σημερινά RoF συστήματα έχουν πρόσθετες δυνατότητες πέρα από την μετάδοση του σήματος όπως είναι η διαμόρφωση και η επεξεργασία σήματος καθώς και το up/down conversion συχνότητας.

Η κυρίαρχη χρήση των RoF τεχνολογιών σήμερα είναι η διανομή ραδιοσημάτων μέσω ίνας για αύξηση της χωρητικότητας και του εύρους ζώνης σε εσωτερικούς χώρους. Πρόκειται για τα κατακευκτα συστήματα κεραιών με χρήση ίνας –fiber Distributed Antenna Systems (DAS) και χρησιμοποιούνται σε πλήθος τοποθεσιών όπως δημόσια κτίρια, αεροδρόμια και μέσα μεταφοράς. Σε αυτά τα ασύρματα συστήματα ο σταθμός βάσης περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό για τη μετατροπή ραδιοσημάτων σε οπτικά, τα οποία έπειτα διανέμονται μέσω ίνας σε απομακρυσμένους σταθμούς-Remote Nodes(RN). Σε καθένα από αυτούς έχουμε επαναφορά του σήματος στην αρχική του μορφή και εκπομπή του μέσω κεραίας.

Γενικά για όλες τις εφαρμογές της τεχνολογίας RoF μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχιτεκτονική που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων συνδέονται με τους σταθμούς βάσης με μικροκυματικούς συνδέσμους. Μελλοντικά η αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης θα οδηγήσει στην εξυπηρέτηση μερικών ομάδων σταθμών βάσης από έναν μόνο κόμβο μεταγωγής. Για ένα δίκτυο που εκτείνεται σε μεγάλη έκταση απαιτείται μεγάλος αριθμός τέτοιων κόμβων μεταγωγής διασυνδεδεμένων μέσω ενός δακτυλίου μητροπολιτικού δικτύου-Metropolitan Area Network(MAN). Μητροπολιτικό είναι το δίκτυο που καλύπτει έκταση που αντιστοιχεί σε μία πόλη. Στην παρουσιαζόμενη αρχιτεκτονική κανάλια μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν από το δίκτυο μέσω των κόμβων μεταγωγής ενώ για τη διασύνδεση των απομακρυσμένων κόμβων βλέπουμε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τοπολογίες(π.χ δακτύλιος, αστέρας).

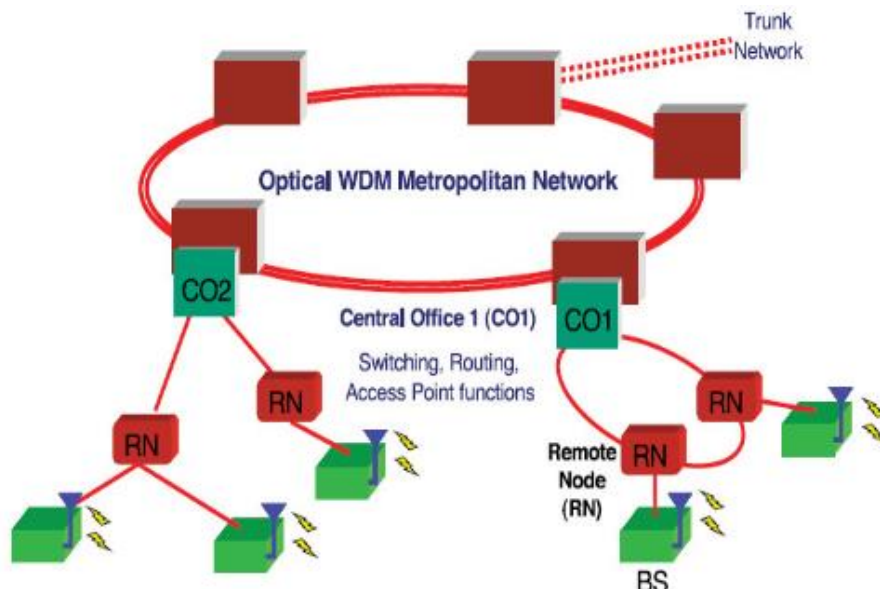


Illustration 14: Architecture of RoF with an optical WDM MAN

Γενικότερα, μελλοντικά η συνεχής αύξηση των τηλεπικοινωνιακών αναγκών θα οδηγήσει στην ανάγκη για βελτιστοποίηση όλων των επιμέρους τμημάτων της τεχνολογίας RoF που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, αλλά και στην εύρεση των πλέον αποδοτικών συνιστωσών όσον αφορά τη μορφή του σήματος που μεταδίδεται. Παράλληλα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι δυσμενείς παράγοντες μετάδοσης.

Στην κατεύθυνση αυτή στο επόμενο κεφάλαιο μελετάται πειραματικά η RoF τεχνολογία. Επιλέγονται διαφορετικοί ρυθμοί μετάδοσης, διαφορετικές μορφές διαμόρφωσης και αναφέρονται σε κάθε περίπτωση οι αρνητικές επιδράσεις των διάφορων φαινομένων διάδοσης και αν τελικά κάθε σενάριο μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Εισαγωγή

Στα πλαίσια αξιοποίησης της τεχνολογίας RoF, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα μελετηθούν πειραματικά διαφορετικά σενάρια της εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής. Θα μελετηθεί δηλαδή η μετάδοση σήματος μέσω RoF και οι επιδράσεις του συστήματος στο τελικά λαμβανόμενο σήμα. Τα βασικά στάδια από τα οποία θα περνάει το εκάστοτε προς μετάδοση σήμα συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα.

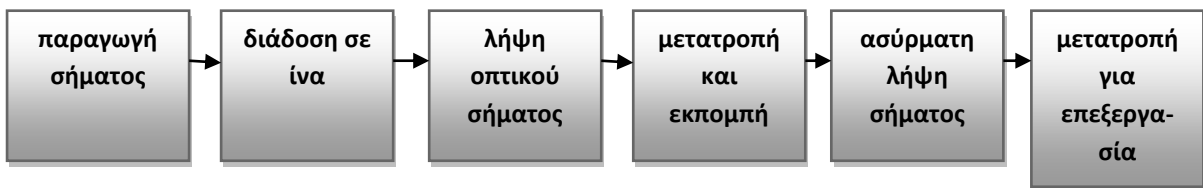


Illustration 15: Στάδια μετάδοσης σήματος κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων

Για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος (μήκος ίνας, απόσταση κεραιών, είδος σήματος και διαμόρφωσης) θα ελέγχεται η ποιότητα του μεταδιδόμενου σήματος στα επιμέρους σημεία του. Θα γίνει λοιπόν παρατήρηση της εξασθένησης και της αλλοίωσης που υπόκειται το μεταδιδόμενο σήμα σε διαφορετικά σημεία της διάταξης. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί αν τα σενάρια μετάδοσης που μελετώνται μπορούν να έχουν πραγματική χρήση, ποια προβλήματα εμφανίζονται και πως αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο του πειράματος αποτελείται από τα εξής στάδια:

- Δημιουργία RF σήματος
- Μετατροπή του RF σήματος σε οπτικό
- Διάδοση στην ίνα
- Μετατροπή του οπτικού σήματος ξανά σε RF
- Upconversion συχνότητας RF σήματος
- Ασύρματη εκπομπή του τρέχοντος σήματος από κεραία εκπομπής και έπειτα λήψη του από δεύτερη κεραία
- Downconversion της συχνότητας για επαναφορά στην προηγούμενη κατάσταση
- Ενίσχυση του σήματος όπου απαιτείται
- Αξιολόγηση του σήματος στα διάφορα σημεία της διάταξης μέσω κατάλληλου εξοπλισμού

Οι πειραματικές διαδικασίες χωρίζονται σε δύο μέρη. Το πρώτο εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Κινητών Επικοινωνιών του ΕΜΠ ενώ το δεύτερο στο OTEAcademy στο Μαρούσι.

Στο εργαστήριο Κινητών Επικοινωνιών η απόσταση διάδοσης στην ίνα ήταν μικρότερη (<7-8 m) καθώς δεν υπήρχε τμήμα ίνας διάδοσης παρά μόνο η ίνα διασύνδεσης των στοιχείων του οπτικού κυκλώματος. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε σήμα πληροφορίας με κωδικοποίηση NRZ παλμών διαφορετικών ταχυτήτων. Οι NRZ παλμοί γενικά χρησιμοποιούνται για προσομοίωση αληθινών δεδομένων αλλά και για έλεγχο συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του εκάστοτε συστήματος. Στη δεύτερη φάση του πειράματος το σήμα πληροφορίας παράχθηκε με τη βοήθεια HP γεννήτριας η οποία δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφορετικών μορφών διαμόρφωσης.

Στις μετρήσεις που έγιναν στο OTE Academy υπήρχε ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο διάδοσης καθώς υπήρχε η δυνατότητα χρήσης οπτικής ίνας μέχρι και 45km. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε πάλι σήμα πληροφορίας με κωδικοποίηση NRZ παλμών διαφορετικών ταχυτήτων και έπειτα παράχθηκε σήμα μέσω Gigabit Media Converter. Χρησιμοποιήθηκαν και οπτικοί εξασθενητές για προσομοίωση του καταμερισμού ισχύος που εμφανίζεται στις βασικές τοπολογίες οπτικών παθητικών δικτύων.

3.1 Πειραματικές μετρήσεις στο εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών

3.1.1 Αξιολόγηση για NRZ παλμούς 0.25/0.5/1GHz

Αρχικά θα αναλυθεί η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος με σήμα πληροφορίας με κωδικοποίηση NRZ παλμών ταχύτητας 0.25, 0.5 και 1 Gbps. Έπειτα θα γίνει αξιολόγηση του συστήματος με παρακολούθηση της μορφής που έχει το σήμα σε κάθε ένα από τα στάδια 1-6 της πειραματικής διάταξης.

3.1.1.1 Πειραματική διάταξη

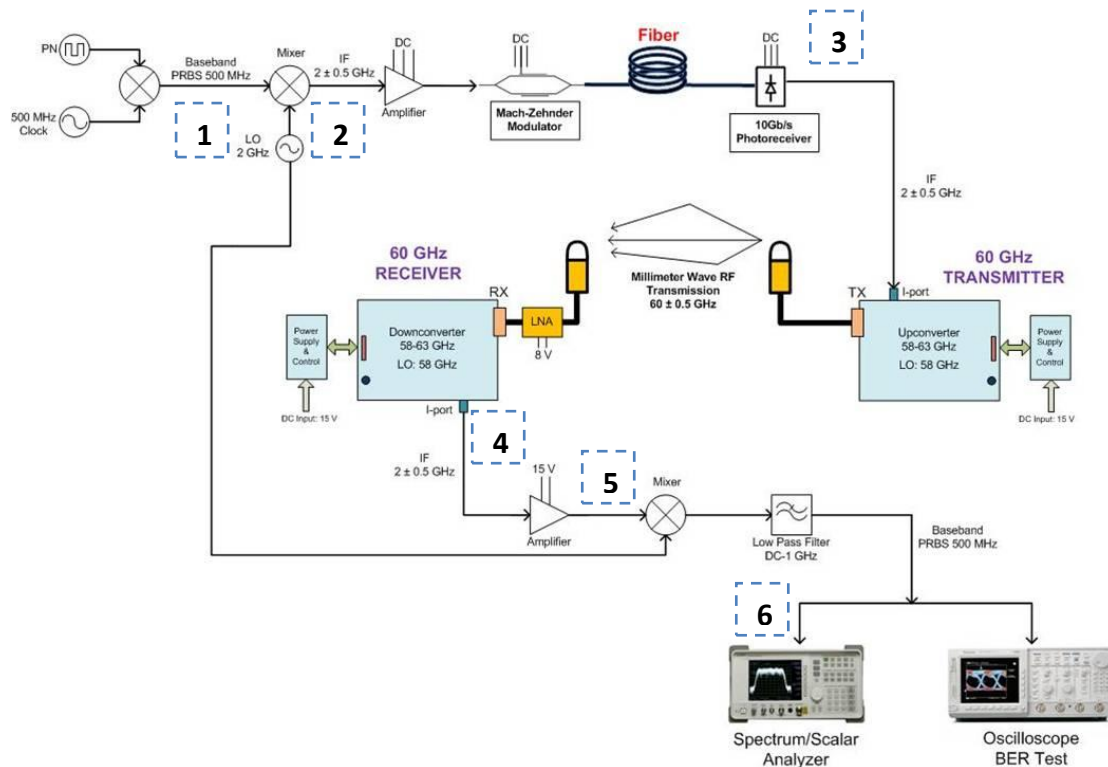


Illustration 16: Πειραματική διάταξη για μετάδοση σήματος με κωδικοποίηση NRZ παλμών

Για την παραγωγή του σήματος εισόδου χρησιμοποιείται γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας/ Pseudorandom Pattern Generator (PPG). Σε αυτή παράγεται μία τυχαία ακολουθία bits (PseudoNoise) που μαζί με το σήμα του ρολογιού, που καθορίζει την ταχύτητα μετάδοσης του παραχθέντος σήματος, οδηγούνται σε έναν ηλεκτρικό μείκτη. Ο έλεγχος για λάθη με την παραγωγή ψευδοτυχαίων ακολουθιών αποτελεί οικονομικότερη, από άποψη χρόνου και κόστους, εναλλακτική, έναντι της παραγωγής δοκιμαστικών κωδίκων με αλγοριθμικές μεθόδους, γι' αυτό και επικρατεί.

Παρατήρηση: Οι NRZ παλμοί επιλέχθηκαν με DC συνιστώσα μηδέν (AC coupled) ώστε το σχήμα διαμόρφωσης να είναι όσο το δυνατόν απλούστερο (On-Off Keying).

Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν αντιστοιχούσαμε το bit 1 σε μία τιμή $V_{max}/2$ και το bit 0 σε $-V_{max}/2$ θα παρατηρούσαμε Binary Phase-Shift Keying (BPSK) διαμόρφωση.

Σε αυτό το σημείο έχει παραχθεί ένα baseband σήμα 0.25/0.5/1 Gbps ανάλογα με την αντίστοιχη συχνότητα που έχει επιλεγεί στο ρολόι. Το σήμα αυτό με τη σειρά του οδηγείται σε ένα νέο μείκτη μαζί με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή. Δημιουργείται τώρα ένα IF (Intermediate Frequency) σήμα σε συχνότητα $2\pm(0.25/0.5/1)$ GHz αφού η συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή επιλέχθηκε στα 2 GHz. Ο ενισχυτής που ακολουθεί είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της ισχύος του σήματος σε επίπεδα που θα εξασφαλίσουν την ορθή λειτουργία του διαμορφωτή Mach-Zehnder που αποτελεί το αμέσως επόμενο στάδιο της διάταξης. Εδώ έχουμε τη μετατροπή του σήματος από ηλεκτρικό σε οπτικό ώστε να ακολουθήσει η διάδοση του στην ίνα.

Παρατήρηση: Η συχνότητα του σήματος σε αυτό το κομμάτι είναι της τάξεως των THz και γι' αυτό εδώ δεν έχουμε ενδιάμεσες μετρήσεις.

Μετά τη διάδοση στην ίνα και όλες τις απώλειες και τα φαινόμενα διασποράς που αυτή συνεπάγεται, το σήμα εισέρχεται στην φωτοδίοδο η οποία το μετατρέπει σε ηλεκτρικό, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση σε συχνότητες του IF σήματος γύρω από τα 2GHz.

Ακολουθεί ένα upconversion του σήματος στα 60GHz ώστε να μπορέσει να εκπεμφεί από την κεραία-πομπό. Η διάταξη περιλαμβάνει δύο όμοιες κεραίες τοποθετημένες σε οριζόντια απόσταση $d=1\text{m}$ ή μία από την άλλη και σε ύψος $h=1.4\text{m}$ από το έδαφος (κοινό και για τις δύο). Η μία κεραία λειτουργεί ως πομπός και η άλλη ως δέκτης. Στη διάδοση του σήματος στο ένα μέτρο που χωρίζει τις δύο κεραίες αναμένονται οι μεγαλύτερες απώλειες του συστήματος καθώς η διάδοση γίνεται στον ελεύθερο χώρο.

Η εξασθένιση που έχει υποστεί το σήμα μετά τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier-LNA) μετά την κεραία λήψης που λειτουργεί στα 60GHz. Η επιλογή αυτού του ενισχυτή οφείλεται στο ότι έχει τη δυνατότητα να ενισχύει σήματα πολύ χαμηλής ισχύος χωρίς να υποβαθμίζει σημαντικά το σηματοθορυβικό τους λόγο (Signal-to-Noise-Ratio-SNR).

Ακολουθεί μετατροπή σε χαμηλή συχνότητα φέροντος (downconversion) του σήματος και πάλι γύρω από τα 2GHz ώστε να μπορέσει να προωθηθεί στο υπόλοιπο σύστημα προς αξιολόγηση. Ο επιπλέον ενισχυτής που διακρίνουμε στο σχήμα χρειάζεται γιατί όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι απώλειες ελεύθερου χώρου είναι εξαιρετικά μεγάλες.

Ακολουθεί ένας μείκτης που είναι υπεύθυνος για τη μετάβαση του σήματος από IF ξανά σε baseband. Στόχος είναι να λάβουμε ξανά το αρχικό σήμα μαζί βέβαια με την αναπόφευκτη εξασθένιση και αλλοίωση που επιφέρουν τα διάφορα στάδια της διάδοσης.

Παρατήρηση: Ο ίδιος τοπικός ταλαντωτής συνδέεται στον αρχικό μείκτη που μετέτρεψε το baseband σήμα σε IF και στον τελικό που επαναφέρει το σήμα σε baseband. Αυτό συμβαίνει το τελικό σήμα πρέπει να διαφέρει όσο το δυνατόν λιγότερο από το αρχικό.

Τέλος ακολουθεί ένα βαθυπερατό φίλτρο (Low Pass Filter-LPF) το οποίο αποκόπτει τις εναπομείνουσες συνιστώσες ρολογιού του σήματος που προέκυψαν στους μείκτες αφήνοντας να περάσει μόνο το αρχικό baseband σήμα.

Παρατήρηση1: Στο σχήμα της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται η δοκιμή του συστήματος για παλμούς NRZ 0.5Gbps, στην πραγματικότητα έγιναν δοκιμές για 0.25, 0.5 και 1Gbps και τα αποτελέσματα τους θα παρουσιασθούν παρακάτω.

Παρατήρηση2: Το βαθυπερατό φίλτρο που απεικονίζεται έχει συχνότητα αποκοπής 1GHz το οποίο είναι κατάλληλο για τις περιπτώσεις NRZ παλμών 0.25 και 0.5GHz, στην οριακή όμως περίπτωση του 1GHz αναμένεται να υπάρχει κάποια μικρή επιβάρυνση στα αποτελέσματα.

Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιασθεί η μορφή του σήματος σε κάθε ένα από τα #1-#6 σημεία της διάταξης όπως αυτό παρουσιάζεται στον αναλυτή φάσματος/ spectrum analyzer.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση του σήματος στα διάφορα στάδια ήταν ο αναλυτής φάσματος και το παλμοσκόπιο για τα οποία αξίζει να αναφερθούν μερικά πράγματα.

Spectrum Analyzer/Αναλυτής Φάσματος: Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Αν και η παρατήρηση στο πεδίο του χρόνου φαίνεται πιο φυσική, η ισοδύναμη στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να δώσει χρήσιμες συμπληρωματικές

πληροφορίες. Ο διαχωρισμός των αρμονικών συνιστωσών ενός σήματος είναι πολύ πιο εύκολος και ακριβής στο πεδίο της συχνότητας. Οι βασικές μετρήσεις σχετίζονται με:

- Τη διαμόρφωση (βαθμός διαμόρφωσης, χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης, πλάτος πλευρικών ζωνών)
- Την παραμόρφωση (αρμονικές, ενδοδιαμόρφωση) και
- Τον θόρυβο (SNR)

Oscilloscope/ Παλμογράφος: Χρησιμοποιείται για την παρατήρηση ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου. Με τη χρήση του μπορούν να μελετηθούν στοιχεία των κυματομορφών μέσω των οποίων μπορεί να γίνει αξιολόγηση της ποιότητας των σημάτων. Τέτοια είναι το πλάτος, η συχνότητα, ο χρόνος ανόδου και καθόδου του παλμού, η παραμόρφωση κ.α. (Χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις που έγιναν στο OTE Academy).

3.1.1.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά θα παραθέσουμε τις τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν για το πείραμα.

PPG

$V_{out}= 508mV_{pp}$	
$V_{off}=0V$	
CLK Input (0.25/0.5/1GHz)	-1 dBm (Ισχύς RF σήματος από τη γεννήτρια)
	2^7-1 PRBS (χρησιμοποιείται 7 ^{ης} τάξης PRBS)

Table 2: Τιμές παραμέτρων για PPG

Οπτικό τμήμα

$\lambda= 1543.720nm$
$P= 4.26dBm$
Οπτική ισχύς που λήφθηκε = -6.3dBm
Φωτοανιχνευτής: $V= 8V$, $I= 110mA$
MZM: $V_{bias}= 1.96V$, $V_{gc}= -1.4V$

Table 3: Τιμές παραμέτρων για το οπτικό τμήμα μετάδοσης

Κεραίες

Πομπός Tx	$V=15V$	$I=515mA$
Δέκτης Rx	$V=15V$	$I=380mA$

Table 4: Τιμές παραμέτρων για τις κεραίες

Στο σημείο 1 παρατηρούμε την συνάρτηση sinc(x) που είναι απλά το φασματικό ανάλογο του τετραγωνικού παλμού που έχουμε στο πεδίο του χρόνου. Το σήμα είναι βασικής ζώνης με μηδενισμούς ανά $1/T_s = 250\text{MHz}$. Ανάλογα αποτελέσματα βλέπουμε παρακάτω για 500Mbps και 1Gbps.

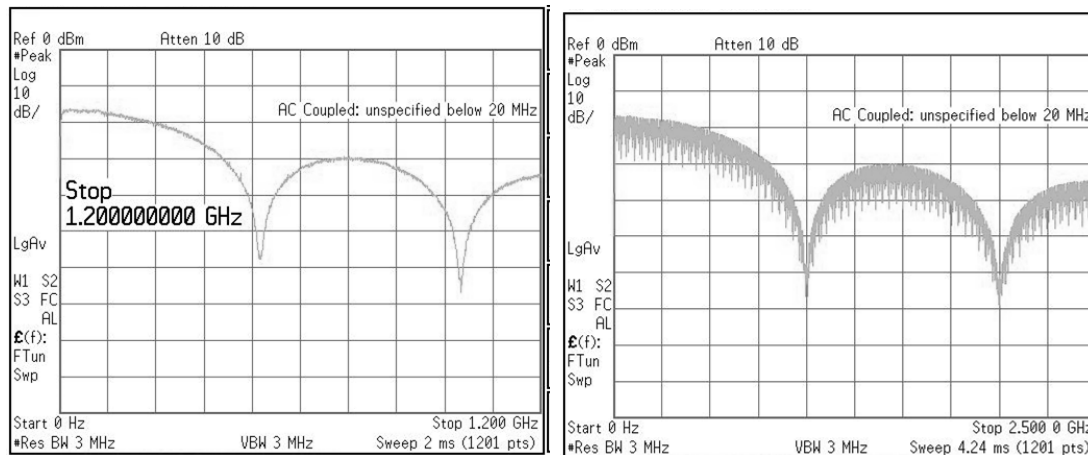


Illustration 18: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 1 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα

Παρατήρηση: Σύμφωνα με το θεώρημα Shannon:

$$C = B * \log_2(1 + SNR)$$

Η χωρητικότητα ενός καναλιού αυξάνεται όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης και ο σηματοθρομβικός λόγος. Αντίστοιχα για το ίδιο κανάλι αύξηση του εύρους ζώνης του σήματος θα προκαλέσει μείωση του σηματοθρομβικού λόγου. Έτσι εξηγείται το ότι στο σήμα του 1Gbps εμφανίζεται περισσότερος θόρυβος.

#2

Στο σημείο 2 έχουμε τα ίδια σήματα απλά πλέον έχουν μετατοπιστεί με κέντρο τη συχνότητα 2GHz του τοπικού ταλαντωτή.

250Mbps

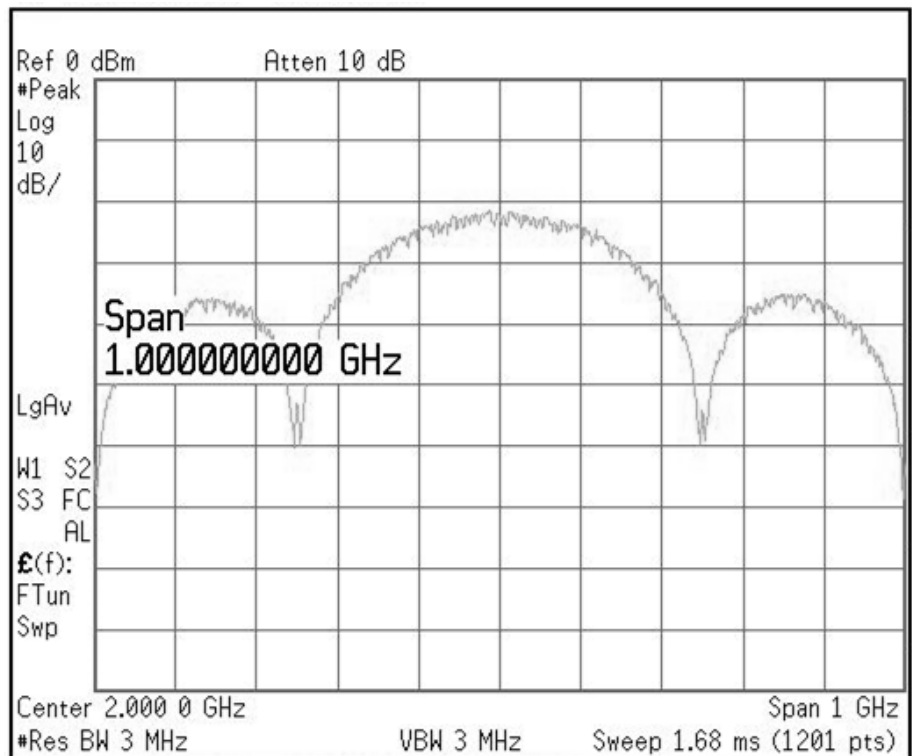
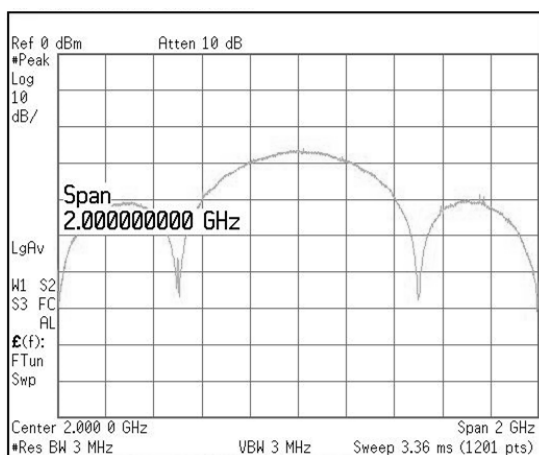


Illustration 19: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 2 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps

500Mbps



1Gbps

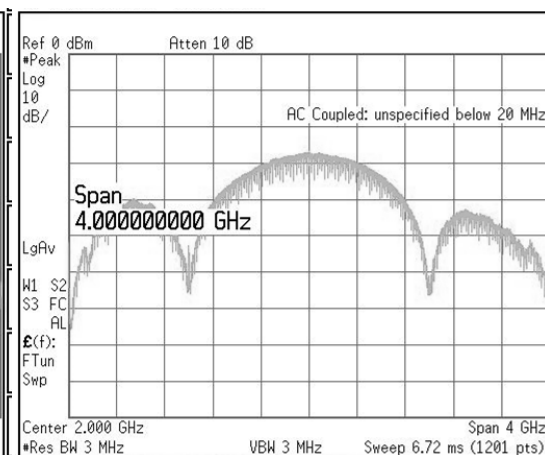


Illustration 20: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 2 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα

#3

Στο σημείο 3 το μεταδιδόμενο σήμα έχει περάσει από το ηλεκτρικό περιβάλλον στο οπτικό και έχει επιστρέψει στο οπτικό. Η φασματική τοποθέτηση είναι λοιπόν ίδια, ωστόσο οι μετατροπές αυτές και η διάδοση στην ίνα έχουν παραμορφώσει ελαφρώς το σήμα. Ο λόγος που δεν παρατηρούμε σημαντική μείωση ισχύος είναι ο ενισχυτής που έχει παρεμβληθεί.

250Mbps

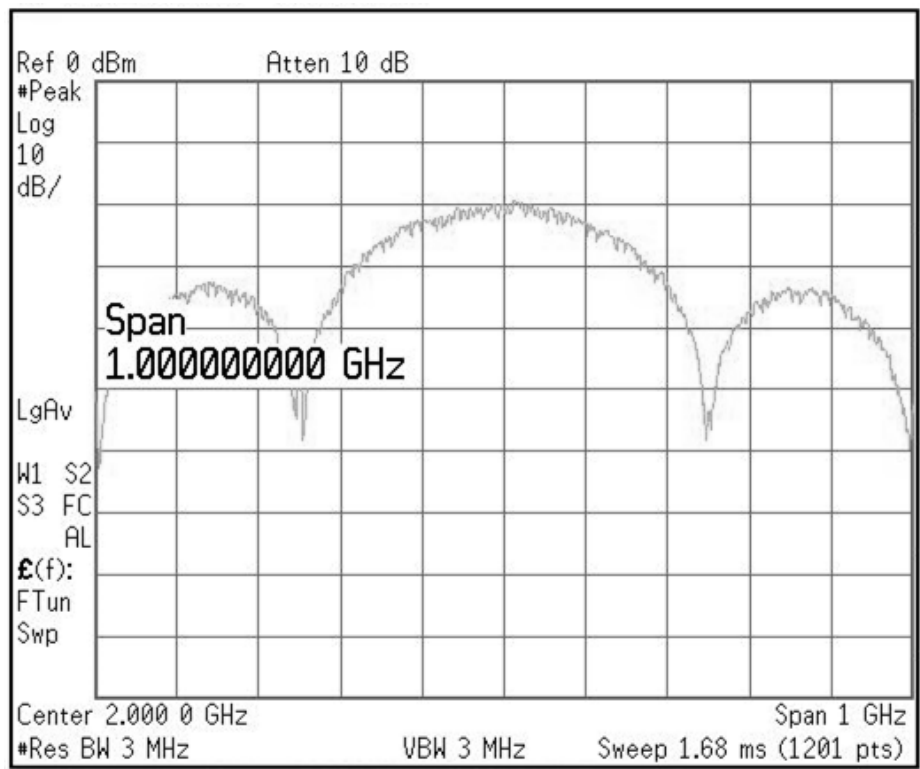
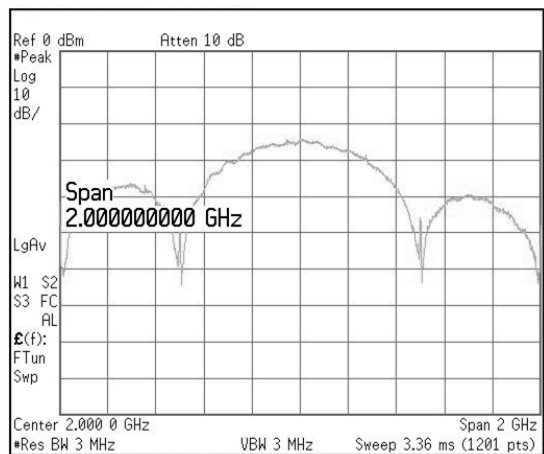


Illustration 21: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 1Gbps

500Mbps



1Gbps

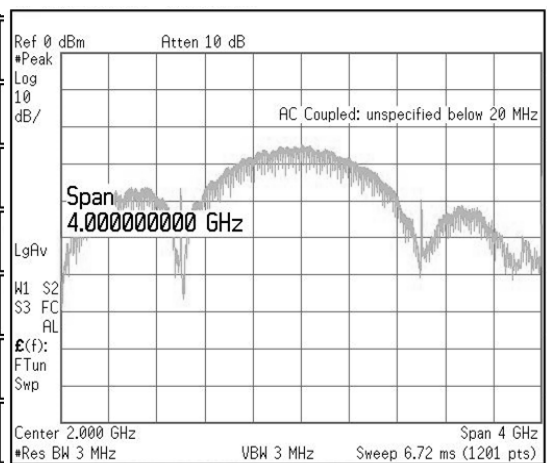


Illustration 22: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα

#4

Στο σημείο 4 έχει προηγηθεί η διάδοση του σήματος στον ελεύθερο χώρο οπότε αναμένουμε να πάρουμε μία πολύ αλλοιωμένη μορφή του σήματος λόγω απωλειών ελεύθερου χώρου και της παρουσίας της πολυδιαδρομικής παρεμβολής που επιβαρύνει την ποιότητα του σήματος. Η συχνότητα του προς μετάδοση σήματος είναι αρκετά μεγάλη και συνεπώς μεγάλες είναι και οι απώλειες ελεύθερου χώρου. Οι απώλειες αυτές οφείλουν να ισοσταθμιστούν από τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης ώστε να καταστεί λειτουργικό το σύστημα. Τα παραπάνω συνοψίζονται στην εξίσωση του Friis:

$$\frac{W_r}{W_t} = n_t * n_r * \left(\frac{\lambda}{4 * \pi * R}\right)^2 * D_{gt} * D_{gr}$$

Όπου W_t η ισχύς που εκπέμπει η κεραία εκπομπής,

W_r η ισχύς που λαμβάνει η κεραία λήψης,

n_t, n_r οι συντελεστές απόδοσης των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα,

λ το μήκος κύματος του σήματος που για τα 60GHz προκύπτει ίσο με 5mm,

R η απόσταση των δύο κεραιών και

D_{gt}, D_{gr} τα κατευθυντικά κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα

Στην παραμόρφωση του σήματος συμβάλλουν και τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης που αναπόφευκτα εμφανίζονται.

250Mbps

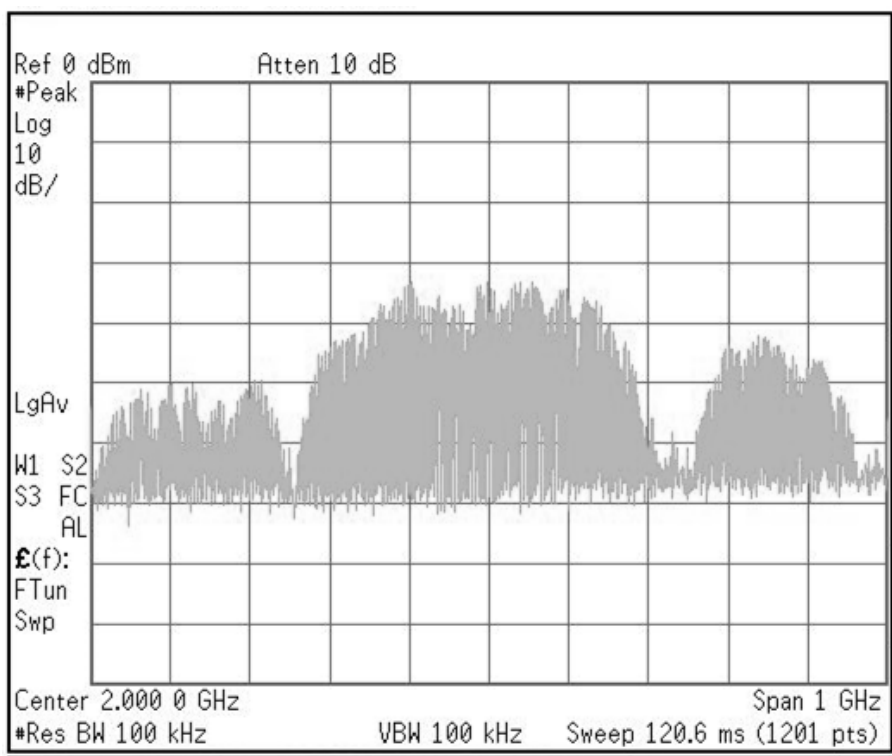
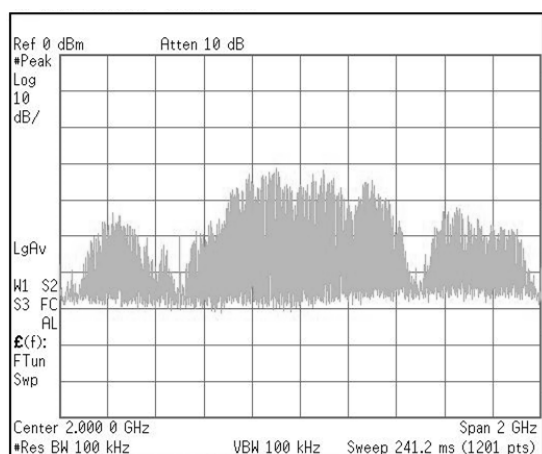


Illustration 23: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 4 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 1Gbps

500Mbps



1Gbps

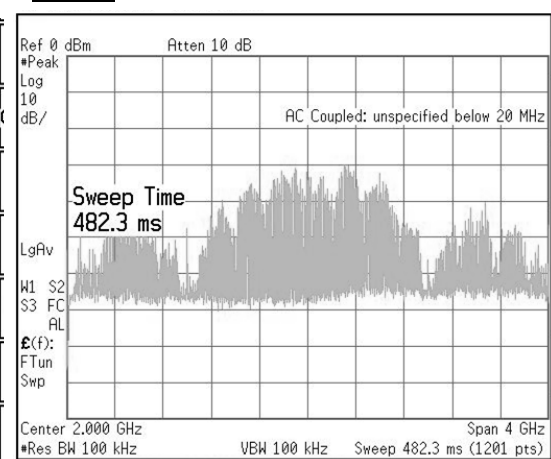


Illustration 24: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 4 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps και 1Gbps αντίστοιχα

#5

Το σημείο 5 βρίσκεται μετά από τον ενισχυτή που επαναφέρει την ισχύ στα επιθυμητά επίπεδα για να γίνει δυνατή η ανάκτηση του αρχικού σήματος.

250Mbps

1Gbps

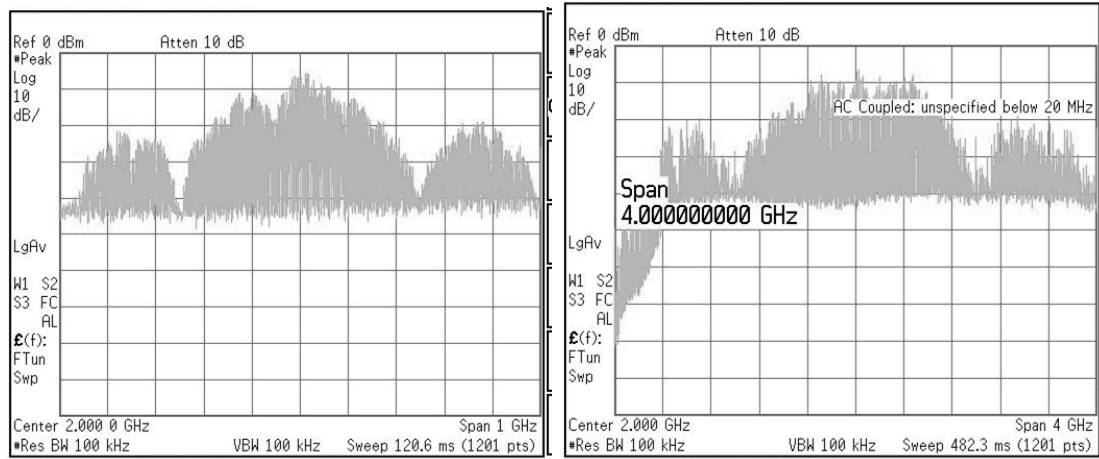


Illustration 25: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 5 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 1Gbps αντίστοιχα

#6

Στο σημείο 6 γίνεται η ανάκτηση του αρχικού σήματος. Γίνεται ενίσχυση του σήματος, αφαιρείται η συχνότητα των 2GHz και με ένα βαθυπερατό φίλτρο διατηρείται μόνο το baseband σήμα.

250Mbps

500Mbps

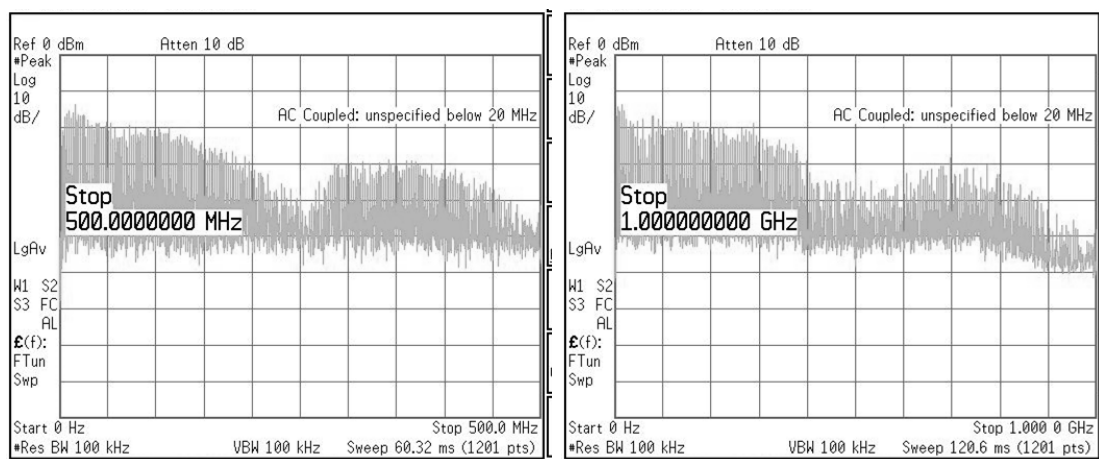


Illustration 26: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 6 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps και 500Mbps αντίστοιχα

1Gbps

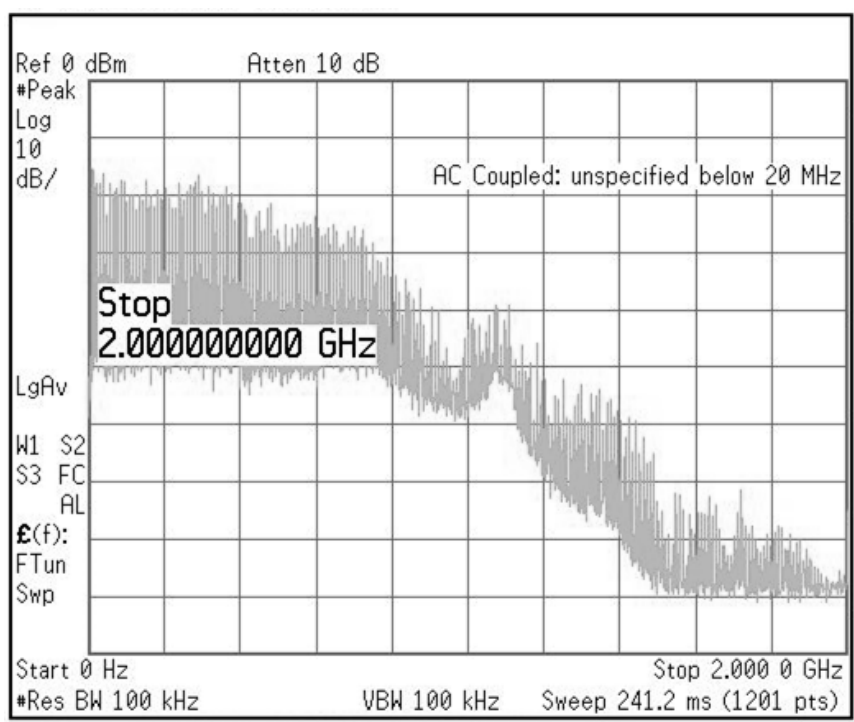


Illustration 27: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 6 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps

Βλέπουμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις το σήμα που παίρνουμε δεν είναι όμοιο με το αρχικό. Το φασματικό περιεχόμενο έχει εξαπλωθεί λόγω φαινομένων διασποράς και στην περίπτωση του σήματος 1GHz βλέπουμε ότι φτάνει μέχρι σχεδόν τα 2GHz. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα γιατί το βαθυπερατό φίλτρο που επιλέχθηκε έχει συχνότητα αποκοπής το 1GHz και άρα χάνουμε ένα κομμάτι πληροφορίας. Θα μπορούσαμε για αυτή μόνο την περίπτωση να χρησιμοποιήσουμε ένα βαθυπερατό φίλτρο με μεγαλύτερη συχνότητα αποκοπής.

3.1.2 Αξιολόγηση για σήματα από HP γεννήτρια

3.1.2.1 Πειραματική διάταξη

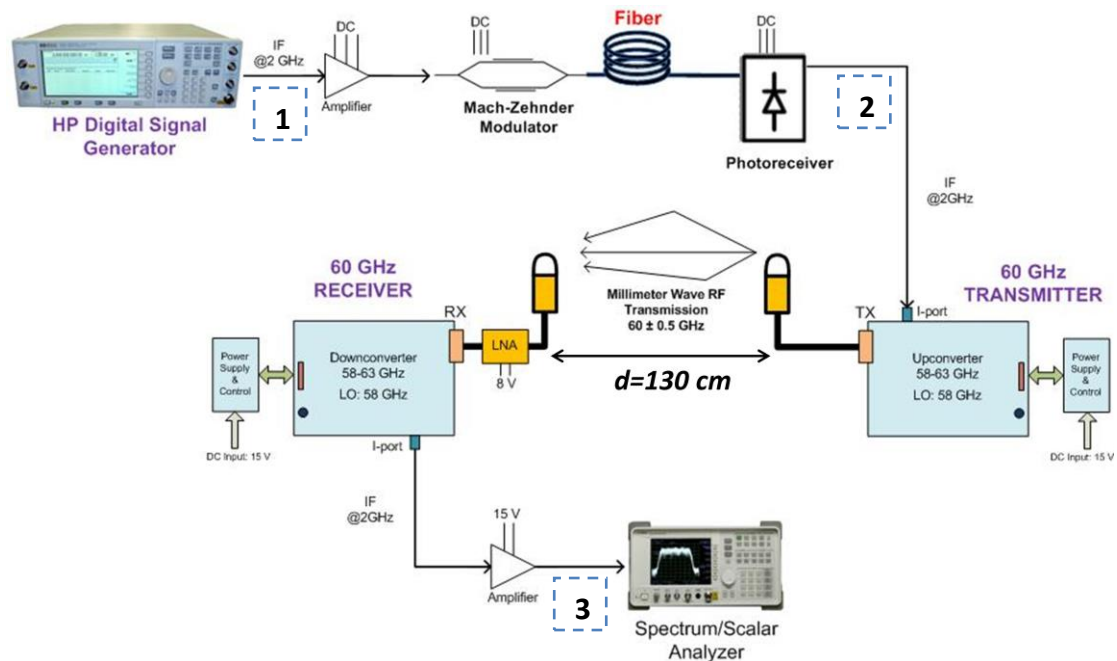


Illustration 28: Πειραματική διάταξη για μετάδοση σήματος που παράγεται από HP γεννήτρια

Η μοναδική διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη πειραματική διάταξη είναι ο τρόπος δημιουργίας του προς μετάδοση σήματος. Εδώ το σήμα παράγεται από μία γεννήτρια -η οποία παρέχει ένα εύρος σημάτων πληροφορίας διαμορφωμένα σε ένα φέρον-κατευθείαν στα 2GHz. Επίσης δοκιμάζονται και αξιολογούνται διαφορετικά είδη διαμόρφωσης. Παρατήρηση: Η χρήση της γεννήτριας δεν επιτρέπει την παραγωγή μεγάλου εύρους πληροφορίας ωστόσο δίνει τη δυνατότητα επιλογής διαφορετικών ειδών διαμόρφωσης για την επιλογή του καταλληλότερου σε κάθε περίπτωση.

3.1.2.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Οι παράμετροι του πειράματος τώρα ρυθμίζονται ως εξής:

Γεννήτρια: Ισχύς εξόδου -10dBm

Οπτικό τμήμα

$\lambda = 1543.720\text{nm}$
$P = 4.04\text{dBm}$
Οπτική ισχύς που λήφθηκε = -6.6dBm
Φωτοανιχνευτής: $V = 8\text{V}$, $I = 110\text{mA}$
MZM: $V_{\text{bias}} = 2.11\text{V}$, $V_{\text{gc}} = -0.9\text{V}$

Table 6: Τιμές παραμέτρων για το οπτικό τμήμα

Κεραίες

Πομπός Tx	$V = 15\text{V}$	$I = 515\text{mA}$
Δέκτης Rx	$V = 15\text{V}$	$I = 380\text{mA}$

Table 7: Τιμές παραμέτρων για κεραίες

Οι κεραίες έχουν τοποθετηθεί σε απόστα $d = 1.3\text{m}$ η μία από την άλλη και σε ύψος $H = 1.4\text{m}$ από το έδαφος.

Θα παρουσιαστούν τώρα τα είδη διαμόρφωσης που επιλέχθηκαν.

- Gaussian Frequency Shift Keying(GFSK)
Η FSK διαμόρφωση χρησιμοποιεί διαφορετικές τιμές συχνότητας για κάθε ένα από τα διαφορετικά bits που έχει να μεταδώσει. Η διαφορά της GFSK είναι ότι πριν αρχίσει τη διαμόρφωση αλλάζοντας τη συχνότητα στην αρχή κάθε περιόδου παλμού εφαρμόζει ένα γκαουσιανό φίλτρο για να κάνει τις μεταβάσεις ομαλότερες με αποτέλεσμα να περιορίζει το φασματικό εύρος.
Το είδος αυτής της διαμόρφωσης χρησιμοποιείται από την ασύρματη τηλεφωνία (DECT) και την τεχνολογία Bluetooth.
- Gaussian Minimum Shift Keying(GMSK)
Η MSK διαμόρφωση αποτελεί μία διαμόρφωση FSK συνεχούς φάσης πράγμα που οφείλεται στο ότι η διαφορά ανάμεσα στην υψηλότερη και την χαμηλότερη χρησιμοποιούμενη συχνότητα ισούται με το μισό bit rate. Και εδώ το γκαουσιανό φίλτρο που εφαρμόζεται περιορίζει το φασματικό εύρος του σήματος, μειώνοντας την ισχύ των πλευρικών ζωνών και περιορίζοντας έτσι τις παρεμβολές με γειτονικές συχνότητες πράγμα σημαντικό κυρίως στις κινητές τηλεπικοινωνίες. Το είδος αυτής της διαμόρφωσης χρησιμοποιείται στο GSM(Global System for Mobile Communications).
Παρατήρηση: Τα δύο παραπάνω είδη διαμόρφωσης δεν εμπεριέχουν διακυμάνσεις πλάτους και άρα μπορούν χρησιμοποιηθούν σε συνδιασμό με αποτελεσματικότερους ενισχυτές παρόλο που τείνουν να είναι μη γραμμικοί. Έτσι μειώνονται οι απαιτήσεις ισχύος του συστήματος.

- $\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)

Η QPSK είναι διαμόρφωση φάσης που χρησιμοποιεί 4 σημεία στο constellation diagram και άρα μπορεί να κωδικοποιήσει 2 bits ανά σύμβολο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για διαφορικό σχήμα διαμόρφωσης δηλαδή η πληροφορία βρίσκεται στην μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη και όχι στην ίδια την εκάστοτε κατάσταση. Στην $\pi/4$ QPSK υπάρχουν δύο ίδιοι αστερισμοί εκ των οποίων ο ένας έχει περιστραφεί κατά 45° σε σχέση με τον άλλο. Το πλεονέκτημα αυτού του σχήματος διαμόρφωσης είναι ότι η μέγιστη μετατόπιση συχνότητας είναι 135° έναντι των 180° του απλού DQPSK. Μεγάλη αλλαγή συχνότητας σημαίνει ταχείες αλλαγές πλάτους και αυξάνει τις απαιτήσεις του συστήματος για εύρος ζώνης και γραμμικότητα. Αυτό το σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται στα PHS(Personal Handyphone System) και στα TETRA(Trans European Trunked Radio).

Παρατήρηση: Συνολικά διαμορφώσεις τύπου QPSK αξιοποιούν αποδοτικότερα το εύρος ζώνης ενώ οι GFSK/GMSK απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης για να ανακτήσουν αποτελεσματικά το φέρον.

Για ένα αδιαμόρφωτο σήμα στο σημείο 1 έχουμε:

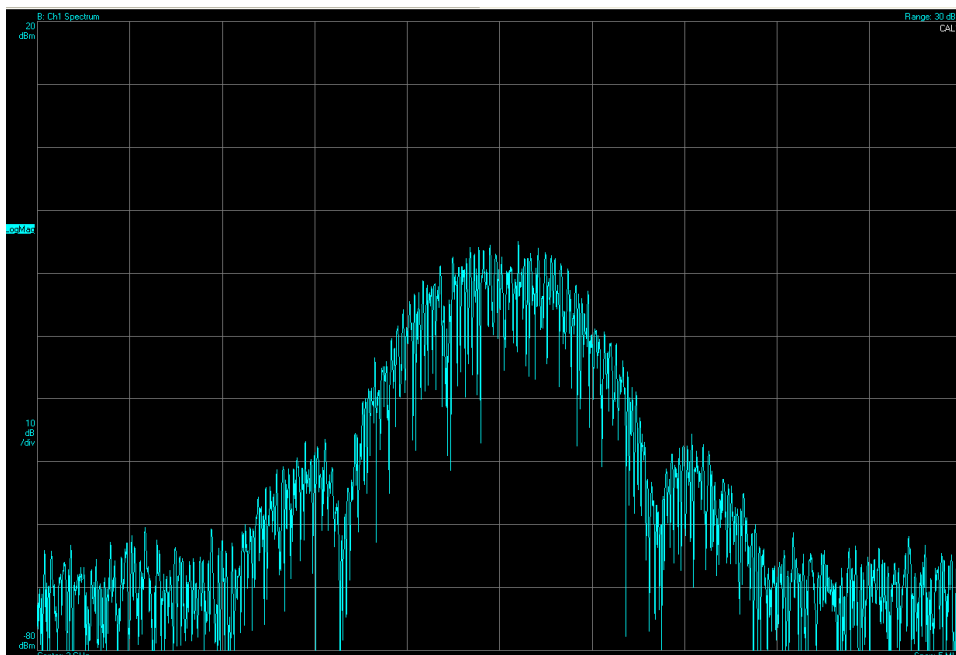


Illustration 29: Φάσμα αδιαμόρφωτου σήματος στο σημείο 1 της διάταξης

Μετά τη μετάδοση στην ίνα, τη διάδοση μέσω των κεραιών και τις ενισχύσεις απεικονίζεται στον αναλυτή φάσματος ως εξής:

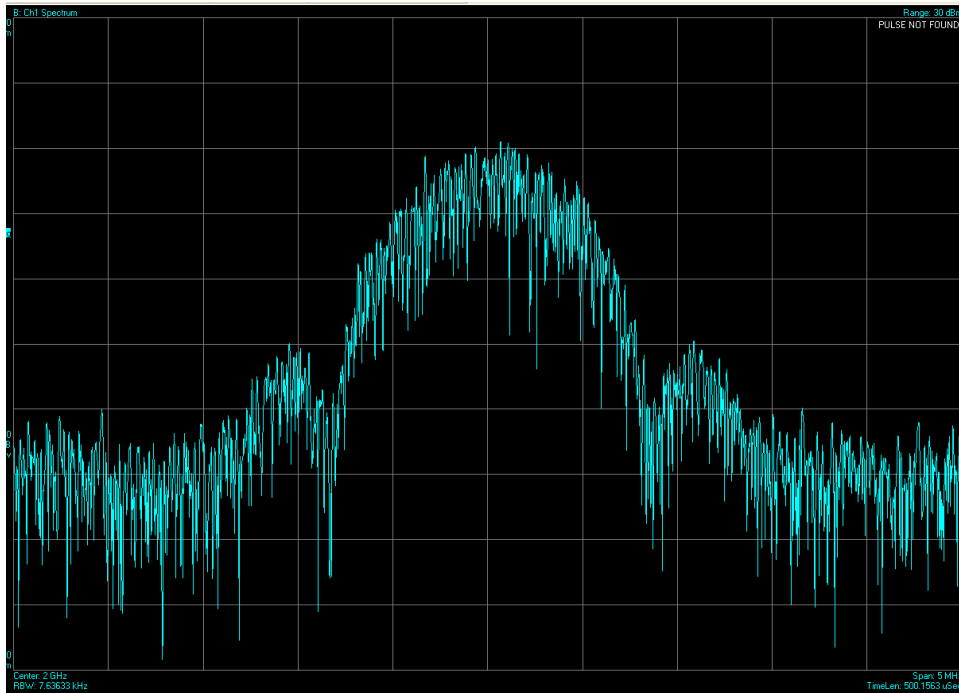


Illustration 30: Φάσμα αδιαμόρφωτου σήματος μετά τη μετάδοση μέσω ίνας, την ασύρματη εκπομπή και την ενίσχυση

Με μια πρώτη ματιά είναι φανερό ότι η πειραματική διαδικασία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης. Η μορφή του σήματος δεν φαίνεται να έχει αλλοιωθεί σημαντικά και τα επίπεδα ισχύος μετά φυσικά και την χρήση των ενισχυτών είναι ικανοποιητικά.

Αντίστοιχα συμπεράσματα βγάζουμε και από το eye diagram που παρατίθεται παρακάτω.

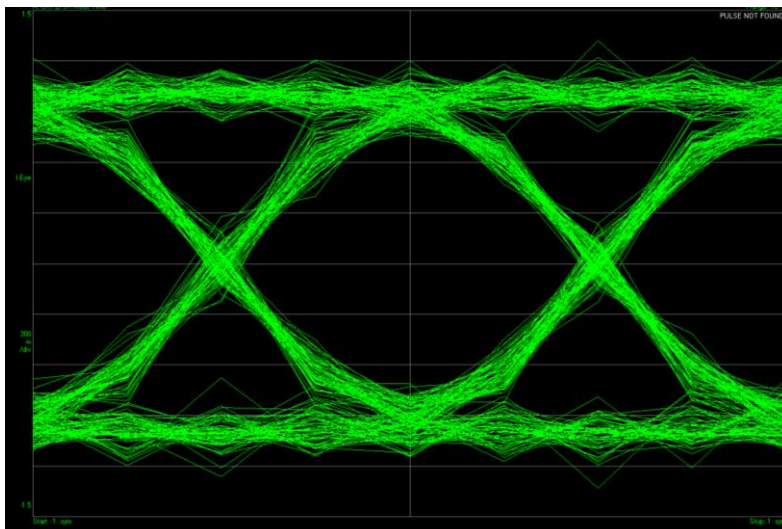


Illustration 31: Eye diagram αδιαμόρφωτου σήματος μετά τη μετάδοση μέσω ίνας, την ασύρματη εκπομπή και την ενίσχυση

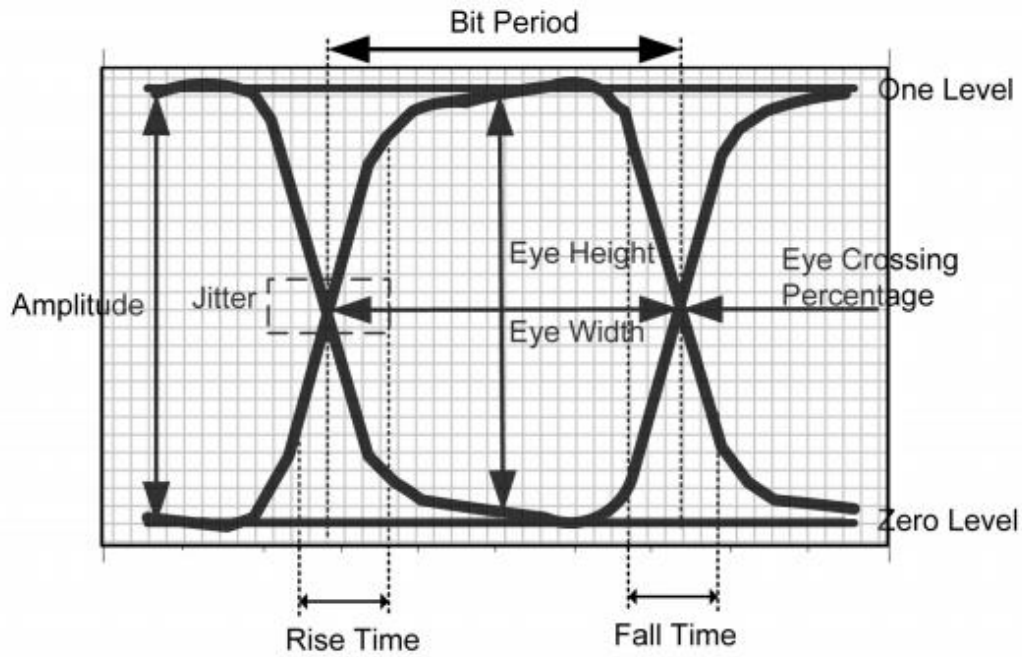


Illustration 32: Χαρακτηριστικά eye diagram

Βλέπουμε ότι το πλάτος και το ύψος του ματιού δεν απέχουν πολύ δηλαδή ο θόρυβος που εμφανίστηκε κατά τη μετάδοση δεν επηρεάζει έντονα το τελικό σήμα. Επίσης το eye crossing percentage φαίνεται να είναι αρκετά κοντά στο 50% άρα δεν έχουμε σημαντική υποβάθμιση σήματος. Το eye crossing percentage(ECP) ορίζεται σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα ως :

$$ECP = \frac{\text{crossing level} - \text{zero level}}{\text{one level} - \text{zero level}}$$

και δείχνει με έναν τρόπο τις παραμορφώσεις πλάτους που οφείλονται σε διαφορετικές διάρκειες του 0 και του 1 καθώς και προβλήματα συμμετρίας παλμών.

GFSK με ρυθμό αποστολής δεδομένων 1.152ΜΒps και κωδικοποίηση 1bit/symbol

Στο σημείο 2 δηλαδή στην έξοδο της φωτοδιόδου παίρνουμε:

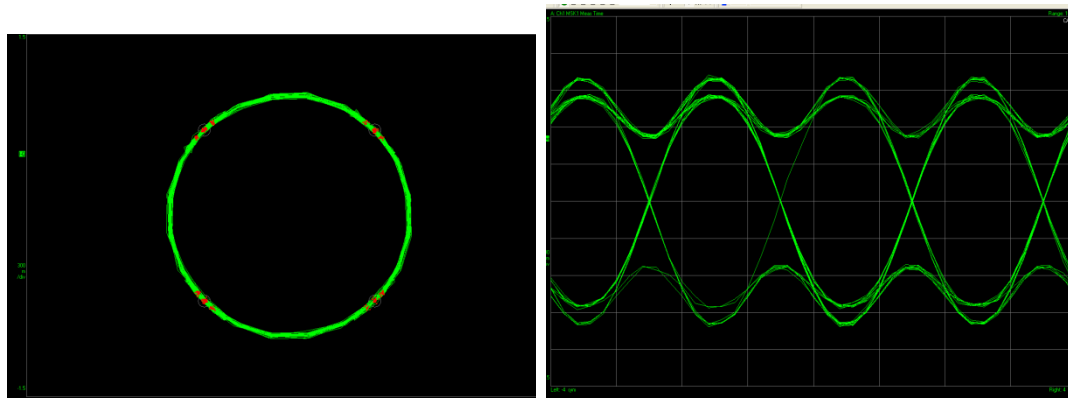


Illustration 33: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 2 της διάταξης για GFSK διαμόρφωση

Ενώ μετά τη μετάδοση στα 60 GHz (σημείο 3) :

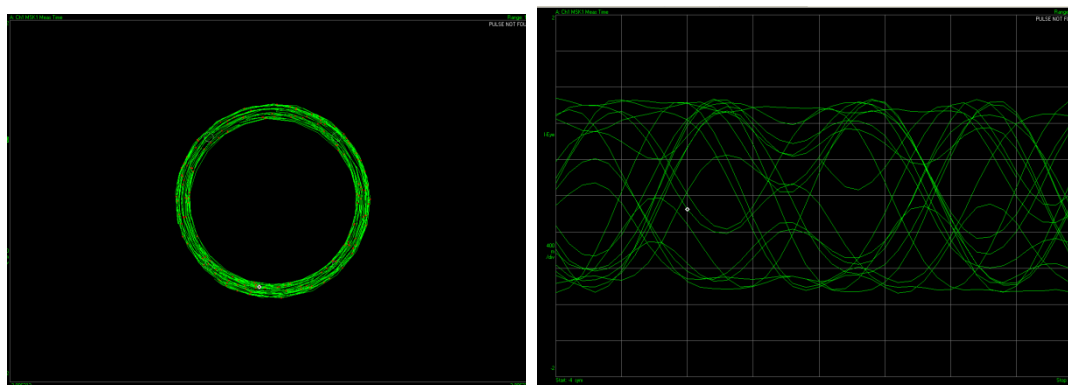


Illustration 34: Constellation diagram και eye diagram στο σημείο 3 της διάταξης για GFSK διαμόρφωση

Στο σημείο 2 τόσο το constellation diagram όσο και το eye diagram έχουν διακριτές μορφές, δηλαδή η μετάδοση είναι ικανοποιητική. Στο σημείο 3 παρότι έχει εισαχθεί θόρυβος από τη μετάδοση, η πληροφορία δεν έχει χαθεί και μπορεί να αξιοποιηθεί. Συνεπώς το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το πειραματικό σενάριο που περιγράφηκε παραπάνω.

GMSK με ρυθμό αποστολής δεδομένων 270.833KBps και κωδικοποίηση 1bit/symbol

Στο σημείο 2 δηλαδή στην έξοδο της φωτοδιόδου παίρνουμε:

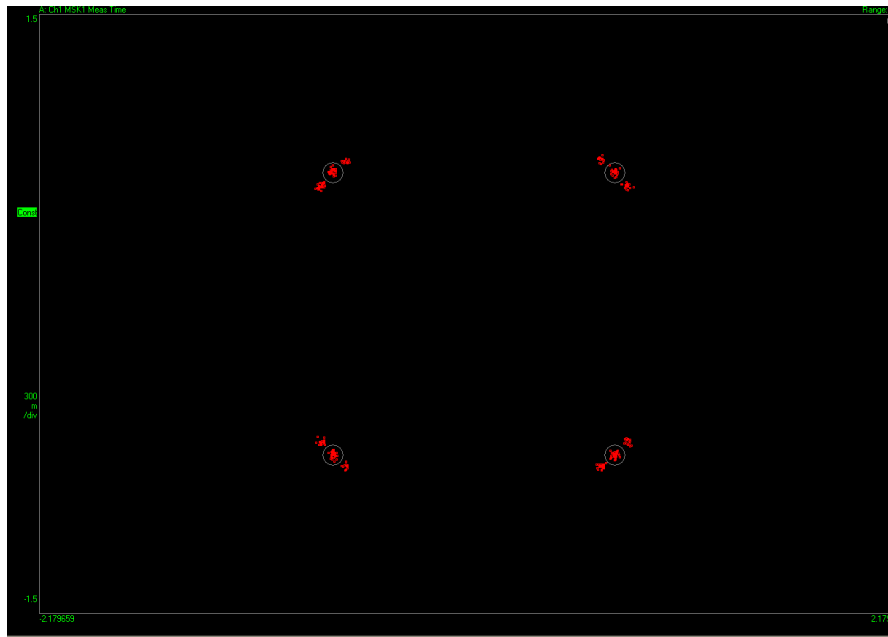


Illustration 35: Constellation diagram στο σημείο 2 της διάταξης για GMSK διαμόρφωση

Ενώ μετά τη μετάδοση στα 60 GHz :

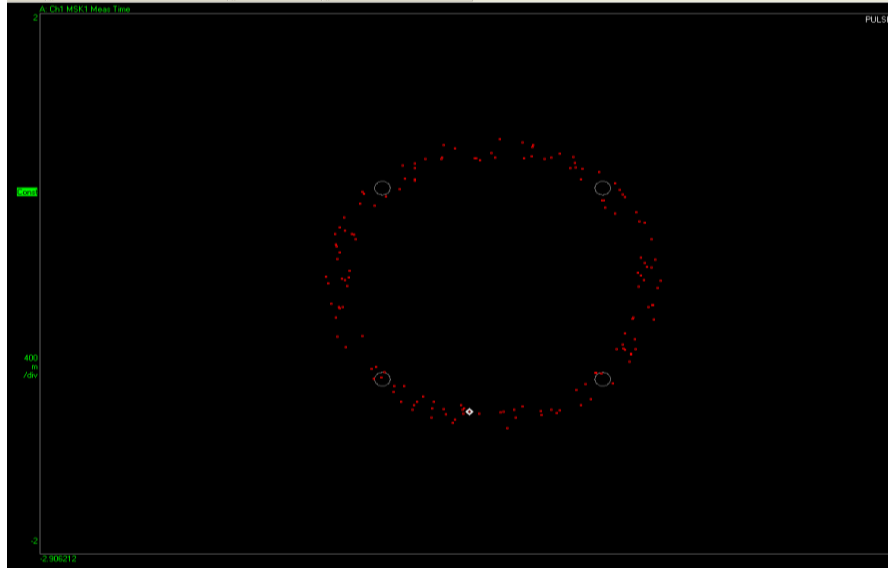


Illustration 36: Constellation diagram στο σημείο 3 της διάταξης για GMSK διαμόρφωση

Εδώ βλέπουμε ότι στο τελικό σήμα η πληροφορία έχει χαθεί.

$\pi/4$ DQPSK με ρυθμό αποστολής δεδομένων 384KBps και κωδικοποίηση 2bits/symbol

Στο σημείο 2 δηλαδή στην έξοδο της φωτοδιόδου παίρνουμε:

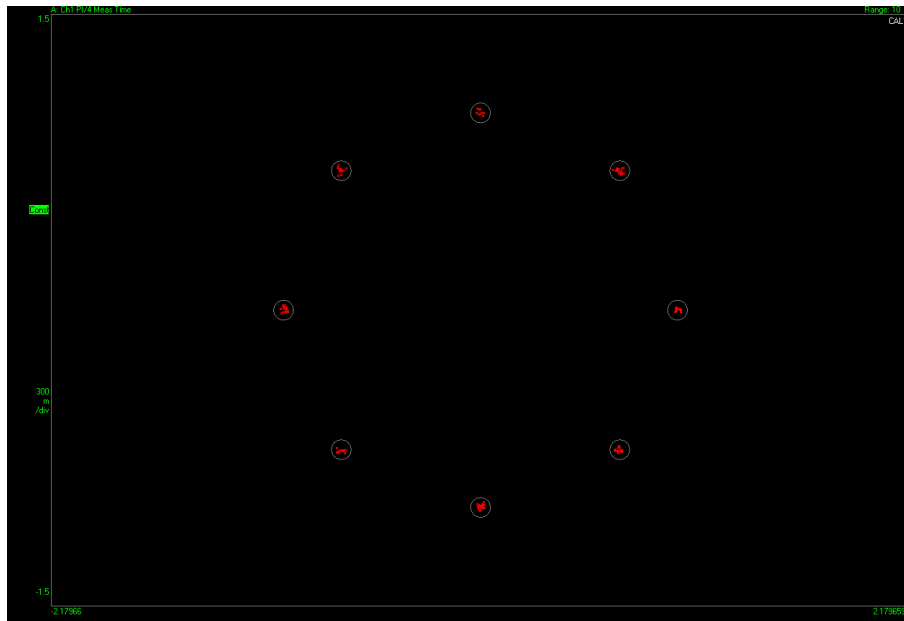


Illustration 37: Constellation diagram στο σημείο 2 της διάταξης για $\pi/4$ DQPSK διαμόρφωση

Ενώ μετά τη μετάδοση στα 60 GHz :

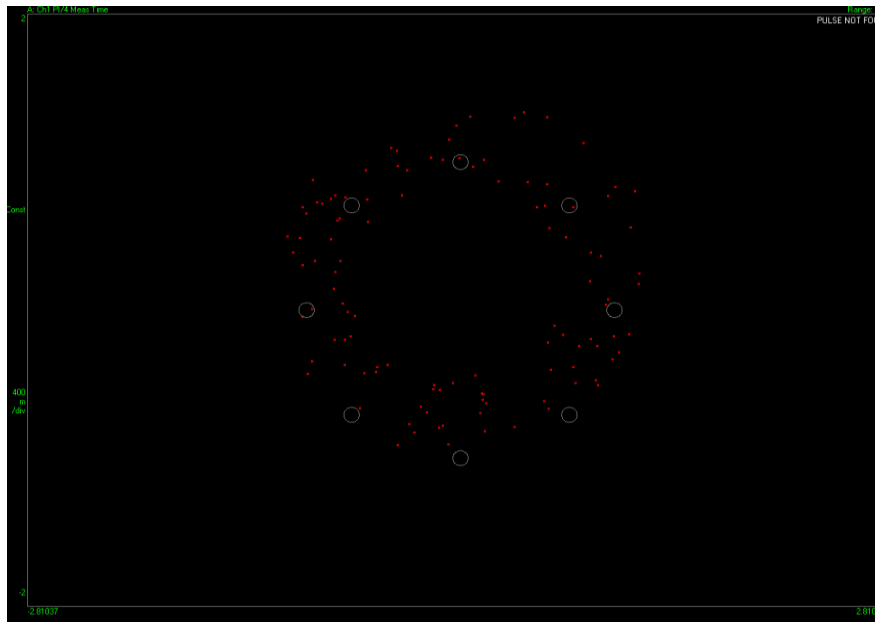


Illustration 38: Constellation diagram στο σημείο 3 της διάταξης για $\pi/4$ DQPSK διαμόρφωση

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση, το σήμα μπορεί να ανακτηθεί μετά τη φωτοδιόδο όχι όμως και μετά τη μετάδοση στα 60GHz.

Συνολικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα σχήματα διαμόρφωσης κατά φάση επηρεάζονται πιο ισχυρά από το multipath fading του wireless link λόγω και της επίδρασης του fading στη φάση του σήματος. Για το λόγο αυτό, τα $\pi/4$ DQPSK υποφέρουν από τη διάδοση στο ασύρματο κανάλι.

Οι GFSK είναι οι ανθεκτικές στο ασύρματο κανάλι καθώς διαμορφώνουν την πληροφορία σε δύο διακριτές frequencies του carrier.

Η GMSK είναι πιο ευάλωτη στο multipath fading. Είναι η ενδιάμεση περίπτωση καθώς είναι πιο αποτελεσματική από τα PSK formats όμως δίνει αισθητά χειρότερα αποτελέσματα από τη GFSK.

3.2 Πειραματικές μετρήσεις στο OTE Academy

3.2.1 Αξιολόγηση για NRZ παλμούς 0.25/0.5/1GHz

Η πειραματική διάταξη είναι όμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στην ανάλογη ενότητα των πειραμάτων του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών με την απόσταση των κεραιών να ισούται με 170cm . Αρχικά με τη χρήση ενός OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer) πήραμε κάποιες πληροφορίες για την χρησιμοποιούμενη κάθε φορά ίνα.

Ο OTDR είναι ένα οπτοηλεκτρονικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό κάποιων χαρακτηριστικών των οπτικών ινών. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην έγχυση οπτικών παλμών στην ίνα και έπειτα την, από το ίδιο άκρο της ίνας, συγκέντρωση του φως που οπισθοσκεδάζεται ή ανακλάται. Συγκεκριμένα ο OTDR θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του μήκους της ίνας και των απωλειών.

3.2.1.1 Διαδρομή: OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy

Ο OTDR μας δίνει τα παρακάτω στοιχεία:

Span length	248.517m
Loss	7.48dB

Table 8: Αποτελέσματα OTDR για τη διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE-OTE Academy

Με τον αναλυτή φάσματος μελετάμε τη μορφή που έχει το τελικό σήμα σε κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις:

250Mbps

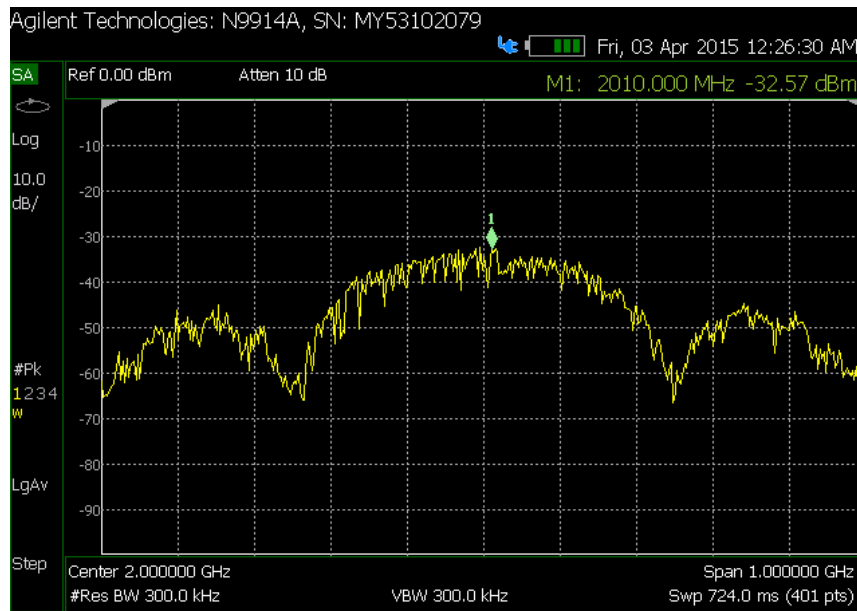


Illustration 39: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE- OTE Academy

Peak power: -32.57dBm

500Mbps

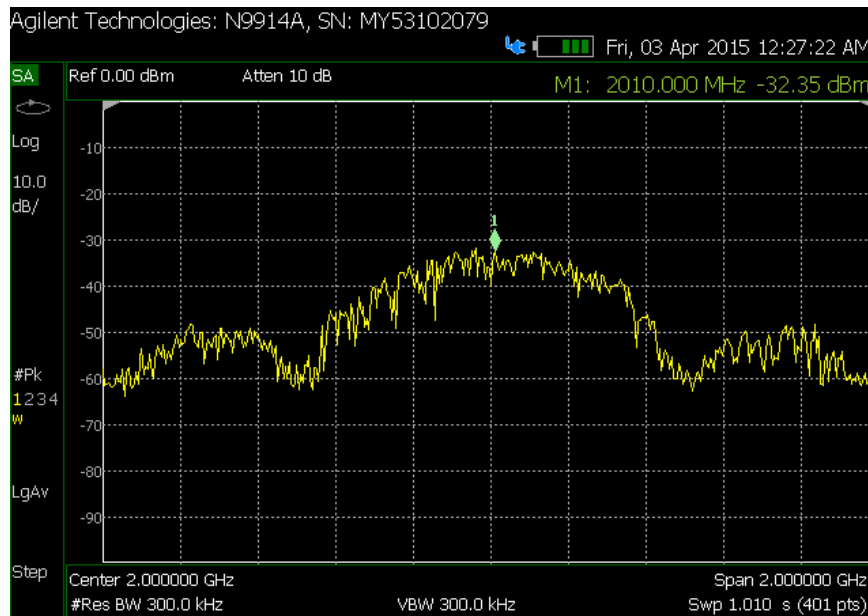


Illustration 40: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE- OTE Academy

Peak power: -32.35dBm

1Gbps

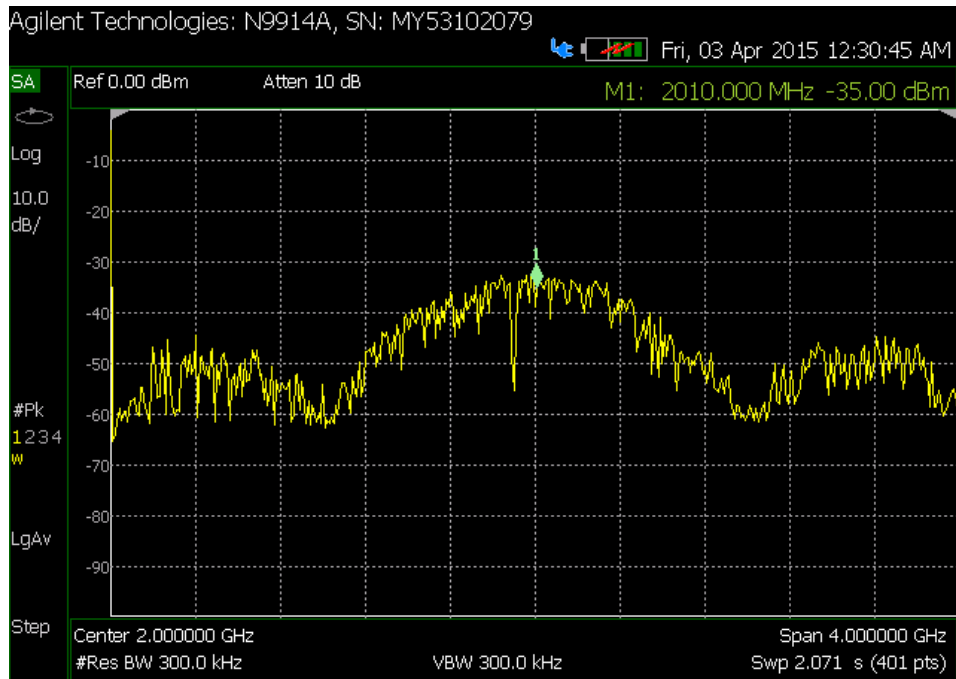


Illustration 41: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps για την διαδρομή OTE Academy-Μέγαρο OTE- OTE Academy

Peak power: -35dBm

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην ποιότητα του τελικού σήματος ανάμεσα στους NRZ παλμούς 250 και 500 Mbps. Ακόμα όμως και στην επιλογή του 1 Gbps όπου υπάρχει σημαντικότερη εξασθένηση και περισσότερος θόρυβος, η ποιότητα του τελικού σήματος είναι ικανοποιητική. Η πληροφορία δεν έχει χαθεί και συνεπώς αυτό το σενάριο μετάδοσης που έχει στηθεί πειραματικά είναι κατάλληλο για αυτή την απόσταση.

3.2.1.2 Διαδρομή: OTE Academy-NTUA-OTE Academy

Ο OTDR μας δίνει τα παρακάτω στοιχεία:

Span length	43.97km
Loss	26.9dB

Table 9: Αποτελέσματα OTDR για τη διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy

Και από τον αναλυτή φάσματος παίρνουμε:

Για 250Mbps

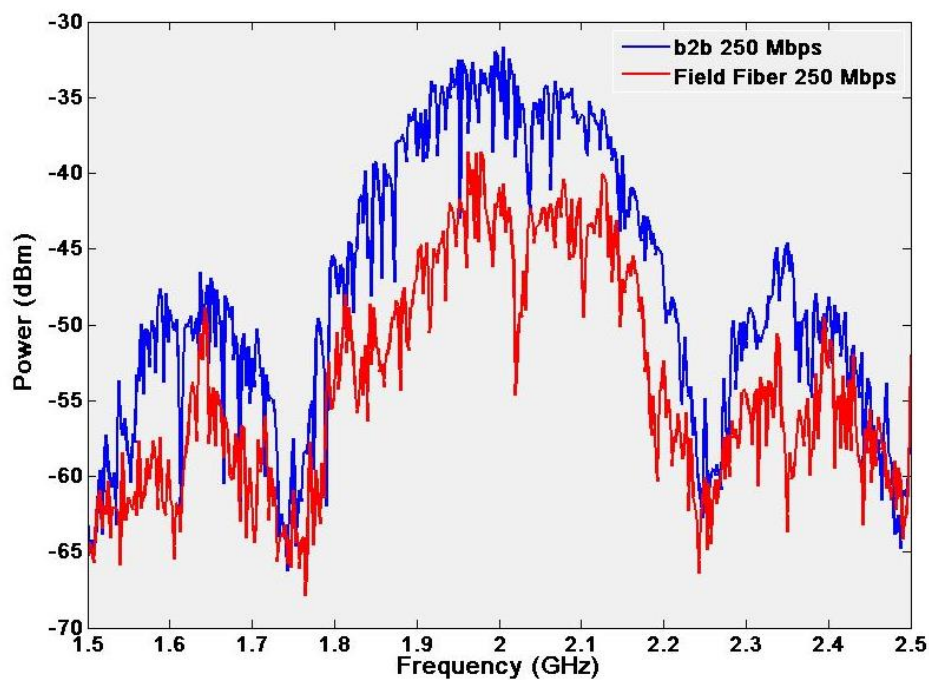


Illustration 42: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή ΟΤΕ Academy-NTUA-ΟΤΕ Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου

Για 500Mbps

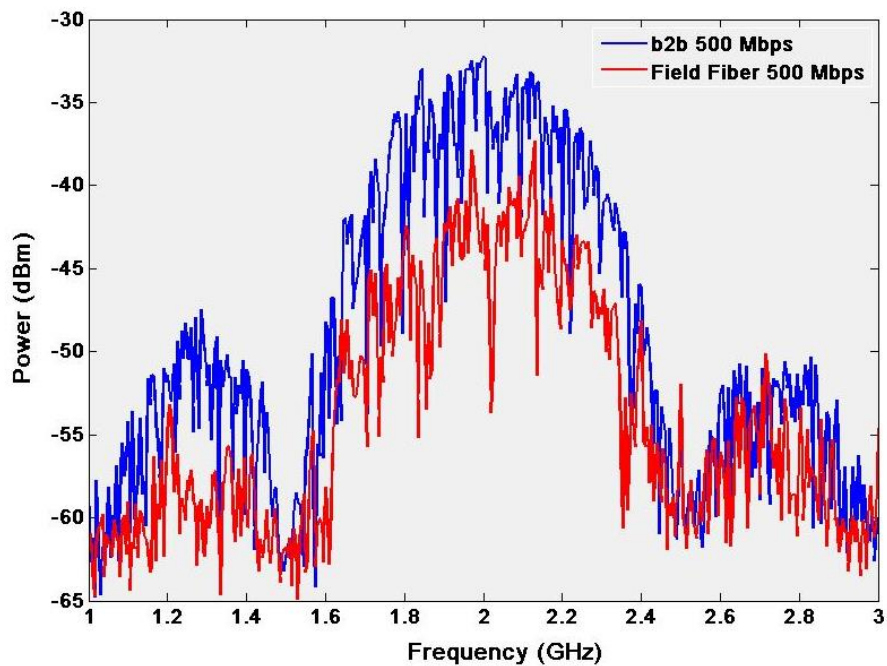


Illustration 43: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 500Mbps για την διαδρομή ΟΤΕ Academy-NTUA-ΟΤΕ Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου

Για 1Gbps

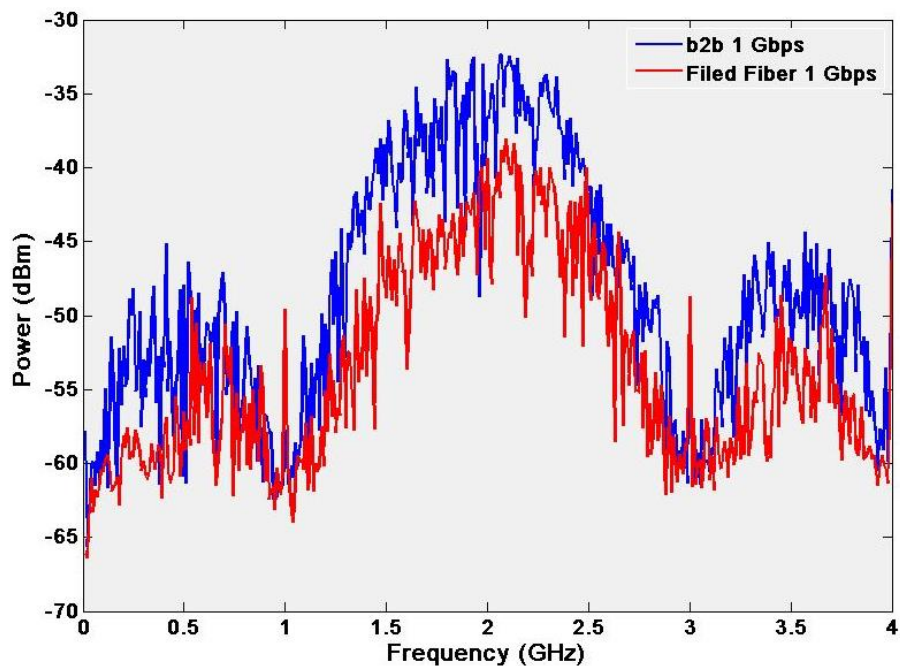


Illustration 44: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy για μετρήσεις b2b και πεδίου

Όπως ήταν αναμενόμενο τα επίπεδα ισχύος είναι αρκετά χαμηλότερα από την προηγούμενη περίπτωση αφού πλέον η απόσταση μετάδοσης είναι της τάξεως των km. Όλα τα δυσμενή φαινόμενα για τη μετάδοση είναι εντονότερα. Παρόλαυτα η χρήση EDFA για αντιστάθμιση των οπτικών απωλειών καθιστά και το σενάριο διάδοσης ακόμα και για το 1Gbps λειτουργικό έστω και οριακά.

Τέλος για NRZ παλμούς 250Mbps μεταβάλλουμε την απόσταση των κεραιών (1m,3m,5m) και παίρνουμε:

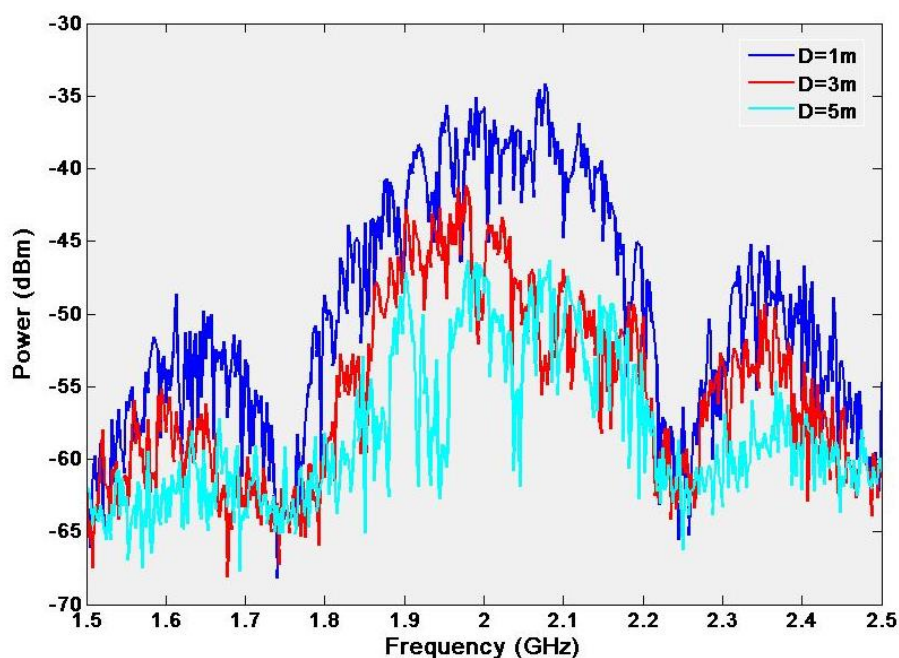


Illustration 45: Φάσμα σήματος κωδικοποιημένου με NRZ παλμούς στο σημείο 3 της διάταξης με ταχύτητα μετάδοσης 250Mbps για την διαδρομή OTE Academy-NTUA-OTE Academy, για αποστάσεις κεραιών 1m, 3m και 5m

Όπως φαίνεται τα 5m είναι μία σχετικά μεγάλη απόσταση για μετάδοση στον ελεύθερο χώρο. Αν αυξηθεί και άλλο η απόσταση το σήμα δεν θα είναι δυνατόν να ανακτηθεί. Παρατήρηση: Η μέτρηση αυτή είναι σημαντική για ένα σενάριο 5G με RoF διότι εκεί απαιτείται να υπάρχει πλήρης κάλυψη σε κάθε σημείο. Η οριακή απόσταση τοποθέτησης κεραιών για την οποία είναι δυνατή η ανάκτηση του σήματος καθορίζει το πόσες κεραιές θα πρέπει να τοποθετηθούν και σε ποιες θέσεις. Μπορεί η μετάδοση στον ελεύθερο χώρο να μην φαίνεται ιδανική λύση λόγω των τεράστιων απωλειών που περιορίζουν πολύ την απόσταση μετάδοσης, ωστόσο η ύπαρξη διαθέσιμων ασύρματων δικτύων αποτελεί πλέον βασική απαίτηση.

3.2.2 Αξιολόγηση για σήματα που παράγονται από Gigabit Media Converter

Το πείραμα αυτό γίνεται διότι το GPON modem δίνει σήμα που προσομοιάζει πραγματική κίνηση και άρα έχουμε ένα ρεαλιστικό σενάριο μετάδοσης. Το σήμα που δημιουργείται είναι βασικής ζώνης και μετά τη διάδοση του στην ίνα και την επιστροφή του στο ηλεκτρικό περιβάλλον μέσω της φωτοδιόδου, εισέρχεται σε ένα μείκτη όπου γίνεται το upconversion.

Ο OTDR μας δίνει τα παρακάτω στοιχεία:

Span length	52.66m
Loss	2.96dB

Table 10: Αποτελέσματα OTDR για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter

Το μήκος κύματος του προς μετάδοση σήματος είναι 1310nm. Σε αυτό το μήκος κύματος οι απώλειες είναι μεγάλες αλλά η διασπορά δεν είναι έντονη. Είναι κατάλληλο για τη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή η μετάδοση θα γίνει σε μικρή απόσταση.

Θα γίνει μελέτη για διαφορετικές αποστάσεις κεραιών αλλά και για διαφορετικές τιμές οπτικών απωλειών.

3.2.2.1 Μεταβολή στην απόσταση των κεραιών

Το σήμα μετά τον μείκτη είναι:

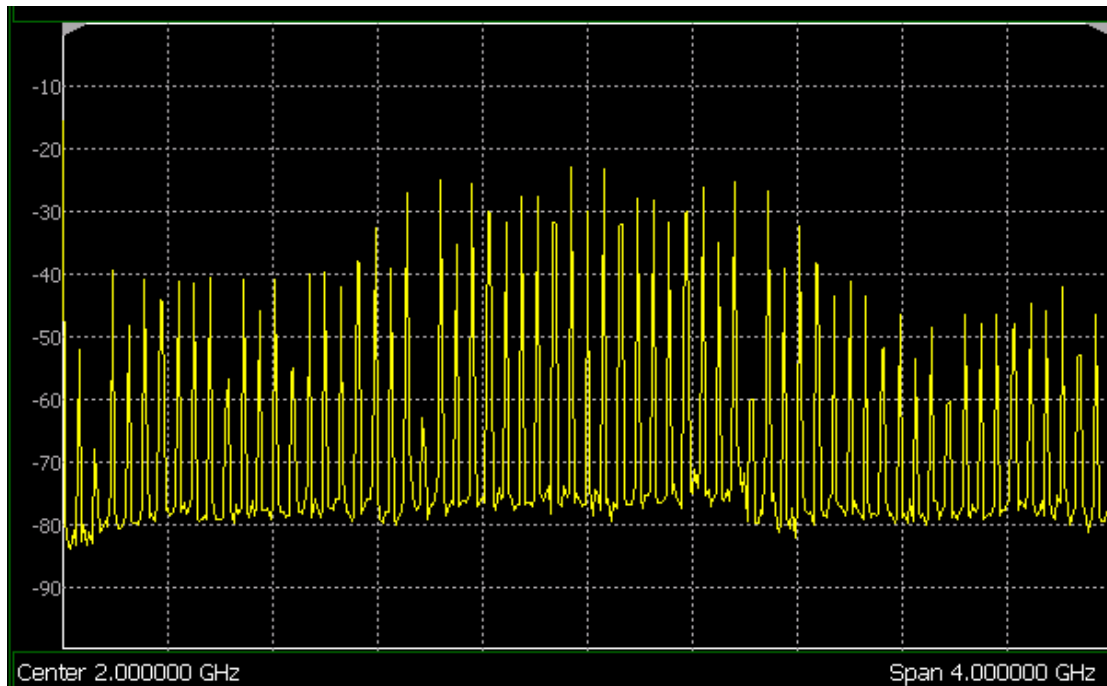


Illustration 46: Φάσμα για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter στο σημείο 1 της διάταξης

Και το τελικό σήμα για τις διάφορες αποστάσεις μεταξύ των κεραιών είναι:

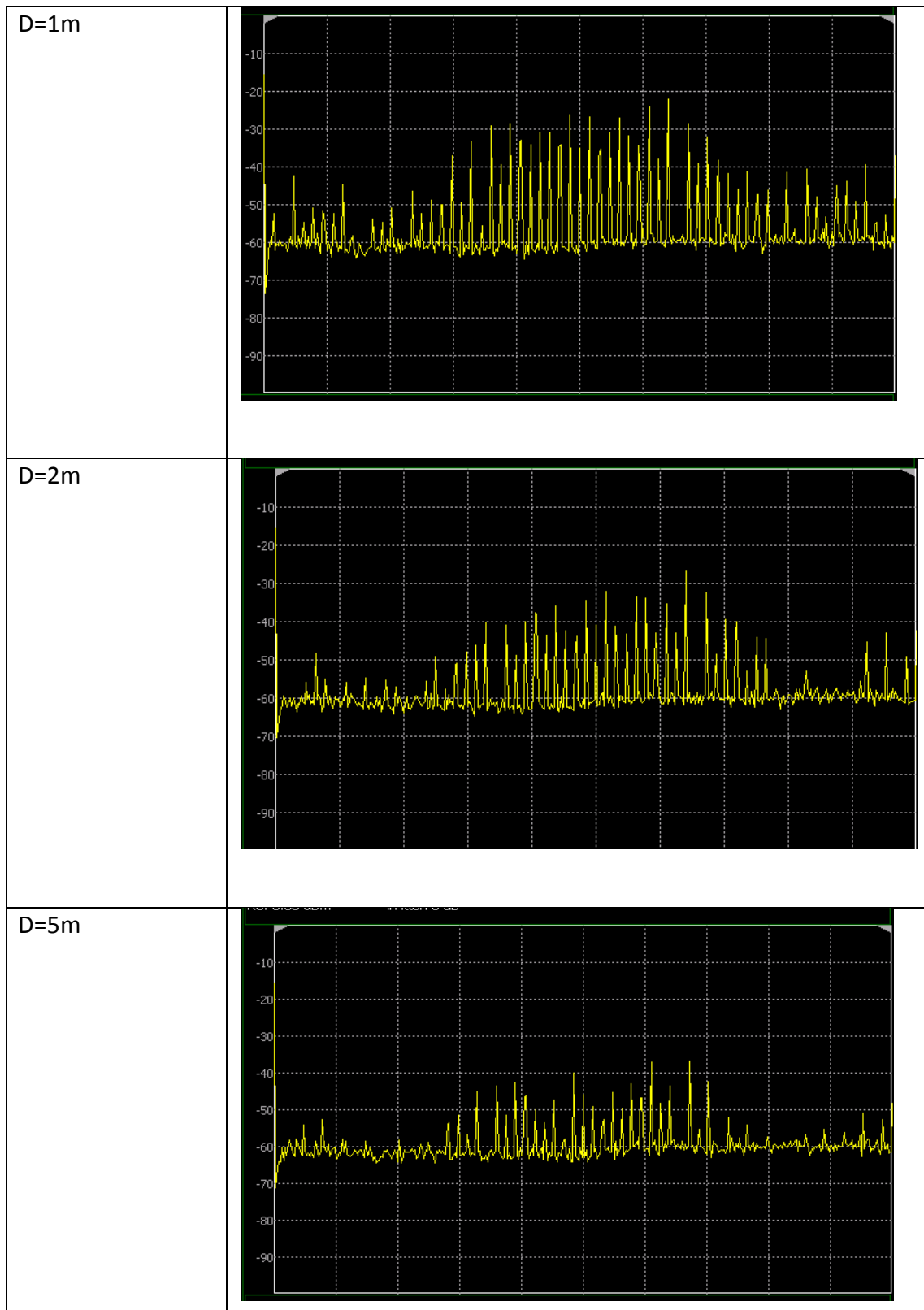


Illustration 47: Φάσμα για σήμα προερχόμενο από Gigabit Media Converter στο σημείο 3 της διάταξης για αποστάσεις κεραίων 1m,2m και 5m

Παρατηρούμε ότι όπως είναι αναμενόμενο όσο μεγαλώνει η απόσταση οι συνιστώσες χαμηλότερης ισχύος χάνονται. Δηλαδή παρότι η διάδοση στην ίνα δεν επιφέρει σημαντική

υποβάθμιση του σήματος λόγω μικρής απόστασης, η ασύρματη μετάδοση σε απόσταση 5m οδηγεί σε απώλεια πληροφορίας.

3.2.2.2 Μεταβολή στην τιμή των οπτικών απωλειών

Η εισαγωγή συγκεκριμένων τιμών απωλειών γίνεται με έναν μεταβλητό οπτικό εξασθενητή/Variable Optical Attenuator(VOA). Με το πείραμα αυτό προσομοιάζεται ο καταμερισμός ισχύος που εμφανίζεται στις βασικές τοπολογίες PON(Passive Optical Network).

Το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει από τις μετρήσεις που πήραμε:

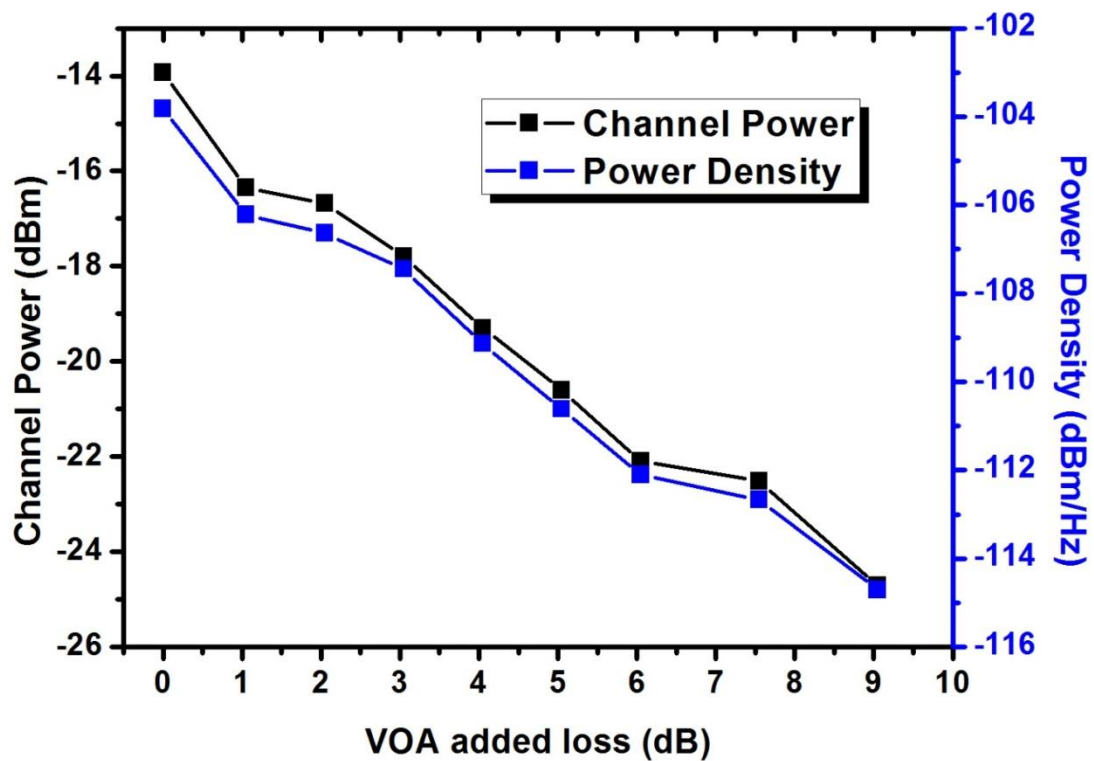


Illustration 48: Διάγραμμα ισχύος/πυκνότητας ισχύος-οπτικών απωλειών

Παρατηρούμε ότι μέχρι 6dB απώλειες η μείωση της ισχύος είναι γραμμική ενώ από εκεί και πέρα υπάρχει σημαντικότερη μείωση. Με 6dB ανεκτές απώλειες πρακτικά συμπεραίνουμε ότι η παρακάτω τοπολογία (όπου οι κύκλοι αντιστοιχούν σε couplers) είναι λειτουργική.

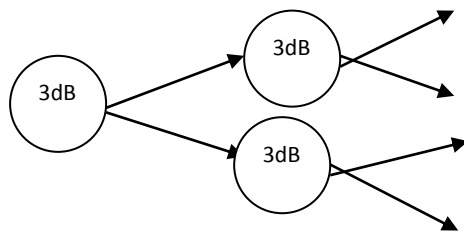


Illustration 49: Απώλειες ανά coupler

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ 5G

Εισαγωγή

Το επόμενο βήμα στις κινητές τηλεπικοινωνίες είναι η τεχνολογία 5G η οποία αναμένεται να αλλάξει πλήρως το υπάρχον σκηνικό. Βασικά χαρακτηριστικά της νέας αυτής τεχνολογικής πραγματικότητας θα είναι η απεριόριστη πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία και η διανομή δεδομένων ανά πάσα στιγμή, οπουδήποτε από οποιονδήποτε και οτιδήποτε. Για να φτάσουμε σε αυτή την κατάσταση απαιτείται βελτιστοποίηση της υπάρχουσας τεχνολογίας αλλά και παράλληλη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν οι διάφορες χρήσεις που μπορεί να έχει η τεχνολογία 5G, οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει αλλά τα απαραίτητα στοιχεία που απαιτούνται για την υλοποίηση της.

Ακολούθως θα αναλυθούν οι σχεδιαστικές αρχές που πρέπει να ακολουθεί ένα δίκτυο 5G και η προκύπτουσα από αυτές αρχιτεκτονική δικτύου. Δίνεται έμφαση στη δυνατότητα προσαρμογής των δικτύων νέας γενιάς μέσω αξιοποίησης των υπαρχουσών τεχνολογιών.

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την απαρίθμηση των προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου τα δίκτυα 5G να γίνουν μέρος της τεχνολογικής πραγματικότητας.

4.1 Τι είναι το 5G και ποιος ο ρόλος της οπτικής τεχνολογίας σε αυτό;

5G ονομάστηκαν τα επόμενης γενιάς (πέμπτης κατά σειρά) ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο δεν είναι πάντα εύκολο να οριστεί επακριβώς ο όρος. Τα δίκτυα 5G με όλη την τεχνολογική εξέλιξη που τα συνοδεύει θα οδηγήσουν στην επόμενη φάση της επανάστασης στη συνδεσιμότητα. Σε αυτή τη φάση οι δυνατότητες των ασύρματων δικτύων θα αυξηθούν δραματικά. Η νέα γενιά δικτύων θα έχει πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, σχεδόν καθολική γεωγραφική κάλυψη και θα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αξιοπιστία. Το 5G δεν είναι απλά η εξέλιξη της υπάρχουσας τεχνολογίας, είναι το στοιχείο που χαράζει το δρόμο για πλήθος νέων χρήσεων και δυνατοτήτων, πολλές από τις οποίες είναι ακόμα άγνωστες.

Η οπτική τεχνολογία θα παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση των δικτύων 5G. Με την εμφάνιση καινοτόμων FiWi (Fibre Wireless) δικτύων αναμένεται να καλυφθούν οι σύγχρονες απαιτήσεις και παράλληλα να μειωθούν τα λειτουργικά κόστη. Στόχος του οπτικού δικτύου είναι η υποστήριξη της διανομής και συλλογής ραδιοκυμάτων που επιτρέπει τη μέγιστη ευελιξία για την εξυπηρέτηση των απαιτήσεων του ασύρματου δικτύου, μειώνοντας παράλληλα το κόστος των σημείων ασύρματης πρόσβασης.

4.2 Χρήσεις και δυνατότητες του 5G



Illustration 50: Δυνατότητες τεχνολογίας 5G

Η τεχνολογία 5G αφενός θα συμβάλει στην ανάπτυξη των σημερινών ασύρματων δικτύων και αφετέρου θα χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με πλήθος διαφορετικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων, για να καλύψει τις σύγχρονες ανάγκες του καταναλωτικού κοινού. Εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση, μετάδοση δεδομένων μεταξύ χρηστών που βρίσκονται εν κινήσει ή μετάδοση δεδομένων με εξασφαλισμένη τη μέγιστη ασφάλεια τους, είναι μερικά τέτοια παραδείγματα. Οι βασικές χρήσεις του 5G που προβλέπονται θα καθορίσουν τις απαιτήσεις αλλά και την αρχιτεκτονική του όλου συστήματος γι' αυτό είναι σημαντικό να αναλυθούν. Θα χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους:

- **Πρόσβαση σε ευρυζωνικά δίκτυα**

Με την άφιξη του 5G οι τηλεπικοινωνίες θα αποτελέσουν ένα κομμάτι της καθημερινότητας που θα βρίσκεται παντού. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές η διαθεσιμότητα δικτυακών υπηρεσιών θα πρέπει να είναι δεδομένη αλλά και οπουδήποτε αλλού θα πρέπει να εξασφαλίζεται ένας ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 50-100Mbps. Η αλληλεπίδραση πολλών χρηστών, οι υπηρεσίες 3D και η «επαυξημένη πραγματικότητα» θα παίξουν σημαντικό ρόλο τα επόμενα χρόνια και κυρίως από το 2020 και μετά. Η επικοινωνία μέσω βίντεο πολύ υψηλής ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί ευρέως και θα γίνει κομμάτι της καθημερινής εργασιακής πραγματικότητας. Θα δημιουργηθεί ένα περιβάλλον στο οποίο το βίντεο θα είναι διαθέσιμο σε όλους ανεξάρτητα από τη φυσική τοποθεσία τους, την χρησιμοποιούμενη συσκευή και τη δικτυακή σύνδεση. Η διαθεσιμότητα αυτή θα πρέπει να εξα-

σφαλίζεται ακόμα και σε περιπτώσεις σποραδικής συγκέντρωσης πολλών χρηστών σε ένα χώρο (π.χ. αθλητικός αγώνας, συναυλία). Το «έξυπνο γραφείο» θα αποτελέσει σημαντικό κομμάτι της νέας αυτής πραγματικότητας. Πρόκειται για έναν εργασιακό χώρο όπου πλήθος συσκευών θα είναι ασύρματα διασυνδεδεμένες και θα αλληλεπιδρούν με ένα μεγάλο σύνολο χρηστών.

- **Μεγάλη κινητικότητα χρηστών**

Μετά το 2020 θα υπάρξει μεγάλη ανάγκη για παροχή ασύρματων υπηρεσιών στα διάφορα μέσα μεταφοράς. Η χρήση του δικτύου για ενημέρωση, ψυχαγωγία, επικοινωνία και οποιονδήποτε άλλο λόγο θα γίνει δυνατή στο αυτοκίνητο, το τρένο αλλά και το αεροπλάνο. Τα σύγχρονα τρένα μπορούν να ξεπεράσουν την ταχύτητα των 500km/h. Ενώ λοιπόν κάποιος κινείται με αυτή την ταχύτητα θα μπορεί να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και μάλιστα με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που του επιτρέπουν να κάνει μία βιντεοκλήση καλής ποιότητας, να παίξει ένα διαδικτυακό παιχνίδι ή οτιδήποτε άλλο που οι απαιτήσεις του το καθιστούν αδύνατο με τα σημερινά δεδομένα.

Συνδεσιμότητα θα εξασφαλίζεται όμως κατά την κίνηση του χρήστη και στις 3 διαστάσεις, δηλαδή θα υπάρχει πρόσβαση στο δίκτυο ακόμα και κατά την διάρκεια μιας αεροπορικής πτήσης. Οποιαδήποτε υπηρεσία διαθέσιμη στο έδαφος θα είναι διαθέσιμη και στον εναέριο χώρο.

- **Internet of Things (IoT)**

Η ιδέα του IoT είναι στενά συνδεδεμένη με το 5G. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα δίκτυο φυσικών συσκευών (οχήματα, κτίρια κτλ), στα οποία είναι ενσωματωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία όπως αισθητήρες και κάμερες, που αξιοποιώντας τη συνδεσιμότητα του δικτύου και το κατάλληλο λογισμικό, μπορούν να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα. Τα «έξυπνα ρούχα» μέσω πλήθους μικροαισθητήρων θα μετρούν χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και του ανθρώπινου σώματος. Πληροφορίες όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία θα είναι άμεσα διαθέσιμες ανά πάσα στιγμή. Στο ευρύτερο πλαίσιο μιας περιοχής ολόκληρα δίκτυα αισθητήρων θα μπορούν να μετρήσουν και να καταγράψουν τις διαθέσιμες ενεργειακές πηγές, τη μόλυνση, το θόρυβο και να ελέγξουν την κίνηση των οχημάτων στους δρόμους, τα φώτα ενός κτιρίου ή και ολόκληρης της πόλης. Η «έξυπνη πόλη» του μέλλοντος θα είναι πλήρως δικτυωμένη και θα μπορεί έχει συνεχή και σαφή εικόνα για όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη ζωή σε αυτή.

- **Τηλεπικοινωνίες πραγματικού χρόνου**

Τα δίκτυα 5G θα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο με μηδενική καθυστέρηση. Θα εμφανιστεί το tactile internet μέσω του οποίου οι άνθρωποι θα μπορούν ασύρματα να ελέγξουν πραγματικά και εικονικά αντικείμενα. Μία αλληλεπίδραση τέτοιου είδους απαιτεί ένα από σήμα ελέγχου και ηχητική ή οπτική ανατροφοδότηση. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσεται και ο ρομποτικός έλεγχος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος περιπτώσεων από αυτόνομα αυτοκίνητα μέχρι απομακρυσμένη παροχή ιατρικής περίθαλψης. Στην πρώτη περίπτωση απαιτείται επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων, των κτιρίων αλλά και των πεζών για να εξασφαλισθεί η ομαλή κίνηση. Στη δεύτερη πλήθος αισθητήρων παρέχουν τις ιατρικές πληροφορίες που αφορούν τον ασθενή σε έναν απομακρυσμένο ιατρό που μπορεί έτσι να αντιμετωπίσει την περίπτωση. Γίνεται κατανοη-

τό ότι σε αυτές τις υπηρεσίες η αξιοπιστία δεν μπορεί να αμφισβητείται διότι κάτι τέτοιο θα έθετε σε κίνδυνο την ασφάλεια μεγάλου μέρους της κοινωνίας.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται ορισμένες χρήσεις της τεχνολογίας 5G. Με C συμβολίζεται το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας που αξιοποιείται σε κάθε περίπτωση, με S ένα σενάριο λειτουργίας και με TC ένα συγκεκριμένο παράδειγμα στο οποίο εμφανίζεται το σενάριο αυτό.

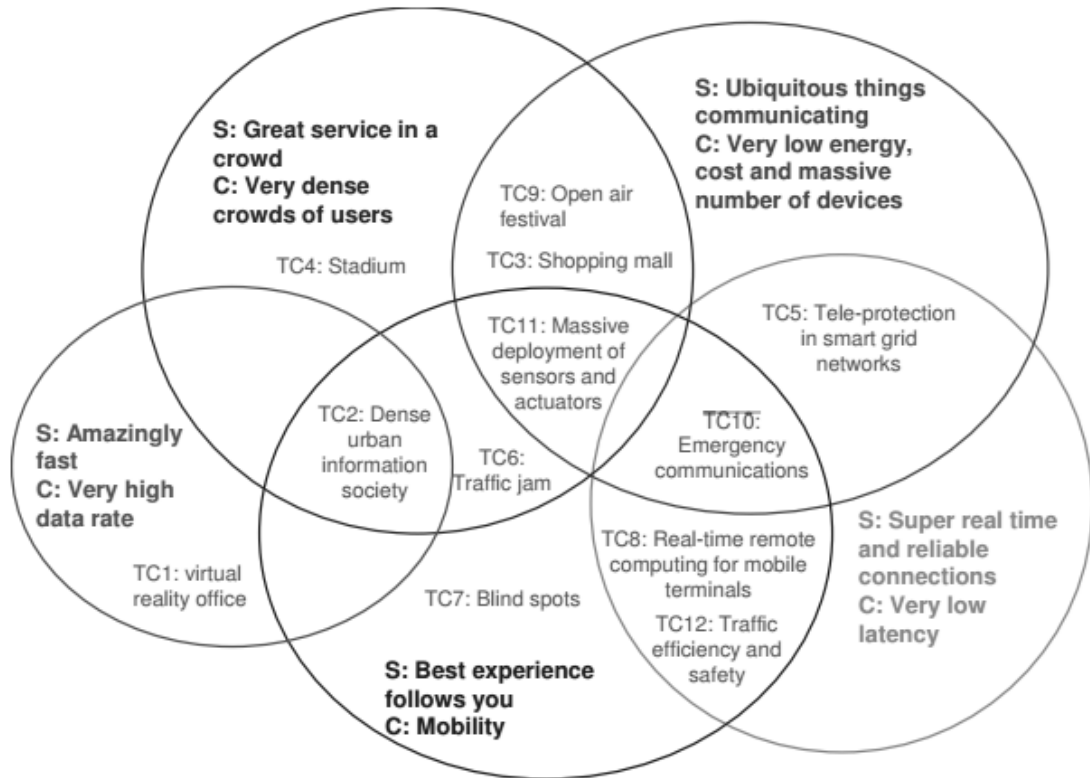


Illustration 51: Χρήσεις τεχνολογίας 5G

4.3 Απαιτήσεις για την υλοποίηση του 5G

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών απαιτεί πλήθος βελτιώσεων της υπάρχουσας τεχνολογίας που αφορά το ρυθμό και την καθυστέρηση μετάδοσης αλλά και την αξιοπιστία του συστήματος. Οι νέες απαιτήσεις θα είναι τεράστιες καθώς η διαχείριση πρωτόγνωρα μεγάλης ποσότητας δεδομένων θα πρέπει να συνοδεύεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση κόστους.

Οι βασικές απαιτήσεις-χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G φαίνονται κατηγοριοποιημένες στο παρακάτω σχήμα:

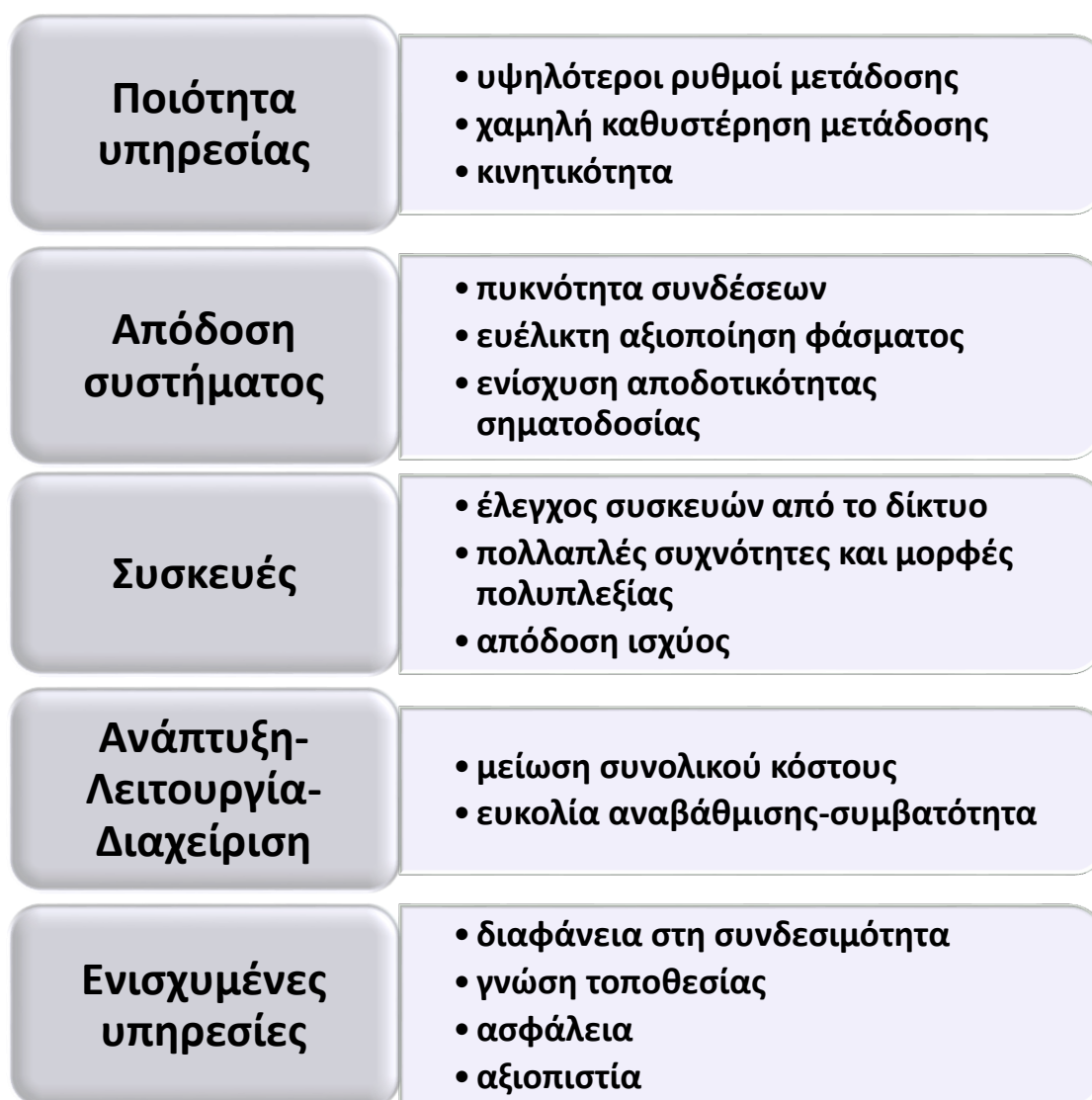


Illustration 52: Απαιτήσεις τεχνολογίας 5G

Όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας που αντιλαμβάνεται ο χρήστης:

- Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων
Σε κάθε μετάβαση από μία τεχνολογία στην επόμενη υπήρχε συνήθως και αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, τώρα όμως αλλάζει η συνολική λογική αντιμετώπισης καθώς δίνεται πλέον έμφαση στον πραγματικό ρυθμό μετάδοσης και όχι στον ρυθμό που μπορεί να επιτευχθεί υπό ιδανικές συνθήκες. Ενδεικτικά οι στόχοι είναι:
 - Η επίτευξη ρυθμού 10Gbps σε συγκεκριμένες συνθήκες όπως είναι αυτές που υπάρχουν σε εσωτερικούς χώρους ή πυκνοκατοικημένες περιοχές.
 - Η επίτευξη ρυθμού αρκετών εκατοντάδων Mbps σε αστικές και προαστιακές περιοχές και

- Η επίτευξη ρυθμού τουλάχιστον 10Mbps σε οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη.
- Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης
Πρέπει να γίνει σαφές ότι η παράμετρος που μας ενδιαφέρει είναι η καθυστέρηση E2E(End-to-End), δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων από το στρώμα εφαρμογής του κόμβου-πηγής μέχρι την επιτυχή λήψη του από το στρώμα εφαρμογής του κόμβου-προορισμού μαζί με τον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά της απάντησης.
Γενικός στόχος είναι τα 10ms ενώ για υπηρεσίες που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση το 1ms για από άκρο σε άκρο μετάδοση. Η χαμηλή καθυστέρηση επιτυγχάνεται μέσω των μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης αλλά και μέσω νέων εφαρμογών που θα φροντίζουν για τον έλεγχο και την ασφάλεια διακίνησης των δεδομένων.
- Κινητικότητα
Πρόκειται για την αδιάλειπτη παροχή υπηρεσίας στον χρήστη ενώ αυτός βρίσκεται σε κίνηση. Τα δίκτυα 5G πρέπει να μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες ενός συνεχώς αυξανόμενου αριθμού στατικών συσκευών. Συνεπώς η εξυπηρέτηση των εν κινήσει χρηστών θα πρέπει να γίνεται μόνο κατ' απαίτηση και όχι να είναι δεδομένη για όλες τις συσκευές, προκειμένου να εξασφαλιστεί έτσι η αποδοτικότερη αξιοποίηση του συστήματος.

Όσον αφορά την απόδοση του συστήματος:

- Πυκνότητα συνδέσεων
Η νέα γενιά ασύρματων δικτύων θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιάδων ταυτόχρονων συνδέσεων ανά τετραγωνικό μέτρο. Στις περιοχές με μεγάλη κίνηση δεδομένων θα πρέπει λοιπόν ένας τόσο μεγάλος αριθμός συσκευών να μπορεί να ανταλλάσσει ταυτόχρονα πληροφορίες με το δίκτυο.
- Ευέλικτη αξιοποίηση του φάσματος
Ο στατικός διαμοιρασμός του φάσματος στους διαφορετικούς λειτουργούς δεν θα αποτελεί πλέον βιώσιμη λύση. Απαιτείται δυναμική προσέγγιση του θέματος με εκχώρηση φασματικών πόρων εκεί που κάθε φορά οι ανάγκες είναι μεγαλύτερες. Προβλέπεται λοιπόν οι διαφορετικοί λειτουργοί να έχουν κοινή πρόσβαση σε ένα τμήμα τουλάχιστον του διαθέσιμου φάσματος και να επιλέγεται δυναμικά αυτός που θα κάνει χρήση του σε κάθε περίπτωση.
- Ενίσχυση αποδοτικότητας της σηματοδοσίας
Τα σήματα σηματοδοσίας και ελέγχου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όπου αυτό είναι απαραίτητο ώστε να μην γίνεται σπατάλη ραδιοπόρων και ενέργειας.

Όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες συσκευές:

- Δυνατότητες ελέγχου συσκευών από το δίκτυο
Τα τερματικά του 5G πρέπει σε μεγάλο βαθμό να προγραμματίζονται και να παρα-

μετροποιούνται από το δίκτυο. Ο εξοπλισμός του χρήστη θα διαχειρίζεται από το δίκτυο με ευέλικτο και δυναμικό τρόπο. Έτσι δίνεται η δυνατότητα επιλογής του κατάλληλου προφίλ σύνδεσης ανάλογα με τις ανάγκες και τις επικρατούσες συνθήκες. Οι λειτουργοί των δικτύων πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν το software και το hardware του δικτύου και να ανανεώνουν το λειτουργικό σύστημα των συσκευών του δικτύου ασύρματα. Παράλληλα θα πρέπει να μπορούν να διαγνώσουν και να διορθώσουν οποιοδήποτε πρόβλημα προκύψει καθώς και να συλλέγουν πληροφορίες από τον εξοπλισμό των χρηστών με στόχο τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

- Πολυπλές συχνότητες και μορφές πολυπλεξίας
Στόχος είναι οι συσκευές να μπορούν να υποστηρίξουν σήματα διαφορετικών συχνοτήτων αλλά και μορφών (TDD/FDD/Mixed) και μάλιστα ταυτόχρονα. Για τις στατικές συσκευές αυτό συνήθως δεν απαιτείται καθώς είναι καθορισμένη η μορφή των σημάτων που θα δέχονται. Οι κινητές όμως συσκευές ενός δικτύου 5G θα πρέπει να διαχειρίζονται ένα σύνολο ροών δεδομένων από διαφορετικές τεχνολογίες και διαφορετικά φέροντα καθώς θα συναντήσουν μία ποικιλία από αυτά στα διαφορετικά περιβάλλοντα στα οποία θα βρεθούν.
- Απόδοση ισχύος
Καθώς ο αριθμός των συσκευών που θα χρησιμοποιείται σε ένα δίκτυο 5G θα αυξηθεί ραγδαία και η χρήση τους θα είναι απαραίτητη στην καθημερινή ζωή, θα πρέπει να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των μπαταριών που τις τροφοδοτούν.

Όσον αφορά την ανάπτυξη, τη λειτουργία και τη διαχείριση του δικτύου οι απαιτήσεις είναι:

- Μείωση συνολικού κόστους
Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι λειτουργοί του δικτύου 5G θα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες με έναν οικονομικά βιώσιμο τρόπο. Στόχος λοιπόν είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας. Ο στόχος αυτός συνδέεται άμεσα με την αποδοτική ενεργειακή αξιοποίηση. Οι απαιτήσεις σε κίνηση δεδομένων προβλέπεται να αυξηθούν δραματικά και άρα απαιτείται η μεταφορά δεδομένων με μικρότερο κόστος ανά bit αλλά και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με σήμερα. Παράλληλα θα είναι αναγκαία η ταυτόχρονη υποστήριξη πολύ μεγαλύτερου αριθμού συσκευών σε σχέση με σήμερα καθώς προβλέπεται η χρήση δισεκατομμυρίων ασύρματα διασυνδεδεμένων αισθητήρων και άλλων συσκευών για την παροχή των νέων τεχνολογικών δυνατοτήτων.
Στα επόμενα 10 χρόνια προβλέπεται η 5G τεχνολογία να πρέπει να υποστηρίξει 1000 φορές μεγαλύτερη κίνηση δεδομένων απ'ότι σήμερα με κατανάλωση ενέργειας τη μισή από την σημερινή. Συνεπώς απαιτείται αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά έναν παράγοντα x2000.
- Ευκολία αναβάθμισης
Η τεχνολογία 5G θα πρέπει να παρέχει δυνατότητα αποτελεσματικής, ευέλικτης και γρήγορης εισαγωγής νέων υπηρεσιών. Η κάλυψη των επερχόμενων αναγκών της αγοράς απαιτεί εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών και τεχνολογιών. Όλα αυτά θα πρέπει να γίνονται στο δίκτυο κορμού με ελάχιστη επιρροή στο

access δίκτυο και στον εξοπλισμό του χρήστη. Θα πρέπει επίσης να μπορούν να αξιοποιηθούν οι υπάρχουσες υποδομές και να μην υπάρχουν προβλήματα συμβατότητας.

Τα ασύρματα δίκτυα 5G θα παρέχουν πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ορισμένες από αυτές («ενισχυμένες υπηρεσίες») έχουν πολύ αυστηρά καθορισμένες απαιτήσεις που το δίκτυο καλείται να καλύψει. Τέτοιες είναι:

- **Διαφάνεια στη συνδεσιμότητα**
Η διαφάνεια είναι απαραίτητη για τη συνεχή παροχή υπηρεσιών σε ετερογενή περιβάλλοντα. Πλήθος διαφορετικών συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις και υπό διαφορετικές συνθήκες θα βρεθούν συνδεδεμένα σε ένα κοινό δίκτυο. Πρέπει συνεπώς ο κάθε χρήστης να μπορεί να πάρει τις πληροφορίες που χρειάζεται χωρίς να επιβαρυνθεί με ενδιάμεσες δικτυακές πληροφορίες.
- **Γνώση τοποθεσίας**
Οι πληροφορίες για το γενικό πλαίσιο αξιοποίησης μίας υπηρεσίας πρέπει να είναι γνωστές στο δίκτυο ώστε να μπορεί να παρέχει άμεσα και εξατομικευμένα αποτελέσματα. Στα 5G δίκτυα ο προσδιορισμός της τοποθεσίας του χρήστη στον τρισδιάστατο χώρο πρέπει να γίνεται και μάλιστα με επαρκή ακρίβεια (1-10m στο 80% των περιπτώσεων και λιγότερο από 1m για υπηρεσίες που παρέχονται σε εσωτερικό χώρο). Η ακρίβεια βελτιώνεται μέσω εξωτερικών τεχνικών που λαμβάνουν δεδομένα και από άλλες κοντινές πηγές και το συνολικό κόστος της διαδικασίας είναι μικρότερο από την αντίστοιχη με χρήση δορυφόρων.
- **Ασφάλεια**
Τα δίκτυα 5G θα διαχειρίζονται τεράστιο όγκο δεδομένων που θα ανταλλάσσονται μεταξύ ανθρώπων αλλά και μηχανών. Ορισμένα από αυτά μπορεί να είναι ευαίσθητα και να πρέπει να προστατευτούν από ανεπιθύμητη πρόσβαση και χρήση, τροποποίηση ή και καταστροφή. Επιπλέον η 5G τεχνολογία θα χρησιμοποιηθεί και σε τομείς που εξ'ορισμού απαιτούν τη μέγιστη ασφάλεια όπως η δημόσια ασφάλεια και η παροχή υπηρεσιών υγείας.
- **Αξιοπιστία**
Ο ρυθμός αξιοπιστίας ορίζεται ως το ποσοστό των επιτυχώς απεσταλμένων πακέτων δεδομένων ως προς τα συνολικά απεσταλμένα πακέτα και ορίζεται μόνο όταν ένα δίκτυο είναι διαθέσιμο. Ο απαιτούμενος ρυθμός αξιοπιστίας διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Η τεχνολογία 5G αναμένεται να έχει τη δυνατότητα να επιτύχει ρυθμό αξιοπιστίας 99.999%.

4.4 Σχεδιαστικές αρχές δικτύου 5G

Με βάση τις απαιτήσεις για την ανάπτυξη 5G καθώς και τις τεχνολογίες που μπο-ρούν να χρησιμοποιηθούν έχουν αναπτυχθεί ορισμένες σχεδιαστικές αρχές για την ανάπτυξη του δικτύου 5G.

4.4.1 Πύκνωση δικτύου

Η πύκνωση των κυψελοειδών δικτύων είναι ένα σενάριο που έχει εμφανιστεί και σε προηγούμενες τεχνολογίες με σκοπό την αύξηση των δυνατοτήτων των υπάρχοντων δικτύων σε τοπικό επίπεδο. Ο διαχωρισμός των κυψελών σε συνδιασμό με τον προσεχτικό σχεδιασμό σχετικά με τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες αύξησε τη χωρητικότητα του δικτύου όπου αυτό ήταν απαραίτητο.

Συγκεκριμένα ο λειτουργός του δικτύου μπορεί να παρατάξει περίπου 1000 μακροκυψέλες για να καλύψει τις ανάγκες μίας πόλης μερικών εκατομμυρίων κατοίκων. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται κάθε μία από αυτές τις μακροκυψέλες να αποτελείται από 100 μικρές κυψέλες. Η πρόβλεψη αυτή δικαιολογείται από τα παρακάτω:

- Σε κάθε μακροκυψέλη θα υπάρχουν 500-1000 σπίτια, καταστήματα ή γραφεία. Ένα ποσοστό αυτών θα έχει μία μικρή κυψέλη εσωτερικού χώρου. Συνεπώς δεκάδες ή και μερικές εκατοντάδες μικρών κυψελών βρίσκονται εντός μίας μακροκυψέλης.
- Παράλληλα θα υπάρχουν και μικρές κυψέλες εξωτερικού χώρου μέσα σε κάθε μακροκυψέλη. Ο αριθμός τους θα κυμαίνεται από 2 έως 10 σε περιοχές χαμηλής κίνησης ενώ μπορεί να φτάσει το 100 σε περιοχές με αυξημένη κίνηση δεδομένων.

Συνεπώς είναι λογικό να περιμένει κανείς την ύπαρξη 100 μικρών κυψελών εντός μίας μακροκυψέλης και κατ'επέκταση 100.000 κυψέλες για την κάλυψη μίας πόλης. Η κάλυψη των προβλεπόμενων αυτών απαιτήσεων οδηγεί με τη σειρά της στη δημιουργία εξαιρετικά πυκνών δικτύων.

Το πρόβλημα εδώ είναι ότι η αύξηση του αριθμού των κυψελών αυξάνει την κίνηση των δεδομένων που αφορούν τη σηματοδότηση.

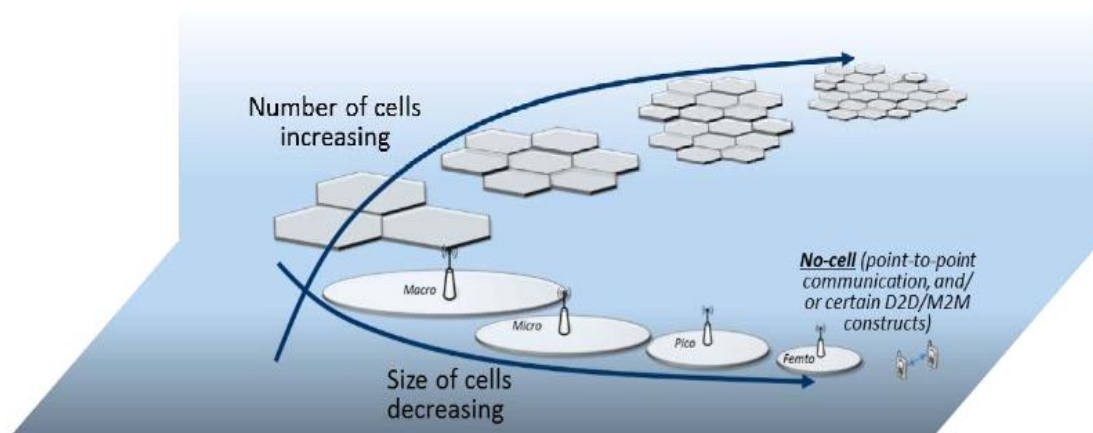


Illustration 53: Εξέλιξη κυψελών

Μελλοντικά, η πύκνωση των δικτύων θα έχει θεμελιωδώς σημαντικό ρόλο καθώς δίνει τη δυνατότητα «άμεσων επικοινωνιών» που με τη σειρά τους δίνουν τα μέσα για την εκπλήρωση των δύο παρακάτω κρίσιμων για τις επικοινωνίες αρχών:

- Μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης μέσω της κατάτμησης του χώρου σε μικρές κυψέλες μέχρι το σημείο όπου η κυψέλη δεν θα έχει την παραδοσιακή της σημασία και κάθε χρήστης μαζί με τον εξοπλισμό του θα έχει πρόσβαση σε ξεχωριστό κόμβο του access δικτύου(AN-Access Node)
- Μείωση των απωλειών μετάδοσης με την τοποθέτηση της υποδομής του access δικτύου σε μικρότερη απόσταση από τον χρήστη

4.4.2 Softwarization και Virtualization δικτύου

Αρχικά ας οριστούν οι δύο αυτές έννοιες. Με τον όρο softwarization εννοείται η τάση εμπλουτισμού του δικτύου με εργαλεία λογισμικού με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείριση τους ενώ με τον όρο virtualization η τάση υιοθέτησης/ ανάπτυξης εικονικών υποδικτύων με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων του δικτύου.

Στην κατεύθυνση καλύτερης αξιοποίησης των πόρων εμφανίστηκαν οι τεχνολογίες SDN (Software-Defined Networking) και NFV(Network Function Virtualization). Η πρώτη αποσκοπεί στην αύξηση της ικανότητας του δικτύου να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των εφαρμογών και υπηρεσιών που εξυπηρετεί και η δεύτερη στην μεταφορά δικτυακών ή τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, που σήμερα συνήθως λειτουργούν σε αποκλειστικές και εξειδικευμένες πλατφόρμες, σε εικονικές υποδομές.

Η βασική αρχιτεκτονική του SDN περιλαμβάνει 3 στρώματα, το στρώμα υποδομών, το στρώμα ελέγχου, το στρώμα εφαρμογών και ορισμένες διεπαφές για την επικοινωνία μεταξύ των στρωμάτων. Το στρώμα υποδομών περιλαμβάνει τις συσκευές και τον εξοπλισμό του δικτύου, το στρώμα ελέγχου το λογισμικό που είναι απαραίτητο για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων από τις εφαρμογές που είναι διαθέσιμες στο στρώμα εφαρμογών και το στρώμα εφαρμογών συνδέσμούς με άλλες εφαρμογές ή συστήματα. Η θεμελιώδης ιδέα πίσω από το SDN είναι ο διαχωρισμός των λειτουργιών προώθησης από το στρώμα ελέγχου.

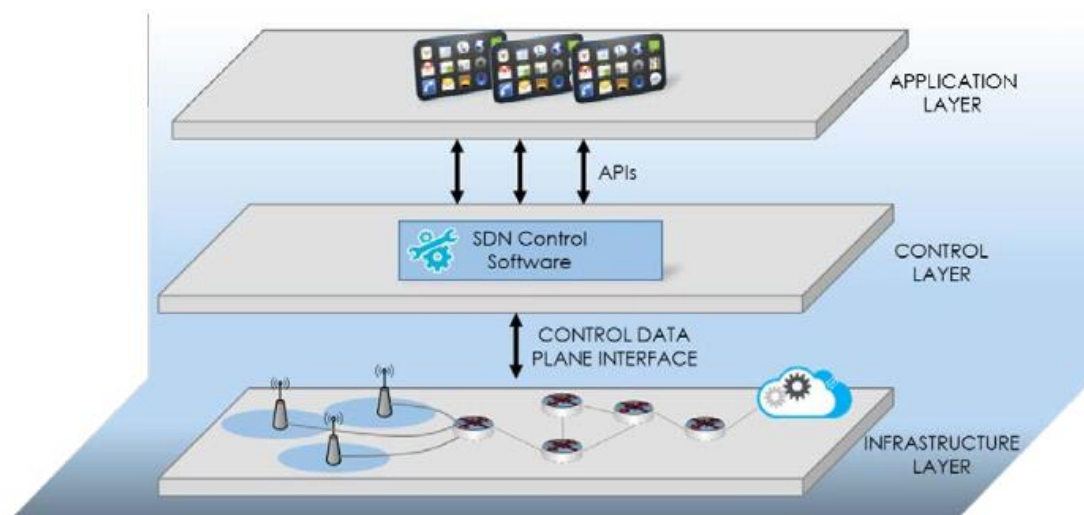


Illustration 54: Βασική αρχιτεκτονική του SDN

Η NFV τεχνολογία λειτουργεί συμπληρωματικά διασφαλίζοντας ότι ορισμένες λειτουργίες του δικτύου μπορούν να μεταφερθούν από ορισμένα βασικά στοιχεία του δικτύου σε εικονικές υποδομές. Με αυτόν τον τρόπο τα δίκτυα γίνονται ταχύτερα ενώ παράλληλα προστίθεται σε αυτά το στοιχείο της «ευφυΐας».

Οι δύο αυτές έννοιες (SDN,NFV) συνδέονται στενά μεταξύ τους, καθώς η δυνατότητα δυναμικού προγραμματισμού του δικτύου θα ενισχύσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και την ευελιξία των εφαρμογών NFV επιτρέποντας τη δυναμική απόδοση των δικτυακών πόρων και την αυτοματοποίηση της διασύνδεσης τους.

4.4.3 Διαμοιρασμένοι πόροι και διαχείριση δικτύου

Η πύκνωση των μελλοντικών δικτύων καθώς και το softwarization και το virtualization δημιουργούν ένα νέο σύστημα όπου πλέον ως πόρος ορίζεται κάθε στοιχείο που περιλαμβάνεται στο δίκτυο. Μέσω του virtualization οι πόροι μοιράζονται και δίνεται η δυνατότητα να κατασκευαστούν δίκτυα προσαρμοσμένα στις υπηρεσίες που καλούνται να παρέχουν. Οι απαιτήσεις σε ότι αφορά το φάσμα, την καθυστέρηση και τις υπόλοιπες παραμέτρους μπορεί να παρουσιάζουν τεράστιες διαφορές από υπηρεσία σε υπηρεσία.

Επιπλέον για να μπορέσουν να καλυφθούν οι απαιτήσεις των 5G δικτύων σε ποιότητα επικοινωνίας, χωρητικότητα δικτύου, καθυστερήσεις, φορητότητα αλλά και κόστος θα πρέπει να γίνει βέλτιστη διαχείριση του δικτύου με την αξιοποίηση των παραπάνω τεχνολογιών. Η επίτευξη της βέλτιστης συμπεριφοράς του δικτύου τη στιγμή που έχει να αντιμετωπίσει πλήθος ετερογενών περιβαλλόντων απαιτεί μεγάλη ευελιξία συστήματος. Οι μηχανισμοί διαχείρισης του δικτύου θα πρέπει να στοχεύουν στη βέλτιστη δυνατή διαμόρφωση του συστήματος που είναι ικανή να διαχειριστεί μία λειτουργία υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

4.5 Αρχιτεκτονική δικτύου 5G

Σύμφωνα με τις σχεδιαστικές αρχές που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα προβλέπεται να αναπτυχθεί για τα δίκτυα 5G μία αρχιτεκτονική που διαχωρίζει το λογισμικό από το υλικό αξιοποιώντας παράλληλα όλες τις δυνατότητες των τεχνολογιών SDN και NFV. Πρόκειται για μία αρχιτεκτονική ευφυών προγραμματιζόμενων δικτύων που παρέχει ένα σύνολο από διεπαφές προγραμματιζόμενων εφαρμογών (Application Programming Interfaces-APIs) ικανών να υποστηρίξουν το πλήθος των διαφορετικών χρήσεων που αναμένεται να έχει η τεχνολογία 5G.

Η αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

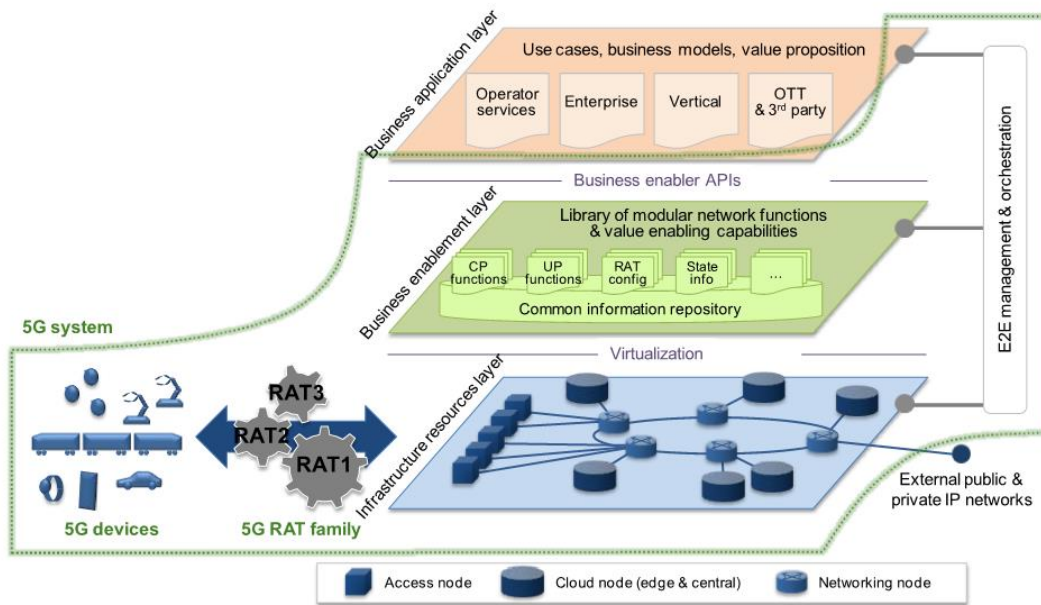


Illustration 55: Αρχιτεκτονική ευφύων προγραμματιζόμενων δικτύων

Τα είδη των κόμβων που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι:

- Access node
Πρόκειται για το σημείο εκκίνησης της οπτικής ίνας που οδηγεί σε έναν συνδρομητή. Οι βασικές λειτουργίες του περιλαμβάνουν: τη στέγαση του ενεργού εξοπλισμού μετάδοσης, τη διαχείριση του τερματισμού της ίνας και τη διευκόλυνση της σύνδεσης μεταξύ ενεργού εξοπλισμού και ίνας
- Cloud node
Αυτοί οι κόμβοι λειτουργούν ως αποθηκευτικό μέσο στο οποίο μπορεί να υπάρχει τεράστιος όγκος πληροφορίας.
- Networking node
Οι κόμβοι αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη σύνδεση των access nodes με τους cloud nodes αλλά και με το εξωτερικό δίκτυο.

Η παρουσιαζόμενη αρχιτεκτονική αποτελείται από 3 στρώματα και μία μονάδα διαχείρισης απ' άκρο σ' άκρο τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Τα τρία στρώματα είναι:

- Infrastructure resource layer (στρώμα πόρων υποδομών)
Περιλαμβάνει τους φυσικούς πόρους του δικτύου που αποτελούνται από access nodes, cloud nodes, συσκευές 5G, networking nodes και τους συνδέσμους μεταξύ τους. Οι συσκευές 5G μπορεί να έχουν πολλαπλές δυνατότητες όπως η αναμετάδοση ή η αποθήκευση δεδομένων ανάλογα με τις απαιτήσεις. Οι πόροι αυτοί είναι διαθέσιμοι στα ανώτερα στρώματα αλλά και στη μονάδα απ' άκρο σ' άκρο διαχείρισης μέσω των APIs.
- Business enablement layer (στρώμα επιχειρηματικής ενεργοποίησης)
Πρόκειται για μία βιβλιοθήκη που περιέχει όλες τις λειτουργίες που απαιτείται να

έχει ένα δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών χωρισμένες σε blocks. Αυτές καλούνται από την μονάδα διαχείρισης όποτε αυτό χρειάζεται και γίνονται διαθέσιμες μέσω των APIs. Για ορισμένες από αυτές μπορεί να υπάρχουν διαφορετικές παράμετροι και έτσι να παρέχεται η ίδια υπηρεσία αλλά με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Υπάρχει δηλαδή σε μεγάλο βαθμό ευελιξία και προσαρμοστικότητα στις εκάστοτε ανάγκες.

- Business application layer(στρώμα επιχειρηματικής ενεργοποίησης)
Περιλαμβάνει συγκεκριμένες εφαρμογές και υπηρεσίες. Η διεπαφή με τη μονάδα διαχείρισης επιτρέπει τη δημιουργία κομματιών δικτύου που είναι αφιερωμένα σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή ή την αντιστοίχιση μίας εφαρμογής με ένα υπάρχον κομμάτι δικτύου. Ο κερματισμός του δικτύου σε κομμάτια για συγκεκριμένους σκοπούς θα μελετηθεί παρακάτω.

Επιπλέον υπάρχει η μονάδα διαχείρισης απ' άκρο σ' άκρο (E2E management and orchestration entity) που αποτελεί το σημείο σύνδεσης των περιπτώσεων χρήσης με τις πραγματικές λειτουργίες του δικτύου και τα πραγματικά κομμάτια του δικτύου. Καθορίζει τα κομμάτια του δικτύου που απαιτούνται για ένα συγκεκριμένο σενάριο μιας εφαρμογής, το συνδέει με τις απαραίτητες λειτουργίες δικτύου και βρίσκει τους κατάλληλους πόρους υποδομών. Λόγω των ποικίλων εργασιών που έχει να εκτελέσει η μονάδα διαχείρισης πρέπει να λειτουργεί με ευελιξία. Επιπλέον χρησιμοποιεί τα δεδομένα που της παρέχονται για την βελτίωση όλων των χαρακτηριστικών της σύνθεσης και διανομής της κάθε υπηρεσίας.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σχολιαστεί η τεχνική κατακερματισμού του δικτύου (Network Slicing). Τα παραδοσιακά δίκτυα (κάθετη, μη προσαρμοζόμενη ιεραρχία στρωμάτων) είναι κατάλληλα για να καλύψουν τις ανάγκες όταν υπάρχει ένα είδος παρεχόμενης υπηρεσίας και η κίνηση του δικτύου μπορεί εύκολα να προβλεφθεί. Οι τεχνολογίες cloud, SDN και NFV επιτρέπουν στα κάθετα συστήματα να σπάσουν σε blocks δημιουργώντας μία οριζόντια αρχιτεκτονική με προγραμματιστικές και εικονικές συνδέσεις. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί το ίδιο δίκτυο να παρέχει πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών με συγκεκριμένα κάθε φορά χαρακτηριστικά.

Ουσιαστικά σκοπός κάθε κομματιού του 5G δικτύου που δημιουργείται είναι η διαχείριση μόνο της κίνησης δεδομένων που είναι απαραίτητη για τη συγκεκριμένη χρήση και αποφυγή όλων των μη αναγκαίων λειτουργιών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί το δίκτυο είναι χωρισμένο σε λογικά-εικονικά υποδίκτυα. Κάθε υπηρεσία που παρέχεται συντίθεται από τους απαραίτητους φυσικούς πόρους και τις λειτουργίες που απαιτεί. Έπειτα η μονάδα διαχείρισης λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω απαιτήσεις αντιστοιχεί την υπηρεσία στο κατάλληλο λογικό υποδίκτυο.

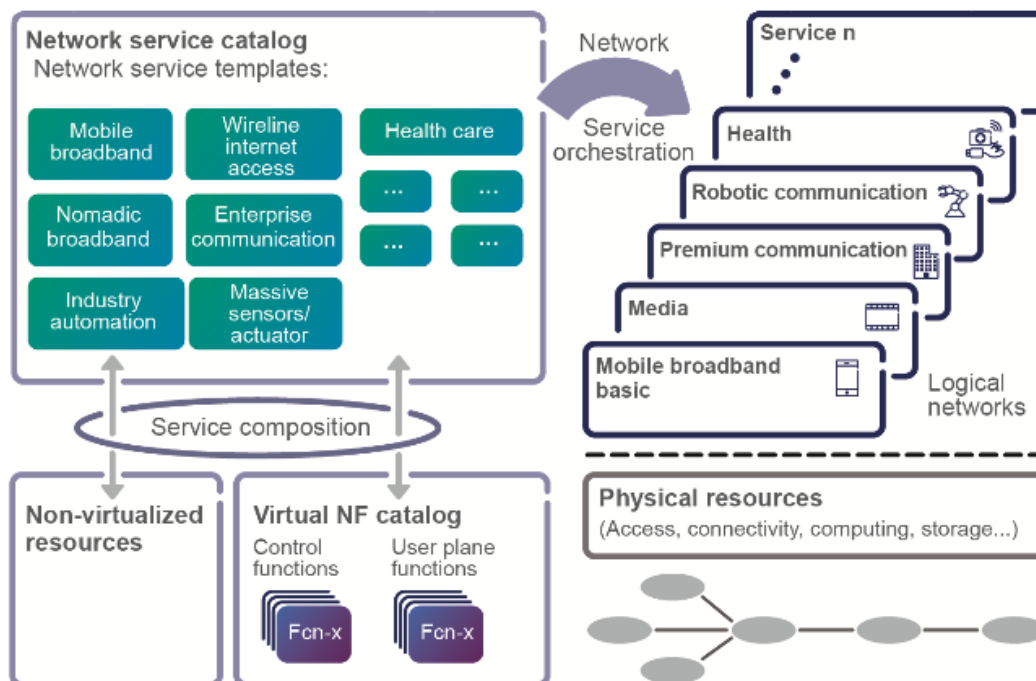


Illustration 56: Network Slicing

4.6 Προκλήσεις

Τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς θα κληθούν να παρέχουν λύσεις επικοινωνίες σε πολλές διαφορετικές ομάδες και για πολλές διαφορετικές περιπτώσεις:

- Άτομα ή κοινωνίες ατόμων
- Εταιρείες και οργανισμοί
- Μέσα Μαζικής Μεταφοράς
- Τομείς υγείας και ρομποτικής
- Δήμοι και δημόσια διοίκηση
- Οργανισμοί δημόσιας ασφάλειας και αμυντικά σώματα

Για να μπορέσει η νέα τεχνολογία να ανταπεξέλθει στις πολυποίκιλες απαιτήσεις των παραπάνω περιπτώσεων θα πρέπει να μπορεί να αξιοποιήσει και να διαχειριστεί διαφορετικές δικτυακές αρχιτεκτονικές.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν όλες οι προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές, οι κατασκευαστές και όλοι όσοι ασχολούνται με την ανάπτυξη των δικτύων 5G. Ορισμένες από αυτές έχουν ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 στο πλαίσιο των απαιτήσεων των δικτύων 5G. Τώρα θα δοθεί μία πλήρης εικόνα των προκλήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να υπάρξει πλήρης εφαρμογή της τεχνολογίας.

- Διέλευση
Αύξηση του ρυθμού διέλευσης των δεδομένων x1000 σε σχέση με τα σημερινά δεδομένα
- Καθυστέρηση
Παροχή υπηρεσιών με καθυστέρηση 1ms όπου χρειάζεται (π.χ tactile internet)
- Ενεργειακή αποδοτικότητα
Κάλυψη των απαιτήσεων με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο (επίτευξη ενεργειακής απόδοσης ίσης με το 90% αυτής του 2010). Η βελτίωση αυτής της παραμέτρου απαιτεί την αύξηση του χρόνου ζωής των χρησιμοποιούμενων μπαταριών αλλά και αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων του περιβάλλοντος
- Δικτυακή κάλυψη
Ο τελικός στόχος είναι ουσιαστικά η δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής υπηρεσιών οπουδήποτε αυτή ζητηθεί
- Ιδιωτικότητα
Διασφάλιση πραγματικά ιδιωτικής επικοινωνίας όταν αυτό απαιτείται μέσω πολιτικής περιορισμών σε θέματα διαχείρισης δεδομένων και ιδιοκτησίας
- Ποιότητα υπηρεσίας(QoS)
Τα δίκτυα 5G θα πρέπει να μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες με διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά αξιοποιώντας τη γεωγραφία των εγκατεστημένων κεραιών. Για παράδειγμα οι κρίσιμες υπηρεσίες υγείας πρέπει να παρέχονται σε πραγματικό χρόνο και απόλυτη ασφάλεια ενώ σε περιπτώσεις χαμηλότερων απαιτήσεων να εξασφαλίζεται η οικονομικότερη λύση.
- Πυκνότητα συσκευών
Η ικανότητα διαχείρισης των απαιτήσεων μεγάλου αριθμού χρηστών και συσκευών που βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους
- Πολυ-μίσθωση δικτύου
Παρέχει υπηρεσίες σε μία έκταση υποδομών που ανήκει σε διαφορετικούς ιδιοκτήτες. Τα διαφορετικά δίκτυα συνυπάρχουν και παρέχουν ολοκληρωμένη και αποτελεσματική αλληλεπίδραση μεταξύ του ασύρματου περιβάλλοντος και του backhaul.
- Ποικιλία συνδεδεμένων συσκευών
Πέρα από τις διαφορές ανάμεσα στους αποδέκτες των υπηρεσιών ενός δικτύου 5G, διαφορές υπάρχουν και μεταξύ τω συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε αυτό και άρα και στο είδος των δεδομένων που διανέμονται
- Αυτοδιαχείριση δικτύου
Βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου και προσθήκη «ευφυΐας» σε αυτό ώστε να μειωθεί η χειρωνακτική διαχείριση του και η ανθρώπινη παρέμβ-βαση σε αυτή
- Ευελιξία δικτύου
Απαιτούνται πραγματικά ευέλικτοι μηχανισμοί ελέγχου που με τη σειρά τους απαιτούν την αξιοποίηση τεχνολογιών προγραμματιζόμενων δικτύων.
- Εξέλιξη και συμβατότητα
Δυνατότητα εξέλιξης και προσαρμογής ενώ παράλληλα υπάρχει συμβατότητα με την προηγούμενη κάθε φορά τεχνολογία ώστε να μην μένουν πόροι και εξοπλισμός αναξιοποίητοι.

Το στοιχείο που κυριαρχεί και διαφοροποιεί την τεχνολογία 5G από τις προηγούμενες είναι η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα. Οι προηγούμενες τεχνολογίες μπορούσαν να παρέχουν περιορισμένες υπηρεσίες. Χρησιμοποιούσαν εξειδικευμένα στοιχεία δικτύου σύμφωνα με γενικά συμφωνημένα πρότυπα, πράγμα που περιόριζε τις δυνατότητες τους. Αυτή την ακαμψία καλούνται να ξεπεράσουν τα δίκτυα 5G και να παρέχουν έτσι άμετρες υπηρεσίες κάποιες από τις οποίες μπορεί να φαντάζουν εξωπραγματικές με τα σημερινά δεδομένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Εισαγωγή

Τα δίκτυα 5G δεν αναμένεται να γίνουν εμπορικά διαθέσιμα άμεσα, ωστόσο η παρούσα χρονική περίοδος συνοδεύεται με την προετοιμασία για το πέρασμα από το 4G στο 5G. Πολλές εταιρείες και οργανισμοί έχουν στρέψει την προσοχή τους στο 5G και αναπτύσσονται χρονοδιαγράμματα απεικόνισης της πορείας που θα ακολουθήσουν τα ασύρματα δίκτυα στα επόμενα χρόνια.

5.1 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης 5G

Η ITU(International Telecommunication Union-Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών) είναι το σώμα το οποίο αναμένεται να θέσει τα παγκόσμια πρότυπα για τις απαιτήσεις των 5G δικτύων. Η ίδια ένωση έχει δημιουργήσει ένα λεπτομερές χρονοδιάγραμμα για τα στάδια ανάπτυξης του 5G.

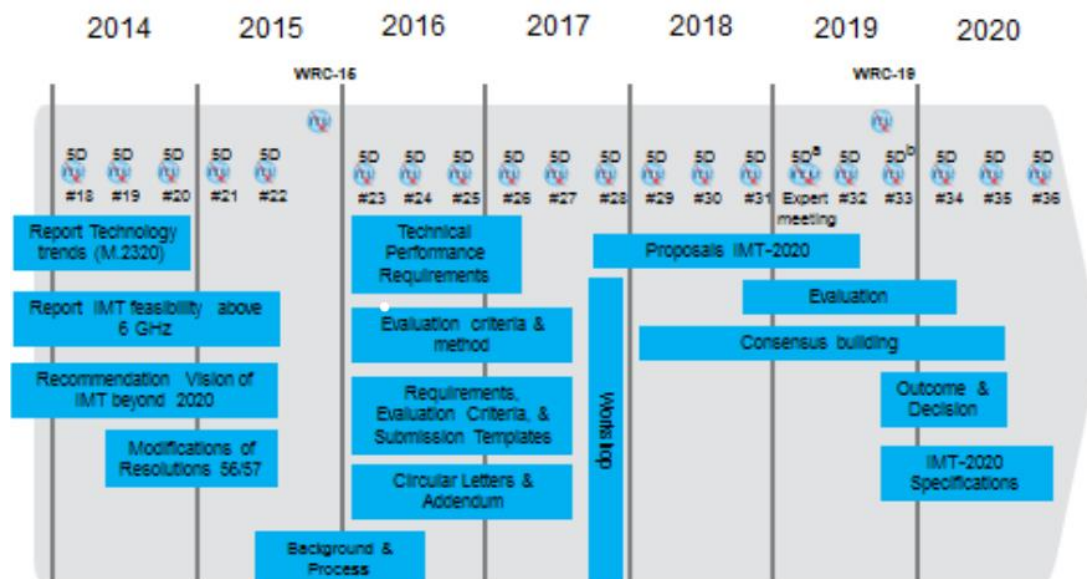


Illustration 57: Λεπτομερές χρονοδιάγραμμα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G

Όπως φαίνεται οι εργασίες έχουν ήδη ξεκινήσει, προσδιορίζονται οι τεχνικές απαιτήσεις και αξιολογούνται τα κριτήρια και οι διάφορες μέθοδοι ανάπτυξης της τεχνολογίας.

Το 3GPP (3rd Generation Partnership Project) είναι το σώμα που θα καθορίσει τις τεχνικές προδιαγραφές. Τον Σεπτέμβριο του 2015 διοργάνωσε ένα workshop μέσω του οποίου:

- Το 3GPP ενέκρινε μία μελέτη για τη μοντελοποίηση του καναλιού για φάσμα πάνω από τα 6GHz. Αναγνώρισε τις απαιτήσεις για διαφορετικά σενάρια ενδιαφέροντος και ολοκλήρωσε τη μοντελοποίηση του καναλιού για συχνότητες μέχρι 100GHz.

- Το Δεκέμβριο του 2015 ενέκρινε μία μελέτη για τα σενάρια και τις απαιτήσεις του 5G.
- Το Μάρτιο του 2016 ενέκρινε μία μελέτη για την αξιολόγηση των τεχνολογικών λύσεων του 5G.

Η πρώτη φάση του καθορισμού των τεχνολογικών προδιαγραφών αναμένεται να ολοκληρωθεί στο δεύτερο μισό του 2018 και η δεύτερη φάση μέχρι τον Δεκέμβριο του 2019.

Παράλληλα από τον Οκτώβριο του 2015 το 3GPP ασχολείται και με τις προδιαγραφές που αφορούν την αρχιτεκτονική των 5G συστημάτων.

Η 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) η οποία αποτελεί κοινή πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών καθώς και της ακαδημαϊκής κοινότητας, έχει στόχο την ανάπτυξη προτύπων για τα 5G δίκτυα ικανών να παρέχουν μεγάλες χωρητικότητες, χαμηλή κατανάλωση ισχύος, κάλυψη παντού και με μικρές καθυστερήσεις και ασφάλεια. Δρα παράλληλα με την 3GPP και στοχεύει να επενδύσει 4 δισεκατομμύρια ευρώ για τη δημιουργία των επόμενης γενιάς τηλεπικοινωνιακών δικτύων και υπηρεσιών. Η διεξαγωγή των μεγάλων κλίμακας δοκιμών της αναμένεται να γίνει μεταξύ 2019 και 2020.

Η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) αναμένεται στο τεύχος του Οκτωβρίου 2016 του περιοδικού επικοινωνιών της να ασχοληθεί με την αρχιτεκτονική και τις τεχνολογίες των δικτύων 5G. Παράλληλα ασχολείται με το πρότυπο 802.11ax Wi-Fi που θα μπορεί να μεταδίδει δεδομένα σε ταχύτητες που φαίνεται να συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις των 5G δικτύων.

Η συμμαχία των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς (Next Generation Mobile Networks Alliance) εξέδωσε τον Μάρτιο του 2015 ένα white paper για τα δίκτυα 5G όπου αναλύει τις χρήσεις, τις απαιτήσεις αλλά και τα τεχνολογικά μοντέλα που συνδέονται με αυτά. Στο ίδιο paper εμφανίζεται ένα χρονοδιάγραμμα σύμφωνα με το οποίο η οριστικοποίηση των προτύπων για τα δίκτυα 5G αναμένεται να γίνει μέχρι το τέλος του 2018 και η εμπορική του αξιοποίηση στα μέσα του 2020.

Ο 5G Americas είναι ένας οργανισμός παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και κατασκευαστών που έχει δημοσιεύσει αρκετά white papers για σχετικά με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας 5G και την εξέλιξη του 4G.

Άλλα προγράμματα και οργανισμοί που έχουν συμβάλει στο πολυαναμενόμενο πέρασμα στην χρήση των 5G δικτύων είναι: 5GNOW, Giga Korea Project, 5G Forum, NYU WIRELESS, 5G Innovation Centre(5GIC), Ministry of Science & Technology (MOST) 863-5G Project, Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum (5GMF) και 2020 and Beyond Ad Hoc Group (20B AH).

5.2 Αξίζει η επένδυση στο 5G;

Όλοι οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι υπηρεσιών έχουν ήδη ασχοληθεί με τα δίκτυα 5G και παρότι τα δίκτυα αυτά δεν θα είναι εμπορικά διαθέσιμα για μερικά χρόνια ακόμα, φαίνεται ότι οι επενδύσεις σε αυτά αξίζει να αρχίσουν. Οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να αρχίσουν να μεταμορφώνουν τα δίκτυα τους ώστε να επιτευχθεί η συμβατότητα με τις 5G τεχνολογίες του μέλλοντος. Το θετικό είναι ότι πολλές από τις απαιτήσεις που έχουν τα 5G δίκτυα μπορούν να ωφελήσουν και τα υπάρχοντα 4G δίκτυα. Στην πραγματικότητα λοιπόν η επένδυση στην κατεύθυνση του 5G δεν ενέχει κάποιο κίνδυνο παρότι δεν έχουν καθορισθεί ακόμα τα αναγκαία πρότυπα. Πολλές από τις τεχνολογίες που θα συνοδέψουν τα δίκτυα 5G (network element virtualization, network orchestration, network intelligence, realtime analytics...) έχουν ήδη αναπτυχθεί, δοκιμασθεί και εφαρμοστεί σε μερικά από τα μεγαλύτερα δίκτυα του κόσμου. Ο πραγματικός κίνδυνος βρίσκεται στην επένδυση σε 4G τεχνολογίες που δεν θα μπορέσουν να συμβαδίσουν με τις νέες τεχνολογικές αρχές που θα φέρουν τα 5G.

5.3 Τι θα ακολουθήσει;

Η τεχνολογία 5G φαίνεται να μπορεί να παρέχει ασύρματη επικοινωνία χωρίς εμπόδια και περιορισμούς. Παρά την προφανή ανωτερότητά της έναντι των προηγούμενων τεχνολογιών, δεν προβλέπεται να είναι το τέλος στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών.

Η έκτη γενιά ασύρματων δικτύων 6G θα είναι ο διάδοχος και συνεχιστής του 5G. Θα ασχοληθεί με το δορυφορικό δίκτυο για να παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Τα είδη των δορυφορικών δικτύων είναι τρία: τηλεπικοινωνιών, πλοήγησης και απεικόνισης της γης. Η έκτη γενιά ασύρματων δικτύων θα συνοδευτεί με ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερη ασφάλεια ενώ ένα θέμα που θα πρέπει να επιλύσει είναι η αντιμετώπιση των handovers των δορυφόρων.

Βιβλιογραφία

- [1] Govind P.Agrawal, *ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ*, Τζιόλα 2014
- [2] Χ.Καψαλης, Π.Κωττης, *ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ*, Τζιόλα 2011
- [3] John Wilson, John Hawkes, *Οπτοηλεκτρονική: μία εισαγωγή*, Επιστημονική επιμέλεια: Α.Α. Σεραφετινίδης
- [4] Yozo SHOJI, Yoshihiro HASHIMOTO, Hiroyo OGAWA, *Fiber-Optic Broadband Signal Distribution Link Based on a Millimeter-Wave Self-Heterodyne Transmission/Optical Remote Heterodyne Detection Technique*, IEICE TRANS, ELECTRON., VOL.E88-C, NO.7 JULY 2005
- [5] Beena R Ballal, Dr.Shikha Nema, *Performance Comparison of Analog and Digital Radio Over Fiber Link*, International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)
- [6] 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
- [7] Pooja, Saroj, Manisha, *Advantages and Limitation of Radio over Fiber System*, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.4 Issue.5, May- 2015
- [8] Vikas Kumar Pandey, *Radio-Over-Fiber (ROF) in Cellular Communication*, International Journal of Scientific Engineering and Technology Volume No.2, Issue No.6, 1 June 2013
- [9] Vimala Reddy, Lochan Jolly, *Radio over Fiber (RoF) Technology an Integration of Microwave and Optical Network for Wireless Access*, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2015)
- [10] M. García Larrodé, A.M.J. Koonen, J.J. Vegas Olmos, G.J. Rijckenberg , *Transparent transport of wireless communication signals in Radio-over-Fibre systems*
- [11] Stavros A.Kotsopoulos, Konstantinos G.Ioannou, *Handbook of Research on Heterogenous Next Generation Networking: Innovations and Platforms*
- [12] Andrew S.Tanenbaum, David J. Wetherall, *ΔΙΚΤΥΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2011
- [13] *5G RADIO ACCESS*, ERICSSON WHITE PAPER, February 2015
- [14] *5G SYSTEMS*, ERICSSON WHITE PAPER, January 2015
- [15] Xavier Fernando, *Radio over Fiber-An Optical Technique for Wireless Access*, 2009
- [16] *Synergies of photonics with 5G networks*, Photonics Communications Research Laboratory
- [17] D.Opatić, *Radio Over Fiber Technology for Wireless Access*
- [18] *Spectrum Analysis Basics Application Note 150*, Agilent Technologies

- [19] Ambreen Ali Felicia Berlanga , *Linear vs. Constant Envelope Modulation Schemes in Wireless Communication Systems*
- [20] Understanding Data Eye Diagram Methodology for Analyzing High Speed Digital Signals Application Note
- [21] Christie Brown, *Spectrum Analysis Basics*
- [22] Wikipedia
<http://www.en.wikipedia.org>
- [23] Techopedia
<https://www.techopedia.com>
- [24] AITS
<https://users.encs.concordia.ca/>
- [25] webapptester
<http://webapptester.com/>
- [26] Δημήτριος Ι. Καλαβρουζιώτης, *Σχεδιασμός και Προσομοίωση Οπτικού Δικτύου Πρόσβασης για Παροχή Πολλαπλών Ευρυζωνικών Υπηρεσιών*
- [27] *5G-a business enabler and disruptor*, Ericsson Business Review, Issue 2, 2013
- [28] Rachid El Hattachi, Javan Erfanian, *NGMN 5G WHITE PAPER*
- [29] Aleksandr Ometov, *5G vision and D2D communications*, 15.03.2016
- [30] Angeliki Alexiou, Panagiotis Demestichas, Andreas Georgakopoulos, *5G Vision, Enablers and Challenges for the Wireless Future*, April 2015
- [31] Μανώλης Περάκης, *NFV και SDN Οικονομίες κλίμακας μέσω Virtualization*, Infocom
- [32] Paolo Monti, Bjorn Skubic, Piero Castoldi, Lena Wosinska, *Challenges for 5G transport networks*, Conference Paper December 2014
- [33] *5G: Challenges, Research Priorities, and Recommendations*, Joint White Paper, European Technology Platform for Communications Networks and Services
- [34] *IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030*, International Telecommunication Union, Report ITU-R M.2370-0 (07/2015)
- [35] *5G Radio access: Requirements, Concept and Technologies*, Docomo 5G White Paper, July 2014
- [36] *Number theories: what 100 operators really think about 5G*, Ericsson Business Review, Issue 1, 2016
- [37] Chris Croupe, *Future of video content: Evolution toward 2020*
- [38] Wei-Tao Shaw, *Hybrid Optical Wireless Access Networks*, March 2009
- [39] Davide Visani, *Optical Fiber Technology and Radio over Fiber for near-future in-building and in-home network*, 18/01/2010
- [40] Hong Bong Kim, *Radio over Fiber based Network Architecture*
- [41] Marcus K. Weldon, *The Future X Network: A Bell Labs Perspective*
- [42] https://www.osapublishing.org/jocn/journal/jocn/feature_announce/on.cfm

- [43] 5G SUBCOMMITTEE, *COMMERCE SPECTRUM MANAGEMENT ADVISORY COMMITTEE (CSMAC)* , August 1, 2016
- [44] *5G is Coming. Are You Ready? What's Ahead, What's Required and What You Can Do About it Today*, White paper, Affirmed Networks
- [45] Ajit Pratap Singh¹, Sharad Nigam², Narendra Kumar Gupta³, *A Study of Next Generation Wireless Network 6G*, International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering