



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Μελέτη και επίδοση αρχιτεκτονικών μετάδοσης σε συστήματα Radio over Fiber (RoF)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

**Επιβλέπων:** Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 23 Δεκεμβρίου 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Μελέτη και επίδοση αρχιτεκτονικών μετάδοσης σε συστήματα Radio over Fiber (RoF)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Δευτέρα 23 Δεκεμβρίου 2013

.....  
Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, 23 Δεκεμβρίου 2013



.....  
Παπαϊωάννου Αντώνιος

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

Copyright © Παπαϊωάννου Αντώνιος, 2013

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

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση κινητών συσκευών και η ανάγκη των χρηστών για μεγάλο όγκο δεδομένων και υπηρεσιών multimedia επιβάλλει την διεύρυνση των δυνατοτήτων του δικτύου κινητών επικοινωνιών. Η σύγκλιση ασύρματης και ενσύρματης επικοινωνίας για την παροχή υπηρεσιών broadband αποτελεί μια σημαντική προοπτική, καθώς μπορεί να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και μεγάλο εύρος ζώνης. Η τεχνολογία Radio over Fiber (RoF), αποτελεί την επιτομή αυτής της σύγκλισης, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων της σε κόστος υλοποίησης και τη μεγάλη χωρητικότητα της οπτικής ζεύξης. Είναι λοιπόν δυνατή η απλοποίηση του σταθμού βάσης, καθώς όλες οι λειτουργίες ελέγχου του δικτύου πραγματοποιούνται σε ένα κεντρικό σταθμό (Central Office – CO) ενώ οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούνται σχεδόν ως απλές κεραίες.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η δημιουργία ενός συστήματος RoF που θα μπορεί να υποστηρίξει κινούμενους χρήστες σε εσωτερικό χώρο, οι οποίοι θα εξυπηρετούνται από το πρότυπο IEEE 802.11ad. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης πραγματοποιήθηκε μια όσο το δυνατόν πληρέστερη καταγραφή της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος RoF καθώς και των δεδομένων εναλλακτικών. Έμφαση δόθηκε στα βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος, στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εκάστοτε αρχιτεκτονικής. Ακόμα αναλύθηκε το πρότυπο IEEE 802.11ad, οι διάφορες εναλλακτικές που προσφέρει σε ρυθμούς μετάδοσης, η δομή των πακέτων και τα βασικά στοιχεία μετάδοσης όπως η ισχύς εκπομπής, η ευαισθησία του δέκτη και τα ικανοποιητικά επίπεδα απώλειας πακέτων στον δέκτη.

Για την περαιτέρω μελέτη της επίδοσης του συστήματος, παρουσιάζεται το μοντέλο Moving Extended Cell και γίνεται η προσομοίωση ενός δικτύου εσωτερικού χώρου, όπου η ποιότητα της υπηρεσίας αξιολογείται από δύο κριτήρια. Το πρώτο είναι η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης και το δεύτερο ο ρυθμός που χάνονται πακέτα. Παράλληλα δημιουργήθηκαν πολλαπλά σενάρια κίνησης των χρηστών και χρήσης δεδομένων. Η προσομοίωση παρέχει σημαντικά συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα του ενός συστήματος RoF και γενικότερα για τα πλεονεκτήματα του μοντέλου Moving Extended Cell με σκοπό την υποστήριξη κινούμενων χρηστών.

Λέξεις κλειδιά: Ασύρματες επικοινωνίες, Radio over Fiber, RoF, Οπτικές ίνες, IEEE 802.11ad, Επίδοση Συστήματος Επικοινωνιών, Μοντέλο Εκτεταμένης Κυψέλης, Αρχιτεκτονική Δικτύου χαμηλού κόστους

## Abstract

The continuous growth of mobile users along with their need for a large amount of data and multimedia services imposes the improvement of the status quo in the mobile networks. The convergence of wired and wireless communication should be considered a good perspective in order to provide broadband services, as it can serve their needs in high data rates and wide spectrum. The Radio over Fiber technology (RoF) is the best case scenario of this convergence due to its low implementation costs and the high capacity of the optical fiber. Under these circumstances a low complexity base station is applicable, as all the core processes of the network are executed in the Central Office, while the base stations are being used almost as simple antennas.

The main objective of the diploma thesis is the creation of a RoF network system that can support indoor moving users that will use the IEEE 802.11ad standard. During this research, the architecture of a RoF system, along with its alternatives, has been recorded. Especially, they are presented thoroughly the basic elements, the advantages and disadvantages of each architecture. Moreover, the IEEE 802.11ad standard has been analyzed. Particular emphasis was placed in the different data rates that the standard supports, the data packet structure and the basic transmission characteristics such as the transmission power, receiver's sensitivity and the quality standards in terms of packet loss.

To further study the performance of the system, the Moving Extended Cell concept is presented and a simulation is made for an indoor network, in which the quality of service is evaluated under two criteria. The first one is the call drop probability, while the second one is the packet loss rate. In parallel, many concepts have been created regarding the moving pattern of the users and the data traffic. The simulation provides many important outputs about the general performance of a RoF system and the advantages of the Moving Extended Cell concept, aiming the support of mobile users.

Keywords: Wireless Communication, Radio over Fiber, RoF, IEEE 802.11ad, Performance Analysis in Communication System, Moving Extended Cell Concept, Low Cost Network Architecture

## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 και αποτελεί την πρακτική εφαρμογή των γνώσεων που έλαβα μέσα από τον κύκλο σπουδών μου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω το σύνολο του διδακτικού προσωπικού της σχολής για την ολοκληρωμένη γνώση που έλαβα. Πιο συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, στον οποίο οφείλω πολλά, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου, προκειμένου να μου ανατεθεί αυτή η διπλωματική εργασία, τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και πρωτότυπο θέμα και την ουσιαστική βοήθειά του στην εξέλιξη αυτής της μελέτης.

Α. Παπαϊωάννου,  
Αθήνα, 2013



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract .....	7
Ευχαριστίες.....	8
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	13
1.1 Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών .....	13
1.2 Ευρυζωνικά Ασύρματα Δίκτυα.....	14
1.3 Η Τεχνολογία Radio-over-Fiber .....	15
1.3.1 Τι είναι το RoF?.....	15
1.3.2 Πλεονεκτήματα της RoF Τεχνολογίας .....	16
1.3.2.1 Μικρή Εξασθένιση.....	16
1.3.2.2 Μεγάλο Εύρος Ζώνης.....	17
1.3.2.3 Ανοχή στην Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή .....	17
1.3.2.4 Εύκολη Εγκατάσταση και Συντήρηση .....	18
1.3.2.5 Μειωμένη Κατανάλωση Ενέργειας.....	18
1.3.2.6 Υποστήριξη πολλαπλών Λειτουργιών.....	18
1.3.2.7 Δυναμική Εκχώρηση Φάσματος.....	18
1.3.3 Περιορισμοί της RoF τεχνολογίας .....	19
1.3.4 Αρχιτεκτονική του δικτύου.....	19
1.3.5 Συνεχής Παροχή Υπηρεσίας σε Κινούμενους Χρήστες .....	21
Τεχνικές Προκλήσεις του Μέλλοντος.....	21
1.3.6.1 Στοιχεία κυκλώματος .....	21
1.3.6.2 Διασύνδεση .....	22
1.3.6.3 Αρχιτεκτονικές με μικρό κόστος.....	22
1.3.6.4 Η σχεδίαση νέων πρωτοκόλλων και προτύπων.....	22
1.3.6.5 Διευθυνσιοδότηση .....	23
Βιβλιογραφία .....	24
Κεφάλαιο 2 Αρχιτεκτονική Radio over Fiber Δικτύου .....	25
2.1 Τα βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου.....	25

2.1.1 Η κυψέλη .....	25
2.1.1.1 Μακροκυψέλες .....	26
2.1.1.2 Μικροκυψέλες.....	26
2.1.1.3 Πικοκυψέλες.....	26
2.1.2 Ο Σταθμός Βάσης (Base Station) .....	26
2.1.3 Ο κεντρικός σταθμός (Central Office) .....	26
2.2 Η ζεύξη (link).....	27
2.2.1 Συχνότητες λειτουργίας .....	27
2.2.1.1 Μετάδοση στην συχνότητα εκπομπής (RF) .....	28
2.2.1.2 Μετάδοση σε ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency).....	28
2.2.1.3 Μετάδοση στην βασική ζώνη (baseband transmission) .....	29
2.2.2 Εύρος ζώνης καναλιού .....	30
2.2.3 Αριθμός καναλιών .....	30
2.2.4 Σχήμα διαμόρφωσης.....	31
2.2.5 Χρήση MIMO .....	31
2.2.6 Παράμετροι αξιολόγησης της ποιότητας της σύνδεσης.....	32
2.2.6.1 Εξασθένιση .....	32
2.2.6.2 Σκέδαση.....	32
2.2.6.3 Διασπορά.....	33
2.2.6.4 Bit Error Rate .....	34
2.2.6.5 Crosstalk .....	34
2.2.7 Είδος πολυπλεξία για την μετάδοση.....	34
2.2.7.1 Subcarrier Multiplexing (SCM) .....	34
2.2.7.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM).....	35
2.2.7.3 Optical Frequency Multiplexing .....	36
2.2.7.4 SCM over WDM .....	37
2.2.7.5 OCDMA over WDM.....	38
2.2.8 Αναλογική ή ψηφιακή μετάδοση? .....	39
Βιβλιογραφία .....	41
Κεφάλαιο 3 Το πρωτόκολλο IEEE 802.11ad .....	43
3.1 Εισαγωγή – Ιστορική Αναδρομή.....	43
3.2 Γιατί στα 60 GHz; .....	45
3.3 Επισκόπηση για το Φυσικό Επίπεδο .....	46
3.3.1 Δομή του Πακέτου .....	48

3.3.1.1 Προοίμιο (Preamble) .....	49
3.3.1.2 Επικεφαλίδα (Header) .....	49
3.2.1.3 Payload .....	50
3.3.2 Είδη Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης .....	51
3.3.2.1 Control PHY .....	52
3.3.2.2 Single Carrier PHY .....	52
3.3.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplex PHY .....	52
3.3.2.4 Low Power Single Carrier PHY .....	52
3.3.3 Διαχείριση του Διαγράμματος Ακτινοβολίας .....	53
3.3.4 Ευαισθησία Δέκτη .....	53
Βιβλιογραφία: .....	55
Κεφάλαιο 4 Το σενάριο προσομοίωσης .....	57
4.1 Το Μοντέλο Moving Extended Cell .....	57
4.2 Ο τρόπος λειτουργίας του RoF Συστήματος .....	60
4.3 Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) .....	60
4.3.1 Πιθανότητα απόρριψης κλήσης (Call drop probability) .....	60
4.3.2 Ρυθμός απώλειας πακέτων .....	61
4.4 Ο Αλγόριθμος Προσομοίωσης .....	63
Βιβλιογραφία .....	69
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	71
5.1 1 <sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης .....	71
5.2 2 <sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης .....	73
5.3 3 <sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης .....	75

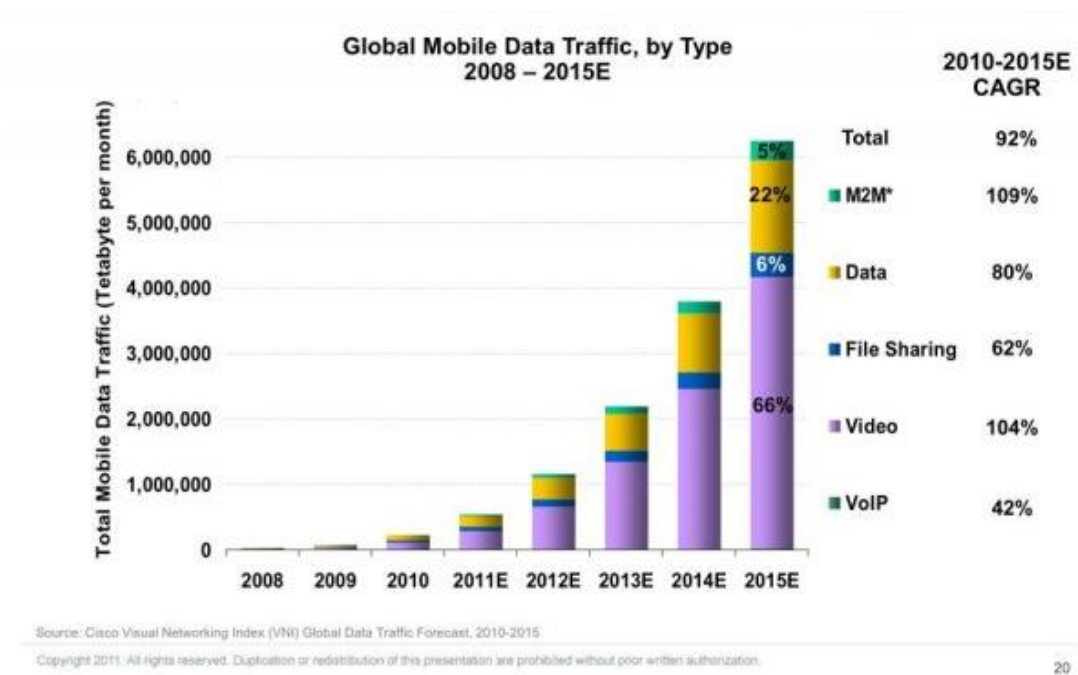


# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γνωρίσει τεράστια αύξηση τα τελευταία 15 χρόνια. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι 20 χρόνια πριν, λιγότερο από το 1% του πληθυσμού είχε κινητό. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 ένας στους 6 ήταν κάτοχος κινητού τηλεφώνου, ενώ το 2012 οι κάτοχοι smartphones, κινητών συσκευών που δίνουν και την δυνατότητα για εύκολη πρόσβαση στο Internet, ξεπέρασαν τα 1,1 δισεκατομμύρια. Ενώ το 2008 χρήστες κινητών τηλεφώνων ήταν τριπλάσιοι από τους χρήστες σταθερών γραμμών τηλεφώνου.



Σχήμα 1.1 : Πρόβλεψη τηλεπικοινωνιακής κίνησης κινητών συσκευών ως το 2015

Εκτός όμως των κινητών επικοινωνιών, έχουν αναπτυχθεί έντονα τα προηγούμενα χρόνια και δίκτυα τοπικής πρόσβασης (WLANs) ενώ αναπτύσσονται και νέα πρωτόκολλα πρόσβασης για αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης. Έτσι από το πρώτο πρωτόκολλο WLAN IEEE 802.11 στα 2.4GHz και ταχύτητες μέχρι 2Mbps του 1997, δημοσιεύτηκε τον Φεβρουάριο του 2012 το IEEE 802.11ad (WiGig) που θα λειτουργεί στα 60GHz και θα επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 7Gbps. Η συνολική ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών βασίζεται στην ευκολία εγκατάστασης των συστημάτων σε σχέση με τα

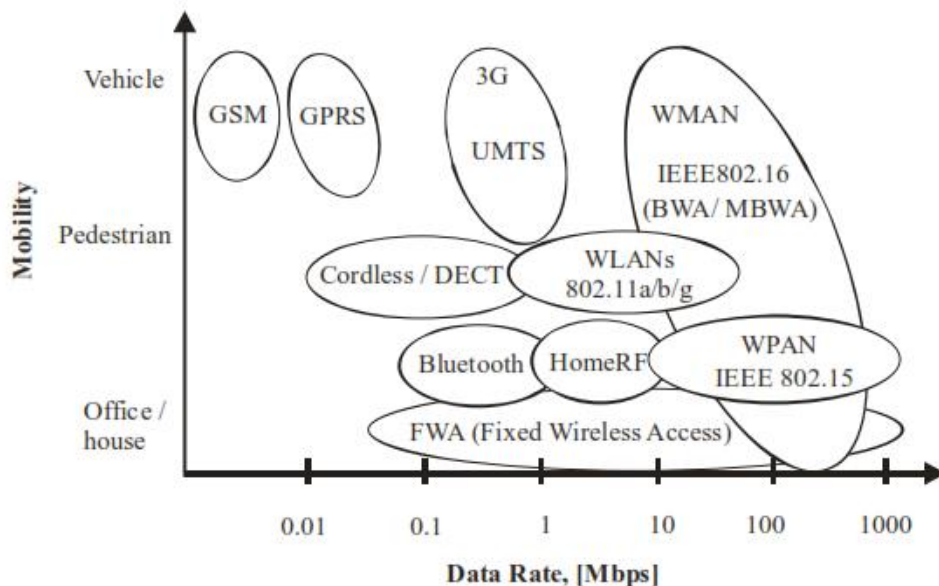
σταθερά δίκτυα επικοινωνιών, ενώ ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα της ηλεκτρονικής και ο ανταγωνισμός των παρόχων κινητής τηλεφωνίας. Σαν φυσικό επόμενο των παραπάνω σε συνδυασμό με τις ανάγκες των χρηστών για συνεχή και αδιάλειπτη χρήση του Internet, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση το 2015 θα ξεπεράσει τα 6 Exabytes =  $10^6$  Terabytes, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.

## 1.2 Ευρυζωνικά Ασύρματα Δίκτυα

Η εκρηκτική ανάπτυξη του Internet και η επιτυχία των συστημάτων 3G και WLAN άλλαξαν τελείως την οπτική των χρηστών ως προς τις δυνατότητες επικοινωνίας. Πλέον οι χρήστες θεωρούν δεδομένη την συνεχή σύνδεση στον Internet με οποιοδήποτε τρόπο ή όπως αλλιώς περιγράφεται από μερικούς “communication anytime, anywhere, and with anything”.

Τέλος, καθώς η οπτική ίνα φτάνει όλο και πιο κοντά στον τελικό χρήστη (Fiber to the X, FTTX), η ταχύτητα των σταθερών δικτύων φτάνει ακόμα και τα 100 Mbps στον τελικό χρήστη. Επομένως οι χρήστες επιθυμούν να έχουν τις αντίστοιχες ταχύτητες και στα κινητά του τερματικά. Τα 2Mbps που παρέχει το 3G δίκτυο δεν είναι αρκετά και αρκετοί κινούνται προς τα 4G/LTE συστήματα, γεγονός που πιέζει τα συστήματα να αυξήσουν τόσο την χωρητικότητά τους όσο και της περιοχή κάλυψης.

Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω και καθώς πάντα υπάρχει το trade-off μεταξύ κινητικότητας και χωρητικότητας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2, δημιουργείται η ανάγκη για συνεργασία των ασύρματων και ενσύρματων συστημάτων επικοινωνιών.



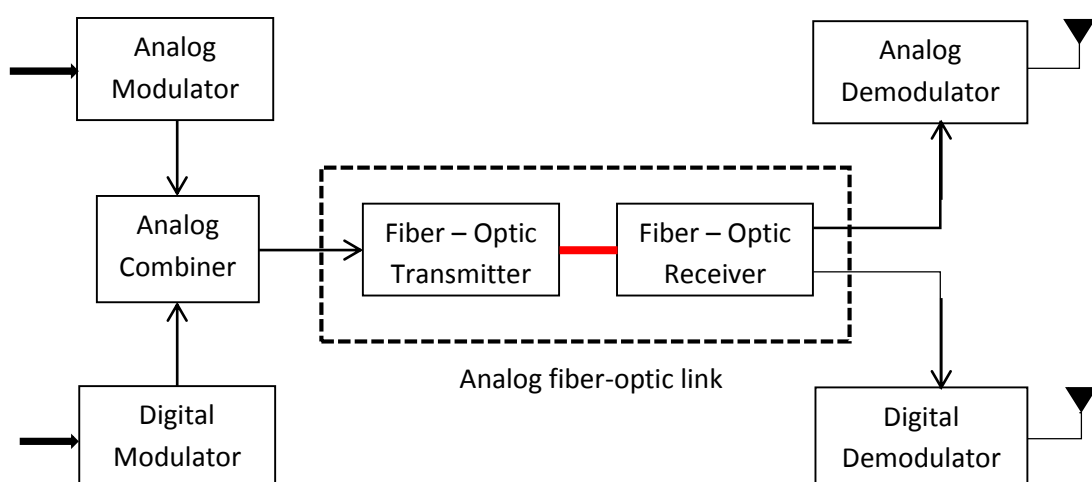
Σχήμα 1.2: Συνοπτική παρουσίαση σύγχρονων και μελλοντικών προτύπων ασύρματων επικοινωνιών

## 1.3 Η Τεχνολογία Radio-over-Fiber

Η όλο και εντονότερη χρήση κινητών συσκευών και η ανάγκη των χρηστών για μεγάλο όγκο δεδομένων και υπηρεσιών multimedia, όπως αναλύθηκε παραπάνω, απαιτεί τη σύγκλιση ασύρματης και ενσύρματης επικοινωνίας με στόχο παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών τους χρήστες. Λύση στον παραπάνω πρόβλημα μπορεί να δώσει η τεχνολογία RoF, η οποία έρχεται να καλύψει αυτή την ανάγκη παρέχοντας λύσεις για το last mile του δικτύου μέσω της αύξησης της χωρητικότητας και της αύξησης της κάλυψης του δικτύου.

### 1.3.1 Τι είναι το RoF?

Η RoF τεχνολογία περιλαμβάνει την χρήση ζεύξεων οπτικών ινών για την διανομή – μετάδοση του σήματος RF από ένα κεντρικό σταθμό (Central Office, CO) στους απομακρυσμένους σταθμούς πρόσβασης του δικτύου (Remote Access Units, RAUs). Στις σύγχρονες κινητές επικοινωνίες λειτουργίες επεξεργασίας του RF σήματος, όπως η μετατροπή συχνότητας, η διαμόρφωση και πολυπλεξία του σήματος διενεργούνται στον σταθμό βάσης και στην συνέχεια το σήμα τροφοδοτούσε την κεραία. Το σύστημα RoF προσφέρει την δυνατότητα να μεταφερθούν όλες αυτές οι λειτουργίες σε κεντρικό διαμοιραζόμενο σταθμό (CO) και στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί η οπτική ίνα, η οποία προσφέρει χαμηλές απώλειες (0.3 dB/km στα 1550nm και 0.5 dB/km στα 1310nm μήκος κύματος), για την μετάδοση του σήματος προς τις RAUs. Εκεί θα εκτελούνται οι απολύτως απαραίτητες λειτουργίες για την εκπομπή του σήματος όπως οπτοηλεκτρονική μετατροπή και ενίσχυση. Έτσι μπορούμε να έχουμε κεντρική επεξεργασία του σήματος, δυναμική κατανομή των πόρων του δικτύου, απομακρυσμένη διαχείριση του συστήματος και απλοποιημένο σταθμό βάσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, ειδικά σε περιοχές που είναι αναγκαία η χρήση πολλών κεραιών σε μικρή περιοχή.



Σχήμα 1.3: Βασική αρχή λειτουργίας RoF συστήματος

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός RoF συστήματος απεικονίζεται στον Σχήμα 1.3. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί επί παραδείγματι να χρησιμοποιηθεί για την μετάδοση GSM σημάτων. Το RF σήμα χρησιμοποιείται για την απευθείας διαμόρφωση της φωτοδιόδου και στην συνέχεια μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας προς το RAU. Στο RAU, το μεταδιδόμενο σήμα ανακτάται μέσω της φωτοδιόδου του δέκτη και εκπέμπεται από την κεραία. Το τελικώς παραγόμενο σήμα προφανώς και πρέπει να συμφωνεί με το αντίστοιχο πρωτόκολλο της εφαρμογής (WLAN, WiMAX, GSM, κλπ). Στην άνω ζεύξη το σήμα από το κινητό τερματικό μεταφέρεται από το RAU προς το CO με τον ίδιο τρόπο. Αυτή η μέθοδος αποτελεί και την πιο απλή υλοποίηση μιας RoF ζεύξης και το σήμα μεταδίδεται στην ίνα, στη συχνότητα που θα εκπεμφθεί προς τον χρήστη.

Ωστόσο δεν είναι απαραίτητο να γίνεται πάντα κατ'αυτόν τον τρόπο. Για παράδειγμα θα μπορούσε να υπάρχει ένας τοπικός ταλαντωτής (local oscillator, LO) που να πραγματοποιεί κάτω μετατροπή συχνότητας στην άνω ζεύξη σε μία ενδιάμεση συχνότητα IF (intermediate frequency) στο RAU. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί το κόστος της κάτω ζεύξης στο RAU καθώς θα χρησιμοποιούνται συσκευές που θα λειτουργούν σε χαμηλότερη συχνότητα. Για περαιτέρω μείωση του κόστους, θα μπορούσαμε αντί για ένα τοπικό ταλαντωτή σε κάθε RAU να έχουμε ένα LO στο CO και το σήμα του ταλαντωτή να μεταφέρεται μέσω της ζεύξης όπως τα δεδομένα. Αυτό οδηγεί σε ακόμα πιο απλή δομή της RAU. Με βάση αυτή την σχεδίαση η κάτω ζεύξη αποτελεί το πιο κρίσιμο κομμάτι του RoF δικτύου καθώς μεταδίδει υψηλής συχνότητας σήματα. Η μετάδοση σημάτων υψηλής συχνότητας αποτελεί μεγάλη πρόκληση καθώς απαιτεί εξοπλισμό που να λειτουργεί σε αυτές τις συχνότητες και πολύ μεγάλο εύρος ζώνης για τη ζεύξη. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα υψηλής συχνότητας είναι πιο ευάλωτα σε θόρυβο και προβλήματα της ζεύξης.

Επεκτείνοντας αυτή την τεχνολογία και σε άλλες εφαρμογές γίνεται κατανοητό ότι κεντρική μονάδα (CO) θα αποτελεί την διεπαφή μεταξύ ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών και του δικτύου κορμού σταθερών επικοινωνιών.

### **1.3.2 Πλεονεκτήματα της RoF Τεχνολογίας**

Μερικά πλεονεκτήματα της RoF έναντι του κλασσικού τρόπου μετάδοσης πληροφορίας παρουσιάζονται παρακάτω:

#### **1.3.2.1 Μικρή Εξασθένιση**

Η μετάδοση ηλεκτρικών μικροκυματικών σημάτων ή σημάτων υψηλής συχνότητας τόσο στον ελεύθερο όσο και μέσω γραμμών είναι προβληματική και κοστοβόρα. Στον ελεύθερο χώρο οι απώλειες από την απορρόφηση και την ανάκλαση αυξάνονται με την συχνότητα. Στις γραμμές μεταφοράς αντίστοιχα, η μεταφορά ηλεκτρικών σημάτων για μεγάλες αποστάσεις απαιτεί ακριβό εξοπλισμό για την αναγέννηση του σήματος. Όσον αφορά τα μικροκύματα, η μετάδοσή τους μέσω γραμμής μεταφοράς δεν είναι καν δυνατή ακόμα και για μικρές αποστάσεις. Εναλλακτική αποτελεί η μετάδοση του σήματος στην βασική ζώνη είτε σε μια χαμηλότερη ενδιάμεση IF συχνότητα. Ωστόσο, η εναλλακτική αυτή όπως θα αναλυθεί και παρακάτω αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του δικτύου.



Εμπορικά διαθέσιμες Single Mode Fibers (SMFs) κατασκευασμένες από silica έχουν απώλειες λόγω εξασθένηση μικρότερες από 0.2 dB/km και 0.5 dB/km στα 1550nm και στα 1300nm αντίστοιχα. Αυτές οι απώλειες είναι κατά πολύ μικρότερες από αυτές που παρουσιάζονται στα ομοαξονικά καλώδια και οι οποίες είναι ακόμα 3 τάξεις μεγαλύτερες σε υψηλές συχνότητες. Για παράδειγμα, η εξασθένηση ενός ομοαξονικού καλωδίου ½ ίντσας (RG-214) είναι μεγαλύτερων 500dB/km για συχνότητες μεγαλύτερες των 5 GHz. Επομένως η μετάδοση μικροκυμάτων σε οπτική μορφή προσφέρει μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης και απαιτεί μικρότερη ενέργεια εκπομπής.

### **1.3.2.2 Μεγάλο Εύρος Ζώνης**

Οι οπτικές ίνες προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης. Υπάρχουν κυρίως τρεις περιοχές συχνοτήτων που προσφέρουν μικρές απώλειες με την κεντρική συχνότητα να έχει μήκος κύματος 850nm, 1310nm και 1550nm. Για μια SMF οπτική ίνα, το συνολικό εύρος των τριών περιοχών ξεπερνάει τα 50 THz. Ωστόσο τα σύγχρονα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα αξιοποιούν μόνο ένα μέρος αυτής της χωρητικότητας. Οι κυρίαρχες σκέψεις για μεγαλύτερη αξιοποίηση του φάσματος περιλαμβάνουν χρήση ινών με μικρή διασπορά και την χρήση εξελιγμένων σχημάτων διαμόρφωσης όπως η OTDM (optical time division multiplexing, οπτική πολυπλεξία διαμοιρασμού χρόνου) και η DWDM (dense wavelength division multiplexing, πυκνή πολυπλεξία διαμοιρασμού μήκους κύματος).

Το μεγάλο εύρος ζώνης που προσφέρουν οι οπτικές ίνες έχει και άλλα παράλληλα οφέλη εκτός από την υψηλή χωρητικότητα για μετάδοση μικροκυμάτων. Το μεγάλο οπτικό φάσμα προσφέρει την δυνατότητα για πολύ γρήγορη επεξεργασία του σήματος που θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να γίνει σε αντίστοιχη ταχύτητα από ηλεκτρονικά συστήματα. Κάποιες απαραίτητες λειτουργίες όπως το φιλτράρισμα, η μίξη των σημάτων, η μετατροπή συχνότητας θα μπορούν, δηλαδή, να γίνονται κατευθείαν σε οπτική συχνότητα. Επιπλέον η επεξεργασία σε οπτική συχνότητα κάνει εφικτή την χρήση φθηνότερου, μικρού εύρους ζώνης οπτικού εξοπλισμού όπως οι φωτοδίοδοι, οι διαμορφωτές χωρίς να χάνουμε την δυνατότητα χειρισμού ευρυζωνικών σημάτων.

Η χρησιμότητα όμως αυτού του μεγάλου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας ελαττώνεται σημαντικά από τους περιορισμούς που θέτει το εύρος ζώνης λειτουργίας των ηλεκτρονικών συστημάτων που είναι οι κύριες πηγές εκπομπής και λήψης της πληροφορίας. Αυτό το πρόβλημα συνήθως αναφέρεται ως “electronic bottleneck”. Η λύση στο πρόβλημα κρύβεται στην αποδοτική χρήση τεχνικών πολυπλεξίας. Η OTDM και η DWDM που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται σε ψηφιακά συστήματα. Σε αναλογικά οπτικά συστήματα συμπεριλαμβανομένου και του RoF χρησιμοποιείται η SCM (subcarrier multiplexing) για την αύξηση της χωρητικότητας του διαύλου. Όπως αναλύεται και παρακάτω, η SCM πολυπλέκει-διαμορφώνει πολλά υποφέρονται σήματα μικρού εύρους ζώνης σε ένα, το οποίο στην συνέχεια μεταδίδεται μέσω μιας ίνας μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Αυτό κάνει και το RoF αποδοτικό ως προς το κόστος.

### **1.3.2.3 Ανοχή στην Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή**

Μια πολύ ελκυστική ιδιότητα των οπτικών ινών είναι η ανοχή τους στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, ειδικά κατά την μετάδοση μικροκυμάτων. Αυτό οφείλεται στον γεγονός ότι τα σήματα μεταδίδονται υπό την μορφή φωτός μέσα στην ίνα. Λόγω αυτής την ιδιότητας

λοιπόν, οι οπτικές ίνες προτιμούνται ακόμα και για μικρές αποστάσεις όταν πρόκειται για την μετάδοση μικροκυμάτων. Σχετική με την ανοχή στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή είναι και η αντοχή των οπτικών δικτύων στις υποκλοπές, αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό καθώς παρέχει ασφάλεια στους χρήστες.

#### **1.3.2.4 Εύκολη Εγκατάσταση και Συντήρηση**

Στα RoF συστήματα ο σύνθετος και ακριβός εξοπλισμός βρίσκεται στο CO και επομένως το RAU γίνεται απλούστερο. Για παράδειγμα, οι περισσότερες τεχνικές RoF εκμηδενίζουν τις ανάγκες των RAU για τοπικούς ταλαντωτές και αντίστοιχο εξοπλισμό. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια φωτοδίοδος για την ανίχνευση του σήματος, ένας ενισχυτής και μία κεραία αποτελούν το RAU. Ο εξοπλισμός διαμόρφωσης, επεξεργασίας και δρομολόγησης βρίσκεται στο CO και τον μοιράζεται όλα τα RAU. Η εύκολη εγκατάσταση και το μικρό κόστος συντήρησης είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για συστήματα RoF που δουλεύουν σε μικροκυματικές συχνότητες, λόγω του μεγάλου αριθμού RAU που απαιτούνται. Σε εφαρμογές που τα RAUs δεν είναι εύκολα προσβάσιμα, η μείωση των αναγκών συντήρησης, θα οδηγήσει σε μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου.

#### **1.3.2.5 Μειωμένη Κατανάλωση Ενέργειας.**

Η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας είναι φυσικό επόμενο του να απλοποιημένου σταθμού βάσης, καθώς έχει λιγότερο εξοπλισμό. Σε κάποιες εφαρμογές ακόμα, τα RAU δουλεύουν με παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία. Για παράδειγμα, μερικά συστήματα που λειτουργούν στα 5GHz και αποτελούνται από πικοκυψέλλες μπορούν να λειτουργούν με παθητικά στοιχεία. Ακόμα η καταναλισκόμενη ενέργεια μειώνεται καθώς μειώνεται η ακτίνα της κυψέλης και αντιστοίχως η ισχύς εκπομπής.

#### **1.3.2.6 Υποστήριξη πολλαπλών Λειτουργιών.**

Ένα RoF σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα διαφανές σύστημα καθώς η απόδοση του δεν επηρεάζεται από το είδος του σήματος στην είσοδο και την έξοδο. Απλά το μεταδίδει. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα για εξυπηρέτηση πολλαπλών υπηρεσιών και πολλαπλών παρόχων, που οδηγεί σε εξαιρετικές μειώσεις του κόστους.

#### **1.3.2.7 Δυναμική Εκχώρηση Φάσματος**

Αφού όλη η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος γίνεται στο κεντρικό σταθμό και η οπτική ίνα μεταφέρει το σήμα σε τέτοια μορφή που να απαιτείται όσο το δυνατόν λιγότερη επεξεργασία, γίνεται δυνατή η δυναμική εκχώρηση φάσματος μέσα στο δίκτυο. Αυτή η δυνατότητα προέρχεται από το γεγονός ότι ο κεντρικός σταθμός έχει γνώση για κάθε κανάλι του φάσματος. Κάθε κεραία επικοινωνεί με τους χρήστες μέσα από ένα σύνολο καναλιών αλλά λαμβάνει και σήματα από άλλους χρήστες που μπορεί να ανήκουν στον ίδιο ή σε διαφορετικό κεντρικό σταθμό. Παράλληλα υπάρχουν και τεχνικές για ανίχνευση της ισχύος και της κωδικοποίησης της λήξης από άλλους σταθμούς. Έτσι υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για κάθε κανάλι και ο κεντρικό σταθμός είναι σε θέση να διαχειριστεί και να κατανέμει προσαρμοστικά το διαθέσιμο φάσμα. Επί παραδείγματι σε ένα σύστημα RoF που υποστηρίζει GSM, μπορεί να εκχωρηθεί χωρητικότητα σε περιοχή γύρω από ένα εμπορικό κέντρο κατά τις ώρες αιχμής και μετά να ανατεθεί ξανά σε κατοικημένες περιοχές το απόγευμα που ο πληθυσμός επιστρέφει στις κατοικίες του. Ωστόσο έχουμε πολλά βήματα να κάνουμε προς αυτή την κατεύθυνση καθώς η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος

περιλαμβάνει αλληλεπίδραση μεταξύ των layers ενώ υπάρχουν και εξαρτήσεις μεταξύ οπτικού και ασύρματου τμήματος.

### 1.3.3 Περιορισμοί της RoF τεχνολογίας

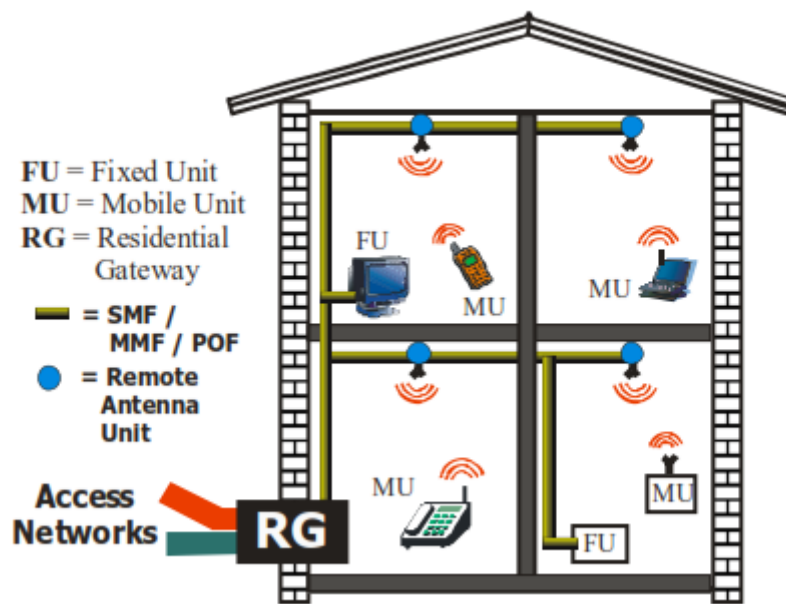
Η RoF τεχνολογία περιλαμβάνει συνήθως αναλογική διαμόρφωση και ανίχνευση φωτός μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν αναλογικός τρόπος μετάδοσης. Επομένως επιπτώσεις στην ποιότητα του σήματος όπως ο θόρυβος και η παραμόρφωση, που είναι σημαντικές στην αναλογικές επικοινωνίες, είναι αντιστοίχως σημαντικές και στα RoF συστήματα. Αυτά τα φαινόμενα τείνουν στο περιορισμό του NF (noise figure) και το δυναμικό εύρος (dynamic range, DR) των RoF ζεύξεων. Το DR είναι σημαντική παράμετρος των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, όπως το GSM, γιατί η ισχύς που λαμβάνεται στον σταθμό βάσης από το κινητό τερματικό διαφέρει ακόμα και κατά 80dB. Αυτό σημαίνει ότι το η ισχύς που λαμβάνει ο σταθμός βάσης από ένα κινητό τερματικό που είναι κοντά του είναι μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από την ισχύ που λαμβάνει από ένα κινητό τερματικό που βρίσκεται μακρύτερα αλλά μέσα στην, ίδια κυψέλη.

Στα αναλογικά οπτικά συστήματα υπάρχουν επίσης και πολλές πηγές θορύβου όπως ο RIN (Relative Intensity Noise) του Laser, ο θόρυβος φάσης του laser, ο θόρυβος που εισάγει η φωτοδίοδος κατά την εκπομπή, ο θερμικός θόρυβος του ενισχυτή και η διασπορά η οποία θα αναλυθεί παρακάτω. Πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως παρόλο που το σύστημα μετάδοσης RoF είναι αναλογικό, το RF σήμα που μεταφέρεται δεν είναι απαραίτητο να είναι αναλογικό καθώς μπορεί να είναι και ψηφιακό όπως στις περιπτώσεις των WLANs και του UMTS, που χρησιμοποιούν εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης όπως η xQAM ή η OFDM.

### 1.3.4 Αρχιτεκτονική του δικτύου

Η RoF τεχνολογία είναι γενικά ακατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό SFDR (Spurious Free Dynamic Range), λόγω του περιορισμένου DR. SFDR είναι η μέγιστη ισχύς του σήματος εξόδου για την οποία η ισχύς του 3<sup>ης</sup> τάξης γινομένου ενδοδιαμόρφωσης γίνεται ίσο με το συνολικό θόρυβο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συστήματα ευρείας κάλυψης όπως το GSM που απαιτούν SFDR>70dB. Ωστόσο για τις περισσότερες εφαρμογές εσωτερικού χώρου δεν απαιτείται υψηλό SFDR και μπορεί άμεσα να υλοποιηθεί για εφαρμογές όπως το WLAN.

Το βασικό σύστημα RoF όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελείται από ένα κεντρικό σταθμό (CU) και ένα απομακρυσμένο προορισμό που συνδέονται μεταξύ τους μέσω οπτικής ίνας. Οι πιο πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας RoF αναφέρονται στην επέκταση της κάλυψης και της χωρητικότητας κινητών συστημάτων εσωτερικών χώρων με χρήση DAS (distributed antenna system). Για εφαρμογές που λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα όπως το WPAN και το IEEE 802.11ad που δουλεύει στα 60GHz, η ακτίνα της κυψέλης είναι μικρή εξαιτίας των μεγάλων απωλειών διάδοσης μέσα από τοίχους και εκεί φαίνονται τα πλεονεκτήματα του DAS (Distributed Antenna System).



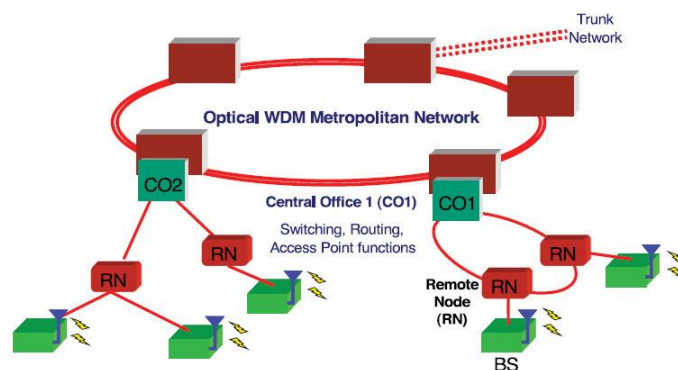
Σχήμα 1.4: Χρήση καλωδίωσης κτηρίου για χρήση από ασύρματες και ενσύρματες εφαρμογές

Το DAS παρέχει αποδοτικούς τρόπους διαχείρισης του φάσματος ενώ παράλληλα είναι αρκετά οικονομικό στην υλοποίηση μικροκυψελών και πικοκεψελών σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους όπως πολυώροφα κτήρια, αεροδρόμια, εμπορικά κέντρα. Στο DAS πολλές κεραίες διαμοιράζονται στον χώρο και συνδέονται μέσω οπτικής ίνας με τον κεντρικό σταθμό. Στον κεντρικό σταθμό, τα RF σήματα μετατρέπονται σε οπτικά και εκπέμπονται μέσω της οπτικής σε συγκεκριμένους σταθμούς. Η χρήση τεχνικών πολυπλεξίας ίσως είναι απαραίτητη όπως θα δούμε και παρακάτω. Παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα για ταυτόχρονη χρήση της εγκατάστασης των οπτικών ινών και από τον σταθερό εξοπλισμό του χώρου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4. Για περαιτέρω μείωση του κόστους της εγκατάστασης μπορούν χρησιμοποιηθούν πολυρυθμικές (MMF) αντί για μονορυθμικές ίνες.

Το RoF είναι σύστημα όμως που μπορεί να εφαρμοσθεί για οποιαδήποτε εφαρμογή δεν έχει υψηλές απαιτήσεις σε SFDR. Για παράδειγμα, στα συστήματα UMTS, τα κινητά τερματικά πρέπει να ρυθμίζουν την ισχύ εκπομπής τους ώστε η ισχύς που φθάνει στον σταθμό βάσης να είναι ίδια από όλα τα τερματικά. Επομένως το UMTS δεν χρειάζεται τόσο υψηλό SFDR όσο το GSM και το RoF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διανομή του σήματος προς τους σταθμούς βάσης. Μια άλλη περιοχή εφαρμογών μπορούν να αποτελέσουν τα Fixed Wireless Access (FWA) συστήματα όπως το WiMAX. Εκεί το RoF μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει λύσεις στο last mile και να μεταφέρει οπτικά το σήμα για μεγάλες αποστάσεις ώστε να φέρει τις κεραίες πιο κοντά στον τελικό χρήστη, αυξάνοντας παράλληλα και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Για μητροπολιτικές περιοχές η διασύνδεση μεταξύ των κεντρικών σταθμών μπορεί να επιτευχθεί με την εγκατάσταση ενός οπτικού WDM MAN δακτυλίου/αστέρα. Αυτό επιβάλλει

την χρήση switch στο κεντρικό σταθμό για τις add/drop λειτουργίες που απαιτούνται. Ένα απλοποιημένο σχεδιαγράμμα τέτοιου δικτύου φαίνεται στον Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική RoF δικτύου με χρήση WDM/MAN

### 1.3.5 Συνεχής Παροχή Υπηρεσίας σε Κινούμενους Χρήστες

Καθώς οι περισσότερες έως τώρα εφαρμογές για την RoF τεχνολογία έχουν σχεδιασθεί ή μελετηθεί για τα 60GHz, δημιουργείται η ανάγκη χρήσης micro- ή pico- κυψελών με ακτίνα μερικών δεκάδων μέτρων και μικρές περιοχές επικάλυψης, λόγω των φαινομένων εξασθένησης σε αυτή την συχνότητα, που εντείνεται σε εσωτερικούς χώρους εξαιτίας των τοίχων και του corner effect. Ακόμα, όπως κάθε σύστημα κινητών επικοινωνιών πρέπει να εγγυάται μια αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών στους κινούμενους χρήστες του. Οι έως τώρα σχεδιασμοί για αδιάλειπτη επικοινωνία σε πικοκυψέλες χαρακτηρίζονται από αρχιτεκτονικές τριών επιπέδων ή εικονικά δίκτυα κυψελών. Μία νέα προσέγγιση είναι το Moving Extended Network.

Καθώς όλη η πληροφορία είναι διαθέσιμη στον κεντρικό σταθμό, μπορεί να διανεμηθεί ανεξάρτητα σε περισσότερες από μία κυψέλες,. Έτσι δημιουργούμε ένα σύνολο από κυψέλες που εκπέμπουν τα ίδια δεδομένα, περιβάλλουν τον χρήστη και ακολουθούν την κίνηση του. Η διαχείριση της πληροφορίας και της προσαρμογής του συνόλου των κυψελών γύρω από τον χρήστη γίνεται αποκλειστικά από τον κεντρικό σταθμό. Οι προσομοιώσεις σε μονοδιάστατο σύστημα δίκτυο (πχ αυτοκινητόδρομος) και με χρήση μιας υβριδικής FDM/WDM έδειξαν μηδενικές απώλειες πακέτων για χρήστες κινούμενους με ταχύτητα έως 40m/sec και ταχύτητα δικτύου στα 100Mb/s, ενώ στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδοσης του συστήματος στις δύο διαστάσεις.

### Τεχνικές Προκλήσεις του Μέλλοντος

Αν και η RoF είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, υπάρχουν ακόμα πεδία έρευνας που θα την αναπτύξουν και θα την εξελίσουν στο μέλλον.

#### 1.3.6.1 Στοιχεία κυκλώματος

Η ανάπτυξη νέων οπτικοηλεκτρονικών στοιχείων είναι απαραίτητη για υποστηριχθούν RoF δίκτυα με μικρό κόστος και καλές επιδόσεις. Η έρευνα εντοπίζεται στον σχεδιασμό εξαρτημάτων με μικρό κόστος που θα εγκατασταθούν στις κεραίες των RAU. Καθώς με την εφαρμογή και εγκατάσταση ενός RoF δικτύου αυξάνεται ο αριθμός των απαιτούμενων

κεραίων, το κόστος είναι παράγοντας ζωτικής σημασίας. Ερευνητικά εξετάζονται πολλές εναλλακτικές όπως τα VCSELS (vertical cavity surface emitting lasers) που λειτουργούν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και υποστηρίζουν αναλογική διαμόρφωση [7] ή συσκευές όπως ο ασύμμετρος διαμορφωτής/ανιχνευτής Fabry-Perot [8] που μπορεί να λειτουργήσει και σαν ανιχνευτής του οπτικού σήματος και σαν διαμορφωτής για να εκπέμψει το RF σήμα σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι συγκεκριμένες διατάξεις έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες και έχουν την δυνατότητα στο μέλλον να μειώσουν σημαντικά το κόστος του συστήματος.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η γραμμικότητα των κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις. Συνήθως οι απαιτήσεις γραμμικότητας σε συστήματα αναλογικής μετάδοσης είναι αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες για συστήματα ψηφιακής μετάδοσης. Συνεπώς τίθενται ακόμα περισσότεροι περιορισμοί στις συσκευές και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που θα χρησιμοποιηθούν. Μια τρίτη περιοχή έρευνας είναι η μετάβαση σε ευρυζωνικές κυψέλες/ RAUs που θα καλύπτουν πολλαπλές φασματικές περιοχές και συνεπώς θα είναι δυνατή η εκπομπή σε διάφορες συχνότητες με τον μικρότερο δυνατό αριθμό συσκευών. Παρόλο που για οπτικές συσκευές του συστήματος είναι εφικτή η κατασκευή συσκευών που να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, για τα αντίστοιχα αναλογικά κυκλώματα και ακόμα περισσότερο για τις κεραίες υπάρχουν ακόμα πολλά βήματα προόδου να γίνουν.

#### **1.3.6.2 Διασύνδεση**

Η έως τώρα έρευνα επικεντρώνεται στην βελτίωση των τεχνικών για Point to Point ζεύξεις. Ωστόσο τεχνολογίες όπως το RoF, για να μπορέσουν να υιοθετηθούν απαιτείται η ανάπτυξη δομών δικτύου που θα αναδεικνύουν όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται από την συγκέντρωση όλων των διαδικασιών σε ένα κεντρικό σημείο. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η δυναμική εκχώρηση φάσματος όπως έχει ήδη αναφερθεί καθώς η χωρητικότητα του δικτύου μπορεί να μεταφερθεί εκεί όπου υπάρχει και μεγάλη πυκνότητα χρηστών.

Για την πραγματοποίηση τέτοιων σχημάτων διασύνδεσης είναι απαραίτητο οι σχεδιαστές να αρχίσουν να σκέφτονται για λύσεις που δεν θα περιορίζονται σε ένα επίπεδο του συστήματος OSI αλλά θα περιλαμβάνουν την συνεργασία και αλληλεπίδραση περισσότερων του ενός επιπέδων.

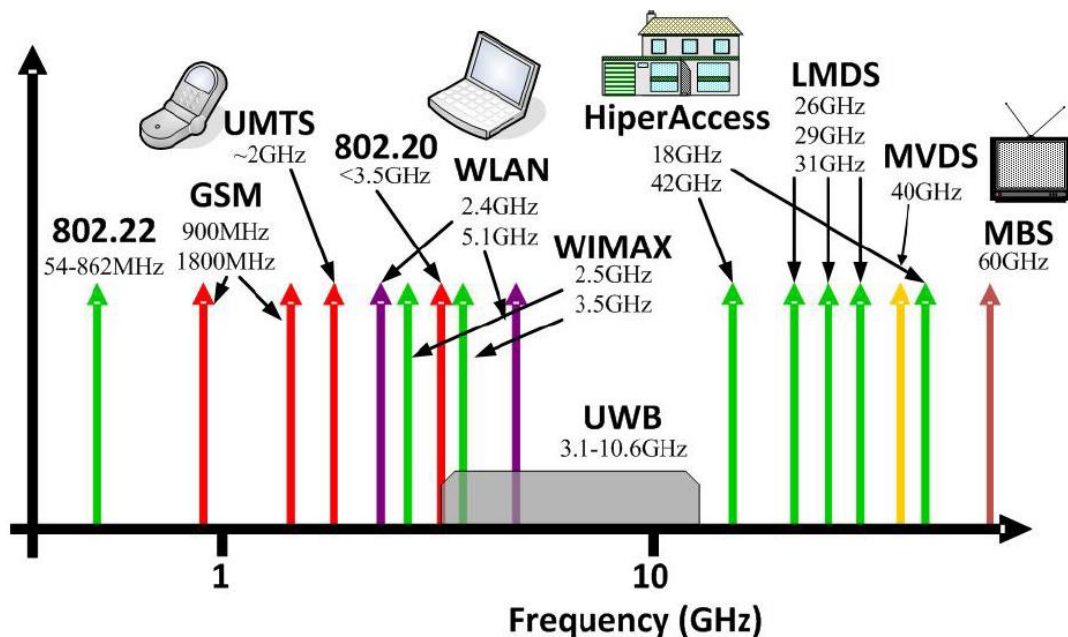
#### **1.3.6.3 Αρχιτεκτονικές με μικρό κόστος**

Στην παροχή λειτουργιών δυναμικής διαμόρφωση του δικτύου και πολλαπλών υπηρεσιών πάνω σε μία και μόνο οπτική ίνα σημαντικό παράγοντα διαδραματίζει η WDM. Συνεπώς είναι αναγκαία η μείωση του κόστους των λειτουργιών και των συσκευών που υλοποιούν την WDM. Προς αυτή την κατεύθυνση απαιτείται η ανάπτυξη γεννητριών και διαμορφωτών, που θα λειτουργούν σε μικροκυμματικές και mm-wave συχνότητες και θα υλοποιούν την WDM με μικρό αριθμό εξαρτημάτων.

#### **1.3.6.4 Η σχεδίαση νέων πρωτοκόλλων και προτύπων**

Η ανάπτυξη νέων προτύπων είναι μια ακόμα πρόκληση για την σχεδίαση των RoF συστημάτων. Το Σχήμα 1.6 είναι μια επισκόπηση μερικών ασύρματων εφαρμογών και των

συχνοτήτων λειτουργίας τους. Μία από τις απαιτήσεις στον σχεδιασμό των Radio over Fiber συστημάτων είναι η ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής που θα μπορεί αδιαφανώς να μεταφέρει αυτές τις υπηρεσίες σε μεγάλη απόσταση. Για παράδειγμα να υπάρχει WiFi σε κάθε σπίτι με την τεχνολογία Fibert to the Home (FTTH) αλλά ο router να είναι απομακρυσμένος και κοινός για όλα τα σπίτια της περιοχής. Καθώς λοιπόν το WiFi δεν περιλαμβάνει την ανάμειξη οπτικής ίνας στο μονοπάτι διάδοσης, όπως και όλα τα ασύρματα πρότυπα, υπάρχει ένα μικρό κενό στην διαχείριση φαινομένων όπως η επιπλέον παραμόρφωση και ο θόρυβος.



Σχήμα 1.6: Ασύρματες εφαρμογές και οι συχνότητες λειτουργίας

Μια ακόμα παράμετρος είναι η καθυστέρηση που εισάγει η οπτική ίνα. Συνήθως υπάρχουν κάποια χρονικά περιθώρια για τα οποία ο πομπός ή ο δέκτης περιμένει πακέτα που έχουν χαθεί. Αυτά τα χρονικά όρια ορίζονται με βάση την μέγιστη δυνατή απόσταση που μπορεί να καλύψει η ασύρματη ζεύξη. Συνεπώς δεν υπολογίζουν την καθυστέρηση που μπορεί να εισάγει η οπτική ίνα και ισούται περίπου με 4μsec ανά χιλιόμετρο.

### 1.3.6.5 Διευθυνσιοδότηση

Πρέπει να αναπτυχθεί ένας τρόπος για το πώς θα ανατίθενται διευθύνσεις μέσα στον RoF δίκτυο καθώς αν και πηγαίνουμε σε all-IP δίκτυα, μπορεί να μην είναι αποδοτικό για τα δεδομένα του.

## Βιβλιογραφία

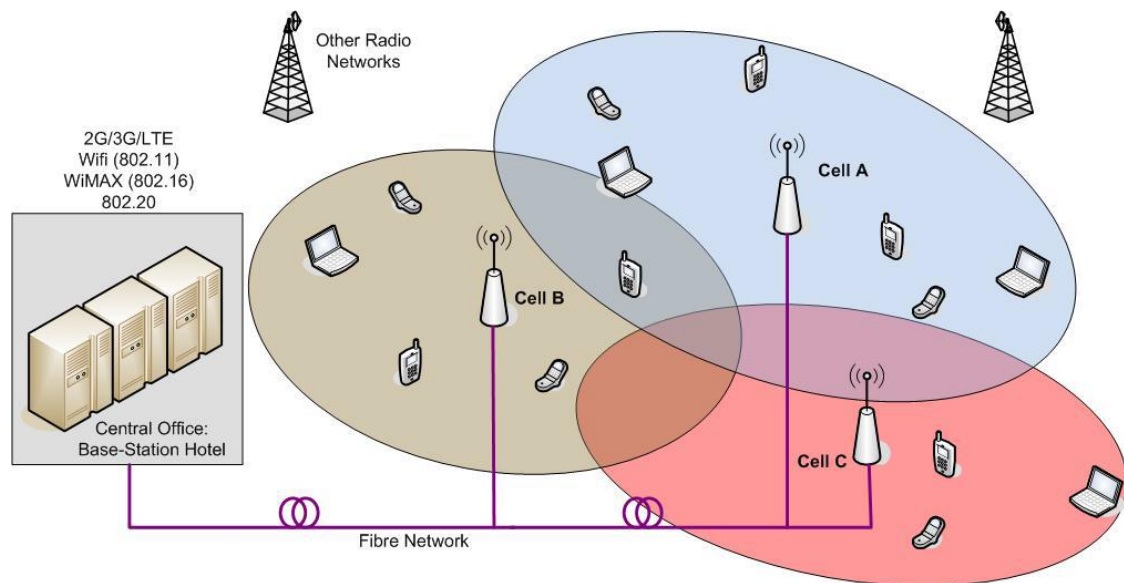
- [1] “Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems”, Anthony Ng’oma
- [2] “Radio over Fiber: Future Technology of Communication”, Ajay Kumar Vyas, Dr. Navneet Agrawal
- [3] “A 60 GHz Radio-Over-Fiber Network Architecture for Seamless Communication With High Mobility”, Nikos Pleros, Konstantinos Vyrsoinos, Kostas Tsagkaris, and Nikolaos D. Tselikas
- [4] “Radio over Fiber Technology for Wireless Access”, D.Opatic
- [5] “Emerging Radio-Over-Fiber Technologies and Networks: Challenges and Issues”, Mitchel
- [6] “Cognitive Radio Over Fibre: Potential advantages for spectrum management”. J.E. Mitchell
- [7] Westbergh, P.; Soderberg, E.; Gustavsson, J.S.; Larsson, A.; Zhang, Z.; Berggren, J.; Hammar, M.; “Noise, distortion and dynamic range of single mode 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAs vertical cavity surface emitting lasers for radio-overfibre links” IET Optoelectronics, Vol 2, pp. 88 – 95 (2008)
- [8] Chuang, C.-H.; Liu, C.-P.; Ismail, T.; Wang, X.; Hao, Y.; Parini, C.; Huggard, P. G.; Krysa, A. B.; Roberts, J. S.; Seeds, A. J. “IEEE 802.11a Data Over Fiber Transmission Using Electromagnetic Bandgap Photonic Antenna With Integrated Asymmetric Fabry–Pérot Modulator/Detector;” Journal of Lightwave Technology, Vol 26, pp.:2671 – 2678 (2008)



## Κεφάλαιο 2

# Αρχιτεκτονική Radio over Fiber Δικτύου

Περιεγράφηκε στο παραπάνω κεφάλαιο η βασική αρχιτεκτονική που ικανοποιεί τις ανάγκες της RoF τεχνολογίας. Στα επόμενα θα αναλυθούν εκτενέστερα αυτές οι βασικές αρχές.



Σχήμα 2.1 : Δίκτυο Radio Over Fiber

## 2.1 Τα βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου

### 2.1.1 Η κυψέλη

Η κυψέλη αποτελεί την βασική γεωγραφική μονάδα ενός οπουδήποτε κυψελωτού δικτύου, ονομάζοντας έτσι την περιοχή που καλύπτει μια κεραία. Σε ένα ιδεατό σύστημα έχουν κυκλικό ή εξαγωνικό μέγεθος. Στην πραγματικότητα, η κυψέλη διαφέρει σε μέγεθος και σχήμα ανάλογα την ισχύ εκπομπής και το τοπίο γύρω από την κεραία, εφεξής καλούμενη ως Σταθμός Βάσης ή Base Station ή BS. Ανάλογα την ακτίνα της κυψέλης υπάρχουν τρεις (3) τύποι: οι μακροκυψέλες, οι μικροκυψέλες και οι πικοκυψέλες (macrocells, microcells, picocells). Κύρια κριτήρια για την επιλογή τύπου κυψέλης αποτελούν:

1. Η έκταση της περιοχής ραδιοκάλυψης
2. Η πυκνότητα των χρηστών
3. Η κινητικότητα των χρηστών
4. Η συχνότητα λειτουργίας

### **2.1.1.1 Μακροκυψέλες**

Με ακτίνα μεγαλύτερη του ενός χιλιομέτρου, οι μακροκυψέλες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών με μέση ή χαμηλή πυκνότητα χρηστών (πχ αγροτικές περιοχές). Παράλληλα μπορούν να καλύψουν χρήστες με υψηλή κινητικότητα λόγω του μεγάλου μεγέθους τους. Στην τυπική περίπτωση, ο σταθμός βάσης εκπέμπει με μεγάλη ισχύ με κεραία τοποθετημένη σε ύψος αρκετών μέτρων με σκοπό την κάλυψη μεγάλης έκτασης. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών τους χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα δίκτυα ως κυψέλες-ομπρέλες (umbrella cells). Μια κυψέλη-ομπρέλα καλύπτει περιοχή που αποτελείται από αρκετές μικροκυψέλες με σκοπό:

- Να καλύψει κενά που ενδεχομένως υπάρχουν μεταξύ των μικροκυψελών
- Να απορροφήσει μέρος την τηλεπικοινωνιακή κίνησης
- Να εξυπηρετήσει χρήστες με υψηλή κινητικότητα και να μειωθεί ο αριθμός των διαπομπών μέσα στο δίκτυο

Ωστόσο το μέγεθος της την καθιστά απαγορευτική για λειτουργία σε RoF δίκτυα λόγω των υψηλών απωλειών μετάδοσης στις οπτικές συχνότητες.

### **2.1.1.2 Μικροκυψέλες**

Οι μικροκυψέλες στα σύγχρονα δίκτυα κινητών δεδομένων χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξυπηρέτηση περιοχών με υψηλή πυκνότητα χρηστών. Η ακτίνα τους κυμαίνεται μεταξύ 200m και 1km επομένως είναι κατάλληλες για την μετάδοση υψηλών ρυθμών δεδομένων. Σε τεχνολογίες RoF χρησιμοποιούνται αλλά σε πολύ χαμηλότερες συχνότητες από αυτές που εξετάζονται σε αυτή την εργασία και πάλι λόγω των υψηλών απωλειών μετάδοσης που εμφανίζουν.

### **2.1.1.3 Πικοκυψέλες**

Οι πικοκυψέλες ή όπως χαρακτηρίζονται και κυψέλες εσωτερικού χώρου, έχουν ακτίνα που δεν ξεπερνά τα 10-15 μέτρα και χρησιμοποιούνται κυρίως για κάλυψη περιορισμένων περιοχών όπως ένα γραφείο ή ένας διάδρομος. Το μέγεθος τους τις κάνει κατάλληλες για την μελέτη RoF δικτύων εσωτερικού χώρου, υψηλών συχνοτήτων και υψηλών ρυθμών μετάδοσης.

## **2.1.2 Ο Σταθμός Βάσης (Base Station)**

Αποτελεί μαζί με την φυσική σύνδεση (link) το μέσο επικοινωνίας του κινητού τερματικού με τον κεντρικό σταθμό (CO). Κύρια στοιχεία του στα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι οι διατάξεις εκπομπής και λήψης καθώς επίσης και διατάξεις επεξεργασίας σήματος, ελέγχου του διαύλου και διαμόρφωσης/ αποδιαμόρφωσης. Στα RoF δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι εξαιρετικά απλοποιημένος και χρησιμεύει μόνο για εκπομπή/λήψη του σήματος και μετατροπή της συχνότητας όπου αυτή είναι απαραίτητη ανάλογα την αρχιτεκτονική, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

## **2.1.3 Ο κεντρικός σταθμός (Central Office)**

Εκμεταλλεζόμενος όλα τα πλεονεκτήματα της οπτικής ίνας σε ταχύτητα και εύρος ζώνης, ο κεντρικός σταθμός (CO) εκτελεί πλέον όλες τις λειτουργίες που στα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς

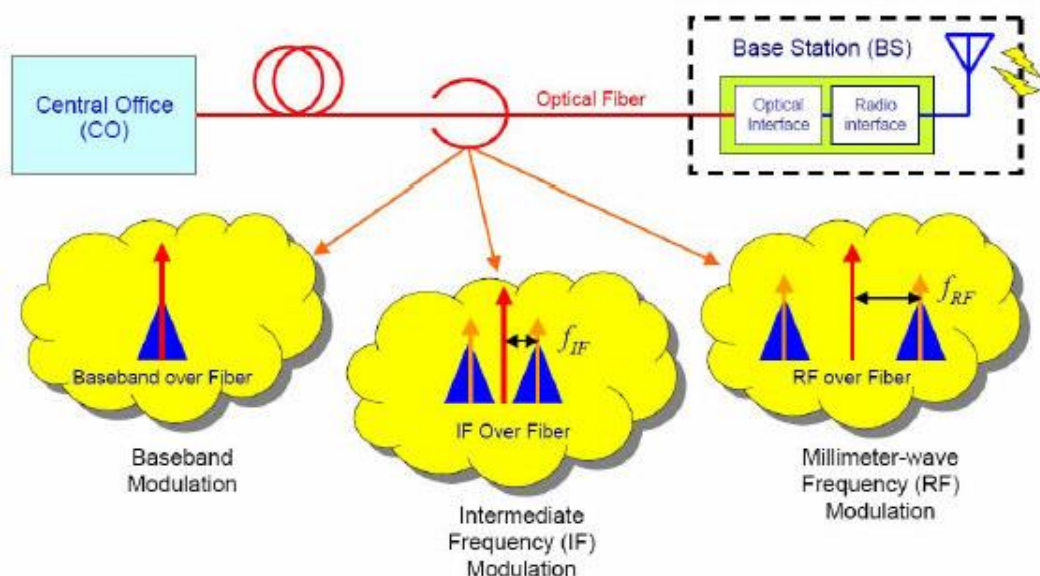
εκτελούσε ο σταθμός βάσης. Η πολυπλεξία, η αποπολυπλεξία, η καταχώρηση φάσματος και η επεξεργασία του σήματος γίνονται πλέον κεντρικά δίνοντας την δυνατότητα για πιο δυναμική χρήση του δικτύου. Ωστόσο πριν κατασκευαστούν τέτοια μικροκυβελωτά δίκτυα θα πρέπει να μειωθεί πολύ το κόστος των σταθμών βάσης, καθώς για την υλοποίησή τους θα χρειαστεί πολύ μεγάλο πλήθος κεραιών.

## 2.2 Η ζεύξη (link)

Η αποδοτικότητα του συστήματος επηρεάζεται κατά πολύ από την υλοποίηση της ζεύξης μεταξύ OC και BS. Αυτή η ενότητα εντοπίζει και αναλύει τα σχεδιαστικά ζητήματα που παρουσιάζονται από τις ανάγκες των κινητών επικοινωνιών του μέλλοντος.

### 2.2.1 Συχνότητες λειτουργίας

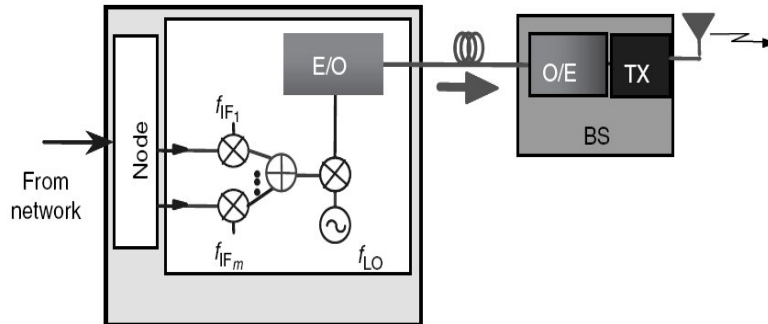
Οι ζεύξεις οπτικών ινών στα συστήματα RoF είναι συνήθως αναλογικές και βασίζονται σε κάποιο είδος πολυπλεξία για μετάδοση πολλών καναλιών μαζί. Επομένως απαιτούν υψηλή ισχύ εκπομπής σε σχέση με τα αντίστοιχα ψηφιακά συστήματα λόγω της απαίτησης για υψηλό CNR ( Carrier to Noise Ratio – ο λόγος ισχύος σήματος στο φέρον προς την ισχύ θορύβου). Η απόδοση επομένως του συστήματος περιορίζεται από τον θόρυβο και τις μη γραμμικότητες που εισάγουν οι συσκευές του δικτύου που παρεμβάλουν σε διπλανά κανάλια. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι ότι οι περισσότερες συσκευές που κυκλοφορούν δεν είναι βελτιστοποιημένες για λειτουργία σε υψηλές συχνότητες ή το κόστος του πολύ υψηλό, με αποτέλεσμα η συχνότητα λειτουργία να αποτελεί σημαντική παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό του δικτύου. Τρεις είναι οι βασικές προσεγγίσεις για μετάδοση του σήματος σε RoF δίκτυα, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 : Τεχνικές μετάδοσης στην οπτική ζεύξη

### 2.2.1.1 Μετάδοση στην συχνότητα εκπομπής (RF)

Αποτελεί την πιο ευθεία αποτύπωση ενός συστήματος RoF για την μετάδοση του σήματος. Η συχνότητα φέροντος του σήματος είναι αυτή ακριβώς που θα εκπεμφθεί από την κεραία προς το κινητό τερματικό, ομοίως και η πληροφορία που θα μεταφέρει. Έτσι δεν υπάρχει ανάγκη για άνω ή κάτω μετατροπή συχνότητας στον BS. Τα δομικά στοιχεία αυτής της δομής παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.



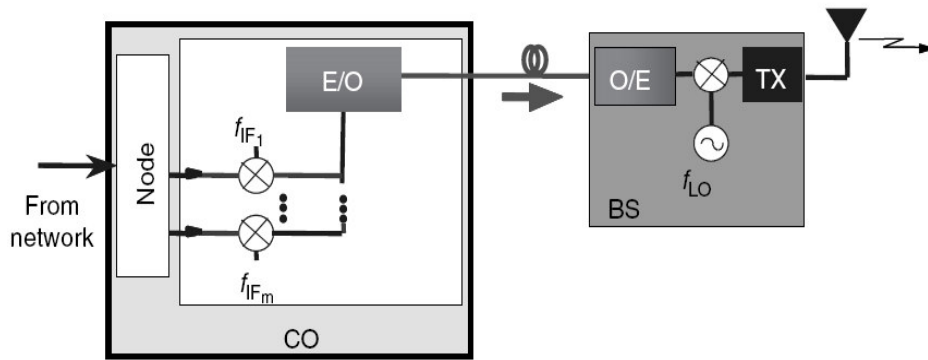
Σχήμα 2.3: Μετάδοση RF σήματος στην κάτω ζεύξη με μετάδοση στην συχνότητα εκπομπής

Συγκριτικό πλεονέκτημα αυτού του τρόπου μετάδοσης αποτελεί η δυνατότητα κεντρικού ελέγχου της κατανομής του φάσματος μέσω του δικτύου κορμού και η μείωση της πολυπλοκότητας του BS. Ωστόσο εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων μετάδοσης είναι ευάλωτο στην χρωματική διασπορά που περιορίζει την απόσταση μετάδοσης.

Στη κάτω ζεύξη (downlink), τα δεδομένα από το δίκτυο κορμού διαμορφώνονται σε ένα αριθμό από διαφορετικές, φασματικά κοντινές, ενδιάμεσες συχνότητες. Τα φέροντα κύματα που προκύπτουν, συνδυάζονται και δημιουργούν ένα υποφέρον πολυπλεγμένο σήμα (subcarrier multiplexed signal – SCM signal). Το SCM σήμα υπόκειται άνω μετατροπή συχνότητας με την βοήθεια ενός τοπικού ταλαντωτή που βρίσκεται στον CO και διαμορφώνεται στη φέρουσα συχνότητα RF που εν τέλει θα εκπεμφθεί. Στον σταθμό βάσης, το αναλογικό οπτικό σήμα ανιχνεύεται, ενισχύεται και οδηγείται στην κεραία για εκπομπή. Στην άνω ζεύξη θα χρειαστεί ένα ηλεκτροοπτικός (electrical-to-optical) μετατροπέας για την μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος που λαμβάνει η κεραία από το κινητό τερματικό και μια φωτοδίοδος στον CO για την ανίχνευση του σήματος.

### 2.2.1.2 Μετάδοση σε ενδιάμεση συχνότητα (Intermediate Frequency)

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ο βασικός εξοπλισμός ενός συστήματος RoF που η μετάδοση του σήματος γίνεται σε μία χαμηλότερη ενδιάμεση συχνότητα IF και ονομάζεται “IF over Fiber”. Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι χρησιμοποιεί εξοπλισμό που είναι εμπορικά διαθέσιμος και οποίος βασίζεται στην ώριμη και δοκιμασμένη μικροκυματική τεχνολογία, ενώ η μετάδοση μπορεί να γίνει και πάνω από μια απλή, χαμηλού κόστους πολυρυθμική οπτική ίνα (multimode fiber – MMF).

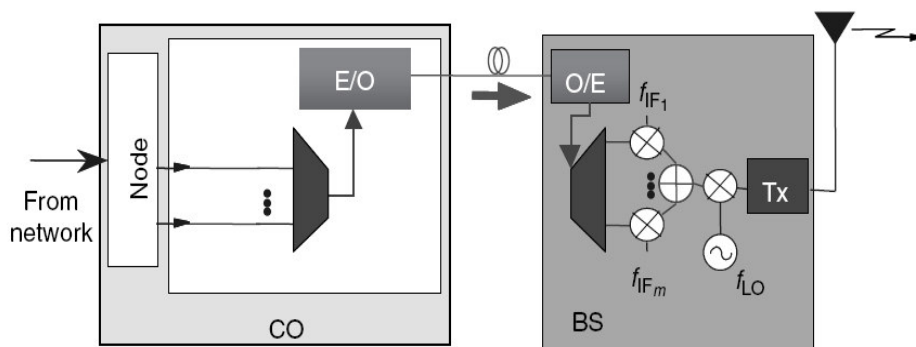


Σχήμα 2.4: Μετάδοση RF σήματος στην κάτω ζεύξη με μετάδοση σε ενδιάμεση συχνότητα

Από την άλλη μεριά, αυξάνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα του σταθμού βάσης καθώς επεξεργάζεται το σήμα σε πολύ υψηλές συχνότητες. Συνεπώς απαιτούνται τοπικοί ταλαντωτές και μείκτες για την μετατροπή της συχνότητας, γεγονός που περιορίζει την δυνατότητα για αναβάθμιση, εύκολο επανασχεδιασμό του δικτύου και για δυναμική εκχώρηση φάσματος.

### 2.2.1.3 Μετάδοση στην βασική ζώνη (baseband transmission)

Στην τρίτη τεχνική τα δεδομένα μεταφέρονται από τον CO προς τον BS με σήμα βασικής ζώνης. Τα δεδομένα του χρήστη και η απαραίτητη πληροφορία ελέγχου διαμορφώνονται με χρήση ψηφιακής TDM, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 2.5. Στην συνέχεια τα δεδομένα του κάθε χρήστη αποπολυπλέκονται στον σταθμό βάσης, διαμορφώνονται σε μια ενδιάμεση συχνότητα και υπόκεινται άλλη μία άνω μετατροπή συχνότητας από ένα τοπικό ταλαντωτή για να φτάσουν στην επιθυμητή συχνότητα εκπομπής. Στην άνω ζεύξη το σήμα που λαμβάνεται από το κινητό τερματικό υπόκειται κάτω μετατροπή συχνότητας στην βασική ζώνη και εκπέμπεται πίσω στον CO.



Σχήμα 2.5 : Μετάδοση RF σήματος στην κάτω ζεύξη με μετάδοση στην βασική ζώνη

Όπως και με την IF over Fiber τεχνική, τα RoF συστήματα που βασίζονται σε μετάδοση στην βασική ζώνη μπορούν άμεσα να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία επεξεργασίας και μετάδοσης RF σημάτων στον σταθμό βάσης και τον CO καθώς και χαμηλού κόστους οπτοηλεκτρικές διεπαφές. Η ανάγκη για μετατροπή συχνότητας στον

σταθμό βάσης περιπλέκει την αρχιτεκτονική του καθώς αυξάνεται η συχνότητα εκπομπής. Οι επιπλέον τοπικοί ταλαντωτές που χρησιμοποιούνται στον BS και ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την εκτεταμένη επεξεργασία του σήματος καθιστά την αναβάθμιση του συστήματος πιο δύσκολη, ενώ αυξάνει και το κόστος κατασκευής του δικτύου.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ένα trade off μεταξύ συχνότητας μετάδοσης στην οπτική ίνα και κόστους κατασκευής του δικτύου. Στην περίπτωση που έχουμε υψηλή συχνότητα μετάδοσης στην οπτική ίνα επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης όμως οι συσκευές του δικτύου έχουν υψηλό κόστος. Ακόμα οι απώλειες, οι παρεμβολές και η διασπορά στην ίνα δίνουν την δυνατότητα για συστήματα εσωτερικού χώρου και μόνο καθώς η απόσταση μετάδοσης είναι πολύ μικρή. Από την άλλη μεριά, μπορούμε να κάνουμε χρήση μια ενδιάμεσης IF συχνότητα και να εξαλείψουμε τα προβλήματα που εμφανίζονται, ωστόσο το κόστος κατασκευής του δικτύου αυξάνει καθώς οι σταθμοί βάσης γίνονται πιο περίπλοκοι.

### 2.2.2 Εύρος ζώνης καναλιού

Αναλογικό σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης είναι και το εύρος ζώνης κάθε καναλιού όπως προκύπτει και από τον νόμο του Shannon.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bps} \quad (2.1)$$

όπου C είναι ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης, B το εύρος ζώνης του καναλιού και S/N ο σηματοθορυβικός λόγος του σήματος στο φυσικό μέσο.

Επομένως γίνεται κατανοητό ότι για την κατάλληλη επιλογή του εύρους ζώνης πρέπει να ληφθεί υπόψη το ελάχιστο CNR απαιτείται για την κατάλληλη αποδιαμόρφωση του σήματος, καθώς μεγάλο εύρος ζώνης θα οδηγήσει σε αυξημένο θόρυβο σε κάθε κανάλι και συνεπώς σε αυξημένη ισχύ εκπομπής.

### 2.2.3 Αριθμός καναλιών

Οι RoF οπτικές συνδέσεις, όπως και κάθε άλλη ζεύξη, έχουν ένα συγκεκριμένο όριο για την συνολική ισχύ εισόδου, πέρα του οποίου η ποιότητα του σήματος υποβαθμίζεται σε μη αποδεκτά επίπεδα. Όλα τα κανάλια πρέπει να μοιραστούν αυτή την ισχύ, συνεπώς όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των καναλιών τόσο μικρότερη είναι η ισχύ που αντιστοιχεί ανά κανάλι. Έτσι επαναφέρεται το πρόβλημα του ελάχιστου CNR, καθώς μικρό CNR οδηγεί σε μικρή εμβέλεια. Στην κάτω ζεύξη αυτό το πρόβλημα αντισταθμίζεται με την αύξηση του κέρδους του ενισχυτή στον σταθμό βάσης, αλλά το μέγιστο κέρδος του ενισχυτή περιορίζεται από:

- τον μέγιστο εκπεμπόμενο θόρυβο που θέτουν οι απαιτήσεις του κάθε πρωτοκόλλου ασύρματης πρόσβασης
- τις απαιτήσεις για σταθερότητα στο κύκλωμα του σταθμού βάσης καθώς το πολύ υψηλό κέρδος μπορεί να οδηγήσει σε ταλάντωση.

## 2.2.4 Σχήμα διαμόρφωσης

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως το CNR μιας RoF ζεύξης πρέπει να είναι αρκετά υψηλό ούτως ώστε να επιτρέπει την επιτυχή αποδιαμόρφωση του σήματος. Όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα του σχήματος διαμόρφωσης τόσο αυξάνονται και οι απαιτήσεις σε CNR. Το ελάχιστο CNR εξαρτάται ακόμη και από τα χαρακτηριστικά του ραδιοδιαύλου. Η απαίτηση για υψηλό CNR οδηγεί σε μείωση της εμβέλειας εξαιτίας της έλλειψης ευαισθησίας του δέκτη. Αυτό αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των ασυρμάτων δικτύων και δεν συνδέεται απόλυτα με την απόδοση της οπτικής ζεύξης RoF όσο αυτή έχει επαρκές CNR στην έξοδο.

## 2.2.5 Χρήση MIMO

Για την περαιτέρω αύξηση του throughput έχει προταθεί η χρήση κεραιών MIMO (multiple input/multiple output), οπότε και αυξάνεται ο αριθμός των ραδιοδιαύλων που μεταφέρονται πάνω από το RoF link. Η χρήση κεραιών MIMO απαιτεί τη μετάδοση πολλών καναλιών από τον κεντρικό σταθμό προς τον BS στην συχνότητα φέροντος που θα μεταδοθούν προς τον κινητό τερματικό. Για την μετάδοση των πολλαπλών καναλιών πάνω από το RoF link έχουν προταθεί οι εξής εναλλακτικές:

- a) Χρήση διαφορετικών ζεύξεων σε ξεχωριστές οπτικές ίνες. Η τεχνική ονομάζεται πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (space division multiplexing – SDM)
- b) Χρήση ξεχωριστών RoF ζεύξεων σε μία οπτική ίνα, αλλά σε διαφορετική συχνότητα. Αυτό η εναλλακτική υλοποιείται με την WDM (wavelength division multiplexing) διαμόρφωση.
- c) Χρήση μιας και μοναδικής RoF ζεύξης, όπου το κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε μία ενδιάμεση συχνότητα IF (subcarrier multiplexing – SCM).

Η λύση που ενδείκνυται εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα και το κόστος της οπτικής ίνας και ο σχεδιασμός του οπτικού δικτύου που συνδέει τον CO με τους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης. Επί παραδείγματι, η οπτική ίνα σε μητροπολιτικές περιοχές είναι ακριβή στην εγκατάσταση της, οπότε και θα προτιμούνταν λύσεις οι οποίες που θα ελαχιστοποιούσαν την χρήση της. Αντίστοιχα για εγκαταστάσεις εσωτερικού χώρου, που το κόστος εγκατάστασης δεν είναι πολύ υψηλό, η χρήση διαφορετικών οπτικών ινών για κάθε σύνδεση ίσως να ήταν καταλληλότερη. Η WDM συνήθως προτιμείται για την μείωση των αναγκών σε οπτική ίνα, ωστόσο υπάρχει ένας περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων χρωμάτων που μπορούν να περάσουν από μια ίνα. Όπως γίνεται κατανοητό η χρήση SCM ελαχιστοποιεί τις ανάγκες για οπτική ίνα καθώς σε ένα μήκος κύματος μπορούν να εκπεμφθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα για ένα σταθμό βάσης και θα παραμείνουν διαθέσιμα μήκη κύματος για την μετάδοση των δεδομένων άλλων σταθμών βάσης. Γι αυτό τον λόγο έχει ερευνηθεί και η δυνατότητα για χρήση SCM over WDM. Ακόμη η μετατροπή συχνότητας που υφίσταται το σήμα, σημαίνει ότι το σήμα μεταδίδεται στην IF συχνότητα που μπορεί να είναι αρκετά χαμηλή ώστε να γίνει χρήση οπτοηλεκτρονικού εξοπλισμού μικρότερου κόστους, ο οποίος λειτουργεί και καλύτερα σε μικρότερες συχνότητες. Η δυνατότητα αυτή παρέχει ένα ακόμη συγκριτικό πλεονέκτημα για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

## 2.2.6 Παράμετροι αξιολόγησης της ποιότητας της σύνδεσης.

### 2.2.6.1 Εξασθένιση

Η εξασθένιση του οπτικού σήματος, αποτελεί παράγοντα που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός οπτικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Συνήθως οι μονορυθμικές ίνες αποτελούν κατάλληλη επιλογή για RoF δίκτυα μεγάλης κλίμακας, όταν η διασπορά για χαμηλές συχνότητες δεν είναι υψηλή για μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Η εξασθένιση εξαρτάται σημαντικά από την συχνότητα λειτουργίας. Οι σύγχρονη τεχνολογία προσφέρει εξασθένιση έως και 0.2dB/km στα 1.55μm. Οι οπτικές απώλειες της ζεύξης συμπεριλαμβανομένων των απωλειών από συνδέσμους και προσαρμογείς υπολογίζονται από τον τύπο :

$$L = 2(NL_c + ML_{sp} + al) \text{ dB}, \quad (2.2)$$

όπου  $NL_c$  είναι οι απώλειες των  $N$  προσαρμογέων (connectors) ,  $ML_{sp}$  οι απώλειες από του  $M$  συνδέσμους (splices),  $\alpha$  η εξασθένιση της ίνας σε dB/km και  $l$  το μήκος της ζεύξης. Επίσης μπορούν να αθροιστούν και οι απώλειες ενέργειας κάθε φορά που υπάρχει ανάγκη για διαχωρισμό του σήματος (splitting) οι οποίες είναι πολύ υψηλές και έχουμε για  $S$  διαχωριστές με απώλειες  $L_{split}$ :

$$L = 2(NL_c + ML_{sp} + SL_{split} + al) \text{ dB} \quad (2.3)$$

### 2.2.6.2 Σκέδαση

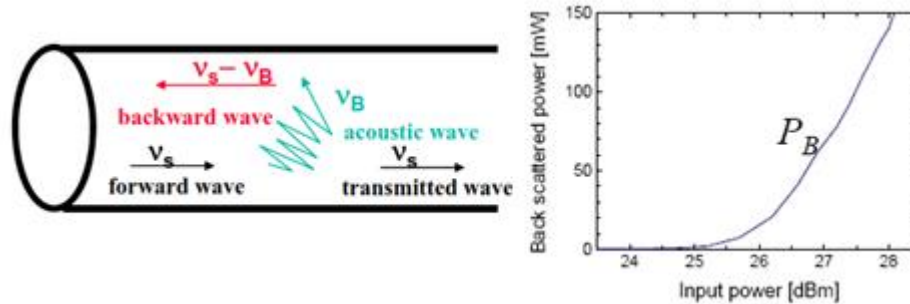
Η σκέδαση αποτελεί μηχανισμό απώλειας στην οπτική ίνα και προκύπτει από την αλληλεπίδραση των υψηλής ενέργειας φωτονίων με τον διηλεκτρικό και έχει σαν αποτέλεσμα μετατόπιση ισχύος σε χαμηλότερη συχνότητα από αυτή της φέρουσας. Δύο είναι οι κύριες μορφές σκέδασης.

#### a) Σκέδαση BRILLOUIN

Όταν ένα οπτικό σήμα ταξιδεύει κατά μήκος της ίνας, οι μεταβολές στο πεδίο του προκαλούν ακουστικές δονήσεις. Η αλληλεπίδρασή του φωτός με τα παραγόμενα ακουστικά κύματα προκαλεί μεταβολή στο δείκτη διάθλασης της ίνας. Έτσι δημιουργείται ένα αντίθετα διαδιδόμενο κύμα σε συχνότητα μικρότερη από την αρχική και ενέργεια μικρότερη από την ενέργεια εισόδου (Σχήμα 2.6). Προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελεί η ισχύς εισόδου να είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου Brillouin.

Όσο η ισχύς εισόδου αυξάνεται πάνω από την ισχύ κατωφλίου, η ισχύς του αντίθετα σκεδαζόμενου κύματος αυξάνει εκθετικά, ενώ αντίθετα η ισχύς του διαδιδόμενου κύματος μειώνεται. Έτσι τίθενται περιορισμοί για την ισχύ εισόδου και δεν μπορούμε να αυξάνουμε επ' άοριστον για να βελτιώνουμε το CNR.





Σχήμα 2.6 : Διάδοση κύματος σε οπτική ίνα και το φαινόμενο της σκέδασης Brillouin  
 Πηγή: Διαφάνειες μαθήματος : “Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες”

b) Σκέδαση RAMAN

Ομοίως η σκέδαση RAMAN προκαλείται από τις δονήσεις που προκαλεί στα μόρια της ίνας η μεταβολή του διαδιδόμενου πεδίου. Η ενέργεια του σκεδαζόμενου κύματος είναι μικρότερη από την ενέργεια του προσπίπτοντος και η συχνότητα του μικρότερη από την συχνότητα του προσπίπτοντος. Άρα το προσπίπτον κύμα δρα ως πηγή άντλησης ενέργειας για το σκεδαζόμενο, ενώ η ισχύς του σκεδαζόμενου αυξάνει εκθετικά με την ισχύ του διαδιδόμενου. Συνεπώς ο θόρυβος ενισχύεται και τα σήματα φθάνουν παραμορφωμένα στον δέκτη.

Πρόσφατες έρευνες σε παθητικά οπτικά δίκτυα έδειξαν ότι τα φαινόμενα σκέδασης Brillouin μπορούν να αντισταθμιστούν με χρήση μονορυθμικής διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης ίνα. Επίσης προτείνεται η μείωση της φασματικής απόστασης των καναλιών για την αντιμετώπιση της σκέδασης Raman.

### 2.2.6.3 Διασπορά

Ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο αλλιώνεται η χρονική μορφή του παλμού και διευρύνεται χρονικά. Μια μορφή διασποράς είναι η χρωματική διασπορά. Αιτία του φαινομένου αποτελεί το ότι ο παλμός δεν είναι μία και μόνο φασματική συνιστώσα αλλά έχει φασματικό περιεχόμενο, έτσι ο δείκτης διάθλασης που είναι συνάρτηση της συχνότητας αντιμετωπίζει διαφορετικά την κάθε φασματική συνιστώσα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι διάφορες φασματικές συνιστώσες του παλμού να ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα και να φτάνουν στην έξοδο της ίνας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ακόμα το σήμα υφίσταται ενδεχομένως και διασπορά τρόπων μετάδοσης σε μια πολυρυθμική ίνα καθώς κάθε ρυθμός ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα μέσα στο φυσικό μέσο. Τέλος υπάρχει και η διασπορά κυματοδηγού καθώς διαφορετικά μήκη κύματος επηρεάζονται διαφορετικά από τα χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας όπως ο δείκτης διάθλασης, το σχήμα και το cladding.

Λόγω λοιπόν των ευρυζωνικών αναγκών των ασύρματων επικοινωνιών νέας γενιάς και της συνήθως αναλογικής μετάδοσης του σήματος στην οπτική ίνα, η απόδοση του συστήματος θα χειροτερέψει αισθητά από την διασπορά ειδικά για μεγάλες αποστάσεις. Στην χειρότερη περίπτωση οι παλμοί μπορεί να διευρυνθούν τόσο που να παρεμβάλουν σε άλλα bits και να έχουμε διασυμβολική παρεμβολή. Με χρήση όμως κατάλληλου συνδυασμού ηλεκτροοπτικών διαμορφωτών φάσης και έντασης μπορεί να επιτευχθεί μεγάλου μήκους

RoF ζεύξεις. Στην χειρότερη περίπτωση οι παλμοί μπορεί να διευρυνθούν τόσο που να παρεμβάλουν σε άλλα bits και να έχουμε διασυμβολική παρεμβολή.

#### **2.2.6.4 Bit Error Rate**

Το BER μπορεί να επηρεαστεί από τον θόρυβο του καναλιού, τις παρεμβολές, την παραμόρφωση του σήματος, τον κακό συγχρονισμό μεταξύ σταθμού βάσης και CO, την εξασθένιση και την πολυδιαδρομική διάδοσης (multipath propagation). Αντίστοιχα μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση της ισχύος εκπομπής ή την επιλογή ενός σταθερού σχήματος διαμόρφωσης. Αναλογικές και ψηφιακές RoF ζεύξεις έχουν συγκριθεί και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ψηφιακές έχουν μικρότερο BER και συνεπώς καλύτερη απόδοση. Το BER με BPSK διαμόρφωση είναι μικρότερο από αντίστοιχες μετρήσεις για QPSK και 16QAM τόσο για αναλογικές όσο και για ψηφιακές ζεύξεις. Από την άλλη μεριά πρέπει να ληφθεί απόφαση και η φασματική απόδοση και η ανοχή στο θόρυβο της κάθε διαμόρφωσης. Επομένως για ψηφιακά συστήματα η 16QAM αποτελεί μια καλή επιλογή καθώς έχει πολύ καλύτερη φασματική απόδοση από την BPSK και η ανοχή της στο θόρυβο είναι ελάχιστα μικρότερη. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι αστερισμός της διαμόρφωσης (constellation diagram) τόσο καλύτερη αξιοποίηση φάσματος γίνεται αλλά μειώνεται η ανοχή της ζεύξης στον θόρυβο με αποτέλεσμα να υπάρξει πιθανώς μεγαλύτερο BER.

#### **2.2.6.5 Crosstalk**

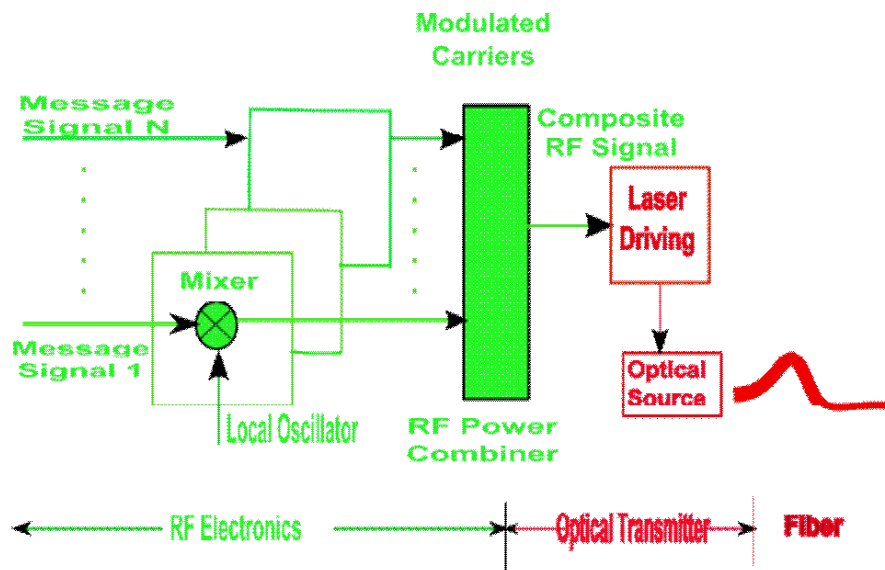
Είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να περιορίσει αρκετά την επίδοση του δικτύου, ειδικά σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν WDM. Το crosstalk υποδιαιρείται σε ετερόδουνο, μεταξύ σημάτων που διαδίδονται σε διαφορετικά μήκη κύματος, και ομόδουνο, μεταξύ σημάτων που διαδίδονται στο ίδιο ονομαστικό μήκος κύματος. Το ομόδουνο crosstalk υποδιαιρείται περαιτέρω σε συνεκτικό (coherent) και μη συνεκτικό, ανάλογα αν τα σήματα είναι συσχετισμένα ως προς την φάση. Έρευνες έχουν δείξει ότι αν τα επίπεδα ισχύος του crosstalk αυξηθούν πάνω από κάποιο κατώφλι το BER αυξάνει σημαντικά. Το ομόδουνο συνεκτικό crosstalk είναι σημαντικό σε οπτικούς WDM μεταγωγείς καθώς σήματα που διαδίδονται στο ίδιο ονομαστικό μήκος κύματος καταλήγουν στην ίδια οπτική ίνα.

### **2.2.7 Είδος πολυπλεξία για την μετάδοση**

#### **2.2.7.1 Subcarrier Multiplexing (SCM)**

Η SCM (οπτική πολυπλεξία υποφέροντος) είναι ένα σχήμα όπου πολλαπλά σήματα πολυπλέκονται σε χαμηλότερη συχνότητα και ύστερα από μετατροπή συχνότητας μεταδίδονται από ένα μήκος κύματος. Σημαντικό πλεονέκτημα της SCM αποτελεί το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μικροκυματικές συσκευές για την επεξεργασία του σήματος. Έτσι η σταθερότητα των μικροκυματικών ταλαντωτών και η αποτελεσματικότητα των μικροκυματικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται είναι ανώτερη των αντίστοιχων οπτικών και χαμηλότερου κόστους. Επιπλέον ο χαμηλός θόρυβος που εισάγει ο RF ταλαντωτής κάνει την συνεκτική αποδιαμόρφωση σε συχνότητες RF ευκολότερη από την αντίστοιχη σε οπτικές συχνότητες, γεγονός που κάνει δυνατή την εφαρμογή πιο περίπλοκων σχημάτων διαμόρφωσης. Δημοφιλής εφαρμογή της SCM τεχνολογίας σε οπτικά συστήματα είναι η αναλογική ψηφιακή τηλεόραση. Ακόμη πρέπει να αναφερθεί ότι μπορεί να υποστηρίξει πολλές εφαρμογές ταυτόχρονα καθώς κάθε υποφέρον μπορεί να μεταφέρει σήματα

ανεξαρτήτου είδους διαμόρφωσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα ότι το είδος διαμόρφωσης στο οποίο έχουν διαμορφωθεί τα δεδομένα προς τον χρήστη είναι ανεξάρτητα από το είδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί η SCM.



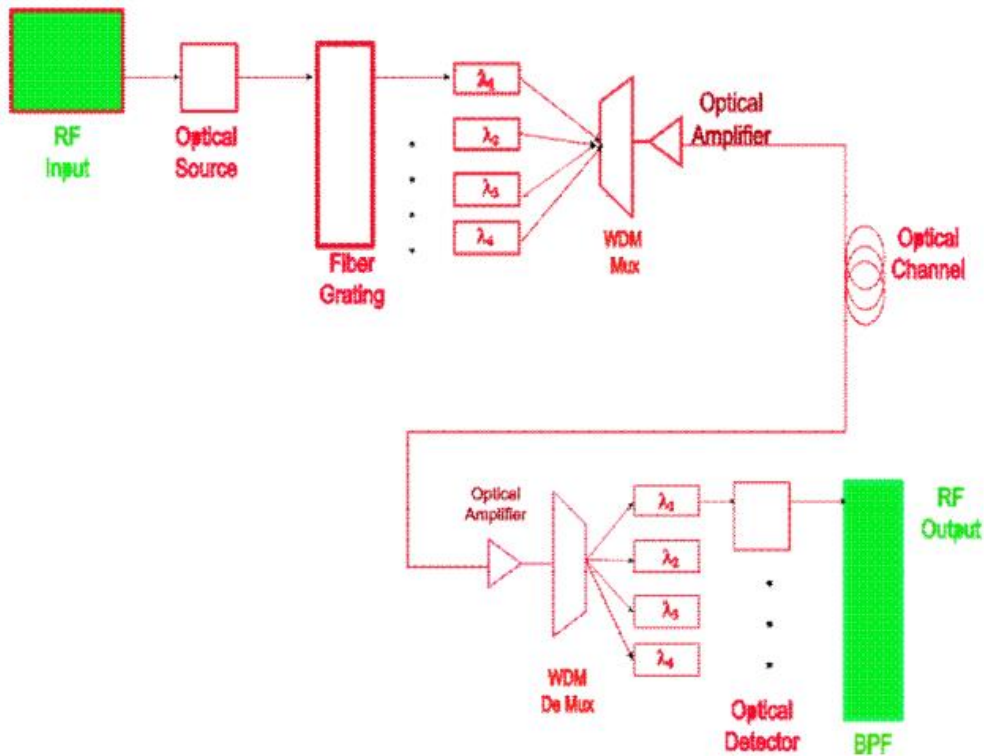
Σχήμα 2.6: Σχηματικό διάγραμμα Subcarrier Multiplexing

Από την άλλη μεριά, μειονέκτημα της SCM αποτελεί ότι είναι ευαίσθητη σε θόρυβο, παρεμβολές και μη γραμμικότητες των συσκευών του δικτύου, όπως και κάθε αναλογικός τρόπος επικοινωνίας. Έτσι τίθενται αυστηρές προδιαγραφές ως προς τη γραμμικότητα των συσκευών που χρησιμοποιούνται, ειδικά σε εφαρμογές όπως το βίντεο που απαιτούν  $CNR > 55$  dB. Τέλος, ο RIN (relative intensity noise) αποτελεί την κύρια πηγή θορύβου και πρέπει να κρατηθεί όσο πιο χαμηλός γίνεται.

### 2.2.7.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

Οι WDM πολυπλέκτες είναι παθητικές συσκευές που συνδυάζουν οπτικά σήματα με διαφορετικά μήκη κύματος που προέρχονται από διαφορετικές οπτικές ίνες σε μία. Αποτελούνται από DWDM (dense wavelength division multiplexers), συσκευές που χρησιμοποιούν αναλογικές τεχνικές πολυπλεξίας για να αυξήσουν την χωρητικότητα των οπτικών δικτύων πέρα από τις δυνατότητες που με υπάρχουν τώρα με χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου (TDM).

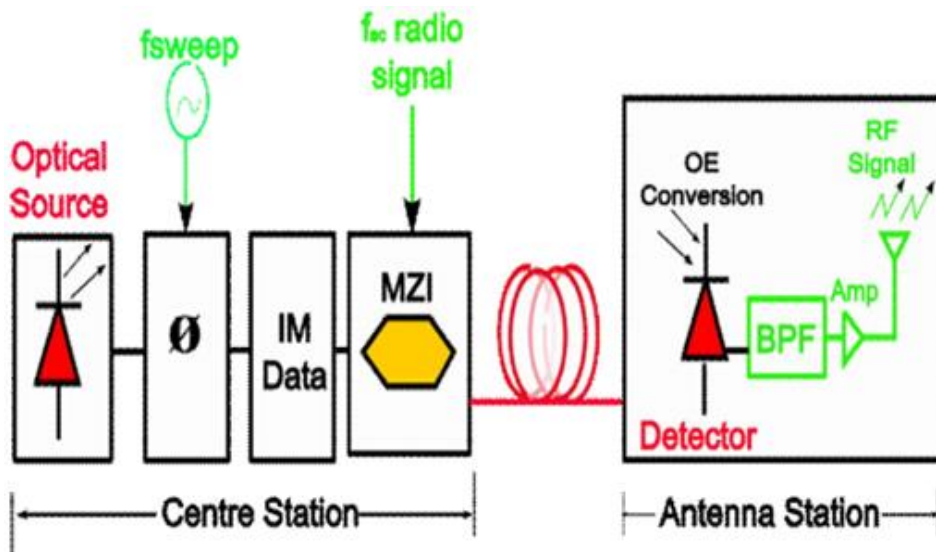
Η χρήση WDM για την μετάδοση του σήματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 έχει ερευνηθεί ιδιαίτερως πρόσφατα. Η WDM δίνει την δυνατότητα για αποδοτική εκμετάλλευση του φάσματος που είναι ανατεθειμένο σε ένα δίκτυο οπτικών ινών. Τέτοια συστήματα μπορούν να επιτύχουν ρυθμούς μετάδοσης που θα ξεπερνούν το 1Tb/s σε μία οπτική ίνα. Επιπροσθέτως, οι ρυθμοί μετάδοσης ανά κανάλι έχουν αυξηθεί σε 10 Gb/s ανά κανάλι και συστήματα που λειτουργούν στα 40 Gb/s γίνονται σιγά σιγά εμπορικά διαθέσιμα. Η φασματική απόσταση μεταξύ των καναλιών έχει μειωθεί στα 50 GHz ή ακόμα και στα 25 GHz σε κάποιες περιπτώσεις και μπορούν χρησιμοποιηθούν εκατοντάδες κανάλια. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι με τη μείωση της φασματικής απόστασης από τα 100 GHz στα 50 GHz, θα είναι πιο δύσκολη η αναβάθμιση των συστημάτων στα 40 Gb/s εξαιτίας των μη γραμμικών φαινομένων.



Σχήμα 2.7: Radio over Fiber με χρήση Wavelength Division Multiplexing

### 2.2.7.3 Optical Frequency Multiplexing

Η οπτική πολυπλεξία συχνότητας είναι μία ευέλικτη και χαμηλού κόστους RoF τεχνική που επιτρέπει τις πολλαπλές λειτουργίες που απαιτούνται για την υποστήριξη ενός ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Βασίζεται στο περιοδικό φιλτράρισμα και την ανίχνευση ενός σήματος που συνεχώς ολισθαίνει φασματικά (sweeping) κατά μία χαμηλή RF συχνότητα  $f_{\text{sweep}}$ , ενώ το επιθυμητό σήμα αναγνωρίζεται από ένα βαθυπερατό φίλτρο. Στην περίπτωση του σχήματος 2.8 η OFM υλοποιείται από ένα Mach-Zehnder Interferometer, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα του Fabry Perot Interferometer.



Σχήμα 2.8: Σχηματικό διάγραμμα OFM

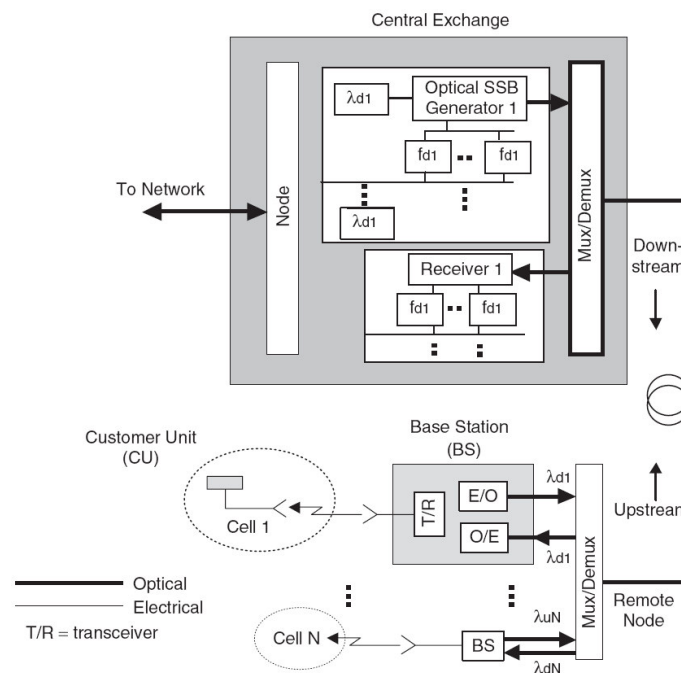
Μερικές από τις λειτουργίες που παρέχονται με μία και μόνο πηγή φωτός, λόγω της OFM πολυπλεξίας είναι :

- a) Δυναμική εκχώρηση φάσματος ανά κυψέλη
- b) Υποστήριξη πολλών προτύπων
- c) Απομακρυσμένο έλεγχο της κεραίας και του δυναμικού εύρους της ζεύξης μέσω καναλιού ελέγχου

Επιπλέον τα δίκτυα RoF που βασίζονται σε OFM πολυπλεξία μπορούν εύκολα να συγχωνευθούν με τα κλασσικά παθητικά ευρυζωνικά οπτικά δίκτυα πρόσβασης (WDM-PON), επιτρέποντας έτσι την σύγκλιση τους με τα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα του μέλλοντος. Όπως έχει αναφερθεί, στόχος των RoF συστημάτων είναι η διανομή του σήματος από τον κεντρικό σταθμό στους απομακρυσμένους απλοποιημένους σταθμούς βάσης, ώστε να μειωθεί το κόστος της υποδομής και να ξεπεραστούν τα προβλήματα περιορισμένης χωρητικότητας του δικτύου μέσω της δυναμικής ανάθεσης του φάσματος. Έτσι, για να σχεδιαστεί ένα αξιόπιστο RoF δίκτυο πρόσβασης, οι τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να μπορούν να δημιουργήσουν κατάλληλα μικροκυματικά σήματα και να επιτρέπουν την αξιόπιστη μετάδοσή τους στην οπτική ίνα. Η OFM ικανοποιεί και τα δύο κριτήρια με την δημιουργία μικροκυμάτων από μία και μόνο πηγή laser. Παράλληλα έχει προταθεί σαν τεχνική για την μετάδοση των σημάτων προς τους BS καθώς έχει μικρό κόστος προς απόδοση και ανοχή στην διασπορά.

#### 2.2.7.4 SCM over WDM

Η μετάδοση SCM over WDM έχει ερευνηθεί με στόχο την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών. Πρόκειται για ένα σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, με οπτική σύνδεση μεταξύ του CO και των απομακρυσμένων BS, οπτική δρομολόγηση και μετάδοση SCM διαμορφωμένων σημάτων πάνω από WDM.



Σχήμα 2.9 : Full duplex SCM/WDM RoF δίκτυο πρόσβασης

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί CWDM/wide passband WDM για την ανάθεση των SCM σημάτων. Ένα πλήρως αμφίδρομο (full duplex) WDM/SCM radio over fiber δίκτυο πρόσβασης έχει προταθεί με σκοπό την μείωση του κόστους, λόγω του κοινού εξοπλισμού εκπομπής, λήψης και επεξεργασίας του σήματος τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Το δίκτυο αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να έχει τρία WDM φέροντα στην κάτω ζεύξη και ένα για την άνω ζεύξη. Η διασπορά στον σύστημα αντιμετωπίζεται με μονόπλευρη οπτική διαμόρφωση σήματος (SSB).

### 2.2.7.5 OCDMA over WDM

Το μεγάλο κενό μεταξύ των απαιτήσεων του χρήστη και της χωρητικότητας του διαύλου ανά μήκος κύματος έχει οδηγήσει στην ανάγκη για διαχωρισμό του κάθε μήκους κύματος που θα επιτρέπει τη χρήση κάθε μήκους κύματος από πολλούς χρήστες. Μια προσέγγιση για να διαμοιραστεί το μήκος κύματος είναι ο χωρισμός του σε συγκεκριμένες χρονικές σχισμές (time slots). Μια εναλλακτική για τον διαμοιρασμό του εύρους ζώνης είναι η χρήση της OCDMA (optical code division multiple access).

Η OCDMA είναι μια τεχνική διαμόρφωσης διασποράς φάσματος παρόμοια με ότι έχει ήδη εφαρμοσθεί με επιτυχία στις ασύρματες επικοινωνίες. Οι τεχνικές του επιτρέπουν σε μεγάλο πλήθος χρηστών να χρησιμοποιεί το ίδιο εύρος συχνοτήτων μετάδοσης. Κάθε χρήστης, ή ομάδα χρηστών είναι «συνδεδεμένοι» με μια διεύθυνση που χρησιμοποιείται για την ονοματοδοσία των bits που είτε μεταδίδονται προς το χρήστη είτε εκπέμπονται από αυτόν. Η WDM/OCDMA αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για υψηλή χωρητικότητα τόσο στην άνω όσο και στην κάτω σκέψη σε συνδυασμό με υψηλή φασματική απόδοση, χαμηλό κόστος, ευελιξία και ασφάλεια για τα ευρυζωνικά δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς.

Ο σχεδιασμός οπτικών συστημάτων είναι συνήθως πολύ διαφορετικός από αυτός των ασύρματων συστημάτων. Αντίστοιχα και ένα σύστημα CDMA οπτικών επικοινωνιών είναι πολύ διαφορετικό από το ανάλογο για ασύρματες επικοινωνίες. Στην πραγματικότητα, η OCDMA δεν έχει λάβει την απαραίτητη προσοχή ως τώρα, εξαιτίας του γεγονότος ως υπάρχει ακόμα αρκετό φάσμα διαθέσιμο στην περιοχή λειτουργίας των οπτικών επικοινωνιών. Ωστόσο υπάρχουν μερικά σημαντικά ζητήματα για την εφαρμογή και των σχεδιασμό OCDMA συστημάτων.

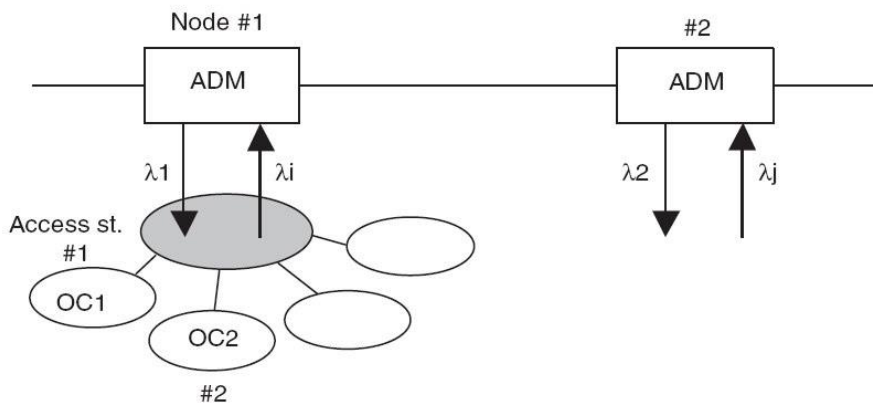
*a) Ο σχεδιασμός κώδικα διασποράς που να έχει καλές ιδιότητες συσχέτισης.*

Ένα σύστημα οπτικών ινών δεν μπορεί να στείλει δυαδικές ροές δεδομένων με χρήση NRZ παλμών. Αντίθετα θα στείλει δυαδική πληροφορία με την χρήση 0 και 1 σταθμών ενέργειας. Ο λόγος είναι ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο σε ένα σήμα να διακρίνεις την φάση του σήματος. Έτσι μόνο το πλάτος είναι ο τρόπος για να διακρίνεις την πληροφορία. Η συσχέτιση λοιπόν των σημάτων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το BER του συστήματος, καθώς είναι αδύνατον να αποκλείσεις τα φαινόμενα της συσχέτισης και της αυτοσυσχέτισης.

*b) Ο αριθμός των χρηστών ανά κανάλι που μπορεί να υποστηρίξει το OCDMA σύστημα.*

Ο αριθμός των χρηστών επηρεάζει άμεσα την χωρητικότητα του συστήματος. Είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί χαμηλό BER όταν είναι ενεργός μεγάλος αριθμός χρηστών.

Στο Σχήμα 2.10 υπάρχει μια προσέγγιση σχεδίασης ενός οπτικού συστήματος για τον περιορισμό της διασυμβολικής παρεμβολής σε ένα WDM σύστημα, με χρήση OCDM για τα κανάλια κάθε κόμβου και ανάθεση ενός συγκεκριμένου WDM μήκους κύματος για όλα αυτά τα κανάλια και χρήση φωτονικής IP δρομολόγησης. Η CWDM χρησιμοποιείται ακόμα για την πολυπλεξία των OCDM οπτικών σημάτων με τα υπόλοιπα σήματα του οπτικού δικτύου.



Σχήμα 2.10: OCDM/WDM δίκτυο πρόσβασης

Αρχικά το σήμα γίνεται add/drop σε κάθε κόμβο. Επομένως προτιμάτε η επιλογή ενός απλού OCDM πρωτοκόλλου αντί για ένα σύνθετο WDM πρωτόκολλο πρόσβασης. Στην συνέχεια σε κάθε σταθμό ανατίθεται ένας κωδικός έστω  $OC_j$ , ώστε να μπορεί μέσω ενός μήκους κύματος  $\lambda_i$  να επικοινωνεί με όλους τους υπόλοιπους σταθμούς που μοιράζεται στο ίδιο μήκος κύματος. Για να επικοινωνήσει με σταθμός που είναι ανατεθειμένος σε άλλο μήκος κύματος, το μήνυμα πρέπει να σταλεί στο μήκος κύματος του προορισμού. Με την παραπάνω προσέγγιση μπορούμε να κάνουμε χρήση της δυνατότητας της OCDM για ασύγχρονη πρόσβαση και επικοινωνία.

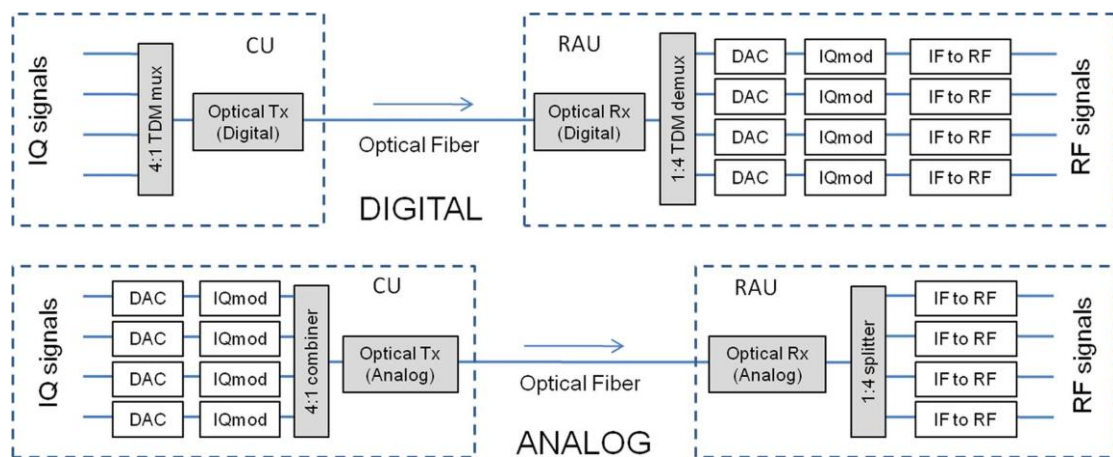
## 2.2.8 Αναλογική ή ψηφιακή μετάδοση?

Από τα παραπάνω έχει γίνει κατανοητό ότι μια RoF ζεύξη μπορεί να παρέχει ένας υψηλής απόδοσης ως προς την εμβέλεια σύστημα παρόλο που υποστηρίζει ευρυζωνικά κανάλια, υψηλής πολυπλοκότητας σχήματα διαμόρφωσης και κεραιές MIMO με πολλά κανάλια. Το όλο και μειούμενο κόστος γρήγορων A/D (analog-to-digital) και D/A μετατροπών, έχει οδηγήσει στο αυξημένο ενδιαφέρον για ψηφιοποίηση των RoF ζεύξεων καθώς μέχρι τώρα όπως έχει αναφερθεί προτιμούνται οι αναλογικές. Στην πραγματικότητα ψηφιακές ζεύξεις έχουν προσδιοριστεί στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών (UMTS, WiMAX, LTE), ώστε να συνδέσουν τους σταθμούς βάσης με απομακρυσμένους σταθμούς κεραιών. Αυτές οι ζεύξεις μεταδίδουν I και Q σύμβολα, το οποίο σημαίνει ότι οι απομακρυσμένοι σταθμοί κεραιών μπορούν να είναι πολύ απλοί και να αποτελούνται μόνο από D/A converters, άνω μετατροπείς συχνότητας και ενισχυτές στη κάτω ζεύξη και A/D converters, κάτω μετατροπείς συχνότητας και ενισχυτές στην άνω ζεύξη. Όλες οι διαδικασίες διαμόρφωσης λαμβάνουν χώρα στην CO. Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό οι απομακρυσμένοι σταθμοί κεραιών να είναι απλοί και μικροί σε μέγεθος ούτως ώστε να μπορούν να



τοποθετηθούν σε σημεία περιορισμένου χώρου. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει παρόμοια λογική με αυτή των RoF ζεύξεων, για αυτό και είναι σημαντική η απόφαση αν θα επιλέξουμε αναλογική ή ψηφιακή μετάδοση.

Η σχεδίαση μιας ζεύξης RoF έχει γενικά σαν στόχο την μείωση του αριθμού των οπτικών που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση του CO με τους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης. Για να συγκριθεί όμως ένα αναλογικό με ένα ψηφιακό σύστημα θα πρέπει τα δύο συστήματα να έχουν τις ίδιες προϋποθέσεις. Έτσι θεωρείτε μια σειριακή ψηφιακή ζεύξη πολυπλεγμένη με χρήση TDM και ως ανάλογη μια αναλογική ζεύξη που κάνει χρήση της SCM. Ως προς την απόδοση του συστήματος, είναι ξεκάθαρο ότι η αναλογική σύνδεση θα υστερεί ελαφρώς της αντίστοιχης ψηφιακής. Επομένως απομένει μόνο το κόστος, ο παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψη. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι απλοποιημένες υλοποιήσεις των δύο συστημάτων. Όλες οι λειτουργίες είναι κοινές και στις δύο περιπτώσεις, αλλά μπορεί να εκτελούνται σε διαφορετικές τοποθεσίες, εκτός από τους οπτικούς πομποδέκτες και (από)πολυπλέκτες που εμφανίζονται σκιασμένοι.



Σχήμα 2.11: Μπλοκ διάγραμμα απλοποιημένων σχεδιαστικών για αναλογική και οπτική κάτω ζεύξη. Σκιασμένα είναι τα μέρη του συστήματος που αλλάζουν στις δύο περιπτώσεις.

Σύμφωνα με έρευνα [5] για χαμηλής κίνησης δίκτυο υπάρχει τουλάχιστον μιας τάξης διαφορά στο κόστος μεταξύ αναλογικής και ψηφιακής μετάδοσης. Έτσι λοιπόν προτιμείται η μετάδοση πολλαπλών ευρυζωνικών καναλιών αναλογικά καθώς η απόδοσή του είναι ελάχιστα χειρότερη ενώ το κόστος κατασκευή του δικτύου σημαντικά μικρότερο. Ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι το κόστος είναι μικρότερο μόνο για την συγκεκριμένη υλοποίηση που υπάρχει η ανάγκη για μεταφορά πολλαπλών καναλιών και δεν αποτελεί πανάκεια για οποιαδήποτε σύγκριση μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών τρόπων μετάδοσης.



## **Βιβλιογραφία**

[1] “Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems”, Anthony Ng’oma

[2] “Radio over Fiber: Future Technology of Communication”, Ajay Kumar Vyas, Dr. Navneet Agrawal

[3] “Radio over Fiber Technology for Wireless Access”, D.Opatic

[4] “Emerging Radio-Over-Fiber Technologies and Networks: Challenges and Issues”, Mitchel

[5] “Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems”, David Wake, Anthony Nkansah, and Nathan J. Gomes, Senior Member, IEEE

[6] “Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Network”, Chapter 4, Hamed Al-Raweshidy



## Κεφάλαιο 3

### Το πρωτόκολλο IEEE 802.11ad

---

Μια από τις φασματικές περιοχές που έχουν προταθεί για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών στους χρήστες είναι αυτή που τα σήματα έχουν μήκος κύματος της τάξης του χιλιοστού ή όπως συνηθίζεται να αποκαλείται mm-wave (Millimeter-wavelength) band. Η mm-wave band παρέχει μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα συμφόρησης, όπως στην περιοχή των μικροκυματικών συχνοτήτων. Από όλες τις mm-wave bands πιο πολύ ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή γύρω από τα 60 GHz καθώς υπάρχει ελεύθερο ένα εύρος τιμών της τάξης των 3 GHz (59-62 GHz) παγκοσμίως. Ωστόσο, εξαιτίας των υψηλών απωλειών διάδοσης και απωλειών διείσδυσης σε τοίχους, το μέγεθος της κυψέλης του συστήματος είναι πολύ μικρό. Ένα WLAN πρωτόκολλο που θα λειτουργούσε σε αυτές τις συχνότητες, και θα μπορούσε να υιοθετήσει/εκμεταλλευτεί τις μεθόδους της RoF τεχνολογίας για αύξηση της χωρητικότητας και της κάλυψης ενός συστήματος είναι το IEEE 802.11ad.

### 3.1 Εισαγωγή – Ιστορική Αναδρομή

Τα πρώτα δημοφιλή πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυο τοπικής πρόσβασης (WLAN ) ήταν τα IEEE 802.11a και b και είχαν σχεδιαστεί κυρίως για να καλύπτουν τις ανάγκες των φορητών υπολογιστών στην εργασία και στο σπίτι, και αργότερα να παρέχουν σύνδεση και σε μέρη όπως αεροδρόμια, ξενοδοχεία, Internet Cafes και εμπορικά κέντρα. Η κύρια λειτουργία τους ήταν να προσφέρουν μια ασύρματη διεπαφή σε σταθερά ευρυζωνικά δίκτυα για πρόσβαση στο διαδίκτυο και τις υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Καθώς τότε τα ευρυζωνικά σταθερά δίκτυα δεν παρείχαν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, μια σχετικά αργή ασύρματη σύνδεση ήταν επαρκής. Έτσι σχεδιάστηκε το IEEE 802.11a που παρείχε μέχρι 54 Mbps στα 5 GHz και το IEEE 802.11b που παρείχε μέχρι 11Mbps στα 2.4 GHz. Και τα δύο πρωτόκολλα λειτουργούσαν φασματικές περιοχές που ήταν ελεύθερες και μην κατοχυρωμένες. Για να μειώσουν λοιπόν της παρεμβολές από άλλα μέσα που χρησιμοποιούσαν τις ίδιες περιοχές συχνοτήτων χρησιμοποιούσαν μετάδοση με διαμόρφωση διασποράς φάσματος και ήταν πολύ ισχυρά κωδικοποιημένα. Μετέπειτα, και συγκεκριμένα το 2003, δημιουργήθηκε το IEEE 802.11g που εδραίωσε την μετάδοση στα 2.4 GHz αλλά διατήρησε τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης μέχρι τα 54 Mbps. Ωστόσο είχαν αναπτυχθεί συγχρόνως και νέες εφαρμογές με ανάγκες για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης όπως η ασύρματη εκτύπωση και ο ασύγχρονος διαμοιρασμός αρχείων μεταξύ συνδεδεμένων συσκευών ενός γραφείου ή ενός σπιτιού. Έτσι δημοσιεύτηκε το 2009 το IEEE 802.11n. Εκτός του ότι βελτίωσε τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ανά κανάλι μέχρι τα 100 Mbps, το νέο πρωτόκολλο εισήγαγε την χρήση κεραιών MIMO, όπου μέχρι και τέσσερις (4) ξεχωριστές κεραιές εκπομπής και λήψης μπορούν να μεταφέρουν ανεξάρτητα δεδομένα που αθροίζονται κατά την διαδικασία της διαμόρφωσης ή της αποδιαμόρφωσης. Πλέον υπάρχουν σκέψεις για νέα μοντέλα για την χρήση των WLANs, που αναφέρονται επιγραμματικά στον Πίνακα Α, και απαιτούν ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών

Κατηγορία	Μοντέλο χρήσης
Ασύρματη απεικόνιση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποθήκευση και απεικόνιση από σταθερό υπολογιστή</li> <li>• Προβολή σε τηλεόραση ή προβολέα σε συνέδριο ή αμφιθέατρο</li> <li>• In-room gaming</li> <li>• Steaming από κάμερα κατευθείαν σε συσκευή απεικόνισης</li> <li>• Ευρεκπομπή HDTV</li> </ul>
Διανομή HDTV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Video streaming μέσα σε σπίτι</li> <li>• Εφαρμογές μέσα σε μεγάλα οχήματα (πλοία, αεροσκάφη)</li> <li>• Ασύρματη σύνδεση του γραφείου</li> <li>• Απομακρυσμένη παροχή ιατρικών υπηρεσιών</li> </ul>
Γρήγορο upload/download	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Γρήγορη μεταφορά ή συγχρονισμός αρχείων</li> <li>• Realtime εμφάνιση φωτογραφιών από απομακρυσμένο σημείο</li> <li>• Downloading ταινίες και άλλων αρχείων σε κινητές συσκευές</li> <li>• Μεταφορά αρχείων της αστυνομίας για έρευνες</li> </ul>
Δίκτυο κορμού	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Point- to-point backhaul</li> <li>• Multi-media δίκτυο κορμού</li> </ul>
Outdoor campus / auditorium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Video demo/tele-presence in auditorium</li> <li>• Public safety mesh (incident presence)</li> </ul>
Manufacturing floor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automation</li> </ul>

Πίνακας Α: Μελλοντικά μοντέλα χρήσης για ασύρματες εφαρμογές

Για να φροντίσουν όλα τα παραπάνω, δύο νέες ομάδες έχουν σχηματιστεί από την IEEE που στοχεύουν στην παροχή πολύ υψηλού throughput. Throughput είναι η πραγματική ποσότητα πληροφορίας που πέρασε στη διάρκεια κάποιας παρατήρησης από το δίκτυο και μετριέται σε bits/sec. Η ομάδα TGac δημιούργησε το πρωτόκολλο IEEE 802.11ac, μια προέκταση του IEEE 802.11n, που παρέχει ένα ελάχιστο throughput της τάξης των 500 Mbps σε μία ζεύξη και 1 Gbps συνολικά, λειτουργεί στα 5 GHz και αναμένεται να δημοσιευτεί τον Φεβρουάριο του 2014. Η δεύτερη ομάδα, TGad, ολοκλήρωσε την δημιουργία και την δημοσίευση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11ad, που παρέχει throughput μέχρι και 6.75 Gbps, χρησιμοποιώντας περίπου 2 GHz φάσματος στην περιοχή των 60 GHz για μετάδοση σε μικρή απόσταση, καθώς η μετάδοση στα 60 GHz έχει πολύ μεγάλες απώλειες διάδοσης και μέσα από φυσικά εμπόδια. Ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο αριθμός των υπαρχόντων συσκευών και η συμβατότητα των νέων πρωτοκόλλων με τα προηγούμενα (backward compatibility), χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος συχνοτήτων. Στόχος όλων των IEEE 802.11 πρωτοκόλλων είναι το backward compatibility και τα IEEE 802.11ac και ad στοχεύουν στην συμβατότητα στο Medium Access Control Layer ή στο Data Link Layer του OSI, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Πίνακας Β, και να διαφέρουν μόνο στα

χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου, δηλαδή στο Physical Layer. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι συσκευές θα λαμβάνουν σε τρεις συχνότητες: τα 2,4 GHz στα οποία θα χρησιμοποιούν για το κοινό Wi-Fi και θα αντιμετωπίζουν τα προβλήματα παρεμβολών που αντιμετωπίζουν και σήμερα, τα 5 GHz για πιο "σταθερές" και γρήγορες συνδέσεις και τα 60 GHz για πάρα πολύ γρήγορες συνδέσεις μέσα σε ένα δωμάτιο. Ακόμα, οι συσκευές α υποστηρίζουν την εναλλαγή μεταξύ αυτό τον πρωτοκόλλων.

OSI Model		Λειτουργία	
7 6 5 4	Επίπεδο Εφαρμογών Είδος επικοινωνίας: e-mail, μεταφορά αρχείων, client/server	Παρέχεται στις εφαρμογές πρόσβαση στο δίκτυο	Επίπεδα Λογισμικού
	Επίπεδο Παρουσίασης TDI, ASCII, EBCDIC, MIDI, MPEG	Αναπαράσταση δεδομένων και κρυπτογράφηση	
	Επίπεδο Συνόδου Named Pipes, NetBIOS, SAP, Half Duplex, Full Duplex, Simplex, SDP	Έλεγχος του διαλόγου μεταξύ των άκρων της επικοινωνίας	
	Επίπεδο Μεταφοράς NBF, nanoTCP, nanoUDP	Αξιόπιστη επικοινωνία από άκρο σε άκρο	
3 2 1	Επίπεδο Δικτύου NBF, Q.931, IS-IS	Καθορισμός διαδρομών και λογικών διευθύνσεων των κόμβων στα πλαίσια ενός διαδικτύου	Επίπεδα Υλικού
	Επίπεδο Ζεύξης δεδομένων 802.3 (Ethernet), 802.11a/b/g/n MAC/LLC, 802.1Q (VLAN), ATM	Φυσική διευθυνσιοδότηση (MAC & LLC)	
	Φυσικό Επίπεδο RS-232, T1, E1, 10BASE-T, 100BASE-TX, SONET, SDH, DSL, 802.11a/b/g/n PHY	Διαδική μετάδοση σήματος μέσω του φυσικού μέσου	

Πίνακας Β: Μοντέλο αναφοράς OSI

### 3.2 Γιατί στα 60 GHz;

Ο Πίνακας Α αναφέρει πολλά παραδείγματα για τις απαιτήσεις σε ρυθμούς της τάξης των Gbps σε ασύρματο περιβάλλον, που έχουν μερικές εφαρμογές. Όπως είναι γνωστό, η χωρητικότητα της ζεύξης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το εύρος ζώνης διαμόρφωσης. Οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης λοιπόν, απαιτούν να τους ανατεθεί μεγάλο εύρος ζώνης. Ωστόσο, για να μπορέσουν οι συσκευές να μπουν στην γραμμή παραγωγής πρέπει να είναι απλές στην κατασκευή του, κάτι που συνεπάγεται ότι το εύρος ζώνης πρέπει να είναι μόνο

ένα μικρό ποσοστό του συνολικού διαθέσιμου φάσματος προς μετάδοση. Το ελεύθερο φάσμα που υπάρχει γύρω από την περιοχή των 60 GHz, που η μετάδοση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων είναι επιτρεπτή, θεωρείται κατάλληλο. Στην περιοχή των 60 GHz υπάρχουν ελεύθερα τουλάχιστον 3.5 GHz συνεχούς φάσματος, ενώ σε αντίθεση με τις περιοχές των 2.4 και 5 GHz, η περιοχή είναι σχετικά λιγότερη συμφορημένη.

Η μετάδοση στα 60 GHz μπορεί να καλύψει μικρότερη περιοχή για δεδομένη ισχύ εκπομπής, κυρίως λόγω των υψηλών απωλειών διάδοσης σε συνδυασμό με τις απώλειες διάδοσης μέσα από διάφορα υλικά και την σκίαση από το ανθρώπινο σώμα. Οι απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου αγγίζουν τα 68 dB για 1m, που είναι 21.6 dB χειρότερες από τις αντίστοιχες για τα 5 GHz, ενώ οι απώλειες σκίασης κυμαίνονται από λίγα dB έως και 30 dB.

Ακόμα η απορρόφηση στα 60 GHz, που προέρχεται κυρίως από τον συντονισμό των μορίων του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα, είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας για αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Ωστόσο η απορρόφηση επιφέρει προβλήματα σε ζεύξεις άνω των 100m, που δεν εξετάζονται για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο καθώς η ισχύς εκπομπής είναι αρκετά μικρή και επομένως είναι ένα φαινόμενο που δεν εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική.

Η μικρή ισχύς εκπομπής δεν θα οδηγήσει το σήμα πολύ μακριά από την κεραία, ωστόσο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου. Η μικρή απόσταση διάδοσης οδηγεί σε μικρές κυψέλες και συνεπώς περιορίζεται η πιθανότητα διακαναλικής παρεμβολής και αυξάνεται η συχνότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μικρής εμβέλειας είναι η μικρή πιθανότητα υποκλοπών σημαντικών πληροφοριών από γειτονικές συχνότητες καθώς θα πρέπει ο υποκλοπέας να είναι πολύ κοντά στην κεραία.

Σημαντική προοπτική στην υλοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι η δυνατότητα για κατασκευή χαμηλού κόστους συσκευών. Η τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, με την χρήση CMOS, InP και SiGe IC τεχνολογιών, κάνει χρήση συσκευών που λειτουργούν στα 60 GHz, από αδιανόητη πριν λίγα χρόνια, εμπορικά διαθέσιμη στο ευρύ κοινό.

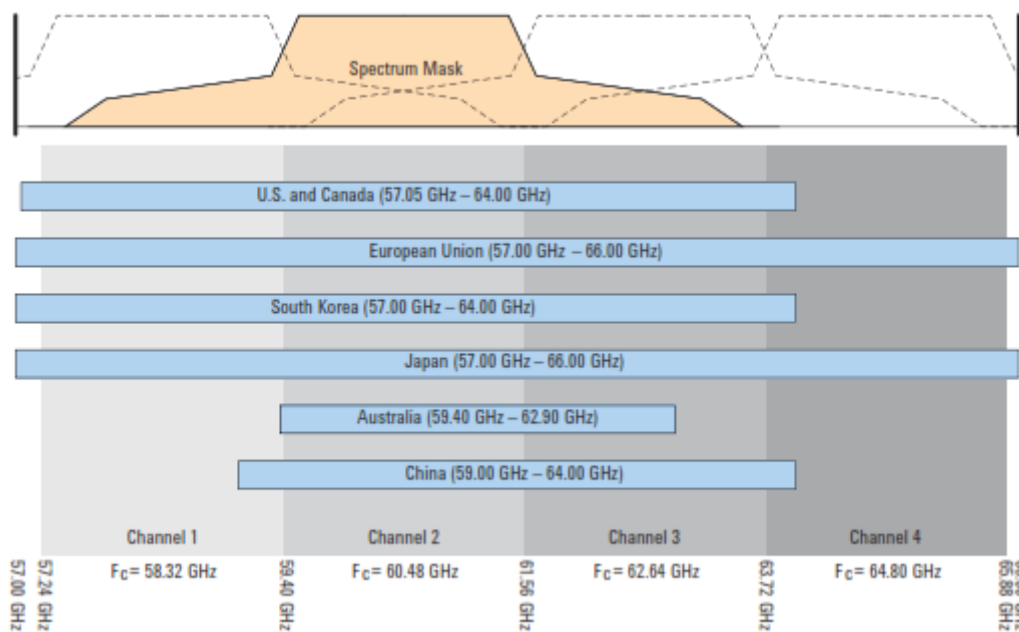
Οι υψηλές απώλειες διάδοσης που αντιμετωπίζει η μετάδοση στα 60 GHz μπορούν να αντισταθμιστούν αυξάνοντας το κέρδος της κεραίας. Οι μικρές διαστάσεις της κεραίας, λόγω της λειτουργίας της στα 60 GHz, επιτρέπει την χρήση τεχνικών που θα αυξήσουν σημαντικά το κατευθυντικό της κέρδος. Ακόμα υποστηρίζεται και η χρήση κεραίων με δυνατότητα στροφής της δέσμης ακτινοβολίας. Η στροφή της δέσμης ακτινοβολίας μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή μικρά αντικείμενα, όπως τα άτομα που περιφέρονται σε ένα δωμάτιο ή τα μικρά έπιπλα και εμποδίζουν την απευθείας μετάδοση (line of sight transmission).

### **3.3 Επισκόπηση για το Φυσικό Επίπεδο**

Στα παρακάτω δίνεται μια σύντομη περιγραφή του mm-wave φυσικού επιπέδου όπως αυτό ορίζεται στο IEEE 802.11ad πρωτόκολλο. Για την απλοποίηση της επεξήγησης της λειτουργίας του στο φυσικό επίπεδο, η IEEE εισήγαγε νέες ορολογίες για να προσδιορίσει το φυσικό επίπεδο των υψηλών ρυθμών μετάδοσης πρωτοκόλλων.

- VHT (very high throughput), είναι κάθε φασματική περιοχή που ξεκινάει κάτω από τα 6 GHz, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η περιοχή γύρω από τα 2.4 GHz.
- DMG (directional multi-gigabit), που αντιπροσωπεύει κάθε φασματική περιοχή που έχει ένα κανάλι, που ξεκινάει σε συχνότητα πάνω από τα 45 GHz.

Χρησιμοποιώντας την νέα ορολογία, η παράγραφος του IEEE 802.11ad-2012 προσδιορίζει το DMG PHY (physical layer), που συνήθως υλοποιείται στα 60 GHz, ως την φασματική περιοχή 57-66GHz, και η οποία υπόκειται στους περιορισμούς της κάθε γεωγραφικής περιοχής, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

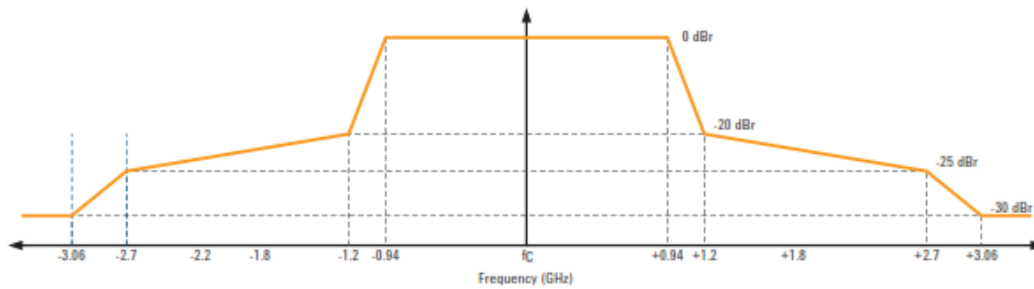


Σχήμα 3.1: Πλάνο ελεύθερων συχνοτήτων και ανάθεση συχνότητας ανά περιοχή

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται οι ελεύθερες φασματικές περιοχές σε κάθε μία από τις περιοχές, καθώς και ο χωρισμός των καναλιών όπως προτυποποιήθηκε από την ITU-R τον Νοέμβριο του 2011. Ακόμα η ITU-R όρισε το εύρος των καναλιών στα 2.16 GHz με κεντρικές συχνότητες τα 58.32 GHz, 60.48 GHz, 62.64 GHz και 64.80 GHz αντίστοιχα. Όπως φαίνεται λοιπόν δεν είναι ελεύθερα όλα τα κανάλια σε όλες τις περιοχές και συνεπώς ορίστηκε το Κανάλι 2 ως το βασικό για τον εξοπλισμό που δουλεύει σε αυτές τις συχνότητες.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται πιο αναλυτικά η φασματική μάσκα των καναλιών και εκφράζεται σε decibel σε σχέση με την στάθμη ισχύος του σήματος στην κεντρική συχνότητα (dBm). Η συγκεκριμένη μάσκα είναι ελαφρώς διαφορετική από τις αντίστοιχες για μικρότερες συχνότητες. Τα σημεία καμπής των -20 dBm είναι ελαφρώς μετατοπισμένα προς τα έξω για εξυπηρετούν και τεχνικές διαμόρφωση διασποράς φάσματος, ενώ και οι επιπρόσθετες φασματικές περιοχές είναι πιο χαλαρές για να διευκολύνουν την σχεδίαση των κυκλωμάτων στα 60 GHz, επιτρέποντας μεγαλύτερη παρεμβολή στις περιοχές μακριά από την κεντρική συχνότητα.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής διαφοροποιείται ανάλογα την χώρα αλλά μια καλή γενίκευση έχει σαν όριο τα +10dBm.

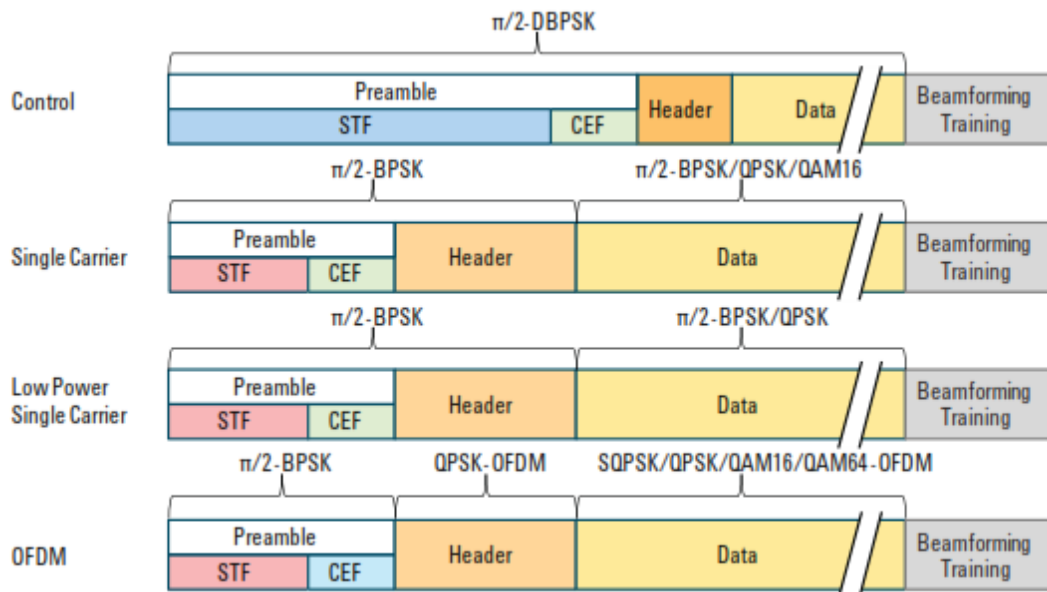


Σχήμα 3.2: Φασματική Μάσκα IEEE 802.11ad

### 3.3.1 Δομή του Πακέτου

Το IEEE 802.11ad-2012 DMG PHY υποστηρίζει 3 ξεχωριστές τεχνικές διαμόρφωσης:

- Διαμόρφωση διασποράς φάσματος: Control PHY (PHY ελέγχου)
- Διαμόρφωση μονού φέροντος (Single Carrier, SC) : Single Carrier PHY ( PHY μονού φέροντος) και Low Power Single Carrier PHY (PHY μονού φέροντος χαμηλής ισχύος)
- Διαμόρφωση ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM): OFDM PHY



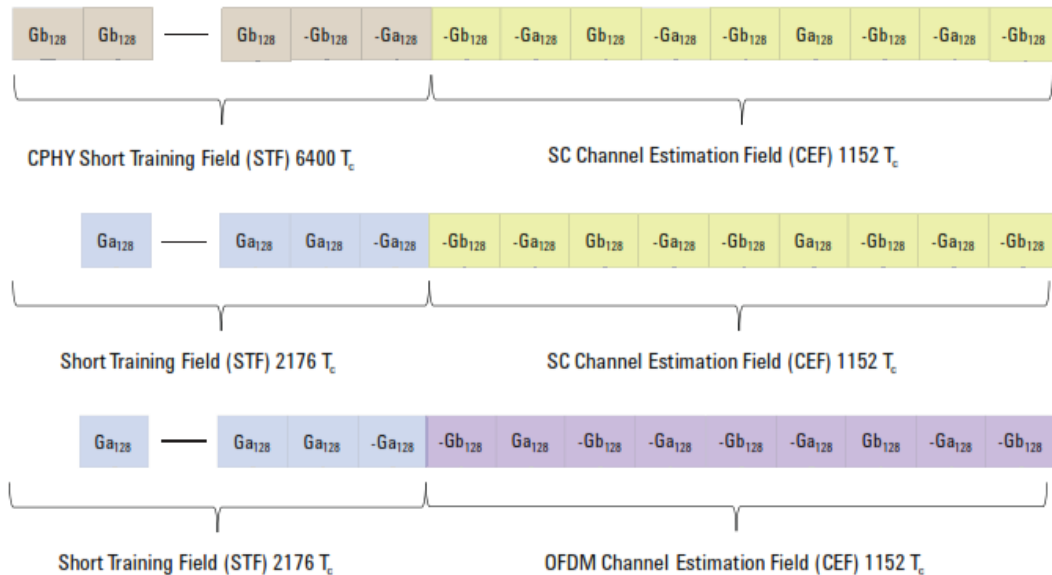
Σχήμα 3.3: Δομή πακέτων ανά τεχνική διαμόρφωσης

Κάθε είδος PHY έχει ένα ξεχωριστό σκοπό και μια ξεχωριστή δομή πακέτου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, αλλά έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην εναρμόνιση της δομής των πακέτων, και συγκεκριμένα στα προοίμια (preambles), ώστε να απλοποιείται η ανάκτηση του σήματος, η επεξεργασία και η σωστή αναγνώριση του PHY στον δέκτη.



### 3.3.1.1 Προοίμιο (Preamble)

Τα τρία είδη πακέτων έχουν ουσιαστικά την ίδια δομή προοιμίου και συνδυάζουν ένα μικρό πεδίο εκπαίδευσης STF (Short Training Field) και ένα πεδίο για την εκτίμηση του καναλιού CEF (Channel Estimation Field), το οποίο παρέχει και δείκτες για την μορφοποίηση του πακέτου που ακολουθεί. Αυτά τα πεδία αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες σειρές Golay που έχουν διαμορφωθεί με  $\pi/2$ -BPSK.



Σχήμα 3.4 : Οι διαφορές των τύπων προοιμίων εκφρασμένες με βάση τις σειρές Galoy

Το Σχήμα 3.4 απεικονίζει την δομή των τριών διαφορετικών προοιμίων με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, όπου είναι φανερό ότι το κύριο στοιχείο του είναι οι συμπληρωματικές σειρές Golay,  $G_{a128}$  και  $G_{b128}$ , ωστόσο η μελέτη τους δεν εντάσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

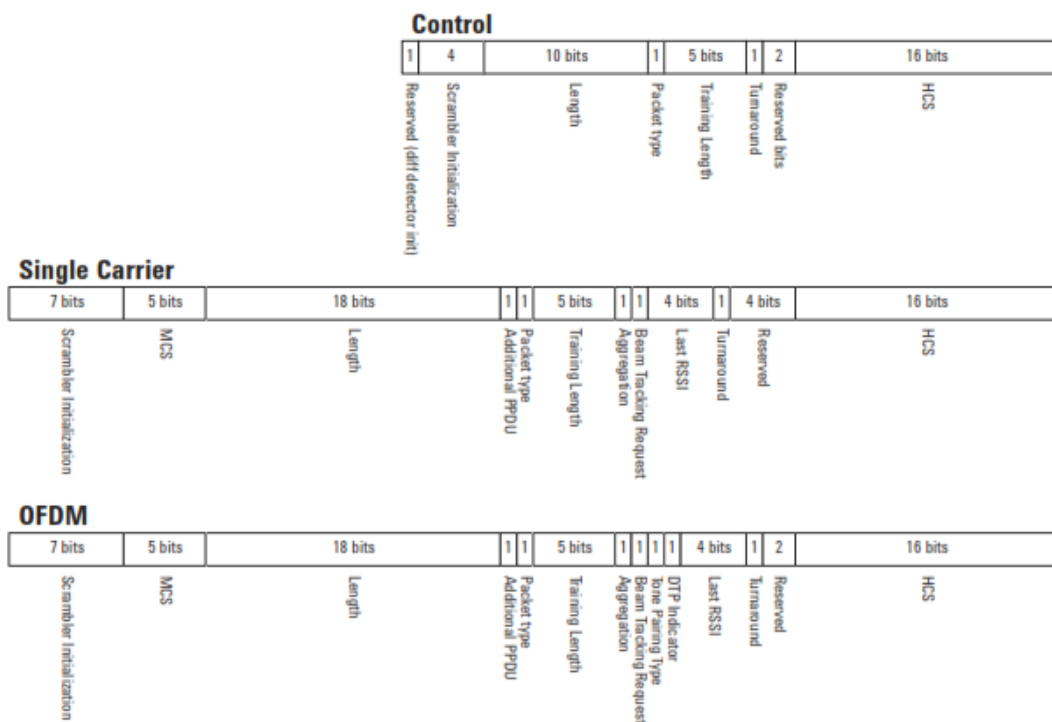
### 3.3.1.2 Επικεφαλίδα (Header)

Όπως σε όλες τις περιπτώσεις, το προοίμιο ακολουθείται από την επικεφαλίδα. Η επικεφαλίδα είναι το πεδίο που παρέχει πληροφορίες για το υπόλοιπο πακέτο, κυρίως πληροφορίες όπως το είδος κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (Modulation and Coding Scheme – MCS) των ωφέλιμων δεδομένων του πακέτου (payload).

Οι πληροφορίες που περιέχονται στην επικεφαλίδα είναι παρόμοιες τόσο για τα Single Carrier πακέτα όσο και για OFDM πακέτα, ενώ στην δεύτερη κατηγορία υπάρχουν κάποια επιπλέον πεδία απαραίτητα για την λειτουργία του OFDM που ονομάζονται δείκτες Tone Pairing Type και Dynamic Tone Pairing.

Μερικά από τα πιο σημαντικά πεδία, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5 είναι:

- Scrambler Initialization: Αυτό το πεδίο αποτελείται από μια τιμή η οποία χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση των στοιχείων στην υπολειπόμενη επικεφαλίδα και στο payload.
- MCS: όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δίνει πληροφορίες για το είδος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του payload που ακολουθεί
- Length: Υποδηλώνει το μέγεθος του payload σε οκτάδες
- Training length: Δηλώνει το μέγεθος του προαιρετικού πεδίου “beam forming training field” που ακολουθεί μετά το payload,
- Packet Type: Διαχωρίζει αν το πεδίο “beam forming training field” έχει διαμορφωθεί για την εκπαίδευση του πομπού ή του δέκτη.
- HCS: είναι το αποτέλεσμα ενός κυκλικού κώδικα (CRC-32) για τα bits της επικεφαλίδας.



Σχήμα 3.5 : Η δομή της επικεφαλίδας

### 3.2.1.3 Payload

Το payload ενός πακέτου είναι μια συνεχής ροή δεδομένων σε οκτάδες. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, το “Length” στη επικεφαλίδα προσδιορίζει το χρήσιμο περιεχόμενο του payload. Πριν την κωδικοποίηση, τα δεδομένα του payload μπορεί να προσαυξηθούν με την χρήση δεδομένων παραγεμίσματος (stuffing bits), ώστε μετά την διαδικασία κωδικοποίησης να προκύψουν ακέραια σύνολα συμβόλων. Τα επιπλέον άχρηστα δεδομένα αφαιρούνται κατά την διαδικασία της αποκωδικοποίησης.

### 3.3.2 Είδη Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου δίνουν την δυνατότητα για 32 διαφορετικά είδη διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, ελέω των 5 διαθέσιμων bits στο MCS πεδίο της επικεφαλίδας. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, υπάρχουν ελάχιστες διαφοροποιήσεις στην κωδικοποίηση και την διαμόρφωση του προοιμίου και της επικεφαλίδας.

Το είδος του πακέτου και συνεπώς το είδος της διαμόρφωσης της επικεφαλίδας δηλώνεται από τις διαφοροποιήσεις του προοιμίου και συγκεκριμένα την εναλλαγή των σειρών Golay. Συνεπώς απλοποιείται η λίστα των MCS σε τέσσερις κατηγορίες.

Control (CPHY)		
Coding	Modulation	Raw Bit Rate
Shortened 3/4 LDPC, 32x Spreading	$\pi/2$ -DBPSK	27.5 Mbps
Single Carrier (SCPHY)		
Coding	Modulation	Raw Bit Rate
1/2 LDPC, 2x repetition 1/2 LDPC, 5/8 LDPC 3/4 LDPC 13/16 LDPC	$\pi/2$ -BPSK, $\pi/2$ -QPSK, $\pi/2$ -16QAM	385 Mbps to 4620 Mbps
Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDMPHY)		
Coding	Modulation	Raw Bit Rate
1/2 LDPC, 5/8 LDPC 3/4 LDPC 13/16 LDPC	OFDM-SQPSK OFDM-QPSK (DCM) OFDM-16QAM OFDM-64QAM	693 Mbps to 6756.75 Mbps
Low-Power Single Carrier (LPSCPHY)		
Coding	Modulation	Raw Bit Rate
RS(224,208) + Block Code(16/12/9/8,8)	$\pi/2$ -BPSK, $\pi/2$ -QPSK	625.6 Mbps to 2503 Mbps

Πίνακας Γ: Παρουσίαση MCS και οι δυνατότητές τους σε ρυθμό μετάδοσης

Ο Πίνακας Γ παρουσιάζει την όλους τους δυνατούς συνδυασμούς κωδικοποίησης και μορφοποίησης, ενώ υπονοείται η σειρά και οι εκάστοτε δυνατότητες που είναι διαθέσιμες ανάλογα τον σκοπό.

Είναι σημαντικό για την εύρυθμη και αξιόπιστη λειτουργία της σύνδεσης να είναι το κανάλι ελέγχου όσο το δυνατόν πιο σταθερό. Ο σκοπός του Control PHY είναι να παρέχει όλα τα δεδομένα ελέγχου για την κατάσταση του δικτύου και την ποιότητα της σύνδεσης ώστε οι πομποδέκτες να προσαρμόζονται και να μην πέφτει η σύνδεση. Επομένως είναι προφανής η επιλογή μεγάλου ρυθμού κωδικοποίησης και απλοϊκής διαμόρφωσης σε βάρος του ρυθμού μετάδοσης που είναι χαμηλός.

Ωστόσο δεν είναι τόσο προφανής η ανάγκη για τόσα διαφορετικά MCS. Το πρωτόκολλο 802.11ad παρέχει την δυνατότητα για χρήση από μια σειρά από διαφορετικές συσκευές με διαφορετικές δυνατότητες τόσο επεξεργαστικής δύναμης όσο και διαθέσιμης ενέργειας. Επομένως υπάρχουν επιχειρήματα υπέρ και κατά του εκάστοτε είδους διαμόρφωσης. Σε καθένα από τα SC, OFDM, LPSC το αντίστοιχο MCS που επιλέγεται έχει συγκεκριμένο ζεύγος κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, που όταν συνδυαστούν παρέχουν στον χρήστη μέσα από την αύξηση της ποιότητας της ζεύξης, μεγαλύτερο throughput.

### **3.3.2.1 Control PHY**

Το MCS0 είναι με διαφορά ο πιο ισχυρά κωδικοποιημένος και συνεπώς χαμηλός σε throughput τρόπος μετάδοσης. Σκοπός του είναι αποκλειστικά η μετάδοση δεδομένων για το κανάλι ελέγχου, και γι' αυτό αναφέρεται και σαν Control PHY (CPHY).

Η σταθερότητα του PHY είναι δεδομένη από την χρήση διαφορεικής κωδικοποίησης και την χρήση διαμόρφωση BPSK και διασποράς κώδικα. Η διαφορεική κωδικοποίηση περιορίζει την ανάγκη για διαρκεί έλεγχο του διαύλου, δηλαδή αν είναι καταλυμένος ή όχι, η διασπορά κώδικα συνεισφέρει θεωρητικά στο κέρδος της κεραίας μέχρι και 15dB, ενώ η BPSK είναι πολύ ανθεκτική στον θόρυβο.

### **3.3.2.2 Single Carrier PHY**

Το SCPHYs χρησιμοποιούν διαμόρφωση μονού φέροντος. Συγκεκριμένα υλοποιούν διαμορφώσεις BPSK, QPSK και 16-QAM σε κατεσταλμένα φέροντα κοντά στην κεντρική συχνότητα και με σταθερό ρυθμό μετάδοσης στα 1.76 Gsymbols/s. Τα διαθέσιμα MCSs είναι παρεμφερή στην διαδικασία κωδικοποίησης του καναλιού, ενώ διαφέρουν στην επιλογή του λόγου προστασίας λαθών και την πυκνότητα του αστερισμού διαμόρφωσης. Αλλάζοντας λοιπόν τις παραμέτρους αυτές, υπάρχει η δυνατότητα για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής σχέσης μεταξύ throughput και ευρωστίας της σύνδεσης.

### **3.3.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiplex PHY**

Όπως σε όλα τα OFDM σχήματα διαμόρφωσης, το OFDMPHY χρησιμοποιεί διαμόρφωση με πολλαπλά φέροντα για την παροχή υψηλής πυκνότητας αστερισμό διαμόρφωσης και πολύ υψηλό throughput σε σχέση με το SCPHY. Ομοίως με το SCPHY, τα MCSs διαφέρουν μόνο ως προς τον λόγο διόρθωσης λαθών και το είδος διαμόρφωσης με στόχο το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αντιθέτως, το OFDMPHY έχει σημαντικό πλεονέκτημα ως προς την ενέργεια που καταναλώνεται για κάθε bit που μεταδίδεται, καθώς είναι πιο ανθεκτικό στην πολυδιαδρομική διάδοση και μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο throughput για δεδομένο κανάλι.

Η διαμόρφωση SQPSK (διασπαρμένη QPSK) περιλαμβάνει ζευγάρια OFDM φερόντων συχνοτήτων μέσα στα οποία τα δεδομένα είναι διαμορφωμένα. Τα δύο φέροντα απέχουν όσο το δυνατόν περισσότερο φασματικά, με στόχο να βελτιώσουν την αντοχή του συστήματος στην επιλεκτική ως προς την συχνότητα διασπορά.

### **3.3.2.4 Low Power Single Carrier PHY**

Αυτό το είδος PHY χρησιμοποιεί επίσης διαμόρφωση μονού φέροντος και δημιουργήθηκε με στόχο την μείωση την κατανάλωση ενέργειας σε συσκευές με περιορισμένες

δυνατότητες στην μπαταρίας τους, που δεν θα μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στην επεξεργασία των υπόλοιπων PHYs.

### 3.3.3 Διαχείριση του Διαγράμματος Ακτινοβολίας

Το μικρό μέγεθος μιας κεραίας που λειτουργεί στα 60 GHz, και οι χαμηλού κόστους τεχνικές κατασκευής τους εξαιτίας της ανάπτυξης της τεχνολογίας, κάνουν την δημιουργία κεραιών, που θα έχουν την δυνατότητα μεταβολής του διαγράμματος ακτινοβολίας, εμπορικά εφικτή. Η μεταβολή του διαγράμματος ακτινοβολίας επιτρέπει σε ένα ζεύγος συσκευών να “εκπαιδεύσουν” τις κεραιές τους, ώστε να μεγιστοποιήσουν την σταθερότητα της σύνδεσης.

Υπάρχει λοιπόν η δυνατότητα να προστεθεί στο τέλος του πακέτου προαιρετικά το πεδίο beam forming training. Το πεδίο αυτό είναι κοινό για όλα τα είδη πακέτων και υλοποιείται με την χρήση διαμορφωμένων και επαναλαμβανόμενων σειρών Galoy, και οι βασικές του λεπτομέρειες καθορίζονται από τα πεδία Training Length και Packet Type στην επικεφαλίδα.

Η διαδικασία του Beam Forming είναι μια σειρά από μεταδόσεις πακέτων που είναι προσαρτημένα στα πακέτα δεδομένων όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα. Στόχος είναι να μεταβάλλουν το διάγραμμα ακτινοβολίας του πομπού ή/και του δέκτη σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση ανθρώπων, του πομπού ή του δέκτη μέσα στο χώρο ή οποιαδήποτε μεταβολή του περιβάλλοντος που επηρεάζουν την LOS (line-of-sight) επικοινωνία. Τη διαδικασία μπορεί να εκκινήσει οποιαδήποτε από τις δύο μεριές στέλνοντας αίτηση για διαμόρφωση της δέσμης, ενώ λήγει όταν κρίνει η συσκευή που άρχισε την διαδικασία ότι δεν χρειάζεται περαιτέρω εκπαίδευση και δεν εκκρεμούν άλλες αιτήσεις.

### 3.3.4 Ευαισθησία Δέκτη

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η συνήθης ισχύς εκπομπής δεν ξεπερνά τα +10dBm, αλλά εξαρτάται απόλυτα από τους κανονισμούς κάθε χώρας. Ως κριτήριο ποιότητας της σύνδεσης κρίνεται για το MCS0 (Control PHY) ότι ρυθμός απώλειας πακέτων δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% του μήκους 256 οκτάδων PSDU, ενώ για τα υπόλοιπα MCSs δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% του μήκους 4096 οκτάδων PSDU. Το PSDU (Physical layer Service Data Unit) είναι όλη η πληροφορία που φθάνει από το ανώτερα επίπεδα του συστήματος αναφοράς OSI στο φυσικό επίπεδο, και το οποίο αφού προστεθούν η επικεφαλίδα και το προοίμιο αποτελεί το πακέτο που εκπέμπεται. Προϋπόθεση για να ελεγχθούν τα παραπάνω είναι η ισχύς του σήματος στο δέκτη να είναι πάνω από τα επίπεδα εισόδου που αναφέρονται στον Πίνακα Δ.

MCS index	Receiver sensitivity (dBm)
0	-78
1	-68
2	-66
3	-65
4	-64
5	-62
6	-63
7	-62
8	-61
9	-59
10	-55
11	-54
12	-53
13	-66
14	-64
15	-63
16	-62
17	-60
18	-58
19	-56
20	-54
21	-53
22	-51
23	-49
24	-47
25	-64
26	-60
27	-57
28	-57
29	-57
30	-57
31	-57

Πίνακα Δ : Ευαισθησία Δέκτη σε dBm

## **Βιβλιογραφία:**

[1] “Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained”, Agilent Technologies Inc., May 30, 2013

[2] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band IEEE Computer Society





## Κεφάλαιο 4

### Το σενάριο προσομοίωσης

---

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μία περιληπτική περιγραφή του σεναρίου προσομοίωσης στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα αναλύεται λεπτομερώς το μοντέλο Moving Extended Cell, μελετάται ο τρόπος λειτουργίας ενός κυψελωτού δικτύου πρόσβασης RoF που υλοποιεί το μοντέλο και δίνεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση. Στόχος είναι η μελέτη του δικτύου και ως προς την απώλεια της κλήσης και την πιθανότητα απώλειας πακέτων.

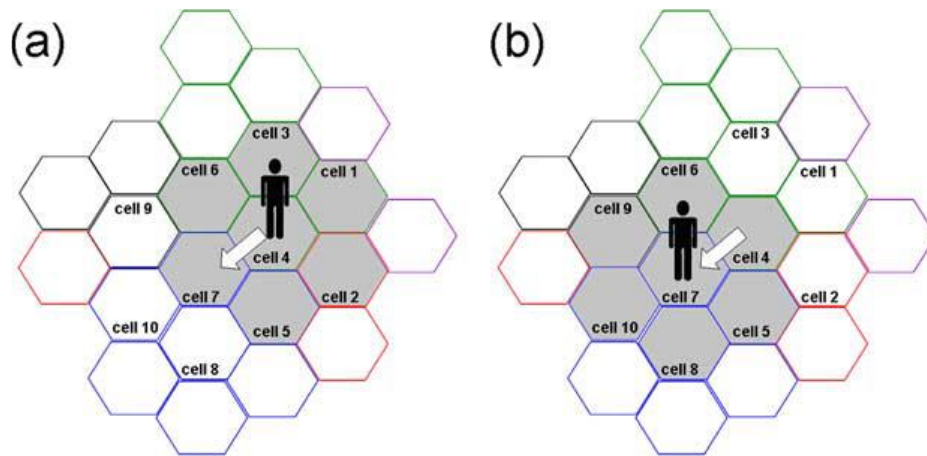
#### 4.1 Το Μοντέλο Moving Extended Cell

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η μετάδοση στα 60 GHz είναι η παροχή συνεχούς επικοινωνίας. Οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο IEEE 802.11ad έχουν μέγιστη ακτίνα κάλυψης 10m, δηλαδή περίπου το μέγεθος ενός μεγάλου δωματίου μιας εταιρείας, επομένως είναι υπαρκτή η ανάγκη για πολλές και συνεχείς διαπομπές των κλήσεων. Επιπλέον δεδομένης της μικρής διεισδυτικότητας της ακτινοβολίας στα 60 GHz στους τοίχους, η επικάλυψη των κυψελών μικραίνει δραματικά, έτσι μικραίνει πολύ το χρονικό περιθώριο για την πραγματοποίηση της διαπομπής, και η συνεχής παροχής της υπηρεσίας, δηλαδή το να μην “πέσει” η κλήση καθίσταται πιο δύσκολη.

Για την λύση του συγκεκριμένου προβλήματος σε συστήματα που στηρίζονται σε πικοκυψέλες έχουν προταθεί περίπλοκες ιεραρχικές αρχιτεκτονικές που εμπλέκουν έως και 3 επίπεδα του OSI και δημιουργούν ομάδες κυψελών [3] ή Εικονικά Δίκτυα Κυψελών (Virtual Cell Networks) [4],[5]. Μια άλλη προσέγγιση είναι ο μηχανισμός δυναμικής εκχώρησης χωρητικότητας (Dynamic Capacity Allocation) που εμπλέκει τόσο το φυσικό επίπεδο όσο και το επίπεδο δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιείται δρομολόγηση μήκους κύματος [6] ενώ στο επίπεδο δικτύου χρησιμοποιούνται στατικά μοντέλα όπως το Extended Cell (επεκτεταμένη κυψέλη) και το Virtual Cellular Zones (εικονικές ζώνες κυψελών). Ωστόσο και τα δύο μοντέλα βασίζονται σε προκαθορισμένες σταθερές ομάδες γειτονικών κυψελών, ώστε να βελτιώσουν την περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης και να μειώσουν την πιθανότητα να “πέσει” η κλήση ή όπως αναφέρεται στην αγγλική ορολογία call dropping.

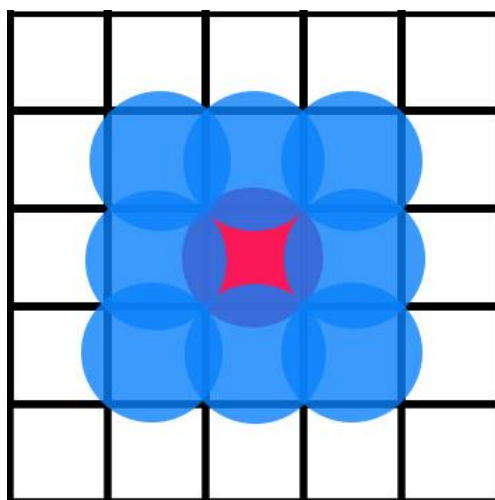
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο Moving Extended Cell, που παρέχει συνεχή επικοινωνία και δίνει την δυνατότητα για υψηλή κινητικότητα στον χρήστη σε ευρυζωνικά δίκτυα Radio-over-Fiber που λειτουργούν στα 60 GHz, ανεξάρτητα από τον τρόπο κίνησης του χρήστη. Το μοντέλο αυτό ακολουθεί την λογική των Extended Cells αλλά προσαρμόζεται στην κινητικότητα του χρήστη και οι κυψέλες τον “ακολουθούν”, διαμορφώνοντας το Moving Extended Cell. Με αυτόν τον τρόπο ο τελικός χρήστης είναι περιτριγυρισμένος πάντα από μια ομάδα κυψελών, οι οποίες εκπέμπουν τα ίδια δεδομένα στην ίδια συχνότητα. Στο Σχήμα 1.1 δίνετε μια σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου MEC, όπου απεικονίζεται ένας κινούμενος χρήστης σε ένα κυψελωτό δίκτυο που αποτελείται από πικοκυψέλες. Κάθε κυψέλη αντιστοιχεί σε ένα Remote Access Unit (όπως

αυτό ορίστηκε στο Κεφάλαιο 1) και η γκρι περιοχή αντιπροσωπεύει την ομάδα κυψελών, που δημιουργούν το Extended Cell και εκπέμπουν ταυτόχρονα τα δεδομένα κάθε χρήστη στην ίδια συχνότητα εκπομπής.



Σχήμα 4.1: Το Μοντέλο Moving Extended Cell

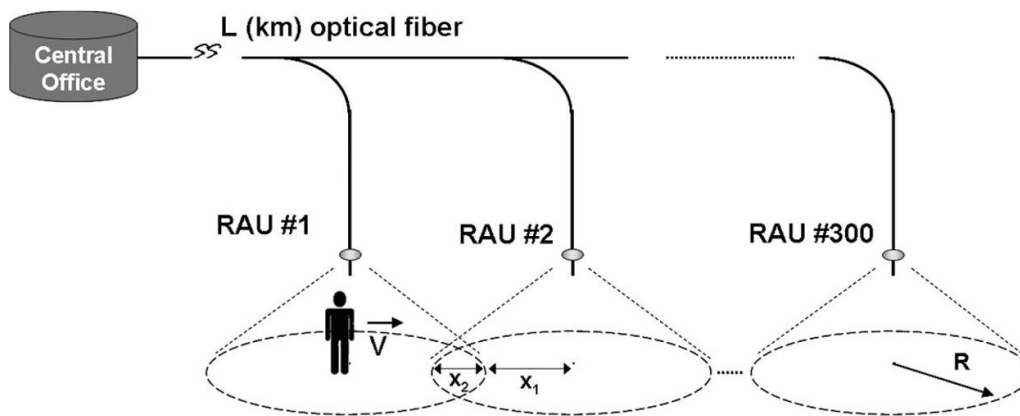
Όπως φαίνεται λοιπόν, το Extended Cell περιλαμβάνει την κυψέλη του χρήστη και περιτριγυρίζεται, στην συγκεκριμένη περίπτωση, από άλλες 6 κυψέλες. Έτσι διασφαλίζετε η επικοινωνία του χρήστη με τον CO για κάθε κατεύθυνση κίνησης όταν ο χρήστης εγκαταλείπει την κυψέλη, εν προκειμένω την κυψέλη #4. Ωστόσο όταν ο χρήστης εισέλθει σε μία κυψέλη, το Extended Cell ξαναδημιουργείται για να δημιουργήσει μία νέα ομάδα 7 κυψελών γύρω από τον χρήστη. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και στο Σχήμα 1.1(b) όπου ο χρήστης εγκαταλείπει την κυψέλη #4 και εισέρχεται στην κυψέλη #7. Έτσι την στιγμή που ο χρήστης λάβει το beacon signal από την κυψέλη #7 ενεργοποιείται ο μηχανισμός του Moving Extended Cell και η συγκεκριμένη κυψέλη γίνεται το κέντρο της νέας ομάδας που περιλαμβάνει τις κυψέλες #3, #4, #6, #7, #8, #9 και #10, ελευθερώνοντας φάσμα από τις κυψέλες #1, #2 και #5. Επομένως γίνεται κατανοητό πως προσαρμόζεται το Extended Cell στο κινητικό μοτίβο του χρήστη, ο οποίος βρίσκεται πάντα περικυκλωμένος από κυψέλες που μεταδίδουν τα ίδια δεδομένα, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο συνεχή επικοινωνία ανεξάρτητα από τον τρόπο που κινείται ο χρήστης.



Σχήμα 4.2: Το πλέγμα που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση

Στην προσομοίωση που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτή της διπλωματικής εργασίας το σενάριο περιλαμβάνει ένα τετραγωνικό πλέγμα, που αντιπροσωπεύει την περιοχή που πρέπει να υπάρχει κάλυψη της δεδομένης υπηρεσίας, και είναι χωρισμένο σε τετράγωνα ίσου εμβαδού περιοχές στο κέντρο των οποίων είναι τοποθετημένες οι κεραιές εκπομπής σε ύψος 3,5 μέτρων. Η επιλογή του ύψους είναι σημαντική όπως θα αναλυθεί αργότερα και η επιλογή αποτελεί μια εκτίμηση για το μέσο ύψος ενός δωματίου. Η ακτίνα ραδιοκάλυψης είναι τέτοια ώστε να καλύπτει πλήρως της τετραγωνική περιοχή στο κέντρο της οποίας είναι τοποθετημένη η κεραία. Η κυψελωτή δομή του ασύρματου δικτύου, όπως αναλύθηκε παραπάνω, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.

Ακόμα εξετάζονται δύο τρόποι κίνησης του χρήστη. Ο πρώτος προσομοιώνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, ενώ ο δεύτερος τυχαία κατεύθυνση κίνησης με σταθερή ταχύτητα. Οπότε γίνεται κατανοητό ότι ανάλογα το σημείο εκκίνησης του χρήστη και τη διεύθυνση κίνησης ο χρόνος που είναι διαθέσιμος για να υλοποιηθεί το Moving Extended Cell μοντέλο και να δημιουργηθεί η νέα ομάδα κυψελών διαφέρει.



Σχήμα 4.3: Ευθύγραμμη κίνηση του χρήστη σε ένα σύστημα RoF

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός συστήματος RoF, για ένα χρήστη που κινείται ευθύγραμμα. Επιλέγεται αυτό το μοντέλο κίνησης για να είναι πιο κατανοητή η ανάλυση χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα της τυχαίας κίνησης. Επικεντρώνοντας σε ένα κινούμενο χρήστη και την μετάβασή του χρήστη από μία κυψέλη σε μία άλλη, το μήκος των οπτικών ζεύξεων μεταξύ του σταθμού βάσης και δύο γειτονικών κυψελών μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο καθώς η ακτίνα  $R$  της κυψέλης είναι αρκετά μικρότερη από το μήκος  $L$  των οπτικών ινών.

Ακόμα παρατηρούνται 2 είδη περιοχών στο Σχήμα 1.3. Οι πρώτες είναι οι ανοιχτόχρωμες που είναι εκείνα τα σημεία του πλέγματος που καλύπτονται από μία και μόνο κεραία. Οι υπόλοιπες, που είναι σκουρόχρωμες, είναι τα σημεία εκείνα του πλέγματος που καλύπτονται από περισσότερες από μία κεραιές και ονομάζονται περιοχές επικάλυψης. Λόγω της γεωμετρίας την διάταξης, ο μέγιστος αριθμός που εξυπηρετεί ένα χρήστη είναι δύο.

## 4.2 Ο τρόπος λειτουργίας του RoF Συστήματος

Έστω ότι ένας χρήστης βρίσκεται σε ένα τυχαίο σημείο του πλέγματος. Σε αυτό το σημείο, ο χρήστης “ανήκει” σε μία κεραία. Με το όρο “ανήκει” σε κάποια κεραία, εννοείται ότι αυτή η κεραία είναι η τελευταία από την οποία ο χρήστης έλαβε beacon signal, και είναι η κεντρική κεραία του Extended Cell που τον περιβάλλει.

Τα σήματα ελέγχου (beacon signals) είναι πακέτα μικρού μεγέθους που εκπέμπονται από τον CO και έχουν στόχο τον εντοπισμό του χρήστη ώστε να εξυπηρετηθεί από την κατάλληλη κεραία-RAU. Τα beacon signals μεταδίδονται κάθε ένα δευτερόλεπτο, δηλαδή σε χρονικό διάστημα  $T_b=1s$  και θεωρούνται συγχρονισμένα για όλες τις κεραίες, καθώς έχουν το πλεονέκτημα του απομακρυσμένου και κοινού για όλες τις κεραίες ελέγχου μέσω του CO.

Έστω, λοιπόν, ότι ο χρήστης βρίσκεται αρχικά στην RAU #1 και κινείται με σταθερή ταχύτητα μέσα στο πλέγμα. Όταν διασχίσει τα όρια μια καινούργιας RAU, έστω RAU#2 θα αρχίσει να λαμβάνει δεδομένα και από την καινούργια. Συνεχίζοντας την πορεία του μπορεί είτε να γυρίσει προς την RAU #1 είτε να προχωρήσει προς την RAU #2. Στην περίπτωση που προχωρήσει προς την RAU #2 θα συνεχίσει να λαμβάνει κανονικά τα δεδομένα και ο χρήστης δεν θα καταλάβει διαφορά στην επικοινωνία του, αλλά σημαντική παράμετρος είναι η χρονική στιγμή που θα εκπεμφθεί το επόμενο beacon signal. Αν την στιγμή που εκπεμφθεί το beacon signal ο χρήστης βρίσκεται στην RAU #2 θα απαντήσει με ένα ACK πακέτο, δηλώνοντας την παρουσία του, και θα αρχίσει η διαδικασία διαμόρφωσης του νέου Extended Cell. Ωστόσο αν ο χρήστης εγκαταλείψει την RAU #2 και κινηθεί προς μια κυψέλη που δεν ανήκει στο Extended Cell με κέντρο την RAU #2 πριν λάβει το beacon signal, η κλήση θα “πέσει” καθώς ο χρήστης, μέχρι να εντοπιστεί ξανά από τον CO, είναι σαν να μην υπάρχει στο σύστημα. Ωστόσο υπάρχει και η πιθανότητα να μην συμβεί τίποτα από τα παραπάνω η κλήση να διατηρηθεί κανονικά αλλά να έχουμε απώλειες πακέτων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, κάτι δυσάρεστο για τον χρήστη.

## 4.3 Παράμετροι Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)

### 4.3.1 Πιθανότητα απόρριψης κλήσης (Call drop probability)

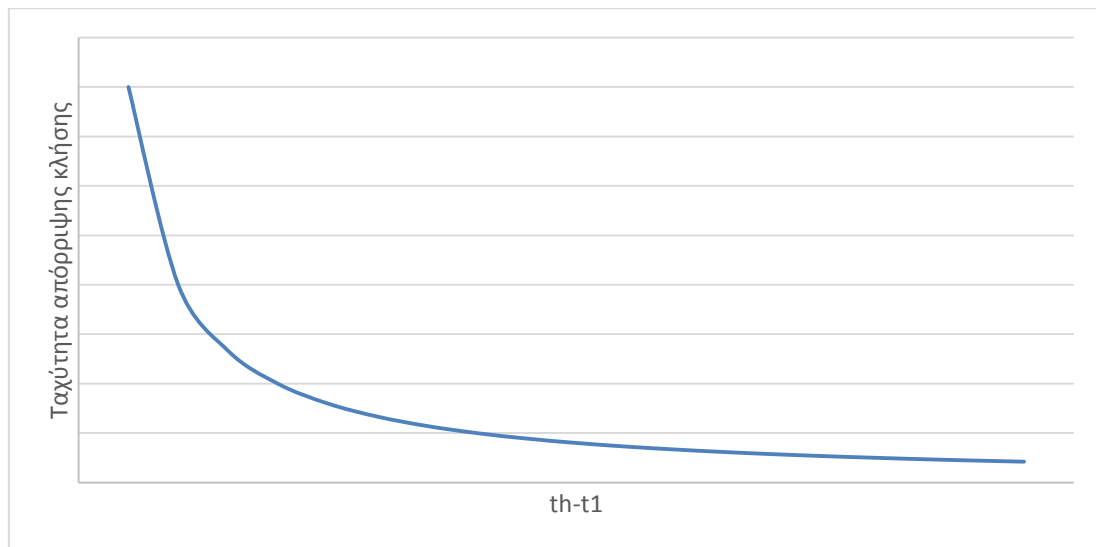
Από την ανάλυση της λειτουργίας ενός συστήματος RoF στην ενότητα 4.2, υπάρχουν 2 παράμετροι που επηρεάζουν την πιθανότητα να πέσει η κλήση, στην διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτές είναι ο χρόνος που θα παραμείνει ο χρήστης μέσα στην νέα RAU και η διαδρομή που θα διανύσει σε αυτή. Όπως γίνεται κατανοητό αυτές μπορούν να εκφραστούν μέσω της ταχύτητας του χρήστη, η οποία, αν αυτός κινείται ευθύγραμμα, εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$V = \frac{\Delta x}{t_h - t_1} \text{ m/s}, \quad (4.1)$$

Όπου  $\Delta x$  είναι η απόσταση που καλύπτει μέσα στην RAU,  $t_h$  η χρονική στιγμή που λαμβάνει ο χρήστης το beacon signal όταν εισέλθει στην νέα RAU και  $t_1$  η χρονική στιγμή που εισέρχεται σε αυτή. Στην ιδανική περίπτωση που ο χρήστης περνάει από το κέντρο της RAU μπορεί να οριστεί και η ταχύτητα απόρριψης κλήσης, δηλαδή η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να κινηθεί ένας χρήστης.

$$V = \frac{2R}{t_h - t_1} m/s, \quad (4.2)$$

Όπως γίνεται λοιπόν κατανοητό, για δεδομένη ακτίνα  $R$  της κυψέλης όσο μικραίνει το χρονικό διάστημα που είναι διαθέσιμο για την αναγνώριση του χρήστη από την νέα RAU και τον σχηματισμό του νέου Extended Cell, τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η ταχύτητα που κινείται ο χρήστης, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1. Σε ανάποδη ανάγνωση, η μεγάλη ταχύτητα κίνησης του χρήστη απαιτεί να γίνει η ανίχνευση του χρήστη από την νέα RAU σχεδόν ταυτόχρονα με την είσοδό του. Ωστόσο χρονικές στιγμές  $t_h$  και  $t_1$  είναι τυχαίοι αριθμοί και η πιθανότητα να συμπίπτουν είναι μικρή. Συνεπώς η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του χρήστη, καθώς το σύστημα δεν προλαβαίνει να προσαρμοστεί στο κινητικό του μοτίβο.



Γράφημα 1: Ταχύτητα απόρριψης κλήσης σε σχέση με το χρονικό διάστημα  $t_h-t_1$

### 4.3.2 Ρυθμός απώλειας πακέτων

Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνει ένας χρήστης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο ρυθμός απώλειας πακέτων. Όπως αναφέρθηκε και την ενότητα 4.2 υπάρχει πιθανότητα η κλήση να παραμείνει ενεργή, αλλά να χαθούν πακέτα με αποτέλεσμα διαλείψεις στην παρεχόμενη υπηρεσία.

Κατά την διάρκεια της μετάβασης από μία κυψέλη στη γειτονική της, ο χρήστης δεν θα αντιληφθεί κάποια διαφορά στην ποιότητα υπηρεσίας, καθώς και οι δύο κυψέλες μεταδίδουν τα ίδια πακέτα, ως μέλη του αρχικού Extended Cell. Πακέτα θα απωλεστούν μόνο στην περίπτωση που ο κινούμενος χρήστης εγκαταλείψει και την νέα κυψέλη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία εκ νέου διαμόρφωσης του Extended Cell. Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας διαμόρφωσης του νέου Extended Cell ισούται με :

$$T_{total} = T_{proc} + \Delta T_{update} + \frac{L}{\left(\frac{c}{n}\right)} + T_{prop} \text{ sec}, \quad (4.3)$$

όπου  $T_{proc}$  είναι ο χρόνος επεξεργασίας στον κεντρικό σταθμό,  $\Delta T_{update}$  είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από την στιγμή που λήφθηκε το beacon signal στο κινητικό τερματικό μέχρι την ενημέρωση του CO για την επικείμενη μεταβολή του Extended Cell,  $T_{prop}$  είναι χρόνος διάδοσης του κύματος από την κεραία ως το κινητό τερματικό και  $L/c/n$  είναι ο χρόνος διάδοσης των πακέτων από τον κεντρικό σταθμό ως τις νέες κυψέλες του Extended Cell. Με  $c$  συμβολίζεται η ταχύτητα του φωτός στο κενό και το  $n$  υποδηλώνει το συντελεστή διάθλασης της οπτικής ίνας. Ο κεντρικός σταθμός ενημερώνεται για την έναρξης της διαδικασίας μεταβολής του Extended Cell μέσω του ACK σήματος που στέλνει το κινητό τερματικό, ως απάντηση στο beacon signal, διαμέσου της νέας κυψέλης, που μόλις εισήλθε, ισούται δηλαδή με την καθυστέρηση διάδοσης του ACK. Στο συνολικό λοιπόν χρόνο  $\Delta T_{update}$  πρέπει να συνυπολογιστεί ο χρόνος από το τερματικό μέχρι την κεραία και ο χρόνος από την κεραία μέχρι τον κεντρικό σταθμό.

Αν υποτεθεί ότι  $T_{inacell}$  είναι ο χρόνος που ο χρήστης παραμένει σε μία κυψέλη, αφού λάβει το beacon signal, τότε οι απώλειες πακέτων θα είναι μηδενικές εφόσον  $T_{total} < T_{inacell}$ . Ωστόσο εάν το  $T_{total} > T_{inacell}$ , για όλο το χρονικό διάστημα  $T_{total} - T_{inacell} = T_{loss}$  τα πακέτα που εκπέμπονται, θα χάνονται. Σημαντική προϋπόθεση για να χαθούν πακέτα και να ισχύσουν τα παραπάνω είναι ο χρήστης να κινηθεί προς μια κυψέλη που δεν ανήκει στο προϋπάρχον Extended Cell.

Εν συντομία, ο χρόνος  $T_{loss}$  εξαρτάται από το αν θα προλάβει ο κεντρικός σταθμός να ενημερωθεί για την μεταβολή του Extended Cell πριν ο χρήστης εγκαταλείψει την υπάρχουσα κυψέλη. Έτσι αν αυτό πραγματοποιηθεί, τα πακέτα θα μεταδίδονται ήδη προς τις γειτονικές κυψέλες και ο χρήστης δεν θα αντιληφθεί κάποια μεταβολή στην ποιότητα υπηρεσίας, η οποία και θα οφείλεται σε απώλειες πακέτων.

Μαθηματικά ο χρόνος απώλειας πακέτων  $T_{loss}$ , μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$T_{loss} = T_{proc} + \frac{L}{c/n} + T_{prop} + \Delta T_{update} - T_{inacell} \quad sec, \quad (4.4)$$

Όπου  $\Delta T_{update} = \frac{L}{c/n} + T_{prop} = \frac{L}{c/n} + \frac{R}{c * \cos\theta}$  καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι ο χρόνος από την λήψη του beacon signal στο κινητό τερματικό μέχρι την λήψη του ACK signal στον κεντρικό σταθμό. Δεδομένου λοιπόν ότι το ACK πακέτο είναι αρκετά μικρό, ο χρόνος μετάδοσης του είναι ίσος με το χρόνο διάδοσης του κύματος. Ακόμα,  $T_{prop}$  επειδή υποθέτουμε LOS επικοινωνία μεταξύ κεραίας και τερματικού είναι ίσο με την απόσταση προς την ταχύτητα του φωτός, όπου  $\theta$  η γωνία μεταξύ κινητού τερματικού και κεραίας στο οριζόντιο επίπεδο. Έτσι λοιπόν καταλήγουμε στην σχέση:

$$T_{loss} = T_{proc} + 2 \frac{L}{c/n} + 2 \frac{R}{c * \cos\theta} - T_{inacell} \quad sec \quad (4.5)$$

Θεωρώντας ότι τα πακέτα μεταδίδονται με σταθερό ρυθμό μετάδοσης (Constant Bit Rate - CBR), τότε οι συνολικές απώλειες πακέτων μπορούν εύκολα να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$packetloss = T_{loss} * CBR \quad (4.6)$$

## 4.4 Ο Αλγόριθμος Προσομοίωσης

Στα παρακάτω αναφέρονται τα βασικά στοιχεία του αλγόριθμου που υλοποίησε την προσομοίωση της διάταξης που αναφέρθηκε παραπάνω.

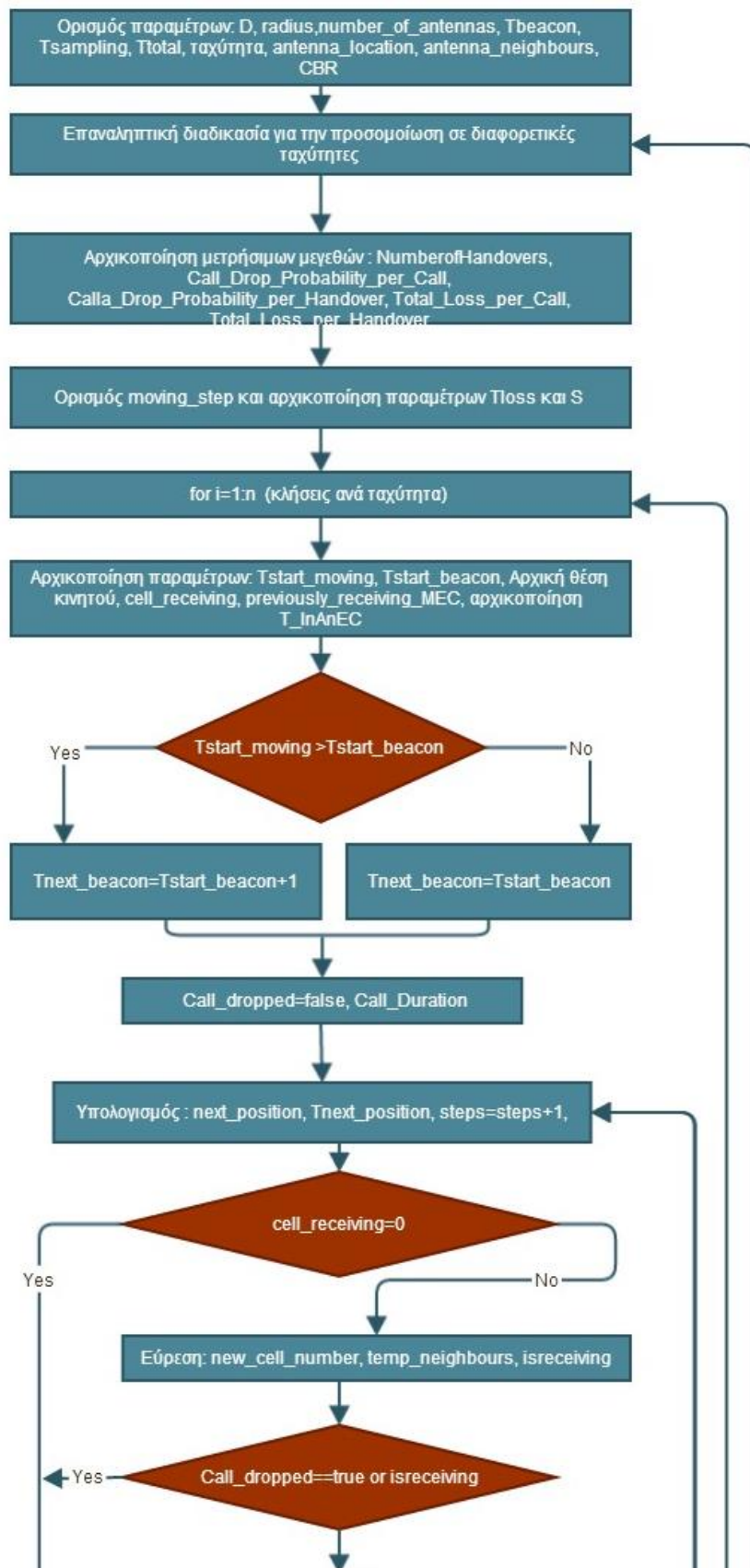
Βασικά στοιχεία της προσομοίωσης είναι η δημιουργία του τετραγωνικού σχήματος όπως αυτό έχει οριστεί στην παράγραφο 4.2 και συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.2, το κινητικό μοτίβο του χρήστη, όπου κινείται πάντα με σταθερό βήμα και ο έλεγχος από ποια κεραία καλύπτεται.

Όπως φαίνεται και σχηματικά στα Σχήματα 4.4(α) και 4.4(β) στην αρχή δηλώνονται όλα τα σταθερά μεγέθη που χρησιμοποιούνται καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτά είναι:

- **D:** Ορίζει την απόσταση μεταξύ των κεραιών. Στην προσομοίωση ισούται με  $D = 7$
- **Radius:** Η ακτίνα κάλυψης/ Η έκταση κάθε κυψέλης.  $radius = D * \frac{\sqrt{2}}{2}$
- **number\_of\_antennas:** Είναι ο αριθμός των κυψελών στην περιοχή που εξετάζεται. Για την ορθή λειτουργία του προγράμματος προσομοίωσης χρειάζεται να είναι τέλειο τετράγωνο.  $number\_of\_antennas = 49$
- **Tbeacon:** Είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο beacon σημάτων. Έχει τεθεί ίσο με  $T_{beacon} = 0.5s$
- **Tsampling:** Είναι το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Η τιμή του είναι  $T_{sampling} = 0.0005s$  και εξαρτάται από την τιμή του  $T_{total}$  καθώς πρέπει να είναι αρκετά μικρότερη.
- **Ttotal :** Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της δημιουργίας του νέου EC. Έχει υπολογιστεί με βάση τον τύπο της παραγράφου 4.4.2 και αναλυτικά τα μεγέθη φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

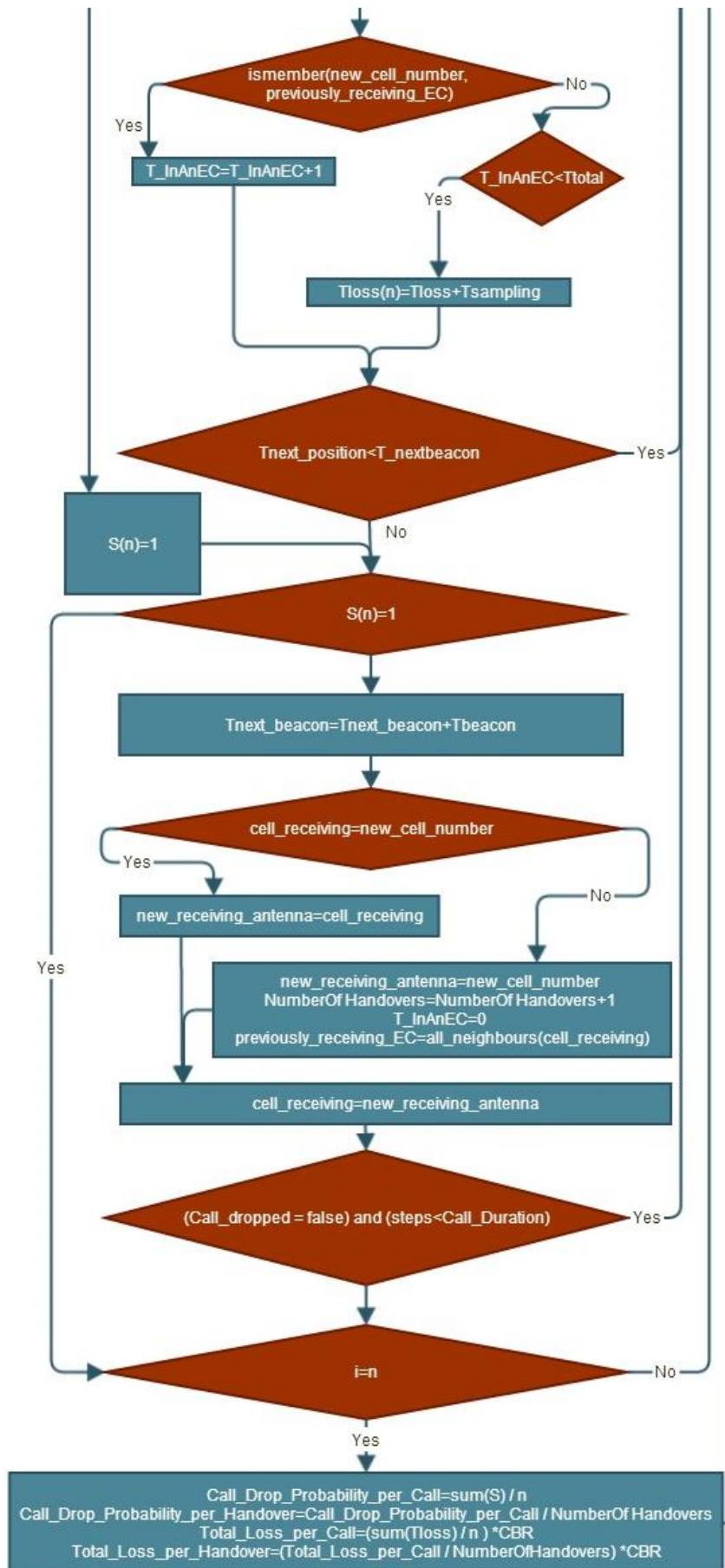
Μέγεθος	Τιμή
$T_{proc}$	0,001 sec
$L$	1km
$c$	$3*10^8$ m/s
$n$	1,50
$radius/2$	2,4748737m
Ύψος κεραιάς	3,5 m
Ύψος Κινητού	1,7 m
$T_{total}$	0,00101 sec

Όπου  $L$  είναι το μήκος της οπτικής ίνας προς τις κεραιές και θεωρείται το ίδιο για όλες τις κυψέλες. Ακόμα η τιμή του δείκτη διάθλασης της οπτικής ίνας έχει επιλεγεί σύμφωνα με [3] ενώ το ύψος της κεραιάς είναι στα 3.5 μέτρα, όσο δηλαδή το ύψος ενός δωματίου. Τέλος προσεγγιστικά έχουμε θέσει τον χρόνο επεξεργασία στον κεντρικό σταθμό ίσο με 1 msec.



Σχήμα 4.4 (α) : Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου





Σχήμα 4.4 (β) : Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου

- **Ταχύτητα** : Είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται ο χρήστης. Όλα τα μεγέθη που μετριοούνται δίνονται σε συνάρτηση με την ταχύτητα καθώς είναι αυτή που χαρακτηρίζει την κινητικότητα του χρήστη και πόσο εύκολο ή δύσκολο είναι η “παρακολούθησή” του από το δίκτυο. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης έχει οριστεί το σύνολο  $[0,5 \ 10]m/sec$ .
- **antenna\_location**: Ανάλογα με τις παραμέτρους D, radius και number\_of\_antennas δημιουργείται αυτόματα το πλέγμα κυψελών μέσα στο οποίο κινείται ο χρήστης και θέτει τις συντεταγμένες των κεραιών. Από εδώ και στο εξής η κεραιά είναι το σημείο αναφορά στο σύστημά καθώς με βάση της συντεταγμένες της και τις συντεταγμένες του κινητού είναι δυνατό να βρεθεί από ποιες κεραιές λαμβάνει κάθε φορά.
- **antenna\_neighbours**: Για κάθε κεραιά υπολογίζει και καταχωρεί σε ένα πίνακα το EC που έχει σαν κέντρο την εκάστοτε κεραιά.
- **CBR**: Είναι ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Έχουν γίνει δύο εφαρμογές του πρωτοκόλλου 802.11ad. Η πρώτη αφορά την χρήση του ασύρματου δικτύου για VoIP τηλεφωνία κινούμενων χρηστών με μέγιστη απαίτηση τα 87,2kbps [4] και η δεύτερη είναι εικονική και χρησιμοποιεί το maximum των δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου ώστε να προσφέρει στον χρήστη ταχύτητες μέχρι 6,75Gbps.

Στην συνέχεια και εφόσον έχει οριστεί η ταχύτητα με την οποία θα τρέξει κάθε φορά η προσομοίωση, ορίζεται το βήμα κίνησης του χρήστη και αρχικοποιούνται όλα τα μεγέθη προς μέτρηση και τίθεται ο αριθμός των επαναλήψεων.

- **moving\_step**: Καθώς στο MATLAB δεν υπάρχει η έννοια της ταχύτητας, δημιουργείται μαθηματικά μέσα από την μεταβλητή moving\_step. Επομένως ορίζεται η μεταβολή της θέσης του για κάθε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, στην προκειμένη περίπτωση  $T_{sampling}$ :  $moving\_step = ταχύτητα * T_{sampling}$
- **Call\_Drop\_Probability\_per\_Handover**: Υπολογίζει την πιθανότητα να πέσει η κλήση κάθε φορά που ο χρήστης αλλάζει κυψέλη και πραγματοποιείται μεταβολή του EC.
- **Call\_Drop\_Probability\_per\_Call**: Είναι η πιθανότητα να πέσει η κλήση. Κατά την διάρκεια μια κλήσης ο χρήστης μπορεί να κινηθεί μέσα από πολλές κυψέλες και κάθε φορά που αλλάζει κυψέλη υπάρχει η πιθανότητα **Call\_Drop\_Probability\_per\_Handover**: Δεδομένης λοιπόν της διάρκειας μια κλήσης είναι δυνατός ο υπολογισμός της πιθανότητας να πέσει η κλήση.
- **Total\_Loss\_per\_Handover**: Είναι οι συνολικές απώλειες σε δεδομένα κάθε φορά που ο χρήστης αλλάζει κυψέλη και πραγματοποιείται μια διαπομπή (handover).
- **Total\_Loss\_per\_Call**: Όμοια με παραπάνω είναι οι απώλειες στην διάρκεια μια ολοκληρωμένης κλήσης.
- **Tloss**: Είναι ο μετρητής του χρόνου που χάνονται πακέτα, μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας του νέου EC.
- **S(n)**: Είναι ένας δείκτης που υποδηλώνει αν έχει πέσει η κλήση σε κάθε επανάληψη.

Στην συνέχεια και εφόσον έχει οριστεί ο αριθμός των επαναλήψεων ορίζονται παράμετροι οι οποίοι αρχικοποιούνται για κάθε επανάληψη και είναι τυχαίοι ώστε οι επαναλήψεις μεταξύ τους είναι ανεξάρτητες. Ορίζουν δηλαδή την αρχική κατάσταση του συστήματος και πιο συγκεκριμένα αυτές είναι:

- **Tstart\_moving**: Το κινητό έχει την δυνατότητα να αρχίσει να κινείται οποιαδήποτε στιγμή στο διάστημα [0 Tbeacon]
- **Tstart\_beacon**: Είναι η χρονική στιγμή που αρχίζουν να στέλνονται τα beacon signals και ομοίως βρίσκεται στο διάστημα [0 Tbeacon]
- **X0, Y0**: Είναι οι αρχικές συντεταγμένες του κινητού. Δηλαδή το σημείο εκκίνησης και επιλέγονται τυχαία μέσα στο πλέγμα.
- **cell\_receiving**: Η κεραία από την οποία λαμβάνει αρχικά το κινητό τερματικό.
- **previously\_receiving\_EC**: Η μεταβλητή αυτή ορίζει το EC που μια δεδομένη στιγμή είναι διαμορφωμένο για τον χρήστη.
- **T\_InAnEC**: Καταγράφει τον χρόνο που ένας χρήστης έχει παραμείνει σε ένα EC από την στιγμή που άρχισε η διαδικασία διαμόρφωσής του.
- **Call\_Dropped**: Είναι Boolean μεταβλητή και παίρνει την τιμή false καθώς ο χρήστης στην αρχή είναι συνδεδεμένος με κάποια κεραία
- **Call\_duration**: Για τον υπολογισμό της διάρκειας κλήσης έχουν χρησιμοποιηθεί αληθινά δεδομένα από την καταγραφή των κλήσεων της εταιρείας OKTABIT A.E.. Οι κλήσεις αυτές καταγράφηκαν με δεδομένα από το τηλεφωνικό κέντρο Siemens HiPath 8000 με την βοήθεια της πλατφόρμας SAP Business Objects. Οι κλήσεις έχουν καταγραφεί σε δευτερόλεπτα. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης πρέπει η διάρκεια των κλήσεων να μετατραπεί σε steps (πόσες μετρήσεις ανά επανάληψη μέχρι να πέσει η κλήση) και για αυτό το λόγο τα δεδομένα από το αρχείο διαίρονται με Tsampling.

Παρατήρηση: Οι χρόνοι Tstart\_moving και Tstart\_beacon επιλέγονται τυχαία και συνεπώς πρέπει να γίνει έλεγχος για το πότε θα στείλει το επόμενο Tbeacon σε σχέση με την αρχή της κίνησης του κινητού.

Μέχρι αυτό το σημείο υπήρχε κυρίως ο ορισμός των απαραίτητων παραμέτρων για την υλοποίηση της προσομοίωσης. Ο κύριος πυρήνας της προσομοίωσης είναι το διπλό loop που ξεκινάει σε αυτό το σημείο και ελέγχει τα εξής πριν ολοκληρωθεί και υπολογίσει τα αντίστοιχα μεγέθη.

Καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων και ενώ η μεταβλητή Call\_Dropped είναι false και ο μετρητής steps της διάρκειας της κλήσης δεν έχει φτάσει την τιμή Call\_Duration το πρόγραμμα υλοποιεί μία ακόμα επαναληπτική διαδικασία μέχρι το κινητό τερματικό να λάβει το επόμενο Tbeacon.

Μέχρι λοιπόν την στιγμή που θα ληφθεί το beacon signal το πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογίζει μέσω της συνάρτησης next\_position την επόμενη θέση του κινητού και βρίσκει μέσα από την συνάρτηση find\_closest\_antenna από ποια κεραία λαμβάνει. Στην συνέχεια ελέγχει αν η κεραία που εντόπισε ανήκει στο previously\_receiving\_EC και πραγματοποιούνται 3 έλεγχοι:

1. Αν η κεραία δεν είναι μέλος του διαμορφωμένου ή του υπό διαμόρφωση EC τότε η κλήση θα χαθεί.
2. Αν η νέα κεραία είναι μέλος του προηγούμενου EC τότε αυξάνει τον μετρητή  $T\_InAnEC$  κατά χρόνο  $T_{sampling}$ .
3. Αν η νέα κεραία δεν είναι μέλος του προηγούμενου EC και  $T\_InAnEC < T_{total}$  τότε χάνονται πακέτα και αυξάνεται ο μετρητής  $T_{loss}$

Στην περίπτωση που μέχρι τότε δεν έχει χαθεί η κλήση, ορίζεται η χρονική στιγμή λήψης του επόμενου beacon signal και η διαδικασία συνεχίζει και γίνεται έλεγχος αν έχει αλλάξει η κεραία λήψης. Σε περίπτωση που έχει αλλάξει η κεραία λήψης εκκινείται η διαδικασία διαμόρφωσης του νέου EC. Ακόμα μηδενίζεται το  $T\_InAnEC$  και ορίζεται το καινούργιο `previously_receiving_EC`

Τέλος, και με δεδομένου ότι έχουν ολοκληρωθεί όλες οι επαναληπτικές διαδικασίες υπολογίζονται όλα τα απαραίτητα μεγέθη αξιολόγησης της ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει το σύστημα.

## Βιβλιογραφία

- [1] “A Moving Extended Cell Concept for Seamless Communication in 60 GHz Radio-over-Fiber Networks” Nikos Pleros, Member, IEEE, Kostas Tsagkaris, Member, IEEE, and Nikolaos D. Tselikas, Member, IEEE, IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 12, NO. 11, NOVEMBER 2008
- [2] “A 60 GHz Radio-Over-Fiber Network Architecture for Seamless Communication With High Mobility” Nikos Pleros, Konstantinos Vyrsoinos, Kostas Tsagkaris, and Nikolaos D. Tselikas, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 12, JUNE 15, 2009
- [3] R. Ghai and S. Singh, “An architecture and communication protocol for picocellular networks,” IEEE Pers. Commun. Mag., vol. 1, no. 3, pp. 36–46, 1994.
- [4] H. J. Kim and J. P. Linnartz, “Virtual cellular network: A new wireless communications architecture with multiple access ports,” Wireless Pers. Commun., vol. 10, no. 3, pp. 287–307, 1999.
- [5] M. Flament, A. Svensson, and J. M. Cioffi, “Performance of 60 GHz virtual cellular networks using multiple receiving antennas,” Wireless Pers. Commun., vol. 23, no. 1, pp. 15–29, 2002
- [6] J. J. V. Olmos, T. Kuri, and K. Kitayama, “Dynamic reconfigurable WDM 60-GHz millimeter-waveband radio-over-fiber access network: Architectural considerations and experiment,” J. Lightwave Technol., vol. 25, no. 11, pp. 3374–3380, Nov. 2007.
- [7] [http://www.jdsu.com/ProductLiterature/fiberguide1\\_bk\\_fop\\_tm\\_ae.pdf](http://www.jdsu.com/ProductLiterature/fiberguide1_bk_fop_tm_ae.pdf)
- [8] [http://www.cisco.com/image/gif/paws/7934/bwidth\\_consume.pdf](http://www.cisco.com/image/gif/paws/7934/bwidth_consume.pdf)



## Κεφάλαιο 5

### Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται διαγράμματα και παράλληλα γίνεται και η ανάλυση τους. Εκτός από το κλασικό σενάριο, πραγματοποιήθηκαν και επιπλέον προσομοιώσεις που ως στόχο είχαν την παρατήρηση της επίπτωσης κάποιων παραμέτρων στην επίδοση των δικτύων.

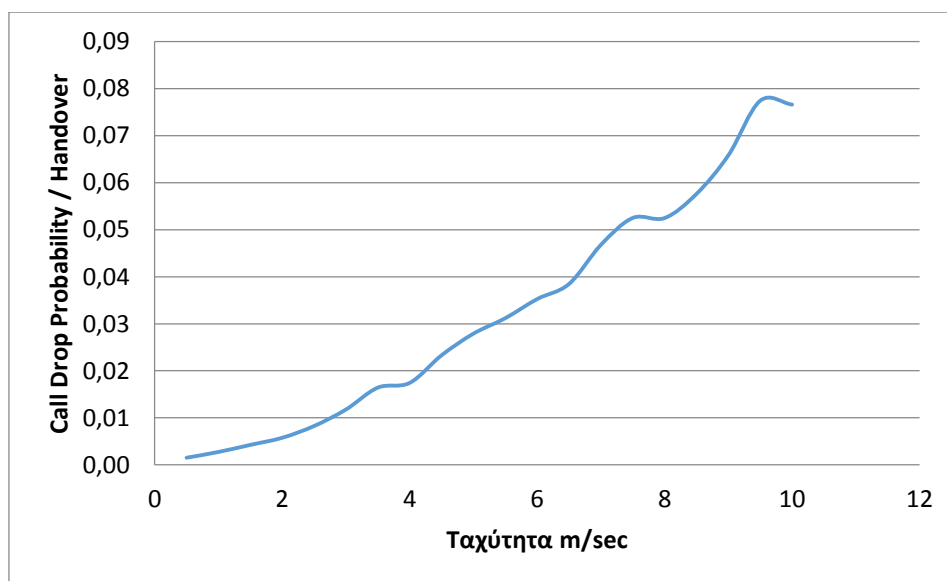
#### 5.1 1<sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης

Στο συγκεκριμένο σενάριο οι μεταβλητές ορίστηκαν όπως ακριβώς και στο κεφάλαιο 4.4. Πιο συγκεκριμένα έχει η επιλογή η μεταβλητή  $D$  να ισούται με  $D = 7m$ , καθώς αυτό την σειρά του αντιστοιχεί σε μια ακτίνα  $radius = 4,94m$ .

Η υπηρεσία που παρέχει το σύστημα στο χρήστη πρέπει να υποστηρίξει ρυθμό μετάδοσης  $87,2 kbps$ . Τέτοιο ρυθμό μετάδοσης μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε MCS του προτύπου IEEE 802.11ad και για ευκολία χρησιμοποιείται αυτό που έχει τις μικρότερες απαιτήσεις για την ισχύ εισόδου στην κεραία. Επομένως χρησιμοποιείται το MCS1 με ευαισθησία στον δέκτη τα  $-68dBm$ . Με βάση λοιπόν την Σχέση (5.1) υπολογίζεται ότι η ισχύς εκπομπής είναι  $13.9 dBm$

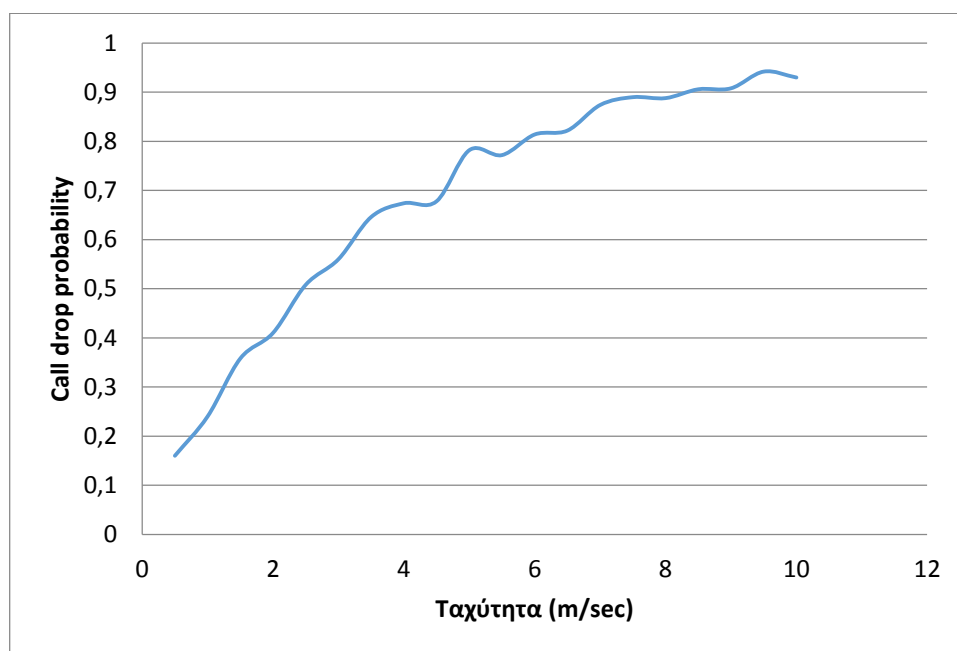
$$PL(dB) = 20 \log(f) + 20 \log(d) + 32.45 \quad (5.1)$$

Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης σε κάθε διαπομπή και στο Διάγραμμα 5.2 η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης για κάθε κλήση.



Διάγραμμα 5.1: Πιθανότητα απόρριψης της κλήσης σε κάθε διαπομπή

Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό το μοντέλο Moving Extended Cell ανταποκρίνεται πολύ καλά στην κινητικότητα του χρήστη με αποτέλεσμα καθώς παρέχει σχεδόν μηδενική πιθανότητα απόρριψης της κλήσης σε φυσιολογικά κινούμενους χρήστες. Ο όρος φυσιολογικά χρησιμοποιείται καθώς σε εσωτερικό χώρο ένας χρήστης είναι αδύνατο να κινηθεί με παραπάνω από 5-7 m/sec. Στην συγκεκριμένη κατηγορία χρηστών λοιπόν η πιθανότητα είναι μικρότερη από 4%, εντυπωσιακό νούμερο δεδομένης της μικρής κυψέλης εξαιτίας της υψηλής συχνότητας λειτουργίας. Ενώ σε μεγαλύτερες ακόμα ταχύτητες το σύστημα συνεχίζει να ανταποκρίνεται εξίσου καλά διατηρώντας την πιθανότητα απόρριψης της κλήσης κάτω από το 8% .



Διάγραμμα 5.2: Η πιθανότητα απόρριψης κλήσης στην συνολική διάρκειας της.

Εξετάζοντας την κλήση στο σύνολό της παρατηρείται μια αύξηση στην πιθανότητα απόρριψής της. Αιτία του συγκεκριμένου φαινομένου είναι η σταθερή ταχύτητα κίνησης του χρήστη. Αυτό στην ουσία σημαίνει ότι ο χρήστης αλλάζει συνεχώς κυψέλες με αποτέλεσμα το σύστημα να μην προλαβαίνει να δημιουργεί συνεχώς καινούργια Extended Cells. Λύση στο παραπάνω πρόβλημα αποτελεί η αύξηση της περιοχής επικάλυψης μεταξύ των κυψελών ή εναλλακτικά η μείωση του χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο beacon signals. Στην πρώτη περίπτωση ο χρήστης θα εισέρχεται νωρίτερα στην νέα κυψέλη και θα έχει περισσότερο χρόνο μέχρι να λάβει το beacon signal και στην δεύτερη θα λαμβάνει νωρίτερα beacon signal.

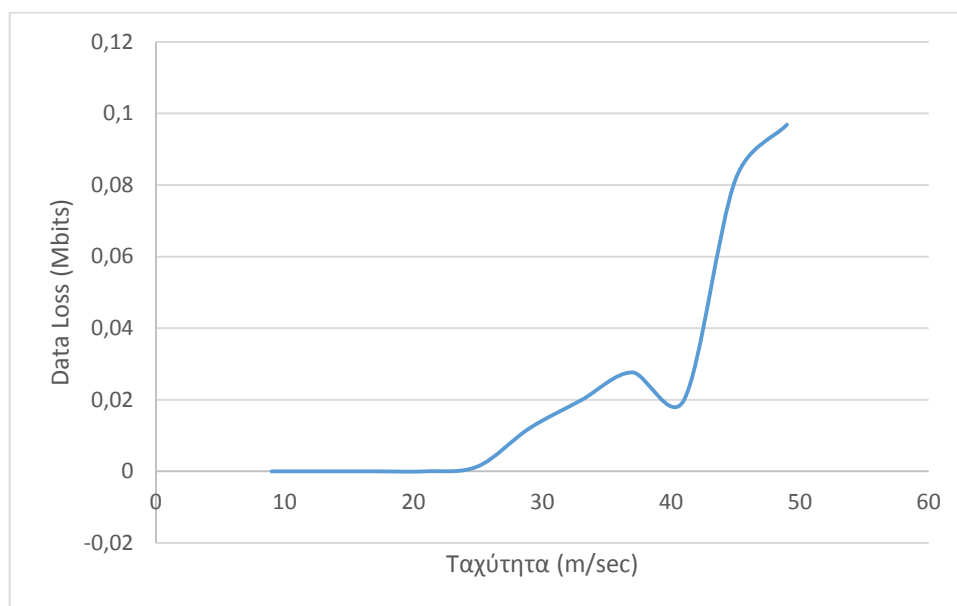
Ακόμα μετρήθηκαν και οι απώλειες πακέτων καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και βγήκαν μηδενικές. Ο λόγος είναι ότι η ταχύτητα κίνησης του κινητού είναι μικρή, όπως και ο χρόνος διαμόρφωση του νέου Extended Cell . Επομένως αν καταφέρει το σύστημα να ανταποκριθεί στην αλλαγή του EC και να μην απορριφθεί η κλήση, θα προλάβει και να το διαμορφώσει έγκαιρα ώστε να μην χαθούν πακέτα.

Στα πλαίσια περαιτέρω διερεύνησης και επέκτασης του προβλήματος της απώλειας δεδομένων έγινε προσομοίωση και σε ανώτερες ταχύτητες οι οποίες θεωρούνται αδύνατες



για κίνηση χρηστών σε εσωτερικούς χώρου. Ωστόσο η προσομοίωση έγινε ώστε να διερευνηθούν οι ανοχές του συστήματος στις απώλειες δεδομένων. Να σημειωθεί ότι η παράμετρος που άλλαξε για την μέτρηση των μεγεθών απώλειας δεδομένων ήταν η CBR καθώς επιλέχθηκε το σύστημα να δουλέψει με τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που πορσφέρει το MCS1 και είναι  $CBR = 385\text{Mbps}$ . Όπως φαίνεται λοιπόν και στο Διάγραμμα 5.3, ο χρήστης πρέπει να κινηθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη των  $25\text{ m/sec}$  για να αρχίζουν να χάνονται πακέτα, ταχύτητα που αντιστοιχεί σε  $90\text{Km/h}$ .

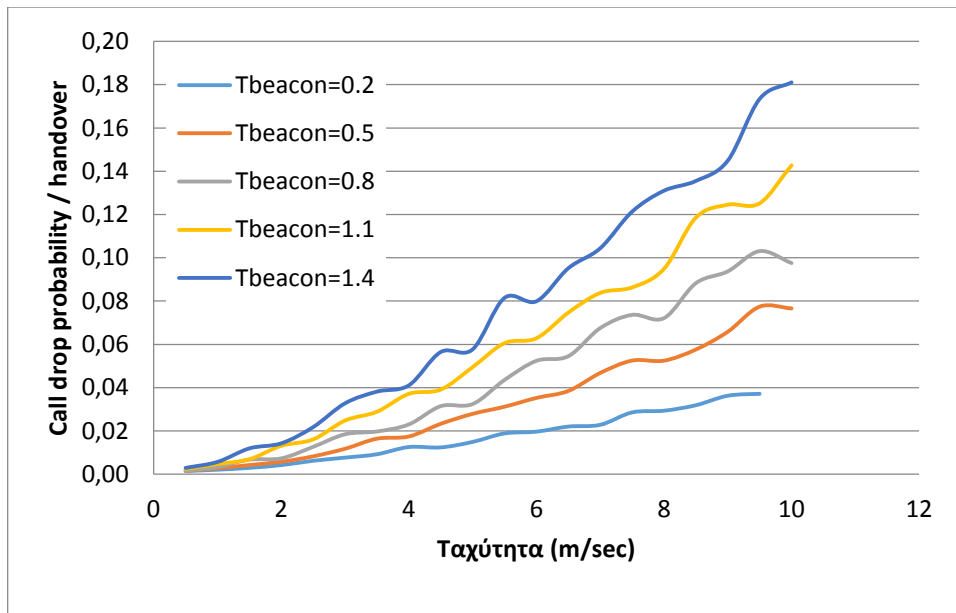
Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί ότι ο χρήστης ακόμα και με  $30\text{ m/sec}$  να κινείται θα χάσει στην διάρκεια μιας διαπομπής λιγότερα από  $20\text{Kbits} = 2500$  οκτάδες δεδομένων. Σε ένα δίκτυο λοιπόν που έχει ρυθμό μετάδοσης της τάξης των  $385\text{Mbps}$  αυτά τα δεδομένα θεωρούνται πολύ μικρές απώλειες.



Διάγραμμα 5.3: Απώλειες δεδομένων κατά την διάρκεια μιας διαπομπής

## 5.2 2<sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο μελετάται η επίδραση της παραμέτρου Tbeacon στην πιθανότητα να πέσει η κλήση. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4, όσο πιο μικρό είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που ένας χρήστη θα εισέλθει σε μία κυψέλη μέχρι την στιγμή που θα εκπνευθεί το επόμενο beacon signal τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η ταχύτητα κίνησής του. Σε ανάποδη ανάγνωση στα συμπεράσματα από το 1<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης αναφέρθηκε σαν λύση στο πρόβλημα απόρριψης της κλήσης η εναλλακτική μείωσης του Tbeacon. Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν παραμείνει ίδιες με το 1<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης και τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα 5.4 και 5.5.

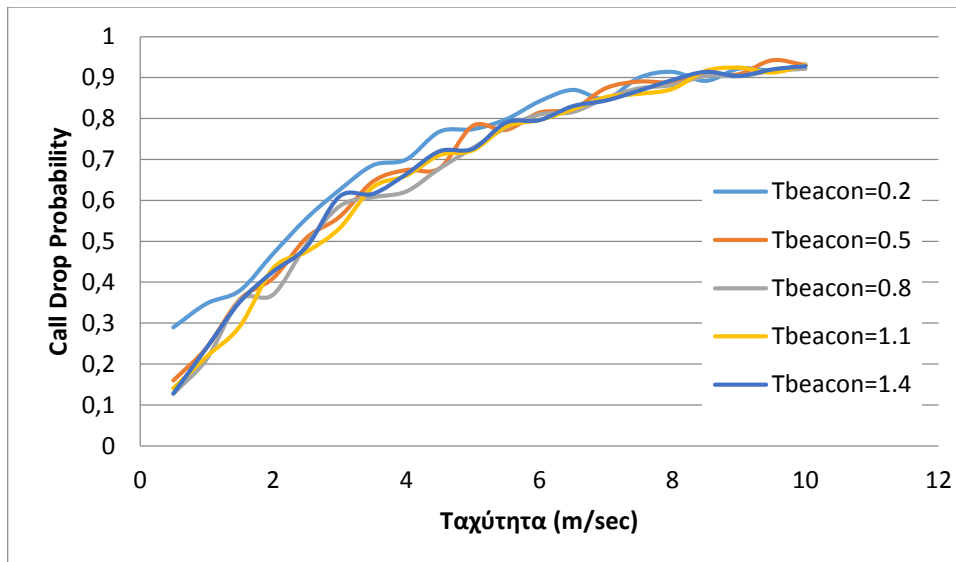


Διάγραμμα 5.4: Πιθανότητα απόρριψης της κλήσης /διαπομπή για τα διάφορα Tbeacon

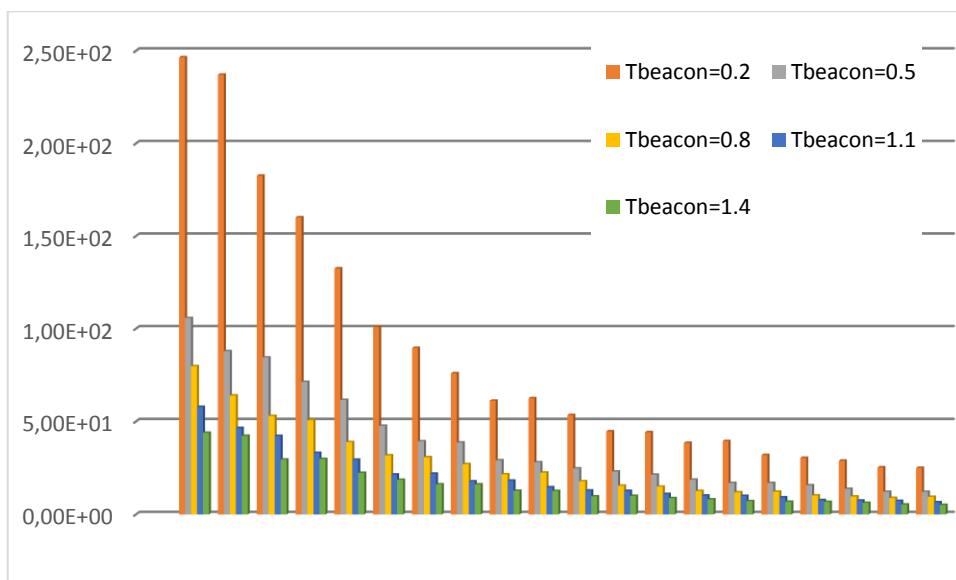
Στο Διάγραμμα 5.4 λοιπόν παρατηρείται μια σημαντική διαφορά στην πιθανότητα απόρριψης της κλήσης ειδικά στις περιπτώσεις που η ταχύτητα είναι μεγάλη με αποτέλεσμα η πιθανότητα για Tbeacon=1.4sec να φτάσει να είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για Tbeacon=0,2sec.

Ωστόσο όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.5 να πέσει η κλήση οποιαδήποτε στιγμή αλλάζει κυψέλη σε όλη την διάρκειά της είναι περίπου ίδια για όλα τα Tbeacon. Ωστόσο αυτό που δεν φαίνεται σε αυτό το διάγραμμα αλλά εξετάζεται στο διάγραμμα 5.6 είναι ο μέσος αριθμός διαπομπών ανά κλήση. Έτσι ενώ κάθε κλήση έχει την ίδια πιθανότητα να πέσει στο σύστημα που το Tbeacon είναι μικρό θα έχει μεγαλύτερη διάρκεια.

Προσοχή ωστόσο θα χρειαστεί κατά τον σχεδιασμό του δικτύου καθώς ενώ θεωρητικά μπορούμε να διαλέξουμε πολύ μικρό Tbeacon για να μηδενίσουμε την πιθανότητα να πέσει η κλήση τότε θα έχουμε πολύ μεγάλο overhead στο δίκτυο από σήματα ελέγχου. Με αποτέλεσμα να μην έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα από άποψη throughput στο δίκτυο.



Διάγραμμα 5.5: Πιθανότητα απόρριψης της κλήσης για διάφορα Tbeacon



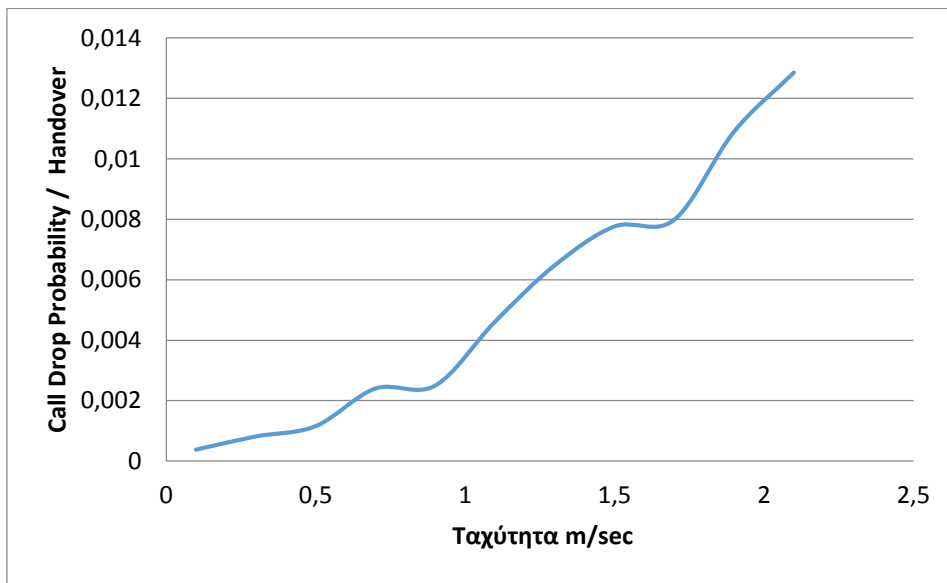
Διάγραμμα 5.6: Μέσος αριθμός διαπομπών ανά κλήση

### 5.3 3<sup>ο</sup> Σενάριο Προσομοίωσης

Στην τελευταία περίπτωση εξετάζεται το ενδεχόμενο ο χρήστης να προσπαθήσει να λάβει από το πρότυπο IEEE 802.11ad το μέγιστο των δυνατοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι θα ζητήσει πολύ υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Το μέγιστο που μπορεί να προσφέρει το πρότυπο IEEE 802.11ad είναι ρυθμός μετάδοσης 6,75Gbps, προϋπόθεση ωστόσο αποτελεί το γεγονός ο χρήστης να κινείται σε απόσταση μικρότερη του ενός μέτρου από την κεραία καθώς η απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο είναι πολύ υψηλές.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης προσομοίωσης έγιναν οι εξής αλλαγές στις παραμέτρους της προσομοίωσης:

1. Δημιουργήθηκε ένα δίκτυο με απόσταση κεραιών  $D=1$ . Αφού ρυθμός μετάδοσης που πρέπει να παρέχει το σύστημα στον χρήστη είναι 6,75Gbps, η στάθμη ισχύος στον δέκτη, με βάση το πρότυπο IEEE 802.11ad καθορίζεται στα -47dBm. Με βάση λοιπόν την Σχέση (5.1) υπολογίζεται ότι η ισχύς εκπομπής είναι 18 dBm
2. Εξετάζονται ταχύτητες κίνησης πολύ μικρότερες από τις αρχικές και συγκεκριμένα από 0,2m/sec έως 2,1m/sec. Ο λόγος είναι ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες ο χρήστης διέσχισε την κυψέλη κατά μήκος της διαμέτρου σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο και συνεπώς η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης είναι 1.



Διάγραμμα 5.7: Πιθανότητα απόρριψης κλήσης σε κάθε διαπομπή

Από τα αποτελέσματα του διαγράμματος 5.7 είναι φανερό ότι το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει μόνο εξαιρετικά αργά κινούμενος χρήστες καθώς η ακτίνα της κάθε κυψέλης είναι πολύ μικρή. Ήδη για ταχύτητα περίπου 2m/sec η πιθανότητα απόρριψης της κλήσης είναι διπλάσια από την αντίστοιχη στο 1<sup>ο</sup> σενάριο. Στην πραγματικότητα ένα τέτοιο σύστημα δεν θα σχεδιαζόταν εξαιτίας της αδυναμίας να υποστηρίξει κινούμενους χρήστες. Οπότε ένας χρήστης που πραγματικά θα είχε ανάγκη του μεγάλου ρυθμού μετάδοσης όσο είναι κοντά στην κεραία θα έχει την υπηρεσία που επιθυμεί, ενώ όσο απομακρύνεται η ποιότητα υπηρεσίας θα υποβαθμίζεται με στόχο να μην πέσει η κλήση. Δηλαδή θα αλλάξει το MCS της υπηρεσίας και θα κάνει χρήση μικρότερων ρυθμών μετάδοσης, ώστε να είμαι μικρότερες οι απαιτήσεις του δέκτη για την ισχύ εισόδου επομένως η ακτίνα κάλυψης της κεραίας μεγαλώνει.