



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ
ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επισκόπηση Τεχνολογιών Radio Over Fiber (ROF)

Ιωάννα Π. Λαδά

Επιβλέπων: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επισκόπηση Τεχνολογιών Radio Over Fiber (ROF)

Ιωάννα Π. Λαδά

A.M.: MM169

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ
Αγγελική Αραπογιάννη, Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Ιανουάριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση τρόπων επικοινωνίας σε ασύρματα δίκτυα με τη χρήση οπτικών ινών. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην ευρέως διαδεδομένη τεχνική ROF (Radio Over Fiber) που μέρα με τη μέρα συγκεντρώνει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας καθώς προβάλλεται σαν λύση για την κάλυψη των αναπτυσσόμενων αναγκών για ασύρματη επικοινωνία. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Στο πρώτο μέρος, επισημαίνονται οι λόγοι που οδήγησαν στη μελέτη του συγκεκριμένου προτύπου, παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του μέρη και προβάλλονται οι θετικές και αρνητικές όψεις του. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διάδοση RF σημάτων μέσω οπτικής ίνας, παραθέτοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Το τρίτο μέρος της εργασίας αφορά την παρουσίαση δημοσιευμένων τεχνικών που έχουν προταθεί σαν λύσεις για την καλύτερη λειτουργία και αποδοτικότητα ενός συστήματος ROF. Τέλος, στο τέταρτο μέρος παρατίθενται κάποιες απλές υλοποιήσεις συστημάτων ROF με τη βοήθεια του προγράμματος OptiPerformer. Μέσω αυτής της μελέτης οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία ROF είναι πολύ πιθανό να αποτελέσει τη βάση για τις μελλοντικές ζεύξεις ασύρματων δικτύων.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Οπτικές-Ασύρματες Επικοινωνίες

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Radio-over-Fiber, ασύρματο δίκτυο, οπτικές ίνες, ραδιοσήματα, mm-waves

ABSTRACT

The object of this paper is to present ways of communication in wireless networks using optical fibers. In particular, reference is made to the widespread ROF (Radio-Over-Fiber) technique which every day gains more and more interest from the scientific community as it is viewed as a solution to the growing needs for wireless communication. More specifically, the work is divided into four parts. The first part identifies the reasons which led to the study of this model, presents its main constituent parts and shows its positive and negative aspects. The second part presents various techniques used for distributing RF signals over optical fiber, giving their advantages and disadvantages. The third part of the work concerns the presentation of published techniques that have been proposed as solutions for better operation and efficiency of a ROF system. Finally, in the fourth part we present some simple implementations of ROF systems using the program OptiPerformer. Through this study we are led to the conclusion that the ROF technology will probably be the basis for future wireless networks' links.

SUBJECT AREA: Fiber-Wireless Communications

KEYWORDS: Radio-Over-Fiber, wireless network, optical fibers, RF signals, mm-waves

Στη μητέρα μου Αγγελική.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Εισαγωγικά.....	13
1.2 Πλεονεκτήματα των συστημάτων ROF	20
2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ RF	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.1.1 Παραγωγή RF σημάτων με τη μέθοδο IMDD	26
2.1.2 Παραγωγή RF σημάτων με τη μέθοδο RHD (Remote Heterodyne Detection)	28
2.1.3 Τεχνικές που βασίζονται στην παραγωγή αρμονικών	34
2.1.4 Τεχνικές ROF Πολυπλεξίας.....	36
3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ROF	38
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Πλήρως οπτική γένεση mm-wave με χρήση λέιζερ καταμεμημένης ανατροφοδότησης άμεσης διαμόρφωσης (Direct-Modulation DFB laser) και εξωτερικού διαμορφωτή.....	38
3.3 Πλήρως αμφίδρομο σύστημα ROF βασισμένο στην καταστολή και επαναχρησιμοποίηση οπτικού φέροντος	39
3.4 ROF διαμόρφωση με χρήση οπτικού διαμορφωτή φάσης για την παραγωγή οπτικού κύματος στην τάξη των χιλιοστών και συγκεντρωτικού κύματος φωτός για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης	40
3.5 Αποτελεσματικό σύστημα εκπομπής για συστήματα ROF βασισμένο στην τεχνική AWG-Based DWDM	42
3.6 Γένεση οπτικών DWDM σημάτων μήκους κύματος στην τάξη χιλιοστών με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό εξωτερικό διαμορφωτή	44
3.7 Σύστημα ROF με κεντροποιημένο κύμα φωτός (centralized lightwave) με χρήση μόνο ενός διαμορφωτή φάσης για τη γένεση DWDM οπτικών κυμάτων τάξης χιλιοστών	45
3.8 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης για τη γένεση οπτικών mm-κυμάτων και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης.....	47

3.9 Παραγωγή οπτικού OFDM σήματος άμεσης ανίχνευσης για ROF ζεύξεις με χρήση της μεθόδου διπλασιασμού συχνότητας με καταστολή φέροντος	49
3.10 Υβριδική, πλήρως αμφίδρομη αναλογικό/ψηφιακή μονάδα δικτύου ROF με χρήση χρονοθυρίδων	50
3.11 Γένεση οπτικών σημάτων με πλευρικές ζώνες με απόσταση ένα μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών χρησιμοποιώντας την τεχνική τετραπλασιασμού συχνότητας χωρίς οπτικό φιλτράρισμα.....	51
3.12 Νέα αρχιτεκτονική για σύστημα ROF με αμφίδρομη διάδοση μέσω οπτικών ινών για πλήρως αμφίδρομη σύνδεση	53
3.13 Σύστημα ROF με φωτονικά παραγόμενα OFDM σήματα χρησιμοποιώντας άμεσα διαμορφωμένο λέιζερ	54
3.14 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση διαμορφωτή φάσης για την κατερχόμενη ζεύξη και διαμορφωτή έντασης για την ανερχόμενη ζεύξη.....	56
3.15 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας για την παραγωγή οπτικών κυμάτων με φασματικές συνιστώσες που απέχουν απόσταση τάξης χιλιοστών	57
3.16 Σύστημα ROF με φωτονικά παραγόμενα 16QAM OFDM σήματα και επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος για τη σύνδεση δεδομένων ανερχόμενης ροής	60
3.17 Gigabit ROF ζεύξη για διάδοση συγκλινόντων σημάτων βασικής ζώνης και ζώνης κυμάτων τάξης χιλιοστών με χρήση διαδοχικών διόδων λέιζερ Fabry-Perot σταθερής έγχυσης	61
3.18 ROF σύστημα βασισμένο στην τεχνική OFM.....	63
3.19 Πλήρως αμφίδρομη ROF ζεύξη με πολύ-επίπεδα OFDM σήματα μέσω ενός MZM μονού ηλεκτροδίου και επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος με τη χρήση RSOA.....	65
4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ROF ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΟΡΤΙΡPERFORMER	67
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	78
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική δικτύου LTE.....	σελ. 14
Εικόνα 2: Επισκόπηση συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών	σελ. 14
Εικόνα 3: Μέρη δικτύου GSM.....	σελ. 15
Εικόνα 4: Η ιδέα ενός συστήματος ROF	σελ. 18
Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική συστήματος ROF.....	σελ. 18
Εικόνα 6: Μέθοδοι διάδοσης ασύρματων σημάτων	σελ. 20
Εικόνα 7: Παραγωγή σημάτων RF με τη μέθοδο IMDD (a) του λέιζερ (b) με χρήση εξωτερικού διαμορφωτή	σελ. 27
Εικόνα 8: Βασική δομή της μεθόδου Optical FM-Filter	σελ. 29
Εικόνα 9: Βασική δομή της μεθόδου OFLL/OPLL.....	σελ. 30
Εικόνα 10: Βασική αρχή της μεθόδου OIL.....	σελ. 32
Εικόνα 11: Βασική αρχή της μεθόδου OIPLL.....	σελ. 33
Εικόνα 12: Βασική δομή της μεθόδου $2f$	σελ. 35
Εικόνα 13: Βασική δομή της μεθόδου συγκερασμού βασιζόμενου σε Συμβολόμετρο..	σελ. 36
Εικόνα 14: Πολυπλεξία Υπο-φέροντος ψηφιακών και αναλογικών σημάτων.....	σελ. 36
Εικόνα 15: Βασική αρχιτεκτονική της μεθόδου παραγωγής οπτικών κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης και εξωτερικού διαμορφωτή....	σελ. 38
Εικόνα 16: Βασική αρχιτεκτονική πλήρως αμφίδρομου ROF συστήματος βασιζόμενου στην καταστολή και επαναχρησιμοποίηση οπτικού φέροντος	σελ. 39
Εικόνα 17: Βασική δομή επαναχρησιμοποίησης οπτικού φέροντος σε σύστημα ROF.	σελ. 41
Εικόνα 18: Καμπύλες BER για δεδομένα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης με ρυθμό 2,5 Gb/s.....	σελ. 42
Εικόνα 19: Βασική δομή της μεθόδου AWG	σελ. 43

Εικόνα 20: Βασική αρχή των οπτικών DWDM σημάτων μήκους κύματος στην τάξη των χιλιοστών με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό εξωτερικό διαμορφωτή.....	σελ. 44
Εικόνα 21: Βασική αρχή για τη δημιουργία DWDM οπτικών σημάτων με απόσταση πλευρικών στην τάξη των χιλιοστών και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος χρησιμοποιώντας έναν μοναδικό διαμορφωτή φάσης.....	σελ. 46
Εικόνα 22: Βασική αρχή γένεσης σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση ανερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιώντας ένα DML σε συνδυασμό με έναν IL	σελ. 48
Εικόνα 23: Βασική αρχή για την παραγωγή οπτικών OFDM σημάτων άμεσης ανίχνευσης για ROF ζεύξεις.....	σελ. 49
Εικόνα 24: Πειραματική διάταξη της μεθόδου με χρήση χρονοθυρίδων	σελ. 50
Εικόνα 25: Οπτική διαμόρφωση προς τα πάνω με χρήση τεχνικής πολλαπλασιασμού συχνότητας για WDM ROF συστήματα.....	σελ. 52
Εικόνα 26: Βασική δομή πλήρως αμφίδρομης αρχιτεκτονικής ROF με χρήση αμφίδρομης διάδοσης μέσω οπτικών ινών.....	σελ. 53
Εικόνα 27: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου mm-wave OFDM-ROF με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης.....	σελ. 55
Εικόνα 28: Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση διαμορφωτή φάσης για την κατερχόμενη ζεύξη και διαμορφωτή έντασης για την ανερχόμενη ζεύξη	σελ. 56
Εικόνα 29: Μετρήσεις του EVM (a) πριν τη διάδοση (b) μετά τη διάδοση με αύξηση του δείκτη IM του σήματος ανερχόμενης ζεύξης και του δείκτη PM για το σήμα κατερχόμενης ζεύξης.....	σελ. 56
Εικόνα 30: Βασική αρχή της μεθόδου τετραπλασιασμού φωτονικής συχνότητας με χρήση SCM	σελ. 57
Εικόνα 31: Βασική αρχή της μεθόδου με χρήση MZM	σελ. 58
Εικόνα 32: Βασική δομή μεθόδου τετραπλασιασμού συχνότητας και επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε ένα OFDM ROF σύστημα.....	σελ. 60
Εικόνα 33: Βασική δομή της μεθόδου με χρήση διαδοχικών διόδων λέιζερ Fabry –Perot σταθερής έγχυσης	σελ. 61

Εικόνα 34: Αμφίδρομο ROF σύστημα βασισμένο στη μέθοδο OFM με χρήση MZM διπλού ηλεκτροδίου	σελ. 63
Εικόνα 35: Διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου διαμόρφωσης.....	σελ. 64
Εικόνα 36: Βασική δομή του προτεινόμενου OFDM ROF συστήματος.....	σελ. 65
Εικόνα 37: Συνιστώσες στο Central Office και στον Base Station	σελ. 67
Εικόνα 38: Διάταξη εξεταζόμενου ROF συστήματος.....	σελ. 67
Εικόνα 39: Παραγωγή συχνότητας 50 GHz	σελ. 69
Εικόνα 40: Διάγραμμα οφθαλμού για το downstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας.....	σελ. 69
Εικόνα 41: Διάγραμμα οφθαλμού για το upstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας	σελ. 70
Εικόνα 42: Καμπύλη BER για σήμα downstream B-T-B.....	σελ. 71
Εικόνα 43: Καμπύλη BER για σήμα downstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας	σελ. 71
Εικόνα 44: Καμπύλη BER για σήμα upstream B-T-B	σελ. 72
Εικόνα 45: Καμπύλη BER για σήμα upstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας	σελ. 72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Εξέλιξη των προτύπων WLAN.....	17
--	----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Μικροηλεκτρονικής» του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, της Σχολής Θετικών Επιστημών, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κατά την περίοδο Μάρτιος 2011 – Ιανουάριος 2012.

Το κίνητρο για τη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος προήλθε από την επιθυμία μου να αποκτήσω μια σφαιρική γνώση στον τόσο δημοφιλή και ραγδαία αναπτυσσόμενο τομέα της επικοινωνίας μέσω ασύρματων δικτύων με τη χρήση οπτικών ινών. Η πρώτη επαφή και ουσιαστικά το έναυσμα δόθηκε κατά τη διάρκεια των διαλέξεων του μαθήματος Φωτονικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα, που ανήκει στο πρόγραμμα σπουδών Μικροηλεκτρονικής και διδάσκεται από τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Συβρίδη.

Για την ολοκλήρωσή της χρειάστηκε διεξοδική έρευνα και μελέτη στο μεγαλύτερο βαθμό σε αγγλική βιβλιογραφία, σε δημοσιεύσεις και στο Διαδίκτυο. Μετά το πέρας της εργασίας οι γνώσεις μου γύρω από το συγκεκριμένο θέμα έχουν φτάσει σε ένα πιο ολοκληρωμένο επίπεδο.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή κ. Δημήτριο Συβρίδη, που αρχικά με ενέπνευσε και στη συνέχεια μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία, για την καθοδήγηση, τη συνεργασία και την ελευθερία που μου παρείχε στην προσέγγιση του θέματος από την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, μέχρι την ολοκλήρωσή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση που με βοήθησε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

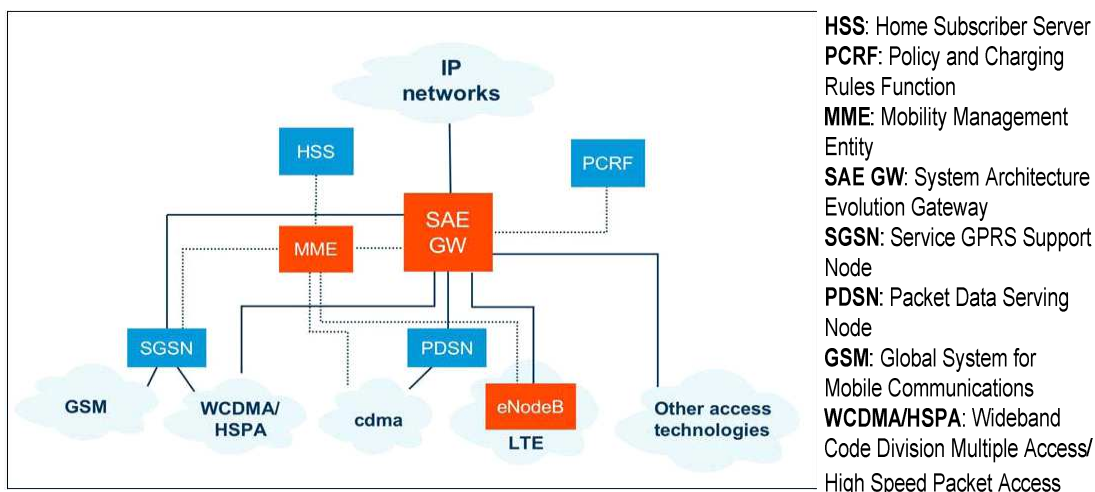
1.1 Εισαγωγικά

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί τεράστια ανάπτυξη στις ασύρματες επικοινωνίες. Μέρα με τη μέρα ο αριθμός των συνδρομητών που επιλέγουν να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ασύρματες μεθόδους, χωρίς να περιορίζονται στα πλαίσια κάποιου συγκεκριμένου χώρου, αυξάνεται παγκοσμίως. Εκτός από τις κινητές τηλεφωνικές επικοινωνίες, μεγάλη ανάπτυξη έχει επίσης παρατηρηθεί στα Ασύρματα Δίκτυα Τοπικής Πρόσβασης (**Wireless Local Area Networks – WLANs**), που εμφανίστηκαν στο προσκήνιο περίπου μια δεκαετία πριν, και η συχνότητα που τα συναντάει κανείς σε δημόσιους χώρους πολλαπλασιάζεται συνεχώς.

Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών αποδίδεται κυρίως στην εύκολη εγκατάσταση τους και στην ελευθερία κίνησης που προσφέρουν, σε σύγκριση με τα σταθερά δίκτυα, δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε ότι σε αυτή την κατεύθυνση οδήγησε τόσο η εξέλιξη της τεχνολογίας όσο και ο ανταγωνισμός ανάμεσα στις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Μέχρι στιγμής υπάρχουν τρία πρότυπα για την κινητή τηλεφωνία, τα οποία εμφανίστηκαν διαδοχικά (κατά προσέγγιση ανά δεκαετία). Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας πρώτης γενιάς (**1G**) ήταν αναλογικά και έκαναν την εμφάνισή τους τη δεκαετία του 1980. Το 1990, ήταν η σειρά των ψηφιακών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (**2G**), όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (**Global System For Mobile communications - GSM**) [1]. Το πρότυπο GSM γνώρισε μεγάλη επιτυχία, παρέχοντας τόσο εθνική όσο και παγκόσμια κάλυψη. Έτσι, δεν είναι τυχαίο ότι αποτελεί για την ώρα τουλάχιστον το βασικό σύστημα κινητής επικοινωνίας.

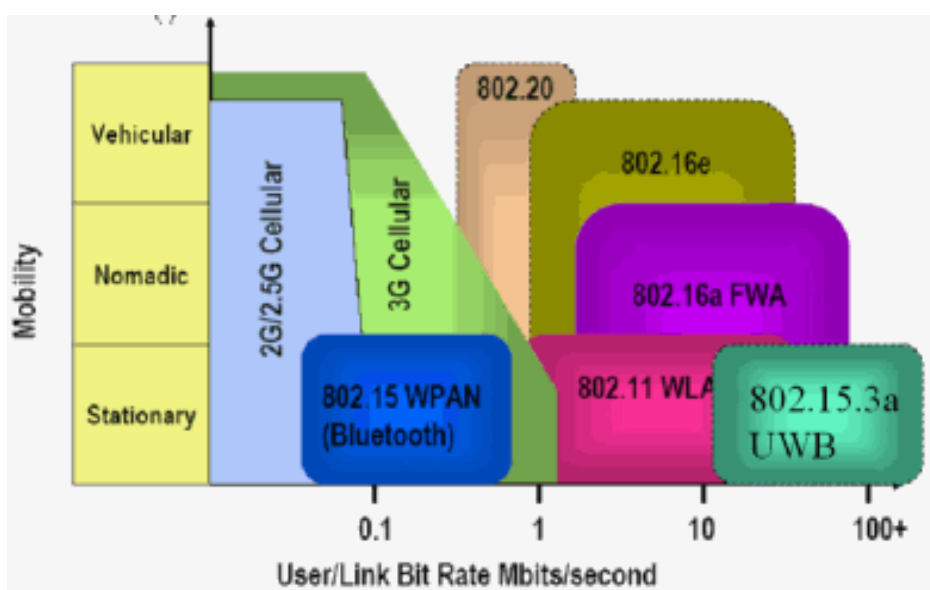
Τα συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς αρχικά σχεδιάστηκαν για να παρέχουν εφαρμογές φωνής και για να υποστηρίζουν υπηρεσίες μεταγωγής κυκλωμάτων. Ωστόσο, το σύστημα GSM παρέχει και υπηρεσίες επικοινωνίας δεδομένων στους χρήστες αν και οι ρυθμοί δεδομένων είναι περιορισμένοι σε μερικές δεκάδες kbps. Σε αντίθεση, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί να υποστηρίζουν ρυθμούς δεδομένων στην τάξη των Mbps. Το πρότυπο WLAN – IEEE 802.11, επίσης γνωστό με το όνομα Wi-Fi βρέθηκε στο προσκήνιο το 1997 και παρείχε ρυθμό δεδομένων στα 2Mbps. Από τότε, το πρότυπο έχει εξελιχθεί αρκετές φορές ανταποκρινόμενο στη σταθερή ζήτηση των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς αποστολής και λήψης bit. Επί του παρόντος, τα WLANs μπορούν να προσφέρουν μέχρι 54Mbps για τα πρότυπα IEEE 802.11a/g και HiperLAN2. Παρ' όλα αυτά, τα WLANs δεν προσφέρουν την ευελιξία που παρέχεται από τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Φυσικά, τα τελευταία χρόνια μιλάμε για συστήματα τρίτης γενιάς, τα οποία έχουν εισχωρήσει στην καθημερινότητά μας παρέχοντας πληθώρα ευκολιών και υπηρεσιών. Το **Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)** [2], είναι μια τεχνολογία για κινητά τρίτης γενιάς και δημιουργήθηκε από την **3GPP – 3rd Generation Partnership Project**. Ήδη από το 2006 από τη μέθοδο αυτή γίνεται χρήση του **HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)**, γνωστό και ως 3.5G. Το μέλλον ανήκει στο **LTE – Long Term Evolution** [3] που προτάθηκε και πάλι από την 3GPP. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του προτύπου είναι: α) υψηλή αποδοτικότητα φάσματος, β) πολύ μικρές καθυστερήσεις στη διάδοση και τη ρύθμιση, γ) υποστήριξη μεγάλης γκάμας ευρών ζώνης και δ) απλότητα στην αρχιτεκτονική. Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός δικτύου βασισμένου στο πρότυπο LTE.



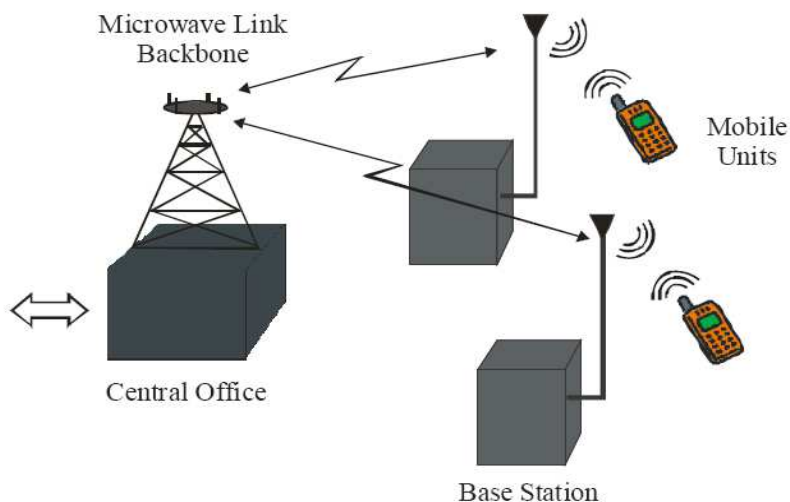
Εικόνα 1 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE

Η ραγδαία ανάπτυξη του Διαδικτύου, και η επιτυχία των συστημάτων δεύτερης γενιάς σε συνδυασμό με την εμφάνιση των WLANs είχαν σημαντικό αντίκτυπο στο πώς αντιλαμβανόμαστε την επικοινωνία. Καταρχήν, η συντριπτική πλειοψηφία ασπάζεται τη νέα θεωρία της αδιάκοπης επικοινωνίας (ubiquitous connectivity), δηλαδή επικοινωνία κάθε στιγμή, σε κάθε μέρος και με κάθε μέσο. Δεύτερον, η ιδέα της ευρυζωνικής επικοινωνίας βρήκε πρόσφορο έδαφος. Καθώς οι οπτικές ίνες διεισδύουν όλο και πιο κοντά στο περιβάλλον του χρήστη, οι ταχύτητες ενσύρματης διάδοσης θα συνεχίσουν να αυξάνουν. Ταχύτητες μετάδοσης στα 100Mbps (Fast Ethernet), είναι ήδη εφικτές και πλέον μιλάμε για ταχύτητες στην τάξη των Gbps. Η απαίτηση για την ύπαρξη αυτού του εύρους ζώνης και στις ασύρματες επικοινωνίες, ασκεί πιέσεις στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας να στραφούν στην αύξηση αφενός της χωρητικότητας διάδοσης και αφετέρου της κάλυψης που παρέχουν. Σε γενικές γραμμές υπάρχει ένας συμβιβασμός (tradeoff) μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας και κινητικότητας και χωρητικότητας. Στην Εικόνα 2 παρατηρούμε τη δεύτερη σχέση για κάποια από τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας.



Εικόνα 2 Επισκόπηση συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών

Στην Εικόνα 3 που ακολουθεί παρατηρούμε τη διάρθρωση των συστημάτων ασύρματης πρόσβασης στενής ζώνης.



Εικόνα 3 Μέρη Δικτύου GSM

Ο Κεντρικός Σταθμός (**Central Office - CO**) διαχειρίζεται την επεξεργασία (processing) και μεταγωγή (switching), ενώ οι Σταθμοί Βάσης (**Base Stations - BSs**) λειτουργούν σαν τις ραδιοεπαφές (radio interfaces) για τις Κινητές Μονάδες (**Mobile Units - MUs**) ή τις Ασύρματες Τερματικές Μονάδες (**Wireless Terminal Units - WTUs**). Οι σταθμοί βάσης συνδέονται με τον κεντρικό σταθμό είτε μέσω αναλογικών μικροκυματικών ζεύξεων, είτε μέσω ψηφιακών ζεύξεων οπτικών ινών. Αφού οι σταθμοί βάσης λάβουν επιτυχώς τα σήματα βασικής ζώνης, τα επεξεργάζονται και διαμορφώνουν κατάλληλα το φέρον. Το σήμα που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης καλύπτει μία ακτίνα που είναι ίση με την ακτίνα της κυψέλης (cell). Όλες οι ασύρματες τερματικές μονάδες στα πλαίσια αυτής της κυψέλης, μοιράζονται το ίδιο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Τα WLANs είναι ρυθμισμένα με παρόμοιο τρόπο, και σε αυτή την περίπτωση η ραδιοεπαφή καλείται Ασύρματο Σημείο Πρόσβασης (**Radio Access Point - RAP**). Εν γένει, φέροντα σε χαμηλότερες φασματικές ζώνες προσφέρουν μικρότερο εύρος ζώνης. Συνεπώς, ένας από τους λόγους που τα συστήματα ασύρματης πρόσβασης στενής ζώνης προσφέρουν περιορισμένη χωρητικότητα, είναι το γεγονός ότι λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες.

Ωστόσο, ένας άλλος λόγος είναι ο σκληρός ανταγωνισμός για το φάσμα συχνοτήτων μεταξύ των πολυάριθμων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούν συχνότητες φέροντος κάτω από τα 6GHz. Ανάμεσα σε αυτά συγκαταλέγονται εκπομπές ραδιοφώνου και τηλεόρασης, συστήματα υπηρεσιών επικοινωνίας σε αεροδρόμια, ερασιτεχνικά ραδιόφωνα και WLANs. Οι χαμηλές συχνότητες επιτρέπουν χαμηλό κόστος στις συνδέσεις μεταξύ των τερματικών του δικτύου. Επιπλέον, η αποδοτικότητα (efficiency) των transistors είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές απ' ότι στις υψηλές συχνότητες. Επομένως, το πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος των συστημάτων που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Επιπρόσθετα, τα σήματα χαμηλής συχνότητας στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων επιτρέπουν μεγαλύτερα κελιά, επειδή τα ραδιοκύματα μπορούν να φτάσουν ακόμα πιο μακριά. Τα μεγαλύτερα κελιά επιτρέπουν υψηλή κινητικότητα (mobility), αλλά οδηγούν

σε χαμηλή απόδοση του ραδιοφάσματος, από τη στιγμή που το φάσμα μοιράζεται σε όλα τα τερματικά, κινητά ή ασύρματα, που λειτουργούν στα πλαίσια του κελιού.

Συνεπώς, ένας φυσικός τρόπος για την αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας είναι η ανάπτυξη μικρότερων κελιών (σε κλίμακα micro, pico και femto). Αυτό είναι κάτι που δύσκολα επιτυγχάνεται σε μικροκυματικά φέροντα χαμηλής συχνότητας, όμως μειώνοντας την ισχύ που ακτινοβολείται από την κεραία, το μέγεθος του κελιού μπορεί να μειωθεί κατά κάποιο τρόπο. Επίσης κελιά στην κλίμακα του pico, είναι πιο εύκολο να διαμορφωθούν μέσα σε κτίρια, όπου οι μεγάλες απώλειες που προκαλούνται από τους τοίχους του κτιρίου οδηγούν στην ελάττωση του μεγέθους του κελιού. Αντιθέτως, οι υψηλές απώλειες διάδοσης, που παρατηρούνται κατά τη διάδοση ραδιοκυμάτων σε συχνότητες κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ευθεία γραμμή, συμβάλλουν στον σχηματισμό μικρών κελιών.


Ένας άλλος τρόπος για την αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, είναι η αύξηση στη συχνότητα φέροντος, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι κατάμεστες ζώνες συχνοτήτων γενικής χρήσης. Οι υψηλότερες συχνότητες φέροντος μπορεί να παρέχουν μεγαλύτερο εύρος διαμόρφωσης, όμως μπορούν να έχουν και αρνητικές επιπτώσεις όπως είναι η αύξηση του κόστους για τις συνδέσεις που απαιτούνται μεταξύ των σταθμών βάσης και των τερματικών του δικτύου.

Η μείωση στο μέγεθος των κελιών οδηγεί σε καλύτερη φασματική απόδοση μέσω της αυξημένης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Όμως την ίδια στιγμή, μικρότερο μέγεθος κελιών μεταφράζεται σε αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων σταθμών βάσης ή των σημείων ασύρματης πρόσβασης προκειμένου να επιτευχθεί η ευρεία κάλυψη που απαιτούν τα πανταχού παρόντα επικοινωνιακά συστήματα. Επιπλέον, απαιτούνται εκτεταμένα δίκτυα τροφοδοσίας για την εξυπηρέτηση αυτού του μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης. Επομένως, αν το κόστος για τους σταθμούς βάσης ή για τα σημεία ασύρματης πρόσβασης και για τα δίκτυα τροφοδοσίας δεν είναι σημαντικά χαμηλό, τα κόστη για την εγκατάσταση και την συντήρηση τέτοιων συστημάτων θα ήταν απαγορευτικά υψηλά. Αυτό είναι και το σημείο στο οποίο επεμβαίνει η τεχνολογία **Radio-over-Fibre (RoF)** [4]. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας αυτής επιτυγχάνουμε την απλοποίηση των BSs/RAPs (που στην περίπτωση αυτή αναφέρονται σαν **Remote Antenna Units - RAUs**) μέσω της ενοποίησης των λειτουργικών δυνατοτήτων του ραδιοσυστήματος σε ένα κεντρικό σημείο, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από κοινού από πολλές Απομακρυσμένες Μονάδες Κεραιών (RAUs). Επιπροσθέτως, μια περαιτέρω μείωση στα κόστη του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθούν πολύτροπες ίνες χαμηλού κόστους στο εκτεταμένο δίκτυο τροφοδοσίας. Κάτι τέτοιο προκύπτει από την ιδιότητα των πολύτροπων οπτικών ινών να επιτρέπουν τη διάδοση πολλαπλών κατευθυνόμενων τρόπων μολονότι αυτοί παρουσιάζουν διαφορετικές σταθερές διάδοσης. Η διαφορά στους χρόνους μετάδοσης των τρόπων οδηγεί σε διασπορά, γεγονός που περιορίζει σημαντικά το εύρος ζώνης των οπτικών ινών. Αυτό σε συνδυασμό με τα χαμηλά κόστη εγκατάστασης και συντήρησης έχει περιορίσει τη χρήση των πολύτροπων ινών σε εφαρμογές βραχείας ζεύξης, όπως τα **LANs (Local Area Networks)**. Γενικότερα η διασπορά τρόπων είναι ο βασικός ανασταλτικός παράγοντας στη χρήση των πολύτροπων οπτικών ινών σε εφαρμογές μεγάλων συνδέσεων.

Επομένως, προκειμένου τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών να παρέχουν την απαιτούμενη υψηλή χωρητικότητα αλλά και την αποσυμφόρηση στις μπάντες χαμηλότερων συχνοτήτων, οδηγούμαστε αναπόφευκτα στην αύξηση των συχνοτήτων φέροντος και στη μείωση του μεγέθους των κελιών. Κάτι τέτοιο γίνεται εμφανές από τα νέα πρότυπα που αρχίζουν να διαφαίνονται στον τεχνολογικό ορίζοντα και τα οποία σκοπεύουν να χρησιμοποιήσουν κύματα τάξης χιλιοστών (mm-waves). Ο Πίνακας 1

που ακολουθεί περιλαμβάνει μια επισκόπηση των συχνοτήτων λειτουργίας για μερικά από τα τρέχοντα και μελλοντικά ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα.

Πίνακας 1 Εξέλιξη των προτύπων WLAN



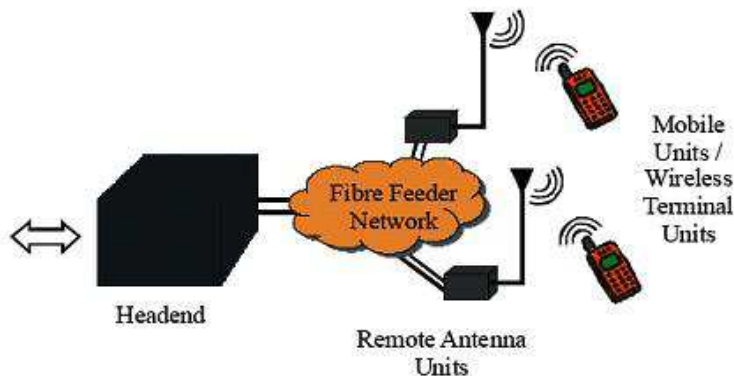
Frequency	Wireless System
2 GHz	UMTS / 3G Systems
2.4 GHz	IEEE 802.11 b/g WLAN
5 GHz	IEEE 802.11 a WLAN
2 – 11 GHz	IEEE 802.16 WiMAX
17/19	Indoor Wireless (Radio) LANs
28 GHz	Fixed wireless access – Local point to Multipoint (LMDS) /
38 GHz	Fixed wireless access, Picocellular
58 GHz	Indoor wireless LANs
57 – 64 GHz	IEEE 802.15 WPAN
10 – 66 GHz	IEEE 802.16 - WiMAX

Για τη μελλοντική παροχή ευρυζωνικών, διαδραστικών και πολυμεσικών υπηρεσιών μέσω ασύρματων μέσων οι τάσεις που κυρίως ακολουθούνται είναι α) η μείωση του μεγέθους κυψέλης που οδηγεί στην αύξηση του αριθμού των κυψελών για τη φιλοξενία περισσότερων χρηστών και β) η λειτουργία σε μικροκυματικές ζώνες συχνοτήτων ώστε να αποφεύγεται η φασματική συμφόρηση στις ζώνες χαμηλότερων συχνοτήτων. Επίσης απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός σταθμών βάσης (Base Stations - BSs) οι οποίοι θα καλύπτουν ένα πεδίο υπηρεσιών, κάτι που καθιστά αναγκαία προϋπόθεση οι σταθμοί αυτοί να είναι οικονομικά αποδοτικοί για να μπορέσουν οι εφαρμογές αυτές να είναι ανταγωνιστικές στην αγορά. Αυτή η απαίτηση οδήγησε στην ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής όπου λειτουργίες όπως δρομολόγηση και επεξεργασία σήματος, παράδοση και κατανομή συχνοτήτων, επιτελούνται σε έναν κεντρικό σταθμό ελέγχου **CS (Central Station)**, αντί στους σταθμούς βάσης. Επιπλέον, μια τέτοια συγκεντρωτική διαμόρφωση παρέχει τη δυνατότητα όλος ο ευαίσθητος εξοπλισμός να είναι συγκεντρωμένος σε ένα πιο ασφαλές περιβάλλον και επιτρέπει το κόστος των πιο ακριβών συνιστωσών να μοιράζεται ανάμεσα στους διάφορους σταθμούς βάσης.

Μια ελκυστική εναλλακτική λύση για τη σύνδεση ενός CS με τους BSs σε ένα τέτοιο ασύρματο δίκτυο γίνεται μέσω ενός δικτύου οπτικών ινών, δεδομένου ότι μια ίνα παρουσιάζει χαμηλές απώλειες, έχει ανοσία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και έχει μεγάλο εύρος ζώνης. Η διάδοση ραδιοσημάτων μέσω ίνας, με μια απλή μετατροπή από το ηλεκτρικό στο οπτικό πεδίο, ακολουθούμενη από εκπομπή σε απομακρυσμένες κεραιές, οι οποίες συνδέονται σε ένα κεντρικό CS, προτάθηκε σαν μια λύση για ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης σε ένα οπτικό φέρον για διάδοση μέσω ενός δικτύου ινών, είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο τεχνολογία « **Radio Over Fiber** » (ROF) [24].

Τι είναι όμως η τεχνολογία ROF; Με τον όρο αυτό, αναφερόμαστε σε μια τεχνολογία με την οποία ηλεκτρικά σήματα (σήματα στο φάσμα των μικροκυμάτων) διαδίδονται χρησιμοποιώντας οπτικές τεχνικές και συνιστώσες. Πιο συγκεκριμένα, ένα δίκτυο που

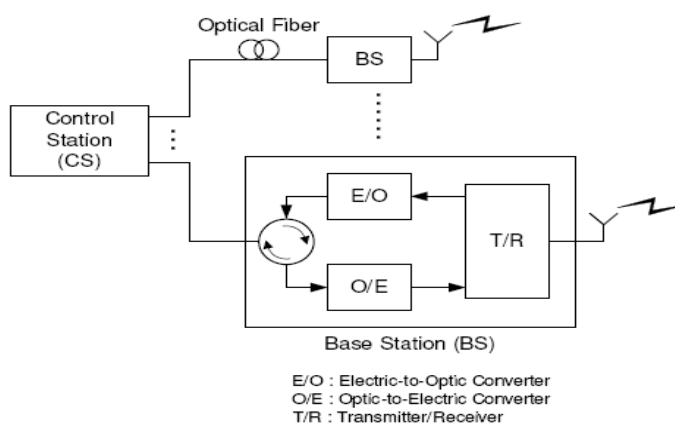
ακολουθεί την αρχιτεκτονική ROF περιλαμβάνει έναν **κεντρικό σταθμό (Central Station - CS ή Central Office - CO)**, στον οποίο λαμβάνουν χώρα όλες οι λειτουργίες μεταγωγής, δρομολόγησης και διαχείρισης συχνοτήτων, και ένα δίκτυο οπτικών ινών, το οποίο διασυνδέει έναν μεγάλο αριθμό λειτουργικά απλών **σταθμών βάσης (Base Stations – BSs ή Remote Access Units - RAUs)** για ασύρματη διανομή σήματος. Στους BSs δεν επιτελείται καμία διεκπεραιωτική λειτουργία και η βασική τους λειτουργία έγκειται στη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ασύρματο και το αντίστροφο. Η Εικόνα 4 αποτυπώνει τη βασική ιδέα λειτουργίας ενός ROF συστήματος.



Εικόνα 4 Η ιδέα ενός συστήματος ROF

Η τεχνολογία ROF θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, όπως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (**Wireless Local Area Networks - WLANs**), σε ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, σε δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης (**Cable Television networks – CATV**) και σε διαστημικούς σταθμούς, όμως χρησιμοποιείται κυρίως όταν μιλάμε για ασύρματη πρόσβαση.

Στα συστήματα ROF, ασύρματα σήματα μεταφέρονται σε οπτική μορφή ανάμεσα σε έναν κεντρικό σταθμό και ένα πλήθος σταθμών βάσης πριν εκπεμφθούν δια μέσω του αέρα. Κάθε σταθμός βάσης είναι προσαρμοσμένος να επικοινωνεί μέσω μιας ραδιοζεύξης με τον κινητό σταθμό τουλάχιστον ενός χρήστη, που βρίσκεται στα πλαίσια του βεληνεκού του συγκεκριμένου σταθμού βάσης. Η βασική δομή της αρχιτεκτονικής ROF φαίνεται στην Εικόνα 5.

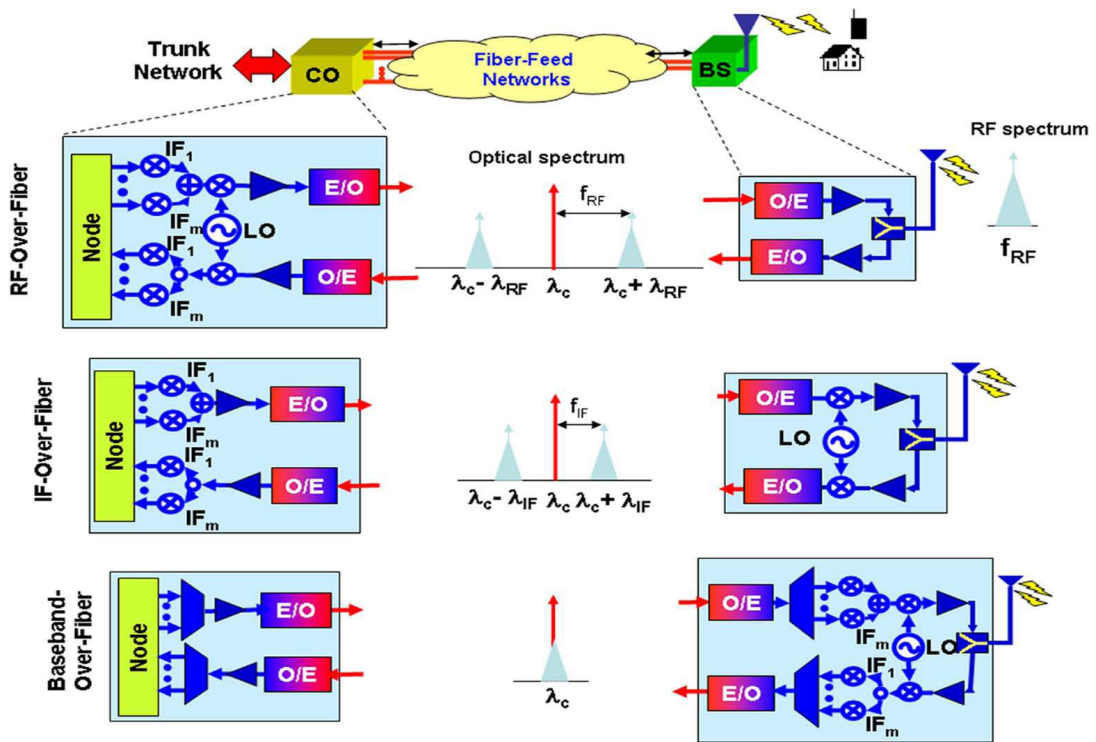


Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική συστήματος ROF

Τα συστήματα μετάδοσης ROF ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση το εύρος συχνοτήτων του ραδιοσήματος που μεταφέρεται κάθε φορά [25]. Οι κατηγορίες είναι οι εξής:

- 1. RF-over-Fiber:** Σε αυτή την κατηγορία ο βασικός άξονας είναι ότι ένα σήμα που μεταφέρει δεδομένα στη ζώνη των ραδιοσυχνοτήτων (RF-Radio Frequency) με υψηλή συχνότητα (συνήθως μεγαλύτερη από 10 GHz) επιβάλλεται σε ένα σήμα φωτός (οπτικό φέρον) προτού μεταδοθεί μέσω της οπτικής ζεύξης. Επομένως, τα ασύρματα σήματα διανέμονται στους σταθμούς βάσης απευθείας σε υψηλές συχνότητες και εκεί μετατρέπονται από οπτικά σε ηλεκτρικά πριν ενισχυθούν και εκπεμφθούν μέσω μιας κεραίας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι απαιτούμενες μετατροπές συχνοτήτων, είτε προς τα πάνω, είτε προς τα κάτω, σε κάθε σταθμό βάσης, οδηγώντας έτσι στην απλοποίηση και στη μείωση του κόστους για την υλοποίηση των σταθμών βάσης.
- 2. IF-over-Fiber:** Με αυτή την αρχιτεκτονική, ένα ραδιοσήμα που ανήκει στις ενδιάμεσες συχνότητες (IF-Intermediate Frequency), με μια συχνότητα συνήθως χαμηλότερη από 10GHz, χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του φωτός πριν διαδοθεί δια μέσω της οπτικής ζεύξης. Συνεπώς, ασύρματα σήματα διαδίδονται σε ενδιάμεσες συχνότητες πάνω από οπτικές συχνότητες. Η μεταφορά στην πραγματική συχνότητα μετάδοσης πραγματοποιείται στο σταθμό βάσης.
- 3. BB-over-Fiber:** Σε αυτή τη μέθοδο το ασύρματο σήμα μεταδίδεται σαν ένα σήμα βασικής ζώνης μέσω μιας οπτικής ίνας. Στη συνέχεια η πληροφορία μετατρέπεται στην επιθυμητή ραδιοσυχνότητα κύματος τάξης χιλιοστών στην κεραία του σταθμού βάσης. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η χρήση καθαρά ψηφιακών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για την επεξεργασία σήματος στους σταθμούς βάσης.

Στην Εικόνα 6 βλέπουμε και τις τρεις παραπάνω μεθόδους.



Εικόνα 6 Μέθοδοι διάδοσης ασύρματων σημάτων

Για ποιο λόγο όμως έχει στραφεί το ενδιαφέρον μας στη συγκεκριμένη τεχνολογία; Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η ασύρματη επικοινωνία έχει γίνει πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Η ευρέως διαδεδομένη χρήση κινητών και άλλων ασύρματων συσκευών σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών οδηγούν αναπόφευκτα στην αναζήτηση λύσεων για την αύξηση της χωρητικότητας. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει τα ασύρματα συστήματα να έχουν αυξημένη χωρητικότητα στην τροφοδοσία του δικτύου, να λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες φέροντος και να μπορούν να ανταπεξέλθουν στον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό των χρηστών. Όμως, η αύξηση της συχνότητας φέροντος προκαλεί μείωση στο μέγεθος του ραδιο-κελιού, γεγονός που οδηγεί σε οικονομικά ασύμφορα συστήματα τέτοιου είδους. Επιπλέον, τα υψηλά κόστη εγκατάστασης (installation) και συντήρησης (maintenance) των συστημάτων αυτών, σε συνδυασμό με τις ίνες πυριτίου υψηλού εύρους καθιστούν οικονομικά ανέφικτη την εφαρμογή τους στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η τεχνολογία ROF έρχεται σαν λύση στο παραπάνω πρόβλημα, συνδυάζοντας έναν αριθμό πλεονεκτημάτων που την καθιστούν ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Το βασικότερο πλεονέκτημα των συστημάτων ROF είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα απλοποίησης των εγκαταστάσεων στις απομακρυσμένες τοποθεσίες, αφού το μεγαλύτερο μέρος του ακριβού και υψηλών συχνοτήτων εξοπλισμού μπορεί να συγκεντρωθεί σε μια κεντρική τοποθεσία, πιο εύκολα προσβάσιμη και διαχειρίσιμη. Τα οφέλη αυτής της απλοποίησης είναι πολλά και παρατίθενται στη συνέχεια.

1.2 Πλεονεκτήματα των συστημάτων ROF

Ένας από τους λόγους που καθιστούν την τεχνολογία ROF ελκυστική είναι τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει.

1. Χαμηλές απώλειες λόγω εξασθένησης (Low Attenuation Loss)

Η διάδοση μικροκυματικών σημάτων υψηλής συχνότητας είτε στον ελεύθερο χώρο είτε με οποιονδήποτε άλλο τρόπο (π.χ. γραμμές μεταφοράς) είναι δαπανηρή και αρκετά δύσκολη, και αυτό γιατί με την αύξηση της συχνότητας στον ελεύθερο χώρο, οδηγούμαστε αφενός σε αύξηση των απωλειών λόγω ανάκλασης και απορρόφησης και αφετέρου στις γραμμές διάδοσης αυξάνεται η αντίσταση. Επομένως, για να επιτευχθεί η διάδοση σημάτων υψηλής συχνότητας σε μεγάλες αποστάσεις ηλεκτρικά, απαιτείται ακριβός εξοπλισμός αναγέννησης (regenerating). Επιπλέον, η διάδοση των μικροκυμάτων με τη βοήθεια γραμμών διάδοσης είναι ανέφικτη ακόμα και για μικρές αποστάσεις. Μια εναλλακτική λύση σε αυτό το πρόβλημα, είναι η διάδοση σημάτων σε βασικές ή ενδιάμεσες συχνότητες από το **κέντρο μεταγωγής (Switching Center - SC)** στο σταθμό βάσης. Εκεί τα λαμβανόμενα σήματα μετατρέπονται στην απαιτούμενη συχνότητα - μικροκυματική ή στην περιοχή των εκατοστών - ενισχύονται και τελικά εκπέμπονται. Ένα τέτοιο σύστημα θέτει αυστηρότερες απαιτήσεις στους επαναληπτικούς ενισχυτές (amplifier) και στους ισοσταθμιστές (equalizer). Επιπρόσθετα σε κάθε σταθμό βάσης ενδέχεται να είναι απαραίτητη η παρουσία τοπικών ταλαντωτών υψηλής απόδοσης για την επίτευξη της μετατροπής στη συχνότητα του σήματος, γεγονός που οδηγεί σε σύνθετους σταθμούς βάσης με αυστηρές απαιτήσεις επιδόσεων. Εναλλακτικά θα μπορούσε να γίνει χρήση οπτικών ινών, κάτι που επιφέρει πολύ χαμηλότερες απώλειες.

Οι εμπορικά διαθέσιμες **Μονότροπες Ίνες (Single Mode Fibers – SMFs)** που είναι κατασκευασμένες από γυαλί (silica) έχουν απώλειες λόγω εξασθένησης κάτω από 0,2 dB/km για μήκος κύματος 1,55 μm και κάτω από 0,5 dB/km για μήκος κύματος 1,31 μm. Οι **Πολυμερείς Οπτικές Ίνες (Polymer Optical Fibers - POFs)** επιδεικνύουν υψηλότερη εξασθένηση που κυμαίνεται από 10-40 dB/km για μήκη κύματος που ανήκουν στο διάστημα 500-1300 nm. Ωστόσο, αυτές οι απώλειες είναι μικρότερες από αυτές που παρατηρούνται στη διάδοση σημάτων υψηλών συχνοτήτων στον ελεύθερο χώρο ή μέσω καλωδίων χαλκού. Συνεπώς, διαδίδοντας μικροκύματα σε οπτική μορφή οι αποστάσεις διάδοσης αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό και η απαιτούμενη ενέργεια διάδοσης μειώνεται κατά πολύ. Παρ' όλα αυτά, οι POFs όπως και οι πολύτροπες οπτικές ίνες πυριτίου δεν ενδείκνυνται για διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις.

2. Μεγάλο Εύρος Ζώνης (Large Bandwidth)

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι το τεράστιο εύρος ζώνης που προσφέρουν. Υπάρχουν τρία βασικά παράθυρα διάδοσης (transmission windows), τα οποία παρέχουν χαμηλή εξασθένηση, ονομαστικά αυτά με μήκος κύματος 850nm, 1310nm και 1550nm. Για μια απλή μονότροπη οπτική ίνα, ο συνδυασμός των τριών παραπάνω παραθύρων, οδηγεί σε ένα εύρος ζώνης που υπερβαίνει τα 50THz. Παρ' όλα αυτά, οι σημερινές εμπορικές εφαρμογές αξιοποιούν μόνο ένα μέρος αυτής της χωρητικότητας. Έτσι η ανάπτυξη τρόπων εκμετάλλευσης μεγαλύτερης οπτικής χωρητικότητας ανά οπτική ίνα συνεχίζεται. Οι βασικοί παράγοντες που οδηγούν στην εκμετάλλευση όλο και μεγαλύτερου εύρους ζώνης, είναι αφενός η διαθεσιμότητα ινών χαμηλής διασποράς – για το παράθυρο των 1550nm ο Ενισχυτής Ίνας Προσμίξεων Ερβίου (Erbium Doped Fibre Amplifier - EDFA) και αφετέρου η χρήση προηγμένων τεχνικών πολυπλεξίας, όπως Οπτική Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Optical Time Division Multiplexing - OTDM) σε συνδυασμό με τεχνικές Πυκνής Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM).

Εκτός από την υψηλή χωρητικότητα για μεταφορά μικροκυματικών σημάτων, το τεράστιο εύρος ζώνης που παρέχεται από τις οπτικές ίνες προσφέρει και άλλα πλεονεκτήματα. Το υψηλό οπτικό εύρος ζώνης επιτρέπει ταχύτατη επεξεργασία σήματος κάτι που μπορεί να είναι δύσκολο ή ακόμα και αδύνατο να συμβεί σε ηλεκτρονικά συστήματα. Κατά συνέπεια, κάποιες από τις πιο απαιτητικές μικροκυματικές λειτουργίες, όπως το φιλτράρισμα, η μίξη, η μετατροπή προς τα πάνω ή προς τα κάτω (up/down conversion), μπορούν να υλοποιηθούν στον οπτικό τομέα. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία στον οπτικό τομέα καθιστά δυνατή τη χρήση φθηνότερων οπτικών συνιστωσών μικρού εύρους ζώνης, όπως είναι οι δίοδοι laser, εξακολουθώντας να παρέχουν τη δυνατότητα διαχείρισης σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης.

Η χρήση του τεράστιου εύρους ζώνης που παρέχεται από τις οπτικές ίνες συναντά σοβαρά εμπόδια στον περιορισμό του εύρους ζώνης των ηλεκτρονικών συστημάτων, τα οποία είναι οι βασικοί πομποί και δέκτες των δεδομένων διάδοσης. Το πρόβλημα αυτό καλείται «ηλεκτρονική συμφόρηση» (electronic bottleneck) και η λύση του βρίσκεται στην αποτελεσματική πολυπλεξία. Οι τεχνικές OTDM και DWDM που αναφέρθηκαν πιο πάνω, χρησιμοποιούνται σε ψηφιακά οπτικά συστήματα. Στα αναλογικά οπτικά συστήματα, όπως είναι και το σύστημα ROF, χρησιμοποιείται Πολυπλεξία με Υπο-Φέρουσες Συχνότητες (Sub-Carrier Multiplexing - SCM) για την βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης των οπτικών ινών. Με την SCM διάφορα σήματα σε ξεχωριστές μικροκυματικές υπο-φέρουσες συχνότητες, τα οποία διαμορφώνονται με ψηφιακά ή αναλογικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του οπτικού φέροντος, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε μία απλή ίνα, καθιστώντας οικονομικά αποδοτική την τεχνολογία ROF.

3. Ανοσία σε παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων (Immunity to Radio Frequency Interference)

Η ιδιότητα της ανοσίας σε παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα που παρέχει η επικοινωνία με οπτικές ίνες, ειδικά στην περίπτωση διάδοσης μικροκυμάτων. Η ιδιότητα αυτή επιτυγχάνεται επειδή τα σήματα διαδίδονται σε μορφή φωτός μέσω της ίνας. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που παρέχουν οι οπτικές ίνες είναι η ανοσία στις υποκλοπές, γεγονός πολύ σημαντικό για τις επικοινωνίες μέσω οπτικών ινών, καθώς παρέχει προστασία προσωπικών δεδομένων και ασφάλεια.

4. Εύκολη Εγκατάσταση και Συντήρηση (Easy Installation and Maintenance)

Στα συστήματα ROF όλος ο πολύπλοκος και ακριβός εξοπλισμός βρίσκεται στα SCs, γεγονός που απλοποιεί τους απομακρυσμένους σταθμούς βάσης. Για παράδειγμα, οι περισσότερες ROF τεχνικές εξαλείφουν την ανάγκη ύπαρξης τοπικού ταλαντωτή και συναφούς εξοπλισμού στον απομακρυσμένο σταθμό (**Remote Station-RS**). Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας φωτοανιχνευτής, ένας ενισχυτής RF και μια κεραία, συνιστούν τον εξοπλισμό του RS. Ο εξοπλισμός για τη διαμόρφωση και τη μεταγωγή βρίσκεται στο SC στις κεντρικές εγκαταστάσεις και χρησιμοποιείται από διάφορους RSs.

Με αυτόν τον τρόπο οι RSs είναι μικρότεροι και λιγότερο πολύπλοκοι, με αποτέλεσμα να απλοποιούνται σημαντικά οι διαδικασίες εγκατάστασης και να μειώνονται τα κόστη συντήρησης, γεγονός πολύ σημαντικό για τα συστήματα που

χρησιμοποιούν κύματα στην περιοχή των χιλιοστών (mm-waves), αν αναλογιστούμε τον τεράστιο αριθμό των απαιτούμενων κεραιών. Η ύπαρξη ακριβών RSs θα καθιστούσε το κόστος του συστήματος απαγορευτικό. Οι πολυάριθμες κεραιές είναι απαραίτητες για να αντισταθμίζουν το μικρό μέγεθος των ράδιο-κελιών που προκύπτει σαν αποτέλεσμα των περιορισμένων αποστάσεων μετάδοσης των μικροκυμάτων που χρησιμοποιούν κύματα στην περιοχή των χιλιοστών. Σε εφαρμογές όπου οι RSs δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι, οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης έχουν πολύ θετικές επιπτώσεις.

5. Μειωμένη κατανάλωση Ισχύος (Reduced Power Consumption)

Η μειωμένη κατανάλωση ισχύος προκύπτει σαν άμεσο αποτέλεσμα της ύπαρξης απλοποιημένων RSs με μειωμένο εξοπλισμό. Το μεγαλύτερο μέρος του σύνθετου εξοπλισμού βρίσκεται σε ένα κεντρικό SC. Σε κάποιες εφαρμογές, οι κεραιές λειτουργούν με παθητικό τρόπο. Για παράδειγμα, μερικά συστήματα που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων 5GHz και χρησιμοποιούν μικρά ράδιο-κελιά μπορούν να θέσουν τους RSs σε παθητική λειτουργία. Η μειωμένη κατανάλωση ισχύος στους RSs είναι πολύ σημαντική ειδικά αν λάβουμε υπόψη μας ότι πολλές φορές οι RSs τοποθετούνται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες που δεν τροφοδοτούνται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

6. Λειτουργική Ευελιξία (Operational Flexibility)

Τα συστήματα ROF προσφέρουν λειτουργικά οφέλη από την άποψη της λειτουργικής ευελιξίας. Πρώτον, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μικροκυμάτων, ένα ROF σύστημα διανομής μπορεί να γίνει διαφανές στη μορφή του σήματος. Για παράδειγμα η τεχνική της Διαμόρφωσης Έντασης και Άμεσης Ανίχνευσης (Intensity Modulation and Direct Detection - IMDD) μπορεί να λειτουργεί σαν γραμμικό σύστημα και επομένως σαν διαφανές σύστημα. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ίνες χαμηλής διασποράς σε συνδυασμό με πολυπλεξία σε υπο-φέρουσες συχνότητες (SCM). Όταν ισχύει κάτι τέτοιο, τότε το ίδιο ROF σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διανομή κίνησης πολλαπλών φορέων και υπηρεσιών, γεγονός που οδηγεί σε τεράστια εξοικονόμηση.

Δεύτερον, όταν λειτουργίες όπως η μεταγωγή και η διαμόρφωση εκτελούνται σε ένα κεντρικό SC, παρέχεται η δυνατότητα για δυναμική κατανομή της χωρητικότητας. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα διανομής κίνησης βασισμένο στην τεχνολογία ROF που χρησιμοποιείται για το GSM μπορεί να κατανέμεται περισσότερη χωρητικότητα σε περιοχές με μεγαλύτερη κίνηση σε ώρες αιχμής και στη συνέχεια η χωρητικότητα αυτή να ανακατανέμεται σε άλλες περιοχές σε ώρες εκτός αιχμής. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί κατανέμοντας οπτικά μήκη κύματος με την αύξηση της ζήτησης. Κατανέμοντας χωρητικότητα δυναμικά με την αύξηση της ζήτησης καθίσταται περιττή η απαίτηση για μόνιμη κατανομή χωρητικότητας, κάτι που μπορεί να είναι σπατάλη πόρων σε περιπτώσεις που ο φόρτος κίνησης διαφέρει συχνά και με μεγάλες αποκλίσεις. Επιπλέον, η ύπαρξη ενός SC διευκολύνει την εδραίωση άλλων λειτουργιών επεξεργασίας σήματος όπως οι λειτουργίες κινητικότητας.

7. Κύματα τάξης χιλιοστών (Millimeter Waves)

Τα κύματα στην τάξη των χιλιοστών προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα. Παρ' όλα αυτά, τα κύματα αυτά δεν μπορούν να διανεμηθούν ηλεκτρικά, εξαιτίας των υψηλών απωλειών της διάδοσης (propagation losses) σε υψηλές ραδιοσυχνότητες. Επιπλέον η δημιουργία συχνοτήτων σε συχνότητες αυτής της τάξης κύματος αποτελεί πρόκληση. Αυτές οι δυσκολίες περιγράφουν την ηλεκτρονική συμφόρηση που έχουμε ήδη αναφέρει. Η πλέον υποσχόμενη λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση οπτικών μέσων. Οι χαμηλές απώλειες λόγω εξασθένησης και το μεγάλο εύρος ζώνης καθιστούν τη διάδοση των κυμάτων της τάξης των χιλιοστών οικονομικά αποδοτική. Επιπρόσθετα, κάποιες τεχνικές βασισμένες σε οπτικά μέσα έχουν την ικανότητα παραγωγής απεριόριστων συχνοτήτων. Παρακάτω παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών.

Πλεονεκτήματα

Παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης εξαιτίας των φερόντων υψηλών συχνοτήτων. Εξαιτίας των υψηλών απωλειών διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων στον ελεύθερο χώρο, οι αποστάσεις διάδοσης των κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών περιορίζονται σημαντικά. Αυτό επιτρέπει τη χρήση καλά καθορισμένων μικρών ραδιο-κελιών, που παρέχουν τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα οι υπηρεσίες να μπορούν να διανεμηθούν ταυτόχρονα σε μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών.

Μειονεκτήματα

Το μειονέκτημα στη χρήση κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών είναι η ανάγκη για μεγάλο αριθμό BSs, σαν συνέπεια των υψηλών απωλειών διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων. Ακόμα και αν οι BSs είναι αρκετά απλοί, η εγκατάσταση και η συντήρηση του συστήματος ενδέχεται να είναι απαγορευτικές οικονομικά εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των BSs που απαιτούνται.

8. Λειτουργικότητες Ραδιοσυστημάτων (Radio System Functionalities)

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η τεχνολογία ROF δεν χρησιμοποιείται μόνο για τη διάδοση σημάτων στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων αλλά και για λειτουργικότητες των ραδιοσυστημάτων. Από αυτές τις λειτουργίες έχουμε ήδη αναφέρει τη διαμόρφωση και τη μετατροπή συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή της τεχνολογίας ROF στις λειτουργικότητες των ραδιοσυστημάτων υπερβαίνει τις παραπάνω διαδικασίες για να συμπεριλάβει επεξεργασία σημάτων σε πολύ υψηλές συχνότητες. Μερικές από αυτές τις λειτουργίες είναι το φιλτράρισμα και ο έλεγχος της εξασθένησης, λειτουργίες στις οποίες συχνά αναφερόμαστε σαν μικροκυματικές λειτουργίες. Πολλές από αυτές τις λειτουργίες είναι δύσκολο να επιτευχθούν στον μικροκυματικό τομέα εξαιτίας του περιορισμένου εύρους ζώνης και άλλων περιορισμών ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης κύματος. Ωστόσο, αν η επεξεργασία γίνεται στον οπτικό τομέα, υπάρχει διαθέσιμο απεριόριστο εύρος ζώνης για την επεξεργασία σήματος. Σαν αποτέλεσμα, πολλές μικροκυματικές λειτουργίες μπορούν να επιτευχθούν με οπτικές συνιστώσες χωρίς να είναι απαραίτητη ηλεκτρο-οπτική μετατροπή για επεξεργασία από μικροκυματικές συνιστώσες και αντιστρόφως.

Πέρα όμως από τα πολλά πλεονεκτήματα που μας παρέχει η χρήση της τεχνολογίας ROF, παρουσιάζονται και κάποιοι περιορισμοί. Από τη στιγμή που η τεχνολογία ROF περιλαμβάνει αναλογική διαμόρφωση και ανίχνευση φωτός, αποτελεί ουσιαστικά ένα σύστημα αναλογικής μετάδοσης. Επομένως, προβλήματα σημάτων όπως ο θόρυβος και η αλλοίωση, που είναι θεμελιώδους σημασίας στα αναλογικά συστήματα

επικοινωνίας, είναι εξίσου σημαντικά και στα συστήματα ROF. Αυτές οι δυσλειτουργίες τείνουν να περιορίσουν την **Εικόνα Θορύβου (Noise Figure - NF)** και τη **Δυναμική Περιοχή (Dynamic Range - DR)** των ζεύξεων στα συστήματα ROF. Η Εικόνα Θορύβου είναι ένα μέτρο της υποβάθμισης του λόγου **SNR (Signal to Noise Ratio)** και σαν Δυναμική Περιοχή ορίζουμε το λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει μια μεταβλητή ποσότητα όπως ο ήχος ή το φως.

Η Δυναμική Περιοχή είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τα συστήματα κινητής επικοινωνίας, όπως ένα σύστημα GSM, επειδή η ενέργεια που λαμβάνουν οι σταθμοί βάσης από τις κινητές μονάδες ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό. Ήτοι, η ισχύς ραδιοσυχνοτήτων που λαμβάνεται από μια κινητή μονάδα κοντά στο σταθμό βάσης μπορεί να είναι κατά πολύ υψηλότερη από την ισχύ που λαμβάνεται από μια κινητή μονάδα αρκετά χιλιόμετρα μακριά, αλλά στα πλαίσια του ίδιου κελιού.

Οι πηγές θορύβου στις αναλογικές ζεύξεις οπτικών ινών περιλαμβάνουν τη Σχετική Ένταση Θορύβου (Relative Intensity Noise - RIN) του λέιζερ, το θόρυβο φάσης του λέιζερ, το θερμικό θόρυβο του ενισχυτή και τη διασπορά της ίνας. Στα συστήματα ROF που βασίζονται σε Μονότροπες Ίνες, η χρωματική διασπορά μπορεί να περιορίσει το μήκος της ζεύξης ινών. Στα συστήματα ROF που βασίζονται σε Πολύτροπες Ίνες, η διασπορά τρόπων περιορίζει σημαντικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης της ζεύξης και τη διαθέσιμη απόσταση. Αξίζει να επισημάνουμε ότι παρόλο που το ίδιο το σύστημα διάδοσης ROF είναι αναλογικό, το ραδιοσύστημα στο οποίο διανέμεται δεν χρειάζεται να είναι επίσης αναλογικό, αλλά μπορεί να είναι και ψηφιακό, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένες πολυεπίπεδες τεχνικές διαμόρφωσης σήματος όπως η Ορθογώνια Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM).

2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΗΜΑΤΩΝ RF

2.1 Εισαγωγή

Εξαιτίας των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση της τεχνολογίας ROF έχουν αναπτυχθεί αρκετές οπτικές τεχνικές για τη δημιουργία και τη διάδοση μικροκυματικών σημάτων μέσω οπτικών ινών. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα συστήματα που χρησιμοποιούν ROF τεχνικές διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες : RF-over-fibre (RFoF) και IF-over-fibre (IFoF) και baseband-over-fibre (BBoF). Στην πρώτη κατηγορία έχουμε την διάδοση του πραγματικού σήματος ραδιοσυχνοτήτων μέσω της οπτικής ίνας. Ωστόσο, στην δεύτερη κατηγορία τα απαιτούμενα μικροκυματικά σήματα παράγονται στις RAUs με τη βοήθεια ενός τοπικού ταλαντωτή, ο οποίος είτε παρέχεται ξεχωριστά στη RAU είτε μεταφέρεται εξ' αποστάσεως στη RAU. Επομένως, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο μετάδοσης, οι RAUs μπορεί να είναι απλές ή σύνθετες. Στις περιπτώσεις που απαιτείται ξεχωριστός ταλαντωτής για τη RAU, οδηγούμαστε σε αύξηση του κόστους για την απομακρυσμένη μονάδα, ειδικά σε εφαρμογές με κύματα στην τάξη των χιλιοστών. Παρ' όλα αυτά, τέτοιου είδους συστήματα επιδεικνύουν εξαιρετική ευαισθησία στον δέκτη.

Η διάδοση ασύρματων σημάτων στην τεχνική RFoF προσδίδει το πλεονέκτημα χρήσης απλούστερων RAUs σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη κάποιου τοπικού ταλαντωτή ο οποίος εκτελεί διαμόρφωση προς τα πάνω στη συχνότητα. Αυτό όμως μεταφράζεται σε κόστος για εξοπλισμό υψηλών συχνοτήτων στον Κεντρικό Σταθμό (CS). Επιπλέον, αυτή η τεχνική είναι ευαίσθητη στις επιδράσεις από τη διασπορά της ίνας στην ισχύ των ραδιοσυχνοτήτων και στο θόρυβο φάσης. Τέτοιου είδους φαινόμενα αποφεύγονται από την τεχνική IFoF, κάτι τέτοιο όμως μπορεί να μεταφραστεί σε κόστος λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας της RAU, εκτός και αν ο τοπικός ταλαντωτής μεταφέρεται σ' αυτή εξ' αποστάσεως.

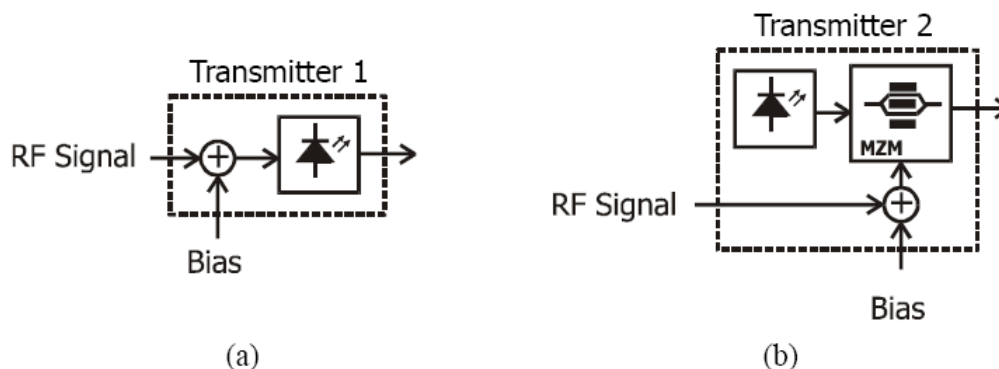
Μια άλλη παράμετρος η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατηγοριοποίηση των τεχνικών ROF, είναι το είδος των κανόνων που εφαρμόζονται για τη διαμόρφωση και την ανίχνευση. Διακρίνουμε τότε άλλες τρεις κατηγορίες τεχνικών, που εμφανίζονται με τους όρους **Διαμόρφωση Έντασης με Άμεση Φώραση (Intensity Modulation – Direct Detection - IMDD)**, Απομακρυσμένη **Ετερόδυνη Φώραση (Remote Heterodyne Detection - RHD)** και τέλος τεχνικές που παράγουν ανώτερες αρμονικές. Τα συστήματα RFoF εμπίπτουν στην κατηγορία IMDD. Τα συστήματα IFoF χρησιμοποιούν επίσης τη μέθοδο IMDD για τη διάδοση δεδομένων, ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις τα συστήματα αυτά βασίζονται στην τεχνική RHD για τη δημιουργία σημάτων.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τις αρχές που διέπουν τις διάφορες μεθόδους παραγωγής σημάτων στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων και παραθέτουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθεμιάς.

2.1.1 Παραγωγή RF σημάτων με τη μέθοδο IMDD

Η απλούστερη μέθοδος για τη διάδοση σημάτων RF με οπτικό τρόπο είναι η απευθείας διαμόρφωση της έντασης της φωτεινής πηγής με το ίδιο το RF σήμα και στη συνέχεια η χρήση άμεσης φώρασης στον φωτοδέκτη για την ανάκτηση του RF σήματος. Συναντάμε δύο τρόπους για τη διαμόρφωση της φωτεινής πηγής: α) επιτρέποντας στο RF σήμα να διαμορφώσει απευθείας το ρεύμα της διόδου λείζερ και β) λείζερ σε λειτουργία συνεχούς κύματος και στη συνέχεια χρήση εξωτερικού διαμορφωτή για τη διαμόρφωση της έντασης του φωτός. Και στις δύο περιπτώσεις, το σήμα που

διαμορφώνεται είναι αυτό που θα διαδοθεί. Το RF σήμα θα πρέπει να έχει διαμορφωθεί καταλλήλως με δεδομένα πριν από τη διάδοση. Γι' αυτό το λόγο η τεχνική RFoF απαιτεί δαπανηρό ηλεκτροπτικό εξοπλισμό υψηλών συχνοτήτων στον CS. Παρατηρούμε και τους δύο τρόπους στην Εικόνα 7 που ακολουθεί.



Εικόνα 7 Παραγωγή σημάτων RF με τη μέθοδο IMDD (a) του λέιζερ (b) με χρήση εξωτερικού διαμορφωτή

Αφού ολοκληρωθεί τόσο η διάδοση μέσω της οπτικής ίνας όσο και η άμεση φώραση σε μια φωτοδίοδο, το φωτόρευμα είναι ένα αντίγραφο του διαμορφούμενου RF σήματος που εφαρμόζεται είτε απευθείας στο λέιζερ είτε στον εξωτερικό διαμορφωτή στον CS. Το φωτόρευμα υποβάλλεται σε ενίσχυση σύνθετης αντίστασης για να παραγάγει μια τάση που με τη σειρά της θα χρησιμοποιηθεί για να διεγείρει την κεραία. Αν το RF σήμα που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του πομπού είναι διαμορφωμένο με δεδομένα, τότε το RF σήμα που ανακτάται στο δέκτη θα μεταφέρει τα ίδια δεδομένα. Επομένως, ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνονται τα δεδομένα διατηρείται.

Οι περισσότερες τεχνικές ROF, με την τεχνική IMDD να είναι μία από αυτές, χρησιμοποιούν μονότροπες οπτικές ίνες για τη διάδοση. Ωστόσο, η χρήση της τεχνικής IMDD για τη διάδοση RF σημάτων μέσω πολύτροπων οπτικών ινών έχει καταδειχτεί για σήματα WLAN κάτω των 6 GHz.

Η τεχνική IMDD είναι σήμερα η κατ' εξοχήν επικρατέστερη μορφή οπτικών ζεύξεων επικοινωνίας λόγω της δομικής της απλότητας και γι' αυτό το λόγο έχει αποδειχτεί εκπληκτικά ανθεκτική στο συναγωνισμό της με άλλους συνδυασμούς διαμόρφωσης – φώρασης. Επιπλέον, αν χρησιμοποιήσουμε ένα χαμηλής διασποράς σε συνδυασμό με έναν εξωτερικό διαμορφωτή, το σύστημα γίνεται γραμμικό. Σαν συνέπεια αυτού, η οπτική ζεύξη ενεργεί μόνο σαν ενισχυτής ή εξασθενητής και είναι ανεξάρτητη του τρόπου με τον οποίο διαμορφώνεται το RF σήμα. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί στοιχειώδη ή ακόμα και μηδενική αναβάθμιση κάθε φορά που επιτελείται κάποια αλλαγή στον τρόπο διαμόρφωσης του RF σήματος.

Παρ' όλα αυτά, η τεχνική IMDD παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η δυσκολία να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος σε εφαρμογές κυμάτων υψηλής συχνότητας στην τάξη των χιλιοστών (mm-waves) και αυτό γιατί, για την παραγωγή σημάτων υψηλότερης συχνότητας, το διαμορφούμενο σήμα θα πρέπει να είναι επίσης στην ίδια υψηλή συχνότητα. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει ευαισθησία στη χρωματική διασπορά, η οποία επιφέρει καταστολή

του εξαρτώμενου από τη συχνότητα ή το μήκος πλάτους της ισχύος RF, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται διαμόρφωση Διπλής Πλευρικής Ζώνης (Double Side Band - DSB) για το οπτικό σήμα.

2.1.2 Παραγωγή RF σημάτων με τη μέθοδο RHD (Remote Heterodyne Detection)

Οι περισσότερες από τις τεχνικές ROF βασίζονται στην αρχή του σύμφωνου συγκερασμού στη φωτοδίοδο, για την παραγωγή του RF σήματος. Ο γενικός όρος με τον οποίο αναφέρονται οι τεχνικές αυτού του είδους είναι Remote Heterodyne Detection (RHD). Με αυτή την τεχνική, το σήμα που μας ενδιαφέρει και το οποίο βρίσκεται σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα, αναμειγνύεται με μη γραμμικό τρόπο με έναν τοπικό ταλαντωτή αναφοράς, ρυθμισμένο σε μια συχνότητα κοντά σε αυτή του σήματός μας. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μία συχνότητα ίση με τη διαφορά των δύο συχνοτήτων, η οποία μεταφέρει τις πληροφορίες του αρχικού, υψηλότερης συχνότητας σήματος, αλλά ταλαντώνεται σε μια χαμηλότερη και πιο εύκολα διαχειρίσιμη συχνότητα φέροντος.

Δεδομένου ότι η συχνότητα εκπομπής του λέιζερ είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, στο θόρυβο φάσης και άλλες παραμέτρους, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές για τη διατήρηση τόσο της απαιτούμενης ολίσθησης στη συχνότητα όσο και της επίδοσης στο θόρυβο φάσης. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον έλεγχο της ολίσθησης στη συχνότητα ανάμεσα στα δύο λέιζερ, όπως

- **Optical Frequency-Locked Loop (OFLL)**
- **Optical Phase-Locked Loop (OPLL)**
- **Optical Injection Locking (OIL)**
- **Optical Injection Phase-Locked Loop (OIPLL)**

οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να δημιουργήσουμε δύο οπτικά φέροντα για σύμφωνη ετεροδύνωση. Μία προσέγγιση είναι η χρήση ενός οπτικού διαμορφωτή φάσης για τη δημιουργία πολλών πλευρικών μπαντών οπτικών συχνοτήτων, και στη συνέχεια η επιλογή των απαιτούμενων συνιστωσών. Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση δύο διαφορετικών πηγών λέιζερ. Οι δύο δίοδοι λέιζερ ρυθμίζονται να εκπέμπουν φως σε συχνότητες που διαφέρουν κατά την απαιτούμενη μικροκυματική συχνότητα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μια από τις προαναφερθείσες μεθόδους για να διατηρήσει την ολίσθηση της συχνότητας ανάμεσα στα δύο οπτικά φέροντα σταθερή και συσχετιζόμενη κατά φάση.

Η τεχνική της οπτικής ετεροδύνωσης παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορούν να παραχθούν πολύ υψηλές συχνότητες οι οποίες περιορίζονται μόνο από το εύρος ζώνης του φωτοανιχνευτή. Επιπλέον η ετεροδύνωση αποφέρει υψηλότερο κέρδος σύνδεσης και υψηλότερο λόγο φέροντος προς θόρυβο (carrier-to-noise ratio - CNR). Αυτό προκύπτει επειδή οι οπτικές δυνάμεις και από τα δύο οπτικά πεδία συμβάλλουν στην ισχύ του παραγόμενου μικροκυματικού σήματος.

Η απομακρυσμένη ετεροδύνωση παρουσιάζει ένα εγγενές πλεονέκτημα όσον αφορά τη χρωματική διασπορά. Αν μόνο ένα από τα δύο οπτικά φέροντα είναι διαμορφωμένο με δεδομένα, η ευαισθησία του συστήματος στη χρωματική διασπορά μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στις μεθόδους που χρησιμοποιούν την τεχνική IMDD, όπου και τα δύο σήματα πλευρικών ζωνών συχνοτήτων καταλήγουν να διαμορφώνονται με δεδομένα. Η μείωση των επιπτώσεων της χρωματικής διασποράς

είναι πολύ σημαντική σε μεθόδους διαμόρφωσης ευαίσθητες στον θόρυβο φάσης, όπου η διασπορά προκαλεί κύρωση στην ισχύ.

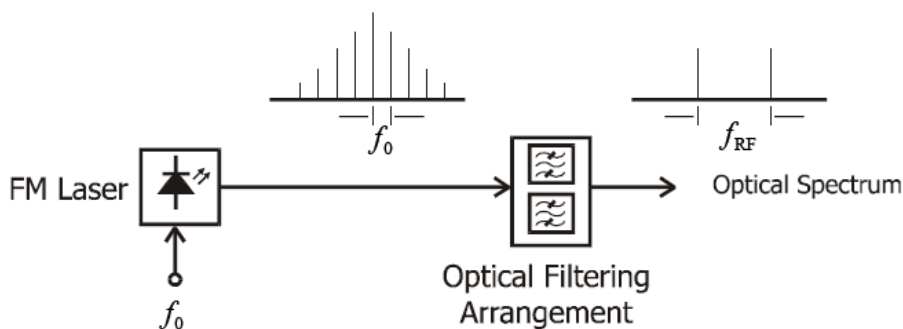
Μια άλλη σημαντική ιδιότητα της μεθόδου RHD είναι ότι επιτρέπει διαμόρφωση δεδομένων χαμηλής συχνότητας στον κεντρικό σταθμό, δεδομένου ότι δεν είναι επιθυμητή η χρήση ηλεκτροοπτικών στοιχείων υψηλής συχνότητας. Συνεπώς, σε αντίθεση με την τεχνική IMDD, ο διαμορφωτής της μεθόδου RHD στον κεντρικό σταθμό μπορεί να οδηγηθεί είτε με δεδομένα στη βασική ζώνη συχνοτήτων είτε με ένα σήμα ραδιοσυχνοτήτων χαμηλής συχνότητας. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της μεθόδου συγκαταλέγονται η φωτονική επεξεργασία σήματος, ο έλεγχος φάσης, το φιλτράρισμα και η μετατροπή συχνότητας.

Στον αντίποδα, το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ισχυρή επιρροή του θορύβου φάσης του λέιζερ και οι διακυμάνσεις στην οπτική συχνότητα στην καθαρότητα και την σταθερότητα των παραγόμενων RF φερόντων. Από τη στιγμή που τα λέιζερ ημιαγωγών έχουν μεγάλο φασματικό εύρος, απαιτούνται πρόσθετα μέτρα για τη μείωση του εύρους γραμμής των παραγόμενων RF σημάτων. Έτσι οδηγούμαστε συχνά σε πιο πολύπλοκα συστήματα. Τεχνικές όπως η OPLL και η OIL που αναφέρθηκαν πιο πάνω, χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ευαισθησίας στο θόρυβο φάσης.

Ας δούμε όμως λίγο πιο αναλυτικά τις μεθόδους ελέγχου ολίσθησης συχνοτήτων στα λέιζερ, που αναφέραμε παραπάνω.

• Optical FM-Filter System

Αυτή η τεχνική, είναι τεχνική μονού λέιζερ που περιλαμβάνει διαμόρφωση της οπτικής συχνότητας με εφαρμογή ενός ηλεκτρικού σήματος σε μία από τις ηλεκτρικές επαφές του λέιζερ. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας ακολουθίας οπτικών φασματικών γραμμών, που απέχουν κατά την οδηγό συχνότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Στη συνέχεια επιλέγονται δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων που χωρίζονται κατά τη συχνότητα του απαιτούμενου κύματος στην τάξη των χιλιοστών (mm-wave). Οι επιλεγμένες πλευρικές ζώνες συχνοτήτων προσκρούουν στην επιφάνεια της φωτοδιόδου και συγκεράζονται σύμφωνα για να παράξουν το επιθυμητό σήμα ραδιοσυχνοτήτων. Δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνά για την επιλογή των επιθυμητών πλευρικών ζωνών συχνοτήτων είναι, α) οπτικό φιλτράρισμα ή τεμαχισμός φάσματος και β) λέιζερ σταθερής έγχυσης. Η Εικόνα 8 παρουσιάζει συνοπτικά τα παραπάνω.

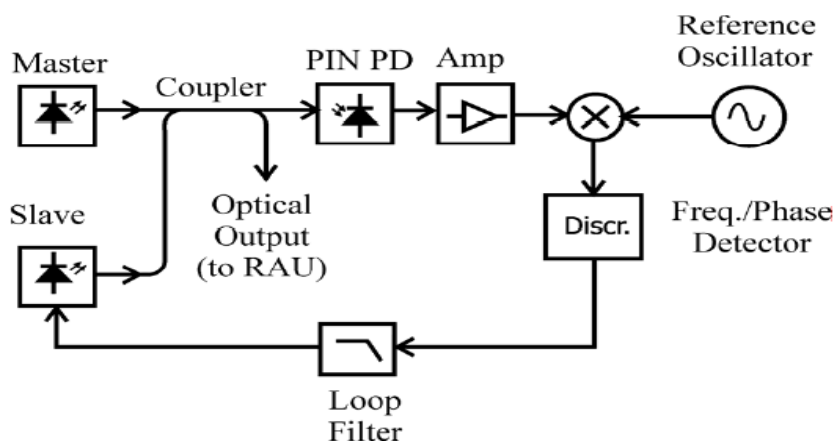


Εικόνα 8 Βασική δομή της μεθόδου Optical FM-Filter

Από τη στιγμή που οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων που συγκεράζονται παράγονται από την ίδια πηγή λέιζερ, είναι καλώς συσχετιζόμενες. Συνεπώς, με αυτή την τεχνική έχουμε τη δυνατότητα παραγωγής mm-wave σημάτων υψηλών συχνοτήτων με πολύ στενό εύρος γραμμής. Από τη άλλη, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και ένα σοβαρό μειονέκτημα, στον ακριβή εντοπισμό οποιασδήποτε μετατόπισης στη θέση των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων από το σύστημα επιλογής τους. Πέραν αυτού απαιτείται εξαιρετικά επιλεκτικό οπτικό φιλτράρισμα. Τέτοια θέματα τείνουν να αυξάνουν την πολυπλοκότητα των συστημάτων ROF. Επιπλέον, η δυνατότητα συντονισμού αυτού του συστήματος είναι πολύ περιορισμένη.

- **Optical Frequency/Phase Locked-Loops (OFLL/OPLL)**

Ο βασικός σχηματισμός για τις τεχνικές OFLL και OPLL, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9, απαρτίζεται από ένα βασικό λέιζερ, μια φωτοδίοδο PIN, έναν μικροκυματικό ενισχυτή, έναν ανιχνευτή φάσης ή συχνότητας, ένα φίλτρο βρόχου, ένα δευτερεύον λέιζερ και έναν μικροκυματικό ταλαντωτή αναφοράς, όπως παρατηρούμε και στην παρακάτω εικόνα. Οι συνδυασμένες έξοδοι των δύο λέιζερ διασπώνται σε δύο μέρη, ένα μέρος εκ των οποίων χρησιμοποιείται στον κεντρικό σταθμό για τις τεχνικές OFLL/OPLL ενώ το δεύτερο μεταδίδεται στην απομακρυσμένη μονάδα πρόσβασης (RAU). Το οπτικό σήμα στον κεντρικό σταθμό υφίσταται τη διαδικασία της ετεροδύνησης σε μια φωτοδίοδο με σκοπό τη δημιουργία ενός μικροκυματικού σήματος, το οποίο συγκρίνεται με το σήμα αναφοράς. Ένα σήμα σφάλματος φάσης (phase error signal) όταν εφαρμόζεται η μέθοδος OPLL και ένα σήμα σφάλματος συχνότητας (frequency error signal) όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος OFLL ανατροφοδοτεί το δευτερεύον λέιζερ. Με αυτόν τον τρόπο, το δευτερεύον λέιζερ αναγκάζεται να παρακολουθεί το κύριο λέιζερ με μια ολίσθηση συχνότητας ανταποκρινόμενη στη συχνότητα του μικροκυματικού ταλαντωτή αναφοράς.



Εικόνα 9 Βασική δομή της μεθόδου OFLL/OPLL

Όπως υποδηλώνει και το όνομα της μεθόδου, με την OFLL προσπαθούμε να διατηρήσουμε το απαιτούμενο αντιστάθμισμα μέσης συχνότητας. Δεν καταστέλλει τις διακυμάνσεις μικρής κλίμακας στη συχνότητα που προκαλούνται από το θόρυβο φάσης. Από την άλλη, και η μέθοδος OPLL είναι σε θέση να παρακολουθήσει διαταραχές

μικρής κλίμακας στην φάση. Για το λόγο αυτό με τις μεθόδους αυτές έχουμε τη δυνατότητα να παράγουμε RF σήματα υψηλής ποιότητας με στενό εύρος γραμμής. Επιπλέον στη μέθοδο αυτή παρέχονται καλές δυνατότητες εντοπισμού θερμοκρασίας και παρουσιάζεται ένα ευρύ φάσμα κλειδώματος. Από την άλλη, οι τεχνικές OFLL, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα συνήθη και πολύ οικονομικά λείζερ κατανεμημένης ανατροφοδότησης (distributed feedback - DFB).

Παρ' όλα αυτά, και οι δύο παραπάνω μέθοδοι παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου OFLL είναι η παραγωγή μικροκυματικών σημάτων με πλατύ εύρος γραμμής, το οποίο προκύπτει σαν άθροισμα των ευρών γραμμής των λείζερ της μεθόδου. Αυτό έρχεται σαν συνέπεια του γεγονότος ότι με τη μέθοδο OFLL προσπαθούμε να διατηρήσουμε το απαιτούμενο αντιστάθμισμα μέσης συχνότητας. Πέραν αυτού, η στιγμιαία συχνότητα του παραγόμενου μικροκυματικού σήματος ισούται με την στιγμιαία διαφορά συχνότητας ανάμεσα στα δύο αντιδρώντα οπτικά πεδία. Επομένως, προκειμένου να έχουμε μικροκυματικά σήματα με στενό εύρος γραμμής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο OFLL, είναι απαραίτητη η χρήση λείζερ με στενό εύρος γραμμής. Ωστόσο με τη μείωση του εύρους γραμμής στην πηγή, μειώνεται η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαδοθεί στην ίνα χωρίς να υποστεί ισχυρή εξασθένηση εξαιτίας της εξαναγκασμένης σκέδασης Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering - SBS). Επομένως, υπάρχει ένα πρακτικό όριο στο πόσο στενά επιτρέπεται να είναι τα εύρη γραμμής των χρησιμοποιούμενων λείζερ.

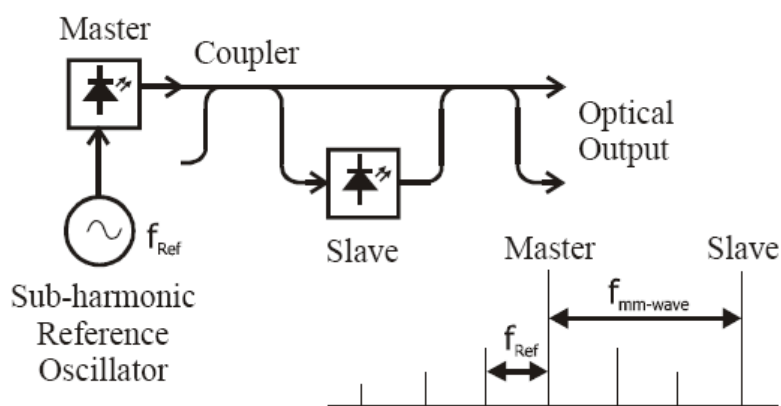
Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου OPLL είναι ότι προϋποθέτει πολύ πιο σύνθετες δομές λείζερ. Αυτό είναι μια άμεση συνέπεια του γεγονότος ότι για να παρακολουθήσουμε τις διαταραχές μικρής κλίμακας στη συχνότητα του βασικού λείζερ, το εύρος συντονισμού του δευτερεύοντος λείζερ πρέπει να είναι σημαντικά υψηλό. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι θα πρέπει να είναι διαθέσιμο επαρκές εύρος ζώνης ανάδρασης. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης ανάδρασης καθορίζεται από τα αθροιζόμενα εύρη γραμμής, από τις απαιτήσεις για σταθερότητα βρόχου και από τις απαιτήσεις θορύβου φάσης που επιδρούν στο οπτικό μικροκυματικό σήμα από το σύστημα στο οποίο θα εφαρμοστεί η μέθοδος OPLL. Όταν χρησιμοποιούνται λείζερ ημιαγωγού, απαιτείται ένα μεγάλο εύρος ζώνης ανάδρασης, επειδή παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα θορύβου φάσης. Προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλο εύρος ζώνης ανάδρασης, η καθυστέρηση λόγω διάδοσης βρόχου πρέπει να είναι μικρή. Επιπλέον, τόσο η απόκριση εύρους ζώνης των μικροκυματικών συνιστωσών, όσο και η απόκριση του δευτερεύοντος FM λείζερ, πρέπει να είναι ευρεία και ομοιόμορφη για το μέγεθος και για τη φάση. Αυτές οι απαιτήσεις είναι δύσκολο να επιτελεστούν καθιστώντας έτσι το σχεδιασμό και την κατασκευή των συνιστωσών της μεθόδου OPLL πολύ ενδιαφέρουσα.

- **Optical Injection Locking (OIL)**

Η τεχνική OIL αφορά στη διαμόρφωση του κύριου λείζερ με ένα σήμα χαμηλής συχνότητας, f_{REF} , το οποίο είναι μια υπο-αρμονική του χρόνου διέλευσης μετ' επιστροφής στην κοιλότητα του δευτερεύοντος λείζερ. Συνεπώς, το φάσμα του κύριου λείζερ περιλαμβάνει πολλές πλευρικές ζώνες χωριζόμενες κατά την υπο-αρμονική συχνότητα f_{REF} . Το διαμορφούμενο σήμα του κύριου λείζερ είναι το σήμα αναφοράς.

Ένα μέρος της εξόδου του κύριου λείζερ τροφοδοτείται σαν είσοδος στο δευτερεύον λείζερ. Δεδομένου ότι η f_{REF} είναι μια υπο-αρμονική της συχνότητας συντονισμού του

δευτερεύοντος λέιζερ, θα υπάρχει μια νιοστή πλευρική συχνότητα της διαμορφωμένης εξόδου του κύριου λέιζερ η οποία θα συμπέσει με τη συχνότητα του δευτερεύοντος λέιζερ. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα το δευτερεύον λέιζερ να κλειδώσει στην πλευρική συχνότητα του κύριου λέιζερ και να συντονίζεται σε αυτή. Κατά συνέπεια, η ολίσθηση στη συχνότητα εκπομπής ανάμεσα στο κύριο και το δευτερεύον λέιζερ θα διαφέρει τόσο κατά την κύρια βασική συχνότητα όσο και κατά τη συχνότητα του σήματος αναφοράς, f_{REF} . Διατηρώντας την f_{REF} σταθερή, η συχνότητα εκπομπής του δευτερεύοντος λέιζερ θα μπορεί να ανιχνεύει οποιαδήποτε διακύμανση στη συχνότητα εκπομπής του κύριου λέιζερ, κρατώντας τη συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος στην τάξη των χιλιοστών σταθερή. Στην Εικόνα 10 που ακολουθεί αποτυπώνονται οι βασικές αρχές αυτής της μεθόδου.

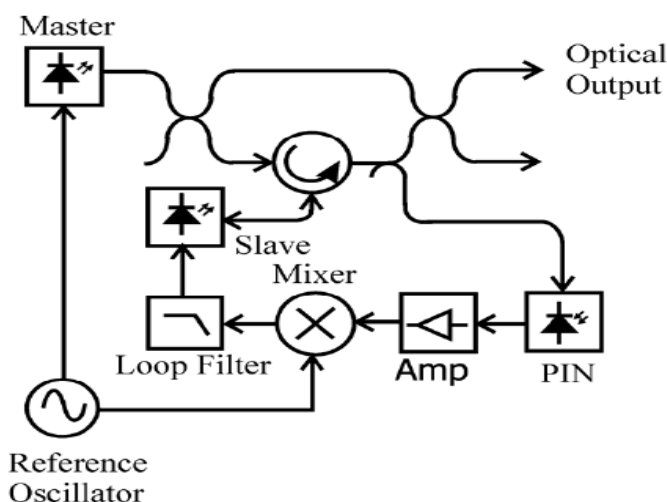


Εικόνα 10 Βασική αρχή της μεθόδου OIL

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι η χρήση πιο οικονομικών λέιζερ για την παραγωγή σημάτων με σταθερό, στενό ηλεκτρικό εύρος γραμμής, η ικανοποιητική καταστολή του θορύβου φάσης λόγω της συσχέτισης κατά φάση των ζωνών πλευρικών συχνοτήτων που αναμιγνύονται και η χρήση σημάτων αναφοράς χαμηλής συχνότητας αφού το δευτερεύον λέιζερ κλειδώνει σε μια υπο-αρμονική της συχνότητας συντονισμού του. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος OIL παρουσιάζει και ένα βασικό μειονέκτημα, το οποίο είναι το μικρό φάσμα συχνοτήτων αποσυντονισμού.

- **Optical Injection Phase Locked Loop (OIPLL)**

Η τεχνική OIPLL συνδυάζει τις αρχές τόσο της μεθόδου OPLL όσο και της μεθόδου OIL. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η αξιοποίηση των προνομίων και των δύο τεχνικών και η διόρθωση των αδυναμιών τους. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11 που ακολουθεί, στη μέθοδο OIPLL, το κύριο λέιζερ διαμορφώνεται σε μια υπο-αρμονική συχνότητα του επιθυμητού κύματος στην τάξη των χιλιοστών, ακριβώς όπως στη μέθοδο OIL. Ένα μικρό μέρος της εξόδου του κύριου λέιζερ διαχέεται στη δίοδο του δευτερεύοντος λέιζερ μέσω ενός οπτικού κυκλοφορητή. Τότε το δευτερεύον λέιζερ ρυθμίζεται να κλειδώσει στη νιοστή αρμονική ζώνη πλευρικών συχνοτήτων του διαχεόμενου από το κύριο λέιζερ φωτός.



Εικόνα 11 Βασική αρχή της μεθόδου OIPLL

Οι έξοδοι των δύο λέιζερ συνενώνονται και οδηγούνται στην έξοδο του συστήματος. Όπως και στη μέθοδο OIL, η απαιτούμενη συχνότητα κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών είναι ίση με την ολίσθηση ανάμεσα στις δύο οπτικές συχνότητες. Ένα μικρό μέρος των συσχετισμένων οπτικών σημάτων υφίσταται επεξεργασία μέσω της μεθόδου OPLL. Στον φωτοανιχνευτή πραγματοποιείται ετεροδύνηση, το παραγόμενο μικροκυματικό σήμα ενισχύεται και στη συνέχεια αντιπαράκειται με το σήμα αναφοράς. Αυτή η σύγκριση γίνεται σε έναν ισορροπημένο μίκτη. Στη συνέχεια η έξοδος περνάει μέσω ενός φίλτρου βρόχου. Το φιλτραρισμένο σήμα μετατρέπεται σε ένα τρέχον σήμα το οποίο προστίθεται στο φέρον έγχυσης του δευτερεύοντος λέιζερ. Με τον τρόπο αυτό έχουμε το συνδυασμό των μηχανισμών ελέγχου των μεθόδων OIL και OPLL.

Η μέθοδος OIPLL επωφελείται από το χαμηλό θόρυβο φάσης που της προσφέρει η εφαρμογή της μεθόδου OIL ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει εκτεταμένο εύρος κλειδώματος, γεγονός που οφείλεται στη χρήση της μεθόδου OPLL σε ένα μέρος του συστήματος. Επιπλέον υποβαθμίζεται η αναγκαιότητα για μικρή καθυστέρηση διάδοσης βρόχου που απαιτεί η μέθοδος OPLL. Τέλος, η μέθοδος OIPLL δεν απαιτεί λέιζερ στενού εύρους γραμμής, αντιθέτως αποδίδει καλά με τα συνήθη και πιο οικονομικά λέιζερ με πλατύ εύρος γραμμής. Το μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πολυπλοκότητα του ίδιου του συστήματος, αφού αποτελείται από δύο ήδη σύνθετες τεχνικές.

- **Dual Mode Lasers**

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το βασικό μειονέκτημα των τεχνικών που βασίζονται στην οπτική ετεροδύνηση είναι η ευαισθησία των δύο ετερόδυνων σημάτων στο θόρυβο φάσης και η εξάρτηση του RF σήματος που προσπίπτει στη φωτοδίοδο από την διαφορά στην κατάσταση πόλωσης των δύο ετερόδυνων φερόντων. Μέχρι τώρα έχουμε αναφέρει διάφορες τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν το θόρυβο φάσης του προσπίπτοντος στη φωτοδίοδο σήματος. Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μείωση του θορύβου φάσης είναι η εξασφάλιση της συσχέτισης μεταξύ των ετερόδυνων οπτικών τρόπων. Όταν κάτι τέτοιο εξασφαλιστεί, ο προσπίπτων θόρυβος εξουδετερώνεται. Η συσχέτιση των οπτικών τρόπων μπορεί να επιτευχθεί έχοντας και τους δύο οπτικούς τρόπους στην ίδια κοιλότητα. Ένας τρόπος για να

πετύχουμε κάτι τέτοιο, είναι η αφαίρεση της ολίσθησης φάσης στο λέιζερ DFB έτσι ώστε να μην πραγματοποιούνται ταλαντώσεις στη συχνότητα Bragg. Οδηγούμεστε έτσι στη δημιουργία μιας συσκευής η οποία καλείται Λέιζερ Διπλού Τρόπου (Dual Mode Laser - DML), επειδή εκπέμπει δύο τρόπους, έναν σε κάθε πλευρά της συχνότητας Bragg. Ο απαιτούμενος διαχωρισμός των τρόπων επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση του συντελεστή διαβάθμισης ισχύος.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτεί σύνθετο κύκλωμα ανάδρασης όπως οι διάφορες τεχνικές κλειδώματος οπτικής έγχυσης που έχουμε ήδη αναφέρει. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει περιορισμούς όσον αφορά την ικανότητα συντονισμού, εξαιτίας του στενού εύρους κλειδώματος που εμφανίζει.

2.1.3 Τεχνικές που βασίζονται στην παραγωγή αρμονικών

- **Η τεχνική μετατροπής FM – IM**

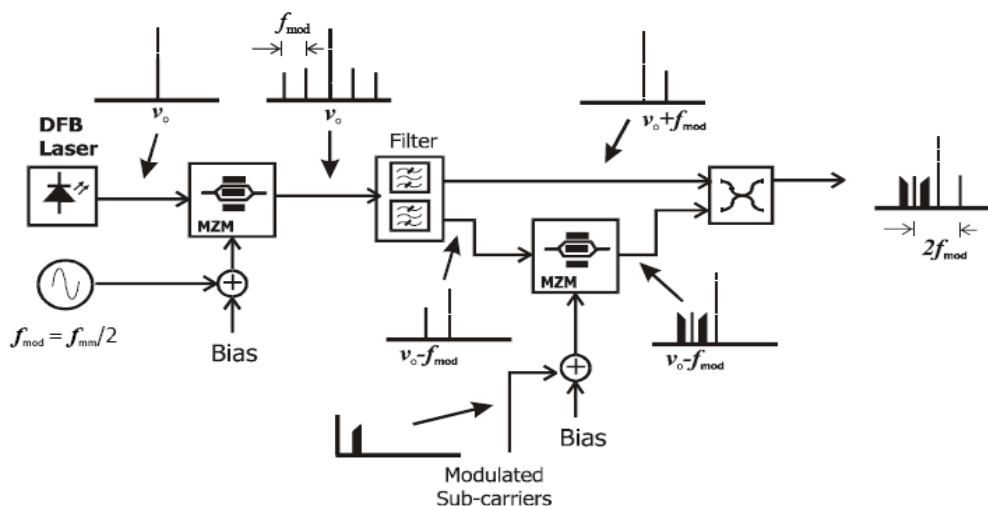
Η τεχνική μετατροπής FM – IM είναι μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα τεχνική, η οποία βασίζει τη λειτουργία της στη χρωματική διασπορά της ίνας. Η μετατροπή ενός σήματος διαμορφωμένου κατά συχνότητα (FM modulated) σε ένα διαμορφωμένο κατά ένταση (IM modulated) εκτελείται από την ίδια τη χρωματική διασπορά της ίνας. Ένα λέιζερ διαμορφώνεται οπτικά κατά συχνότητα εφαρμόζοντας ένα σήμα οδηγό σε ένα από τα τερματικά του. Αυτό παράγει ένα οπτικό φάσμα το οποίο αποτελείται από φασματικές γραμμές που απέχουν κατά την οδηγό συχνότητα. Στη συνέχεια το διαμορφωμένο κατά συχνότητα σήμα διαδίδεται πάνω από ίνα με διασπορά. Εξαιτίας φαινομένων χρωματικής διασποράς, η σχετική φάση των οπτικών ζωνών πλευρικών συχνοτήτων τροποποιείται οδηγώντας σε διακυμάνσεις στην ένταση του φωτός στις αρμονικές της οδηγού συχνότητας.

Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει αποτελεσματικά κύματα στην τάξη των χιλιοστών σε πολύ υψηλές συχνότητες. Είναι μια εύκολα εφαρμόσιμη τεχνική, της οποίας το βασικό πλεονέκτημα είναι η εκμετάλλευση της ανεπιθύμητης χρωματικής διασποράς της ίνας.

Ένα μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι το βάθος διαμόρφωσης ποικίλει με το μήκος της ίνας. Ωστόσο, μπορεί να υποστηριχθεί ότι η διαφοροποίηση του δείκτη της διαμόρφωσης κατά συχνότητα μπορεί να αντισταθμίσει αυτή την εξάρτηση, ανάμεσα στο μήκος της ίνας και το βάθος στη διαμόρφωση.

- **Τεχνικές Διαμόρφωσης Πλευρικών Ζωνών Συχνοτήτων**

Υπάρχουν δύο τεχνικές αυτού του είδους οι οποίες είναι ευρύτερα γνωστές με τους όρους «μέθοδος $2f$ » και «μέθοδος $4f$ ». Σε αντίθεση με την τεχνική FM – IM, αυτές οι τεχνικές παράγουν αρμονικές υψηλότερης τάξης χωρίς την αναγκαιότητα για ίνα διασποράς, βασιζόμενες στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς του Mach Zehnder διαμορφωτή πλάτους (Mach Zehnder Modulator - MZM). Παρουσιάζουμε ενδεικτικά την τεχνική $2f$ στην Εικόνα 12.



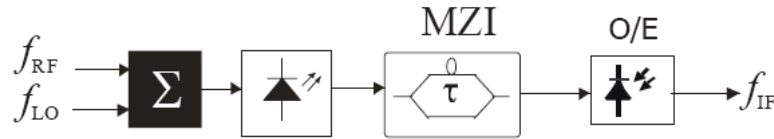
Εικόνα 12 Βασική δομή της μεθόδου 2f

Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην οπτική ετεροδύνηση. Επομένως, έχουν τη δυνατότητα παραγωγής κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών. Δεδομένου ότι το ίδιο λέιζερ παράγει και τα δύο οπτικά πεδία, ο θόρυβος φάσης συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό, οδηγώντας έτσι σε κύματα τάξης χιλιοστών με πολύ στενό εύρος γραμμής. Στην πραγματικότητα, όσον αφορά το θόρυβο φάσης, αυτές οι μέθοδοι είναι συγκρίσιμες με τη μέθοδο OPLL. Τα βάρη διαμόρφωσης που επιτυγχάνονται με αυτές τις τεχνικές είναι στην πράξη μεγαλύτερα από αυτά που πετυχαίνουμε με την FM – IM τεχνική.

Το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζουν αυτές οι τεχνικές είναι η ανάγκη για φιλτράρισμα μίας από τις ζώνες πλευρικών συχνοτήτων για διαμόρφωση δεδομένων. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία προκειμένου το φίλτρο να παραμείνει ευθυγραμμισμένο με την οπτική ζώνη πλευρικών συχνοτήτων που πρόκειται να φιλτραρισθεί.

- **Συγκερασμός βασισμένος σε Συμβολόμετρο**

Πρόκειται για μια ακόμη μέθοδο διαμόρφωσης των αρμονικών προς τα πάνω η οποία χρησιμοποιεί ένα συμβολόμετρο για την επίτευξη του συγκερασμού. Σε αυτή τη μέθοδο, ένα σήμα LO και ένα RF σήμα χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση μιας διόδου λέιζερ και στη συνέχεια συγκεράζονται σε μια σύνθεση Συμβολόμετρου Mach Zehnder (Mach Zehnder Interferometer - MZI)/φωτοδιόδου. Η Ελεύθερη Φασματική Περιοχή (Free Spectral Range- FSR) του MZI επιλέγεται ώστε να μεγιστοποιεί το προϊόν του συγκερασμού. Η πρόκληση σε αυτή την προσέγγιση έγκειται στο γεγονός ότι τόσο το μήκος κύματος του λέιζερ όσο και η απόκριση του φίλτρου πρέπει να σταθεροποιηθούν απέναντι σε περιβαλλοντικές διαταραχές. Τέλος, αυτό το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε διαταραχές πόλωσης. Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται η βασική δομή αυτής της μεθόδου.



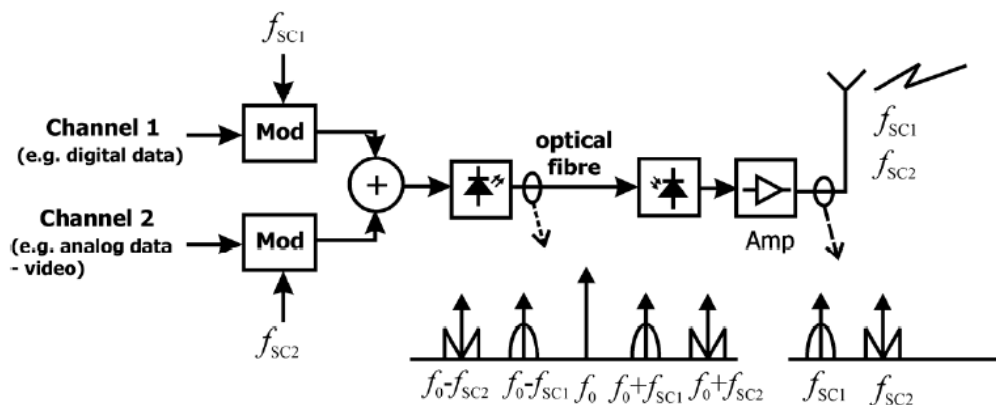
Εικόνα 13 Βασική δομή της μεθόδου συγκερασμού βασιζόμενου σε Συμβολόμετρο

2.1.4 Τεχνικές ROF Πολυπλεξίας

- Συστήματα RoF πολυπλεξίας υπο-φέρουσας

Η μέθοδος Subcarrier Multiplexing είναι μια απλή και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για την εκμετάλλευση του εύρους ζώνης των οπτικών ινών, τόσο σε αναλογικά οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα όσο και σε συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία RoF. Στη μέθοδο SCM, το RF σήμα χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ενός οπτικού φέροντος στην πλευρά του πομπού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός οπτικού φάσματος το οποίο αποτελείται από το αρχικό οπτικό φέρον f_0 μαζί με δύο πλευρικούς τόνους οι οποίοι εντοπίζονται στη συχνότητα $f_0 \pm f_{sc}$, όπου η f_{sc} είναι η υποφέρουσα συχνότητα.

Για την πολυπλεξία πολλαπλών καναλιών στο οπτικό φέρον, πολλαπλές υπο-φέρουσες συνδυάζονται αρχικά και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του οπτικού φέροντος. Στην πλευρά του δέκτη οι υπο-φέρουσες ανακτώνται μέσω άμεσης ανίχνευσης και στη συνέχεια εκπέμπονται μέσω ακτινοβολίας. Διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης μπορούν να εφαρμοστούν σε ξεχωριστές υπο-φέρουσες. Μία υπο-φέρουσα μπορεί να κουβαλάει ψηφιακά δεδομένα, ενώ κάποια άλλη μπορεί να έχει διαμορφωθεί με αναλογικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα δεδομένα τηλεφωνικής κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος SCM υποστηρίζει την πολυπλεξία διαφόρων ειδών ευρυζωνικών δεδομένων. Η διαμόρφωση του οπτικού φέροντος μπορεί να επιτευχθεί είτε με απευθείας διαμόρφωση του λέιζερ, είτε χρησιμοποιώντας εξωτερικούς διαμορφωτές όπως ένας διαμορφωτής Mach Zehnder (MZM). Η Εικόνα 14 παρουσιάζει τη βασική ιδέα της μεθόδου.



Εικόνα 14 Πολυπλεξία Υπο-φέροντος ψηφιακών και αναλογικών σημάτων

Η τεχνική SCM μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στη τεχνική IM-DD όσο και στην τεχνική RHD. Η μέθοδος SCM σε συνδυασμό με τη μέθοδο IM-DD έχει χρησιμοποιηθεί σε συστήματα RoF τροφοδοτούμενα από πολύτροπες ίνες. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη διάδοση WLAN σημάτων σε συχνότητες κάτω των 6GHz.

Ένα από τα θετικά αυτής της μεθόδου, είναι ότι υποστηρίζει μικτά είδη δεδομένων. Κάθε υπο-φέρουσα μπορεί να διαδίδει ένα σήμα με διαφορετικό τύπο διαμόρφωσης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στα ασύρματα LANs. Κάτι τέτοιο προκύπτει σαν συνέπεια του γεγονότος ότι η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και τα δεδομένα που μεταφέρονται πάνω σε κάθε υπο-φέρουσα είναι ανεξάρτητα από τις υπο-φέρουσες που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, επειδή οι υπο-φέρουσες βρίσκονται σε χαμηλές συχνότητες, υπάρχουν ήδη άμεσα διαθέσιμα τα απαραίτητα συστατικά για ένα σύστημα βασισμένο στη μέθοδο SCM. Διαμορφωτές, μίκτες, ενισχυτές και άλλα δορυφορικά συστήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα SCM οδηγώντας σε ακόμα χαμηλότερα κόστη.

Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής έγκειται στην αναλογική της φύση, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευαίσθητη σε επιπτώσεις θορύβου και σε παραποιήσεις που οφείλονται σε μη γραμμικότητες.

- **Συστήματα RoF Πολυπλεξίας με Διαίρεση Μήκους Κύματος**

Η μέθοδος WDM για τη διάδοση σημάτων RoF επιτρέπει την αποτελεσματική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης του δικτύου ινών. Ωστόσο, η μετάδοση σημάτων RoF θεωρείται αναποτελεσματική όσον αφορά τη χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος, δεδομένου ότι το εύρος ζώνης της διαμόρφωσης είναι πάντα ένα μικρό μέρος της συχνότητας του φέροντος σήματος [10].

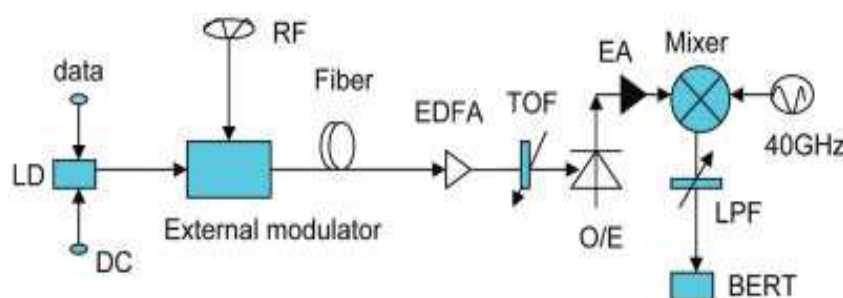
3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ROF

3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία ROF ασχολείται με τη διάδοση ευρυζωνικών ασύρματων σημάτων σε δίκτυα πρόσβασης σε συνδυασμό με δυναμική κατανομή πόρων. Το γεγονός ότι η οπτική διάδοση σημάτων βασικής ζώνης (BB -baseband), για τα σταθερά δίκτυα, και τα συστήματα ROF πρέπει να συνυπάρχουν στα πλαίσια του ίδιου δικτύου προκειμένου να είναι πράγματι οικονομικά αποδοτικά, έχει οδηγήσει σε έρευνα σχετικά με το πώς θα γίνεται ταυτόχρονη παραγωγή και των δύο σημάτων στο ίδιο κανάλι. Παρ' όλα αυτά, εξίσου σημαντική με την ταυτόχρονη παραγωγή των σημάτων BB και ROF είναι και η αποτελεσματική διανομή τους μέσω του δικτύου, ώστε να καλύψει τις ανάγκες των τελικών χρηστών. Επιπλέον, η κίνηση των δεδομένων θα πρέπει να είναι πλήρως αμφίδρομη, και επομένως χρειαζόμαστε στο σύστημά μας μονάδες τοποθετημένες στα APs, ικανές να στέλνουν σήματα BB και ROF στο upstream. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε δημοσιευμένες τεχνικές που έχουν προταθεί σαν λύση για την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία ενός συστήματος ROF.

3.2 Πλήρως οπτική γένεση mm-wave με χρήση λέιζερ κατανεμημένης ανατροφοδότησης άμεσης διαμόρφωσης (Direct-Modulation DFB laser) και εξωτερικού διαμορφωτή

Η λύση αυτή προτάθηκε τον Οκτώβριο του 2006 από τους Lin Chen et al. [5], στην προσπάθειά τους να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των κυμάτων της τάξης των χιλιοστών, σαν μια πολλά υποσχόμενη πηγή συχνοτήτων για τις ευρυζωνικές ραδιοεπικοινωνίες του μέλλοντος. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την παραγωγή οπτικών κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών, από τους οποίους ο πιο απλός και πιο ακριβής είναι χρησιμοποιώντας εξωτερική διαμόρφωση έντασης. Σε αυτή την προτεινόμενη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας διαμορφωτής Mach-Zehnder ως άμεσος διαμορφωτής, βασιζόμενος στην τεχνική της καταστολής του οπτικού φέροντος (**Optical Carrier Suppression - OCS**) και ένα λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης. Η Εικόνα 15 απεικονίζει αυτή την πρόταση.



Εικόνα 15 Βασική αρχιτεκτονική της μεθόδου παραγωγής οπτικών κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης και εξωτερικού διαμορφωτή

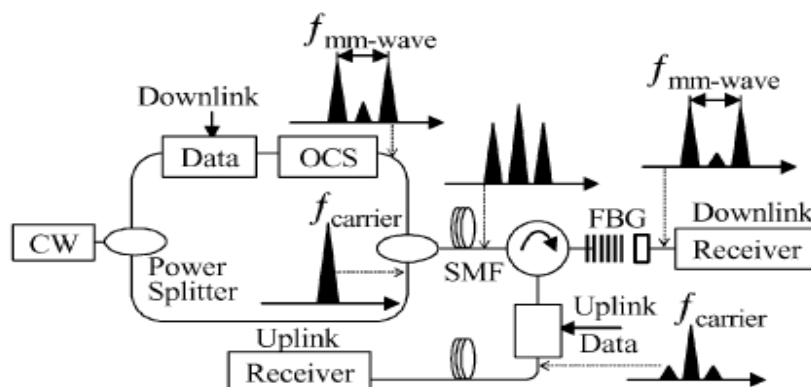
Όπως βλέπουμε, χρησιμοποιείται ένα λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης για την παραγωγή ενός συνεχούς κύματος φωτός και για τη διαμόρφωση του σήματος βασικής

ζώνης. Η ιδέα της καταστολής του οπτικού φέροντος χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία κύματος στην τάξη των χιλιοστών και για τη διαμόρφωση προς τα πάνω του σήματος βασικής ζώνης για το downstream. Ένας διαμορφωτής διπλού βραχίονα Mach Zehnder νιοβικού λιθίου, με τάση πόλωσης v_p και οδηγούμενος από δύο συμπληρωματικά σήματα RF έχει χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη της τεχνικής OCS. Το οπτικό κύμα της τάξης των χιλιοστών μεταδίδεται στο σταθμό βάσης. Εκεί, φιλτράρεται μέσω ενός ρυθμιζόμενου οπτικού φίλτρου (**Tunable Optical Filter - TOF**) πριν από τη διαδικασία της οπτικο-ηλεκτρικής μετατροπής μέσω μιας διόδου PIN. Το σήμα της τάξης των χιλιοστών μετατράπηκε προς τα κάτω με τη βοήθεια ενός μίκτη με ενσωματωμένο σήμα ρολογιού. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, αποδείχτηκε πειραματικά ότι το κανάλι δεδομένων με ρυθμό 2.5 Gb/s, διαδόθηκε επιτυχώς για πάνω από 20 km με downstream που παρουσίαζε ποιινή ισχύος μικρότερη από 1 dB σε σχέση με την back-to-back (BtB) μετάδοση. Μέχρι το 2006, δεν είχε προταθεί ξανά κάποια παρόμοια μέθοδος για την παραγωγή οπτικών κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών.

Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της μεθόδου, διαπιστώθηκε ότι είναι συμπαγής και οικονομικά αποδοτικότερη σε σύγκριση με προηγούμενες παρόμοιες μεθόδους. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε επίσης ότι υπάρχουν και περιθώρια βελτίωσης αυτής της τεχνικής.

3.3 Πλήρως αμφίδρομο σύστημα ROF βασισμένο στην καταστολή και επαναχρησιμοποίηση οπτικού φέροντος

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τους Zhensheng Jia, Jianjun Yu, και Gee-Kung Chang τον Αύγουστο του 2006 [6], σαν μια λύση για πλήρως αμφίδρομη λειτουργία σε φέροντα υψηλών RF συχνοτήτων. Σκοπός αυτής της πρότασης είναι όλο το δίκτυο να στέλνει τα δεδομένα ταυτόχρονα τόσο στο downlink όσο και στο uplink, γεγονός που μεταφράζεται σε πλήρως αμφίδρομη λειτουργία με συμμετρικό ρυθμό δεδομένων προκειμένου να καλυφθούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των νέων δικτυακών υπηρεσιών. Στην Εικόνα 16 που ακολουθεί, φαίνεται η αρχιτεκτονική αυτής της μεθόδου.



Εικόνα 16 Βασική αρχιτεκτονική πλήρως αμφίδρομου ROF συστήματος βασιζόμενου στην καταστολή και επαναχρησιμοποίηση οπτικού φέροντος

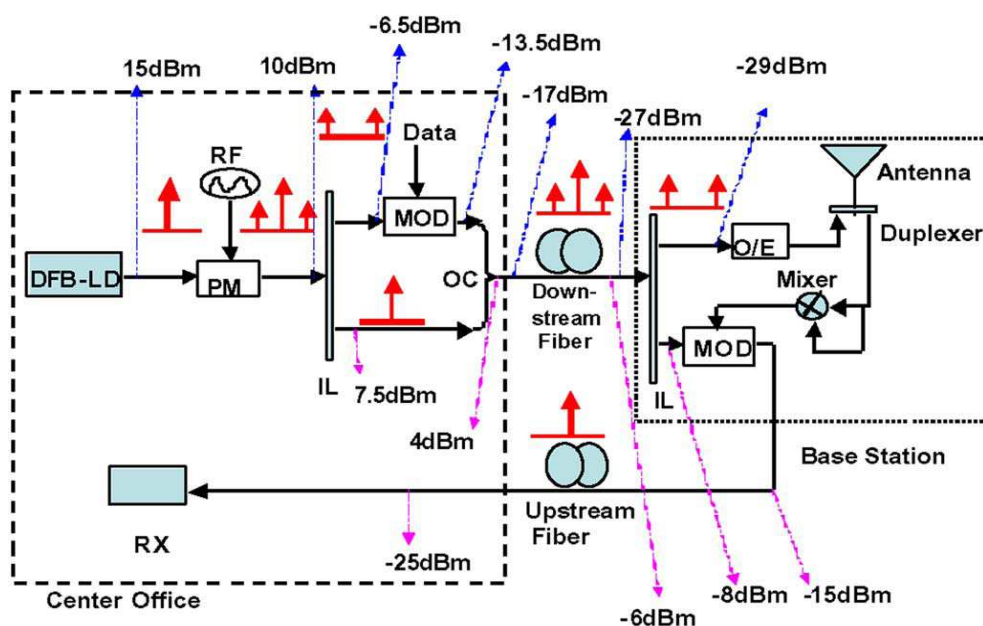
Για την παραγωγή οπτικού κύματος στην τάξη των χιλιοστών και για την ταυτόχρονη διαμόρφωση προς τα πάνω του baseband σήματος δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος OCS. Το αρχικό φέρον διαχωρίζεται πριν από τη διαδικασία OCS και στη συνέχεια συνδυάζεται με ένα οπτικό σήμα της τάξης των χιλιοστών πριν αυτά διαδοθούν στο σταθμό βάσης. Εκεί ένα ζωνοπερατό φίλτρο ανακλά το φέρον και επιτρέπει τη διέλευση του οπτικού σήματος στο δέκτη κατερχόμενης ζεύξης. Το ανακλώμενο φέρον ενεργεί σαν ένα συνεχές κύμα και αφού διαμορφωθεί με το συμμετρικό σήμα της ανερχόμενης ροής, τότε διαδίδεται πίσω στον κεντρικό σταθμό. Στον κεντρικό σταθμό, ένας δέκτης χαμηλών συχνοτήτων ανιχνεύει το σήμα ανερχόμενης ροής.

Χρησιμοποιώντας αυτό το σχεδιασμό, το αμφίδρομο κανάλι δεδομένων, ρυθμού 2.5 Gb/s διαδόθηκε επιτυχώς για περισσότερα από 40 km, ταυτόχρονα για την κατερχόμενη και ανερχόμενη ροή δεδομένων με ποινή ισχύος μικρότερη από 2dB. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτή η μέθοδος έχει πολύ απλή και οικονομικά αποδοτική διαμόρφωση, υψηλή φασματική απόδοση εξαιτίας της χρήσης του ίδιου μήκους κύματος και καλή απόδοση για διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας την με αυτό τον τρόπο μια εφικτή λύση.

3.4 ROF διαμόρφωση με χρήση οπτικού διαμορφωτή φάσης για την παραγωγή οπτικού κύματος στην τάξη των χιλιοστών και συγκεντρωτικού κύματος φωτός για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης

Αυτή η λύση παρουσιάστηκε από τους Jianjun Yu, Zhensheng Jia, Ting Wang και Gee-Kung Chang το Φεβρουάριο του 2007 [7], σαν βελτίωση στην προηγούμενη πρότασή τους που παρουσιάστηκε το 2006 [6]. Σύμφωνα με την προηγούμενη πρόταση γινόταν χρήση της τεχνικής OCS για την παραγωγή οπτικού κύματος τάξης χιλιοστών, μια τεχνική που συνήθως απαιτεί ένα σύνθετο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον έλεγχο του συνεχούς ρεύματος πόλωσης και συμμετρικά RF σήματα, γεγονός που καθιστούσε πολύπλοκη τη δομή του πομπού.

Έτσι, σαν λύση σε αυτό τον περιορισμό, πρότειναν τη χρήση ενός διαμορφωτή φάσης για την παραγωγή οπτικών κυμάτων τάξης χιλιοστών. Ένας διαμορφωτής φάσης, μπορεί να έχει σταθερή λειτουργία χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη ηλεκτρικού κυκλώματος ελέγχου για το συνεχές ρεύμα πόλωσης και επιπλέον, παρουσιάζει μικρότερες απώλειες λόγω παρεμβολών. Η παραπάνω ομάδα ερευνητών απέδειξε ότι ένα οπτικό κύμα τάξης χιλιοστών μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας ένα διαμορφωτή φάσης οδηγούμενο από ένα σχετικά μικρό σήμα RF. Η Εικόνα 17 που ακολουθεί παρουσιάζει τη δομή αυτής της μεθόδου.



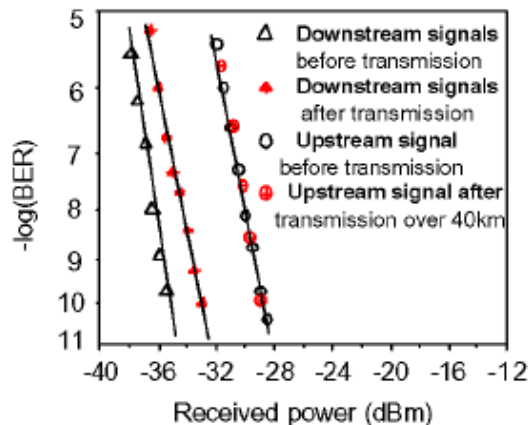
Εικόνα 17 Βασική δομή επαναχρησιμοποίησης οπτικού φέροντος σε σύστημα ROF

Όπως βλέπουμε, για την οδήγηση του διαμορφωτή φάσης χρησιμοποιείται ένα μικρό RF σήμα με πλάτος περίπου ίσο με το 25% της τάσης ημικύματος του διαμορφωτή φάσης. Επειδή το RF σήμα είναι μικρό, μετά τη διαμόρφωση, οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης είναι μικρές. Ωστόσο, η ισχύς του εναπομείναντος οπτικού φέροντος είναι μεγάλη, περίπου 15 dB μεγαλύτερη από την ισχύ του σήματος της πλευρικής ζώνης συχνοτήτων πρώτης τάξης, εξαιτίας της ασθενούς διαμόρφωσης. Αφού διαχωριστούν με τη βοήθεια ενός οπτικού συμπλέκτη, τα σήματα πλευρικής ζώνης συχνοτήτων πρώτης τάξης απομονώνονται από το υπολειπόμενο οπτικό φέρον. Το οπτικό κύμα τάξης χιλιοστών παράγεται όταν τα δύο πρώτα σήματα πλευρικής ζώνης συχνοτήτων πρώτης τάξης ανιχνευτούν από μία φωτοδίοδο. Αφού οι δύο οπτικές φέρουσες με απόσταση ενός κύματος μήκους τάξης χιλιοστών διαμορφωθούν, τότε παράγεται το οπτικό σήμα στην επιθυμητή μορφή για το downstream.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας οπτικός συζεύκτης για να συνδυάσει το οπτικό φέρον που έχει απομείνει και το οπτικό σήμα που φέρει την πληροφορία που προορίζεται για το downlink, έτσι ώστε το οπτικό φέρον να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση του uplink. Μετά τη διάδοσή τους στο σταθμό βάσης, μέσω μιας ζεύξης οπτικών ινών, τα δύο σήματα διαχωρίζονται από έναν πανομοιότυπο interleaver με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στον κεντρικό σταθμό. Έτσι, το οπτικό σήμα με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών, αφού ενισχυθεί και μετατραπεί οπτικο-ηλεκτρικά θα μεταδοθεί από μια κεραία, ενώ το οπτικό φέρον που έχει απομείνει θα διαμορφωθεί από κάποιον άλλο εξωτερικό διαμορφωτή, οδηγούμενο από τα δεδομένα της ανερχόμενης ροής που έλαβε από την κεραία μετά την μετατροπή προς τα κάτω. Τα οπτικά δεδομένα της ανερχόμενης ροής στέλνονται πίσω στον κεντρικό σταθμό είτε μέσω της ίδιας ίνας κατερχόμενης ροής είτε μέσω κάποιας άλλης ίνας για να αποφευχθούν παρεμβολές στα δεδομένα κατερχόμενης ροής. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, τα δεδομένα ανερχόμενης ροής, θεωρείται ότι αποστέλλονται μέσω μιας άλλης ίνας.

Για τη μέθοδο αυτή υπολογίστηκε με πειραματικό τρόπο το περιθώριο θορύβου και παρατηρήθηκε ότι αυτό υφίσταται ακόμα και αν δεν χρησιμοποιείται πουθενά στο σύστημα κάποιος ενισχυτής. Επίσης μετρήθηκε το BER (Bit Error Rate) τόσο για την

κατερχόμενη όσο και για την ανερχόμενη ροή δεδομένων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 18 που ακολουθεί. Βλέπουμε ότι η ποιινή ισχύος για διάδοση δεδομένων με ρυθμό 2.5 Gb/s σε απόσταση μεγαλύτερη από 40 km με το BER ίσο με 10^{-9} είναι 2 dB για την κατερχόμενη ροή δεδομένων, κάτι που προκύπτει από τη διασπορά της ίνας και 0 dB για την ανερχόμενη ροή δεδομένων.



Εικόνα 18 Καμπύλες BER για δεδομένα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης με ρυθμό 2,5 Gb/s

3.5 Αποτελεσματικό σύστημα εκπομπής για συστήματα ROF βασισμένο στην τεχνική AWG-Based DWDM

Η μέθοδος αυτή δημοσιεύτηκε το Φεβρουάριο του 2007 από μια ερευνητική ομάδα που αποτελούνταν από τους Prasanna A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, M. Bakaul, D. Novak και R. Waterhouse [8]. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι τεχνικές ROF παρέχουν τη δυνατότητα αποδοτικής διανομής σημάτων με μήκη κύματος στην τάξη των χιλιοστών. Η χρήση **Οπτικής Σύμπλεξης (Wavelength Interleaving –WI)** σε συνδυασμό με την τεχνική DWDM, οδηγεί σε απλοποίηση της αρχιτεκτονικής των δικτύων ROF και ταυτόχρονα παρέχει τη δυνατότητα σε τέτοιου είδους συστήματα να υποστηρίζουν DWDM δίκτυα τροφοδοσίας τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αυξήσουν τον αριθμό των εξυπηρετούμενων σταθμών βάσης από τον ίδιο κεντρικό σταθμό.

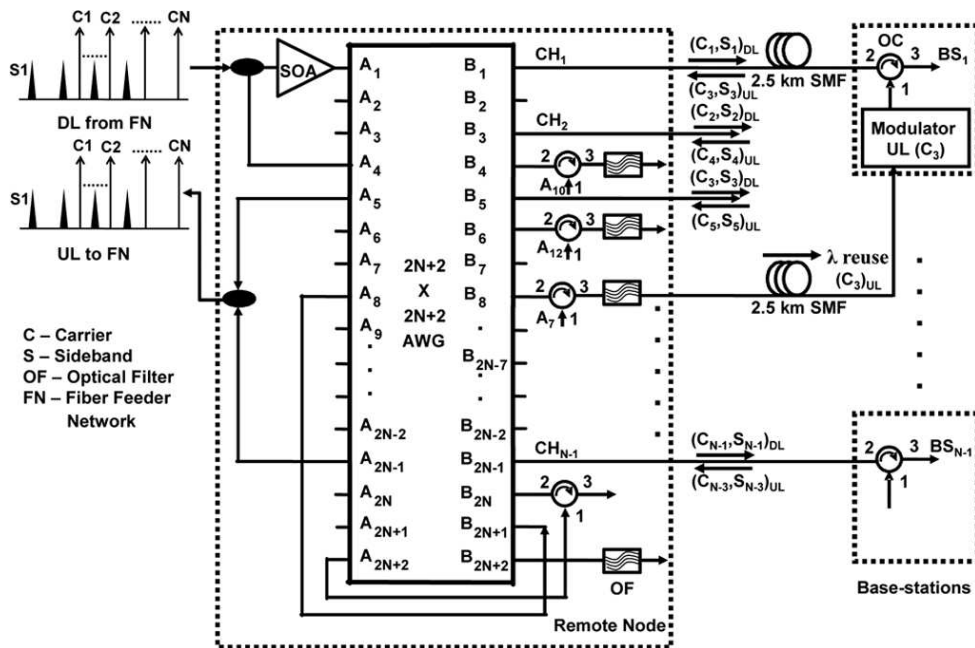
Μία γενικά αποδεκτή αλλά ακριβή λύση για την καλή λειτουργία των συστημάτων ROF είναι η παρουσία οπτικών πηγών στους σταθμούς βάσης. Πάνω σε αυτό έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, όπως η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος και η ταυτόχρονη ανίχνευση και διαμόρφωση με τη βοήθεια ενός Electro-Absorption Modulator. Μια άλλη πρόταση αφορούσε την ιδέα πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας βασιζόμενες σε ένα Φράγμα Συστοιχίας Κυματοδηγών (**Arrayed Waveguide Grating-AWG**) για πλήρως αμφίδρομη διάδοση σε ένα WI-DWDM ROF σύστημα.

Ωστόσο, στην ιδέα αυτή χρησιμοποιείται μια οπτική πηγή για τη διάδοση των δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη, κάτι που δεν την καθιστά μια αποδοτική τεχνική καθώς είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν λείζερ με χαμηλό κόστος, εξαιρετική σταθερότητα και στενό εύρος γραμμής. Ένα άλλο λανθάνον θέμα για τη μέθοδο αυτή είναι ότι λόγω της κυκλικής φύσης του AWG, η διαδικασία της αποπολυπλεξίας οδηγεί

στη δημιουργία ενός μη χρησιμοποιούμενου τμήματος της ισχύος οπτικού φέροντος στην κατερχόμενη ζεύξη στις θύρες εξόδου του AWG.

Σαν λύση στα προαναφερθέντα έρχεται η πρόταση της παραπάνω ερευνητικής ομάδας, σύμφωνα με την οποία ένας **ημιαγωγικός οπτικός ενισχυτής (Semiconductor Optical Amplifier-SOA)** σε συνδυασμό με ένα AWG σε έναν απομακρυσμένο κόμβο (RN- Remote Node) συνθέτουν την ιδέα διάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη. Σε αντίθεση με την προηγούμενη πρόταση, εδώ επιτυγχάνονται σταθμοί βάσης με απουσία πηγής για διάδοση στην ανερχόμενη ζεύξη, αξιοποιώντας οπτικά φέροντα της κατερχόμενης ζεύξης που δεν χρησιμοποιούνται και τα οποία παράγονται κατά τη διαδικασία της αποπολυπλεξίας.

Επιπλέον, με την παρούσα τεχνική βελτιώνεται η συνολική απαίτηση ισχύος τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη, ενώ παράλληλα ενισχύεται ο λόγος φέρον προς πλευρική ζώνη συχνοτήτων (CSR- Carrier-to-Sideband Ratio) για την κατερχόμενη ζεύξη δεδομένων, αφού ο SOA στην οπτική διασύνδεση ενισχύει το RF υπο-φέρον της κατερχόμενης ζεύξης και το οπτικό φέρον της ανερχόμενης ζεύξης. Επιπρόσθετα, οι πολλαπλοί βρόχοι που επιτελούνται στον απομακρυσμένο κόμβο κατά τη διαδικασία της πολυπλεξίας βελτιώνει το CSR της ανερχόμενης ζεύξης. Επομένως αυτή η πρόταση οδηγεί στη δημιουργία σταθμών βάσης με απουσία πηγών λέιζερ και με οικονομικά αποδοτικό προϋπολογισμό ισχύος τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη διάδοσης σε WI-DWDM ROF συστήματα με μήκη κύματος στην τάξη των χιλιοστών. Η Εικόνα 19 που ακολουθεί περιλαμβάνει την βασική δομή αυτής της μεθόδου.



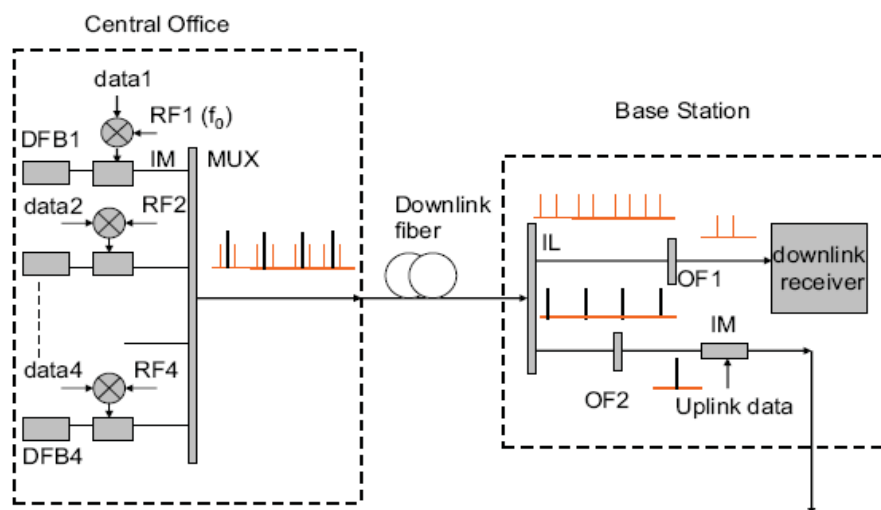
Εικόνα 19 Βασική δομή της μεθόδου AWG

Όπως βλέπουμε, το AWG στον απομακρυσμένο κόμβο εκτελεί ταυτόχρονα τις διαδικασίες πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας των καναλιών ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Ο SOA ενισχύει επιλεκτικά το RF υπο-φέρον της κατερχόμενης ζεύξης και το οπτικό φέρον της ανερχόμενης ζεύξης, προσφέροντας έτσι έναν βελτιωμένο οπτικό προϋπολογισμό και για τις δύο ζεύξεις. Η ανάκτηση δεδομένων

χωρίς παρουσία σφαλμάτων τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη, με αμελητέα ποιινή ισχύος για διάδοση σε απόσταση πάνω από 10 km μονότροπης οπτικής ίνας, καταδεικνύει τη λειτουργικότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

3.6 Γένεση οπτικών DWDM σημάτων μήκους κύματος στην τάξη χιλιοστών με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό εξωτερικό διαμορφωτή

Η ιδέα αυτή παρουσιάστηκε από τους Ying Li, Lin Chen, Shuangchun Wen και Dianyuam Fan το Μάιο του 2008 [9]. Η πρόταση αυτή αφορούσε μια νέα μέθοδο τόσο για την παραγωγή DWDM οπτικών υπό-φερόντων με απόσταση τάξης χιλιοστών και τετραπλάσια συχνότητα από αυτή του τοπικού ταλαντωτή όσο και για την ταυτόχρονη διαμόρφωση προς τα πάνω των δεδομένων βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας μόνο έναν εξωτερικό διαμορφωτή. Η αρχή πάνω στην οποία βασίζεται αυτή η τεχνική παρουσιάζεται στην Εικόνα 20 που ακολουθεί.



Εικόνα 20 Βασική αρχή των οπτικών DWDM σημάτων μήκους κύματος στην τάξη των χιλιοστών με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό εξωτερικό διαμορφωτή

Όπως βλέπουμε, για κάθε κανάλι στον κεντρικό σταθμό, τα σήματα βασικής ζώνης για τα δεδομένα της κατερχόμενης ζεύξης μετατρέπονται προς τα πάνω με το RF φέρον της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή από έναν ηλεκτρικό μίκτη. Κάθε συνεχές κύμα φωτός διαμορφώνεται μέσω ενός εξωτερικού διαμορφωτή νιοβικού λιθίου, ο οποίος οδηγείται από το σήμα που έχει υποστεί προς τα πάνω μετατροπή. Στο σημείο αυτό δεχόμαστε ότι ο διαμορφωτής είναι ιδανικός με συμμετρική DC πόλωση. Αν ο διαμορφωτής είναι πολωμένος στη μέγιστη κορυφή ισχύος εξόδου, οι περιττοί τρόποι μπορούν να κατασταλούν και έτσι να οδηγηθούμε στη γένεση οπτικών φερόντων-πλευρικών με απόσταση στο πεδίο των συχνοτήτων τέσσερις φορές τη συχνότητα του τοπικού ταλαντωτή.

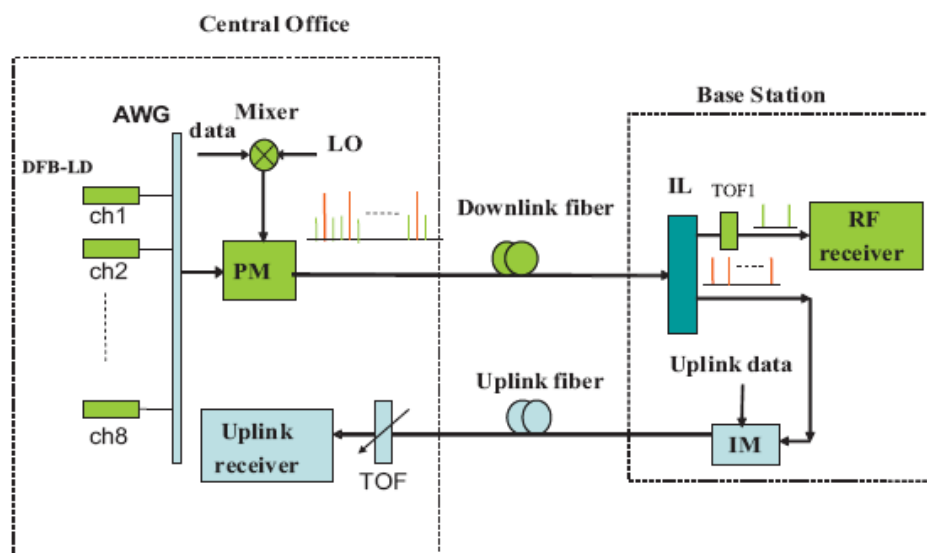
Τα οπτικά κύματα, συμπεριλαμβανομένων τόσο του κεντρικού οπτικού φέροντος όσο και αυτών που ανήκουν στις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης, συνδυάζονται από έναν πολυπλέκτη και μεταφέρονται στο σταθμό βάσης μέσω της ίνας για την κατερχόμενη ζεύξη. Εκεί, ένας οπτικός interleaver, με δύο θύρες εξόδου χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των βασικών οπτικών φερόντων από τα φέροντα των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων δεύτερης τάξης. Στη συνέχεια οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης του επιθυμητού καναλιού επιλέγονται από ένα Συντονιζόμενο Οπτικό Φίλτρο (TOF). Οι δύο κορυφαίοι τρόποι των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων δεύτερης τάξης οδηγούν στη δημιουργία κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών με συχνότητα τετραπλάσια του RF σήματος όταν αυτά εντοπίζονται από το δέκτη της κατερχόμενης ζεύξης. Το υπολειπόμενο οπτικό φέρον, αφού επιλεγεί από ένα TOF μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οπτικό φέρον της ανερχόμενης ζεύξης.

Επομένως, παρατηρούμε ότι με τη μέθοδο αυτή μπορούν να παραχθούν DWDM οπτικά σήματα κατάλληλου μήκους κύματος και απόσταση στο πεδίο των συχνοτήτων τετραπλάσια αυτής του ηλεκτρικού σήματος-οδηγού, και ταυτόχρονα να τροποποιούνται κατά συχνότητα προς τα πάνω χρησιμοποιώντας μόνο έναν εξωτερικό διαμορφωτή. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους και του εύρους ζώνης του εξωτερικού διαμορφωτή καθώς και στην αποφυγή της απαίτησης για RF πηγή υψηλών συχνοτήτων. Για τη μέθοδο αυτή αποδείχτηκε με πειραματικό τρόπο ότι ένα φέρον για το downlink με συχνότητα 40 GHz, με οπτικά σήματα κατάλληλου μήκους κύματος και με τέσσερα κανάλια δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας ένα RF σήμα, συχνότητας 10 GHz καθώς και ότι σήμα δεδομένων κατερχόμενης ροής με ρυθμό διάδοσης 2.5 Gb/s διαδόθηκε σε απόσταση πάνω από 20 km ίνας με ποιινή ισχύος 0.7 dB.

3.7 Σύστημα ROF με κεντροποιημένο κύμα φωτός (centralized lightwave) με χρήση μόνο ενός διαμορφωτή φάσης για τη γένεση DWDM οπτικών κυμάτων τάξης χιλιοστών

Η λύση αυτή προτάθηκε τον Αύγουστο του 2008 από τους Lin Chen, Ze Dong, Jia Lu και Shuang Chun Wen [10] και αφορούσε την παρουσίαση μιας νέας ROF αρχιτεκτονικής σύμφωνα με την οποία η γένεση DWDM οπτικών σημάτων κατάλληλου μήκους κύματος, ώστε να προκύψει για το downlink κύμα μήκους στην τάξη των χιλιοστών και η υλοποίηση της διαδικασίας επαναχρησιμοποίησης μηκών κύματος για τη σύνδεση δεδομένων ανερχόμενης ροής, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μόνο ένα διαμορφωτή φάσης και ένα οπτικό φίλτρο.

Επιπλέον, στο σταθμό βάσης δεν χρησιμοποιείται κάποια επιπρόσθετη πηγή λείζερ για την παραγωγή των δεδομένων ανερχόμενης ροής, ούτε κάποιος μηχανισμός ελέγχου dc πόλωσης για το διαμορφωτή φάσης. Με τον τρόπο αυτό οδηγούμαστε στην απλοποίηση του σχηματισμού για το DWDM ROF σύστημα καθώς και στη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Στην Εικόνα 21 βλέπουμε τη βασική δομή αυτής της αρχιτεκτονικής.



Εικόνα 21 Βασική αρχή για τη δημιουργία DWDM οπτικών σημάτων με απόσταση πλευρικών στην τάξη των χιλιοστών και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος χρησιμοποιώντας έναν μοναδικό διαμορφωτή φάσης

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, τα σήματα RF παράγονται από έναν ηλεκτρικό μίκτη, ο οποίος αναμιγνύει τον τοπικό ταλαντωτή και τα δεδομένα της κατερχόμενης ροής. Με τη διαμόρφωση των συνεχών DWDM κυμάτων φωτός μέσω ενός διαμορφωτή φάσης από τα RF σήματα, μπορούμε να οδηγηθούμε στη δημιουργία κάποιων πλευρικών ζωνών συχνοτήτων διαμορφωμένες με τα downstream δεδομένα. Κάτι τέτοιο εξαρτάται από το πλάτος του RF σήματος – οδηγού στο διαμορφωτή φάσης. Στο σταθμό βάσης, για το διαχωρισμό του οπτικού φέροντος και των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων πρώτης τάξης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ένας οπτικός interleaver, είτε ένας οπτικός κυκλοφορητής και ένα φράγμα Bragg σε cascaded τοπολογία.

Τη στιγμή που τα κεντρικά μήκη κύματος της DWDM πηγής φωτός μπορούν να ταιριάξουν καλά με τον interleaver, το οπτικό φέρον του κάθε καναλιού θα διαχωριστεί από τις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων πρώτης τάξης, αφού το διαμορφωμένο DWDM κύμα φωτός περάσει από τον interleaver. Στη συνέχεια, οι πρώτες πλευρικές ζώνες συχνοτήτων του επιθυμητού καναλιού επιλέγονται από ένα TOF. Οι δύο τρόποι των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων πρώτης τάξης οδηγούν στη δημιουργία ηλεκτρικών σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών και με μία συχνότητα διπλάσια του σήματος του τοπικού ταλαντωτή, όταν αυτά ανιχνευτούν από έναν εξαιρετικά ταχύ δέκτη κυμάτων φωτός. Το οπτικό φέρον μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φέρον για την ανερχόμενη ζεύξη.

Σε ένα πραγματικό, πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό- ανάμειξη (self-mixing) για τη μετατροπή προς τα κάτω των δεδομένων της ανερχόμενης ζεύξης και συνεπώς ο τοπικός ταλαντωτής μπορεί να αφαιρεθεί. Έτσι μειώνεται το κόστος των σταθμών βάσης. Για την πρόταση αυτή αποδείχθηκε πειραματικά ότι η ποιινή ισχύος για τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης μετά από διάδοση σε μονότροπη οπτική ίνα σε απόσταση μεγαλύτερη από 20 km είναι μικρότερη από 2 dB. Αντίστοιχα, για τα δεδομένα ανερχόμενης ζεύξης η ποιινή ισχύος για διάδοση στην ίδια απόσταση θεωρείται αμελητέα.

3.8 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης για τη γένεση οπτικών mm-κυμάτων και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης

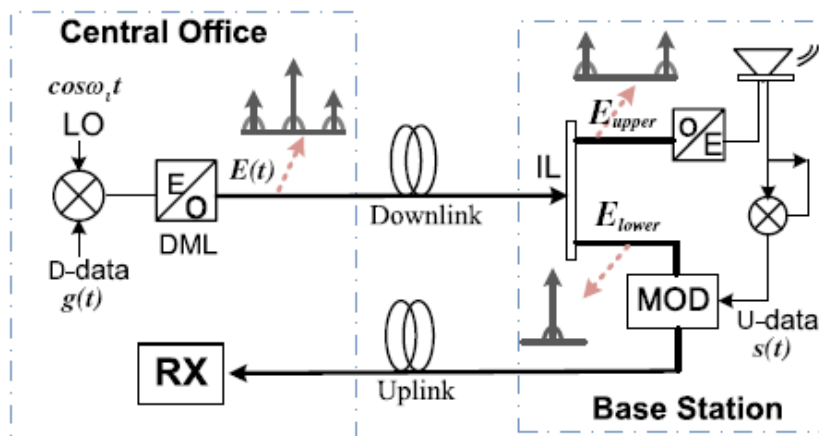
Η πρόταση αυτή παρουσιάστηκε το 2008 από τους Hong Wen, Lin Chen, Cheng Huang, Shuangchun Wen [11] και περιλάμβανε την περιγραφή ενός πλήρως αμφίδρομου ROF συστήματος το οποίο περιλάμβανε τόσο την παραγωγή mm-κυμάτων όσο και την επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης.

Η οπτική γέννηση σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών αποτελεί μια καίρια τεχνολογική λύση στα συστήματα ROF και για το σκοπό αυτό έχουν αναφερθεί πολλές προσεγγίσεις. Μια από αυτές είναι και η διαμόρφωση DSB, η οποία έχει παρουσιάσει μεγάλες δυνατότητες στην παραγωγή σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών υψηλής καθαρότητας. Ωστόσο, ένα οπτικό DSB σήμα πλήττεται από σημαντική χρωματική διασπορά στην ίνα, γεγονός που οδηγεί στην εξασθένιση του σήματος. Ένας τρόπος περιορισμού αυτού του φαινομένου είναι η μετατροπή του οπτικού DSB σήματος σε οπτικό OCS σήμα.

Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας OCS διαμόρφωση στον πομπό, είτε με τεχνικές βασισμένες στο φιλτράρισμα του οπτικού φέροντος. Και οι δύο παραπάνω μέθοδοι δεν οδηγούν σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθώς φαινόμενα όπως απώλειες και απαίτηση για ύπαρξη ακριβούς εξοπλισμού δεν αποφεύγονται και έτσι δεν αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις για αυτό το σκοπό. Στην παρούσα δημοσίευση, προτάθηκε μια οικονομικά αποδοτική μέθοδος για την παραγωγή οπτικών DSB σημάτων. Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε ένα ευρυζωνικό λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης, το οποίο συγκρινόμενο με έναν οπτικό εξωτερικό διαμορφωτή είναι οικονομικά πιο αποδοτικό και παρουσιάζει υψηλότερη ισχύ εξόδου.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό για την πρακτική υλοποίηση των συστημάτων ROF είναι η ύπαρξη πηγών φωτός χαμηλού κόστους, ειδικά για την ανερχόμενη ζεύξη στους σταθμούς βάσης. Για το σκοπό αυτό οι πιο αποδοτικές λύσεις είναι είτε η χρήση συγκεντρωτικών πηγών φωτός ή η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος. Ο βασικός άξονας της επαναχρησιμοποίησης του μήκους κύματος είναι η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος που εκπέμπεται από τον κεντρικό σταθμό για την επαναδιαμόρφωση σήματος ανερχόμενης ροής στους σταθμούς βάσης. Παρατηρείται απουσία τόσο πηγών φωτός όσο και σχετικών μηχανισμών ελέγχου σε κάθε σταθμό βάσης. Μέχρι τώρα μερικές ιδέες για την επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος έχουν προταθεί και αποδειχτεί πειραματικά. Σε αυτές τις μεθόδους το οπτικό φέρον ή οι οπτικές πλευρικές ζώνες συχνοτήτων διαχωρίζονται με τη βοήθεια οπτικών φίλτρων και στη συνέχεια επαναδιαμορφώνουν σήματα για την ανερχόμενη ροή.

Στην παρούσα πρόταση, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, παρουσιάζεται ένα πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα το οποίο ενσωματώνει παραγωγή πλευρικών με απόσταση ένα μήκος κύματος τάξης χιλιοστών και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση της ανερχόμενης ζεύξης. Η βασική δομή αυτής της ιδέας φαίνεται στην Εικόνα 22 που ακολουθεί.



Εικόνα 22 Βασική αρχή γένεσης σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση ανερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιώντας ένα DML σε συνδυασμό με έναν IL

Όπως βλέπουμε, στο σταθμό βάσης χρησιμοποιείται ένα ευρυζωνικό DML οδηγούμενο από ένα συγκερασμένο RF σήμα για την παραγωγή οπτικού DSB σήματος. Για το DML το εύρος ζώνης των 3dB είναι μεγαλύτερο από 20 GHz. Ένα τέτοιο λείζερ είναι και εμπορικά διαθέσιμο. Τα συγκερασμένα RF σήματα παράγονται από έναν ηλεκτρικό μίκτη, ο οποίος αναμιγνύει το σήμα του τοπικού ταλαντωτή, συχνότητας 20 GHz, και τα δεδομένα βασικής ζώνης στην κατερχόμενη ζεύξη. Στο σταθμό βάσης, ένας οπτικός interleaver με δύο θύρες εξόδου χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του οπτικού φέροντος από τις οπτικές πλευρικές ζώνες συχνοτήτων πρώτης τάξης του παραγόμενου DSB σήματος.

Στη συνέχεια, οι οπτικές πλευρικές ζώνες συχνοτήτων πρώτης τάξης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σήματος με μήκος κύματος τάξης χιλιοστών με συχνότητα διπλάσια αυτής του συγκερασμένου RF σήματος όταν ανιχνευτούν από το δέκτη κατερχόμενης ζεύξης. Το διαχωρισμένο οπτικό φέρον επαναχρησιμοποιείται σαν πηγή φωτός για την επαναδιαμόρφωση του σήματος δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης.

Η κυματομορφή εξόδου του DML οδηγούμενου από ένα RF συγκερασμένο σήμα $g(t) \cos \omega_1 t$ μπορεί να παρουσιαστεί προσεγγιστικά από την

$$E(t) \approx E_0 \left\{ J_0[\xi g(t)] \cos \omega_c t + J_1[\xi g(t)] \cos(\omega_c + \omega_1)t + J_1[\xi g(t)] \cos(\omega_c - \omega_1)t \right\},$$

όπου $g(t)$ είναι τα δεδομένα κατερχόμενης ροής, ω_1 είναι η κυκλική συχνότητα του σήματος στον τοπικό ταλαντωτή. Σ' ένα πραγματικό σύστημα, υπάρχουν και κάποιες υψηλότερες αρμονικές εξαιτίας της μη γραμμικότητας του DML, αλλά είναι τόσο μικρές που αγνοούνται.

Το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα αποτελείται κυρίως από τη DC συνιστώσα και την αρμονική συνιστώσα συχνότητας $2\omega_1$, δηλαδή το παραγόμενο mm-wave σήμα κατερχόμενης ζεύξης. Ο κύκλος λειτουργίας των κωδικοποιημένων δεδομένων θα μειωθεί μετά τη μετατροπή προς τα κάτω και όταν γίνει ίσος με τον κύκλο λειτουργίας των δεδομένων βασικής ζώνης, δεν θα υπάρχει mm-wave σήμα στη συχνότητα $2\omega_1$. Παρόλο που η χρωματική διασπορά δεν προκαλεί ποινή ισχύος στο mm-wave σήμα κατερχόμενης ζεύξης, εισάγει διασυμβολική παρεμβολή (**Intersymbol Interference - ISI**) στα δεδομένα βασικής ζώνης κατερχόμενης ζεύξης και επομένως η απόσταση διάδοσης του οπτικού mm-wave που παράγεται από αυτή τη μέθοδο περιορίζεται.

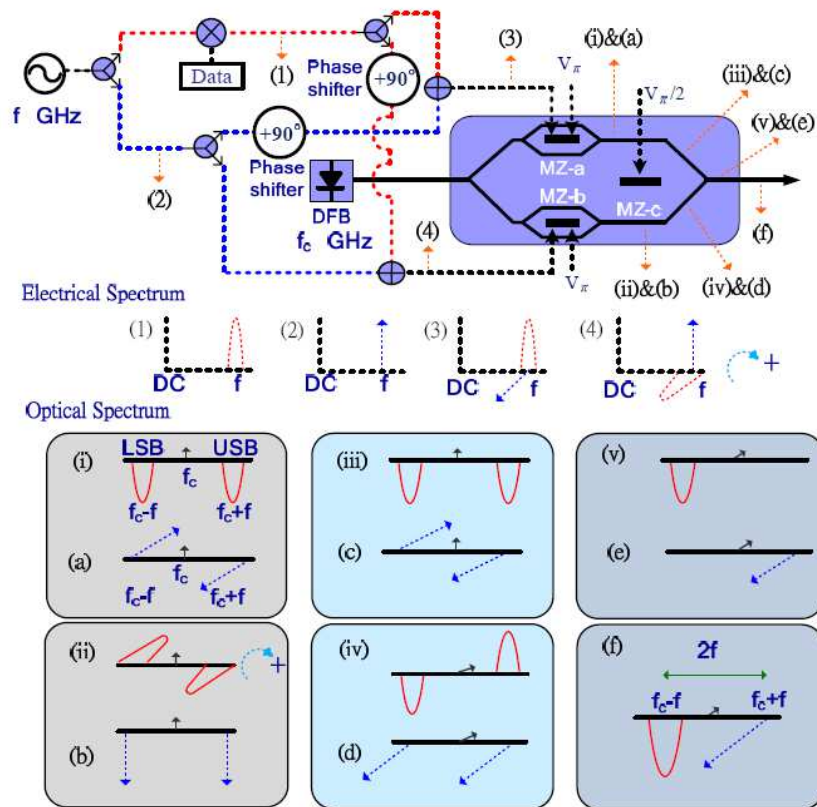
Για τη μέθοδο αυτή αποδείχτηκε πειραματικά ότι η ποινή ισχύος για τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης, για διάδοση σε απόσταση μεγαλύτερη από 40 km μονότροπης ίνας είναι 2.1 dB, ενώ για τα δεδομένα ανερχόμενης ζεύξης η αντίστοιχη ποινή ισχύος είναι μικρότερη από 0.2 dB.

3.9 Παραγωγή οπτικού OFDM σήματος άμεσης ανίχνευσης για ROF ζεύξεις με χρήση της μεθόδου διπλασιασμού συχνότητας με καταστολή φέροντος

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τους Chun-Ting Lin, Yu-Min Lin, Jason (Jyehong) Chen, Sheng-Peng Dai, Po Tsung Shih, Peng-Chun Peng και Sien Chi τον Απρίλιο του 2008 [12].

Ο συνδυασμός της Ορθογώνιας Πολυπλεξίας με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) με τα συστήματα ROF έχει προσελκύσει ιδιαίτερα το ενδιαφέρον για την ευρυζωνική ασύρματη επικοινωνία του μέλλοντος. Η υψηλή κορυφή στο **λόγο ισχύος κορυφής προς μέση ισχύ (Peak to Average Power Ratio-PAPR)** καθώς και η μη γραμμική παραμόρφωση του οπτικού πομπού, είναι τα καίρια ζητήματα που προκύπτουν από τα συστήματα OFDM και ROF αντίστοιχα. Ήδη έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι για την παραγωγή οπτικών RF σημάτων με χρήση ενός εξωτερικού διαμορφωτή Mach-Zehnder, καθεμία βασιζόμενη σε ξεχωριστή τεχνική διαμόρφωσης.

Σε αυτή την πρόταση βλέπουμε να παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος για την παραγωγή οπτικών OFDM-ROF σημάτων άμεσης διαμόρφωσης χρησιμοποιώντας μια νέα ιδέα **Διπλής Πλευρικής Ζώνης Συχνοτήτων με Καταστολή Οπτικού Φέροντος (Double-Sideband with Optical Carrier Suppression-DSBCS)** διαμόρφωσης, η οποία μπορεί να μεταφέρει διανυσματικά σήματα. Μια μέθοδος διπλασιασμού συχνότητας εφαρμόζεται για τη μείωση απαίτησης εύρους ζώνης των ηλεκτρονικών συνιστωσών, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στα συστήματα ROF με κύματα μήκους στην τάξη των χιλιοστών. Η Εικόνα 23 αναπαριστά σχηματικά αυτή τη νέα μέθοδο.



Εικόνα 23 Βασική αρχή για την παραγωγή οπτικών OFDM σημάτων άμεσης ανίχνευσης για ROF ζεύξεις

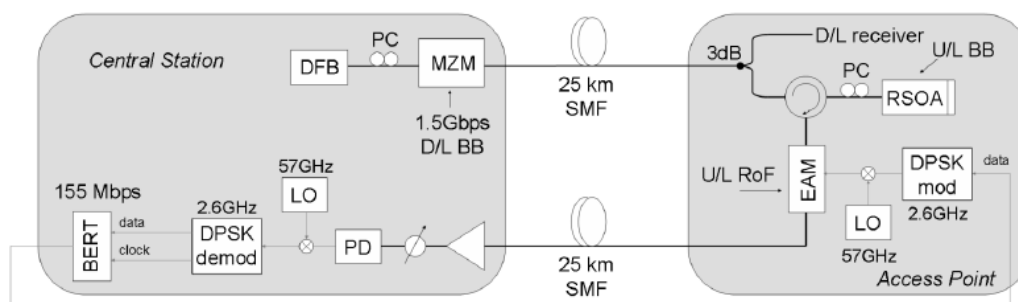
Όπως βλέπουμε, για την παραγωγή των οπτικών σημάτων κατάλληλων συχνοτήτων χρησιμοποιείται ένας ολοκληρωμένος MZM νιοβικού λιθίου, ο οποίος αποτελείται από τρεις MZMs απλού ηλεκτροδίου. Δύο υπό-MZMs (ο a και ο b στην παραπάνω εικόνα) είναι ενσωματωμένοι σε κάθε άκρο του κύριου Mach Zehnder διαμορφωτή (ο c στην παραπάνω εικόνα). Όταν ο a και ο b είναι πολωμένοι στο μηδενικό σημείο, το παραγόμενο οπτικό φέρον αποτελείται από μια ανώτερη πλευρική μπάντα συχνοτήτων (Upper Sideband - USB) και μια κατώτερη πλευρική μπάντα συχνοτήτων (Lower Sideband - LSB) με καταστολή οπτικού φέροντος. Εκτός από μια διαφορά φάσης 90° , τα RF σήματα που στέλνονται στους MZM-a και MZM-b έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά. Όταν ο MZM-c πολωθεί στο σημείο τετραγωνισμού, τόσο η LSB όσο και η USB θα εξαλειφθούν στην έξοδο του ολοκληρωμένου MZM. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιοποιεί το διπλασιασμό συχνότητας και διαδίδει επιτυχώς ένα OFDM σήμα υψηλής χωρητικότητας με ρυθμό διάδοσης 4 Gb/s σε απόσταση μεγαλύτερη από 50 km μονότροπης οπτικής ίνας με αμελητέα ποινή στην ευαισθησία.

3.10 Υβριδική, πλήρως αμφίδρομη αναλογικό/ψηφιακή μονάδα δικτύου ROF με χρήση χρονοθυρίδων

Η πρόταση αυτή παρουσιάστηκε τον Απρίλιο του 2008 από τους J.J. Vegas Olmos, Toshiaki Kuri και Ken Ichi Kitayama [13]. Στη παρουσίαση αυτή αποδείχτηκε πειραματικά η δυνατότητα ύπαρξης ενός πλήρως αμφίδρομου, βασισμένου σε χρονοθυρίδες δικτύου πρόσβασης τόσο με σήματα βασικής ζώνης όσο και με σήματα

ROF. Τα σήματα της ανερχόμενης ζεύξης επιβάλλονται στο φέρον χρησιμοποιώντας έναν **Ανακλαστικό Ημιαγωγικό Οπτικό Ενισχυτή (Reflective Semiconductor Optical Amplifier - RSOA)** για το σήμα βασικής ζώνης και έναν Διαμορφωτή Ηλεκτροαπορρόφησης (Electro-Absorption Modulator-EAM) για το σήμα ROF. Το κέρδος κορεσμού του RSOA μας επιτρέπει να απαλείψουμε αποτελεσματικά το σήμα βασικής ζώνης στην κατερχόμενη ζεύξη, παρέχοντας ένα «λογικά» σταθερό φέρον το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επαναδιαμόρφωση έντασης και φάσης.

Ο RSOA είχε χρησιμοποιηθεί ξανά σε συστήματα αρχιτεκτονικής ROF, έτσι ώστε να οδηγήσει σε βελτίωση της γραμμικότητας της ανερχόμενης ζεύξης. Στην Εικόνα 24 που ακολουθεί, βλέπουμε τη βασική αρχιτεκτονική αυτής της μεθόδου, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 24 Πειραματική διάταξη της μεθόδου με χρήση χρονοθυρίδων

Η εφικτότητα ενός δικτύου βασισμένου στην παραπάνω μέθοδο με σήματα βασικής ζώνης ρυθμού 1.5 Gb/s και ROF σήματα στη ζώνη συχνοτήτων των 60 GHz, αποδείχτηκε και πειραματικά. Όλα τα σήματα διαδόθηκαν επιτυχώς σε μια απόσταση 25 km μονότροπης οπτικής ίνας και ανακτήθηκαν με απουσία σφαλμάτων. Η ιδέα αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε πολυκαναλικές εφαρμογές.

3.11 Γένεση οπτικών σημάτων με πλευρικές ζώνες με απόσταση ένα μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών χρησιμοποιώντας την τεχνική τετραπλασιασμού συχνότητας χωρίς οπτικό φιλτράρισμα

Η μέθοδος αυτή δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2008 από τους Chun-Ting Lin, Po-Tsung Shih, Jason (Jyehong) Chen, Wen-Qiang Xue, Peng-Chun Peng και Sien Chi [14] και αφορά μια νέα μέθοδο για την παραγωγή σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών υψηλής καθαρότητας με καταστολή φέροντος, χρησιμοποιώντας μια τεχνική τετραπλασιασμού της συχνότητας.

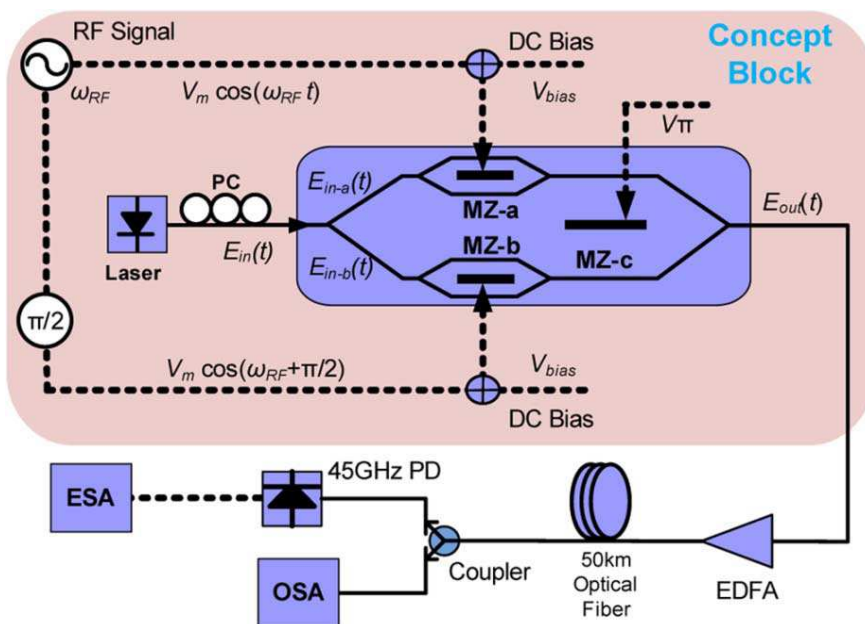
Είναι η πρώτη φορά που παρουσιάζεται μια μέθοδος σύμφωνα με την οποία ένα σύστημα τετραπλασιασμού συχνότητας απαιτεί μόνο έναν απλό ολοκληρωμένο MZM χωρίς να χρειάζεται κάποιο οπτικό φίλτρο στενής ζώνης για την αφαίρεση των ανεπιθύμητων οπτικών ζωνών πλευρικών συχνοτήτων. Δεδομένου ότι δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη κάποιου οπτικού φίλτρου, ο γρήγορος συντονισμός συχνότητας

είναι απλή διαδικασία και αυτή η προσέγγιση θα είναι πολύ ελκυστική για τα μελλοντικά ROF συστήματα.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα πλεονεκτήματα της χρήσης οπτικών ινών σαν μέσο για τη διάδοση σημάτων με μήκη κύματος στην τάξη των χιλιοστών, βρίσκονται στο σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης και στις πολύ χαμηλές απώλειες διάδοσης. Ωστόσο, η παραγωγή τέτοιου είδους σημάτων σε συχνότητες πάνω από 40 GHz παραμένει μια τεράστια πρόκληση, η οποία περιορίζεται από την απόκριση συχνότητας ενός MZM νιοβικού λιθίου, τυπικά μικρότερη από 40 GHz ή από το διαμορφωτή φάσης. Επιπρόσθετα, οι ηλεκτρικές συνιστώσες και ο ηλεκτρικός εξοπλισμός σε συχνότητες πάνω από 40 GHz, όπως είναι οι ενισχυτές και οι μίκτες είναι πολύ δαπανηρά. Επομένως, η στροφή της ερευνητικής κοινότητας σε αυτή την κατεύθυνση ήταν αναμενόμενη.

Μέχρι τη στιγμή της δημοσίευσης της παρούσης μεθόδου, είχαν προταθεί αρκετές τεχνικές για παραγωγή οπτικών σημάτων με πλευρικές μπάντες που απέχουν απόσταση ένα μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών οι οποίες χρησιμοποιούσαν έναν MZM ή έναν PM για την επίτευξη του πολλαπλασιασμού της συχνότητας. Όμως, καμιά από αυτές τις μεθόδους δεν ήταν τόσο απλή ή οικονομικά αποδοτική. Εδώ βλέπουμε να παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση για τον τετραπλασιασμό της συχνότητας, στην οποία χρησιμοποιείται μόνο ένας εξωτερικός διαμορφωτής χωρίς οπτικό φίλτράρισμα.

Ο λόγος καταστολής του οπτικού φέροντος και της παραμόρφωσης αρμονικών (Optical Carrier and Harmonic Distortion Suppression Ratio - OCSR) για τα σήματα με μήκη κύματος τάξης χιλιοστών στα 40- και 72-GHz, τα οποία παράγονται χρησιμοποιώντας σήματα οδήγησης στα 10- και 18-GHz, μπορεί να ξεπεράσει τα 38 και 36 dB, αντίστοιχα. Από τη στιγμή που το οπτικό φέρον και η παραμόρφωση αρμονικών καταστέλλονται σε μεγάλο βαθμό, το υψηλής καθαρότητας κύμα φωτός δύο τόνων με «φασματική» απόσταση τάξης χιλιοστών, δεν παρουσιάζει δυσλειτουργία λόγω της διασποράς της ίνας. Η Εικόνα 25 που ακολουθεί είναι ένα διάγραμμα της μεθόδου αυτής.



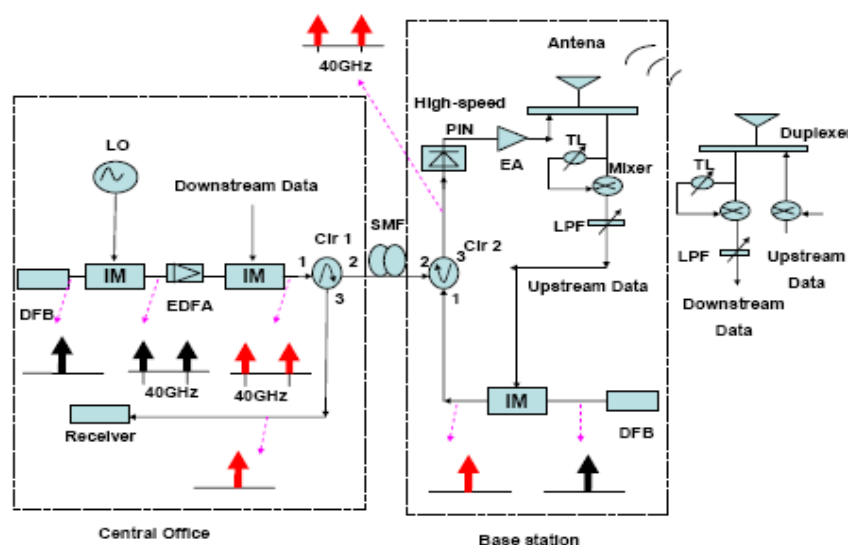
Εικόνα 25 Οπτική διαμόρφωση προς τα πάνω με χρήση τεχνικής πολλαπλασιασμού συχνότητας για WDM ROF συστήματα

Δεδομένου ότι δεν απαιτείται κάποιο οπτικό φίλτρο στη μέθοδο αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε WDM ROF συστήματα καθώς και σε συστήματα παραγωγής συνεχώς συντονισιμων σημάτων με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών. Από τη στιγμή που ο MZM έχει ένα άνω όριο στην απόκριση συχνότητας στα 40 GHz, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα παραγωγής οπτικών σημάτων με πλευρικές που απέχουν ένα μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών με συχνότητα μέχρι τα 160 GHz.

3.12 Νέα αρχιτεκτονική για σύστημα ROF με αμφίδρομη διάδοση μέσω οπτικών ινών για πλήρως αμφίδρομη σύνδεση

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε τον Ιούλιο του 2008 από τους Z. Dong, J. Lu, L. Chen και J. Yu [15] και αποτελεί μια νέα πλήρως αμφίδρομη ROF αρχιτεκτονική, με αμφίδρομη διάδοση οπτικών ινών. Κάποιες προηγμένες πλήρως αμφίδρομες ROF αρχιτεκτονικές έχουν ήδη παρουσιάσει εξειδικευμένες λειτουργίες έτσι ώστε να αποφεύγεται η χρήση φωτός στους σταθμούς βάσης όπως είναι η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για διάδοση στην κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη.

Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της εξαναγκασμένης σκέδασης Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering - SBS), είναι αναγκαία η χρήση διαφορετικών συνδέσεων μετάδοσης οπτικών ινών για το κατερχόμενο και το ανερχόμενο «ρεύμα» δεδομένων. Η αμφίδρομη διάδοση στην ίδια ίνα μπορεί να μειώσει το κόστος, την πολυπλοκότητα και το μέγεθος των δικτύων πρόσβασης στα συστήματα ROF. Η Εικόνα 26 που ακολουθεί απεικονίζει την αρχιτεκτονική αυτής της νέας μεθόδου.



Εικόνα 26 Βασική δομή πλήρως αμφίδρομης αρχιτεκτονικής ROF με χρήση αμφίδρομης διάδοσης μέσω οπτικών ινών

Όπως βλέπουμε, στον κεντρικό σταθμό, το συνεχές κύμα φωτός που παράγεται από μια συστοιχία DFB, διαμορφώνεται μέσω ενός απλού διαμορφωτή νιοβικού λιθίου, βασιζόμενου στην ιδέα της διαμόρφωσης OCS. Έχουμε ήδη αναφέρει, ότι η τεχνική OCS παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή ευαισθησία του δέκτη, η χαμηλή φασματική κατοχή και η απαίτηση για χαμηλό εύρος ζώνης για τις οπτικές και ηλεκτρικές συνιστώσες. Τα οπτικά κύματα με φασματική απόσταση ένα μήκος κύματος τάξης χιλιοστών παράγονται από τις δύο κορυφές των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων πρώτης τάξης. Έτσι, τα παραγόμενα οπτικά κύματα, έχουν μια διπλά επαναλαμβανόμενη συχνότητα του RF σήματος όταν εντοπίζονται από έναν οπτικό δέκτη.

Τα δεδομένα βασικής ζώνης φορτώνονται στο οπτικό σήμα με τις δύο πλευρικές, με τη βοήθεια ενός επιπρόσθετου εξωτερικού διαμορφωτή έντασης. Τότε ο πρώτος οπτικός κυκλοφορητής χρησιμοποιείται για την εξαπόλυση των σημάτων εισόδου στην τυπική μονότροπη οπτική ίνα και για το πέρασμα των σημάτων που φτάνουν από την αντίθετη κατεύθυνση στο δέκτη του Central Office. Τα σήματα της κατερχόμενης ζεύξης λαμβάνονται από έναν φωρατή υψηλής ταχύτητας, προτού ενισχυθούν από έναν ηλεκτρικό ενισχυτή στενής ζώνης και εκπεμφθούν από την κεραία. Τα δεδομένα ανερχόμενης ζεύξης που λαμβάνονται από την κεραία, αρχικά τροποποιούνται προς τα κάτω έτσι ώστε να μετατραπούν σε σήματα βασικής ζώνης με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού μίκτη. Τα ηλεκτρικά δεδομένα βασικής ζώνης ανερχόμενης ζεύξης, χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν έναν άλλο εξωτερικό διαμορφωτή να παράγει οπτικά δεδομένα ανερχόμενης ζεύξης, προτού διαδοθούν αμφίδρομα με τα δεδομένα κατερχόμενης ροής.

Για τη μέθοδο αυτή αποδείχτηκε πειραματικά ότι τόσο τα σήματα κατερχόμενης ζεύξης όσο και τα σήματα ανερχόμενης ζεύξης έχουν αμελητέες επιπτώσεις σε κάθε κατεύθυνση όταν διαδίδονται μέσω της ίδιας ίνας. Η ποιινή ισχύος για τα δεδομένα κατερχόμενης ροής και για διάδοση σε απόσταση πάνω από 20 km μονότροπης οπτικής ίνας μπορεί να αγνοηθεί, ενώ αντίστοιχα για τα δεδομένα ανερχόμενης ροής η ποιινή ισχύος είναι μικρότερη από 0.8 dB για τα ίδια δεδομένα διάδοσης. Το προτεινόμενο ROF σύστημα είναι πολύ πιο αποδοτικό οικονομικά εξαιτίας του μικρότερου αριθμού συνιστωσών του και μπορεί να είναι συμβατό με πολλά οπτικά συστήματα πρόσβασης σε μεγάλες αποστάσεις, χαμηλού κόστους.

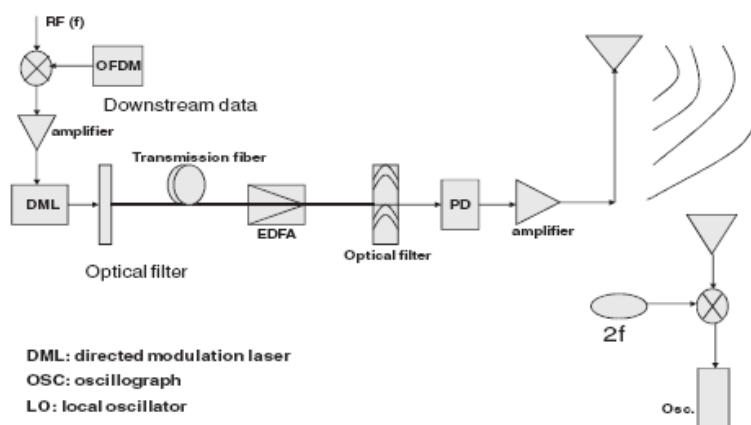
3.13 Σύστημα ROF με φωτονικά παραγόμενα OFDM σήματα χρησιμοποιώντας άμεσα διαμορφωμένο λείζερ

Η πρόταση αυτή παρουσιάστηκε τον Απρίλιο του 2009 από τους L. Chen, J. Lu, J. He, Z. Dong και S. Wen [16]. Ένα σύστημα Ορθογώνιας Πολυπλεξίας με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) μπορεί να προσφέρει εξαιρετική ανεκτικότητα όσον αφορά τα φαινόμενα της πολυκαναλικής καθυστέρησης διάδοσης και της παραμόρφωσης καναλιού που εξαρτάται από τη συχνότητα.

Πρόσφατη έρευνα σε αυτή την κατεύθυνση απέδειξε ότι η μέθοδος OFDM θα αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στα δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς, εξαιτίας της υψηλής αποδοτικότητας φάσματος και της αντοχής στη χρωματική διασπορά και στη διασπορά τρόπου πόλωσης. Επομένως, ο συνδυασμός των μεθόδων OFDM και ROF είναι κατάλληλος για οπτικά ασύρματα συστήματα για την αύξηση του εύρους ζώνης και

την επέκταση της απόστασης διάδοσης των κυμάτων τάξης χιλιοστών τόσο μέσω οπτικών ζεύξεων όσο και ζεύξεων μέσω του αέρα.

Η παραγωγή κυμάτων τάξης χιλιοστών χαμηλού κόστους για τη μεταφορά OFDM σημάτων είναι καίριας σημασίας για ένα OFDM-ROF σύστημα. Προηγούμενη έρευνα για την παραγωγή τέτοιων σημάτων επιδεικνύει κυρίως τη χρήση εξωτερικών διαμορφωτών, κάτι που οδηγεί σε περίπλοκη και ακριβή διαμόρφωση. Σε αυτή την πρόταση παρουσιάστηκε για πρώτη φορά ένα σύστημα ROF για διάδοση 2.5 Gb/s OFDM σημάτων σε κύματα τάξης χιλιοστών συχνότητας 40GHz, παραγόμενα από ένα απευθείας διαμορφούμενο DFB λέιζερ. Η Εικόνα 27 που ακολουθεί παρουσιάζει τη βασική αρχιτεκτονική της μεθόδου.



Εικόνα 27 Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου mm-wave OFDM-ROF με χρήση λέιζερ άμεσης διαμόρφωσης

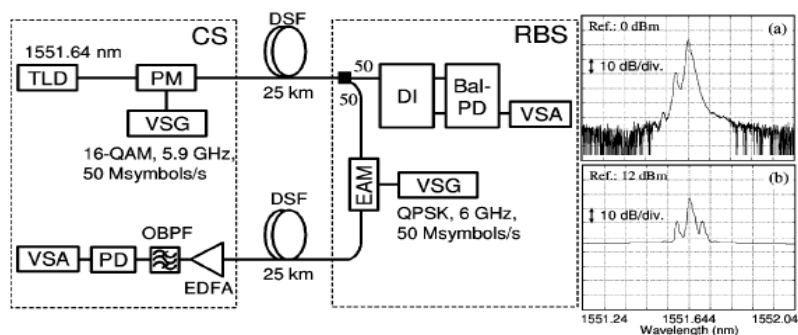
Όπως παρατηρούμε, τα αναλογικά δεδομένα OFDM και ένα ρολόι RF αναμιγνύονται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού μίκτη. Στη συνέχεια τα μικτά σήματα εφαρμόζονται για την οδήγηση ενός απευθείας διαμορφωμένου λέιζερ (DML) για την παραγωγή οπτικών σημάτων διπλής πλευρικής ζώνης. Κατόπιν χρησιμοποιείται ένα οπτικό φίλτρο για το διαχωρισμό των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων πρώτης τάξης από το οπτικό φέρον. Οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων πρώτης τάξης θα διαδοθούν στο σταθμό βάσης μέσω τυπικής μονότροπης οπτικής ίνας. Εκεί, το σήμα με μήκος κύματος τάξης χιλιοστών αφού υποστεί οπτικο/ηλεκτρική μετατροπή διαδίδεται μέσω μιας κεραίας. Το λαμβανόμενο σήμα από την κεραία του δέκτη μετατρέπεται προς τα κάτω για να προκύψει OFDM σήμα βασικής ζώνης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δείχνουν ότι η επίδραση του φαινομένου διασποράς της ίνας μπορεί να αγνοηθεί. Η ποιότητα ισχύος είναι μικρότερη από 1 dB για διάδοση σε απόσταση μεγαλύτερη από 20 km τυπικής μονότροπης οπτικής ίνας. Το χαμηλό κόστος του χρησιμοποιούμενου για την παραγωγή σημάτων με μήκος κύματος τάξης χιλιοστών DML αποτελεί μια πρακτική λύση για τα μελλοντικά ευρυζωνικά δίκτυα ROF.

3.14 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση διαμορφωτή φάσης για την κατερχόμενη ζεύξη και διαμορφωτή έντασης για την ανερχόμενη ζεύξη

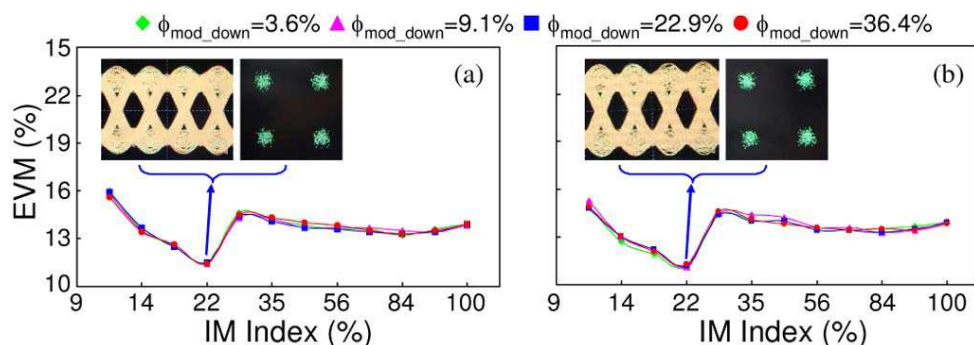
Η μέθοδος αυτή προτάθηκε τον Ιανουάριο του 2009 από τους Ho-Chul Ji, Hoon Kim, και Yun Chur Chung [17] και αφορά ένα πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα που χρησιμοποιεί κατερχόμενη ζεύξη διαμορφωμένη κατά φάση (PM) και ανερχόμενη ζεύξη διαμορφωμένη κατά ένταση (IM) πάνω από ένα απλό οπτικό φέρον. Χάρη στη συνεχή ένταση της διαμορφωμένης κατά φάση κατερχόμενης ζεύξης, ο περιορισμός στο δείκτη διαμόρφωσης του σήματος κατερχόμενης ζεύξης μπορεί να «χαλαρώσει» σημαντικά, σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα ROF τα οποία βασίζονταν σε σήματα κατερχόμενης ζεύξης διαμορφωμένα κατά ένταση. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται καλύτερο προϋπολογισμό ισχύος για το σήμα της ανερχόμενης ζεύξης, ακόμα και χωρίς την ύπαρξη οπτικού ενισχυτή στους σταθμούς βάσης.

Η προτεινόμενη τεχνική επιδεικνύει ότι οι σταθμοί βάσης μπορούν να απαρτίζονται μόνο από έναν διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (EAM) χωρίς κάποια άλλη ενεργή οπτική συνιστώσα. Η Εικόνα 28 που ακολουθεί δείχνει την πειραματική διάταξη με την οποία ελέγχθηκε η μέθοδος αυτή.



Εικόνα 28 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με χρήση διαμορφωτή φάσης για την κατερχόμενη ζεύξη και διαμορφωτή έντασης για την ανερχόμενη ζεύξη

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιδεικνύουν την καλή επίδοση σφάλματος διανυσματικού μεγέθους (Error Vector Magnitude - EVM) τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη μετά από διάδοση σε απόσταση 25 km κάτι που φαίνεται και στην Εικόνα 29 που ακολουθεί. Στην πράξη, ο προϋπολογισμός ισχύος για το σήμα ανερχόμενης ζεύξης μπορεί να καλυτερεύσει, είτε βελτιώνοντας το λόγο σύζευξης του οπτικού συζεύκτη που υπάρχει στους σταθμούς βάσης, είτε με την αύξηση της οπτικής ισχύος του σήματος κατερχόμενης ζεύξης στον κεντρικό σταθμό.



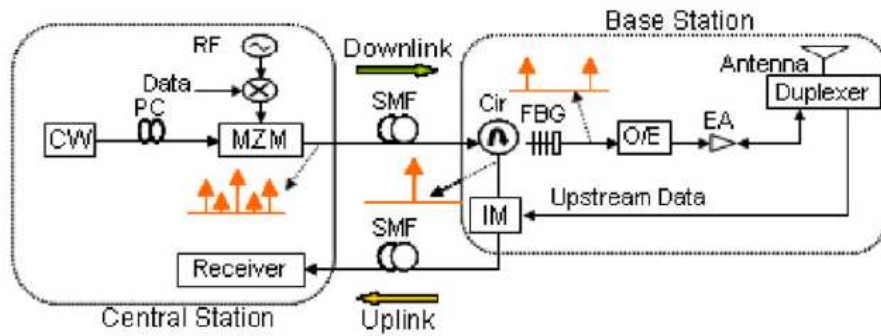
Εικόνα 29 Μετρήσεις του EVM (a) πριν τη διάδοση (b) μετά τη διάδοση με αύξηση του δείκτη IM του σήματος ανερχόμενης ζεύξης και του δείκτη PM για το σήμα κατερχόμενης ζεύξης

3.15 Πλήρως αμφίδρομο ROF σύστημα με τετραπλασιασμό της φωτονικής συχνότητας για την παραγωγή οπτικών κυμάτων με φασματικές συνιστώσες που απέχουν απόσταση τάξης χιλιοστών

Η λύση αυτή παρουσιάστηκε από τους J. He, L. Chen, Z. Dong, S. Wen και J. Yu το Σεπτέμβριο του 2008 [18] και αποτελεί την περιγραφή και πειραματική απόδειξη δύο διαφορετικών μεθόδων για την παραγωγή οπτικών σημάτων με φασματικές συνιστώσες που απέχουν απόσταση ένα μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών χρησιμοποιώντας οπτικό τετραπλασιασμό συχνότητας και επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για τη σύνδεση ανερχόμενης ζεύξης σε συστήματα ROF.

Και στις δύο μεθόδους, ένα ηλεκτρικό σήμα με μήκος κύματος στην τάξη χιλιοστών, κεντρικής συχνότητας 40 GHz παράχθηκε από ένα σήμα RF συχνότητας 10 GHz. Ένας MZM οδηγούμενος από ένα μεγάλο RF σήμα θα οδηγήσει σε μεγάλο βάθος διαμόρφωσης, επομένως το υπολειπόμενο οπτικό φέρον είναι μεγάλο. Για το λόγο αυτό, το υπολειπόμενο οπτικό φέρον μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά δεδομένων ανερχόμενης ροής. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να οδηγηθούμε σε αποδοτική αξιοποίηση της οπτικής ισχύος και στη μείωση του κόστους του συστήματος. Τέλος ελέγχθηκε η ποιότητα των σημάτων και η απόδοση διάδοσης δεδομένων ανερχόμενης και κατερχόμενης ροής λαμβάνοντας υπόψη την επίπτωση της χρωματικής διασποράς της ίνας και στις δύο περιπτώσεις.

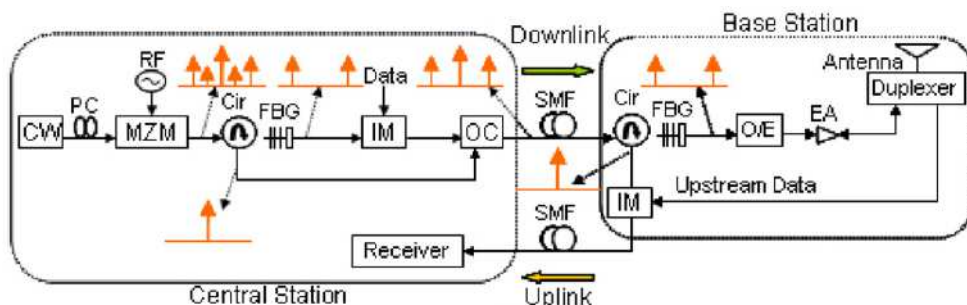
Η αρχή που διέπει την πρώτη προτεινόμενη μέθοδο με χρήση πολυπλεξίας υποφέροντος (SCM) φαίνεται στην Εικόνα 30. Στον κεντρικό σταθμό, τα δεδομένα κατερχόμενης ροής μετατρέπονται προς τα πάνω με ένα RF σήμα από τον τοπικό ταλαντωτή με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού μίκτη. Το συνεχές κύμα φωτός διαμορφώνεται με χρήση ενός MZM νιοβικού λιθίου ο οποίος οδηγείται από το διαμορφωμένο προς τα πάνω σήμα. Ο MZM επιτελεί τη λειτουργία παραγωγής οπτικών αρμονικών υψηλής τάξης και τη λειτουργία διαμόρφωσης του οπτικού σήματος.



Εικόνα 30 Βασική αρχή της μεθόδου τετραπλασιασμού φωτονικής συχνότητας με χρήση SCM

Αν ο MZM είναι πολωμένος σε συνεχή τάση στη μέγιστη κορυφή ισχύος εξόδου όταν τα σήματα των τοπικών ταλαντωτών αφαιρούνται, οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων περιττής τάξης μπορούν να κατασταλούν. Επομένως, οδηγούμαστε στην παραγωγή των οπτικών σημάτων με φασματικές συνιστώσες που έχουν απόσταση ένα μήκος κύματος τάξης χιλιοστών και με συχνότητα τετραπλάσια της συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή, αφού διαχωριστούν από το οπτικό φέρον με τη βοήθεια ενός FBG (Fiber Bragg Grating). Το σήμα με μήκος κύματος τάξης χιλιοστών παράγεται όταν οι δύο οπτικές πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης προσπίπτουν σε έναν οπτικο/ηλεκτρικό μετατροπέα στο σταθμό βάσης. Το σήμα θα διαδοθεί από μια κεραία αφού υποστεί οπτικο-ηλεκτρική μετατροπή, ενώ ταυτόχρονα το ανακλώμενο οπτικό φέρον από το FBG ενεργεί σαν συνεχές κύμα και διαμορφώνεται από έναν διαμορφωτή έντασης. Τα οπτικά δεδομένα ανερχόμενης ροής θα σταλούν πίσω στον κεντρικό σταθμό, όπου ανιχνεύονται από έναν δέκτη χαμηλών συχνοτήτων και χαμηλού κόστους.

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 31 που ακολουθεί βλέπουμε την αρχιτεκτονική της δεύτερης προτεινόμενης μεθόδου. Στη μέθοδο αυτή, το συνεχές κύμα φωτός διαμορφώνεται μέσω ενός MZM οδηγούμενου από ένα RF σήμα. Όπως και στην πρώτη μέθοδο, ο MZM είναι πολωμένος σε συνεχή τάση στη μέγιστη κορυφή ισχύος εξόδου, όταν τα σήματα του τοπικού ταλαντωτή αφαιρούνται. Στην έξοδο του MZM οι πλευρικές ζώνες συχνοτήτων περιττής τάξης μπορούν να κατασταλούν. Τότε, ένας οπτικός κυκλοφορητής και ένα FBG χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό του κεντρικού οπτικού φέροντος και των πλευρικών ζωνών συχνοτήτων δεύτερης τάξης. Τα δεδομένα βασικής ζώνης της κατερχόμενης ζεύξης φορτώνονται στις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης χρησιμοποιώντας έναν διαμορφωτή έντασης, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με έναν επιπλέον MZM. Το κεντρικό οπτικό φέρον συνδυάζεται με το οπτικό σήμα κατερχόμενης ροής, με χρήση ενός οπτικού συζεύκτη 3dB πριν τη διάδοσή τους στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης είναι ίδιος με αυτόν της πρώτης πρότασης.



Εικόνα 31 Βασική αρχή της μεθόδου με χρήση MZM

Και στις δύο μεθόδους, καθώς ένας MZM οδηγείται από ένα RF σήμα συχνότητας 10 GHz, μπορούν να παραχθούν κύματα με μήκος τάξης χιλιοστών συχνότητας 40 GHz, τα οποία μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά το εύρος ζώνης των μικροκυματικών διατάξεων και διαμορφωτών. Ταυτόχρονα, δεδομένου ότι ο υπολειπόμενο οπτικό φέρον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά δεδομένων ανερχόμενης ροής στο σταθμό βάσης, μπορούμε να έχουμε αποτελεσματική αξιοποίηση της οπτικής ισχύος και μείωση του κόστους του συστήματος.

Ύστερα από σύγκριση των δύο μεθόδων οδηγηθήκαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Για την πρώτη μέθοδο, τα κύματα τάξης χιλιοστών με τετραπλασιασμό συχνότητας παράχθηκαν από έναν μοναδικό MZM. Ωστόσο, τα παραγόμενα κύματα και το οπτικό φέρον θα περιλαμβάνονται στα δεδομένα κατερχόμενης ροής στο σταθμό βάσης. Άραξ το οπτικό φέρον που ανακλάται από το FBG στο σταθμό βάσης επαναχρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των δεδομένων ανερχόμενης ροής, η επίδραση από την παρεμβολή από τα δεδομένα κατερχόμενης ροής θα είναι παρούσα. Επομένως οι διακυμάνσεις ισχύος των κυμάτων τάξης χιλιοστών, εξαιτίας της ενισχυτικής και της καταστροφικής συμβολής ανάμεσα στους δύο παλμούς προκαλούνται από τη χρωματική διασπορά.

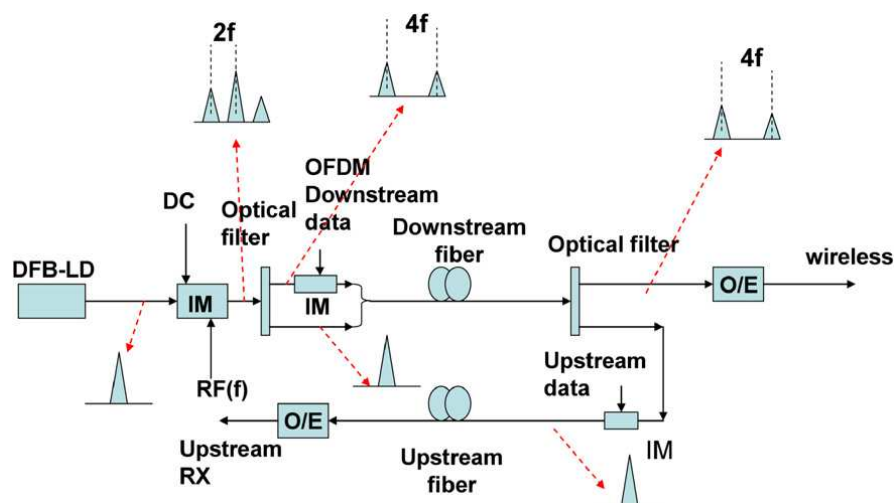
Για τη δεύτερη μέθοδο, μόνο οι παραγόμενες πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης και όχι το οπτικό φέρον διαμορφώνονται από τα δεδομένα κατερχόμενης ροής. Έτσι τα δεδομένα ανερχόμενης ροής που μεταφέρονται από το οπτικό φέρον παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση. Συγκρίνοντας πειραματικά την απόδοση διάδοσης τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ροή στις δύο μεθόδους, μπορεί να διαπιστωθεί ότι η δεύτερη μέθοδος παράγει κύματα τάξης χιλιοστών καλύτερης ποιότητας καθώς και ότι το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα με μήκος κύματος στην τάξη των χιλιοστών με τα δεδομένα κατερχόμενης ροής είναι σχεδόν ανεπηρέαστο από το φαινόμενο χρωματικής διασποράς της ίνας.

3.16 Σύστημα ROF με φωτονικά παραγόμενα 16QAM OFDM σήματα και επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος για τη σύνδεση δεδομένων ανερχόμενης ροής

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε το Μάρτιο του 2009 από τους L. Chen, J. Lu, J. He, Z. Dong και J. Yu [19] και αφορά μια πλήρως αμφίδρομη αρχιτεκτονική ROF για τη διάδοση 16QAM OFDM σημάτων ρυθμού 2.5 Gb/s πάνω σε κύματα τάξης χιλιοστών συχνότητας 40 GHz παραγόμενα από την τεχνική τετραπλασιασμού συχνότητας.

Η Εικόνα 32 που ακολουθεί απεικονίζει την αρχή του τετραπλασιασμού της συχνότητας και τη μέθοδο επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε ένα OFDM-ROF σύστημα. Ένας διαμορφωτής έντασης (IM) και ένα σειριακά συνδεδεμένο οπτικό φίλτρο χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οπτικών κυμάτων με πλευρικές ζώνες συχνοτήτων που απέχουν απόσταση τάξης χιλιοστών και επιπλέον παρέχουν την πηγή κύματος φωτός για τη διαμόρφωση των δεδομένων ανερχόμενης ροής. Για να επιτευχθούν πλευρικές με απόσταση τάξης χιλιοστών με συχνότητα τετραπλάσια αυτής του τοπικού ταλαντωτή, ο IM πρέπει να πολωθεί σε συνεχή τάση στη μέγιστη κορυφή ισχύος εξόδου, τη στιγμή που το σήμα του τοπικού ταλαντωτή αφαιρείται. Αν η συχνότητα της RF μικροκυματικής πηγής είναι ίση με f , οι τρόποι πρώτης τάξης καταστέλλονται και η απόσταση σε μονάδες συχνότητας ανάμεσα στους τρόπους δεύτερης τάξης είναι ίση με $4f$. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα οπτικό φίλτρο για το διαχωρισμό του οπτικού φέροντος από τις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης.

Τα αναλογικά OFDM δεδομένα μεταφέρονται από τις πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης μέσω ενός άλλου διαμορφωτή έντασης. Εν συνεχεία, οι διαμορφωμένες πλευρικές ζώνες συχνοτήτων δεύτερης τάξης συνδυάζονται με το οπτικό φέρον με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη. Αφού μεταδοθούν μέσω της ίνας, αυτές οι ζώνες συχνοτήτων διαχωρίζονται από το οπτικό φέρον με ένα οπτικό φίλτρο και ανιχνεύονται από έναν δέκτη υψηλής ταχύτητας. Στο σταθμό βάσης, τα τροποποιημένα προς τα κάτω δεδομένα ανερχόμενης ροής διαμορφώνονται από έναν άλλο IM προτού διαδοθούν στον κεντρικό σταθμό.

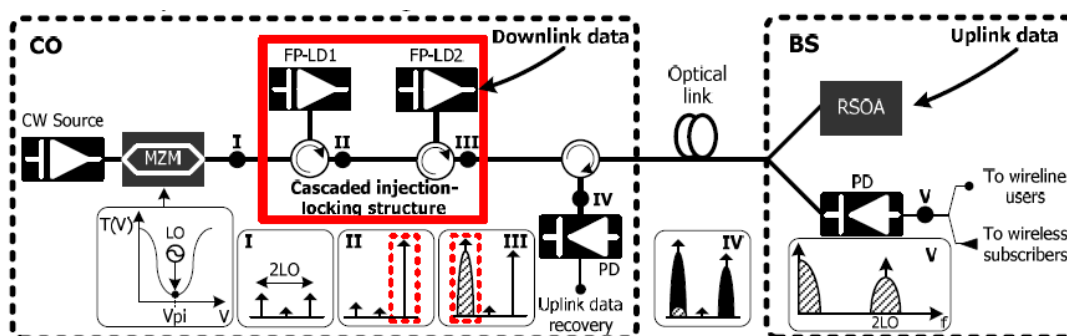


Εικόνα 32 Βασική δομή μεθόδου τετραπλασιασμού συχνότητας και επαναχρησιμοποίησης μήκους κύματος σε ένα OFDM ROF σύστημα

Στην παρούσα μέθοδο η συχνότητα της RF πηγής και το εύρος ζώνης του οπτικού διαμορφωτή μειώνονται κατά πολύ. Το οπτικό φέρον υψηλής ισχύος αφού απομονωθεί, επαναδιαμορφώνεται στο σταθμό βάσης, έτσι όλη η οπτική ισχύς μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά. Η ποιινή ισχύος για διάδοση σήματος κατερχόμενης ροής σε απόσταση μεγαλύτερη από 20 km οπτικής ίνας βρέθηκε από πειραματικές μετρήσεις να είναι μικρότερη από 1 dB. Τέλος, το φαινόμενο της διασποράς της ίνας μπορεί να αγνοηθεί με τη χρήση των OFDM σημάτων.

3.17 Gigabit ROF ζεύξη για διάδοση συγκλινόντων σημάτων βασικής ζώνης και ζώνης κυμάτων τάξης χιλιοστών με χρήση διαδοχικών διόδων λείζερ Fabry-Perot σταθερής έγχυσης

Η μέθοδος αυτή δημοσιεύτηκε τον Απρίλιο του 2009 από τους Moon-Ki Hong, Yong-Yuk Won και Sang-Kook Han [20] και αφορά την παρουσίαση μιας νέας μεθόδου για την παραγωγή πλευρικών ζωνών που απέχουν απόσταση τάξης χιλιοστών υψηλής ποιότητας κι επιπρόσθετα την επίτευξη ταυτόχρονης ασύρματης διάδοσης δεδομένων βασικής ζώνης και ζώνης μήκους κύματος τάξης χιλιοστών. Η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιείται με την παράθεση FP-LD (Fabry-Perot Laser Diode) σταθερής έγχυσης σε cascaded σχηματισμό. Για την κατασκευή αμφίδρομης ROF ζεύξης η οποία να βασίζεται στην προτεινόμενη μέθοδο, το σήμα της ανερχόμενης ζεύξης επαναδιαμορφώνεται με τη χρήση ενός RSOA στον κόρο. Στην Εικόνα 33 βλέπουμε τη δομή αυτής της μεθόδου.



Εικόνα 33 Βασική δομή της μεθόδου με χρήση διαδοχικών διόδων λείζερ Fabry –Perot σταθερής έγχυσης

Για την παραγωγή του οπτικού, με καταστολή φέροντος σήματος το οποίο παρουσιάζει RF απόσταση τρόπων ίση με $2LO$, χρησιμοποιείται ένας MZM μονού ηλεκτροδίου με τάση πόλωσης V_{pi} , σημείο πόλωσης για την ελάχιστη έξοδο οπτικής ισχύος του MZM, ο οποίος διαμορφώνει το φως από μια συνεχή πηγή χρησιμοποιώντας τη συχνότητα αναφοράς LO. Το διαμορφωμένο σήμα διέρχεται μέσω ενός κυκλοφορητή και διαχέεται στη FP-LD1. Ένας επιθυμητός πλευρικός τρόπος για το οπτικό σήμα με καταστολή φέροντος, ο οποίος εγχέεται σταθερά μέσω της FP-LD1, μπορεί να είναι είτε ο αριστερός είτε ο δεξιός πλευρικός τρόπος του σήματος αυτού. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, ο σωστός πλευρικός τρόπος επιλέγεται να κλειδωθεί από την FP-LD1.

Το οπτικό σήμα σταθερής έγχυσης από την FP-LD1 παρουσιάζει μια κορυφή ισχύος στον δεξιό πλευρικό τρόπο ο οποίος κυριαρχεί συγκρινόμενος με την ισχύ των άλλων πλευρικών τρόπων. Το σήμα αυτό διέρχεται στη συνέχεια μέσω ενός άλλου κυκλοφορητή και διαχέεται στην FP-LD2. Στο σημείο αυτό, ο επιθυμητός πλευρικός τρόπος είναι ο αντίθετος από αυτόν που επιτυγχάνεται από την FP-LD1. Έτσι βλέπουμε τον αριστερό πλευρικό τρόπο να ορίζεται ώστε να κλειδωθεί από την FP-LD2. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης σταθερής έγχυσης, ο κλειδωμένος πλευρικός τρόπος που χρησιμοποιεί η FP-LD1 καταστέλλεται επίσης. Παρ' όλα αυτά, κάτι πιθανό να επιτευχθεί είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της κορυφής ισχύος μπορεί να διατηρηθεί με τη χρήση εκτιμώμενου ελέγχου των παραμέτρων της διαδικασίας σταθερής έγχυσης, όπως είναι η εγχεόμενη οπτική ισχύς. Επίσης είναι πιθανό ο κλειδωμένος πλευρικός τρόπος από τη FP-LD1 να οδηγηθεί σε μια κατάσταση στην οποία θα παρουσιάζει αρκετή ισχύ υψηλής κορυφής και έτσι να ανακλάται από τη FP-LD2 χωρίς σοβαρή καταστολή.

Κατά προτίμηση, η άμεση διαμόρφωση υλοποιείται στην FP-LD2. Αν τα δεδομένα μεταφέρονταν στο οπτικό σήμα με καταστολή φέροντος στην FP-LD1, τα δεδομένα αυτά θα καταστέλλονταν επίσης και στη FP-LD2 εξαιτίας του φαινομένου της οπτικής σταθερής έγχυσης, κάτι που είναι γνωστό με τον όρο καταστολή υπολειπόμενου εύρους διαμόρφωσης (Residual Amplitude Modulation Suppression - RAMS). Κάτι τέτοιο μπορεί να μειώσει την ευαισθησία του δέκτη για τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης. Το οπτικό σήμα με καταστολή φέροντος μπορεί επίσης να διαμορφωθεί από τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τόσο τη FP-LD1 όσο και τη FP-LD2. Σε αυτή την περίπτωση, το μήκος της γραμμής οπτικής καθυστέρησης, το οποίο αποτελεί μέρος του χρόνου διάδοσης από τη FP-LD1 στην FP-LD2, πρέπει να εξεταστεί για την αποφυγή διασυμβολικής παρεμβολής ανάμεσα στα δύο διαμορφωμένα σήματα από την κάθε FP-LD. Επειδή αυτό το θέμα είναι αρκετά πολύπλοκο αγνοήθηκε για την παρούσα πρόταση.

Από τον κεντρικό σταθμό, το διαμορφωμένο οπτικό σήμα με καταστολή φέροντος διαδίδεται στο σταθμό βάσης και διαχωρίζεται σε δύο μονοπάτια. Το ένα είναι για την ανάκτηση του σήματος κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ετερόδυνης λήψης και το άλλο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του σήματος ανερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιώντας την τεχνική επαναδιαμόρφωσης, η οποία βασίζεται στα χαρακτηριστικά του υπεραποσβεστή φίλτρου του RSOA στον κόρο.

Για τη μέθοδο αυτή αποδείχτηκε πειραματικά, ότι μπορεί να επιτευχθεί φέρον συχνότητας 60 GHz, με θόρυβο φάσης ίσο με -103.5 dBm/Hz με αντιστάθμισμα συχνότητας 1 MHz και με RF κορυφή ισχύος στα -40dBm, χρησιμοποιώντας τη λαμβανόμενη οπτική ισχύ των -24.5 dBm. Με βάση την προτεινόμενη μέθοδο, επιτυγχάνεται ταυτόχρονη διάδοση ασύρματων δεδομένων βασικής ζώνης και ζώνης κυμάτων στην τάξη των χιλιοστών με ρυθμό διάδοσης 1.25-Gbps για την κατερχόμενη ζεύξη και για διάδοση δεδομένων βασικής ζώνης με τον ίδιο ρυθμό για την ανερχόμενη ζεύξη, για ευαισθησία δέκτη ίση με -21dBm. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά ελκυστική για την εφαρμογή συνδυασμένης διάδοσης ασύρματων και ενσύρματων δικτύων.

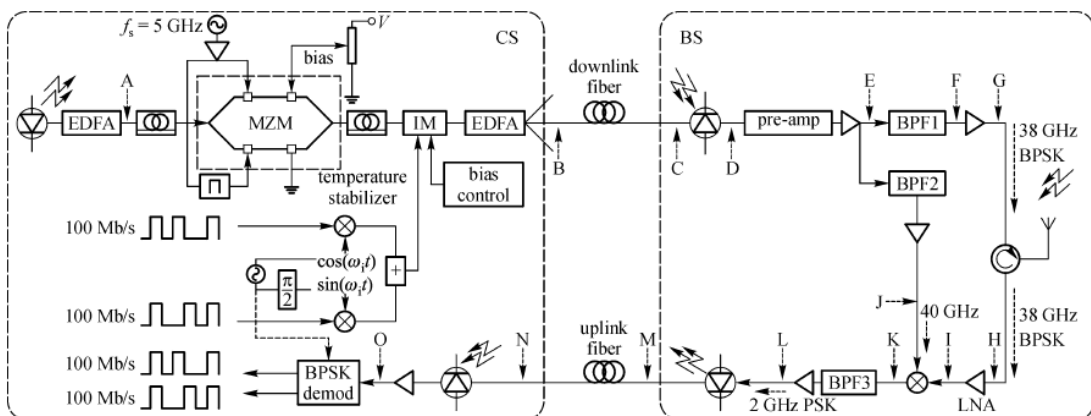
3.18 ROF σύστημα βασισμένο στην τεχνική OFM

Η λύση αυτή προτάθηκε το 2009 από τους Rujian Lin, Meiwei Zhu, Haoshuo Chen και Jiajun Ye [21] και αποτελεί μια αναφορά στα συστήματα ROF τα οποία βασίζονται στην παραγωγή κυμάτων τάξης χιλιοστών χρησιμοποιώντας την τεχνική **OFM (Optical Frequency Multiplier)**. Το κλειδί της τεχνολογίας σε συστήματα ROF με κύματα τάξης χιλιοστών είναι η παραγωγή των κυμάτων αυτών με τη χρήση οπτικών μέσων.

Ανάμεσα στις οπτικές τεχνικές που έχουν προταθεί μέχρι τώρα για την παραγωγή κυμάτων τάξης χιλιοστών, όπως η οπτική ετεροδύνωση δύο δεσμών λέιζερ ή δύο τρόπων λέιζερ, η αυτό-ετεροδύνωση των πλευρικών τρόπων που παράγονται από εξωτερική διαμόρφωση, η οπτικοηλεκτρονική μίξη και ο οπτικός πολλαπλασιασμός της συχνότητας (OFM), η τεχνική OFM, η οποία βασίζεται στην παραγωγή αρμονικών από μικροκύματα χαμηλής συχνότητας είναι μία πολύ ελκυστική και οικονομικά αποδοτική τεχνική, επειδή δεν απαιτεί την ύπαρξη ταλαντωτή κυμάτων τάξης χιλιοστών, πολλαπλασιαστή συχνότητας ή διαμορφωτή στον κεντρικό σταθμό ή στους σταθμούς βάσης.

Γνωρίζουμε ότι για την επίτευξη της τεχνικής OFM υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι: α) διαμόρφωση οπτικής φάσης με υψηλό δείκτη διαμόρφωσης για την παραγωγή οπτικών πλευρικών τρόπων υψηλής τάξης και β) μετατροπή από διαμόρφωση φάσης σε διαμόρφωση έντασης έτσι ώστε να επιτευχθεί η αυτό-ετεροδύνωση στον φωτοδέκτη. Για τη δεύτερη περίπτωση, χρειαζόμαστε δύο λέιζερ που να παρεμβάλλονται μεταξύ τους και αυτή η οπτική παρεμβολή δεν επιτυγχάνεται μόνο με χρήση ενός φίλτρου Mach Zehnder.

Πράγματι, αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση ενός διαμορφωτή Mach Zehnder διπλής οδήγησης (**Dual-drive MZM – DD-MZM**). Ένας DD-MZM είναι ο παράλληλος συνδυασμός δύο οπτικών διαμορφωτών φάσης και τα δύο σκέλη του μπορούν να οδηγήσουν στην οπτική παρεμβολή. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται και στην Εικόνα 34 που ακολουθεί.



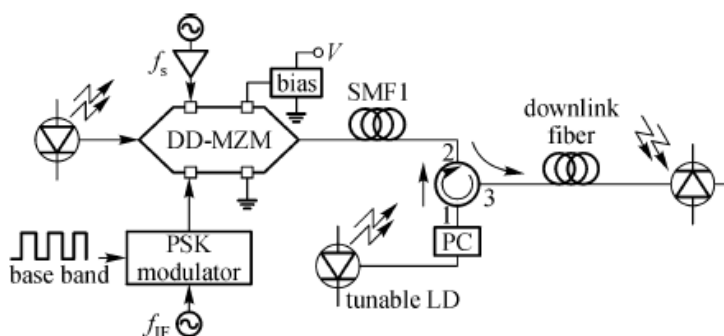
Εικόνα 34 Αμφίδρομο ROF σύστημα βασισμένο στη μέθοδο OFM με χρήση MZM διπλού ηλεκτροδίου

Όπως βλέπουμε, για την κατερχόμενη ροή δεδομένων, μία προσαρμοσμένη κατά πόλωση δέσμη λέιζερ στα 1550 nm εγχέεται σε έναν DD-MZM, του οποίου τα δύο μέρη είναι χωριστά πολωμένα σε συνεχή τάση και σε RF συχνότητες. Δύο ημιτονοειδή κύματα συχνότητας 5 GHz και με διαφορά φάσης π οδηγούν τον DD-MZM στη οπτική διαμόρφωση φάσης με υψηλό δείκτη σε κάθε σκέλος. Στο σημείο της ένωσης του DD-MZM, οι δύο οπτικές δέσμες που έχουν διαφορετική φάση παρεμβάλλονται μεταξύ τους, μετατρέποντας τη διαμόρφωση οπτικής φάσης σε διαμόρφωση οπτικής έντασης με πολλούς πλευρικούς τρόπους υψηλής τάξης.

Αυτοί οι οπτικοί τρόποι διαμορφώνονται ξανά σε έναν άλλο διαμορφωτή έντασης από μια ενδιάμεση συχνότητα στα 2 GHz που φέρει πληροφορίες και μετά διαδίδονται μέσω μιας κατερχόμενης ζεύξης ινών μήκους 20 km. Τελικά, προσκρούουν στο φωτοδέκτη του σταθμού βάσης, παράγοντας πολλές ηλεκτρικές αρμονικές ενός σήματος συχνότητας 5 GHz, ανάμεσα στις οποίες οποιαδήποτε μπορεί να επιλεγεί από ένα συγκεκριμένο ζωνοπερατό φίλτρο στενής ζώνης.

Με τον τρόπο αυτό παράγονται τόσο ένα καθαρό σήμα συχνότητας 40 GHz, όσο και κύμα μήκους τάξης χιλιοστών με συχνότητα 38 GHz που μεταφέρουν 2×100 Mbps δεδομένα Ethernet με κωδικοποίηση BPSK. Το δεύτερο θα ενισχυθεί και θα εκπεμφθεί στον αέρα μέσω μιας κεραίας. Στην ανερχόμενη ροή δεδομένων, το σήμα συχνότητας 38 GHz από την κεραία ενισχύεται από ένα **ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier - LNA)** και στη συνέχεια αναμιγνύεται με το ενισχυμένο τοπικό σήμα συχνότητας 40 GHz, οδηγώντας σε ένα σήμα ενδιάμεσης συχνότητας 2GHz. Το φιλτραρισμένο και ενισχυμένο IF σήμα διαμορφώνει άμεσα μια DFB-LD, αποστέλλεται πίσω στον κεντρικό σταθμό μέσω της ίνας ανερχόμενης ζεύξης και ανακτάται στον φωτοδέκτη. Εκεί το ενισχυμένο IF σήμα μετατρέπεται σε 2×100 Mbps δεδομένα Ethernet αφού πραγματοποιηθεί αποδιαμόρφωση BPSK.

Μια άλλη διαδικασία που περιγράφεται σε αυτή την πρόταση, είναι η γένεση κυμάτων τάξης χιλιοστών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο OFM με επιλεκτική ενίσχυση Brillouin. Ένας DD-MZM χρησιμοποιείται σαν γεννήτρια παραγωγής πλευρικών τρόπων υψηλής τάξης. Το κύμα φωτός που παράγεται από μια οπτική πηγή διαμορφώνεται στον DD-MZM με δύο διαφορετικά RF σήματα ταυτόχρονα στα δύο RF σκέλη του. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 στο ένα σκέλος εφαρμόζεται ένα μικροκυματικό σήμα συχνότητας f_s και στο άλλο ένα σήμα διαμορφωμένο κατά PSK συχνότητας f_{IM} . Και τα δύο σκέλη πολώνονται κατάλληλα. Επιπλέον, στη μέθοδο OFM εισάγεται μια διαδικασία επιλεκτικής οπτικής ενίσχυσης που βασίζεται στην εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin (SBS) καθιστώντας την ευέλικτη κατά συχνότητα.



Εικόνα 35 Διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου διαμόρφωσης

Η επιλεκτική ενίσχυση Brillouin έχει προταθεί για τα συστήματα ROF, αλλά οι προτεινόμενες μέθοδοι μπορούν μόνο να παράγουν μια μικροκυματική έξοδο στα 11 GHz εξαιτίας του περιορισμού ολίσθησης συχνότητας του Stokes. Συνήθως χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της παραγωγής κυμάτων τάξης χιλιοστών με τη μέθοδο OFM καθώς και στην παραγωγή κυμάτων αναφοράς τάξης χιλιοστών στο σταθμό βάσης.

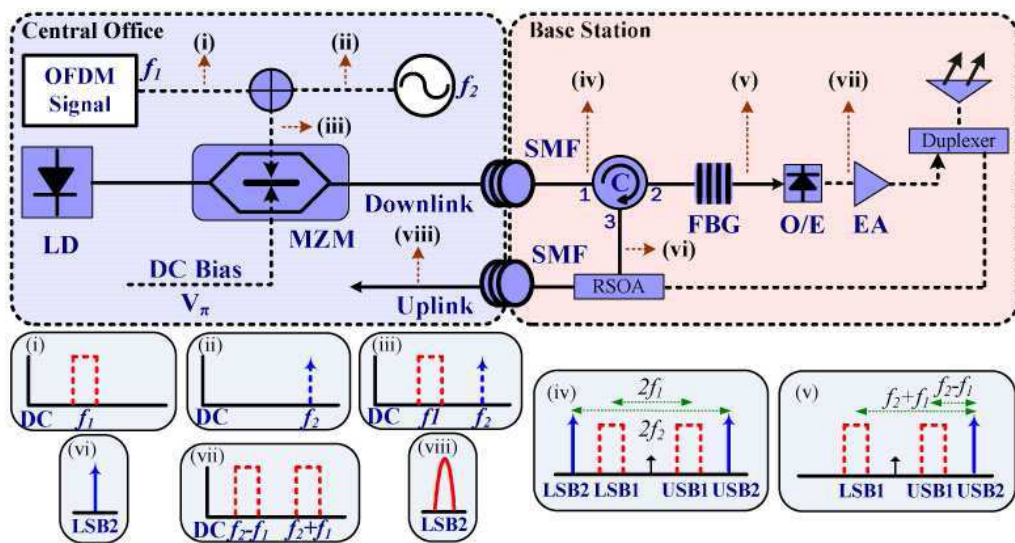
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου OFM χρησιμοποιώντας DD-MZM, όπως η απλότητα, η σταθερότητα στις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η οικονομική αποδοτικότητα χωρίς την ανάγκη για εξειδικευμένες συσκευές, η ανοσία στο θόρυβο φάσης του λέιζερ και η ανοχή στη διασπορά της ίνας, αποδείχτηκαν και πειραματικά.

3.19 Πλήρως αμφίδρομη ROF ζεύξη με πολύ-επίπεδα OFDM σήματα μέσω ενός MZM μονού ηλεκτροδίου και επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος με τη χρήση RSOA

Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε το Φεβρουάριο του 2010 από τους Wen-Jr Jiang, Chun-Ting Lin, Po-Tsung Shih, Jason (Jyehong) Chen, Peng-Chun Peng και Sien Chi, [22] και αφορά την εφικτότητα μιας πλήρως αμφίδρομης ζεύξης ROF που χρησιμοποιεί ένα πολύ-επίπεδο OFDM σήμα μέσω ενός MZM απλού ηλεκτροδίου και επαναχρησιμοποίηση μήκους κύματος για την ανερχόμενη ζεύξη αξιοποιώντας έναν RSOA.

Εξαιτίας της υψηλής ανεκτικότητάς τους στη χρωματική διασπορά της ίνας και στη διασπορά τρόπων πόλωσης, τα οπτικά OFDM συστήματα έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητικών ομάδων για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων και υψηλής χωρητικότητας, για πολύτροπες οπτικές ζεύξεις και για πλαστικές ζεύξεις. Τα συστήματα OFDM χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) σύμφωνης ανίχνευσης (Coherent Detection-CO) και β) άμεσης ανίχνευσης (Direct Detection-DD).

Με τη δημοσίευση αυτή παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος για παραγωγή πολύ-επίπεδων DD-OFDM σημάτων με χρήση ενός MZM απλού ηλεκτροδίου βασιζόμενου στη μέθοδο διαμόρφωσης **DSBCS (Double Side Band-Carrier Suppression-DSBCS)** και η βασική αρχιτεκτονική φαίνεται στην Εικόνα 36 που ακολουθεί.



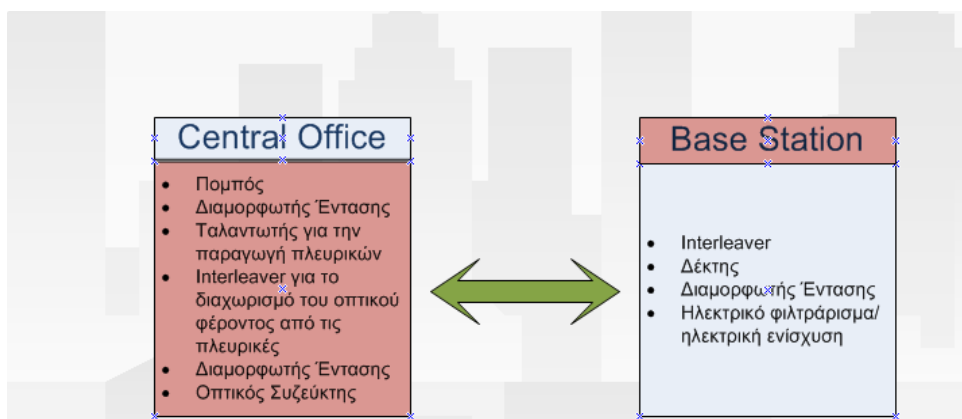
Εικόνα 36 Βασική δομή του προτεινόμενου OFDM ROF συστήματος

Με πόλωση στο μηδενικό σημείο, ο MZM λειτουργεί στη γραμμική περιοχή του ηλεκτρικού πεδίου για την άμβλυση των μη-γραμμικών στρεβλώσεων που προκαλούνται από τον υψηλό λόγο ισχύος κορυφής προς τη μέση ισχύ (PAPR) των OFDM σημάτων. Επιπλέον, μία μέθοδος πολλαπλασιασμού συχνότητας χρησιμοποιείται για τη μείωση των απαιτήσεων εύρους ζώνης του οπτικού OFDM πομπού, κάτι εξαιρετικά σημαντικό στα συστήματα ROF με κύματα τάξης χιλιοστών. Τέλος, η επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος επιτυγχάνεται για τα σήματα ανερχόμενης ζεύξης στο σταθμό βάσης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα για αυτή τη μέθοδο απέδειξαν την παραγωγή και επιτυχή διάδοση σε απόσταση μεγαλύτερη από 25 km μονότροπης οπτικής ίνας με αμελητέα ποινή ευαισθησίας, ενός 16-QAM OFDM σήματος εξαιρετικής φασματικής απόδοσης με ρυθμό 5-Gb/s. Επιπρόσθετα, για την επαναχρησιμοποίηση του μήκους κύματος για διάδοση δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη μέσω ενός RSOA αποδείχτηκε η ύπαρξη ποινής μικρότερης από 0.5 dB.

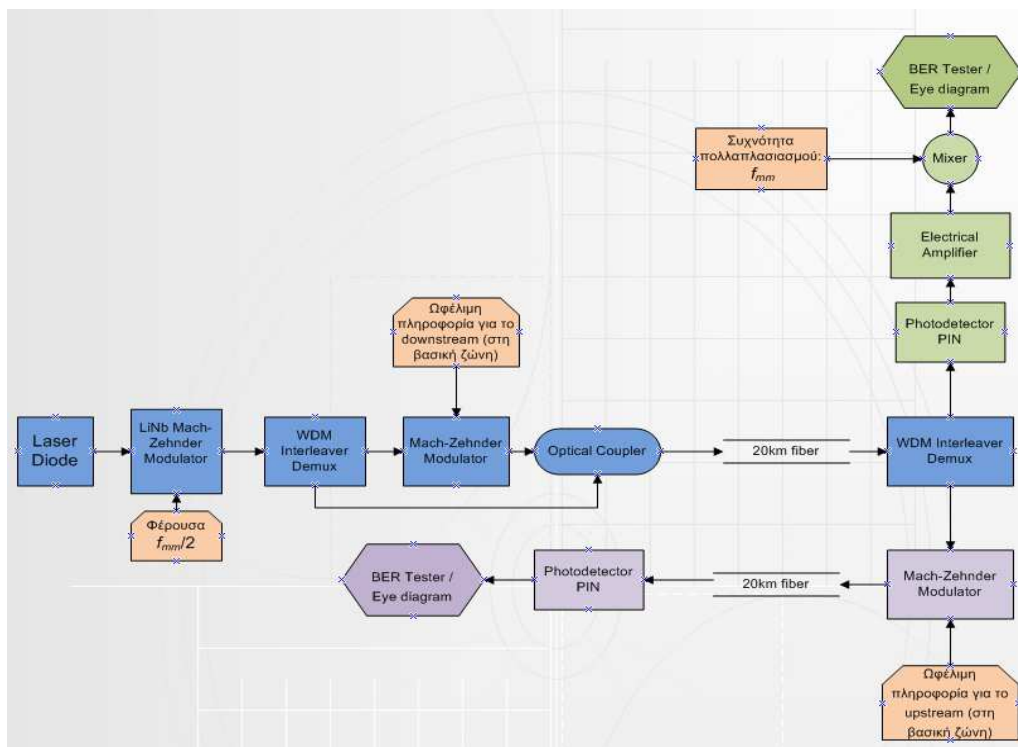
4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ROF ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΟΡΤΙPERFORMER

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε την υλοποίηση κάποιου απλού ROF συστήματος με τη βοήθεια του προγράμματος OptiPerformer. Στην Εικόνα 37 που ακολουθεί φαίνονται τα συστατικά στοιχεία του Κεντρικού Σταθμού (CO) και του Σταθμού Βάσης (BS) του υλοποιούμενου συστήματος. Εύκολα παρατηρούμε τη διαφορά στον αριθμό συνιστωσών ανάμεσα στους δύο σταθμούς, επαληθεύοντας τη φιλοσοφία στην οποία βασίζεται η τεχνολογία ROF.



Εικόνα 37 Συνιστώσες στο Central Office και στον Base Station

Στην Εικόνα 38, παρατίθεται ένα απλό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που μελετήσαμε σε αυτό το κεφάλαιο.



Εικόνα 38 Διάταξη του εξεταζόμενου ROF συστήματος

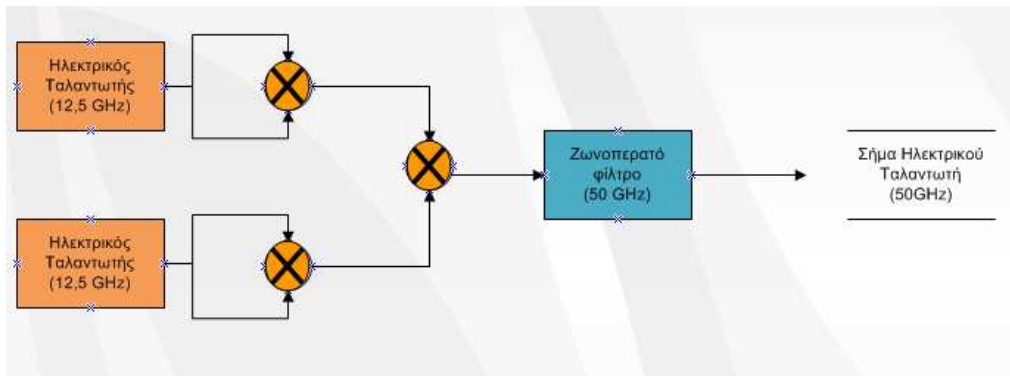
Το παραγόμενο από μια δίοδο λέιζερ κύμα φωτός διαμορφώνεται από έναν LiNbO_3 Mach Zehnder διαμορφωτή έντασης, ο οποίος οδηγείται από ένα RF μικροκυματικό σήμα στα 25GHz ($f_{\text{mm}}/2$ στην εικόνα 38). Το επίπεδο ισχύος της πηγής λέιζερ είναι 6dBm. Ένας οπτικός interleaver χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του οπτικού φέροντος και των πλευρικών ζωνών πρώτης τάξης.

Στη συνέχεια, οι ισχυρές πλευρικές ζώνες πρώτης τάξης, με απόσταση ένα μήκος κύματος τάξης χιλιοστών που αντιστοιχεί σε συχνότητα 50GHz, διαμορφώνονται από έναν δεύτερο Mach Zehnder διαμορφωτή έντασης με την πληροφορία που προορίζεται για το downlink. Με τη βοήθεια ενός οπτικού συζεύκτη οι διαμορφωμένες πλευρικές με την κατάλληλη απόσταση συνδυάζονται με το οπτικό φέρον προτού διαδοθούν σε οπτική ίνα μήκους 20km με συντελεστή απόσβεσης ίσο με 0,2 dB/km και διασποράς 17 ps/nm/km.

Με προσεκτική επιλογή του μήκους της οπτικής ίνας που συνδέει τον οπτικό συζεύκτη και τον interleaver μεταξύ των δύο διαχωριζόμενων σημάτων, η καθυστέρηση μεταξύ αυτών των δύο σημάτων μετά τον interleaver δεν επηρεάζει την απόδοση του σήματος επειδή αυτή η καθυστέρηση είναι πολύ μικρή.

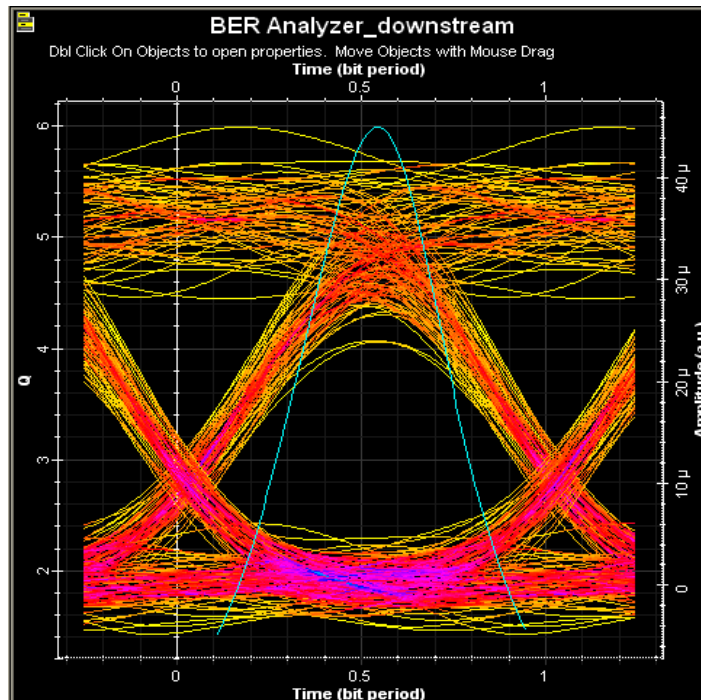
Μετά τη διάδοση, οι διαμορφωμένες με το downlink σήμα πλευρικές διαχωρίζονται από το οπτικό φέρον με τη βοήθεια ενός ακόμα οπτικού interleaver. Το διαχωρισμένο οπτικό mm-wave σήμα εντοπίζεται μέσω οπτικο-ηλεκτρικής μετατροπής με τη βοήθεια ενός PIN φωτοδέκτη.

Το διαμορφωμένο ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται από έναν ηλεκτρικό ενισχυτή κέρδους 30dB. Ένα ηλεκτρικό σήμα τοπικού ταλαντωτή στα 50GHz παράγεται χρησιμοποιώντας τρεις πολλαπλασιαστές συχνότητας, ταλαντωτές στα 12,5GHz και κατάλληλο ζωνοπερατό φίλτρο ώστε να απομονωθεί η επιθυμητή συχνότητα των 50GHz. Ακολουθεί ένας μίκτης για τη μεταφορά του σήματος στη βασική ζώνη. Στο σημείο αυτό καλό είναι να αναφέρουμε πως δεν γίνεται ασύρματη μετάδοση, αλλά απευθείας μεταφορά στη βασική ζώνη. Η Εικόνα 39 που ακολουθεί παρουσιάζει τον τρόπο παραγωγής των 50 GHz.

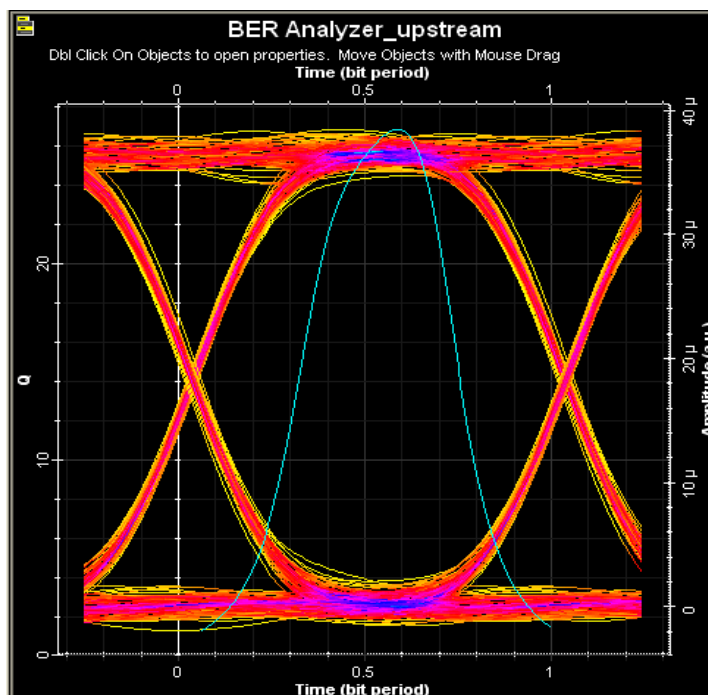


Εικόνα 39 Παραγωγή συχνότητας 50 GHz

Τα διαγράμματα οφθαλμού για τα δεδομένα στο downstream και στο upstream μετά από διάδοση σε οπτική ίνα μήκους 20km φαίνονται στην Εικόνα 39 και Εικόνα 40 αντίστοιχα.



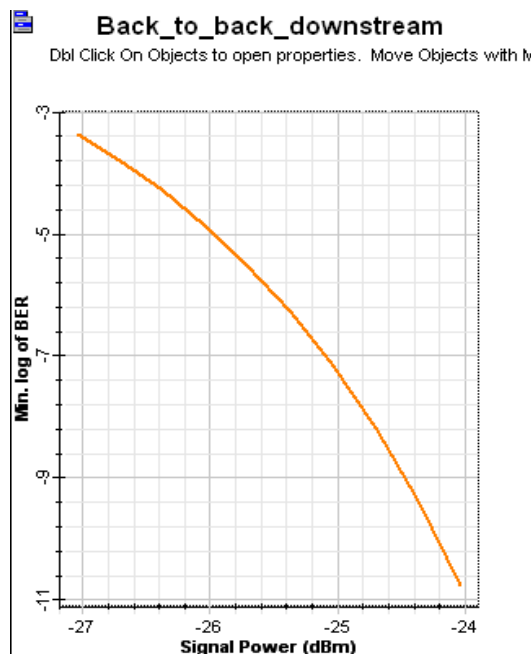
Εικόνα 40 Διάγραμμα οφθαλμού για το downstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας



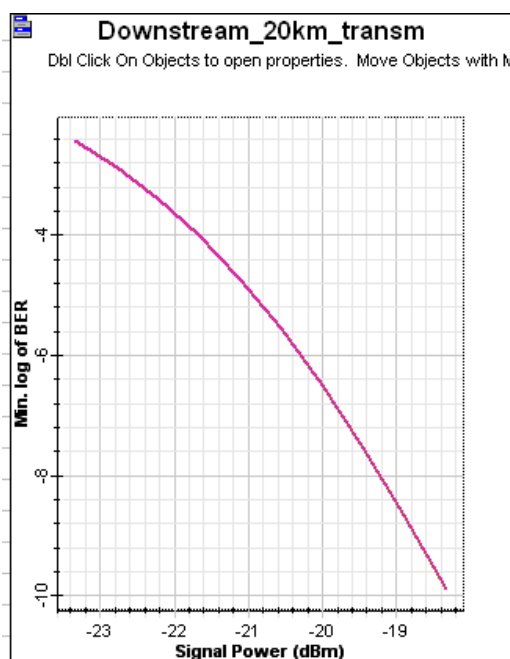
Εικόνα 41 Διάγραμμα οφθαλμού για το upstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα οφθαλμού βλέπουμε ότι στο διάγραμμα του upstream το άνοιγμα του ματιού είναι μεγαλύτερο. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως για το upstream έχουμε μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο για επιτυχή δειγματοληψία της κυματομορφής σε σχέση με το downstream. Επίσης στο διάγραμμα οφθαλμού για το upstream και πάλι σε σχέση με αυτό του downstream, παρατηρούμε ότι το σήμα παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στο θόρυβο. Τέλος από την κλίση των καμπυλών παρατηρούμε ότι για το downstream το σήμα είναι πιο ευαίσθητο σε σφάλματα χρονισμού σε σύγκριση με αυτό του upstream. Όλα αυτά απορρέουν από τις απώλειες και την επίδραση της διασποράς της ίνας στις πλευρικές με απόσταση 50 GHz που φέρουν το σήμα που προορίζεται να μεταδοθεί κατά το downlink.

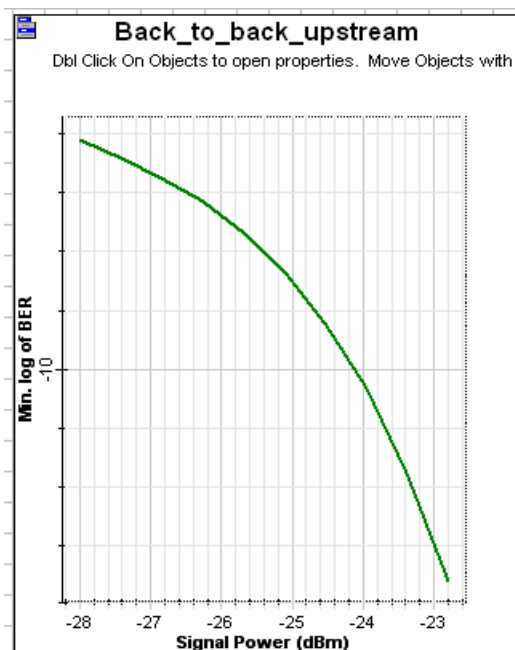
Στη συνέχεια εξετάζουμε την BER απόδοση του συστήματος. Οι Εικόνες 41-44 που ακολουθούν απεικονίζουν τις καμπύλες BER για back-to-back μετάδοση και ύστερα από διάδοση σε οπτική ίνα μήκους 20km, τόσο για το downstream όσο και για το upstream. Πρόκειται για διαγράμματα του BER σε συνάρτηση με την εισερχόμενη ισχύ στο δέκτη, δηλαδή με την οπτική ισχύ του σήματος πριν από τη διαδικασία της φώρασης.



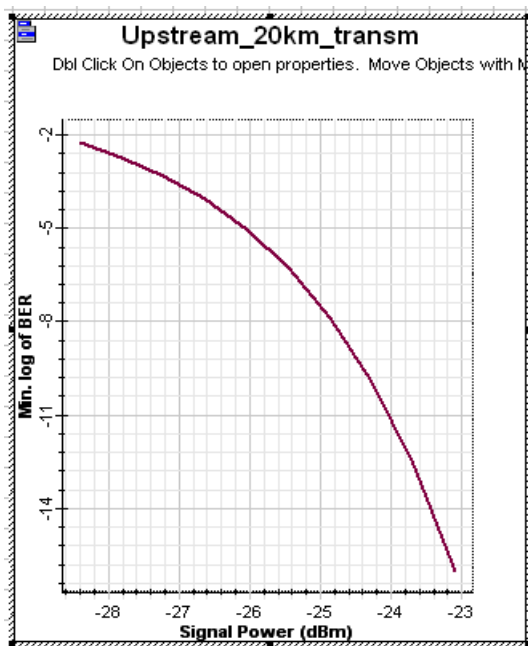
Εικόνα 42 Καμπύλη BER για σήμα downstream B-T-B



Εικόνα 43 Καμπύλη BER για σήμα downstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας



Εικόνα 44 Καμπύλη BER για σήμα upstream B-T-B



Εικόνα 45 Καμπύλη BER για σήμα upstream μετά από διάδοση σε 20km οπτικής ίνας

Συγκρίνοντας τις καμπύλες BER για το downstream για BER ίσο με 10^{-9} , παρατηρούμε ότι η ποινή ισχύος είναι περίπου 6dB. Κάτι τέτοιο οφείλεται κυρίως στην επίδραση της διασποράς της ίνας. Αντίστοιχα για τις καμπύλες BER του upstream και πάλι για BER ίσο με 10^{-9} , η ποινή ισχύος είναι μικρότερη από 0.5 dB. Εδώ η επίδραση του φαινομένου της διασποράς μπορεί να αγνοηθεί λόγω του ότι μία καθαρή φέρουσα διαμορφώθηκε με ένα σήμα βασικής ζώνης χωρίς να χρειάζεται να διαμορφωθούν πλευρικές ζώνες.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε σε βάθος η τεχνική ROF (Radio-over-Fiber). Όπως διατυπώθηκε στις σελίδες αυτής της εργασίας οι βασικοί λόγοι που έκαναν το ενδιαφέρον μας να στραφεί σε αυτή τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, με βασικότερο απ' όλα τη δυνατότητα απλοποίησης των απομακρυσμένων σταθμών βάσης, γεγονός που την καθιστά πέρα των άλλων και οικονομικά αποδοτική. Είδαμε επίσης ότι έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για τη διάδοση RF σημάτων μέσω οπτικών ινών.

Οι περισσότερες δημοσιευμένες προτάσεις γύρω από αυτή την τεχνική χρησιμοποιούν μηχανισμούς για την παραγωγή mm-waves οπτικά. Τα mm-waves είναι μια πολλά υποσχόμενη περιοχή συχνοτήτων για τις μελλοντικές ευρυζωνικές επικοινωνίες. Η παραγωγή mm-waves και η πλήρως οπτική μετατροπή προς τα πάνω αποτελούν βασικές τεχνικές για την επίτευξη χαμηλού κόστους και μετάδοση υψηλής απόδοσης στα συστήματα ROF.

Το βέβαιο είναι, πως η τεχνική ROF θα διαδραματίσει σίγουρα σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές ζεύξεις ασύρματων δικτύων και σίγουρα έχουμε να περιμένουμε πολλά προς αυτή την κατεύθυνση.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Amplifier	Ενισχυτής
Cell	Κυψέλη
Efficiency	Αποδοτικότητα
Electronic bottleneck	Ηλεκτρονική συμφόρηση
Equalizer	Ισοσταθμιστής
Flexibility	Ευελιξία
Functionalities	Λειτουργικότητες
Immunity	Ανοσία
Installation	Εγκατάσταση
Maintenance	Συντήρηση
mm-waves	Κύματα τάξης χιλιοστών
Mobility	Κινητικότητα
Processing	Επεξεργασία
Propagation losses	Απώλειες διάδοσης
Radio interfaces	Ράδιο επαφές
Regenerating	Αναγέννησης
Self-mixing	Αυτό- ανάμειξη
Switching	Μεταγωγή
Trade	Συμβιβασμός
Transmission windows	Παράθυρα διάδοσης
Ubiquitous connectivity	Αδιάκοπη επικοινωνία
Up/Down conversion	Μετατροπή προς τα πάνω/κάτω

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΕΚΠΑ	Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CATV	Cable Television Network
CNR	Carrier to Noise Ratio
CO	Central Office
CO	Central Office
CS	Central Station
CSR	Carrier to Sideband Ratio
DD-MZM	Dual-Drive Mach Zehnder Modulator
DFB	Distributed Feedback
DML	Dual Mode Laser
DR	Dynamic Range
DSB	Double Side Band
DSBCS	Double Sideband with Optical Carrier Suppression
DSBCS	Double Side Band Carrier Suppression
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EAM	Electro-Absorption Modulator
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier
EVM	Error Vector Magnitude
FBG	Fiber Bragg Grating
FP-LD	Fabry-Perot Laser Diode
FSR	Free Spectral Range
GSM	Global System for Mobile Communications
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IF	Intermediate Frequency
IMDD	Intensity Modulation and Direct Detection
LAN	Local Area Network
LNA	Low Noise Amplifier
LSB	Lower Sideband
LTE	Long Term Evolution

MU	Mobile Unit
MZI	Mach Zehnder Interferometer
MZM	Mach Zehnder Modulator
NF	Noise Figure
OCS	Optical Carrier Suppression
OCSR	Optical Carrier and Harmonic Distortion Suppression Ratio
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFLL	Optical Frequency-Locked Loop
OFM	Optical Frequency Multiplier
OIL	Optical Injection Locking
OIPLL	Optical Injection Phase-Locked Loop
OPLL	Optical Phase-Locked Loop
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
PAPR	Peak to Average Power Ratio
POF	Polymer Optical Fiber
RAMS	Residual Amplitude Modulation Suppression
RAP	Radio Access Point
RAUs	Remote Antenna Units
RF	Radio Frequency
RHD	Remote Heterodyne Detection
RIN	Relative Intensity Noise
ROF	Radio Over Fiber
RS	Remote Station
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SC	Switching Center
SCM	Sub-Carrier Multiplexing
SMF	Single Mode Fiber
SNR	Signal to Noise Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
TOF	Tunable Optical Filter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Upper Sideband
WI	Wavelength Interleaving

WLANs	Wireless Local Area Networks
WTU	Wireless Terminal Unit

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Την εργασία συνοδεύουν σε ηλεκτρονική μορφή τα demos που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος OptiPerformer για το τελευταίο τμήμα της παρούσης εργασίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM> [Προσπελάστηκε 15/10/11].
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System [Προσπελάστηκε 15/10/11].
- [3] <http://www.3gpp.org/LTE> [Προσπελάστηκε 15/10/11].
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_over_Fiber [Προσπελάστηκε 15/10/11].
- [5] L. Chen, Y. Pi, H. Wen, S. Wen, All-Optical mm-wave Generation by Using Direct-Modulation DFB Laser and External Modulator, Photonics Technology Research Center, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, China 410082, 2006
- [6] Z. Jia, J. Yu, G.-K. Chang, A Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Based on Optical Carrier Suppression and Reuse, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, NO.16, August 15,2006
- [7] J.Yu, Z. Jia, T. Wang, G.-K. Chang, A Novel Radio-Over-Fiber Configuration Using Optical Phase Modulator to Generate an Optical mm-Wave and Centralized Lightwave for Uplink Connection, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, NO. 3, February 1, 2007.
- [8] Prasanna A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, M. Bakaul, D. Novak, R. Waterhouse, Efficient Transmission Scheme for AWG-Based DWDM Millimeter-Wave Fiber-Radio Systems, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 19, NO. 4, February 15, 2007 .
- [9] Y. Li, L. Chen, S. Wen, D. Fan, Optical MM-Wave DWDM Signal Generation With Photonic Frequency Quadruple by Only One External Modulator, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 50, NO. 5, May 2008.
- [10] L. Chen, Z. Dong, J. Lu, S.C. Wen, Centralized Lightwave Radio-Over-Fiber System by Only One Phase Modulator For DWDM Optical Millimeter-Wave Generation, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 50, NO. 8, August 2008.
- [11] H. Wen, L.Chen, C. Huang, S. Wen, A Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Using Direct Modulation Laser to Generate Optical Millimeter-Wave and Wavelength Reuse for Uplink Connection, Research Center of Laser Science and Engineering and School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China, 2007 .
- [12] C.-T. Lin, Y.-M. Lin, J. Chen, S.-P. Dai, P.Tsung Shih, P.-C. Peng, S. Chi, Optical Direct-Detection OFDM Signal Generation for Radio-Over-Fiber Link Using Frequency Doubling Scheme With Carrier Suppression, Optics Express, Vol. 16, NO. 9, April 28, 2008.
- [13] J.J. Vegas Olmos, T. Kuri, K.-I. Kitayama, 60-GHz-Band 155-Mb/s and 1.5-Gb/s Baseband Time-Slotted Full-Duplex Radio-Over-Fiber Access Network, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 20, NO. 8, April 15, 2008.
- [14] C.-T. Lin, P.T. Shih, J. Chen, W.-Q. Xue, P.-C. Peng, S. Chi, Optical Millimeter-Wave Signal Generation Using Frequency Quadrupling Technique and No Optical Filtering, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 20, NO. 12, June 15, 2008.
- [15] Z. Dong, J. Lu, L. Chen, J. Yu, A Novel Radio-Over-Fiber System Architecture with Bidirectional Fiber Transmission for Full-Duplex Connection, Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China, 2008.
- [16] L. Chen, J. Lu, J. He, Z. Dong, S. Wen, A Radio-Over-Fiber System with Photonics Generated OFDM Signals by Using Directly Modulated Laser, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51, NO. 4, April 2009.
- [17] H.-C. Ji, H. Kim, Y.C. Chung, Full-Duplex Radio-Over-Fiber System Using Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, NO. 1, January 1, 2009.
- [18] J. He, L. Chen, Z. Dong, S. Wen, J. Yu, Full-Duplex Radio-Over-Fiber System with Photonics Frequency Quadruples for Optical Millimeter-Wave Generation, Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China, 2008.
- [19] L. Chen, J. Lu, J. He, Z. Dong, J. Yu, A Radio-Over-Fiber System with Photonic Generated 16QAM OFDM Signals and Wavelength Reuse for Upstream Data Connection, Key Laboratory for Micro/Nano Opto-Electronic Devices of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China, 2009.
- [20] M.-K. Hong, Y.-Y. Won, S.-K. Han, Gigabit Radio-Over-Fiber Link for Converged Baseband and Millimeter-Wave Band Signal Transmission Using Cascaded Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diodes, Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea, 2009.
- [21] R. Lin, M. Zhu, Z. Zhu, H. Chen, Y. Ye, New Progress of mm-wave Radio-Over-Fiber System Based on OFM, Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai 200072, China, 2009.

- [22] W.-Jr Jiang, C.-T. Lin, P.-T. Shih, J. Chen, P.-C. Peng, S. Chi, A Full Duplex Radio-Over-Fiber Link with Multi-level OFDM Signal via a Single electrode MZM and Wavelength Reuse with a RSOA, *Optics Express* 2710, Vol. 18, NO.3, February 1, 2010.
- [23] G.-K. Chang, Z. Jia, J. Yu, A. Chowdhury, T. Wang, G. Ellinas, Super-Broadband Optical Wireless Access Technologies, *OFC/NFOEC 2008*, OThD1.
- [24] A. Ng'oma, Radio-over-Fibre Technology for Broadband Wireless Communication Systems, *Electrical Engineering of the Eindhoven University of Technology*, June 28, 2005.
- [25] C. Lim, A. Nirmalathas, M. Bakaul, P. Gamage, K.-L. Lee, Y. Yang, D. Novak, R. Waterhouse, Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, NO. 4, February 15, 2010.
- [26] C.-H. Yeh et al., Understanding Standard OFDM WIMAX Signal Access in Radio Over Fiber System, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 10, 201-214, 2009.
- [27] J. Yu, Z. Jia, T. Wang, G.-K. Chang, Centralized Lightwave Radio-Over-Fiber System With Photonic Frequency Quadrupling for High-Frequency Millimeter-Wave Generation, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, NO. 19, October 1, 2007.
- [28] H.-C. Ji, H. Kim, Y.C. Chung, Cost-Effective Radio-over-Fiber Systems Employing Phase-Modulated Downlink and Intensity-Modulated Uplink, *OSA/OFC/NFOEC 2009*, OTuJ8.
- [29] A. Ng'oma, Design of a Radio-Over-Fiber System for Wireless LANs, May 5, 2002.
- [30] Z. Jia, Optical Millimeter-Wave Signal Generation, Transmission and Processing for Symmetric Super-Broadband Optical-Wireless Access Networks, *Georgia Institute of Technology*, August 2008.
- [31] H. Yang, H.-D. Jung, Y. Zheng, B. Huiszoon, J. H. C. van Zantvoort, E. Tangdionga, A.M.J. Koonen, *COBRA Research Institute, Eindhoven University of Technology, The Netherlands*, 2008.
- [32] T. Koonen, A. Ng'oma, H. van den Boom, I. T. Monroy, P. Smulders, G.-D. Khoe, Polymer Optical Fibre Network for Feeding Wireless LAN Antenna Stations, *COBRA Research Institute, Eindhoven University of Technology, The Netherlands*.
- [33] Z. Jia, J. Yu, G. Ellinas, G.-K. Chang, Key Enabling Technologies for Optical-Wireless Networks: Optical Millimeter-Wave Generation, Wavelength Reuse and Architecture, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, NO. 11, November 2007.
- [34] J. Ma, J. Yu, C. Yu, X. Xin, X. Sang, Q. Zhang, 64 GHz Optical Millimeter-Wave Generation by Octupling 8 GHz Local Oscillator via a Nested LiNbO₃ Modulator, *Optics & Laser Technology* 42 (2010) 264-268, 2010.
- [35] Q. Chang, T. Ye, Y. Su, Generation of Optical Carrier Suppressed-Differential Phase Shift Keying (OCS-DPSK) Format Using One Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator in Radio Over Fiber Systems, *Optics Express* 10421, Vol. 16, NO. 14, July 7, 2008.
- [36] J. He, L. Chen, S. Wen, A Novel Full-Duplex Radio-over-Fiber System with Photonics Frequency Quadruple for Optical Millimeter Wave Generation, *School of Computer and Communication, Hunan University Changsha, China*, 2008.
- [37] L. Chen, H. Wen, S. Wen, A Radio-Over- Fiber System With a Novel Scheme for Millimeter-Wave Generation and Wavelength Reuse for Up-Link Connection, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, NO. 19, October 1, 2006.
- [38] L. Chen, X. Lei, S. Wen, A Novel Radio Over Fiber System with DWDM mm-wave Generation and Wavelength Reuse for Upstream Data Connection, *Research Center of Laser Science and Engineering, and School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, China*, 2007.
- [39] M. S. Rahman, J. H. Lee, Y. Park, K.-D. Kim, Radio over Fiber as a Cost Effective Technology for Transmission of WiMAX Signals, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 56, 2009.
- [40] P. e. Green, *Fiber Optic Networks, Μετάφραση Κ. Καρούμπalos, Εκδόσεις Παπασωτηρίου*, 1994.