



**ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ασύρματες Επικοινωνίες με  
Ραδιοσυχνότητες & Οπτικά Μέσα**

**Βασιλική Ε. Μαρκουλάκη  
Βασίλειος Ν. Καραγιαννόπουλος**

**Εισηγητής: Δρ. Νικόλαος Ι. Μυριδάκης**

**ΑΘΗΝΑ  
ΙΟΥΝΙΟΣ 2016**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Ασύρματες**

**Οπτικές Επικοινωνίες**

**Βασιλική Ε. Μαρκουλάκη  
Α.Μ. 40349  
Βασίλειος Ν. Καραγιαννόπουλος  
Α.Μ. 34239**

**Εισηγητής:**

**Δρ. Νικόλαος Ι. Μυριδάκης**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Δρ. Νικόλαος Ι. Μυριδάκης  
Δρ. Παναγιώτης Γιαννακόπουλος, Καθηγητής Παν. Πειραιά Τ.Τ  
Αναστασία Βελώνη, Καθηγήτρια Εφαρμογών Παν. Πειραιά Τ.Τ**

**Ημερομηνία εξέτασης: ΙΟΥΝΙΟΣ 2016**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα πτυχιακή ολοκληρώθηκε μετά από πολλές προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως είναι αυτό των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών.

Την προσπάθειά μας αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μας με τις πολύτιμες υποδείξεις του, τον οποίο θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους φίλους και τις οικογένειές μας για την στήριξη τους όχι μόνο στην συγκεκριμένη εργασία, αλλά και σε όλη μας την πορεία στο εκπαιδευτικό ίδρυμα.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την παρουσίαση των ασύρματων επικοινωνιών. Γίνεται ανάλυση αυτών σε δύο μέσα μετάδοσης, τον αέρα και το φως.

Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μελέτη των διαμορφώσεων και των χαρακτηριστικών των σημάτων στις ήδη γνωστές τεχνολογίες RF (Radio Frequency) σε αντιστοιχία τους με τις τεχνολογίες FSO (Free Space Optics).

Κάθε μία από τις δύο αυτές τεχνολογίες έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά και συγκρίνονται μεταξύ τους.

## ABSTRACT

The present thesis refers to the presentation of wireless communications. The most known technologies which are going to be presented and analyzed, are the communications in two different transmission means, air and light.

Notably, research has been undertaken on the subject of signal's modulations and features on the known RF (Radio Frequency) technologies in correspondence with the FSO (Free Space Optics) technologies.

Each one of those technologies has specific advantages and disadvantages which are presented and compared respectively.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>12</b>
<b>2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RF .....</b>	<b>15</b>
2.1 Ραδιοφωνικά συστήματα.....	15
2.2 Χαρακτηριστικά της ραδιοσυχνότητας.....	17
2.3 Κατανομή συχνότητας και διαφοροποίηση.....	20
2.3.1 Πλάτος διαμόρφωσης της ραδιοσυχνότητας .....	23
2.3.2 Συχνότητα διαμόρφωσης .....	27
<b>3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ.....</b>	<b>29</b>
3.1 Η ιστορία των FSO.....	30
3.3 Βασικές αρχές των οπτικά ασύρματων τηλεπικοινωνιών .....	31
3.3.1 Ανίχνευση της οπτικής ακτινοβολίας .....	35
3.3.2 Ρυθμοί σφάλματος bit στις συνδέσεις FSO .....	36
3.4 Διαμόρφωση συστημάτων FSO .....	37
3.4.1 Διαμόρφωση ενεργοποίησης/ απενεργοποίησης Κλειδώματος (on off keying (OKK) modulation).....	37
3.4.2 Διαμόρφωση θέσης παλμού .....	40
3.4.3 Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης .....	41
3.5 Προκλήσεις στην επικοινωνία με FSO συστήματα .....	44
3.5.1 Επίγειες συνδέσεις.....	44
3.5.1.1 Απώλειες λόγω απορρόφησης και σκέδασης.....	45
3.5.1.2 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης .....	47
3.5.1.3 Απώλειες λόγω απόκλισης της δέσμης .....	48
3.5.1.4 Απόκλιση λόγω φωτός .....	49
3.5.1.5 Απώλειες λόγω μη ευθυγράμμισης .....	49
3.5.2 Διαστημικές συνδέσεις .....	49
3.5.2.1 Απώλεια εντοπισμού.....	50
3.5.2.2 Θόρυβος παρασκηνίου .....	51
3.5.2.3 Γωνία των λαμβανόμενων διακυμάνσεων.....	51
<b>4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ RF ΚΑΙ FSO .....</b>	<b>52</b>
4.1 Διαφορές συστημάτων RF και FSO .....	52
4.1.1 Διαμόρφωση του εύρους ζώνης.....	52
4.1.2 Απόκλιση στενής δέσμης .....	53
4.1.3. Ισχύς και απαίτηση μάζας .....	53



## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

4.1.4 Προσανατολισμός .....	54
4.1.5 Αδειοδοτούμενο φάσμα.....	54
4.1.6 Ασφάλεια συστήματος.....	55
4.2 Μειονεκτήματα των FSO έναντι των RF .....	55
4.3 Πειραματικές προσομοιώσεις FSO συστημάτων και RF .....	55
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>69</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>71</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1:</b> Ασύρματος τηλεγράφος (Stoehr, M.D.).....	16
<b>Σχήμα 2.2:</b> Ο υπερετερόδυνος δέκτης (fas.org).....	17
<b>Σχήμα 2.3:</b> Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (NIEHS, 2015) .....	18
<b>Σχήμα 2.4:</b> Οι ζώνες του φάσματος RF.....	18
<b>Σχήμα 2.5:</b> Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων ραδιοσυχνότητας (Harris Corporation, 1996). .....	19
<b>Σχήμα 2.6:</b> Γενική αρχιτεκτονική δομή δικτύου RF (Xiao, L., Wang, P., Niyato, D., Han, Z., 2014) .....	21
<b>Σχήμα 2.7:</b> Πλάτος διαμόρφωσης (Harris Corporation, 1996) .....	24
<b>Σχήμα 2.8:</b> Πλευρικές ζώνες πλάτους διαμόρφωσης (Harris Corporation, 1996). .....	25
<b>Σχήμα 2.9:</b> Διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (Harris Corporation, 1996). .....	26
<b>Σχήμα 3.1</b> Γεωμετρία της οπτικής σύνδεσης.....	31
<b>Σχήμα 3.2:</b> Τα υποσυστήματα ενός FSO συστήματος. ....	33
<b>Σχήμα 3.3:</b> Πιθανότητα ανίχνευσης και εσφαλμένου συναγερμού .....	37
<b>Σχήμα 3.3:</b> Διάγραμμα ροής της διαμόρφωσης ενεργοποίηση / απενεργοποίηση του κλειδώματος (ΟΚΚ).....	38
<b>Σχήμα 3.4:</b> Φάση σήματος για την σειρά δεδομένων [1 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1] για πέντε διαφορετικές μορφές ΟΚΚ: α) CRZ, b) CSRZ, c) ACRZ, d) AMI, e) PSBT. ....	39
<b>Σχήμα 3.6:</b> Διάγραμμα ροής της διαμόρφωσης θέσης παλμού.....	40
<b>Σχήμα 3.7:</b> Σύγκριση ισχύος μετάδοσης για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και ΟΚΚ.....	42
<b>Σχήμα 3.8:</b> Σύγκριση BER για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και ΟΚΚ.....	42
<b>Σχήμα 3.9:</b> Σύγκριση εύρους ζώνης για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και ΟΚΚ. ....	43
<b>Σχήμα 3.10:</b> Τοπολογίες συνδέσεων FSO .....	45
<b>Σχήμα 3.11:</b> Απόσβεση συναρτήσεως της ορατότητας (Kim et al. 2000) .....	47
<b>Σχήμα 3.12:</b> Δορυφορικές συνδέσεις FSO.....	50

<b>Σχήμα 4.2:</b> Χρησιμοποιούμενη κεραία για την προτεινόμενη διάταξη των Akella et al. (2005).....	57
<b>Σχήμα 4.3:</b> Πειραματική διαμόρφωση των Akella et al. (2005) .....	58
<b>Σχήμα 4.4:</b> Διάγραμμα τύπου ματιού (Eye diagram) για το απλό TX/RX FSO σύστημα κάτω από καθαρές συνθήκες. ....	59
<b>Σχήμα 4.6:</b> Είδη πιθανών διευθετήσεων απώλειας /κέρδους κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (Bigli και Yunskel 2010). ....	61
<b>Σχήμα 4.7:</b> α) θεωρητική πιθανότητα σφάλματος αυξάνεται καθώς ο δέκτης μετακινείται μακριά από τον πομπό. Β) Θεωρητική πιθανότητα σφάλματος του δέκτη απομακρύνεται από την κανονικότητα του πομπού (Bigli και Yunskel 2010). ....	62
<b>Σχήμα 4.8:</b> Διάγραμμα συστήματος με δυο παράλληλα κανάλια .....	63
<b>Σχήμα 4.9:</b> BER για διαφορετικές τιμές συντελεστή συσχέτισης σε διαφορετικές συνθήκες τύρβης. (Djordjevic, G.T., Petkovic, M.I., Cvetkovic, A.M., Karagiannidis, G.K.,2015).....	64
<b>Σχήμα 4.10:</b> Γραφική αναπαράσταση των υβριδικών καναλιών που χρησιμοποιήθηκαν από τους Eslami et al. (2010).....	65
<b>Σχήμα 4.11:</b> Αποτελέσματα των Eslami et al. (2010) για το BER από τους υβριδικούς κώδικες όταν τα κανάλια FSO είναι σταθερά.....	65
<b>Σχήμα 4.12:</b> Διάγραμμα ασύμμετρης σύνδεσης RF/FSO σε σύστημα μετάδοσης των Ansari και Yilmaz (2013) .....	66
<b>Σχήμα 4.13:</b> Επίδραση των σημειακών σφαλμάτων στην εργοδική ικανότητα του ασύμμετρου συστήματος των Ansari και Yilmaz (2013).....	67
<b>Σχήμα 4.14:</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης των Moradi et al. (2010) για χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι .....	68



## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>FSO</b>	Free Space Optics
<b>LOS</b>	Line Of Sight
<b>EM</b>	Electromagnetic
<b>AM</b>	Amplitude Modulation
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>SSB</b>	Single Side Band
<b>USB</b>	Upper Side Band
<b>LSB</b>	Lower Side Band
<b>DSB</b>	Dual Side Band
<b>AME</b>	Amplitude Modulation Equivalent
<b>PEP</b>	Peak Envelope Power
<b>LED</b>	Light Emitted Diode
<b>PIN (DIODE)</b>	Positive Intrinsic Negative
<b>APD</b>	Avalanche Photo Diode
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>IM/DD</b>	Intensity Modulated Direct Detection
<b>OOK</b>	On Off Keying (Modulation)
<b>CRZ</b>	Chirped Return to Zero
<b>CSRZ</b>	Carrier Suppressed Return to Zero
<b>AMI</b>	Alternate Mark Inversion
<b>PSBT</b>	Phase Shaped Binary Transmission
<b>PPM</b>	Pulse Position Modulation
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>PRBS</b>	Pseudo Random Bit Sequence

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των υπολογιστών και των δικτύων τηλεπικοινωνίας γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη καθώς έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες επικοινωνίας προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις επεκτασιμότητας των δικτύων που προκύπτουν από τις απαιτήσεις της ευρείας αποδοχής τους. Οι απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτονται για να είναι ευρέως αποδεκτές οι συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι το μεγάλο εύρος ζώνης, η ασφάλεια και η εγγύηση της ιδιωτικότητας, μικρή καθυστέρηση από άκρη σε άκρη και ανταπόκριση, μεγάλη συνδεσιμότητα και κάλυψη δικτύου.

Σήμερα δεν υπάρχει απλή τεχνολογία επικοινωνίας που να ικανοποιεί όλες αυτές τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα στα δίκτυα ad-hoc έχουν προταθεί υβριδικά μοντέλα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων κλιμάκωσης στα κινητά δίκτυα ad-hoc. Αυτές οι λύσεις χρησιμοποιούν ένα αραιό δίκτυο σταθερών ενσύρματων σταθμών βάσης σε ένα δίκτυο ad-hoc προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες του δικτύου.

Η δυνατότητα των ασύρματων δικτύων ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency, RF) κατασκευάζονται με περιορισμούς ενώ δεν ενδείκνυνται για την κλιμάκωση των δικτύων με αυξημένο αριθμό κόμβων εξαιτίας της παρεμβολής που δημιουργείται με ταυτόχρονη μετάδοση μεταξύ των γειτονικών κόμβων (Gurta and Kumar, 2000).

Τα ασύρματα δίκτυα RF συνεχίζουν να αναπτύσσονται και να αυξάνουν τις απαιτήσεις των εφαρμογών τους αλλά παράλληλα η τεχνολογία των οπτικών ζεύξεων ελεύθερου χώρου (Free Optics Space, FSO) αναπτύσσεται σε ερευνητικό και βιομηχανικό επίπεδο. Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με μεγάλο ρυθμό και ιδιαίτερες κατευθυντικές μεταδόσεις χρησιμοποιώντας ακτίνες λέιζερ ελεύθερου χώρου των οποίων η γωνία απόκλισης είναι της τάξης των μιλι-ακτινίων.

Η πολύ καλή διεύθυνση μετάδοσης καθιστά την τεχνολογία FSO ανεπηρέαστη από παρεμβολές. Παρόλα αυτά ένας από τους βασικούς περιορισμούς της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η ανάγκη οπτικών συνδέσμων που διατηρούν την ευθυγράμμιση (Line of Sight, LOS) της μετάδοσης. Η διαθεσιμότητα των συνδέσμων FSO μπορεί να περιοριστεί περαιτέρω από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως οι βροχοπτώσεις και οι έντονες χιονοπτώσεις.

Οι συμπληρωματικές ιδιότητες των RF και FSO σημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων RF/FSO δικτύων στην οποία οι αδυναμίες του κάθε δικτύου εξαλείφονται από τα πλεονεκτήματα του άλλου.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα παρουσιαστούν τα δύο είδη μετάδοσης σημάτων και οι τεχνολογίες τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το RF και θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του ενώ στο τρίτο κεφάλαιο θα αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του FSO. Η σύγκριση των δύο συστημάτων ως προς την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων την απώλεια ανάλογα με τις συνθήκες και το κόστος τους θα γίνει στο τέταρτο κεφάλαιο. Τέλος στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα βασικά συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ RF

Η ασύρματη ραδιοτεχνολογία αποτελεί ένα σύγχρονο κλάδο της τεχνολογίας που βασίζεται σε πρότερες ανακαλύψεις. Οι πρώτες έρευνες σχετικά με το φάσμα ραδιοσυχνότητας πραγματοποιήθηκαν στην οπτική, στον ηλεκτρισμό και στο μαγνητισμό. Πρίν από το 19<sup>ο</sup> αιώνα ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός θεωρούνταν ξεχωριστές δυνάμεις ενώ το 1820 για πρώτη φορά διατυπώθηκε η άποψη πως τα ηλεκτρικά ρεύματα ασκούν δύναμη στους μαγνήτες και μια δεκαετία αργότερα ο Faraday διατύπωσε την αρχή πως το μαγνητικό πεδίο δημιουργεί γύρω του ηλεκτρικό πεδίο. Η διατύπωση βασικών νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού όπως ο νόμος του Gauss, ο νόμος του Faraday ο νόμος του Ampere αποτελούν τις βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού και τη βάση για τη διατύπωση των εξισώσεων του Maxwell που βοήθησαν στην εξέλιξη του μαγνητισμού του ηλεκτρισμού και της οπτικής.

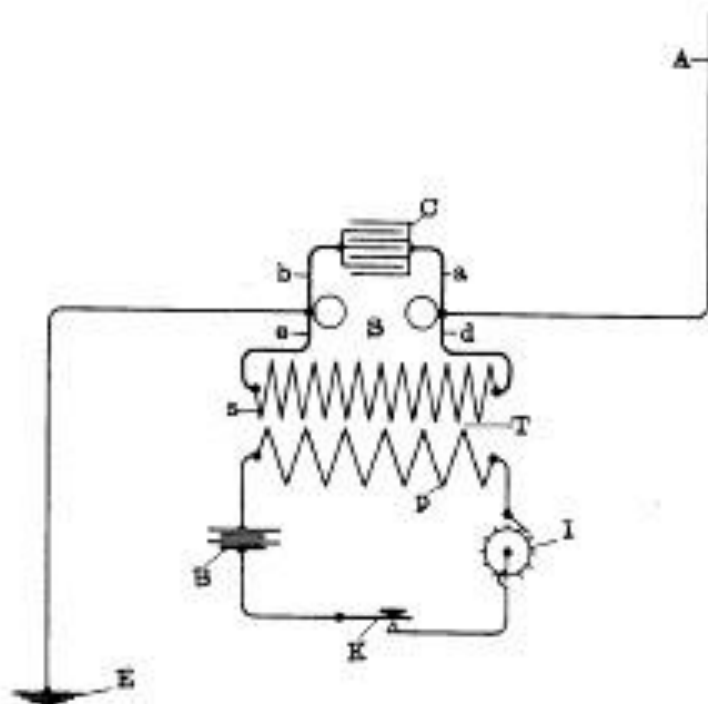
Καθώς οι θεωρίες του ηλεκτρομαγνητισμού εξελίχθηκαν γρήγορα αναπτύχθηκε και η ασύρματη επικοινωνία. Οι ασύρματοι τηλέγραφοι πρωτοεμφανίστηκαν το 1900 και εξελίχθηκαν στα βραχεία ραδιοσήματα μια εικοσαετία αργότερα. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των επικοινωνιακών συστημάτων με ραδιοσυχνότητες.

### 2.1 Ραδιοφωνικά συστήματα

Ένα ραδιοφωνικό σύστημα συνήθως χρησιμοποιεί μια πηγή ηλεκτρομαγνητικού κύματος και έναν προβλεπόμενο προορισμό για αυτό το μήνυμα. Η ραδιοφωνική πηγή είναι γνωστή ως μεταδότης ενώ ο προορισμός αποτελεί το δέκτη. Υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις στις οποίες είναι αναγκαίος μόνο ο δέκτης με πιο χαρακτηριστική την αστρονομία.

Ένας τυπικός μεταδότης είναι μια συσκευή που αποτελείται από ένα ταλαντευόμενο ηλεκτρικό κύκλωμα από μια μέθοδο διαμόρφωσης της ταλάντωσης που περιέχει δεδομένα, έναν ενισχυτή για την αύξηση της ισχύος της διαμορφωμένης ταλάντωσης και μια κεραία η οποία μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα που παράγονται από το κύκλωμα του πομπού σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.





**Σχήμα 2.1:** Ασύρματος τηλέγραφος (Stoehr, M.D.)

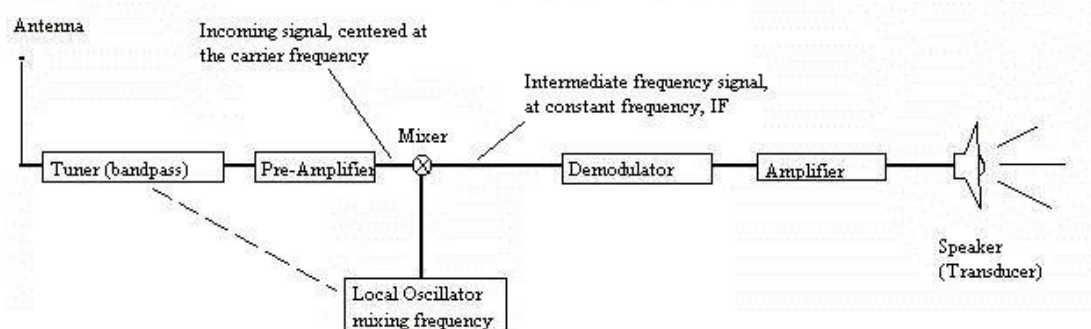
Οι πομποί λειτουργούν απλά και μοιάζουν με γεννήτριες σπινθήρα σε κενό. Η αρχική τους λειτουργία περιλάμβανε το άνοιγμα και το κλείσιμο του κυκλώματος ταλάντωσης που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός απλού συνεχούς κύματος και τη μετάδοση ενός on/off σήματος. Η διαδικασία του συνεχούς κύματος χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες πειραματικές μετρήσεις των σημάτων EM όπως επίσης και στους ασύρματους τηλέγραφους. Ο σχεδιασμός ήταν πολύ βασικός: μια πηγή ισχύος που συνήθως είναι μπαταρία, ένα αγωγίμο έλασμα (πομπός), ένας διακόπτης, ένα διάκενο σπινθήρα, ένας πυκνωτής, ένα πηνίο συντονισμού (μετασχηματιστής) και μια κεραία (Shoemaker, H. 1901).

Τα τμήματα ενός σύγχρονου πομπού αποτελείται από έναν ταλαντωτή αναφοράς ή πηγή συχνότητας, έναν διαμορφωτή, έναν ενισχυτή και μια κεραία. Φυσικά είναι αναγκαίο να υπάρχουν εξωτερικά τμήματα όπως η πηγή ισχύος και έναν κρύσταλλο ταλάντωσης και επιπλέον η σύνδεση ανάμεσα στον πομπό και

στην κεραία συνήθως απαιτεί μερικά παθητικά στοιχεία προκειμένου να ρυθμίζεται το κύκλωμα αλλά η βασική δομή ενός πομπού παραμένει ίδια.

Παρά το γεγονός πως ο πομπός έχει την ίδια δομή ένας λήπτης είναι πολύ πιο περίπλοκος. Οι αυθεντικοί λήπτες αποτελούνται από μια κεραία και ένα φορτίο. Οι πρώτοι λήπτες είχαν διάφορες μορφές συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος σπινθήρα σε κενό που υποδηλώνει την ύπαρξη μεγάλων ηλεκτρομαγνητικών σημάτων και το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις ζώνες εκπομπής ραδιοφωνικού σήματος AM.

Η ευαισθησία των πρώτων ληπτών αυξήθηκε με τη χρήση ενός θετικού συστήματος αποθήκευσης που ενίσχυε το εισερχόμενο σήμα. Οι σημερινοί δέκτες είναι υπερετερόδυνοι στους οποίους το εισερχόμενο σήμα μειώνεται με ανάμιξη της συχνότητας τους. Στα σύγχρονα ραδιοφωνικά συστήματα το AM ή το FM σήμα μειώνει τη συχνότητα του σε μια μέση τιμή που αποκαλείται ενδιάμεση συχνότητα.



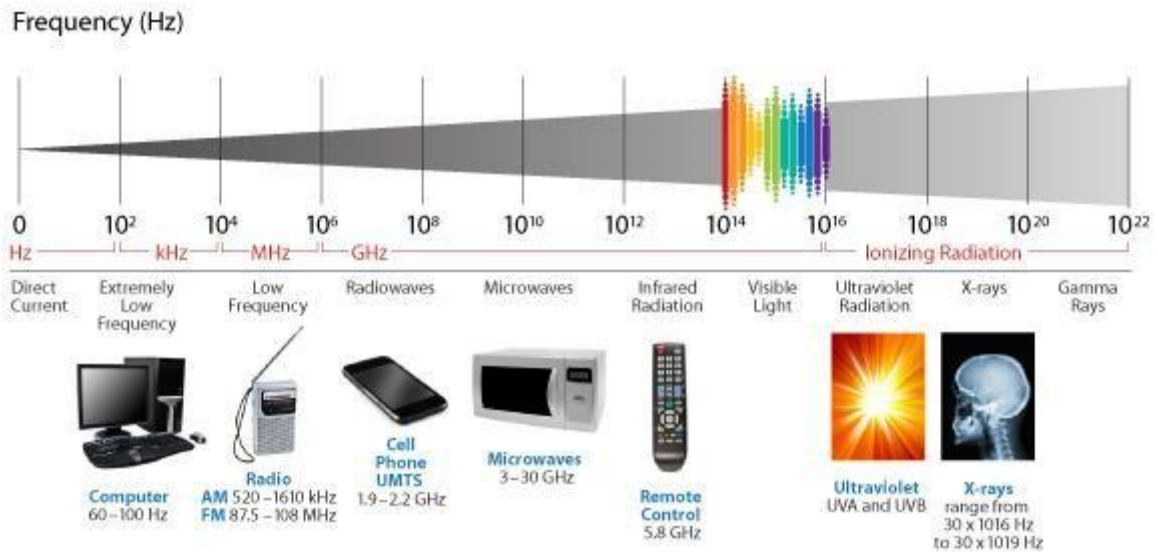
**Σχήμα 2.2:** Ο υπερετερόδυνος δέκτης (fas.org)

Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται ένας τυπικός δέκτης με την προσθήκη ενός αναμίκτη και ταλαντωτή σήματος. Ο τοπικός ταλαντωτής συνδέεται με το δέκτη επειδή και οι δύο μεταβάλλονται με τη συχνότητα του φορέα.

### 2.2 Χαρακτηριστικά της ραδιοσυχνότητας

Τα σήματα ραδιοσυχνότητας αποτελούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που αποτελούν μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει όλες τις μορφές φωτός που κυμαίνονται από τις συχνότητες του ήχου μέχρι τις πρότυπες ραδιοσυχνότητες που περιλαμβάνουν τα ραδιοφωνικά AM, FM τα κανάλια της τηλεόρασης και άλλες ζώνες ραδιοσυχνότητας.

## Electromagnetic Spectrum



Σχήμα 2.3: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (NIEHS, 2015)

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται στην υπέρυθη ακτινοβολία, στην ορατή και στην υπεριώδη ακτινοβολία αλλά και στις μορφές της ακτινοβολίας όπως οι ακτίνες X και οι ακτίνες Γ και τις κοσμικές ακτίνες.

Το φάσμα RF διαιρείται περαιτέρω στις συμβατικές ζώνες που ταξινομούνται κυρίως από το εύρος συχνοτήτων τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Table 2.1: RF spectrum bands

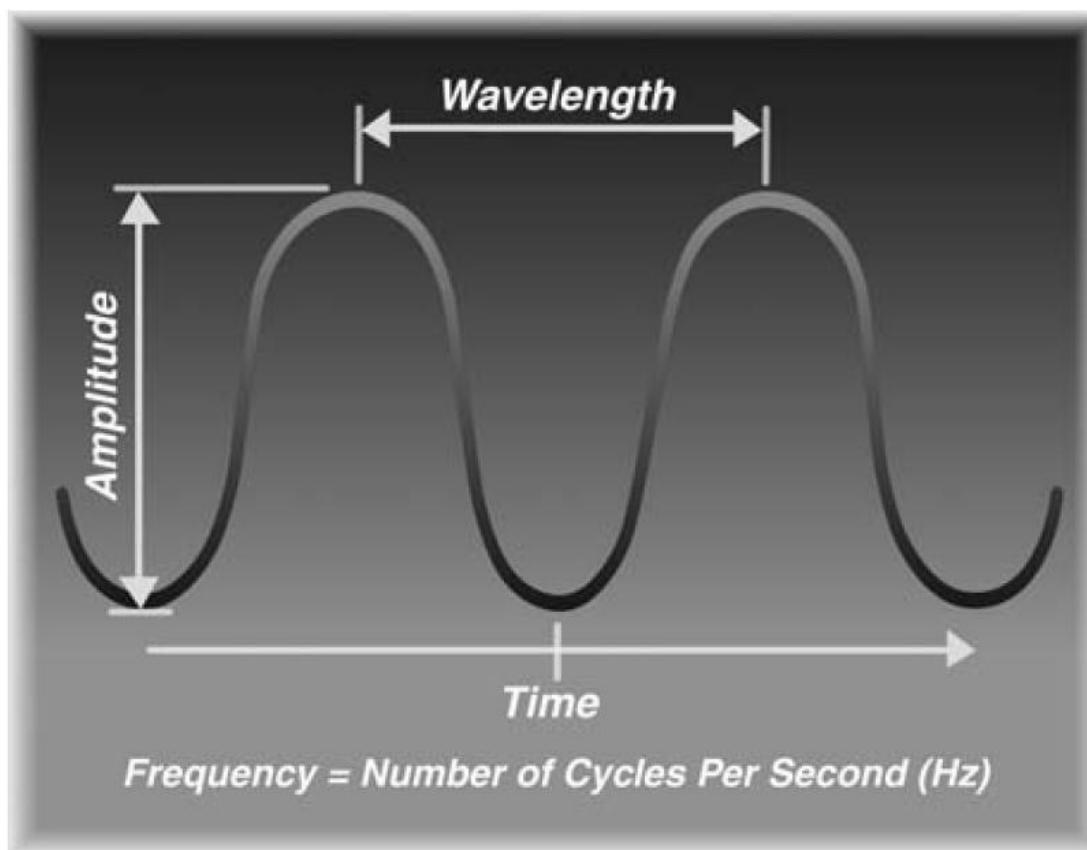
Name	ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF
f (Hz)	$3 \times 10^0 - 3 \times 10^1$	$3 \times 10^1 - 3 \times 10^2$	$3 \times 10^2 - 3 \times 10^3$	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^5$	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$
$\lambda$ (m)	$10^8 - 10^7$	$10^7 - 10^6$	$10^6 - 10^5$	$10^5 - 10^4$	$10^4 - 10^3$	$10^3 - 10^2$
Uses	NA	AC power	NA (audible)	Navigation	Maritime	AM radio

Name	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	Infrared
f (Hz)	$3 \times 10^6 - 3 \times 10^7$	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^8$	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{10} - 3 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$
$\lambda$ (m)	$10^2 - 10^1$	$10^1 - 10^0$	$10^0 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 7.5 \times 10^{-7}$
IEEE	HF	VHF	UHF   L   S	S   C   X   Ku   K   Ka	Ka   V   W   mm	
NATO			A - E	F - K	K - M	
Uses	Shortwave, CB	TV, FM radio	ISM, TV, Wi-Fi®	Microwave	Radar	"Light"

Σχήμα 2.4: Οι ζώνες του φάσματος RF

Όλα τα σήματα ραδιοσυχνότητας έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: το πλάτος, τη συχνότητα, το μήκος κύματος, τη φάση και την πολικότητα τους. Η ενέργεια της ραδιοσυχνότητας είναι ανάλογη της ενέργειας των ηχητικών κυμάτων, δηλαδή των μεταβολών της πίεσης του αέρα.



**Σχήμα 2.5:** Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων ραδιοσυχνότητας (Harris Corporation, 1996).

Τα κύματα ραδιοσυχνότητας προκαλούν την ταλάντωση των ηλεκτρονίων σε μια κεραία οδηγώντας στο σχηματισμό κυμάτων μεγάλης και μικρής πίεσης. Η μεταβολή της ενέργειας ραδιοσυχνότητας μετριέται με τον ίδιο τρόπο που μετριέται η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης. Πρακτικά το πλάτος του ραδιοκύματος θεωρείται ως το ύψος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του. Η μεταβολή αυτή της ενέργειας του κύματος ραδιοσυχνότητας είναι γνωστή ως πλάτος του σήματος. Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του σήματος τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του εκπεμπόμενου σήματος. Με άλλα λόγια όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του RF σήματος τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση στην οποία μεταδίδεται πριν ασθενήσει στο σημείο όπου θα σταματήσει (Harris Corporation, 1996).

Η μετάδοση και η λήψη ενός σήματος είναι ευκολότερες όταν το σήμα ταλαντώνεται με έναν μεγαλύτερο ή μικρότερο ρυθμό. Ο χρόνος ανάμεσα στο μέγιστο πλάτος του σήματος και στο επόμενο μέγιστο είναι σταθερό για τα

μέγιστα. Ο αριθμός των φορών ανά δευτερόλεπτο που το πλάτος του σήματος γίνεται μέγιστο αποτελεί τη συχνότητα του σήματος.

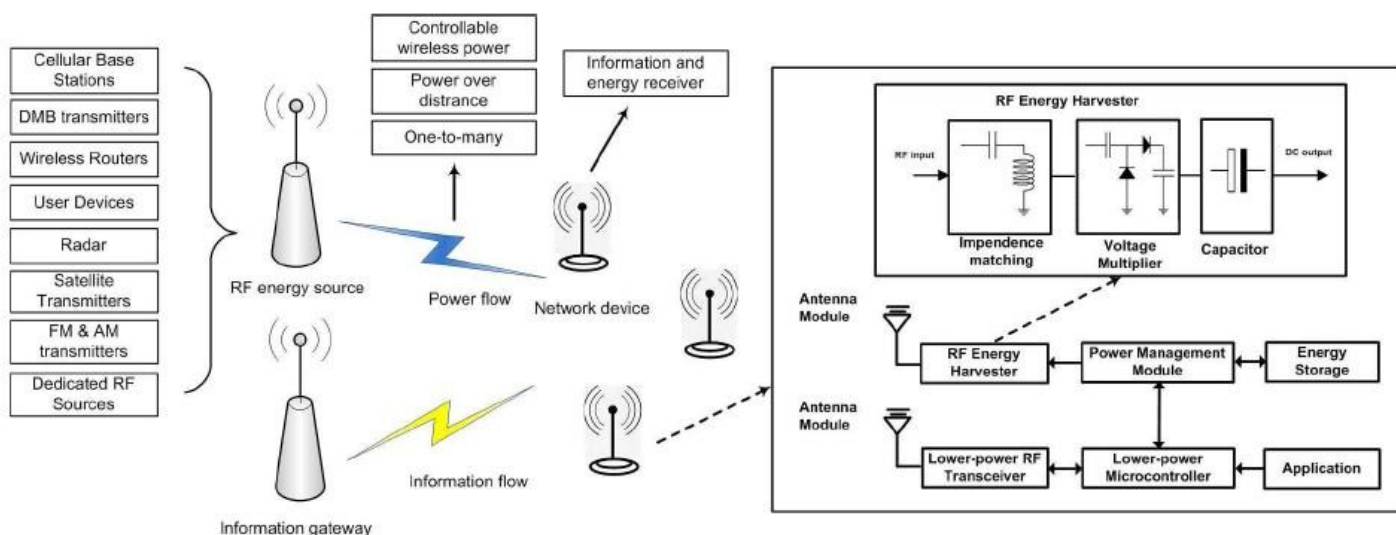
Τα ραδιοσήματα με συχνότητα από 300GHz έως 3 kHz χρησιμοποιούνται ως μέσο μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι ασύρματες πληροφορίες διαμορφώνονται στο πλάτος και στη φάση των κυμάτων RF ενώ η ασύρματη μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται μέσω μακρινού πεδίου για την RF ακτινοβολία. Η μεταφορά ενέργειας RF χαρακτηρίζεται από μεταφορά χαμηλής ισχύος και μεγάλης απόστασης και για αυτό είναι προσιτή σε μεγάλο αριθμό συσκευών με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που διαχέεται σε μια σχετικά ευρεία περιοχή. Εξαιτίας της ιδιαίτερης φύσης της ενέργειας RF και των απαιτήσεων της ασύρματης επικοινωνίας τα ασύρματα δίκτυα επανασχεδιάζονται με στόχο να επιτύχουν τη μέγιστη απόδοση στην μεταφορά και παραγωγή της ενέργειας RF (Harris Corporation, 1996).

Το μήκος των ραδιοκυμάτων είναι η απόσταση ανάμεσα στις κορυφές ενός κύματος. Το άθροισμα του μήκους κύματος και της συχνότητας είναι σταθερό και ισούται με την ταχύτητα διάδοσης του. Κατά συνέπεια όταν η συχνότητα αυξάνεται το μήκος κύματος μειώνεται και το αντίστροφο. Τα ραδιοκύματα συνήθως διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός και ο καθορισμός του μήκους κύματος σε μέτρα για κάθε συχνότητα γίνεται διαιρώντας την ταχύτητα του φωτός (300 εκατομμύρια m/s) με τη συχνότητα σε MHz.

### **2.3 Κατανομή συχνότητας και διαφοροποίηση**

Μια τυπική κεντρική δομή ενός δικτύου ραδιοσυχνότητας αποτελείται από τρία στοιχεία (Varshney , 2008): τις πύλες πληροφοριών, τις πηγές ενέργειας της ραδιοσυχνότητας (RF) και τους κόμβους (συσκευές) του δικτύου.

## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες



**Σχήμα 2.6:** Γενική αρχιτεκτονική δομή δικτύου RF (Xiao, L., Wang, P., Niyato, D., Han, Z., 2014)

Οι πύλες πληροφοριών είναι γνωστές ως σταθμοί βάσης, ασύρματοι δρομολογητές και ρελέ. Οι πηγές ενέργειας RF μπορούν να θεωρηθούν είτε ως εκπομποί ενέργειας της ραδιοφωνικής συχνότητας ή ατμοσφαιρικές πηγές RF. Οι κόμβοι του δικτύου είναι οι συσκευές του χρήστη που επικοινωνούν με τις πύλες των πληροφοριών. Συνήθως οι πύλες πληροφοριών και οι ενεργειακές πηγές ραδιοφωνικής συχνότητας έχουν συνεχή και δεδομένη ηλεκτρική παροχή ενώ οι ενεργειακοί κόμβοι του δικτύου από τις πηγές παίρνουν ενέργεια από τις πηγές RF έτσι ώστε να στηρίζουν τη λειτουργία τους. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι πύλες πληροφοριών και οι ενεργειακές πηγές RF μπορεί να ταυτίζονται.

Ένας κόμβος συλλέκτης ενέργειας αποτελείται από τα εξής στοιχεία (Xiao, L., Wang, P., Niyato, D., Han, Z., 2014):

- Την εφαρμογή που αποδίδει τα χαρακτηριστικά του δικτύου
- Έναν μικροελεγκτή χαμηλής ισχύος για την επεξεργασία των δεδομένων από την εφαρμογή
- Έναν αναμεταδότη RF χαμηλής ισχύος για τη μετάδοση ή λήψη πληροφοριών

- Έναν ενεργειακό καταναλωτή που αποτελείται από μια κεραία, μια ταύτιση εμπέδισης, έναν πολλαπλασιαστή τάσης και έναν πυκνωτή για τη συλλογή σημάτων RF που μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Ένα στοιχείο διαχείρισης ισχύος που αποφασίζει για το αν θα αποθηκευτεί η ηλεκτρική ενέργεια που πετυχαίνεται από το RF ή για το αν θα χρησιμοποιηθεί για την άμεση μετάδοση πληροφοριών.
- Μια μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας για να αναπληρώσει την ενέργεια RF για μελλοντική χρήση.

Ένα τυπικό σύστημα RF αποτελείται από μια κεραία, μια εμπέδηση, έναν πολλαπλασιαστή τάσης και έναν πυκνωτή. Η κεραία σχεδιάζεται έτσι ώστε να δουλεύει είτε σε απλή συχνότητα ή σε ζώνες πολλαπλής συχνότητας στην οποία ο κόμβος του δικτύου μπορεί να αντλήσει ενέργεια από μια απλή ή ταυτόχρονα από πολλαπλές πηγές αντίστοιχα. Κατά συνέπεια η ενέργεια RF τυπικά λειτουργεί σε ένα εύρος συχνοτήτων ενώ η πυκνότητα των σημάτων RF είναι αντίστροφη της συχνότητας (Varshney, 2008).

Η εμπέδηση μοιάζει με ένα κύκλωμα συντονιστή που λειτουργεί σε συγκεκριμένη συχνότητα προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά ισχύος ανάμεσα στην κεραία και στον πολλαπλασιαστή.

Το κύριο στοιχείο του πολλαπλασιαστή τάσης είναι η διόδος του κυκλώματος ανόρθωσης που μετατρέπει τα σήματα RF σε συνεχή τάση. Γενικά η μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής μπορεί να επιτευχθεί από διόδους με χαμηλότερες τάσεις. Ο πυκνωτής διασφαλίζει τη μεταφορά ισχύος ενώ όταν η ενέργεια της ραδιοσυχνότητας δεν είναι διαθέσιμη λειτουργεί και ως αποθήκη ενέργειας για μικρό χρονικό διάστημα (Varshney, 2008).

Στην λήψη ενέργειας εντός της ζώνης ραδιοσυχνοτήτων ο κόμβος του δικτύου λαμβάνει ενέργεια από την ίδια ζώνη συχνότητας από την οποία μεταδίδεται η πληροφορία. Από την άλλη στην εξωτερική ζώνη ενέργειας της ραδιοσυχνότητας ο κόμβος του δικτύου καταναλώνει ενέργεια της ραδιοσυχνότητας από τις διάφορες ζώνες συχνότητας που χρησιμοποιούνται και για την μετάδοση της πληροφορίας. Με δεδομένο ότι τα σήματα RF μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια όπως και πληροφορίες η κατανάλωση της ενέργειας και η λήψη της πληροφορίας μπορεί να αποδωθεί από το ίδιο σήμα εισόδου ραδιοσυχνότητας. Αυτό

αναφέρεται τόσο στην μεταφορά της ασύρματης πληροφορίας όσο και στη μετάδοση ισχύος ((Varshney, 2008).

Η ενέργεια που καταναλώνεται από ένα δίκτυο ραδιοσυχνότητας εξαρτάται από τη μεταδιδόμενη ισχύ, το μήκος κύματος του σήματος RF και την απόσταση ανάμεσα στην πηγή παραγωγής ενέργειας και στον κόμβο κατανάλωσης. Η κατανάλωση ενέργειας της ραδιοσυχνότητας χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία (H. J. Visser, and R. J. Vullers, 2013):

- Οι πηγές ραδιοσυχνότητας αποδίδουν ελεγχόμενη και σταθερή μεταφορά ενέργειας σε απόσταση από τους καταναλωτές.
- Η κατανάλωση ενέργειας ραδιοσυχνότητας είναι ιδανική για κινητά τηλέφωνα.
- Δεδομένου ότι η ποσότητα της καταναλισκώμενης ενέργειας εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή παραγωγής ραδιοσυχνότητας, οι κόμβοι του δικτύου στις διάφορες τοποθεσίες μπορούν να διαφέρουν ως προς την ενέργεια που καταναλώνουν.

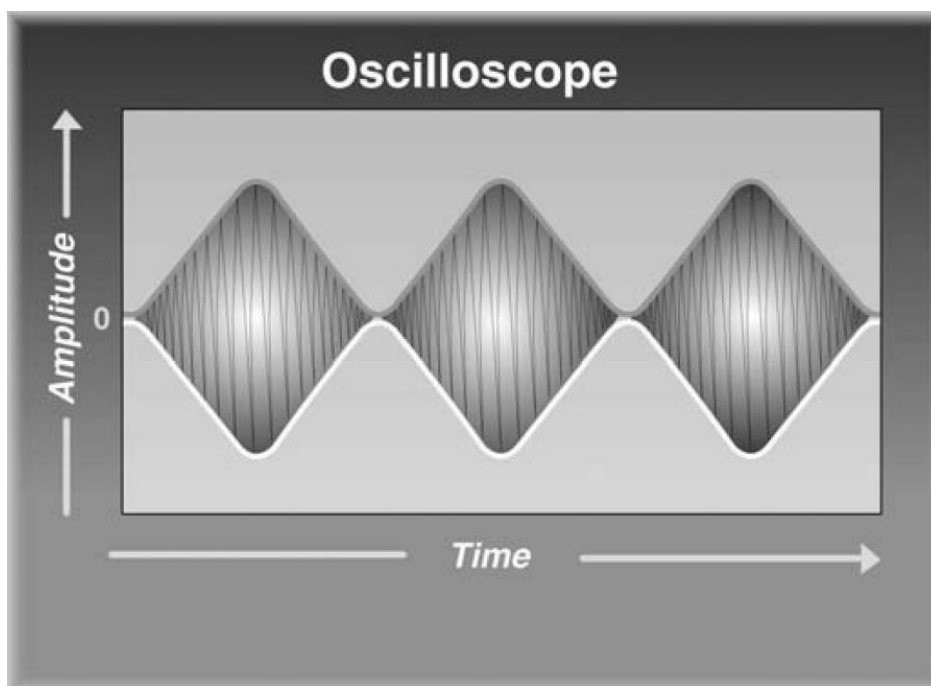
Οι πηγές ραδιοσυχνότητας διακρίνονται σε δύο είδη τις ειδικές ραδιοσυχνότητες και τις ατμοσφαιρικές ραδιοσυχνότητες. Ειδικές πηγές ραδιοσυχνότητας μπορεί να αποδώσουν ενέργεια στους κόμβους δικτύου ότανβ απαιτείται περισσότερη ενέργεια. Οι ατμοσφαιρικές πηγές ραδιοσυχνότητας είναι οι μεταδότες εκείνοι που δεν προορίζονται για τη μεταφορά ενέργειας. Αυτή η ενέργεια ραδιοσυχνότητας είναι συνήθως ελεύθερη. Οι ατμοσφαιρικές πηγές ραδιοσυχνότητας μπορεί να είναι στατικές ή δυναμικές (S. Lee, R. Zhang, and K. Huang, 2013).

### **2.3.1 Πλάτος διαμόρφωσης της ραδιοσυχνότητας**

Η διαμόρφωση είναι η διαδικασία εκείνη με την οποία μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του σήματος του φορέα ανάλογα με την στιγμιαία τιμή του σήματος της πληροφορίας. Οι τρεις παράμετροι ενός ημιτονοειδούς σήματος είναι το πλάτος, η φάση του και η συχνότητα του. Το διαμορφωμένο σήμα προκύπτει από τη διαμόρφωση καθεμιάς από τις παραπάνω παραμέτρους ανάλογα προς το σήμα της πληροφορίας ([http://www.pa2old.nl/files/am\\_fundamentals.pdf](http://www.pa2old.nl/files/am_fundamentals.pdf)).



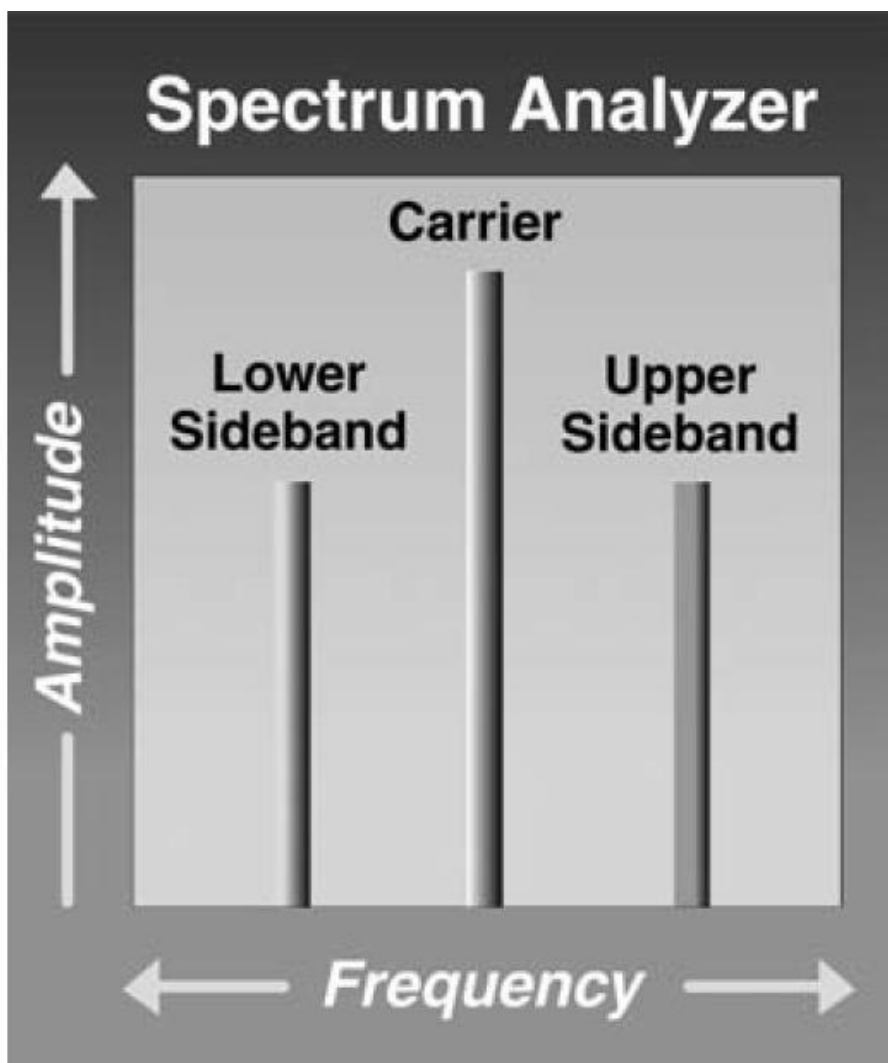
Σήμερα οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι για τις ραδιοεπικοινωνίες περιλαμβάνουν το πλάτος διαμόρφωσης (Amplitude Modulation, AM) που μεταβάλλει την ισχύ του φορέα ανάλογα με τις αλλαγές της πυκνότητας μιας πηγής όπως για παράδειγμα μπορεί να είναι η ανθρώπινη φωνή. Με άλλα λόγια οι μεταφερόμενες πληροφορίες περιέχονται στη μεταβολή του πλάτους (McCune,E.W, Sander,W 1999).



**Σχήμα 2.7:** Πλάτος διαμόρφωσης (Harris Corporation, 1996)

Η μέθοδος του πλάτους διαμόρφωσης δημιουργεί έναν φορέα και ένα ζεύγος διπλών πλευρικών ζωνών με συχνότητες πάνω και κάτω από τον φορέα. Οι διπλές πλευρικές ζώνες δημιουργούνται όποτε διαμορφώνεται ο φορέας του σήματος από το σήμα πληροφοριών σε διαφορετικές συχνότητες.

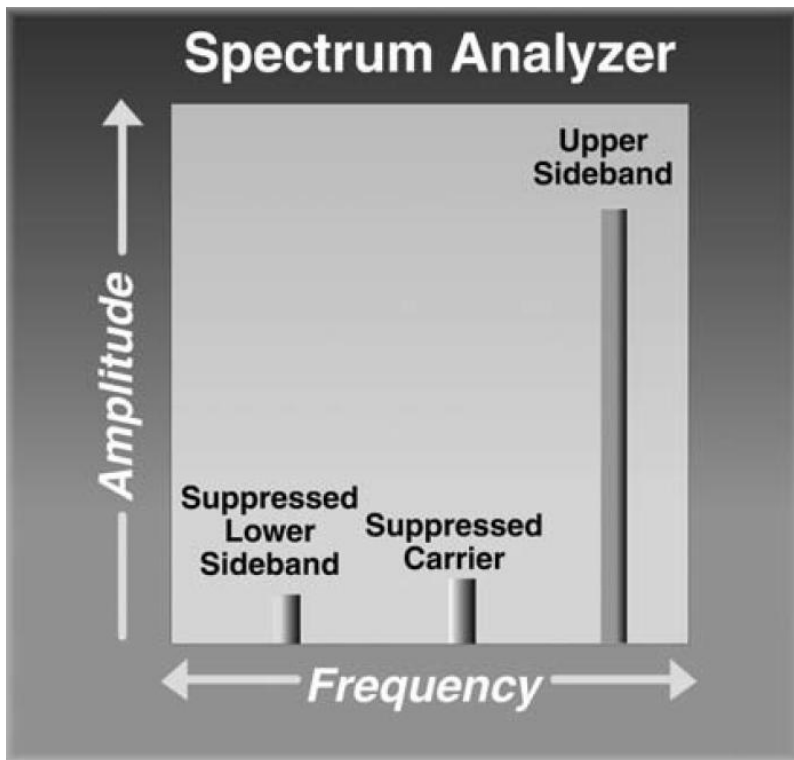
Το πλάτος διαμόρφωσης αποτελεί μια όχι και τόσο ικανοποιητική μορφή διαμόρφωσης δεδομένου ότι ο φορέας πρέπει να παράγεται συνεχώς. Η κύρια ισχύς ενός σήματος πλάτους διαμόρφωσης καταναλώνεται από το φορέα που δεν μεταφέρει πληροφορίες και το υπόλοιπο καταναλώνεται στις πλευρικές ζώνες που μεταφέρουν τις πληροφορίες (Harris Corporation, 1996).



**Σχήμα 2.8:** Πλευρικές ζώνες πλάτους διαμόρφωσης (Harris Corporation, 1996).

Σύμφωνα με μια άλλη τεχνική είναι δυνατόν η μονή πλευρική ζώνη (single sideband SSB), ο φορέας και μια από τις πλευρικές ζώνες να συμπιέζονται και να μεταδίδεται η εναπομείνουσα πλευρική ζώνη η πάνω (USB) ή η κάτω (LSB). Ένα σήμα SSB απαιτεί μόνο τη μισή ζώνη του διαμορφωμένου πλάτους ενός σήματος AM και παράγεται μόνο όταν υπάρχει διαμορφωμένο σήμα. Κατά συνέπεια τα SSB συστήματα είναι πιο αποτελεσματικά τόσο στη χρήση του φάσματος όσο και στη μετάδοση ισχύος. Όλη η μεταδιδόμενη ισχύς πάει στην πλευρική ζώνη που μεταφέρει την πληροφορία. Επιπλέον επειδή τα SSB σήματα απαιτούν μικρότερο εύρος ζώνης ο θόρυβος του σήματος είναι κατά πολύ μικρότερος. Τα σήματα SSB εξασθενούν επιλεκτικά σε μακρές αποστάσεις. Το σήμα AM είναι πολλαπλό σήμα που προκύπτει από τουλάχιστον έναν φορέα και δύο πλευρικές ζώνες που βρίσκονται σε διαφορετικές συχνότητες με αποτέλεσμα να επηρεάζονται

διαφορετικά από την ιονόσφαιρα και την ανώτερη ατμόσφαιρα ενώ η επίδραση που έχουν στα ραδιοσηματα είναι μικρότερη των 50MHz.



**Σχήμα 2.9:** Διαμόρφωση μονής πλευρικής ζώνης (Harris Corporation, 1996).

Εναλλακτική μορφή του πλάτους διαμόρφωσης είναι το ισοδύναμο πλάτος διαμόρφωσης (Amplitude Modulation Equivalent (AME) στο οποίο ο φορέας σε ένα χαμηλότερο επίπεδο μεταδίδεται με την πλευρική ζώνη. Στο ισοδύναμο πλάτος διαμόρφωσης η ανίχνευση του σήματος μπορεί να γίνει με ένα σχετικά απλό δέκτη.

Τα σήματα SSB όταν δεν υπάρχουν σήματα πληροφορίας ή διαμορφωμένα σήματα δεν μεταφέρουν ούτε σήματα ραδιοσυχνότητας. Σε έναν τυπικό πομπό σημάτων AM ο φορέας μεταφέρεται ανεξάρτητα από το αν είναι διαμορφωμένος. Αντίθετα ένα σύστημα SSB όταν δεν υπάρχει φορέας μεταφερόμενος δεν δίνουν σήμα αν το σήμα πληροφορίας είναι μηδενικό.

Το βασικό μειονέκτημα των σημάτων SSB και DSB είναι ότι ανακτώνται δύσκολα ή αποδιαμορφώνονται στο δέκτη. Η αποδιαμόρφωση εξαρτάται από την παρουσία του φορέα. Αν ο φορέας δεν είναι παρών τότε πρέπει να αναγεννηθεί στο δέκτη και να επανέλθει στο σήμα. Η ανάκτηση του έξυπνου σήματος ανακτάται ικανοποιητικά όταν ο επανεισερχόμενος φορέας έχει την ίδια φάση και

συχνότητα με τον αρχικό φορέα. Όταν τα σήματα SSB χρησιμοποιούνται για μετάδοση φωνής ο επανεισερχόμενος φορέας μπορεί να μεταβάλλει τη συχνότητα και να ρυθμιστεί χειροκίνητα γεγονός που δεν είναι εφικτό για όλους τους τύπους των δεδομένων.

Στα συμβατικά σήματα AM η μεταδιδόμενη ισχύς κατανέμεται ανάμεσα στο φορέα και σε δύο πλευρικές ζώνες. Ο πομπός SSB δεν στέλνει φορέα και κατά συνέπεια η ισχύς του φορέα είναι μηδενική. Ένας πομπός σήματος SSB έχει την ίδια αποτελεσματικότητα επικοινωνίας με τη συμβατική μονάδα AM που δίνει μεγαλύτερη ισχύ. Η έξοδος του πομπού στα SSB εκφράζεται σε όρους μέγιστης αναπτυσσόμενης ισχύος (peak envelope power, PEP) που είναι η μέγιστη ισχύς που παράγεται στο μέγιστο πλάτος στο κανάλι φωνής και υπολογίζεται από τη σχέση  $P=V^2/R$ .

### 2.3.2 Συχνότητα διαμόρφωσης

Η χρήση της συχνότητας διαμόρφωσης (frequency modulation) είναι άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προσθήκη πληροφορίας σε ένα σήμα φορέα. Παρά το γεγονός πως το πλάτος διαμόρφωσης ήταν από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση του φορέα η χρήση της συχνότητας διαμόρφωσης παρέχουν τη δυνατότητα διαθεσιμότητας σταθερών πηγών RF σε συνδυασμό με ένα ευρύ φάσμα συχνότητας. Ο ταλαντωτής σωλήνας κενού ήταν η πρώτη πηγή RF που χρησιμοποιήθηκε ως συχνότητα διαμόρφωσης. Οι ραδιοφωνικές εκπομπές FM ξεκίνησαν πριν από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο ως μέσο καλύτερων εκπομπών με καλύτερη ποιότητα ήχου. Οι πρώτοι ραδιοφωνικοί σταθμοί FM χρησιμοποιούσαν τη ζώνη των 42-50MHz για τη μετάδοση των σημάτων FM η οποία ζώνη θεωρούνταν ως εξαιρετικά υψηλή συχνότητα. Η ελαχιστοποίηση του πλάτους διαμόρφωσης επέτρεπε στο δέκτη να χρησιμοποιεί μεγάλο εύρος έτσι ώστε σκόπιμα να υπερφορτώνονται τα στάδια του ενισχυτή με αποτέλεσμα τον περιορισμό του πλάτους διαμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονταν σημαντικά ο θόρυβος AM και τα κυκλώματα ανίχνευσης σημάτων FM μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποβάλλονται τα σήματα AM σε μεγάλο βαθμό. Το γεγονός ότι οι ανθρώπινοι ήχοι στη φύση είναι ισχυροί και αποτελούνται από σήματα AM όπως επίσης και το γεγονός πως τα φυσικά ατμοσφαιρικά στατικά επίπεδα ανιχνεύονται σε συχνότητες μικρότερες των

42MHz κατέστησαν τη μέθοδο της συχνότητας διαμόρφωσης ιδιαίτερα δημοφιλή. Επιπλέον με τη συγκεκριμένο μέθοδο είναι δυνατή η μετάδοση σε μεγαλύτερη ζώνη ραδιοσυχνότητας αφού σε μεγαλύτερα εύρη φάσματος επιτρέπονταν η εκπομπή μεγαλύτερων σημάτων.

Ένα σήμα FM μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σήμα RF που διαμορφώνεται με τη μεταβολή της συχνότητας του σήματος σύμφωνα με τη διαμόρφωση. Με δεδομένο ότι η συχνότητα μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο και οι κύκλοι ορίζονται ως ο αριθμός των στιγμών όπου ένα ημιτονοειδές κύμα κάνει έναν πλήρη κύκλο, η συχνότητα ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της φάσης ενός ημιτονοειδούς κύματος ανά μονάδα χρόνου. Αντίστοιχα η μεταβολή της συνολικής φάσης σε μια χρονική περίοδο ισούται με την συχνότητα πολλαπλασιασμένη με το χρόνο (Sheet and Graf). Κατά συνέπεια η συχνότητα διαμόρφωσης είναι άμεσα συνειφασμένη με τη φάση διαμόρφωσης η οποία είναι η διαμόρφωση εκείνη στην οποία η φάση του φορέα κύματος μεταβάλλεται ανάλογα με το σήμα διαμόρφωσης. Παρόλα αυτά η μεταβολή της φάσης του σήματος συνοδεύεται από στιγμιαία μεταβολή της συχνότητας.

Η απόκλιση ενός FM σήματος είναι το στοιχείο μεταβολής στη συχνότητα του φορέα η οποία παράγεται από το διαμορφωμένο σήμα. Γενικά η συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος δεν είναι η ίδια και δεν σχετίζεται υποχρεωτικά με την απόκλιση. Οι πιθανές αποκλίσεις που μπορεί να υπάρχουν είναι πολλών ειδών. Σε αντίθεση με τον πομπό AM που έχει καθορισμένα φυσικά όρια στη διαμόρφωση ο πομπός FM δεν υπόκειται σε περιορισμούς. Το όριο της διαμόρφωσης σε αυτήν την περίπτωση τίθεται ως η τιμή εκείνη που οδηγεί σε μη γραμμική διαμόρφωση ή αλλιώς ως η απόκλιση της συχνότητας που μπορεί να δεκτεί ο δέκτης FM πριν παραμορφωθεί το σήμα (Sheet & Graf). Αυτό σχετίζεται με τη ραδιοφωνική ζώνη εκπομπής του δέκτη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΟΠΤΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ

Οι επικοινωνίες που βασίζονται στην τεχνολογία οπτικής ζεύξης ελεύθερου χώρου αποτελούν μια από τις πιο ραγδαία εξελίξιμες τεχνολογίες στις μέρες μας. Αυτός ο τύπος ασύρματης τεχνολογίας χρησιμοποιεί ευρείες δέσμες για τη μετάδοση των δεδομένων από το ένα σημείο στο άλλο. Η καθαρή οπτική επαφή για την μετάδοση και τη λήψη αποτελεί βασικό στοιχείο για την απρόσκοπτη επικοινωνία. Αυτή η οπτική επαφή προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων στους χρήστες των τηλεπικοινωνιών και στους παροχούς. Τα συγκεκριμένα συστήματα παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων έως και αρκετά Gbps, έχουν μηδαμινές παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων, δεν απαιτείται αδειοδότηση, παρέχουν μια ασφαλή σύνδεση επικοινωνίας λόγω της χρήσης μια πολύ στενής γωνίας δέσμης και επιπλέον προσφέρουν μια φθηνή, γρήγορη και εύκολη ανάπτυξη συγκριτικά με την εγκατάσταση οπτικών ινών (Prokes and Skorpil, 2009).

Η τεχνολογία των FSO προτιμάται όταν δεν είναι εφικτή η φυσική σύνδεση και απαιτείται η διαχείριση μεγάλου εύρους ζώνης. Επιπλέον ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη συγκεκριμένη τεχνολογία προσελκύει το γεγονός ότι απαιτούν μικρό κόστος εγκατάστασης και σε συνδυασμό με το μεγάλο βαθμό προστασίας και ασφάλειας των δεδομένων που παρέχουν καθώς και της ευελιξίας τους και για αυτό προτιμούνται για πλήθος εφαρμογών.

Εκτός από το ενδιαφέρον που προσελκύουν για υπόγειες και διαστημικές εφαρμογές τα επίγεια FSO έχουν μεγάλη σημασία και η απόδοση των συγκεκριμένων συστημάτων είναι συνάρτηση των διαφορετικών καιρικών συνθηκών. Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας επηρεάζουν την απόσταση και την διαθεσιμότητα των ασύρματων οπτικών συνδέσμων με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η χρήση τους σε όλες τις γεωγραφικές ζώνες. Συνδέσεις της τάξης των 7km μπορούν να λειτουργούν αλλά πριν την εγκατάστασή τους πρέπει να εκτιμούνται οι μέσες καιρικές συνθήκες έτσι ώστε να προσδιορίζεται ο χρόνος διακοπής της σύνδεσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Η διακοπή εξαρτάται από το μήκος σύνδεσης και την επιμονή των αντίξωων καιρικών συνθηκών. Κατά

συνέπεια οι αρκετά μικρές συνδέσεις της τάξης των εκατοντάδων μέτρων είναι εφικτό να λειτουργούν και στις πιο αντίξοες καιρικές συνθήκες (Wells, 2009).

### 3.1 Η ιστορία των FSO

Η χρήση μηχανικών συστημάτων για την ολοκλήρωση ασύρματων οπτικών συστημάτων αποδίδεται στον Charpe και χρονολογείται από το 1792 (Huurdeeman, 2003). Ο Charpe θεωρείται ως ο εφευρέτης του «οπτικού τηλέγραφου» στη Γαλλία. Το σύστημα βασιζόταν σε ένα ρυθμιστή με μήκος 4,5m και 0,35m πλάτος στον οποίο εφάπτονταν δύο δείκτες. Τα συστήματα αυτά τοποθετήθηκαν σε σταθμούς στη γραμμή της περιοχής στα 9 km ο καθένας. Τα τηλεσκόπια και οι ανθρώπινοι επαναλήπτες ήταν αναγκαίοι για τη μετακίνηση του ρυθμιστή και των δεικτών μέσω τριών στροφάλων και συρματοσχοίνων. Ο χρόνος χρήσης ήταν μικρός επειδή το σύστημα μπορούσε να δουλεύει μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και για καλές καιρικές συνθήκες. Από την άλλη κάλυπτε μεγάλη απόσταση για τη Γαλλία, περίπου 4830 χιλιομέτρων, με 29 πόλεις να συνδέονται μέσω περίπου 540 πύργων. Η ασφάλεια διασφαλιζόταν με τη μετάδοση μυστικών κωδικών με βραχεία προοίμια που έδιναν την δυνατότητα κατανόησης της ακρίβειας μετάδοσης. Ο Charpe το 1795 εισήγαγε έναν ειδικό κώδικα για να αυξήσει την ταχύτητα μετάδοσης. Το συγκεκριμένο σύστημα βοήθησε στη μείωση του χρόνου ανταλλαγής πληροφοριών από ημέρες σε λεπτά. Το σύστημα του Charpe άρχισε να εγκαταλείπεται το 1800 εξαιτίας της ανάπτυξης του ηλεκτρισμού και την εισαγωγή του ηλεκτρικού τηλέγραφου από τον Morse.

Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα ο Μπελ εισήγαγε το φωτόφωνο (Bona and Rudnicki, 2001). Το σύστημα του Μπελ δούλευε με τη χρήση των ηχητικών κυμάτων της φωνής να κινούνται σε έναν καθρέπτη και να στέλνουν παλμούς από το ανακλώμενο ηλιακό φως στις συσκευές λήψης. Ειδικότερα διαμόρφωσε τη φωνή του με τη χρήση ενός οπτικοακουστικού αισθητήρα και ένα φακό που συγκέντρωνε την ηλιακή δέσμη. Παρά το γεγονός πως η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν ήταν ποτέ εμπορική αποτέλεσε τη βασική αρχή των οπτικών τηλεπικοινωνιών.

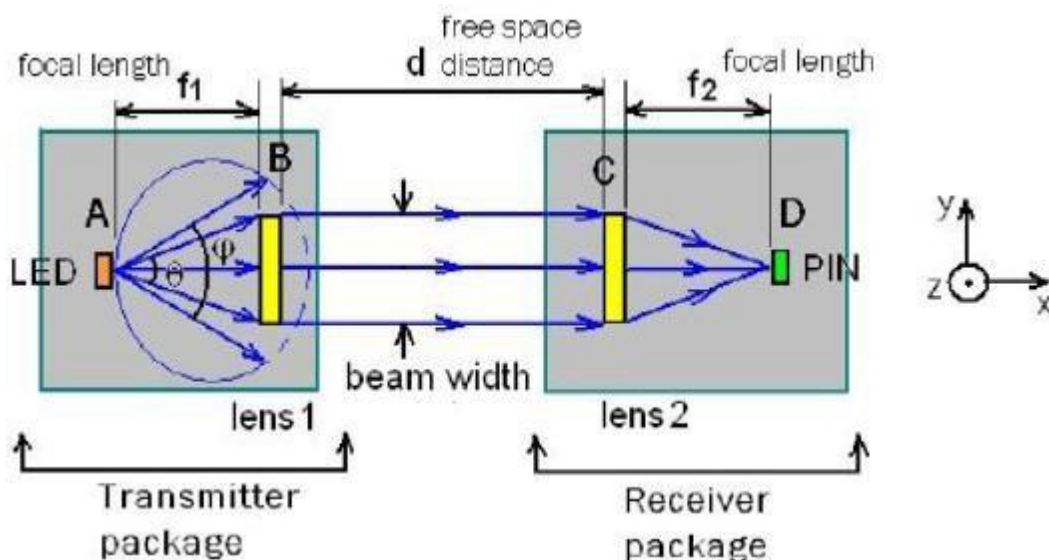
Από εκείνη την περίοδο και μετά οι ασύρματες οπτικές τηλεπικοινωνίες αναπτύχθηκαν ραγδαία σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι μελέτες σχετικά με τις ασύρματες οπτικές τηλεπικοινωνίες χωρίζονται σε τρεις περιόδους: τη δεκαετία του 60 που εισάγονται τα θέματα τα σχετικά με τα λέιζερ και εισάγεται για πρώτη

φορά η έννοια των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, τη δεκαετία του 90 όπου γίνεται πιο προσιτή η ιδέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών από το έδαφος στο δορυφόρο και το αντίστροφο χρησιμοποιώντας κόκκινες και πράσινες πηγές και στην περίοδο μετά το 2000 όπου οι οπτικές τεχνολογίες ελεύθερου χώρου (FSO) εφαρμόζονται σε πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές και χρησιμοποιούν διαφορετικά μήκη κύματος από 1 μέχρι 10 μικρά.

### 3.3 Βασικές αρχές των οπτικά ασύρματων τηλεπικοινωνιών

Τα συστήματα FSO βασίζονται στη χρήση μιας άμεσα κατευθυνόμενης δέσμης φωτός ανάμεσα σε δύο άκρα για τη μεταφορά πληροφοριών / μηνυμάτων δηλαδή δεδομένων, ήχου ή βίντεο. Αυτό είναι παράλληλο προς τα δίκτυα ενσύρματων οπτικών ινών εκτός από τους φωτεινούς παλμούς που μεταφέρονται μέσω του αέρα ως υποκατάστατο των πυρήνων των δικτύων οπτικών ινών. Μια μονάδα FSO αποτελείται από έναν οπτικό πομποδέκτη με ένα πομπό λέιζερ και έναν δέκτη με αμφίδρομη ικανότητα (Gurta, Bhanawat, 2010).

Κάθε μονάδα FSO χρησιμοποιεί μια μεγάλης ισχύος, στενού πλάτους οπτική πηγή μαζί με ένα φακό που μεταδίδει το φως μέσω του αέρα σε έναν άλλο φακό που λειτουργεί ως δέκτης. Ο φακός λήψης συνδέεται με έναν δέκτη μεγάλης ευαισθησίας μέσω οπτικών ινών. Οι μονάδες FSO πετυχαίνουν οπτική συνδεσιμότητα σε μέγιστη απόδοση 6km.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρία της οπτικής σύνδεσης



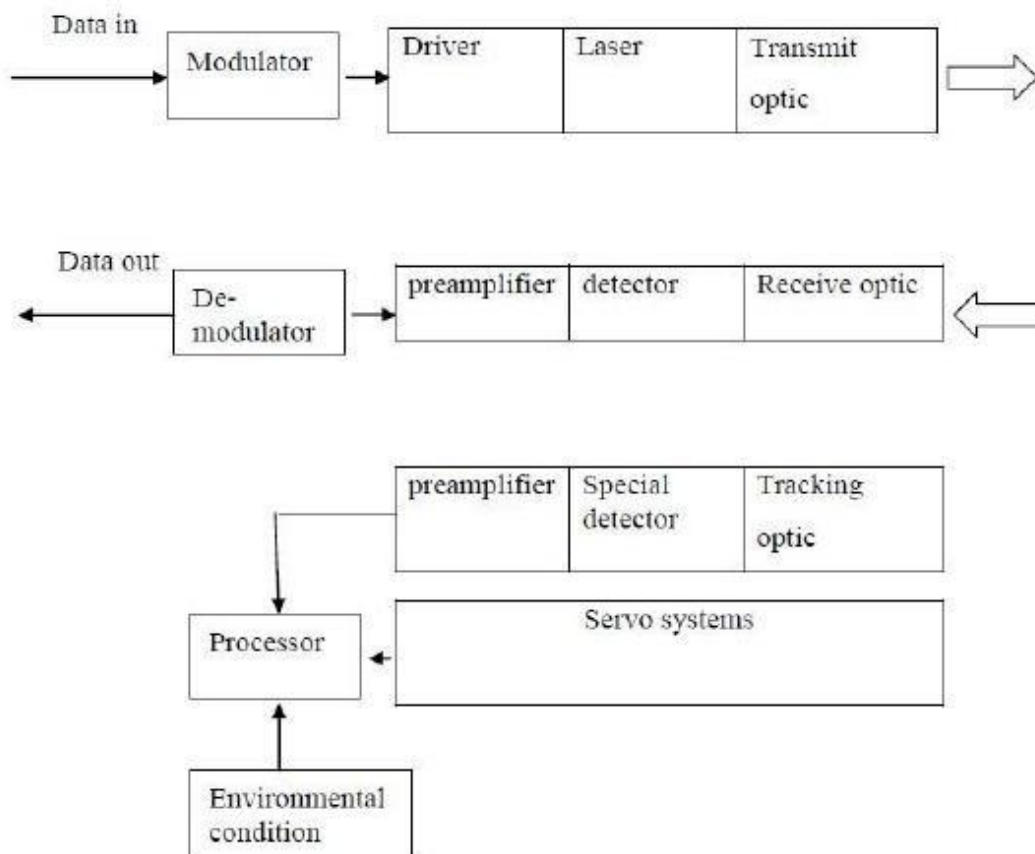
Τα οπτικά συστήματα λειτουργούν στο υπέρυθρο ή στο σχεδόν υπέρυθρο φάσμα του φωτός και ο καλύτερος τρόπος για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους είναι να συνδεθούν δύο σημεία με ένα καλώδιο οπτικής ίνας και στη συνέχεια να αφαιρεθεί το καλώδιο. Ο υπέρυθρος φορέας που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του σήματος προκαλείται από ένα LED υψηλής ισχύος ή μια δίοδο laser. Δύο παράλληλες ράβδοι χρησιμοποιούνται η μία για τη μετάδοση και η άλλη για τη λήψη του έργου λαμβάνοντας σταθερά σήματα δεδομένων ήχου ή βίντεο τα οποία μετατρέπουν σε ψηφιακή μορφή και τα μεταδίδουν μέσω της ατμόσφαιρας.

Τα σύγχρονα συστήματα λέιζερ προσφέρουν συνδεσιμότητα δικτύου σε ταχύτητα περίπου 600Mbits/sec. Οι ράβδοι συγκρατούνται πολύ κοντά έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι δεν επικαλύπτονται από άλλες FSO ράβδους. Οι ανιχνευτές λήψης είναι δίοδοι PIN ή φωτοδίοδοι. Τα FSO μεταδίδουν ανεπαίσθητες ασφαλή για την όραση ακτίνες φωτός από τον πομπό στο δέκτη με χαμηλή ισχύ και στο φάσμα των THz.

Κατά την μετάδοση τα δεδομένα στέλνονται στο διαμορφωτή για τη διαμόρφωση του σήματος και ο οδηγός στην αρχή είναι το λέιζερ. Στο τμήμα της λήψης το οπτικό σήμα λαμβάνεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ενώ χρησιμοποιείται και προενισχυτής για το σήμα εισόδου το οποίο ενισχύει και το στέλνει στον αποκωδικοποιητή για την αναπαραγωγή του αρχικού σήματος. Επιπλέον υπάρχει ένα σύστημα το οποίο καθορίζει τη διαδρομή της δέσμης ενώ υπάρχει και ειδικός ανιχνευτής για την ανίχνευση του σήματος που δόθηκε στον προενισχυτή.

Το σέρβο σύστημα χρησιμοποιείται για τον συνολικό έλεγχο του συστήματος. Το εισερχόμενο σήμα συγκρίνεται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και αν υπάρχει διαμόρφωση του σήματος τότε το σέρβο σύστημα χρησιμοποιείται για τον εξαναγκασμό του σήματος.

## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες



**Σχήμα 3.2:** Τα υποσυστήματα ενός FSO συστήματος.

Οι συνδέσεις FSO μεταφέρουν πληροφορίες με ακτίνες λέιζερ μέσω ενός ατμοσφαιρικού καναλιού. Στηριζόμενα στο υπέρυθρο φως αυτά τα συστήματα επικοινωνιών είναι απαθή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές τις εμπλοκές ή την υποκλοπή τηλεφωνικών διαλέξεων. Επιπλέον, δεν δημιουργούν τα ίδια ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και λειτουργούν σε συχνότητες (~300THz) στις οποίες το φάσμα δεν απαιτεί άδεια. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι πως τα FSO μαζί με τον εξοπλισμό ινών μπορούν να συνδυαστούν χωρίς ενδιάμεση μετατροπή δεδομένου ότι τόσο ο αέρας όσο και το υλικό των καλωδίων ινών έχουν καλή μεταδοτικότητα στα εγκατεστημένα μήκη κύματος που είναι από 850-1550nm (Leitgeb, Gebhart, Birnbacher, Kogler, and Schrotter 2004).

Τα συστήματα FSO/ οπτικές ίνες σήμερα αποτελούν μια πολύ δημοφιλή επιλογή αφού δίνουν λύσεις για την αναζωογόνηση σήματος τη μετάδοση και την λήψη χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη ενδιάμεσου ηλεκτρικού σήματος. Τα FSO μπορούν να εγκατασταθούν πιο γρήγορα και με μικρότερο κόστος σε σχέση με τα

ασύρματα ραδιοφωνικά γεγονός που τα καθιστά πιο ελκυστικά για βραχυπρόθεσμες εγκαταστάσεις για μεμονωμένα γεγονότα, στρατιωτικούς σκοπούς και αποκατάσταση ζημιών. Κατά συνέπεια υπάρχει πλήθος εμπορικά διαθέσιμου εξοπλισμού FSO για τη διασύνδεση με τα τυποποιημένα στοιχεία Ethernet.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί απαίτηση για την απρόσκοπτη λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων είναι η ανεμπόδιστη διαδρομή του φωτός ειδικά σε μακρινές αποστάσεις. Παρόλα αυτά το σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι επηρεάζονται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα η ομίχλη δημιουργεί σοβαρή εξασθένηση της δέσμης λέιζερ και την επακόλουθη ολική απώλεια σύνδεσης. Ακόμα και η μέτρια ηπειρωτική ομίχλη μπορεί να οδηγήσει σε εξασθένηση των 130dB/km ενώ η πυκνή θαλάσσια ομίχλη μπορεί να εξηγήσει εξασθένηση ως 480dB/km (E. Leitgeb et al., 2006).

Η ασθενής βροχή έχει μικρή επίδραση στη διαθεσιμότητα των συστημάτων FSO αλλά αυτές οι επιδράσεις εξαρτώνται από το ρυθμό βροχόπτωσης  $R$  και μάλιστα με εκθετικό βαθμό (Carbonneau and Wisley, 1998).

Ένα άλλο φαινόμενο που επηρεάζει τις συνδέσεις επικοινωνίας FSO σχετίζεται με τους σπινθήρες και τις αναταράξεις του αέρα. Τα κελιά αέρα με διαφορετικές θερμοκρασίες κατανέμονται τυχαία κατά μήκος της σύνδεσης προκαλούν εστίαση και αποεστίαση εξαιτίας των μεταβολών στο διαθλαστικό δείκτη. Το πλάτος και η συχνότητα αυτών των διαταράξεων εξαρτάται από το μέγεθος των κελιών συγκριτικά με τη διάμετρο της οπτικής δέσμης (Motlagh, V. Ahmadi, Z. Ghassemloooy, and K. Abedi 2008).

Άλλα προβλήματα που επηρεάζουν την ορατότητα σχετίζονται με τη δέσμη που χρησιμοποιούν τα FSO συστήματα δεδομένου ότι οποιοσδήποτε εξωτερικός παράγοντας όπως η άμμος, η σκόνη τα πουλιά που παρεμποδίζουν τη δέσμη προκαλούν στιγμιαίες απώλειες σύνδεσης ενώ η παρεμπόδιση λόγω πύργων ή θερμικών επιδράσεων μπορεί να ελεγχθεί από συστήματα αυτόματης παρακολούθησης (Wells, 2009).

Ο ήλιος από μόνος του λειτουργεί ως πηγή θορύβου που μπορεί να υπεροδηγεί πλήρως του δέκτες αν αυτοί εκτείθονται πλήρως στην ηλιακή ακτινοβολία. Το λέρωμα και η γήρανση των στοιχείων ειδικά των φακών και των καθρεπτών συμπληρώνουν τη λίστα των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των συνδέσεων FSO. Οι περισσότερες από αυτές τις επιδράσεις ξεπερνιούνται είτε

δίνοντας ένα εύρος στην κάθε σύνδεση είτε δημιουργώντας ένα σύνθετο σύστημα. Η ομίχλη από την άλλη είναι η μόνη συνθήκη που παραμένει επιβλαβής για τη διαθεσιμότητα καθιστώντας τη διαθεσιμότητα του φορέα για τα FSO συστήματα αμφισβητήσιμη (W. Kogler, P. Schrotter, U. Birnbacher, E. Leitgeb, and O. Koudelka 2003).

### 3.3.1 Ανίχνευση της οπτικής ακτινοβολίας

Όταν τα μεταδιδόμενα οπτικά σήματα φτάνουν στο δέκτη μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά σήματα από φωτοανιχνευτές με κυριότερους τις φωτοδιόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στα οπτικά συστήματα τηλεπικοινωνιών εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους του προσιτού τους υλικού της ευαισθησίας τους και του γρήγορου χρόνου απόκρισης τους (G. Keiser, 2000). Οι δύο συνηθέστερες μορφές φωτοδίοδων είναι η φωτοδίοδος ακίδας (pin) και η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (APD) επειδή έχουν ικανοποιητική κβαντική απόδοση και κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά που είναι διαθέσιμα εμπορικά.

Η φωτοδίοδος ακίδας (pin) αποτελείται από δύο περιοχές p και n που διαχωρίζονται από μια περιοχή n ενισχυμένη ενδογενή περιοχή. Σε κανονική λειτουργία εφαρμόζεται μια ικανοποιητική τάση αναστροφής έτσι ώστε να απαλειφθεί πλήρως η ενδογενής περιοχή. Όταν ένα τυχαίο φωτόνιο έχει μεγαλύτερη ενέργεια από το κενό της ζώνης ενέργειας του υλικού το φωτόνιο δίνει την ενέργεια του και διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ζεύγων ηλεκτρονίων- οπών που ονομάζονται φωτοφορείς. Ο φωτοανιχνευτής ακίδας σχεδιάζεται έτσι ώστε αυτοί οι φορείς φωτός να παράγονται κυρίως στην απεμπλουτισμένη περιοχή όπου απορροφάται το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας. Το μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει σε αυτήν την περιοχή προκαλεί τους φορείς των φωτονίων να διαχωριστούν και να συλληχτούν κατά μήκος της σύνδεσης αναστροφής τάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή ρεύματος σε ένα εξωτερικό κύκλωμα με ένα ηλεκτρόνιο να ρέει για κάθε παραγόμενο φορέα φωτονίου (fourier.eng).

Ο ανιχνευτής APD πολλαπλασιάζει εσωτερικά το αρχικό σήμα του φωτορεύματος πριν εισέλθει στο κύκλωμα εισόδου του ενισχυτή που ακολουθεί. Αυτό αυξάνει την ευαισθησία του δέκτη ενώ το φωτορεύμα πολλαπλασιάζεται

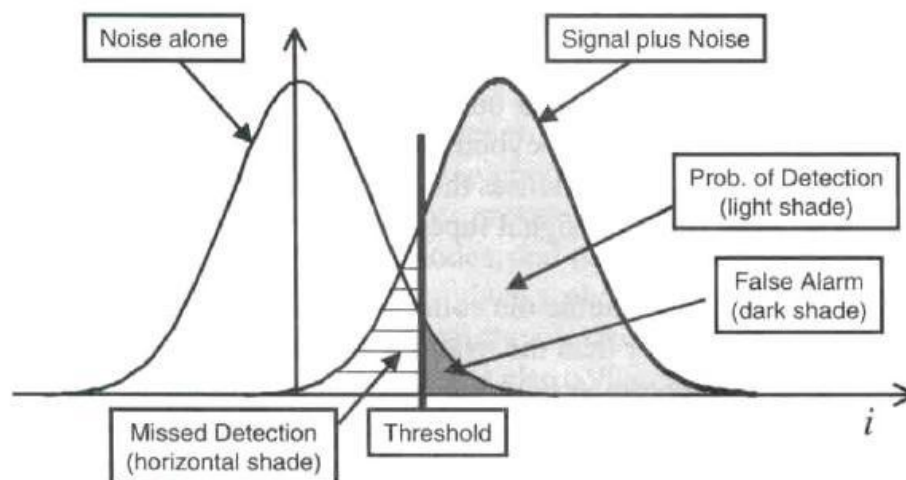
πριν να συμπεριληφθεί ο θερμικός θόρυβος που σχετίζεται με το κύκλωμα του δέκτη. Σε αυτήν την δομή οι φωτοφορείς δημιουργούνται αρχικά στο φωτεινό  $p$ -ενισχυμένο ενδογενές πεδίο που ονομάζεται στρώμα  $p$  επειδή η σύνδεση  $p$ - $n$  είναι πολύ λεπτή. Όταν υπάρχει ικανοποιητική τάση κατά μήκος του στρώματος  $p$  οι φωτοφορείς υποβαθμίζονται σημαντικά σε αυτό. Κατά συνέπεια στην  $p$ - $n$  σύνδεση κοντά στο θετικό ηλεκτρόδιο δημιουργείται μια μεγάλη βαθμίδα πεδίου και πραγματοποιείται ικανοποιητικός πολλαπλασιασμός στη μορφή στοιβάδας (Keiser 2000).

### 3.3.2 Ρυθμοί σφάλματος bit στις συνδέσεις FSO

Ο ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate, BER) εξαρτάται από τη μέση λαμβανόμενη ισχύ, το σπινθήρα στο άνοιγμα και το θόρυβο του δέκτη. Επιπλέον εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο απόφασης που τίθεται στο δέκτη. Η ατμόσφαιρα κυμαίνεται σχετικά αργά και πρακτικά δεν υπάρχουν χρονικές κλίμακες μεγαλύτερες του 1ms. Κατά συνέπεια, σε μεγάλους ρυθμούς δεδομένων μεγάλος αριθμός bit μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού που είναι σε «ψυχρή» κατάσταση αλλά τα χαρακτηριστικά των καναλιών για τις επιτυχείς ομάδες bits το κανάλι μεταβάλλεται αργά. Κατά συνέπεια το BER μεταβάλλεται σταθερά εξαιτίας των διακυμάνσεων που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική διαταραχή.

Όταν δεν υπάρχει διαταραχή το BER υπολογίζεται θεωρώντας τα σφάλματα που προκαλούνται από το θόρυβο στο δέκτη. Όταν υπάρχει διαταραχή υπάρχει ένας επιπλέον παράγοντας που χρειάζεται να προστεθεί στο θόρυβο για τον υπολογισμό του BER ο οποίος προέρχεται από τις διακυμάνσεις της πυκνότητας που προκαλεί η αναταραχή. Αυτές οι διακυμάνσεις είναι εμφανείς μόνο για τις λήψεις του 1 ενώ όταν λαμβάνεται το 0 δεν παράγεται σήμα.

Η ανίχνευση του σήματος γίνεται με διάφορες τεχνικές που βασίζονται στην ανίχνευση της οριακής τιμής. Μόνο όταν η έξοδος του ανιχνευτή ξεπερνάει την εκάστοτε οριακή τιμή θεωρείται πως υπάρχει σήμα. Στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι αυτός που ξεπερνάει την οριακή τιμή μπορεί να θεωρηθεί λαθεμένα ως σήμα. Από την άλλη αν το σήμα και ο θόρυβος δεν υπάρχουν στο θεωρούμενο όριο αυτό αποτελεί χαμένη ανίχνευση (Yuksel, H. 2005).



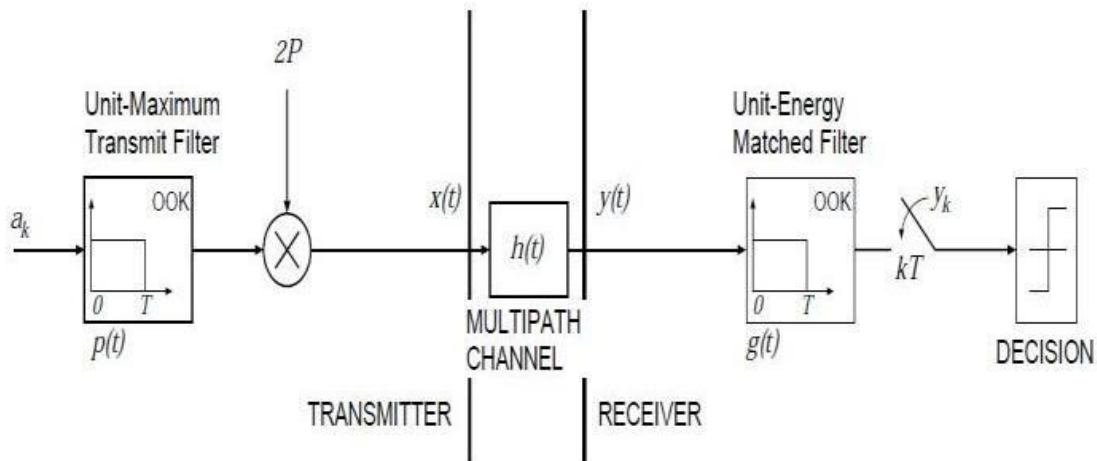
**Σχήμα 3.3:** Πιθανότητα ανίχνευσης και εσφαλμένου συναγερμού

### 3.4 Διαμόρφωση συστημάτων FSO

Για τα ασύρματα οπτικά συστήματα τηλεπικοινωνιών τα πιο συνηθισμένα συστήματα διαμόρφωσης είναι τα Διαμορφωμένης έντασης και άμεσης ανίχνευσης (Intensity Modulated Direct Detection, IM/DD). Στα ασύρματα οπτικά συστήματα η πυκνότητα μιας οπτικής πηγής διαμορφώνεται σε σήματα μετάδοσης. Για τη μετάδοση των ψηφιακών δεδομένων δεν υπάρχει πρακτική εναλλακτική προς τη ψηφιακή διαμόρφωση αφού αποδίδει πηγαία κωδικοποίηση (συμπύεση δεδομένων), κωδικοποίηση καναλιού (ανίχνευση/ διόρθωση σφάλματος) και εύκολη πολυπλεξία πολλαπλών ρευμάτων πληροφορίας (δυναμική κωδικοποίηση) ή σε βάση λεκτικών bit (κωδικοποίηση ομάδων).

#### 3.4.1 Διαμόρφωση ενεργοποίησης/ απενεργοποίησης Κλειδώματος (on off keying (OKK) modulation)

Η ενεργοποίηση / απενεργοποίηση του κλειδώματος είναι μια απλή και πολύ χρήσιμη ψηφιακή μορφή διαμόρφωσης που θεωρεί τα ψηφιακά δεδομένα ως τον πιο απλό δυαδικό συνδυασμό του 1 και του 0 ενός φορέα κύματος. Στην απλούστερη μορφή του η παρουσία ή η ύπαρξη του φορέα για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια αναπαριστά ένα δυαδικό ενώ η απουσία ή η μη ύπαρξη για την ίδια χρονική διάρκεια αναπαριστά ένα δυαδικό μηδέν.

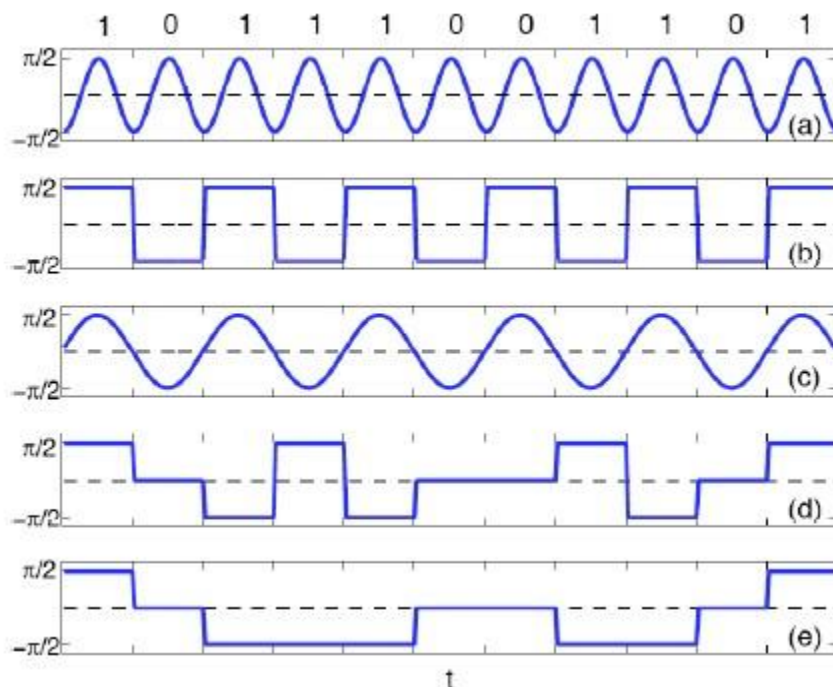


**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα ροής της διαμόρφωσης ενεργοποίηση / απενεργοποίηση του κλειδώματος (ΟΚΚ).

Στη μετάδοση των δεδομένων με ΟΚΚ η μεταφορά πραγματοποιείται από την πυκνότητα του σήματος. Η φάση του σήματος είναι κατά συνέπεια ένας επιπλέον βαθμός ελευθερίας. Διάφοροι τρόποι συνδυασμού διαμόρφωσης φάσης με ΟΚΚ έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια. Η επιστροφή στο μηδέν με μεταβαλλόμενη συχνότητα (chirped return to zero, CRZ) για παράδειγμα παράγεται από μια συγχρονισμένη με bit ημιτονοειδή φάση του σήματος επιστροφής στο μηδέν δίνοντας στους παλμούς που αυξάνονται μη γραμμικά, αντοχή σε μετάδοση με στενό παλμό (I. Morita, et al., 1997). Την επιστροφή στο μηδέν με την καταστολή του φορέα (carrier-suppressed return-to-zero, CSRZ) στα διαδοχικά τμήματα bit δίνεται μια μετατόπιση φάσης  $\pi$  η οποία είναι καλύτερη από την αντίστοιχη μετατόπιση επιστροφής στο μηδέν (Miyamoto, et al, 1999). Αυτό εν μέρει οφείλεται στο σήμα του στενότερου φάσματος και η προκύπτουσα υψηλότερη ανοχή διασποράς και εν μέρει με την καταστρεπτική παρεμβολή μεταξύ των παλμών και τις ουρές των παλμών στις γειτονικές υποδοχές bit (M. Forzati, et al., 2006). Το CSRZ χαρακτηρίζεται από πομπό και δέκτη πολυπλοκότητας που είναι συγκρίσιμα με το RZ. Στην εναλλακτική στιγμιαίου ήχου επιστροφή στο μηδέν (ACSRZ) οι γειτονικοί παλμοί δίνουν ένα στιγμιαίο ήχο με αντίθετο πρόσημο μέσω του φιλτραρίσματος μιας φάσης διαμόρφωσης που οδηγεί σε αύξηση της ανοχής ισχύος.

Στην εναλλακτική επιστροφή σήματος (Alternate-Mark Inversion, AMI) η φάση του σήματος είναι της μορφής  $\pi$  και μετατοπίζεται για κάθε συνεχόμενο σήμα αντί για κάθε συνεχόμενο bit και το πάχος του παλμού είναι πιο στενό από το αντίστοιχο στο CSRZ. Αυτό βελτιώνει τη μη γραμμική αντοχή (X. Liu, et al., 2002).

Στο οπτικό διπλό δυαδικό σήμα ή στη δυαδική μετάδοση μετατόπισης φάσης (PSBT) η φάση του σήματος δίνει μια  $\pi$  μετατόπιση με βάση το προηγούμενο σήμα αν ανάμεσα τους υπάρχει ένας μονός αριθμός μηδενικών γεγονόσ που αυξάνει την αντοχή της χρωματικής διασποράς. Η διαμόρφωση φάσης επίσης έχει προταθεί για την αντιστάθμιση της διασποράς τρίτης τάξης στους υπερβραχείς παλμούς (M. D. Pelusi, et al., 1998).



**Σχήμα 3.4:** Φάση σήματος για την σειρά δεδομένων [1 0 1 1 1 0 0 1 1 0 1] για πέντε διαφορετικές μορφές ΟΚΚ: α) CRZ, β) CSRZ, γ) ACRZ, δ) AMI, ε) PSBT.

Σε κάθε διαμόρφωση ΟΟΚ το 1 κωδικοποιείται ως παλμός ενώ το 0 ως παύλα. Για να περιοριστεί η πολυπλοκότητα του διαμορφωτή το σχήμα του παλμού θεωρείται ορθογωνικό. Ο ρυθμός των bit είναι  $R_b=1/T_b$  όπου  $T_b$  είναι η διάρκεια του bit και σχετίζεται με τον ρυθμό στον οποίο η πηγή μπορεί να ενεργοποιηθεί και να απενεργοποιηθεί (Zhang, J., 2000).

Το κανονικοποιημένο σχήμα του παλμού για μια διαμόρφωση ΟΚΚ είναι:

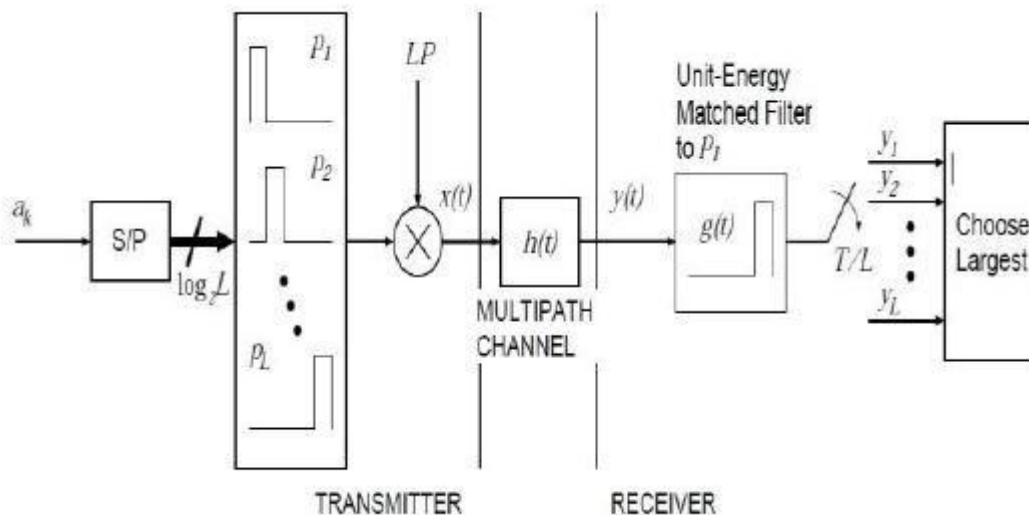


$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{για } t \in [0, T_b) \\ 0 & \text{για οπουδήποτε αλλού} \end{cases}$$

Για τον αποκωδικοποιητή ο παλμός του δέκτη ολοκληρώνεται σε μια περίοδο bit όταν γίνεται δειγματοληψία και συγκρίνεται με το όριο που αποφασίζεται να είναι ή το bit 1 ή το 0. Αυτό ονομάζεται μέγιστη πιθανότητα δέκτη που ελαχιστοποιεί το ρυθμό σφάλματος των bit (BER). Επειδή ο θόρυβος του ανιχνευτή τα σφάλματα που είναι πιθανόν να συμβούν στον καθορισμό των πραγματικών συμβόλων μεταδίδονται. Στη μετάδοση ΟΚΚ ο τυχαίος θόρυβος προσεγγίζεται με την κατανομή Gauss. Θεωρώντας ότι και τα δύο σύμβολα έχουν μοναδική διακύμανση θορύβου και έχουν ισοδύναμη πιθανότητα να μεταδοθούν το επίπεδο του ορίου τίθεται ίσο με τη μέση τιμή των ρευμάτων των συμβόλων.

### 3.4.2 Διαμόρφωση θέσης παλμού

Η διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse-position modulation, PPM) είναι ένας χρήσιμος τύπος διαμόρφωσης σήματος στον οποίο N πληροφορίες/ μηνύματα bits κωδικοποιούνται με την μετάδοση μόνο ενός απλού παλμού σε μια από τις πιθανές χρονικές μετατοπίσεις. Αυτή η μετάδοση επαναλαμβάνεται μετά από κάθε T sec και ο ρυθμός μετάδοσης των bit πραγματοποιείται σε N/T bits ανά sec. Εφαρμόζεται για τα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα όπου τείνουν να έχουν μικρή πολυζωνική παρεμβολή.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής της διαμόρφωσης θέσης παλμού

Στην κωδικοποίηση της ομάδας τα bit μεταδίδονται σε ομάδες αντί για ένα κάθε στιγμή. Η οπτική κωδικοποίηση ομάδων επιτυγχάνεται μετατρέποντας κάθε λέξη των  $i$  bit σε ένα  $L=2^i$  οπτικό πεδίο μετάδοσης. Ένα από τα πιο γνωστά σχήματα κωδικοποίησης ομάδων είναι το PPM στο οποίο μια εισερχόμενη λέξη μετατρέπεται σε μια θέση ενός ορθογωνίου παλμού μέσα σε ένα πλαίσιο. Το πλαίσιο με διάρκεια  $T_f$  διαιρείται σε  $L$  παύλες και μόνο μία από αυτές έχει ένα παλμό. Το σχήμα αυτό είναι γνωστό και ως  $L$  PPM. Το σχήμα του παλμού μετάδοσης είναι (Zang, J., 2000):

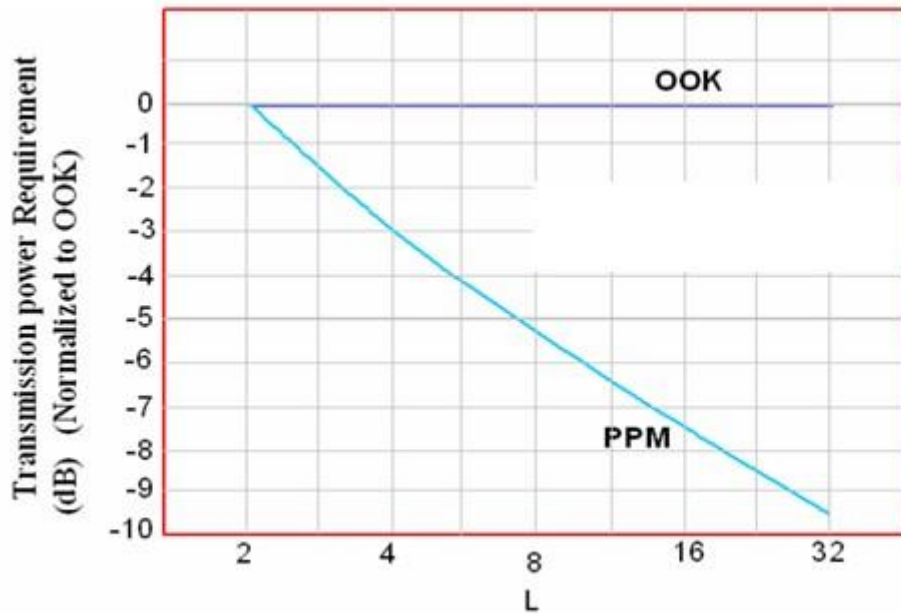
$$p = \begin{cases} 1 & \text{για } t \in [(m-1)T_f / L, mT_f / L] \\ 0 & \text{για οπουδήποτε αλλού} \end{cases}$$

Ο βέλτιστος δέκτης  $L$ -PPM αποτελείται από μια τράπεζα φίλτρων κάθε ένα από αυτά ολοκληρώνει το ρεύμα του φωτονίου σε διάστημα ενός παλμού. Ο αποκωδικοποιημένος παλμός λαμβάνεται από την υποδοχή που βρέθηκε στο πιο πρόσφατο επίπεδο. Αν η θέση του αποδιαμορφωμένου παλμού είναι η σωστή τα  $\log_2 L$  bit αποκωδικοποιούνται σωστά αλλιώς θεωρείται πως υπάρχουν  $L-1$  λαθεμένες θέσεις που μπορεί ισοδύναμα να συμβούν. Κατά συνέπεια τα σφάλματα των bit εμφανίζονται κατά ομάδες (Carlson, A.B., 1986)

### 3.4.3 Σύγκριση συστημάτων διαμόρφωσης

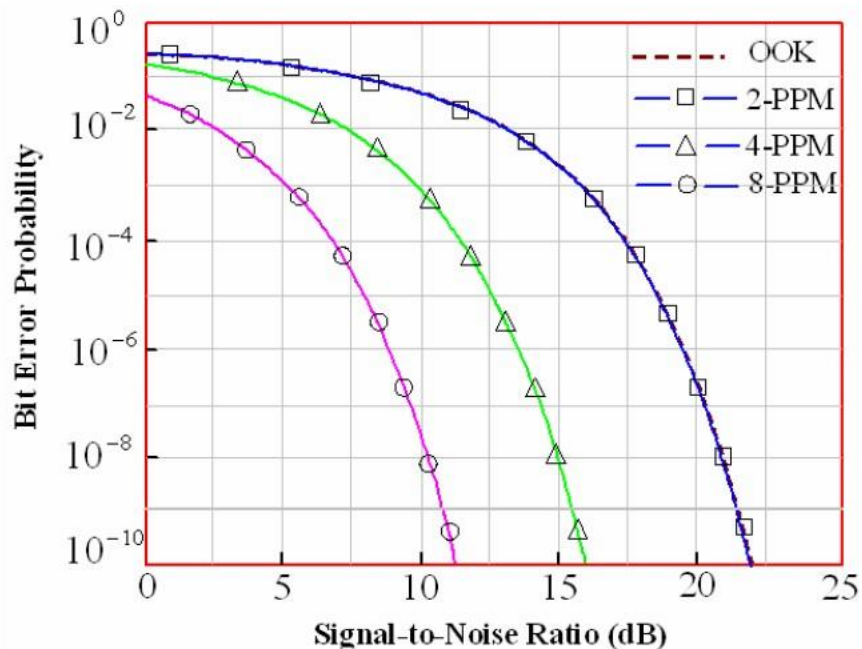
Η σύγκριση των συστημάτων διαμόρφωσης των FSO γίνεται με βάση την απόδοση της ισχύος και της ζώνης εύρους που ορίζονται ως η απαιτούμενη ισχύς ή η ζώνη εύρους σε μια επιθυμητή ταχύτητα μετάδοσης ενώ παράλληλα υπολογίζεται και το BER (Zang, J., 2000):

Η απόδοση ισχύος είναι άμεση συνέπεια του BER. Από διάφορες μετρήσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία προκύπτει ότι η σύγκριση συστημάτων OKK και  $L$ -PPM δίνουν ως πιο αποδοτικό το  $L$ -PPM σχήμα και μάλιστα με  $L=8$  (Zang, J., 2000):



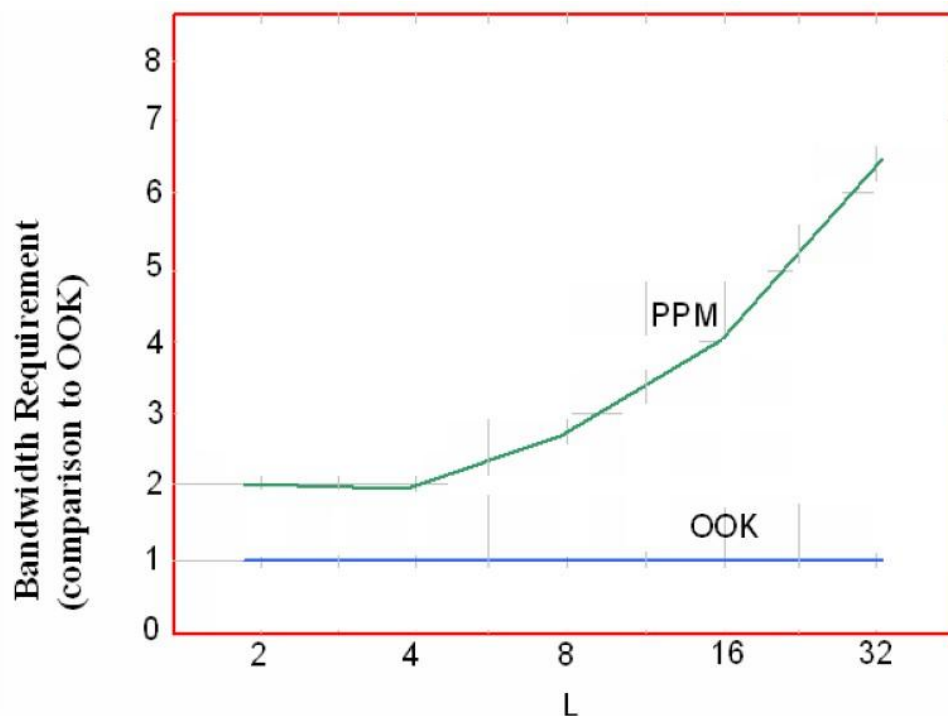
Σχήμα 3.7: Σύγκριση ισχύος μετάδοσης για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και OOK.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.7 όσο αυξάνεται το επίπεδο η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης μειώνεται για το PPM σύστημα γεγονός που το καθιστά πιο αποδοτικό (Zang, J., 2000):.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση BER για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και OOK.

Ένα άλλο σημαντικό μέτρο της απόδοσης είναι η απόδοση του εύρους ζώνης. Το εύρος ζώνης που απαιτείται για τη διαμόρφωση μπορεί να εκτιμηθεί από το πρώτο μηδέν του φάσματος ισχύος των μεταδιδόμενων σημάτων. Η απόδοση του εύρους ζώνης ορίζεται ως ο λόγος ανάμεσα στο ρυθμό των bit και της απαιτούμενης ζώνης εύρους (Zang, J., 2000).



**Σχήμα 3.9:** Σύγκριση εύρους ζώνης για τα συστήματα διαμόρφωσης PPM και OOK.

Είναι χαρακτηριστικό πως όσο αυξάνεται το στρώμα η απαίτηση για το εύρος ζώνης αυξάνεται για το PPM με αποτέλεσμα ως προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης το συγκεκριμένο σύστημα να είναι λιγότερο αποδοτικό από το OOK.

Όλα τα σχήματα διαμόρφωσης απαιτούν όπως προκύπτει από τα παραπάνω ακριβή παλμό ή παύση για την ιδανική τους αποκωδικοποίηση. Οι ολοκληρώσεις τους πρέπει να οριοθετούνται από τα βοηθητικά χρονικά κυκλώματα που υποκινούν τους δείκτες έναρξης και λήξης για τους ολοκληρωτές έτσι ώστε οι μεταβλητές ολοκλήρωσης που προκύπτουν να ξεπερνούν μόνο τους χρόνους παύσης. Αν δεν είναι ακριβής ο χρονισμός οι ολοκληρώσεις πραγματοποιούνται σε περιθωριακά χρονικά διαστήματα οδηγώντας σε εσφαλμένες τιμές ολοκλήρωσης που υποβαθμίζουν την απόδοση ολοκλήρωσης. Στα συστήματα OOK τα χρονικά σφάλματα προκαλούν επιπλέον μεταβολές στο ρεύμα σήματος

που θεωρούνται επιπλέον πηγές θορύβου και υποβαθμίζουν πάντα την απόδοση. Κατά συνέπεια για την αποτελεσματική αποκωδικοποίηση τα χρονικά σφάλματα πρέπει να διατηρούνται σε μικρή αναλογία σε σχέση με το ρυθμό των bit.

Στα συστήματα PPM η διαδικασία αποκωδικοποίησης δεν αποτελεί δοκιμή ορίου αλλά δοκιμή συγκριτικής ολοκλήρωσης. Τα χρονικά περιθώρια προκαλούν απώλεια στην ενέργεια παλμών στο σωστό χρονικό διάστημα και κατά συνέπεια δημιουργεί ενέργεια στο λανθασμένο χρονικό διάστημα. Αυτό προκαλεί σχετικά γρηγορότερη μείωση της απόδοσης καθώς το αντιστάθμισμα αυξάνεται σε σχέση με το χρόνο του παλμού.

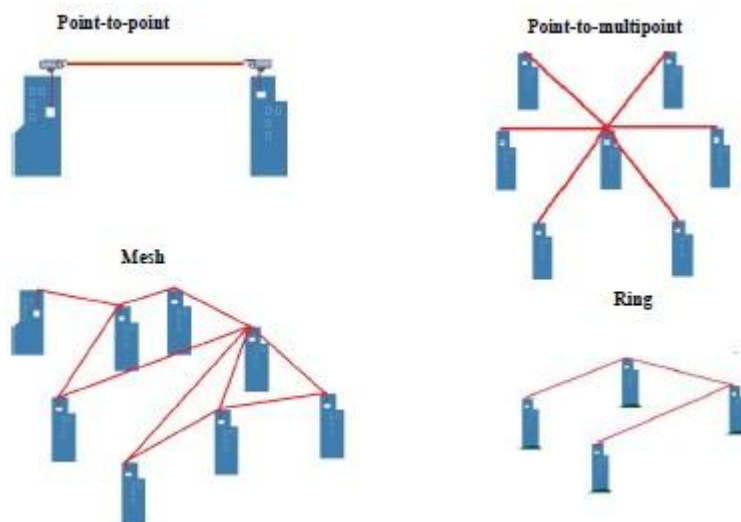
### **3.5 Προκλήσεις στην επικοινωνία με FSO συστήματα**

Όπως ήδη αναφέρθηκε η τεχνολογία των FSO χρησιμοποιεί το ατμοσφαιρικό κανάλι ως μέσο διάδοσης του οποίου οι ιδιότητες εξαρτώνται από το χώρο και το χρόνο. Τα συστήματα FSO δημιουργούν τυχαία φαινόμενα που εξαρτώνται από τον καιρό και τη γεωγραφική τοποθέτησή τους.

Οι διάφοροι απρόβλεπτοι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η ομίχλη, η βροχή, τα σύννεφα, το χιόνι κλπ προκαλούν ισχυρή εξασθένιση στο οπτικό σήμα και οδηγούν σε μείωση της απόστασης σύνδεσης στην οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα FSO συστήματα. Στη συνέχεια αναφέρονται οι προκλήσεις αυτές που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την αποδοτική χρήση των συστημάτων FSO.

#### **3.5.1 Επίγειες συνδέσεις**

Οι επίγειες συνδέσεις αφορούν σε συνδέσεις ανάμεσα σε κτήρια, βουνά και γενικά οριζόντιες συνδέσεις ανάμεσα σε δυο επίγειους σταθμούς. Αυτά τα FSO δίκτυα αναπτύσσονται με διάφορες τοπολογίες όπως σημείο προς σημείο, σημείο προς  
πολλαπλά σημεία ή δακτύλιους.



**Σχήμα 3.10:** Τοπολογίες συνδέσεων FSO

Όταν μια δέσμη λέιζερ διαδίδεται στην ατμόσφαιρα υπάρχει απώλεια ισχύος εξαιτίας διαφόρων παραγόντων και οι σχεδιαστικές απαιτήσεις του συστήματος πρέπει να καλυφθούν προσεκτικά προκειμένου να αντιμετωπίζουν τις τυχαίες αλλαγές στην ατμόσφαιρα. Για την αξιοπιστία των συγκεκριμένων συστημάτων η γνώση των πιθανών απωλειών θεωρείται απαραίτητη. Οι σημαντικότερες απώλειες που μπορεί να παρουσιαστούν είναι οι απώλειες λόγω απορρόφησης και σκέδασης, οι απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης, οι απώλειες απόκλισης της δέσμης, απώλειες λόγω του φωτός και λόγω μη ευθυγράμμισης.

### 3.5.1.1 Απώλειες λόγω απορρόφησης και σκέδασης

Οι απώλειες στο ατμοσφαιρικό κανάλι προέρχονται από την απορρόφηση και τη σκέδαση του σήματος και περιγράφονται από το νόμο του Beer (H. Weichel, 1990).

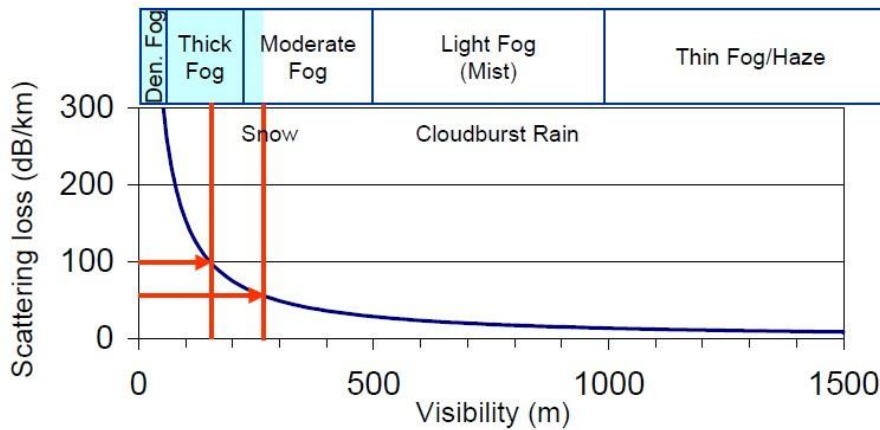
Στα ορατά και υπέρυθρα μήκη κύματος οι κύριοι ατμοσφαιρικοί απορροφητές είναι τα μόρια του νερού του διοξειδίου του άνθρακα και του όζοντος. Η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από το μήκος κύματος. Το εύρος του μήκους κύματος των συστημάτων επικοινωνιών FSO επιλέγεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της απορρόφησης η οποία αποτελεί το επανομαζόμενο παράθυρο μετάδοσης. Σε αυτό το παράθυρο η απόσβεση εξαιτίας της μοριακής απορρόφησης είναι μικρότερη από 0,2dB/km ενώ υπάρχουν

διάφορα παράθυρα στο εύρος των 700-1600nm. Τα κύρια συστήματα FSO σχεδιάζονται για να λειτουργούν στα παράθυρα των 780-850nm και 1520-1600nm. Αυτά τα μήκη κύματος επιλέγονται εξαιτίας της διαθεσιμότητας του πομπού και των στοιχείων ανίχνευσης σε αυτά τα μήκη κύματος.

Η σκέδαση του φωτός είναι επίσης υπεύθυνη για την υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος FSO. Όπως και η απορρόφηση έτσι και η σκέδαση εξαρτάται κυρίως από το μήκος κύματος. Αν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι μικρά συγκριτικά με το οπτικό μήκος κύματος τότε δημιουργείται η σκέδαση Rayleigh. Αυτό το είδος σκέδασης είναι εμφανές στα FSO συστήματα γύρω από το ορατό ή το υπεριώδες φάσμα και για μήκη κύματος μικρότερα από 1 $\mu$ m. Παρόλα αυτά μπορεί να αγνοηθεί σε μήκη κύματος μεγαλύτερα που προσεγγίζουν το φάσμα του υπέρυθρου. Αν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι συγκρίσιμα με αυτά του οπτικού μήκους κύματος τότε η σκέδαση Mie παράγεται. Αν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερα από το οπτικό μήκος κύματος όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ομίχλης, του χιονιού και του χαλαζιού τότε η σκέδαση περιγράφεται καλύτερα από οπτικά γεωμετρικά μοντέλα (R. N. Mahalati and J. M. Kahn, 2012).

Η συνολική ατμοσφαιρική απόσβεση αναπαριστάται από το συντελεστή ατμοσφαιρικής απόσβεσης που δίνεται ως συνδυασμός της απορρόφησης και της σκέδασης του φωτός. Κατά συνέπεια μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της απορρόφησης και της σκέδασης του φωτός. Η απορρόφηση και η σκέδαση στα συστήματα FSO προκαλείται από διάφορους παράγοντες όπως την ομίχλη τη βροχή και το χαλάζι.

Ο κύριος παράγοντας που προκαλεί την ατμοσφαιρική απόσβεση είναι η ομίχλη η οποία με τη σειρά της θεωρείται αιτία τόσο της απορρόφησης όσο και της σκέδασης. Κατά τη διάρκεια έντονων ομιχλώδων φαινομένων η ορατότητα δεν ξεπερνά τα 50m ενώ η απόσβεση μπορεί να φτάσει τα 350dB/km (I. I. Kim and M. Achour, 2001). Αυτό αποδεικνύει ότι είναι δυνατός ο περιορισμός της διαθεσιμότητας των FSO συνδέσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις λέιζερ μεγάλης ισχύος με τη χρήση διαφόρων τεχνικών βοηθούν στην βελτίωση των συνδέσεων. Γενικά προτιμώνται δέσμες 1550nm για συνδέσεις μεγάλης απόσβεσης εξαιτίας της ικανότητας τους να μεταφέρουν μεγάλη ισχύ (I. I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, 2000).



**Σχήμα 3.11:** Απόσβεση συναρτήσει της ορατότητας (Kim et al. 2000)

Η επίδραση της βροχής δεν είναι τόσο εμφανής όσο της ομίχλης επειδή οι σταγόνες της βροχής είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στα FSO συστήματα. Η απώλεια απόσβεσης για ελαφριά βροχόπτωση έως τη βαριά βροχόπτωση κυμαίνεται από το 1dB/km στα 10dB/km για μήκη κύματος από 850-1500nm (A. Z. Suriza, I. M. Rafiqul, A. K. Wajdi, and A. W. Naji, 2013).

Το μέγεθος των σωματιδίων του χιονιού είναι ενδιάμεσα από τα σωματίδια της ομίχλης και της βροχής. Κατά συνέπεια η απόσβεση εξαιτίας του χιονιού είναι μεγαλύτερη από αυτή της βροχής και μικρότερη από την αντίστοιχη της ομίχλης. Στις ισχυρές χιονοπτώσεις το μονοπάτι της δέσμης λέιζερ εμποδίζεται εξαιτίας της αύξησης της πυκνότητας των νιφάδων χιονιού στο μονοπάτι διάδοσης ή εξαιτίας του σχηματισμού πάγου στο παράθυρο. Σε αυτή την περίπτωση η απόσβεση είναι συγκρίσιμη με αυτή της ομίχλης και μειώνει σημαντικά τη διαθεσιμότητα των συνδέσεων στα συστήματα FSO (R. K. Crane and P. C. Robinson, 1997).

### 3.5.1.2 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής τύρβης

Η ατμοσφαιρική τύρβη είναι ένα συχνό φαινόμενο που προκαλείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της πίεσης στην ατμόσφαιρα κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης. Οδηγεί στο σχηματισμό των τυρβώδων κελιών που ονομάζονται επίσης δίνες και είναι διαφορετικών μεγεθών και με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Αυτές οι δίνες λειτουργούν σαν πρίσμα ή ως φακοί και



προκαλούν επικοδομητικές ή καταστροφικές παρεμβολές στο μονοπάτι διάδοσης. Επιπλέον οδηγούν στην ανακατανομή του σήματος σε τυχαίες διακυμάνσεις στην πυκνότητα και στη φάση του λαμβανόμενου σήματος. Οι διακυμάνσεις του λαμβανόμενου σήματος είναι γνωστές ως σπινθηρισμός και μετριοούνται με βάση τον συντελεστή σπινθηρισμού (E. S. Oh, J. C. Ricklin, G. C. Gilbreath, N. J. Vallesterio, and F. D. Eaton, 2004).

Ανάλογα με το μέγεθος των τυρβώδων δινών και το μέγεθος της δέσμης εκπομπής υπάρχουν τρία είδη επιδράσεων διακύμανσης:

- Η τύρβη που προκαλείται από την περιπλάνηση της δέσμης: Η περιπλάνηση της δέσμης είναι ένα φαινόμενο που προκαλείται όταν οι δίνες της τύρβης είναι μεγαλύτερες από το μέγεθος της δέσμης. Αυτό οδηγεί σε μια τυχαία απόκλιση της δέσμης από το μονοπάτι διάδοσης της και σε αστοχία της σύνδεσης (H. Kaushal, V. Kumar, A. Dutta, H. Aennam, H. Aennam, V. Jain, S. Kar, and J. Joseph, 2011)
- Τύρβη που προκαλείται από την ακτίνα διασποράς: Η ακτίνα διασποράς λαμβάνεται υπόψη όταν το μέγεθος των δινών είναι μικρότερο από την ακτίνα της δέσμης. Σε αυτήν την περίπτωση η εισερχόμενη δέσμη διαθλάται και σκεδάζεται ανεξάρτητα οδηγώντας στην παραμόρφωση του λαμβανόμενου μετώπου κύματος.
- Τύρβη που προκαλείται από το σπινθηρισμό της δέσμης. Όταν το μέγεθος της δίνης είναι ίση με το μέγεθος της δέσμης οι δίνες θα λειτουργούν σαν φακοί που θα εστιάζουν και θα αποεστιάζουν την εισερχόμενη δέσμη. Αυτό οδηγεί σε προσωρινές και χωρικές διακυμάνσεις ακτινοβολίας της δέσμης λείζερ και υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση των συστημάτων FSO.

### 3.5.1.3 Απώλειες λόγω απόκλισης της δέσμης

Καθώς η οπτική δέσμη μεταδίδεται στην ατμόσφαιρα η απόκλιση της προέρχεται από τη διάθλαση κοντά στο σημείο λήψης. Μέρος της μεταδιδόμενης δέσμης δεν συλλέγεται από το δέκτη και προκαλεί απώλεια στην απόκλιση της δέσμης ή γεωμετρικές απώλειες. Αυτή η απώλεια αυξάνεται με το μήκος σύνδεσης εκτός αν το μέγεθος του σημείου λήψης αυξηθεί ή πραγματοποιηθεί απόκλιση του δέκτη.

#### **3.5.1.4 Απόκλιση λόγω φωτός**

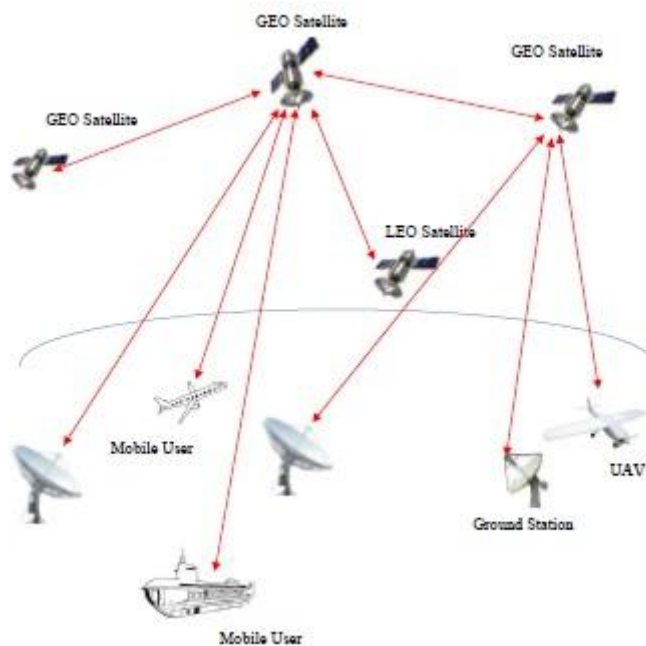
Το φως από τα φωτεινά σώματα όπως ο ήλιος το φεγγάρι ή τα φωσφωρίζοντα σώματα παράγουν σημειακό θόρυβο και παρεμβάλλουν όταν υπάρχει θόρυβος στον ανιχνευτή. Ο θόρυβος του δέκτη προέρχεται ταυτόχρονα από το θόρυβο του ανιχνευτή και τον ατμοσφαιρικό θόρυβο γεγονός που οδηγεί σε διακυμάνσεις. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος από τις ατμοσφαιρικές φωτεινές πηγές τα FSO πρέπει να λειτουργούν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (G. Thuillier, M. Herse, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. C. Simon, and H. Mandel, 2003).

#### **3.5.1.5 Απώλειες λόγω μη ευθυγράμμισης**

Η οπτική δέσμη που χρησιμοποιούν τα FSO είναι πλήρως ευθυγραμμισμένη με μικρή απόκλιση. Επίσης οι δέκτες που χρησιμοποιούνται δεν έχουν απεριόριστο χώρο. Κατά συνέπεια προκειμένου να εξασφαλιστεί η 100% διαθεσιμότητα των συνδέσεων FSO είναι βασικό να διατηρείται σταθερή η LOS σύνδεση ανάμεσα στο δέκτη και στον πομπό. Όμως τα κτήρια στα οποία τοποθετούνται οι πομποί βρίσκονται σε σταθερή κίνηση εξαιτίας διαφόρων παραγόντων όπως η θερμική διαστολή ή η μεγάλη ταχύτητα του ανέμου. Αυτό οδηγεί στην αστοχία των συνδέσεων εξαιτίας της μη ευθυγράμμισης.

#### **3.5.2 Διαστημικές συνδέσεις**

Οι διαστημικές συνδέσεις περιλαμβάνουν τόσο τις συνδέσεις από το έδαφος προς το διάστημα και από το διάστημα προς το έδαφος όσο και τις διαδορυφορικές συνδέσεις και τις εξολοκλήρου δορυφορικές συνδέσεις. Συνδέσεις ανάμεσα στα LEO και GEO χρησιμοποιούνται για τη συλλογή μεταδιδόμενων δεδομένων από το LEO στο GEO που στη συνέχεια επαναεκπέμπονται προς τη γη(A. Katsuyoshi, 2012).



**Σχήμα 3.12:** Δορυφορικές συνδέσεις FSO

Εξαιτίας των δυσμενών ατμοσφαιρικών συνθηκών στο διάστημα οι διαστημικές συνδέσεις έχουν πολλά προβλήματα να αντιμετωπίσουν τα οποία αφορούν στην απώλεια επισήμανσης, την ατμοσφαιρική τύρβη το θόρυβο του παρασκηνίου, την ατμόσφαιρα και την γωνία των ληφθέντων διακυμάνσεων.

### 3.5.2.1 Απώλεια εντοπισμού

Το σφάλμα εντοπισμού είναι μια από τις βασικές προκλήσεις που εντοπίζονται στα συστήματα FSO και μπορεί να οδηγήσουν στην αστοχία της σύνδεσης. Είναι βασικό να διατηρείται και να επισημαίνεται η απόκτηση κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να προκληθεί εξαιτίας διάφορων λόγων όπως η ταλάντωση του δορυφόρου ή οποιαδήποτε πίεση στις ηλεκτρονικές ή μηχανικές συσκευές (S. Arnon, 1997).

Το συγκεκριμένο σφάλμα μπορεί επίσης να εμφανιστεί εξαιτίας της ατμοσφαιρικής τύρβης εξαιτίας της περιπλάνησης της δέσμης που μπορεί να αντικαταστήσει τη δέσμη από το μονοπάτι μετάδοσης της. Σε κάθε περίπτωση το σφάλμα εντοπισμού αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας της σύνδεσης ή ακόμα και να μειώσει τη λαμβανόμενη ισχύ από το δέκτη οδηγώντας σε μεγάλο σφάλμα (G. A. Tyler, 1994).

Η απώλεια λόγω του σφάλματος εντοπισμού είναι μεγαλύτερη κατά την παρακολούθηση του LEO από τον GEO δορυφόρο. Επιπλέον οι απώλειες από το συγκεκριμένο σφάλμα είναι πιο σημαντικές στο ορατό φάσμα και μειώνεται στα μεγαλύτερα μήκη κύματος εξαιτίας της εξάπλωσης της δέσμης. Το σφάλμα εντοπισμού επιδρά σημαντικά και στην απόδοση του BER παρουσία τυχαίων διακυμάνσεων.

### **3.5.2.2 Θόρυβος παρασκηίου**

Οι κύριες πηγές που δημιουργούν θόρυβο στο παρασκήνιο είναι α) ο διαχεόμενος εκτεταμένος θόρυβος από την ατμόσφαιρα, β) ο θόρυβος από τον ήλιο και τους υπόλοιπους αστερισμούς και γ) από το σκεδαζόμενο φως που συλλέγεται από το δέκτη. Ο θόρυβος του παρασκηίου ελέγχεται από τον περιορισμό της οπτικής ζώνης εύρους του δέκτη. Οι απλές οπτικές ίνες με μικρό εύρος ζώνης χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.

### **3.5.2.3 Γωνία των λαμβανόμενων διακυμάνσεων**

Εξαιτίας της παρουσίας της τύρβης στην ατμόσφαιρα η δέσμη του μετώπου κύματος που φτάνει στο δέκτη θα διαταράσσεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό κίνησης στο εστιακό επίπεδο του δέκτη. Αυτό αποτελεί τη γωνία των λαμβανόμενων  
διακυμάνσεων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ RF ΚΑΙ FSO

#### 4.1 Διαφορές συστημάτων RF και FSO

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε λεπτομερώς η τεχνολογία των RF και FSO συστημάτων τηλεπικοινωνιών. Γενικά όπως προκύπτει από την ανάλυση των παραπάνω συστημάτων τα FSO συστήματα παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συστήματα RF τα οποία παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Η κύρια διαφορά των FSO συστημάτων από τα RF συστήματα προκύπτει από τη διαφορά στο μήκος κύματος τους. Για τα συστήματα FSO όταν οι καιρικές συνθήκες είναι καλές το παράθυρο της ατμοσφαιρικής μετάδοσης κινείται στο πλησιέστερο υπέρυθρο μήκος κύματος ανάμεσα στα 700 με 1600nm. Το παράθυρο μετάδοσης για τα συστήματα RF κυμαίνεται ανάμεσα στα 30mm και στα 3m. Κατά συνέπεια το μήκος κύματος RF είναι εκατό φορές μεγαλύτερο από το οπτικό μήκος κύματος. Αυτός ο μεγάλος λόγος του μήκους κύματος είναι και η βάση των περισσότερων διαφορών των δύο συστημάτων οι οποίες αναφέρονται στη διαμόρφωση του εύρους ζώνης, στην απόκλιση της δέσμης, στην απαιτούμενη ισχύ και μάζα, στην κατευθυντικότητα, στο φάσμα και στην ασφάλεια.

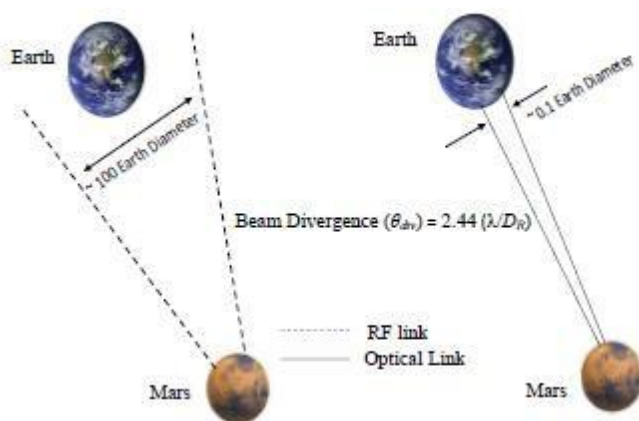
##### 4.1.1 Διαμόρφωση του εύρους ζώνης

Η αύξηση στη συχνότητα του φορέα αυξάνει τη δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας ενός συστήματος επικοινωνίας. Στα συστήματα RF και στα συστήματα μικροκυμάτων το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης μπορεί να είναι κατά 20% μεγαλύτερο από τη συχνότητα του φορέα. Στα συστήματα RF και στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μικροκυμάτων το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 20% της συχνότητας φορέα. Στην οπτική τηλεπικοινωνία ακόμα και αν το εύρος ζώνης λαμβάνεται ίσο με 1% της

συχνότητας του φορέα το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης θα είναι 100THz. Αυτό κάνει τη χρήση του εύρους ζώνης σε μια οπτική συχνότητα της τάξης των THz που είναι  $10^5$  μεγαλύτερο από τον τυπικό φορέα RF (Williams, M. Collins, D. M. Boroson, J. Lesh, A. Biswas, R. Orr, L. Schuchman, and O. Scott Sands, 2007).

### 4.1.2 Απόκλιση στενής δέσμης

Η απόκλιση είναι ανάλογη στο  $\lambda/D_R$  όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος φορέα και  $D_R$  και η διάμετρος του ανοίγματος. Κατά συνέπεια, η δέσμη που προσφέρεται από τον οπτικό φορέα είναι στενότερη από την αντίστοιχη στα συστήματα RF με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του σήματος από τον δέκτη για δεδομένη ισχύ μετάδοσης (Franz and V. K. Jain, 2000).



**Σχήμα 4.1:** Σύγκριση της απόκλισης της οπτικής δέσμης από τον Άρη στη Γή (Franz and V. K. Jain, 2000).

### 4.1.3. Ισχύς και απαίτηση μάζας

Για ένα δεδομένο επίπεδο μεταδιδόμενης ισχύος η οπτική πυκνότητα είναι μεγαλύτερη από του δέκτη εξαιτίας της στενής απόκλισης της δέσμης. Κατά συνέπεια ένα μικρότερο μήκος κύματος επιτρέπει στο σχεδιασμό του FSO να προσαρτάται μικρότερη κεραία από εκείνη που απαιτείται για τα RF συστήματα. Το τυπικό μέγεθος για τα οπτικά συστήματα είναι 0,3m ενώ για τα RF συστήματα είναι 1.5m (M. Jeganathan, K. E. Wilson, and J. R. Lesh,, 1996).

**Πίνακας 4.1:** Σύγκριση της ισχύος και της μάζας συνδέσεων για γεωστατική τροχιά κοντά στη γη (GEO) και χαμηλότερη γήινη τροχιά (LEO) χρησιμοποιώντας RF και FSO συστήματα επικοινωνιών (M. Jeganathan, K. E. Wilson, and J. R. Lesh,, 1996)

Σύνδεση	FSO	RF
GEO-LEO Διάμετρος κεραίας Μάζα Ισχύς	10,2cm 65.3kg 93.8W	2.2 m 152.8kg 213.9W
GEO-GEO Διάμετρος κεραίας Μάζα Ισχύς	13.5m 86.4kg 124.2W	2.1m 145.8kg 204.2W
LEO-LEO Διάμετρος κεραίας Μάζα Ισχύς	3.6cm 23kg 33.1W	0.8m 55.6kg 77.8W

#### 4.1.4 Προσανατολισμός

Ενώ το οπτικό μήκος κύματος είναι πολύ μικρό ο προσανατολισμός του είναι εφικτός με κεραία μικρού μεγέθους. Ο προσανατολισμός της κεραίας σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το κέρδος της. Το πλεονέκτημα του οπτικού φορέα σε σχέση με τον φορέα RF προκύπτει από το λόγο κατεύθυνσης της κεραίας που δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Gain}_{\text{optical}}/\text{Gain}_{\text{RF}}=(4\pi/\theta^2_{\text{div(optical)}})/(4\pi/\theta^2_{\text{divRF}})$$

Όπου  $\theta_{\text{divoptical}}$  και  $\theta_{\text{div,RF}}$  είναι η οπτική και η RF απόκλιση δέσμης που όπως αναφέρθηκε είναι ανάλογη στο  $\lambda/D_R$ .

#### 4.1.5 Αδειοδοτούμενο φάσμα

Στα συστήματα RF η παρεμβολή από τον ρυθμιστικό φορέα είναι το κύριο πρόβλημα που προκαλείται εξαιτίας της συμφόρησης του φάσματος. Αυτό απαιτεί την ανάγκη της αδειοδότησης του φάσματος από ρυθμιστικούς παράγοντες. Από την άλλη πλευρά το οπτικό σύστημα δεν απαιτεί αδειοδότηση του φάσματος με αποτέλεσμα να έχει μικρότερο κόστος και χρόνο ανάπτυξης (H. Henniger and O. Wilfert, 2010).



#### **4.1.6 Ασφάλεια συστήματος**

Τα συστήματα FSO δεν είναι ανιχνεύσιμα από αναλυτές φάσματος ή μέτρα RF καθώς η δέσμη λέιζερ του FSO μπορεί να προσανατολιστεί με τον κατάλληλο τρόπο με μικρή απόκλιση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα δύσκολη οποιαδήποτε παρεμβολή στο σήμα. Αντίθετα με το σήμα RF το FSO δεν μπορεί να διαπεράσει τοίχους και ως εκτούτου δεν μπορεί να αποτρέψει υποκλοπές.

Εκτός από όσα ήδη αναφέρθηκαν ως πλεονεκτήματα των FSO συστημάτων έναντι των RF υπάρχουν και δευτερεύοντα πλεονεκτήματα τα οποία είναι:

- A) είναι εύκολα επεκτάσιμα γεγονός που μειώνει το μέγεθος των στοιχείων του δικτύου
- B) αναπτύσσονται εύκολα και γρήγορα
- Γ) έχουν μικρό βάρος και είναι πιο συμπαγή συστήματα και
- Δ) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε δεν είναι εφικτή η χρήση των οπτικών ινών.

#### **4.2 Μειονεκτήματα των FSO έναντι των RF**

Παρά το γεγονός πως τα FSO είναι συστήματα που παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των RF ταυτόχρονα έχουν και μειονεκτήματα τα οποία δίνουν πλεονέκτημα στα συστήματα RF.

Το κύριο μειονέκτημα τους είναι πως απαιτούν λόγω της μικρής απόκλισης της δέσμης τους στενή απόκτηση, παρακολούθηση και υπόδειξη. Επιπλέον τα FSO εξαρτώνται από τις απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες οι οποίες μπορεί να υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος. Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι η θέση του ήλιου συναρτησει του πομπού και του δέκτη. Σε μια ειδική ευθυγράμμιση η παρασκηνιακή ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να αυξηθεί οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης του συστήματος (Sidorovich, 2002).

#### **4.3 Πειραματικές προσομοιώσεις FSO συστημάτων και RF**

Οι κινητές τηλεπικοινωνίες που χρησιμοποιούν τα FSO χρησιμοποιούνται στους εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιώντας διαχέουσα οπτική τεχνολογία (D.J.T. Heatley, D. R. Wisely, I. Neild, and P. Cochrane, 1998). Εξαιτίας της περιορισμένης ισχύος της απλής πηγής που διαχέεται στο χώρο προς όλες τις

κατευθύνσεις οι τεχνικές αυτές προτιμώνται για μικρές αποστάσεις και όχι για μεγαλύτερες. Για να μπορούν οι εξωτερικές σταθερές FSO τεχνικές επικοινωνίας να αντιστέκονται στις μικρές ταλαντώσεις και στις παρεμβολές από τα κτήρια έχουν αναπτυχθεί μηχανικά συστήματα αυτόματης κατεύθυνσης (E. Bisailon, D. F. Brosseau, T. Yamamoto, M. Mony, E. Bernier, D., Goodwill, D. V. Plant, and A. G. Kirk, 2002).

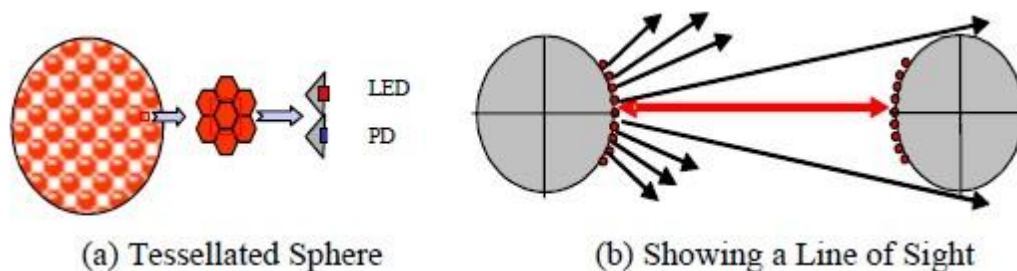
Στην περίπτωση των εμπορικών FSO οι ακτίνες λέιζερ στη ζώνη των 850 και 1550nm προτιμούνται εξαιτίας της μεγαλύτερης τάσης προώθησης τους σε αυτή τη ζώνη και στη μεγαλύτερη ισχύ τους εξαιτίας της γεωμετρικής διασποράς. Οι συσκευές αυτού του είδους έχουν μεγαλύτερο κόστος και απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ. Επιπλέον οι συσκευές αυτές δεν έχουν γεωμετρικό συντελεστή, βάρος και χαρακτηριστικά ισχύος που να τους επιτρέπουν να τοποθετούνται στις δομές ad-hoc.

Τα συστήματα FSO επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος τελευταίου μιλίου στην πρόσβαση του εύρους ζώνης και για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται το πρότυπο IEEE 802.16 που επιτυγχάνει πρόσβαση σε μεγάλο εύρος ζώνης της τάξης των 70Mbps για στατικούς κόμβους χρησιμοποιώντας το εύρος ζώνης των 10-66 GHz (C. Eklund, R. B. Marks, K. L. Stanwood, and S. Wang, 2002). Αυτή η διαμόρφωση παρέχει μία καλή εναλλακτική στα δίκτυα πρόσβασης με καλώδια με χαρακτηριστικούς εκπρόσωπους τις συνδέσεις οπτικών ινών και τις ψηφιακές γραμμές συνδρομητών επειδή είναι ευκολότερες και πιο φθηνές δομές (J. Akella, C. Liu, D. Partyka, M. Yuksel, S.Kalyanaraman, and P. Dutta, 2005).

Οι Akella et al. (2005) προσπάθησαν να απαντήσουν στην ερώτηση αν τα συστήματα επικοινωνίας FSO θα αποδώσουν καλύτερα από τις υπάρχουσες δυνατότητες για τα κινητά ad-hoc ασύρματα δίκτυα σε όρους καινοτόμων οπτικών δομικών μονάδων της κεραίας. Προκειμένου να ενεργοποιήσουν την επικοινωνία FSO στα κινητά τηλέφωνα εισήγαγαν την έννοια της σφαιρικής οπτικής κεραίας που προωθεί τη γωνιακή εκτροπή και κατά συνέπεια τη γραμμή όρασης (line of sight, LOS) στις τρεις διαστάσεις. Επιπλέον στην ίδια εργασία εισάγεται η χωρική επαναχρησιμοποίηση με τη χρήση πολλαπλών οπτικών πομπών στην επιφάνεια της σφαίρας. Αυτή η διάταξη δεν βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του πεδίου επειδή κάθε κατεύθυνση τώρα έχει μια ακριβή φωτεινή πηγή που λειτουργεί στο πεδίο

## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

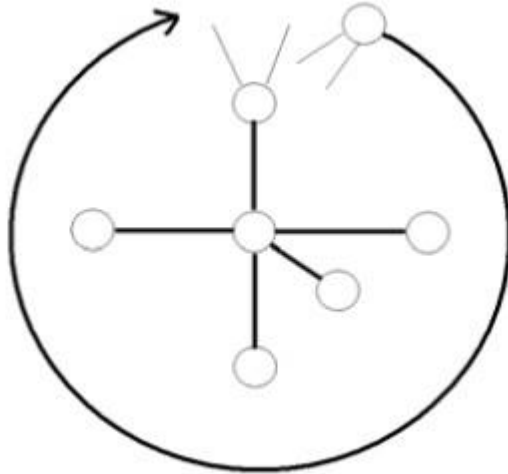
είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα και ενεργοποιεί παράλληλα την ταυτόχρονη επικοινωνία ανάμεσα στα διάφορα κανάλια και τους πομπούς.



**Σχήμα 4.2:** Χρησιμοποιούμενη κεραία για την προτεινόμενη διάταξη των Akella et al. (2005).

Για την προσομοίωση των κινητών FSO στοιχείων χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής NS-2 ο οποίος είναι ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων και αποδίδει υποστήριξη της προσομοίωσης του TCP της περιαγωγής και πολλαπλών πρωτοκόλλων στα ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα.

Εξαιτίας της έλλειψης οπτικών χαρακτηριστικών του δικτύου στον NS-2 χρησιμοποιούνται μοντέλα διάδοσης για τον καθορισμό αν μια κεραία μπορεί να λάβει σήμα από μια άλλη και έτσι καθορίζεται αν αυτό το σήμα είναι καλό αρκετά για να μεταφέρει δεδομένα. Αυτό το πρόβλημα σπάει σε δύο τμήματα το πρώτο καθορίζει το LOS και το δεύτερο χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς ισχύος. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε από τους Akella et al. (2005) είναι ένα πολύπλοκο υπολογιστικό μοντέλο δισδιάστατο που προσπαθεί να πιστοποιήσει την χωρική επαναχρησιμοποίηση και τη γωνιακή διασπορά για πρόσβαση σε οπτικά ασύρματα δίκτυα. Σύμφωνα με την προτεινόμενη διαμόρφωση ένας απλός FSO κόμβος κινείται γύρω από διάφορους στατικούς κόμβους ενώ η μετάδοση των δεδομένων επιτυγχάνεται με τη διευθέτηση αυτή.



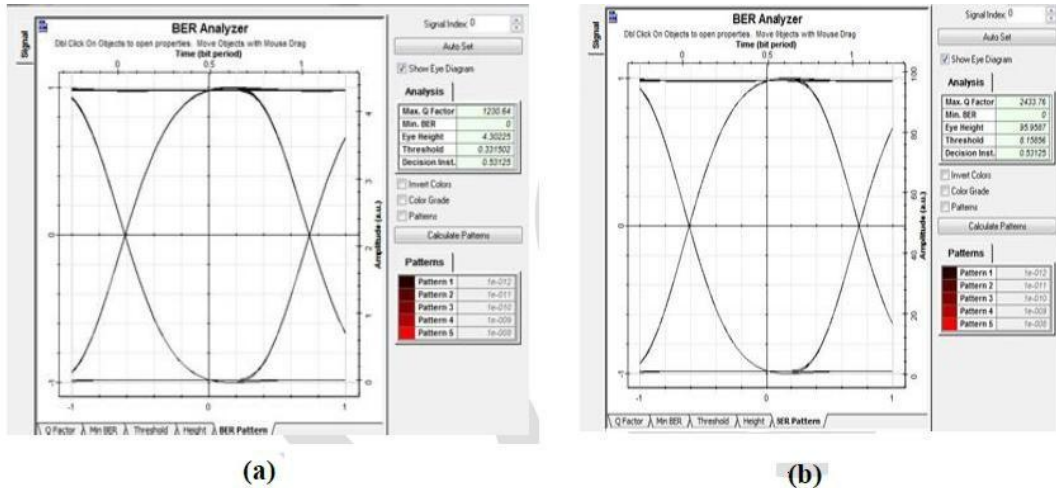
**Σχήμα 4.3:** Πειραματική διαμόρφωση των Akella et al. (2005)

Επιπλέον στην ίδια εργασία αποδεικνύεται ότι το μοντέλο διάχυσης FSO στην προσομοίωση είναι πιθανό να επιτευχθεί συνδεσιμότητα μέσω του κινητού FSO ακόμα και με ένα μικρό αριθμό πομπών. Τα πειράματα έγιναν έτσι ώστε να μην είναι πάντα παρούσα η LOS αποδεικνύοντας την επανεγκατάσταση της συνδεσιμότητας όταν οι κόμβοι βρίσκονται πίσω από τη LOS.

Η χωρική μεταβολή αποτελεί μια ένδειξη διαθεσιμότητας των πολλαπλών κεραίων που χρησιμοποιούνται στον πομπό ή στο δέκτη. Κάθε ζευγάρι κεραίων που προστίθεται στο σύστημα μπορεί να αυξάνει γραμμικά την έξοδο του κάθε καναλιού. Η χρήση πολλαπλών κεραίων επιτρέπει την επέκταση της χωρικής μεταβολής του ασύρματου καναλιού και δημιουργεί αξιοπιστία εξαιτίας της ταυτόχρονης μετάδοσης του ίδιου σήματος με νέους βαθμούς ελευθερίας που προωθούνται από τη χωρική μεταβολή. Τα τμήματα του πομπού και του δέκτη περιέχουν πολλαπλούς φακούς που ενισχύουν την μεταβολή. Οι Roy και Babu (2015) προσομοίωσαν ένα σύστημα FSO που αποτελούταν από πομπό και ένα δέκτη και ένα κανάλι FSO. Ο πομπός που περιλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδο τυχαίας ακολουθίας (Pseudo Random Bit Sequence, PRBS), την παλμική γεννήτρια NRZ την πηγή λέιζερ και το διαμορφωτή MZM MD (Noor, AW Najj and WA Khateeb, 2012). Κατά την προσομοίωση τα δεδομένα που παράγονται από τη γεννήτρια PRB με ρυθμό 20Gbs κωδικοποιούνται και το φως διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας MZM στο οποίο οι πηγές του λέιζερ λειτουργούν ως φορείς με μήκος κύματος 1550nm και ισχύ 20dB. Το ενισχυμένο σήμα στη συνέχεια

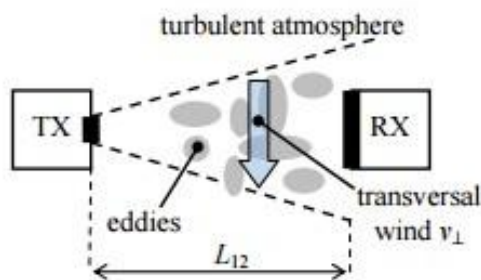
## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

κατευθύνεται στο δέκτη μέσω του καναλιού FSO. Η προσομοίωση τους πραγματοποιήθηκε σε ισχύ 10dBm, πεδίο 1km και ρυθμό 10 Gbps ενώ η ανάλυση έγινε σε καθαρές συνθήκες καθώς και σε συνθήκες ομίχλης και καταχνιάς. Αποδείχθηκε ότι το 4TX/4RX σύστημα δείχνει καλύτερη απόδοση με υψηλό Q συντελεστή και ρυθμό σφάλματος των Bit (BER).



**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα τύπου ματιού (Eye diagram) για το απλό TX/RX FSO σύστημα κάτω από καθαρές συνθήκες.

Οι Kokla et al (2008) μοντελοποίησαν και προσομοίωσαν τις ατμοσφαιρικές FSO συνδέσεις. Εξαιτίας της ατμοσφαιρικής τύρβης οι συνδέσεις χαρακτηρίζονται από διακοπές δεκάδων χιλιοστών του δευτερόλεπτου οι οποίες είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τη διάρκεια των πλαισίων που μεταδίδονται.



**Σχήμα 4.4:** Συνδέσεις FSO (Kokla et al. 2008)

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής τύρβης δεν παρουσιάζει σχεδόν κανένα πρόβλημα με πολύ μικρές συνδέσεις. Το περιθώριο σύνδεσης σχεδιάζεται για μεγάλη διαθεσιμότητα και απορρόφηση των διακυμάνσεων ισχύος. Για

μεγαλύτερες συνδέσεις με ένα στενό πλαίσιο ισχύος, η ατμοσφαιρική τύρβη προκαλεί σύντομες διακοπές (V.W.S. Chan, 2006).

Το μοντέλο του καναλιού μπορεί να δοκιμαστεί για την προσομοίωση της προστασίας των δεδομένων FEC που είναι προσιτές για τις μη κατευθυνόμενες δέσμες με σχετικές δυναμικές διαδικασίες.



**Σχήμα 4.5:** Το σχήμα κωδικοποίησης για μακροπρόθεσμες συνδέσεις (Kokla et. al. 2008)

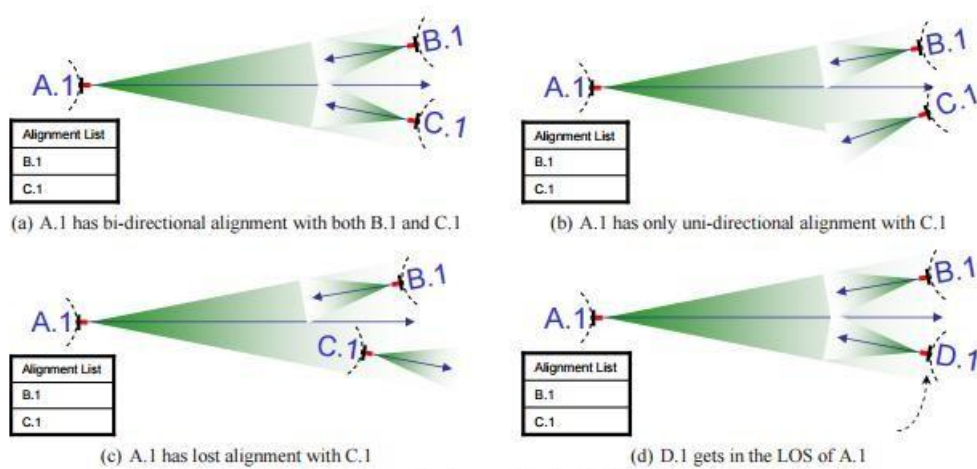
Αποδεικνύεται ότι οι διακοπές που προκαλούνται από την τυρβώδη ατμόσφαιρα απαιτούν τη χρήση μεγάλων κωδικών σε συνδυασμό με τη διόρθωση σφάλματος στους κώδικες των επιπέδων πακέτων. Οι εργασίες δείχνουν ότι οι ιδιότητες του καναλιού FSO στην περίπτωση ενός ενός φτηνού πακέτου ισχύος.

Οι Bigli και Yunskel (2010) παρουσίασαν στοιχεία προσομοίωσης που επιβεβαιώνουν τα χαρακτηριστικά των πολλαπλών πομπών με οπτικές ίνες ελεύθερου χώρου (FSO) στα κινητά ad-hoc δίκτυα. Χρησιμοποίησαν ένα φυσικό μοντέλο διείσδυσης για επικοινωνίες FSO στα δίκτυα ad-hoc. Ειδικά εστίασαν στην πτώση τάσης της φωτεινής δέσμης και η πιθανότητα του σφάλματος στο αποκωδικοποιημένο σήμα εξαιτίας των παραμέτρων τους. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε μια δομή πομπού που έχει μια γωνία διασποράς που καθορίζει το πεδίο της άποψης του πομπού. Η γωνία απόκλισης του πομπού είναι βασική και θεωρείται ως κύριος παράγοντας που καθορίζει αν δυο πομποί ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους. Μία ασύρματη σύνδεση (RF) σε έναν προσομοιωτή πακέτων έχει ολοκληρωθεί με έναν συγγραμμικό τρόπο και δεν υπάρχει τρόπος να εγκατασταθούν στην κατεύθυνση των δεσμών που μπορεί να χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνότητας ταυτόχρονα χωρίς την παρεμβολή άλλων. Ολοκληρώθηκαν τα στοιχεία του NS-2 που μπορούν:

- Δημιουργούν σφαιρικούς κυκλικούς και κυλινδρικούς FSO κόμβους με πολλαπλές διεπιφάνειες κατεύθυνσης.

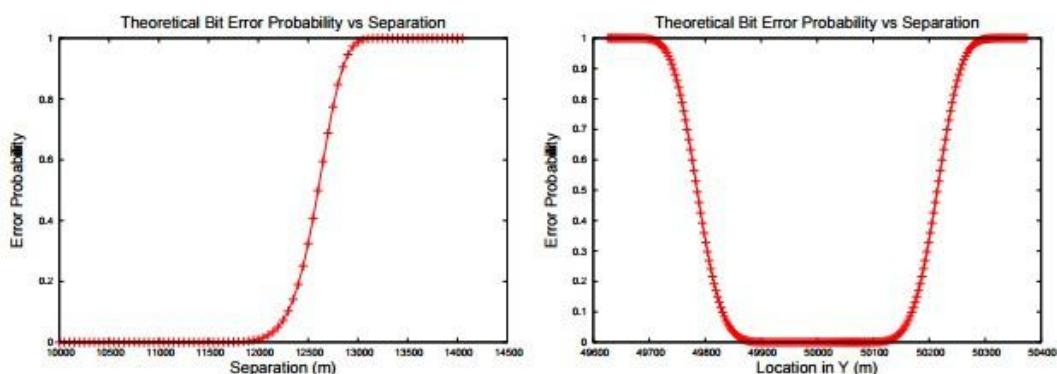
## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

- Καθορίζουν την ύπαρξη των δεσμών σύνδεσης ανάμεσα σε πομπούς με διαφορετικούς κόμβους και μεταφέρουν τα αντίστοιχα πακέτα.
- Μιμούνται τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης FSO στη λήψη ισχύος, του θορύβου και του ρυθμού σφάλματος.
- Η αποδοχή της ύπαρξης των 3-D αντικειμένων που διαταράσσουν την διεύθυνση της σύνδεσης.
- Τα γενικά σενάρια κινητικότητας για ασύρματους κόμβους ικανοποιώντας την αποφυγή των αντικειμένων.



**Σχήμα 4.6:** Είδη πιθανών διευθετήσεων απώλειας /κέρδους κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (Bigli και Yunskel 2010).

Για να πιστοποιηθούν οι προσομοιώσεις FSO με το θεωρητικό μοντέλο προώθησης έχουν γίνει διάφορα πειράματα προσομοίωσης. Στα συγκεκριμένα πειράματα περιλαμβάνονταν δύο πομποί που τοποθετούνται με διάφορους τρόπους μεταξύ τους. Παρατηρήθηκε ότι η λαμβανόμενη ισχύς και η πιθανότητα ισχύος ενώ μεταβάλλονται σημαντικές παράμετροι όπως ο διαχωρισμός ανάμεσα σε πομπούς, η ορατότητα και ο θόρυβος ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά.

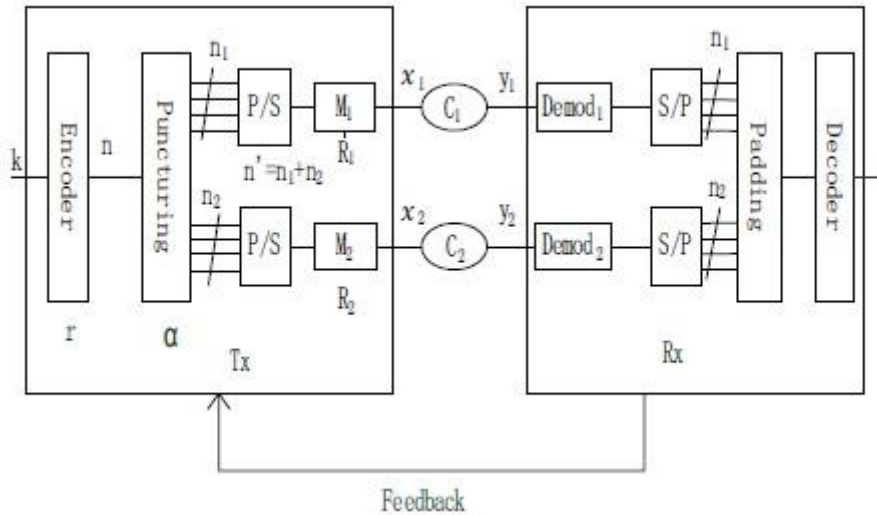


**Σχήμα 4.7:** α) θεωρητική πιθανότητα σφάλματος αυξάνεται καθώς ο δέκτης μετακινείται μακριά από τον πομπό. Β) Θεωρητική πιθανότητα σφάλματος του δέκτη απομακρύνεται από την κανονικότητα του πομπού (Bigli και Yunskel 2010).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια προσελκύει η προσομοίωση των υβριδικών συστημάτων FSO και RF τα οποία προσφέρουν ιδιαίτερη ευελιξία στην υψηλή ασύρματη σύνδεση. Αυτά τα συστήματα υπόσχονται υψηλούς ρυθμούς συνδεσιμότητας. Αυτά τα συστήματα υπόσχονται πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων εξαιτίας του καναλιού FSO και των κατάλληλων καιρικών συνθηκών. Η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων ενισχύεται από τα πιο συμπαγή RF κανάλια. Μια κρίσιμη ερώτηση είναι το πόσο αποτελεσματικά μπορεί να μεταδοθούν δεδομένα με τη χρήση υβριδικών συστημάτων με μεταβλητές συνθήκες καναλιού.

Οι Tang et al. (2012) μοντελοποίησαν ένα υβριδικό σύστημα επικοινωνίας με τη μορφή δύο ανεξάρτητων παράλληλων καναλιών. Κάτω από την υπόθεση των σχεδόν στατικών καναλιών και της πλήρους γνώσης των καναλιών στους πομπούς προτείνουν έναν σχεδιασμό που οδηγεί στη χωρητική προσέγγιση και σε παρόμοιο σύστημα σύνδεσης. Ο ρυθμός κωδικοποίησης ο σύγχρονος ρυθμός μετάδοσης και το σχήμα διαμόρφωσης κάθε καναλιού είναι δυναμικά ρυθμιζόμενο ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού.



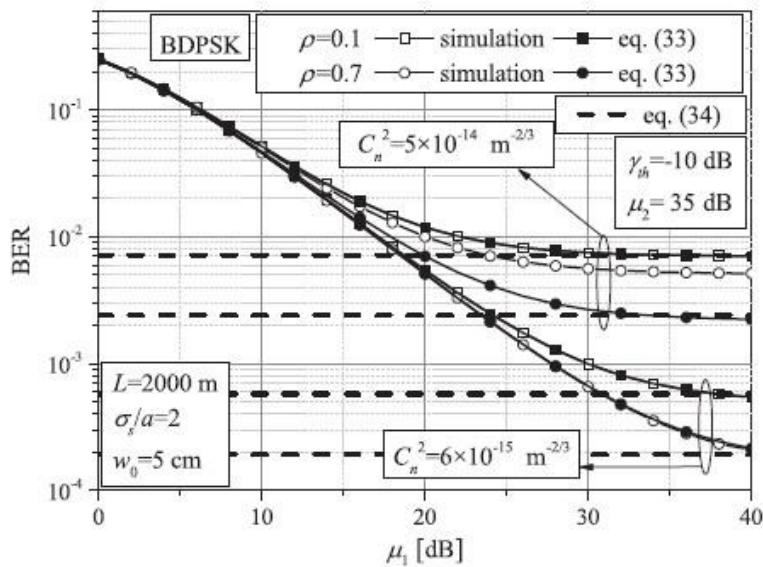


**Σχήμα 4.8:** Διάγραμμα συστήματος με δυο παράλληλα κανάλια

Στη συγκεκριμένη εργασία (Tang et al. 2012) αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για τον καθορισμό των παραμέτρων του συστήματος που μεγιστοποιούν την διακίνηση του παράλληλου καναλιού με παρόμοιο τρόπο. Τα αποτελέσματα της συνδεσμολογίας εφαρμόστηκαν σε ένα υβριδικό FSO/RF σύστημα και η μέση διακίνηση που επιτυγχάνεται βρέθηκε συγκρίσιμη με εκείνα τα συστήματα που υποφέρουν από συνθήκες εξόδου και είναι σημαντικά υψηλότερα από δεδομένους μη προσαρμοζόμενους σχεδιασμούς.

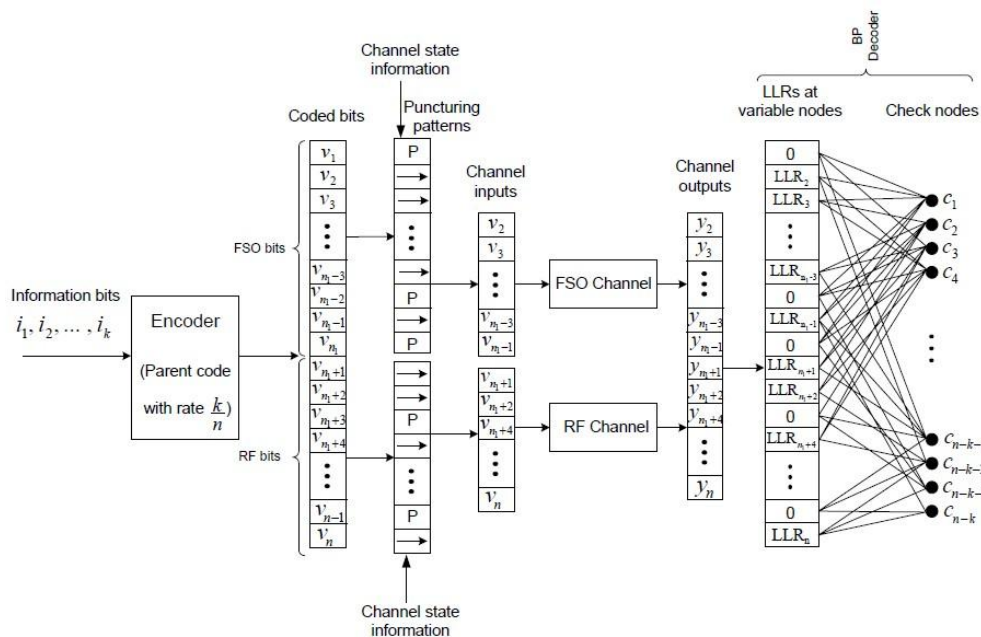
Σε πιο πρόσφατη εργασία (Djordjevic, G.T., Petkovic, M.I., Cvetkovic, A.M., Karagiannidis, G.K., 2015) μελετήθηκε η πιθανότητα εξόδου και η απόδοση του μέσου ρυθμού σφάλματος ενός ενισχυτή dual-hop και μπροστινό σύστημα μετεγκατάστασης που αποτελείται από ένα υβριδικό σύστημα RF/FSO ενώ ταυτόχρονα θεωρείται πως η κατάσταση του καναλιού δεν είναι κανονική και βρίσκεται στο ρελέ και υπάρχει κακή ευθυγράμμιση ανάμεσα στο πομπό και στο δέκτη στις σύνδεση FSO. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται ετεροχρονισμένη η κατάσταση πληροφορίας του καναλιού όταν το ρελέ ενισχύει το μεταδιδόμενο σήμα. Η σύνδεση RF ακολουθεί διάλεια Rayleigh ενώ η σύνδεση FSO βρίσκεται υπό την επίδραση της ατμοσφαιρικής τύρβης που μοντελοποιείται από την κατανομή Γάμα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από προσομοιώσεις Monte Carlo και διατυπώθηκαν εκφράσεις για την πιθανότητα εξόδου και το μέσο BER οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της

απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον διερευνήθηκε η επίδραση της τύρβης των σημειακών σφαλαμάτων της ισχύος και του συντελεστή συσχέτισης στο μέσο BER.



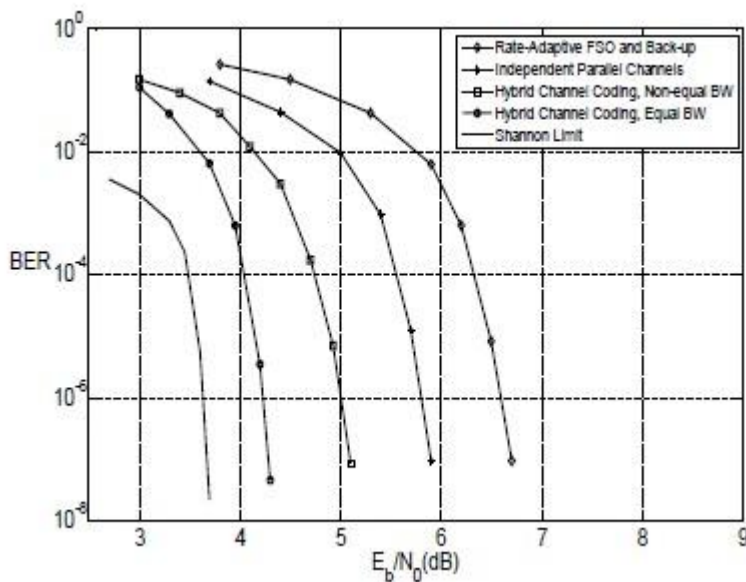
**Σχήμα 4.9:** BER για διαφορετικές τιμές συντελεστή συσχέτισης σε διαφορετικές συνθήκες τύρβης. (Djordjevic, G.T., Petkovic, M.I., Cvetkovic, A.M., Karagiannidis, G.K.,2015)

Οι Eslami et al. (2010) πρότειναν μια σχεδιαστική μεθοδολογία για να δημιουργήσουν κώδικες υβριδικών καναλιών. Αποδείχθηκε ότι η ανάλυση και προσομοίωση με τη χρήση κώδικων υβριδικών καναλιών πετυχαίνονται καλύτερα αποτελέσματα διαθεσιμότητας σε όρους περιθωρίου απαιτούμενης σύνδεσης ενώ καλύτερη είναι και η διακίνηση από τα υπάρχοντα συστήματα.



**Σχήμα 4.10:** Γραφική αναπαράσταση των υβριδικών καναλιών που χρησιμοποιήθηκαν από τους Eslami et al. (2010)

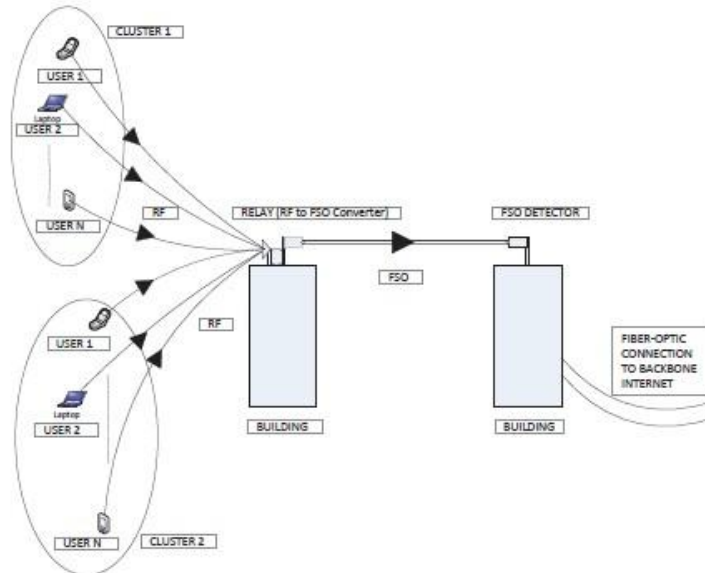
Επίσης αποδείχθηκε πως η αποφυγή της επικάλυψης των δεδομένων οδηγεί σε αντιμετώπιση των κρίσιμων στοιχείων ασφαλείας των επικοινωνιών FSO ενώ οι προσομοιώσεις απέδειξαν ότι οι υβριδικοί κώδικες πετυχαίνουν διπλάσια βελτίωση στο ρυθμό σφάλματος συγκριτικά με τα υπάρχοντα συστήματα.



**Σχήμα 4.11:** Αποτελέσματα των Eslami et al. (2010) για το BER από τους υβριδικούς κώδικες όταν τα κανάλια FSO είναι σταθερά.

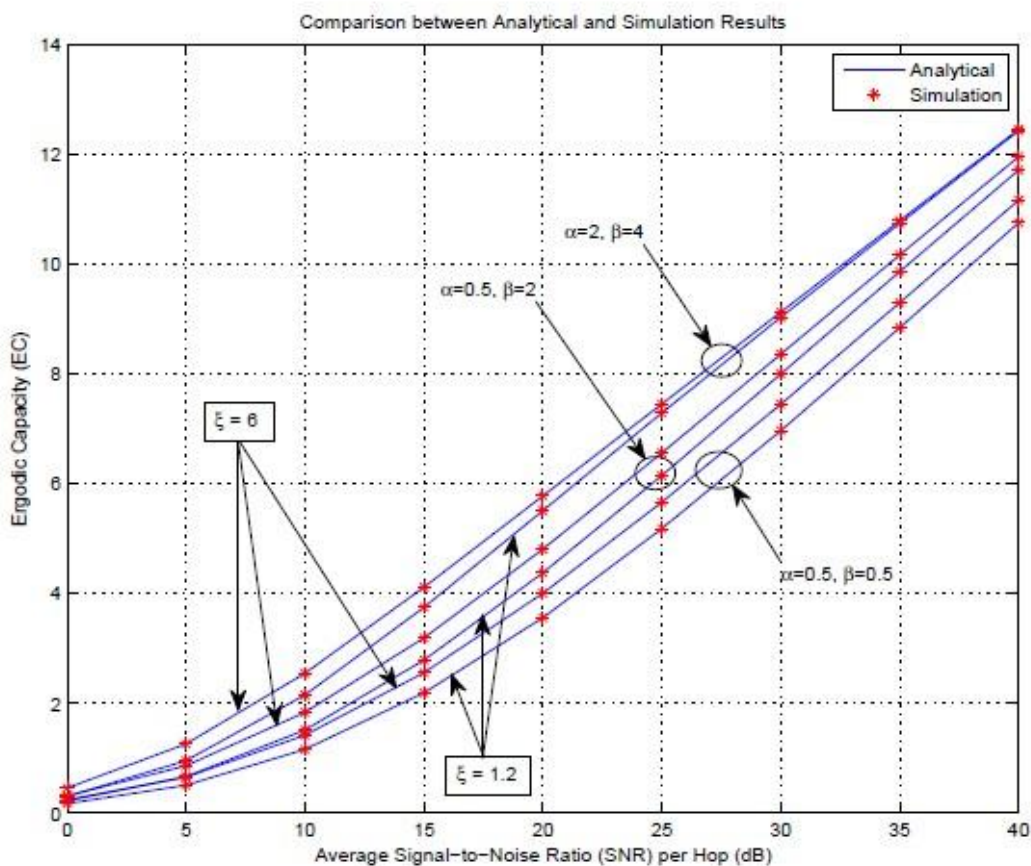
## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

Οι Ansari και Yilmaz (2013) ανέλυσαν την απόδοση ενός διπλού ρελέ συστήματος μετάδοσης που αποτελούταν από ασύμμετρες συνδέσεις RF/FSO. Συγκεκριμένα ανέπτυξαν ένα μοντέλο συστήματος για να εξάγουν εκφράσεις για την αθροιστική συνάρτηση κατανομής, τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και τη συνάρτηση στιγμιαίας παραγωγής.



**Σχήμα 4.12:** Διάγραμμα ασύμμετρης σύνδεσης RF/FSO σε σύστημα μετάδοσης των Ansari και Yilmaz (2013)

Απέδειξαν ότι τα σημειακά σφάλματα όπως και η ατμοσφαιρική τύρβη επηρεάζουν σημαντικά τη δυνατότητα του συστήματος και κατά συνέπεια την απόδοση του υβριδικού συστήματος.

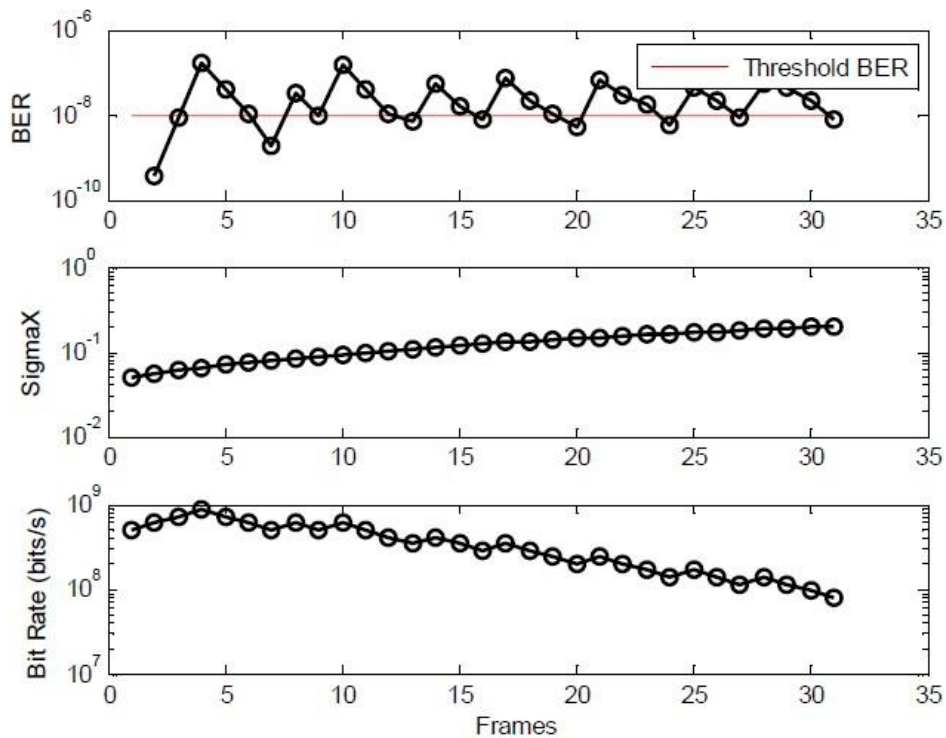


**Σχήμα 4.13:** Επίδραση των σημειακών σφαλμάτων στην εργοδική ικανότητα του ασύμμετρου συστήματος των Ansari και Yilmaz (2013)

Στα υβριδικά συστήματα FSO/RF οι συνδέσεις FSO είναι οι πρωτεύουσες συνδέσεις ενώ οι συνδέσεις RF οι δευτερεύουσες. Στα υπάρχοντα υβριδικά συστήματα όταν το σήμα του FSO προς το λόγο θορύβου μειώνεται πάνω από ένα όριο θορύβου το σύστημα μεταβαίνει από το FSO στο RF προκειμένου να διατηρηθεί η σύνδεση της επικοινωνίας με αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται η μέγιστη χρήση του εύρους ζώνης σε όρους απόδοσης σφάλματος. Οι Moradi et al. (2010) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για τον ρυθμό των bit στο FSO προκειμένου να διατηρείται η επικοινωνία χρησιμοποιώντας τις συνδέσεις FSO καθώς έχουν μεγαλύτερο ρυθμό bit από τις συνδέσεις RF και δεν απαιτούν μετάβαση στις δευτερεύουσες συνδέσεις. Το σύστημα σε αυτήν την περίπτωση μεταβαίνει στη δευτερεύουσα σύνδεση όταν και μόνο όταν ο ρυθμός των bit της FSO μειωθεί κάτω από το όριο της RF σύνδεσης. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη εργασία η εξάρτηση του σφάλματος των bit του FSO εξαρτάται από το ρυθμό σφάλματος

## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

των bit του καναλιού που μπορεί να επιτευχθεί από τη σύνδεση RF. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε υπολογιστική προσομοίωση και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου στην διατήρηση υψηλών ρυθμών με τη χρήση συνδέσεων FSO.



**Σχήμα 4.14:** Αποτελέσματα προσομοίωσης των Moradi et al. (2010) για χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν δύο βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες τα συστήματα ραδιοσυχνότητας (RF) και τα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου (FSO).

Η μεγάλη πληθυσμιακή ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών οδήγησε και σε αύξηση των χρηστών πολυμέσων και τηλεπικοινωνιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και να καθίσταται αναγκαία η αντικατάσταση των συστημάτων RF που έχουν μικρούς ρυθμούς μετάδοσης.

Στα συστήματα RF μεταφέρονται σε όλες τις ομάδες χρηστών διακριτά ραδιοκανάλια ή διαφορετικές ραδιοσυχνότητες. Τα κανάλια αυτά είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και για κάθε ένα από αυτά οι χρήστες μεταδίδουν και δέχονται σήματα. Τα ασύρματα οπτικά συστήματα χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους οπτικές δέσμες και δεδομένα που μεταδίδονται μέσω της οπτικής δέσμης.

Το κύριο πλεονέκτημα των RF συστημάτων είναι ότι λειτουργούν σε μεγαλύτερες περιοχές για απεριόριστο αριθμό χρηστών και εξαρτώνται από τη συχνότητα. Στα ασύρματα οπτικά συστήματα το βασικό τους μειονέκτημα είναι το εύρος του σήματος επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ενώ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία κάτω από το νερό.

Τα συστήματα RF μπορούν να μεταδίδουν σήματα ακόμα και σε άσχημες καιρικές συνθήκες αλλά με μικρούς ρυθμούς μετάδοσης.

Γενικά θεωρείται πως τα συστήματα FSO παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα RF που αφορούν στην ασφαλή μετάδοση δεδομένων του χαμηλού τους κόστους, της μικρότερης χρήσης ισχύος και τους μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης και του απεριόριστου εύρους ζώνης τους. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν και τα



## Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες

οποία οφείλονται στην ετερογενή φύση του ατμοσφαιρικού καναλιού με κυριότερο την επίδραση των καιρικών συνθηκών στην απόδοση τους.

Η αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων τόσο των FSO όσο και των RF συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός υβριδικού συστήματος που θα προκύψει από το συνδυασμό των δυο προηγούμενων. Σε αυτά τα συστήματα η σύνδεση RF είναι εφικτή όταν δεν είναι εφικτή η σύνδεση FSO. Σε τέτοια συστήματα είναι δυνατή η επέκταση της περιοχής λειτουργίας των FSO και να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης των RF.

Τα διάφορα συστήματα έχουν αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης μέσω προσομοίωσης προκειμένου να περιοριστούν οι επιδράσεις των εξωτερικών παραμέτρων και να αυξηθεί η απόδοση τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Akella, C. Liu, D. Partyka, M. Yuksel, S.Kalyanaraman, and P. Dutta, (2005) Building Blocks for Mobile Free-Space-Optical Networks, IEEE
- [2] Ansari, I.S., Yilmaz, F., (2013) Impact of Pointing Errors on the Performance of Mixed RF/FSO Dual-Hop Transmission Systems, IEEE Wireless Communication Letters 1-6
- [3] S. Arnon, 1997 "Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations – Analog case," Opt. Engg., vol. 36, no. 1,.
- [4] Bigli, M., Yuskel M., (2010), Multi-transceiver simulation modules for free-space optical mobile ad hoc networks, <http://www.cse.unr.edu/~yuksemy-papers/spie10.pdf>
- [5] E. Bisailon, D. F. Brosseau, T. Yamamoto, M. Mony, E. Bernier, D., Goodwill, D. V. Plant, and A. G. Kirk, (2002) "Free-space optical link with spatial redundancy for misalignment tolerance", IEEE Photonics Technology Letters, Volume 14, pp 242 – 244,
- [6] B. Bova, S. Rudnicki, (2001). The Story of Light, Sourcebook
- [7] T. Carbonneau and D. Wisley (1998) Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place, in SPIE Conference on Optical Wireless Communications, 1998, pp. 119–128.
- [8] Carlson, A.B., (1986), Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication, McGraw-Hil Ed.
- [9] V.W.S. Chan, 2006, "Free-Space Optical Communications," J. of Lightwave Techn., 24, p. 4750-4762.
- [10] R. K. Crane and P. C. Robinson, 1997 "ACTS propagation experiment: rain-rate distribution observations and prediction model comparisons," Proc. IEEE, vol. 86, pp. 946–958,.
- [11] Djordjevic, G.T., Petkovic, M.I., Cvetkovic, A.M., Karagiannidis, G.K.,(2015) Mixed RF/FSO Relaying With Outdated Channel State Information, IEEE Journal on selected areas in Communications, 33,
- [12] C. Eklund, R. B. Marks, K. L. Stanwood, and S. Wang,(2002) "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access", IEEE Communications Magazine, pp. 98-107.
- [13] M. Forzati, et al.,(2006) "Performance Analysis of Single-MZM APRZ Transmitters," Journal of Lightwave Technology, vol. 24, pp. 2006-2014,
- [14] J. H. Franz and V. K. Jain, 2000 Optical Communications: Components and Systems: Analysis, Design, Optimization, Application. Narosa Publishing House,
- [15] P. Gupta and P. R. Kumar, (2000) "The Capacity of Wireless Networks ," IEEE Trans on Information Theory, p. 388 - 404,
- [16] Gupta, G., Bhanawat, P.,(2010) Free space optics –optical wireless communication, Fiber Optic Communication Term Paper,1-5

- [17] MD Noor, AW Naji and WA Khateeb, 2012 “Performance analysis of a free space optics link with multiple transmitters/receivers”, IJUM Engineering Journal, Vol. 13, No. 1.
- [18] Harris Corporation, (1996) RF Communications Division Radio Communications in the Digital Age Volume One: HF Technology, Edition 2,
- [19] D.J.T. Heatley, D. R. Wisely, I. Neild, and P. Cochrane, (1998) “Optical Wireless: The story so far”, IEEE Communications, Vol.36, pp. 72 - 74, 79-82,
- [20] H. Henniger and O. Wilfert, 2010 “An introduction to free-space optical communications,” J. Radioeng., vol. 19, no. 2, pp. 203–212,.
- [21] A.A. Huurdeman, (2003). The worldwide history of telecommunications John Wiley & Sons
- [22] M. Jeganathan, K. E. Wilson, and J. R. Lesh,, 1996 “Preliminary analysis of fluctuations in the received uplink-beacon-power data obtained from the GOLD experiments,” TDA Progress Report 42-124, Comm. Sys. and Research Sec., pp. 20-32
- [23] M. Kaine-Krolak and M. E. Novak, 1995 “An introduction to Infrared technology: Applications in the home, classroom, workplace, and beyond,” [http://trace.wisc.edu/docs/ir\\_intro/ir\\_intro.htm](http://trace.wisc.edu/docs/ir_intro/ir_intro.htm)
- A. Katsuyoshi, 2012 “Overview of the optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS) project,” J. Nat. Inst. of Info. And Comm. Tech., vol. 59, pp. 5–12,
- [24] H. Kaushal, V. Kumar, A. Dutta, H. Aennam, H. Aennam, V. Jain, S. Kar, and J. Joseph, 2011 “Experimental study on beam wander under varying atmospheric turbulence conditions,” IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 23, pp. 1691–1693,
- [25] G. Keiser, (2000) □Optical Fiber Communications□ ,McGraw-Hill,
- [26] I. Kim and M. Achour, 2001 “Free-space links address the last-mile problem,” vol. 37, <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-37/issue-6/features/optical-communications/free-space-links-address-the-last-mile-problem.html>
- [27] I. Kim, B. McArthur, and E. Korevaar, 2000. “Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 850 nm in fog and haze for optical wireless communications,” Proc. SPIE, Opt. wireless comm. III, vol. 4214, pp. 26–37,
- [28] W. Kogler, P. Schrotter, U. Birnbacher, E. Leitgeb, and O. Koudelka (2003), Hybrid wireless networks - high availability with combined optical / microwave links, in Telecommunications and Mobile Computing, pp. 1–3.
- [29] Kokla, Z., Biokolva,V., Bielek,D (2008) Simulation of FSO Transmission Channel, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on CIRCUITS, SYSTEMS, ELECTRONICS, CONTROL and SIGNAL PROCESSING (CSECS'08),
- [30] S. Lee, R. Zhang, and K. Huang, (2013) “Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 9, pp. 4788-4799,
- [31] E. Leitgeb, M. Gebhart, U. Birnbacher, W. Kogler, and P. Schrotter (2004) High availability of hybrid wireless networks, Proceedings of the SPIE, vol. 5465, pp. 238–249, 2004

- [32] E. Leitgeb, S. S. Muhammad, B. Flecker, C. Chlestil, M. Gebhart, and T. Javornik (2006) The influence of dense fog on optical wireless systems, analysed by measurements in Graz for improving link-reliability, in ICTON, July 2006, pp. 154–159
- [33] X. Liu, et al., (2002) ."Suppression of intrachannel four-wave-mixing-induced ghost pulses in high-speed transmissions by phase inversion between adjacent marker blocks," Optics Letters, vol. 27, pp. 1177-1179,
- [34] R. N. Mahalati and J. M. Kahn, 2012 "Effect of fog on free-space optical links employing imaging receivers," Opt. Exp., vol. 20, no. 2, pp. 1649–661.
- [35] Y. Miyamoto, et al., 1999 "320 Gbit/s x Gbit/s WDM transmission over 367 km with 120 km repeater spacing using carrier-suppressed return-to-zero format," Electronics Letters, vol. 35, pp. 2041-2042,
- [36] McCune,E.W, Sander,W (1999) Direct digital synthesis of precise, stable angle modulated RF signal, US5952895 A US Patent <https://www.google.com/patents/US5952895>
- [37] Motlagh,A.C, V. Ahmadi, Z. Ghassemlooy, and K. Abedi (2008) The effect of atmospheric turbulence on the performance of the free space optical communications, in CSNDSP, July 2008, pp. 540–543 [http://www.researchgate.net/publication/4366328\\_The\\_effect\\_of\\_atmospheric\\_turbulence\\_on\\_the\\_performance\\_of\\_the\\_free\\_space\\_optical\\_communications](http://www.researchgate.net/publication/4366328_The_effect_of_atmospheric_turbulence_on_the_performance_of_the_free_space_optical_communications)
- [38] Morita, et al.,(1997) "Performance improvement by initial phase modulation in 20 Gbit/s soliton-based RZ transmission with periodic dispersion compensation," Electronics Letters, vol. 33, pp. 1021-1022
- [39] Moradi, H., Falahpour, M., Refai, H.H., LoPresti, P.G., Atiquazzaman, M.,(2010) Toward an Optimal Combined FSO/RF System via an Adaptive Bit Rate Control, Free-Space Laser Communication Technologies XXII, edited by Hamid Hemmati, Proc. of SPIE Vol. 7587,
- [40] NIEHS,Electric and Magnetic fields, <http://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/emf/>
- [41] E. S. Oh, J. C. Ricklin, G. C. Gilbreath, N. J. Vallesterro, and F. D. Eaton, 2004 "Optical turbulence model for laser propagation and imaging applications," Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. and Active Laser Illumina. III, pp. 25–32,.
- [42] M. D. Pelusi, et al., 1998"Phase modulation of stretched optical pulses for suppression of third-order dispersion effects in fibre transmission," Electronics Letters, vol. 34, pp. 1675-1677,.
- [43] Prokes A. and. Skorpil, V (2009)"Estimation of free space optics systems availability based on meteorological visibility," presented at IEEE Latin-American Conference on Communications, 2009. LATINCOM '09. , 2009
- [44] Roy R., Babu, JS, (2015) Simulation and Performance Analysis of Free Space Optical Systems using Multiple TX/RX and Polarized CO-OFDM techniques under Atmospheric Disturbances, International Journal of Engineering Research and General Science 3
- [45] Sheets, W., Graf, R.F., Modulation Methods – Frequency Modulation, <http://www.northcountryradio.com/PDFs/121102012.pdf>

- [46] V. G. Sidorovich, 2002 “Solar background effects in wireless optical communications,” Proc. SPIE , Opt. Wireless Comm. V, vol. 4873,
- [47] Stoehr, M.D., RF Basics, PMTS, ISM-RF Strategic Applications Wireless Telegraphy, Patent No. 711,130, Harry Shoemaker, Filed 16 Oct 1901, Patented 14 Oct 1902, U.S. Patent Office, <http://www.google.com/patents/US711130>
- [48] Suriza, A.Z. I. M. Rafiqul, A. K. Wajdi, and A. W. Naji, 2013 “Proposed parameters of specific rain attenuation prediction for free space optics link operating in tropical region,” J. of Atmosp. and Solar-Terres. Phys.,vol. 94, pp. 93–99,.
- [49] Tang, Y., Pearce, M.B., Wilson,S.(2012) Link Adaptation for Throughput Optimization of Parallel Channels with Application to Hybrid FSO/RF Systems, IEEE Transactions on communications 60, 2723-2732
- [50] G. Thuillier, M. Herse, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. C. Simon, and H. Mandel, 2003 The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer ATLAS and EURECA missions, vol. 214. Kluwer Academic Publisher, Netherlands,
- [51] G. A. Tyler, 1994 “Bandwidth considerations for tracking through turbulence,” J. Opt. Soc. Am., vol. 11, no. 1, pp. 358–367,
- [52] Yuksel, H. 2005Studies of the Effects of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communications, Ph.D. Dissertation, Univ. of Maryland, College Park,
- [53] L. R. Varshney, “Transporting information and energy simultaneously,” in Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, pp. 1612-1616, Toronto, Ontario, Canada, July 2008
- [54] H. J. Visser, and R. J. Vullers, (2013) “RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: Principles and requirements,” in Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1410-1423.
- [55] H. Weichel, 1990 Laser Beam Propagation in the Atmosphere. SPIE, Bellingham, WA, [https://books.google.gr/books?id=OzkZOo5SRj8C&dq=Laser+Beam+Propagation+in+the+Atmosphere&lr=&hl=el&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.gr/books?id=OzkZOo5SRj8C&dq=Laser+Beam+Propagation+in+the+Atmosphere&lr=&hl=el&source=gbs_navlinks_s) .
- [56] Wells (2009), Faster than fiber, IEEE Microwave Magazine, vol. 10, 104–112, May 2009
- [57] W. D. Williams, M. Collins, D. M. Boroson, J. Lesh, A. Biswas, R. Orr, L. Schuchman, and O. Scott Sands, 2007 “RF and optical communications: A comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 timeframe,” Tech. Report: NASA/TM-2007-214459,.
- [58] Xiao, L., Wang, P., Niyato, D., Han, Z., (2014) Resource Allocation in Wireless Networks with RF Energy Harvesting and Transfer, IEE Network <http://arxiv.org/pdf/1405.5630.pdf>
- [59] Zhang, J., (2000) □ Modulation Analysis for Outdoors Applications Of Optical Wireless Communications, Communication Technology Proceedings, 2000. WCC - ICCT 2000. International Conference on, 2
- [60] Chapter 3 Amplitude Modulation Fundamentals [http://www.pa2old.nl/files/am\\_fundamentals.pdf](http://www.pa2old.nl/files/am_fundamentals.pdf)
- [61] The Superheterodyne Receiver, <http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/superhet.htm#receiver>
- [62] <http://fourier.eng.hmc.edu/e84/lectures/ch4/node1.html>