

## Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεματικής

## ПТҮХІАКН МЕЛЕТН

## ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΚΩΝ. ΣΤΡΑΤΟΓΛΟΥ

Μοντελοποίηση υψίρυθμων οπτικών συστημάτων μετάδοσης

## επιβλεπων

Θ. Καμαλάκης, Λέκτορας

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Μ. Νικολαΐδου, Καθηγήτρια

Χ. Μιχαλακέλης, Λέκτορας

Αθήνα 2013

Στον Καθηγητή

Και Δάσκαλο

Γεώργιο Καραμπατζό

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΊΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Επίκουρο Καθηγητή του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, κ. Θωμά Καμαλάκη για την καθοδήγηση και την στήριξή του κατά την εκπόνηση την πτυχιακής μου εργασίας.

Την Καθηγήτρια κ. Μάρα Νικολαΐδου καθώς και τον Λέκτορα, κ. Χρήστο Μιχαλακέλη για την στήριξή τους.

Την οικογένειά μου για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη που έδειξαν σε αυτή τη δύσκολη περίοδο της ζωής μου.

Τους φίλους μου και την παρέα του Σχαροκοπείου που είναι πάντα δίπλα μου.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ПЕРІЛНҰН	8
ABSTRACT	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Οι επικοινωνίες στα ασύρματα δίκτυα	10
1. Εισαγωγή	10
1.1. Ιστορική αναδρομή	10
1.2. Οι επικοινωνίες στα ασύρματα κανάλια	11
1.3. Χρονική ιστορική αναδρομή για τις οπτικές ίνες	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Οι επικοινωνίες με τις Οπτικές ίνες	16
1. Εισαγωγή	16
2.1. Τι είναι οι οπτικές ίνες	16
2.2. Πως λειτουργούν οι οπτικές ίνες	17
2.2.1. Οι τύποι των οπτικών ινών	18
2.2.2. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών	18
2.2.2.1. Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών	18
2.2.2. Τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βασικές αρχές των ασύρματων επικοινωνιών	20
1. Εισαγωγή	20
3.1. Τι είναι οι ασύρματες επικοινωνίες	20
3.2. Τι είναι Ενισχυτής	21

3.3. Τι είναι Πομπός	22
3.4. Τι είναι Δέκτης	23
3.5. Χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών διάδοσης	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δίκτυα οπτικών ινών	25
1. Εισαγωγή	25
4.1. Δίκτυα οπτικών ινών: συστήματα μετάδοσης	25
4.1.1. Τι είναι το Σύστημα διαχείρισης διασποράς πρώτης γενιάς	25
4.1.2. Τι είναι ο Σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης διασποράς	25
4.1.3. Τι είναι η Ενσωματωμένη οπτική αντιστάθμιση διασποράς σε ένα σύστ	ημα <b>26</b>
4.2. Δίκτυα οπτικών ινών: κανάλια διαλείψεων	27
4.2.1. Τι είναι οι Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών	27
4.2.2. Τι είναι οι Βραχύχρονες ή Ταχείες Διαλείψεις (Fast Fading)	29
4.2.3. Τι είναι οι Μακρόχρονες ή Βραδείες Διαλείψεις (Slow Fading)	31
4.3. Ο θόρυβος στα οπτικά συστήματα	31
4.3.1. Ο εξωτερικός θόρυβος	32
4.3.1.1. Ατμοσφαιρικός Θόρυβος	33
4.3.1.2. Εξωγήινος Θόρυβος	34
4.3.1.3. Βιομηχανικός Θόρυβος	35
4.3.2. Εσωτερικός θόρυβος	36
4.3.2.1.Θερμικός Θόρυβος	36
4.3.2.2. Shot Θόρυβος	38
4.3.2.3. Θόρυβος Μεταβλητού Χρόνου (Transit-time)	40

, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	41
КЕФАЛАІО 5: GNU Octave	
5.1. Τι είναι το GNU Octave	42
5.2 Ιστορική αναδρομή	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος	
1. Εισαγωγή	44
1. Εισαγωγή 6.1. Στάδια υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος	44 44
<ol> <li>Εισαγωγή</li> <li>Εισαγωγή</li> <li>Στάδια υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος</li> <li>Αποτελέσματα</li> </ol>	44 44 61

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διάδοση του Gaussian παλμού στην ίνα
Σχήμα 2: Ο τελικός παλμός μετά την αύξηση του φίλτρου
Σχήμα 3: Ο τελικός παλμός μετά την μείωση του φίλτρου
Σχήμα 4: Διεύρυνση του Gaussian παλμού50
Σχήμα 5: Διεύρυνση του Gaussian παλμού με διαφορετικό πλάτος παλμού εισόδου
(1)
Σχήμα 6: Διεύρυνση του Gaussian παλμού με διαφορετικό πλάτος παλμού εισόδου
(2)
Σχήμα 7: Διάδοση του παλμού στο δεύτερο κομμάτι ίνας
Σχήμα 8: Διεύρυνση του Gaussian παλμού στο δεύτερο κομμάτι της ίνας
Σχήμα 9: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ κανονικοποιημένων δειγμάτων57
Σχήμα 10: Σύγκριση κανονικοποιημένης συνάρτησης αυτοσυσχέτισης με την
εκθετική συνάρτηση
Σχήμα 11: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ μη κανονικοποιημένων δειγμάτων 60

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην πτυχιακή αυτή μελέτη, με τίτλο "Μοντελοποίηση υψίρυθμων οπτικών συστημάτων μετάδοσης" ασχολούμαστε με τις επικοινωνίες στα ασύρματα δίκτυα ακολουθώντας την εξέλιξή τους στον 20ο και στον 21ο αιώνα και εκτενής ανάλυση στον τομέα των επικοινωνιών με οπτικές ίνες.

Αρχικά, εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και μελετάται η λειτουργία τους, και ακολουθούν οι βασικές αρχές των ασύρματων επικοινωνιών και τα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών διάδοσης.

Η μελέτη στη συνέχεια επεκτείνεται στα δίκτυα των οπτικών ινών και γίνεται αναφορά τόσο στα συστήματα μετάδοσης όσο και στα κανάλια διαλείψεων. Στη συνέχεια, αναλύεται εκτενώς ο πολύ σημαντικός τομέας του θορύβου στα οπτικά συστήματα και περιγράφονται τα είδη θορύβων και οι επιδράσεις τους στα συστήματα αυτά.

Το κεφάλαιο 5 επικεντρώνεται στο περιεχόμενο του προγράμματος GNU Octave, το οποίο παρέχει δυνατότητες για αριθμητική λύση των γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων καθώς και για την πραγματοποίηση άλλων αριθμητικών πειραμάτων.

Τέλος, η έρευνα ολοκληρώνεται με την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος οπτικών ινών και μελετάται η συμπεριφορά ενός Gaussian παλμού μέσα στο σύστημα αυτό.

#### ABSTRACT

The following thesis with the title "Modeling of high rate transmission visual systems", examines the advances made in wireless communications throughout the 20th and the 21st centuries. Also, an extensive analysis is included on the field of communication.

First, the advantages and disadvantages of the optical fibers are examined together with their operation. In the third chapter, the basic principles of wireless communications are mentioned and the characteristics of the wireless transmission channels.

The study then moves on to the optical fiber systems and a reference is made on not only the transmission systems but also on the optical transmission system impairments. Then, the very important part of noise in optical systems is elaborated on and an analysis is made on the kinds of noise and their impact on these systems.

Chapter 5 focuses on GNU Octave and the numerical solution of linear and non-linear problems as well as the solution to other numerical experiments.

Finally, the survey is focused on the implementation of an optical fiber complete system and the performance of a Gaussian pulse is analyzed through this system.

#### 1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και την εξέλιξή τους, καθώς και με τις επικοινωνίες στα ασύρματα κανάλια και τους όρους που χρησιμοποιούνται, τόσο στο σύστημα οπτικών ινών το οποίο αναλύουμε παρακάτω όσο και στις οπτικές επικοινωνίες γενικότερα.

#### 1.1. Ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

Η εφεύρεση του ηλεκτρικού στοιχείου από τον Alessandro Volta to 1799 υπήρξε μία από τις πρωταρχικές εφευρέσεις μεγίστης σημασίας για τις επικοινωνίες. Η εφεύρεση αυτή επέτρεψε στον Samuel Morse να αναπτύξει τον ηλεκτρικό τηλέγραφο του οποίου την επίδειξη έκανε το 1837. Ο Morse επινόησε τον δυαδικό κώδικα μεταβλητού μήκους στον οποίο τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου αναπαραστάθηκαν με μία ακολουθία από τελείες και παύλες (κωδικές λέξεις).

Ο κώδικας Morse υπήρξε ο πρόδρομος των μεθόδων κωδικοποίησης πηγής με κωδικές λέξεις διαφορετικού μήκους. Είναι αξιοσημείωτο, ότι η αρχέτυπη αυτή μορφή ηλεκτρονικών επικοινωνιών που αναπτύχθηκε από τον Morse, δηλαδή, η τηλεγραφία, ήταν ένα σύστημα δυαδικής ψηφιακής επικοινωνίας στο οποίο τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου ήταν κωδικοποιημένα αποτελεσματικά με αντίστοιχες μεταβλητού μήκους κωδικές λέξεις με δυαδικά στοιχεία.

Η εγκατάσταση του πρώτου υπερατλαντικού καλωδίου το 1858, πού συνέδεσε τις ΗΠΑ με την Ευρώπη αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο για την τηλεγραφία. Το καλώδιο αυτό έπαψε να λειτουργεί μετά από τέσσερις περίπου εβδομάδες λειτουργίας. Μερικά χρόνια αργότερα τοποθετήθηκε ένα δεύτερο καλώδιο που μπήκε σε λειτουργία τον Ιούλιο το 1866.

Η Τηλεφωνία γεννήθηκε με την εφεύρεση του τηλεφώνου τη δεκαετία του 1870. Το 1876 ο Alexander Graham Bell κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία για την εφεύρεση της τηλεφωνίας. Το 1877 ίδρυσε την Τηλεφωνική Εταιρεία Bell (Bell Telephone Company). Οι πρώτες παραλλαγές συστημάτων τηλεφωνίας ήταν σχετικά απλές και παρείχαν υπηρεσίες για αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μιλίων. Σημαντικές πρόοδοι στην εμβέλεια και στην ποιότητα της υπηρεσίας τηλεφωνίας επιτεύχθηκαν στις δύο πρώτες δεκαετίες του εικοστού αιώνα χάρις στην εφεύρεση του μικροφώνου άνθρακα και του επαγωγικού πηνίου.

Η εφεύρεση της τριόδου ενισχύτριας λυχνίας κενού από τον Lee De Forest το 1906 κατέστησε δυνατή την εισαγωγή ενισχυτών σήματος στα συστήματα τηλεφωνικής επικοινωνίας και επομένως, επέτρεψε τη μετάδοση τηλεφωνικού σήματος σε μεγάλες αποστάσεις. Για παράδειγμα, με τον τρόπο αυτό άρχισαν να λειτουργούν το 1915 διηπειρωτικές τηλεφωνικές επικοινωνίες.

Οι δύο παγκόσμιοι πόλεμοι και η μεγάλη οικονομική κρίση της δεκαετίας του 1930 είχαν όπως φαίνεται αποτρεπτική επίδραση στην εγκαθίδρυση διηπειρωτικής τηλεφωνικής υπηρεσίας, η οποία δεν υπήρξε μέχρι το 1953, όταν εγκαταστάθηκε το πρώτο διατλαντικό καλώδιο, οπότε και έγινε διαθέσιμη η τηλεφωνική υπηρεσία μεταξύ Ηνωμένων Πολιτειών και Ευρώπης.

Η αυτόματη μεταγωγή ήταν μια άλλη σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη της τηλεφωνίας. Ο πρώτος μεταγωγέας που αναπτύχθηκε το 1897 από τον Strowger, ήταν ένας ηλεκτρομηχανικός 'βηματικός' (step-by-step) μεταγωγέας. Ο τύπος αυτός του μεταγωγέα χρησιμοποιήθηκε επί αρκετές δεκαετίες. Με την εφεύρεση του transistor έγινε οικονομικά εφικτή η ηλεκτρονική (ψηφιακή) μεταγωγή. Μετά από αρκετά χρόνια ανάπτυξης στα εργαστήρια Bell Telephone τέθηκε σε λειτουργία ένας ψηφιακός μεταγωγέας στο Illinois τον Ιούνιο του 1960.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριάντα ετών υπήρξαν πολυάριθμες σημαντικές πρόοδοι στις τηλεφωνικές επικοινωνίες. Τα καλώδια οπτικών ινών εκτοπίζουν γρήγορα τα χάλκινα στις τηλεφωνικές εγκαταστάσεις και οι ηλεκτρονικοί μεταγωγείς αντικατέστησαν τα παλιά ηλεκτρομηχανικά συστήματα.

#### 1.2. Οι επικοινωνίες στα ασύρματα κανάλια

Ο σκοπός του οποιουδήποτε ασύρματου συστήματος επικοινωνιών είναι να μεταφερθούν πιστά οι πληροφορίες μεταξύ της πηγής και του προορισμού.

Αρχικά, τα πρώτα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιήθηκαν από τα αστυνομικά τμήματα σε πόλεις των ΗΠΑ για λόγους δημόσιας ασφάλειας. Η πρώτη εμφάνιση κινητής ασύρματης ζεύξης πραγματοποιείται στους 2 μεγακύκλους γύρω στα 1921 στο πλαίσιο των αναγκών της αστυνομίας του Detroit. Το 1934 εγκαταστάθηκαν σε 252 αστυνομικά τμήματα τα πρώτα συστήματα κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιούσαν αναλογική διαμόρφωση πλάτους (AM). Με την εισαγωγή το 1935 της διαμόρφωσης συχνότητας (FM), όλα τα συστήματα κινητών επικοινωνιών υιοθέτησαν την FM διαμόρφωση.

Στη δεκαετία του 1960, η AT&T Bell Labs καθώς και άλλες εταιρίες τηλεπικοινωνιών, ανέπτυξαν τις βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων. Η βασική ιδέα ήταν ο χωρισμός μιας περιοχής κάλυψης σε μικρές κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες επαναχρησιμοποιεί διαύλους, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα των συστημάτων. Όμως, μόλις το 1976, όταν η τεχνολογία ήταν πλέον ώριμη και ικανή να προσφέρει την απαραίτητη υποδομή, το WARC (World Administrative Radio Conference) ενέκρινε την απόδοση συχνοτήτων για κυψελωτά συστήματα στην περιοχή των 800/900MHz θέτοντας τη βάση για την ανάπτυξη εμπορικών συστημάτων.

Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας είναι δυναμικό και τυχαίο και, κατά περιόδους, το λαμβανόμενο σήμα δεν είναι αρκετά ισγυρό για να υπάρξει αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ του πομπού των σημάτων και του δέκτη. Η μέση ένταση των σημάτων που λαμβάνεται από μια κεραία μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, αλλά σε μερικές περιπτώσεις δεν είναι ασυνήθιστο η στιγμιαία στάθμη του σήματος σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) να πέσει 30 db ή περισσότερο κάτω από το μέσο επίπεδό του. Κατά τη διάρκεια αυτών των απότομων πτώσεων της στάθμης του σήματος το μήνυμα είναι πιθανό να παραληφθεί ανακριβώς. Προκειμένου να αντισταθμιστεί η εξασθένιση που παρουσιάζεται εξαιτίας του καναλιού και για να εξασφαλιστεί ότι η πληροφορία δεν αποκωδικοποιείται λανθασμένα, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια λήψης των ασθενών σημάτων από την κεραία. Τα περισσότερα όμως ασύρματα συστήματα επικοινωνιών είναι χαμηλής ισχύος και δεν έχουν τη δυναμική περιοχή που χρειάζεται για να αντιμετωπίσουν τις διαλείψεις (fading). Παρόλα αυτά, η αύξηση της αξιοπιστίας σε ένα περιβάλλον διαλείψεων πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) χωρίς αύξηση της ισχύος εκπομπής, μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας σύστημα λήψης διαφορισμού κεραιών (antenna diversity systems).

Οι πολλαπλές κεραίες στο δέκτη έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για να εξαλείψουν τις διακυμάνσεις της έντασης των σημάτων, ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις της εξασθένησης των σημάτων κατά τη διάρκεια των διαλείψεων. Στο

12

σύστημα λήψης διαφορισμού κεραιών όλα τα στοιχεία των κεραιών λαμβάνουν τα σήματα. Η χρησιμοποίηση διαφορετικών κεραιών αυξάνει την πιθανότητα ότι ένα ή περισσότερα από τα στοιχεία θα λάβουν τα σήματα με την επαρκή ένταση. Η μείωση των περιστατικών εξασθένισης βελτιώνει τη γενική αξιοπιστία των λαμβανόμενων πληροφοριών και επομένως επιτρέπει μεγαλύτερες αποστάσεις κάλυψης.

Στις παρούσες κυψελοειδείς κινητές ραδιοεπικοινωνίες (824-894 MHz), η χρήση των πολλαπλών κεραιών περιορίστηκε σχεδόν αποκλειστικά στους σταθμούς βάσεων που ήταν διαθέσιμη μια αρκετά μεγάλη περιοχή, για να τοποθετηθούν διάφορες ογκώδεις κεραίες. Είναι ευρέως γνωστό, ότι το μέγεθος της κεραίας είναι άμεσα ανάλογο προς το μήκος κύματος. Η αύξηση στις συχνότητες επικοινωνίας, ως συνέπεια, συνοδεύθηκε από μια μείωση του μεγέθους των στοιχείων κεραιών. Επιπλέον, στις συχνότητες PC (1850-1990 MHz) ή υψηλότερες, έχει γίνει εφικτό να υπάρχουν πολλαπλές κεραίες όχι μόνο στο σταθμό βάσεων αλλά και στην κινητή μονάδα.

Τελευταία, τα περισσότερα ενσύρματα συστήματα επικοινωνιών αντικαθίστανται από καλώδια οπτικών ινών που παρέχουν εξαιρετικά μεγάλο εύροςζώνης καθιστώντας δυνατή τη μετάδοση μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών φωνής, δεδομένων, video, και πολυμέσων. Η κυψελωτή ραδιοεπικοινωνία κινητών έχει αναπτυχθεί προσφέροντας υπηρεσίες φωνής σε συνδρομητές που κινούνται με αυτοκίνητα, τρένα και λεωφορεία. Δίκτυα υψίρυθμων επικοινωνιών συνδέουν υπολογιστές και μια ποικιλία περιφερειακών διατάξεων που είναι διασπαρμένες κυριολεκτικά σε όλο τον κόσμο.

Στη σημερινή εποχή γινόμαστε, σχεδόν καθημερινά, μάρτυρες μίας σημαντικής ανάπτυξης στην εισαγωγή και χρήση υπηρεσιών προσωπικών δεδομένων που περιλαμβάνουν μετάδοση φωνής, δεδομένων και video. Δίκτυα δορυφόρων και οπτικών ινών παρέχουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες μεγάλου εύρους-ζώνης (πολύ υψηλού ρυθμού) περίπου σε όλο τον κόσμο. Πραγματικά, πρόκειται για την αυγή μίας νέας εποχής για τις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες.

13

#### 1.3 Χρονική ιστορική αναδρομή για τις οπτικές ίνες

- 1910 Ανάλυση διηλεκτρικού κυματοδηγού (Debye, Χόνδρος)
- 1955 Ανακάλυψη οπτικής ίνας
- 1962 Ανακάλυψη laser ημιαγωγού
- **1965** Πρώτη χρήση οπτικής ίνας στις οπτικές τηλεπικοινωνίες με μεγάλη απώλεια (>20dB/Km)
- 1972 Η Corning κατασκευάζει οπτική ίνα με απώλεια 4dB/Km
- 1977 Πρώτο σύστημα οπτικών τηλεπικοινωνιών (Σικάγο, Η.Π.Α.)
- **1980** Η Bell Telephone Systems ανακοινώνει σχέδια για την κατασκευή του ΤΑΤ-8 (του πρώτου διατλαντικού δικτύου)
- 1987 Επιδεικνύονται ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA)
- Δεκαετία '90 Η ανάγκη να αυξηθεί η χωρητικότητα στην ίνα, οδηγεί στην εξέταση τεχνικών για πολυπλεξία κατά μήκος κύματος
- 1990 Οι ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA) γίνονται εμπορικά διαθέσιμοι
- 1996 –1999 Σχεδιάζονται και υλοποιούνται τα δια-ατλαντικά οπτικά δίκτυα (ΤΑΤ 12/13, ΤΑΤ 14, FlagAtlantic-1)

Η διέλευση του FlagAtlantic-1 φτάνει τα 5 Tbit/s και περιλαμβάνει 297επαναλήπτες

2000 Ανακοινώνεται η έναρξη του FlagPacific-1, που θα μεταφέρει συνολικά 10.24 Tbit/s δεδομένα σε ένα μήκος 24000 Km αποτελούμενο από 447 επαναλήπτες.
2001 Ανακοινώνεται η έναρξη του έργου Apollo με μήκος 13000 Km, το οποίο πρόκειται να ενώσει ΗΠΑ, Αγγλία και Γαλλία μεταφέροντας 3.2 Tbit/s. Είναι WDM δίκτυο και χρησιμοποιεί 80 κανάλια των 10 Gbit/s

2002 Το FlagPacific-1και το Apollo είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμα

Αναλυτικότερα: Η συνολική εσωτερική αντανάκλαση, το βασικό φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την καθοδήγηση του φωτός μέσα στις οπτικές ίνες- είναι γνωστό από το 19° αιώνα. Παρόλο που οι γυμνές οπτικές ίνες κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1920, ο τομέας των οπτικών ινών δεν είχε εμφανιστεί μέχρι τη δεκαετία του 1950, όταν η χρήση επίστρωσης οδήγησε σε αξιόλογη βελτίωση στα χαρακτηριστικά της ίνας.

Η ιδέα ότι οι οπτικές ίνες θα ωφελούνταν από μια διηλεκτρική επίστρωση δεν ήταν προφανής κι έχει αξιοσημείωτη θεωρία. Ο τομέας των οπτικών ινών

αναπτύχτηκε ραγδαία τη δεκαετία του 1960, με σκοπό τη μετάδοση εικόνας μέσα από μια δέσμη οπτικών ινών. Αυτές οι πρώτες οπτικές ίνες είχαν υπερβολική απώλεια (1000 dB/km) από το τρέχον επίπεδο.

Όμως, η κατάσταση άλλαξε πάρα πολύ το 1970 όταν, ακολουθώντας μια παλιότερη πρόταση, οι απώλειες των ινών πυριτίου ελαττώθηκαν σε λιγότερο από 20 dB/Km. Μεγαλύτερη πρόοδος στην τεχνολογία κατασκευών κατέληξε το 1979 σε απώλεια μόνο 0.2 d.B/Km στο 1.55- m περιοχή μήκους κύματος. Το επίπεδο απώλειας περιοριζόταν βασικά από την ουσιαστική διαδικασία της διάχυσης Rayleigh.

Η διαθεσιμότητα ινών πυριτίου με χαμηλή απώλεια οδήγησε όχι μόνο σε επανάσταση στον τομέα της επικοινωνίας μέσω οπτικών ινών, αλλά και στην άφιξη του καινούριου τομέα των μη γραμμικών οπτικών ινών. Οι παλμοί 6fs δημιουργήθηκαν το 1987. Υπάρχουν αρκετές έρευνες και βιβλία που καλύπτουν την τεράστια πρόοδο που έγινε τη δεκαετία του 1980.

Ο τομέας των οπτικών ινών συνέχισε να αναπτύσσεται και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990. Μια καινούρια διάσταση δόθηκε όταν οι οπτικές ίνες εμπλουτίστηκαν με σπάνια γήινα στοιχεία και χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία ενισχυτών και λέιζερ.

Παρόλο που οι ενισχυτές ινών είχαν δημιουργηθεί ήδη από το 1964, η ανάπτυξη τους ξεκίνησε το 1987. Ενισχυτές ινών εμπλουτισμένοι με έρβιο προσέλκυσαν την προσοχή γιατί λειτουργούν σε περιοχή μήκους κύματος περίπου 1.55m και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενίσχυση απωλειών στα συστήματα οπτικών ινών. Τέτοιοι ενισχυτές χρησιμοποιήθηκαν για εμπορικές εφαρμογές από το 1995. Η χρήση τους έχει οδηγήσει σε ουσιαστική επανάσταση στο σχεδιασμό πολυκάναλων συστημάτων. Επίσης, έχει οδηγήσει σε πρόοδο πολλούς τομείς τόσο από θεμελιώδη όσο και από τεχνολογική άποψη. Το ενδιαφέρον για τις μη γραμμικές οπτικές ίνες θα πρέπει να συνεχιστεί με σκοπό την ανάπτυξη τεχνολογιών βασισμένων σε φωτόνια για την διαχείριση των πληροφοριών.

15

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Οι επικοινωνίες με τις Οπτικές ίνες

#### 1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 2 θα μελετήσουμε τις οπτικές ίνες, τη λειτουργία , τους τύπους καθώς και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματά τους.

#### 2.1. Τι είναι οι οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες, είναι πολύ λεπτά νήματα από πλαστικό ή γυαλί, όπου από μέσα τους, μεταδίδονται ψηφιακά δεδομένα, υπό μορφή φωτός. Ένα καλώδιο οπτικών ινών, περιέχει μέσα του 10άδες ή και 100άδες πολύ λεπτές τέτοιες οπτικές ίνες, σε διάμετρο, μικρότερη και από μία τρίχα! Οι ταχύτητες μετάδοσης των δεδομένων μέσω των οπτικών ινών, αφού τα δεδομένα ταξιδεύουν υπό μορφή φωτός, είναι τεράστια (όσο η ταχύτητα του φωτός).

Στην πιο απλή της μορφή μια οπτική ίνα αποτελείται από ένα κεντρικό γυάλινο πυρήνα, ο οποίος περιβάλλεται από επίστρωση του οποίου ο δείκτης διάθλασης n2 είναι ελαφρώς μικρότερος από το δείκτη διάθλασης n1. Τέτοιες ίνες γενικά αναφέρονται ως Ίνες Βηματικού Δείκτη Διάθλασης για να ξεχωρίζουν από τις Ίνες Διαβαθμισμένου Δείκτη Διάθλασης στις οποίες ο Δείκτης Διάθλασης του πυρήνα μειώνεται σταδιακά από το κέντρο μέχρι το όριο του πυρήνα.

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με τα κατευθυνόμενα ηλεκτρόνια ενός διηλεκτρικού, η μέση ανταπόκριση, γενικά, εξαρτάται από την οπτική συχνότητα. Αυτή η ιδιότητα που αναφέρεται ως χρωματική διασπορά, εκδηλώνεται μέσα από την συχνότητα εξάρτησης του Δείκτη Διάθλασης. Σε θεμελιώδες επίπεδο, η προέλευση της χρωματικής διάχυσης σχετίζεται με τις χαρακτηριστικές συχνότητες αντήχησης στις όποιες το μέσο απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσω ταλαντώσεων των κατευθυνόμενων ηλεκτρονίων.

Η διασκόρπιση των ινών παίζει κρίσιμο ρόλο στην αναπαραγωγή - διάδοση των μικρών οπτικών παλμών, γιατί διαφορετικά φασματικά συστατικά συνδέθηκαν με το ταξίδι του παλμού σε διαφορετικές ταχύτητες δοσμένα από cn. Ακόμα και όταν οι μη γραμμικές επιδράσεις δεν είναι σημαντικές η διεύρυνση του παλμού που προκαλείται από διάχυση, μπορεί να είναι επιβλαβής για τα οπτικά επικοινωνιακά

16

συστήματα. Στο μη γραμμικό καθεστώς, ο συνδυασμός της διάχυσης και της μη γραμμικότητας μπορεί να καταλήξει σε ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά.

#### 2.2. Πως λειτουργούν οι οπτικές ίνες

Στο ένα άκρο της οπτικής ίνας, υπάρχει ο πομπός και στο άλλο, ο δέκτης. Ο πομπός, μετατρέπει τα ψηφιακά δεδομένα ενός υπολογιστή, σε ψηφιακά κύματα φωτός. Ο δέκτης, αποκωδικοποιεί τα ψηφιακά κύματα φωτός, σε ψηφιακά δεδομένα. Τα ψηφιακά κύματα φωτός ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός μέσα από την οπτική ίνα, με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της οπτικής ίνας. Οι ανακλάσεις αυτές, γίνονται στα τοιχώματα, σε γωνία μικρότερη των 42 μοιρών, με αποτέλεσμα να λειτουργούν τα τοιχώματα σαν καθρέφτες.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ολική ανάκλαση** και είναι η αιτία που τα κύματα φωτός μένουν μέσα στην οπτική ίνα, συνεχίζοντας το ταξίδι τους μέχρι το άλλο άκρο, χωρίς να χάνονται έξω από την ίνα.

Σε αυτό συνεισφέρει και η δομή της. Το εσωτερικό μέρος της **οπτικής ίνας**, ονομάζεται πυρήνας και μέσω αυτού, ταξιδεύουν τα κύματα φωτός. Ο πυρήνας, είναι περιτυλιγμένος από μία άλλη στρώση πλαστικού - γυαλιού που ονομάζεται περίβλημα.



Το περίβλημα των οπτικών ινών, είναι έτσι κατασκευασμένο, ώστε να κρατάει τα κύματα φωτός, με ολικές ανακλάσεις, μέσα στον πυρήνα και να συνεχίζουν το ταξίδι τους μέσω αυτού. Το περίβλημα το πετυχαίνει αυτό, λόγω της διαφορετικότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο, σε σχέση με το υλικό του πυρήνα.

#### 2.2.1. Οι τύποι των οπτικών ινών

Υπάρχουν οι οπτικές ίνες απλού τύπου και οι πολλαπλού τύπου. Στις οπτικές ίνες απλού τύπου (single-mode), τα κύματα φωτός ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή και μπορούμε να στείλουμε δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Οι οπτικές ίνες πολλαπλού τύπου (multi-mode), είναι πιο "χοντρές" από τις απλού τύπου, αλλά μπορούν να στείλουν παράλληλα, σε ξεχωριστό μονοπάτι, πολλά κύματα φωτός. Το κάθε κύμα φωτός, εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα, και ακολουθεί το δικό του μονοπάτι μέσα της, μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων στο περίβλημα.



Multi-mode fiber

Αυτό συμβαίνει παράλληλα με πολλά κύματα φωτός (όλα σε διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα) κι έτσι μπορούμε να στείλουμε παράλληλα, τεράστιο όγκο δεδομένων!

#### 2.2.2. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών

#### 2.2.2.1. Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι κατά σειρά τα ακόλουθα: α. μπορούν να μεταφέρουν παράλληλα πολύ μεγαλύτερο όγκο δεδομένων σε σχέση με το χάλκινο καλώδιο, β. η μεταφορά των δεδομένων γίνεται γρηγορότερα, γ. είναι λιγότερο ευάλωτα τα δεδομένα που ταξιδεύουν μέσα τους σε παρεμβολές, δ. είναι πολύ πιο λεπτές και ελαφρύτερες από το χάλκινο καλώδιο και ε. τα δεδομένα μεταδίδονται ψηφιακά με αποτέλεσμα την πιο γρήγορη κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση δεδομένων, σχεδόν χωρίς καθόλου απώλειες δεδομένων.

#### 2.2.2.2. Τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών

Τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών είναι κατά σειρά τα ακόλουθα: α. είναι πιο ακριβές, β. είναι πιο δύσκολη η εγκατάστασή τους, γ. είναι πιο εύθραυστες, δ. δε μπορούμε να τις λυγίζουμε πολύ, γι αυτό θα πρέπει να τις εγκαθιστούμε με ελαφριά κλίση, γιατί διαφορετικά θα έχουμε απώλειες.

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βασικές αρχές των ασύρματων επικοινωνιών

#### 1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις ασύρματες επικοινωνίες και στα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών διάδοσης.

#### 3.1. Τι είναι οι ασύρματες επικοινωνίες

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των καναλιών επικοινωνίας είναι η εξασθένηση, η οποία υποδιαιρείται στην εξασθένηση σκίασης (shadowing fading) και στην εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών (multipathfading). Η εξασθένηση σκίασης είναι το φαινόμενο της ισχνότητας του σήματος που οφείλεται στα εμπόδια γύρω από τον δέκτη. Η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών είναι τα αθροιστικά αποτελέσματα που προέρχονται από διάφορους διασκορπιστές, ανακλαστήρες και διαθλαστήρες που περιβάλλουν τον πομπό και τον δέκτη.

Ένας πομπός και ένας δέκτης περιβάλλονται από διάφορα αντικείμενα που προκαλούν ανάκλαση και διασκόρπιση της μεταδιδόμενης ενέργειας, με αποτέλεσμα διάφορα κύματα να φθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές διευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation).

Η περίπτωση που το απευθείας κύμα δεν μπορεί να φτάσει στο δέκτη ονομάζεται διάδοση μη οπτικής επαφής (non-line-of-sight, NLOS). Συνήθως δεν γίνεται υπολογισμός της ισχύος του σήματος που φθάνει μέσω πολλαπλών διαδρομών, και αυτό γιατί απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης και των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών όλων των σκεδαστών. Αντίθετα, γίνεται μια στατιστική περιγραφή που φυσικά διαφέρει πολύ στην απευθείας και στη μη διάδοση του σήματος.

#### 3.2. Τι είναι Ενισχυτής



Σύμβολο ηλεκτρονικού ενισχυτή τροφοδοσίας  $V_{CC}$  εισόδου e<sub>+</sub>-e. και εξόδου s.

**Ενισχυτής** ονομάζεται η ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή που ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα. Ένα τυπικός ενισχυτής έχει τέσσερις εισόδους, μία κανονική έξοδο και μία γειωμένη έξοδο. Οι δύο πρώτες είσοδοι διαμορφώνουν μια διαφορά δυναμικού στον ενισχυτή, ώστε η τάση που εξέρχεται να ισούται με τη διαφορά δυναμικού επί το συντελεστή ενίσχυσης υπό ιδανικές συνθήκες. Οι άλλες δύο είσοδοι εισάγουν στον ενισχυτή δύο, θεωρητικά συμμετρικές, τάσεις με βάση τις οποίες λειτουργεί η ενίσχυση.

Όταν ενισχύεται η τάση, η επιπλέον τάση τροφοδοτείται στον ενισχυτή από δεύτερο ζευγάρι εξόδων, ως αποτέλεσμα η ενίσχυση δε μπορεί να ξεπεράσει αυτές τις τάσεις, οι οποίες ονομάζονται *τροφοδοσία*. Ο ιδανικός ενισχυτής ενισχύει την ηλεκτρική τάση γραμμικά μέχρι δύο συμμετρικά σημεία, ένα στα θετικά και το συμμετρικό στα αρνητικά.

Στη μικροηλεκτρονική τα κυκλώματα περιλαμβάνουν και την ανατροφοδότηση (Feedback), η οποία σταθεροποιεί την τάση. Αν η ανατροφοδότηση είναι αντίθετη, τότε οι τάσεις στην είσοδο γίνονται περίπου ίσες, και η ενίσχυση δίνει τάσεις συγκρίσιμες με αυτές του πρώτου ζεύγους των εισόδων. Τότε ο ενισχυτής ονομάζεται τελεστικός ενισχυτής, γιατί χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία για την εκτέλεση μετασχηματισμών και διάφορων πράξεων.

#### 3.3. Τι είναι Πομπός



Συσκευή πομπού

Ο πομπός αποτελεί επί το πλείστον μέρος ενός συστήματος επικοινωνίας. Ο πομπός είναι μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία συνήθως με τη βοήθεια μιας κεραίας, εκπέμπει σήματα που περιέχουν πληροφορίες όπως το ραδιοφωνικό, το τηλεοπτικό ή σήμα άλλων τηλεπικοινωνιών.

Ο πομπός δέχεται κάποια δεδομένα τα οποία μετασχηματίζει ή κωδικοποιεί για να μεταδοθούν σε κάποιο κανάλι ή μέσο μετάδοσης. Ως μέσα μετάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ο κενός χώρος, τα δισύρματα καλώδια, οι οπτικές ίνες κ.α. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πομπών είναι αυτοί της τηλεόρασης, του ραδιοφώνου, οι επίγειοι πομποί προς τους τηλεπικοινωνιακός δορυφόρους.

Στην επιστήμη της πληροφορικής, πομπός μπορεί να θεωρηθεί ένα modem, το οποίο δέχεται ροή ψηφιακών δεδομένων, τα οποία μετατρέπει σε αναλογικό σήμα πριν τα αποστείλει στο τηλεφωνικό δίκτυο.

Για να έχει νόημα η αποστολή δεδομένων πρέπει να υπάρχει και κάποιος παραλήπτης – δέκτης, ο οποίος κάνει την αντίστροφη εργασία, δηλαδή μετατρέπει τα δεδομένα του καναλιού μετάδοσης στα πρωτογενή που έλαβε ο πομπός.

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι πάσης φύσεως συσκευές ραντάρ, (επιφανείας, αέρος κλπ), τα ηλεκτρονικά βυθόμετρα, κ.ά. υποβρύχιες συσκευές που αποτελούν ταυτόχρονα πομποδέκτες των ιδίων (δικών τους) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

#### 3.4. Τι είναι Δέκτης

Ο Δέκτης είναι το άκρο ενός συστήματος επικοινωνίας. Δέχεται αποκωδικοποιημένες πληροφορίες από τον αποστολέα, ο οποίος τις κωδικοποιεί. Μερικές φορές, ο δέκτης είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να περιλαμβάνει τον αποκωδικοποιητή.

#### 3.5. Χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών διάδοσης

Η ασύρματη διάδοση ραδιοκυμάτων, τόσο για αυτά του εσωτερικού, όσο και για τα υπαίθριου τύπου περιβάλλοντα, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, κυρίως επειδή η συντομότερη διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμποδίζεται συνήθως από τοίχους, οροφές, ή άλλα αντικείμενα στην περίπτωση ενός εσωτερικού χώρου, ή από κτήρια και αλλά φυσικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα στην περίπτωση υπαίθριων εκτάσεων. Κατά συνέπεια, η ισχύς των εκπεμπόμενων σημάτων λαμβάνεται στο δέκτη μέσα από μια πολλαπλότητα των διαδρομών διαφορετικής έντασης η κάθε μία που ονομάζεται πολυδιόδευση (multipath).

Οι χρόνοι άφιξης των σημάτων από τις διάφορες διαδρομές είναι ανάλογη προς τα μήκη των διαδρομών που διανύθηκαν, ενώ επίσης επηρεάζονται από το μέγεθος, την αρχιτεκτονική του περιβάλλοντος, καθώς και από τις θέσεις των αντικειμένων γύρω από τον πομπό και τον δέκτη. Για παράδειγμα, επειδή οι αποστάσεις σε ένα περιβάλλον π.χ. γραφείων είναι σχετικά μικρές, οι καθυστερήσεις διάδοσης των κυμάτων τις πολυδιόδευσης είναι επίσης μικρές, με συνέπεια το λαμβανόμενο σήμα να χαρακτηρίζεται από μικρή παραμόρφωση, ενώ το αντίθετο συνήθως συμβαίνει σε ένα εξωτερικό περιβάλλον.

Οι εντάσεις των σημάτων σε αυτές τις διαδρομές εξαρτάται από την εξασθένιση που προκαλείται κατά την μετάβαση του κατευθείαν ή του ανακλώμενου σήματος, σε διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται μέσα στην διεύθυνση διάδοσης. Η ανάλυση που βασίζεται στην αιτιοκρατικούς μηχανισμούς διάδοσης σε ένα τέτοιο περιβάλλον μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο στις πλέον απλές περιπτώσεις.

Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, η στατιστική προσέγγιση είναι ακριβέστερη και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται. Στην μοντελοποίηση με

στατιστικά μοντέλα, οι στατιστικές παράμετροι των καναλιών συλλέγονται από πραγματικές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται στις διάφορες πιθανές θέσεις εγκαταστάσεις του πομπού και του δέκτη. Οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση του σήματος μέσα από το φυσικό μέσο διάδοσης είναι ανάκλαση, διάθλαση και σκέδαση.

Ανάκλαση πραγματοποιείται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενο με πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις από το μήκος κύματος του. Διάθλαση συμβαίνει όταν στη φυσική διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλονται μεγάλες ανομοιομορφίες. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, δευτερεύοντα κύματα ακολουθούν καμπύλη τροχιά γύρω από το εμπόδιο και τελικά ένα ποσοστό του σήματος φθάνει στο δέκτη, ακόμα και στην περίπτωση που δεν υπάρχει οπτική επαφή (line-of-sight) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Σε υψηλές συχνότητες, το φαινόμενο της διάθλασης εξαρτάται από τη γεωμετρία του αντικειμένου που παρεμβάλλεται, καθώς και από τα φυσικά χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κύματος.

Το φαινόμενο της σκέδασης παρατηρείται όταν το φυσικό μέσο διάδοσης αποτελείται από αντικείμενα μικρότερων διαστάσεων σε σχέση με το μήκος κύματος και με σχετικά μεγάλη πυκνότητα. Στην πράξη, η τροπόσφαιρα, τα πυκνά φυλλώματα και τα αέρια της ατμόσφαιρας προκαλούν το φαινόμενο της σκέδασης στις κινητές επικοινωνίες. Γενικά, σε σήματα περιορισμένης ζώνης, όπως το φορητό τηλέφωνο ή κατά τη μετάδοση χαμηλού ρυθμού δεδομένων, τα λαμβανόμενα κύματα δεν έχουν σημαντική χρονική διαφορά μεταξύ τους, αλλά μόνο διαφορετικές εντάσεις και φάσεις. Συνεπώς, το ολικό σήμα, το οποίο είναι η επαλληλία όλων των κυμάτων, είναι δυνατόν να είναι ενισχυμένο ή υποβαθμισμένο, λόγω της ενισχυτικής ή της καταστρεπτικής συμβολής που αντίστοιχα δημιουργείται.

Σε εφαρμογές μετάδοσης υψηλού ρυθμού δεδομένων, π.χ. σε συστήματα ευρείας ζώνης (wide band), τα λαμβανόμενα κύματα είναι δυνατόν να φθάνουν στο δέκτη σε ομάδες. Σε κάθε ομάδα, τα κύματα που την αποτελούν χαρακτηρίζονται από διαφορετικές εντάσεις και φάσεις, όπως στην περίπτωση σημάτων περιορισμένου εύρους ζώνης, αλλά οι ομάδες μεταξύ τους φθάνουν στο δέκτη με σημαντική χρονική διαφορά μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, το λαμβανόμενο σήμα παραμορφώνεται σημαντικά.

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δίκτυα οπτικών ινών

#### 1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στα Δίκτυα οπτικών ινών και στον θόρυβο, μια πολύ σημαντική παράμετρο στην αποδοτικότητα κάθε συστήματος

#### 4.1. Δίκτυα οπτικών ινών: συστήματα μετάδοσης

#### 4.1.1. Τι είναι το Σύστημα διαχείρισης διασποράς πρώτης γενιάς

Η διαχείριση της διασποράς είναι ένα θέμα ζωτικής σημασίας στα οπτικά συστήματα μετάδοσης. Μη γραμμικά αποτελέσματα έχουν την τάση να περιπλέκουν τη συμπεριφορά της διάχυσης και πρέπει να αναπληρώσουμε τη διάχυση ξεχωριστά σε κάθε διάστημα χρόνου (span).

Μονοκάναλα συστήματα 5Gb/s απασχόλησαν μια συγκεκριμένη διαμόρφωση, όπου μια ίνα DSF με αρνητικό D χρησιμοποιήθηκε και μετά από έναν αριθμό διαστημάτων χρόνου μια μικρή ίνα SMF χρησιμοποιήθηκε με θετικό D για να αναπληρώσει την συσσωρευμένη διάχυση. Έγινε σύντομα αντιληπτό ότι αυτή η διαμόρφωση δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πολυκάναλα συστήματα όπου FWM επέφερε σοβαρές βλάβες σε ίνες DSM.

#### 4.1.2. Τι είναι ο Σχεδιασμός ενός συστήματος διαχείρισης διασποράς

Για πολυκαναλική μετάδοση σε 10 Gb/s, μια εναλλακτική διαμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε κανάλι. Για να ελαττωθούν τα μη γραμμικά αποτελέσματα τοποθετείται πρώτα ένας μεγάλος πυρήνας ινών (LCF) σε κάθε ενισχυτή έχοντας αρνητική διάχυση. Ο μεγάλος πυρήνας του LCF εξασφαλίζει ότι τα μη γραμμικά αποτελέσματα εξασθενούν.

Μια ίνα μη μηδενικής διασποράς (Non Zero Dispersion Shifted Fiber NZDSF) με αρνητικό συντελεστή διάχυσης, ακολουθεί το LCF, εκεί που τα μη γραμμικά αποτελέσματα ελαττώνονται, αφού μέρος της ισχύος του σήματος (signal power) απορροφάται από το LCF. Ένα SMF τοποθετημένο μετά από ένα αριθμό διαστημάτων χρόνου εναλλάσσει το ίχνος (sign) της συσσωρευμένης διάχυσης. Η εναλλαγή ίχνους, η οποία επαναλαμβάνεται πολλές φορές κατά τη διάρκεια της σύνδεσης, είναι σημαντική αφού η μεγίστη απόλυτα συσσωρευμένη διάχυση θα πρέπει να διατηρείται χαμηλά, για να αποφευχθεί ο XPM-προκληθείς υποβιβασμός.

Μια προσέγγιση για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, είναι να χρησιμοποιηθεί αντιστάθμιση διασποράς πριν ή μετά, ξεχωριστά σε κάθε πλευρά πομπού/δέκτη. Αυτή η τεχνική καταλήγει σε λιγότερο συσσωρευμένη μέγιστη διάχυση στα ακριανά κανάλια και γι αυτό προκαλείται λιγότερη cross phase παραμόρφωση. Είναι, γενικά, ιδανικό για 16 κανάλια spaced στα 100 GHz να λειτουργούν σε 10 Gbs.

# 4.1.3. Τι είναι η Ενσωματωμένη οπτική αντιστάθμιση διασποράς σε ένα σύστημα

Η αναπλήρωση της διάχυσης μπορεί να γίνει αντιληπτή χρησιμοποιώντας διακριτικούς αντισταθμιστές διάχυσης, επίσης. Οι δικτυωτοί κυματοδηγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτή την κατεύθυνση, αν η βασική τους γεωμετρία διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας μια μεταβλητή που απεικονίζει την γεωμετρία, της οποίας η καμπυλότητα μπορεί να ελεγχθεί εισάγοντας μια τεχνητή δεύτερη διάχυση. Η διαμορφωμένη καμπυλότητα εισάγει μια τεχνητή δεύτερη διάχυση. Με αυτό τον τρόπο φαίνεται ότι αναπληρώνει την συσσωρευμένη διάχυση ενός 40Gb/s πολυκαναλικού συστήματος με την προϋπόθεση να μην ξεφεύγει.

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιείται ηλεκτρονική αναπλήρωση διάχυσης η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι η παραμόρφωση που προκαλείται από διασπορά ανέρχεται σε μετατόπιση φάσης (ίση με  $\beta_2 \Omega^2 L/2$ ) στο φασματικό χώρο. Ελαττώνοντας στον ίδιο βαθμό τη φάση του συναφούς φάσματος το σήμα θα ληφθεί αναλλοίωτο.

Αυτό που πρέπει να γίνει εδώ, είναι να παραμορφωθεί από πριν το σήμα. Μια προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί συμμετρικό Mach Zehnder συμβολόμετρο. Οι τάσεις που εφαρμόζονται στο Mach Zehnder εξαρτώνται από τη φάση και το πλάτος του προπαραμορφωμένου μεταδιδόμενου σήματος στο εύρος του χρόνου και μετριούνται εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier στο φάσμα του.

#### 4.2. Δίκτυα οπτικών ινών: κανάλια διαλείψεων

#### 4.2.1. Τι είναι οι Διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών

Η ασύρματη επικοινωνία στο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών λαμβάνει χώρα μεταξύ σταθερών σταθμών βάσης και κινητών τερματικών. Ένα τυπικό μοντέλο ασύρματης επικοινωνίας στο περιβάλλον των επίγειων κινητών επικοινωνιών αποτελείται αφενός από μια υπερυψωμένη κεραία (ή πολλαπλές κεραίες) σταθμού βάσης και αφετέρου από μια κινητή κεραία (ή κεραίες) στερεωμένη στον πομποδέκτη του κινητού τερματικού.

Στις περισσότερες εφαρμογές δεν υπάρχει πλήρης διάδοση οπτικής επαφής μεταξύ της κεραίας του σταθμού βάσης, που είναι γνωστή και ως σημείο πρόσβασης, και της κεραίας του κινητού τερματικού, λόγω φυσικών ή τεχνητών εμποδίων.

Η διαδρομή διάδοσης αποτελείται από ένα τμήμα οπτικής επαφής (line-ofsight), σχετικά μικρού μήκους, ακολουθούμενου από πολλά τμήματα χωρίς οπτική επαφή (non-light-of-sight). Οι μηχανισμοί που διέπουν τη ραδιοδιάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι και μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις βασικούς: την ανάκλαση (reflection), την περίθλαση (diffraction) και τη σκέδαση (scattering).

Ανάκλαση εμφανίζεται όταν διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος του. Ανακλώμενα κύματα παράγονται ύστερα από πρόσπτωση των διαδιδόμενων κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους και στα κτίρια, και μπορούν να συμβάλλουν με τα αρχικά κύματα στο δέκτη εποικοδομητικά ή όχι.

Περίθλαση εμφανίζεται, όταν παρεμβάλλεται ένα αδιαπέραστο σώμα στη διαδρομή του ραδιοκύματος από τον πομπό προς τον δέκτη.

Σκέδαση εμφανίζεται στην περίπτωση όπου στη διαδρομή του ραδιοκύματος υπάρχουν αντικείμενα με διαστάσεις ίσες ή μικρότερες από το μήκος κύματος. Έχει αποδειχθεί ότι η σκέδαση είναι ο μηχανισμός διάδοσης, που είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί στα ασύρματα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών.

Σε τέτοιο περιβάλλον, καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι ανακλάσεις (reflections), οι περιθλάσεις (diffractions) και οι σκεδάσεις (scatterings) που λαμβάνουν χώρα έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη πολλών επίπεδων κυμάτων στο

27

κινητό τερματικό, από πολλές κατευθύνσεις και με διαφορετικές καθυστερήσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση με διαλείψεις πολλαπλών διάδρομων (multipath fading). Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα.

Η διαδρομή διάδοσης μεταβάλλεται με την κίνηση του κινητού τερματικού και/ή την κίνηση των τριγύρω αντικείμενων και του περιβάλλοντος. Το μήκος κύματος του φέροντος στα λειτουργούντα συστήματα κινητών επικοινωνιών κυμαίνεται από 15 έως 60 cm. Συνεπώς, μικρές μεταβολές στις καθυστερήσεις λόγω της κίνησης του τερματικού προκαλούν μεγάλες μεταβολές στις φάσεις των επίπεδων κυμάτων που καταφθάνουν. Αυτές οι μεταβολές φάσης δρουν εποικοδομητικά ή αρνητικά κατά την ανυσματική άθροιση των διάφορων συνιστωσών στην κεραία του δέκτη, γεγονός που αποδεικνύεται από τις μεγάλες μεταβολές στο πλάτος και τη φάση του λαμβανομένου σήματος. Καθώς το κινητό τερματικό μετακινείται, οι χωρικές μεταβολές της περιβάλλουσας και της φάσης του λαμβανομένου συνθέτου σήματος εμφανίζονται ως χρονικές μεταβολές, ένα φαινόμενο που ονομάζεται διαλείψεις περιβάλλουσας.

Μπορούμε να φανταστούμε ότι, στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών, το κινητό θα λαμβάνει πολλά ανακλώμενα κύματα και ένα άμεσο. Τα ανακλώμενα κύματα που λαμβάνονται από το κινητό θα καταφθάνουν από διαφορετικές γωνίες. Συνήθως το άμεσο κύμα παρουσιάζεται σχετικά πιο ισχυρό, σε σύγκριση με τα ανακλώμενα.

Το μοντέλο που περιγράφει την περίπτωση της οπτικής επαφής λέγεται στατιστικό μοντέλο Rice. Ωστόσο, η σχεδίαση ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών δεν μπορεί να βασίζεται σε αυτή την ιδανική κατάσταση. Βασίζεται σε ασθενή ή έμμεσα κύματα που υπάρχουν συνήθως στον περίγυρο του δέκτη. Όλα τα ανακλώμενα κύματα που λαμβάνονται από το κινητό τερματικό συνδυάζονται ώστε να παρέχουν ένα σήμα πολλαπλών διάδρομων με διαλείψεις.

Μέχρι πρόσφατα όταν ο αριθμός των προσπιπτόντων επίπεδων κυμάτων που κατέφθαναν από διάφορες κατευθύνσεις ήταν αρκούντως μεγάλος και δεν υπήρχε ισχυρή συνιστώσα προερχόμενη από διάδοση οπτικής επαφής, χρησιμοποιούνταν η κατανομή Rayleigh. Η κατανομή Rayleigh ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση κατανομής για τα κανάλια των επίγειων κινητών επικοινωνιών και σε εξωτερικούς και σε εσωτερικούς χώρους. Πολυάριθμα πειραματικά αποτελέσματα

28

δείχνουν ότι η κατανομή Rayleigh αποτελεί ένα αρκούντως ακριβές μαθηματικό μοντέλο.

Στις μέρες μας έχει υπάρξει έντονο ενδιαφέρον για την ανάλυση επικοινωνιών στα κανάλια εξασθένησης Nakagami-m με σκοπό να διαμορφωθεί ένα ευρύτερο φάσμα των όρων της εξασθένησης. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η κατανομή Nakagami έχει καλύτερα αποτελέσματα από τις κατανομές Rice, Rayleigh και την ορθοκανονική κατανομή (Log-normal distribution). Ένα πλεονέκτημα της κατανομής Nakagami είναι ότι μπορεί να πάρει τη μορφή της κατανομής Rayleigh και να διαμορφώσει λιγότερο ή περισσότερο αυστηρές προϋποθέσεις από αυτήν.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε, ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα: α) τις απώλειες διαδρομής (path loss), β) τη σκίαση (shadowing) και γ) τις διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading). Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading). Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών περιγράφονται από τις διαλείψεις περιβάλλουσας (κατανομή πλάτους μηεπιλεκτική ως προς τη συχνότητα), την εξάπλωση Doppler (χρονικά μεταβαλλόμενος θόρυβος τυχαίας φάσης) και την εξάπλωση της χρονοκαθυστέρησης (μεταβλητή απόσταση διάδοσης των ανακλώμενων σημάτων προκαλεί χρονικές μεταβολές στα ανακλώμενα σήματα).

#### 4.2.2. Τι είναι οι Βραχύχρονες ή Ταχείες Διαλείψεις (Fast Fading)

Το ραδιοσήμα παρουσιάζει μια τυχαία μεταβολή του πλάτους του, λόγω των πολλών διαφορετικών οδών που ακολουθεί (πολυοδικό φαινόμενο – multipath phenomenon) μέχρι τη λήψη του από το δέκτη. Αυτές οι ταχύτατες μεταβολές στο πλάτος του ραδιοσήματος αναφέρονται σαν Ταχεία Εξασθένηση (Fast Fading) ή Πολυοδική Εξασθένηση (Multipath Fading).

Ο όρος βραχύχρονες διαλείψεις χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απότομης διακύμανσης του πλάτους ενός ραδιοσήματος σε βραχύ χρονικό διάστημα ή σε βραχεία διανυόμενη απόσταση, έτσι ώστε οι επιδράσεις των απωλειών διαδρομής να μπορεί να αμεληθούν.

Βραχύχρονες διαλείψεις μπορεί να προκύψουν από τη συμβολή δυο ή περισσότερων εκδοχών του μεταδιδόμενου σήματος, που φθάνουν στο δέκτη με μικρές διαφορές καθυστέρησης. Τα σήματα αυτά, που ονομάζονται και σήματα πολλαπλών διαδρομών, συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να δώσουν ένα συνιστάμενο σήμα του οποίου το πλάτος και η φάση μπορεί να μεταβάλλονται ευρέως, και οι μεταβολές αυτές εξαρτώνται από την κατανομή της έντασης του πεδίου, τον σχετικό χρόνο διάδοσης των επιμέρους σημάτων καθώς και από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος.

Οι βραχύχρονες διαλείψεις οφείλονται κυρίως στις ανακλάσεις πολλαπλών διαδρομών ενός μεταδιδόμενου κύματος από τοπικούς σκεδαστές, όπως π.χ. σπίτια, κτίρια και άλλα ανθρώπινα δημιουργήματα, ή από φυσικά εμπόδια, όπως π.χ. δέντρα που περιβάλλουν ένα κινητό. Δεν οφείλονται σε φυσικά εμπόδια μεγάλου μεγέθους, όπως π.χ. ένα βουνό ή έναν λόφο μεταξύ εκπομπής και λήψης.

Τα τρία κυριότερα φαινόμενα που προέρχονται από τις πολλαπλές διαδρομές είναι: i) απότομες αλλαγές στην ένταση του σήματος, όταν διανύονται μικρές αποστάσεις ή μεσολαβούν μικρά χρονικά διαστήματα, ii) τυχαία διαμόρφωση συχνότητας, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι η ολίσθηση Doppler, για τα διάφορα σήματα πολλαπλών διαδρομών, είναι διαφορετική, και iii) εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης (φαινόμενα ηχούς), η οποία προκαλείται από διαφορετική καθυστέρηση σε κάθε διαδρομή που ακολουθείται από το σήμα.

Στην περίπτωση των κινητών επικοινωνιών σε αστικές περιοχές, όπου υπάρχουν πολλά κτίρια, παρατηρούνται διαλείψεις επειδή το ύψος των κεραιών των κινητών τερματικών είναι πολύ μικρότερο από το ύψος των γύρω κτιρίων, οπότε δεν υπάρχει οπτική επαφή με το σταθμό βάσης. Ακόμα και όταν υπάρχει διάδοση οπτικής επαφής, υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές λόγω ανακλάσεων στο εδάφους και στα γύρω κτίρια.

Τα εισερχόμενα στο δέκτη ραδιοκύματα καταφθάνουν από διαφορετικές κατευθύνσεις με διαφορετικές καθυστερήσεις διάδοσης. Το σήμα που λαμβάνεται από το κινητό τερματικό σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, μπορεί να αποτελείται από μεγάλο αριθμό επίπεδων κυμάτων με τυχαία κατανεμημένα πλάτη, φάσεις και γωνίες άφιξης. Αυτές οι πολλαπλές συνιστώσες συνδυάζονται ανυσματικά στην κεραία του δέκτη, και μπορούν να συντελούν στην εμφάνιση παραμορφώσεων ή διαλείψεων στο λαμβανόμενο σήμα. Ακόμα και αν ο δέκτης είναι ακίνητος, το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να εμφανίζει διαλείψεις λόγω της κίνησης του περιβάλλοντος.

#### 4.2.3. Τι είναι οι Μακρόχρονες ή Βραδείες Διαλείψεις (Slow Fading)

Ταυτόχρονα με το φαινόμενο της Ταχείας Εξασθένησης συμβαίνει και μια δεύτερη βραδεία μεταβολή του πλάτους του ραδιοσήματος. Αυτή η μεταβολή αναφέρεται σαν Βραδεία Εξασθένηση (Slow Fading). Η Βραδεία Εξασθένηση είναι αποτέλεσμα των ανακλάσεων του εκπεμπόμενου ραδιοσήματος σε μεγάλου μεγέθους εμπόδια (μεγάλα κτίρια, βουνά, λόφοι κλπ).

Μακρόχρονη διάλειψη είναι ο μέσος ορός του λαμβανομένου ραδιοσήματος που εμφανίζει διαλείψεις. Ονομάζεται επίσης τοπικός μέσος όρος, επειδή κάθε τιμή του αντιστοιχεί στη μέση τιμή της έντασης του πεδίου σε κάθε σημείο. Ο μέσος όρος του λαμβανομένου σήματος περιέχει συνιστώσες που αφορούν και τις μακρόχρονες και τις βραχύχρονες διαλείψεις. Οι συνιστώσες των μακρόχρονων διαλείψεων, οι οποίες συνεισφέρουν μόνο στις απώλειες διαδρομής, πρέπει να απομακρυνθούν ώστε να μείνει μόνο ο όρος των βραχύχρονων διαλείψεων, που είναι το αποτέλεσμα των πολλαπλών διαδρομών.

#### 4.3. Ο θόρυβος στα οπτικά συστήματα

Ο θόρυβος είναι πιθανώς το μοναδικό κεφάλαιο στα ηλεκτρονικά και στις τηλεπικοινωνίες για το οποίο θα πρέπει όλοι να είναι ενημερωμένοι ανεξάρτητα με τον τομέα εξειδίκευσης του. Είναι πάντοτε παρών και περιορίζει την αποδοτικότητα σχεδόν κάθε συστήματος. Στην περίπτωση που θελήσουμε να μετρήσουμε τον θόρυβο και τις συνέπειες που έχει πάνω σε ένα σύστημα, τότε μάλλον θα έρθουμε σε αδιέξοδο, διότι σχεδόν κάθε ένας έχει και από μια δική του μέθοδο υπολογισμού του θορύβου.

Ο θόρυβος μπορεί να οριστεί με την ηλεκτρονική έννοια ως κάποιο ανεπιθύμητο είδος ενέργειας που τείνει να αναμειχθεί με το επιθυμητό σήμα κατά την διάρκεια λήψης και αναπαραγωγής του σήματος. Πολλές διαταραχές που προκαλούνται στη φύση μπορούν να εμφανίσουν θόρυβο στους δέκτες, τροποποιώντας ανεπιθύμητα το σήμα. Στους ραδιοφωνικούς δέκτες για παράδειγμα ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει το χαρακτηριστικό hiss στα ηχεία του ραδιοφώνου, ενώ στους δέκτες της τηλεόρασης απεικονίζεται χιόνι ή κομφετί (χρωματιστό χιόνι). Στα παλμικά επικοινωνιακά συστήματα, ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητους παλμούς ή ακόμα και να εξαφανίσει τους σωστούς προκαλώντας σοβαρά προβλήματα με αυτόν τον τρόπο. Επομένως αντιμετωπίζουμε τον θόρυβο σαν το μέσο ώστε να μειωθεί η λειτουργία των συστημάτων για μια δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ. Μπορεί επίσης να επηρεάσει την ευαισθησία των δεκτών, βάζοντας ένα όριο ενίσχυσης στα ασθενέστερα σήματα. Μερικές φορές μπορεί ακόμα και να βιάσει μια μείωση στο εύρος ζώνης του συστήματος, όπου θα φανεί στο ραντάρ.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ταξινόμησης του θορύβου. Μπορεί να υποδιαιρεθεί ανάλογα με κάποιες προϋποθέσεις σύμφωνα με τον τύπο, την πηγή, την επίδραση ή την σχέση με τον δέκτη. Είναι ωστόσο πιο εύκολο να χωρίσουμε τον θόρυβο σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στο θόρυβο του οποίου οι πηγές βρίσκονται έξω από τον δέκτη (εξωτερικός) και στο θόρυβο που δημιουργείται μέσα στον δέκτη (εσωτερικός).

Από την μία πλευρά ο εξωτερικός θόρυβος είναι δύσκολο να επεξεργαστεί ποσοτικά και επιπλέον συχνά δεν μπορεί να γίνει κάτι γι αυτό, εκτός από το να μετακινηθεί το σύστημα σε άλλη τοποθεσία. Γι' αυτό τα ραδιοτηλεσκόπια τοποθετούνται μακριά από την βιομηχανία, της οποίας η ανάπτυξη συνέβαλλε στην δημιουργία ηλεκτρικού θορύβου. Παγκόσμιοι δορυφορικοί σταθμοί της γης είναι εγκατεστημένοι σε κοιλάδες όσο το δυνατόν απομακρυσμένες από θορύβους. Από την άλλη πλευρά ο εσωτερικός θόρυβος είναι περισσότερο ποσοτικοποιημένος και μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα δέκτη κατάλληλου σχήματος.

Επειδή ο θόρυβος μπορεί να δράσει περιοριστικά και συχνά είναι πιθανόν να μειώνει την επίδραση που έχει πάνω στα σήματα με την χρήση ενός λογικού κυκλώματος, είναι σημαντικό για όλους εκείνους που σχετίζονται με τις επικοινωνίες να είναι πλήρως ενημερωμένοι για τον θόρυβο.

#### 4.3.1. Ο εξωτερικός θόρυβος

Τα διάφορα είδη θορύβου, που δημιουργούνται έξω από τον δέκτη, υπάγονται στην κατηγορία των εξωτερικών θορύβων και συμπεριλαμβάνονται: α) ο ατμοσφαιρικός, β) ο εξωγήινος και γ) ο βιομηχανικός θόρυβος.

#### 4.3.1.1. Ατμοσφαιρικός Θόρυβος

Ίσως ο καλύτερος τρόπος να εξοικειωθεί κανείς με τον θόρυβο είναι να ακούσει τα μικροκύματα (shortwaves) στον δέκτη, ο οποίος δεν είναι καλά εξοπλισμένος ώστε να τα δέχεται. Αυτό που θα ακούσουμε είναι μια εκπληκτική ποικιλία από περίεργους θορύβους που τείνουν να εισχωρήσουν μέσα στο πρόγραμμα. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι το αποτέλεσμα λανθασμένων ραδιοφωνικών κυμάτων που προκαλούν τάσεις στην κεραία. Η πλειονότητα αυτών των κυμάτων προέρχεται από διαταραχές φυσικών πηγών, και αποτελούν τον ατμοσφαιρικό θόρυβο που γενικά καλείται και στατικός.

Στατικός θόρυβος προκαλείται από τις ξαφνικές εκκενώσεις των καταιγίδων και από άλλες φυσικές ηλεκτρικές διαταραχές που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας του ότι η προέλευση του στατικού θορύβου έχει αυθόρμητη μορφή (impulses) και επειδή τέτοιες διαδικασίες παρουσιάζονται σπάνια στη φύση, ο στατικός θόρυβος είναι διασκορπισμένος σε όλο το ραδιοφωνικό φάσμα που χρησιμοποιείται για μετάδοση.

Επομένως ο ατμοσφαιρικός θόρυβος αποτελείται από ψευδή ραδιοσήματα με συνιστώσες κατανεμημένες σε μια ευρεία κλίμακα συχνοτήτων. Ο θόρυβος αυτός είναι διαδεδομένος πάνω στη γη με τον ίδιο τρόπο που είναι διαδεδομένα και τα ραδιοκύματα των ίδιων συχνοτήτων, έτσι ώστε σε κάθε σημείο της γης ο στατικός θόρυβος μπορεί να ληφθεί από όλες τις καταιγίδες, κοντινές ή μακρινές.

Ο στατικός θόρυβος που λαμβάνεται από τις καταιγίδες είναι πιθανώς πιο έντονος αλλά λιγότερο συχνός. Η δύναμη πεδίου είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας, έτσι ώστε ο θόρυβος αυτός να εμπλέκεται περισσότερο στην λήψη του ραδιοφώνου από ότι στη λήψη της τηλεόρασης. Ένας τέτοιος θόρυβος έχει αυθόρμητη μορφή (impulses) και αυτά τα μη ημιτονικά κύματα έχουν αρμονικές των οποίων το πλάτος ελαττώνεται με αύξηση της αρμονικής. Ο στατικός θόρυβος από απομακρυσμένες πηγές θα ποικίλει σε ένταση σύμφωνα με τις μεταβολές στις

εκπεμπόμενες συνθήκες. Έτσι έχουμε αύξηση του στατικού θορύβου την νύχτα τόσο στις εκπεμπόμενες όσο και στις μικροκυματικές συχνότητες.

Ο ατμοσφαιρικός θόρυβος γίνεται λιγότερο έντονος σε συχνότητες πάνω από περιορισμένες σε ευθεία οπτική εκπομπή δηλαδή λιγότερο από 80 χιλιόμετρα. Δεύτερον, ο μηχανισμός που παράγει τον θόρυβο είναι τέτοιος ώστε μια πολύ μικρή αναλογία θορύβου να δημιουργείται στο εύρος των πολύ υψηλών συχνοτήτων και παραπάνω.

#### 4.3.1.2. Εξωγήινος Θόρυβος

Είναι υπερβολή να πούμε ότι υπάρχουν τόσοι τύποι διαστημικού θορύβου όσες και πηγές θορύβου. Αλλά εντάσσονται σε δύο κατηγορίες: τον ηλιακό θόρυβο και τον κοσμικό θόρυβο.

Ηλιακός θόρυβος: Ο ήλιος στέλνει διάφορα αντικείμενα στη γη και ανάμεσα σε αυτά είναι και ο θόρυβος. Υπάρχουν δύο τύποι θορύβου. Κάτω από κανονικές, "ήπιες" συνθήκες, υπάρχει ένας σταθερός ακτινοβολούμενος θόρυβος από τον ήλιο, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο ήλιος είναι ένα μεγάλο σώμα με μεγάλη θερμοκρασία (πάνω από 6000 °C στην επιφάνεια του). Επομένως ακτινοβολεί σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων όπου εκεί συμπεριλαμβάνονται οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες.

Ωστόσο ο ήλιος είναι ένα μεταβαλλόμενο αστέρι που υποβάλλεται σε κύκλους, στην κορυφή των οποίων ξεσπούν ηλεκτρικές διαταραχές, όπως φλεγόμενα στεφάνια και ηλιακές κηλίδες. Αν και ο προσθετικός θόρυβος που παράγεται προέρχεται από μια μικρή αναλογία του ηλιακού δίσκου, έχει τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη την ποσότητα θορύβου που παράγεται κατά την διάρκεια που ο ήλιος παραμένει ήσυχος.

Ο ηλιακός κύκλος επαναλαμβάνει περιόδους μεγάλων ηλεκτρικών διαταραχών περίπου κάθε 11 χρόνια. Επιπλέον, αν προσπαθήσουμε να ζωγραφίσουμε μια γραμμή που να διέρχεται από τις 11 κορυφές των κύκλων αυτών θα δούμε ότι σχηματίζεται ένας μεγαλύτερος κύκλος, με τις κορυφές να φτάνουν υψηλότερο μέγιστο περίπου κάθε 100 χρόνια. Τελικά, αυτές οι κορυφές των 100 χρόνων τείνουν να αυξάνονται σε ένταση. Εφόσον υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κορυφών της

34

ηλιακής διαταραχής και των δακτυλίων ετησίων δέντρων (growth rings in trees) ήταν δυνατόν να ανιχνεύσουμε αυτές τις κορυφές στις αρχές του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Στοιχεία έχουν δείξει ότι το 1957 όχι μόνο υπήρξε μια κορυφή αλλά η μεγαλύτερη κορυφή που έχει καταγραφεί.

Κοσμικός θόρυβος: Εφόσον τα αστέρια λάμπουν και έχουν υψηλές θερμοκρασίες, επομένως και αυτά εκπέμπουν θόρυβο κατά τον ίδιο τρόπο που εκπέμπει και ο ήλιος. Αν και βρίσκονται μακριά το ένα με το άλλο, ωστόσο είναι τόσα πολλά σε αριθμό που η μεταξύ τους απόσταση δεν επηρεάζει την εκπομπή του θορύβου. Έτσι, ο θόρυβος που λαμβάνουμε καλείται θερμικός θόρυβος και είναι κατανεμημένος ομοιόμορφα στον ουρανό.

Λαμβάνουμε, επίσης, θόρυβο από το κέντρο του δικού μας γαλαξία (Milky Way), από άλλους γαλαξίες καθώς επίσης και από φανταστικές πηγές όπως είναι οι "quasars" και "pulsars". Αυτός ο γαλαξιακός θόρυβος είναι πολύ έντονος, όμως προέρχεται από πηγές που είναι απλά σημεία στον ουρανό. Δύο από τις πιο ισχυρές πηγές οι οποίες είναι και αυτές που ανακαλύφθηκαν πιο πρόσφατα είναι οι Cassiopeia A και Cygnus A. Ωστόσο, είναι απερισκεψία να μιλάμε για θορύβους με ραδιοαστρονόμους καθώς αυτοί θεωρούν σημαντική πληροφορία οτιδήποτε εμείς θεωρούμε θόρυβο.

#### 4.3.1.3. Βιομηχανικός Θόρυβος

Μεταξύ των συχνοτήτων 1 έως 600MHz, στις αστικές, προαστιακές και άλλες βιομηχανικές περιοχές, η ένταση του θορύβου που προκαλεί ο άνθρωπος, εύκολα ξεπερνά κάθε άλλο θόρυβο εσωτερικό ή εξωτερικό από τον δέκτη. Ο βιομηχανικός θόρυβος περιλαμβάνει πηγές θορύβου όπως το αυτοκίνητο, η ανάφλεξη του αεροσκάφους, ηλεκτρικές μηχανές και μηχανές ταχυτήτων, διαρροές από γραμμές υψηλών τάσεων και ένα μεγάλο αριθμό από βαριές ηλεκτρικές μηχανές. Οι λάμπες φθορισμού αποτελούν ισχυρή πηγή βιομηχανικού θορύβου και για το λόγο αυτό δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε σημεία λήψης ή δοκιμών σήματος.

Ο θόρυβος παράγεται από εκκενώσεις (arc discharge) παρούσες σε όλες τις λειτουργίες, και κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι αναμενόμενο ότι αυτός ο θόρυβος θα είναι περισσότερο έντονος σε βιομηχανικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η φύση του βιομηχανικού θορύβου είναι τόσο μεταβλητή που είναι δύσκολο να την αναλύσουμε σε οποιαδήποτε βάση εκτός της στατιστικής. Υπακούει ωστόσο στη γενική αρχή του θορύβου που λέει ότι ο λαμβανόμενος θόρυβος αυξάνεται καθώς το εύρος ζώνης αυξάνει.

#### 4.3.2. Εσωτερικός θόρυβος

Ο εσωτερικός θόρυβος παράγεται από κάθε ενεργή ή παθητική συσκευή που βρίσκεται μέσα στον δέκτη. Ένας τέτοιος θόρυβος είναι γενικά τυχαίος και αυτό τον κάνει να μην μπορεί να μελετηθεί σε κάποια ανεξάρτητη στάθμη τάσης παρά μόνο στατιστικά. Επειδή ο εσωτερικός θόρυβος είναι τυχαία κατανεμημένος σε ολόκληρο το ραδιοφωνικό φάσμα τότε κατά μέσο όρο υπάρχει τόσος θόρυβος σε μία συχνότητα όσο και σε μια άλλη. Έτσι η ισχύς του τυχαίου θορύβου είναι ανάλογη του εύρους ζώνης που μετράμε.

#### 4.3.2.1.Θερμικός Θόρυβος

Ο θόρυβος που αναπτύσσεται πάνω σε μια αντίσταση ή σε ένα ωμικό στοιχείο μιας σύνθετης αντίστασης, είναι τυχαίος και αναφέρεται με διάφορους χαρακτηρισμούς όπως θερμικός, θερμική διαταραχή, λευκός ή Johnson θόρυβος. Οφείλεται στην γρήγορη και τυχαία κίνηση των μορίων, ατόμων και ηλεκτρονίων από τα οποία αποτελείται κάθε αντίσταση.

Στην θερμοδυναμική, η κινητική θεωρία δείχνει ότι η θερμοκρασία ενός σωματιδίου είναι ένας τρόπος να εκφράσει την εσωτερική του κινητική ενέργεια. Έτσι, η θερμοκρασία ενός σώματος φανερώνει την στατιστική τετραγωνική μέση τιμή (rms) της ταχύτητας των σωματιδίων στο σώμα. Όπως δηλώνει η θεωρία, η κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων γίνεται περίπου μηδέν (η κίνηση τους σταματάει) στην θερμοκρασία του απόλυτου μηδέν, το οποίο είναι το 0 K (kelvins, άλλοτε καλούνται βαθμοί Kelvin) που ισοδυναμεί με -273<sup>0</sup>C.

Επομένως είναι φανερό ότι η ισχύς θορύβου που παράγεται από μία αντίσταση είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας, και ανάλογη του εύρους ζώνης στο οποίο μετράμε το θόρυβο. Έτσι:

 $P_{\rm n} \propto {\rm T} \delta {\rm f} = {\rm k} {\rm T} \delta {\rm f}$ 

όπου k = σταθερά του Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  Joules/K T = απόλυτη θερμοκρασία, K=273 +  $^{0}$ C δf = εύρος ζώνης

 $\mathbf{P}_{_{\rm o}}$  = η μέγιστη ισχύς θορύβου στην έξοδο της αντίστασης

Αν μια συνηθισμένη αντίσταση με μια συγκεκριμένη θερμοκρασία στους 17 °C (290 K) δεν συνδέεται σε πηγή τάσης, μπορεί κανείς στην αρχή να πιστέψει ότι δεν υπάρχει τάση να μετρήσουμε στα άκρα της. Η δήλωση αυτή είναι σωστή αν το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιούμε μετράει συνεχής τάση, όμως η δήλωση είναι λάθος αν το όργανο μέτρησης είναι ένα πολύ ευαίσθητο βολτόμετρο.

Η αντίσταση είναι μια γεννήτρια θορύβου και ενδεχομένως να έχει μεγάλη τάση στα άκρα της. Αν αυτή η τάση είναι τυχαία και έχει συγκεκριμένη rms τιμή αλλά όχι συνεχής συνιστώσα, μόνο ένα όργανο που μετράει εναλλασσόμενες τάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καταγράψει την τιμή της. Ο θόρυβος τάσης δημιουργείται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στην αντίσταση. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων είναι το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση. Είναι γεγονός ότι ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων φτάνει και στα δύο άκρα της αντίστασης σε κάθε περίοδο του χρόνου. Αν και σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι πιθανό να φτάνει διαφορετικός αριθμός ηλεκτρονίων στο ένα άκρο της αντίστασης από ότι στο άλλο ακριβώς, διότι η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι τυχαία. Τόσο ο ρυθμός άφιξης των ηλεκτρονίων όσο και η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης ποικίλει. Επομένως τυχαία τάση στην αντίσταση υφίσταται και μπορεί να μετρηθεί και να υπολογιστεί.

Πρέπει να καταλάβουμε ότι, όλοι οι τύποι που αναφέρονται στο θόρυβο είναι εφαρμόσιμοι μόνο στην rms τιμή ενός τέτοιου θορύβου και όχι στην στιγμιαία τιμή του η οποία μπορεί να είναι απρόβλεπτη. Τώρα, όσον αφορά τις κορυφές του θορύβου τάσης, αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι δεν μπορούν να υπερβαίνουν σε τιμή 10 φορές την rms τιμή.

#### 4.3.2.2. Shot Θόρυβος

Η θερμική διέγερση είναι αναμφισβήτητα η μοναδική πηγή θορύβου στους δέκτες. Το σημαντικότερο όλων των άλλων πηγών είναι το shot αποτέλεσμα, το οποίο οδηγεί στον shot θόρυβο σε όλα τα ενισχυτικά στοιχεία και ουσιαστικά σε όλες τα ενεργά στοιχεία.

Ο θόρυβος αυτός δημιουργείται από τις τυχαίες μεταβολές στις αφίξεις των ηλεκτρονίων (ή οπών) στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο του ενισχυτικού στοιχείου και με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται στην έξοδο ένας τυχαίος μεταβαλλόμενος θόρυβος ρεύματος ο οποίος λαμβάνεται ενισχυμένος. Όταν ο θόρυβος ενισχύεται, υποτίθεται ότι αυτό που ακούγεται είναι μια βροχή από σφαίρες να πέφτουν πάνω σε μια μεταλλική επιφάνεια, γι αυτό το λόγο ονομάζεται shot θόρυβος.

Αν και η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου ενός στοιχείου ελέγχεται από την διάφορες τάσεις πόλωσης, σε κάθε χρονική στιγμή ενδέχεται να φτάνουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Στα διπολικά τρανζίστορ, για παράδειγμα, το φαινόμενο αυτό είναι κυρίως αποτέλεσμα της τυχαίας κατεύθυνσης του ρεύματος δια μέσου των διασταυρώσεων. Οι διαδρομές που ακολουθούνται είναι τυχαίες επομένως και άνισες, έτσι ώστε, αν και ο μέσος όρος του ρεύματος στο συλλέκτης είναι σταθερός, ωστόσο προκαλούνται μικρές μεταβολές. Ο Shot θόρυβος συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όπως και ο θερμικός θόρυβος με την μοναδική διαφορετική πηγή.

Πολλές μεταβλητές περιλαμβάνονται στην δημιουργία αυτού του θορύβου στις διάφορες ενισχυτικές συσκευές, και συνήθως χρησιμοποιούμε προσεγγιστικές εξισώσεις για τις μεταβλητές αυτές. Επιπλέον είναι δύσκολο με υπολογισμούς να προσθέσουμε ρεύμα shot θορύβου σε θερμικό θόρυβο τάσης, οπότε για όλες τις συσκευές εκτός της διόδου, οι τύποι shot θορύβου που χρησιμοποιούνται είναι γενικά απλοποιημένοι. Για την δίοδο ο τύπος είναι

 $i_n = \sqrt{2ei_p df}$ 

όπου i n = rms τιμή του ρεύματος του shot noise

 $e = φορτίο του ηλεκτρονίου = 1.6 X 10^{-19} C$ 

 $i_{p} = συνεχές ρεύμα διόδου$ 

df = εύρος ζώνης του συστήματος

Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις όχι μόνο ο τύπος είναι απλουστευμένος αλλά δεν υπάρχει τύπος για shot θόρυβο ρεύματος. Ο μοναδικός τρόπος για να χειριστούμε τον shot θόρυβο είναι να βρούμε την τιμή ή τον τύπο μιας ισοδύναμης αντίστασης εσωτερικού θορύβου. Η αντίσταση αυτή προηγείται της συσκευής, η οποία υποθέτουμε ότι είναι απαλλαγμένη από κάθε θόρυβο και έχει τέτοια τιμή ώστε το ίδιο ποσό θορύβου βρίσκεται τόσο στην έξοδο του ισοδύναμου συστήματος όσο και στον πρακτικό ενισχυτή, έτσι ο θόρυβος ρεύματος έχει αντικατασταθεί από μια αντίσταση, επομένως τώρα είναι εύκολο να προσθέσουμε shot θόρυβο στον θερμικό θόρυβο. Επιπλέον η αντίσταση αυτή έχει τοποθετηθεί στην είσοδο του ενισχυτή που όπως θα δούμε είναι μια κατάλληλη θέση.

Η τιμή της ισοδύναμης αντίστασης shot θορύβου  $R_{eq}$  μιας συσκευής δίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Προσεγγιστικοί τύποι για ισοδύναμες αντιστάσεις shot θορύβου είναι επίσης διαθέσιμες και δείχνουν ότι ένας τέτοιος θόρυβος είναι αντιστρόφως ανάλογος της υπεραγωγιμότητας και ανάλογος του ρεύματος εξόδου. Όσον αφορά την χρήση της  $R_{eq}$  το σημαντικό που θα πρέπει να καταλάβουμε είναι ότι αυτή η αντίσταση είναι μια φανταστική αντίσταση που ουσιαστικά χρησιμοποιείται για την απλούστευση των υπολογισμών για τον shot θόρυβο. Σύμφωνα με αυτό, για το θόρυβο μόνο, η αντίσταση, με την ίδια θερμοκρασία όπως και οι άλλες αντιστάσεις, και τοποθετημένη σε σειρά με το εσωτερικό ηλεκτρόδιο της συσκευής.

#### 4.3.2.3. Θόρυβος Μεταβλητού Χρόνου (Transit-time)

Εάν ο χρόνος που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο να μεταφερθεί από τον πομπό στον δέκτη ενός τρανζίστορ γίνει συγκρίσιμος με την περίοδο του σήματος το οποίο ενισχύεται, π.χ., σε συχνότητες μεγαλύτερες και πέραν της κλίμακας των VHF (Very High Frequency), η επίδραση του αποκαλούμενου μεταβλητού χρόνου λαμβάνει χώρα, και ο θόρυβος εισόδου του τρανζίστορ αυξάνει. Τη στιγμή που τα ρεύματα στην είσοδο της συσκευής επηρεάζονται από τυχαίες διακυμάνσεις, τα ρεύματα στην έξοδο αποτελούν σημαντικό παράγοντα για αυτές τις συχνότητες και δημιουργούν τυχαίο θόρυβο. Από τη μια μεριά αυτός ο θόρυβος υψηλής συχνότητας κάνει την παρουσία του αισθητή, τείνει να αυξάνει με συχνότητα σε έναν ρυθμό ο οποίος σύντομα προσεγγίζει τα 6 dB ανά οκτάβα, και αυτός ο τυχαίος θόρυβος γρήγορα στη συνέχεια επικρατεί ως προς τα άλλα είδη.

Το αποτέλεσμα από όλα αυτά είναι το γεγονός ότι είναι προτιμότερο να μετράμε το θόρυβο σε τέτοιες υψηλές συχνότητες, από το να προσπαθούμε να υπολογίσουμε έναν εισαγόμενο ισοδύναμο θόρυβο αντίστασης για αυτό. Παρ' όλα αυτά, τα τρανζίστορ ραδιοφωνικής συχνότητας (RF) προσδίδουν αξιόλογα χαμηλό θόρυβο. Μια εικόνα θορύβου με θόρυβο τόσο χαμηλό όσο 1 dB είναι πιθανό με τη χρήση ενισχυτικών τρανζίστορ να μεταπηδήσει στην κλίμακα των UHF(Ultra High Frequency).

#### 4.3.2.4. Ετερογενής (Ανάμεικτος) Θόρυβος

#### Τρεμοπαίξιμο (Flicker)

Στις χαμηλές ακουστικές συχνότητες, ένας ελάχιστα αντιληπτός τύπος θορύβου ο οποίος ονομάζεται flicker ή αλλιώς θόρυβος διαμόρφωσης (modulation noise) εμφανίζεται στα τρανζίστορ. Είναι ανάλογος προς το ρεύμα του πομπού και της [θερμοκρασίας junction], αλλά από τη στιγμή που είναι επίσης αντίστροφα ανάλογος της συχνότητας, μπορεί να αγνοηθεί πλήρως για συχνότητες που υπερβαίνουν τα 500 Hz. Από εκεί και πέρα δεν είναι πολύ σοβαρό.

#### Αντίσταση

Ο θερμικός θόρυβος, μερικές φορές καλείται θόρυβος αντίστασης (resistance noise), και είναι επίσης παρόν στα τρανζίστορ. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι εσωτερικές αντιστάσεις της βάσης, του πομπού και του δέκτη και στις περισσότερες περιπτώσεις η αντίσταση της βάσης έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά.

Από τα 500 Hz περίπου μέχρι περίπου τα  $f_{ab}/5$ , ο θόρυβος από το τρανζίστορ παραμένει σχετικά σταθερός, έτσι ώστε μια ισοδύναμη αντίσταση εισόδου για shot και θερμικό θόρυβο να μπορεί να χρησιμοποιείται ελεύθερα.

Θόρυβος στους μείκτες

Οı μείκτες περιέχουν περισσότερο θόρυβο από τους ενισχυτές χρησιμοποιώντας πανομοιότυπες συσκευές, με εξαίρεση στις συχνότητες μικροκυμάτων, όπου η κατάσταση είναι μάλλον πολύπλοκη. Αυτή η υψηλή τιμή του θορύβου στους μείκτες προκαλείται από δυο ξεχωριστά πράγματα. Καταρχήν, η μετατροπή της υπεραγωγιμότητας (conversion transconductance) στους μείκτες είναι πολύ χαμηλότερη από την υπεραγωγιμότητα των ενισχυτών. Κατά δεύτερον, αν η απόρριψη της συγνότητας του δείκτη είναι ανεπαρκής, όσο συγνά συμβαίνει στις βραχείες συχνότητες (shortwave frequencies), ο θόρυβος ο οποίος σχετίζεται με τη συχνότητα της εικόνας μπορεί επίσης να είναι αποδεκτή.

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: GNU Octave**

#### 5.1. Τι είναι το GNU Octave

Το GNU Octave είναι υψηλού επιπέδου γλώσσα, η οποία κυρίως επικεντρώνεται σε αριθμητικούς υπολογισμούς. Παρέχει δυνατότητες για αριθμητική λύση των γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων καθώς και για την πραγματοποίηση άλλων αριθμητικών πειραμάτων. Επίσης, παρέχει εκτενείς γραφικές ικανότητες για οπτικοποίηση και χειρισμό δεδομένων. Χρησιμοποιείται φυσιολογικά μέσω της αλληλεπιδραστικής γραμμής εντολών (interactive command line interface), αλλά μπορεί επίσης και να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία των μη-διαδραστικών προγραμμάτων.

Το GNU Octave μοιάζει με το Matlab, κι έτσι τα περισσότερα προγράμματα μεταφέρονται εύκολα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιήσει συγκεκριμένη λειτουργία αυτομάτως σε μια ομάδα αρχείων ή για να επεξεργαστεί ομάδα πράξεων ταυτόχρονα (batch oriented language). Το ίδιο ισχύει και για την βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο. Για παράδειγμα, το Octave, χρησιμοποιείται στην προσομοίωση συστημάτων οπτικών επικοινωνιών.

#### 5.2 Ιστορική αναδρομή

Το πρόγραμμα GNU Octave πήρε το όνομά του από τον Octave Levenspiel. Επινοήθηκε το 1988 με αρχικό σκοπό να βοηθήσει μια σειρά μαθημάτων σχεδιασμού χημικού αντιδραστήρα. Το έτος 1993 ξεκίνησε η ουσιαστική του εξέλιξη από τον John W.Eaton.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να εργαστεί κανείς στο ΟCTAVE: (Καμαλάκης,2013)

- Να γράφει απευθείας τις εντολές στο command line
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος τρόπος όταν πρόκειται να εκτελέσουμε λίγες εντολές και θέλουμε να βλέπουμε άμεσα τα αποτελέσματα τους.
- Να χρησιμοποιεί OCTAVE scripts. Στην ουσία χρησιμοποιούμε τον editor του octave για να γράψουμε μία σειρά εντολών στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε πιο περίπλοκους υπολογισμούς.
- Το OCTAVE έχει υλοποιημένες πολλές μαθηματικές μεθόδους που μπορούν να μας βοηθήσουν στην επιπλέον επεξεργασία των σημάτων μας. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έτοιμη συνάρτηση max για να υπολογίσουμε το μέγιστο στοιχείο ενός διανύσματος. Αυτό αποτελεί ένα απειροελάχιστο δείγμα των έτοιμων συναρτήσεων του OCTAVE που έχουνε στόχο να μας κάνουνε την ζωή πιο εύκολη.

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος

#### 1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μοντελοποιήσουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα οπτικών ινών και θα μελετήσουμε τη διάδοση ενός Gaussian παλμού μέσα σε αυτό καθώς και ποιες επιπτώσεις έχουν κάποιες αλλαγές του συστήματος στον παλμό αυτό. Εισάγουμε την έννοια της αντιστάθμισης διασποράς για να παρακολουθήσουμε τη συμβολή της στη διάδοση του παλμού. Τέλος, προσθέτουμε στο σύστημα αυτό θόρυβο, για να εξετάσουμε τις αλλαγές που θα επιφέρει, με απώτερο σκοπό να φτιάξουμε ένα εργαλείο το οποίο θα προσομοιώνει ένα ρεαλιστικό οπτικό σύστημα μεγάλων αποστάσεων.

#### 6.1. Στάδια υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος

Το ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο υλοποιήθηκε αποτελείται από έναν πομπό, δύο κομμάτια οπτικής ίνας (διαφορετικού μήκους και φίλτρου το καθένα) και έναν δέκτη. Στο σύστημα αυτό θα διαδώσουμε ένα Gaussian παλμό, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του καθώς τι επιπτώσεις επιφέρουν οι απώλειες σε αυτόν και, τέλος, θα παρατηρήσουμε τις μεταβολές που φέρνει στο σύστημα η εισαγωγή του θορύβου. Ο πομπός και ο δέκτης είναι θεωρητικοί και δεν υλοποιούνται στον κώδικα του Octave, μιας και δεν επιφέρουν κάποια αλλαγή στο σύστημά μας. Το σύστημα αυτό είναι κοντά σε ένα πραγματικό σύστημα, αλλά για την διευκόλυνσή μας έχει γίνει μία παραδοχή. Το δεύτερο κομμάτι ίνας εξυπηρετεί τον σκοπό της αντιστάθμισης της χρωματικής διασποράς οπότε και χρησιμοποιείται ο παράγοντας διασποράς b2. Σε ένα πραγματικό σύστημα θα έπρεπε να υπάρχει και μία τρίτης τάξης διασπορά που θα πρόσθετε και τον παράγοντα διασποράς b3. Για την ευκολότερη υλοποίηση του συστήματος και των υπολογισμών έχει πασαλειφθεί τελείως η διασπορά τρίτης τάξης

Στο πρώτο στάδιο, δώσαμε αρχικές τιμές σε όλες τις μεταβλητές που χρειαστήκαμε και χρησιμοποιήσαμε στο σύστημα. Η πρώτη μεταβλητή t0 είναι η παράμετρος του Gaussian παλμού που εξετάζουμε, N είναι ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιούμε για να αναπαραστήσουμε τον αναλογικό παλμό, το dt είναι η περίοδος δειγματοληψίας των N δειγμάτων στον άξονα του χρόνου, το t είναι ο άξονας του χρόνου, το b1 είναι ο συντελεστής χρωματικής διασποράς στο πρώτο κομμάτι ίνας, το adB είναι οι απώλειες σε dB και το α1 ο ρυθμός απωλειών στο πρώτο κομμάτι και το L είναι το μήκος του πρώτου κομματιού ίνας. Τα b2, adB2, a2 και DispL είναι τα αντίστοιχα για το δεύτερο κομμάτι ίνας. Το Niterations είναι ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιούμε, το filter\_3dB είναι το εύρος του ηλεκτρικού φίλτρου που χρησιμοποιούμε στην αναπαράσταση του θορύβου και το t1 είναι η παράμετρος του ηλεκτρικού αυτού φίλτρου. Στις μεταβλητές αυτές δόθηκαν οι εξής αρχικές τιμές:

t0=0.025e-9;	% Gaussian pulse parameter (in seconds)	
Tw=50*t0;	% Time window size (in seconds)	
N=2048;	% Number of samples used to represent the analog pulse	
dt=Tw/(N-1); % Sa	mpling period set to amount to N samples in the time axis	
t=(-N/2:1:(N/2-1))*dt;	% Time axis	
b1=2e-26;	% Dispersion parameter in s^2/m	
adB=0.4e-3;	% Loss in dB/m	
a=adB/4.3429;	% Exponential loss rate	
L=1e3:1e3:50e3;	% Dispersion fiber length in meters	
DispL=1e3:1e3:10e3;	% Dispersion fiber length in meters	
b2=-(L(end)/DispL(end)) .* b1; % Dispersion parameter in s^2/m		
adB2=2e-3;	% Loss in dB/m	
a2=adB2/4.3429;	% Exponential loss rate	
Niterations=1000;	% Number of iterations	
filter_3dB=1e9;	% 3dB bandwidth of the electric filter	
t1=1/filter_3dB/2/pi;	% Electric filter parameter	

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν γιατί είναι ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές, δηλαδή συναντώνται στην πράξη σε ένα σύστημα οπτικών ινών.

Μαζί με τις μεταβλητές αρχικοποιούνται και τέσσερις πίνακες (avg\_samples, std\_samples, corr\_samples), όπου όλοι έχουν μία σειρά διαφορετικού μήκους γεμισμένη με 0. Να παρατηρηθεί πως το μήκος της ίνας δε δίνεται σταθερό από την

αρχή, αλλά εξετάζεται βήμα-βήμα, από 1 Km μέχρι 50 Km με βήμα 1 Km η πρώτη και από 1 Km μέχρι 10 Km με βήμα 1 Km η δεύτερη.

Η πρώτη εντολή που χρησιμοποιούμε είναι η close all, η οποία κλείνει όλα τα γραφικά παράθυρα που έχουν ανοίξει, ώστε να μην υπάρξει σύγχυση με προηγούμενα script. Έχοντας ορίσει την παράμετρο του Gaussian παλμού t0 να είναι ίση με 0,025 ns υπολογίζουμε τον παλμό που εισάγεται στο σύστημα βάση της σχέσης  $x(t) = \exp(-t^2/2/t_0^2)$ . Το διακριτό φάσμα του παλμού υπολογίζεται με τη χρήση του Fast Fourier Transfer (FFT), ενώ για τον υπολογισμό του αναλογικού φάσματος προσεγγίζεται από τον FFT με μία αλλαγή κλίμακας και με μία αντιμετάθεση των δειγμάτων. Έτσι, με την εντολή X1=dt\*fftshift(fft(fftshift(x1))); παράγουμε δείγματα της X(f) στο πεδίο των συχνοτήτων, τα οποία είναι έτσι τοποθετημένα ώστε η μηδενική συχνότητα να βρίσκεται στο κέντρο των στοιχείων του X και όπου df\*dt=1/N, όπου N ο αριθμός στοιχείων του x. Αφού υπολογίσουμε και τις συχνότητες, περνάμε στην μελέτη του παλμού μέσα στην ίνα.

for n=1:length(L)

Lcur=L(n);	% Current fiber length
H1=exp(-a*Lcur/2+j*2*pi^2*f.^2*b1*Lcur); characteristic	% Estimation of the fiber
Y1=H1.*X1;	% Estimation of the output spectrum
y1=1/dt*fftshift(ifft(fftshift(Y1))); in the time domain using OCTAVE's iFFT	% Estimation of the output pulse

end

Χρησιμοποιούμε μία επανάληψη for από n=1 μέχρι και το τελικό μήκος τις ίνας έτσι ώστε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του παλμού σε όλο το μήκος τις ίνας. Αναθέτουμε το μήκος τις ίνας στη μεταβλητή Lcur για την ξεχωριστή του χρήση κάθε φορά. Η χαρακτηριστική του φίλτρου που χρησιμοποιούμε δίνεται από την εξίσωση  $H(f) = \exp\left(-\frac{aL}{2} + j\frac{\beta_2(2\pi f)^2}{2}L\right)$ όπου L είναι το μήκος της οπτικής ίνας, a είναι ένας

45

παράγοντας που σχετίζεται με τις απώλειες της οπτικής ίνας ενώ ο συντελεστής  $β_2$ είναι ο συντελεστής χρωματικής διασποράς της οπτικής ίνας υπολογισμένος στην κεντρική συχνότητα του οπτικού σήματος  $f_0$ . Αν X(f) είναι το φάσμα ενός σήματος στην είσοδο του φίλτρου τότε το φάσμα του σήματος στην έξοδο του φίλτρου Y(f). Η εξίσωση μεταφοράς της οπτικής ίνας H(f) περιγράφει πώς το σήμα y1(t) λαμβάνεται ως φιλτραρισμένη έκδοση του x1(t). Δηλαδή, αν το φάσμα των σημάτων χαμηλών συχνοτήτων x1(t) και y1(t) είναι X1(f) και Y1(f) αντίστοιχα, τότε ισχύει πως Y1(f) = H1 \* X1(f), όπως παρατηρούμε και στον κώδικα. Τέλος, για να υπολογίσουμε το σήμα y1(t) από το φάσμα εξόδου Y(f) χρησιμοποιούμε τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier, όπου στο Octave υλοποιείται με την συνάρτηση ifft όπως φαίνεται από το y1=1/dt\*fftshift(ifft(fftshift(Y1)));

Στη συνέχεια, αφού έχουν γίνει όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, αναπαριστούμε γραφικά το σήμα εισόδου και εξόδου μας. Αυτό γίνεται με την χρήση της συνάρτησης plot του Octave. Να παρατηρηθεί πως γενικά το φάσμα ενός σήματος είναι μιγαδικός αριθμός, αλλά εμάς μας ενδιαφέρει μόνο το μέτρο του το οποίο υπολογίζεται με την χρήση του abs(y1) και abs(x1) στο σύστημα αυτό. Στο Σχήμα 1 απεικονίζουμε τον παλμό που εισάγεται στο πρώτο κομμάτι ίνας και τον παλμό στην έξοδο της.



#### Σχήμα 1: Διάδοση του Gaussian παλμού στην ίνα

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 1 ο παλμός είναι εξασθενημένος κυρίως λόγω των απωλειών και λίγο διευρυμένος εξαιτίας της διασποράς.

Η εξασθένηση που παρατηρούμε στο Σχήμα 2 οφείλεται στο φίλτρο που έχει η ίνα. Μεταβάλλοντας χαρακτηριστικά της ίνας παρατηρούμε και αντίστοιχες αλλαγές στο Σχήμα 2 και στο Σχήμα 3 που προκύπτουν. Για παράδειγμα, αν μεγαλώσουμε το al τότε οι απώλειες θα είναι πολύ μεγαλύτερες οπότε και το φίλτρο θα επιτρέπει ακόμα λιγότερα dB.



#### Σχήμα 2: Ο τελικός παλμός μετά την αύξηση του φίλτρου

Στο Σχήμα 2 βλέπουμε τις αλλαγές που προκύπτουν στον τελικό παλμό αν αλλάξουμε το φίλτρο με το να μεγαλώσουμε το al από 0,4\*10<sup>-3</sup> σε 4\*10<sup>-3</sup>. Ο παλμός κατά την έξοδο πλέον έχει κοπεί τελείως μιας και το φίλτρο έχει μεγαλώσει πάρα πολύ, οπότε και επιτρέπει να περάσει ένα πάρα πολύ μικρό κομμάτι του σήματος, σχεδόν 0.

Στην περίπτωση που μειώσουμε τα χαρακτηριστικά του φίλτρου, τότε αυτό θα επιτρέπει όλο και μεγαλύτερο μέρος του σήματος να περάσει.



#### Σχήμα 3: Ο τελικός παλμός μετά την μείωση του φίλτρου

Στο Σχήμα 3 βλέπουμε τις αλλαγές που προκύπτουν στον τελικό παλμό αν αλλάξουμε το φίλτρο με το να μειώσουμε το al από  $0,4*10^{-3}$  σε  $0,04*10^{-3}$ . Το φίλτρο πλέον επιτρέπει μεγαλύτερο μέρος του παλμού να περάσει, όπως φαίνεται και από τον παλμό εξόδου, φτάνοντας πιο κοντά στον αρχικό παλμό.

Επισημαίνεται πως ο αριθμός των δειγμάτων N δεν είναι τυχαίος. Αν το dt είναι πολύ μεγάλο και ο παλμός πολύ στενός τότε μπορεί να περιγράφουμε τις σημαντικές περιοχές του παλμού (δηλαδή εκεί που διαφέρει σημαντικά από το μηδέν) με πολύ λίγα σημεία και επομένως οι υπολογισμοί μας δεν θα είναι σωστοί. Στην περίπτωση που το dt είναι πολύ μικρό, επειδή dfdt=1/N έπεται πως θα υπολογίζουμε το φάσμα σε συχνότητες που απέχουν πολύ μεταξύ τους και επομένως ο υπολογισμός μας δεν θα είναι χρήσιμος.

Ένα σήμα κατά τη διάδοσή του μέσα στην ίνα υφίσταται εξασθενίσεις. Ένα χαρακτηριστικό των οπτικών σημάτων είναι ο παράγοντας διεύρυνσης ενός σήματος (BF). Ουσιαστικά, περιγράφει πόσο πιο ευρύς είναι ο είναι ο παλμός εξόδου από τον παλμό εισόδου. Για να μετρήσουμε το εύρος του παλμού υπολογίζουμε την τυπική

```
απόκλιση σ παλμού από την σχέση \sigma^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - m_x)^2 P(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(t) dt}, όπου m_x = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dt P(t) t}{\int_{-\infty}^{+\infty} dt P(t)} και
```

χρησιμοποιούμε την τυπική απόκλιση για να συγκρίνουμε τους δύο παλμούς ως προς το εύρος τους.

P1=abs(x1).^2;

```
mx(1)=trapz(t,P1.*t) / trapz(t,P1);
```

 $sigma2(1)=trapz(t,P1.*(t-mx(1)).^{2}) / trapz(t,P1);$  %Standard Deviation

```
sigma(1)=sqrt(sigma2(1));
```

for n=1:length(L)

% Current fiber length Lcur=L(n); H1=exp(- $a*Lcur/2+j*2*pi^2*f.^2*b1*Lcur$ ); % Estimation of the fiber characteristic % Estimation of the output spectrum Y1=H1.\*X1; y1=1/dt\*fftshift(ifft(fftshift(Y1))); % Estimation of the output pulse in the time domain using OCTAVE's iFFT P1=abs(y1).^2; mx(n)=trapz(t,abs(P1).\*t) / trapz(t,abs(P1));  $sigma2(n)=trapz(t,P1.*(t-mx(n)).^2) / trapz(t,P1);$ %Standard Deviation sigma(n)=sqrt(sigma2(n)); BF1(n)=sigma(n)/sigma(1);

end

Χρησιμοποιώντας πάλι ένα βρόγχο for, υπολογίζουμε τις χαρακτηριστικές συναρτήσεις τις ίνας καθώς και την ισχύ του σήματος για κάθε βήμα της ίνας.

Ύστερα, με την συνάρτηση trapz υπολογίζουμε το mx και το σ για κάθε τμήμα (1 Km) της ίνας. Η συνάρτηση trapz του Octave υπολογίζει το ολοκλήρωμα μίας δοθείσας συνάρτησης. Η συνάρτηση παίρνει δύο μεταβλητές που χωρίζονται με κόμμα, η δεύτερη μεταβλητή είναι η συνάρτηση και η πρώτη είναι η μεταβλητή ως προς την οποία θα ολοκληρωθεί η συνάρτηση. Επειδή ο βρόγχος for ξεκινάει από n=1 υπολογίζουμε χειροκίνητα την πρώτη τιμή της τυπικής απόκλισης σ. Τέλος, υπολογίζουμε τον παράγοντα διεύρυνσης BF σε κάθε σημείο με το να διαιρούμε την τυπική απόκλιση στο σημείο αυτό της ίνας ως προς την τυπική απόκλιση του πρώτου σημείου. Στο Σχήμα 4 απεικονίζουμε τον παράγοντα διεύρυνσης BF σε συνάρτηση με το μήκος του πρώτου κομματιού ίνας.



#### Σχήμα 4: Διεύρυνση του Gaussian παλμού

Στην περίπτωση που αλλάξουμε το πλάτος του παλμού εισόδου και μαζί το πόσο διευρύνεται ο παλμός εξόδου, θα αλλάξει και ο παράγοντας διεύρυνσης.



#### Σχήμα 5: Διεύρυνση του Gaussian παλμού

#### με διαφορετικό πλάτος παλμού εισόδου (1)

Στο Σχήμα 5 βλέπουμε τις αλλαγές που προκύπτουν στον παράγοντας διεύρυνσης αν αλλάξουμε τον παλμό εισόδου με το να αυξήσουμε το t0 από  $0,025*10^{-9}$  σε  $0,05*10^{-9}$ . Το πλάτος του παλμού εξόδου έχει αλλάξει και παρ' όλο που η κλίση της γραφικής παράστασης είναι ίδια, παρατηρούμε πως ο παράγοντας διεύρυνσης είναι σχεδόν 1, δηλαδή το πλάτος μεταβάλλεται πάρα πολύ λίγο.



#### Σχήμα 6: Διεύρυνση του Gaussian παλμού

#### με διαφορετικό πλάτος παλμού εισόδου (2)

Στο Σχήμα 6 βλέπουμε τις αλλαγές που προκύπτουν στον παράγοντας διεύρυνσης αν αλλάξουμε τον παλμό εισόδου με το να μειώσουμε το t0 από  $0,025*10^{-9}$  σε  $0,016*10^{-9}$ . Το πλάτος του παλμού εξόδου έχει αλλάξει και παρ' όλο που η κλίση της γραφικής παράστασης είναι ίδια, παρατηρούμε πως ο παράγοντας διεύρυνσης έχει αυξηθεί πάρα πολύ φτάνοντας την τιμή 4, δηλαδή ο παλμός έχει διευρυνθεί πολύ.

Όπως αναφέραμε πιο πάνω, στα ολοκληρωμένα συστήματα οπτικών ινών συναντάται το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς το οποίο αντισταθμίζεται με διάφορες μεθόδους αντιστάθμισης διασποράς. Στο συγκεκριμένο σύστημα, χρησιμοποιούμε ένα δεύτερο κομμάτι ίνας αμέσως μετά το πρώτο. Το κομμάτι αυτό ίνας δεν θα πρέπει έχει τυχαία χαρακτηριστικά. Το μήκος του πρέπει να είναι μικρότερο από το αρχικό κομμάτι, οπότε και λαμβάνεται 10 Km. Το γινόμενο του ρυθμού απωλειών επί το μήκος της ίνας (a2\*DispL) πρέπει να είναι ίσο με το γινόμενο του ρυθμού απωλειών επί το μήκος της ίνας (a1\*L) οπότε και προκύπτει η τιμή του a2. Τέλος, ο παράγοντας διασποράς b2 προκύπτει από την εξίσωση b1\*L + b2\*DispL =0, δηλαδή το άθροισμα των γινομένων των παραγόντων διασποράς επί το μήκος των ινών πρέπει να είναι ίσο με το 0 οπότε και το b2 είναι -10\*10<sup>-26</sup>.

Αντιθέτως με πριν, στο δεύτερο κομμάτι της ίνας έχουμε σαν παλμό εισόδου τον παλμό εξόδου του πρώτου κομματιού, οπότε και δεν υπολογίζεται εκ νέου (x2=y1;).

Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία, υπολογίζουμε το αναλογικό φάσμα X2 του δεύτερου κομματιού με τον FFT (X2=dt\*fftshift(fft(fftshift(x2))); ).

for n=1:length(DispL)

DispLcur=DispL(n);	% Current fiber length
H2=exp(-a2*DispLcur/2+j*2*pi^2*f.^2*b2*Lcur); characteristic	% Estimation of the fiber
Y2=H2.*X2; spectrum	% Estimation of the output
y2=1/dt*fftshift(ifft(fftshift(Y2))); pulse in the time domain using OCTAVE's iFFT	% Estimation of the output

end

Χρησιμοποιώντας ένα βρόγχο for υπολογίζουμε τη χαρακτηριστική του φίλτρου H2 και το σήμα εξόδου Y2, ενώ για τον υπολογισμό του σήματος y2 χρησιμοποιούμε τον iFFT.

Στο Σχήμα 7 αναπαριστούμε τον παλμό εισόδου όπως εξήλθε από το πρώτο κομμάτι ίνας καθώς και στην έξοδο τον τελικό παλμό του συστήματός μας.

53



#### Σχήμα 7: Διάδοση του παλμού στο δεύτερο κομμάτι ίνας

Παρατηρούμε πως πλέον ο παλμός όχι μόνο έχει διευρυνθεί, αλλά και έχει εξασθενίσει πολύ, κάτι το οποίο αναμέναμε.

P2=abs(x2).^2;

Dispmx(1)=trapz(t,abs(P2).\*t) / trapz(t,abs(P2));

Dispsigma2(1)=trapz(t,abs(P1).\*(t-Dispmx(1)).^2) / trapz(t,abs(P2)); %Standard Deviation

Dispsigma(1)=sqrt(Dispsigma2(1));

for n=1:length(DispL)

DispLcur=DispL(n);

% Current fiber length

H2=exp(-a2\*DispLcur/2+j\*2\*pi^2\*f.^2\*b2\*DispLcur); % Estimation of the fiber characteristic % Estimation of the output Y2=H2.\*X2; spectrum y2=1/dt\*fftshift(ifft(fftshift(Y2))); % Estimation of the output pulse in the time domain using OCTAVE's iFFT P2=abs(y2).^2; Dispmx(n)=trapz(t,P2.\*t) / trapz(t,P2); %Standard Dispsigma2(n)=trapz(t,P2.\*(t-Dispmx(n)).^2) / trapz(t,P2); Deviation Dispsigma(n)=sqrt(Dispsigma2(n)); BF2(n)=Dispsigma(n)/sigma(1);

end

Για να υπολογίσουμε τον παράγοντα διεύρυνσης στο δεύτερο κομμάτι ίνας ακολουθούμε την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήσαμε και στο πρώτο κομμάτι ίνας, υπολογίζοντας την τυπική απόκλιση σ σε κάθε βήμα της ίνας.



Σχήμα 8: Διεύρυνση του Gaussian παλμού στο δεύτερο κομμάτι της ίνας

Για την μελέτη του θορύβου στο σύστημά μας χρησιμοποιούμε την τεχνική Monte-Carlo για να υπολογίσουμε την στατιστική διάφορων τυχαίων μεγεθών, πιο συγκεκριμένα της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Στην ουσία έχουμε ένα βρόγχο for που ξεκινάει με την εντολή

## for n=1:Niterations

και επιτρέπει την εκτέλεση Niterations επαναλήψεων. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζουμε τυχαίους μιγαδικούς αριθμούς με την εντολή

```
Nspec=randn(1,N)+j*randn(1,N);
```

όπου η συνάρτηση randn παράγει τυχαία Gaussian δείγματα. Εξ ορισμού η διακύμανση των παραγόμενων δειγμάτων είναι ίση με 1 ενώ η μέση τιμή του είναι μηδέν. Οι εντολές

Nspec=Nspec.\*H;

```
nsamples=1/dt*fftshift(ifft(fftshift(Nspec)));
```

έχουν ως στόχο να φιλτράρουν τα δείγματα μας με την χαρακτηριστική του φίλτρου που θεωρούμε πως είναι της μορφής RC.

Στη συνέχεια φέρνουμε τα δείγματα στο πεδίο του χρόνου με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Οι εντολές:

avg\_samples=avg\_samples+nsamples;

std\_samples=std\_samples+abs(nsamples).^2;

corr\_samples=corr\_samples+nsamples(N/2+1)\*conj(nsamples);

χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την αναμενόμενη τιμή των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

Στο Σχήμα 9 αναπαριστούμε τις τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης σ για τις 1000 επαναλήψεις που πραγματοποιούμε.



#### Σχήμα 9: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ κανονικοποιημένων δειγμάτων

Παρατηρούμε πως η μέση τιμή των δειγμάτων είναι πολύ μικρότερη από το σ και επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε πως η μέση τιμή των δειγμάτων είναι σταθερή. Επίσης παρατηρούμε πως η διακύμανση είναι σχεδόν σταθερή κάτι που περιμέναμε.

Στο Σχήμα 10 συγκρίνουμε την κανονικοποιημένη συνάρτηση συσχέτισης  $R_{nn}(0,t)/R_{nn}(0,0)$  με την εκθετική συνάρτηση όπου το εύρος του ηλεκτρικού RC φίλτρου είναι το filter 3dB.



Σχήμα 10: Σύγκριση κανονικοποιημένης συνάρτησης αυτοσυσχέτισης

#### με την εκθετική συνάρτηση

Η ταύτιση που παρατηρούμε στο  $\Sigma \chi \eta \mu a \ 10$  δεν είναι τυχαία. Όταν ένας θόρυβος u(t) φιλτράρεται από ένα φίλτρο με χαρακτηριστική H(f), τότε η φασματική του πυκνότητα είναι:

$$S_{nn}(f) = S_{nn}(f) \left| H(f) \right|^2$$

όπου  $S_{uu}(f)$  και  $S_{nn}(f)$  είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του u(t) και n(t) αντίστοιχα. Αν  $S_{uu}(f)=S_0$  δηλαδή ο αρχικός θόρυβος είναι Gaussian, τότε στην περίπτωση όπου έχουμε ότι  $H(f)=\frac{1}{1+j(f/f_e)}$ , θα ισχύει:

$$S_{nn}(f) = S_0 \frac{1}{1 + (f / f_0)^2} (1)$$

και η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης προκύπτει από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της (1),

$$R_{nm}(t) = F^{-1} \left\{ \frac{1}{1 + (f/f_0)^2} \right\} = \frac{1}{2t_0} e^{-|t|/t_0}$$

όπου  $t_0 = (2\pi f_0)^{-1}$ . Επομένως είναι φυσιολογικό να περιμένουμε πως η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που υπολογίζουμε αριθμητικά θα είναι ανάλογη με την εκθετική.

Επιπροσθέτως, μπορούμε να εξηγήσουμε γιατί η τυπική απόκλιση σ στο Σχήμα 9 έχει αυτή την τιμή. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής:

Γεννάμε τυχαία μιγαδικά δείγματα στο πεδίο των συχνοτήτων

$$N(f) = N_r(f) + jN_i(f)$$

όπου εφόσον χρησιμοποιούμε την συνάρτηση randn έπεται ότι η μέση τιμή των  $N_r$  και  $N_i$  είναι μηδέν,

$$E\{N_r\}=E\{N_i\}=0$$

Αν δεν τα πολλαπλασιάζαμε με την χαρακτηριστική του φίλτρου με την εντολή

Nspec=Nspec.\*H;

τότε η διακύμανση τους είναι

$$\sigma^2 = E\{N_r^2\} = E\{N_i^2\} = 1$$

οπότε

$$E\{|N(f)|^{2}\} = E\{|N_{r}(f)|^{2}\} + E\{|N_{i}(f)|^{2}\} = 2\sigma^{2} = 2\sigma^{2}$$

Επειδή όμως πολλαπλασιάζουμε με την χαρακτηριστική του φίλτρου θα έχουμε

$$E\left\{\left|N(f)\right|^{2}\right\} = 2\left|H(f)\right|^{2}$$

Στο πεδίο του χρόνου έχουμε για τα δείγματα του θορύβου,

$$n(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} N(f) e^{j2\pi f t} df$$

Ωστόσο το OCTAVE δεν υπολογίζει τους αναλογικούς μετασχηματισμούς Fourier αλλά προσπαθεί να προσεγγίσει του αναλογικούς μετασχηματισμούς με τους διακριτούς μετασχηματισμούς

$$n(t_n) \cong \Delta f \sum_{m=1}^M N(f_m) e^{j2\pi f_m t_n}$$

οπότε

$$|n(t_n)|^2 = n(t_n)n^*(t_n) \cong (\Delta f)^2 \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=1}^{M} N(f_m)N^*(f_l)e^{j2\pi(f_m - f_l)t_n}$$

και επομένως

$$E\{|n(t_n)|^2\} \cong (\Delta f)^2 \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^M E\{N(f_m)N^*(f_l)\} e^{j2\pi(f_m - f_l)t_n}$$

όμως τα δείγματα  $N(f_m)$  έχουν γεννηθεί το ένα ανεξάρτητα του άλλου, δηλαδή

$$E\{N(f_m)N^*(f_l)\} = E\{N(f_m)\}E\{N^*(f_l)\} = 0 \text{ fram } f_m \neq f_l$$

οπότε

$$E\left\{\left|n(t_{n})\right|^{2}\right\} \cong \left(\Delta f\right)^{2} \sum_{m=1}^{M} E\left\{\left|N\left(f_{m}\right)\right|^{2}\right\} = 2\left(\Delta f\right)^{2} \sum_{m=1}^{M} \left|H\left(f_{m}\right)\right|^{2}$$

Η τυπική απόκλιση, όπως μπορούμε να δούμε και από το Σχήμα 9, κυμαίνεται γύρω από το 1 ακριβώς γιατί κανονικοποιούμε τα δείγματα με το να τα διαιρούμε στο πεδίο των συχνοτήτων με Ι με τις εντολές

I=sum(abs(Hef).^2);

$$I=sqrt(I*2*df^2);$$

Nspec=Nspec/I;

Στην περίπτωση που δεν κανονικοποιούσαμε τα δείγματά μας, τότε τα δείγματα της τυπικής απόκλισης θα ήταν περίπου ίσα με  $2.5 \times 10^9$ , όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 11.





#### 2. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Από τις παρατηρήσεις μας προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

Ο παλμός κατά την έξοδό του από το πρώτο κομμάτι ίνας είναι εξασθενημένος κυρίως λόγω των απωλειών και λίγο διευρυμένος εξαιτίας της διασποράς. Κατά την έξοδό του από το σύστημα, ο παλμός έχει διευρυνθεί και έχει εξασθενίσει σε μεγάλο βαθμό. Ο παράγοντας διεύρυνσης στο δεύτερο κομμάτι ίνας μεγαλώνει με ρυθμό μεγαλύτερο από το πρώτο κομμάτι, αφού ο παλμός εξόδου διευρύνεται πολύ περισσότερο από τον αρχικό σε σχέση με τον παλμό εξόδου στο πρώτο κομμάτι ίνας. Μετά την εισαγωγή του θορύβου στο σύστημά μας, η μέση τιμή των δειγμάτων είναι πολύ μικρότερη από την τυπική απόκλιση σ, οπότε η μέση τιμή των δειγμάτων είναι σταθερή. Επίσης, παρατηρούμε πως η διακύμανση είναι σχεδόν

Τα αποτελέσματα αυτά και το ίδιο το σύστημα μας βοηθούν να μελετήσουμε την συμπεριφορά του παλμού στον πραγματικό κόσμο κατά τη διάδοσή του σε μία οπτική ίνα.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αβραμόπουλος, Η. Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών. ΕΜΠ, Σχολή

Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

- Agrawal, Govind P. (2001). "Nonlinear Fiber Optics," Third Edition, Academic Press, New York
- Alouini, M.S., Simon, M.K.Digital Communications over Fading Channels:A Unified Approach to Perfomance Analysis
- Asobe, M. (1997). Opt. Fiber Technol. 3, 142 (1997).
- Butcher, P. N., Cotter, D. N. (1990). The Elements of Nonlinear Optics. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Καμαλάκης, Θ. (2012). Προσομοίωση Συστημάτων Οπτικών Επικοινωνιών με το GNU-OCTAVE: ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών
- Κουλουμέντας, Χ. (2010). Οπτικά Κυκλώματα μη Γραμμικών Ινών για την Υλοποίηση Σύνθετων Διαδικασιών Επεξεργασίας Σήματος σε Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών. Διδακτορική Διατριβή

Melloni, A., Martinelli, M., and Fellegara, A. (1999). Fiber Integ. Opt. 18, 1

- Μπακόπουλος, Π. (2010). Ευρυζωνικά φωτονικά συστήματα παραγωγής και επεξεργασίας σήματος με ισχυρά μη-γραμμικές οπτικές ίνες, με εφαρμογή σε τηλεπικοινωνίες και βιοϊατρική απεικόνιση. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Αθήνα
- Sphicopoulos, T. Recent Trends in Optical Transmission Systems. Optical Communications Laboratory National and Kapodistrian University of Athens,

Greece