



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

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΠΛΩΜΕΝΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΠΟΛΥΡΥΘΜΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΚΤΗ RAKE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΚΑΜΙΤΣΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2006



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

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΠΛΩΜΕΝΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΠΟΛΥΡΥΘΜΙΚΕΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΚΤΗ RAKE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΚΑΜΙΤΣΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την/...../2006

.....
N. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δ. Κακλαμάνη
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Π. Φράγκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2006

.....

Ιωάννης Ε. Καμίτσος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Ιωάννης Ε. Καμίτσος, 2006

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή της τεχνικής απλωμένου φάσματος (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα-CDMA) σε πολυρυθμικές οπτικές ίνες με ταυτόχρονη χρήση ενός δέκτη RAKE.

Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των οπτικών ινών με έμφαση στις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για επίτευξη υψηλότερου γινομένου εύρος ζώνης επί απόσταση της πολυρυθμικής ίνας. Επίσης, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση της τεχνικής απλωμένου φάσματος τόσο ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης σε κοινό μέσο μετάδοσης, όσο και ως τεχνική εξισορρόπησης της πολυδιαδρομικής διάδοσης που ενυπάρχει σε πολλούς διαύλους μετάδοσης. Η εξισορρόπηση αυτή γίνεται σε συνδυασμό με ένα συγκεκριμένο είδος δέκτη που ονομάζεται δέκτης RAKE.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB αναπτύσσονται κώδικες με τους οποίους προσομοιώνεται η εφαρμογή της τεχνικής απλωμένου φάσματος σε συγκεκριμένη πολυρυθμική ίνα με στόχο να εξαλειφθεί η αρνητική επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης που χαρακτηρίζει τις πολυρυθμικές ίνες. Μελετώνται διάφορα μήκη της συγκεκριμένης ίνας και εξετάζονται οι ταχύτητες διάδοσης που μπορούν να υποστηριχθούν σε συνάρτηση με το CDMA κέρδος, ώστε να εξισορροπηθεί το περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης και να επιτευχθεί στην έξοδο του δέκτη RAKE τιμή BER μικρότερη από κάποια τιμή σύγκλισης.

Τέλος, αναπτύσσεται συγκεκριμένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης προκειμένου να υπολογιστούν οι χρόνοι ολίσθησης του CDMA κώδικα στα fingers του δέκτη, με τους οποίους επιτυγχάνεται BER μικρότερο από την τιμή σύγκλισης.

Λέξεις κλειδιά

Πολυρυθμικές ίνες, μονορυθμικές ίνες, δείκτης διάθλασης, διασπορά, διασυμβολική παρεμβολή, καθυστέρηση ομάδας, CDMA, πολυδιαδρομική διάδοση, δέκτης RAKE, BER.

ABSTRACT

This diploma thesis aims mainly at the application of the spread spectrum technique (code division multiple access-CDMA) on multimode optical fibers using at the same time a RAKE receiver.

A literature review on optical fibers is presented at the beginning of this work, with emphasis on methods developed to achieve higher products of bandwidth times distance over multimode fibers. This is followed by a presentation of the theoretical analysis of the spread spectrum technique, which is a technique of multiple access on a common transmission channel as well as a compensative technique against multiway propagation that takes place in many transmission channels. This compensation is achieved by using a specific kind of receiver, the so called RAKE receiver.

By employing MATLAB software, program codes were developed and used to simulate the application of the spread spectrum technique on a multimode fiber in order to compensate for the negative effect of multiway propagation that characterizes multimode fibers. Different lengths of the same multimode fiber were studied, while the propagation speeds that can be supported in connection to the CDMA gain were also investigated to achieve a BER value that is smaller than a convergent value that can be accomplished at the output of the RAKE receiver.

Finally, an optimization algorithm was developed to obtain the CDMA code shifting times that correspond to the receiver fingers, on the basis of which a BER value smaller than the convergent point is achieved.

Key words

Multimode fibers, singlemode fibers, refractive index, dispersion, intersymbol interference, group delay, CDMA, multiway propagation, RAKE receiver, BER.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή κ. Ν. Ουζούνογλου για την ανάθεση του θέματος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ		
1.	Εισαγωγή στις οπτικές ίνες	9
2.	Κατηγοριοποίηση οπτικών ινών	12
3.	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA)	21
4.	Πολυδιαδρομική διάδοση και δέκτης RAKE	26
5.	Πολυρυθμικές ίνες και τεχνική απλωμένου φάσματος	
5.1	Ανάλυση της πολυρυθμικής ίνας που μελετάται στη Διπλωματική Εργασία	29
5.2	Προσομοίωση της τεχνικής του απλωμένου φάσματος (CDMA) και αναπτυχθέντες κώδικες MATLAB	42
6.	Αποτελέσματα – Συζήτηση	54
7.	Επίλογος	91
8.	Αναφορές	92

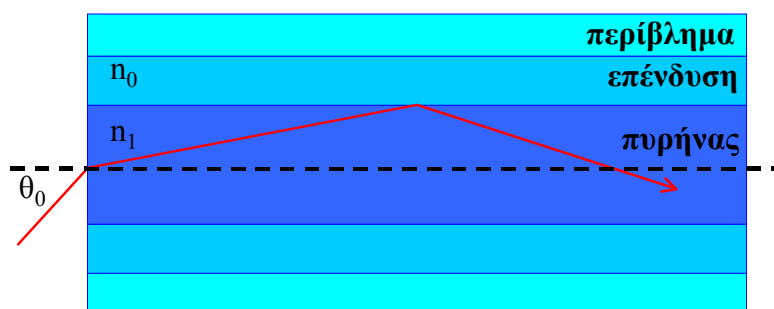
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	
Σχήμα 1	9
Σχήμα 2	14
Σχήμα 3	15
Σχήμα 4	16
Σχήμα 5	17
Σχήμα 6	18
Σχήμα 7	19
Σχήμα 8	21
Σχήμα 9	27
Σχήμα 10	70
Σχήμα 11	89

ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	
Πίνακας 1	31
Πίνακας 2	54
Πίνακας 3	55
Πίνακας 4	71
Πίνακας 5	74
Πίνακας 6	90

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια για τη μετάδοση οπτικών σημάτων-παλμών σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Και τούτο διότι χαρακτηρίζονται από αρκετά χαμηλές τιμές αποσβέσεων για συγκεκριμένα μήκη κύματος λειτουργίας και από μεγάλο εύρος ζώνης, γεγονός που οδηγεί στην επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων διάδοσης των σημάτων. Η τροφοδοσία μιας οπτικής ίνας με οπτικούς παλμούς γίνεται με κατάλληλους πομπούς. Συγκεκριμένα, ο πομπός που βρίσκεται στην είσοδο της ίνας δέχεται κωδικοποιημένη πληροφορία ηλεκτρικών παλμών από ένα αγωγό χαλκού. Στη συνέχεια, επεξεργάζεται και μεταφράζει αυτή την πληροφορία σε ισοδύναμους κωδικοποιημένους παλμούς φωτός. Για αυτή τη διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, μια δίοδος εκπομπής φωτός (light emitting diode-LED) ή κάποιο είδος laser. Χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο φακό, οι οπτικοί παλμοί τροφοδοτούνται μέσα στην ίνα και στη συνέχεια διαδίδονται σε υψηλές ταχύτητες.

Κάθε ίνα χαρακτηρίζεται από τρεις περιοχές, τον πυρήνα που είναι κατασκευασμένος από πυριτική ύαλο υψηλής ποιότητας, την επένδυση και το εξωτερικό περίβλημα. Οι τρεις αυτές περιοχές συνιστούν ένα ομοαξονικό σύστημα κυλινδρικά συμμετρικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση οπτικής ίνας

Ο πυρήνας είναι η κυριότερη περιοχή μιας οπτικής ίνας, δεδομένου ότι εκεί συγκεντρώνεται η οπτική ισχύς, δηλαδή είναι η περιοχή όπου γίνεται η

κυματοδηγήση των κυμάτων/παλμών φωτός. Για να γίνεται η κυματοδηγήση του φωτός στον πυρήνα πρέπει ο δείκτης διάθλασης του να είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης της επένδυσης. Επίσης, για να μην διαφεύγουν τα κυματοδηγούμενα κύματα στην επένδυση της ίνας θα πρέπει να ικανοποιείται η αρχή της “ολικής εσωτερικής ανάκλασης”. Η αρχή αυτή ορίζει ότι εάν η γωνία θ_0 που σχηματίζει η ακτίνα φωτός με τον άξονα της ίνας (Σχήμα 1), κατά την είσοδό της ακτίνας στην ίνα, είναι μικρότερη από μια κρίσιμη γωνία θ_{critical} τότε η ακτίνα αυτή παγιδεύεται στον πυρήνα. Δηλαδή, η ακτίνα διαδίδεται μέσα στον πυρήνα μέσω διαδοχικών ολικών εσωτερικών ανακλάσεων στην μεσεπιφάνεια τοιχώματα πυρήνα-επένδυσης ίνας (Σχήμα 1). Η αρχή της “ολικής εσωτερικής ανάκλασης” εκφράζεται με την παρακάτω σχέση [1]:

$$\theta_0 \leq \theta_{\text{critical}} = \sin^{-1} \left(\frac{(n_1^2 - n_0^2)^{1/2}}{n_\alpha} \right) \quad (1)$$

όπου $n_\alpha \approx 1$ είναι ο δείκτης διάθλασης του αέρα, n_1 ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και n_0 ο δείκτης διάθλασης της επένδυσης ($n_1 > n_0$).

Για να μην υπάρχει υψηλή απόσβεση και παραμόρφωση των μεταδιδόμενων σημάτων είναι απαραίτητο ο πυρήνας να είναι κατασκευασμένος από υλικό με μικρή ενδογενή οπτική απορρόφηση και διασπορά. Ιδιαίτερα, η διασπορά αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα για τη μετάδοση ενός σήματος μέσω μιας οπτικής ίνας. Ο βασικός τύπος διασποράς είναι η χρωματική διασπορά, η οποία υπάρχει σε κάθε είδος ίνας και αντιπροσωπεύει την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του πυρήνα από τη συχνότητα του οπτικού σήματος. Όταν ένας οπτικός παλμός, που αποτελείται φασματικά από πολλές συχνότητες, διαδίδεται στην ίνα τότε κάθε φασματική συνιστώσα διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα και άρα φτάνει στην έξοδο της ίνας σε διαφορετική χρονική στιγμή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να μην επηρεάζει το φάσμα του παλμού, ωστόσο οδηγεί σε χρονική διαπλάτυνσή του.

Ένα άλλο είδος διασποράς που ενυπάρχει σε όλα τα είδη οπτικών ινών και που συντελεί στη χρονική διαπλάτυνση ενός οπτικού παλμού είναι η διασπορά κυματοδηγού. Οφείλεται στο γεγονός ότι η σταθερά διάδοσης κάθε

κυματοδηγούμενου ρυθμού, δηλαδή κάθε κυματοδηγούμενης κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξαρτάται από τη διάμετρο του πυρήνα σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται επίσης και στο γεγονός ότι το φως διαδίδεται στον πυρήνα με διαφορετικό τρόπο από ότι στην επένδυση της ίνας.

Όταν πρέπει να μεταδοθεί μέσω της ίνας πληροφορία που αποτελείται από διαδοχικούς οπτικούς παλμούς, με κάθε παλμό να αντιστοιχεί σε ένα bit πληροφορίας, η χρονική διαπλάτυνση των παλμών οδηγεί σε αλληλεπικάλυψή τους. Τούτο δεν επιτρέπει στο δέκτη να αναγνωρίσει χωρίς λάθη τη σειρά των bit που μεταδόθηκαν, φαινόμενο που ονομάζεται διασυμβολική παρεμβολή.

2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Οι οπτικές ίνες κατηγοριοποιούνται σε μονορυθμικές και σε πολυρυθμικές. Οι μονορυθμικές ίνες έχουν πολύ μικρή διάμετρο πυρήνα (της τάξης των 9 μm), γεγονός που επιτρέπει τη διέγερση μόνο του βασικού ρυθμού κυματοδότησης (βασική κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλές ταχύτητες διάδοσης για πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς τη χρήση επαναληπτών. Το κύριο μειονέκτημα των πολυρυθμικών ινών (συνήθης διάμετρος πυρήνα 50 μm ή 62,5 μm) είναι ότι στα συνήθη μήκη κύματος λειτουργίας διεγείρονται πολλοί ρυθμοί, δηλαδή πολλές κατανομές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αυτό μπορεί να παρασταθεί γεωμετρικά με τη διάδοση στην πολυρυθμική ίνα πολλών ακτίνων φωτός. Κάθε ακτίνα φτάνει στην έξοδο σε διαφορετική χρονική στιγμή ανάλογα με την απόσταση που διανύει μέσα στην ίνα. Δηλαδή, οι ρυθμοί έχουν διαφορετικές καθυστερήσεις ομάδας (group delays), με αποτέλεσμα ένα σήμα να φτάνει στην έξοδο της ίνας σε πολλές καθυστερημένες εκδοχές. Αυτό είναι το φαινόμενο της διασποράς λόγω των πολλαπλών τρόπων διάδοσης, πέραν της χρωματικής διασποράς και της διασποράς κυματοδηγού που επίσης υπάρχουν. Συνεπώς, στις πολυρυθμικές ίνες το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής είναι πολύ ισχυρότερο σε σχέση με τις μονορυθμικές ίνες και περιορίζει σε σημαντικό βαθμό τη ταχύτητα διάδοσης μέσα στην ίνα.

Παρά τα παραπάνω προφανή μειονεκτήματα, οι πολυρυθμικές ίνες είναι αυτές που κυριαρχούν σήμερα στα περισσότερα δίκτυα κορμού (LANs και WANs). Ο λόγος είναι το πολύ χαμηλό κόστος εγκατάστασης και διατήρησης δικτύων πολυρυθμικών ινών. Ακόμη, λόγω της μεγάλης διαμέτρου πυρήνα και της ελαστικότητάς τους οι πολυρυθμικές ίνες είναι πολύ ανθεκτικές σε μηχανικές καταπονήσεις.

Σκοπός, λοιπόν, των ερευνητικών προσπαθειών τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση διάφορων τεχνικών με στόχο την αύξηση της ταχύτητας διάδοσης του οπτικού σήματος σε πολυρυθμικές ίνες ακόμα και σε πολύ μεγάλα μήκη ζεύξεων. Μια τεχνική για τον περιορισμό της διασποράς λόγω πολλαπλών τρόπων διάδοσης, άρα και για την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης πληροφορίας μέσω της ίνας, είναι η κατασκευή και χρήση πολυρυθμικών ινών όπου ο δείκτης διάθλασης ελαττώνεται βαθμιαία καθώς αυξάνει η ακτινική απόσταση από το κέντρο του πυρήνα. Μια τέτοια

πολυρυθμική ίνα χαρακτηρίζεται ως graded index ίνα, σε αντίθεση με τη step-index ίνα όπου ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι ομοιόμορφος και ανεξάρτητος της ακτινικής απόστασης από το κέντρο του πυρήνα. Ο δείκτης διάθλασης μιας graded index ίνας έχει την εξής μορφή:

$$n_1 \left[1 - 2\Delta_1 \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^q \right]^{1/2}, \text{ για } \rho < \alpha \quad (2\alpha)$$

$n(\rho) =$

$$n_1 [1 - 2\Delta_1]^{1/2} = n_0, \text{ για } \rho > \alpha \quad (2\beta)$$

Στην παραπάνω σχέση ρ είναι η απόσταση από το κέντρο του πυρήνα, α είναι η ακτίνα του πυρήνα, n_1 ο δείκτης διάθλασης για $\rho=0$, n_0 ο δείκτης διάθλασης της επένδυσης και $\Delta_1 = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2}$. Η παράμετρος q καθορίζει τη μορφή που έχει η γραφική

παράσταση του δείκτη διάθλασης ως προς ρ και παίρνει τιμές από 1 μέχρι ∞ . Σημειώνεται ότι για $q \rightarrow \infty$ η ίνα εκφυλίζεται σε step-index ίνα, ενώ για $q=2$ η κατανομή του δείκτη διάθλασης έχει παραβολική μορφή.

Στην περίπτωση που η ίνα είναι graded index, οι ρυθμοί που κυματοδηγούνται κοντά στο κέντρο του πυρήνα, δεδομένου ότι διανύουν μικρότερη απόσταση σε σχέση με αυτούς που κυματοδηγούνται κοντά στα τοιχώματα, συναντούν υψηλότερη τιμή δείκτη διάθλασης και άρα κυματοδηγούνται με χαμηλότερη ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ακτίνες που αναπαριστούν τους κυματοδηγούμενους ρυθμούς να φτάνουν με μικρές χρονικές αποκλίσεις στην έξοδο της ίνας και έτσι να περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό η διασπορά λόγω πολλαπλών τρόπων διάδοσης.

Μια άλλη σημαντική τεχνική που ερευνάται στοχεύει στον περιορισμό των κυματοδηγούμενων ρυθμών που διεγείρονται σε μια πολυρυθμική ίνα [2]. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται πολύ η διασπορά λόγω πολλαπλών τρόπων διάδοσης και έτσι αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας. Η επιλεκτική διέγερση κάποιων ρυθμών μπορεί να γίνει αν η δέσμη φωτός που παράγεται από ένα laser-πομπό κατευθυνθεί σε συγκεκριμένα σημεία του άκρου εισόδου της ίνας. Ακολουθεί

αναφορά σε πειράματα που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια προς αυτή την κατεύθυνση.

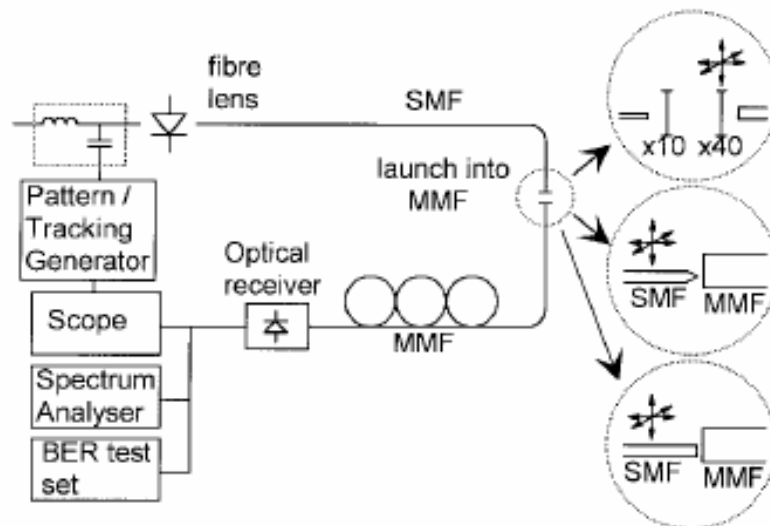
Η δέσμη φωτός που παράγεται από το laser-πομπό αρχικά συλλέγεται μέσω φακού από μια μονορυθμική ίνα. Στη συνέχεια, υπάρχουν τρεις επιλογές για το πώς θα μεταφερθεί το φως από τη μονορυθμική στην πολυρυθμική ίνα.

(α) Μέσω δύο φακών: το φως που εξέρχεται από τη μονορυθμική ίνα κατευθύνεται σε έναν ευθυγραμμίζοντα φακό και μέσω αυτού σε ένα δεύτερο εστιακό φακό. Από εκεί καταλήγει στην πολυρυθμική ίνα. Η χρήση των φακών αυτών επιτρέπει τη μεταβολή του μεγέθους της κηλίδας που δημιουργείται στο άκρο εισόδου της πολυρυθμικής ίνας.

(β) Τοποθετείται ένας μόνο φακός ανάμεσα στη μονορυθμική και στην πολυρυθμική ίνα. Με αυτή τη διάταξη δημιουργείται μια πολύ μικρή κηλίδα στο άκρο εισόδου της πολυρυθμικής ίνας.

(γ) Το άκρο εξόδου της μονορυθμικής ίνας τοποθετείται ακριβώς δίπλα στο άκρο εισόδου της πολυρυθμικής ίνας.

Οι τρεις αυτοί τρόποι φαίνονται παραστατικά στο ακόλουθο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σχηματική αναπαράσταση των τρόπων μεταφοράς του φωτός από τη μονορυθμική στην πολυρυθμική ίνα [2]

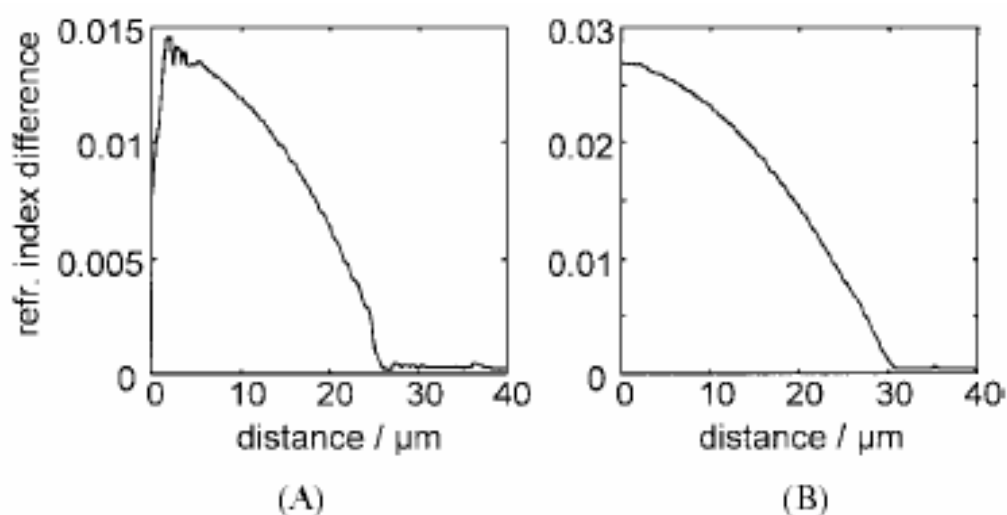
Ποια από τις τρεις παραπάνω μεθόδους επιλέγεται κάθε φορά εξαρτάται από το μήκος κύματος λειτουργίας. Για το σύνηθες μήκος κύματος λειτουργίας των 1300nm επιλέγεται η τρίτη μέθοδος, με τη διάμετρο του πυρήνα της μονορυθμικής ίνας να ανέρχεται περίπου στα 9 μm .

Αντίστοιχα μελετώνται δύο ειδών πολυρυθμικές ίνες:

(A) graded index ίνα με διάμετρο πυρήνα 50 μm και παράμετρο του προφίλ δείκτη διάθλασης $q=2,1$

(B) graded index ίνα με διάμετρο πυρήνα 62,5 μm και παράμετρο του προφίλ δείκτη διάθλασης $q=1,9$.

Το προφίλ των δεικτών διάθλασης των ινών A, B φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.



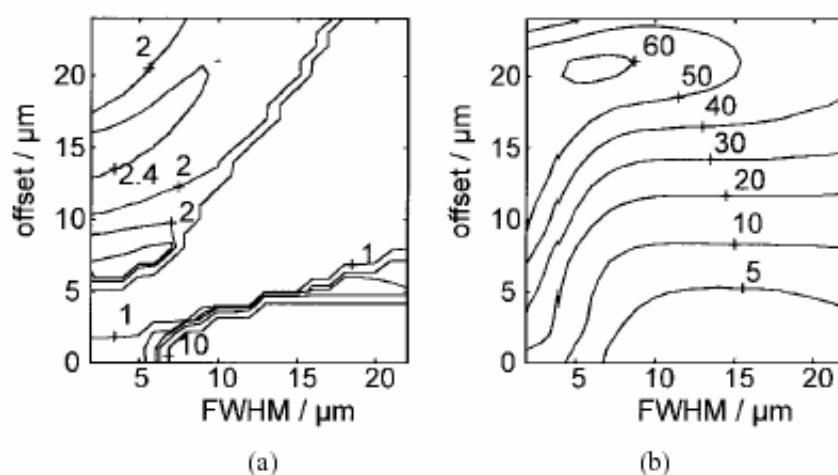
Σχήμα 3. Κατανομή δεικτών διάθλασης των ινών A και B σε σχέση με την απόσταση από το κέντρο του πυρήνα [2]

Σημειώνεται ότι ο δείκτης διάθλασης της ίνας A έχει καταπιεστεί στο κέντρο του πυρήνα. Επιπλέον, το laser εκπομπής είναι ένα Fabry-Perot laser που λειτουργεί στα 1300nm. Μπορούν να παρατηρηθούν δύο περιπτώσεις πολύ υψηλής αύξησης του εύρους ζώνης των ινών A και B σε σχέση με την λειτουργία τους υπό διέγερση όλων των ρυθμών.

Για την ίνα A ισχύει:

- Όταν φωτίζεται το κέντρο του άκρου εισόδου της πολυρυθμικής ίνας με μια ακτίνα διαμέτρου μεγαλύτερης των 7 μm (center launch) τότε διεγείρεται κυρίως ο χαμηλότερης τάξης ρυθμός και η διασπορά λόγω τρόπων διάδοσης σχεδόν εξαφανίζεται.
- Όταν η ίνα φωτίζεται με ακτίνα εύρους λιγότερο από 8 μm σε απόσταση περίπου 15 μm από το κέντρο του πυρήνα (offset launch) τότε διεγείρεται περίπου το 50% των ρυθμών και το εύρος ζώνης αυξάνται κατά 2,4 φορές.

Τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται παραστατικά στο παρακάτω Σχήμα 4.



Σχήμα 4, (a) Βελτίωση του εύρους ζώνης της ίνας A (σε σχέση με όταν λειτουργεί υπό συνθήκες διέγερσης όλων των ρυθμών) για κάθε συνδυασμό εύρους ακτίνας (FWHM) και απόστασης από το κέντρο του πυρήνα (offset) σε μήκος κύματος 1300nm (b) Αριθμός των group ρυθμών που διεγείρονται για κάθε συνδυασμό εύρους ακτίνας (FWHM) και απόστασης από το κέντρο του πυρήνα (offset) [2]

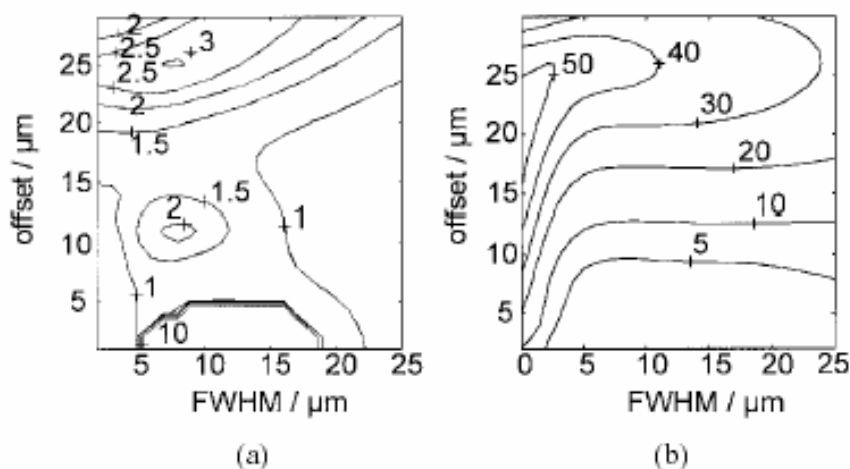
Για την ίνα B του Σχήματος 3 ισχύει:

- Όταν φωτίζεται το κέντρο του άκρου εισόδου της πολυρυθμικής ίνας με μια ακτίνα εύρους 6-18 μm τότε διεγείρεται μόνο ο θεμελιώδης ρυθμός (LP_{01}). Κάτι

τέτοιο είναι πολύ βασικό, γιατί τότε η ίνα αποκτά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα μονορυθμικής διάδοσης με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης.

- Όταν, αντίθετα, η ίνα φωτίζεται με ακτίνα πολύ μικρού εύρους σε απόσταση 18-28 μm από το κέντρο του άκρου εισόδου της (offset launch), τότε διεγείρεται ένα υποσύνολο των group ρυθμών υψηλής τάξης. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του εύρους ζώνης μέχρι και 3 φορές σε σχέση με την περίπτωση διέγερσης όλων των ρυθμών.

Τα παραπάνω φαίνονται και στο Σχήμα 5 που ακολουθεί.

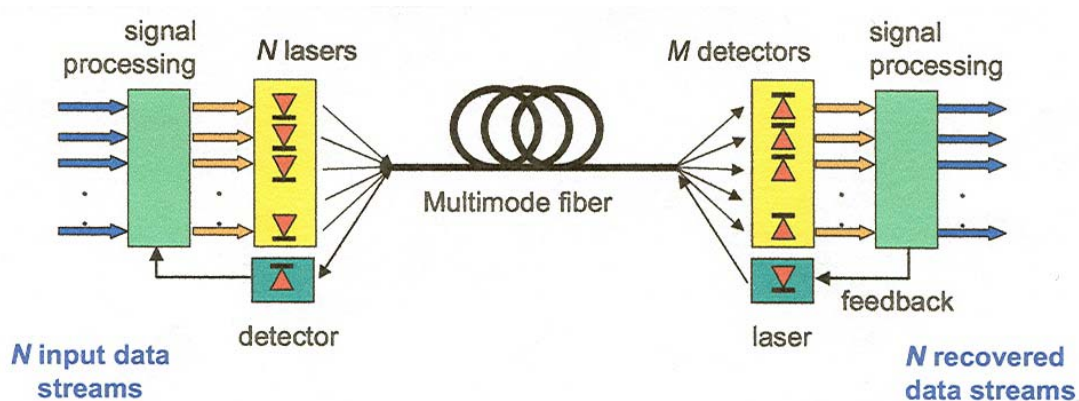


Σχήμα 5, (a) Βελτίωση του εύρους ζώνης της ίνας B (σε σχέση με όταν λειτουργεί υπό συνθήκες διέγερσης όλων των ρυθμών) για κάθε συνδυασμό εύρους ακτίνας (FWHM) και απόστασης από το κέντρο του πυρήνα (offset) σε μήκος κύματος 1300nm (b) Αριθμός των group ρυθμών που διεγείρονται για κάθε συνδυασμό εύρους ακτίνας (FWHM) και απόστασης από το κέντρο του πυρήνα (offset) [2]

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ένα σημαντικό μειονέκτημα της διέγερσης μόνο του βασικού ρυθμού είναι ότι για να επιτευχθεί αυτή η διέγερση απαιτούνται πολύ ισχυρές αντοχές στην ευθυγράμμιση της μονορυθμικής με την πολυρυθμική ίνα. Επιπλέον, όταν διεγείρεται μόνο ο βασικός ρυθμός εμφανίζονται αρνητικές επιπτώσεις λόγω σύζευξης ρυθμών, κάτι που παρατηρείται σε περιπτώσεις διαταραχής του προφίλ του δείκτη διάθλασης του πυρήνα.

Αντίθετα, η τεχνική διέγερσης ενός υποσυνόλου των group ρυθμών υψηλής τάξης δεν είναι ευαίσθητη σε μηχανικές καταπονήσεις της ίνας, οι οποίες μπορούν να συμβούν πολύ συχνά. Μπορεί, βέβαια, οι υψηλής τάξης ρυθμοί να χαρακτηρίζονται από υψηλότερη εξασθένηση, ωστόσο το φαινόμενο αυτό είναι αμελητέο για ζεύξεις μικρότερες του 1 km που ενδιαφέρουν στην πράξη.

Μια πολύ σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης σε μια πολυρυθμική ίνα μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση τεχνικών MIMO (multiple input multiple output) [3]. Συγκεκριμένα, στην είσοδο της ίνας τοποθετούνται N laser-πομποί και στην έξοδο M φωτοανιχνευτές αντίστοιχα (με $M \geq N$), όπως φαίνεται και στην παρακάτω Σχήμα 6.



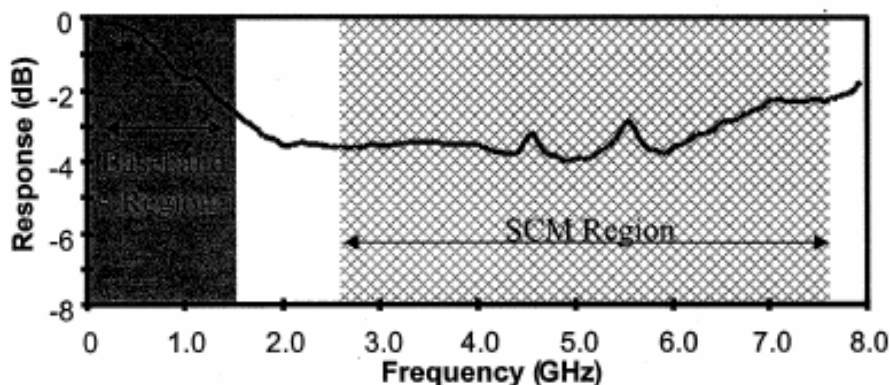
Σχήμα 6. Χρήση τεχνικής MIMO σε πολυρυθμική ίνα [3]

Κάθε ένα από τα laser-πομπούς διεγείρει ένα υποσύνολο από τα συνολικά group ρυθμών, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτοί οι ρυθμοί μπορούν να τροφοδοτηθούν με μια συγκεκριμένη ακολουθία οπτικών παλμών, που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ακολουθία bit πληροφορίας. Άρα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι κάθε ένα από τα n ανεξάρτητα και διαφορετικά υποσύνολα ρυθμών που διεγείρονται από τα N laser-πομπούς μπορεί να λειτουργήσει ως ένα ανεξάρτητο κανάλι πληροφοριών. Θα περίμενε, λοιπόν, κανείς ότι μια τέτοια τεχνική θα οδηγούσε σε συνολική ταχύτητα μέσα στην ίνα όσο το άθροισμα των ταχυτήτων των επιμέρους καναλιών. Αυτό όμως δεν είναι άμεσα εφικτό γιατί μέσα στην ίνα παρατηρείται σύζευξη (και άρα ανταλλαγή ενέργειας) ρυθμών που ανήκουν σε γειτονικά κανάλια. Έτσι, κάθε φωτοανιχνευτής δεν ανιχνεύει αποκλειστικά και μόνο την ενέργεια των

ρυθμών του καναλιού για το οποίο προορίζεται. Αντίθετα, η έξοδος κάθε φωτοανιχνευτή συνίσταται σε μια μίξη σημάτων που προέρχονται από γειτονικά κανάλια. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αναιρεθεί με κατάλληλη ηλεκτρική επεξεργασία σήματος. Η επεξεργασία αυτή οδηγεί στο διαχωρισμό των σημάτων στην έξοδο της ίνας, με αποτέλεσμα να αποκαθίστανται οι αρχικές ακολουθίες bit που αντιστοιχούν στα επιμέρους κανάλια. Τότε, μόνο μπορεί να ειπωθεί ότι η συνολική ταχύτητα μέσα στην ίνα ισοδυναμεί με το άθροισμα των ταχυτήτων των επιμέρους καναλιών.

Πειράματα που έχουν γίνει σε αυτή την κατεύθυνση για $N=M=2$ έχουν δείξει ότι ταχύτητα 1 Mbps ανά κανάλι είναι εφικτή χρησιμοποιώντας υπολογιστή για off-line επεξεργασία σήματος. Η χρήση κατάλληλων υψηλής ταχύτητας κυκλωμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτητες επεξεργασίας σήματος της τάξης ακόμα και Gbps.

Τέλος, μια ακόμη σημαντική τεχνική για την αύξηση της ταχύτητας διάδοσης σε μεγάλα μήκη πολυρυθμικής ίνας είναι η χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος (wavelength division multiplexing-WDM) σε συνδυασμό με πολυπλεξία φέροντος (subcarrier multiplexing-SCM) [4]. Σε αντίθεση με τις μονορυθμικές ίνες, η απόκριση συχνότητας μιας πολυρυθμικής ίνας δε μειώνεται σταθερά μετά το σημείο 3-dB που ορίζει το βαθυπερατό εύρος ζώνης της ίνας. Παρακάτω φαίνεται η απόκριση συχνότητας μιας πολυρυθμικής ίνας διαμέτρου 62,5 μm , μήκους 300 m, σε μήκος κύματος λειτουργίας 1300 nm, και μάλιστα στη χειρότερη περίπτωση (δηλαδή, όταν διεγείρονται όλοι οι δυνατοί ρυθμοί).



Σχήμα 7. Απόκριση συχνότητας μιας πολυρυθμικής ίνας διαμέτρου 62,5 μm , μήκους 300 m, σε μήκος κύματος λειτουργίας 1300 nm, και στη χειρότερη περίπτωση [4]

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μεγάλες περιοχές σχετικά σταθερής απόκρισης συχνότητας σε συχνότητες πέραν του βαθυπερατού εύρους ζώνης. Οι περιοχές αυτές, που χαρακτηρίζονται σαν ζωνοπερατές περιοχές, μπορούν να υποστηρίξουν επιπρόσθετα κανάλια πληροφορίας με τη χρήση της SCM. Συγκεκριμένα, διαμορφώνοντας ένα υψίσυχο φέρον με μια NRZ ροή πληροφορίας βασικής ζώνης χρησιμοποιώντας τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης, όπως FSK ή PSK, είναι δυνατό να μεταδοθούν επιπρόσθετα κανάλια σε αυτές τις ζωνοπερατές περιοχές. Έχει αποδειχτεί ότι με την SCM μπορεί να μεταδοθεί πληροφορία ταχύτητας 2,5 Gbps σε 300m πολυρυθμικής ίνας διαμέτρου 62,5μm χωρίς να υπάρχει εσφαλμένη αναγνώριση ψηφίων στο δέκτη. Για να γίνει αυτό, μια ψευδοτυχαία ακολουθία bits συχνότητας 2,5 Gbps διαμορφώνει ένα φέρον συχνότητας 5,1 GHz χρησιμοποιώντας BPSK διαμόρφωση. Το τελικό σήμα διεγείρει ένα Fabry-Perot laser που λειτουργεί στα 1300 nm. Στο δέκτη, μετά από τις αντίστοιχες αποδιαμορφώσεις, το κανάλι δεδομένων συχνότητας 2,5 Gbps αναγεννάται πλήρως. Η χωρητικότητα της πολυρυθμικής ίνας μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω αν η SCM συνδυαστεί με την τεχνική της πολυπλεξίας μήκους κύματος. Η διαμορφωμένη ακολουθία bits συχνότητας 2,5 Gbps μπορεί να διεγείρει όχι μόνο ένα, αλλά περισσότερα laser που λειτουργούν σε γειτονικά μήκη κύματος. Έτσι, αν διεγερθούν 40 laser που λειτουργούν σε μήκη κύματος που διαδοχικά απέχουν 0,8 nm (100 GHz απόσταση) τότε μέσα στην πολυρυθμική ίνα δημιουργούνται 40 κανάλια SCM των 2,5 Gbps. Η συνολική λοιπόν χωρητικότητα της ίνας ανέρχεται στα $40 \times 2,5\text{Gbps}=100\text{Gbps}$.

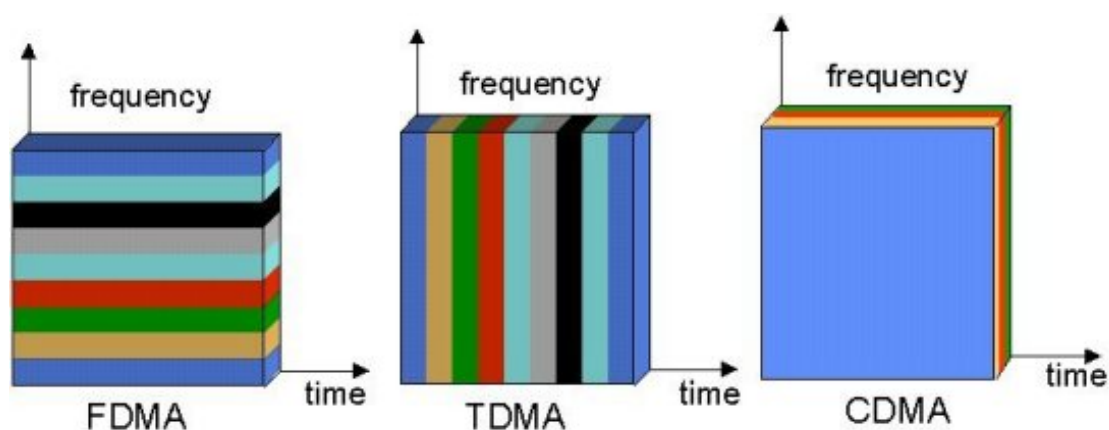
3. ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΔΙΑΙΡΕΣΗΣ ΚΩΔΙΚΑ (CDMA)

Ένα πρόβλημα που συναντάται πολύ συχνά στις τηλεπικοινωνίες αφορά την περίπτωση που πολλοί πομποί-χρήστες ανταγωνίζονται μεταξύ τους για τη μετάδοση δεδομένων σε ένα κοινό μέσο μετάδοσης. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη κάποιων τεχνικών για τον έλεγχο της πολλαπλής πρόσβασης στο κοινό μέσο μετάδοσης.

Ορισμένες από τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι οι ακόλουθες [5]:

- **TDMA (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου):** Με την τεχνική αυτή το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές και σε κάθε χρονοσχισμή επιτρέπεται μόνο σε ένα χρήστη να εκπέμψει (σε όλο το φάσμα συχνοτήτων).
- **FDMA (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας):** Με την τεχνική αυτή, σε κάθε χρήστη εκχωρείται μία μοναδική συχνότητα στην οποία μπορεί να εκπέμψει για όσο χρόνο επιθυμεί.
- **CDMA (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα):** Η βασική αρχή του CDMA ορίζει ότι όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα, ενώ επιπλέον ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί όλο το διατιθέμενο φάσμα συχνοτήτων.

Στο Σχήμα 8 που ακολουθεί φαίνονται παραστατικά οι παραπάνω τεχνικές.



Σχήμα 8. FDMA-TDMA-CDMA

Από τις τρεις τεχνικές που αναφέρθηκαν η πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η CDMA, για την οποία ακολουθεί η παρακάτω ανάλυση [6]. Συγκεκριμένα, ο κάθε χρήστης επιθυμεί να μεταδώσει ένα σήμα πληροφορίας που συνίσταται σε μια ακολουθία bits πληροφορίας, από τα οποία, με τη βοήθεια ενός μορφοποιητικού παλμού, δημιουργείται το σήμα βασικής ζώνης.

Για τον χρήστη i το σήμα βασικής ζώνης είναι της μορφής:

$$m_i(t) = \sum_k b_{k,i} p(t - kT_b) \quad (3)$$

όπου $b_{k,i}$ είναι το k -οστό bit της ακολουθίας των bits πληροφορίας του i -οστού χρήστη, T_b η διάρκεια του κάθε bit, ενώ $p(t)$ είναι ο μορφοποιητικός παλμός που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του σήματος βασικής ζώνης (συνήθως επιλέγονται παλμοί NRZ ή Manchester).

Το σήμα $m_i(t)$ είναι στενής ζώνης. Γι' αυτό το λόγο, πολλαπλασιάζεται με ένα σήμα πολύ μεγαλύτερου εύρους ζώνης (σήμα εξάπλωσης-spreading signal), ώστε το σήμα που προκύπτει να έχει εύρος ζώνης πολύ μεγαλύτερο από όσο πραγματικά χρειάζεται. Το σήμα εξάπλωσης είναι μια ψευδοτυχαία ακολουθία bits με ρυθμό μετάδοσης πολύ μεγαλύτερο του ρυθμού μετάδοσης των bits πληροφορίας. Η ψευδοτυχαία αυτή ακολουθία είναι μοναδική για κάθε χρήστη και λειτουργεί ως κώδικας αναγνώρισής του. Οι ακολουθίες αυτές που ανήκουν στους διάφορους χρήστες είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, ενώ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης κάθε μίας πρέπει να έχει μία μόνο κορυφή. Ο κάθε κώδικας παράγεται χρησιμοποιώντας αθροιστές modulo-2, καταχωρητές ολίσθησης και βρόχους ανατροφοδότησης. Σημειώνεται ότι κάθε bit που ανήκει στην ψευδοτυχαία ακολουθία ονομάζεται chip.

Το σήμα εξάπλωσης που αντιστοιχεί στον χρήστη i είναι, λοιπόν, της μορφής:

$$s_i(t) = \sum_k c_{k,i} p(t - kT_{ch}) \quad (4)$$

όπου $c_{k,i}$ το k -οστό chip της ψευδοτυχαίας ακολουθίας που αντιστοιχεί στον i -οστό χρήστη, T_{ch} η διάρκεια του κάθε chip, ενώ $p(t)$ είναι ο μορφοποιητικός παλμός που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του σήματος $s_i(t)$ (συνήθως επιλέγονται παλμοί NRZ ή Manchester).

Το σήμα που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των σημάτων $m_i(t)$ και $s_i(t)$ είναι το $x(t)=m_i(t)s_i(t)$, το οποίο χαρακτηρίζεται ως σήμα απλωμένου φάσματος (spread spectrum signal).

Η σημαντικότερη παράμετρος ενός CDMA συστήματος είναι το CDMA κέρδος (CDMA gain) που ορίζει πόσες φορές μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του σήματος απλωμένου φάσματος από το εύρος ζώνης του αρχικού σήματος στενής ζώνης. Ισοδύναμα, το CDMA κέρδος ορίζει πόσες φορές υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης

$R_{ch} = \frac{1}{T_{ch}}$ των chips του σήματος εξάπλωσης από τον ρυθμό μετάδοσης

$R_b = \frac{1}{T_b}$ των bits του σήματος πληροφορίας. Άρα προκύπτει ότι:

$$\text{CDMA gain} = \frac{R_{ch}}{R_b} = \frac{T_b}{T_{ch}} \quad (5)$$

Το σήμα απλωμένου φάσματος προτού μεταδοθεί διαμορφώνει ένα υψίσυψνο φέρον $\cos(2\pi f_c t)$, έτσι ώστε το φάσμα του να μεταφερθεί στην κατάλληλη φέρουσα συχνότητα. Το σήμα λοιπόν που μεταδίδεται στο δίαυλο επικοινωνίας από τον i χρήστη δίνεται από τη σχέση:

$$c_i(t) = m_i(t)s_i(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (6)$$

Ο κάθε δέκτης ενός CDMA συστήματος λαμβάνει τα εκπεμπόμενα σήματα και από τους n πομπούς που ανταγωνίζονται για το κοινό μέσο μετάδοσης. Άρα το σήμα που λαμβάνεται από ένα δέκτη, αγνοώντας για λόγους απλότητας την παρουσία του θορύβου του διαύλου επικοινωνίας, είναι της μορφής:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) \quad (7)$$

Έστω ότι ο συγκεκριμένος δέκτης επιθυμεί να επεξεργαστεί το σήμα πληροφορίας του j πομπού. Σε αυτή την περίπτωση τα $n-1$ υπόλοιπα σήματα απλωμένου φάσματος που έχει λάβει συνιστούν την παρεμβολή στο χρήσιμο σήμα.

Ο δέκτης, λοιπόν, είναι εφοδιασμένος με το μοναδικό κωδικό αναγνώρισης του j χρήστη, $s_j(t)$. Ο πολλαπλασιασμός του λαμβανόμενου σήματος με το σήμα $s_j(t)$ επανασυμπιέζει μόνο το σήμα του j χρήστη, ενώ αφήνει ανεπηρέαστα τα $n-1$ υπόλοιπα σήματα απλωμένου φάσματος. Για να πραγματοποιηθεί η λειτουργία της επανασυμπίεσης, θα πρέπει ο δέκτης όχι μόνο να γνωρίζει τον κώδικα του j -οστού χρήστη, αλλά επιπλέον, ο κώδικας $s_j(t)$ που παράγεται τοπικά στο δέκτη και ο κώδικας του επιθυμητού σήματος να είναι συγχρονισμένοι.

Μετά την επανασυμπίεση του επιθυμητού σήματος, στο αρχικό στενό εύρος ζώνης του σήματος πληροφορίας η ισχύς του επιθυμητού σήματος είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με την ισχύ των υπόλοιπων $n-1$ σημάτων παρεμβολής. Δηλαδή, η ισχύς των σημάτων παρεμβολής μειώνεται κατά ένα παράγοντα όσο το κέρδος CDMA. Αυτό βοηθά το δέκτη να αναγνωρίσει και να εξάγει το επιθυμητό σήμα πληροφορίας.

Η διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο επαληθεύεται με τις ακόλουθες εξισώσεις. Αρχικά, το σήμα $r(t)$ αποδιαμορφώνεται καθώς πολλαπλασιάζεται με το υψίσυχο φέρον $2\cos(2\pi f_c t)$. Το σήμα που προκύπτει έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned} r(t) 2\cos(2\pi f_c t) &= \sum_{i=1}^n c_i(t) 2\cos(2\pi f_c t) = \sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t) \cos(2\pi f_c t) 2\cos(2\pi f_c t) = \\ &= \sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t) + \sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t) \cos(4\pi f_c t) \end{aligned} \quad (8)$$

Το παραπάνω σήμα αποτελείται από δύο συνιστώσες, μια βαθυπερατή ($\sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t)$) και μία συνιστώσα περί την ψηλή συχνότητα $2f_c$. Με την παρεμβολή ενός βαθυπερατού φίλτρου αποκόπτεται η συνιστώσα περί τη $2f_c$ και διέρχεται μόνο η βαθυπερατή συνιστώσα $\sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t)$. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η

επανασυμπίεση του σήματος απλωμένου φάσματος. Με άλλα λόγια, η βαθυπερατή συνιστώσα πολλαπλασιάζεται με την ψευδοτυχαία ακολουθία που αποτελεί τον κωδικό αναγνώρισης του j-οστού πομπού, δηλαδή με το σήμα $s_j(t)$.

Το τελικό σήμα που προκύπτει στην έξοδο του δέκτη είναι της μορφής:

$$\text{out}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n m_i(t) s_i(t) \right\} s_j(t) \quad (9)$$

Επειδή, όμως, το σύνολο των n ψευδοτυχαίων ακολουθιών που αντιστοιχούν στους n πομπούς είναι ορθοκανονικό ισχύει:

$$1 \quad \text{για κάθε } t, \text{ αν } i=j \quad (10\alpha)$$

$$s_i(t) s_j(t) =$$

$$0 \quad \text{για κάθε } t, \text{ αν } i \neq j \quad (10\beta)$$

Άρα προκύπτει το αποτέλεσμα:

$$\text{out}(t) = m_j(t) \quad (11)$$

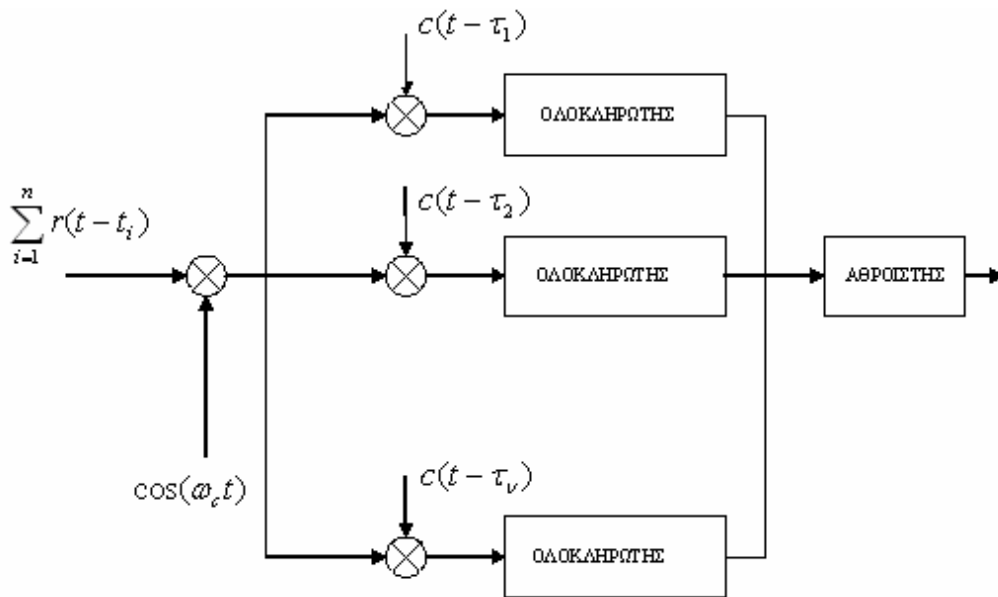
Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η έξοδος του δέκτη αποτελεί το σήμα πληροφορίας του j-οστού δέκτη, όπως ήταν επιθυμητό.

4. ΠΟΛΥΔΙΑΔΡΟΜΙΚΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗΣ RAKE

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης της τεχνικής απλωμένου φάσματος παρουσιάζεται όταν ο διάυλος μετάδοσης χαρακτηρίζεται από πολλαπλές διαδρομές. Σε ένα τέτοιο διάυλο, ένα σήμα κατά τη μετάδοσή του ακολουθεί πολλές διαδρομές με αποτέλεσμα στην έξοδο του διαύλου να φτάνουν αντίστοιχες καθυστερημένες εκδοχές του αρχικού σήματος. Η ύπαρξη πολλών τέτοιων καθυστερημένων εκδοχών περιορίζει σε σημαντικό βαθμό την ικανότητα ενός απλού δέκτη να αναγνωρίσει το αρχικό σήμα.

Η αρνητική επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης μπορεί να εξλειφθεί με τη χρήση της τεχνικής απλωμένου φάσματος (CDMA) σε συνδυασμό με τη χρήση ενός δέκτη RAKE στην έξοδο του διαύλου πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Η αρχιτεκτονική του δέκτη RAKE επιτρέπει ένα βέλτιστο συνδυασμό της ενέργειας που λαμβάνεται από τις διαδρομές ενός διαύλου πολυδιαδρομικής διάδοσης. Επίσης, αποτρέπει διαλείψεις που οφείλονται στην άφιξη των εκδοχών του σήματος με διαφορά στη φάση. Ουσιαστικά, ο δέκτης RAKE εκμεταλλεύεται την πολυδιαδρομική διάδοση καθώς συνδυάζει με κατάλληλο τρόπο τα σήματα που φτάνουν από τις διάφορες διαδρομές και παράγει ένα ισχυρότερο σήμα στην έξοδο. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνει η αποδοτικότητα του συστήματος στο οποίο ο δέκτης RAKE συμμετέχει. Ακολουθεί ένα απλοποιημένο block διάγραμμα ενός δέκτη RAKE.



Σχήμα 9. Απλοποιημένο block διάγραμμα ενός δέκτη RAKE

Το σήμα το οποίο εισέρχεται στο διάυλο για μετάδοση είναι το $r(t)$. Τονίζεται ότι το $r(t)$ είναι ένα διαμορφωμένο σήμα απλωμένου φάσματος. Για να προκύψει το $r(t)$ έχει γίνει η ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά ένα σήμα στενής ζώνης έχει πολλαπλασιαστεί με μια ψευδοτυχαία ακολουθία $c(t)$, με την προϋπόθεση ότι η περίοδος του κάθε chip στην ακολουθία αυτή είναι μικρότερη από την περίοδο κάθε bit πληροφορίας κατά ένα παράγοντα όσο το CDMA κέρδος. Στη συνέχεια, το σήμα που έχει προκύψει έχει διαμορφώσει ένα υψίσυχο φέρον συχνότητας ω_c .

Με την υπόθεση ότι ο διάυλος αποτελείται από n διαδρομές, οι καθυστερήσεις των διαδρομών αυτών συμβολίζονται στο παραπάνω διάγραμμα ως t_1, t_2, \dots, t_n . Το σήμα που εξέρχεται από το διάυλο είναι προφανώς το $\sum_{i=1}^n r(t-t_i)$, αποτελεί δηλαδή υπέρθεση των εκδοχών του σήματος που μεταδίδονται στις n διαδρομές. Στη συνέχεια, αφού αυτό το σήμα αποδιαμορφωθεί, μεταφέρεται στα λεγόμενα fingers του δέκτη RAKE. Αν οι διαδρομές του διαύλου είναι σχετικά λίγες τότε ο αριθμός n των fingers είναι ίδιος με τον αριθμό των διαδρομών (δηλαδή $v=n$) ενώ σε διαφορετική περίπτωση είναι αρκετά μικρότερος ($v < n$).

Στην περίπτωση που ο αριθμός των fingers είναι ίδιος με τον αριθμό των διαδρομών ακολουθείται η εξής διαδικασία. Σε κάθε finger (π.χ. στο i) το αποδιαμορφωμένο ληφθέν σήμα πολλαπλασιάζεται με το σήμα $c(t-\tau_i)$. Το σήμα αυτό είναι ο CDMA κώδικας ολισθημένος κατά τ_i , με $\tau_i = \tau_i$ για κάθε $i=1,2,\dots,n$ ($=n$). Ο πολλαπλασιασμός με το $c(t-\tau_i)$ οδηγεί στην επανασυμπύεση του σήματος πολλαπλών διαδρομών. Εδώ πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η ψευδοτυχαία ακολουθία $c(t)$ επιλέγεται έτσι ώστε η συνάρτηση αυτοσυσχέτισής της να έχει πολύ μικρή τιμή για κάθε μη μηδενική χρονική ολίσθηση. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην αποφυγή διαφωνίας μεταξύ των fingers του δέκτη. Στην πράξη, όμως, η κατάσταση είναι λιγότερο ιδανική. Δεν είναι η πλήρως περιοδική αυτοσυσχέτιση που καθορίζει τη διαφωνία μεταξύ των σημάτων σε διαφορετικά fingers του δέκτη RAKE, αλλά δύο μερικές (μη περιοδικές) συσχετίσεις με συνεισφορά από δύο συνεχόμενα bits. Έχουν γίνει προσπάθειες να βρεθούν ψευδοτυχαίες ακολουθίες με ικανοποιητική τιμή μερικών συσχετίσεων, αλλά η διαφωνία που οφείλεται σε μη περιοδικές συσχετίσεις παραμένει πολύ δυσκολότερο να μειωθεί από ότι οι επιδράσεις των περιοδικών συσχετίσεων. Στη συνέχεια, το σήμα που δημιουργείται μετά την επανασυμπύεση ολοκληρώνεται με τη βοήθεια ενός ολοκληρωτή. Τέλος, τα σήματα που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο από όλα τα fingers του δέκτη σταθμίζονται με ένα κατάλληλο κριτήριο και αθροίζονται. Ένα αρκετά συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο στάθμισης είναι ο συνδυασμός μεγίστου λόγου, δηλαδή το σήμα που προκύπτει από το i finger σταθμίζεται με το συντελεστή εξασθένησης της i -οστής διαδρομής. Η έξοδος του δέκτη RAKE ισοδυναμεί με την ακολουθία των bits πληροφορίας που παράγεται από τον πομπό του συστήματος ή, ακριβολογώντας, το BER που επιτυγχάνεται είναι πάρα πολύ χαμηλό (γιατί πάντα υπάρχει η πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης κάποιου ψηφίου).

Στην περίπτωση που ο αριθμός n των διαδρομών ενός διαύλου είναι πάρα πολύ μεγάλος, είναι ασύμφορη η χρήση δέκτη RAKE με αριθμό fingers n ίσο με n . Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός n των fingers που περιλαμβάνει ο δέκτης είναι πολύ μικρότερος του αριθμού των διαδρομών, ενώ οι χρόνοι ολίσθησης $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ του κώδικα $c(t)$ επιλέγονται με βάση κάποιον αλγόριθμο βελτιστοποίησης του BER στην έξοδο του δέκτη.

5. ΠΟΛΥΡΥΘΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ & ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΠΛΩΜΕΝΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

5.1 Ανάλυση της πολυρυθμικής ίνας που μελετάται στη Διπλωματική Εργασία

Όπως διαπιστώθηκε στις προηγούμενες παραγράφους από τη θεωρητική ανάλυση των πολυρυθμικών ινών, κάθε πολυρυθμική ίνα στην οποία διεγείρονται πολλοί ρυθμοί συμπεριφέρεται σαν δίαυλος πολυδιαδρομικής διάδοσης. Το ρόλο των διαδρομών παίζουν οι διάφοροι ρυθμοί. Με άλλα λόγια, όταν εισέρχεται ένας οπτικός παλμός για μετάδοση στην πολυρυθμική ίνα τότε ο παλμός θα μεταδοθεί μέσω κάθε ρυθμού ξεχωριστά. Έτσι, στην έξοδο της ίνας θα φτάσουν πολλές καθυστερημένες εκδοχές του παλμού (όσοι και οι ρυθμοί που διεγείρονται).

Ένας από τους στόχους, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της εφαρμογής της τεχνικής απλωμένου φάσματος (CDMA) σε πολυρυθμικές ίνες, με σκοπό την εξάλειψη της αρνητικής επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Η πολυρυθμική ίνα που μελετάται [7] είναι μια graded-index ίνα με παράμετρο $q=2$, δηλαδή ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα έχει παραβολική κατανομή. Η παράμετρος Δ , δηλαδή η σχετική διαφορά του δείκτη διάθλασης n_0 της επένδυσης από τον δείκτη διάθλασης n_1 στο κέντρο του πυρήνα ($\rho=0$) ισούται με 2%.

$$\text{Δηλαδή, } \Delta = \frac{n_1 - n_0}{n_1} = 0,02.$$

Λαμβάνοντας ως δείκτη διάθλασης της επένδυσης $n_0=1,41$, από την προηγούμενη σχέση προκύπτει ότι $n_1=1,439$. Επιπλέον, η διάμετρος του πυρήνα είναι 62,5 μm ενώ η συνολική διάμετρος της ίνας ανέρχεται στα 125 μm .

Από την ανάλυση που γίνεται στην [1], σχετικά με κυματοδήγηση σε πολυρυθμική ίνα με κατανομή δείκτη διάθλασης παραβολικής μορφής, προκύπτει ότι η σταθερά διάδοσης κάθε ρυθμού είναι:

$$\beta = k_0 n_1 \sqrt{1 - \frac{\sqrt{2\Delta}}{\alpha k_0 n_1} 2(2l + |m| + 1)} \quad (12)$$

Στην προηγούμενη σχέση $k_0 = \frac{\omega}{c}$ είναι η σταθερά διάδοσης στον ελεύθερο χώρο, $a = 62,5 \mu\text{m}/2$ η ακτίνα του πυρήνα, $\Delta = 0,02$, $n_1 = 1,439$, ενώ η παράμετρος $2l + |m| + 1$, για $l = 0, 1, 2, \dots$ και $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ εκφράζει την τάξη του κυματοδηγούμενου ρυθμού.

Το μήκος κύματος λειτουργίας είναι $\lambda_0 = 1300 \text{ nm}$, άρα η κυκλική συχνότητα λειτουργίας είναι $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0 = 14,5 \times 10^{14} \text{ rad/sec}$.

Από τη σχέση που δίνει τη σταθερά διάδοσης κάθε ρυθμού φαίνεται ότι για να υπάρχει κυματοδότηση πρέπει η παράσταση που βρίσκεται στο υπόριζο να είναι θετική, ενώ για να υπάρχει απόσβεση πρέπει το υπόριζο να γίνει αρνητικό. Άρα, για ένα δεδομένο ρυθμό (δεδομένα l, m) η συχνότητα αποκοπής (συχνότητα που ορίζει τη μετάβαση από την απόσβεση στην κυματοδότηση) υπολογίζεται από το μηδενισμό του υποριζίου. Έτσι, για ένα δεδομένο ρυθμό η συχνότητα αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_c = \frac{\sqrt{2\Delta}}{n_1 a \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} 2(2l + |m| + 1) \quad (13)$$

Αντικαθιστώντας τις γνωστές παραμέτρους έχουμε:

$$\omega_c = 0,027 \times 10^{14} (2l + |m| + 1) \text{ rad/sec} \quad (14)$$

Για τη συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0 = 14,5 \times 10^{14} \text{ rad/sec}$, για να βρεθούν πόσοι ρυθμοί κυματοδηγούνται προκύπτει:

$$\omega_0 \geq \omega_c \Leftrightarrow 14,5 \times 10^{14} \geq 0,027 \times 10^{14} (2l + |m| + 1) \Leftrightarrow (2l + |m| + 1) \leq 537 \quad (15)$$

Άρα, στη συγκεκριμένη πολυρυθμική ίνα κυματοδηγούνται περίπου 537 ρυθμοί.

Η καθυστέρηση ομάδας (group delay) ανά μονάδα μήκους ίνας δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_g = \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (16)$$

Υπολογίζοντας την παραπάνω παράγωγο και αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων λαμβάνουμε την καθυστέρηση ομάδας (σε nsec):

$$\tau_g = 4,8\sqrt{1 - 0,00184(2l + |m| + 1)} + \frac{0,0044(2l + |m| + 1)}{\sqrt{1 - 0,00184(2l + |m| + 1)}} \quad (17)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η καθυστέρηση ομάδας ανά μονάδα μήκους ίνας για κάθε ένα από τους 537 ρυθμούς που κυματοδηγούνται για τη συγκεκριμένη κυκλική συχνότητα λειτουργίας.

Πίνακας 1. Καθυστερήσεις ομάδας (group delays) των 537 ρυθμών που κυματοδηγούνται σε μήκος κύματος λειτουργίας $\lambda_0=1300$ nm	
Αύξων αριθμός ρυθμού	Καθυστερέση ομάδας ανά μέτρο ίνας (10^{-9} sec)
1	4,8000
2	4,8000
3	4,8000
4	4,8000
5	4,8000
6	4,8000
7	4,8000
8	4,8000
9	4,8000
10	4,8000
11	4,8001
12	4,8001
13	4,8001
14	4,8002
15	4,8002
16	4,8003
17	4,8003
18	4,8004
19	4,8005
20	4,8005
21	4,8006
22	4,8007
23	4,8007
24	4,8008
25	4,8009
26	4,8010
27	4,8011
28	4,8012

29	4,8013
30	4,8014
31	4,8016
32	4,8017
33	4,8018
34	4,8019
35	4,8021
36	4,8022
37	4,8024
38	4,8025
39	4,8027
40	4,8028
41	4,8030
42	4,8032
43	4,8034
44	4,8035
45	4,8037
46	4,8039
47	4,8041
48	4,8043
49	4,8045
50	4,8048
51	4,8050
52	4,8052
53	4,8054
54	4,8057
55	4,8059
56	4,8062
57	4,8064
58	4,8067
59	4,8069
60	4,8072
61	4,8075
62	4,8078
63	4,8080
64	4,8083
65	4,8086
66	4,8089
67	4,8092
68	4,8096
69	4,8099
70	4,8102
71	4,8105
72	4,8109
73	4,8112
74	4,8116
75	4,8119
76	4,8123
77	4,8127
78	4,8131

79	4,8134
80	4,8138
81	4,8142
82	4,8146
83	4,8150
84	4,8155
85	4,8159
86	4,8163
87	4,8168
88	4,8172
89	4,8176
90	4,8181
91	4,8186
92	4,8190
93	4,8195
94	4,8200
95	4,8205
96	4,8210
97	4,8215
98	4,8220
99	4,8225
100	4,8231
101	4,8236
102	4,8241
103	4,8247
104	4,8252
105	4,8258
106	4,8264
107	4,8270
108	4,8275
109	4,8281
110	4,8287
111	4,8294
112	4,8300
113	4,8306
114	4,8312
115	4,8319
116	4,8325
117	4,8332
118	4,8339
119	4,8345
120	4,8352
121	4,8359
122	4,8366
123	4,8373
124	4,8380
125	4,8388
126	4,8395
127	4,8402
128	4,8410

129	4,8418
130	4,8425
131	4,8433
132	4,8441
133	4,8449
134	4,8457
135	4,8465
136	4,8473
137	4,8482
138	4,8490
139	4,8499
140	4,8507
141	4,8516
142	4,8525
143	4,8534
144	4,8543
145	4,8552
146	4,8561
147	4,8570
148	4,8580
149	4,8589
150	4,8599
151	4,8609
152	4,8619
153	4,8628
154	4,8638
155	4,8649
156	4,8659
157	4,8669
158	4,8680
159	4,8690
160	4,8701
161	4,8712
162	4,8723
163	4,8734
164	4,8745
165	4,8756
166	4,8767
167	4,8779
168	4,8790
169	4,8802
170	4,8814
171	4,8826
172	4,8838
173	4,8850
174	4,8863
175	4,8875
176	4,8888
177	4,8900
178	4,8913

179	4,8926
180	4,8939
181	4,8952
182	4,8966
183	4,8979
184	4,8993
185	4,9006
186	4,9020
187	4,9034
188	4,9048
189	4,9062
190	4,9077
191	4,9091
192	4,9106
193	4,9121
194	4,9136
195	4,9151
196	4,9166
197	4,9182
198	4,9197
199	4,9213
200	4,9229
201	4,9245
202	4,9261
203	4,9277
204	4,9294
205	4,9310
206	4,9327
207	4,9344
208	4,9361
209	4,9378
210	4,9396
211	4,9413
212	4,9431
213	4,9449
214	4,9467
215	4,9485
216	4,9503
217	4,9522
218	4,9541
219	4,9560
220	4,9579
221	4,9598
222	4,9617
223	4,9637
224	4,9657
225	4,9677
226	4,9697
227	4,9717
228	4,9738

229	4,9759
230	4,9780
231	4,9801
232	4,9822
233	4,9844
234	4,9865
235	4,9887
236	4,9910
237	4,9932
238	4,9954
239	4,9977
240	5,0000
241	5,0023
242	5,0047
243	5,0070
244	5,0094
245	5,0118
246	5,0142
247	5,0167
248	5,0192
249	5,0217
250	5,0242
251	5,0267
252	5,0293
253	5,0319
254	5,0345
255	5,0371
256	5,0398
257	5,0425
258	5,0452
259	5,0479
260	5,0507
261	5,0534
262	5,0563
263	5,0591
264	5,0620
265	5,0648
266	5,0678
267	5,0707
268	5,0737
269	5,0767
270	5,0797
271	5,0827
272	5,0858
273	5,0889
274	5,0921
275	5,0952
276	5,0984
277	5,1017
278	5,1049

279	5,1082
280	5,1115
281	5,1149
282	5,1183
283	5,1217
284	5,1251
285	5,1286
286	5,1321
287	5,1357
288	5,1392
289	5,1428
290	5,1465
291	5,1502
292	5,1539
293	5,1576
294	5,1614
295	5,1652
296	5,1691
297	5,1730
298	5,1769
299	5,1809
300	5,1849
301	5,1889
302	5,1930
303	5,1972
304	5,2013
305	5,2055
306	5,2098
307	5,2140
308	5,2184
309	5,2227
310	5,2272
311	5,2316
312	5,2361
313	5,2406
314	5,2452
315	5,2499
316	5,2545
317	5,2593
318	5,2640
319	5,2688
320	5,2737
321	5,2786
322	5,2836
323	5,2886
324	5,2937
325	5,2988
326	5,3039
327	5,3091
328	5,3144

329	5,3197
330	5,3251
331	5,3305
332	5,3360
333	5,3415
334	5,3471
335	5,3528
336	5,3585
337	5,3643
338	5,3701
339	5,3760
340	5,3819
341	5,3880
342	5,3940
343	5,4002
344	5,4064
345	5,4126
346	5,4190
347	5,4254
348	5,4319
349	5,4384
350	5,4450
351	5,4517
352	5,4584
353	5,4653
354	5,4722
355	5,4791
356	5,4862
357	5,4933
358	5,5005
359	5,5078
360	5,5151
361	5,5226
362	5,5301
363	5,5377
364	5,5454
365	5,5532
366	5,5611
367	5,5690
368	5,5771
369	5,5852
370	5,5934
371	5,6017
372	5,6102
373	5,6187
374	5,6273
375	5,6360
376	5,6448
377	5,6538
378	5,6628

379	5,6719
380	5,6811
381	5,6905
382	5,7000
383	5,7095
384	5,7192
385	5,7290
386	5,7390
387	5,7490
388	5,7592
389	5,7695
390	5,7799
391	5,7905
392	5,8012
393	5,8120
394	5,8229
395	5,8340
396	5,8453
397	5,8566
398	5,8682
399	5,8799
400	5,8917
401	5,9037
402	5,9158
403	5,9281
404	5,9406
405	5,9532
406	5,9660
407	5,9790
408	5,9921
409	6,0055
410	6,0190
411	6,0327
412	6,0465
413	6,0606
414	6,0749
415	6,0894
416	6,1041
417	6,1190
418	6,1341
419	6,1494
420	6,1650
421	6,1807
422	6,1968
423	6,2130
424	6,2295
425	6,2462
426	6,2632
427	6,2805
428	6,2980

429	6,3158
430	6,3339
431	6,3522
432	6,3709
433	6,3898
434	6,4090
435	6,4286
436	6,4485
437	6,4687
438	6,4892
439	6,5101
440	6,5313
441	6,5529
442	6,5748
443	6,5972
444	6,6199
445	6,6430
446	6,6665
447	6,6905
448	6,7148
449	6,7396
450	6,7649
451	6,7906
452	6,8168
453	6,8436
454	6,8708
455	6,8985
456	6,9268
457	6,9556
458	6,9850
459	7,0150
460	7,0455
461	7,0768
462	7,1086
463	7,1411
464	7,1743
465	7,2082
466	7,2428
467	7,2782
468	7,3144
469	7,3514
470	7,3892
471	7,4278
472	7,4674
473	7,5079
474	7,5493
475	7,5917
476	7,6352
477	7,6797
478	7,7254

479	7,7722
480	7,8202
481	7,8695
482	7,9201
483	7,9720
484	8,0253
485	8,0801
486	8,1365
487	8,1945
488	8,2541
489	8,3155
490	8,3788
491	8,4440
492	8,5112
493	8,5805
494	8,6521
495	8,7261
496	8,8025
497	8,8815
498	8,9633
499	9,0480
500	9,1358
501	9,2269
502	9,3214
503	9,4196
504	9,5217
505	9,6280
506	9,7387
507	9,8542
508	9,9748
509	10,1008
510	10,2327
511	10,3709
512	10,5159
513	10,6683
514	10,8287
515	10,9978
516	11,1765
517	11,3655
518	11,5659
519	11,7789
520	12,0058
521	12,2482
522	12,5078
523	12,7867
524	13,0874
525	13,4128
526	13,7665
527	14,1526
528	14,5763

529	15,0442
530	15,5641
531	16,1465
532	16,8047
533	17,5564
534	18,4257
535	19,4466
536	20,6682
537	22,1656

Από τον προηγούμενο Πίνακα φαίνεται ότι οι καθυστερήσεις των ρυθμών κυμαίνονται από $4,8 \times 10^{-9}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-9}$ sec για ένα μέτρο της συγκεκριμένης πολυρυθμικής ίνας.

5.2 Προσομοίωση της τεχνικής του απλωμένου φάσματος (CDMA) και αναπτυχθέντες κώδικες MATLAB.

Η προσομοίωση της τεχνικής του απλωμένου φάσματος (CDMA) στη συγκεκριμένη πολυρυθμική ίνα θα γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Η προσομοίωση αυτή είναι χωρισμένη σε δύο προγράμματα MATLAB: στο πρώτο πρόγραμμα προσομοιώνεται η δημιουργία του σήματος απλωμένου φάσματος που θα μεταδοθεί στην ίνα καθώς και η μετάδοσή του μέσα στην ίνα, ενώ στο δεύτερο πρόγραμμα προσομοιώνεται η επεξεργασία του σήματος εξόδου από ένα δέκτη RAKE με σκοπό την αποκατάσταση της αρχικής ακολουθίας των bits πληροφορίας.

Οι συγκεκριμένες ενέργειες που γίνονται στο πρόγραμμα πρώτο είναι οι εξής:

- Αρχικά παράγεται το σήμα πληροφορίας $info(t)$. Το συγκεκριμένο σήμα περιλαμβάνει τα bits πληροφορίας διαμορφωμένα σε μορφή τετραγωνικού παλμού. Επίσης παράγεται το σήμα $chip(t)$ που αναπαριστά τον CDMA κώδικα. Το $chip(t)$ περιλαμβάνει τα chips της ψευδοτυχαίας ακολουθίας διαμορφωμένα και αυτά σε μορφή τετραγωνικού παλμού. Τονίζεται ότι η περίοδος κάθε bit πληροφορίας είναι μεγαλύτερη από την περίοδο κάθε chip τόσες φορές όσο είναι και το CDMA κέρδος.
- Στη συνέχεια αφού παραχθεί το σήμα $encoded(t) = info(t) * chip(t)$ (σήμα απλωμένου φάσματος), αυτό διαμορφώνεται κατά PSK στο σήμα $modulated(t)$ και

μεταδίδεται στην ίνα. Είναι προφανές από τον πολλαπλασιασμό $\text{info}(t) * \text{chip}(t)$ ότι η περίοδος κάθε bit που μεταδίδεται στην ίνα ισοδυναμεί με την περίοδο κάθε chip του CDMA κώδικα.

- Όπως προκύπτει και από την ανάλυση στην εργασία [8] η πολυρυθμική ίνα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα κανάλι Rayleigh πολυδιαδρομικής διάδοσης. Έτσι αν $x(t)$ είναι το σήμα στην είσοδο της ίνας, τότε το σήμα στην έξοδο είναι:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N h_k x(t - \tau_{gk}) \quad (18)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός ρυθμών-διαδρομών στην ίνα, τ_{gk} η καθυστέρηση ομάδας (group delay) του k -οστού ρυθμού και h_k η εξασθένηση λόγω της k -οστής διαδρομής (ρυθμού).

Επίσης, για τη συγκεκριμένη ίνα η εξασθένηση που προκαλείται από κάθε ρυθμό λαμβάνεται ίση με 0,4 dB/Km [7].

Στο δεύτερο πρόγραμμα γίνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

- Σε προηγούμενες παραγράφους βρέθηκε ότι στο μήκος κύματος λειτουργίας $\lambda_0 = 1300$ nm διεγείρονται 537 ρυθμοί στην πολυρυθμική ίνα που μελετάται. Ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγάλος και δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα 537 fingers στο δέκτη RAKE που προσομοιώνεται ώστε να εξισορροπηθεί η πολυδιαδρομική διάδοση. Συνεπώς, η συμπεριφορά του συστήματος μελετάται για αριθμό fingers από 2 ως 10. Εδώ εγείρεται το ερώτημα ποιοι θα είναι οι χρόνοι ολίσθησης $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ του κώδικα chip(t) στα n fingers του δέκτη RAKE, με $n=2,3,\dots,10$.

- Έτσι αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που δουλεύει ως εξής. Για κάθε αριθμό fingers δίνεται μια αρχική συνθήκη για τους χρόνους ολίσθησης του

κώδικα και στη συνέχεια υπολογίζεται το BER στην έξοδο του δέκτη RAKE. Αν το BER είναι μικρότερο ή ίσο από μια τιμή σύγκλισης (π.χ. 10^{-2} για 100 bit πληροφορίας, 10^{-3} για 1000 bit πληροφορίας κ.ο.κ) τότε ο αλγόριθμος θεωρείται ότι συγκλίνει και επιλέγονται οι συγκεκριμένοι χρόνοι ολίσθησης. Σε διαφορετική περίπτωση, ο αλγόριθμος κρατάει σταθερό το χρόνο ολίσθησης του πρώτου finger και αυξάνει κατά 1 το χρόνο ολίσθησης των υπόλοιπων fingers (τονίζεται ότι οι χρόνοι ολίσθησης είναι εκφρασμένοι σε αριθμό chips). Αν και πάλι το BER που υπολογίζεται δεν είναι μικρότερο ή ίσο από την τιμή σύγκλισης τότε ο αλγόριθμος κρατάει σταθερό το νέο χρόνο ολίσθησης και του δεύτερου finger και αυξάνει κατά 1 το χρόνο ολίσθησης των υπόλοιπων fingers (από το τρίτο και μετά). Αυτός είναι ο βασικός βρόχος του αλγορίθμου και επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες ο αριθμός fingers του δέκτη RAKE. Αν ο βασικός βρόχος του αλγορίθμου επαναληφθεί τόσες φορές όσες και ο αριθμός των fingers και δεν βρεθεί BER μικρότερο ή ίσο με την τιμή σύγκλισης τότε κλείνει ο πρώτος κύκλος του αλγορίθμου. Αν στο ενδιάμεσο βρεθεί BER μικρότερο ή ίσο από την τιμή σύγκλισης ο αλγόριθμος τερματίζει και επιλέγονται οι αντίστοιχοι χρόνοι ολίσθησης. Αν ο αλγόριθμος δεν έχει τερματίσει, ξεκινά ο δεύτερος κύκλος όπου οι χρόνοι ολίσθησης των fingers ισούνται με τους χρόνους ολίσθησης στο ξεκίνημα του προηγούμενου κύκλου συν ένα (το ξεκίνημα του πρώτου κύκλου είναι η αρχική συνθήκη). Κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου ο κύριος βρόχος που περιγράφηκε πιο πάνω επαναλαμβάνεται και πάλι τόσες φορές όσες και ο αριθμός των fingers, στη συνέχεια ξεκινά ο τρίτος κύκλος κ.ο.κ. Επαναλαμβάνεται ότι ανά πάσα στιγμή ο αλγόριθμος τερματίζει αν το BER βρεθεί μικρότερο ή ίσο από την τιμή σύγκλισης. Αν μετά από 100 κύκλους ο αλγόριθμος δε τερματίσει τότε θεωρείται ότι με τον συγκεκριμένο αριθμό fingers δεν μπορεί να επιτευχθεί BER μικρότερο ή ίσο από την τιμή σύγκλισης και έτσι ως BER του συστήματος επιλέγεται το ελάχιστο από όσα έχουν υπολογιστεί (και ενδιάμεσως έχουν αποθηκευτεί σε κάποιον πίνακα). Όσον αφορά την αρχική συνθήκη για τους χρόνους ολίσθησης έχει γίνει η επιλογή ότι ο αρχικός χρόνος ολίσθησης για κάθε finger ισούται με το πηλίκο:

$$\frac{\text{καθυστέρηση ομάδας (group delay) πρώτου ρυθμού (l = m = 0)}}{\text{περίοδος bit που μεταδίδεται στην ίνα (= περίοδος chip CDMA κώδικα)}}$$

Το παραπάνω πηλίκo στρογγυλοποιείται στον κοντινότερο ακέραιο γιατί κάθε χρόνος ολίσθησης του κώδικα σε ένα finger του δέκτη RAKE είναι εκφρασμένος σε αριθμό chips.

- Για να υπολογιστεί το BER σε κάθε επανάληψη του παραπάνω αλγορίθμου γίνονται οι ακόλουθες ενέργειες. Το σήμα εξόδου της ίνας $out(t)$ αποδιαμορφώνεται και δημιουργείται το σήμα $out_demod(t)$. Το σήμα αυτό διοχετεύεται σε όλα τα fingers του δέκτη RAKE. Στο i -οστό finger πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη καθυστερημένη εκδοχή του κώδικα $chip(t)$, δηλαδή με το σήμα $chip(t-t_i)$, όπου t_i ο χρόνος ολίσθησης για το i -οστό finger που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη επανάληψη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού αυτού (επανασυμπιεσμένο σήμα), δηλαδή το σήμα $out_despread(t)$, ολοκληρώνεται και παράγεται το σήμα $out_integral(t)$. Τα σήματα $out_integral(t)$ που παράγονται από κάθε finger αθροίζονται και παράγεται το σήμα $out_final(t)$. Το σήμα αυτό αποτελεί την έξοδο του δέκτη RAKE. Με τη βοήθεια μιας συσκευής απόφασης συγκρίνεται bit προς bit με την αρχική ακολουθία των bits πληροφορίας για να εξαχθεί το BER.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας των δύο αυτών προγραμμάτων MATLAB εμπλουτισμένος με σχόλια.

ΠΡΩΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

```
M=2;
```

```
CDMA_gain=input('give the CDMA gain:      ');
```

Εδώ ζητείται από το χρήστη να εισάγει το CDMA κέρδος. Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή `CDMA_gain`.

```
bit_num=input('give the number of bits:    ');
```

Εδώ ζητείται από το χρήστη να εισάγει τον αριθμό των bit πληροφορίας. Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή `bit_num`.

```
x=randint(1,bit_num,M);
```

Ο πίνακας x περιέχει τα τυχαία παραγόμενα bit πληροφορίας. Ο αριθμός των bit που παράγονται είναι bit_num (Ο πίνακας είναι $1 \times bit_num$). Το $M=2$ ορίζει ότι παράγονται δύο ειδών τιμές: 0 και 1.

```
info=rectpulse(x,CDMA_gain);
```

Με την εντολή `rectpulse` τα bit πληροφορίας διαμορφώνονται σε μορφή τετραγωνικού παλμού στον πίνακα `info`. Κάθε bit πληροφορίας καταλαμβάνει `CDMA_gain` θέσεις στον πίνακα `info`. Άρα ο πίνακας `info` είναι $1 \times (bit_num * CDMA_gain)$.

```
y=randint(1,bit_num*CDMA_gain,M);
```

Ο πίνακας y περιέχει $bit_num * CDMA_gain$ τυχαία παραγόμενα 0 και 1. Είναι ο κώδικας CDMA. Άρα ο πίνακας y είναι $1 \times (bit_num * CDMA_gain)$.

```
chip=rectpulse(y,1);
```

Με την εντολή `rectpulse` τα bit του κώδικα CDMA (chips) διαμορφώνονται σε μορφή τετραγωνικού παλμού στον πίνακα `chip`. Η δεύτερη παράμετρος της παραπάνω εντολής που έχει την τιμή 1 ορίζει ότι κάθε chip καταλαμβάνει 1 θέση στον πίνακα `chip`. Άρα ο πίνακας `chip` είναι $1 \times (bit_num * CDMA_gain)$.

Άρα τελικά οι πίνακες `info` και `chip` έχουν το ίδιο μέγεθος ($1 \times (bit_num * CDMA_gain)$), μόνο που στον πίνακα `info` κάθε bit πληροφορίας καταλαμβάνει `CDMA_gain` θέσεις, ενώ στον πίνακα `chip` κάθε chip καταλαμβάνει 1 θέση. Άρα η περίοδος κάθε bit πληροφορίας είναι `CDMA_gain` φορές μεγαλύτερη από την περίοδο του chip.

```
encoded=info.*chip;
```

Με την παραπάνω εντολή πολλαπλασιάζονται στοιχείο-στοιχείο οι πίνακες `info` και `chip` και παράγεται ο πίνακας `encoded` μεγέθους $1 \times (bit_num * CDMA_gain)$ που περιέχει το σήμα προς αποστολή.

```
modulated=pskmod(encoded,M);
```

Το σήμα `encoded` πριν αποσταλλεί διαμορφώνεται κατά psk και παράγεται το σήμα `modulated` (πίνακας $1 \times (bit_num * CDMA_gain)$).

```
chip_period=input('give the chip period in seconds:');
```

Εδώ ζητείται από το χρήστη να εισάγει την περίοδο του chip (σε sec). Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή chip_period.

```
chan=rayleighchan(chip_period,0);
```

Με την εντολή αυτή μοντελοποιείται η πολυρυθμική ίνα που εξετάζεται. Η παράμετρος chip_period ορίζει την περίοδο δειγματοληψίας για την επεξεργασία του σήματος modulated. Άρα το Matlab καταλαβαίνει ότι κάθε στοιχείο του πίνακα modulated (γιατί αυτόν θα επεξεργαστεί το κανάλι παρακάτω) διαρκεί chip_period sec. Ομως κάθε στοιχείο του πίνακα modulated ισοδυναμεί με την περίοδο του chip. Άρα εμμέσως ορίζεται η περίοδος του chip ότι είναι chip_period sec.

```
chan.NormalizePathGains=0;
```

Με την παραπάνω εντολή το άθροισμα των κερδών των επιμέρους διαδρομών (ρυθμών) της ίνας δεν κανονικοποιείται στην τιμή 1.

```
out=zeros(1,length(chip));
```

Στον πίνακα out θα αποθηκευτεί παρακάτω η έξοδος από την ίνα και γι'αυτό έχει μήκος όσο και ο πίνακας chip, δηλαδή έχει διαστάσεις 1x (bit_num * CDMA_gain). Ο πίνακας αρχικοποιείται με 0 σε κάθε θέση.

```
delay=input('give delays of the paths: ');
```

Εδώ ζητείται από το χρήστη να εισάγει τις καθυστερήσεις ομάδας (group delays) των ρυθμών-διαδρομών που αποτελείται. Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στον πίνακα delay. Κάθε φορά που τρέχει το πρόγραμμα δίνεται ως input ένας 1x537 πίνακας με τα group delays των ρυθμών αλλά με την εξής ιδιομορφία, αν ένας ρυθμός έχει group delay για παράδειγμα 4,8 nsec ανά μονάδα μήκους μετάδοσης, τότε το αντίστοιχο στοιχείο του παραπάνω πίνακα (πίνακας delay) έχει την τιμή 4,8.

```
fiber_length=input('give the length of the fiber in meters: ');
```

Ζητείται από το χρήστη να εισάγει το μήκος (σε μέτρα) της ίνας που θα προσομοιωθεί. Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή fiber_length.

```
PathGain=-0.4*(fiber_length/1000) ;
```

Για το συγκεκριμένο μήκος ίνας (fiber_length σε μέτρα) υπολογίζεται το κέρδος κάθε ρυθμού-διαδρομής, δεδομένου ότι αυτό ανέρχεται σε -0,4dB/Km για μήκος κύματος λειτουργίας $\lambda_0=1300$ nm. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι υπάρχουν απώλειες 0,4dB/Km.

```
for kk=1:length(delay)
```

Ο βρόχος αυτός επαναλαμβάνεται 537 φορές, μία για κάθε ρυθμό-διαδρομή. Οι καθυστερήσεις των ρυθμών έχουν αποθηκευτεί στον πίνακα delay.

```
chan.PathDelays=[delay(kk)*1e-9*fiber_length] ;
```

Ορίζεται η καθυστέρηση σε sec για κάθε διαδρομή-ρυθμό και για μήκος ίνας ίσο με fiber_length (σε μέτρα) μέσω του πεδίου PathDelays του rayleighchan.

```
chan.AvgPathGaindB=[PathGain] ;
```

Ορίζεται η απώλεια για κάθε διαδρομή-ρυθμό μέσω του πεδίου AvgPathGaindB του rayleighchan.

```
out=out+filter(chan, modulated) ;
```

Ο πίνακας out περιέχει το σήμα στην έξοδο της ίνας. Είναι το άθροισμα της εξόδου από όλους τους ρυθμούς-διαδρομές.

```
end
```

ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

```
out_demod=pskdemod(out,M) ;
```

Το σήμα που περιέχεται στον πίνακα out αποδιαμορφώνεται και παράγεται το σήμα out_demod. Ο πίνακας out_demod έχει διαστάσεις 1x (bit_num*CDMA_gain).


```
Num_fingers=input('give the number of fingers: ');
```

Εδώ ζητείται από το χρήστη να εισάγει τον αριθμό των fingers του δέκτη RAKE. Η παράμετρος αυτή αποθηκεύεται στη μεταβλητή Num_fingers.

```
finger_delays=zeros(1,Num_fingers);
```

Γίνεται αρχικοποίηση του πίνακα finger_delays με μηδενικά. Ο πίνακας αυτός θα περιλαμβάνει τους χρόνους ολίσθησης του κώδικα CDMA που αντιστοιχούν στα fingers του δέκτη RAKE. Προφανώς έχει διαστάσεις 1x Num_fingers.

```
cycle=0;
```

Η μεταβλητή cycle εκφράζει ποιο κύκλος του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εκτελείται.

```
test_number=1;
```

Η μεταβλητή test_number εκφράζει ποια συνολική επανάληψη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εκτελείται.

```
for ll=1:100
```

Επαναλαμβάνονται συνολικά 100 κύκλοι του αλγορίθμου αν αυτός δε συγκλίνει.

```
count=0;
```

Η μεταβλητή count εκφράζει ποια επανάληψη του κύριου βρόχου μέσα σε ένα κύκλο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης εκτελείται

```
for mm=1:Num_fingers
```

Σε κάθε κύκλο ο κύριος βρόχος του αλγορίθμου επαναλαμβάνεται maximum τόσες φορές όσο ο αριθμός fingers του δέκτη.

```
for rr=(1+count):Num_fingers
```

```
finger_delays(rr)=
```

```
(round((delay(1)*1e-9*fiber_length)/chip_period)
```

```
+count+cycle);
```

Εδώ με βάση τον αλγόριθμο που περιγράφηκε παραπάνω καθορίζονται οι χρόνοι ολίσθησης για τους οποίους υπολογίζεται το BER.

end

```
out_final=zeros(1,length(x));
```

```
for kk=1:length(finger_delays)
```

Ο βρόχος επαναλαμβάνεται μία φορά για κάθε finger.

```
chip_receiver=zeros(1,length(chip));
```

```
out_despread=zeros(1,length(chip));
```

```
out_integral=zeros(1,length(x));
```

```
for jj=1:length(chip)
```

```
chip_receiver(jj+finger_delays(kk))=chip(jj);
```

```
end
```

Με τον βρόχο αυτό παράγεται η ολισθημένη μορφή του CDMA κώδικα. Για κάθε finger η ολίσθηση σε αριθμό chips δίνεται από το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα finger_delays.

```
out_despread=out_demod.*chip_receiver  
(1:length(chip));
```

Πολλαπλασιάζεται το αποδιαμορφωμένο σήμα με τον ολισθημένο κώδικα και παράγεται το σήμα out_despread. Ο πίνακας αυτός έχει διαστάσεις 1x(bit_num*CDMA_gain).

```
out_integral=intdump(out_despread, CDMA_gain);
```

Ολοκληρώνεται το σήμα out_despread με περίοδο ολοκλήρωσης CDMA_gain θέσεις του πίνακα out_despread και παράγεται ο πίνακας out_integral με διαστάσεις 1x bit_num.

```
out_final=out_final+out_integral;
```

Παράγεται το τελικό σήμα στην έξοδο του δέκτη RAKE με διαδοχική άθροιση των εξόδων των fingers. Το τελικό σήμα είναι το out_final με διαστάσεις 1x bit_num.

end

```
for ii=1:length(out_final)
```

```
    if out_final(ii)>=0.5
```

```
        out_final(ii)=1;
```

```
    elseif out_final(ii)<0.5
```

```
        out_final(ii)=0;
```

Το προηγούμενο κομμάτι κώδικα είναι μια συσκευή απόφασης; αν ένα στοιχείο του πίνακα out_final είναι $\geq 0,5$ τότε λαμβάνεται απόφαση για 1, αλλιώς για 0.

```
    end
```

```
end
```

```
[nErrors, BER] = biterr(x,out_final);
```

Συγκρίνεται ο πίνακας x που περιέχει τα αρχικά bit πληροφορίας με τον πίνακα out_final και παράγεται ο αριθμός των λαθών nErrors και το BER.

```
Error(test_number)=nErrors;
```

Ο αριθμός λαθών αποθηκεύεται στον πίνακα Error στη θέση που υποδηλώνεται από τη μεταβλητή test_number.

```
if (nErrors<2)
```

```
    fprintf('BER<= %f achieved!!!\n', 1/bit_num);
```

```
    break;
```

Στην περίπτωση που το BER βρεθεί μικρότερο ή ίσο της τιμής σύγκλισης τότε ο κύριος βρόχος του αλγορίθμου διακόπτεται.

```
end
```

```
test_number=test_number+1;
```

```
count=count+1;
```

```
end
```

```
if (nErrors<2)
```

```
break;
```

Στην περίπτωση που το BER βρεθεί μικρότερο ή ίσο της τιμής σύγκλισης διακόπτεται και ο κύκλος του αλγορίθμου (στον οποίο ανήκει η επανάληψη του βρόχου όπου βρέθηκε η επιθυμητή τιμή του BER).

```
end
```

```
cycle=cycle+1;
```

```
end
```

```
if ((min(Error))<2)
```

```
fprintf('the total number of iterations is %d\n',  
test_number);
```

```
fprintf('number of errors achieved:  
%d\n',min(Error));
```

```
fprintf('the finger delays are: ');
```

```
disp(finger_delays);
```

Στην περίπτωση που επιτυγχάνονται 1 ή 0 λάθη στην έξοδο του δέκτη (οπότε ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης) παρουσιάζονται ο αριθμός επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση, ο αριθμός των λαθών που οδήγησε στη σύγκλιση (1 ή 0) καθώς και οι χρόνοι ολίσθησης του CDMA κώδικα για τους οποίους επιτυγχάνεται το κριτήριο σύγκλισης. Σημειώνεται ότι οι χρόνοι ολίσθησης είναι εκφρασμένοι σε αριθμό chip.

```
else
```

```
fprintf('BER<= %f cannot be achieved\n', 1/bit_num)
```

```
fprintf('the total number of iterations is %d\n',  
test_number-1);
```

```
fprintf('minimum errors achieved: %d\n',min(Error));
```

Αν δεν επιτευχθεί σύγκλιση παρουσιάζονται οι συνολικές επαναλήψεις του αλγορίθμου, καθώς και ο ελάχιστος αριθμός λαθών που επιτυγχάνεται με τον συγκεκριμένο αριθμό fingers.

```
end
```

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αρχικά η μελέτη του συστήματος γίνεται για CDMA κέρδος ίσο με 50. Επίσης, ο αριθμός των bits πληροφορίας ανέρχεται στα 100. Άρα ως συνθήκη επιτυχούς λειτουργίας του συστήματος θεωρείται η επίτευξη $BER \leq 0,01$, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός ανεκτών λαθών είναι 1. Από την επεξεργασία των παραπάνω προγραμμάτων προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι στο δεδομένο CDMA κέρδος για να μπορεί να ισχύει $BER \leq 0,01$ πρέπει το αντίστροφο του bit rate μέσα στην ίνα (άρα η περίοδος των chips του CDMA κώδικα) να είναι ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από τις καθυστερήσεις ομάδας (group delays) των ρυθμών-διαδρομών. Η μελέτη της ίνας γίνεται για μήκη από 1m μέχρι 100 km. Όπως διαπιστώθηκε από τον Πίνακα 1, για 1m ίνας οι καθυστερήσεις ομάδας των 537 ρυθμών κυμαίνονται από $4,8 \times 10^{-9}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-9}$ sec.

Στον ακόλουθο Πίνακα φαίνονται οι διακυμάνσεις των καθυστερήσεων ομάδας των 537 κυματοδηγούμενων ρυθμών σε διάφορα μήκη της πολυρυθμικής ίνας.

Πίνακας 2. Διακύμανση καθυστερήσεων ομάδας (group delays) σε διάφορα μήκη της πολυρυθμικής ίνας	
Μηκος ίνας	Διακύμανση καθυστερήσεων ομάδας
1m	$4,8 \times 10^{-9}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-9}$ sec
10m	$4,8 \times 10^{-8}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-8}$ sec
100m	$4,8 \times 10^{-7}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-7}$ sec
1Km	$4,8 \times 10^{-6}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-6}$ sec
10Km	$4,8 \times 10^{-5}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-5}$ sec
100Km	$4,8 \times 10^{-4}$ sec μέχρι $22,1656 \times 10^{-4}$ sec

Με βάση τα αποτελέσματα του προηγούμενου Πίνακα κατασκευάζεται και ο Πίνακας 3 όπου φαίνονται οι μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να υποστηριχθούν για επιτυχή λειτουργία (αριθμός λαθών 0 ή 1) σε κάθε μήκος ίνας (CDMA κέρδος = 50).

Πίνακας 3. Ελάχιστη περίοδος chip και αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης σε διάφορα μήκη της πολυρυθμικής ίνας και για CDMA κέρδος ίσο με 50		
Μήκος ίνας	Περίοδος chip	Ταχύτητα διάδοσης στην ίνα
1m	10^{-9} sec	1Gbps
10m	10^{-8} sec	100Mbps
100m	10^{-7} sec	10Mbps
1Km	10^{-6} sec	1Mbps
10Km	10^{-5} sec	100Kbps
100Km	10^{-4} sec	10Kbps

Για την απόδειξη των δεδομένων του Πίνακα 3 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων MATLAB. Σημειώνεται ότι το πρώτο πρόγραμμα έχει ονομαστεί **transmitter.m**, ενώ το δεύτερο πρόγραμμα **rake.m**

Οι καθυστερήσεις ομάδας των κυματοδηγούμενων ρυθμών (με τη μορφή που φαίνονται στον Πίνακα 1) έχουν αποθηκευτεί στον πίνακα `group_delays`. Ο Πίνακας αυτός δίνεται ως input κάθε φορά που ζητούνται από το πρόγραμμα `transmitter.m` οι καθυστερήσεις ομάδας των κυματοδηγούμενων ρυθμών.

Για 100 Km ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-4} (για επιτυχή λειτουργία) → αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 10Kbps

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      50
give the number of bits: 100
give the chip period in seconds: 1e-4
give delays of the paths: group_delays
give the length of the fiber in meters: 100000

>> rake
give the number of fingers: 2
```

```

BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5

>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5

```



```
>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      6      6      6
6      6
```

```
>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 5
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      6      7      8      9
9      9      9
```

```
>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 8
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     12     12
```

```
>> rake
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 17
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      6      7      8      9      10
11     12     12     12     12
```

Για 10 Km ίνας → ελάχιστη περίοδος chip=10⁻⁵ (για επιτυχή λειτουργία) → αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 100Kbps

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      50
give the number of bits: 100
give the chip period in seconds: 1e-5
give delays of the paths: group_delays
give the length of the fiber in meters: 10000
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5
```

```
>> rake
```

```

give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      6      6      6
6      6

>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 3
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      7      7
7      7      7

>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 6

```

```
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     10     10     10
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 7
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     11     11     11
```

Για 1Km ίνας →ελάχιστη περίοδος chip=10⁻⁶ (για επιτυχή λειτουργία) → αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 1Mbps

```
>> transmitter
```

```
give the CDMA gain:      50
```

```
give the number of bits:  100
```

```
give the chip period in seconds:      1e-6
```

```
give delays of the paths:  group_delays
```

```
give the length of the fiber in meters:  1000
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 2
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 1
```

```
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      5      5
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 3
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```

the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      6      6      6
6      6

```

```
>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 5
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
9      9      9
```

```
>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 5
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
9      9      9      9
```

```
>> rake
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 6
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     10     10     10     10
```

Για 100 m ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-7} (για επιτυχή λειτουργία) → αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 10 Mbps

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      50
give the number of bits: 100
give the chip period in seconds:      1e-7
give delays of the paths:      group_delays
give the length of the fiber in meters:      100
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 7
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 2
```

```
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      5      6      6      6      6
6      6
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 8
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 4
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      5      6      7      8      8
8      8      8
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 9
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 7
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     11     11
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 7
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     11     11     11
```


**Για 10 m ίνας → ελάχιστη περίοδος chip=10⁻⁸ (για επιτυχή λειτουργία) →
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 100 Mbps**

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      50
give the number of bits: 100
give the chip period in seconds:      1e-8
give delays of the paths:  group_delays
give the length of the fiber in meters: 10
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5
```

```
>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```

the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      6      6      6
6      6

>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 7
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     11

>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 17
number of errors achieved: 1

```

```
the finger delays are:      6      7      8      9      10
11     12     13     13
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 25
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      7      8      9      10      11
11     11     11     11     11
```

**Για 1 m ίνας →ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-9} (για επιτυχή λειτουργία)→
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 1Gbps**

```
>> transmitter
```

```
give the CDMA gain:      50
```

```
give the number of bits: 100
```

```
give the chip period in seconds:      1e-9
```

```
give delays of the paths:      group_delays
```

```
give the length of the fiber in meters:      1
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 2
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 1
```

```
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      5      5
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 3
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 1
```

```

number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      5      5      5      5
5

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 3
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      7      7
7      7

```

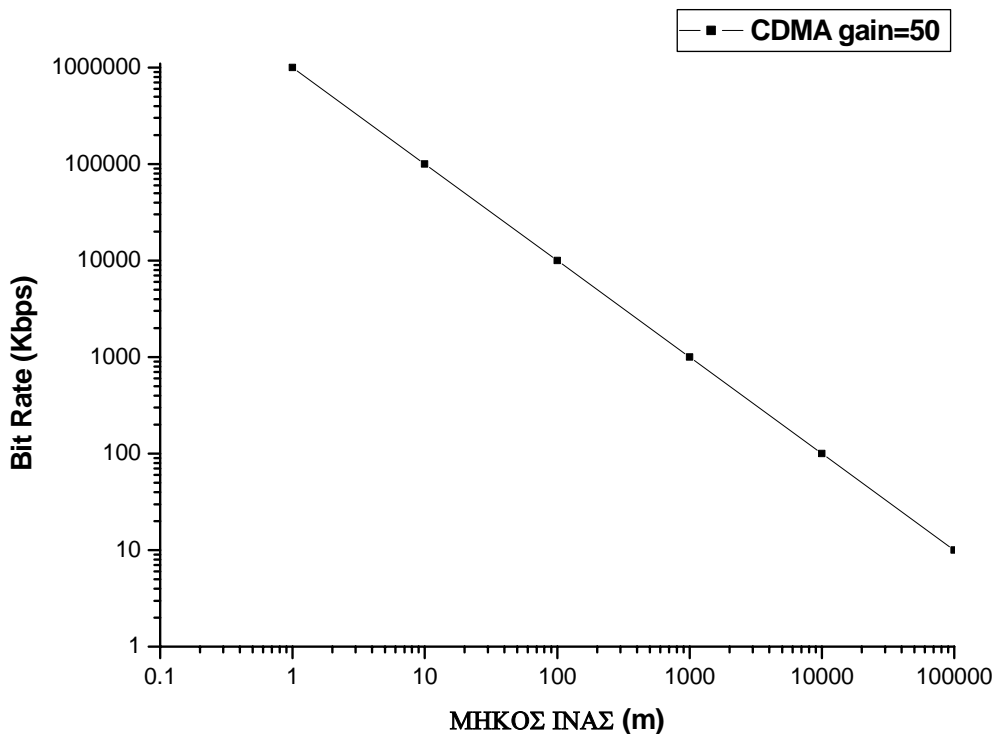
```
>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 6
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     10     10
```

```
>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 9
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     12     13
```

```
>> rake
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 10
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      5      6      7      8      9
10     11     12     13     14
```

Από τη μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Επιβεβαιώθηκε ότι για κάθε μήκος ίνας για να υπάρχει επιτυχής λειτουργία του συστήματος πρέπει η περίοδος των chips του κώδικα (αντίστροφο της ταχύτητας διάδοσης στην ίνα) να είναι τουλάχιστον ίση με την τάξη μεγέθους της καθυστέρησης ομάδας των κυματοδηγούμενων ρυθμών. Αυτό φαίνεται παραστατικά στην ακόλουθη γραφική παράσταση.



Σχήμα 10. Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης για κάθε μήκος ίνας ώστε να επιτυγχάνεται $BER \leq 0,01$ με CDMA κέρδος ίσο με 50

Η παραπάνω γραφική παράσταση υποδηλώνει στην ουσία το όριο μετάβασης από την περιοχή ορθής λειτουργίας ($BER \leq 0,01$) στην περιοχή όπου το σύστημα δε λειτουργεί σωστά ($BER > 0,01$).

- Όταν ικανοποιείται η προηγούμενη συνθήκη (δηλαδή, η περίοδος των chip του κώδικα είναι τουλάχιστον ίση με την τάξη μεγέθους της καθυστέρησης ομάδας των κυματοδηγούμενων ρυθμών), το σύστημα λειτουργεί επιτυχώς για κάθε αριθμό fingers του δέκτη RAKE (από 2 μέχρι 10 που πρακτικά ενδιαφέρει). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για κάθε μήκος ίνας, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των fingers που προσομοιώνεται τόσο δυσκολότερα συγκλίνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Μάλιστα, για αριθμό fingers από 2 ως 6 ο αλγόριθμος συγκλίνει μόλις από την πρώτη επανάληψη, συγκλίνει δηλαδή με την αρχική συνθήκη.

Στον ακόλουθο Πίνακα φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται ο αλγόριθμος για να συγκλίνει σε κάθε μήκος ίνας (και αντίστοιχη μέγιστη ταχύτητα διάδοσης)

Πίνακας 4. Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ανάλογα με το μήκος της ίνας και τον αριθμό των fingers (CDMA κέρδος ίσο με 50)						
Αριθμός fingers	Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης					
	100Km (10Kbps)	10Km (100Kbps)	1Km (1Mbps)	100m (10Mbps)	10m (100Mbps)	1m (1Gbps)
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1
7	2	2	2	2	2	3
8	5	3	5	4	7	6
9	8	6	5	7	17	9
10	17	7	6	7	25	10

Αν στο δεδομένο CDMA κέρδος= 50 επιχειρηθεί να αυξηθεί η ταχύτητα διάδοσης σε κάθε μήκος ίνας κατά μία τάξη μεγέθους πάνω από τη μέγιστη δυνατή (δηλαδή να μειωθεί η περίοδος των chip του CDMA κώδικα κατά μία τάξη μεγέθους σε σχέση με την ελάχιστη δυνατή) διαπιστώνεται ότι πράγματι το σύστημα δε δουλεύει για κανένα αριθμό fingers του δέκτη.

Αυτό φαίνεται και στα παρακάτω αποτελέσματα, όπου για παράδειγμα επιχειρήθηκε να προσομοιωθεί ταχύτητα 100 Mbps (περίοδος chip= 10^{-8}) σε 100m ίνας. Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο μήκος έχει βρεθεί ότι η ταχύτητα για την οποία το σύστημα δουλεύει σωστά είναι 10 Mbps

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      50
give the number of bits: 100
give the chip period in seconds: 1e-8
give delays of the paths: group_delays
give the length of the fiber in meters: 100
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 cannot be achieved
the total number of iterations is 200
minimum errors achieved: 45
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 cannot be achieved
the total number of iterations is 300
minimum errors achieved: 43
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 cannot be achieved
the total number of iterations is 400
minimum errors achieved: 42
```

```
>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 cannot be achieved
the total number of iterations is 500
minimum errors achieved: 44
```

```
>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 cannot be achieved
```



```
the total number of iterations is 600
minimum errors achieved: 45
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 7
```

```
BER<= 0.010000 cannot be achieved
```

```
the total number of iterations is 700
```

```
minimum errors achieved: 45
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 8
```

```
BER<= 0.010000 cannot be achieved
```

```
the total number of iterations is 800
```

```
minimum errors achieved: 45
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 9
```

```
BER<= 0.010000 cannot be achieved
```

```
the total number of iterations is 900
```

```
minimum errors achieved: 46
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 cannot be achieved
```

```
the total number of iterations is 1000
```

```
minimum errors achieved: 46
```

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί $BER \leq 0,01$ για κανένα αριθμό fingers του δέκτη. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν για όλα τα μήκη ίνας που εξετάζονται.

Για να μπορεί να αυξηθεί σε κάθε μήκος ίνας το bit rate κατά μια τάξη μεγέθους (και να παραμένει το $BER \leq 0,01$), είναι απαραίτητο να αυξηθεί το CDMA gain. Επιλέγεται να δοκιμαστεί το σύστημα με CDMA κέρδος ίσο με 500. Προκύπτει ο ακόλουθος

Πίνακας, όπου φαίνονται οι μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να υποστηριχθούν για επιτυχή λειτουργία (αριθμός λαθών 0 ή 1) σε κάθε μήκος ίνας (για CDMA κέρδος ίσο με 500).

Πίνακας 5. Ελάχιστη περίοδος chip και αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης σε διάφορα μήκη της πολυρυθμικής ίνας και για CDMA κέρδος ίσο με 500		
Μήκος ίνας	Περίοδος chip	Ταχύτητα διάδοσης στην ίνα
1m	10^{-10} sec	10Gbps
10m	10^{-9} sec	1Gbps
100m	10^{-8} sec	100Mbps
1Km	10^{-7} sec	10Mbps
10Km	10^{-6} sec	1Mbps
100Km	10^{-5} sec	100Kbps

Για την απόδειξη των δεδομένων του Πίνακα 5 παρατίθενται και τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων MATLAB.

Για 100Km ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-5} (για επιτυχή λειτουργία)→ αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 100Kbps

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      500
give the number of bits:  100
give the chip period in seconds:  1e-5
give delays of the paths:  group_delays
give the length of the fiber in meters:  100000

>> rake
give the number of fingers:  2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved:  0
```

the finger delays are: 48 48

>> rake

give the number of fingers: 3

BER<= 0.010000 achieved!!!

the total number of iterations is 1

number of errors achieved: 0

the finger delays are: 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 4

BER<= 0.010000 achieved!!!

the total number of iterations is 1

number of errors achieved: 0

the finger delays are: 48 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 5

BER<= 0.010000 achieved!!!

the total number of iterations is 1

number of errors achieved: 0

the finger delays are: 48 48 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 6

BER<= 0.010000 achieved!!!

the total number of iterations is 1

number of errors achieved: 0

the finger delays are: 48 48 48 48 48

48

>> rake

give the number of fingers: 7

BER<= 0.010000 achieved!!!

```
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 6
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      49      50      51      52
53      53      53      53      53
```

**Για 10Km ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-6} (για επιτυχή λειτουργία)→
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 1Mbps**

```
>> transmitter
```

```
give the CDMA gain:      500
give the number of bits:  100
give the chip period in seconds:  1e-6
give delays of the paths:  group_delays
give the length of the fiber in meters:  10000
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 3
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      49      50      50      50
50      50      50      50      50
```

**Για 1Km ίνας → ελάχιστη περίοδος chip=10⁻⁷ (για επιτυχή λειτουργία)→
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 10Mbps**

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      500
give the number of bits:  100
give the chip period in seconds:      1e-7
give delays of the paths:  group_delays
give the length of the fiber in meters:      1000
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!  
the total number of iterations is 1  
number of errors achieved: 0  
the finger delays are:      48      48      48      48
```

```
>> rake  
give the number of fingers: 5  
BER<= 0.010000 achieved!!!  
the total number of iterations is 1  
number of errors achieved: 0  
the finger delays are:      48      48      48      48      48
```

```
>> rake  
give the number of fingers: 6  
BER<= 0.010000 achieved!!!  
the total number of iterations is 1  
number of errors achieved: 0  
the finger delays are:      48      48      48      48      48  
48
```

```
>> rake  
give the number of fingers: 7  
BER<= 0.010000 achieved!!!  
the total number of iterations is 1  
number of errors achieved: 0  
the finger delays are:      48      48      48      48      48  
48      48
```

```
>> rake  
give the number of fingers: 8  
BER<= 0.010000 achieved!!!  
the total number of iterations is 1  
number of errors achieved: 0
```



```
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 9
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 2
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 2
```

```
number of errors achieved: 1
```

```
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49      49
```

Για 100 m ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-8} (για επιτυχή λειτουργία) → αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 100Mbps

```
>> transmitter
```

```
give the CDMA gain:      500
```

```
give the number of bits:      100
```

```
give the chip period in seconds:      1e-8
```

```
give delays of the paths:      group_delays
```

```
give the length of the fiber in meters:      100
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 2
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are: 48 48

>> rake

give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are: 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are: 48 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are: 48 48 48 48 48

>> rake

give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are: 48 48 48 48 48
48

>> rake

```
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49      49
```

**Για 10 m ίνας → ελάχιστη περίοδος chip=10⁻⁹ (για επιτυχή λειτουργία) →
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 1Gbps**

```
>> transmitter
give the CDMA gain:      500
give the number of bits:  100
give the chip period in seconds:      1e-9
give delays of the paths:  group_delays
give the length of the fiber in meters:  10
```

```
>> rake
give the number of fingers: 2
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 3
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48
```

```
>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```

the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48

```

```

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48

```

```

>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48

```

```

>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 0

```

```
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 10
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 3
```

```
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      48      49      50      50      50
50      50      50      50      50
```

**Για 1m ίνας → ελάχιστη περίοδος chip= 10^{-10} (για επιτυχή λειτουργία)→
αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης στην ίνα = 10Gbps**

```
>> transmitter
```

```
give the CDMA gain:      500
```

```
give the number of bits: 100
```

```
give the chip period in seconds:      1e-10
```

```
give delays of the paths:      group_delays
```

```
give the length of the fiber in meters:      1
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 2
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 1
```

```
number of errors achieved: 0
```

```
the finger delays are:      48      48
```

```
>> rake
```

```
give the number of fingers: 3
```

```
BER<= 0.010000 achieved!!!
```

```
the total number of iterations is 1
```

```

number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48

>> rake
give the number of fingers: 4
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48

>> rake
give the number of fingers: 5
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48

>> rake
give the number of fingers: 6
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48

>> rake
give the number of fingers: 7
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 0
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48

```

```

>> rake
give the number of fingers: 8
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 1
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      48      48      48      48
48      48      48

```

```

>> rake
give the number of fingers: 9
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 2
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      49      49      49      49
49      49      49      49

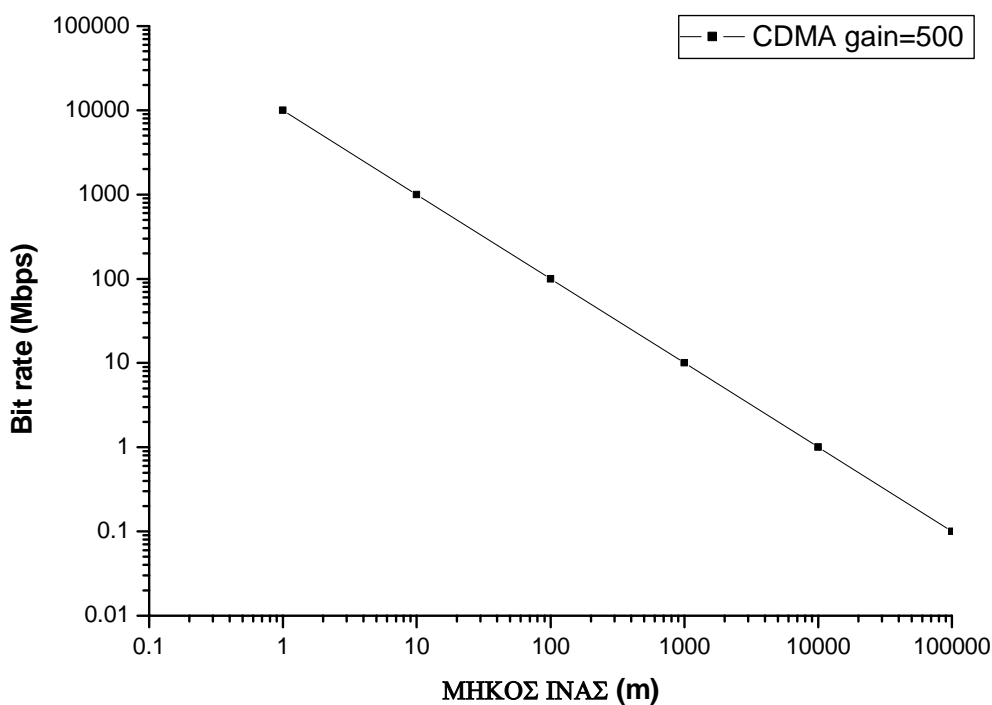
```

```

>> rake
give the number of fingers: 10
BER<= 0.010000 achieved!!!
the total number of iterations is 3
number of errors achieved: 1
the finger delays are:      48      49      50      50      50
50      50      50      50      50

```

Από τη μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι αν αυξηθεί το CDMA κέρδος σε 500 τότε είναι δυνατόν σε κάθε μήκος ίνας να αυξηθεί η ταχύτητα διάδοσης μέσα στην ίνα κατά μία τάξη μεγέθους (σε σχέση με όταν το CDMA κέρδος είναι 50) και το BER να παραμένει μικρότερο ή ίσο με 0,01. Αυτό φαίνεται και στην ακόλουθη γραφική παράσταση.



Σχήμα 11. Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης για κάθε μήκος ίνας ώστε να επιτυγχάνεται $BER \leq 0,01$ με CDMA κέρδος ίσο με 500

Αυτή η γραφική παράσταση υποδηλώνει στην ουσία το όριο μετάβασης από την περιοχή ορθής λειτουργίας ($BER \leq 0,01$) στην περιοχή όπου το σύστημα δε λειτουργεί σωστά ($BER > 0,01$) για CDMA κέρδος ίσο με 500.

Επίσης, όταν το σύστημα δουλεύει σωστά, αυτό γίνεται για κάθε αριθμό fingers του δέκτη (από 2 μέχρι 10 που πρακτικά ενδιαφέρει). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης συγκλίνει πολύ γρήγορα και μάλιστα από 2 μέχρι 8 fingers συγκλίνει μόλις από την πρώτη επανάληψη (δηλαδή με την αρχική συνθήκη), ενώ για 9 και 10 fingers ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είναι 3. Αυτή η πολύ γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης οφείλεται στο μεγάλο CDMA κέρδος (=500).

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάζεται ο αλγόριθμος για να συγκλίνει σε κάθε μήκος ίνας (και αντίστοιχη μέγιστη ταχύτητα διάδοσης).

**Πίνακας 6. Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση του αλγορίθμου
βελτιστοποίησης ανάλογα με το μήκος της ίνας και τον αριθμό των fingers
(CDMA κέρδος ίσο με 500)**

Αριθμός fingers	Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης					
	100Km (100Kbps)	10Km (1Mbps)	1Km (10Mbps)	100m (100Mbps)	10m (1Gbps)	1m (10Gbps)
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1
9	2	1	2	2	2	2
10	3	3	2	2	3	3

7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετήθηκε η τεχνική απλωμένου φάσματος (CDMA), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης σε ένα κοινό μέσο μετάδοσης, αλλά και ως εξισορροπητικός παράγοντας της πολυδιαδρομικής διάδοσης ενός διαύλου (σε συνδυασμό με ένα δέκτη RAKE). Στη συνέχεια, με χρήση λογισμικού MATLAB αναπτύχθηκαν κώδικες με την βοήθεια των οποίων εφαρμόστηκε η τεχνική αυτή σε πολυρυθμική ίνα, η οποία είναι ένα περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Μελετήθηκαν διάφορα μήκη της συγκεκριμένης ίνας και εξετάστηκαν οι ταχύτητες που μπορούν να υποστηριχθούν σε συνάρτηση με το CDMA κέρδος, ώστε να εξισορροπηθεί το περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης και να επιτευχθεί στην έξοδο του δέκτη RAKE BER μικρότερο από κάποια τιμή σύγκλισης. Προκειμένου να βρεθούν οι χρόνοι ολίσθησης του CDMA κώδικα στα fingers του δέκτη με τους οποίους επιτυγχάνεται BER μικρότερο από την τιμή σύγκλισης αναπτύχθηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Διαπιστώθηκε ότι για CDMA κέρδος ίσο με 50 αν η περίοδος των chips του κώδικα (αντίστροφο της ταχύτητας μετάδοσης στην ίνα) είναι τουλάχιστον ίση με την τάξη μεγέθους της καθυστέρησης ομάδας των κυματοδηγούμενων ρυθμών τότε επιτυγχάνεται BER μικρότερο από την τιμή σύγκλισης για κάθε αριθμό fingers του δέκτη RAKE από 2 ως 10. Διαπιστώθηκε επίσης ότι όσο αυξάνει ο αριθμός των fingers τόσο πιο δύσκολα συγκλίνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Αν επιχειρηθεί να αυξηθεί η ταχύτητα διάδοσης στο δεδομένο CDMA κέρδος τότε το σύστημα δε δουλεύει ικανοποιητικά. Για να ξαναεπιτευχθεί BER μικρότερο από την τιμή σύγκλισης απαιτείται να αυξηθεί κατάλληλα το CDMA κέρδος. Μάλιστα μπορεί να βρεθεί CDMA κέρδος στο οποίο ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να συγκλίνει για κάθε αριθμό fingers από 2 μέχρι 10 που πρακτικά ενδιαφέρει.

8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] N.K. Ουζούνογλου,
“Τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών”, Κεφάλαιο 3, Εκδόσεις Συμμεών (1999).
- [2] L. Raddatz, I. H. White, D.G. Cunningham, and M.C. Nowell,
“An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links”,
J. of Lightwave Technology 16, 324 (1998).
- [3] T. Koonen, H. Boom, F. Willems, J. Bergmans, Giok-Djan Khoe,
“Mode Group Diversity Multiplexing for multi-service in-house networks using multi-mode polymer optical fibre”,
Proceedings Symposium IEEE/LEOS, Benelux Chapter, 2002, Amsterdam. Pp. 183-186.
- [4] E.J. Tyler, P. Kourtessis, M. Webster, E. Rochart, T. Quinlan, S.E. M. Dudley, S.D. Walker, R.V. Penty, I.H. White,
“Toward Terabit-per-second capacities over multimode fiber links using SCM/WDM techniques”,
J. of Lightwave Technology 21, 3237 (2003).
- [5] M.E. Θεολόγου,
“Δίκτυα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π (2004)
- [6] Χ. Καψάλης, Π. Κωττής,
“Δορυφορικές επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα (2003)
- [7] www.corning.com/opticalfiber/products_applications/products/infinicor.aspx
- [8] A.R. Shah, R.C.J. Hsu, A. Tarighat, A.H. Sayed, B. Jalali,
“Coherent optical MIMO (COMIMO)”,
J. of Lightwave Technology 21, 2410 (2005).