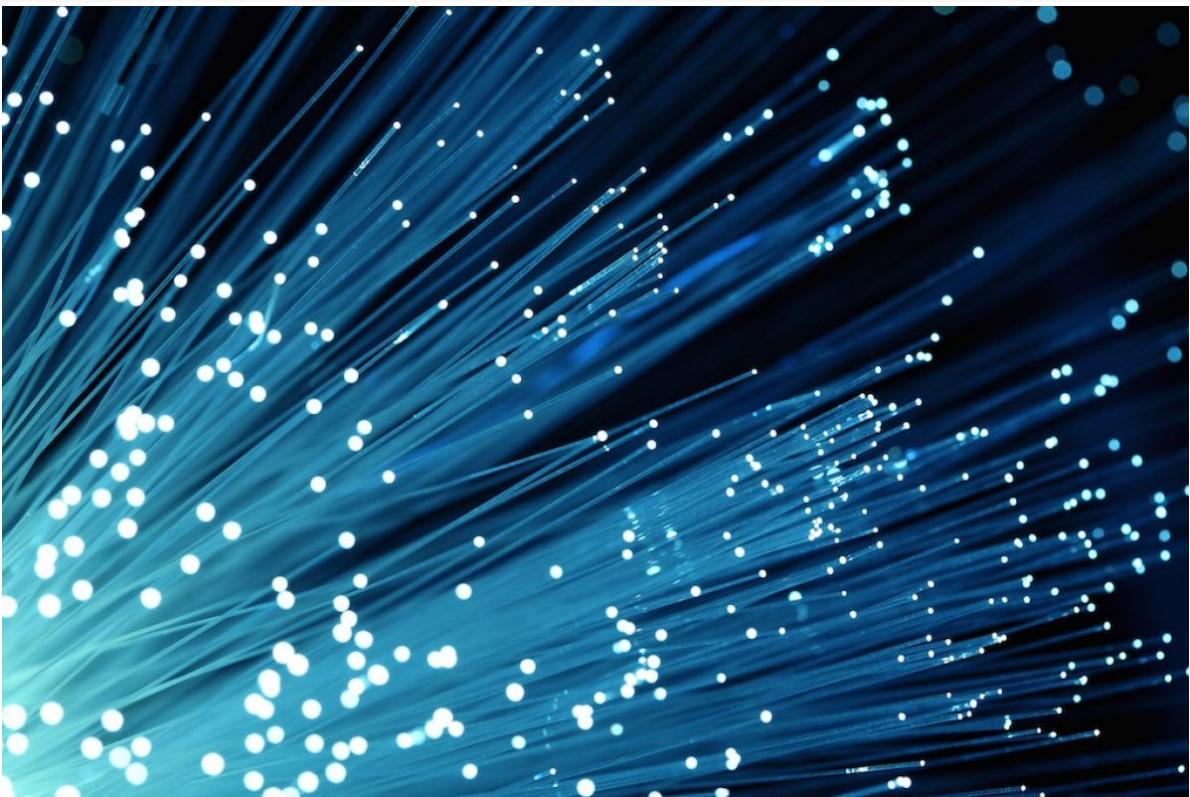


Οπτικές Επικοινωνίες

Προαιρετικά Θέματα 3ου Κεφαλαίου



Αλέξανδρος Τζήκας

alexatzik@ece.auth.gr - 8978

Προαιρετικά Θέματα 3^{ον} Κεφαλαίου

Οπτικοί Κυματοδηγοί II: Απόσβεση & Διασπορά

1. Παράμετροι Διασποράς Μονόρρυθμης Ίνας SMF-28

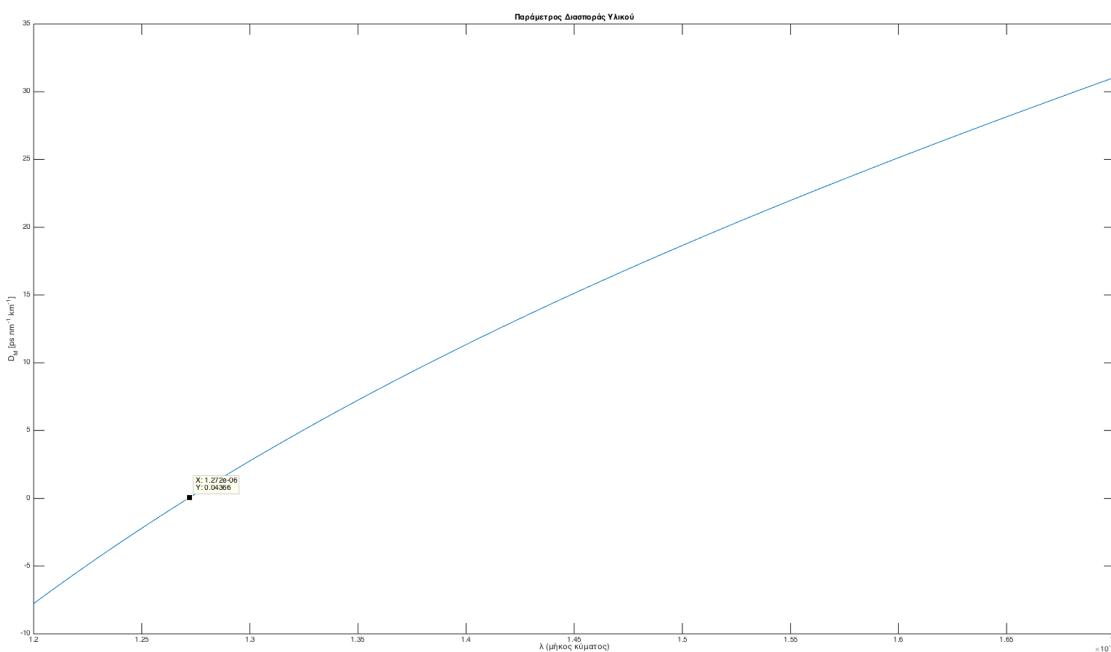
Στο πρώτο θέμα της εργασίας ζητείται η εύρεση των παραμέτρων διασποράς της μονόρρυθμης ίνας SMF-28. Η συγκεκριμένη ίνα έχει διάμετρο 8.2μm και σχετική διαφορά δεικτών διάθλασης πυρήνα-περιβλήματος $\Delta=0.3\%$. Ο δείκτης διάθλασης του υλικού της ίνας δίνεται με την εξίσωση του Sellmeier. Τέλος, είναι έγκυρα τα αποτελέσματα της βαθμωτής προσέγγισης του θέματος 1.2, αφού η ίνα ικανοποιεί τις προϋποθέσεις ασθενούς κυματοδήγησης.

Ερώτημα (α)

Στο ερώτημα αυτό ζητείται ο καθορισμός της παραμέτρου διασποράς υλικού D_M της ίνας SiO_2 για το εύρος μηκών κύματος [1200, 1700]nm. Για την παράμετρο αυτή ισχύει:

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

Επομένως, με χρήση συμβολικών υπολογισμών στο MATLAB για την εκτέλεση της παραγώγισης και με χρήση της συνάρτησης `subs()` για τον υπολογισμό της παραμέτρου στα διάφορα μήκη κύματος προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 1.1: Παράμετρος Διασποράς Υλικού

Η παράμετρος μηδενίζεται στα 1272 nm.

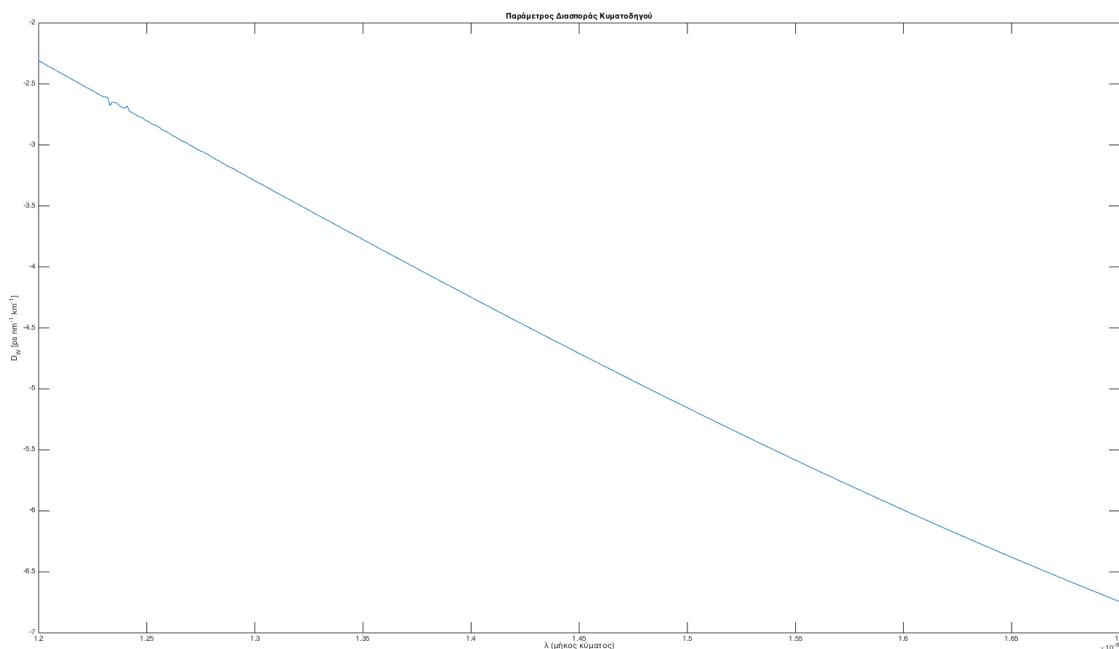
Ερώτημα (β)

Εδώ ζητείται να αγνοηθεί η διασπορά υλικού και να υπολογιστεί μόνο η διασπορά κυματοδηγού D_W για τα μήκη κύματος [1200, 1700] nm. Στον κώδικα αρχικά ορίστηκαν ως συναρτήσεις οι μεταβλητές k_0 και V . Βρέθηκαν οι ακρότατες τιμές του V για τα δεδομένα μήκη κύματος, επιλύθηκε η χρακτηριστική εξίσωση για V στην περιοχή που περιέχει το εύρος V για τα επιθυμητά μήκη κύματος (η περιοχή είναι πιο μεγάλη από το εύρος αυτό, διότι θα πραγματοποιηθεί παραγώγιση στην συνέχεια) και υπολογίστηκε η παραγώγος της συνάρτησης Vb με χρήση αριθμητικής παραγώγισης (gradient). Τέλος, αντιστοιχήθηκε σε κάθε μήκος κύματος λ στο δοσμένο εύρος η τιμή V που αυτό παράγει και η τιμή της δεύτερης παραγώγου του Vb που αντιστοιχεί στο V του.

Η παραμετρος διασποράς κυματοδηγού υπολογίστηκε από τις σχέσεις:

$$D_W = -\frac{n_1}{\lambda c} \Delta \cdot V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}, \quad V = k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

Το ζητούμενο διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.

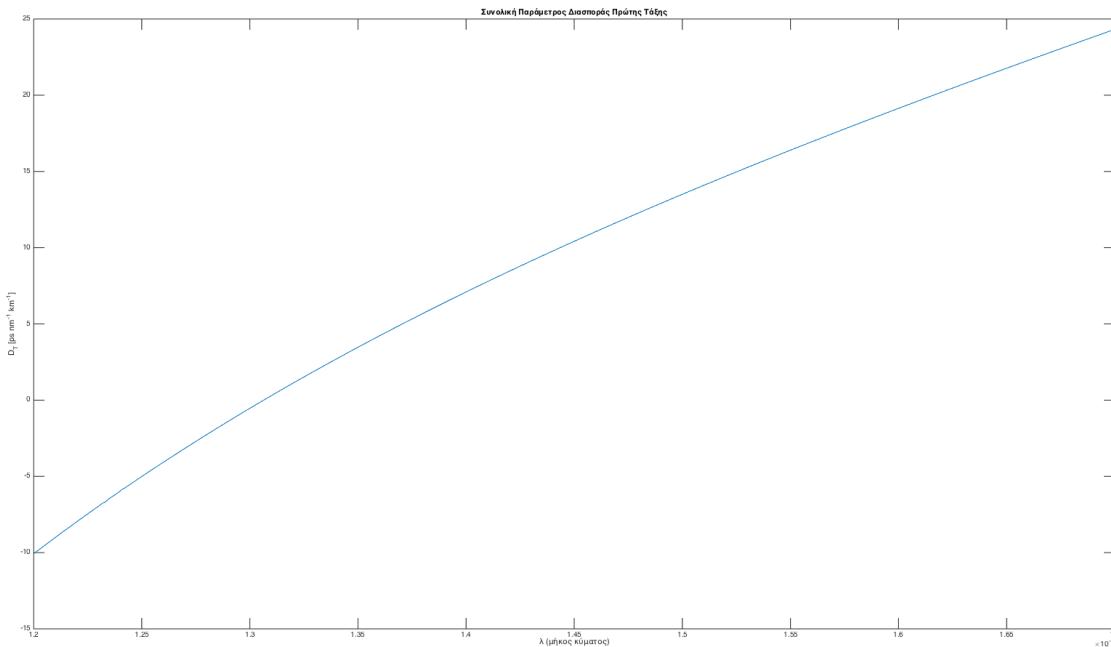


Εικόνα 1.2: Παραμετρος Διασποράς Κυματοδηγού

Ερώτημα (γ)

Με πρόσθεση των καμπυλών D_M και D_W προκύπτει η συνολική παραμέτρος διασποράς πρώτης τάξης D_T (στην οποία βέβαια δεν συμπεριλαμβάνεται ο όρος D_P , ο οποίος εν γένει βέβαια είναι πολύ μικρός).

Η παραμέτρος D_T μηδενίζεται στα 1306 nm.



Εικόνα 1.3: Συνολική Παραμέτρος Διασποράς Πρώτης Τάξης

Ερώτημα (δ)

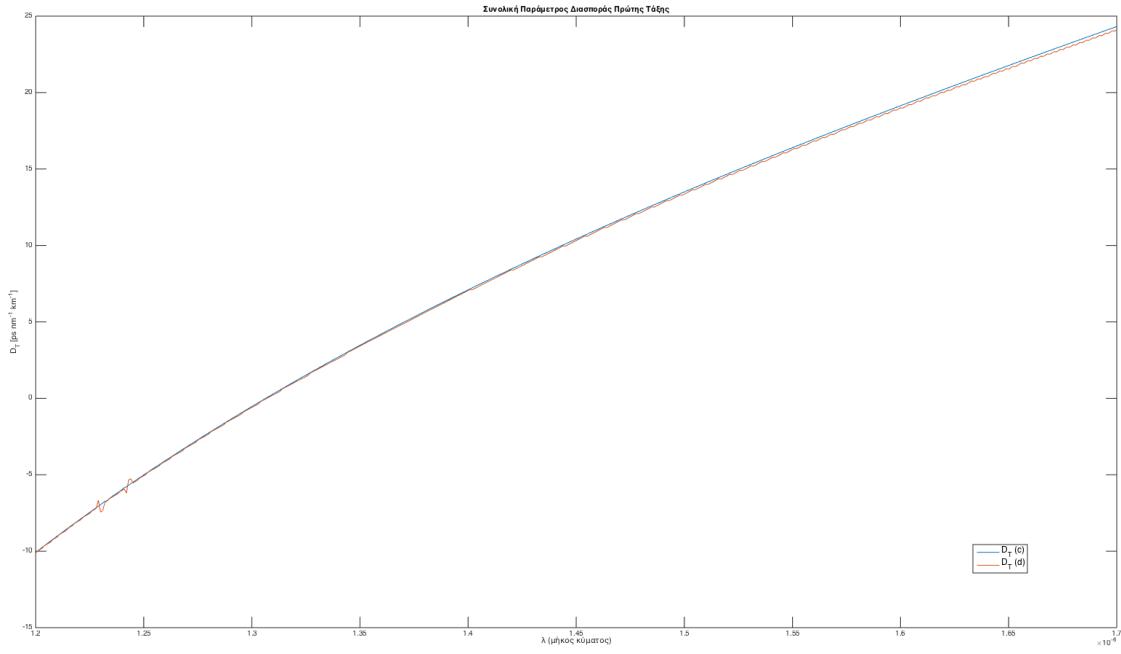
Με χρήση των τύπων:

$$D_T = -\frac{\omega}{\lambda} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}, \quad \beta = \frac{\omega}{c} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta(1 - b)}$$

προκύπτει απευθείας η παραμέτρος D_T .

Παρακάτω απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα οι 2 διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της. Παρατηρείται ότι οι δυο καμπύλες δεν διαφοροποιούνται σημαντικά, αλλά είναι ουσιαστικά ίδιες. Με άλλα λόγια, ο υπολογισμός της παραμέτρου με χρήση της παραγώγου ή του αθροίσματος των επιμέρους όρων δίνει το ίδιο αποτέλεσμα.

Επίσης, βλέπουμε ότι η καμπύλη D_T με υπολογισμό μέσω της παραγώγου (χωρίς διάκριση σε επιμέρους όρους) μηδενίζεται στο μήκος κύματος 1307nm. Η τιμή αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στα 1306 nm, τιμή στην οποία μηδενίζεται η καμπύλη D_T με άθροισμα των επιμέρους όρων D_M και D_W .

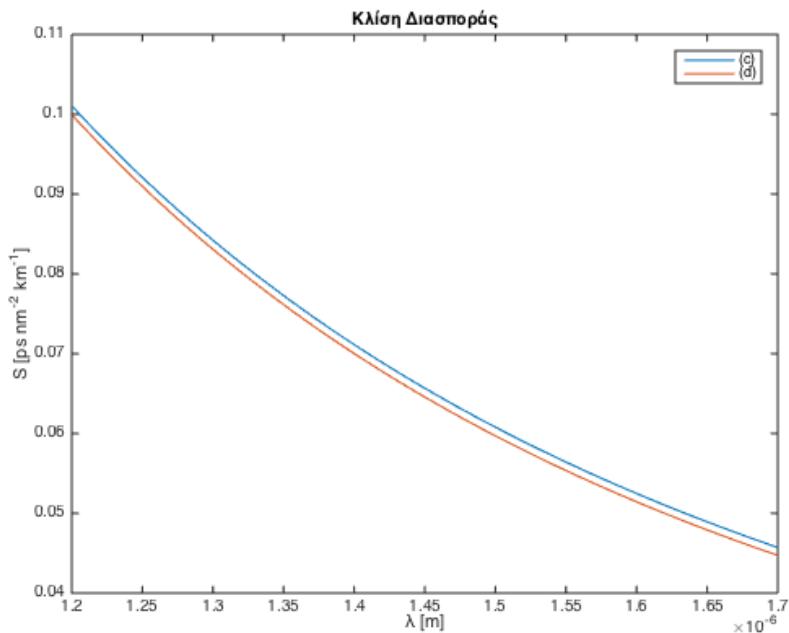


Εικόνα 1.4: Συνολική Παράμετρος Διασποράς Πρώτης Τάξης - Σύγκριση Τρόπων Υπολογισμού

Ερώτημα (ε)

Η κλίση διασποράς S υπολογισμένη με χρήση των D_T που βρέθηκαν στα ερωτήματα (γ) και (δ) φαίνεται παρακάτω. Λόγω της όξυνσης των σφαλμάτων με την παραγώγιση, υπάρχει μια μικρή διαφορά μεταξύ των καμπυλών.

Στον υπολογισμό της κλίσης διασποράς με χρήση της συνάρτησης $\text{gradient}()$ εμφανίστηκαν απότομες ακμές, λόγω των σφαλμάτων που εισάγονται και οξύνονται από την αριθμητική παραγώγιση. Για αυτό κρίθηκε απαραίτητη η επεξεργασία των δεδομένων με την εισαγωγή κάποιου fitting πριν υπολογιστεί η παράμετρος



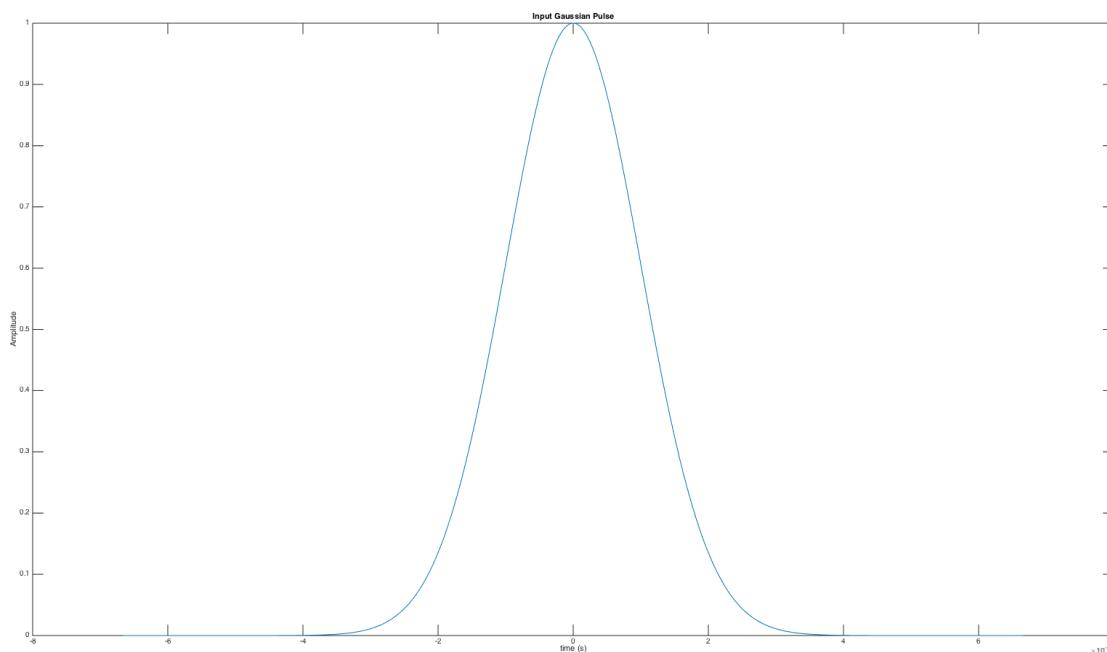
Εικόνα 1.5: Κλίση Διασποράς S

2. Διάδοση Ψευδοτυχαίας Ακολουθίας σε Μονόρρυθμη Ίνα

Στόχος της συγκεκριμένης άσκησης είναι η μελέτη της διάδοσης παλμοσειρών μέσα σε μία μονόρρυθμη ίνα. Οι παλμοσειρές που προσομοιώνονται μεταφέρονται μα δεδομένη ακολουθία από bits, η οποία έχει ως στόχο να εξετάσει όλες τις πιθανές επιδράσεις της διασποράς με διάφορους συνδυασμούς 1 και 0. Για την άσκηση θεωρούμε ότι η σταθερά που δείχνει την διασπορά $\tau_{\text{αληθινή}} = 2.1 \times 10^{-26} \text{ s}^2/\text{m}$ και η σταθερά που δηλώνει την διασπορά 3ης τάξης $\beta_3 = -1.3 \times 10^{-40} \text{ s}^3/\text{m}$. Οι απώλειες είναι 0.18 dB/km και ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας $B_T = 10 \text{ Gbps}$ και, εφόσον ο κάθε παλμός μεταφέρει ένα bit, έχουμε διάρκεια παλμού 10^{-10} s . Θεωρώντας κινούμενο πλαίσιο με την ταχύτητα ομάδας δεν λαμβάνουμε υπόψιν την σταθερά β_1 .

Ερώτημα (a)

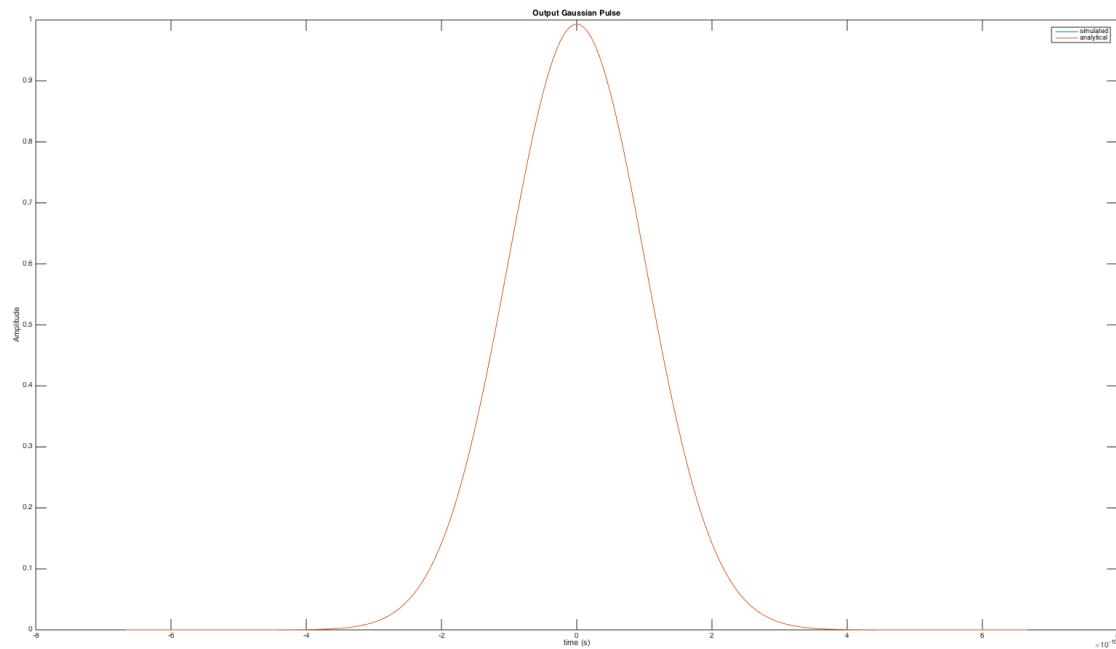
Πρώτο βήμα αποτελεί η επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κώδικα. Θεωρούμε λοιπόν την διάδοση ενός μεμονωμένου Gaussian παλμού σε ίνα χωρίς απώλειες με $\beta_3 = 0$. Ο παλμός εκφράζεται στο πεδίο του χρόνου, στο $z=0$, μέσω της σχέσης (3.48). Θεωρούμε μια τυπική τιμή $T_0 = 0$, $C_0 = 1$, $A_0 = 1$. Έτσι προκύπτει ο παλμός του παρακάτω σχήματος.



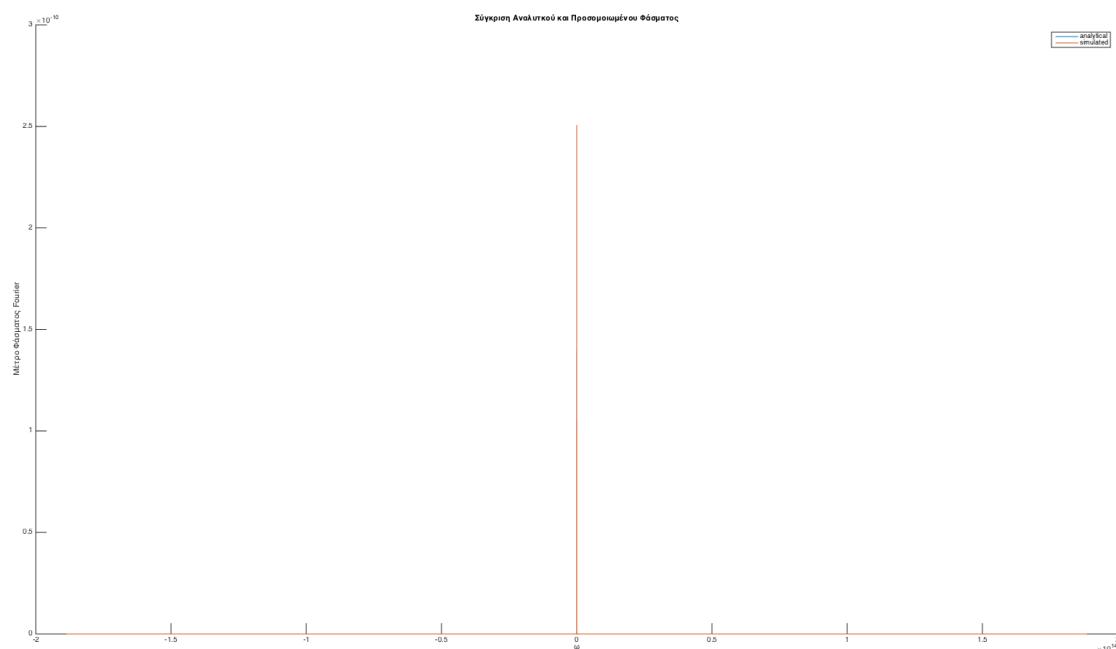
Εικόνα 2.1: Gaussian Παλμός Εισόδου

Στην συνέχεια, μετασχηματίζουμε στο φάσμα με χρήση του `fft()` επιβάλλουμε την αλλαγή που εκφράζεται μέσω της (3.42a) και μέσω του `ifft()` προκύπτει ο παλμός εξόδου στον χρόνο σε μια επιλεγμένη τιμή του z . Πρέπει να ταυτίζεται ο τελευταίος με τον παλμό που εκφράζει η (3.56) και επίσης το φάσμα του παλμού εισόδου μέσω `fft()` να είναι αυτό που δίνει η (3.53). Για το τελευταίο να σημειωθεί ότι οι μορφές των φασμάτων ταυτίζονται σε μορφή, αλλά διαφέρουν σε κλίμακα, καθώς το φάσμα που προκύπτει μέσω του `fft()` αποτελεί δείγματα φάσματος του παραθυροποιημένου, δειγματοληπτημένου σήματος της (3.56) και όχι δείγματα της (3.53), δηλαδή του αναλογικού φάσματος του παλμού. Στο πρώτο εισάγεται λόγω της μορφής και διαφορετικό βάρος από αυτό της κανονικής μορφής, άρα απαραίτητη είναι η κλιμάκωση, ενώ τα δύο φάσματα

σε μορφή είναι απόλυτα όμοια. Αυτό συμβαίνει εάν στην χρήση του `fft()` ληφθεί φροντίδα έτσι ώστε να αποφευχθεί επικάλυψη δέπλικων λόγω δειγματοληψίας αυξάνοντας την συχνότητα δειγματοληψίας, αλλά και να μειωθεί η επιρροή των εμφανιζόμενων sinc με αύξηση του αριθμού δειγμάτων. Σημαντική είναι και η χρήση της σχέσης (3.42a) σωστά με αντικατάσταση $\omega = -\omega$. Παρατηρούμε τελικά, όπως φαίνεται παρακάτω απόλυτη ταύτιση των αποτελεσμάτων.

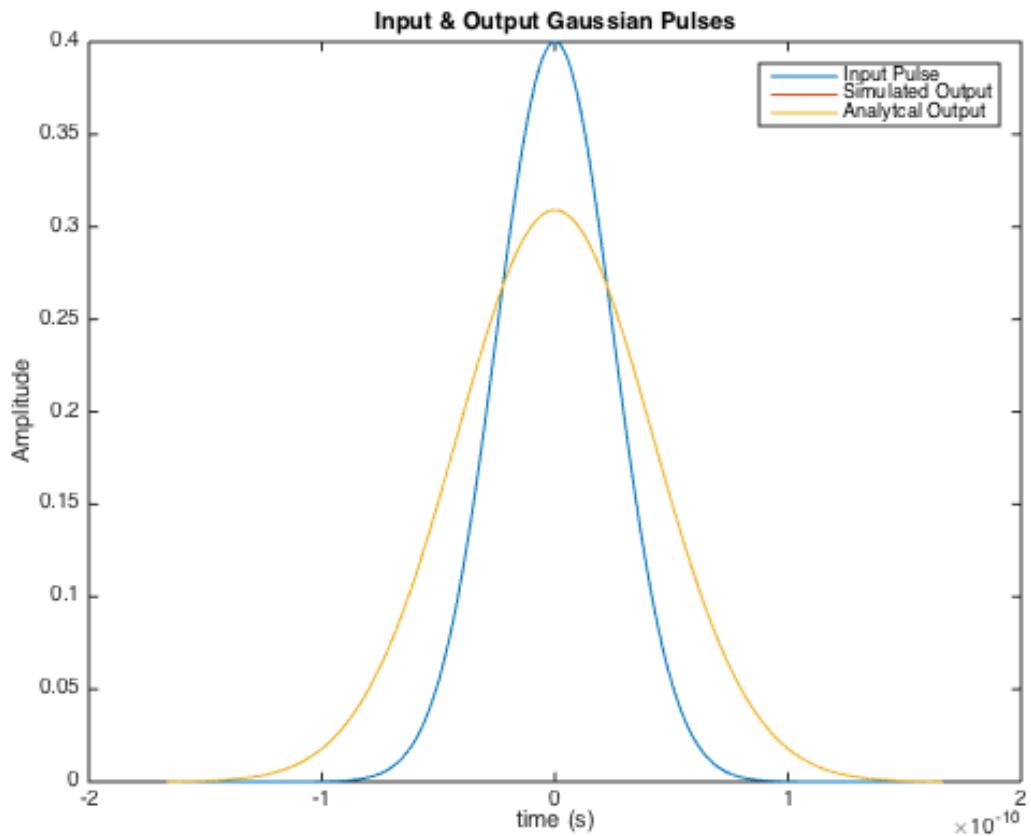


Εικόνα 2.2: Gaussian Παλμός Εξόδου



Εικόνα 2.3: Φάσμα Gaussian Παλμού Εισόδου

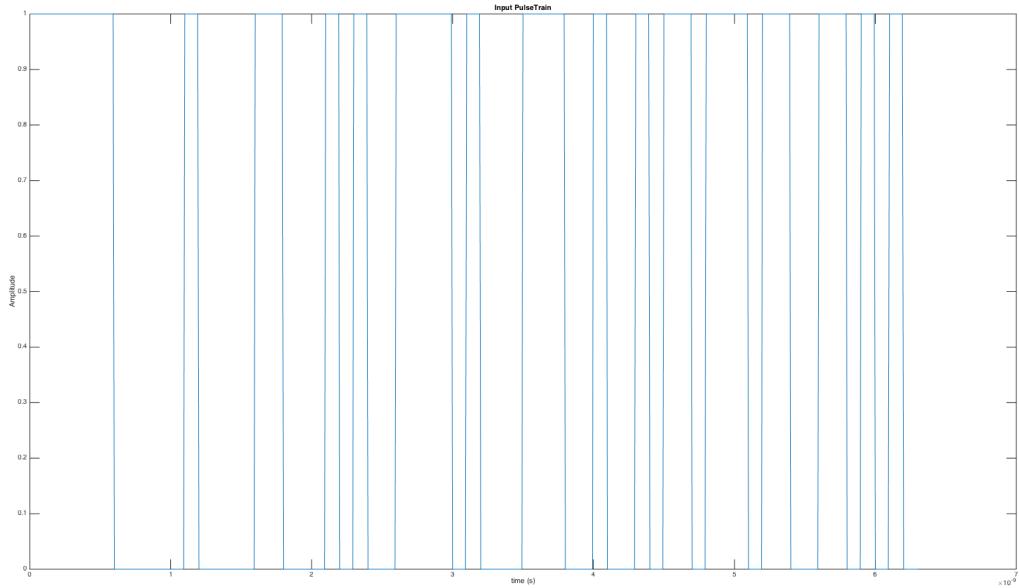
Ένα παράδειγμα στο οποίο φαίνεται καλύτερα η συμφωνία αναλυτικών και προσομοιωμένων αποτελεσμάτων είναι αυτό που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



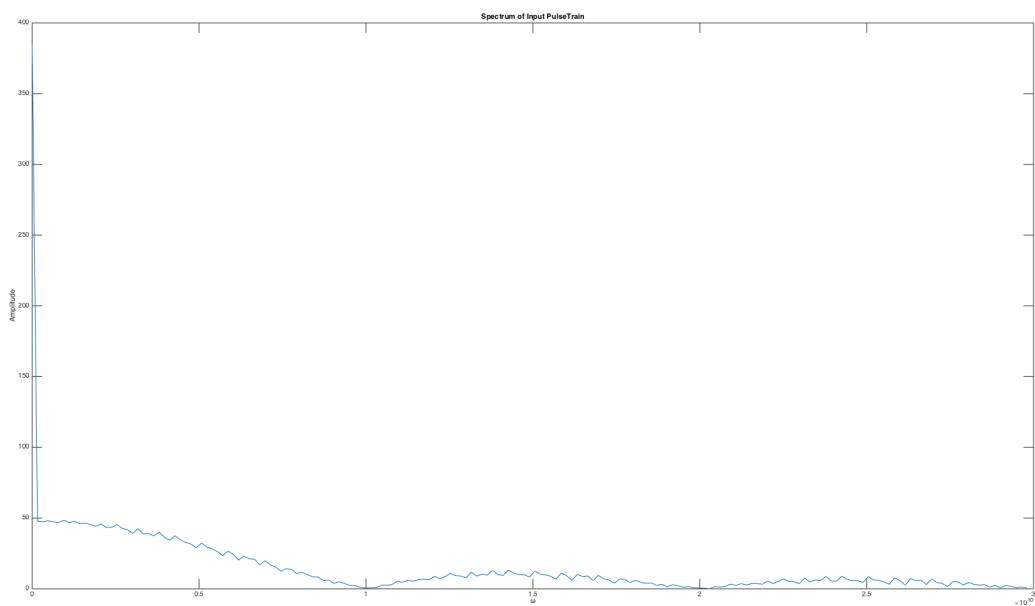
Εικόνα 2.4: Gaussian Παλμοί Εισόδου και Εξόδου

Ερώτημα (β)

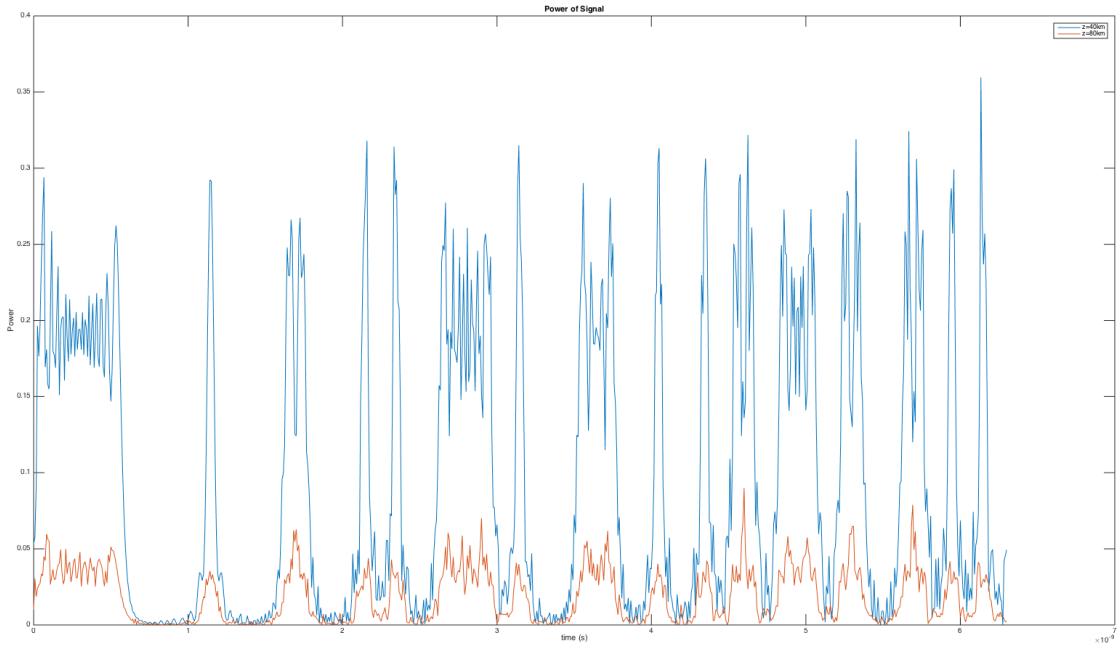
Αφού επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία του κώδικα, το επόμενο βήμα είναι η χοήση παλμοσειράς ιδανικών τετραγωνικών παλμών για την αποστολή της NRZ (σε όλη την περίοδο συμβόλου κρατάει την τιμή του ο παλμός) PRBS ακολουθίας τάξης 6. Η παλμοσειρά υλοποιήθηκε με χοήση της συνάρτησης `pulstran()` με βασικό παλμό τον ορθογωνικό. Η παλμοσειρά καθώς και το φάσμα της φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Στο φάσμα, όπως προαναφέρθηκε, δεν έχει σημασία η κλίμακα των συντελεστών Fourier, αλλά η γενικότερη μορφή τους.



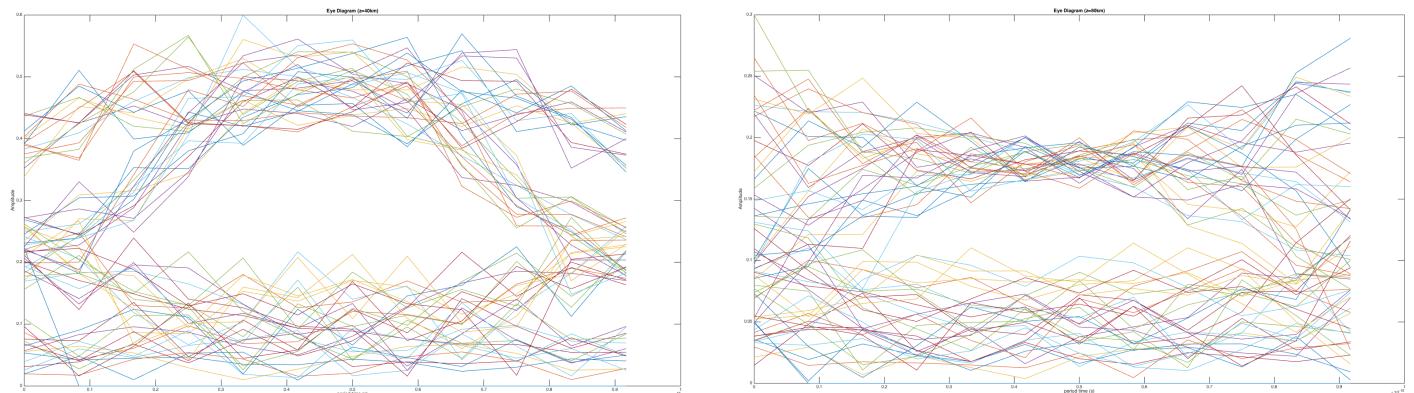
Εικόνα 2.5: Ορθογωνική Παλμοσειρά Εισόδου



Εικόνα 2.6: Φάσμα Ορθογωνικής Παλμοσειράς Εισόδου



Εικόνα 2.7: Οπτική Ισχύς στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km



Εικόνα 2.8: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km

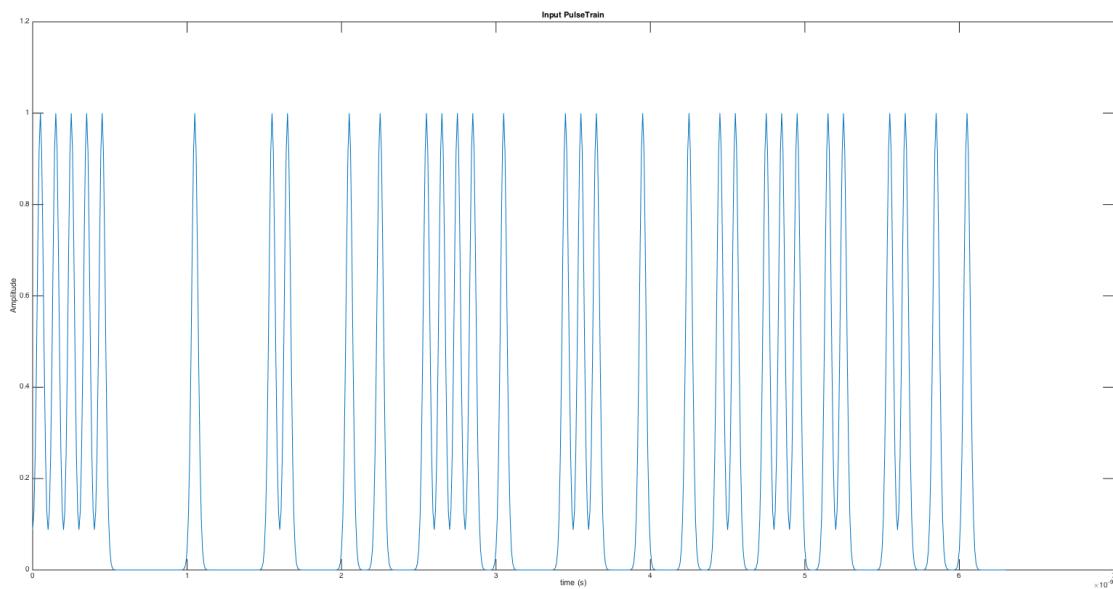
Παρατηρείται μια καλύτερη συγκέντρωση των κυματομορφών σε δύο διακριτά σημεία στο μέσο της περιοχής συμβόλου στο διάγραμμα οφθαλμού @ $z=40$ km. Αυτό σημαίνει ότι η πληροφορία ανιχνεύεται με λιγότερα σφάλματα σε αυτή την θέση, καθώς τα φαινόμενα διασποράς και απωλειών επιτρέπουν ακόμα την διάκριση της απεσταλμένης πληροφορίας.

Παρατήρηση:

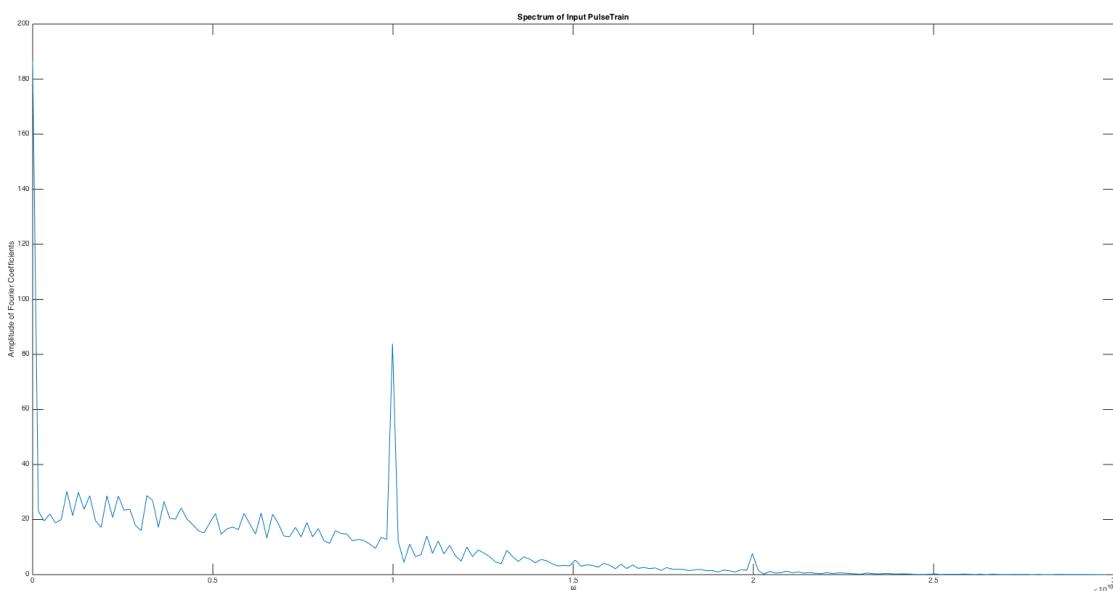
Το φάσμα έχει μηδενισμούς στα ακέραια πολλαπλάσια του $f=10\text{GHz}$. Αυτό συμβαίνει γιατί ο μετασχηματισμός Fourier ενός παλμού διάρκειας T είναι ουσιαστικά μια sinc με μηδενισμούς στα ακέραια πολλαπλάσια του $1/T$. Για άθροισμα μετατοπισμένων παλμών ίδιας διάρκειας (ακολουθία ερωτήματος) το πλάτος του ΜΣ είναι πάλι η ίδια sinc, άρα το φάσμα έχει τους ίδιους μηδενισμούς.

Ερώτημα (γ)

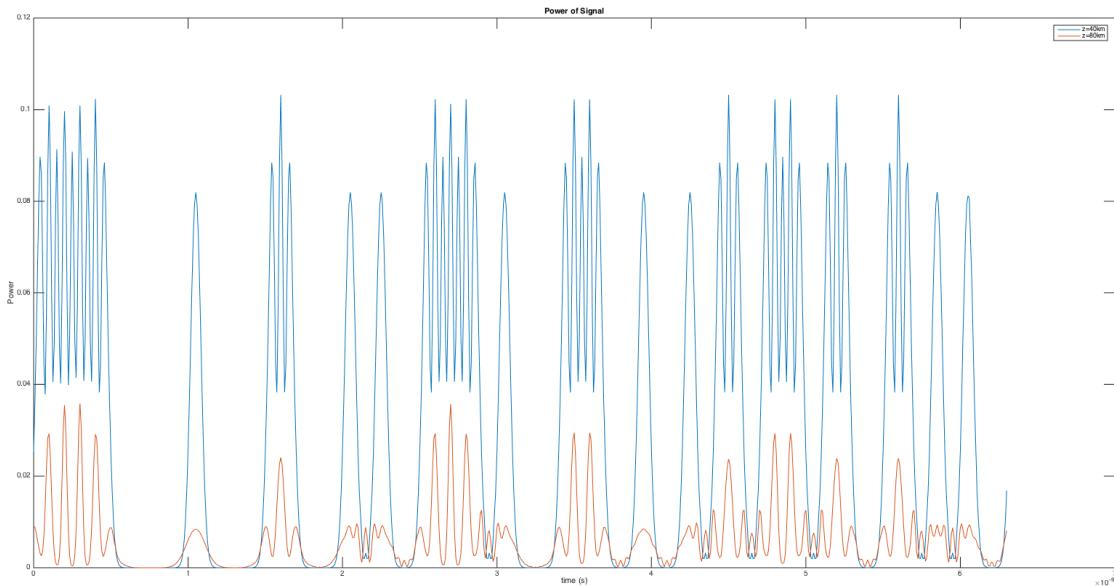
Στην συνέχεια καλούμαστε να κάνουμε την ίδια ανάλυση αλλά για RZ PRBS ακολουθία τάξης 6 με Gaussian παλμούς ($T_0=20$ ps) χωρίς chirp.



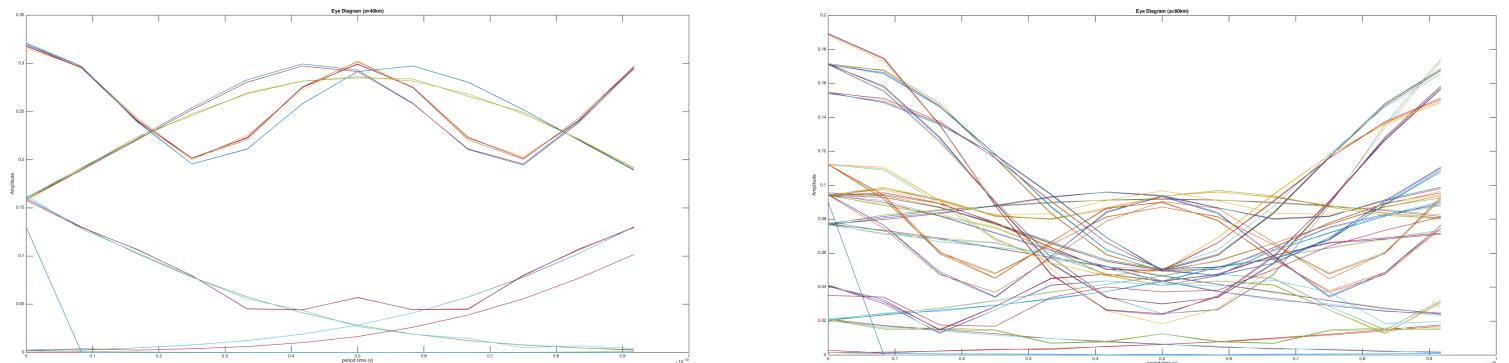
Εικόνα 2.9: Gaussian Παλμοσειρά Εισόδου



Εικόνα 2.10: Φάσμα Gaussian Παλμοσειράς Εισόδου



Εικόνα 2.11: Οπτική Ισχύς στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km



Εικόνα 2.12: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km

Σε σχέση με το φάσμα εισόδου της παλμοσειράς με ορθογωνικούς παλμούς, παρατηρούμε ότι το φάσμα της παλμοσειράς με Gaussian παλμούς παρουσιάζει σημαντικό συχνοτικό περιεχόμενο και σε άλλη συχνότητα πέραν της μηδενικής, ενώ εν γένει το πλάτος των συντελεστών ακολουθεί μια μειούμενη συμπεριφορά. Αντίθετα, στο φάσμα της παλμοσειράς με ορθογωνικούς παλμούς (sinc στο φάσμα) παρατηρούμε 2 μηδενισμούς των συντελεστών, ενώ φαίνεται να υπάρχουν και δευτερεύοντες λοβοί. Βέβαια, παρατηρούμε αρκετά μεγάλο συντελεστή μόνο στο $\omega=0$.

Από τα διαγράμματα οφθαλμού παρατηρούμε την πολύ καλή συγκέντρωση των καμπυλών σε 2 σημεία στο κέντρο της περιόδου συμβόλου για $z=40$ km. Επομένως, σε αυτή την απόσταση, η διασπορά δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά, αλλάζει όμως αρκετά την γενική μορφή των παλμών. Αντίθετα, στην απόσταση $z=80$ km φαίνεται η αλλαγή της μορφής των παλμών λόγω διασποράς να επιδρά σημαντικά και να αλλοιώνει σε μεγάλο βαθμό το διάγραμμα οφθαλμού, με αποτέλεσμα να μην είναι ευδιάκριτες 2 ανεξάρτητες περιοχές.

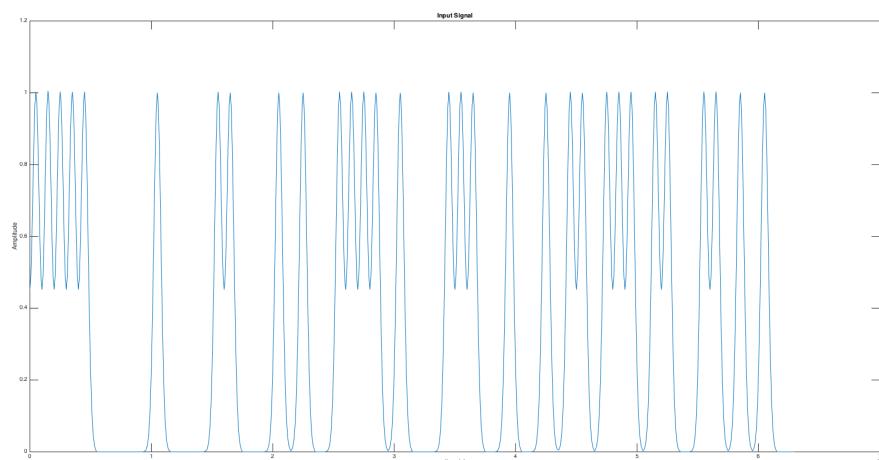
Ερώτημα (δ)

Ζητείται η επανάληψη των υπολογισμών για PRBS τάξης 6 με Gaussian παλμούς, αλλά αυτή την φορά χρησιμοποιώντας το T_0 εκείνο που με βάση την (3.58) θα δώσει την ελάχιστη εξάπλωση του παλμού στον χρόνο (δηλαδή το ελάχιστο T_1). Τα βέλτιστα T_0 για τα ζητούμενα μήκη φαίνονται παρακάτω (ελάχιστη εξάπλωση σε αυτό το μήκος).

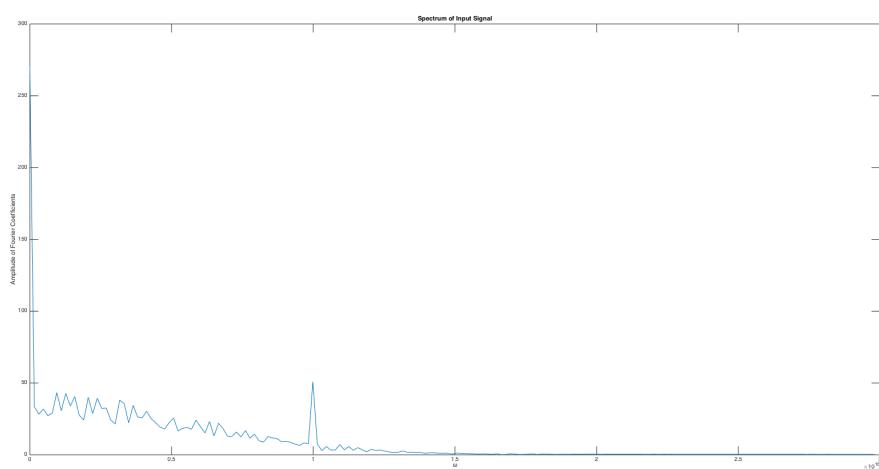
Απόσταση	T_0
40 km	28.98 ps
80 km	40.98 ps

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το βέλτιστο T_0 για το $z=40\text{km}$ και μετά για το $z=80\text{km}$.

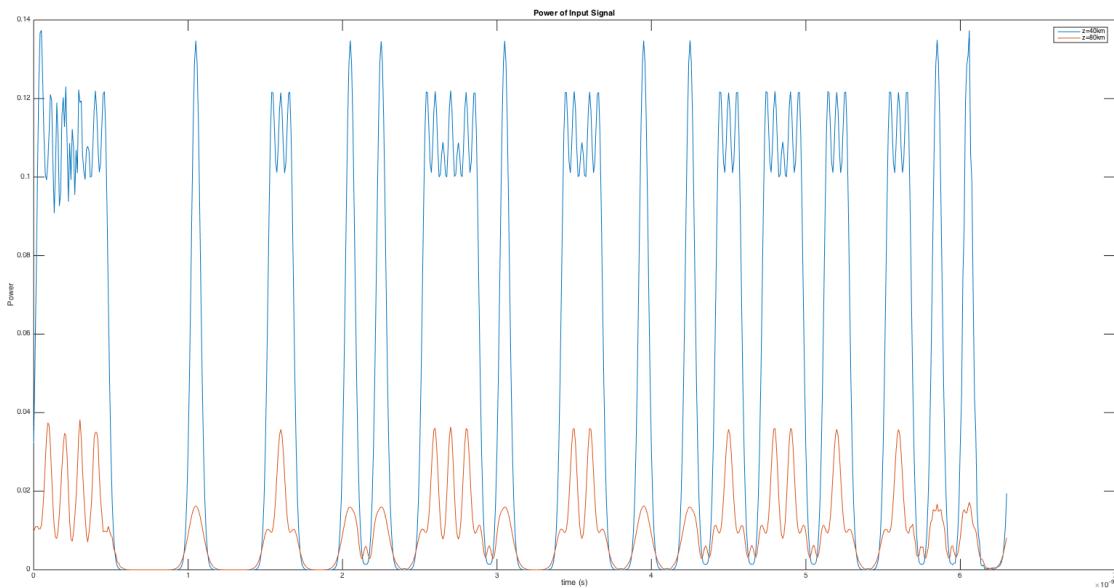
Βέλτιστο T_0 για $z=40\text{km}$



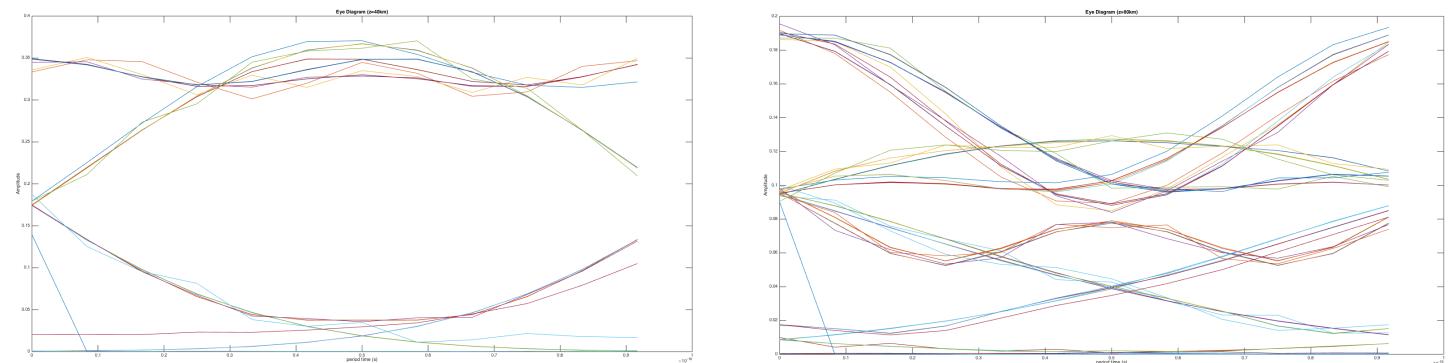
Εικόνα 2.13: Gaussian Παλμοσειρά Εισόδου



Εικόνα 2.14: Φάσμα Gaussian Παλμοσειράς Εισόδου

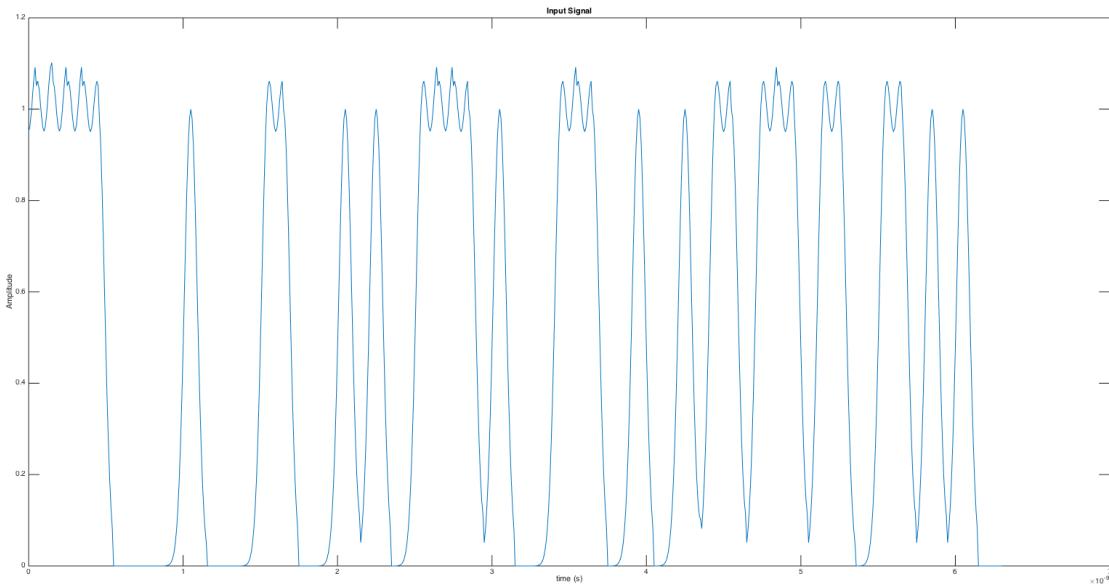


Εικόνα 2.15: Οπτική Ισχύς στις θέσεις $z=40\text{ km}$, $z=80\text{ km}$

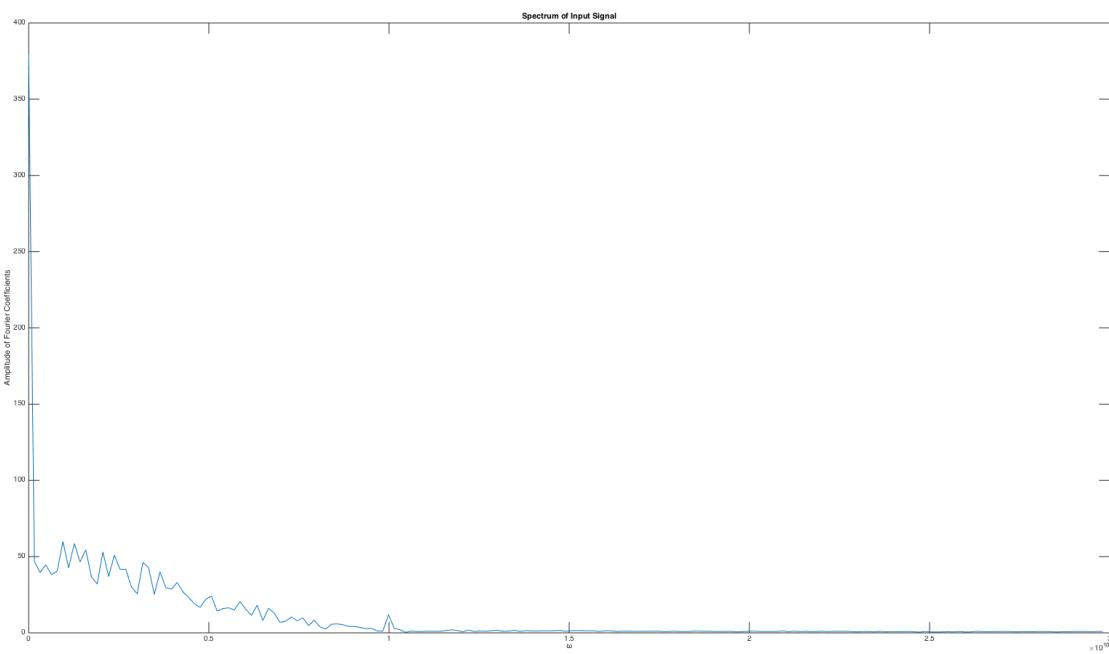


Εικόνα 2.16: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις $z=40\text{ km}$, $z=80\text{ km}$

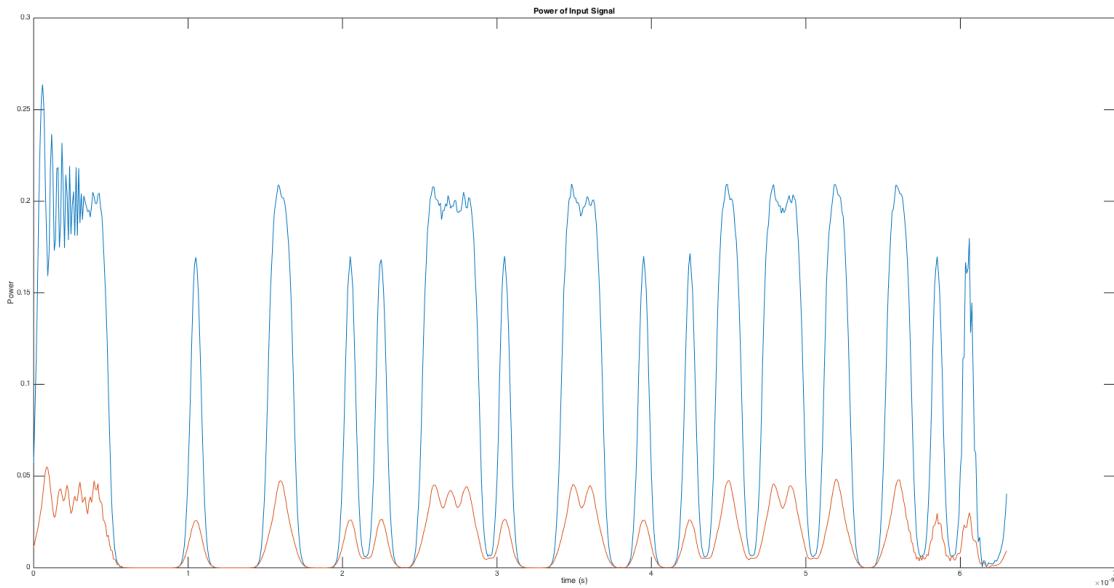
Βέλτιστο T_0 για $z=80km$



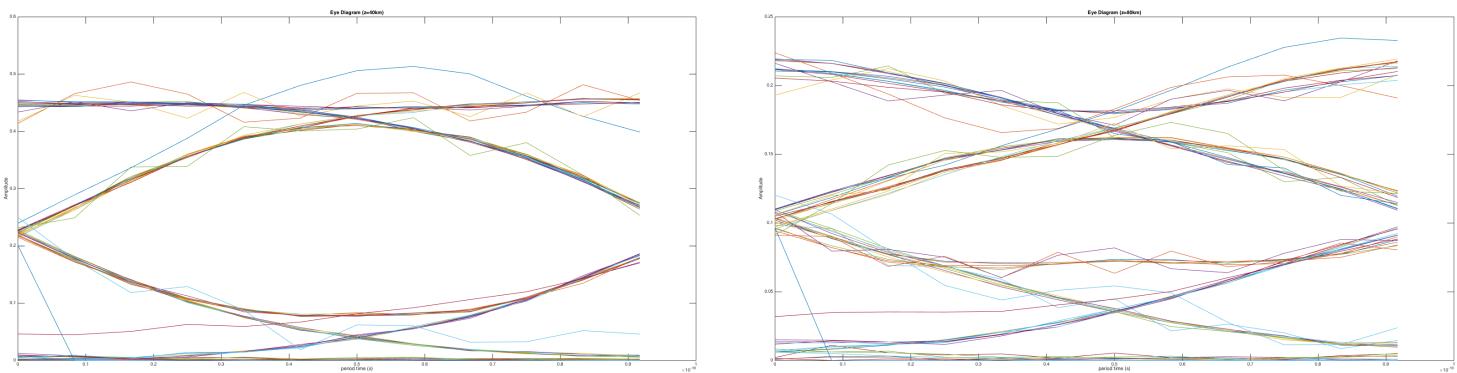
Εικόνα 2.17: Gaussian Παλμοσειρά Εισόδου



Εικόνα 2.18: Φάσμα Gaussian Παλμοσειράς Εισόδου



Εικόνα 2.19: Οπτική Ισχύς στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km



Εικόνα 2.20: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις $z=40$ km, $z=80$ km

Συμπεράσματα

Παρατηρείται εύκολα ότι τα διαγράμματα οφθαλμού βελτιώθηκαν με την χρήση των βέλτιστων T_0 .

Με άλλα λόγια το διάγραμμα οφθαλμού για $z=40$ km με το $T_{0,best}(z=40\text{km})$ είναι πολύ καλύτερο (ορίζονται ξεκάθαρα δυο περιοχές σημάτων, με την μέγιστη δυνατή συγκέντρωση-ελάχιστο εύρος - κατά y - περιοχής) από τα άλλα δυο διαγράμματα οφθαλμού για $z=40$ km με Gaussian παλμούς της αναφοράς.

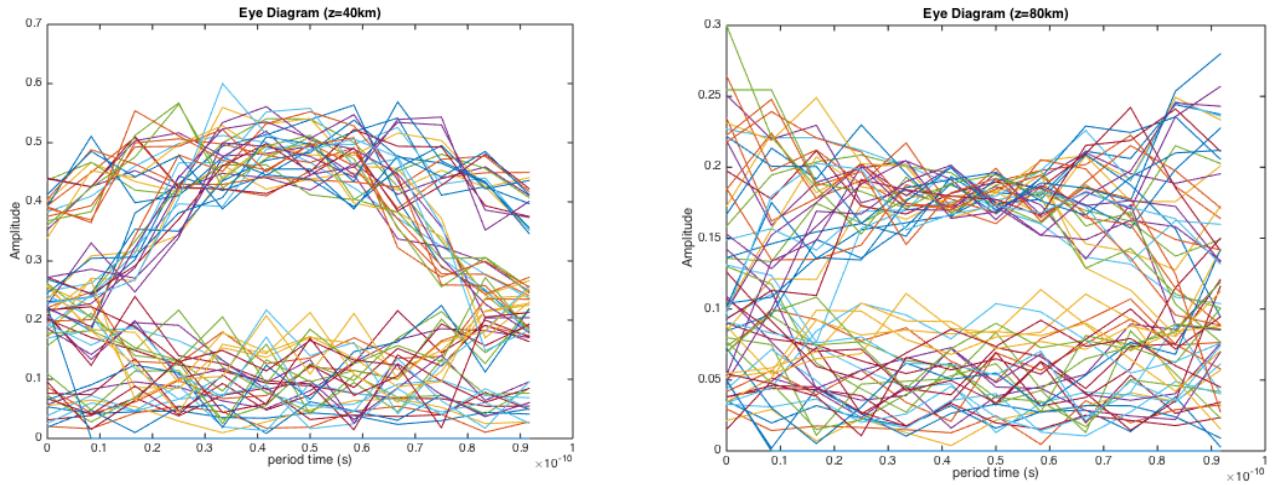
Παρατηρούμε ότι κάτι αντίστοιχο (είναι πλέον ευδιάκριτες οι 2 περιοχές) συμβαίνει και στο διάγραμμα οφθαλμού για $z=80$ km με χρήση του $T_{0,best}(z=80\text{km})$.

Επομένως, υπάρχει αξιόλογη βελτίωση η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι παλμοί της παλμοσειράς εξόδου έχουν πλέον την ελάχιστη δυνατή εξάπλωση στον χρόνο (χρησιμοποιήθηκαν τα T_0 που ελαχιστοποιούν το T_1), αφού αυτό εκφράζει ουσιαστικά (στην πραγματικότητα είναι η στιγμή μείωσης της ισχύος κατά $1/e$, αλλά είναι και μέτρο της διάρκειας του παλμού) η παράμετρος T_1 . Εφόσον η εξάπλωση του παλμού είναι ελάχιστη, περιορίζεται και η επίδρασή του στους

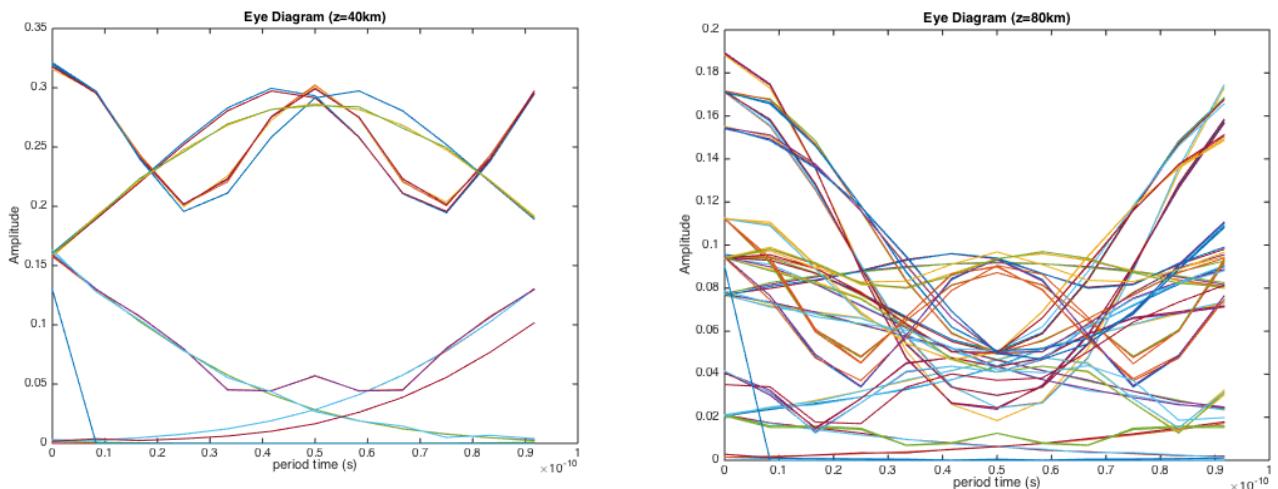
γειτονικούς παλμούς, άρα τελικά προκύπτει ένα καθαρό διαγράμμα οφθαλμού. Περιορίζονται δηλαδή τα φαινόμενα διασποράς.

Ερώτημα (ε)

Θέτοντας $\beta_3=0$ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα οφθαλμού στην περίπτωση παλμοσειράς με ορθογωνικούς παλμούς και Gaussian ($T_0=20$ ps). Είναι ευφανές ότι τα διαγράμματα αυτά δεν διαφέρουν από τα υπολογισμένα θεωρώντας $\beta_3=-1.3 \times 10^{-40}$ s³/m.

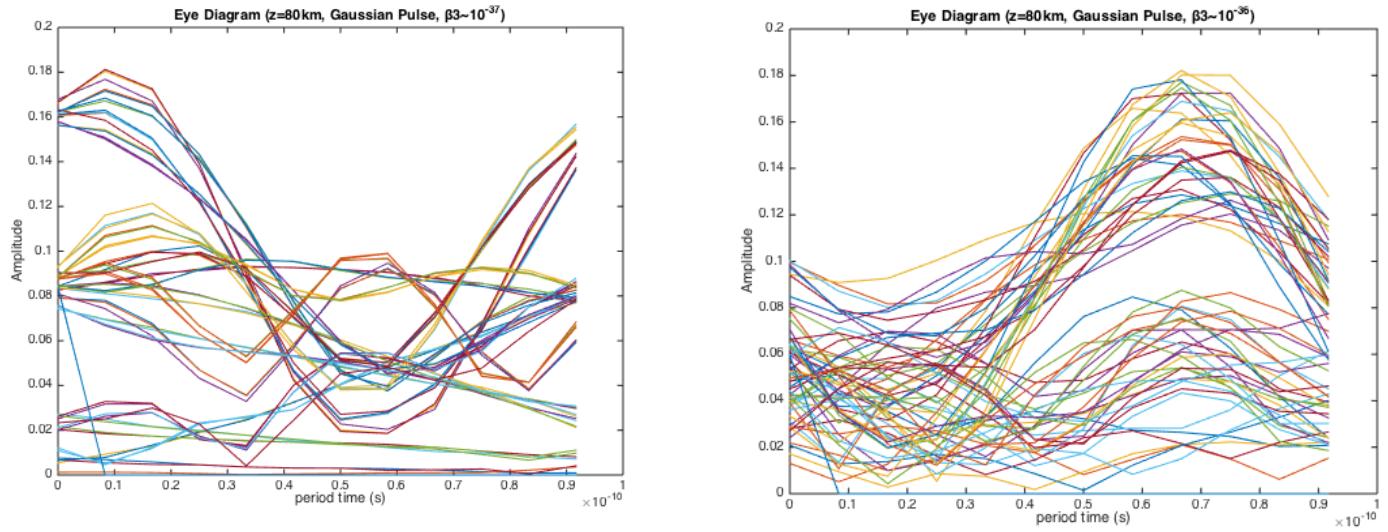


Εικόνα 2.22: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις z=40 km, z=80 km (Ορθογωνικοί Παλμοί)



Εικόνα 2.22: Διαγράμματα Οφθαλμού στις θέσεις z=40 km, z=80 km (Gaussian Παλμοί)

Τέλος, η σημαντική αλλαγή (χειροτέρευση) έγινε όταν το β_3 άλλαξε από τάξη μεγέθους $\sim 10^{-37}$ σε $\sim 10^{-36}$, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.22: Διαγράμματα Οφθαλμού @ $z=80$ km (Gaussian Παλμού) με διαφορετικά β_3