

3^ο ΣΕΤ ΑΣΚΗΣΕΩΝ - PROJECT ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ «ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗ»

Μελέτη διάδοσης παλμών σε ίνες με μη γραμμικότητα και διασπορά

Ονοματεπώνυμο : Γιώργος Χατζηευφραιμίδης – ΑΜ : 3503

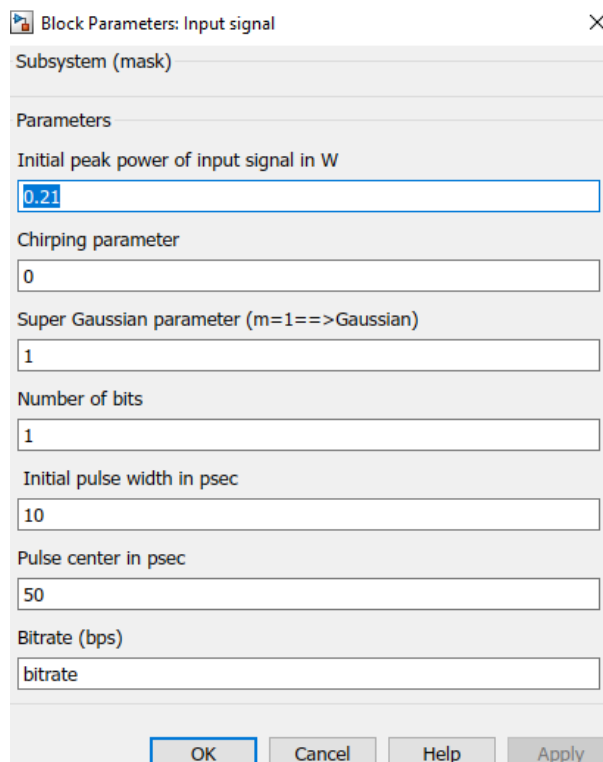
Δεδομένα :

Δt_{FWHM} (χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος psec) = $10 + 2 \cdot (22 \bmod 11) = 10$

P_p (ισχύς κορυφής σε mW) = $200 + 10 \cdot (1 \bmod 11) = 210$

ΑΣΚΗΣΗ Α: ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΙΝΑ ΜΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΜΗΚΟΣ

Αρχικά παραμετροποιείται το block του Gaussian Pulse ώστε να εκπέμπει έναν μόνο transform-limited παλμό Gauss, με χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος και ισχύ κορυφής σύμφωνα με τα δεδομένα του επιθέτου μου.



Block Parameters: Input signal

Subsystem (mask)

Parameters

Initial peak power of input signal in W

0.21

Chirping parameter

0

Super Gaussian parameter (m=1==>Gaussian)

1

Number of bits

1

Initial pulse width in psec

10

Pulse center in psec

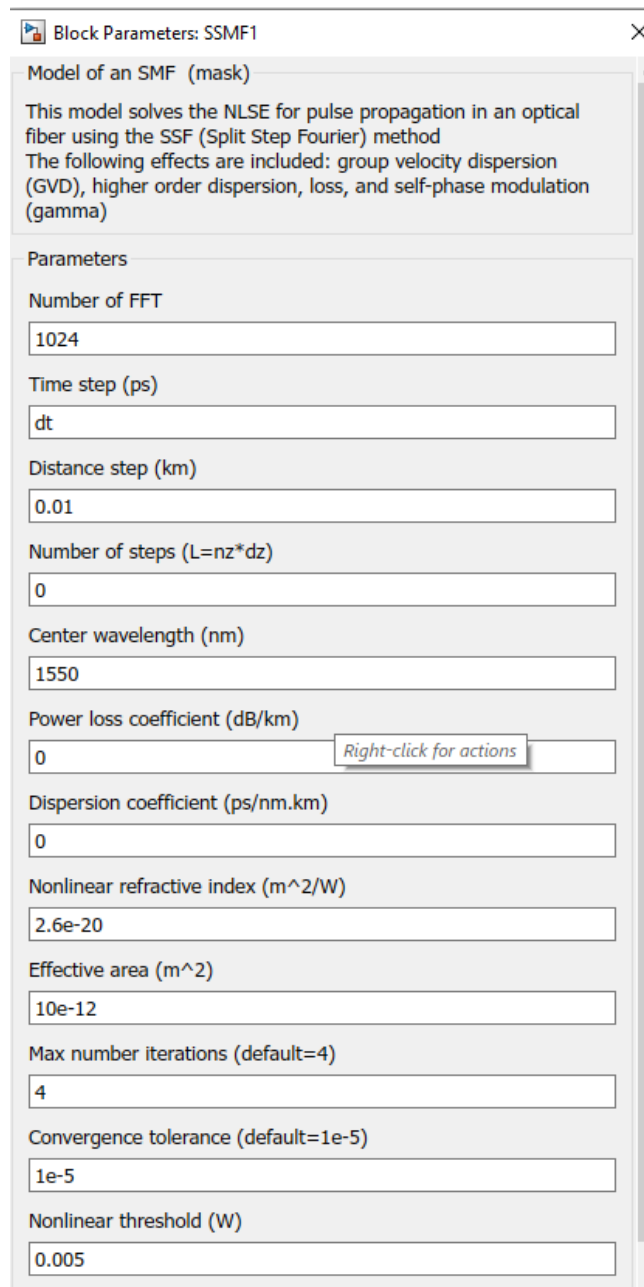
50

Bitrate (bps)

bitrate

OK Cancel Help Apply

Εισάγονται οι ακόλουθοι παράμετροι στην 1^η και 2^η ίνα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μήκος και των δύο ινών είναι ίσο με μηδέν (number of steps = 0)



Block Parameters: SSMF1

Model of an SMF (mask)

This model solves the NLSE for pulse propagation in an optical fiber using the SSF (Split Step Fourier) method
The following effects are included: group velocity dispersion (GVD), higher order dispersion, loss, and self-phase modulation (gamma)

Parameters

Number of FFT
1024

Time step (ps)
dt

Distance step (km)
0.01

Number of steps ($L=nz*dz$)
0

Center wavelength (nm)
1550

Power loss coefficient (dB/km)
0 *Right-click for actions*

Dispersion coefficient (ps/nm.km)
0

Nonlinear refractive index (m^2/W)
2.6e-20

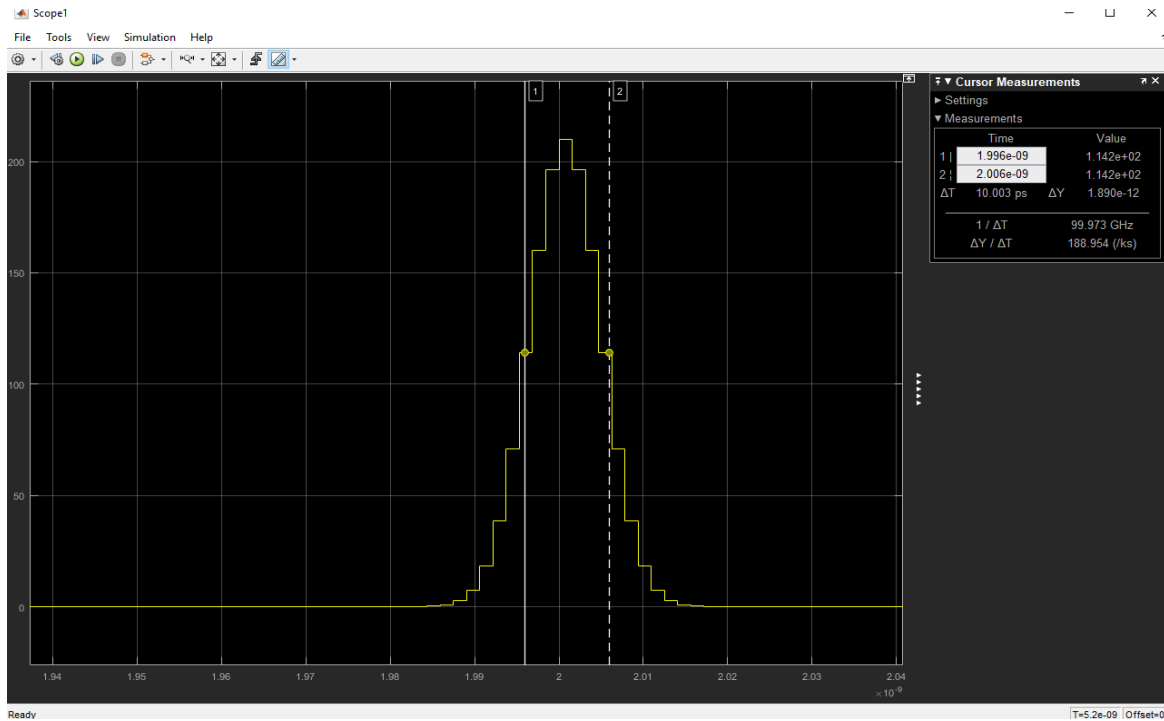
Effective area (m^2)
10e-12

Max number iterations (default=4)
4

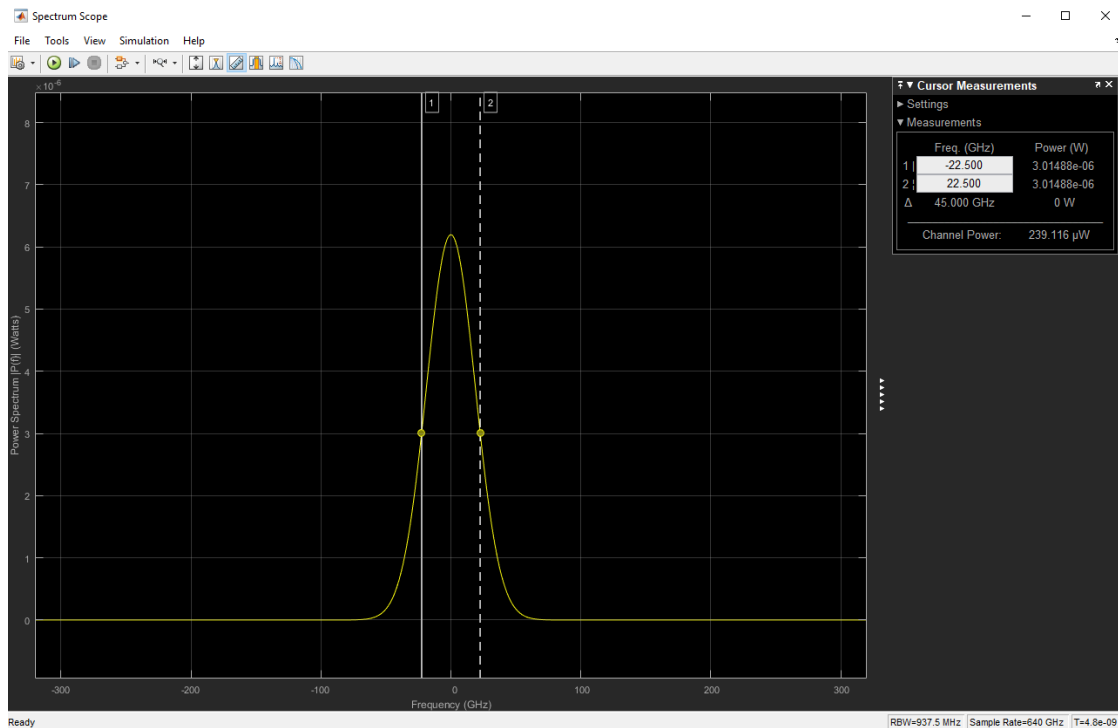
Convergence tolerance (default=1e-5)
1e-5

Nonlinear threshold (W)
0.005

Αφού το $P_p = 0.21 \text{ W}$ το T_{FWHM} προκύπτει για ισχύ $P_p/2 = 0.105 \text{ W}$. Όπως φαίνεται στην έξοδο του παλμογράφου, το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού όπως εξέρχεται από την πηγή είναι περίπου ίσο με $\Delta t_{FWHM} = 10.00 \text{ ps}$.



Το αντίστοιχο φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού για μήκος διάδοσης μηδέν προκύπτει από τον φασματικό αναλυτή. Σύμφωνα με το γράφημα, η ισχύς κορυφής παλμού είναι $P_p = 6.19 \mu\text{W}$ άρα $P_p/2 = 3.09 \mu\text{W}$. Επομένως το φασματικό εύρος είναι περίπου $\Delta f_{FWHM} = 45.00 \text{ GHz}$

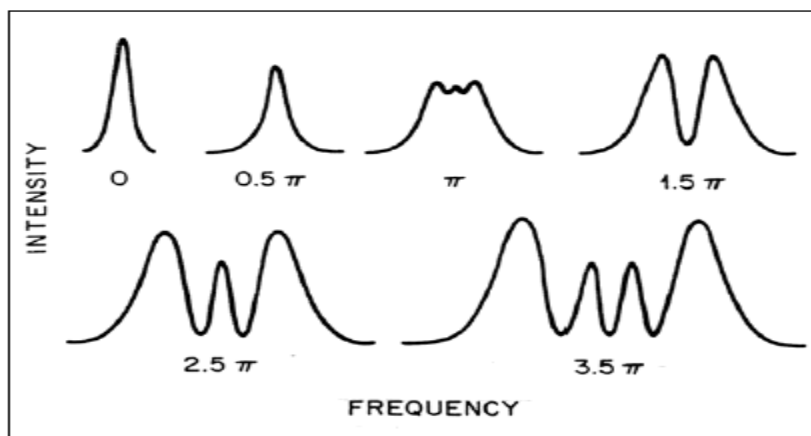


Στη συνέχεια το μήκος της ίνας SSMF1 ορίζεται ίσο με 500 m (δλδ $nz = 50$) και τρέχω το σύστημα ζεύξης διαδοχικά για τις εξής διαφορετικές τιμές ισχύος κορυφής P_p του παλμού Gauss [1, 10, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000] σε mW.

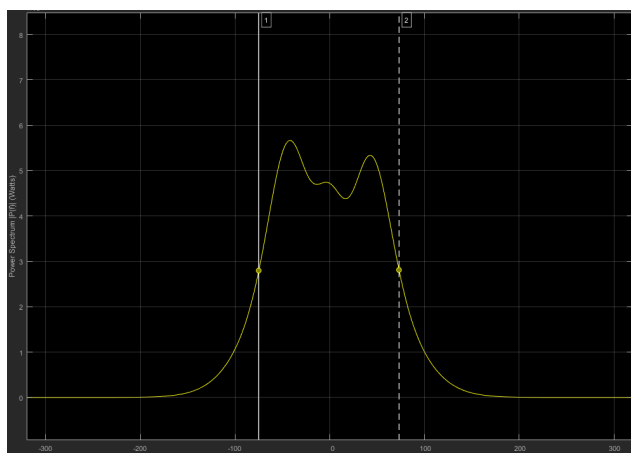
Επειδή η ίνα έχει μηδενική διασπορά, επιδρά μόνο το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης, το οποίο αυξάνει το φάσμα του παλμού εξαιτίας της μη γραμμικής φάσης που εισάγεται, ενώ το χρονικό εύρος του παλμού δεν μεταβάλλεται.

Επίσης σύμφωνα με την θεωρία, ο παλμός είναι transform limited όταν $\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm} \leq 0.44$, όπου τότε η παράμετρος chirp $C = 0$. Σε αντίθετη περίπτωση δηλαδή $\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm} > 0.44$, τότε υπολογίζεται το chirp από την σχέση $\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm} = 0.44 \sqrt{1 + C^2}$

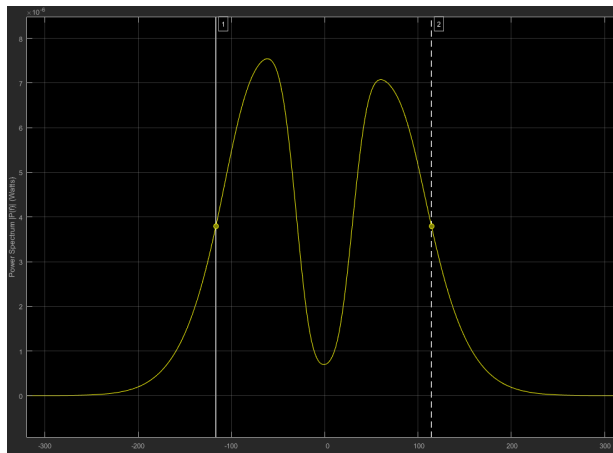
Θεωρώντας ως αναφορά τα φασματικά σχήματα με τις επαγόμενες στροφές φάσης που φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα



Κατ' εκτίμηση οι τιμές ισχύος όπου η μη γραμμική στροφή φάσης ϕ_{NL} που αποκτά ο παλμός είναι κοντά στο π και στο 1.5π προκύπτουν ότι είναι $P_p = 600$ mW και $P_p = 1000$ mW αντίστοιχα, όπως φαίνεται από τις ακόλουθες εικόνες :



$$\phi_{NL} = \pi$$



$$\phi_{NL} = 1.5\pi$$

Από την σχέση $\Delta\phi_{NL} = \gamma \cdot P_p \cdot z$, όπου $P_p = 0.6 \text{ W}$, $\Delta\phi_{NL} = \pi$ και $z = 0.5 \text{ Km}$, υπολογίζεται ο συντελεστής γ (παράγοντας μη γραμμικότητας), όπου προκύπτει $\gamma = 10.466 \text{ W}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$. Οπότε για δεδομένο γ υπολογίζονται οι διαφορετικές τιμές για την μη γραμμική στροφή φάσης λόγω διαφοροποίησης της ισχύος κορυφής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της ίνας, ο παράγοντας μη γραμμικότητας γ υπολογίζεται από την σχέση :

$$\gamma = \frac{n_2 \omega}{c A_{eff}} = \frac{n_2 \cdot 2\pi \cdot c_0}{c_0 \cdot A_{eff} \cdot \lambda} = \frac{2,6 \cdot 10^{-20} \cdot 2 \cdot 3,14}{10 \cdot 10^{-12} \cdot 1550 \cdot 10^{-9}} = 10,53 / \text{Km} \cdot \text{W}$$

Η τιμή είναι πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε από τον κατ' εκτίμηση υπολογισμό της μη γραμμικής στροφής φάσης ϕ_{NL} από τα σχετικά διαγράμματα.

Το μήκος που “αρχίζει” να γίνεται κυρίαρχη η μη γραμμικότητα της ίνας υπολογίζεται από τον τύπο $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_p}$

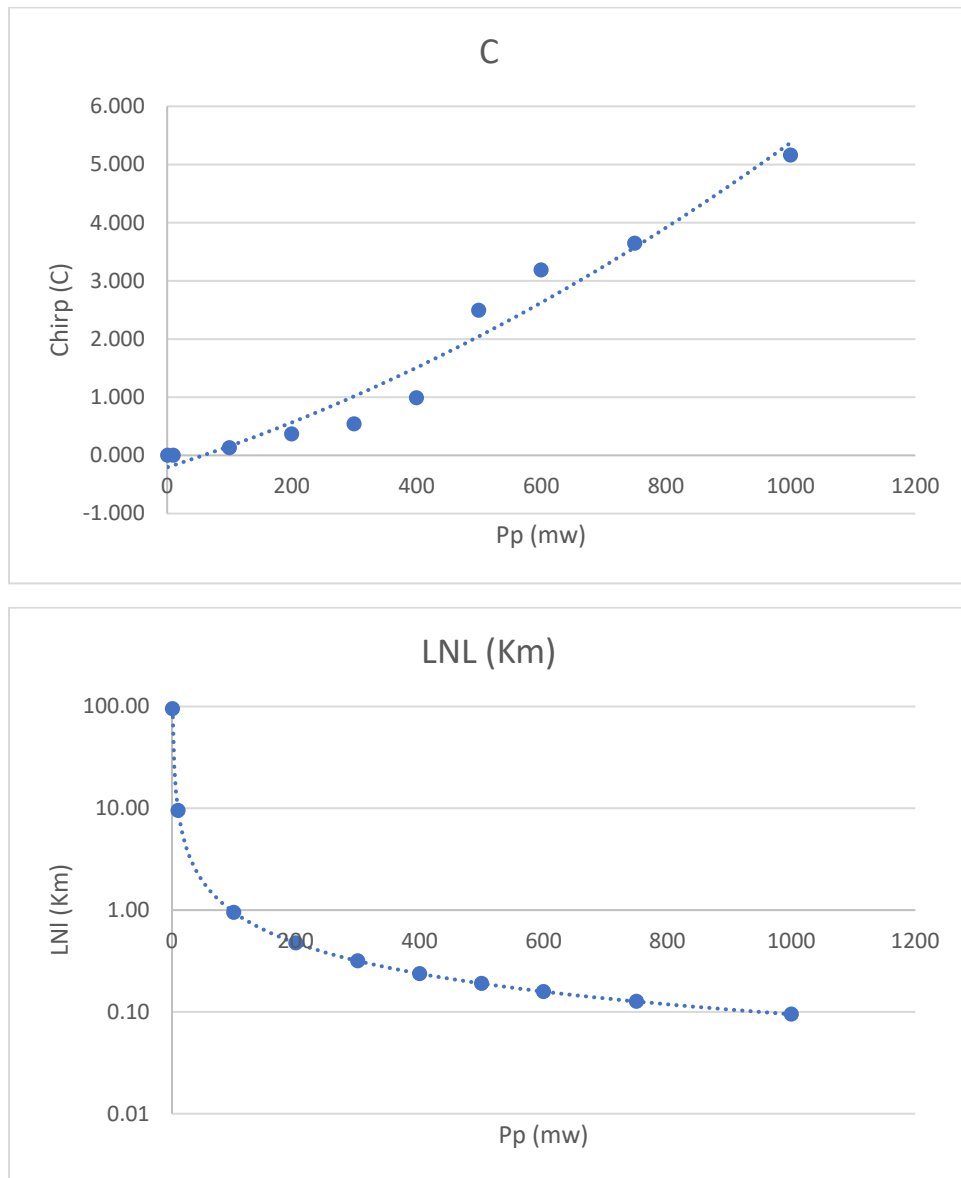
Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές του πίνακα :

P_p (mW)	Δt_{fwhm} (psec)	Δf_{fwhm} (GHz)	P_{pOut} (mW)	$\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm}$	C	Transform- limited (ναι ή όχι)	$\Delta\phi_{NL}$ (rad)	L_{NL} (km)
1	10	43.75	1	0.438	0	ναι	0.01	94.97
10	10	43.75	10	0.438	0	ναι	0.05	9.50
100	10	44.37	100	0.444	0.130	όχι	0.52	0.95
200	10	46.87	200	0.469	0.367	όχι	1.05	0.47
300	10	50.00	300	0.500	0.540	όχι	1.57	0.32
400	10	61.87	400	0.619	0.989	όχι	2.09	0.24
500	10	118.12	500	1.181	2.491	όχι	2.62	0.19
600	10	146.87	600	1.469	3.185	όχι	3.14	0.16
750	10	166.25	750	1.663	3.644	όχι	3.92	0.13
1000	10	231.25	1000	2.313	5.160	όχι	5.23	0.09

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $z = 0.5 \text{ Km}$ είναι μικρότερο από το L_{NL} για τιμές ισχύος κορυφής μέχρι 100 mW , προκύπτει ότι μέχρι αυτή την τιμή της ισχύος η μετάδοση είναι εφικτή χωρίς να περιορίζεται από τα μη-γραμμικά φαινόμενα.

Επειδή τέλος η αυτοδιαμόρφωση φάσης δρα μόνη της (χωρίς διασπορά) επηρεάζει μόνο το φάσμα, όπως φάνηκε από τα παραπάνω, και επομένως δεν υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος.

Οι γραφικές παραστάσεις του παράγοντα chirp C καθώς και του χαρακτηριστικού μήκους μη γραμμικότητας L_{NL} ως προς την ισχύ κορυφής του παλμού εισόδου φαίνονται ακολούθως:



ΑΣΚΗΣΗ Β: ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΙΝΑ ΜΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΙΣΧΥ ΚΟΡΥΦΗΣ

Ως ισχύ κορυφής του παλμού στην είσοδο εισάγεται η τιμή $P_p = 210$ mW και διατηρείται σταθερή.

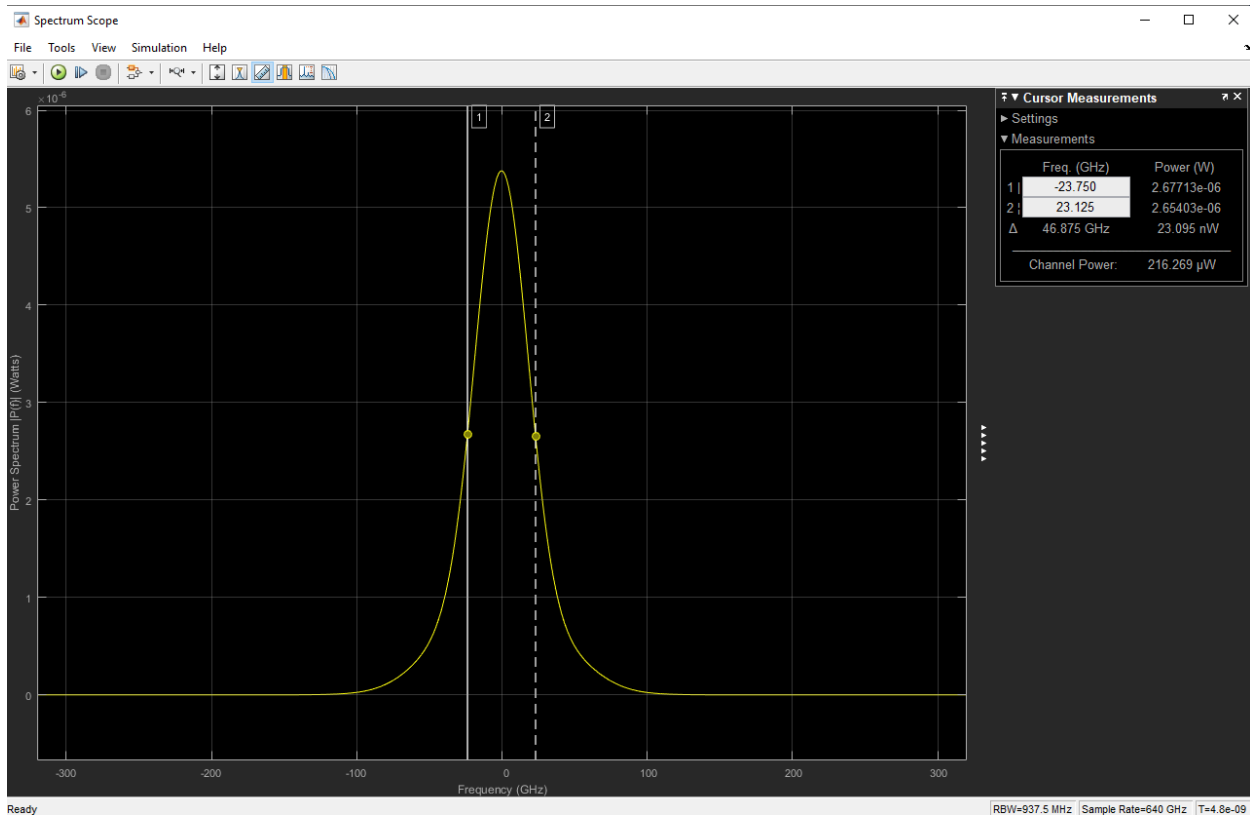
Κατ' εκτίμηση το μήκος της ίνας όπου η μη γραμμική στροφή φάσης ϕ_{NL} που αποκτά ο παλμός είναι κοντά στο 2.5π είναι $L = 3.5$ Km για $P_p = 0.210$ W. Οπότε από την σχέση $\Delta\phi_{NL} = \gamma \cdot P_p \cdot z$, υπολογίζεται ο συντελεστής γ (παράγοντας μη γραμμικότητας), όπου προκύπτει $\gamma = 10.68$ W⁻¹·Km⁻¹. Οπότε για δεδομένο γ υπολογίζονται οι διαφορετικές τιμές για την μη γραμμική στροφή φάσης λόγω διαφοροποίησης του μήκους της ίνας.

Το μήκος που “αρχίζει” να γίνεται κυρίαρχη η μη γραμμικότητα της ίνας υπολογίζεται από τον τύπο $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_p}$ και προκύπτει ίσο με $L_{NL} = 0.446$ Km. Εφόσον η ισχύς κορυφής παραμένει σταθερή και ο παράγοντας μη γραμμικότητας είναι επίσης σταθερός, το μήκος της ίνας πάνω από το οποίο αρχίζουν και εμφανίζονται μη γραμμικά φαινόμενα είναι σταθερό.

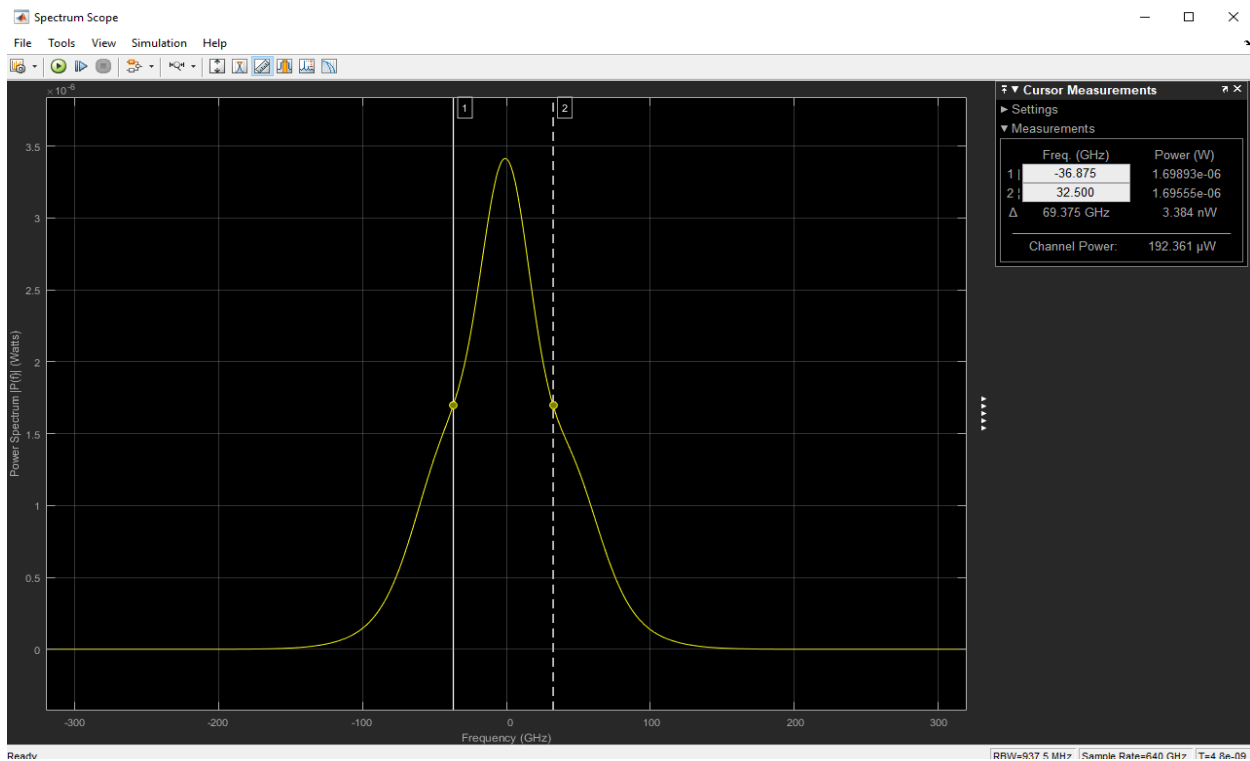
Στο παρακάτω πίνακα έχουν συγκεντρωθεί τα σχετικά αποτελέσματα :

LSSMF1 (km)	nz (Km)	Δt_{fwhm} (psec)	Δf_{fwhm} (GHz)	P_{pout} (mW)	$\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm}$	C	Transform-limited (ναι ή όχι)	$\Delta\phi_{NL}$ (rad)	L_{NL} (km)
0.5	50	10	46.87	210	0.469	0.367	όχι	1,12	0.446
1	100	10	69.37	210	0.694	1.219	όχι	2,24	0.446
1.5	150	10	145.62	210	1.456	3.155	όχι	3,36	0.446
2	200	10	185.62	210	1.856	4.098	όχι	4,49	0.446
2.5	250	10	245.00	210	2.450	5.478	όχι	5,61	0.446
3	300	10	288.12	210	2.881	6.471	όχι	6,73	0.446
3.5	350	10	339.37	210	3.394	7.648	όχι	7,85	0.446
4	400	10	390.00	210	3.900	8.807	όχι	8,97	0.446

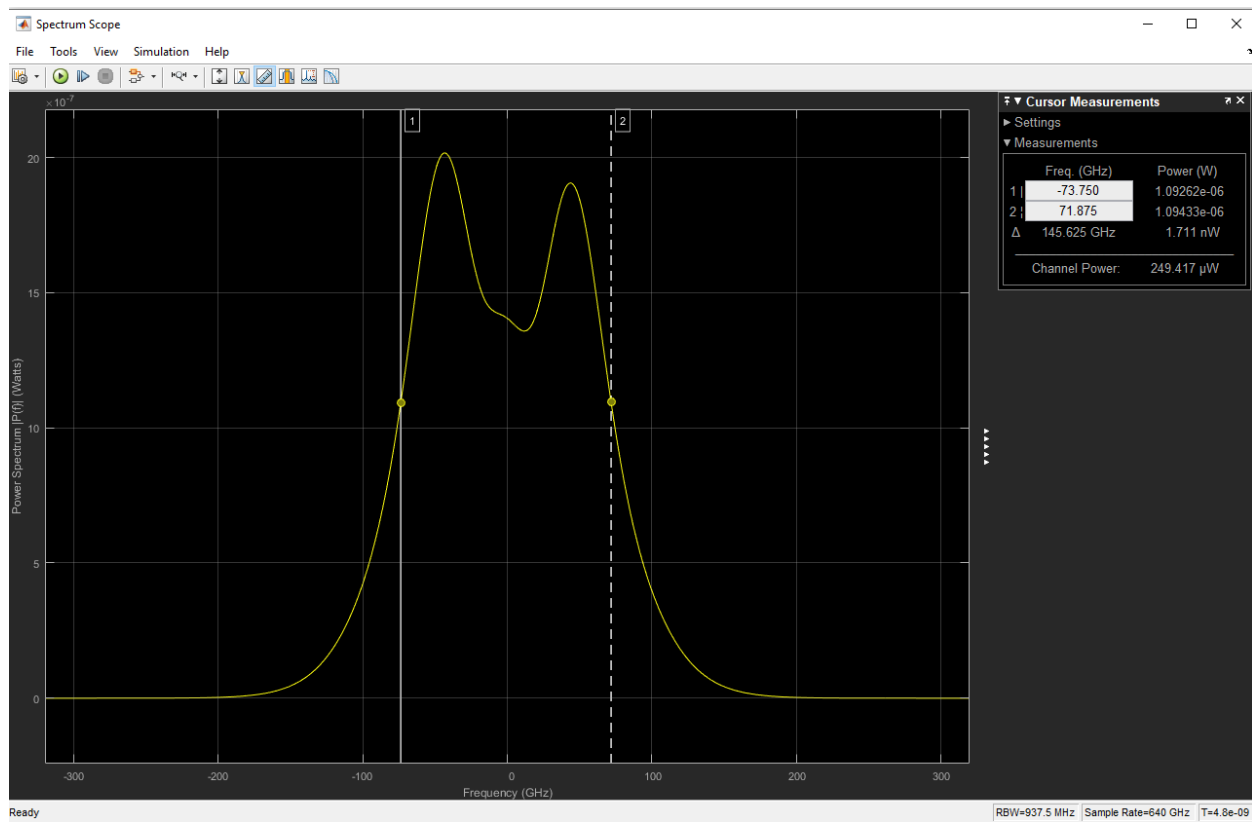
Παρακάτω φαίνονται τα σχετικά φάσματα όπου υπάρχει μεταβολή του φασματικού εύρους ημίσειας ισχύος του παλμού για τα διαφορετικά μήκη της ίνας. Επισημαίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση επειδή έχουμε μόνο αυτοδιαμόρφωση φάσης (χωρίς διασπορά) επηρεάζεται μόνο το φάσμα του παλμού ενώ χρονικά παραμένει αναλλοίωτο.



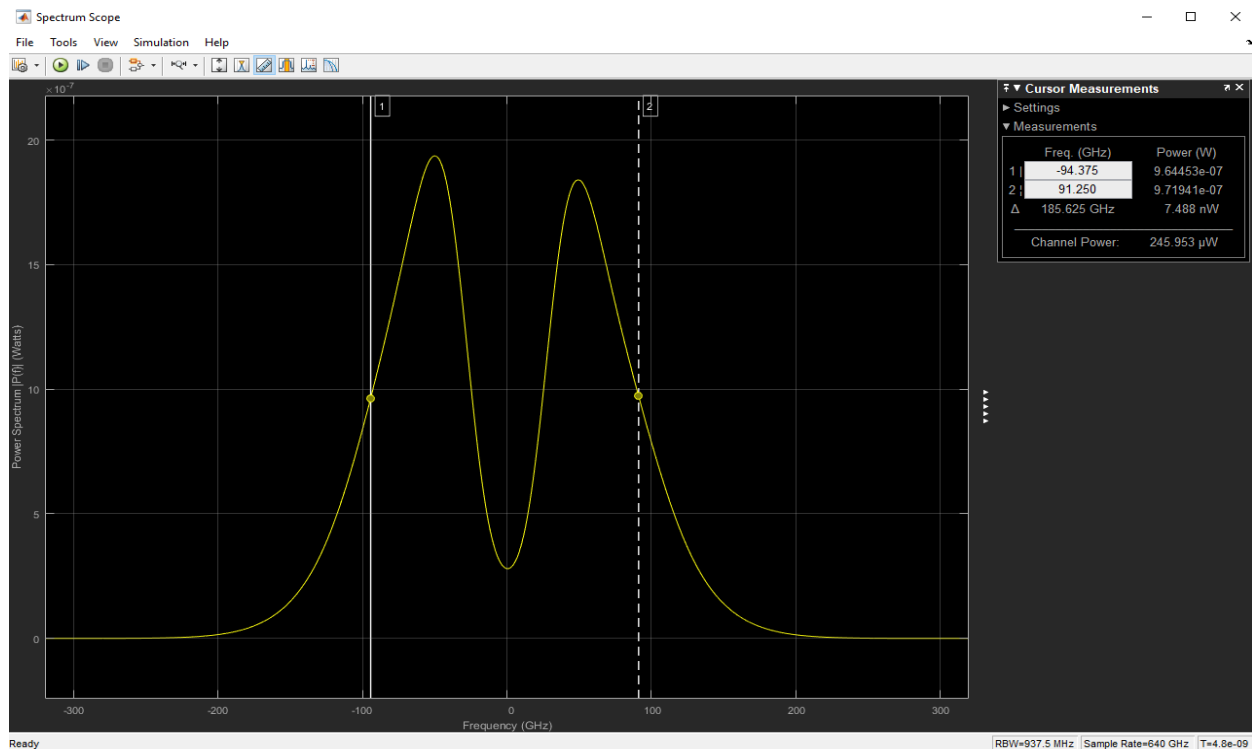
Length = 0.5 Km



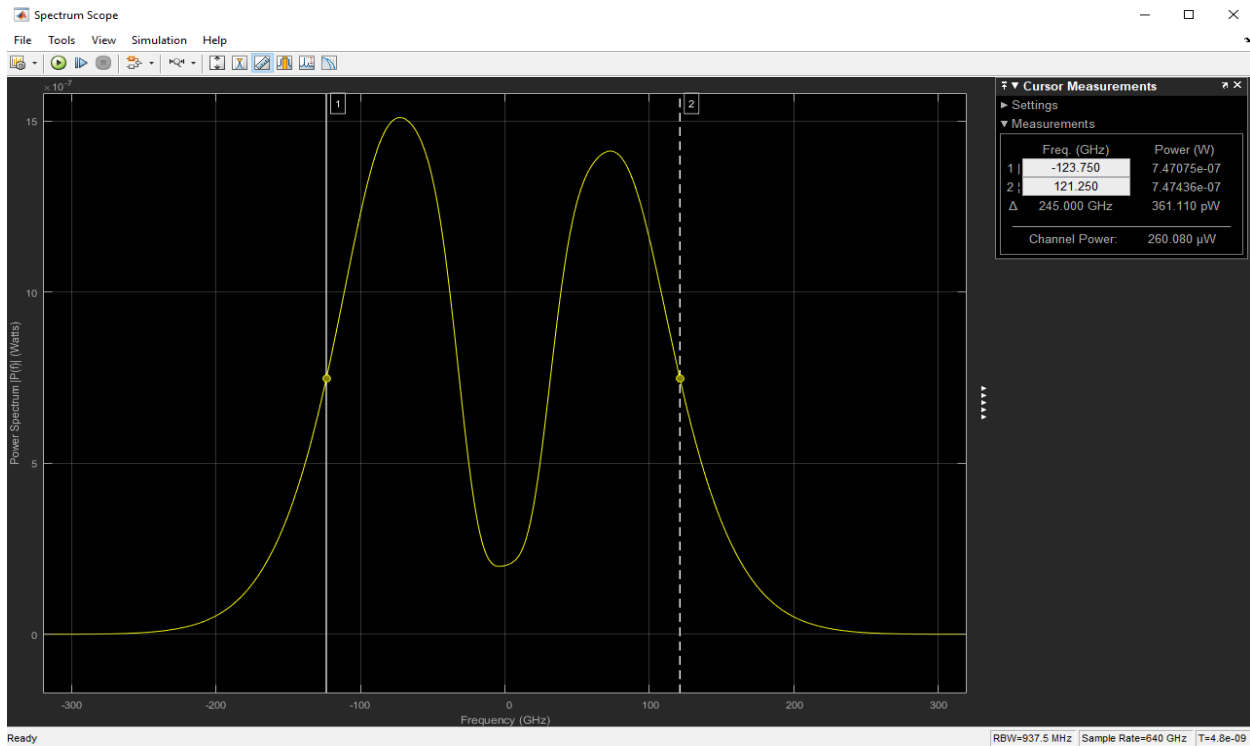
Length = 1.0 Km



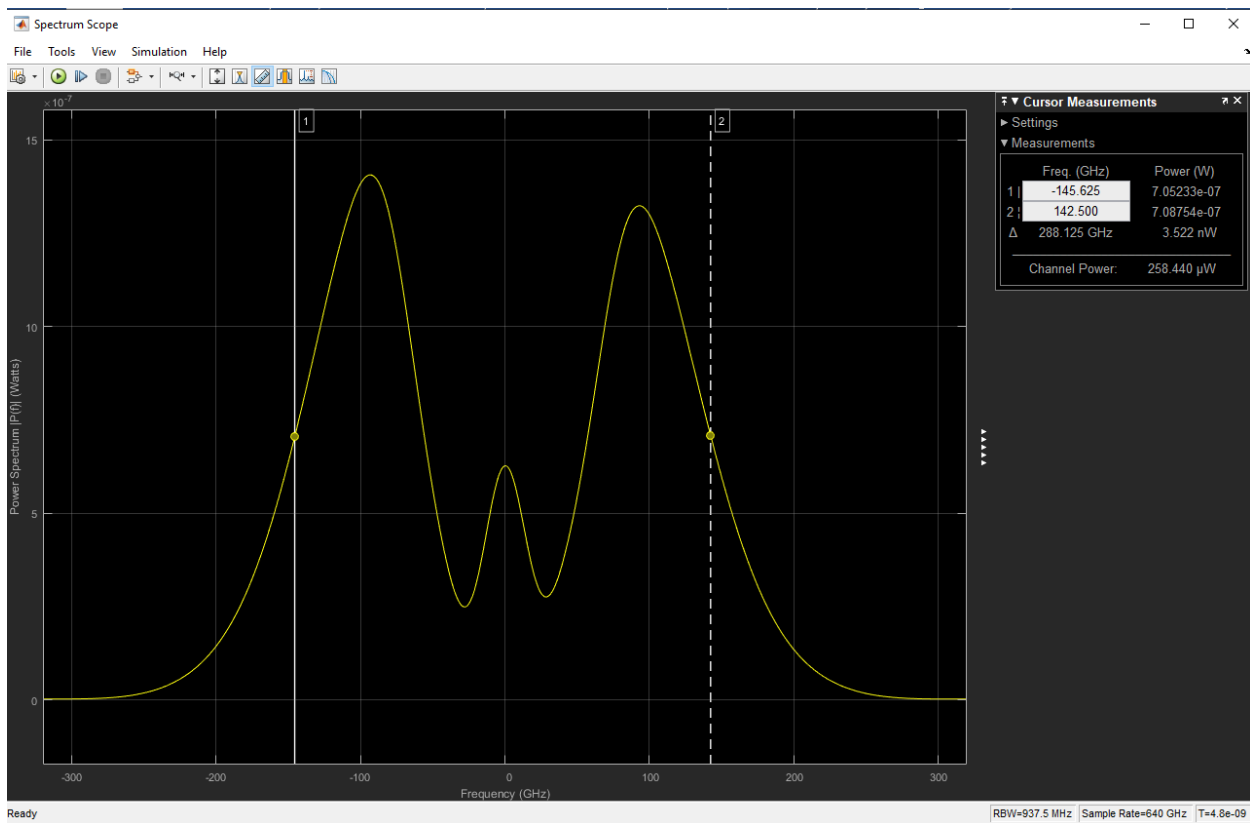
Length = 1.5 Km



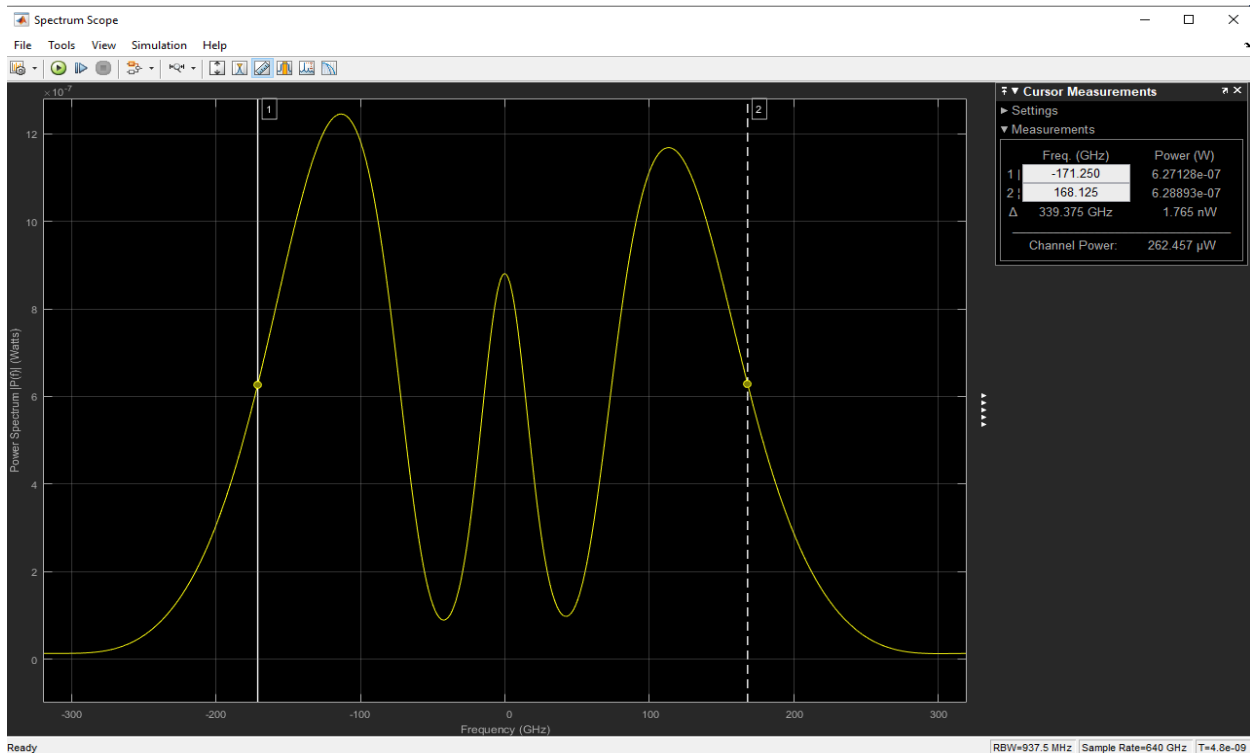
Length = 2.0 Km



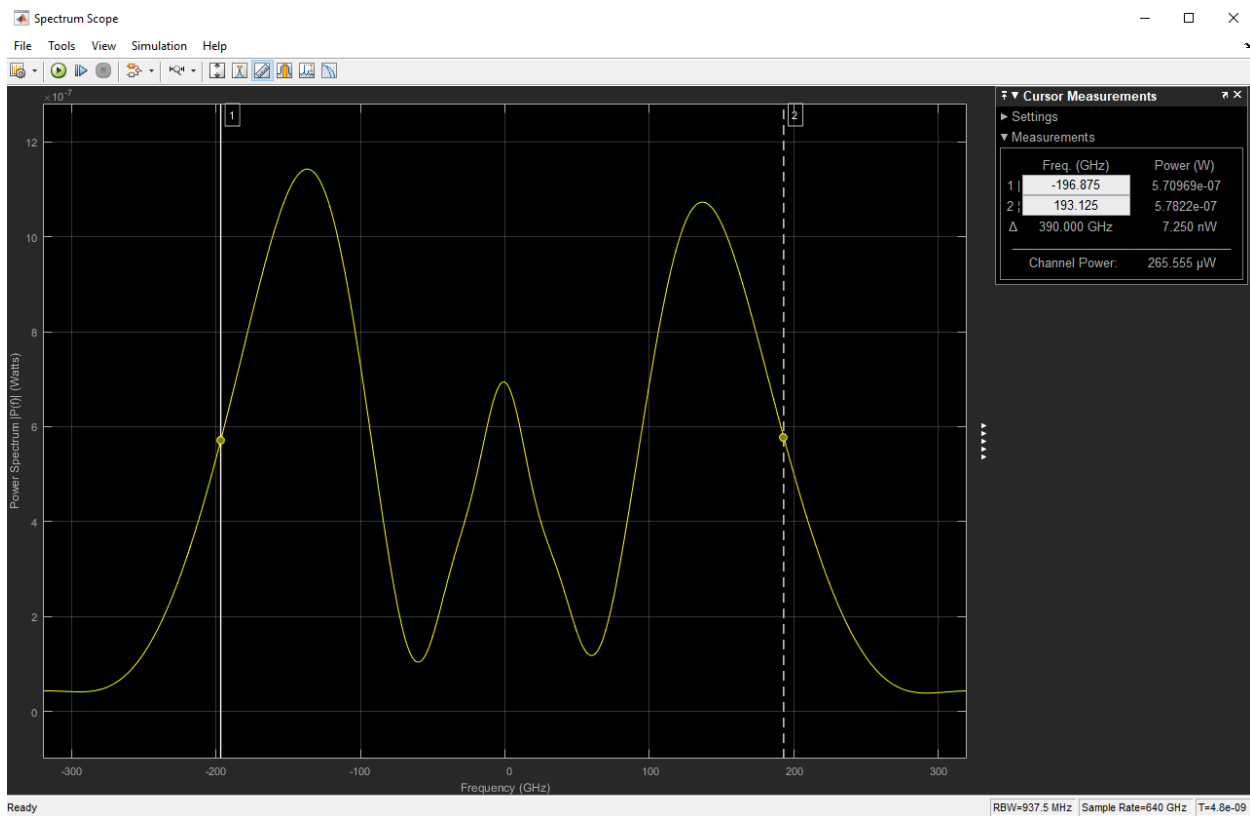
Length = 2.5 Km



Length = 3.0 Km

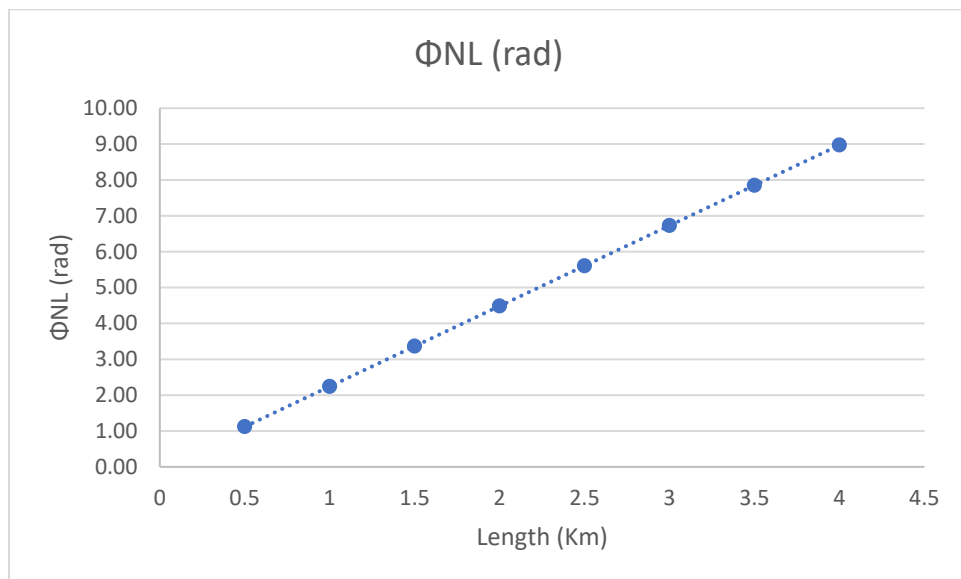
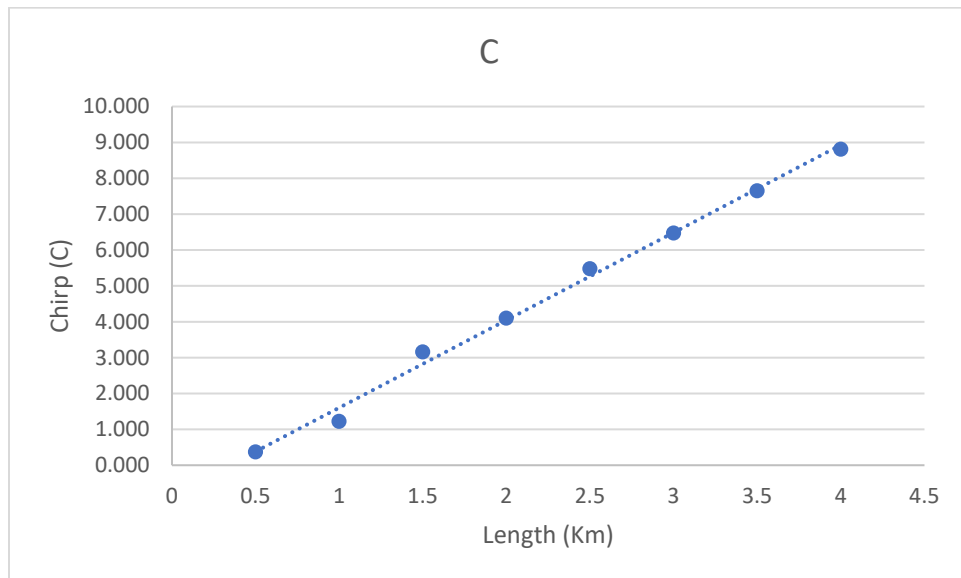


Length = 3.5 Km



Length = 4 Km

Οι γραφικές παραστάσεις του παράγοντα chirp C καθώς και της μη γραμμικής στροφής φάσης $\Delta\phi_{NL}$ ως προς το μήκος διάδοσης του παλμού φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα:



ΑΣΚΗΣΗ Γ: ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ 2 ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ

ι. Χρησιμοποιούμε την SSMF1 ίνα με μήκος ίνας ίσο με 1.5 km και τα ίδια χαρακτηριστικά. Ως είσοδο στην SSMF1 ίνα βάζω παλμό Gauss με χρονικό εύρος ίσο με $\Delta t_{FWHM} = 10$ ps και ισχύ κορυφής ίση με $P_p = 0.21$ w. Σύμφωνα με τον πίνακα της άσκησης Γ προκύπτει :

LSSMF1 (km)	nz (Km)	Δt_{fwhm} (psec)	Δf_{fwhm} (GHz)	P_{pout} (mW)	$\Delta t_{fwhm} * \Delta f_{fwhm}$	C	Transform-limited (ναι ή όχι)	$\Delta\Phi_{NL}$ (rad)	L_{NL} (km)
1.5	150	10	145.62	210	1.456	3.155	όχι	3,36	0.446

Από την σχέση $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2$ υπολογίζεται η παράμετρος διασποράς ταχύτητας ομάδας β_2 :

$$\beta_2 = -\frac{17 \cdot 1550^2}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8} = -21.67 \frac{(ps)^2}{Km}$$

Επίσης από την σχέση $T_o = \frac{\Delta t_{fwhm}}{2\sqrt{\ln 2}}$ υπολογίζεται ότι το χρονικό εύρος του παλμού στο 1/e της μέγιστης ισχύος είναι $T_o = 7.21$ ps

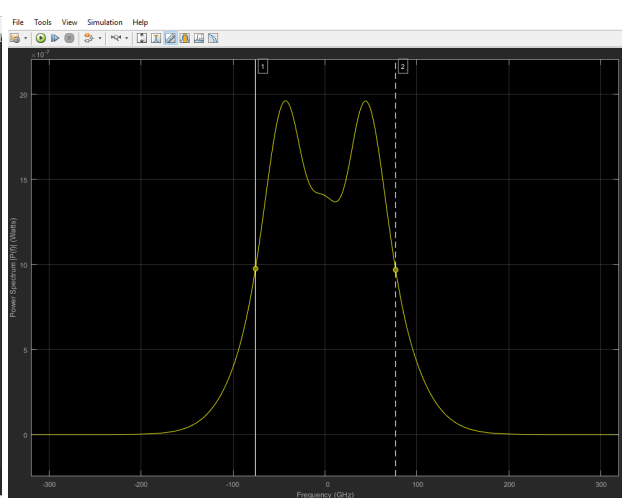
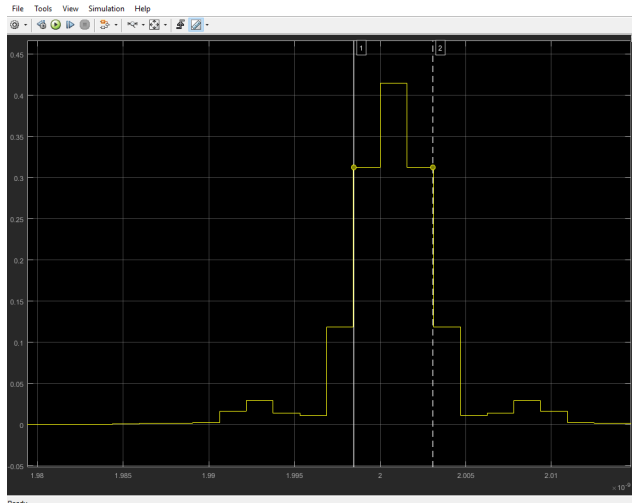
Το χαρακτηριστικό μήκος διασποράς προκύπτει από την σχέση :

$$L_D = \frac{T_o^2}{|\beta_2|} = \frac{7.21^2}{21.67} = 2.4 Km$$

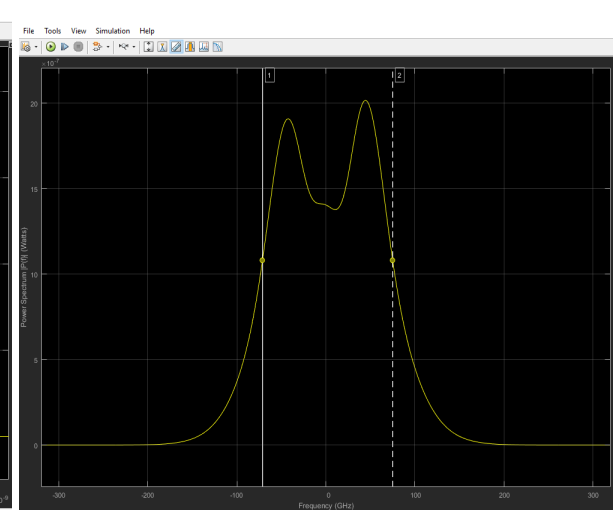
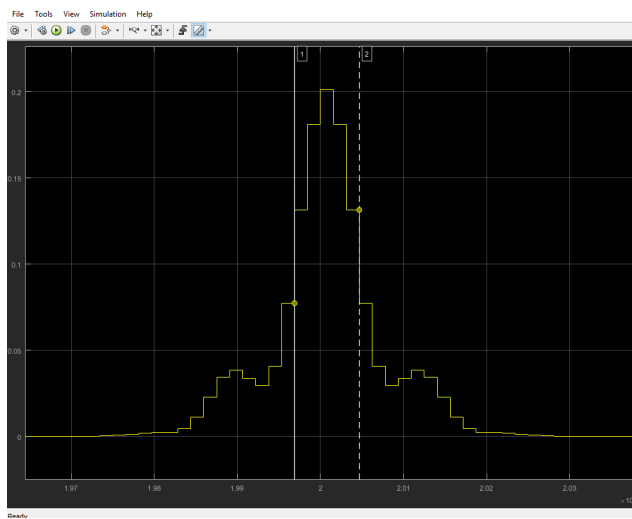
Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

LSSMF (km)	nz (Km)	Δt_{fwhm} (psec) στην είσοδο της SSMF	Δf_{fwhm} (GHz) στην είσοδο της SSMF	P_p (mW) στην είσοδο της SSMF	Δt_{fwhm} (psec) στην έξοδο της SSMF	Δf_{fwhm} (GHz) στην έξοδο της SSMF	P_p (mW) στην έξοδο της SSMF	$\Delta t_{fwhm} * \Delta f_{fwhm}$ στην έξοδο της SSMF	C στην έξοδο της SSMF
0.25Ld = 0.6	60	10	145.62	210	4.65	152.50	414	0.709	1.264
0.5Ld = 1.2	120	10	145.62	210	7.78	146.25	200	1.138	2.385
0.75Ld = 1.8	180	10	145.62	210	13.96	148.75	115	2.077	4.612
Ld = 2.4	240	10	145.62	210	17.39	148.12	75	2.576	5.768
1.25Ld = 3	300	10	145.62	210	49.26	146.25	54	7.204	16.343
1.5Ld = 3.6	360	10	145.62	210	63.13	143.75	41	9.075	20.601
2Ld = 4.8	480	10	145.62	210	87.27	140.62	27	12.272	27.873
2.5Ld = 6	600	10	145.62	210	114.84	134.37	20	15.431	35.056
3Ld = 7.2	720	10	145.62	210	143.85	131.25	15	18.880	42.898

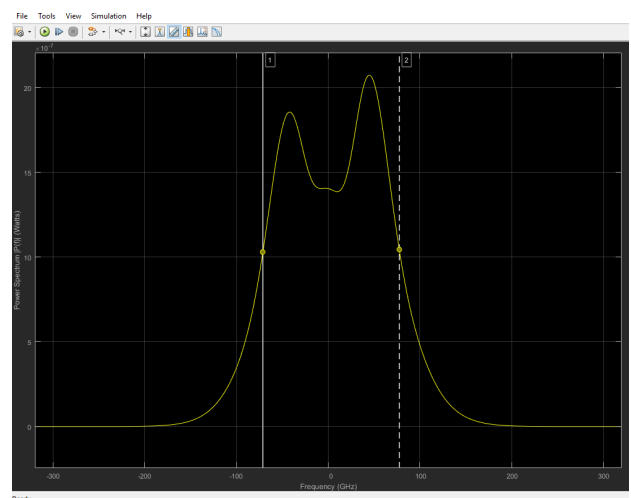
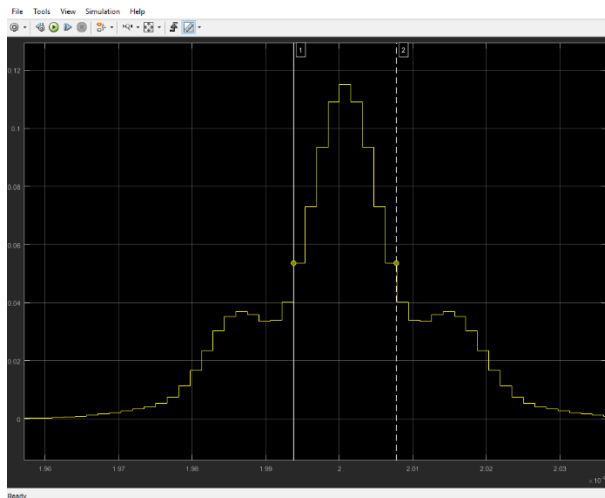
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα γραφήματα χρόνου και φάσματος για τα διαφορετικά μήκη της 2^{ης} ίνας



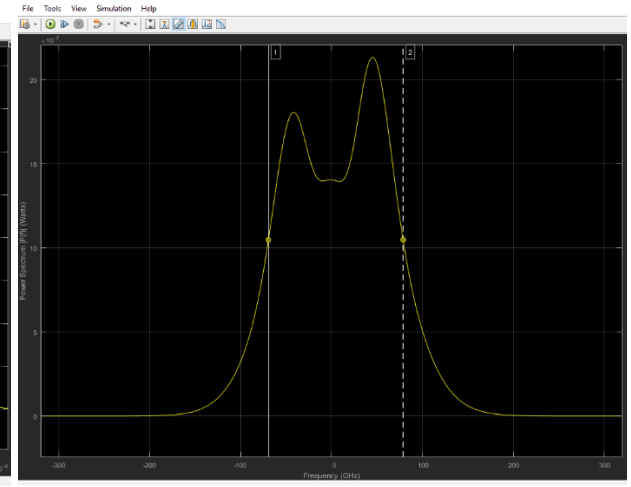
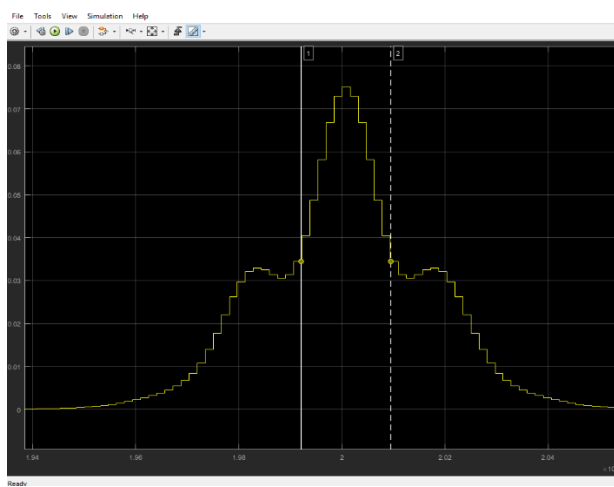
Length = 0.6 Km



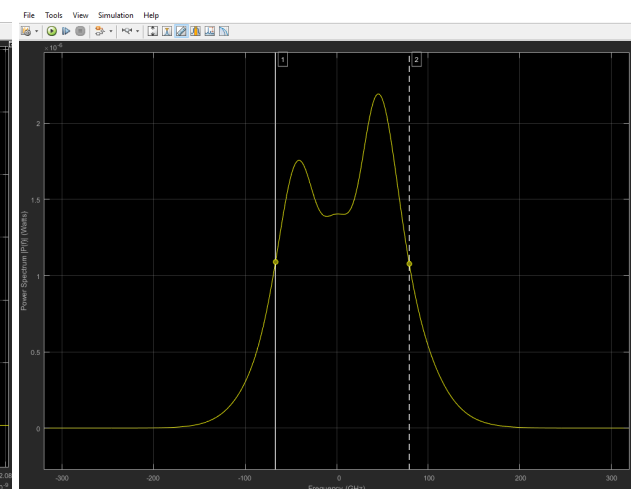
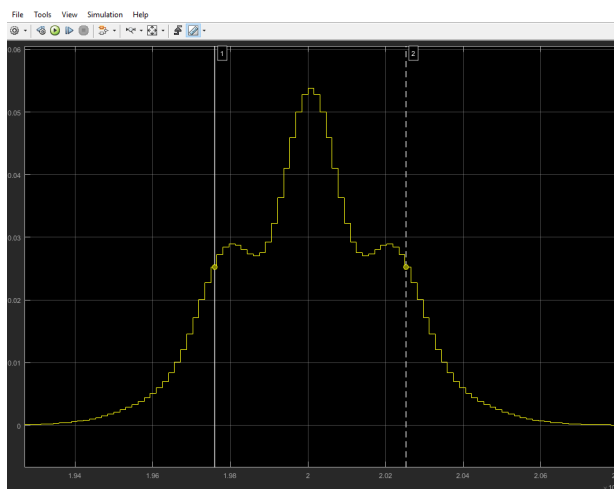
Length = 1.2 Km



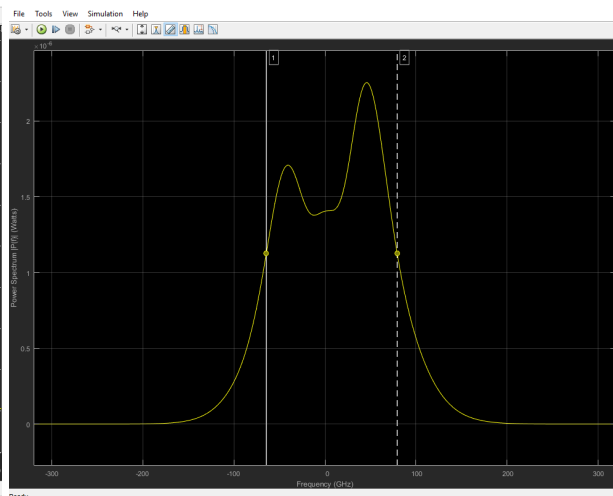
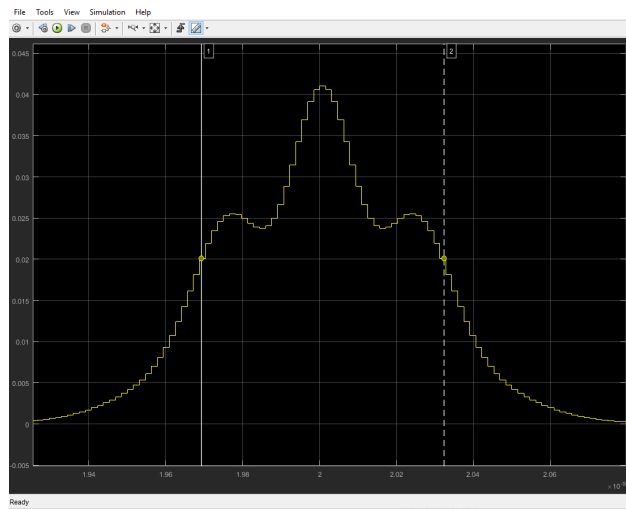
Length = 1.8 Km



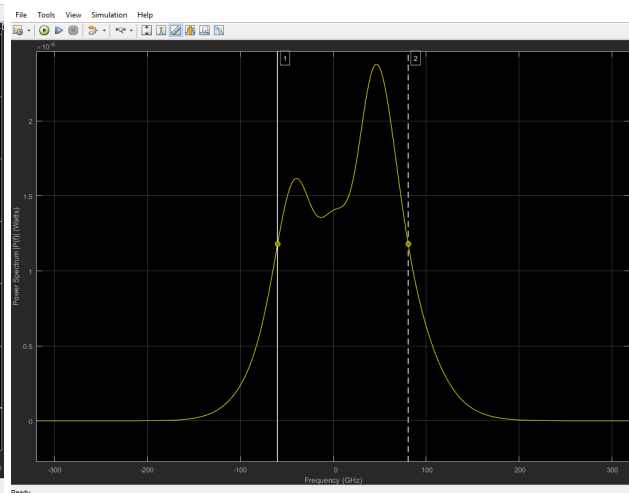
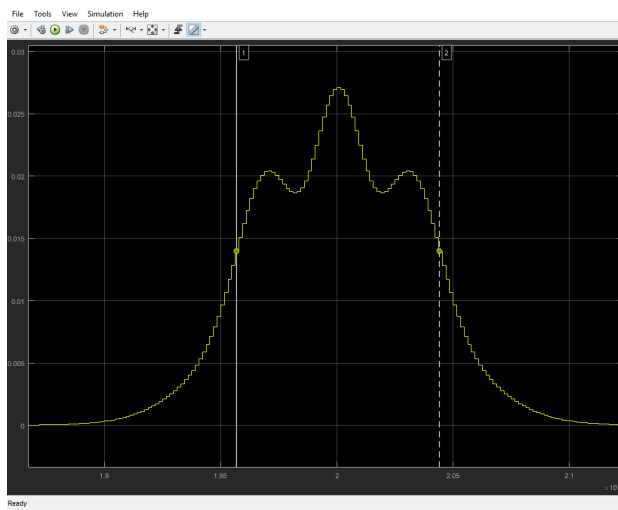
Length = 2.4 Km



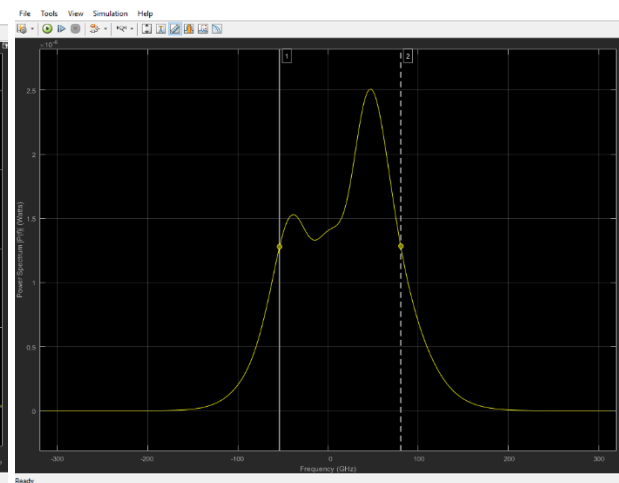
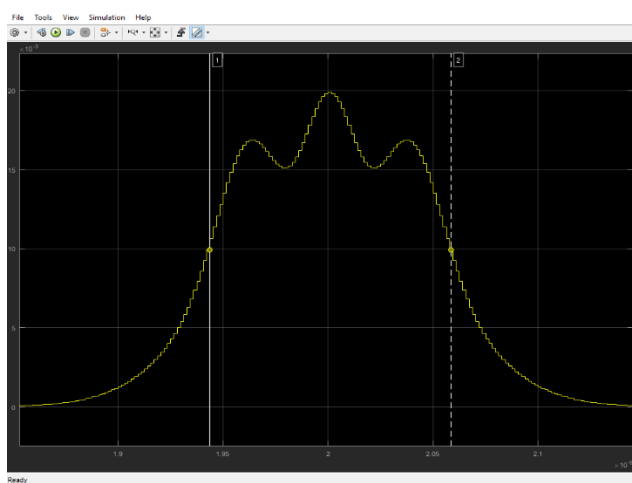
Length = 3.0 Km



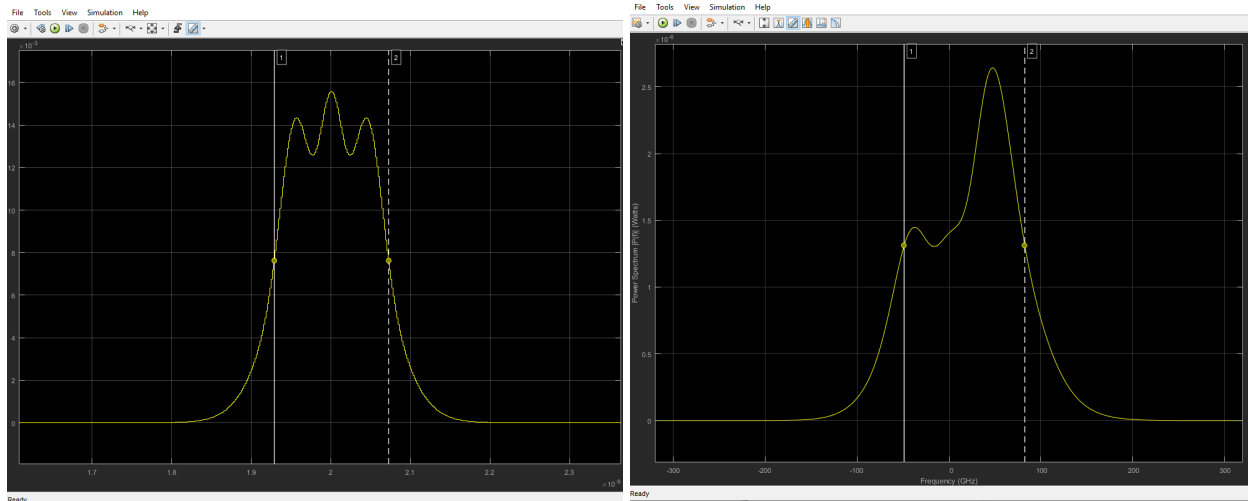
Length = 3.6 Km



Length = 4.8 Km



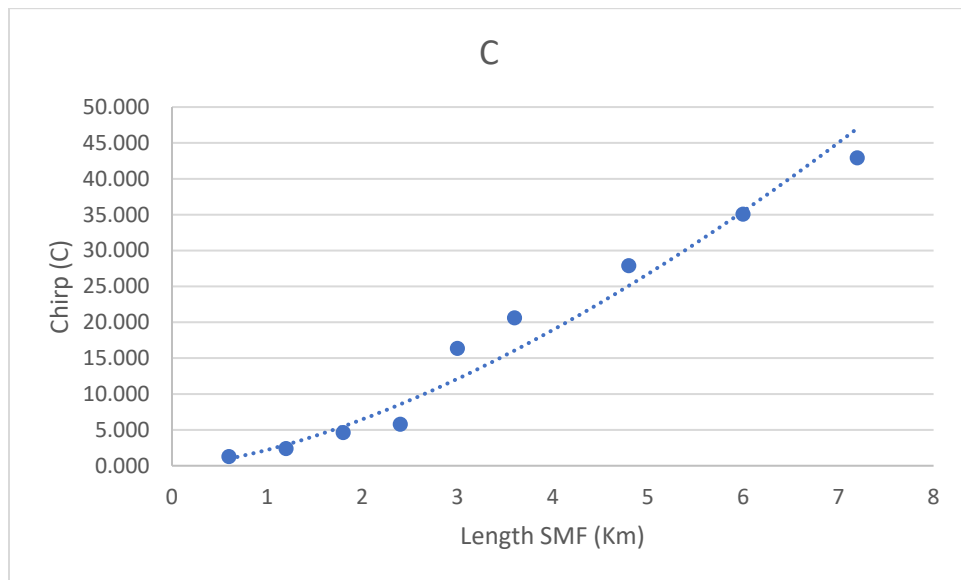
Length = 6.0 Km



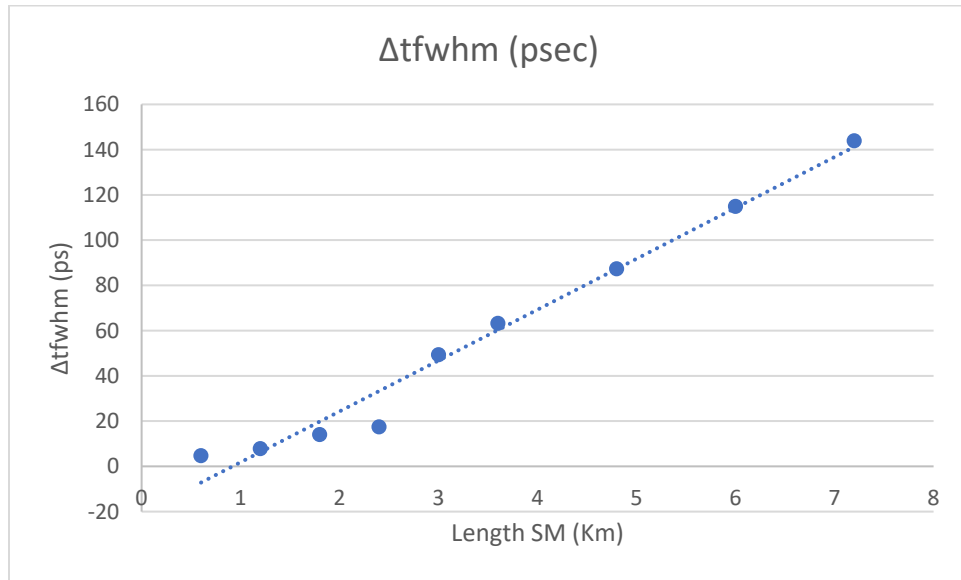
Length = 7.2 Km

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις :

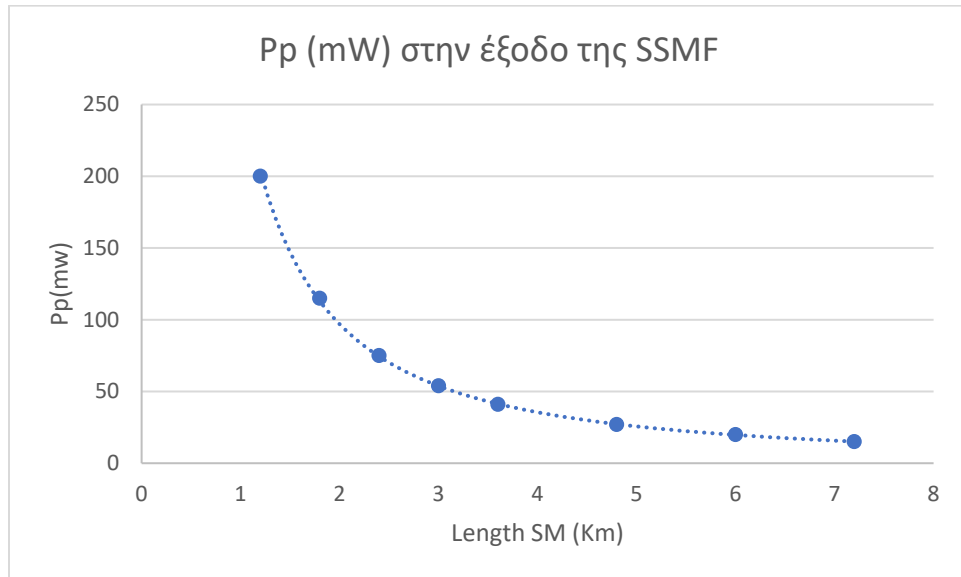
του παράγοντα chirp C ως προς το μήκος της ίνας SSMF



του χρονικού εύρους Δt_{fwhm} στην έξοδο της SSMF ως προς το μήκος της SSMF

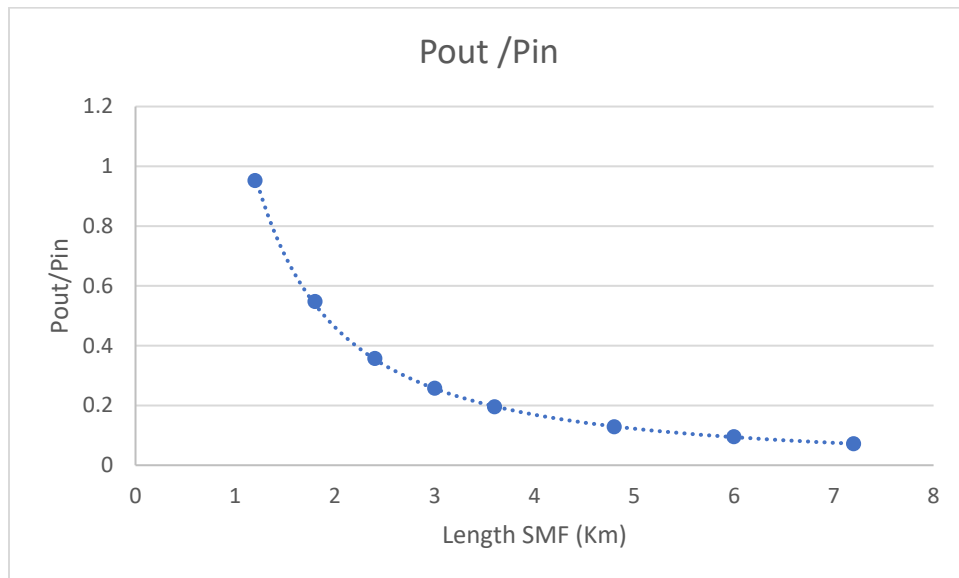


της ισχύος κορυφής του παλμού P_p στην έξοδο της SSMF ως προς το μήκος της SSMF

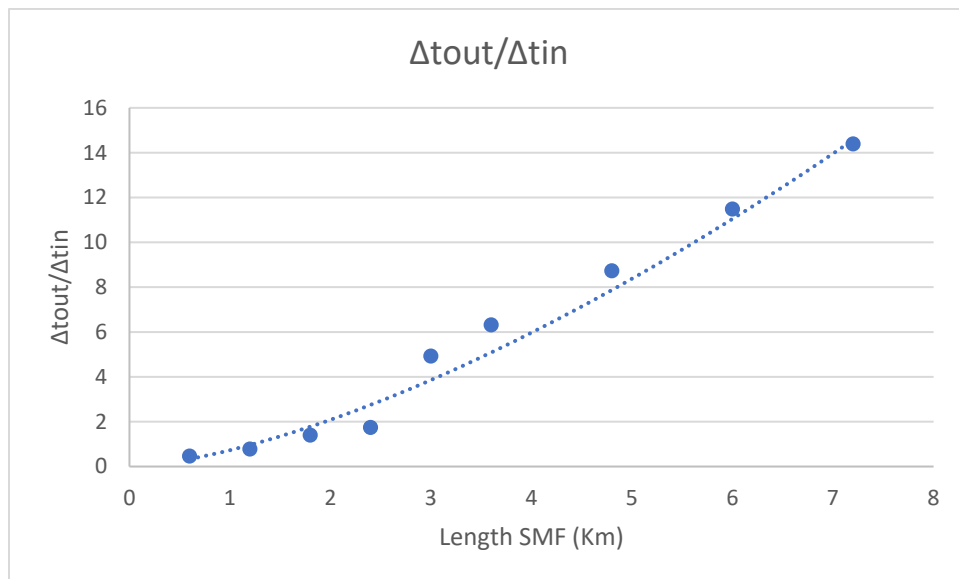


Στο παραπάνω διάγραμμα δεν λήφθηκε υπόψη η τιμή $P_p = 414$ mw που αντιστοιχεί σε μήκος ίνας 0.6 Km γιατί είναι λανθασμένο αποτέλεσμα που προκύπτει, δεδομένου ότι δεν έχει λογική η αύξηση της ισχύος κορυφής.

του λόγου $P_{\text{rout}} / P_{\text{rin}}$ (ισχύς κορυφής του παλμού P_{rout} στην έξοδο της SSMF προς ισχύ κορυφής του παλμού P_{rin} στην είσοδο της SSMF) ως προς το μήκος της SSMF



του λόγου $\Delta t_{\text{fwhmout}} / \Delta t_{\text{fwhmin}}$ (χρονικό εύρος παλμού στην έξοδο προς χρονικό εύρος στην είσοδο, ή αλλιώς παράγοντας χρονικής διεύρυνσης) ως προς το μήκος της ίνας



Από τα δύο τελευταία διαγράμματα παρατηρείται ότι το χρονικό εύρος του παλμού αυξάνει λόγω της διασποράς όσο αυξάνει το μήκος της ίνας, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται λόγω της διαπλάτυνσης η ισχύς κορυφής του παλμού.

ii. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της ίνας, ο παράγοντας μη γραμμικότητας γ υπολογίζεται από την σχέση :

$$\gamma = \frac{n_2 \omega}{c A_{eff}} = \frac{n_2 \cdot 2\pi \cdot c_0}{c_0 \cdot A_{eff} \cdot \lambda} = \frac{2,6 \cdot 10^{-20} \cdot 2 \cdot 3,14}{10 \cdot 10^{-12} \cdot 1550 \cdot 10^{-9}} = 10,53 / Km \cdot w$$

Από την σχέση $\Delta\phi_{NL} = \gamma \cdot P_p \cdot z$, όπου $P_p = 0.210$ w, $z = 1.5$ Km προκύπτει $\Delta\phi_{NL} = 3.31$ rad

Από την σχέση $\Delta f = \frac{0,8 \cdot \Delta\phi_{NL}}{T_0}$ όπου $T_0 = 7.21$ ps, υπολογίζεται η φασματική διεύρυνση του παλμού που προκύπτει $\Delta f = 367.26$ GHz. Επειδή το αρχικό φασματικό εύρος του παλμού είναι περίπου $\Delta f_{fwhm} = 45$ GHz προκύπτει ότι το τελικό φάσμα του παλμού στη έξοδο της SSMF1 είναι 412.26 GHz.

Από την σχέση $\Delta t_{fwhm} \cdot \Delta f_{fwhm} = 0.44 \sqrt{1 + C^2}$ υπολογίζω τον συντελεστή chirp $c = 9.316$

Για τον υπολογισμό του χρονικού εύρους του παλμού μετά την ίνα SSMF, στο $1/e$ της ισχύος, χρησιμοποιώ την σχέση :

$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + \frac{C \beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

όπου $T_0 = 7.21$ ps, $C = 9.316$, $\beta_2 = 21.67$ ps²/Km για διαφορετικά μήκη z ίνας. Έτσι προκύπτει ο πίνακας :

Z (km)	T1 (ps)
0,6	24,08
1,2	40,97
1,8	57,86
2,4	74,76
3	91,65
3,6	108,55
4,8	142,34
6	176,13
7,2	209,93