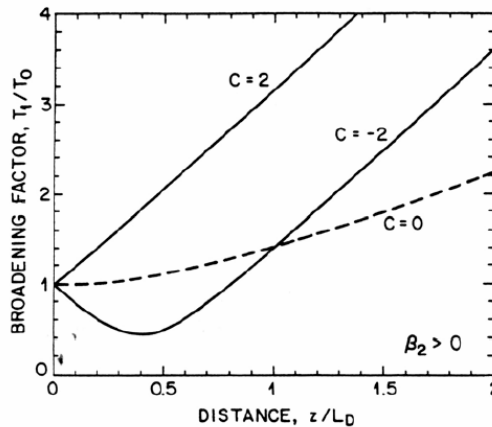


ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
Εξέταση 6/3/2003

Θέμα Δεύτερο

(β) Εξηγήστε με λεπτομέρεια το διάγραμμα του σχήματος 1.19 στη σελίδα 56 των σημειώσεων. Εξηγήστε τη μορφή της κάθε καμπύλης, από τι εξαρτάται η κλίση των καμπύλων για μεγάλα z και για ποιο λόγο οι κλίσεις αυτές, είναι οι ίδιες στις περιπτώσεις που $C=2$ και $C=-2$.

Λύση



Σχήμα 1.19 Μεταβολή του παράγοντα διεύρυνσης σε συνάρτηση με τη διανύμενη απόσταση για την περίπτωση ενός παλμού Gauss με chirping. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην περίπτωση παλμού με μηδενικό chirping.

Στο παραπάνω διάγραμμα το T_0 αντιστοιχεί στο αρχικό εύρος του παλμού στο σημείο όπου η ισχύς του έχει πέσει στο $1/e$ της μέγιστης ισχύος, ενώ το T_1 αντιστοιχεί στο αντίστοιχο εύρος του παλμού όταν αυτός έχει διανύσει απόσταση z μέσα σε μια ίνα που εισάγει διασπορά.

Όπως είναι ήδη γνωστό, το φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος ενός παλμού εξαρτάται άμεσα από την παράμετρο του chirp και δίδεται από τη σχέση :

$$\Delta\omega = \frac{(1 + C^2)^{1/2}}{T_0}$$

Από τον παραπάνω τύπο γίνεται φανερό ότι ένας παλμός με μηδενικό chirping ($C=0$) έχει μικρότερο φασματικό εύρος από έναν παλμό με αρχικό chirp, αν και εφόσον βέβαια οι δύο αυτοί παλμοί έχουν το ίδιο αρχικό χρονικό εύρος. Επίσης είναι σαφές πως δύο παλμοί με chirp ίσα κατά απόλυτο τιμή αλλά αντίθετα σε πρόσημο ($C_1=-C_2$) έχουν το ίδιο φασματικό εύρος.

Σύμφωνα με την ανάλυση του βιβλίου στη σελίδα 23, η παλμική διεύρυνση $\Delta\tau$ που θα υποστεί ένας παλμός λόγω διασποράς σε απόσταση z μέσα στην ίνα θα δίδεται από τον τύπο :

$$\Delta\tau = z \beta_2 \Delta\omega$$

όπου $\Delta\omega$ είναι το φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος του συγκεκριμένου παλμού. Από τον παραπάνω τύπο γίνεται φανερό ότι για συγκεκριμένο μήκος ίνας ένας στενότερος φασματικά παλμός θα διαπλατυνθεί λιγότερο από κάποιον με μεγαλύτερο φασματικό εύρος. Επίσης γίνεται φανερό ότι ο ρυθμός της διεύρυνσης λόγω διασποράς θα είναι μικρότερος για έναν παλμό με μικρότερο φασματικό εύρος.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις και αναφερόμενοι στο σχήμα 1.19, συμπεραίνουμε τα εξής :

- ο παλμός με μηδενικό chirp ($C=0$) είναι στενότερος φασματικά από τους άλλους δύο παλμούς με $C=2$ και $C=-2$ αντίστοιχα και συνεπώς έχει μικρότερο ρυθμό διεύρυνσης λόγω διασποράς από αυτούς, δηλαδή θα διαπλατυνθεί λιγότερο από τους άλλους δύο για συγκεκριμένο μήκος ίνας. Για το λόγο αυτό η κλίση της καμπύλης του παλμού αυτού είναι μικρότερη από την κλίση της καμπύλης των άλλων δύο παλμών.
- οι παλμοί με chirp ίσα κατά απόλυτο τιμή αλλά αντίθετα σε πρόσημο έχουν το ίδιο φασματικό εύρος και επομένως θα έχουν διαπλατυνθεί το ίδιο μετά από μια δεδομένη απόσταση z . Για το λόγο αυτό η κλίση των δύο καμπύλων για μεγάλα z είναι οι ίδιες στις περιπτώσεις που $C=2$ και $C=-2$.

Επομένως η κλίση των καμπυλών εξαρτάται από την απόλυτη τιμή του chirp που έχει ο αντίστοιχος παλμός. Μεγαλύτερο chirp κατ' απόλυτο τιμή αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη κλίση.

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
Εξέταση 4/10/2004

Θέμα Δεύτερο

- (α) Περιγράψτε σύντομα, το φαινόμενο της διασποράς ανώτερης τάξης (β_3 διάφορο του 0).
- (β) Εξηγήστε τη μορφή των παλμών που εμφανίζονται στο σχήμα 1.20 του βιβλίου, λόγω διασποράς τρίτης (και δεύτερης) τάξης.
- (γ) Ας υποθέσουμε ότι μας ενδιαφέρει να χρησιμοποιήσουμε ίνα με $\beta_2 = 0$ ps²/km (κατόπι αντιστάθμισης της διασποράς δεύτερης τάξης) και $\beta_3 = 0.1$ ps³/km σε μία ζεύξη και ας υποθέσουμε ότι η γραμμή θα πρέπει να μπορεί να μεταφέρει χωρητικότητα που να πλησιάζει τα 500 Gb/s ώστε να χρειάζονται παλμοί με εύρος 1 ps. Υπολογίστε το μήκος μετά από το οποίο η διασπορά τρίτης τάξης θα δημιουργήσει πρόβλημα. Ποιος είναι ο προφανής τρόπος για να αυξηθεί το μήκος μετάδοσης, διατηρώντας τη δυνατότητα μετάδοσης των 500 Gb/s.

Λύση

(α) Η διασπορά ανώτερης τάξης χρειάζεται σε μερικές περιπτώσεις να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της διεύρυνσης του παλμού λόγω διασποράς, πχ όταν το μήκος κύματος του φέροντος είναι πολύ κοντά στο μήκος κύματος μηδενικής διασποράς λ_D , οπότε $\beta_2 \approx 0$ και ο όρος β_3 επικρατεί, ή όταν το εύρος του παλμού είναι πολύ μικρό, $T < 0.1$ ps ακόμα και αν $\beta_2 \neq 0$ καθώς ο παράγοντας διεύρυνσης $\Delta\omega/\omega_0$ δεν είναι αρκετά μικρός ώστε να δικαιολογεί την απλοποίηση της σχέσης 1.146 μετά τον όρο β_2 . Η εξίσωση Schrödinger τότε, παραλείποντας τους όρους της απορρόφησης και της εξασθένισης, γράφεται:

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 U}{\partial T^3}$$

η οποία λύνεται με τη μέθοδο του μετασχηματισμού Fourier και το αποτέλεσμα της δίνεται από τη σχέση 1.180 του βιβλίου: Το κανονικοποιημένο πλάτος του παλμού σε διανύμενη απόσταση z ισούται με

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(0, \omega - \omega_0) \exp\left(\frac{j}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 z + \frac{j}{6} \beta_3 (\omega - \omega_0)^3 z - j\omega T\right) d\omega$$

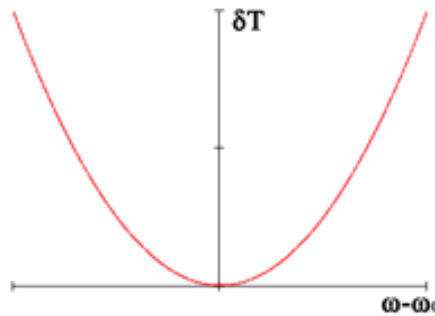
όπου $\tilde{U}(0, \omega - \omega_0)$ ο μετασχηματισμός Fourier του οπτικού σήματος. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η φάση του παλμού σε συνάρτηση με την συχνότητα ω :

$$\phi = -\frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 z - \frac{1}{6} \beta_3 (\omega - \omega_0)^3 z \quad (1)$$

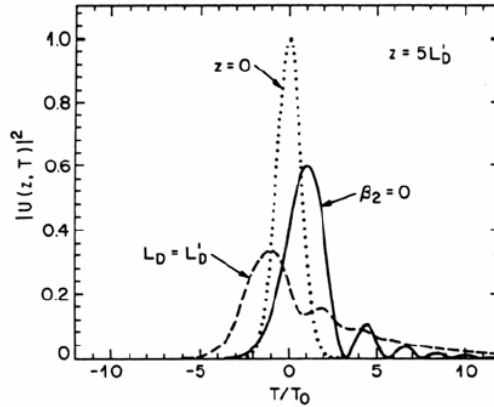
ενώ η χρονική καθυστέρηση που υφίστανται οι φασματικές συνιστώσες του παλμού σε σχέση με την ω_0 δίδεται από τον τύπο :

$$\delta T = -\frac{d\phi}{d\omega} = \beta_2(\omega - \omega_0)z + \frac{1}{2}\beta_3(\omega - \omega_0)^2 z \quad (2)$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης (2) φαίνεται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι οι φασματικές συνιστώσες που ισαπέχουν από τη φέρουσα ω_0 υπόκεινται στην ίδια καθυστέρηση δT , με αποτέλεσμα να συμβάλλουν μεταξύ τους, αλλοιώνοντας το σχήμα του παλμού, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα και θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

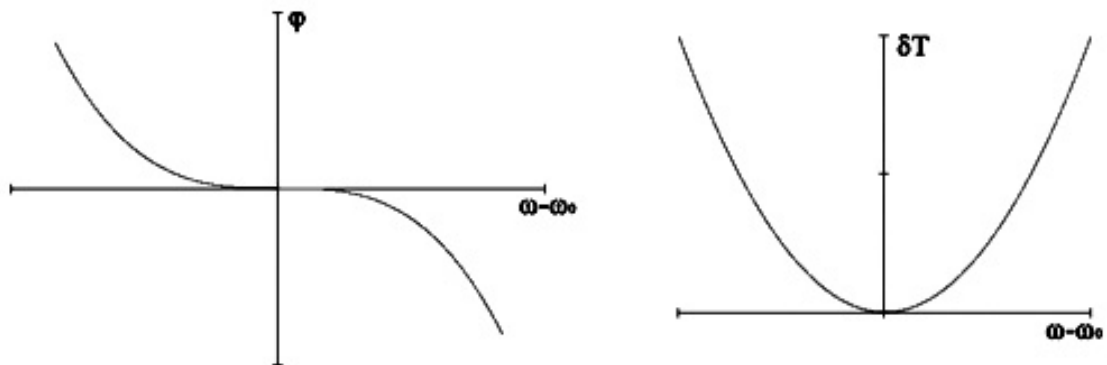


Σχήμα 1.20 Κυματομορφές παλμών κατά την κυματοδότησή τους σε ένα όπου έχουμε παρουσία φαινομένων διασποράς ανώτερης τάξης

(β)

❖ Περίπτωση $\beta_2 = 0$ και $\beta_3 > 0$

Παρακάτω δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των ποσοτήτων των εξισώσεων σε συνάρτηση με την συχνότητα ω για δεδομένη απόσταση z και για την περίπτωση που $\beta_2 = 0$ και $\beta_3 > 0$.

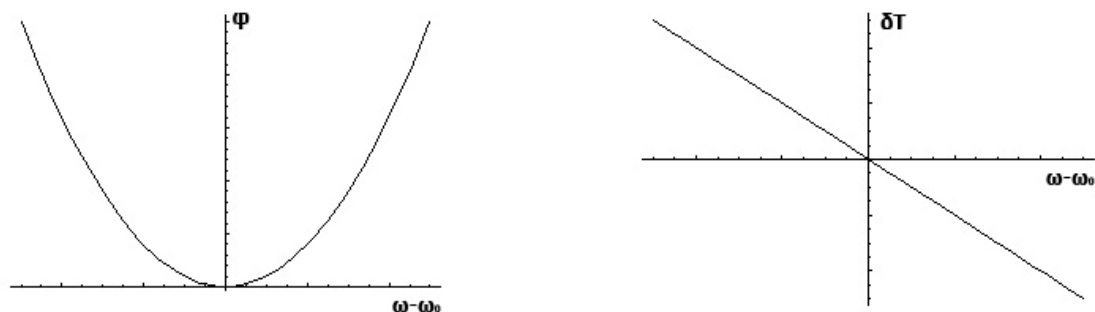


Από τις δύο αυτές παραστάσεις παρατηρώ πως φασματικές συνιστώσες που ισαπέχουν από τη φέρουσα συχνότητα ω_0 , δηλαδή φασματικές συνιστώσες για τις οποίες ισχύει $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$ και $\omega_2 = \omega_0 - \Delta\omega$ έχουν φάσεις ίσες κατ' απόλυτη τιμή και αντίθετες ενώ υφίστανται την ίδια χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τη φέρουσα. Αυτό σημαίνει πως κάποια από αυτά τα ζεύγη των φασματικών συνιστωσών θα εμφανίζουν διαφορά φάσης $\delta\phi = \pi$ ενώ ταυτόχρονα θα υφίστανται την ίδια χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τη φέρουσα και έτσι θα ταυτίζονται χρονικά. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι ότι οι φασματικές αυτές συνιστώσες (οι οποίες ως γνωστό έχουν και το ίδιο πλάτος) θα συμβάλλουν αρνητικά στο πεδίο του χρόνου οπότε και θα αλληλοεξουδετερώνονται. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται οι μηδενισμοί που φαίνονται στο σχήμα 1.20. Ομοίως, υπάρχουν και ζεύγη φασματικών συνιστωσών τα οποία θα εμφανίζουν την ίδια φάση, οπότε και θα συμβάλλουν θετικά με την ίδια ακριβώς λογική. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζονται τα μέγιστα που φαίνονται στο σχήμα 1.20.

Από την άλλη, η ασυμμετρία που παρουσιάζει το σχήμα 1.20, όπου η ουρά που φαίνεται στο σχήμα του παλμού βρίσκεται μόνο από την μια του πλευρά, μπορεί να εξηγηθεί από την παρατήρηση της γραφικής παράστασης του δT σε συνάρτηση με το ω . Από τη γραφική αυτή παράσταση φαίνεται ότι όλες η φασματικές συνιστώσες του παλμού έπονται της φέρουσας (ή προηγούνται ανάλογα με το πρόσημο του β_3).

❖ Περίπτωση $\beta_2 < 0$ και $\beta_3 = 0$

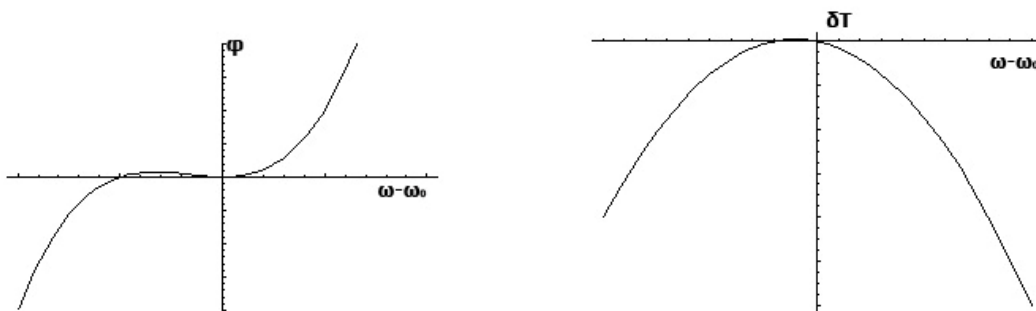
Παρακάτω δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της φάσης του παλμού και της καθυστέρησης δT σε συνάρτηση με την κυκλική συχνότητα ω για δεδομένη απόσταση z και για την περίπτωση που $\beta_2 < 0$ και $\beta_3 = 0$.



Η περίπτωση αυτή ταυτίζεται με την περίπτωση της ανώμαλης διασποράς όπου οι χαμηλότερες συχνότητες ταξιδεύουν πιο αργά από τις υψηλές ενώ τα φαινόμενα διασποράς ανώτερης τάξης θεωρούνται αμελητέα. Αποτέλεσμα αυτής της διαφοροποίησης της ταχύτητας με την οποία κινούνται οι διάφορες φασματικές συνιστώσες του παλμού είναι η διαπλάτυνση του παλμού στο πεδίο του χρόνου.

❖ **Περίπτωση $\beta_2 < 0$ και $\beta_3 < 0$**

Παρακάτω δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της φάσης του παλμού και της καθυστέρησης δT σε συνάρτηση με την κυκλική συχνότητα ω για δεδομένη απόσταση z και για την περίπτωση που $\beta_2 < 0$ και $\beta_3 < 0$.



Από τις δύο αυτές παραστάσεις παρατηρώ πως φασματικές συνιστώσες που ισαπέχουν από τη φέρουσα συχνότητα ω_0 , δηλαδή φασματικές συνιστώσες για τις οποίες ισχύει $\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega$ και $\omega_2 = \omega_0 - \Delta\omega$ έχουν φάσεις αντίθετες αλλά όχι ίσες κατ'απόλυτη τιμή. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή οι δύο αυτές συνιστώσες δεν συμπίπτουν στο πεδίο του χρόνου οπότε και δε θα συμβάλουν αναιρετικά όπως στην πρώτη περίπτωση. Συνεπώς δε θα παρουσιαστούν μηδενισμοί στο σχήμα του παλμού. Αντιθέτως, το σχήμα του παλμού θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1.20.

Από την άλλη, η ασυμμετρία που παρουσιάζει το σχήμα 1.20 για $\beta_2 \neq 0$, μπορεί να εξηγηθεί με παρόμοιο τρόπο όπως στην πρώτη περίπτωση.

(γ) Το μήκος διασποράς ανώτερης τάξης δίνεται από τη σχέση 1.181 του βιβλίου :

$$L'_D = \frac{T_0^3}{|\beta_3|} \xrightarrow{T_0=1ps, \beta_3=0.1ps^2/km} L'_D = 10Km$$

Άρα δεχόμαστε ότι μετά από μήκος $L'_D = 10Km$ η διασπορά τρίτης τάξης θα δημιουργήσει πρόβλημα.

Για να μπορέσουμε να αυξήσουμε το μήκος της μετάδοσης χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα από φαινόμενα διασποράς τρίτης τάξης θα πρέπει :

- είτε να αυξήσουμε το χρονικό εύρος του παλμού

- είτε να μειώσουμε κατ'απόλυτη τιμή το β_3 , πράγμα που σημαίνει αντικατάσταση της υπάρχουσας ίνας.

Επειδή, όμως, δεν έχουμε τη δυνατότητα να αντικαταστήσουμε την οπτική ίνα που χρησιμοποιούμε, προτιμάμε να αυξήσουμε το χρονικό εύρος του παλμού T_0 .

Η χωρητικότητα της γραμμής μας είναι 500Gbps. Η χωρητικότητα αυτή αντιστοιχεί σε μια περίοδο bit ίση με :

$$T_{bit} = \frac{1}{500Gbps} = 2 psec$$

Επιπλέον, το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού δίδεται από τον τύπο 1.164 του βιβλίου και είναι ίσο με

$$T_{FWHM} = 2(\ln 2)^{1/2} T_0 = 1,665 psec$$

Συνεπάγεται, λοιπόν, πως το duty cycle του παλμού μας είναι ίσο με :

$$\frac{T_{FWHM}}{T_{bit}} = \frac{1,665 psec}{2 psec} = 0,83$$

Προκειμένου, όμως, να αυξήσουμε το χρονικό εύρος του παλμού διατηρώντας, όμως, ταυτόχρονα το duty cycle των παλμών μας θα πρέπει να αυξήσω και την περίοδο του bit T_{bit} , πράγμα το οποίο άμεσα συνεπάγεται την μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Ωστόσο, εμείς επιθυμούμε τη δυνατότητα μετάδοσης των 500Gbps και για το λόγο αυτό προτείνουμε τη δημιουργία περισσότερων καναλιών με ρυθμοδότηση μικρότερη της υπάρχουσας και πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος των καναλιών αυτών (πολυπλεξία WDM-Wavelength Division Multiplexing).

Για παράδειγμα θα μπορούσαν να δημιουργηθούν 50 κανάλια με ρυθμό μετάδοσης στα 10Gbps το κάθε ένα. Στην περίπτωση αυτή η περίοδος του bit θα έχει διαμορφωθεί ως εξής :

$$T'_{bit} = \frac{1}{10Gbps} = 100 psec$$

ενώ με δεδομένο το duty cycle του παλμού μας ίσο με 0,83 το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού διαμορφώνεται ως εξής :

$$T'_{FWHM} = duty \ cycle * T'_{bit} = 0,83 * 100 psec = 83,255 psec$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει το νέο χρονικό εύρος του παλμού T_0 :

$$T_0' = \frac{T_{FWHM}'}{2(\ln 2)^{1/2}} = 50 \text{ psec}$$

Επομένως το νέο μήκος διασποράς ανώτερης τάξης είναι :

$$L_D'' = \frac{T_0'^3}{|\beta_3|} \xrightarrow{T_0' = 50 \text{ ps}, \beta_3 = 0.1 \text{ ps}^2 / \text{km}} L_D' = 1.250.000 \text{ Km}$$

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 6/3/2003

Θέμα Τρίτο

Αποφασίστε για τους πομπούς συστήματος μετάδοσης οπτικών ινών, μήκους 1000 km, που πρέπει να έχει δυνατότητα για χωρητικότητα μετάδοσης 10 Gbps (SDH/STM-64): Οι παράμετροι της ίνας που έχει εγκατασταθεί είναι: $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ (παράμετρος διασποράς), $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ (μη-γραμμικός δείκτης διάθλασης), $A_{\text{eff}} = 60 \mu\text{m}^2$ (εμβαδόν οπτικής δέσμης στην ίνα) και το μήκος κύματος των πομπών είναι στη περιοχή των 1.5 μm . Μπορείτε να υποθέσετε ότι η απώλεια της ίνας αντισταθμίζεται περιοδικά με οπτικούς ενισχυτές. Μπορείτε επίσης να υποθέσετε ότι για μετάδοση χωρίς σφάλματα, η ενέργεια/bit που πρέπει να παρέχει ο πομπός είναι 50 fJ/bit, ανεξάρτητα του ρυθμού μετάδοσης.

Υπολογίστε τις παραμέτρους (α) γ , (β) L_D , (γ) L_{NL} . (δ) Εξηγήστε κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας πομπός μετάδοσης σε κάθε τερματικό, με ρυθμό επανάληψης 10 Gbps. (ε) Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό, εξηγήστε τις επιλογές που έχετε είτε αναφορικά με τη ρυθμοδότηση των πομπών, είτε με επέμβαση στη γραμμική μετάδοση της οπτικής ίνας αλλά χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα για πλήρη αντικατάσταση της.

Λύση

(α) Ο μη γραμμικός συντελεστής γ υπολογίζεται από τη σχέση 1.150 του βιβλίου:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

$$\text{όπου } \omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0} = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^8}{1.5 \times 10^{-6}} = 1256.6 \times 10^{12} \text{ Hz } (\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m})$$

$$\text{Αντικαθιστούμε στην (1) : } \gamma = \frac{2.6 \times 10^{-20} \times 1256.6 \times 10^{12}}{3 \times 10^8 \times 60 \times 10^{-12}} = 18.15 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{W}^{-1}$$

(β) Το μήκος διασποράς L_D δίνεται από τη σχέση:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (2)$$

όπου T_0 είναι το εύρος του παλμού στο σημείο που η ισχύς του έχει πέσει στο 1/e της μέγιστης ισχύος. Υποθέτουμε ότι οι πομποί εκπέμπουν παλμούς με εύρος ίσο με 1/(ρυθμό μετάδοσης), οπότε $T_0 = 100 \text{ ps}$. Αντικαθιστούμε στη σχέση (2) και έχουμε:

$$L_D = \frac{100^2 \text{ ps}^2}{|-20 \text{ ps}^2 / \text{km}|} = 500 \text{ km}$$

(γ) Όμοια για το μήκος μη γραμμικότητας $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$, όπου P_0 η ισχύς κορυφής των παλμών. Η τιμή της P_0 προκύπτει από την απαίτηση για την ενέργεια/bit:

$$P_0 = \frac{E}{T_0} = \frac{50 \times 10^{-15}}{100 \times 10^{-12}} = 500 \text{ } \mu\text{W}.$$

$$\text{Συνεπώς } L_{NL} = \frac{1}{18.15 \times 10^{-4} \times 500 \times 10^{-6}} = 1102 \text{ km}$$

(δ) Από τα αποτελέσματα των (β) και (γ) προκύπτει ότι για το μήκος L της ζεύξης που εξετάζουμε ισχύει $L < L_{NL}$ (οπότε τα μη γραμμικά φαινόμενα δεν επιδρούν στη μετάδοση του παλμού), αλλά $L = L_D$, άρα η ζεύξη περιορίζεται οριακά από τη διασπορά. Έτσι δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας πομπός μετάδοσης σε κάθε τερματικό, με ρυθμό επανάληψης 10 Gbps.

(ε) Δεδομένου ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα για πλήρη αντικατάσταση της υπάρχουσας ίνας, διαφαίνονται δύο εναλλακτικές λύσεις ώστε να υλοποιηθεί το ζητούμενο σύστημα μετάδοσης οπτικών ινών:

1. Αντιστάθμιση της διασποράς (Dispersion Compensation). Στην υπάρχουσα ίνα προστίθεται ίνα με παράμετρο διασποράς β_2' αντίθετου προσήμου, με κατάλληλο μήκος L' ώστε $\beta_2 L = -\beta_2' L'$.
2. Μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Από τον τύπο (2) παρατηρούμε ότι για να αυξηθεί το L_D πρέπει να αυξηθεί το T_0 . Έτσι, προκειμένου να έχουμε $L_D \gg 1000 \text{ km}$ πρέπει να μειώσουμε το ρυθμό μετάδοσης. Η ζητούμενη χωρητικότητα 10 Gb/s μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πολυπλεξία διαίρεσης μηκών κύματος (WDM), εκπέμποντας n μήκη κύματος σε χαμηλότερο ρυθμό R , έτσι ώστε $n \cdot R = 10 \text{ Gb/s}$.

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 4/10/2004

Θέμα Τρίτο

Στον ωκεανό υπάρχουν τα νησιά Παπάγια, Ποντογονάτο και Απάπα. Η απόσταση μεταξύ Παπάγιας και Ποντογονάτου, καθώς και μεταξύ Ποντογονάτου και Απάπα είναι 500 km και στα 3 νησιά υπάρχουν τερματικοί κόμβοι για το σημείο-προς-σημείο, αμφίδρομο, σύστημα μετάδοσης οπτικών ινών των νησιών. Μέχρι πριν λίγες μέρες το δίκτυο υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης 2.5 Gb/s μεταξύ των 3 νησιών. Λόγω θεομηνίας οι τερματικοί σταθμοί στα νησιά Ποντογονάτο και Απάπα έχουν καταστραφεί και εσείς σαν μηχανικοί του τηλεπικοινωνιακού φορέα των νησιών, καλείστε να προτείνετε την οικονομικότερη λύση επισκευής. Με την ευκαιρία, καλείστε επίσης να αναβαθμίσετε το σύστημα μετάδοσης σε 10 Gb/s. Γνωρίζετε ότι ένας πομπός/δέκτης των 2.5 Gb/s κοστίζει 1U μονάδες κόστους, ενώ ένας πομπός/δέκτης των 10 Gb/s κοστίζει 2U μονάδες κόστους, καθώς και ότι το κόστος μη ποντισμένης ίνας είναι αμεληταίο. Γνωρίζετε ότι το β_2 της ποντισμένης ίνας είναι $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ (παράμετρος διασποράς), $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ (μη-γραμμικός δείκτης διάθλασης), $A_{\text{eff}} = 60 \mu\text{m}^2$ (εμβαδόν οπτικής δέσμης στην ίνα) και το μήκος κύματος των πομπών είναι στη περιοχή των 1.5 μm . Η απώλεια της ίνας αντισταθμίζεται περιοδικά με οπτικούς ενισχυτές (αν και αυτό δε θα χρειαστεί στους υπολογισμούς σας) και αυτοί δε χρειάζονται αντικατάσταση. Μπορείτε επίσης να υποθέσετε ότι για μετάδοση χωρίς σφάλματα, η ενέργεια/bit που πρέπει να παρέχει ο πομπός είναι 50 fJ/bit, ανεξάρτητα του ρυθμού μετάδοσης και ότι οι πομποί εκπέμπουν παλμούς με εύρος ίσο με 1/(ρυθμό μετάδοσης). Προτείνετε λύση. ΑΙΤΙΟΛΟΓΕΙΣΤΕ τη πρότασή σας σε σχέση με τα φαινόμενα διασποράς, αυτοδιαμόρφωσης καθώς και σε σχέση με το κόστος της.

Λύση

Η αναβάθμιση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

1. Εγκατάσταση συστήματος στα 10 Gb/s χρησιμοποιώντας πομπούς/δέκτες των 10 Gb/s
2. Εγκατάσταση συστήματος πολυπλεξίας διαίρεσης μηκών κύματος WDM που θα υποστηρίξει 4 κανάλια ρυθμού 2.5 Gb/s σε διαφορετικά μήκη κύματος.

Θα εξετάσουμε κατά πόσο είναι εφικτή καθεμιά λύση στην περίπτωση μας. Αρχικά υπολογίζουμε τα μήκη διασποράς L_D και μη γραμμικότητας L_{NL} για τις περιπτώσεις των 2.5 Gb/s και 10 Gb/s με βάση τους τύπους της σελίδας 50 του βιβλίου:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (1) \quad \text{και} \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (2).$$

Ο μη γραμμικός συντελεστής γ υπολογίζεται από τη σχέση 1.150 του βιβλίου:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

$$\text{όπου } \omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{2\pi c}{1.5 \times 10^{-6}} = 1256.6 \times 10^{12} \text{ Hz } (\lambda_0 = 1.5 \text{ } \mu\text{m})$$

$$\text{Αντικαθιστούμε στην (1) : } \gamma = \frac{2.6 \times 10^{-20} \times 1256.6 \times 10^{12}}{3 \times 10^8 \times 60 \times 10^{-12}} = 18.15 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \text{W}^{-1}$$

- 2.5 Gb/s: $T_0^{2.5 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{2.5 \text{ Gb/s}} = 400 \text{ ps}$ άρα από τη σχέση (1):

$$L_D^{2.5 \text{ Gb/s}} = \frac{(T_0^{2.5 \text{ Gb/s}})^2}{|\beta_2|} = \frac{400^2 \text{ ps}^2}{|-20 \text{ ps}^2 / \text{km}|} = 8000 \text{ km}$$
 και από τη σχέση (2):

$$L_{NL}^{2.5 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{\gamma P_0^{2.5 \text{ Gb/s}}}, \text{ όπου η τιμή της } P_0^{2.5 \text{ Gb/s}} \text{ προκύπτει από την απαίτηση για}$$

$$\text{την ενέργεια/bit: } P_0^{2.5 \text{ Gb/s}} = \frac{E}{T_0^{2.5 \text{ Gb/s}}} = \frac{50 \times 10^{-15}}{400 \times 10^{-12}} = 125 \text{ } \mu\text{W}.$$

$$\text{Άρα } L_{NL}^{2.5 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{18.15 \times 10^{-4} \times 125 \times 10^{-6}} = 4408 \text{ km}$$

Συμπέρασμα: Στην περίπτωση αυτή ούτε τα φαινόμενα διασποράς ούτε τα μη γραμμικά φαινόμενα επιδρούν στη διάδοση του παλμού.

Το κόστος της αναβάθμισης ισούται με το κόστος των πομποδεκτών που πρέπει να τοποθετηθούν. Μετά τη θεομηνία παραμένει ανέπαφος μόνο ένας πομποδέκτης 2.5 Gb/s στην Παπάγια, άρα χρειάζονται άλλοι τρεις για την Παπάγια καθώς και τέσσερις για καθένα από τα άλλα δύο νησιά. Συνολικά $3 + 4 + 4 = 11$ πομποδέκτες 2.5 Gb/s, που συνεπάγονται κόστος $11 \cdot 1 U = 11 U$ μονάδες.

- 10 Gb/s: $T_0^{10 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{10 \text{ Gb/s}} = 100 \text{ ps}$ άρα από τη σχέση (1):

$$L_D^{10 \text{ Gb/s}} = \frac{(T_0^{10 \text{ Gb/s}})^2}{|\beta_2|} = \frac{100^2 \text{ ps}^2}{|-20 \text{ ps}^2 / \text{km}|} = 500 \text{ km}$$
 και από τη σχέση (2):

$$L_{NL}^{10 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{\gamma P_0^{10 \text{ Gb/s}}}, \text{ όπου η τιμή της } P_0^{10 \text{ Gb/s}} \text{ προκύπτει από την απαίτηση για}$$

$$\text{την ενέργεια/bit: } P_0^{10 \text{ Gb/s}} = \frac{E}{T_0^{10 \text{ Gb/s}}} = \frac{50 \times 10^{-15}}{100 \times 10^{-12}} = 500 \text{ } \mu\text{W}.$$

$$\text{Άρα } L_{NL}^{10 \text{ Gb/s}} = \frac{1}{18.15 \times 10^{-4} \times 500 \times 10^{-6}} = 1102 \text{ km}$$

Συμπέρασμα: Στην περίπτωση αυτή τα μη γραμμικά φαινόμενα δεν επιδρούν στη διάδοση του παλμού ενώ τα φαινόμενα διασποράς περιορίζουν οριακά τη διάδοση του παλμού. Καλό θα ήταν, λοιπόν, η διασπορά να αντισταθμιστεί (dispersion compensation) σε κάθε ζεύξη, χρησιμοποιώντας κατάλληλο μήκος

ίνας με θετικό συντελεστή διασποράς β_2 . Η ίνα αυτή δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί υποθαλάσσια, καθώς μπορεί να προστεθεί στο τέρμα κάθε ζεύξης, οπότε το κόστος της θεωρείται αμελητέο.

Το κόστος της αναβάθμισης ισούται με το κόστος των πομποδεκτών που πρέπει να τοποθετηθούν. Όλοι οι πομποδέκτες θα αντικατασταθούν από καινούριους των 10 Gb/s, άρα απαιτούνται 3 πομποδέκτες των 10 Gb/s, με συνολικό κόστος $3 \cdot 2 U = 6 U$ μονάδες.

Παρατηρούμε ότι η πιο συμφέρουσα λύση είναι η δεύτερη, δηλ. η εγκατάσταση καινούριων πομποδεκτών ρυθμού 10 Gb/s, σε συνδυασμό με αντιστάθμιση της διασποράς.

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 11/3/2004

Θέμα Πρώτο

(β) Υποθέστε ότι το μεταδιδόμενο σήμα στην αρχή της γραμμής μετάδοσης είναι σε μορφή παλμών Gauss, με περιβάλλουσα πεδίου:

$$E(0,T) = \exp(-T^2 / 2T_0^2)$$

Υπολογίστε το συντελεστή τριλίσματος (chirp), C_1 μετά από μετάδοση σε απόσταση z , από:

$$C_1 = (\partial^2 \phi / \partial T^2) T_0^2$$

χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.167 των σημειώσεων. Αν υποθέσουμε ότι $\beta_2 = -5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $z = 1 \text{ km}$, συμπληρώστε το παρακάτω πίνακα όπου T_1 το εύρος του παλμού στην έξοδο. Σχολιάστε τη διεύρυνση του παλμού

T ₀	C ₁	T ₁
1 ps		
3 ps		
100 ps		

Λύση

Σύμφωνα με τη σχέση 1.167 του βιβλίου η φάση του παλμού σε συνάρτηση με το χρόνο δίνεται από τη σχέση :

$$\phi = -\frac{\text{sgn}(\beta_2)(z/L_D) T^2}{1+(z/L_D)^2} \frac{1}{T_0} + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{z}{L_D}\right)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ο συντελεστής τριλίσματος (chirp) C_1 σύμφωνα με τη σχέση :

$$C_1 = \frac{\partial^2 \phi}{\partial T^2} T_0^2 = -\frac{2 \text{sgn}(\beta_2)(z/L_D)}{1+(z/L_D)^2} T_0$$

Επιπλέον, από τη σχέση 1.166 του βιβλίου προκύπτει το χρονικό εύρος του παλμού στην έξοδο :

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

όπου στις παραπάνω σχέσεις το L_D αντιπροσωπεύει το μήκος της διασποράς και ισούται με

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$$

Επομένως, ο πίνακας που ζητείται μπορεί να συμπληρωθεί με η βοήθεια των παραπάνω σχέσεων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας αυτός συμπληρωμένος :

T_0	C_1	T_1
1 ps	0,385	5,1psec
3 ps	2,547	3,432psec
100 ps	0,1	100psec

Παρατηρήσεις

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρούμε ότι για συγκεκριμένο μήκος ίνας ένας στενότερος αρχικά παλμός (μικρότερο T_0) θα διαπλατυνθεί περισσότερο εξαιτίας του μικρότερου μήκους διασποράς που του αντιστοιχεί. Στο παραπάνω παράδειγμα ο παλμός με αρχικό εύρος $T_0 = 1$ ps θα υποστεί διαπλάτυνση λόγω διασποράς της τάξεως των 4,1 ps, ενώ αντίθετα ο παλμός με αρχικό εύρος $T_0 = 100$ ps δεν θα διαπλατυνθεί.

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 11/3/2004

Θέμα Δεύτερο

(β) Υποθέστε ότι το μεταδιδόμενο σήμα στην αρχή της γραμμής μετάδοσης είναι σε μορφή παλμών Gauss, με περιβάλλουσα πεδίου:

$$E(0,T) = \exp(-T^2 / 2T_0^2)$$

Υπολογίστε το συντελεστή τριλίσματος (chirp), C_2 μετά από μετάδοση σε απόσταση z , από:

$$C_2 = (\partial^2 \phi / \partial T^2) T_0^2$$

χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.200 των σημειώσεων. Υποθέστε ότι η μετάδοση έχει γίνει για απειροελάχιστο μήκος ίνας, ώστε η μεταβολή της φάσης λόγω αυτοδιαμόρφωσης να είναι πολύ μικρή και ότι ενδιαφέρεστε για την περιοχή του παλμού γύρω από τη κορυφή του ώστε $(T / T_0) \rightarrow 0$.

Λύση

Σύμφωνα με τη σχέση 1.200 του βιβλίου η φάση του παλμού σε συνάρτηση με το χρόνο δίνεται από τη σχέση :

$$\phi_{NL} = |U(0,T)|^2 \left(\frac{1 - \exp(-az)}{aL_{NL}} \right) = \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \left(\frac{1 - \exp(-az)}{aL_{NL}} \right)$$

Αν αναπτύξουμε τη συνάρτηση $\exp(-az)$ σε ανάπτυγμα Taylor σύμφωνα με τη σχέση :

$$\exp(-az) = 1 - az + \frac{a^2}{2} z^2 - \frac{a^3}{6} z^3 + \dots$$

και αν θεωρήσουμε την υπόθεση ότι η μετάδοση έχει γίνει για απειροελάχιστο μήκος ίνας ώστε να θεωρήσουμε τους όρους $z^2, z^3, z^4, z^5, \dots$ αμελητέους, τότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής :

$$\phi_{NL} = |U(0,T)|^2 \left(\frac{1 - \exp(-az)}{aL_{NL}} \right) = \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \left(\frac{z}{L_{NL}} \right)^{L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}} = \gamma P_0 \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) z$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ο συντελεστής τριλίσματος (chirp) C_2 :

$$C_2 = \frac{\partial^2 \phi}{\partial T^2} T_0^2 = 2\gamma P_0 z \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \left(\frac{2T^2}{T_0^2} - 1 \right)$$

Εφόσον, τώρα, ενδιαφερόμαστε για την περιοχή του παλμού γύρω από τη κορυφή του ώστε $(T / T_0) \rightarrow 0$, ο συντελεστής C_2 είναι :

$$C_2 = \lim_{\frac{T}{T_0} \rightarrow 0} \left[2\gamma P_0 z \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \left(\frac{2T^2}{T_0^2} - 1\right) \right] = -2\gamma P_0 z$$

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 11/3/2004

Θέμα Τρίτο

(β) Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τις προηγούμενες ασκήσεις, βρείτε τη σχέση μεταξύ μέγιστης ισχύος P_0 και εύρους παλμού T_0 ώστε να υπάρχει εξισορρόπηση.

Λύση

Για να αλληλοαναιρεθούν τα δύο φαινόμενα θα πρέπει οι συντελεστές C_1 και C_2 να είναι ίσοι κατ' απόλυτη τιμή και αντίθετοι. Συνεπώς θα πρέπει να ισχύει :

$$C_1 = -C_2 \quad \Leftrightarrow$$

$$-\frac{2 \operatorname{sgn}(\beta_2)(z/L_D)}{1+(z/L_D)^2} T_0 = 2\gamma P_0 z \quad \Leftrightarrow$$

$$-\frac{\operatorname{sgn}(\beta_2)(1/L_D)}{1+(z/L_D)^2} T_0 = \gamma P_0 \quad \Leftrightarrow \quad L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$$

$$-\frac{\operatorname{sgn}(\beta_2)|\beta_2|}{T_0 \left(1 + \frac{z^2 |\beta_2|^2}{T_0^4}\right)} = \gamma P_0$$

Για να ισχύει η αλληλοαναιρέση των φαινομένων, θα πρέπει καταρχάς η παραπάνω σχέση να ισχύει για $z=0$. Άρα τελικά προκύπτει ότι για να υπάρχει εξισορρόπηση, πρέπει η μέγιστη ισχύς P_0 και το εύρος του παλμού T_0 να συνδέονται με την παρακάτω σχέση :

$$-\frac{\beta_2}{T_0} = \gamma P_0$$

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Εξέταση 3/10/2005

Θέμα Πρώτο

(β) Υποθέστε ότι το φίλτρο χρησιμοποιείται σε γραμμή μετάδοσης οπτικής ίνας και ότι το μεταδιδόμενο σήμα στην αρχή της γραμμής μετάδοσης είναι σε μορφή παλμών Gauss, με περιβάλλουσα πεδίου :

$$E(0,T) = \exp(-T^2 / 2T_0^2)$$

φέρουσα $f_0 = \omega_0/2\pi$ που συμπίπτει με το σημείο συντονισμού οπτικού φίλτρου, που έχει παιδική συνάρτηση μεταφοράς επίσης μορφής Gauss,

$$E(f) = \exp(-2\pi^2 (f-f_0)^2 / \Delta f^2)$$

Περιγράψτε και αποδείξτε (κάνοντας χρήση μετασχηματισμών Fourier, αν θέλετε), τι θα συμβεί στο παλμικό σήμα όταν περάσει από το παραπάνω φίλτρο. Συσχετίστε και εξηγήστε την αλλαγή που θα υποστεί ο παλμός όταν περάσει από συντονισμένο φίλτρο με την αλλαγή που θα υποστεί ο ίδιος παλμός στην περίπτωση που περάσει από υλικό που παρουσιάζει διασπορά. Εστιάστε στην έννοια transform limited παλμών.

Λύση

Έστω η συνάρτηση $g(T) = \exp(-\pi T^2)$ με παράγωγο :

$$\frac{d}{dt} g(T) = \frac{d}{dt} \exp(-\pi T^2) = \exp(-\pi T^2)(-2\pi T) = -2\pi T g(T) \quad (1)$$

και έστω ο μετασχηματισμός Fourier αυτής $G(f)$. Παραγωγίζοντας τον τύπο του μετασχηματισμού Fourier $G(f)$ ως προς f , έχουμε :

$$\mathbb{F}\{-j2\pi Tg(T)\} = \frac{d}{df}G(f) \Rightarrow \mathbb{F}\{-2\pi Tg(T)\} = -j \frac{d}{df}G(f) \quad (2)$$

Από την ιδιότητα της παραγώγισης στο πεδίο του χρόνου του μετασχηματισμού Fourier ισχύει :

$$\mathbb{F}\left\{\frac{d}{dt}g(T)\right\} = j2\pi fG(f) \stackrel{(1)}{\Rightarrow} \mathbb{F}\{-2\pi Tg(T)\} = j2\pi fG(f) \stackrel{(2)}{\Rightarrow} -j \frac{d}{df}G(f) = j2\pi fG(f) \Rightarrow -\frac{d}{df}G(f) = -2\pi fG(f)$$

που σημαίνει ότι ο παλμός και ο μετασχηματισμός του είναι η ίδια συνάρτηση. Επομένως για την περίπτωση της συνάρτησης $g(T) = \exp(-\pi T^2)$ ισχύει η σχέση :

$$\mathbb{F}\{\exp(-\pi T^2)\} = \exp(-\pi f^2) = G(f)$$

Επιπλέον, από την ιδιότητα της αλλαγής κλίμακας χρόνου του μετασχηματισμού Fourier ισχύει :

$$\mathbb{F}\{g(aT)\} = \frac{1}{a}G\left(\frac{f}{a}\right) \quad (3)$$

Αν θεωρήσουμε ότι $a = \frac{1}{\sqrt{2\pi T_0}}$ τότε

$$g(aT) = \exp(-\pi a^2 T^2) = \exp\left(-\pi \frac{T^2}{2\pi T_0^2}\right) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right)$$

που συμπίπτει με τον παλμό Gauss της άσκησης. Ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτής είναι :

$$\mathbb{F}\{g(aT)\} = \frac{1}{a}G\left(\frac{f}{a}\right) = \sqrt{2\pi T_0}G(\sqrt{2\pi T_0}f) = \sqrt{2\pi T_0} \exp(-2\pi^2 T_0^2 f^2)$$

Επομένως, ο μετασχηματισμός Fourier του παλμού Gauss είναι :

$$\boxed{\Phi(f) = \mathbb{F}\left\{\exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right)\right\} = \sqrt{2\pi T_0} \exp(-2\pi^2 T_0^2 f^2)}$$

Όταν το παλμικό αυτό σήμα περάσει από το δοσμένο φίλτρο με συνάρτηση μεταφοράς $E(f)|_{f_0=0}$, η έξοδος του φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας δίδεται από τη σχέση :

$$E_o(0, f) = E(f) * E_i(0, f) \quad \begin{matrix} E_i(0, f) = \sqrt{2\pi}T_0 \exp(-2\pi^2T_0^2 f^2) \\ = \end{matrix} \quad \sqrt{2\pi}T_0 \exp\left(\frac{-2\pi^2 f^2}{\Delta f^2}\right) \exp(-2\pi^2T_0^2 f^2) \Rightarrow$$

$$E_o(0, f) = \sqrt{2\pi}T_0 \exp\left(-2\pi^2T_0^2 \left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) f^2\right)$$

Αν θεωρήσουμε ότι $\beta = \frac{\Delta f T_0}{\sqrt{1 + \Delta f^2 T_0^2}}$ τότε

$$\frac{1}{\beta} E_o(0, f) = \frac{1}{\beta} \sqrt{2\pi}T_0 \exp\left(-2\pi^2T_0^2 \frac{f^2}{\beta^2}\right) = \frac{1}{\beta} \Phi\left(\frac{f}{\beta}\right)$$

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier της παραπάνω ισότητας και λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα της εξίσωσης (3) προκύπτει :

$$\frac{1}{\beta} \mathbb{F}^{-1}\{E_o(0, f)\} = \mathbb{F}^{-1}\left\{\frac{1}{\beta} \Phi\left(\frac{f}{\beta}\right)\right\} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\beta} E_o(0, T) = \phi(\beta T)$$

όπου $E_o(0, f)$ η έξοδος του φίλτρου στο πεδίο του χρόνου και $\phi(T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right)$.

Οπότε :

$$E_o(0, T) = \beta \phi(\beta T) = \beta \exp\left(-\frac{\beta^2 T^2}{2T_0^2}\right) = \frac{\Delta f T_0}{\sqrt{1 + \Delta f^2 T_0^2}} \exp\left(-\frac{\Delta f^2 T_0^2 T^2}{2(1 + \Delta f^2 T_0^2)T_0^2}\right) \Rightarrow$$

$$E_o(0, T) = \frac{\Delta f T_0}{\sqrt{1 + \Delta f^2 T_0^2}} \exp\left(-\frac{T^2}{2\left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right)T_0^2}\right)$$

Η ισχύς του σήματος εξόδου από το φίλτρο είναι :

$$P_0(0, T) = |E_o(0, T)|^2 = \frac{\Delta f^2 T_0^2}{1 + \Delta f^2 T_0^2} \exp\left(-\frac{T^2}{\left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) T_0^2}\right)$$

Για να υπολογίσουμε το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού στην έξοδο του φίλτρου, βρίσκουμε τότε η ισχύς αυτή πέφτει στο μισό :

$$P_0(0, T_{1/2}) = \frac{P_0(0, 0)}{2} \Rightarrow \frac{\Delta f^2 T_0^2}{1 + \Delta f^2 T_0^2} \exp\left(-\frac{T_{1/2}^2}{\left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) T_0^2}\right) = \frac{1}{2} \frac{\Delta f^2 T_0^2}{1 + \Delta f^2 T_0^2} \Rightarrow \exp\left(-\frac{T_{1/2}^2}{\left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) T_0^2}\right) = \frac{1}{2} \Rightarrow$$

$$-\frac{T_{1/2}^2}{\left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) T_0^2} = -\ln 2 \Rightarrow T_{1/2}^2 = \left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right) T_0^2 \ln 2 \Rightarrow T_{1/2} = T_0 \sqrt{\ln 2 \left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right)}$$

Άρα το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος του παλμού στην έξοδο του φίλτρου είναι :

$$\Delta T_{1/2} = 2T_{1/2} = 2T_0 \sqrt{\ln 2 \left(\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1\right)}$$

Αντίθετα το χρονικό εύρος του παλμού στην είσοδο του φίλτρου, όπως προκύπτει και από την άσκηση Α.2.3. του βιβλίου είναι :

$$\Delta T_{01/2} = 2T_{01/2} = 2T_0 \sqrt{\ln 2}$$

Από τις δύο αυτές εξισώσεις προκύπτει ότι κατά το πέρασμα του παλμικού σήματος από το φίλτρο, διευρύνεται το χρονικό του εύρος και μάλιστα κατά τον παράγοντα $\sqrt{\frac{1}{\Delta f^2 T_0^2} + 1}$.

Στην περίπτωση που ο ίδιος παλμός περάσει από υλικό που παρουσιάζει διασπορά, ο παλμός και πάλι θα διευρυνθεί χρονικά, με τη διαφορά όμως ότι στη δεύτερη αυτή

περίπτωση ο παλμός θα αποκτήσει και chirp, λόγω της εξάρτησης που θα αποκτήσει η φάση του παλμού από το χρόνο.

ΦΩΤΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

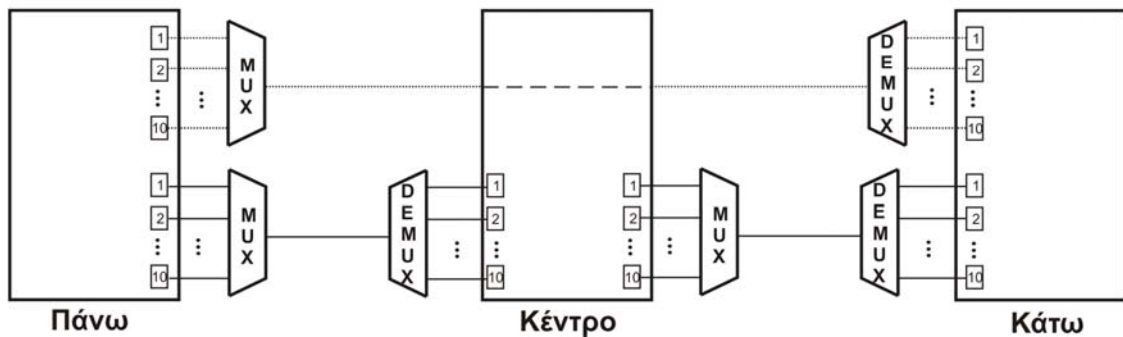
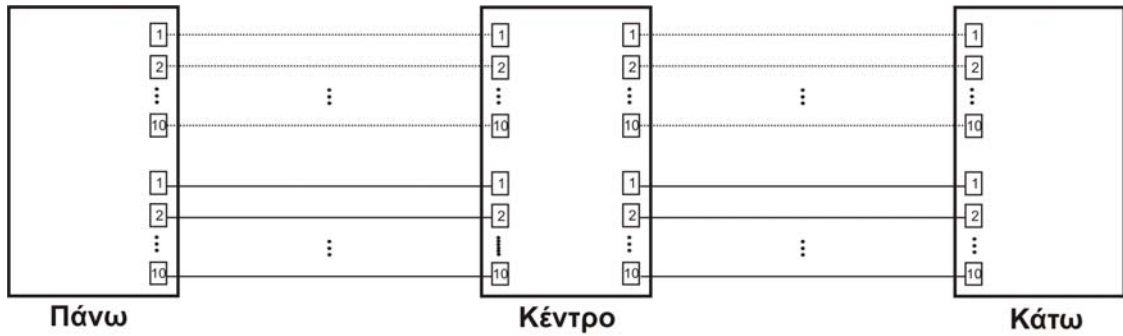
Εξέταση 11/3/2004

Θέμα Τρίτο

Υποθέτουμε 3 κόμβους Πάνω, Κέντρο, Κάτω που πρέπει να συνδεθούν με οπτικές ζεύξεις WDM μέσω δρομολογητών για πακέτα IP με 10Gbps ταχύτητα διεπαφών γραμμής μετάδοσης στους κόμβους ανά μήκος κύματος. Η αναμενόμενη χωρητικότητα μετάδοσης για κάθε μία από τις 3 συνδέσεις μεταξύ των τριών κόμβων είναι 100Gbps. (α) Προτείνετε 2 τρόπους σχεδιασμού του απλού δικτύου, χωρίς και με την ύπαρξη πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών μηκών κύματος (συζευκτών WDM). Υπολογίστε το συνολικό αριθμό διεπαφών γραμμής στους δρομολογητές των κόμβων στις δύο περιπτώσεις για το δίκτυο. (β) Η απόσταση Πάνω-Κέντρο και Κέντρο-Κάτω είναι αντίστοιχα 1000 Km και 2000 Km. Η απώλεια της ίνας είναι 0,2 dB/Km, η οπτική ισχύς των lasers είναι 0 dBm και η ευαισθησία των δεκτών για λήψη χωρίς σφάλματα είναι -20 dBm. Ποιος είναι ο απόλυτα ελάχιστος αριθμός ενισχυτών με κέρδος 20 dB που χρειάζονται για κάθε μία από τις δύο ζεύξεις για τους δύο τρόπους σχεδιασμού του δικτύου που αναφέρατε στο (α);

Λύση

(α)



(β)

➤ Για τον πρώτο τρόπο σχεδιασμού του δικτύου του ερωτήματος (α) για κάθε ζεύξη μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διεπαφών των 1000 Km θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$0\text{dBm} - 1000 \text{ Km} * 0,2 \text{ dB/Km} + \text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} \rightarrow$$

$$\text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} + 200 \text{ dB} = 180 \text{ dB}$$

ενώ για κάθε ζεύξη μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διεπαφών των 2000 Km θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$0\text{dBm} - 2000 \text{ Km} * 0,2 \text{ dB/Km} + \text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} \rightarrow$$

$$\text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} + 400 \text{ dB} = 380 \text{ dB}$$

Επομένως, για κάθε ζεύξη μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διεπαφών των 1000 Km θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν $180 \text{ dB} / 20 \text{ dB} = 9$ ενισχυτές ενώ για κάθε ζεύξη μεταξύ δύο οποιωνδήποτε διεπαφών των 2000 Km θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν $380 \text{ dB} / 20 \text{ dB} = 19$ ενισχυτές . Άρα εφόσον σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο σχεδιασμού του δικτύου

έχουμε 10 ζεύξεις των 1000 Km και 10 ζεύξεις των 2000 Km για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κάτω, ο απόλυτα ελάχιστος αριθμός ενισχυτών που χρειάζονται για την σύνδεση αυτή είναι $10 \cdot 9 + 10 \cdot 19 = 280$ ενισχυτές.

Για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κέντρο, έχουμε 10 ζεύξεις των 1000 Km και άρα ο απόλυτα ελάχιστος αριθμός ενισχυτών που χρειάζονται για την σύνδεση αυτή είναι 90 ενισχυτές.

Για τη σύνδεση των κόμβων Κέντρο-Κάτω, έχουμε 10 ζεύξεις των 2000 Km και άρα ο απόλυτα ελάχιστος αριθμός ενισχυτών που χρειάζονται για την σύνδεση αυτή είναι 190 ενισχυτές.

➤ Για τον δεύτερο τρόπο σχεδιασμού του δικτύου του ερωτήματος (α) και για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κάτω η ισχύς στη ζεύξη μετά τον πολυπλέκτη θα είναι δεκαπλάσια της οπτικής ισχύς των lasers. Η οπτική ισχύς των lasers είναι 0 dBm που αντιστοιχεί σε 1mW. Επομένως, η ισχύς στη ζεύξη μετά τον πολυπλέκτη θα είναι 10 mW ή 10 dBm. Ομοίως, η ισχύς στη ζεύξη πριν τον αποπολυπλέκτη θα πρέπει να είναι δεκαπλάσια της ευαισθησία των δεκτών για λήψη χωρίς σφάλματα, η οποία είναι -20 dBm ή 0,01 mW. Επομένως, η ισχύς στη ζεύξη πριν τον αποπολυπλέκτη θα πρέπει να είναι 0,1 ή -10 dBm. Για τη ζεύξη μεταξύ του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη στην σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κάτω θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$10\text{dBm} - 3000 \text{ Km} * 0,2 \text{ dB/Km} + \text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -10\text{dBm} \rightarrow$$

$$\text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} + 600 \text{ dB} = 580 \text{ dB}$$

Επομένως, για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κάτω θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν $580 \text{ dB} / 20 \text{ dB} = 29$ ενισχυτές.

Για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κέντρο η ισχύς στη ζεύξη μετά τον πολυπλέκτη θα είναι ομοίως 10 dBm ενώ η ισχύς στη ζεύξη πριν τον αποπολυπλέκτη θα πρέπει να είναι -10 dBm. Επομένως, για τη ζεύξη μεταξύ του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη στην σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κέντρο θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$10\text{dBm} - 1000 \text{ Km} * 0,2 \text{ dB/Km} + \text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -10\text{dBm} \rightarrow$$

$$\text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} + 200 \text{ dB} = 180 \text{ dB}$$

Επομένως, για τη σύνδεση των κόμβων Πάνω-Κέντρο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν $180 \text{ dB} / 20 \text{ dB} = 9$ ενισχυτές.

Για τη σύνδεση των κόμβων Κέντρο-Κάτω η ισχύς στη ζεύξη μετά τον πολυπλέκτη θα είναι ομοίως 10 dBm ενώ η ισχύς στη ζεύξη πριν τον αποπολυπλέκτη θα πρέπει να είναι -

10 dBm. Επομένως, για τη ζεύξη μεταξύ του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη στην σύνδεση των κόμβων Κέντρο-Κάτω θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$10\text{dBm} - 2000 \text{ Km} * 0,2 \text{ dB/Km} + \text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -10\text{dBm} \rightarrow$$

$$\text{συνολικό κέρδος ενισχυτών} = -20\text{dBm} + 400 \text{ dB} = 380 \text{ dB}$$

Επομένως, για τη σύνδεση των κόμβων Κέντρο-Κάτω θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν $380 \text{ dB} / 20 \text{ dB} = 19$ ενισχυτές.