

Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 21 d'Octubre de 2009

Temps : 1h 30'

Nom:

TEST (6 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

1. Quan un raig de llum incideix des del medi 1 (n_1) al medi 2 (n_2), tota l'energia romandrà al medi 1 (reflexió interna total) si es compleix que:

- a. $\sin \phi_i < n_2/n_1$ i $n_1 < n_2$ b. $\sin \phi_i > n_2/n_1$ i $n_1 < n_2$
c. $\sin \phi_i < n_2/n_1$ i $n_1 > n_2$ d. $\sin \phi_i > n_2/n_1$ i $n_1 > n_2$

on ϕ_i és l'angle que forma el raig incident i la normal a la superfície de separació entre els dos medis.

2. Quan un raig de llum incideix des del medi 1 (n_1) al medi 2 (n_2), la transferència energètica serà màxima quan:

- a. La incidència sigui paral·lela a la superfície de separació entre els dos medis
b. La incidència sigui perpendicular a la superfície de separació entre els dos medis
c. La incidència es produeixi seguint l'angle crític
d. La incidència es produeixi seguint l'angle d'acceptació

3. En una fibra òptica de salt d'índex, trobeu la relació que hi ha entre l'angle crític de la fibra (ϕ_c) i el seu índex de refracció relatiu (Δ).

- a. $\sin \phi_c = 1 - \Delta$ b. $\sin \phi_c = \Delta$ c. $\cos \phi_c = 1 - \Delta$ d. $\cos \phi_c = \Delta$

4. En una fibra òptica de salt d'índex, trobeu la relació lineal aproximada que existeix entre l'angle crític complementari (θ_c) i l'obertura numèrica (NA) de la fibra.

- a. $NA \approx n_1 \theta_c$ b. $NA \approx n_2 \theta_c$ c. $NA \approx \theta_c / n_1$ d. $NA \approx \theta_c / n_2$

5. La corba d'atenuació a la tercera finestra d'una fibra òptica monomode estàndard ve dominada per:

- a. L'absorció infraroja i l'scatering de Mie b. L'absorció infraroja i l'scatering de Rayleigh
c. L'absorció ultraviolada i l'scatering de Mie d. L'absorció ultraviolada i l'scatering de Rayleigh

6. En una fibra òptica en la que es compleix que l'índex de refracció, tant del nucli com del revestiment, és independent de la freqüència de l'ona propagada, podem assegurar que:

- a. La dispersió del material és nul·la b. La dispersió guia-ona és nul·la
c. La dispersió cromàtica és nul·la d. La dispersió modal és nul·la

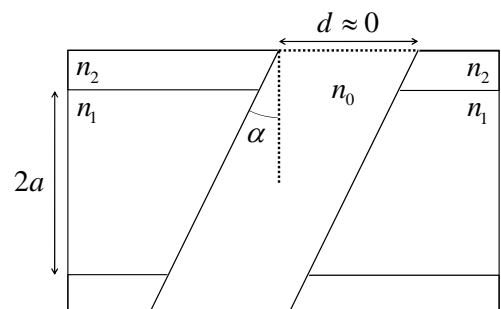
7. El paràmetre de dispersió d'una fibra òptica monomode estàndard és de 16 ps/(nm·Km). Això implica que:

- a. Les freqüències superiors es propaguen més ràpid
b. Les freqüències inferiors es propaguen més ràpid
c. Els modes superiors es propaguen més ràpid
d. Els modes inferiors es propaguen més ràpid

8. Assmunint que l'índex de refracció de l'aire és $n_0 = 1$, en referència a l'angle d'acceptació (θ_a) d'una fibra òptica de salt d'índex podem assegurar que:

- a. És menor que l'angle crític complementari (θ_c) b. És major que l'angle crític (ϕ_c)
c. És major que l'angle crític complementari (θ_c) d. No podem dir res al respecte

9. Es vol acoblar la llum procedent d'un LED a una fibra GRIN. Si no es tenen en compte les pèrdues per reflexió, es pot assegurar que l'eficiència d'acoblament respecte una fibra de salt d'índex de les mateixes dimensions, el mateix índex de refracció del revestiment i un índex de refracció del nucli igual al màxim del de la fibra GRIN, és:
- Igual
 - Pitjor**
 - Millor
 - Depèn del paràmetre del perfil d'índex
10. Es pretén acoblar llum procedent d'una font puntual amb diagrama de radiació $P=P_0 \cdot \cos\theta$ situada a 25 micres d'una fibra òptica de salt d'índex amb un diàmetre del nucli de 50 micres i un angle d'acceptació de 11.3° . La font està situada inicialment a l'eix de la fibra, calculeu la distància radial que es pot allunyar de l'eix (mantenint la distància de separació) sense incrementar les pèrdues d'acoblament.
- 5 micres
 - 10 micres
 - 15 micres
 - 20 micres**
11. Supposeu una connexió entre una fibra multimode que propaga 100 modes i una fibra monomode amb amb els mateixos índexs de refracció del nucli i del revestiment. Les pèrdues de la unió, si es considera una distribució uniforme de la llum en la secció transversal del nucli, es pot assegurar que són:
- < 15 dB
 - Depèn de la finestra de transmissió
 - > 15 dB**
 - Falten dades
12. En una fibra òptica multimode, si fem créixer l'obertura numèrica es pot assegurar que:
- L'angle d'acceptació decreix mentre que la dispersió modal creix
 - L'angle d'acceptació creix mentre que la dispersió modal decreix
 - Tant l'angle d'acceptació com la dispersió modal decreixen
 - Tant l'angle d'acceptació com la dispersió modal creixen**
13. Per a evitar el retorn de potència òptica guiada, es talla el final de la fibra òptica en angle (vegeu la fibra de l'esquerra en la figura). Deduïu per a quin angle mínim α ens assegurem de que els rajos reflectits al final de la fibra no seran guiats.
- $\alpha = \text{asin}(NA/n_1)$**
 - $\alpha = \text{acos}(NA/n_1)$
 - $\alpha = \text{asin}(n_1/NA)$
 - $\alpha = \text{acos}(n_1/NA)$



14. Continuant amb l'exercici anterior, calculeu les pèrdues resultants pel fet d'unir dues fibres amb tall angular (vegeu figura). Preneu $n_1 = 1.5$ i $n_0 = 1$.
- 0.7 dB
 - 0.35 dB**
 - 28 dB
 - 14 dB
15. Es disposa d'una font òptica sintonitzable que emet una portadora òptica en el rang $\lambda = 1.55 \pm 0.25 \mu\text{m}$ amb una amplada espectral $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$. Calculeu en quin marge espectral podrà treballar aquesta font per a que la fibra òptica associada ($2a = 10 \mu\text{m}$ i $NA = 0.11$) tingui un comportament monomode i un increment de dispersió cromàtica relatiu (respecte el punt central) inferior al 10%. Supposeu menyspreable la dispersió guia-ona i preneu $n''(\lambda) = -0.01/\lambda^2$:
- $1.437 \mu\text{m} \geq \lambda \geq 1.722 \mu\text{m}$
 - $1.409 \mu\text{m} \geq \lambda \geq 1.722 \mu\text{m}$
 - $1.437 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722 \mu\text{m}$**
 - $1.409 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722 \mu\text{m}$

PROBLEMA (4 punts)

Marqueu la resposta correcta. Cada resposta correcta suma 0,4 punts mentre que cada resposta errònia resta 0,1 punts.

Les fibres òptiques estàndard (tant multimode com monomode) presenten els següents valors d'atenuació: $\alpha_{0.85\mu\text{m}} = 5 \text{ dB/Km}$, $\alpha_{1.3\mu\text{m}} = 0.5 \text{ dB/Km}$, $\alpha_{1.55\mu\text{m}} = 0.2 \text{ dB/Km}$

D'altra banda, el retard de grup en els marges freqüencials d'interès es pot modelar de la forma:

$$\tau_g = A \cdot \lambda^2 + B \cdot \lambda + C \quad , \text{on} \quad A = 32 \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \quad B = -83.2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \quad C = 5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

1) Deduïu a quina longitud d'ona es minimitza l'efecte de la dispersió cromàtica:

- a) 0 μm b) 0.85 μm **c) 1.3 μm** d) 1.55 μm

2) Doneu el valor aproximat del paràmetre de dispersió a 1^a finestra:

- a) 29 ns/(nm·Km) b) 29 ps/(nm·Km) c) - 29 ns/(nm·Km) **d) - 29 ps/(nm·Km)**

Es preten fer una revisió històrica dels sistemes de comunicacions per fibra òptica a les dècades 70, 80 i 90. Als anys 70 la tecnologia disponible era la següent:

Fibra multimode ($n_1 = 1.45$, $\Delta = 2\%$)

Làser multimode a 850 nm i a 1300 nm ($\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$, $P_{\text{tx}} = 10 \text{ mW}$)

Velocitat de transmissió de 10 Mb/s

Energia de bit exigida pels dels receptors: $E_b = 10^{-17} \text{ J}$

3) Trobeu la màxima distància de transmissió per a un senyal de modulació de la intensitat NRZ. Assumiu que l'amplada espectral del senyal transmès és igual a l'amplada espectral de la font:

- a) 0.5 Km** b) 5 Km c) 16 Km d) 160 Km

4) Es pot dir que el que els sistemes de comunicacions per fibra òptica dels anys 70 estaven limitats per:

- a) atenuació b) disp. cromàtica **c) disp. modal** d) disp. guia-ona

Als anys 80 la tecnologia disponible era la següent:

Fibra monomode ($n_1 = 1.45$, $\Delta = 2\%$)

Làser multimode a 1300 nm i a 1550 nm ($\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$, $P_{\text{tx}} = 10 \text{ mW}$)

Velocitat de transmissió de 100 Mb/s

Energia de bit exigida pels dels receptors: $E_b = 10^{-17} \text{ J}$

5) Trobeu la màxima distància de transmissió per a un senyal de modulació de la intensitat NRZ. Assumiu que l'amplada espectral del senyal transmès és igual a l'amplada espectral de la font:

- a) 66 Km b) 132 Km **c) 140 Km** d) 350 Km

6) Es pot dir que el que els sistemes de comunicacions per fibra òptica dels anys 80 estaven limitats per:

- a) atenuació** b) disp. cromàtica c) disp. modal d) disp. guia-ona

Als anys 90 la tecnologia disponible era la següent:

Fibra monomode ($n_1 = 1.45$, $\Delta = 2\%$)

Làser monomode a 1300 nm i a 1550 nm ($\Delta\lambda = 0.1$ pm, $P_{tx} = 10$ mW)

Velocitat de transmissió de 10 Gb/s

Energia de bit exigida pels dels receptors: $E_b = 10^{-17}$ J

7) Trobeu la màxima distància de transmissió per a un senyal de modulació de la intensitat NRZ. Assumiu que l'amplada espectral del senyal transmès és igual a l'amplada espectral de la font més l'amplada espectral de la modulació. Per aquesta última preneu un valor igual a un terç de la velocitat de transmissió (en Hertz):

- a) 100 Km b) 125 Km c) 200 Km d) 250 Km

8) Es pot dir que el que els sistemes de comunicacions per fibra òptica dels anys 90 estaven limitats per:

- a) atenuació b) disp. cromàtica c) disp. modal d) disp. guia-ona

Per tal de poder fer enllaços de llarga distància s'utilitzen làsers monomode de 3ª finestra, amplificadors òptics per a compensar l'atenuació i fibres DCF per a compensar la dispersió cromàtica. Imagineu un enllaç en el que cada 100 Km de fibra estàndard hi ha un aplicador òptic ideal amb un guany de 25 dB i una bobina de 20 Km de fibra DCF. Les característiques de la fibra DCF són:

Atenuació: $\alpha_{1.55\mu m} = 0.35$ dB/Km

Dispersió Cromàtica: $D_{1.55\mu m} = -80$ ps/(nm·Km)

9) Trobeu la màxima distància de transmissió:

- a) 1250 Km b) 2500 Km c) 5000 Km d) 10000 Km

10) Imagineu que es vol implementar un segon canal sobre la mateixa fibra però a una longitud d'ona 20 nm superior. Per a aquesta longitud d'ona la fibra de transmissió presenta una dispersió de 20 ps/(nm·Km) mentre que la fibra DCF presenta una dispersió de -90 ps/(nm·Km). Calculeu la nova distància de transmissió aproximada.

- a) 4000 Km b) 3000 Km c) 2000 Km d) 1000 Km

Resolució

1) El paràmetre de dispersió és, per definició, la derivada del retard de grup respecte la longitud d'ona, per tant:

$$\tau_g = A \cdot \lambda^2 + B \cdot \lambda + C \quad A = 32 \frac{s}{m^3} \quad B = -83.2 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2} \quad C = 5 \cdot 10^{-9} \frac{s}{m}$$
$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} = 2A \cdot \lambda + B = 0 \rightarrow \lambda_0 = -\frac{B}{2A} = \frac{83.2 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2}}{2 \cdot 32 \frac{s}{m^3}} = 1.3 \mu m$$

La funció resultant és una recta que talla amb l'eix (s'anul·la) a segona finestra.

2) El valor del paràmetre de dispersió a 1ª i a 3ª finestra es calcula:

$$D_{0.85\mu m} = 2A \cdot 0.85\mu m + B = 2 \cdot 32 \frac{s}{m^3} \cdot 0.85\mu m - 83.2 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2} \approx -29 \frac{ps}{nm \cdot Km}$$

$$D_{1.55\mu m} = 2A \cdot 1.55\mu m + B = 2 \cdot 32 \frac{s}{m^3} \cdot 1.55\mu m - 83.2 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2} = 16 \cdot 10^{-6} \frac{s}{m^2} = 16 \frac{ps}{nm \cdot Km}$$

3-4) Per tal de trobar la distància màxima cal comprovar la limitació causada per la dispersió així com la causada per l'atenuació. En quant a la dispersió, donat que es tracta d'una fibra multimode, cal determinar la dispersió modal i la dispersió cromàtica:

$$\tau_{mod} \approx \frac{n_1 \Delta}{c} \approx 100 \frac{ns}{Km} \quad \tau_{crom} = |D| \cdot \Delta\lambda = \begin{matrix} 145 \frac{ps}{Km} \\ 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \lambda = 0.85 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{matrix}$$

$$\Delta = 2\%$$

$$n_1 = 1.5$$

Es comprova que la dispersió dominant és la modal independentment de la finestra. Així doncs assumint una funció de transferència de la fibra gaussiana i una modulació NRZ, la longitud màxima ve donada per l'expressió:

$$L_{disp} \leq \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau \cdot R_b} \approx \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau_{mod} \cdot R_b} = 530 m$$

La distància màxima per dispersió és de aproximadament 0.5 Km. Pel que fa a l'atenuació, donada una potència de transmissió i una energia de bit de recepció, la distància màxima ve donada per:

$$L_{att} \leq \frac{10}{\alpha} \log \left(\frac{P_{tx}}{E_b R_b} \right) = \begin{matrix} 16 Km \\ 160 Km \end{matrix} \quad \begin{matrix} \lambda = 0.85 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{matrix}$$

On ara si que hi ha diferència entre treballar a una finestra o a una altra. De totes maneres la limitació ve donada per la dispersió modal que ens limita la transmissió a 0.5 Km.

5-6) En fibres monomode només hi ha dispersió cromàtica per tant la màxima distància per dispersió serà:

$$\tau_{crom} = |D| \cdot \Delta\lambda = \begin{matrix} 80 \frac{ps}{Km} \\ 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{matrix}$$

$$L_{disp} \leq \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau \cdot R_b} \approx \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau_{mod} \cdot R_b} = \begin{matrix} 66 Km \\ \infty \end{matrix} \quad \begin{matrix} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{matrix}$$

Donat que la dispersió cromàtica sanu-la a 2ª finestra, la distància màxima és infinita. Pel que fa a la limitació per atenuació:

$$L_{att} \leq \frac{10}{\alpha} \log \left(\frac{P_{tx}}{E_b R_b} \right) = \begin{matrix} 350 Km \\ 140 Km \end{matrix} \quad \begin{matrix} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{matrix}$$

Així doncs, la millor opció és treballar a 2ª finestra ja que, tot i que l'atenuació és pitjor, l'efecte de la dispersió cromàtica a 3ª finestra és molt fort.

7-8) La limitació per dispersió cromàtica tenint en compte l'amplada espectral de la modulació és la següent:

$$\tau_{crom} = |D| \cdot \Delta\lambda = \frac{43 \frac{fs}{Km}}{0} \quad \begin{array}{l} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{array}$$

$$\Delta\lambda \approx \Delta f \frac{\lambda^2}{c} = \frac{R_b}{3} \frac{\lambda^2}{c}$$

$$\Delta f = \frac{R_b}{3}$$

$$L_{disp} \leq \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau \cdot R_b} \approx \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau_{mod} \cdot R_b} = \frac{124.5 Km}{\infty} \quad \begin{array}{l} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{array}$$

La limitació per atenuació:

$$L_{att} \leq \frac{10}{\alpha} \log \left(\frac{P_{tx}}{E_b R_b} \right) = \frac{250 Km}{100 Km} \quad \begin{array}{l} \lambda = 1.55 \mu m \\ \lambda = 1.3 \mu m \end{array}$$

Per tant el millor cas és treballar a 3ª finestra i estem limitats per dispersió cromàtica.

9) Com que la dispersió cromàtica està perfectament compensada només cal pensar en la limitació per atenuació. Després d'un tram de 100 Km de fibra estàndard es tenen unes pèrdues de 20 dB (0.2 dB/Km x 100 Km). L'amplificador té un guany de 25 dB i la fibra DCF unes pèrdues de 7 dB (0.35 dB/Km x 20 Km). El balanç de cada tram és de 2 dB de pèrdues o el que és el mateix, un paràmetre d'atenuació equivalent de 0.02 dB/Km (2 dB / 100 Km). Així doncs la distància màxima per atenuació ve donada per:

$$\Delta\alpha = \frac{2 dB}{100 Km} = 0.02 \frac{dB}{Km} \rightarrow L_{att} \leq \frac{10}{\Delta\alpha} \log \left(\frac{P_{tx}}{E_b R_b} \right) = 2500 Km$$

10) En aquest cas tenim una certa dispersió cromàtica residual. Després d'un tram de 100 Km de fibra estàndard tenim 2000 ps/nm acumulats (20 ps/(nm·Km) x 100 Km). La fibra DCF introdueix -1800 ps/nm (-90 ps/(nm·Km) x 20 Km). Així doncs la dispersió cromàtica residual és de 200 ps/nm o, el que és el mateix, el paràmetre de dispersió equivalent és de 2 ps/(nm·Km) (200 ps/nm / 100 Km). Finalment, la distància màxima serà:

$$L_{disp} \leq \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot \tau_{crom} \cdot R_b} = \frac{6\sqrt{\ln 2}}{\pi \cdot |D| \frac{\lambda^2}{c} \cdot R_b^2} = 993 Km$$

Donat que aquesta és inferior a la limitació per atenuació es pot dir que la màxima distància de transmissió d'aquest enllaç és d'aproximadament 1000 Km.