

# Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 22 d'Octubre de 2008

Temps : 1h 15'

Nom:

## TEST (6 punts)

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

- El principi de reflexió interna total s'explica a partir de:
  - L'òptica de rajos (òptica geomètrica)
  - L'òptica d'ones (escalar)
  - L'òptica electromagnètica
  - L'òptica quàntica
- En una fibra òptica estàndard (ITU-T G.652), els materials emprats són:
  - El diòxid de silici per al nucli i un polímer per al revestiment
  - Un polímer per al nucli i el diòxid de silici per al revestiment
  - El diòxid de silici tant per al nucli com per al revestiment
  - Un polímer tant per al nucli com per al revestiment
- En el procés de fabricació d'una fibra òptica:
  - Es fabrica una versió a escala tant del nucli com del revestiment per separat, després s'estiren per aconseguir les dimensions desitjades d'ambdós i finalment es junten.
  - Es fabrica una versió a escala del nucli que després s'estira per aconseguir les dimensions definitives i finalment s'afegeix el revestiment per deposició.
  - Es fabriquen tant el nucli com el revestiment a la vegada per donar lloc a una "preforma" que després s'estira per aconseguir les dimensions definitives.
  - Es fabriquen tant el nucli com el revestiment a la vegada i en l'escala definitiva mitjançant uns processos anomenats Inside/Outside Vapor Deposition (I/OVD).
- El perfil d'índex de les fibres òptiques:
  - Pot ser de salt d'índex o gradual tant en fibres monomode com en fibres multimode.
  - És sempre gradual en fibres multimode.
  - És sempre de salt d'índex en fibres monomode.
  - És de salt d'índex en fibres monomode estàndard però és més complex en fibres monomode amb tractament de la dispersió cromàtica.
- Per a que es doni reflexió interna total, els rajos incidents al nucli d'una fibra amb índex de refracció nucli/revestiment  $n_1/n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) ho han de fer amb un angle d'entrada  $\theta_i$  que ha de complir (assumiu  $n_0 = 1$ ):
  - $\sin \theta_i \leq (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$
  - $|\sin \theta_i| \leq (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$
  - $\sin \theta_i \leq (n_1^2 - n_2^2)^2$
  - $|\sin \theta_i| \leq (n_1^2 - n_2^2)^2$
- La teoria de propagació en una fibra òptica (basada en l'òptica geomètrica):
  - Només és vàlida per aquells rajos que entren a la fibra pel punt central del nucli.
  - Només és vàlida per aquells rajos que entren a la fibra pel nucli segons un pla que talla en el centre del mateix.
  - És vàlida per qualsevol raig que entri a la fibra pel nucli segons un pla perpendicular a la superfície d'entrada.
  - És vàlida per qualsevol raig que entri a la fibra pel nucli.
- En una fibra òptica l'obertura numèrica (NA):
  - Creix quan  $n_2$  creix si  $n_1$  no canvia.
  - Decreix quan  $n_2$  creix si  $n_1$  no canvia.
  - Creix quan tant  $n_2$  com  $n_1$  creixen.
  - Decreix quan tant  $n_2$  com  $n_1$  creixen.

8. De la freqüència normalitzada d'una fibra òptica, podem dir que:
- Com més gran, major concentració d'energia dels modes de propagació dins del nucli
  - Com més gran, menor número de modes de propagació
  - És inversament proporcional a la freqüència d'emissió
  - Totes són certes
9. La dispersió guia-ona compleix que:
- És nul·la si els materials que conformen el nucli i el revestiment presenten una dispersió del material nul·la.
  - És diferent de zero quan es transmet un senyal digital encara que l'amplada espectral de la font sigui infinitament estreta.
  - És sempre menyspreable enfront de la dispersió del material.
  - Només es dona en fibres monomode.
10. Es connecten dues fibres exactament iguals que tenen un radi del nucli  $a$  i una obertura numèrica  $NA = \sqrt{2} - 1$ . Les pèrdues degudes exclusivament a la distància de separació entre elles ( $D$ ) seran del 50% si (assumiu  $n_0=1$ ):
- $D = a$
  - $D = \sqrt{2}a$
  - $D = 2a$
  - és impossible
11. L'atenuació intrínseca al fet d'unir dues fibres òptiques idèntiques excepte en l'índex de refracció del revestiment  $n_2/n_3$  (sentit  $n_2 \rightarrow n_3$ ) són:
- $10 \log \left\{ (n_1^2 - n_2^2) / (n_1^2 - n_3^2) \right\}$   $n_2 < n_3$
  - $10 \log \left\{ (n_1^2 - n_2^2) / (n_1^2 - n_3^2) \right\}$   $n_2 > n_3$
  - $20 \log \left\{ (n_1^2 - n_2^2) / (n_1^2 - n_3^2) \right\}$   $n_2 > n_3$
  - $20 \log \left\{ (n_1^2 - n_2^2) / (n_1^2 - n_3^2) \right\}$   $n_2 < n_3$
12. Determineu l'expressió de la fracció de potència òptica emesa des d'una font puntual que és acceptada per una fibra de salt d'índex amb obertura numèrica  $NA$  i índex de refracció del nucli  $n_1$ . La font radia en un únic sentit de l'espai de la forma  $\cos^n(\theta)$  i l'índex de refracció de l'ambient és  $n_0=1$ . Supposeu que la font està a molt poca distància de la fibra:
- $\eta_c = R \left\{ (1 - NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$   $R = \left[ (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1) \right]^2$
  - $\eta_c = (1 - R) \left\{ (1 - NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$   $R = \left[ (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1) \right]^2$
  - $\eta_c = R \left\{ 1 - (1 - NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$   $R = \left[ (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1) \right]^2$
  - $\eta_c = (1 - R) \left\{ 1 - (1 - NA^2)^{(n+1)/2} \right\}$   $R = \left[ (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1) \right]^2$
13. Una fibra de salt d'índex presenta les següents característiques: diàmetre del nucli  $2a=50$  micres, índex de refracció del nucli  $n_1=1.47$ , diferència relativa d'índexs  $\Delta=0.001$  i coeficient de dispersió del material  $D_M=25$  ps/nm/Km. Si injectem llum procedent d'un LED amb una longitud d'ona central  $\lambda=1550$  nm i una amplada espectral  $\Delta\lambda=80$  nm, deduiu la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10 Mb/s en format RZ.
- 0.5 km
  - 1 km
  - 5 km
  - 10 km
14. 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  $\Delta\lambda=0.3$  nm. Calculeu en quin marge espectral podrà treballar aquesta font per a que la fibra òptica associada ( $2a=10$  micres 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  $n''(\lambda) = -0.01/\lambda^2$ :
- $1.437 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722 \mu\text{m}$
  - $1.347 \mu\text{m} \geq \lambda \geq 1.722 \mu\text{m}$
  - $1.409 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722 \mu\text{m}$
  - $1.490 \mu\text{m} \geq \lambda \geq 1.722 \mu\text{m}$
15. Per tal d'eliminar la potència òptica de retorn que es produeix per reflexió al final d'una fibra òptica, es practica un tall angular enlloc de perpendicular. L'angle de tall que garantirà que la llum de retorn no complirà reflexió interna total ha de ser:
- Superior a l'angle crític
  - Inferior a l'angle crític
  - Superior a l'angle crític complementari
  - Inferior a l'angle crític complementari

### PROBLEMA (4 punts)

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

Es pretén dissenyar un enllaç de comunicacions. Es disposa d'una fibra òptica monomode amb un paràmetre d'atenuació (3ª finestra)  $\alpha = 0.2$  dB/Km i un paràmetre de dispersió cromàtica (3ª finestra)  $D = 17$  ps/(nm·Km):

- 1) Des del punt de vista de l'atenuació, la màxima distància de transmissió ve determinada per l'energia de bit. La seva definició, a partir de la potència òptica promig ( $P$ ) i el temps de bit ( $T_b$ ), és la següent:  
a)  $E_b = P/T_b$                       b)  $E_b = T_b P$                       c)  $E_b = T_b/P$                       d)  $E_b = 1/T_b P$
- 2) Si es disposa d'un receptor que requereix una energia de bit mínima ( $E_{\min}$ ) de  $10^{-15}$  J per a garantir la qualitat de la transmissió, deduiu la distància màxima de l'enllaç en funció de la velocitat de transmissió ( $R_b$ ), la potència del transmissor ( $P_T$ ) i de  $E_{\min}$ . Assumiu una modulació d'intensitat RZ.  
a)  $L \leq 10/\alpha \cdot \log(P_T/(E_{\min} \cdot 2R_b))$                       c)  $L \leq 10/\alpha \cdot \log((E_{\min} \cdot 2R_b)/P_T)$   
b)  $L \leq 20/\alpha \cdot \log(P_T/(E_{\min} \cdot R_b))$                       d)  $L \leq 20/\alpha \cdot \log((E_{\min} \cdot R_b)/P_T)$
- 3) Si es vol establir una connexió a 10 Gb/s i es disposa d'una potència òptica de transmissió de 0 dBm, calculeu la distància màxima de l'enllaç. Assumiu en aquest cas una modulació d'intensitat NRZ.  
a) 50 Km                      b) 100 Km                      c) 20 m                      d) 40 m
- 4) Si per un accident en unes tasques de manteniment es malmet un connector afegint 10 dB d'atenuació, la distància de transmissió serà un:  
a) 10% inferior                      b) 25% inferior                      c) 50% inferior                      d) 75% inferior
- 5) Per a quantificar la limitació imposada per la dispersió es transmet un pols gaussià  $P_0(t) = A_0^2 \exp[-t^2/2\sigma_0^2]$ . Si es defineix la durada temporal del pols ( $T_0$ ) com el marge temporal en el qual la potència òptica cau com a molt un factor  $1/\sqrt{e^N}$ , aquesta valdrà:  
a)  $T_0 = N\sigma_0$                       b)  $T_0 = 2N\sigma_0$                       c)  $T_0 = \sqrt{N}\sigma_0$                       d)  $T_0 = 2\sqrt{N}\sigma_0$
- 6) S'observa que a la sortida de la fibra, tot i que el pols s'ha eixamplat, es manté la forma gaussiana  $P_L(t) = A_L^2 \exp[-t^2/2\sigma_L^2]$ . Es defineix el factor d'eixamplament  $B \equiv \sigma_L^2/\sigma_0^2 = 1 + (\beta_2 L/\sigma_0^2)^2$ , on  $\beta_2$  és el coeficient de dispersió cromàtica ( $s^2/m$ ). Per a limitar la interferència intersimbòlica (ISI) es fixa un eixamplament màxim  $B = 2$ , determineu la distància màxima de l'enllaç prenent la relació  $T_0 = 2\sigma_0$ :  
a)  $L \leq 2\beta_2/T_0^2$                       b)  $L \leq 4\beta_2/T_0^2$                       c)  $L \leq T_0^2/2\beta_2$                       d)  $L \leq T_0^2/4\beta_2$
- 7) Ara deixeu-ho en funció del paràmetre de dispersió  $D$  ( $s/m^2$ ) i de la velocitat de transmissió  $R_b$  (b/s). Prenent la relació  $R_b = 1/T_0$ :  
a)  $L \leq |2\pi c R_b^2 / 4D \lambda_p^2|$                       c)  $L \leq 2\pi c R_b^2 / 4D \lambda_p^2$   
b)  $L \leq |2\pi c / 4R_b^2 D \lambda_p^2|$                       d)  $L \leq 2\pi c / 4R_b^2 D \lambda_p^2$
- 8) Si la velocitat de transmissió és de 10 Gb/s, calculeu quina serà la longitud de l'enllaç màxima:  
a)  $L_{\max} = 1150$  Km                      b)  $L_{\max} = 115$  Km                      c)  $L_{\max} = 11.5$  Km                      d)  $L_{\max} = 1.15$  Km

- 9) Per a compensar la dispersió es disposa d'una fibra de compensació de dispersió (DCF) que presenta un paràmetre d'atenuació de  $\alpha = 0.6$  dB/km i un paràmetre de dispersió cromàtica  $D = -85$  ps/(km·nm). Deduïu quanta fibra serà necessària per cada 100 Km de fibra estàndard:  
a) 500 Km                      b) 100 Km                      **c) 20 Km**                      d) 5 Km
- 10) Si es disposa d'amplificadors òptics ideals de 40 dB de guany, quina serà la màxima distància entre amplificadors si la font emet 0 dBm i al receptor li ha d'arribar 1 mW ?. Els trams de fibra DCF no computen en distància:  
**a) 125 Km**                      b) 150 Km                      c) 200 Km                      d) 240 Km
- 

### **Resolució**

1-3). Màxima distància de transmissió marcada per l'energia de bit:

L'energia de bit es defineix com el producte entre la potència òptica mitjana en un bit i el temps de bit  $E_b = P \cdot T_b$ . Aquesta decreix amb la propagació degut a l'atenuació introduïda per la fibra:

$$\underbrace{P(L)T_b}_{E_b(L)} = \underbrace{P(0)T_b}_{E_b(0)} \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L}{10}}$$

Ara donada una energia de bit mínima es pot determinar la distància de l'enllaç màxima:

$$\begin{aligned} P(0)T_b \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L}{10}} &\geq E_{b,\min} \rightarrow \log\left(\frac{P(0)T_b}{E_{b,\min}}\right) \geq \frac{\alpha \cdot L}{10} \\ \rightarrow L &\leq \frac{10}{\alpha} \log\left(\frac{P(0)T_b}{E_{b,\min}}\right) = \frac{10}{\alpha} \log\left(\frac{P(0)}{E_{b,\min} R_b}\right) \end{aligned}$$

Ara cal diferenciar entre una modulació d'intensitat NRZ i una RZ ja que l'energia promig és diferent:

$$\begin{aligned} \text{NRZ} \quad \rightarrow P(0) &= P_T \quad \rightarrow L_{\text{NRZ}} \leq \frac{10}{\alpha} \log\left(\frac{P_T}{E_{b,\min} R_b}\right) = 100 \text{ Km} \\ \text{RZ} \quad \rightarrow P(0) &= P_T/2 \quad \rightarrow L_{\text{RZ}} \leq \frac{10}{\alpha} \log\left(\frac{P_T}{E_{b,\min} 2R_b}\right) = 85 \text{ Km} \end{aligned}$$

4). Si es perden 10 dB de de potència òptica, això implica que el marge d'atenuació que pot introduir la fibra quedarà reduït:

$$\begin{aligned} E_{b,\min} &= P(L)T_b \quad \rightarrow P(L) = E_{b,\min} R_b = 10^{-2} \text{ mW} \\ A &= 10 \log\left(\frac{P(0)}{P(L)}\right) = \begin{aligned} &\xrightarrow{\text{NRZ}} 10 \log\left(\frac{1 \text{ mW}}{10^{-2} \text{ mW}}\right) = 20 \text{ dB} = \underbrace{A_{\text{fibra}}}_{10 \text{ dB}} + 10 \text{ dB} \\ &\xrightarrow{\text{RZ}} 10 \log\left(\frac{0.5 \text{ mW}}{10^{-2} \text{ mW}}\right) = 17 \text{ dB} = \underbrace{A_{\text{fibra}}}_{7 \text{ dB}} + 10 \text{ dB} \end{aligned} \\ A_{\text{fibra}} &= \alpha (\text{dB/Km}) \cdot L (\text{Km}) \quad \rightarrow L (\text{Km}) = \frac{A_{\text{fibra}}}{\alpha (\text{dB/Km})} = \begin{aligned} &\xrightarrow{\text{NRZ}} 50 \text{ Km} \\ &\xrightarrow{\text{RZ}} 35 \text{ Km} \end{aligned} \end{aligned}$$

Es veu com la reducció és del 50% / 60%.

5). Durada d'un pols gaussià:

$$P_0(t) = A_0^2 e^{-t^2/2\sigma_0^2} \leq A_0^2 \frac{1}{\sqrt{e^N}} = A_0^2 e^{-N/2} \quad \rightarrow t = \pm \sqrt{N}\sigma_0 \quad \rightarrow T_0 = 2\sqrt{N}\sigma_0$$

6-8). Màxima distància de transmissió marcada per la condició de dispersió (factor d'eixamplament):

$$B = 1 + (\beta_2 L / \sigma_0^2)^2 \leq 2 \quad \rightarrow (\beta_2 L / \sigma_0^2)^2 \leq 1 \quad \rightarrow \frac{\beta_2 L}{\sigma_0^2} \leq 1 \quad \xrightarrow{T_0 = 2\sigma_0} L \leq \frac{T_0^2}{4\beta_2}$$

Ara ho posem en funció del paràmetre de dispersió fent ús del mòdul per a donar sentit físic. També diferenciem el tipus de modulació utilitzada:

$$L \leq \frac{T_0^2}{4\beta_2} = \frac{\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D}{2\pi c} \rightarrow \frac{2\pi c T_0^2}{4|D|\lambda_p^2} = \frac{NRZ \rightarrow R_b = 1/T_0}{16R_b^2 |D| \lambda_p^2} = 115 \text{ Km}$$

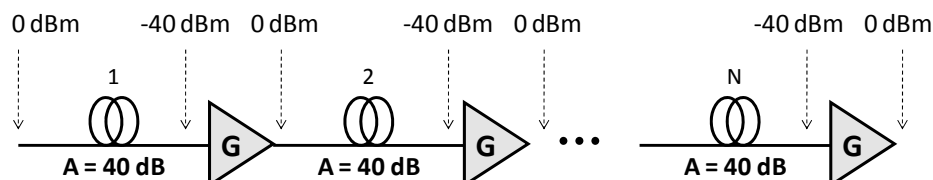
$$\xrightarrow{RZ \rightarrow R_b = 1/2 T_0} \frac{2\pi c}{16R_b^2 |D| \lambda_p^2} \approx 29 \text{ Km}$$

En la modulació RZ es pren un temps de bit  $T_b = 2T_0$ , és a dir que una ocupació del 50%.

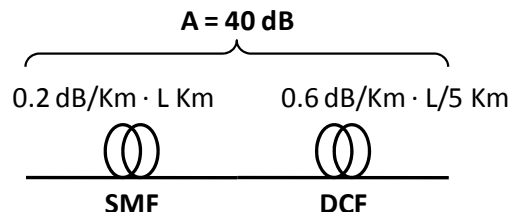
9). Per a poder compensar la dispersió cromàtica el producte  $L \cdot D$  ha de ser de igual valor absolut i de signe contrari, per tant:

$$L_{STD} \cdot D_{STD} = -L_{DCF} \cdot D_{DCF} \rightarrow L_{DCF} = -L_{STD} \frac{D_{STD}}{D_{DCF}} = 20 \text{ Km}$$

10). Si la font transmet 0 dBm i al fotodetector li ha d'arribar 1 mW (0 dBm) l'atenuació de tot l'enllaç ha de ser perfectament compensada pels amplificadors. Ara donat que un guany de 40 dB la situació és la que es veu a la figura:



Així doncs cada tram de fibra entre amplificadors ha d'atenuar 40 dB entre la fibra de transmissió més la fibra de compensació:



Per tant, donats els respectius paràmetres d'atenuació de les fibres i que la longitud de la fibra de compensació és 1/5 de la fibra de transmissió, es pot calcular la longitud del tram:

$$40[\text{dB}] = \alpha_{STD} \cdot L_{STD} + \alpha_{DCF} \cdot L_{DCF} = 0.2[\text{dB/Km}] \cdot L[\text{Km}] + 0.6[\text{dB/Km}] \cdot \frac{L}{5}[\text{Km}]$$

$$L = \frac{40[\text{dB}]}{0.2[\text{dB/Km}] + \frac{0.6}{5}[\text{dB/Km}]} = 125 \text{ Km}$$