
Col·lecció de Problemes de Comunicacions Òptiques

Fibres Òptiques

Joan M. Gené Bernaus

Grup de Comunicacions Òptiques
Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Exercici 1

Una fibra multimode de salt d'índex amb un diàmetre del nucli $2a=80\mu\text{m}$ i una diferència d'índexs relativa $\Delta=0.015$, opera a una $\lambda=0.85\mu\text{m}$. Si l'índex de refracció del nucli és de 1.48, calculeu:

- La freqüència normalitzada (V) de la fibra.
- El número aproximat de modes guiats (M).
- L'obertura numèrica (NA) i l'angle sòlid d'acceptació (θ_a) de la separació fibra-aire.
- Calculeu l'ample de banda de la fibra per unitat de longitud (f_0).

Solució:

- $V=75.79$
- $M=2872$
- $NA=0.256$
- $\theta_a=14.85^\circ$
- $f_0=5.06 \text{ MHz}\cdot\text{km}$

Exercici 2

Una fibra òptica amb nucli i revestiment de vidre presenta els índexs de refracció respectius $n_1=1.48$ i $n_2=1.46$.

- Demostreu que si un raig de llum entra a la fibra amb un angle de 10° respecte l'eix, es verificarà el principi de reflexió interna total.
- Si la fibra treballa a 2ª finestra, calculeu el diàmetre màxim del seu nucli per tal de garantir un comportament monomode.

Solució:

- Angle acceptació $> 10^\circ$
- Diàmetre < 4.1 micres

Exercici 3

- Calculeu l'angle intern de reflexió total d'una fibra de salt d'índex que presenta una diferència d'índexs relativa del 0,5 %.
- Demostreu la relació lineal aproximada que existeix entre l'angle anterior i l'obertura numèrica de la fibra.
- Si la fibra treballa a segona finestra, quina condició s'ha de complir per a garantir un comportament monomodal?

Solució:

- $\theta_c=84.27$
- $NA \approx n_1 \phi_c$
- $2\pi a NA < 2.405\lambda$ ($\lambda=1.3\mu\text{m}$)

Exercici 4

Una fibra òptica presenta una dispersió modal de 20ps/km i un coeficient de dispersió intramodal de 10 ps/km·nm. Si la font òptica té una amplada espectral $\Delta\lambda=1\text{nm}$, calculeu:

- La velocitat de transmissió màxima i l'amplada de banda de la fibra.
- La longitud màxima de l'enllaç per a poder transmetre 500 Mb/s.

Considereu codificació NRZ.

Solució:

- $R_{B\text{max}}=23.7 \text{ (Gb/s)}\cdot\text{Km}$, $B_E=11.85 \text{ GHz}\cdot\text{Km}$
- $L_{\text{max}}=47,6 \text{ Km}$

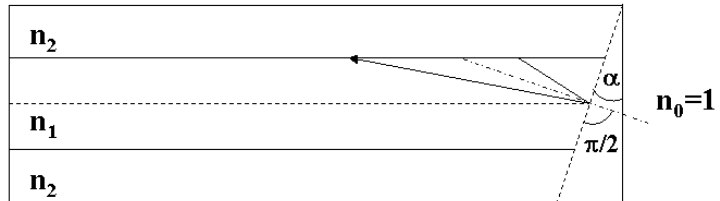
Exercici 5

En una fibra multimode de salt d'índex amb $V=20$ es redueix a la meitat la diferència relativa d'índexs de refracció, què succeeix amb el nombre de modes si l'índex de refracció del nucli es manté constant ?.

Solució: Es redueix a la meitat

Exercici 6

Per a evitar el retorn de potència òptica guiada, es talla el final de la fibra òptica en angle (vegeu la figura). Deduïu per a quin angle mínim α ens assegurem de que no hi haurà potència òptica de retorn pel nucli expressant-ho en funció de l'angle crític.



Solució: $\alpha > \theta_c$

Exercici 7

Una fibra monomode (a $1.3 \mu\text{m}$) de salt d'índex té un radi del nucli $a = 3.5 \mu\text{m}$. Els índexs de refracció del nucli i del revestiment són respectivament $n_1 = 1.447$, $n_2 = 1.442$. Els números de grup del nucli i del revestiment són respectivament $n_{1g} = 1.462$ i $n_{2g} = 1.457$.

- Confirmeu que es tracta d'una fibra monomode.
- Calculeu la dispersió guia-ona si la font emprada és un LED amb $\Delta\lambda = 50\text{nm}$.

Solució:

- La fibra és monomode
- $D_w = 308\text{ps/Km}$

Exercici 8

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 $\Delta=0.01$
- 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, deduïu la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10Mb/s en format NRZ.

Solució: 1.086 Km

Exercici 9

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 $\Delta=0.01$
- Coeficient de dispersió del material $D_M=25$ ps/nm·Km

Es demana:

- a) Si injectem llum procedent d'un LED amb una longitud d'ona central $\lambda=1550$ nm i una amplada espectral $\Delta\lambda=80$ nm, deduïu la màxima distància a la que podem transmetre un senyal digital de 10 Mb/s en format RZ.
- b) Quin hauria de ser com a màxim el temps de vida del portador del LED per a permetre la transmissió de l'apartat anterior ?.

Solució:

- a) 0.541 Km
- b) 16 ns / 16.7 ns

Exercici 10

Es disposa d'una font òptica sintonitzable que emet una portadora òptica en el rang $\lambda = 1.25 \pm 0.25 \mu\text{m}$ amb una amplada espectral $\Delta\lambda = 0.3\text{nm}$. Es tracta de calcular 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 una dispersió relativa inferior al 10%, és a dir:

$$\left| \tau_{\lambda} - \tau_{1.55\mu\text{m}} \right| \leq \frac{\tau_{1.55\mu\text{m}}}{10}$$

Nota: Suposeu menyspreable la dispersió guia-ona i preneu $n''(\lambda) = -\frac{0.01}{\lambda^2}$.

Solució: $1.437\mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.722\mu\text{m}$

Exercici 11

Considereu una fibra de salt d'índex de SiO_2 amb les següents dades:

- $n_1 = 1.48, n_2 = 1.46$
- $a = 2.03\mu\text{m}$
- $\lambda_p = 1550\text{nm}$
- $n''(\lambda) = -\frac{0.01}{\lambda^2}$

- a) Deduïu l'expressió del coeficient de dispersió del material.
- b) Si s'utilitza un làser multimode amb $\lambda_p = 1550\text{nm}$ i $\Delta\lambda = 5\text{nm}$, trobeu el valor de la dispersió del material.
- c) Considereu que la dispersió guia-ona pot calcular-se a partir de la següent expressió:

$$\tau_w = D_w (n_1 - n_2) \frac{V}{c\lambda} \Delta\lambda$$

On D_w depèn de V i que la relació es pot linealitzar a trams per valors de V compresos entre 1 i 3:

- $V = 1 \rightarrow D_w = -2$
- $V = 2 \rightarrow D_w = -0.5$
- $V = 2.5 \rightarrow D_w = -0.2$
- $V = 3 \rightarrow D_w = 0$

Quin valor hauria de tenir el radi de la fibra per a aconseguir un mínim de dispersió intramodal a la λ_p anterior ?

- d) Quin comentari es podria fer respecte la dispersió total sota les noves condicions geomètriques deduïdes a l'apartat anterior ?

Exercici 12

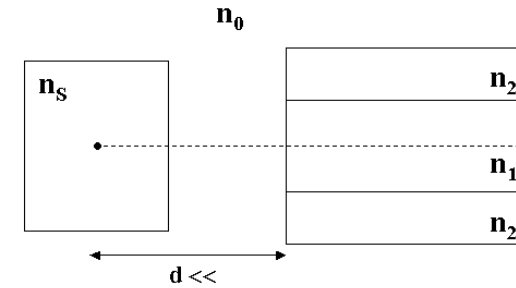
- a) Calculeu la fracció de potència òptica emesa des d'un LED que és acceptada per una fibra de salt d'índex en aire amb obertura numèrica $NA=0.1$ i índex de refracció del nucli $n_1=1.46$. Suposeu que el LED té una superfície plana, un índex de refracció $n_s=3.6$ i un diagrama de radiació proporcional a $\cos^4\theta$. Suposeu que el LED està enganxat al nucli de la fibra i que l'àrea d'emissió és menor que la del nucli.
- b) Respecte les pèrdues d'acoblament LED-fibra, si el diagrama de radiació fos proporcional a $\cos\theta$ (Diagrama de Lambert), augmentarien o disminuirien ?.

Solució:

- a) -34.62 dB
b) Augmentarien (4 dB)

Exercici 13

Considereu una font òptica puntual que emet llum des de la zona activa de manera isotròpica (vegeu la figura). Calculeu la relació entre la potència òptica injectada a la fibra i la potència òptica total emesa per la font (eficiència d'acoblament) tenint en compte que la distància font-fibra és menyspreable.

**Dades:**

Índex de refracció zona activa: $n_s=3.5$
Índex de refracció de l'entorn: $n_0=1$
Índex de refracció del nucli de la fibra: $n_1=1.5$
Diferència relativa d'índexs de la fibra: $\Delta=1\%$

Solució: -32.15 dB

Exercici 14

- a) Deduïu les pèrdues que es generen pel fet d'unir dues fibres òptiques que presenten diferents tamanys pel que fa al nucli. La primera fibra té un radi del nucli $a_1=50$ micres mentre que la segona $a_2=10$ micres. Què passa si canviem el sentit de propagació ?.
- b) Deduïu les pèrdues que es generen pel fet d'unir dues fibres òptiques idèntiques excepte pel que fa a l'obertura numèrica. La primera fibra té una $NA_1=0.1$ i la segona $NA_2=0.08$. Feu el mateix per al cas $NA_2=0.12$.

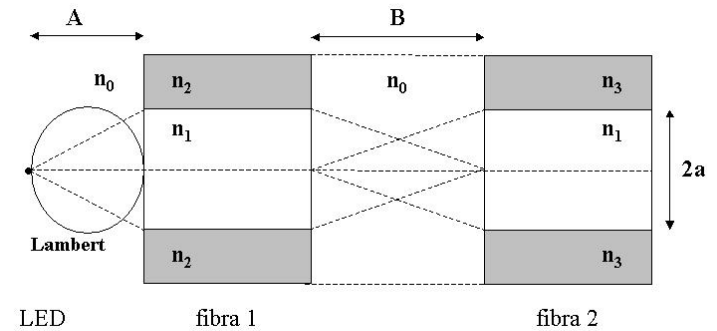
Solució:

- a) $L_{dB} = 7 \text{ dB} / L_{dB} = 0 \text{ dB}$
- b) $L_{dB} = 1.94 \text{ dB} / L_{dB} = 0 \text{ dB}$

Exercici 15

Considereu el conjunt: LED + fibra 1 + fibra 2 de la figura. Es demana:

- a) La fracció de potència òptica injectada a la fibra 1 respecte la potència òptica total radiada per la font (eficiència d'acoblament) en funció de la distància A. Preneu la font com a puntual i amb un diagrama de radiació de Lambert.
- b) Deduïu les pèrdues existents en la unió entre la fibra 1 i la fibra 2 sabent que estan separades una distància B i que presenten diferents índexs de refracció del revestiment.



Solució:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } & A \leq \frac{n_0 a}{NA} \rightarrow \eta = (1-R) \left(\frac{NA}{n_0} \right)^2 \\
 & A \geq \frac{n_0 a}{NA} \rightarrow \eta \approx (1-R) \left(\frac{a}{A} \right)^2 \\
 \text{b) } & n_3 \leq n_2 \rightarrow L_{dB} \equiv 2 \cdot 10 \log \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right) + 10 \log \left(\frac{a}{a+B} \frac{1}{\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}} \right)^2 + 10 \log \left(\frac{n_1^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \right) \\
 & n_3 \geq n_2 \rightarrow L_{dB} \equiv 2 \cdot 10 \log \left(1 - \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \right) + 10 \log \left(\frac{a}{a+B} \frac{1}{\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}} \right)^2
 \end{aligned}$$