Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENT DE TEORIA DEL SENYAL Y COMUNICACIONS
-

Comunicaciones Ópticas
7 de juny 2011

Data notes provisionals:	20 de juny
Període d'al.legacions:	21-22 de juny
Data notes revisades:	27 de juny

Professors: Joan M. Gené, Sergio Ruiz Moreno, MªJosé Soneira

Informacions addicionals:

- Durada de la prova: 1h 45m. Es penalitzarà el retard en el lliurament.
- Les respostes dels diferents exercicis s'entregaran en fulls separats. Poseu-hi el nom.
- En el test, les respostes incorrectes resten 1/4.

NOM:

Ejercicio 1 (Test) – 40 %

1. *El nivell de scattering de Rayleigh en una fibra òptica estàndard és*
   - *a) proporcional a la quarta potència de la longitud d'ona.*
   - *b) inversament proporcional a la quarta potència de la longitud d'ona.*
   - *c) aproximadament independent de la longitud d'ona.*
   - *d) menyspreable a l'entorn de la tercera finestra.*
2. *La dispersió del material és pràcticament nul·la en fibres monomode estàndard (ITU-T G.652) a*
   - *a) La dispersió cromàtica no es pot donar en fibres monomode.*
   - *b) primera finestra.*
   - *c) segona finestra.*
   - *d) tercera finestra.*
3. *Es pretén transmetre un senyal òptic de λ=1531 nm modulat en intensitat en format NRZ a R_b=20 Gb/s per una fibra monomode amb un paràmetre de dispersió cromàtica de D=-16 ps/(nm·Km). Determineu la màxima distància de transmissió si es demana que l'eixamplament provocat per la dispersió cromàtica sigui, com a màxim, igual al temps de bit. Considereu que l'amplada espectral del senyal a transmetre és $\Delta f=R_b$ [Hz].*
   - *a) 5 Km*
   - *b) 20 Km*
   - *c) 80 Km*
   - *d) 320 Km*
4. *Es disposa d'una fibra òptica monomode estàndard (SSMF) amb un paràmetre d'atenuació α = 0.2 dB/Km i un paràmetre de dispersió cromàtica D=17 ps/(nm·Km). Per a compensar la dispersió es disposa d'una fibra de compensació de dispersió (DCF) que presenta un paràmetre d'atenuació α= 0.6 dB/Km i un paràmetre de dispersió cromàtica D=-85 ps/(nm·Km). Deduïu quanta fibra DCF serà necessària per cada 80 Km de fibra estàndard.*
   - *a) 16 Km*
   - *b) 20 Km*
   - *c) 24 Km*
   - *d) 28 Km*
5. *Continuant amb l'exercici anterior, si es disposa d'amplificadors òptics ideals de 32 dB de guany, quina serà la màxima distància entre amplificadors si han de compensar totalment les pèrdues del tram ?. Teniu en compte que els mòduls de fibra DCF són unes bobines i que, per tant, no computen en quant a distància de l'enllaç.*
   - *a) 100 Km*
   - *b) 125 Km*
   - *c) 150 Km*
   - *d) 175 Km*
6. *Determineu l'eficiència d'acoblament de la potència òptica emesa des d'una font puntual envers una fibra de salt d'índex amb obertura numèrica NA=0.25 i índex de refracció del nucli n_1=1.5. La font radia en un únic sentit de l'espai de la forma $\cos^3\theta$ i l'índex de refracció de l'ambient és n_0=1. Suposeu que la font està a molt poca distància de la fibra i perfectament alineada.*
   - *a) -17.2 dB*
   - *b) -13.7 dB*
   - *c) -11.2 dB*
   - *d) -9.3 dB*
7. *El concepte de nivell de transparència d'un material semiconductor fa referència a la concentració de portadors necessària per a que*
   - *a) el guany del material iguali les pèrdues de la cavitat.*
   - *b) el guany del material iguali les pèrdues de scattering més les de la cavitat.*
   - *c) el procés d'emissió estimulada iguali el procés d'absorció estimulada.*
   - *d) el guany del material iguali les pèrdues de scattering.*
8. *L'amplada de banda d'un làser Fabry-Perot semiconductor*
   - *a) creix quan el corrent d'alimentació creix.*
   - *b) decreix quan el corrent d'alimentació creix.*
   - *c) no depèn del corrent d'alimentació.*
   - *d) és màxima prop del corrent llindar.*

9. *Es talla sobtadament el corrent d'alimentació d'un diode LED i s'ha mesurat que el temps que triga la potència emesa a caure fins a l'1% del seu valor inicial és de 2.1 ns. Es pretén modular digitalment el LED anterior i es fixa que el temps de commutació (10%-90%) sigui com a màxim del 20% del temps de bit. Deduïu quina serà, aproximadament, la màxima velocitat de modulació per a un senyal NRZ ideal.*

   a) 400 Mb/s *b) 200 Mb/s* *c) 100 Mb/s* *d) 50 Mb/s*

10. *Un receptor consta d'un fotodetector APD (eficiència quàntica η=0.8 , guany M, factor de soroll F=M, corrent de foscor menyspreable i una variància (adimensional) del número d'electrons per bit corresponents al soroll tèrmic total σ_p=2·10^3). Donat un factor de qualitat exigit Q=10, es defineix la sensibilitat del receptor com el número mitjà de fotons per bit rebut $\langle n_a \rangle$ que la garanteixen. Assumint una modulació d'intensitat NRZ ideal, calculeu el guany que optimitza la sensibilitat.*

    a) 20 *b) 30* *c) 40* *d) 50*

11. *Continuant amb la qüestió anterior, calculeu el valor òptim de sensibilitat.*

    a) 2500 *b) 3750* *c) 5000* *d) 6250*

12. *Un amplificador òptic presenta un guany de 30 dB i un paràmetre d'emissió espontània ideal. Calculeu la potència aproximada de soroll ASE mesurada a la sortida d'un filtre òptic ideal, d'un nanòmetre d'amplada de banda i centrat a tercera finestra, que es troba situat a la sortida de l'amplificador.*

    a) -28 dBm *b) -18 dBm* *c) -8 dBm* *d) +2 dBm*

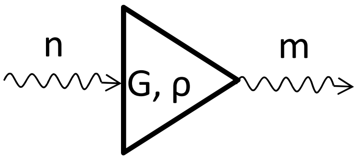
<u>Ejercicio 2</u> – 30%

Considérese un láser semiconductor ideal y simétrico.

a) Deducir las expresiones para la corriente umbral de efecto láser y para la potencia de salida.
b) ¿Qué ocurre con ambos conceptos si se aumenta la sección transversal de la zona activa?, ¿y si las reflectividades se acercan a la unidad?.
c) Si el láser inyecta 3 mW durante 100 pseg a un tramo de fibra óptica de 120 Km, estimar la relación señal-ruido a la salida de la fibra si atenúa 0,2 dB/Km en 3ª ventana.

<u>Ejercicio 3</u> – 30%

Supóngase que un receptor con decisión por umbral, formado por un fotodiodo PIN con eficiencia cuántica η y sin corriente de oscuridad, tiene ruido térmico despreciable y recibe luz coherente con modulación NRZ ideal. Por otro lado, se dispone de un amplificador óptico de ganancia G>>1 y parámetro de emisión espontánea ρ. Se sabe que la media $\langle m \rangle$ y la varianza σ_m^2 de la luz amplificada se puede expresar como



$$\langle m \rangle = G\langle n \rangle + (G-1)\rho$$
$$\sigma_m^2 = G^2(\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + G\langle n \rangle + (G-1)\rho + 2\rho\langle n \rangle G(G-1) + \rho^2(G-1)^2$$

Siendo $\langle n \rangle$ y σ_n^2 la media y la varianza de la luz a la entrada del amplificador. Se pide:

a) Deducir la sensibilidad del receptor en número promedio de fotones por bit $\langle n_a \rangle$ para tener una probabilidad de error de 10^{-9}.
b) Si el amplificador óptico se usa como preamplificador, deducir la nueva sensibilidad.
c) Deducir la cota de la eficiencia cuántica para que el preamplificador óptico sea de utilidad. Calcular su valor si el amplificador es ideal.
d) Comentar el papel del preamplificador óptico si el fotodiodo tiene η = 1.

Exercici 2

a) El guany del material semiconductor es modela segons l'expressió següent:

$$g_m = a\left(N - N_0\right) - \gamma\left(\lambda - \lambda_p\right)^2 \quad m^{-1}$$

On a és el coeficient de guany, γ el factor de corbatura, N la concentració de portadors a la zona activa, N_0 el nivell de transparència i λ la longitud d'ona de pic.

El guany net ve determinat a partir de l'expressió:

$$g_n = \Gamma g_m - \alpha_s \quad m^{-1}$$

On Γ fa referència al factor de confinament i α_s a les pèrdues per scattering dins la cavitat. Si el làser és ideal, el confinament ha de ser perfecte (Γ=1) i tant les pèrdues per scattering com el nivell de transparència han de ser nuls (N_0=0 , α_s=0). D'aquesta manera el guany net queda de la forma:

$$g_n = \underbrace{aN}_{g_p} - \gamma\left(\lambda - \lambda_p\right)^2 \quad m^{-1}$$

Per altra banda, si el làser és simètric, les reflectivitats dels miralls han de ser idèntiques i les pèrdues de la cavitat seguiran l'expressió:

$$\alpha_c = \frac{1}{2L}\ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right) = \frac{1}{L}\ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad m^{-1}$$

$$R_1 = R_2 = R$$

Donades aquestes condicions, el corrent llindar del làser es veurà afectat de la manera següent:

$$I_{th} = \frac{qV}{\tau_{sp}}\left[N_0 + \frac{\alpha_T}{\Gamma a}\right] = \frac{qV}{\tau_{sp}}\left[N_0 + \frac{1}{\Gamma a}\left(\alpha_s + \frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}\right)\right] \xrightarrow[\alpha_s = N_0 = 0]{\Gamma=1} \frac{qV}{\tau_{sp}}\frac{1}{a}\frac{1}{L}\ln\frac{1}{R} = \frac{qWd}{\tau_{sp}a}\ln\frac{1}{R}$$

De manera similar, la potència òptica de sortida del làser també queda simplificada:

$$P_{out} = \frac{1-R}{2\sqrt{R}}\frac{hf}{q\alpha_T L}\left(I - I_{th}\right) = \frac{1-R}{2\sqrt{R}}\frac{hf}{q\left(\alpha_s + \frac{1}{L}\ln\frac{1}{R}\right)L}\left(I - I_{th}\right) \xrightarrow[\alpha_s = N_0 = 0]{\Gamma=1} \frac{1-R}{2\sqrt{R}}\frac{hf}{q\ln\frac{1}{R}}\left(I - I_{th}\right)$$

Es veu doncs, com tant el corrent llindar com la potència òptica de sordida no depenen de la longitud de la cavitat làser.

b) Si la secció de la cavitat canvia, ambdós conceptes es veuen afectats. En particular, si la secció es fa més gran, el corrent llindar creix i, per tant, la potència òptica de sortida decreix donat un mateix corrent d'alimentació. La corba llum-corrent es desplaça cap a la dreta. El comportament serà anàleg si la secció es fa més petita.

Per altra banda, si les reflectivitats tendeixen a la unitat, tota la potència òptica queda confinada dins de la cavitat i, per tant, la potència òptica de sortida tendirà a zero intuïtivament. Es pot arribar a la mateixa conclusió de manera matemàtica a partir de l'expressió anterior. Pel que fa al corrent llindar, es veu clar en l'expressió matemàtica com tendirà a zero. Resumint:

$$\textit{si } Wd \uparrow \Rightarrow \left| \begin{array}{l} I_{th} \uparrow \\ P_{out} \downarrow \end{array} \right. \qquad \textit{si } R \to 1 \Rightarrow \left| \begin{array}{l} I_{th} \to 0 \\ P_{out} \to 0 \end{array} \right.$$

c) La llum lliurada per un làser monomode es pot dir que és llum coherent. En aquest cas la relació senyal a soroll (SNR) és la màxima que es pot tenir i es coneix com a Límit Quàntic. Si n és el número mitjà de fotons en un temps d'integració prefixat, i tenint en compte que si la llum és coherent la variància coincideix amb el valor mitjà, la SNR queda de la manera següent:

$$\mathrm{SNR} \equiv \frac{\langle n \rangle^2}{\sigma_n^2} = \frac{\langle n \rangle^2}{\langle n \rangle} = \langle n \rangle$$

$$\sigma_n^2 = \langle n \rangle$$

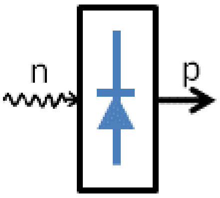
La fibra òptica és un element completament passiu i, per tant, la llum a la sortida continuarà essent coherent. Així doncs la SNR es pot calcular a partir del número mitjà de fotons en el temps d'integració fixat:

$$\mathrm{SNR_{in}} = \langle n \rangle = P_{tx} \frac{T}{hf} \approx 2.3 \cdot 10^6 \quad \text{fotons}$$

$$\mathrm{SNR_{out,dB}} = \underbrace{10 \log \langle n \rangle}_{\mathrm{SNR_{in,dB}} = 63.7\,\mathrm{dB}} - \underbrace{\alpha(\mathrm{dB/Km}) \cdot L(\mathrm{Km})}_{24\,\mathrm{dB}} \approx 39.7 \text{ dB}$$

Solución Ejercicio 3:

a) El fotodiodo PIN sin corriente de oscuridad se puede caracterizar con el modelo estadístico del amplificador óptico, sustituyendo G→η y ρ=0. La media y la varianza del número de fotoelectrones generados por el fotodiodo se puede expresar:



$$\langle p\rangle = \eta\langle n\rangle$$

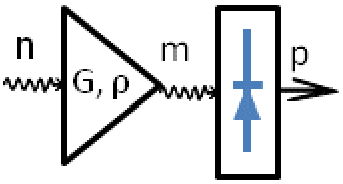
$$\sigma_p^2 = \eta^2(\sigma_n^2 - \langle n\rangle) + \eta\langle n\rangle = \eta\langle n\rangle$$

Luz coherente

Como no hay ruido de oscuridad ni ruido térmico la estadística de los fotoportadores es de Poisson. Como la señal recibida es NRZ ideal y la detección del bit es por umbral el receptor sólo se equivoca cuando recibiendo un "1" no se generan fotoportadores, es decir,

$$P(\varepsilon) = \frac{1}{2}e^{-\eta\langle n\rangle} = 10^{-9} \rightarrow \langle n\rangle = \frac{20}{\eta} \rightarrow \langle n_a\rangle = \frac{10}{\eta}$$

b) Con preamplificador óptico el receptor es:



$$\langle p\rangle_1 = \eta G\langle n\rangle + \eta(G-1)\rho$$

$$\sigma_{p1}^2 = \eta^2[G^2(\sigma_n^2 - \langle n\rangle) + 2\rho G(G-1)\langle n\rangle + (G-1)^2\rho^2] + \eta[G\langle n\rangle + (G-1)\rho]$$

$$\langle p\rangle_0 = \eta(G-1)\rho$$

$$\sigma_{p0}^2 = \eta^2(G-1)^2\rho^2 + \eta(G-1)\rho$$

Considerando estadística gaussiana para el número de fotoportadores, para $P(\varepsilon) = 10^{-9} \rightarrow Q = 6$ y $Q = \frac{\mu_1-\mu_0}{\sigma_1+\sigma_0} = \frac{\langle p\rangle_1 - \langle p\rangle_0}{\sigma_{p1}+\sigma_{p0}} = 6$.

Como la luz incidente es coherente y suponiendo G>>1:

$$\langle p\rangle_1 \approx \eta G\langle n\rangle + \eta G\rho$$

$$\sigma_{p1}^2 \approx \eta^2[2\rho G^2\langle n\rangle + G^2\rho^2]$$

$$\langle p\rangle_0 \approx \eta G\rho$$

$$\sigma_{p0}^2 \approx \eta^2 G^2\rho^2$$

$$Q = \frac{\langle p\rangle_1 - \langle p\rangle_0}{\sigma_{p1}+\sigma_{p0}} = \frac{\eta G\langle n\rangle}{\sqrt{\eta^2[2\rho G^2\langle n\rangle + G^2\rho^2]} + \eta G\rho} = \frac{\langle n\rangle}{\sqrt{[2\rho\langle n\rangle + \rho^2]} + \rho} = 6$$

$$\left(\frac{\langle n\rangle}{6} - \rho\right)^2 = 2\rho\langle n\rangle + \rho^2 \rightarrow \langle n\rangle = 84\rho \rightarrow \langle n_a\rangle = 42\rho$$

c) El preamplificador es útil si mejora la sensibilidad del receptor: $\langle n_a\rangle_{\sin PAO} > \langle n_a\rangle_{\mathrm{con}\, PAO}$

$$\frac{10}{\eta} > 42\rho \rightarrow \eta < \frac{10}{42\rho} \quad ; Si\ el\ PAO\ es\ ideal\ \rho = 1 \ \rightarrow \eta < \frac{10}{42} \cong 0{,}24$$

d) Si la eficiencia cuántica η=1 el receptor sin PAO es ideal (Límite cuántico) y el PAO no es de utilidad.