Télécommunications optiques

Exercice 1 *On considère une photodiode de bande passante $\Delta f = 5\ MHz$. Calculer la puissance optique incidente nécessaire pour telle photodiode, fonctionnant à la longueur d'onde $\lambda = 1\,\mu\text{m}$, pour avoir un rapport signal-bruit de 50 dB . On suppose que seuls les bruits quantiques sont importants et que la photodiode est idéale $\eta = 1$*

Solution 1

Les bruits quantiques sont donnés par : $\left\langle i_q^2 \right\rangle = 2eI_p\Delta f$ avec e est la charge de l'électron $e = 1.6 \times 10^{-19}$, Δf la bande passante effective de photodiode et I_p l'intensité du photocourant
le rapport signal à bruit est donné par

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{\left\langle i_q^2 \right\rangle + \left\langle i_{th}^2 \right\rangle + \left\langle i_o^2 \right\rangle}$$

avec $\left\langle i_q^2 \right\rangle$ est la valeur quadratique moyenne du bruit quantique, $\left\langle i_{th}^2 \right\rangle$ est la valeur quadratique moyenne du bruit thermique, et $\left\langle i_o^2 \right\rangle$ est la valeur quadratique moyenne du bruit d'obscurité.
Puisque seuls les bruits quantiques sont dominants alors le rapport signal à bruit s'écrit :

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{\left\langle i_q^2 \right\rangle} = \frac{I_p^2}{2qI_p\Delta f} = \frac{I_p}{2q\Delta f}$$

Calculons l'intensité du photocourant en fonction de la puissance optique incidente :
L'éfficacité quantique de photodiode est donnée par :

$$\eta = \frac{I_p hf}{Pq} = \frac{I_p hc}{Pq\lambda} = \frac{I_p \times 1.24}{P\lambda_{(\mu m)}}$$

La photodiode est supposée idéale $(\eta = 1)$ donc : $I_p = \dfrac{P\lambda}{1.24}$ et par suite

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p}{2q\Delta f} = \frac{P\lambda}{2 \times 1.24 q\Delta f}$$

et finalement on trouve :

$$P = \frac{2.48 \times q \times \Delta f}{\lambda} \times \left(\frac{S}{N}\right)$$

On a $\left.\dfrac{S}{N}\right|_{dB} = 50\text{ dB} = 10\log_{10}\dfrac{S}{N} \implies \dfrac{S}{N} = 10^5$

$P = \dfrac{2.48 \times q \times \Delta f}{\lambda} \times \left(\dfrac{S}{N}\right)$

$= \dfrac{2.48 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6}{1} \times \left(10^5\right) = 1.984 \times 10^{-7}\ \text{W} = 0.198\,\mu\text{W}$

$P_{dB} = 10\log_{10}\left(1.984 \times 10^{-7}\right) = -67.025\ \text{dB} = -37.025\ \text{dBm}$

Exercice 2 *Soit une photodiode PIN d'efficacité quantique $\eta = 60\%$, sa résistance de charge est $R_L = 4\ k\Omega$ et l'intensité du courant d'obscurité vaut $3nA$. La photodiode reçoit $200nW$ de puissance optique de longueur d'onde $\lambda = 0.9\,\mu\text{m}$.*

1. *Sachant que la bande passante du récepteur est $5MHz$, comparer le bruit quantique total avec le bruit thermique dans la résistance R_L Pour une température de $20\,°\text{C}$. (La constante de Blotzmann est $k = 1,3810^{-23}$)*

2. *On suppose que l'amplificateur du circuit de réception introduit des bruits équivalents à $F_n = 3$ dB. Déterminer la valeur du rapport signal/bruit à la sortie du récepteur.*

Solution 2

1. Les bruits quantiques : $\left\langle i_q^2\right\rangle = 2eI_p\Delta f$

$\eta = \dfrac{I_p \times 1.24}{P\lambda_{(\mu m)}} \Longrightarrow I_p = \dfrac{\eta \times \lambda_{(\mu m)} \times P_i}{1.24} = \dfrac{0.6 \times 0.9 \times 200}{1.24} = 87.097 \simeq 87.1 \text{ nA}$

$\Longrightarrow \left\langle i_q^2\right\rangle = 2eI_p\Delta f = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 87.1 \times 10^{-9} \times 5 \times 10^6 = 1.3936 \times 10^{-19}$

$\langle i_q\rangle = \sqrt{1.3936 \times 10^{-19}} = 3.7331 \times 10^{-10} A$

bruits thermiques : $\left\langle i_{th}^2\right\rangle = \dfrac{4kT}{R_L}\Delta f = \frac{4\times 1.38\times 10^{-23}\times 293\times 5\times 10^6}{4\times 10^3} = 2.0217 \times 10^{-17}$

$\langle i_{th}\rangle = \sqrt{2.0217 \times 10^{-17}} = 4.4963 \times 10^{-9}$ A

$\dfrac{\langle i_{th}\rangle}{\langle i_q\rangle} = \dfrac{4.4963 \times 10^{-9}}{3.7331 \times 10^{-10}} = 12.044$

2. $F_n = 3$ dB , $F_n = 10\log_{10} B_A \Rightarrow B_A = 10^{3/10} = 1.9953 \cong 2$

$\Rightarrow \left\langle i_{th}^2\right\rangle = \dfrac{4kT}{R_L}\Delta f F_n = 2 \times 2.0217 \times 10^{-17} = 4.0434 \times 10^{-17}$

le bruit total : $N = \left\langle i_q^2\right\rangle + \left\langle i_o^2\right\rangle + \left\langle i_{th}^2\right\rangle$

$\left\langle i_o^2\right\rangle = 2eI_o\Delta f = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^{-9} \times 5 \times 10^6 = 4.8 \times 10^{-21}$

$= 1.3936 \times 10^{-19} + 4.8 \times 10^{-21} + 4.0434 \times 10^{-17} = 4.0578 \times 10^{-17}$

$S = I_p^2 = \left(87.1 \times 10^{-9}\right)^2 = 7.5864 \times 10^{-15}$

$\dfrac{S}{N} = \dfrac{7.5864 \times 10^{-15}}{4.0578 \times 10^{-17}} = 186.96$

en dB : $10\log_{10}(186.96) = 22.717$ dB

Exercice 3 *Une photodiode de capacité totale $C_T = 6$ pF . Calculer la valeur maximale de la résistance de charge qui exige une bande passante de 8 MHz . Que dévient la bande passante avec la résistance de charge si on suppose de plus que la capacité d'entrée de l'amplificateur est 6pF.*

Solution 3

La bande passante de diode est donnée par : $B_d = \dfrac{1}{2\pi R_L C_d}$

$\Rightarrow R_L = \dfrac{1}{2\pi B_A C_d} = \dfrac{1}{2\pi \times 8 \times 10^6 \times 6 \times 10^{-12}} = 3315.7\Omega = 3.32k\Omega$

$C_T = C_d + C_A = 6 + 6 = 12pF = 2C_d$

$B'_d = \dfrac{1}{2\pi R_L C_T} = \dfrac{1}{2\pi \times 3315.7 \times 12 \times 10^{-12}} = 4.0 \times 10^6 = \dfrac{1}{2}B_d$

Exercice 4 *Une photodiode à avalanche est brancher dans un système de réception de résistance de charge $R_L = 10\ k\Omega$. La température est 120 K, l'intensité minimale du photocourant qui donne un rapport signal à bruit de 35dB, est 10 fois plus grande que celle du courant d'obscurité. Si le bruit de l'amplificateur est équivalent à 1 dB et la bande passante du récepteur est $10MHz$, déterminer la valeur du coefficient de multiplication M.*

Solution 4

Dans le cas d'une photodiode à avalanche de facteur de multiplication M et d'excès de bruit F_n le rapport signal à bruit s'écrit :

$$\frac{S}{N} = \frac{M^2 I_p^2}{2qB\left(I_p + I_o\right).M^{2+x} + \frac{4kTB}{R_L}F_n} = \frac{I_p^2}{2qB\left(I_p + I_o\right).M^{x} + \frac{4kTB}{R_L}M^{-2}F_n}$$

La valeur optimale qui minimise $\frac{S}{N}$ est celle qui vérifie la relation :

$$\frac{2qB\left(I_p+I_o\right).M^{x+2}}{\frac{4kTB}{R_L}F_n}=\frac{2}{x}\Longrightarrow M^{2+x}=\frac{4kTF_n}{xeR_L\left(I_p+I_o\right)}$$

dans le cas idéal $x=1\Longrightarrow M^3=\dfrac{4kTF_n}{eR_L\left(I_p+I_o\right)}$

on a $I_p=10I_o\Longrightarrow M^3=\dfrac{4kTF_n}{11eR_LI_o}\Longrightarrow I_p+I_o=11I_o=\dfrac{4kTF_n}{eR_LM^3}$

$$\Rightarrow\frac{S}{N}=\frac{M^2\left(10I_o\right)^2}{2eB\left(\frac{4kTF_n}{eR_LM^3}M^3\right)+\frac{4kTF_n}{R_L}B}=\frac{25}{3}M^2\frac{I_o^2R_L}{BkTF_n}$$

$$\Rightarrow M^2I_o^2=\frac{3kTF_nB}{25R_L}\left(\frac{S}{N}\right)$$

on a $\left.\frac{S}{N}\right|_{dB}=35\Rightarrow\frac{S}{N}=10^{3.5}=3162.3,\quad F_n=1dB=10^{0.1}=1.2589$

$$M^3=\frac{4kTF_n}{11eR_LI_o}\Rightarrow M^2I_o^2=I_o^2\left(\frac{4kTF_n}{11eR_LI_o}\right)^{2/3}=\frac{3kTF_nB}{25R_L}\left(\frac{S}{N}\right)$$

$$\Rightarrow I_o^{4/3}=\frac{\frac{3kTF_nB}{25R_L}\left(\frac{S}{N}\right)}{\left(\frac{4kTF_n}{11eR_L}\right)^{2/3}}=\frac{3B}{100}\frac{S}{N}\sqrt[3]{\frac{4kTF_n}{R_L}}\left(\sqrt[3]{11e}\right)^2$$

$$I_o^4=\left(\frac{3B}{100}\frac{S}{N}\sqrt[3]{\frac{4kTF_n}{R_L}}\left(\sqrt[3]{11e}\right)^2\right)^3=\left(\frac{3B}{100}\frac{S}{N}\right)^3\frac{4kTF_n}{R_L}\left(11e\right)^2$$

$$=\left(\tfrac{3\times10\times10^6}{100}\times3162.3\right)^3\times\left(\tfrac{4\times1.381\times10^{-23}\times120\times1.26}{10\times10^3}\right)\left(11\times1.6\times10^{-19}\right)^2=2.209\times10^{-33}$$

$$I_0=\sqrt[4]{2.209\times10^{-33}}=6.8557\times10^{-9}A=6.85\text{ nA}$$

$$M^3=\frac{4kTF_n}{11eR_LI_o}=\frac{4\times1.381\times10^{-23}\times120\times1.26}{11\times1.6\times10^{-19}\times10\times10^3\times6.85\times10^{-9}}=69.279$$

$$M=\sqrt[3]{69.279}=4.1071$$

Exercice 5 *On considère un récepteur de résistance de charge $4M\Omega$ avec un amplificateur à intégration en tête de résistance $4M\Omega$. Déterminer :*

1. *La bande passante maximale obtenue sans égalisation si la capacité totale du système est $C_T=6pF$.*
2. *La valeur quadratique moyenne du bruit thermique par unité de bande passante à la température* 300 K .
3. *Refaire les questions 1) et 2) si l'amplificateur est remplacé par un autre amplificateur transimpédance de* 100 kΩ *de résistance de contre réaction et de facteur de gain égal à* 400*. La capacité est toujours* 6 pF*.*

Solution 5

1. $\dfrac{1}{R_T}=\dfrac{1}{R_L}+\dfrac{1}{R_a}=\dfrac{R_L+R_a}{R_aR_L}=\dfrac{8}{16}=\dfrac{1}{2}\Rightarrow R_T=2M\Omega$

   $B=\dfrac{1}{2\pi R_TC_T}=\dfrac{1}{2\pi\times2\times10^6\times6\times10^{-12}}=13263Hz$

2. $\left\langle i_{th}^2\right\rangle=\dfrac{4kTB}{R_T}$ donc par unité de bande passante :

   $\left\langle i_{th}^2\right\rangle=\dfrac{4kT}{R_T}=\dfrac{4\times1.381\times10^{-23}\times300}{2\times10^6}=8.286\times10^{-27}\ A^2Hz^{-1}$

3. Dans ce cas la résistance totale est $R_{1T}=\dfrac{R_LR_a}{R_L+R_a}=\dfrac{10^5\times4\times10^6}{10^5+4\times10^6}==97561\ \Omega$

   Avec un facteur de gain $G=400$ la bande passante est

   $B_1=\dfrac{G}{2\pi R_{1T}C_T}=\dfrac{400}{2\pi\times97561\times6\times10^{-12}}=1.0876\times10^8$

   $\left\langle i_{th}^2\right\rangle=\dfrac{4kT}{R_{1T}}=\dfrac{4\times1.381\times10^{-23}\times300}{97561}=1.6986\times10^{-25}\ A^2Hz^{-1}$

Exercice 6 *On considère une photodiode de sensibilité spectrale $S_\lambda = 0.5A/W$ pour la longueur d'onde $\lambda = 0.85\,\mu$m. Déterminer la puissance optique minimale demandée pour avoir une probabilité d'erreur 10^{-7} avec un débit numérique d'ordre de $35Mbits/s$.*

Solution 6

Dans le cas de distribution de Poisson, la probabilité d'erreur s'exprime en fonction du nombre moyen de photons détectés $\widetilde{N}$ par : $P_e = \exp\left(-\widetilde{N}\right)$. Si la probabilité demandée est de 10^{-7} alors : $\exp\left(-\widetilde{N}\right) = 10^{-7} \Longrightarrow \widetilde{N} = 7 \times \ln(10) = 16.118$, c'est le nombre moyenne de photons incidents pendant l'itervalle du temps Δt. Si P_0 est la puissance incidente alors l'énergie optique incidente est $E = P_0\Delta t$ tandis que l'énergie détectée est $\eta E = \eta P_0 \Delta t = \widetilde{N}\dfrac{hc}{\lambda} \Longrightarrow P_0 = \dfrac{\widetilde{N}hc}{\eta\lambda\Delta t}$

La sensibilité spectrale est $S_\lambda = \dfrac{I_p}{P_0} = \eta\dfrac{\lambda_{(\mu m)}}{1.24}$

On peut écrire P_0 sous la forme $P_0 = \dfrac{\widetilde{N}hc}{\eta\lambda\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}hce}{\eta\lambda e\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}e1.24}{\eta\lambda\Delta t} = \dfrac{\widetilde{N}e}{S_\lambda\Delta t}$

Si on suppose que les éléments binaires sont équiprobables : $P_e(0) = P_e(1) = \dfrac{1}{2}$

c'est-à-dire on a $\dfrac{b}{2}$ bits/s sont les (1), donc : $\dfrac{1}{\Delta t} = \dfrac{b}{2}$

Finalement $P_0 = \dfrac{\widetilde{N}eb}{2S_\lambda} = \dfrac{16.11 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 35 \times 10^6}{2 \times 0.5} = 9.0216 \times 10^{-11}W$

en dB : $P_{0dB} = 10\log_{10}\left(9.0216 \times 10^{-11}\right) = -100.45$ dB$= -70.44$ dBm

Exercice 7 *Le taux d'échantillonnage de chaque canal téléphonique, dans un système PCM de 30 canaux, est $8kHz$ et chaque échantillon est codé en 8 bits. Déterminer :*

1. *Le taux de transmission (débits) du système.*
2. *La durée d'une voie*
3. *La durée de chaque trame .*

Solution 7

1. Le nombre de bits par trame est : $32 \times 8 = 256$ bits
   Chaque trame est transmise à la fréquence 8 kHz c'est-à-dire 8×10^3 trames par seconde donc le débit est
   $8 \times 10^3 \times 256 = 2.048 \times 10^6 = 2.048$ Mbits/s
2. La durée de chaque bit est $\dfrac{1}{2.048 \times 10^6} = 4.8828 \times 10^{-7}s = 488$ ns donc la durée de chaque voie est $8 \times 488 = 3904$ ns$= 3.9\ \mu s$
3. La durée de chaque trame est : $32 \times 3904 = 124\,928\ ns \simeq 125\mu s$

Exercice 8 *En utilisant l'approximation de Gauss, déterminer le rapport signal à bruit nécessaire pour avoir une probabilité d'erreur d'ordre de 10^{-9} dans un système de communication binaire en bande de base .*
On suppose que le niveau de décision est à mi-distance entre les niveaux (0) et (1) et $\mathrm{erf\,c}(4.24) = 2\times 10^{-9}$

Solution 8

Pour la lois de Gauss la probabilité d'erreur est donnée par :

$$P_e = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{S/N}{2\sqrt{2}}}\right)$$

$P = 10^{-9} = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{S/N}}{2\sqrt{2}}\right)$

On a $\operatorname{erfc}(4.24) = 2 \times 10^{-9} \Rightarrow \frac{\sqrt{S/N}}{2\sqrt{2}} = 4.24 \Rightarrow \sqrt{S/N} = 2\sqrt{2} \times 4.24 = 11.993$

$\frac{S}{N} = (11.993)^2 = 143.83$

en dB : $10\log_{10}(143.83) = 21.578\ dB$

Exercice 9 *Dans un système de réception PCM, dont le niveau de décision est à mi-distance des niveaux (0) et (1), on utilise comme détecteur une photodiode à avalanche d'efficacité quantique $\eta = 80\%$, de facteur de multiplication $M = 100$ et de facteur de bruit $F(M) = 4$. Estimer le nombre moyen des photons qui doivent être incidents sur la photodiode pour avoir une probabilité d'erreur d'ordre 10^{-9} pour l'élément binaire (1)*

Si la photodiode fonctionne pour la longueur d'onde de $\lambda = 1\,\mu$m. Estimer la puissance optique demander au niveau de détecteur pour avoir un élément (1) avec une probabilité d'erreur 10^{-9} pour les débits : $10Mbits/s$ et $140Mbits/s$.

Solution 9

Avec la probabilité d'erreur 10^{-9} on a $S/N \cong 144$

1. Pour une PDA $\frac{S}{N} = \frac{M^2 I_p^2}{2qB\left(I_p + I_o\right).M^{2+x} + \frac{4kTB}{R_L}F_n}$

   Si l'amplificateur n'introduit pas de bruit $F_n = 0$ alors $\frac{S}{N} = \frac{M^2 I_p^2}{2qB\left(I_p + I_o\right).M^{2+x}}$

   $I_o << I_p \Rightarrow \frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{2qBI_pM^x} = \frac{I_p}{2qBF(M)} \Longrightarrow I_p = 2qBF(M)\frac{S}{N}$

   Si N est le nombre moyenne des photons détectés alors le nombre des photons incidents est n ; $N = \eta n$.
   donc la puissance incidente est

   $P_0 = \frac{nhf}{\Delta t} \Rightarrow I_p = \eta\frac{qP_0}{hf} = \eta\frac{qn}{\Delta t} \Rightarrow n = \frac{I_p\Delta t}{\eta q}$

   D'autre part $I_p = 2qBF(M)\frac{S}{N} \Rightarrow n = \frac{2BF(M)\Delta t}{\eta}\frac{S}{N}$

   $B = \frac{1}{\Delta t} \Rightarrow n = \frac{2F(M)}{\eta}\frac{S}{N} = \frac{2 \times 4 \times 144}{0.8} = 1440$

   Si $B = \frac{0.6}{\Delta t} \Rightarrow n = 0.6\frac{2F(M)}{\eta}\frac{S}{N} = 1440 \times 0.6 = 864$

2. n photons incidents $\Rightarrow E = nhf \Rightarrow P_0 = \frac{nhf}{\Delta t} = \frac{nq1.24}{\lambda_{(\mu m)}\Delta t} = \frac{nq1.24}{2\lambda_{(\mu m)}}B$

   Pour $B = 10^7$ bits/s :

   $P_0 = \frac{864 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.24 \times 10^7}{2 \times 1} = 8.5709 \times 10^{-10}W$

   $P_{0dB} = 10\log_{10}\left(8.5709 \times 10^{-10}\right) = -90.67dB$

   Pour $B = 140Mbits/s$:

   $P_0 = \frac{864 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.24 \times 14 \times 10^7}{2 \times 1} = 1.1999 \times 10^{-8}$

   $P_{0dB} = 10\log_{10}\left(1.1999 \times 10^{-8}\right) = -79.209$

Exercice 10 *Une liaison par fibre optique constituée d'un câble de longueur 4km d'atténuation linéique $\alpha_f = 5dB/km$, la perte de liaison est équivalente à $2dB/km$, et les pertes de connexion avec la source et le détecteur sont respectivement 3.5 et 2.5 dB. En négligeant tout effet de dispersion calculer la perte total dans cette liaison .*

Solution 10

$\alpha_t = \alpha_f \times L + N\alpha_\ell + \alpha_s + \alpha_d = 5 \times 4 + 4 \times 2 + 3.5 + 2.5 = 34.0$ dB

Exercice 11 *Le débit numérique maximal dans un système de transmission par fibre optique en utilisant le format NRZ s'exprime en fonction de la dispersion totale du système (T_S) par : $B_T = \dfrac{0.7}{T_S}$ et dans le format RZ : $B_T = \dfrac{0.35}{T_S}$. On considère un système de liaison optique, de longueur $L = 10$ km avec les dispersion suivantes : i) LED : 8ns ii) Fibre : intermodale : 5 ns/km ; intramodale 1 ns/km iii) détecteur : 6 ns . Calculer pour les deux formats RZ et NRZ le débits maximal .*

Solution 11

$L = 10$ km, $T_n = 5$ ns/km, $T_m = 1$ ns/km, $T_d = 6\ ns$, $T_S = 8\ ns$

$T = \sqrt{T_s^2 + T_d^2 + (T_n \times L)^2 + (T_m \times L)^2}$

$= \sqrt{8^2 + (5 \times 10)^2 + (1 \times 10)^2 + 6^2} = 51.962$ ns

Pour les codes NRZ :

$B = \dfrac{0.7}{T} = \dfrac{0.7}{51.962 \times 10^{-9}} = 1.3471 \times 10^7$bits/s$\simeq$ 13.5 Mbits/s

pour les codes RZ :

$B = \dfrac{0.35}{T} = \dfrac{0.35}{51.962 \times 10^{-9}} = 6.7357 \times 10^6$ bits/s $= 6.735$ Mbits/s

Exercice 12 *Les paramètres d'un système de transmission par fibre optique monomode, fonctionnant à la longueur d'onde $\lambda = 0.85\,\mu$m, sont les suivantes :*

Puissance moyenne émise par la source laser : 3dBm

Pertes intrinsèques dans la fibre : 1.9dB/km

Pertes de liaison fibre - fibre : 0.3dB/km

Pertes de connexion fibre - source et fibre - détecteur : 1dB sur chacun

Puissance reçue par la photodiode à avalanche :

avec 35 Mbits/s et taux d'erreur 10^{-7} : 55dB

avec 500 Mbits/s et taux d'erreur 10^{-9} : 44dB

Marge de sécurité : 9dB .

1. *Estimer la longueur maximale possible du système sans répétiteur dans les deux cas 35 Mbits/s et 500 Mbits/s .*
2. *Estimer la longueur maximale possible si on suppose de plus que le correcteur introduit une perte équivalente à 5dB.*

Solution 12

$\lambda = 0.85\ \mu m$, $P_i = 3$ dBm, $\alpha_f = 1.9$ dB/km, $\alpha_{ff} = 0.3$ dB/km, $\alpha_{sf} = \alpha_{fr} = 1$ dB, $P_r = 55$ dBm pour $b = 35 Mbits/s$ et $P_e = 10^{-7}$ et $P_r = 44$ dBm pour $B = 500$ Mbits/s et $P_e = 10^{-9}$, $M = 9$ dB

1. Soit P_i la puissance incidente à l'entrée de la fibre et P_r la puissance réçue au niveau de détecteur : le bilan d'énergie s'écrit :

   $P_i - P_r = (\alpha_f + \alpha_{ff}) \times L + \alpha_{sf} + \alpha_{fr} + M$

$P_i = -3dBm = -33$ dB
$P_r = -55$ dB$\Rightarrow P_r = 10^{-5.5} = 3.162\,3 \times 10^{-6}$
Pour le débits de 35 Mbits/s on a alors :
l'excés en puissance : $P_i - P_r = -3 - (-55) = 52.$ dB
Les pertes : $(\alpha_f + \alpha_{ff}) \times L + \alpha_{sf} + \alpha_{fr} + M = (1.9 + 0.3) \times L + 1 + 1 + 9 = 2.\,2L + 11.0$
$52 = 2.\,2L + 11.0 \Rightarrow 2.2L = 52 - 11 = 41 \Rightarrow L = \dfrac{41}{2.2} = 18.\,636$ km
Pour le débits de 500 Mbits/s on a
l'excés en puissance : $P_i - P_r = -3 - (-44) = 41$
$\Rightarrow 41 = 2.\,2L + 11.0 \Rightarrow 2.2L = 41 - 11 = 30 \Rightarrow L = \dfrac{30}{2.2} = 13.\,636$ km

2. Pour le débits de 35 Mbits/s on a :
$52 = 2.\,2L + 11 + 5 = 2.\,2L + 16 \Rightarrow L = \dfrac{52 - 16}{2.2} = 16.\,364$ km
Pour le débits de 500 Mbits/s on a :
$41 = 2.\,2L + 11 + 5 \Rightarrow L = \dfrac{41 - 16}{2.2} = 11.\,364$ km.

Exercice 13 *Pour la transmission numérique de 20 Mbits/s sur fibres optiques, sur une distance de 7 km, on a la structure suivante : Une LED de longueur d'onde $0.85\,\mu$m, émet une puissance optique moyenne $100\mu W$ injectée directement dans une fibre à gradient d'indice de diamètre de coeur $50\,\mu$m vers une photodiode PIN convenablement choisie. L'atténuation linéique totale dans la fibre est $\alpha_f = 2.6$ dB/km, la perte par liaison fibre-fibre est $\alpha_{ff} = 0.5dB$ sur chaque liaison , où on a 7 fibres chacune de longueur 1 km, la perte due à la connexion fibre-détecteur est α_{fd} = 1.5 dB . La puissance exigeante pour la photodiode est 41 dBm pour avoir une probabilité d'erreur d'ordre 10^{-10} . La marge proposée est 6 dB .*
Ecrire le budget de puissance optique du système et vérifier la validité de telle liaison de point de vue de puissance .

Solution 13
$B = 20$ Mbits/s, $L = 7$ km, $\lambda = 0.85\ \mu m$, $P_i = 100\mu W$, $a = 50\mu m$, $\alpha_f = 2.6$ dB/km, $\alpha_{ff} = 0.5$ dB, 7 fibres $L = 1 \times 7 = 7$ km, $P_e = 10^{-10}$, $M = 6$ dB, $P_r = 41$ dBm.

1. La puissance injectée dans la fibre est : $P_{i(W)} = 100\ \mu W = 10^{-4}W$
$\Rightarrow P_{i(dB)} = 10 \times \log_{10}\left(10^{-4}\right) = -40$ dB
La sensibilité de photodiode est : $P_r = -41$dBm $= -71$ dB
L'excés en puissance est : $P_i - P_r = -40 - (-71) = 31$ dB
Perte dans la fibre : $\alpha_f \times L = 2.6 \times 7 = 18.\,2$ dB
Perte de connexions fibre-fibre : $\alpha_{ff} \times 6 = 0.5 \times 6 = 3$ dB
Perte par connexion fibre photodiode=1.5 dB, Marge : 6 dB
Perte totales : $\alpha_T = 18.2 + 3 + 1.5 + 6 = 28.\,7$
$(P_i - P_r) - \alpha_T = 31 - 28.7 = 2.\,3$ dB
ce système est donc valable de point de vue de puissance .

Exercice 14 *Soit à réaliser une liaison par fibre optique d'une source laser avec une photodiode. La diode laser émet de la lumière de longueur d'onde $\lambda = 1.3\,\mu$m, de largeur spectrale $\Delta\lambda = 0.1\,\mu$m et de puissance optique $2mW$, elle munit d'une fibre amorce d'indices 1.48 et 1.46, son rayon de coeur est $a_1 = 51\,\mu$m . La photodiode est à avalanche de facteur de multiplication $M = 50$, d'efficacité quantique $\eta = 75\%$ et la bande passante de réception est $5MHz$. La liaison entre terminaux est réaliser à l'aide d'une fibre à saut d'indice telle que $n_1 = 1.48$ et $n_2 = 1.5$ et de rayon du coeur $a = 50\,\mu$m .*

1. *Sachant que la perte linéique totale dans la fibre est 3 dB/km . Déterminer par unité de longueur la valeur totale de perte en considérant que la perte due à la connexion fibre - détecteur est d'ordre 2 dB.*

2. *Si la longueur de liaison est 5 km, calculer la valeur du photocourant généré par la photodiode .*
3. *Si le coefficient de dispersion chromatique de la fibre est $M_d = 60$ ps nm/km. Calculer la valeur de la bande passante optique de la fibre. Comparer cette valeur avec celle du détecteur .*
4. *Calculer la valeur du rapport signal à bruit au niveau de détecteur si sa résistance de charge est $5k\Omega$ à la température 25^oC et le bruit d'excès de bruit $F(M) = 10^{-3}$, en supposant que le courant d'obscurité n'a aucune influence.*

Solution 14

$\lambda = 1.3\ \mu m$, $\Delta\lambda = 0.1\ \mu m$, $P_i = 2\ mW$, $n_{2e} = 1.48$, $n_{1e} = 1.46$, $a_e = 51\ \mu m$, $a_f = 50\ \mu m$, $\eta = 75\%$, $B = 5$ Mbits/s, $n_{1f} = 1.48$, $n_{2f} = 1.5$,

1. Les pertes dans cette liaison sont :
   (a) Pertes intrinsèques dans la fibre : $\alpha_f = 3$ dB/km
   (b) Perte due à la connexion fibre-détecteur : $\alpha_{fd} = 2$ dB et elle indépendante de longueur de fibre.
   (c) Perte de connexion source fibre : $\alpha_{sf} = \alpha_{ON} + \alpha_S + \alpha_F$

$$\alpha_{ON} = 20\log_{10}\left(\frac{ON_s}{ON_f}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{n_{2e}^2 - n_{1e}^2}{n_{2f}^2 - n_{1f}^2}\right)$$
$$ON_s = \sqrt{n_{2e}^2 - n_{1e}^2} = \sqrt{1.48^2 - 1.46^2} = .242\,49$$
$$ON_f = \sqrt{n_{2f}^2 - n_{1f}^2} = \sqrt{1.5^2 - 1.48^2} = .244\,13$$
$$\alpha_{ON} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{.242\,49}{.244\,13}\right) = -5.854\,6 \times 10^{-2}\text{ dB}$$
$$\alpha_S = 20\log_{10}\left(\frac{S_e}{S_f}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{\pi a_e^2}{\pi a_f^2}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{\pi(51)^2}{\pi(50)^2}\right) = 0.344\,01\text{ dB}$$
$$\alpha_F = 10\log_{10}\left(\frac{1-R_e}{1-R_f}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{4n_{2f}/(1+n_{2f})^2}{4n_{2e}/(1+n_{2e})^2}\right)$$
$$\frac{4n_{2f}}{(1+n_{2f})^2} = \frac{4\times 1.5}{(1+1.5)^2} = 0.96$$
$$\frac{4n_{2e}}{(1+n_{2e})^2} = \frac{4\times 1.48}{(1.48+1)^2} = 0.962\,54$$
$$\alpha_F = 10 \times \log_{10}\left(\frac{0.96}{0.962}\right) = -9.038\,4 \times 10^{-3}$$
$$\alpha_{sf} = -5.868\,9 \times 10^{-2} + 0.344\,01 - 9.038\,4 \times 10^{-3} = 0.276\,28$$

$\alpha_T = 3 + 2 + 0.276 = 5.276$ dB.

2. avec $L = 5$ km les pertes sont :
   $\alpha_f \times L + \alpha_{fe} + \alpha_{fd} = 3 \times 5 + 2 + 0.276 = 17.276$ dB
   La puissance émise par la source est :
   $P_i = 2mW = 2\times 10^{-3}W = 10 \times \log_{10}\left(2\times 10^{-3}\right) = -26.99 \simeq -27$ dB
   La puisance incidente sur le détecteur est $P_r = -27 - 17.276 = -44.276$ dB
   $$= 10^{-\frac{44.276}{10}} = 3.735\,9 \times 10^{-5}\text{ W}$$
   $\Rightarrow$ l'intensité du courant généré par la photodiode est
   $$I_p = \eta\frac{e\lambda P_r}{hc} = \eta\frac{\lambda_{(\mu m)}P_r}{1.24} = \frac{0.75\times 1.3\times 3.7359\times 10^{-5}}{1.24} = 2.937\,5\times 10^{-5}A$$
   Le courant amplifié est $I_M = 50 \times 2.937\,5 \times 10^{-5} = 1.468\,8 \times 10^{-3}A$
3. $\Delta t = \sqrt{\Delta t_n^2 + \Delta t_m^2}$
   $$\Delta t_n = \frac{L(ON)^2}{2cn_1} = \frac{5000\times(0.244)^2}{2\times 3\times 10^8\times 1.5} = 3.307\,6\times 10^{-7}s$$
   $\Delta t_m = M_d L\Delta\lambda = 60 \times 5 \times 0.1 \times 10^3 = 30000$ ps$= 30000 \times 10^{-12} = 3 \times 10^{-8}s$
   $$\Delta t = \sqrt{(3.307\,6\times 10^{-7})^2 + (3\times 10^{-8})^2} = 3.321\,2\times 10^{-7}s$$
   $$B_f \simeq \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{3.321\,2\times 10^{-7}} = 3.011\times 10^6$$
   $B_{diode} > B_{fibre}$.

4. $\left\langle i_n^2 \right\rangle = \left\langle i_{th}^2 \right\rangle + \left\langle i_q^2 \right\rangle$

$$\left\langle i_{th}^2 \right\rangle = \frac{4kTB}{R_L} = \frac{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times (25+273) \times 5 \times 10^6}{5000} = 1.645 \times 10^{-17} \text{ A}^2$$

$$\left\langle i_q^2 \right\rangle = 2eBI_pM^2F(M)$$

$$= 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^6 \times 2.9375 \times 10^{-5} \times (50)^2 \times 10^{-3} = 1.175 \times 10^{-16} A^2$$

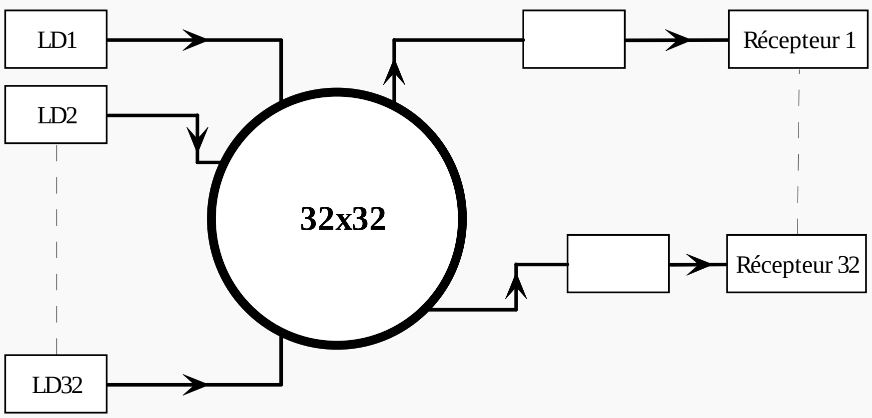
$$\frac{S}{N} = \frac{1/2\,(MI_p)^2}{\langle i_{th}^2 \rangle + \langle i_q^2 \rangle} = \frac{\left(50 \times 2.9375 \times 10^{-5}\right)^2}{2\,(1.645 \times 10^{-17} + 1.175 \times 10^{-16})} = 8.0524 \times 10^9$$

Exercice 15 *Un concepteur doit réaliser un système de distribution de 32 canaux de signaux numériques. Pour ce faire, il utilise 32 lasers à des fréquences différentes qu'il relie à 32 fibres optiques distinctes par l'intermédiaire d'un coupleur en étoile 32×32 . A la réception, à l'extrémité des fibres, la sélection de canal est effectuée à l'aide d'un filtre optique à band passante suffisamment étroite pour éviter la diaphonie entre canaux. Chaque laser est modulé en amplitude à un taux de 1.2 Gbits/s et fournit une puissance de 2 mW dans le coeur de la fibre durant "1" logique*
Considérant que

- *Le coupleur sépare uniformement la puissance optique de chaque laser en 32 voies et qu'il introduit pour chaque voie une perte supplémentaire de 1 dB.*
- *La plus grande distance à parcourir est 30 km et l'atténuation dans la fibre utilisée est $0.25dB/km$.*
- *Les pertes des raccords dans chaque lien optique sont équivalentes à 2 dB.*
- *Les pertes d'insertion de chaque filtre optique sont équivalentes à 2 dB.*
- *La puissance minimale, réquise par chaque récepteur pour produire le taux d'erreur désiré, est -30 dBm.*

1. *Calculer la marge en puissance disponible, c'est-à-dire l'écart, donné en dB, entre la puissance optique reçue au détecteur et la puissance minimale requise.*
2. *Chaque photodiode est assimilée à une jonction PIN ; Si la puissance incidente est P_0 et les largeurs de zones sont respectivement $x_p, x_i,$et $x_n$et les coefficients d'absorption sont $\alpha_p, \alpha_i,$et α_n. Etablir l'expression de l'efficacité quantique si la photodiode recoit la lumière du côté de la zone P d'indice de réfraction $n = 3.2$.Calculer sa valeur numérique si $\alpha_p = 10^4 m^{-1}$, $x_p = 5\mu m, x_i = 40\mu m$ et $\alpha_i = 10^5 m^{-1}$.*
3. *Les photodiodes de réception sont de type APD. L'efficacité quantique est $\eta = 0.7$, l'intensité du courant d'obscurité est $I_o = 120$ nA, son gain intrinsèque est $M = 20$ On suppose que le courant de surface est nul. La puissance optique incidente est $3.5\ \mu W$ pour $\lambda = 1.55\mu m$*
   Calculer la sensibilité de la photodiode et l'intensité du photocourant signal.

Solution 15



1. (a) Bilan de la puissance

Puissance de la source : $2mW = +3dBm$

Atténuation du coupleur : $\frac{1}{32} = 0.003 = -15dB$

perte d'insertion : $-1dB$

Perte totale par voie : $-15dB - 1dB = -16dB$

(b) Atténuation due à la fibre :

Atténuation due à longueur : $-0.25dB/km \times 30km = -7.5$

Atténuation due aux raccords : $-2dB$

Totale par voie de 30 km : -9.5 dB

(c) Atténuation dans le filtre optique : $-$ 2dB

Atténuation totale dans chaque voie de 30 km : $-16dB - 9.5dB - 2dB = -27.5dB$

Puissance au récepteur : $+3dBm - 27.5dB = -24.5$ dBm

Marge de la puissance : $-24.5dBm - (-30dBm) = 5.5$ dB

2. La puissance émergente dans la région P est $(1-R)\,P_0$, en traversant la distance x_p dans la zone P , la puissance devient $(1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_p x_p)$, et en traversant la zone désertée la puissance devient : $(1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_p x_p) \exp(-\alpha_i x_i)$ donc la puissance absorbée dans la zone désertée et qui se transforme en courant est donc : $P_u = (1-R)\,P_0 \exp(-\alpha_p x_p)\,[1-\exp(-\alpha_i x_i)]$

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{3.2-1}{3.2+1}\right)^2 = 0.27438$$

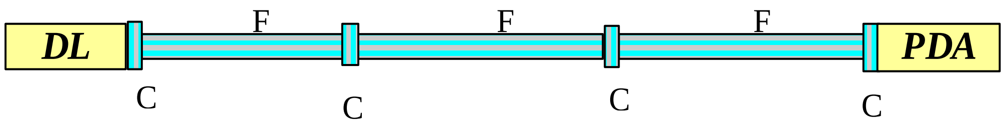
d'où l'efficacité quantique

$$\eta = \frac{P_u}{P_0} = (1-R)\exp(-\alpha_p x_p)\,[1-\exp(-\alpha_i x_i)]$$
$$= (1-0.27438)\times\exp\left(-10^4\times5\times10^{-6}\right)\times\left[1-\exp\left(-10^5\times40\times10^{-6}\right)\right]$$
$$= 0.72562 e^{-\frac{1}{20}}\left[1-e^{-4}\right] = 0.67759$$

3. Sensibilité : $S_\lambda = \dfrac{\eta e\lambda}{hc} = \dfrac{0.7\times1.602\times10^{-19}\times1.55\times10^{-6}}{6.62\times10^{-34}\times3\times10^8} = 0.875 \quad \text{A/W}$

$$S_\lambda = \frac{I}{P_0} = \frac{I}{3.5} \Longrightarrow I = 3.5\times0.875 = 3.0625\,\mu\text{A}$$
$$M = \frac{I}{I_1} \Longrightarrow I_1 = \frac{I}{M} = \frac{3.0625}{20} = 0.15313\mu A = 153.13\,\text{nA}$$
$$\Longrightarrow I_s = I_1 - I_0 = 153.13 - 120 = 33.13\,\text{nA}$$

Exercice 16 (1ère séssion 2004) *On a le système de transmission par fibres optiques monomodes suivant :*



Les paramètres sont :

* *Puissance moyenne émise par la source laser :* $P_i = -3$ *dBm à la longueur d'onde* $\lambda = 0.85$ *µm*
* *Pertes intrinsèques dans chaque fibre :* $\alpha_f = 0.9$ *dB/km*
* *Pertes de liaison fibre - fibre :* $\alpha_{ff} = 0.3$ *dB/km*
* *Pertes de connexion fibre - source et fibre - détecteur :* $\alpha_{sf} = \alpha_{fr} = 1$ *dB sur chacun*
* *Puissance reçue par la photodiode à avalanche :*
  avec 35 *Mbits/s et taux d'erreur* 10^{-9} : $P_r = -55$ *dBm*
  avec 500 *Mbits/s et taux d'erreur* 10^{-9} : $P_r = -44$ *dBm*
* *Marge de sécurité :* $M_s = 9$ *dB.*

1. *Estimer la longueur maximale possible du système sans répétiteur dans les deux cas* 35 *Mbits/s et* 500 *Mbits/s .*
2. *Estimer la longueur maximale possible si on suppose de plus que le correcteur introduit une perte équivalente à* 5 *dB.*
3. *Le facteur de multiplication de PDA est* $M = 50$ *le facteur d'excès de bruit* $F(M) = 4$ *et le facteur de bruit d'amplificateur est* $F_n = 1$*. Estimer la valeur du rapport signal à bruit au niveau de détecteur, avec* 500 *Mbits/s ; sachant que le courant d'obscurité a une intensité* $Io = 2nA$ *à la température* 23 °C*, l'efficacité quantique est de* 75%*, la résistance de charge est* $R_L = 10k\Omega$*, la capacité est* $C = 6pF$

4. *On remplace la photodiode à avalanche par une autre photodiode PIN de sensibilité spectrale $0.5A/W$. Déterminer la puissance optique demandée pour avoir la même probabilité d'erreur 10^{-9}*

Solution 16

1. faisons le bilan d'énergie du système :
Puissance injectée dans la fibre : $P_i = -3dBm = -33dB$
Puissance reçue par la photodiode : $\begin{cases} 35Mbits/s \rightarrow & -55dBm = -85dB \\ 500Mbits/s \rightarrow & -44dBm = -74dB \end{cases}$

$P_i - P_r = \begin{cases} 35Mbits/s \rightarrow & -33+85 = 52dB \\ 500Mbits/s \rightarrow & -33+74 = 41dB \end{cases}$

Les pertes sont :
$\alpha_T = \alpha_{fs} + (3\alpha_f + 2\alpha_{ff})\, L + \alpha_{fr}$
$= 1 + (3\times 0.9 + 2\times 0.3)\, L + 1 = 2 + 3.3L$
Le bilan $P_i - P_r = \alpha_T + M_s \Longleftrightarrow P_i - P_r = 2 + 3.3L + 9 = 11 + 3.3L$
$L = \dfrac{(P_i - P_r) - 11}{3.3}$
Avec 35 Mbits/s : $L = \dfrac{52-11}{3.3} = 12.424$ km
Avec 500 Mbits/s : $L = \dfrac{41-11}{3.3} = 9.0909$ km

2. La perte additionnelle du correcteur est $5dB \implies$
$\alpha_T = 11 + 3.3L + 5 = 16 + 3.3L$
Avec 35 Mbits/s : $L' = \dfrac{52-16}{3.3} = 10.909$ km
Avec 500 Mbits/s : $L = \dfrac{41-16}{3.3} = 7.5758$ km

3. L'intensité du photocourant est

$$I_p = \eta P_r \frac{\lambda}{1.24}$$

$P_r = -74dB = 10^{-4.4} = 3.9811\times 10^{-5}mW$
$P_r = 39.811nW$
$I_p = 0.75 \times \dfrac{39.811\times 0.85}{1.24} = 20.467\ nA$
La valeur quadratique moyenne du courant signal est :
$\langle i_p^2\rangle = (MI_p)^2 = \left(50\times 20.467\times 10^{-9}\right)^2 = 1.0472\times 10^{-12}A^2$
Bruit quantique : $\langle i_q\rangle^2 = 2eB\,\langle I_p + I_0\rangle\, M^2 F(M)$
B est la bande passante de photodiode
$B = \dfrac{1}{2\pi R_L C} = \dfrac{1}{2\pi\times 10^4\times 6\times 10^{-12}} = 2.6526\times 10^6$
$\langle i_q\rangle^2 = 2\times 1.6\times 10^{-19}\times 2.65\times 10^6\times (20.467+2)\times 10^{-9}\times (50)^2\times 4 = 1.9052\times 10^{-16}$
$\langle i_q\rangle^2 = 1.9052\times 10^{-16}A^2$
Bruit thermique : $\langle i_t\rangle^2 = \dfrac{4kT}{R_L}BF_n = \dfrac{4\times 1.3\times 10^{-23}\times (23+273)\times 2.65\times 10^6\times 1}{10^4}$
$\langle i_t\rangle^2 = 4.0789\times 10^{-18}A^2$
$N = \langle i_q\rangle^2 + \langle i_t\rangle^2 = 1.9052\times 10^{-16} + 4.0789\times 10^{-18} = 1.946\times 10^{-16}$
$\dfrac{S}{N} = \dfrac{\langle i_p^2\rangle}{\langle i_q\rangle^2 + \langle i_t\rangle^2} = \dfrac{1.0472\times 10^{-12}}{1.946\times 10^{-16}} = 5381.3$
$\left(\dfrac{S}{N}\right)_{dB} = 10\log_{10}(5381.3) = 37.309$ dB

4. Selon la statistique de Poisson la probabilité de détecter N photons au voisinage d'une valeur moyenne N_m est $P(N, N_m) = \left(\dfrac{N_m}{N!}\right)^N \exp(-N_m)$ alors la probabilité de étecter 0 photons parmis N_m photons par impulsion est $P(0, N_m) = \exp(-N_m)$ donc le taux d'erreur pour les élements binaires (0) et (1) est $P_e = \frac{1}{2}\exp(-N_m)$

Pour $P_e = 10^{-9}$ on a $\exp(-N_m) = 2 \times 10^{-9} \Longrightarrow N_m = -\ln\left(2 \times 10^{-9}\right) \simeq 20$ photons par impulsion

La puissance moyenne d'une impulsion est donc : $P_M = \dfrac{E}{\Delta t}$ pour un débit de 500Mbits/s . si les élements (0) et (1) sont équiprobale alors la puissance est associée à $\dfrac{b}{2} \Longrightarrow \Delta t = \dfrac{2}{b}$

$$P_M = \frac{N_m bhc}{2\lambda} = \frac{20 \times 5 \times 10^7 \times 6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.85 \times 10^{-6} \times 2}$$
$$= 1.1647 \times 10^{-10} W = 11.64\ nW$$

La puissance minimale demandée est $P_m = \dfrac{P_M}{\eta}$

$$S_\lambda = \eta\frac{\lambda}{1.24} \Longrightarrow \eta = \frac{S_\lambda \times 1.24}{\lambda}$$
$$P_m = \frac{P_M \times \lambda_{\mu m}}{1.25 \times S_\lambda} = \frac{11.64 \times 0.85}{1.24 \times 0.5} = 15.958\,\mathrm{nW}$$

Exercice 17 (1ère session 2004) *On réaliser une liaison par fibre optique, de longueur 5km , en utilisant une diode laser avec une photodiode.*
La diode laser émet de la lumière de longueur d'onde $\lambda = 1.3\ \mu m$, de largeur spectrale $\Delta\lambda = 0.1\mu m$ et de puissance optique $2mW$, elle est munit d'une fibre amorce d'indices 1.48 et 1.46, son rayon de coeur est $a_1 = 51\mu m$.
La photodiode est à avalanche de facteur de multiplication $M = 50$, d'efficacité quantique $\eta = 75\%$ et la bande passante de réception est $5MHz$. La liaison entre terminaux est réaliser à l'aide d'une fibre à saut d'indice telle que $n_1 = 1.48$ et $n_2 = 1.5$ et de rayon du coeur $a = 50\mu m$.

1. *Sachant que la perte linéique totale dans la fibre est 3 dB/km. Déterminer la valeur totale de perte en considérant que la perte due à la connexion fibre - détecteur est d'ordre 2dB*
2. *Calculer la valeur du photocourant généré par la photodiode .*
3. *Si le coefficient de dispersion chromatique de la fibre est $M_d = 60\ ps \cdot nm/km$. Calculer la valeur de la bande passante optique de fibre . Comparer cette valeur avec celle du détecteur.*

Solution 17

1. Perte totale : $\alpha_T = \alpha_f + \alpha_{sf} + \alpha_{fc}$
   $\alpha_f = 3 \times 5 = 15$ dB, $\alpha_{fc} = 2$ dB
   α_{sf} est la perte totale due à la connexion source-fibre :
   (a) perte due à la différence des ON :
   $$\alpha_{ON} = 20\log_{10}\left(\frac{ON_s}{ON_f}\right)$$
   $$= 20 \times \log_{10}\left(\sqrt{\frac{(1.48)^2 - (1.46)^2}{(1.5)^2 - (1.48)^2}}\right) = -5.8689 \times 10^{-2}$$
   (b) Perte due à la différence de surface :
   $$\alpha_a = 20\log_{10}\left(\frac{a_e}{a_f}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{51}{50}\right) = 0.172$$
   (c) Perte de Fresnel : $\alpha_F = 10\log_{10}\left(\dfrac{\frac{4n_{2f}}{(n_{2f}+1)^2}}{\frac{4n_{2e}}{(n_{2e}+1)^2}}\right)$
   $$= 10\log_{10}\left(\frac{\frac{4 \times 1.5}{(1.5+1)^2}}{\frac{4 \times 1.48}{(1.48+1)^2}}\right) = -1.1471 \times 10^{-2}$$

$\alpha_{sf} = -5.8689 \times 10^{-2} + 0.172 - 1.1471 \times 10^{-2} = 0.10184$
$\alpha_T = 15 + 0.10184 + 2 = 17.102$

2. La puissnace optique de la source est : $2mW = 3dB_m = -27dB$
La puissance incidente sur la photodiode est
$P_r = -27 - 17.102 = -44.102 = 10^{-4.4102} = 3.8887 \times 10^{-5} W = 38.9 \mu W$
L'intensité du photcourant est :
$I_p = \eta \frac{e\lambda P_r}{hc} = \eta P_r \frac{\lambda}{1.24} = \frac{0.75 \times 1.3 \times 38.9}{1.24} = 30.587\ \mu A$
Le courant multiplié est $I_M = MI_p = 50 \times 30.587 = 1529.4 \mu A = 1.529$ mA

3. La dispersion totale est $\Delta t = \sqrt{(\Delta t_n)^2 + (\Delta t_m)^2}$

$$\Delta t_n = \frac{L(ON)^2}{2cn_{2f}} = \frac{5 \times 10^3 \times \left((1.5)^2 - (1.48)^2\right)}{2 \times 3 \times 10^8 \times 1.5} = 3.3111 \times 10^{-7} \sec = 33.1 \mu s$$

$\Delta t_m = M_d L \Delta\lambda = 60 \times 5 \times 0.1 \times 10^3 = 30000\ ps = 0.03 \mu s$

$\Delta t = \sqrt{(33.1)^2 + (0.03)^2} = 33.1$

$$B_f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{33.1 \times 10^{-6}} = 3.0211 \times 10^{-2} MHz = 30211. Hz < B_r$$