

Control de Comunicacions Òptiques

Grup 10 - 19 de Desembre 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.

1. La definició d'eficiència quàntica en un fotodetector és la següent:

a. $\eta = \frac{I \cdot hf}{P \cdot q}$

b. $\eta = \frac{P \cdot q}{I \cdot hf}$

c. $\eta = \frac{I \cdot q}{P \cdot hf}$

d. $\eta = \frac{P \cdot hf}{I \cdot q}$

2. El corrent que lliura un fotodiode és, en general, un procés:

a. Determinista

b. Estacionari

c. Cicloestacionari

d. No estacionari

3. La sensibilitat en una detecció PSK és:

a. 6 dB millor que en una detecció ASK

b. 6 dB pitjor que en una detecció ASK

c. 3 dB millor que en una detecció ASK

d. 3 dB pitjor que en una detecció ASK

4. En un sistema de comunicacions per fibra òptica amb modulació d'intensitat, la sensibilitat d'un receptor (en potència òptica promig per bit) quan es canvia de format NRZ a RZ serà:

a. 3 dB millor

b. la mateixa

c. 3 dB pitjor

d. depèn de quin sigui el soroll dominant

5. A un fotodiode amb eficiència quàntica η li arriben n fotons per bit. La variància del número de fotoportadors per bit lliurats pel fotodiode segueix, en general, l'expressió:

a. $\sigma_e^2 = \eta(\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + \eta^2 \langle n \rangle$

b. $\sigma_e^2 = \eta(\sigma_n^2 - \langle n \rangle)^2 + \eta^2 \langle n \rangle$

c. $\sigma_e^2 = \eta^2(\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + \eta \langle n \rangle$

d. $\sigma_e^2 = \eta^2(\sigma_n^2 - \langle n \rangle)^2 + \eta \langle n \rangle$

6. Considereu un receptor òptic amb fotodiode APD de Silici (figura de soroll $F(M)=M^x$) que rep una potència òptica constant. Calculeu la millora en dBs aproximada introduïda en la SNR quan s'ha optimitzat el paràmetre de guany ($M_{OPT} \gg 1$) per a obtenir una SNR màxima respecte el cas $M=1$:

a. $10 \log \left(M_{OPT}^2 \frac{x}{x+2} \right)$

b. $10 \log \left(M_{OPT}^2 \frac{x+2}{x} \right)$

c. $10 \log \left(M_{OPT}^{2+x} \frac{x}{x+2} \right)$

d. $10 \log \left(M_{OPT}^{2+x} \frac{x+2}{x} \right)$

7. En un enllaç per fibra òptica (α dB/km) el receptor basat en fotodiode PIN es pot considerar que interpreta estadístiques gaussianes tot i que el soroll tèrmic és nul. El transmissor làser emet polsos òptics ideals de $\langle n_1 \rangle$ i $\langle n_0 \rangle \neq 0$ fotons per bit "1" i "0" respectivament. Si s'exigeix un paràmetre de qualitat Q, quina és la màxima longitud permesa de l'enllaç ?:

a. $L \leq \frac{10}{\alpha} \log \left\{ \frac{\eta}{Q^2} (\langle n_1 \rangle + \langle n_0 \rangle)^2 \right\}$

b. $L \leq \frac{10}{\alpha} \log \left\{ \frac{\eta}{Q^2} (\langle n_1 \rangle - \langle n_0 \rangle)^2 \right\}$

c. $L \leq \frac{10}{\alpha} \log \left\{ \frac{\eta}{Q^2} (\sqrt{\langle n_1 \rangle} + \sqrt{\langle n_0 \rangle})^2 \right\}$

d. $L \leq \frac{10}{\alpha} \log \left\{ \frac{\eta}{Q^2} (\sqrt{\langle n_1 \rangle} - \sqrt{\langle n_0 \rangle})^2 \right\}$

8. Continuant amb l'exercici anterior, assumiu un diferencial entre bits constant $\langle n_1 \rangle = \langle n_0 \rangle + \Delta n$, determineu el nivell del bit "0" $\langle n_0 \rangle$ que maximitza la longitud de l'enllaç:

a. $\langle n_0 \rangle = 0$

b. $\langle n_0 \rangle = \Delta n / 2$

c. $\langle n_0 \rangle = \Delta n$

d. $\langle n_0 \rangle = \infty$

9. Un enllaç per fibra òptica està caracteritzat per:

- Font làser ideal que emet 2 mW a tercera finestra
- Format de modulació NRZ a 2.5 Gb/s
- Fibra monomode estàndard ($D=16$ ps/Km/nm, $\alpha=0.2$ dB/Km a 1550 nm)
- Fotodetector APD ($R=0.7$, $M=100$, $F_{APD}=15$ dB, soroll tèrmic i corrent de foscor menyspreables)

Trobeu la distància màxima de l'enllaç (limitada per atenuació) si s'exigeix una probabilitat d'error de 10^{-9} i indiqueu a quants Km ens quedem del límit quàntic aproximadament:

- a. 50 Km **b. 100 Km** c. 150 Km d. 200 Km

10. Continuant amb l'exercici anterior, si es disposa d'un receptor format per un preamplificador òptic ($G_{\text{unsat}}=30$ dB i $\rho=1.58$) més un fotodiode PIN ideal, trobeu la distància màxima de l'enllaç (limitada per atenuació) si s'exigeix una probabilitat d'error de 10^{-9} i indiqueu aproximadament a quants Km ens quedem del límit quàntic. Preneu com a soroll dominant el batut senyal-ASE.

- a. 20 Km **b. 40 Km** c. 80 Km d. 120 Km

11. La potència òptica incident sobre un amplificador òptic (amb una potència de saturació P_s) que fa que el guany sigui el 50% del valor en petita senyal (G_0) ve donada per l'expressió:

- a. $P_{3\text{dB}} = P_s$ b. $P_{3\text{dB}} = P_s \frac{\ln 2}{G_0}$ c. $P_{3\text{dB}} = P_s \frac{\ln 2}{2G_0}$ **d. $P_{3\text{dB}} = P_s \frac{2 \ln 2}{G_0}$**

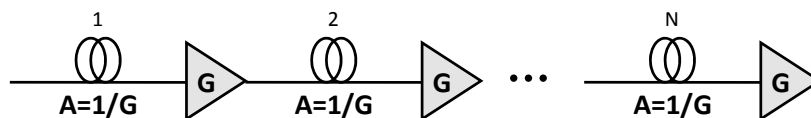
12. En el procés de disseny d'un EDFA, la longitud de la fibra dopada:

- a. Com més gran sigui, major guany.
b. Existeix un valor òptim que decreix quan el nivell de bombeig creix.
c. Existeix un valor òptim que creix quan el nivell de bombeig creix.
d. El guany només depèn de la concentració d'erbi en la fibra dopada.

13. Determineu la condició de millora de la BER, en quant al número de fotons promig rebuts per bit, d'un receptor basat en un fotodiode PIN (eficiència quàntica η , desviació tipus en el número d'electrons de soroll tèrmic per bit σ_{th}) quan s'introdueix un preamplificador òptic (paràmetre d'emissió espontània ρ i guany $G \gg 1$). Preneu les suposicions que considereu oportunes:

- a. $\langle n_a \rangle < \frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta} \left(\frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta \rho} - 1 \right)$ b. $\langle n_a \rangle < \frac{2\sigma_{\text{th}}}{\eta} \left(\frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta \rho} - 1 \right)$
c. $\langle n_a \rangle < \frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta} \left(\frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta} - \rho \right)$ d. $\langle n_a \rangle < \frac{2\sigma_{\text{th}}}{\eta} \left(\frac{\sigma_{\text{th}}}{\eta} - \rho \right)$

14. Es pretén calcular la SNR de l'enllaç de la figura, on $G \gg 1$ és el guany dels amplificadors i A és l'atenuació del tram de fibra. Tal com il·lustra la figura, els amplificadors compensen perfectament les pèrdues de cada tram de fibra. Obteniu la variància del número de fotons per bit a la sortida (m) d'un tram de fibra amb atenuació A en funció de la mitja i la variància del número de fotons per bit a l'entrada (n):



- a. $\sigma_m^2 = A \langle n \rangle$ b. $\sigma_m^2 = A (\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + A^2 \langle n \rangle$
c. $\sigma_m^2 = A^2 (\sigma_n^2 - \langle n \rangle)$ **d. $\sigma_m^2 = A^2 (\sigma_n^2 - \langle n \rangle) + A \langle n \rangle$**

15. Continuant amb l'exercici anterior, assumint que al principi de l'enllaç es disposa d'un làser ideal que emet llum 100% coherent, determineu la SNR aproximada de N trams fibra-amplificador. Considereu que el nivell de senyal és prou gran:

- a. $\text{SNR}_N \approx 2 \langle n \rangle / (N \rho G)$ b. $\text{SNR}_N \approx 3 \langle n \rangle / (N \rho G)$
c. $\text{SNR}_N \approx \langle n \rangle / (2 N \rho G)$ d. $\text{SNR}_N \approx \langle n \rangle / (3 N \rho G)$

PROBLEMA (4 punts)

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

Es disposa d'un receptor de comunicacions òptiques basat en un fotodiode PIN (responsivitat \mathfrak{R}). Es pretén determinar els marges de potència per als quals les prestacions milloraran pel fet d'emprar un fotodiode APD (responsivitat \mathfrak{R} , paràmetre de guany M i factor de soroll F) o bé introduir un preamplificador òptic (guany G i paràmetre d'emissió espontània ρ). El paràmetre de qualitat serà la SNR, l'amplada de banda elèctric de referència és B i la variància de corrent deguda al soroll tèrmic σ_{th}^2 .

- 1) Determineu el marge de potència òptica rebuda en el qual la SNR millora si emprem un fotodiode APD (factor de soroll F) respecte el cas d'haver utilitzat un fotodiode PIN (utilitzeu únicament l'aproximació $M \gg 1$).

a) $P < \frac{2qB\mathfrak{R}}{\sigma_{th}^2 [F-1]}$

b) $P > \frac{2qB\mathfrak{R}}{\sigma_{th}^2 [F-1]}$

c) $P < \frac{\sigma_{th}^2}{2qB\mathfrak{R}[F-1]}$

d) $P > \frac{\sigma_{th}^2}{2qB\mathfrak{R}[F-1]}$

- 2) Quina condició s'hauria de complir per a que l'APD fos sempre millor que el PIN ?.

a) $F < 1$

b) $F < 0$

c) $F > 1$

d) $F > 0$

- 3) És possible ?.

a) Si

b) Si, si el soroll tèrmic és nul

c) No

d) No, si el soroll tèrmic és nul

- 4) Determineu el marge de potència òptica rebuda en el qual la SNR millora si introduïm un amplificador òptic (AO) enfront del fotodiode PIN (utilitzeu les aproximacions $G \gg 1$ així com $\sigma_{th}^2 \gg 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2$).

a) $P < \frac{\sigma_{th}^2}{2\mathfrak{R}B[2\mathfrak{R}hf\rho - q]}$

b) $P > \frac{\sigma_{th}^2}{2\mathfrak{R}B[2\mathfrak{R}hf\rho - q]}$

c) $P < \frac{2\mathfrak{R}B}{\sigma_{th}^2 [2\mathfrak{R}hf\rho - q]}$

d) $P > \frac{2\mathfrak{R}B}{\sigma_{th}^2 [2\mathfrak{R}hf\rho - q]}$

- 5) Quina condició s'hauria de complir per a que l'AO fos sempre millor que el PIN ?.

a) $\rho > 1/2\eta$

b) $\rho < 1/2\eta$

c) $\rho < 2/\eta$

d) $\rho > 2/\eta$

- 6) És possible ?.

a) Si

b) Si, si el soroll tèrmic és nul

c) No

d) No, si el soroll tèrmic és nul

- 7) Determineu ara el marge de potència òptica rebuda en el qual la SNR del receptor basat en AO + PIN és millor que en el receptor APD (utilitzeu les aproximacions $G \gg M$ així com $\sigma_{th}^2/M^2 \gg 4\Re^2(hf)^2 \rho^2 B^2$).

$$a) P < \frac{\sigma_{th}^2/M^2}{2\Re B[2\Re hf \rho - qF]}$$

$$b) P > \frac{\sigma_{th}^2/M^2}{2\Re B[2\Re hf \rho - qF]}$$

$$c) P < \frac{M^2 2\Re B}{\sigma_{th}^2 [2\Re hf \rho - qF]}$$

$$d) P > \frac{M^2 2\Re B}{\sigma_{th}^2 [2\Re hf \rho - qF]}$$

- 8) Quina condició s'hauria de complir per a que la SNR del receptor basat en AO + PIN fos sempre millor que en el receptor APD.

$$a) \rho > (F+1)/2\eta$$

$$b) \rho < (F+1)/2\eta$$

$$c) \rho > F/2\eta$$

$$d) \rho < F/2\eta$$

- 9) És possible ?.

a) Si

b) Si, si el soroll tèrmic és nul

c) No

d) No, si el soroll tèrmic és nul

- 10) Si es compleix que $\rho > (F+1)/2\eta$, ordeneu els tipus de receptor en funció de quin ofereix millor SNR quan la potència òptica rebuda passa de 0 a ∞ (utilitzeu les aproximacions $G \gg M$ així com $\sigma_{th}^2/M^2 \gg 4\Re^2(hf)^2 \rho^2 B^2$).

a) PIN \rightarrow OA

b) PIN \rightarrow APD \rightarrow OA

c) OA \rightarrow PIN

d) OA \rightarrow APD \rightarrow PIN

Resolució

- 1) APD vs. PIN:

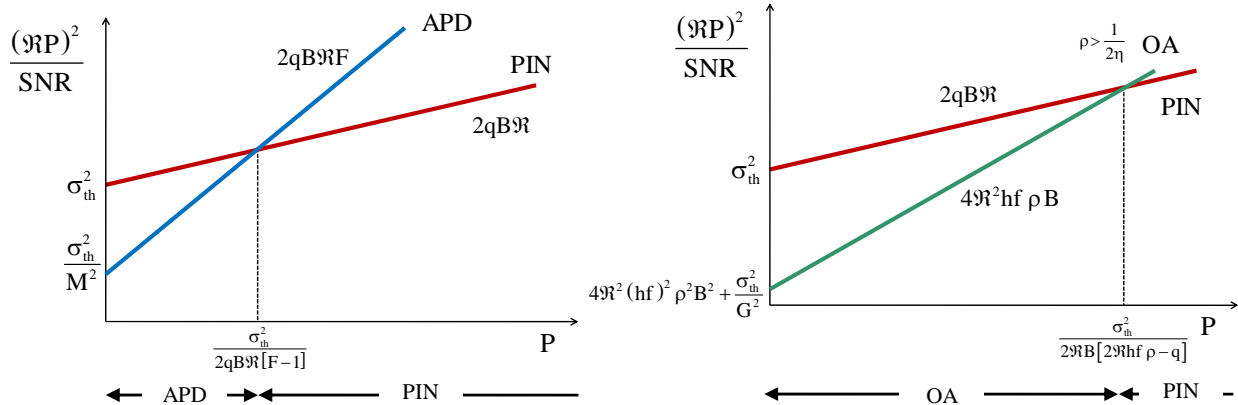
$$SNR_{APD} = \frac{(\Re P)^2}{2qBF \cdot \Re P + \frac{\sigma_{th}^2}{M^2}} > \frac{(\Re P)^2}{2qB \cdot \Re P + \sigma_{th}^2} = SNR_{PIN}$$

$$2qB \cdot \Re P + \sigma_{th}^2 > 2qBF \cdot \Re P + \frac{\sigma_{th}^2}{M^2}$$

$$P \cdot 2qB\Re[F-1] < \sigma_{th}^2 \left[1 - \frac{1}{M^2} \right] \rightarrow P < \frac{\sigma_{th}^2}{2qB\Re[F-1]} \equiv P_{APD-PIN}$$

$$M \gg 1$$

Aquesta és la condició que ha de complir la potència òptica per a que l'APD millori les prestacions del receptor. A la figura següent es poden verure representats els denominadors de la funció SNR, on el que interessa és tenir un valor petit per tal de que la SNR sigui gran. Comparant el PIN i l'APD es pot apreciar com les funcions es creuen en el punt trobat anteriorment i que per definició passen dues coses, la SNR per a un nivell de potència tendint a zero és sempre millor en l'APD, i el pendent és superior en l'APD si $F > 1$, és a dir sempre.



2-3) Observant la gràfica es veu clar que per a que la SNR de l'APD sigui sempre millor s'ha de donar que $F > 1$, per tant no és possible.

4) OA vs. PIN:

En l'AO menyspreem els termes de soroll shot enfront dels termes de batut donat que $G \gg 1$.

$$\text{SNR}_{OA} \approx \frac{(\mathfrak{R}P)^2}{4\mathfrak{R}^2 hf \rho B P + 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2 + \frac{\sigma_{th}^2}{G^2}} > \frac{(\mathfrak{R}P)^2}{2qB \cdot \mathfrak{R}P + \sigma_{th}^2} = \text{SNR}_{PIN}$$

$$2qB \cdot \mathfrak{R}P + \sigma_{th}^2 > 4\mathfrak{R}^2 hf \rho B P + 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2 + \frac{\sigma_{th}^2}{G^2}$$

$$P \cdot 2\mathfrak{R}B[2\mathfrak{R}hf \rho - q] < \sigma_{th}^2 \left[1 - \frac{1}{G^2} \right] - 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2$$

$G \gg 1$

$$P < \frac{\sigma_{th}^2 - 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2}{2\mathfrak{R}B[2\mathfrak{R}hf \rho - q]} \approx \frac{\sigma_{th}^2}{2\mathfrak{R}B[2\mathfrak{R}hf \rho - q]} = P_{OA-PIN}$$

$\sigma_{th}^2 \gg 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2$

Observant la part dreta de la gràfica anterior, s'observa que donades les condicions de l'enunciat (condicions habituals en un cas realista), tenim una situació pareguda al cas anterior. Per determinar quin dels dos pendents és superior, es pot fer:

$$4\mathfrak{R}^2 hf \rho B > 2qB \cdot \mathfrak{R} \rightarrow \rho > \frac{1}{2} \frac{q}{\mathfrak{R}hf} = \frac{1}{2\eta}$$

5-6) Per a que l'AO dones millors prestacions per a qualsevol nivell de potència s'hauria de donar que el pendent fos inferior, és a dir:

$$\rho < \frac{1}{2\eta}$$

Donat que l'eficiència quàntica d'un fotodetector real no és en cap cas inferior a 0.5 i que el paràmetre d'emissió espontània ha de ser major que 1, aquesta condició no es pot donar.

7) OA vs. APD:

Igual que abans, en l'AO menyspreem els termes de soroll shot enfront dels termes de batut donat que $G \gg 1$.

$$\text{SNR}_{\text{OA}} \approx \frac{(\mathfrak{R}P)^2}{4\mathfrak{R}^2 hf \rho B P + 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2 + \frac{\sigma_{\text{th}}^2}{G^2}} > \frac{(\mathfrak{R}P)^2}{2qB \cdot \mathfrak{R}P \cdot F + \frac{\sigma_{\text{th}}^2}{M^2}} = \text{SNR}_{\text{APD}}$$

$$2qB \cdot \mathfrak{R}P \cdot F + \frac{\sigma_{\text{th}}^2}{M^2} > 4\mathfrak{R}^2 hf \rho B P + 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2 + \frac{\sigma_{\text{th}}^2}{G^2}$$

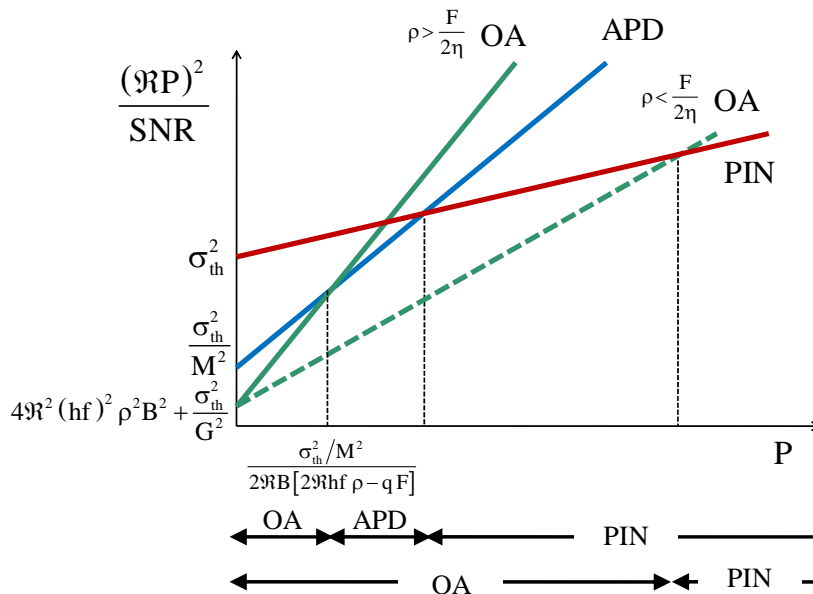
$$P \cdot 2\mathfrak{R}B [2\mathfrak{R}hf \rho - qF] < \sigma_{\text{th}}^2 \left[\frac{1}{M^2} - \frac{1}{G^2} \right] - 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2$$

$$P < \frac{\sigma_{\text{th}}^2 \left[\frac{1}{M^2} - \frac{1}{G^2} \right] - 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2}{2\mathfrak{R}B [2\mathfrak{R}hf \rho - qF]} \approx \frac{\frac{\sigma_{\text{th}}^2}{M^2}}{2\mathfrak{R}B [2\mathfrak{R}hf \rho - qF]} = P_{\text{OA-APD}}$$

$$G \gg M$$

$$\frac{\sigma_{\text{th}}^2}{M^2} \gg 4\mathfrak{R}^2 (hf)^2 \rho^2 B^2$$

En aquest cas dibuixem dues situacions en funció de si el pendent del receptor amb AO és més gran o més petit que el receptor APD. En qualsevol cas han de ser superiors al pendent del receptor PIN.



8-9) Per tal de determinar si l'AO pot ser sempre millor que l'APD trobem la condició de pendent:

$$4\mathfrak{R}^2 hf \rho \cancel{B} < 2q\cancel{B} \cdot \cancel{\mathfrak{R}} \cdot F \rightarrow \rho < \frac{F}{2\mathfrak{R} hf} \cdot \frac{q}{\mathfrak{R}} = \frac{F}{2\eta}$$

En aquest cas es veu clar que si que es pot complir i, de fet, és el més habitual.

10) En aquest punt es tracta de determinar quin receptor és el millor en funció del nivell de potència rebut. En la gràfica anterior es veu clar que per a potències petites el millor receptor és el basat amb AO mentre que per a potències grans el millor és el receptor PIN. Falta determinar si es pot donar el cas que per a potències intermèdies pot ser millor el receptor APD. Per a que es doni aquesta situació ha de succeir que el creuament entre la gràfica AO i APD tingui lloc abans que el creuament entre l'APD i el PIN, així doncs només cal fer:

$$P_{OA-APD} = \frac{\frac{\sigma_{th}^2}{M^2}}{2\Re B [2\Re hf \rho - q F]} < \frac{\frac{\sigma_{th}^2}{M^2}}{2\Re B q [F-1]} = P_{APD-PIN}$$

$$q[F-1] < M^2 [2\Re hf \rho - q F]$$

$$q[F-1] + M^2 q F = q(M^2 F + F - 1) = q(F(M^2 + 1) - 1)$$

$$q(F(M^2 + 1) - 1) < M^2 2\Re hf \rho \rightarrow \rho > \frac{q F(M^2 + 1)}{M^2 2\Re hf} = \frac{F}{2\eta} \frac{M^2 + 1}{M^2} \approx \frac{F}{2\eta}$$

$$M \gg 1$$

$$q[M^2(F+1) - 1] < M^2 2\Re hf \rho \rightarrow \rho > \frac{q M^2 (F+1)}{M^2 2\Re hf} = \frac{F+1}{2\eta}$$

$$M \gg 1$$

Així doncs es veu com la condició és pràcticament la mateixa que en el cas anterior. De totes maneres, donat que l'enunciat imposa la condició $\rho > (F+1)/2\eta$ queda clar que l'ordenació dels receptors per a una potència òptica creixent ha de ser: OA \rightarrow APD \rightarrow PIN. Aquest cas no és realista.