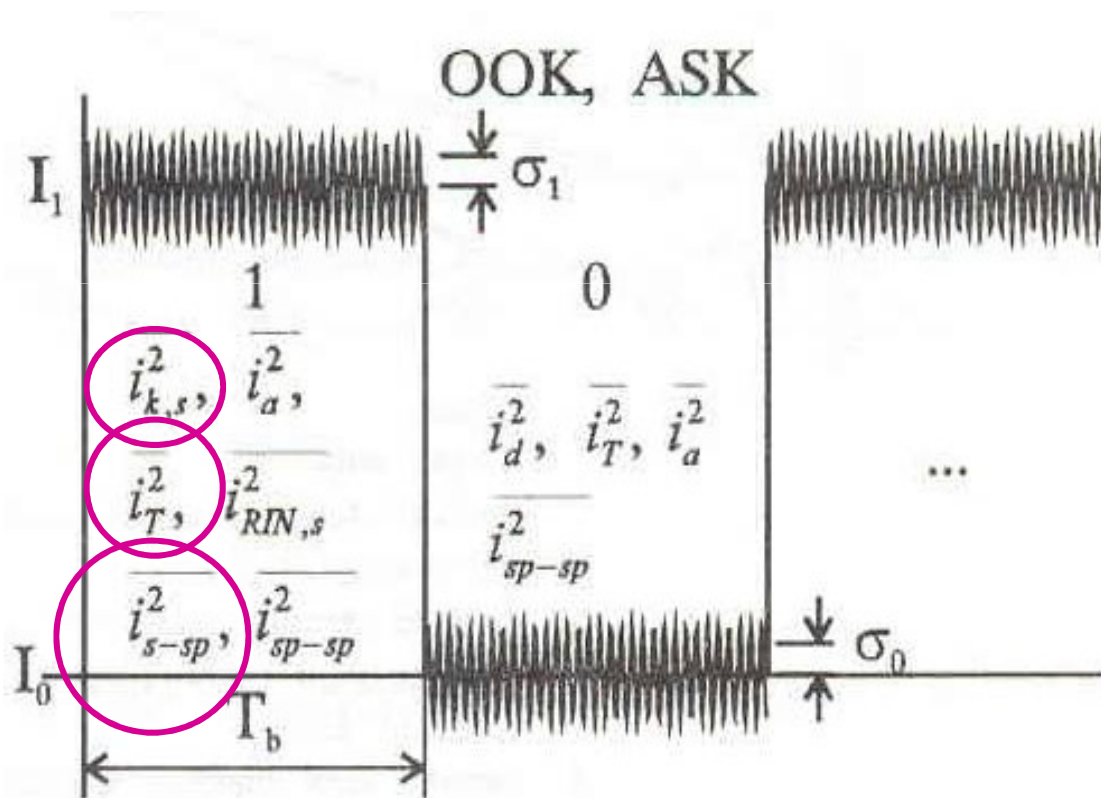


Signal in šum na zvezah in sistemih ¹

Mobitel d.d.,
izobraževanje

18. 6. 2010,
predavanje 12

Prof. dr. Jožko
Budin



Vsebina

1. Osnovni šumi:

- dioda PIN
- dioda APD
- optični ojačevalnik
- BER

2. Enačba neojačevane optične zveze:

- dioda PIN
- dioda APD

3. Enačba ojačevane optične zveze

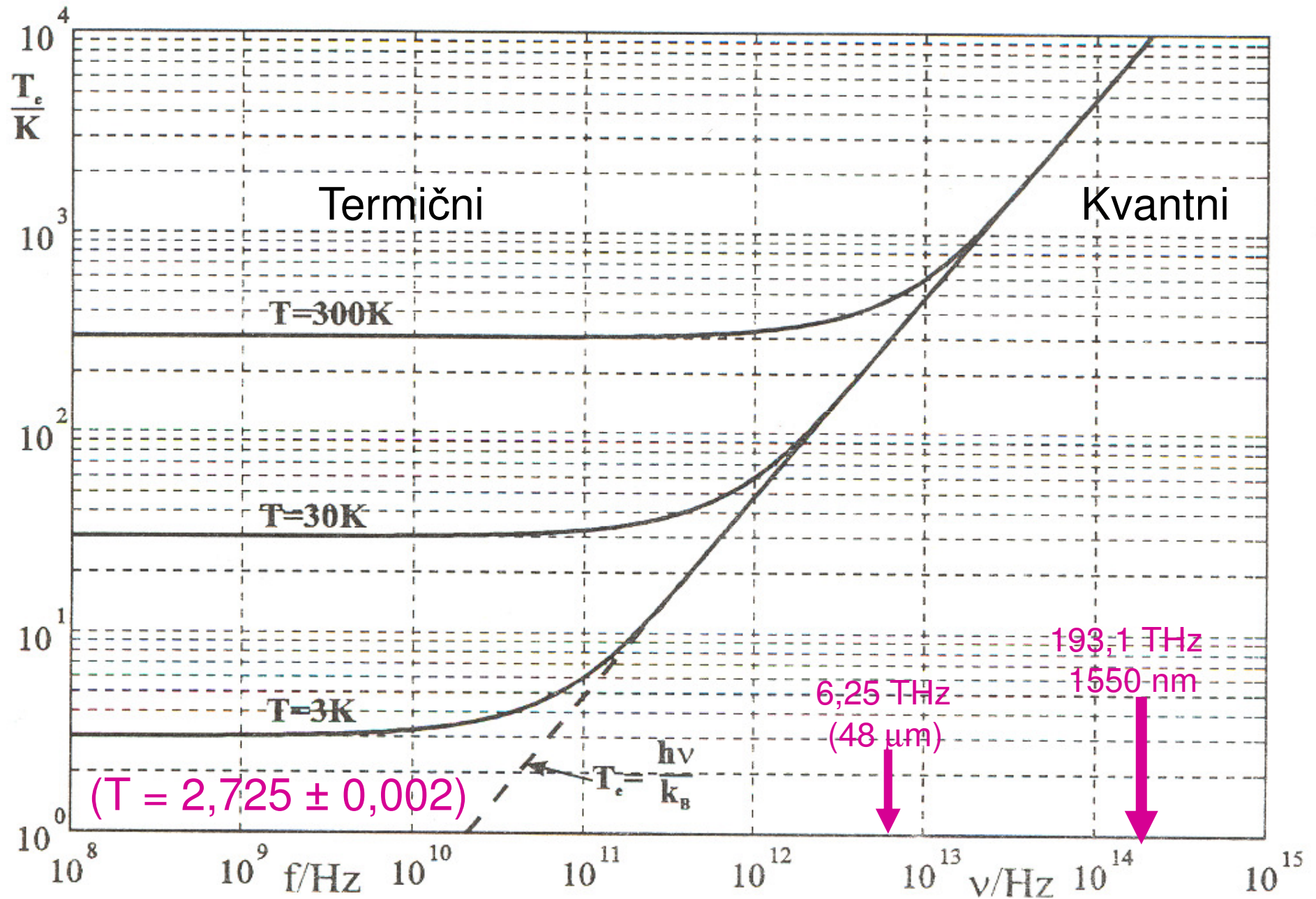
4. Enačba koherentne zveze

5. Stisnjena svetloba

6. Temna energija

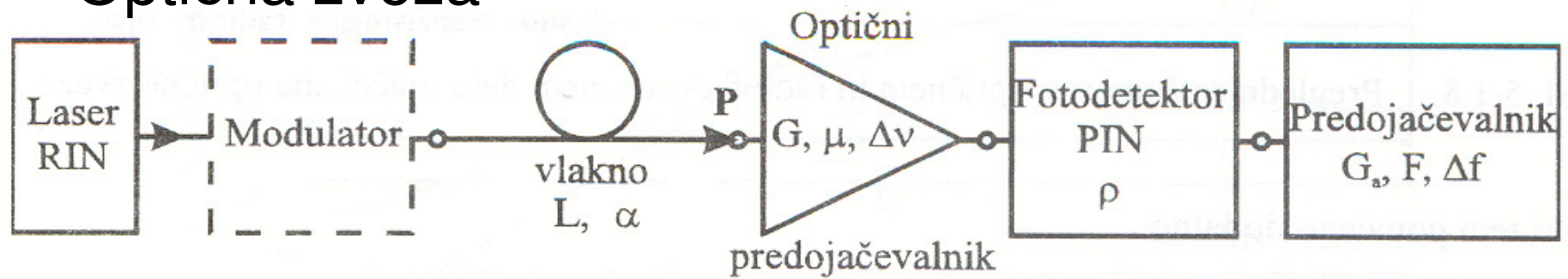
Uvod

Termični in kvantni šum

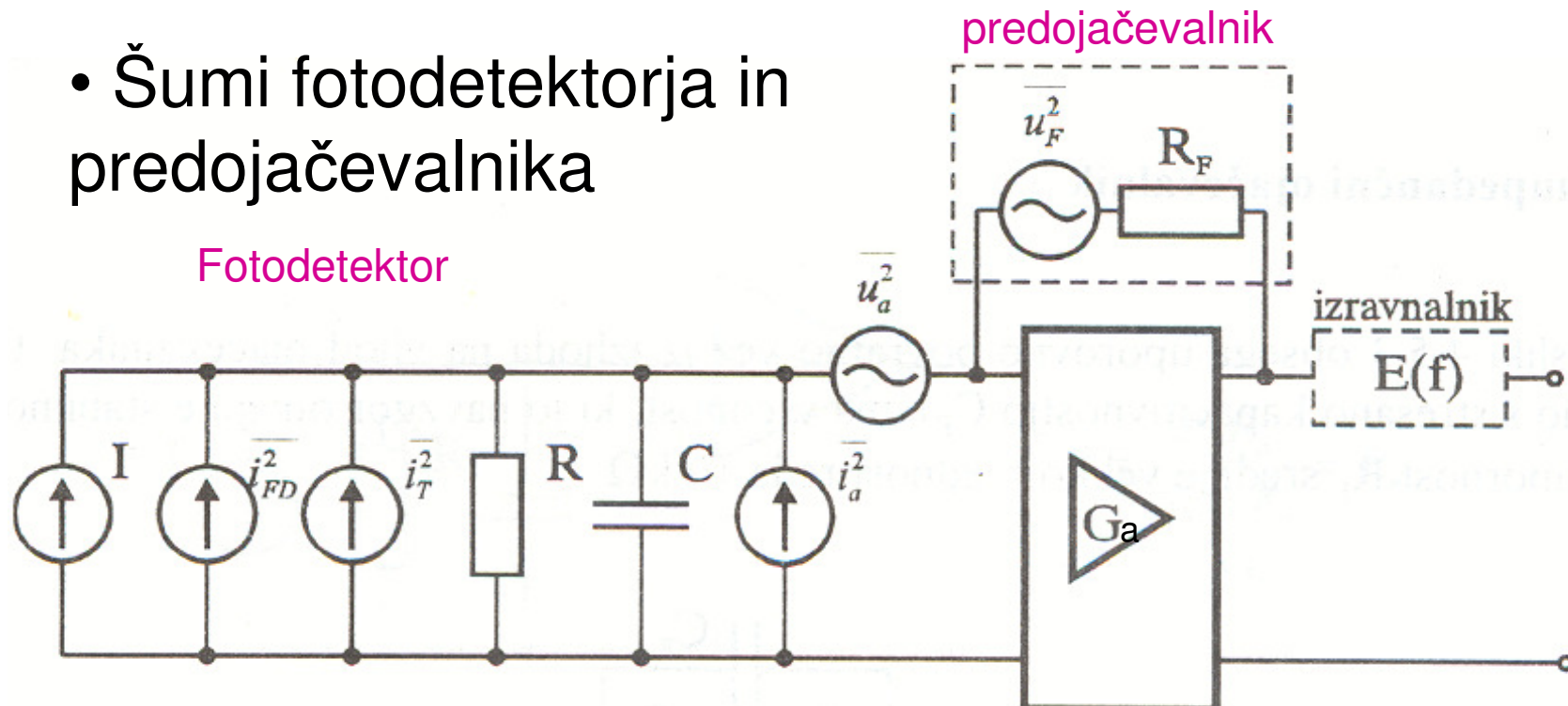


Fotodetektor in predojačevalnik

- Optična zveza

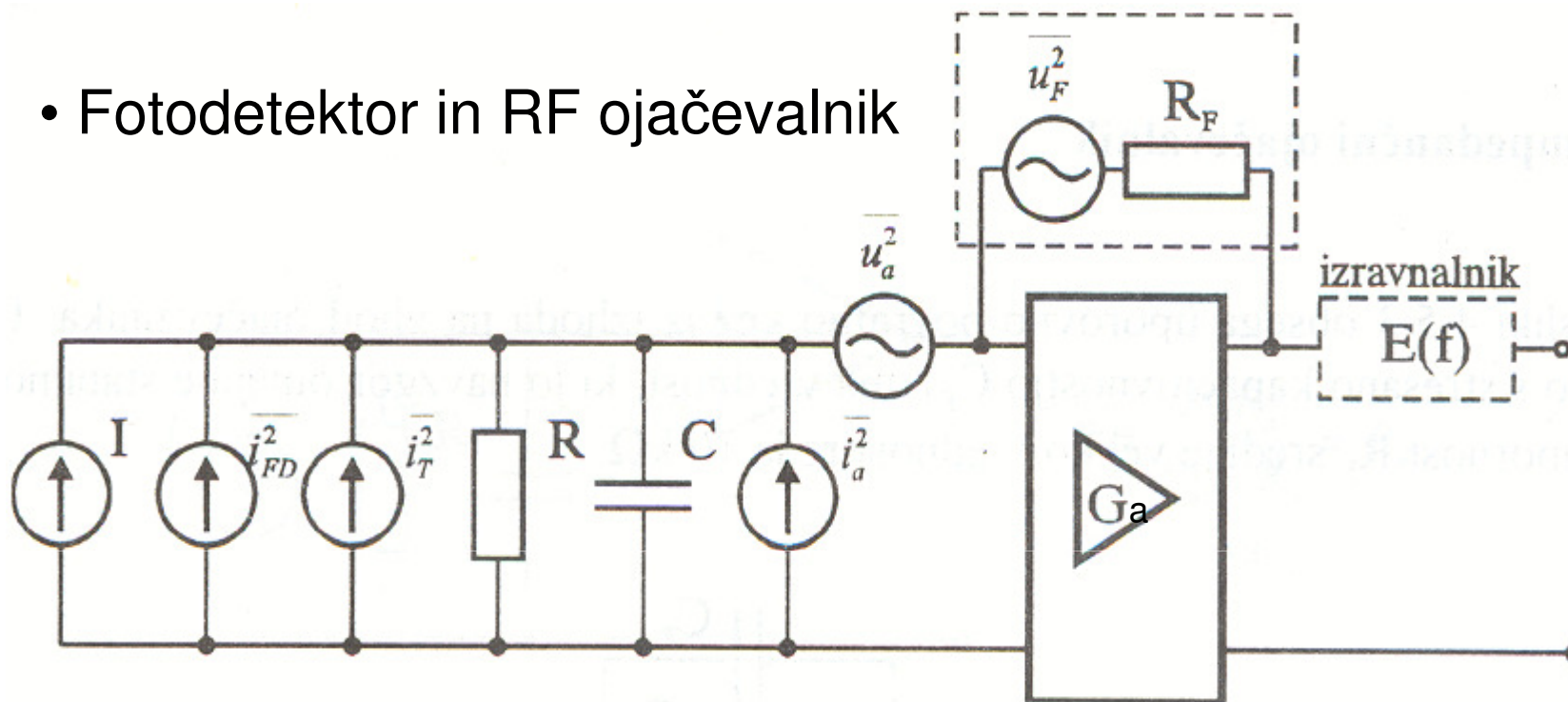


- Šumi fotodetektorja in predojačevalnika



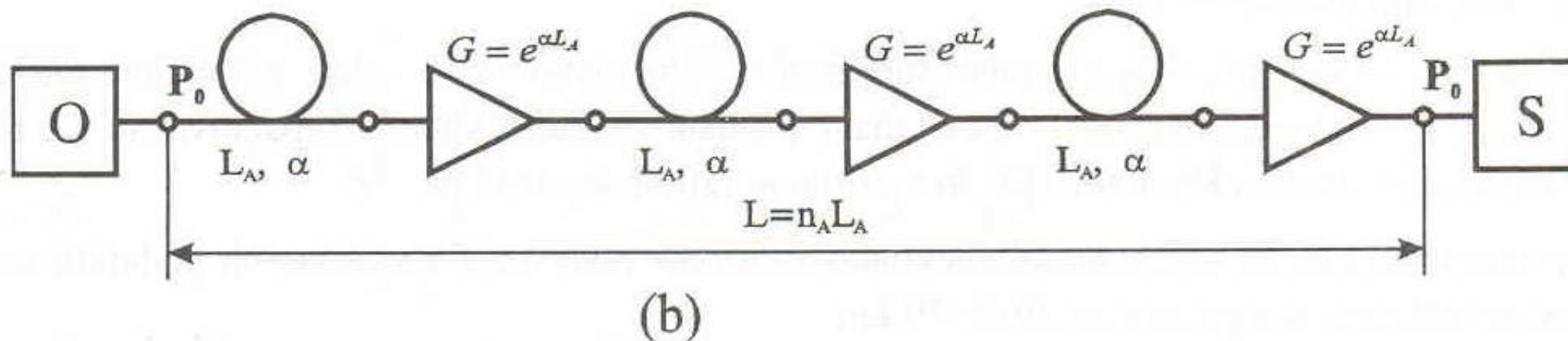
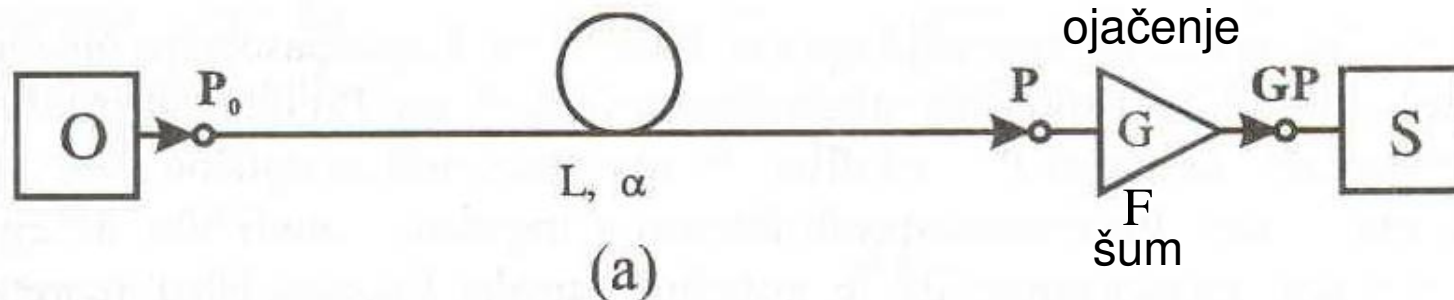
Nadomestna vezava šumnih generatorjev ⁶

- Fotodetektor in RF ojačevalnik



Nadomestna vezava šumnih generatorjev. Optični šum i_{FD}^2 fotodetektorja in termični šum bremena i_T^2 sta vhodna šuma predajačevalnika. Šumi i_a^2 , u_a^2 in u_F^2 so notranji šumi predajačevalnika. Izravnalnik se uporablja pri visokoimpedančnem ojačevalniku. Povratna zanka se uporablja pri transimpedančnem ojačevalniku.

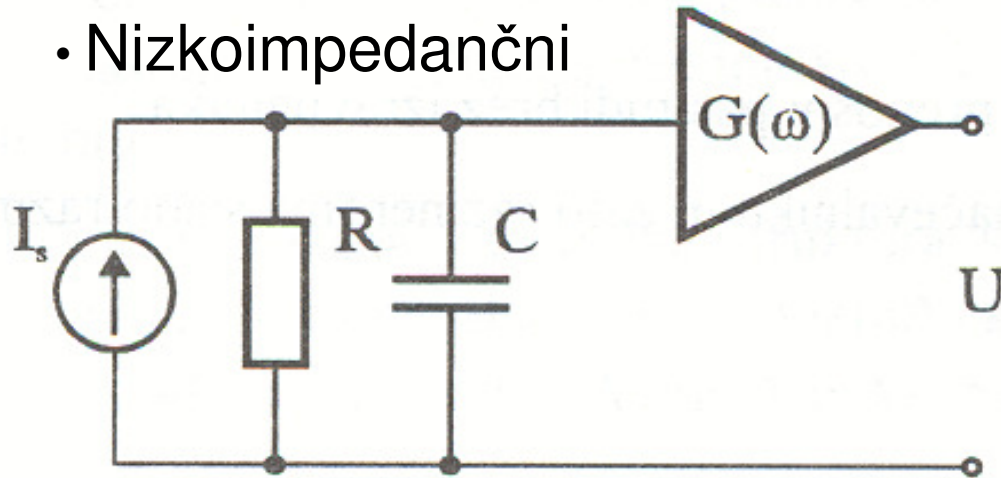
Predojačevanje in linijsko ojačevanje ⁷



- (a) Predojačevalnik povečuje občutljivost sistema
- (b) Linijski ojačevalniki kompenzirajo slabljenje vlakna

Impedančni RF ojačevalnik

- Nizkoimpedančni



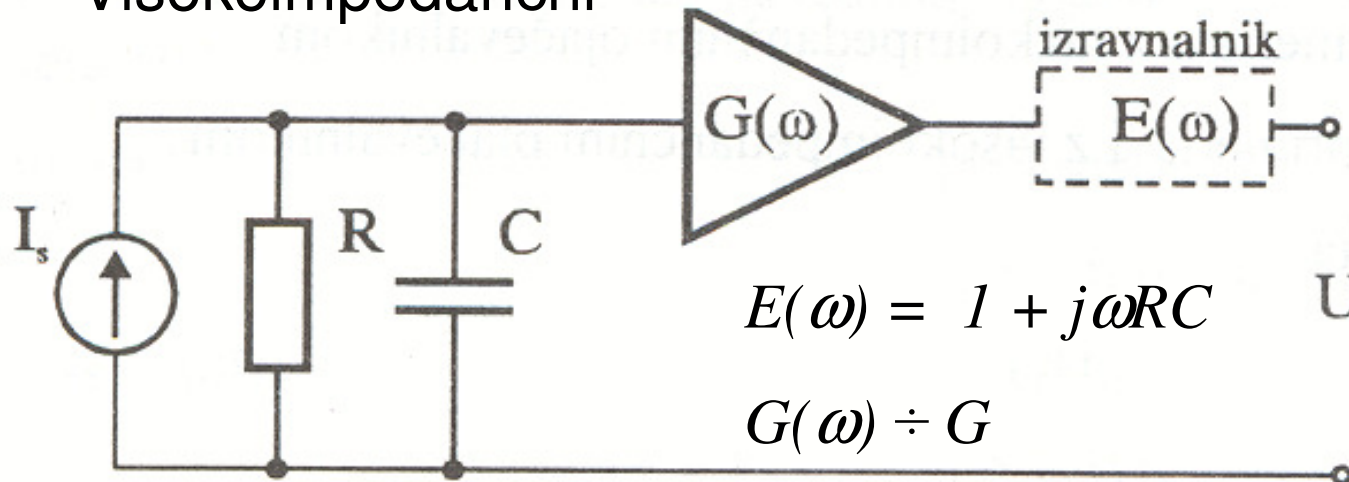
$$U = \rho P_s R M G(\omega)$$

$$R = \frac{R_d R_a}{R_d + R_a} \doteq R_d$$

$$C = C_d + C_a$$

$$f_m = 1/(2\pi RC)$$

- Visokoimpedančni



$$U = \rho P_s R M G(\omega)$$

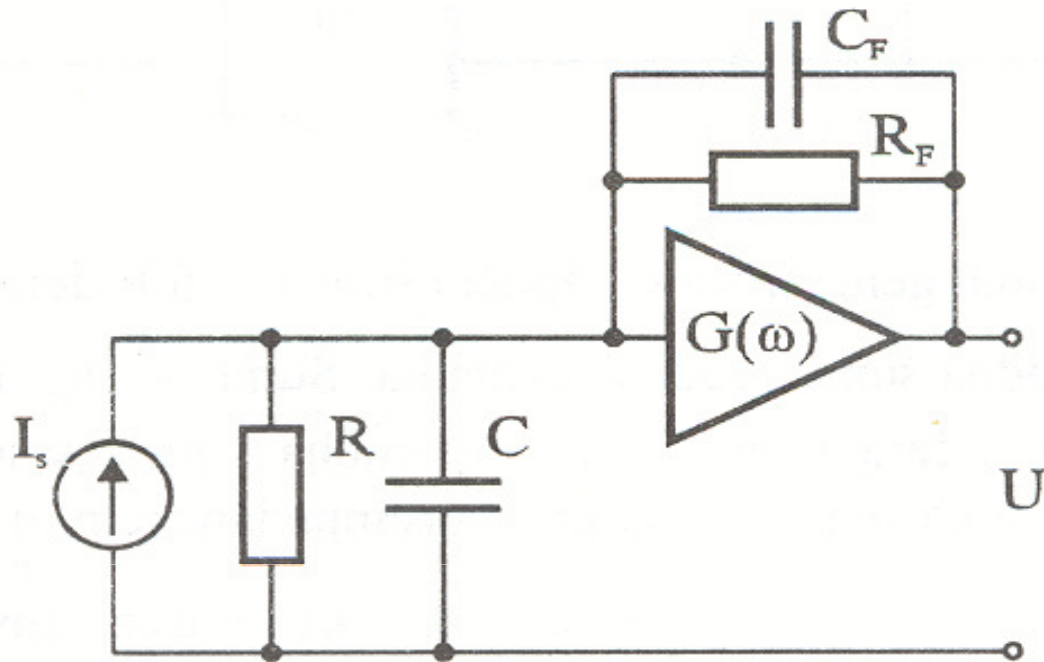
$$R = \frac{R_d R_a}{R_d + R_a}$$

$$C = C_d + C_a$$

$$E(\omega) = 1 + j\omega RC$$

$$G(\omega) \doteq G$$

Transimpedančni RF ojačevalnik



$$U = \rho P_s R_F M$$

$$R = \frac{R_d R_a}{R_d + R_a}$$

$$C = C_d + C_a$$

$$f_m = G / (2\pi R_F C)$$

Izhodna napetost je natančno in v približku $\left(G \gg 1 + \frac{R_F}{R} \text{ in } \frac{C}{G} > C_F \right)$ tolikšna

$$U = \frac{-R_F \rho P_s M}{1 + \frac{1}{G} + \frac{R_F}{GR} + j\omega R_F \left(C_F + \frac{C}{G} \right)} \doteq \frac{-R_F M \rho P_s}{1 + j \frac{\omega C R_F}{G}}$$

Pri frekvencah, ki so mnogo manjše od

$$f_m = \frac{G}{2\pi R_F (C + G C_F)} \doteq \frac{G}{2\pi R_F C}$$

ima ojačena napetost konstantno vrednost

$$U = -R_F M \rho P_s$$

=
G
/
(
2
pi
R
F
C)

BER

Definicije Q in BER

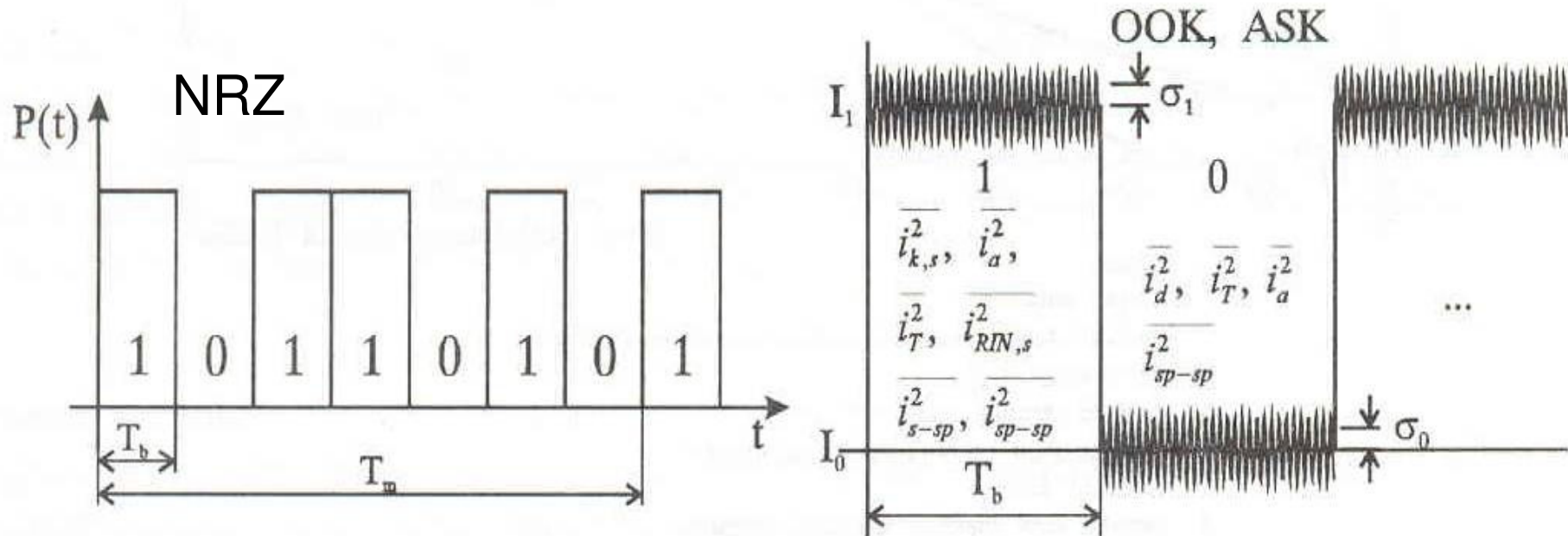
$$Q = \frac{V_{th} - V_{off}}{\sigma_{off}} = \frac{V_{on} - V_{th}}{\sigma_{on}}$$

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

Pri $\sigma_{off} = \sigma_{on}$ $V_{off} = 0$ $V_{th} = V/2$ je $Q = V/2\sigma$

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{V}{2\sigma\sqrt{2}} \right) \right]$$

Signal in šumi



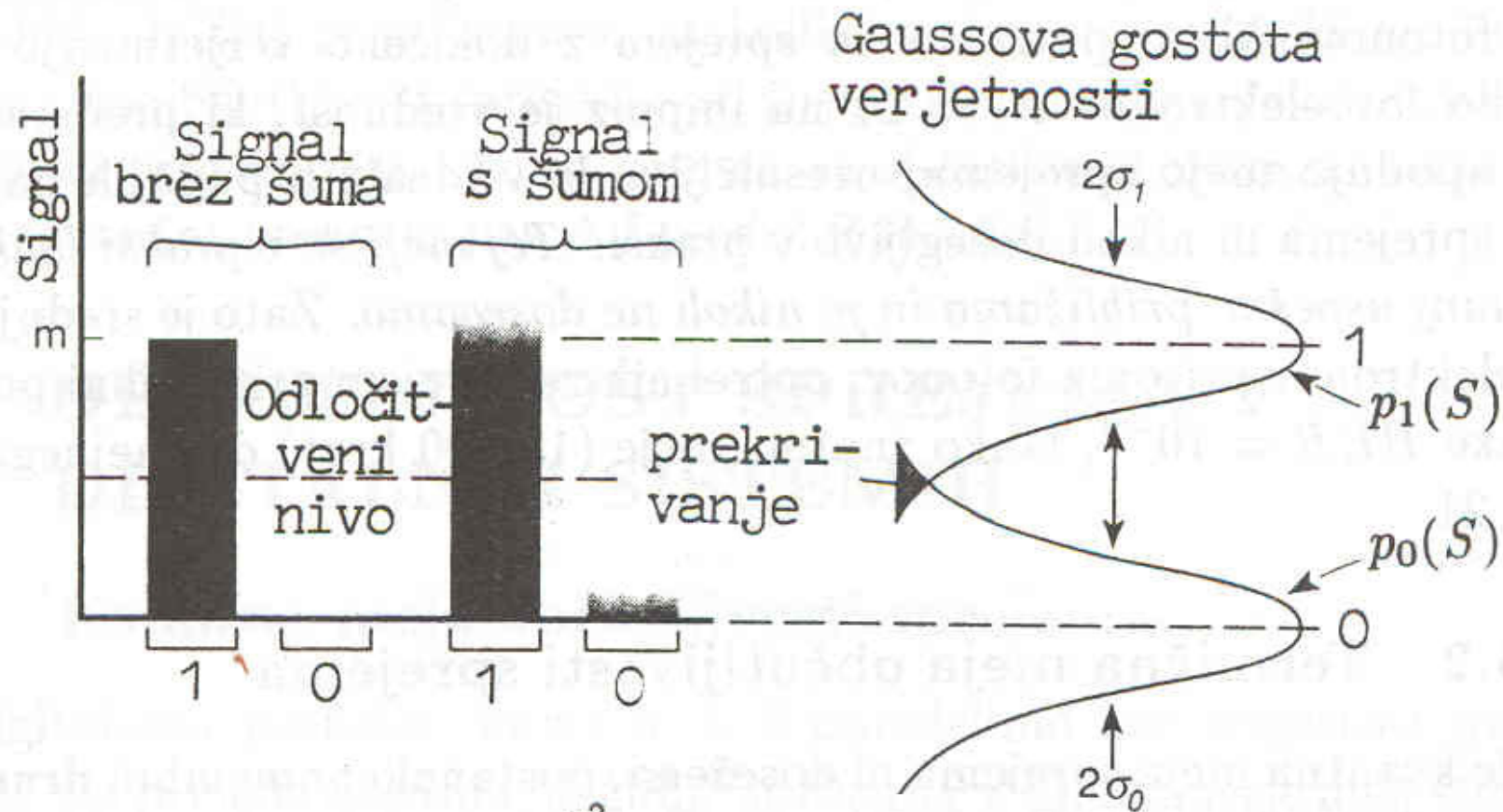
Šumi v času impulza (1):

- Mešalni šum signala in kvantnega šuma
- Toplotni šum
- Mešalni šum signala in intenzitetnega šuma
- **Mešalni šum signala in spontane emisije**
- Mešalni šum spontane emisije same s seboj

Šumi v odsotnosti impulza (0):

- Šum temnega toka
- **Toplotni šum**
- Mešalni šum spontane emisije same s seboj

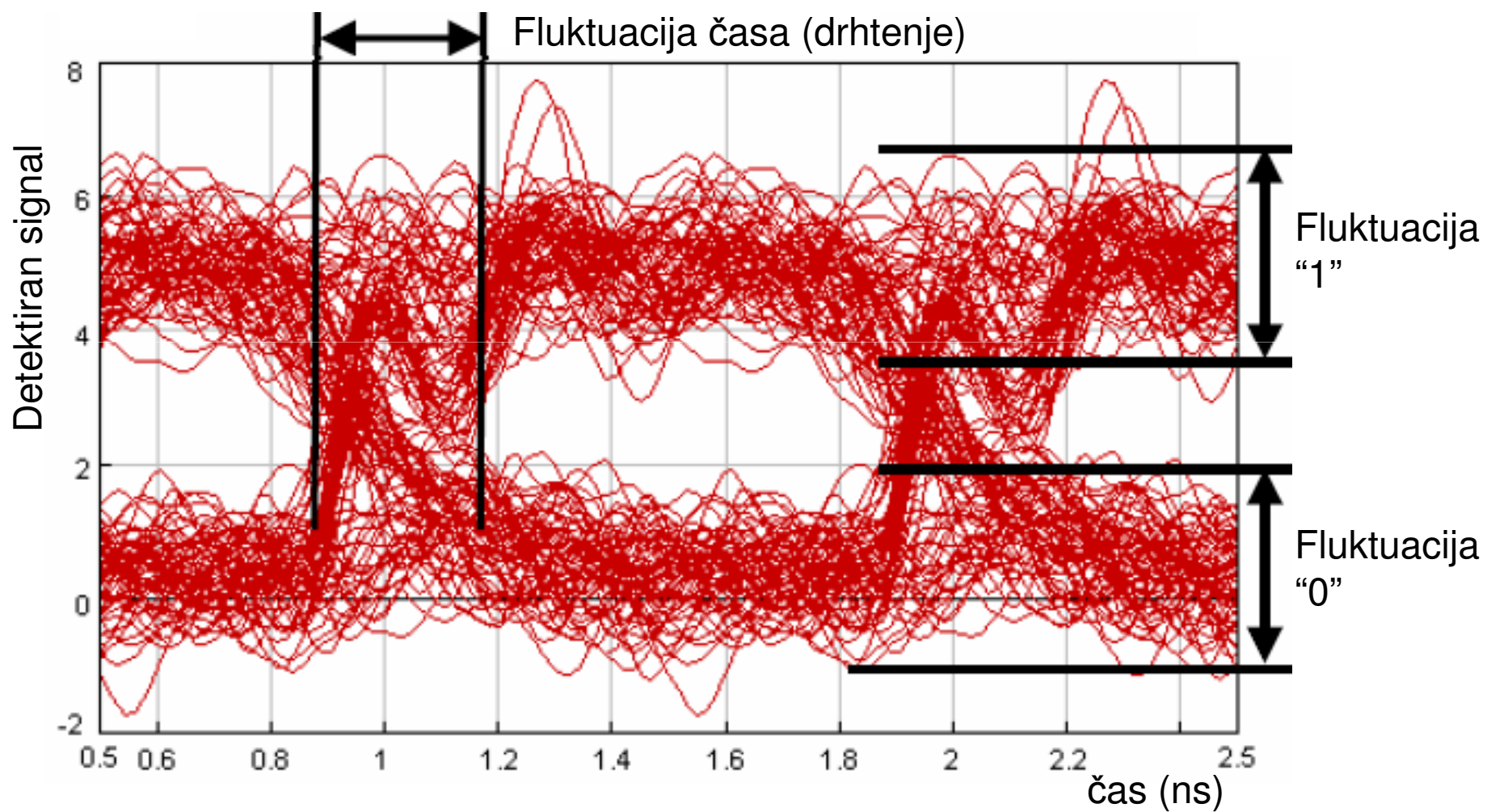
Odločanje o digitalnem signalu



$$p_0(S) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{S^2}{2\sigma_0^2}}, \quad \text{interval 0,}$$

$$p_1(S) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(S-m)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad \text{interval 1}$$

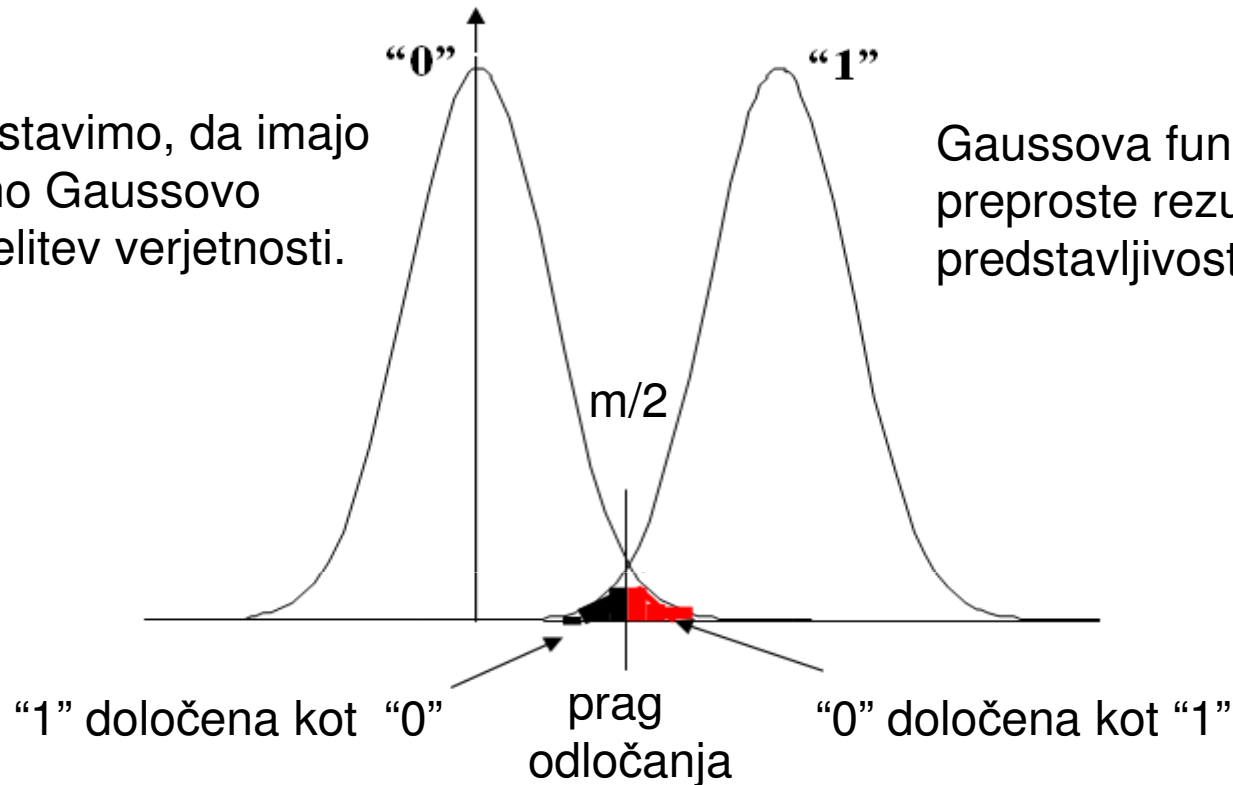
Očesni diagram



Napaka določitve 0 in 1

Predpostavimo, da imajo vsi šumo Gaussovo porazdelitev verjetnosti.

Gaussova funkcija omogoča preproste rezultate in predstavljivost.



$$BER = P(0/1) = \int_{m/2}^{\infty} p_0(S) dS = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{S}{N}}}{2\sqrt{2}} \right) \doteq \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{S}{8N}}}{\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{S}{8N}}}$$

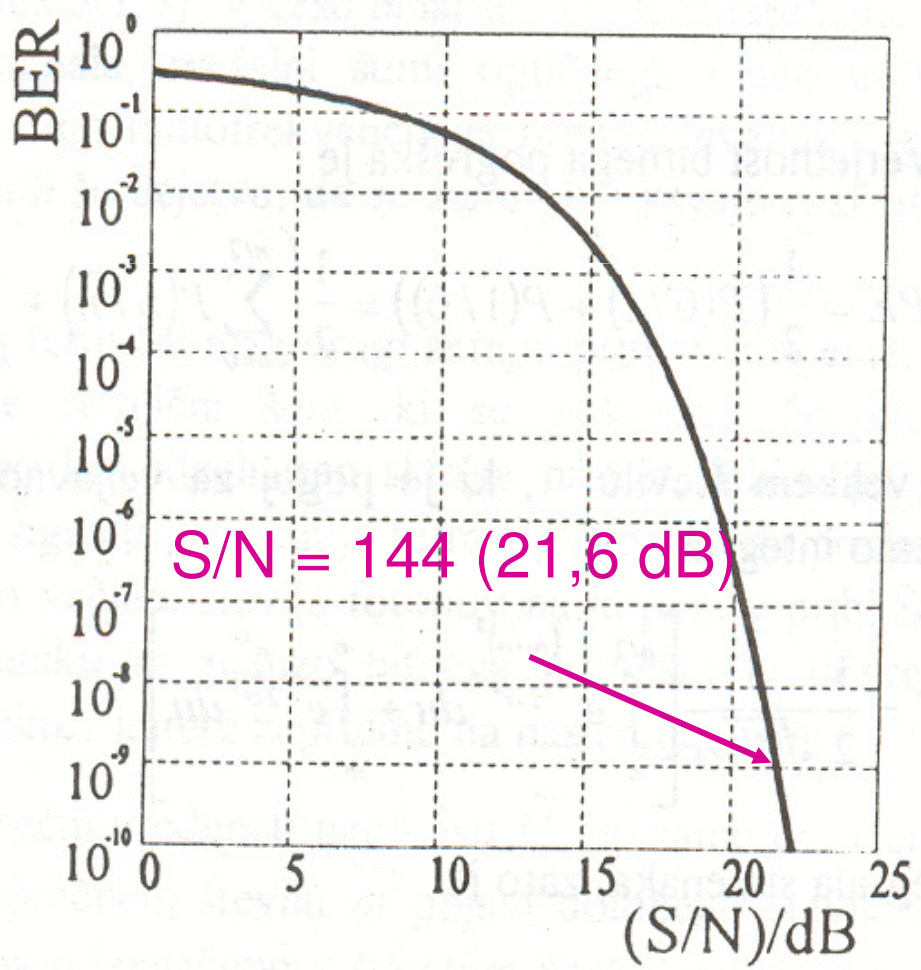
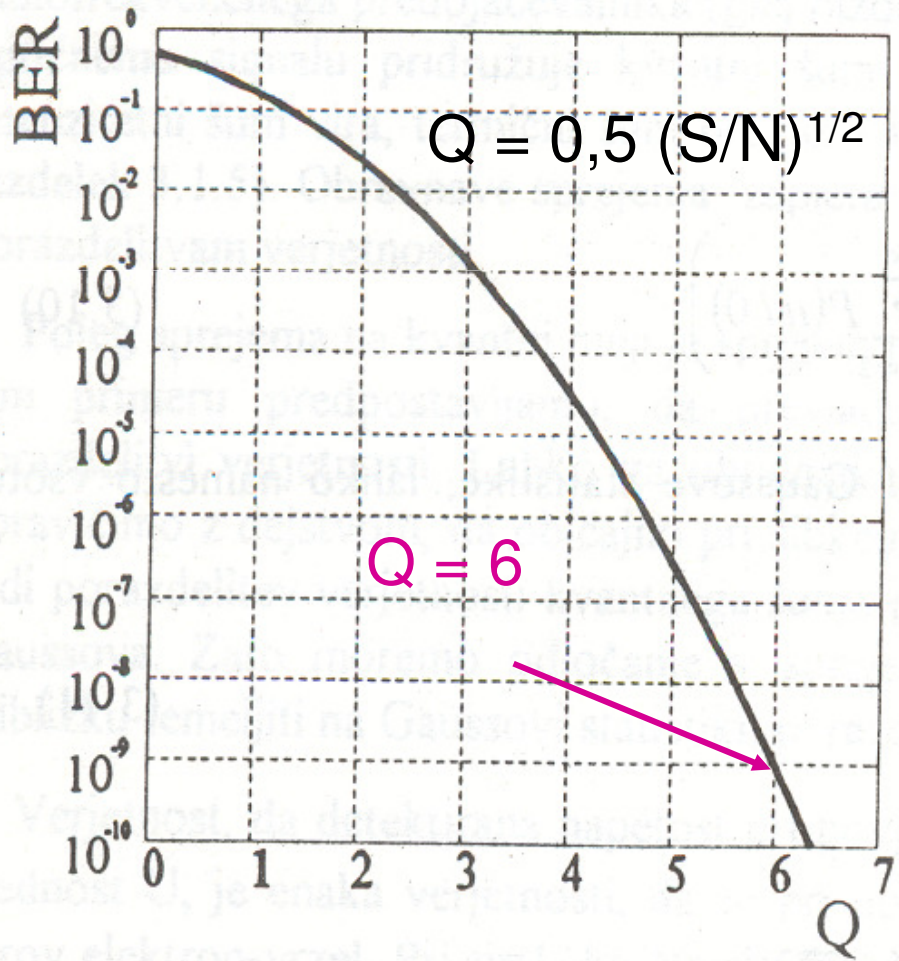
kjer pomeni *erfc* komplementarno funkcijo pogreškov

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy,$$

Pogostost bitnega pogrška (BER)

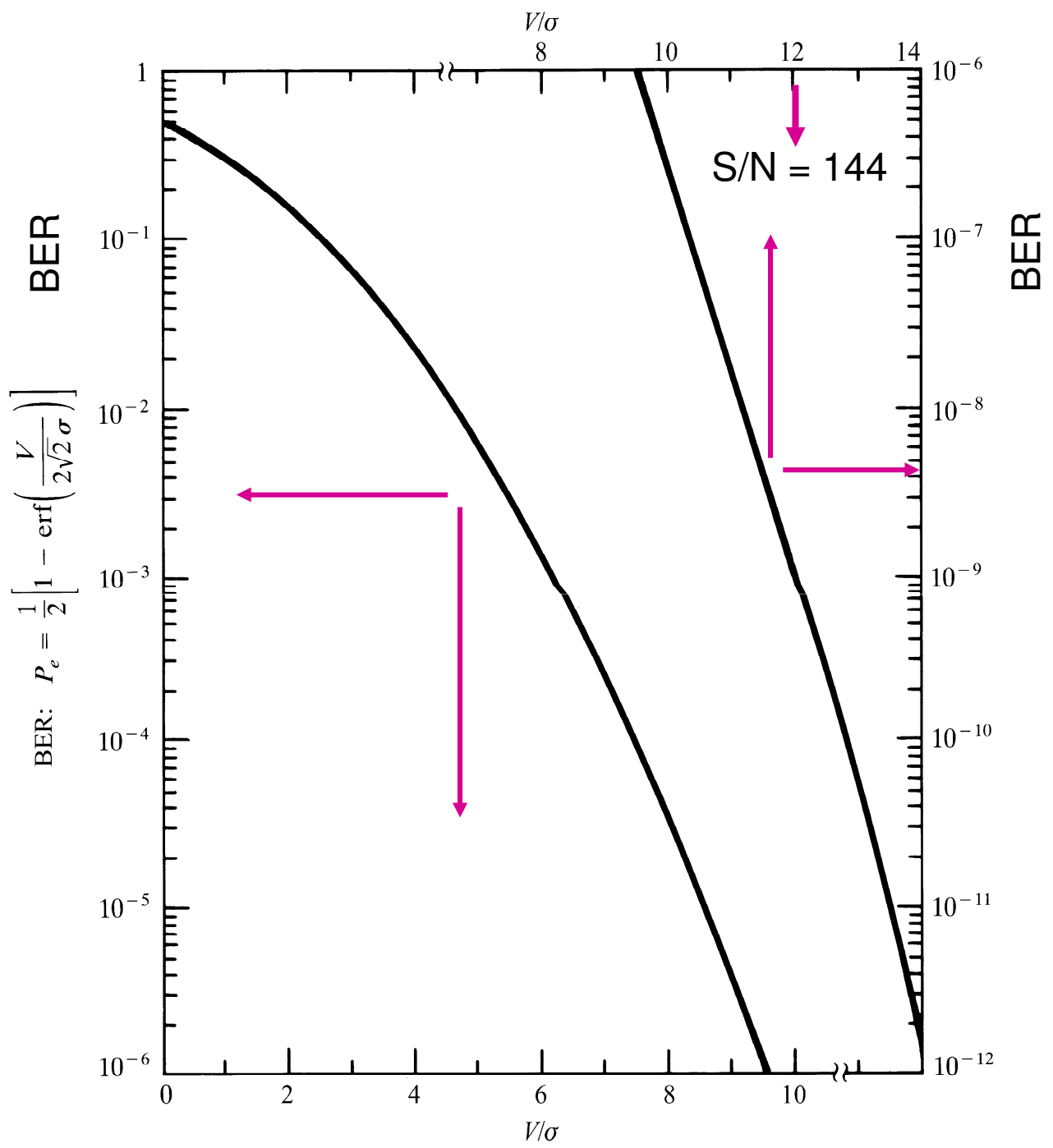
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} \doteq \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{S}{N}}}{2\sqrt{2}} \right) \doteq \frac{\exp\left(-\frac{S}{8N}\right)}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{S}{N}}}$$



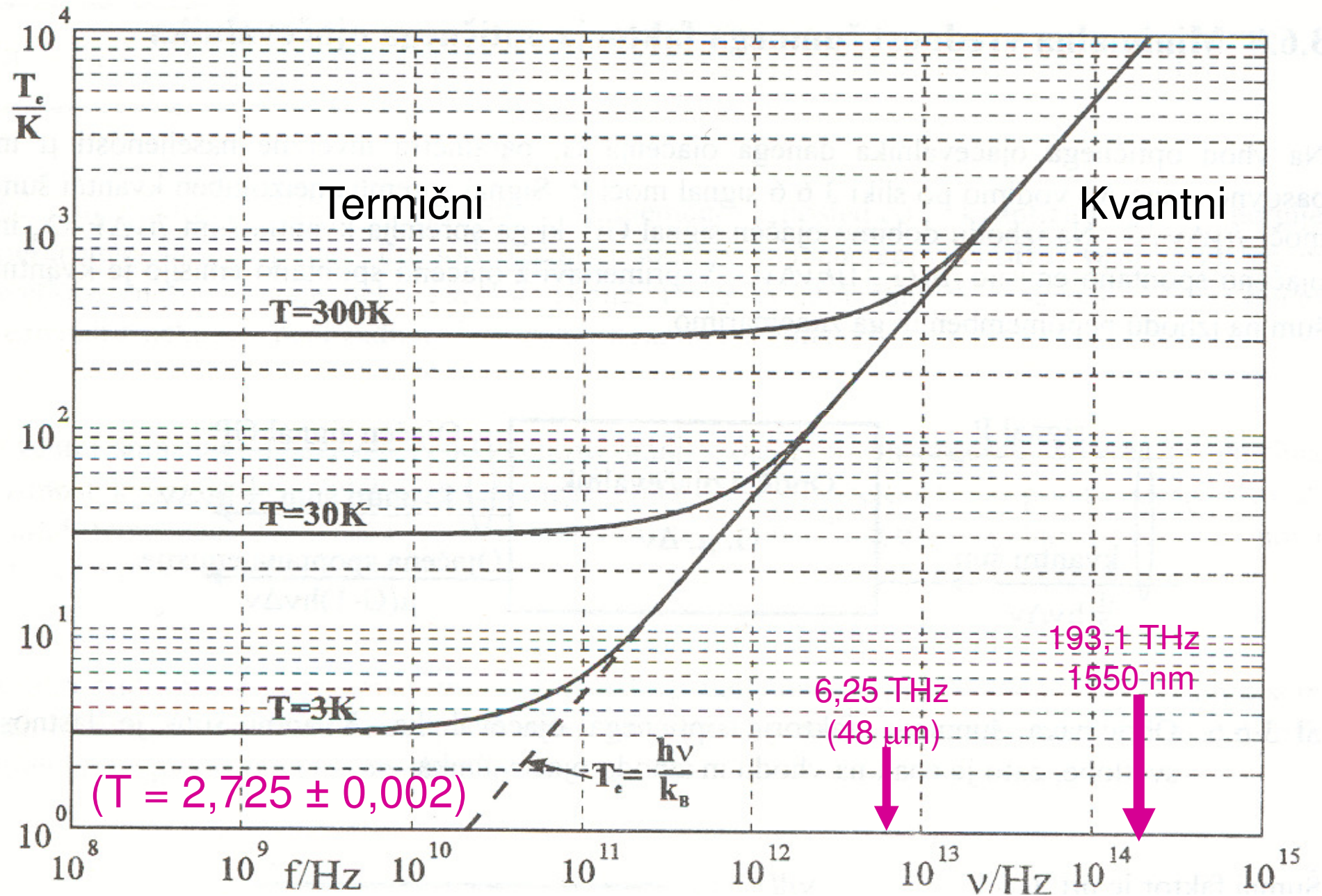
BER

$$V/\sigma = (S/N)^{1/2}$$

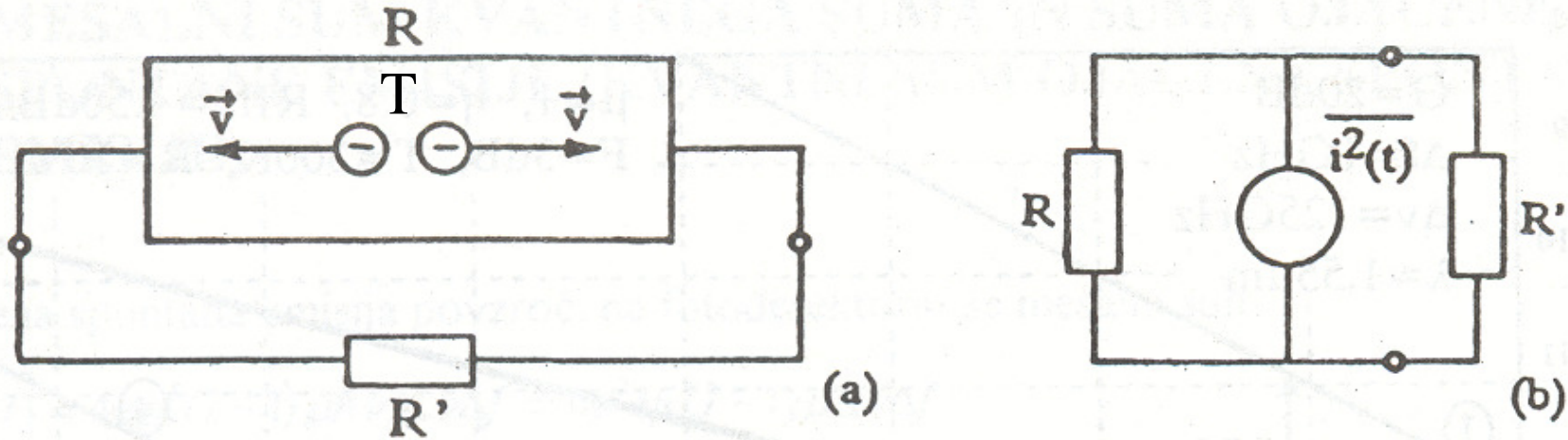


Šumi

Termični in kvantni šum



Termični šum upora



Šumeči upor: (a) fizična vezava; (b) nadomestna slika.

Planckov zakon sevanja črnega telesa (velja splošno za vse frekvence):

$$S_T(f) = \frac{dN_T}{df} = \frac{4hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}, \quad \text{WHz}^{-1} \quad k_B = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K Boltzmannova konstanta}$$

Rayleigh-Jeansova radiofrekvenčna aproksimacija:

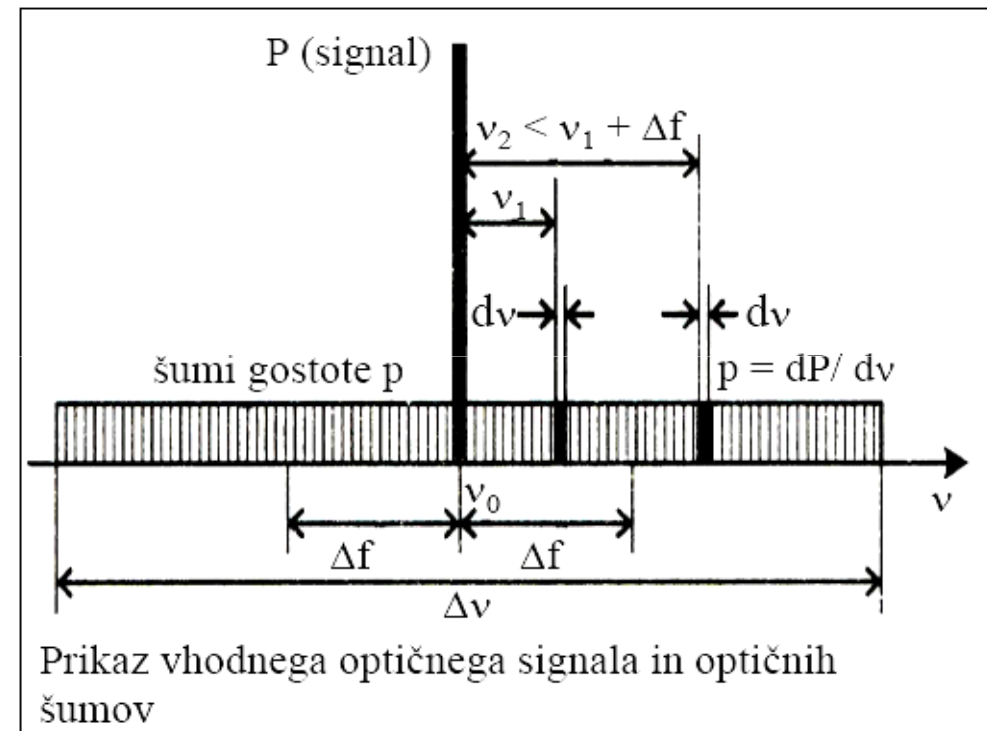
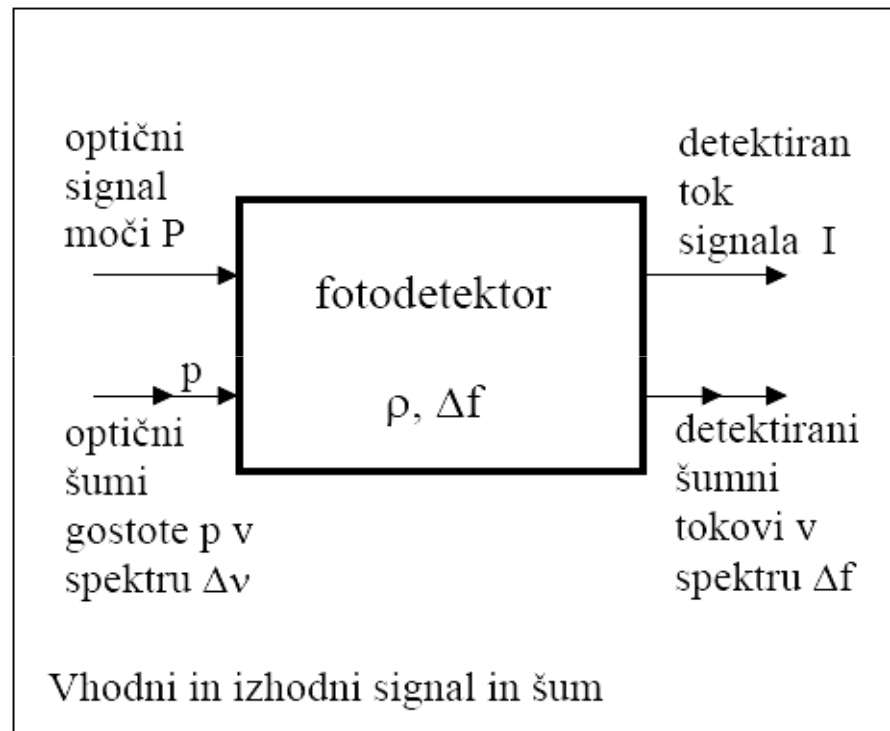
$$S_T(f) \doteq 4k_B T.$$

$$\overline{i_T^2(t)} = \frac{N_T}{R} = \frac{4k_B T \Delta f}{R}$$

Srednjekvadratni šumni tok upora v pasu Δf
(Johnson, Nyquist)

Mešalni šumi fotodetektorja

Na fotodetektorju kvadratne karakteristike $I = \rho P$ se meša vhodni optični signal z vhodnimi optičnimi šumi ter vhodni optični šumi med seboj. Izhodni radiofrekvenčni mešalni produkti predstavljajo šume v spektru prenašanega signala in so pomembni za delovanje optične zveze.

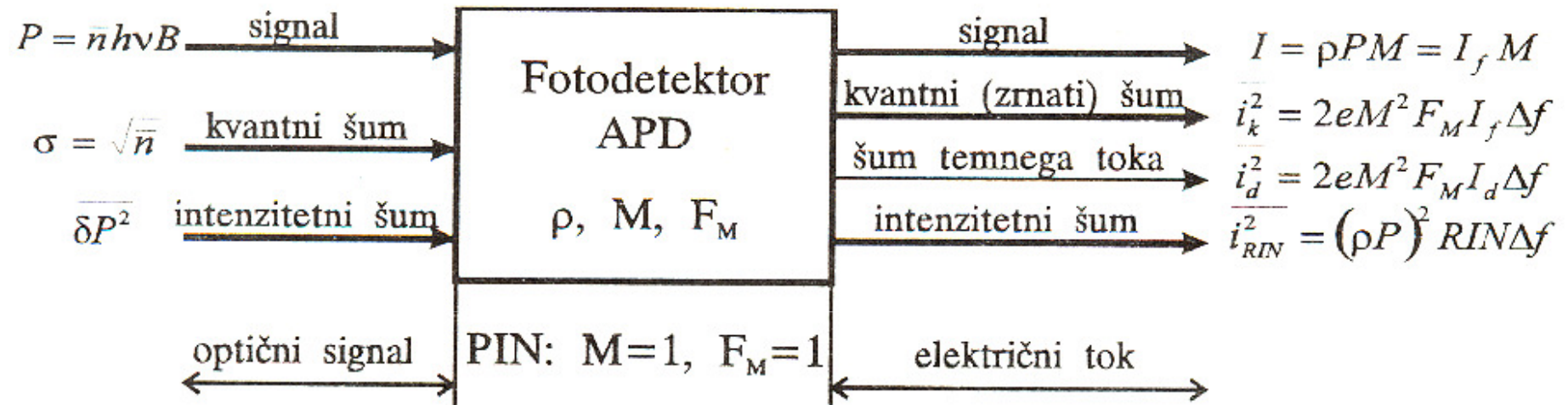


Srednjekvadratna vrednost mešalnih produktov

$$\overline{i_{\text{signal-šum}}^2} = 4\rho^2 P p \Delta f$$

$$\overline{i_{\text{šum-šum}}^2} = 4\rho^2 p_1 p_2 \Delta \nu \Delta f$$

Šumi fotodetektorja APD



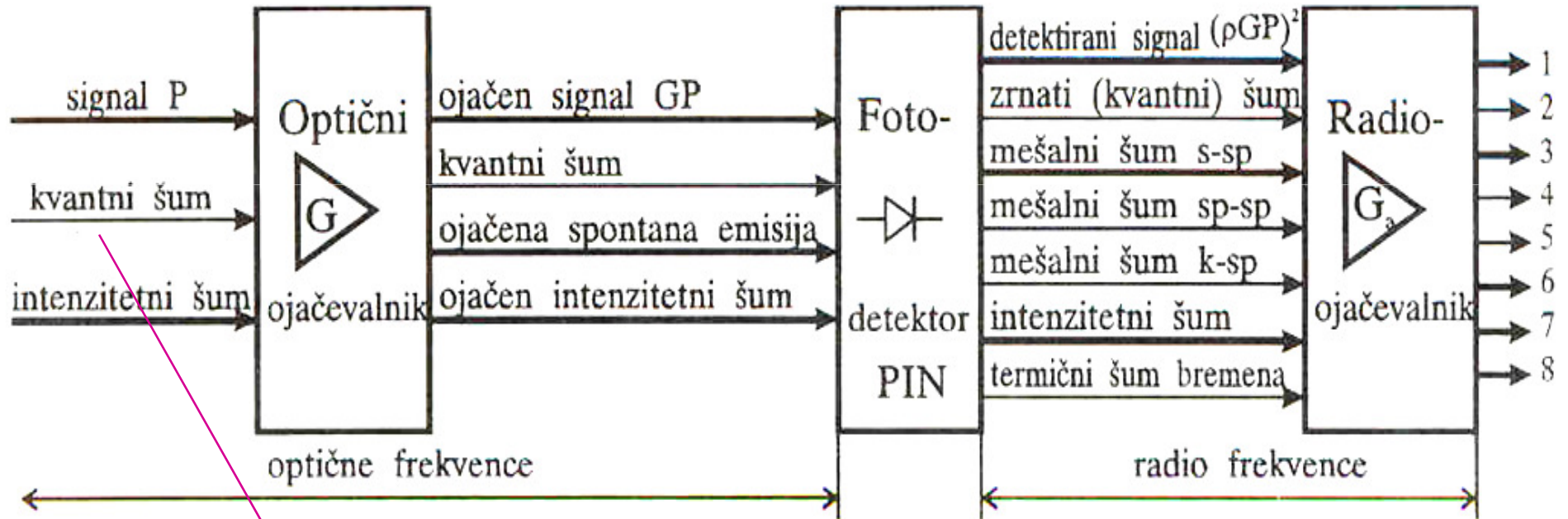
Odzivnost $\rho = \frac{\eta e}{h \nu} M$

Preglednica šumov v sprejemniku

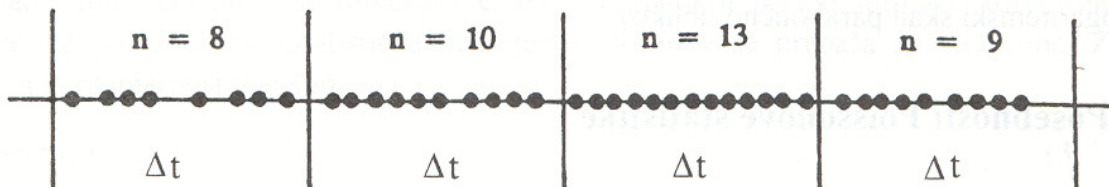
Vhod
signal in šumi
iz vlakna

Signal in šumi
na izhodu iz
ojačevalnika

Signal in šumi
na izhodu iz
fotodetektorja



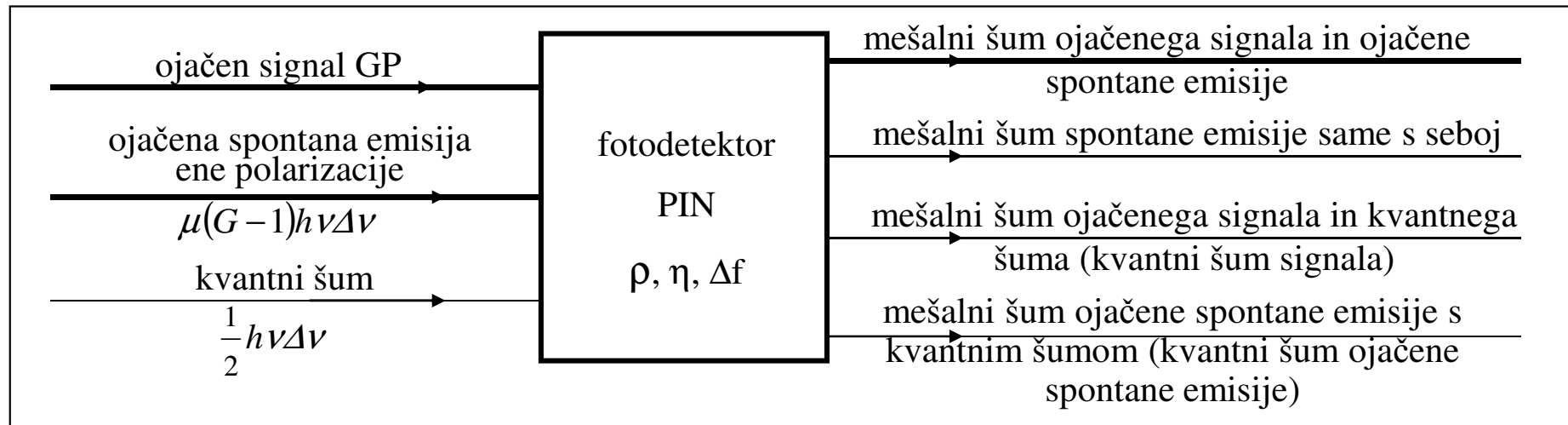
kvantni šum



7 termični šum radiofr. ojač.

8 šum tranzistorjev radiofr. ojač.

Mešalni šumi fotodetektorja (nad.)



- Mešalni šum ojačenega signala in ojačene spontane emisije

$$\overline{i_{sig-sp}^2} = 4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu_0 \Delta f = 4e\eta I(G-1)\mu \Delta f$$

- Mešalni šum ojačene spontane emisije same s seboj

$$\overline{i_{sp-sp}^2} = 2\rho^2 \mu^2 (G-1)^2 (h\nu_0)^2 (2\Delta\nu - \Delta f) \Delta f \doteq 4e^2 \eta^2 \mu^2 (G-1)^2 \Delta\nu \Delta f$$

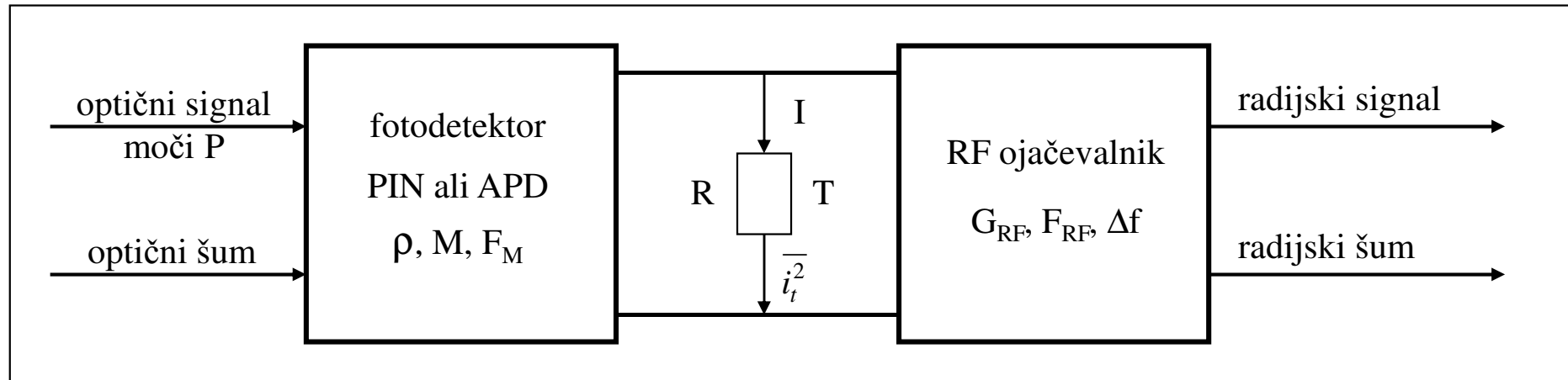
- Mešalni šum ojačenega signala in kvantnega šuma

$$\overline{i_{sig-kv}^2} = 2e\rho GP \Delta f \doteq 2eI \Delta f$$

- Mešalni šum (polarizirane) ojačene spontane emisije s kvantnim šumom

$$\overline{i_{sp-kv}^2} = 4e\eta\rho\mu(G-1)h\nu_0\Delta\nu\Delta f = 4e^2\eta^2\mu(G-1)\Delta\nu\Delta f \doteq 2eI_{ASE} \Delta f, \quad I_{ASE} = 2\mu(G-1)\Delta\nu$$

Šumi fotodetektorja in RF ojačevalnika



- Šum na izhodu plazovne fotodiode APD - kvantni in dodatni šum (multiplikativni šum)

$$\overline{i_{APD}^2} = 2e\rho P \Delta f M^2 F_M \quad (\text{dioda PIN : } M = 1, F_M = 1), \quad \rho = \frac{\eta e}{h\nu} \text{ odzivnost}$$

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja

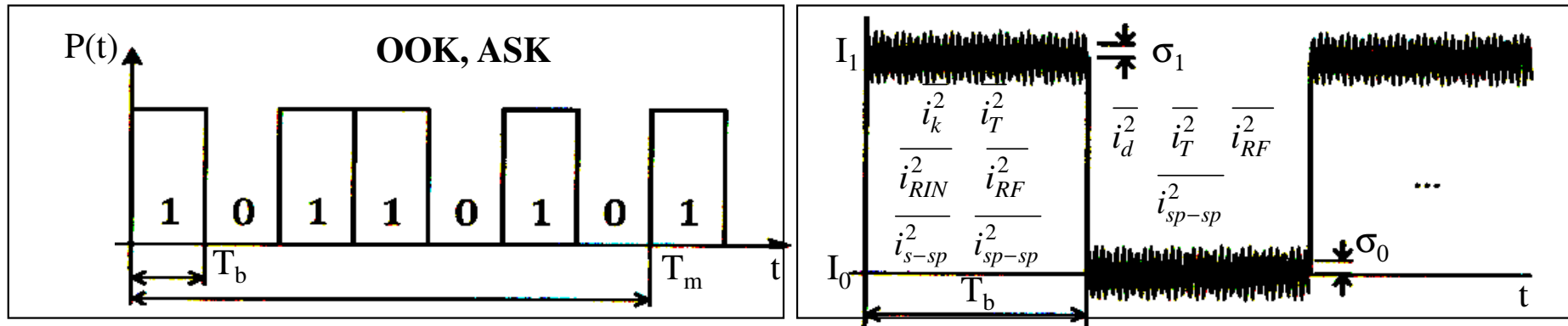
$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R} \quad R, \text{ upornost bremena}$$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, Boltzmannova konstanta

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja vključno s šumom RF ojačevalnika

$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T F_{RF} \Delta f}{R} \quad F_{RF}, \text{ šumni faktor RF ojačevalnika}$$

Povzetek optičnih in električnih šumov



1. Šumi v času trajanja impulza (bitna perioda 1)

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}
- intenzitetni šum P_{RIN}

• šumi v električnem delu zveze

- zrnati (kvantni in plazovni) šum $\overline{i_k^2}$
- mešalni šum signala in ASE $\overline{i_{ASE}^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- relativni intenzitetni šum $\overline{i_{RIN}^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

2. Šumi v odsotnosti impulza (bitna perioda 0) pri idealnem ugasnem razmerju

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum (vakuumsko polje) P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}

• šumi v električnem delu zveze

- šum temnega toka $\overline{i_d^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

Preglednica: velikost signala in šumov²⁷

1. $I = \rho GP$ ojačen optični signal po detekciji na diodi PIN (5.1.6)

2. $\overline{i_{s,sp}^2} = 4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu\Delta f$ mešalni šum signala in ojačene spontane emisije (5.1.7)

3. $\overline{i_{sp,sp}^2} = 4\rho^2 (G-1)^2 (\mu h\nu)^2 \Delta\nu\Delta f$ mešalni šum ojačene spontane emisije same s seboj (5.1.8)

4. $\overline{i_{k,sp}^2} = 2e\rho(G-1)\mu h\nu\Delta\nu\Delta f$ kvantni šum ojačene spontane emisije (5.1.9)

5. $\overline{i_t^2} = \frac{4k_B TF\Delta f}{R}$ toplotni šum (5.1.10)

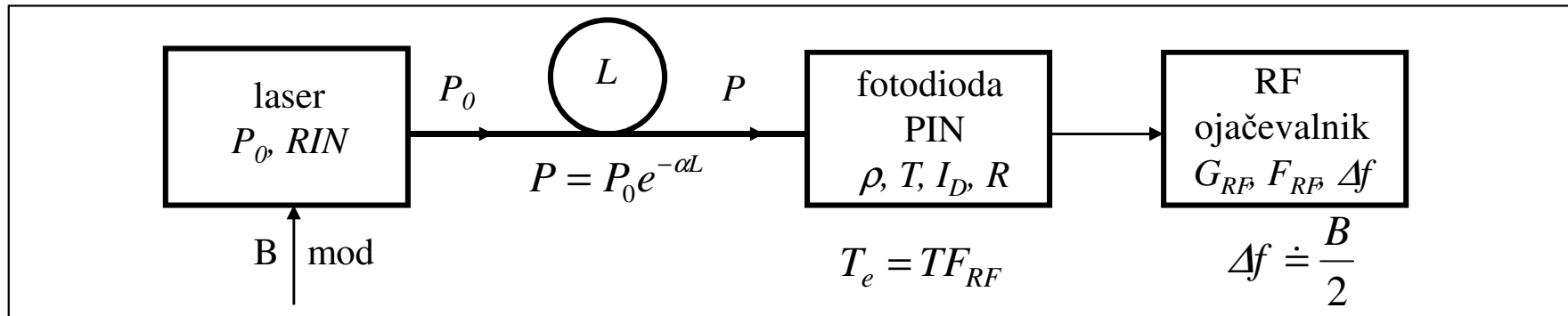
Pri večjih močeh vhodnega signala lahko upoštevamo še druge šume, in sicer:

$\overline{i_k^2} = 2e\rho GP\Delta f$ kvantni šum signala (5.1.11)

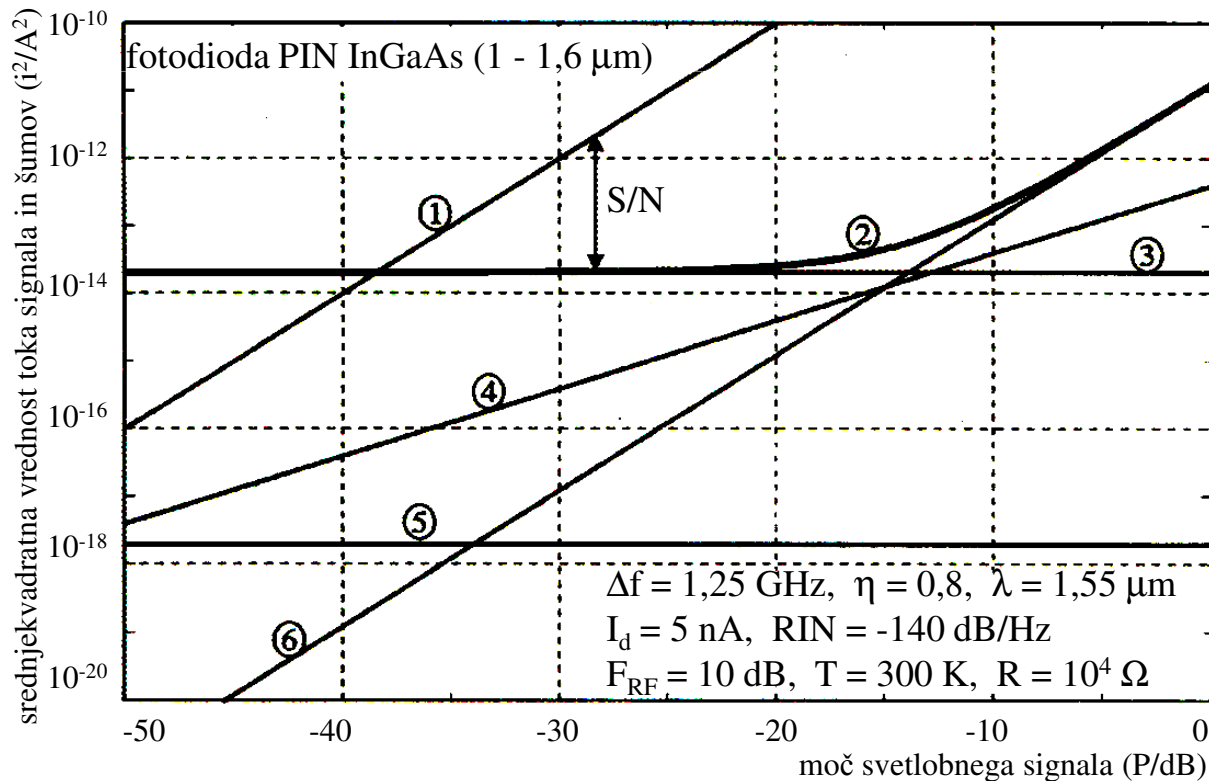
$\overline{i_{RIN}^2} = (\rho GP)^2 RIN\Delta f$ relativni intenzitetni šum (5.1.12)

Primeri optičnih zvez

Neojačevana optična zveza - dioda PIN



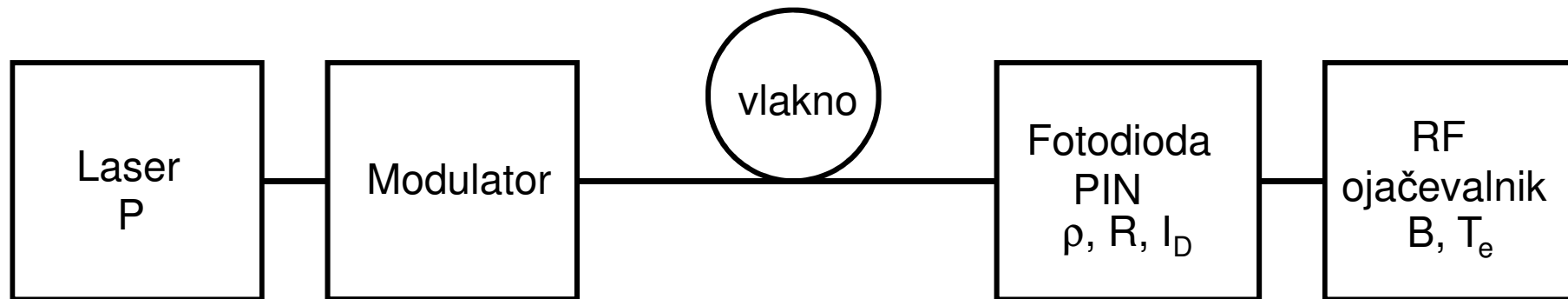
$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(\rho P)^2 R}{(2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF})\Delta f} \doteq \frac{(\rho P)^2 R}{4kTF_{RF}\Delta f} \quad \text{termična meja}$$



**srednjekvadratni tok
signala in šumov:**

- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni šum signala
- 5 kvantni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Neojačevana optična zveza - PIN



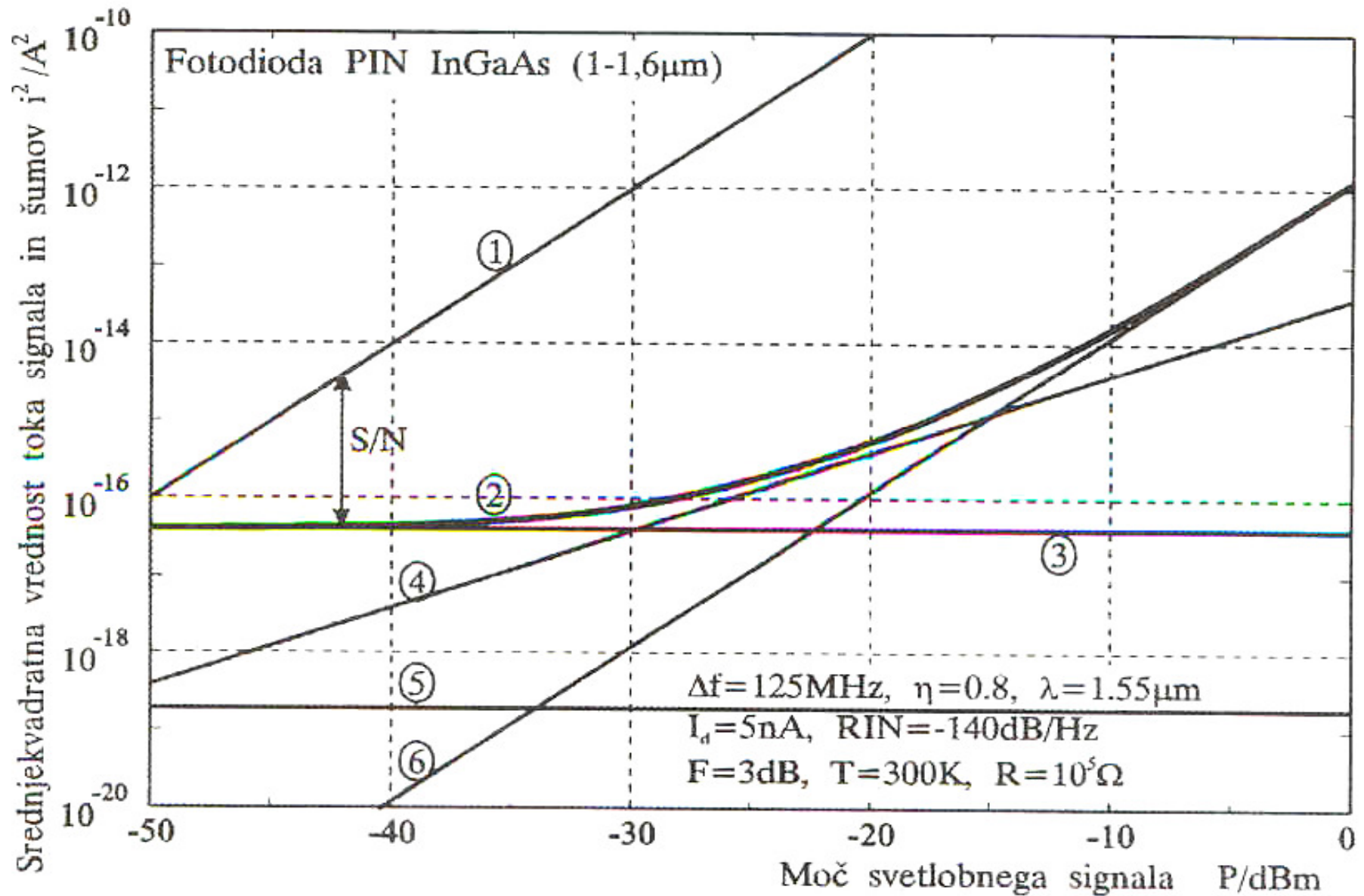
Skrajšana formula:

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\eta \frac{eP}{hf}\right)^2 R}{2e \left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B}$$

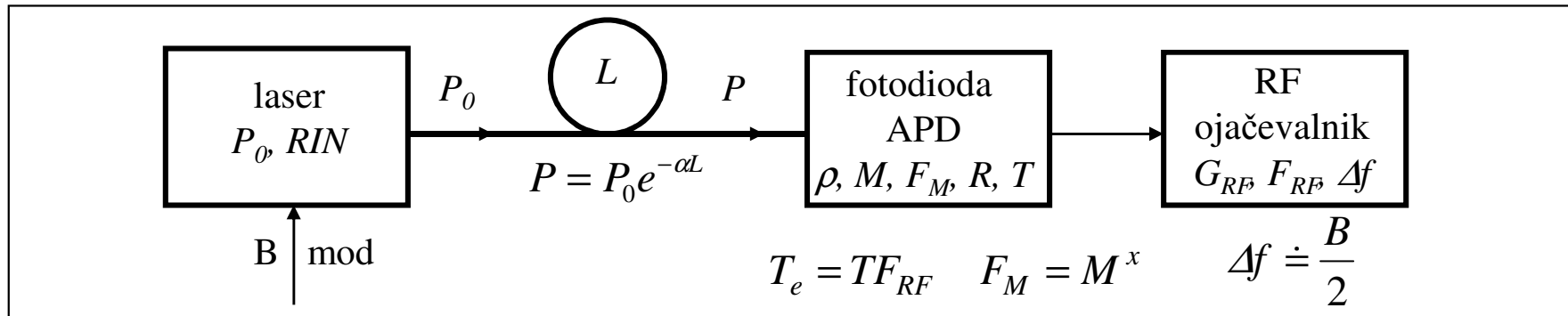
Kvantni šum signala Kvantni šum temnega toka Termični šum

(zanemarjen RIN)

Jakost signala in šumov - PIN



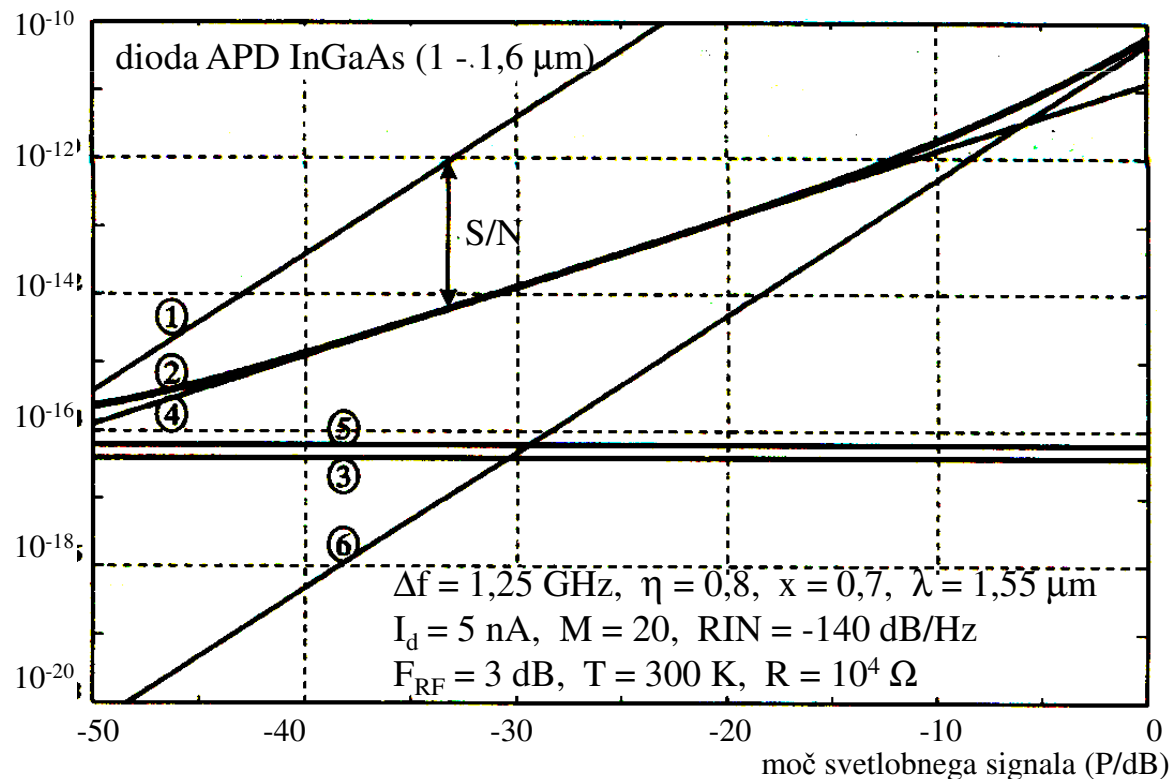
Neojačevana optična zveza - dioda APD



$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(M\rho P)^2 R}{\left(M^2 F_M 2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF} \right) \Delta f} \doteq \frac{\rho P}{F_M 2e \Delta f}$$

kvantna meja

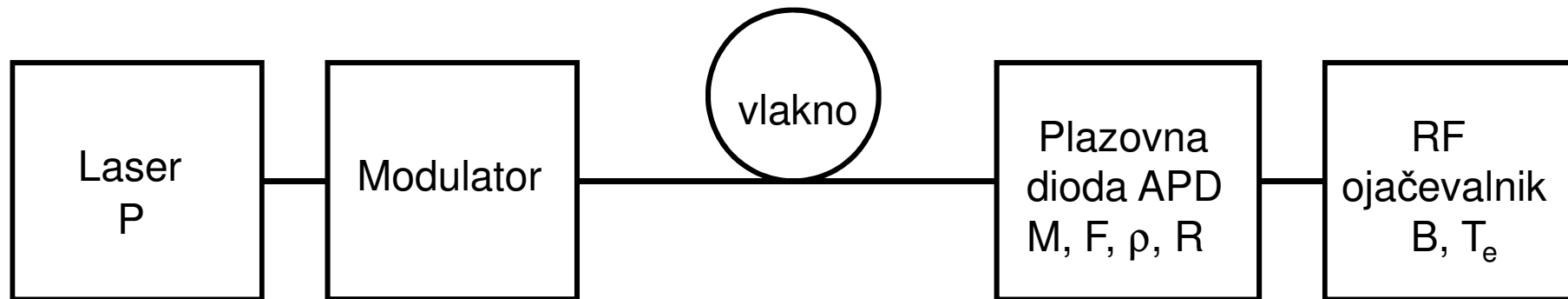
srednjekvadratna vrednost toka signala in šumov (i^2/A^2)



srednjekvadratni tok signala in šumov:

- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni (in plazovni) šum signala
- 5 kvantni in plazovni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Neojačevana optična zveza - APD



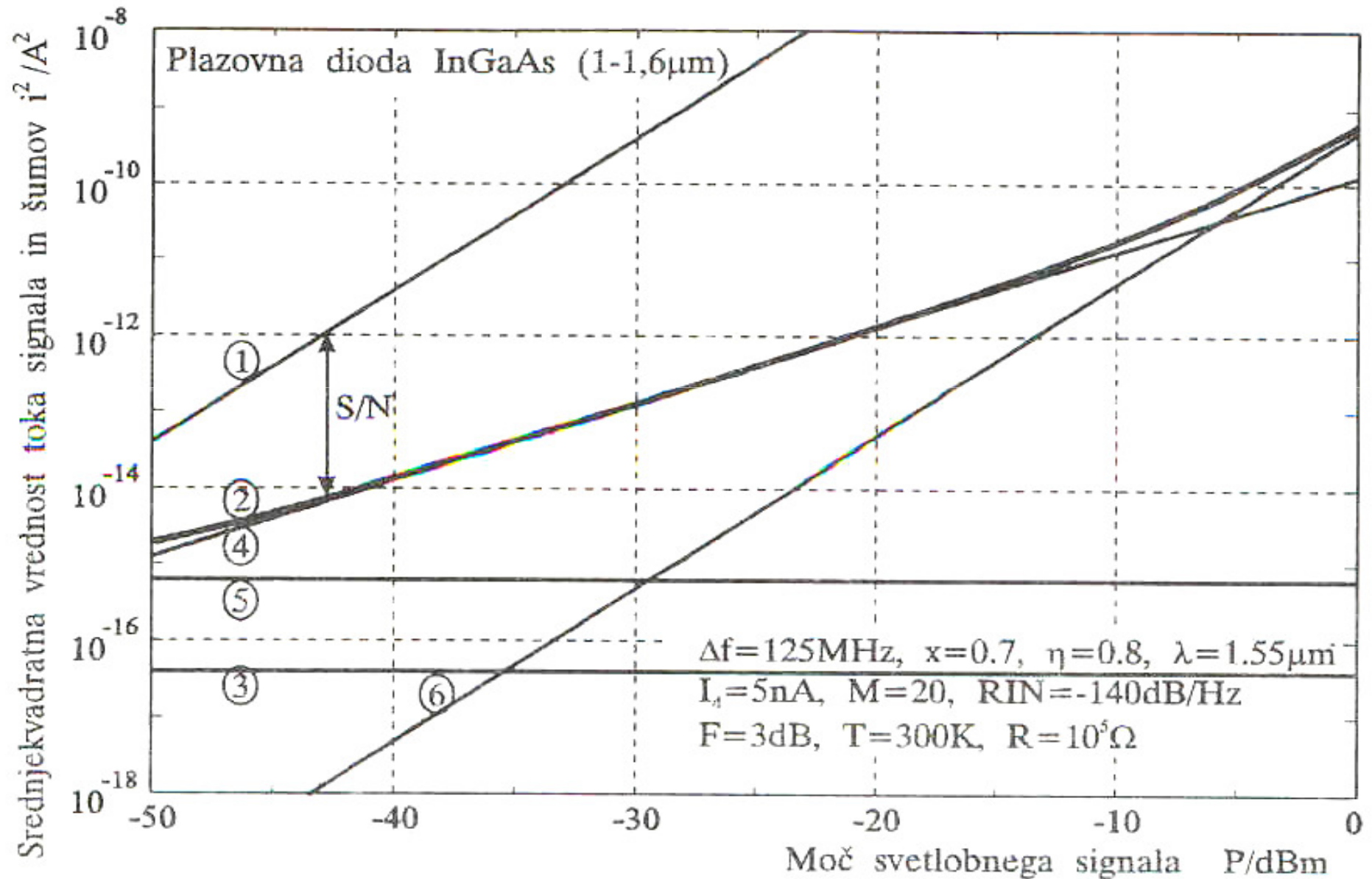
Skrajšana formula:

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(M\eta\frac{eP}{hf}\right)^2 R}{M^2 F(M) 2e \left(\eta\frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B}$$

Ojačen kvantni šum signala
Ojačen kvantni šum temnega toka
Termični šum

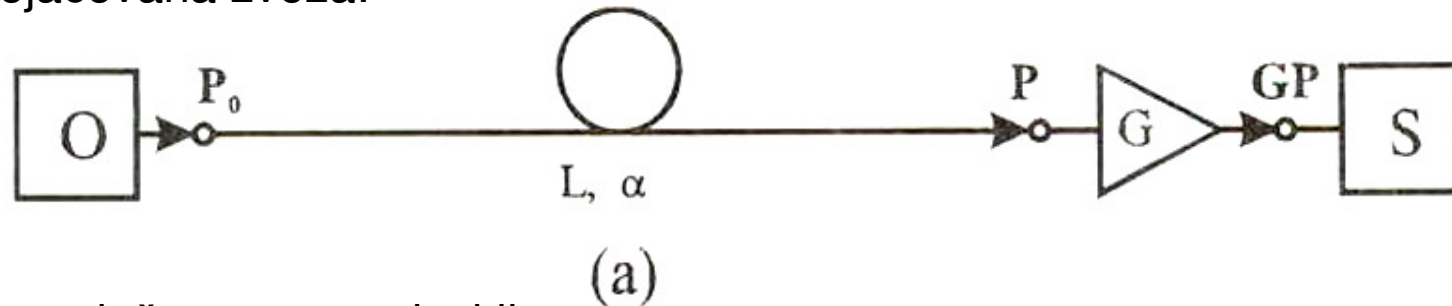
zanemarjen RIN

Jakost signala in šumov - APD

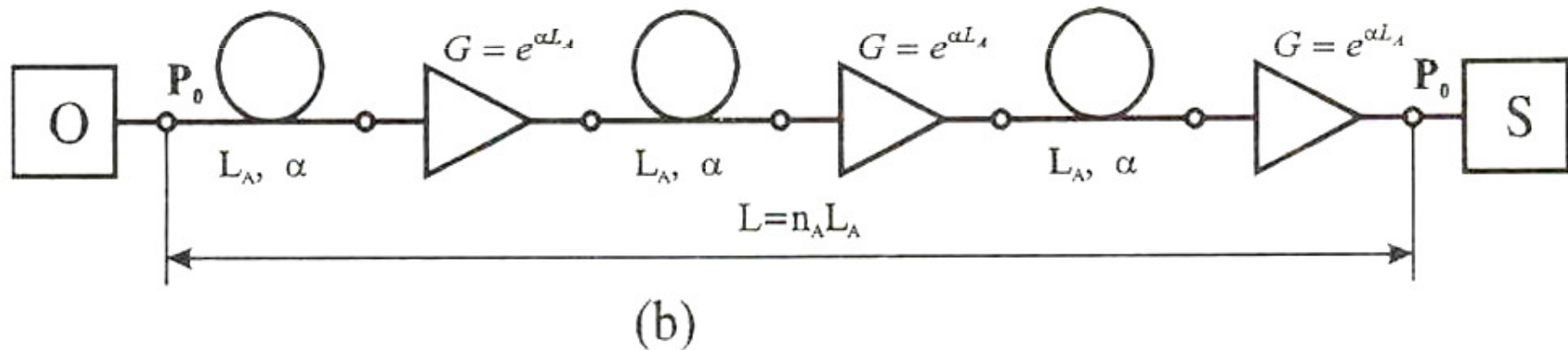


Predojačevanje in linijsko ojačevanje

- Predojačevana zveza:



- Zveza, ojačevana po odsekih:



Optični ojačevalniki generirajo šum spontane emisije, ki se v njih ojačuje, v vlaknu pa se slabi. V fotodetektorju se ta šum meša s signalom, sam s seboj in z drugimi šumi. Največjo vrednost ima mešalni šum signala in ojačene spontane emisije, ki prevlada nad drugimi šumi, vključno s toplotnim šumom.

Šumi optičnega ojačevalnika

Vhodno razmerje S/N:

$$SNR_i = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_{shot}^2} = \frac{(R \cdot P)^2}{2 \cdot R \cdot e \cdot P \cdot B_e}$$

Izhodno razmerje S/N:

$$SNR_o = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{thermal}^2 + \sigma_{sig-spon}^2 + \sigma_{spon-spon}^2}$$

$$\approx \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_{sig-spon}^2} \approx \frac{(R \cdot G \cdot P)^2}{4R^2 P \cdot G(G-1) \cdot n_{sp} \cdot hf_c \cdot B_e}$$

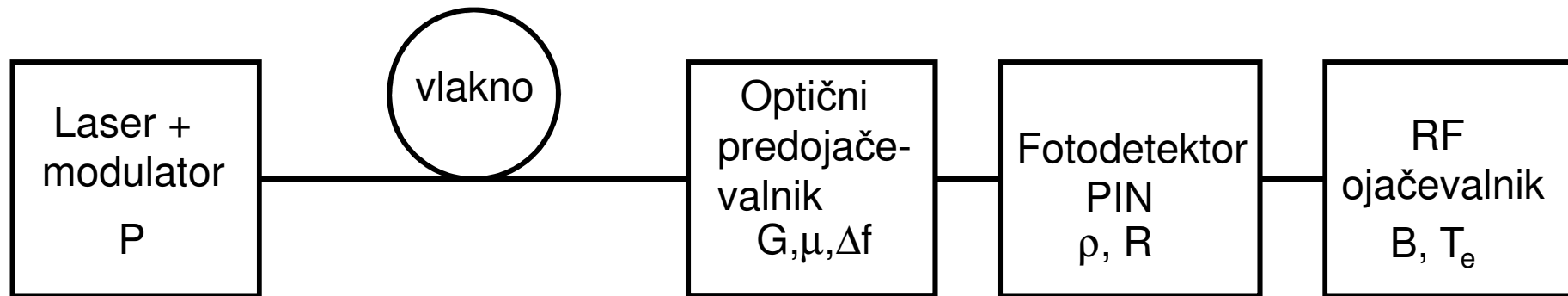
Moč spontane emisije:

$$P_{ASE} = 2n_{sp} h\nu(G-1)\Delta\nu$$

Detektiran tok spontane emisije:

$$I_{sp} = 2n_{sp}(G-1)eB_o$$

Predojačevana optična zveza



$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\eta \frac{eP}{hf}\right)^2 G^2 R}{2\left(2e\eta \frac{eP}{hf} \mu + \Delta f \mu^2\right) G^2 BR + 4kT_e B}$$

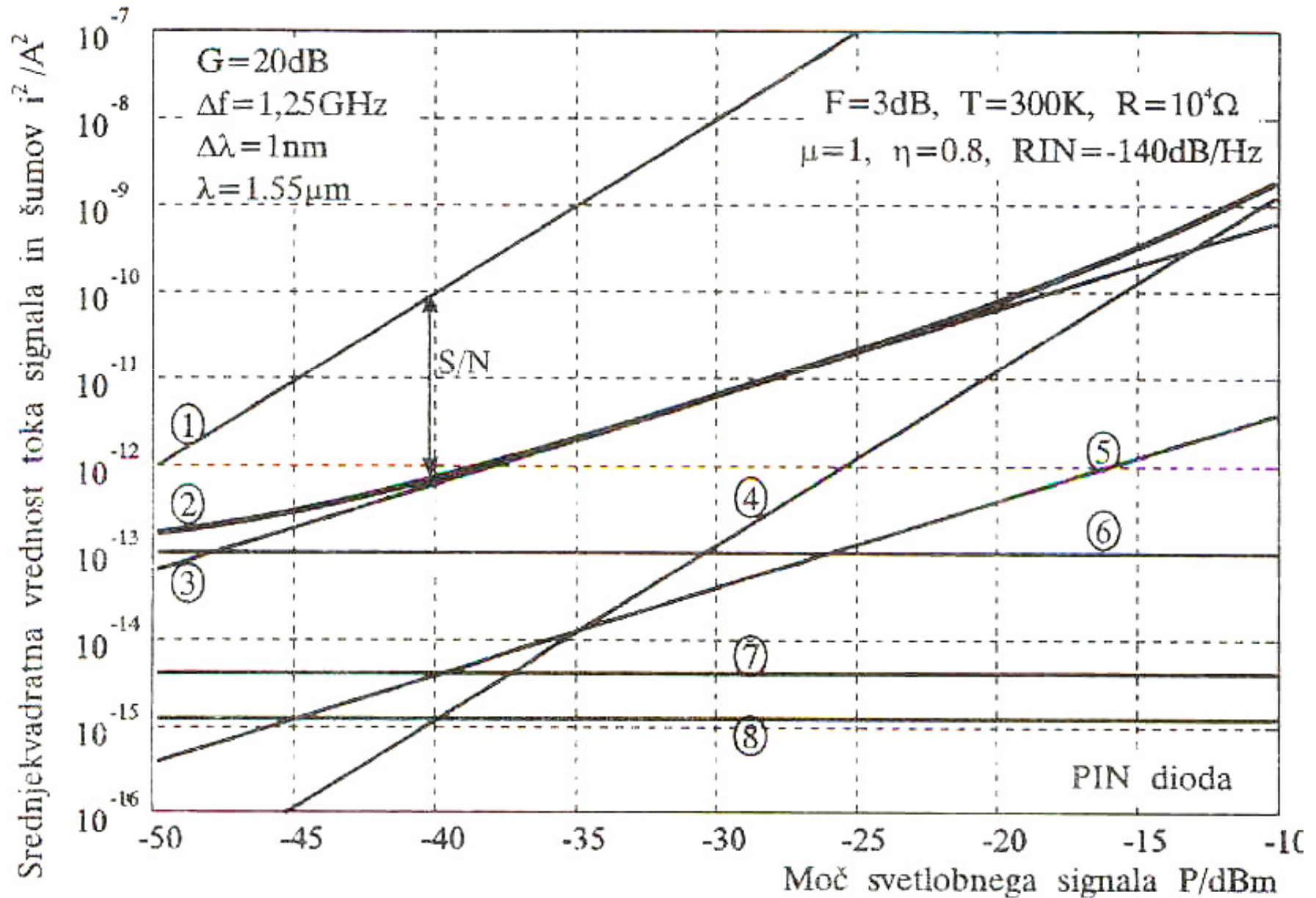
Mešalni šum
signala in
ojačene
spontane emisije

Mešalni šum
ojačene spontane
spontane emisije

Termični
šum

Predojačevana optična zveza - PIN

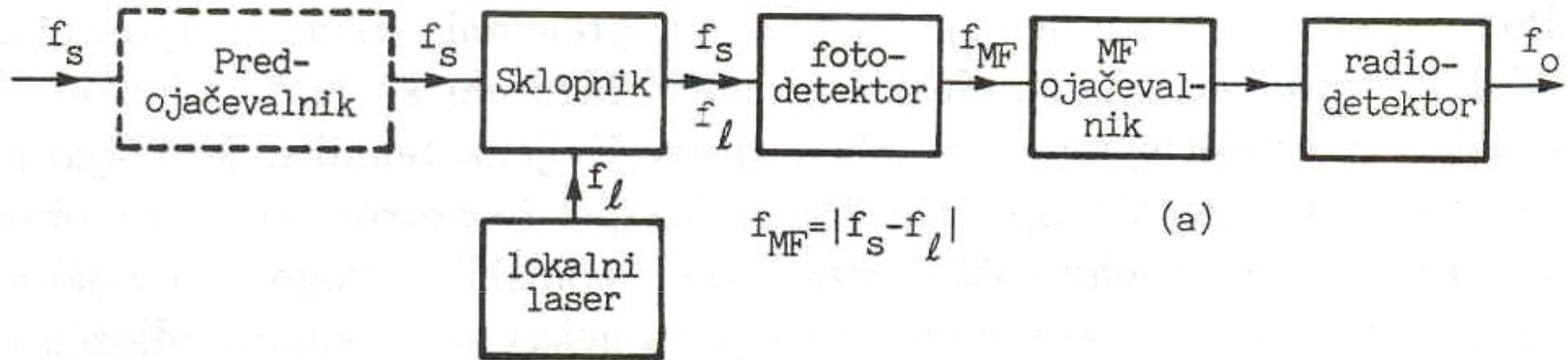
38



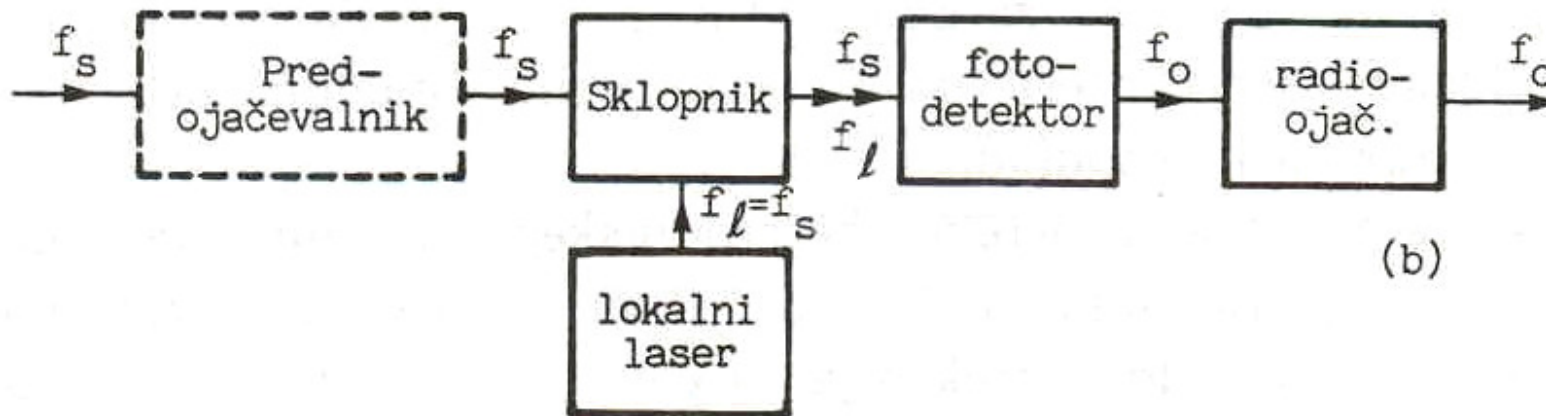
Koherentna detekcija

Koherentni sprejem, princip

1. Heterodinski sprejem (pretvorba v osnovni pas preko medfrekvence)

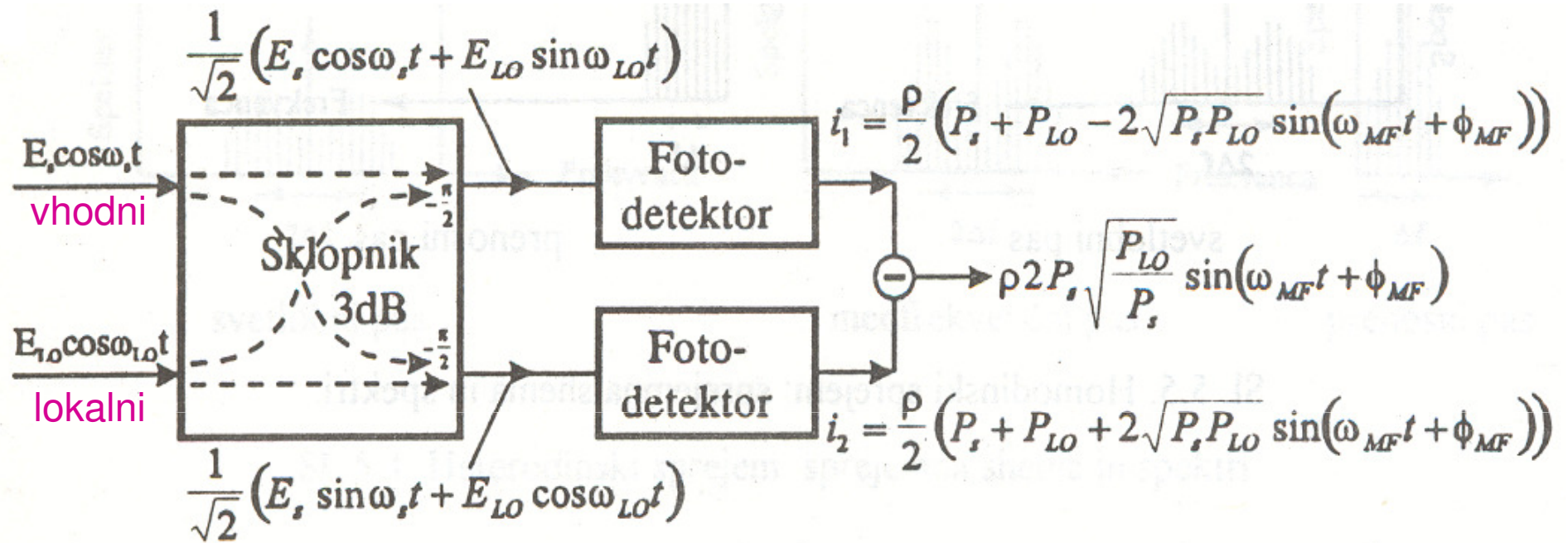


2. Homodinski sprejem (direktna pretvorba v osnovni pas)



Homodinski sprejem v praksi uporablja digitalno procesiranje signala (DSP)

Koherentni sprejem, vezje



Razmerje signal/šum na kvantni meji

Kvantni šum signala lokalnega oscilatorja

hf: energija fotona,
 n_b : srednje število fotonov na bit,
 R: $\eta\lambda/hc$ odzivnost fotodiode

Razmerje S/N za primer neojačevane zveze

$$= \frac{|I(t)|^2}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$= \frac{2R^2P_sP_{LO}}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$\xrightarrow{P_{LO} \rightarrow \infty} \frac{\eta P_s}{hfB} = \begin{matrix} 2\eta n_b & \text{hetero} \\ 4\eta n_b & \text{homo} \end{matrix}$$

Termični šum

B: širina MF ali osnovnega pasu,
 kT: termična energija,
 R_d : upornost bremena
 η : kvantni izkoristek

Optimalni sprejem **na kvantni meji** pri zadostni moči lokalnega oscilatorja oz. pri prevladujočem kvantnem šumu lokalnega oscilatorja nad termičnim šumom. Heterodinski sprejem je 3 dB nad kvantno mejo. Homodinski sprejem je za 3 dB občutljivejši od heterodinskega sprejema zaradi polovičnega spektra.

Koherentni sprejem brez predojačenja⁴³

$$\frac{S}{N} = \frac{2P_s P_l R \left(\frac{\eta e}{hf} \right)^2}{2eR\Delta f \left(\eta \frac{eP_l}{hf} \left(1 + \frac{P_s}{P_l} \right) + I_D \right) + 4kT_e\Delta f}$$

Kvantni šum signala
in kvantni šum signala
lokalnega oscilatorja

Kvantni šum
temnega toka

Termični šum

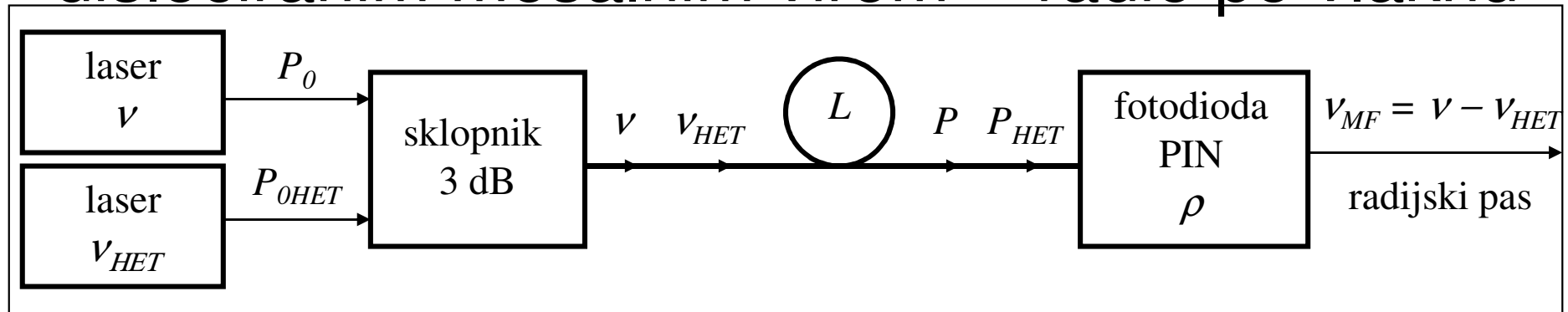
$$\frac{S}{N} \stackrel{\cdot}{=} \frac{\eta P_s}{hf\Delta f} = \frac{q\eta P_s}{2hfB} = q \left(\frac{S}{N} \right)_k$$

Doseganje kvantne meje

q = 2 heterodinski sprejem

q = 4 homodinski sprejem

Koherentna (heterodinska) optična zveza z dislociranim mešalnim virom - “radio po vlaknu”



Svetlobo moduliranega laserja skupaj s svetlobo heterodinskega laserja sklopimo v vlakno. Na izhodu iz fotodiode izsejemo mešalni produkt $\nu_{MF} = \nu - \nu_{HET}$. Z izbiro heterodinske frekvence pade ν_{MF} v radijski pas, npr. 60 GHz. Če je laser moduliran z razvrščenimi radijskimi prednosilniki (SCM), se ti pojavijo na izhodu (prenos “radio po vlaknu”).

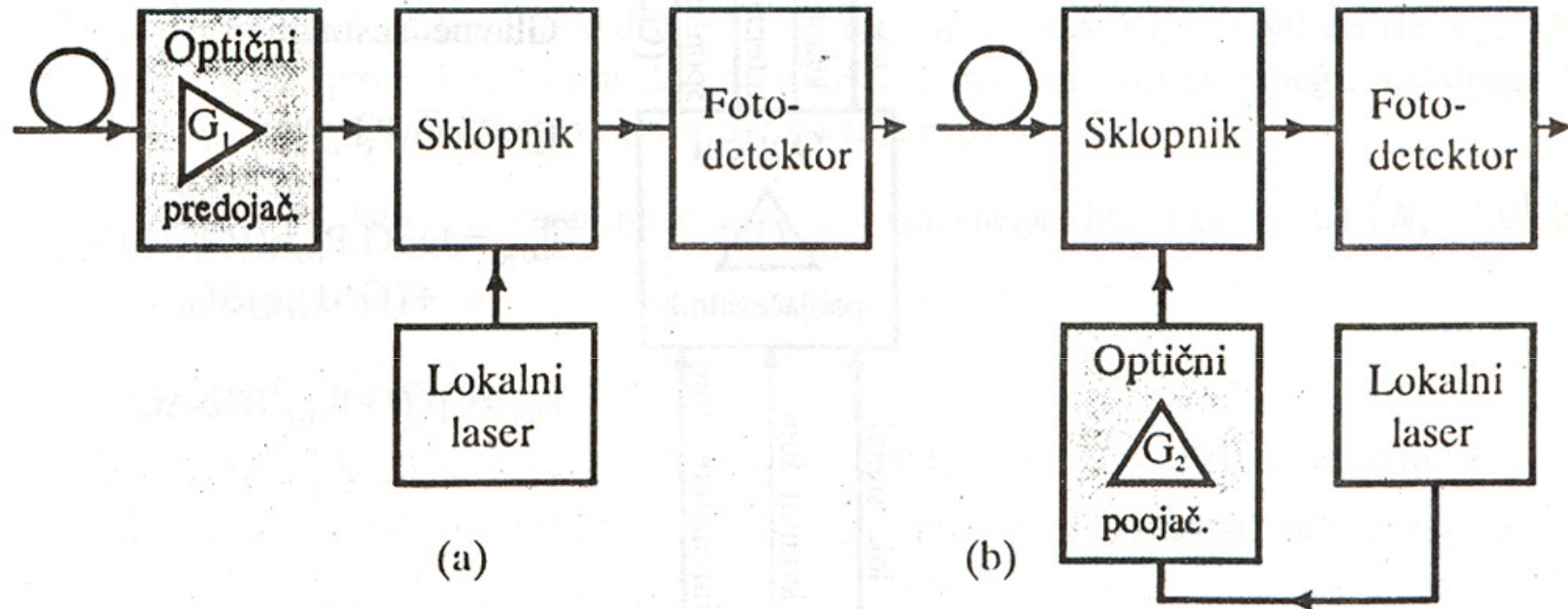
Medfrekvenčni tok

$$I_{MF} = \rho P 2 \sqrt{\frac{P_{HET}}{P}} \cos(\omega_{MF} t + \iota)$$

Razmerje signal / šum v medfrekvenci

$$ESNR = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{\rho^2 2 P P_{HET} R}{\left(2e(\rho P + \rho P_{HET} + I_D) R + \rho^2 C^2 (P^2 + P_{HET}^2) R I_N \cdot R + 4kTF_{RF} \right) \Delta f} \doteq \frac{\eta P}{h \nu \Delta f}$$

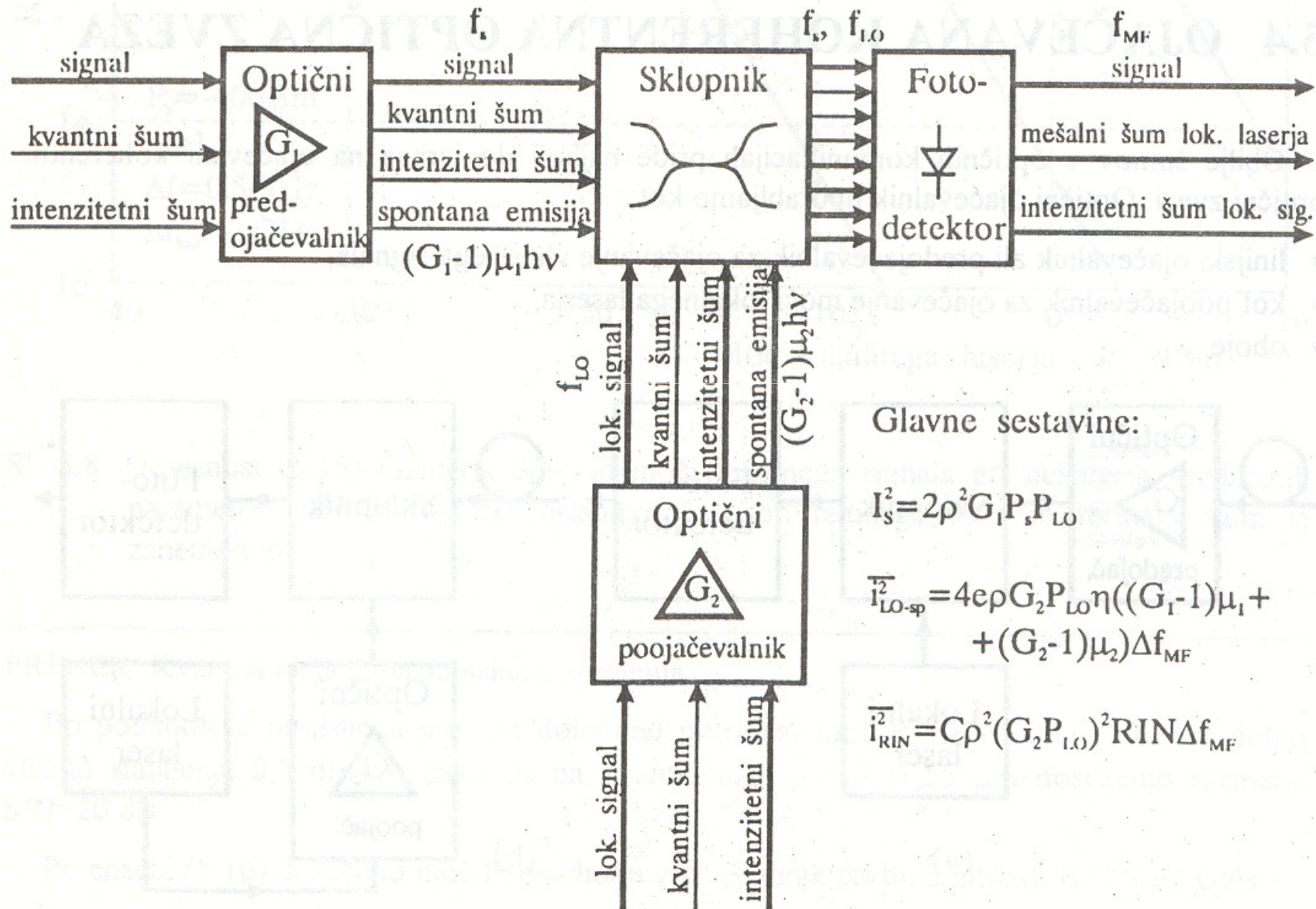
Načini ojačevanja



Ojačevanje vhodnega signala Ojačevanje lokalnega signala

Ojačevanje obeh signalov hkrati

Koherentni sprejem, ojačen signal LO⁴⁶



Glavne sestavine:

$$I_s^2 = 2\rho^2 G_1 P_s P_{LO}$$

$$\overline{i_{LO-sp}^2} = 4e\rho G_2 P_{LO} \eta ((G_1-1)\mu_1 + (G_2-1)\mu_2) \Delta f_{MF}$$

$$\overline{i_{RIN}^2} = C\rho^2 (G_2 P_{LO})^2 RIN \Delta f_{MF}$$

Koherentni sprejem, mešalni šumi

- $\overline{i_{k,s}^2} = 2e\rho G_1 P_s \Delta f_{MF}$ - kvantni šum ojačenega vhodnega signala
- $\overline{i_{k,LO}^2} = 2e\rho G_2 P_{LO} \Delta f_{MF}$ - kvantni šum ojačenega lokalnega signala
- $\overline{i_{s,sp}^2} = 4e\rho G_1 P_s \eta \left((G_1 - 1)\mu_1 + (G_2 - 1)\mu_2 \right) \Delta f_{MF}$
- mešalni šum ojačenega vhodnega signala in ojačene spontane emisije
- $\overline{i_{LO,sp}^2} = 4e\rho G_2 P_{LO} \eta \left((G_1 - 1)\mu_1 + (G_2 - 1)\mu_2 \right) \Delta f_{MF}$
- mešalni šum ojačenega lokalnega signala in ojačene spontane emisije
- $\overline{i_{sp,sp}^2} = 4e^2 \eta^2 \left((G_1 - 1)^2 \mu_1^2 + (G_2 - 1)^2 \mu_2^2 + (G_1 - 1)(G_2 - 1)\mu_1\mu_2 \right) \Delta v \Delta f_{MF}$
- mešalni šum ojačene spontane emisije s seboj
- $\overline{i_{k,sp}^2} = 4e^2 \eta \left((G_1 - 1)\mu_1 + (G_2 - 1)\mu_2 \right) \Delta v \Delta f_{MF}$
- kvantni šum ojačene spontane emisije

Meje optičnega sprejema

Primerjava S/N

1. Direktna detekcija:

1.1 Dioda PIN

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\eta \frac{eP}{hf}\right)^2 R}{2e\left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B}$$

1.2 Dioda APD

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(M \eta \frac{eP}{hf}\right)^2 R}{M^2 F(M) 2e\left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B}$$

1.3 EDFA, dioda PIN

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(\eta \frac{eP}{hf}\right)^2 G^2 R}{2\left(2e\eta \frac{eP}{hf} \mu + \Delta f \mu^2\right) G^2 BR + 4kT_e B}$$

2. Koherentna detekcija:

2.1 Homodinski

$$\frac{S}{N} = \frac{2P_s P_l R \left(\frac{\eta e}{hf}\right)^2}{2eR\Delta f \left(\eta \frac{eP_l}{hf} \left(1 + \frac{P_s}{P_l}\right) + I_D\right) + 4kT_e \Delta f}$$

Meje optičnega sprejema

1. Meja Poissonove statistike

Poissonova statistika sprejema fotonov na drug način izraža kvantni šum svetlobe. Pri povprečnem številu 21 fotonov v bitnem intervalu sprejmemo 0 fotonov z verjetnostjo 10^{-9} . Če predpostavimo, da za sprejem zadostuje prisotnost vsaj enega fotona, je mogoče zagotoviti sprejem s pogostostjo napake 10^{-9} ali manj, če je v skladu s Poissonovo statistiko povprečno število fotonov na bit večje od 21.

Pri sprejemu bitnega niza, ki ima v povprečju enako število enic in ničel, zadostuje za sprejem pri pogostosti napake 10^{-9} v povprečju 11 fotonov.

Te izjemno nizke občutljivosti sprejema v praksi ne dosegamo, ker ne razpolagamo z napravo, ki bi zagotavljala sprejem enega signalnega fotona v prisotnosti velikega števila šumnih fotonov. Meja Poissonove statistike ima zato le teoretični pomen. Realno mejo sprejema določa šumni prag.

2. Termična meja diode PIN

Najpreprostejše optične zveze delujejo v pogojih, ko termični šum prevladuje nad drugimi šumi. Razmereje S/N je v tem primeru enako

$$\frac{S}{N} = \frac{(\eta e/hf)^2 P^2 R}{4k_B T_e B}$$

Uporabljamo RF predojačevalnik visoke upornosti R

Meje optičnega sprejema

3. Kvantna meja

Kvantna meja sprejema je najnižji možen prag sprejema, ki ga dosežemo tako, da razen neizogibnega kvantnega šuma signala vse druge šume relativno potlačimo. To dosežemo z multiplikativnim, optičnim ali koherentnim ojačevanjem, pri katerem se ojačujeta signal in mešalni šum signala, ne pa tudi drugi šumi.

3.1 Sprejem na kvantni meji z diodo PIN

Pri zadosti močnem signalu se sorazmerno poveča kvantni šum signala tako, da prevlada nad termičnim šumom, ki ga lahko zanemarimo. Dobimo razmerje

$$\frac{S}{N} = \frac{(\rho P)^2}{\left(2e\rho P + \frac{4k_B T F}{R}\right) \Delta f} \quad \frac{S}{N} \doteq \frac{\eta P}{2h\nu \Delta f} \quad \frac{S}{N} = \eta \bar{n}$$

Pri BER = 10⁻⁹ oz. S/N 144 je povprečno število fotonov 144, če je kvantni izkoristek η = 1. Pri η = 0,8 se povprečno število fotonov zviša na 180 (moč je -46,4 dBm). (Upoštevali smo Nyquistov kriterij Δf = B/2.). Rezultat ni odvisen od R.

Z diodo PIN dosežemo kvantno mejo le pri močnem signalu. Tak primer pa nas ne zanima, ker želimo občutljivo zvezo, ki lahko sprejema šibek signal. Sklenemo lahko, da kvantne meje sprejema ni nogoče doseči z diodo PIN.

Meje optičnega sprejema

3.2 Sprejem na kvantni meji z diodo APD

Pri sprejemu z diodo APD se vsaj deloma lahko približamo kvantni meji. Za faktor M^2 se multiplikativno poveča moč signala, nekoliko več, za faktor $M^2 F_M$, pa se poveča moč kvantnega šuma signala. Tako povečan kvantni šum močno preglasi vse druge šume, ki jih lahko ranemarimo. Dobimo razmerje

$$\frac{S}{N} \doteq \frac{\eta P}{2h\nu F_M \Delta f}, \quad F_M = M^x, \quad \frac{S}{N} = \frac{\eta}{F_M} \bar{n}.$$

V primeru $\text{BER} = 10^{-9}$, $S/N = 144$, $\eta = 0,8$, $M = 10$ in $x = 0,7$ dobimo

$$\bar{n} = \frac{F_M}{\eta} 144 = 900, \quad P = \bar{n} h\nu B = 1,110^{-4} \text{ mW} (-39,5 \text{ dB}).$$

Namesto idealnih 144 fotonov potrebujemo za sprejem 900 fotonov, kljub temu je to dober približek kvantni meji. Rezultat ni odvisen od upornosti R bremena.

Meje optičnega sprejema

3.3 Sprejem na kvantni meji s predojačevanjem

Na optični zvezi, ki uporablja optični predojačevalnik se za faktor G^2 optičnega ojačenja poveča moč signala in moč prevladujočega mešalnega šuma signala in ojačene spontane emisije.

$$\frac{S}{N} = \frac{(\rho GP)^2}{\left(4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu + 4\rho^2(G-1)^2(\mu h\nu)^2 \Delta\nu + \frac{4k_B TF}{R}\right) \Delta f} \quad \frac{S}{N} = \frac{\bar{n}}{2\mu} = \frac{\bar{n}}{F}$$

Mešalni šum ojačene spontane emisije same s seboj (drugi člen v imenovalcu) lahko zanemarimo vključno s še drugimi šumi (npr. kvantni šum ojačene spontane emisije, ki v gornji formuli ni zajet).

Teoretična meja sprejema z idealnim optičnim ojačevalnikom (šumni faktor $F = 3$ dB) je 288 fotonov, praktično je lahko znatno več. Pri šumnem faktorju $F = 6$ dB potrebujemo 576 fotonov.

3.4 Koherentni sprejem

Sprejem omogoča doseganje kvantne meje.

Kvantna meja sprejema

Kvantna meja, pogoji za:

- Fototok prevladuje nad temnim tokom ($\eta e P / hf \gg I_D$)
- Kvantni šum prevladuje nad termičnim šumom ($N_k \gg N_t$)

Dioda PIN:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_k = \frac{\eta P}{2hfB} = \eta \frac{n}{2B} = \eta n_b,$$

Dioda APD:

$$\frac{S}{N} = \frac{1}{F(M)} \left(\frac{S}{N}\right)_k$$

n fotoni na sekundo
 $n_b = n / (2B)$
 v povprečju na bit

EDFA:

$$\frac{S}{N} \doteq \frac{1}{2} \left(\frac{S}{N}\right)_k$$

$F = 2$

Homodinski:

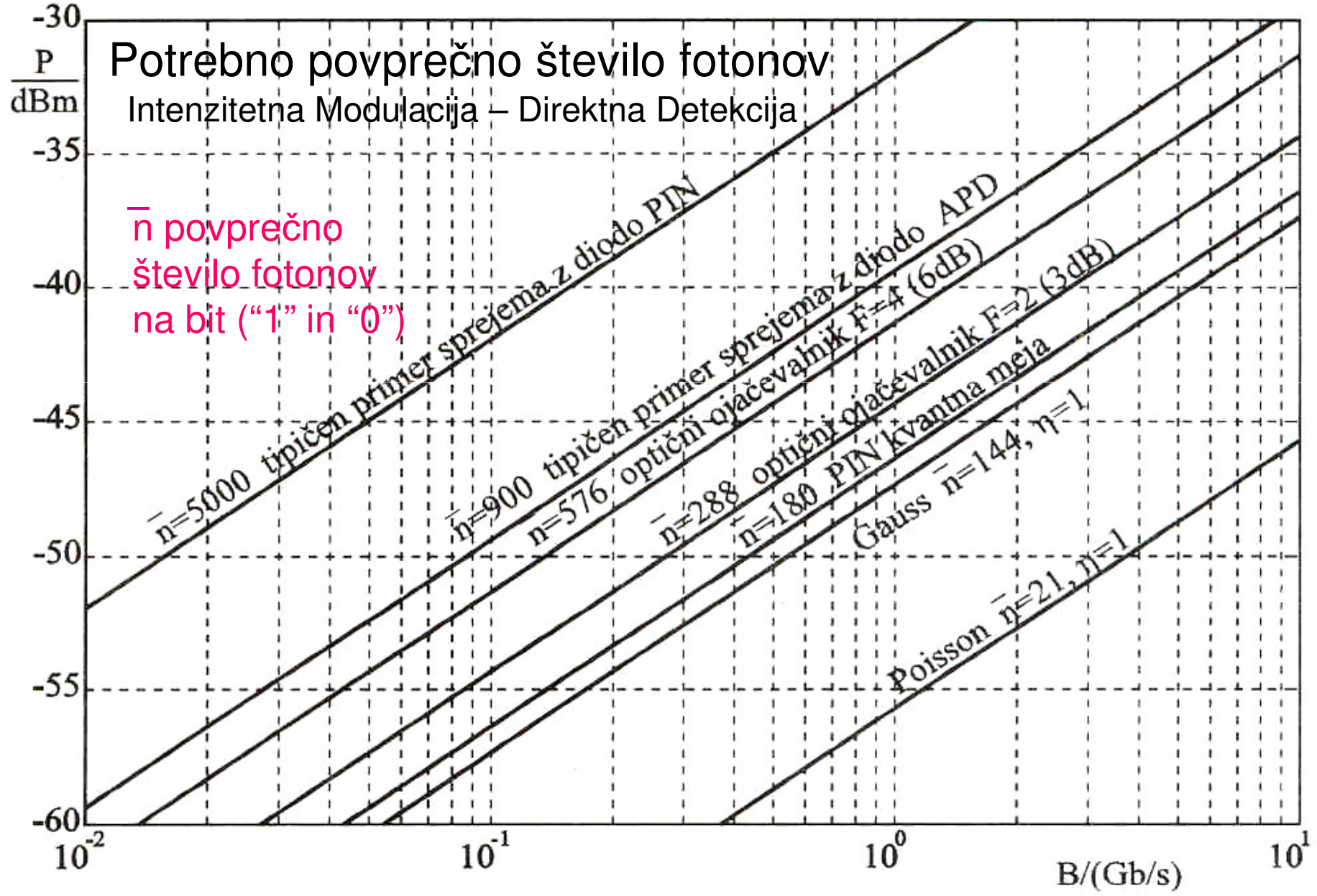
$$\frac{S}{N} \doteq \frac{\eta P_s}{hf\Delta f} = \frac{q\eta P_s}{2hfB} = q \left(\frac{S}{N}\right)_k$$

$q = 4$

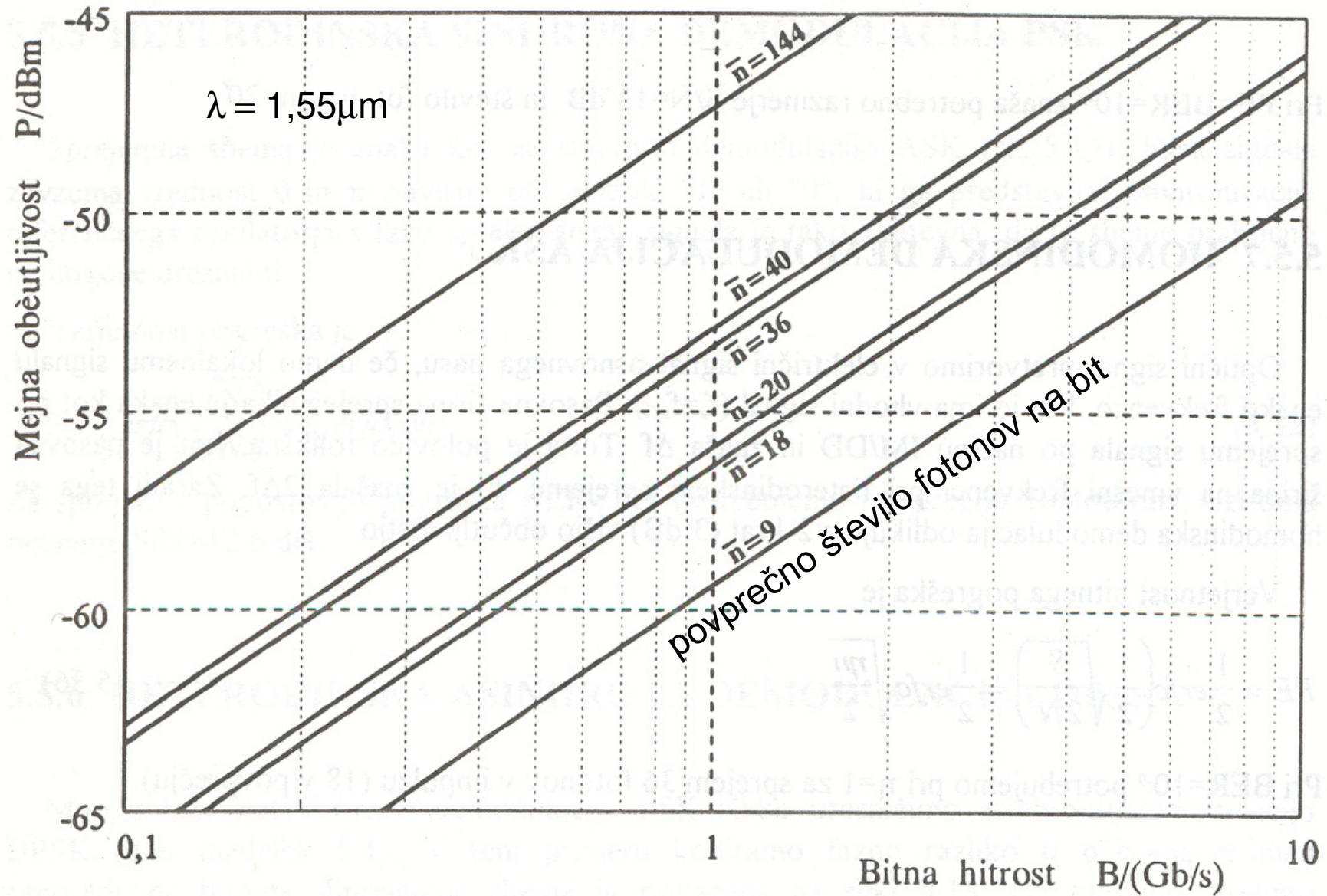
Komentar h kvantni meji

- Pri direktnem sprejemu z diodo PIN je kvantna meja nedosegljiva. Približamo se ji le pri velikem signalu, kar ni namen optične zveze.
- Pri direktnem sprejemu z diodo APD z multiplikacijo M sicer prevladamo termični šum, vnesemo pa šum multiplikacije in s tem za določeno število dB poslabšamo S/N.
- Na ojačevani optični zvezi je razmerje S/N najmanj 3 dB pod kvantno mejo.
- S koherentno detekcijo teoretično dosežemo kvantno mejo. Signal brezšumno ojačujemo z močjo lokalnega oscilatorja. S homodinskim sprejemom teoretično presežemo kvantno mejo diode PIN za faktor 4 (6 dB). Po teoriji je to najboljši sprejem.

Mejni primeri opt. sprejema IM/DD



Mejna občutljivost



Kvantna stanja svetlobe

Princip nedoločljivosti

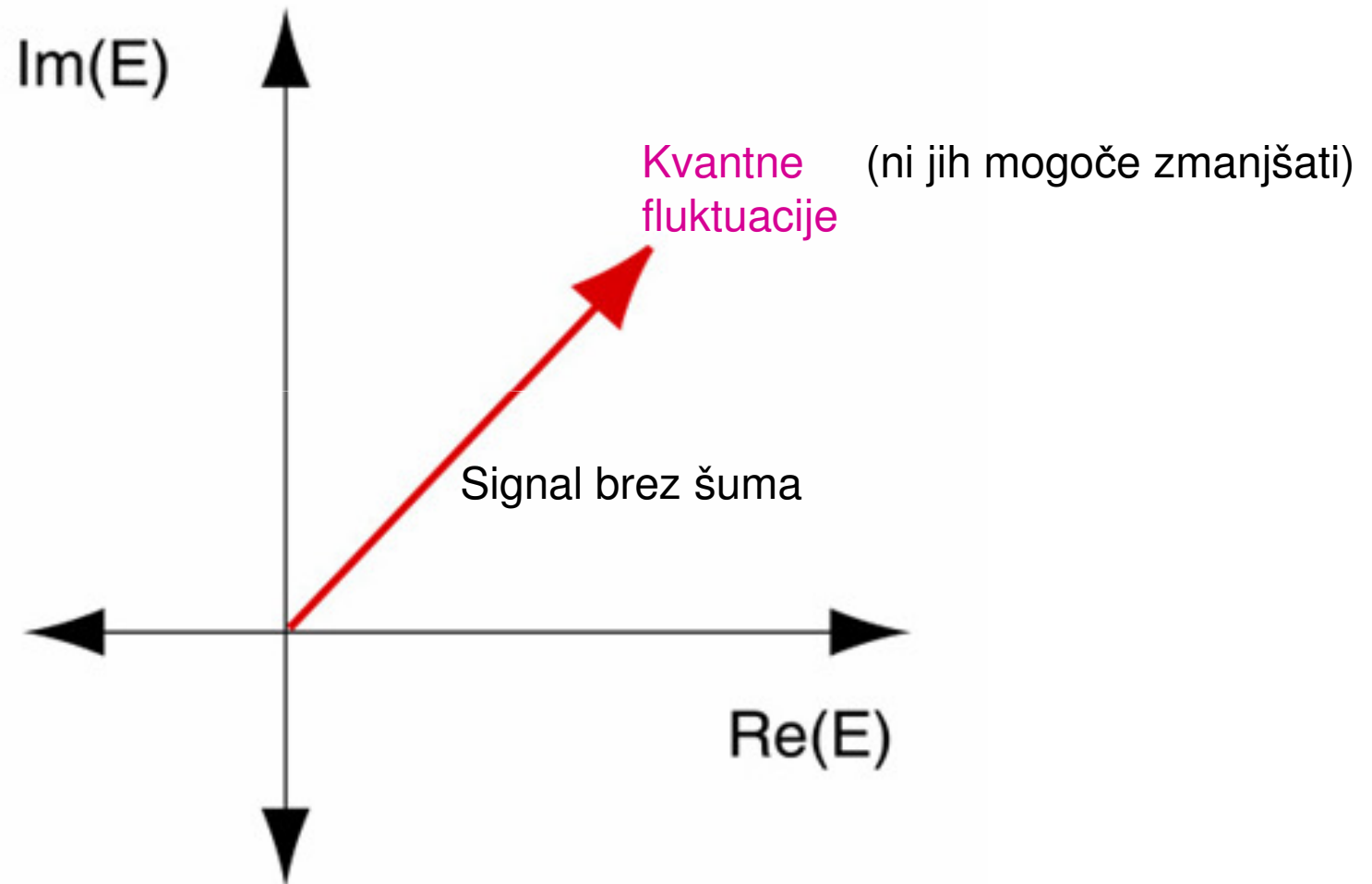
Nedoločljivost mesta Δx in gibalne količine Δp delca

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2$$

Nedoločljivost komponent elektromagnetnega polja
(teoretična podlaga kvantnega šuma)

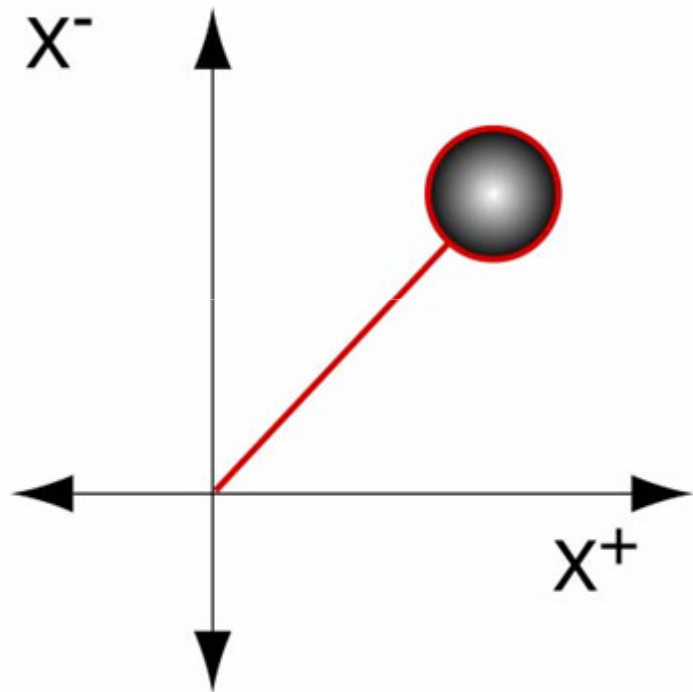
$$\Delta \hat{X}^+ \Delta \hat{X}^- \geq 1$$

Predstevitev kvantnih stanj svetlobe

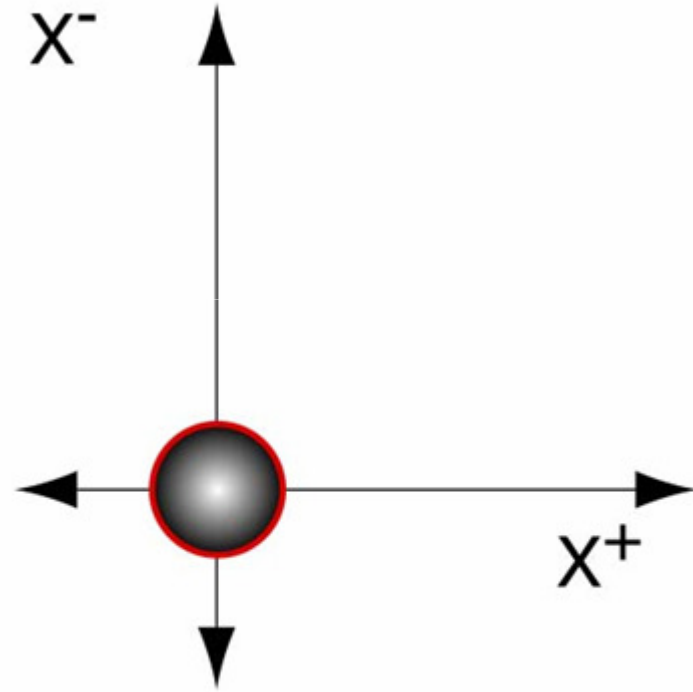


Ali je kvantne fluktuacije mogoče spremeniti tako, da kvantni šum čim manj vpliva na modulacijske parametre (amplituda, faza) komunikacijskega sistema?

Koherentno in ničelno (vakuumsko) stanje⁶¹

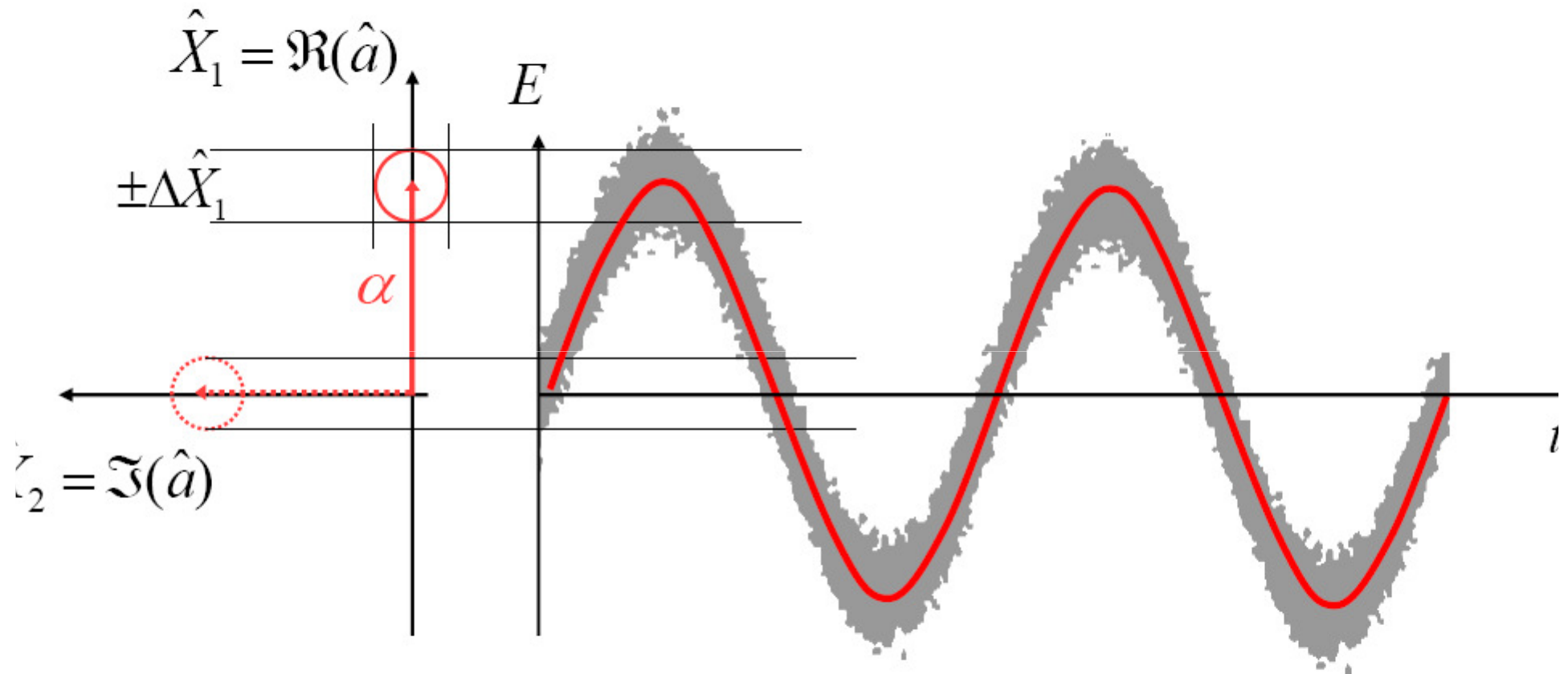


Koherentno stanje



Vakuumsko stanje

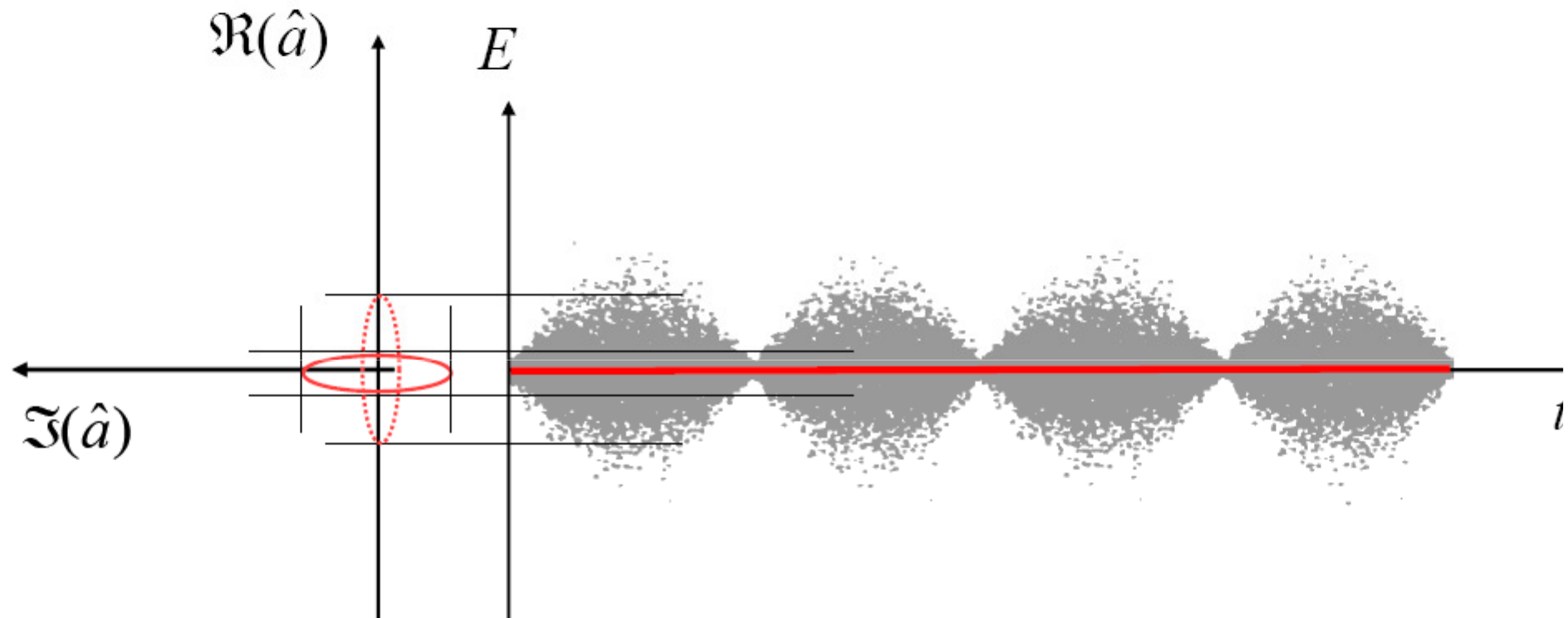
Coherent State



Coherent amplitude: $\alpha = \langle \hat{a} \rangle = \langle \alpha | \hat{a} | \alpha \rangle$

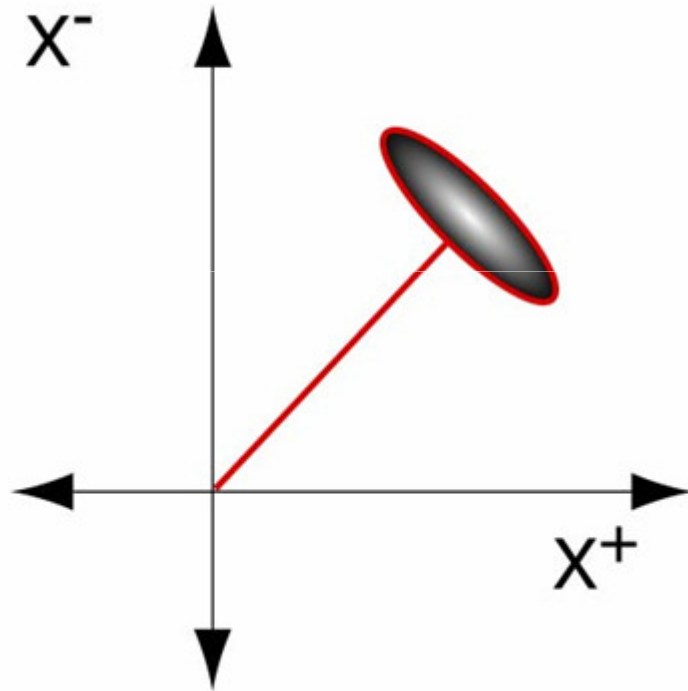
Field quadratures: $\Delta \hat{X}_1 = \Delta \hat{X}_2 = 1/2$, $[\hat{X}_1, \hat{X}_2] = i/2$

Squeezed Vacuum State

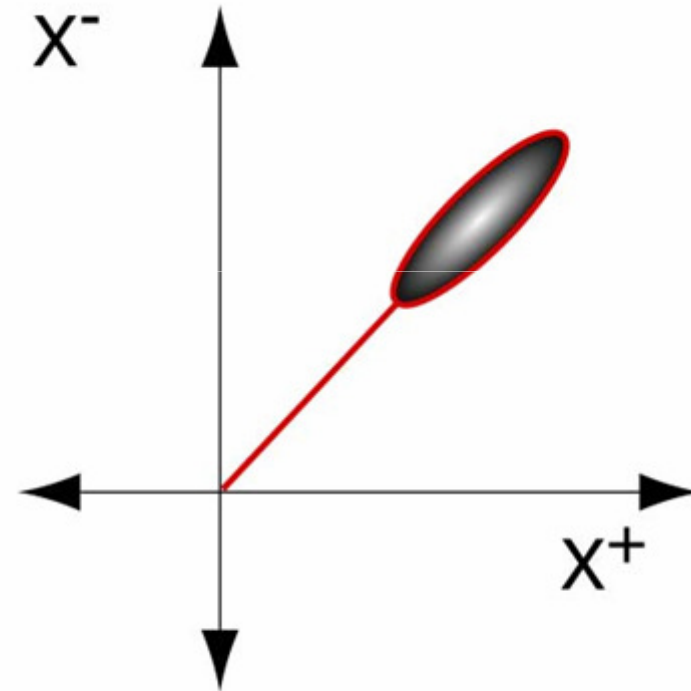


Squeezed vacuum state

Stisnjena svetloba (squeezed light)



Amplitudno stisnjena svetloba



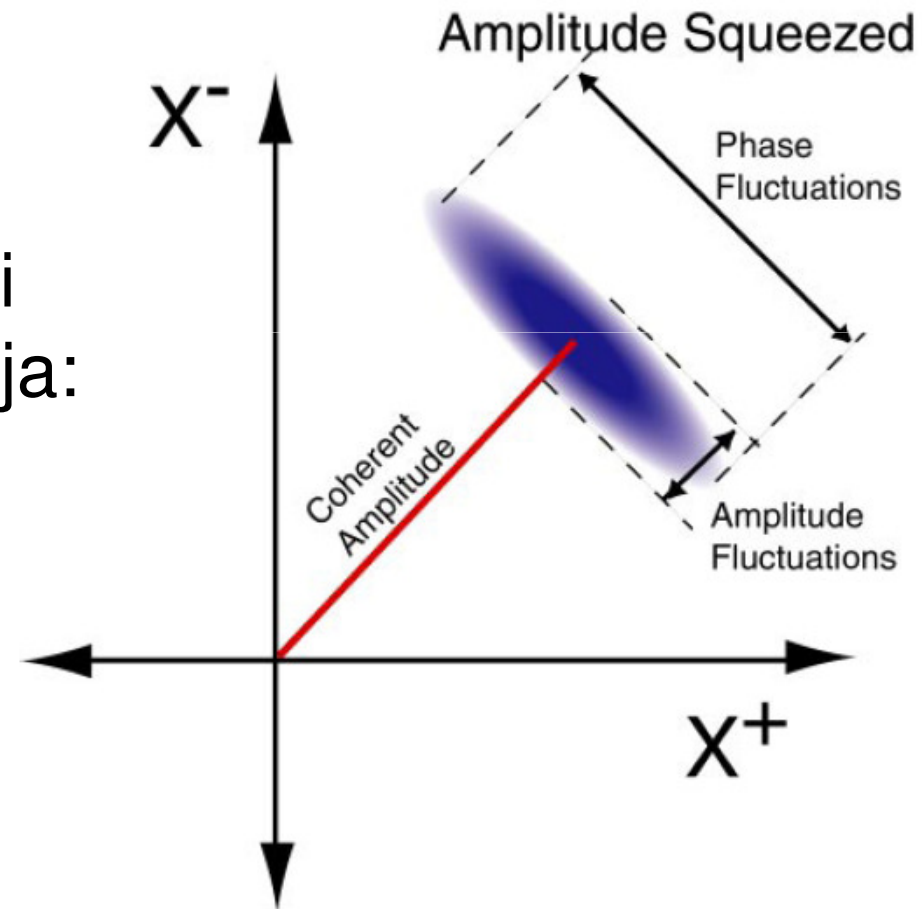
Fazno stisnjena svetloba

Uporaba za najbolj zahtevne meritve (npr. gravitacijski valovi)

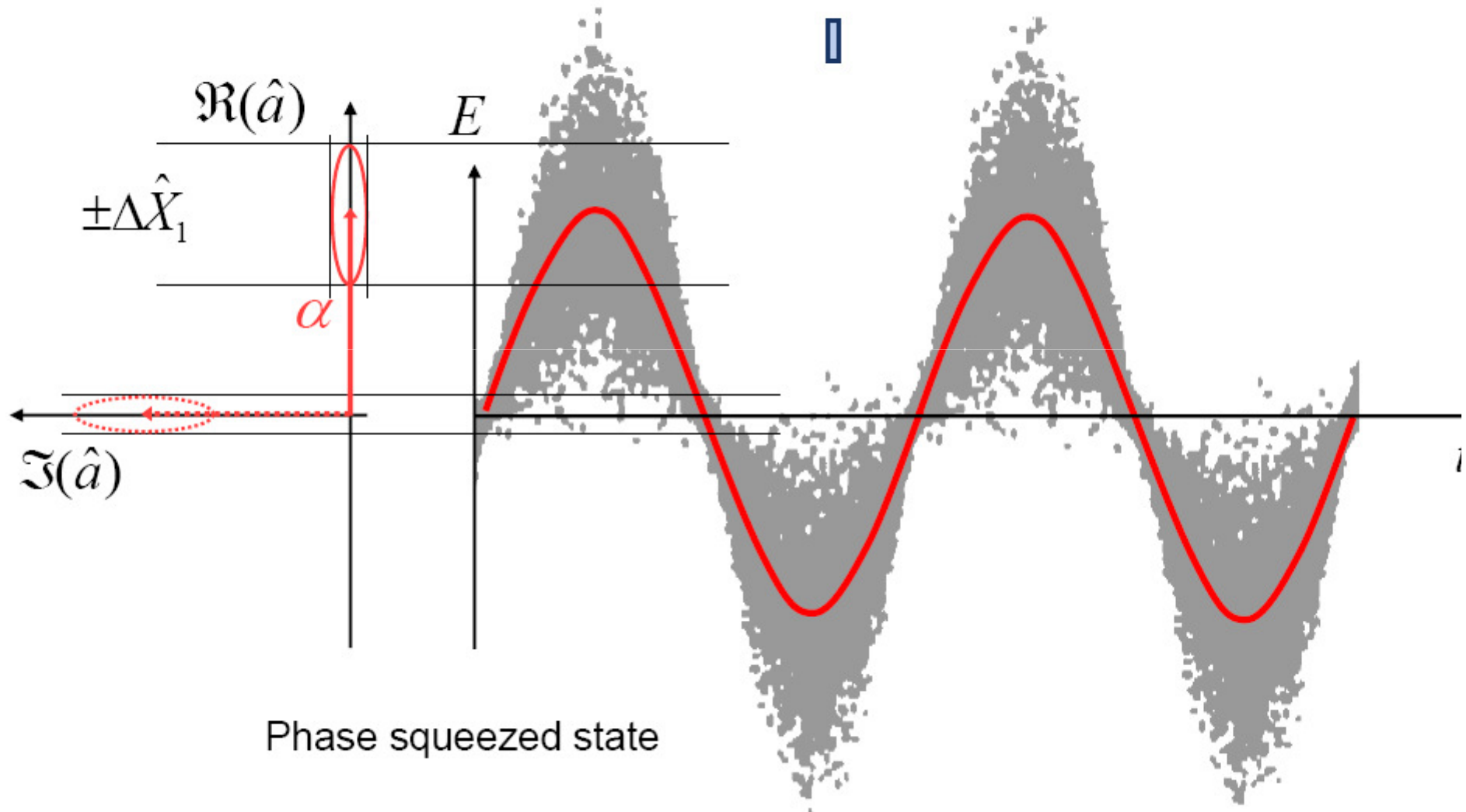
Amplitudno stisnjena svetloba

Heisenbergov princip nedoločljivosti za kvadraturni komponenti elektromagnetnega polja:

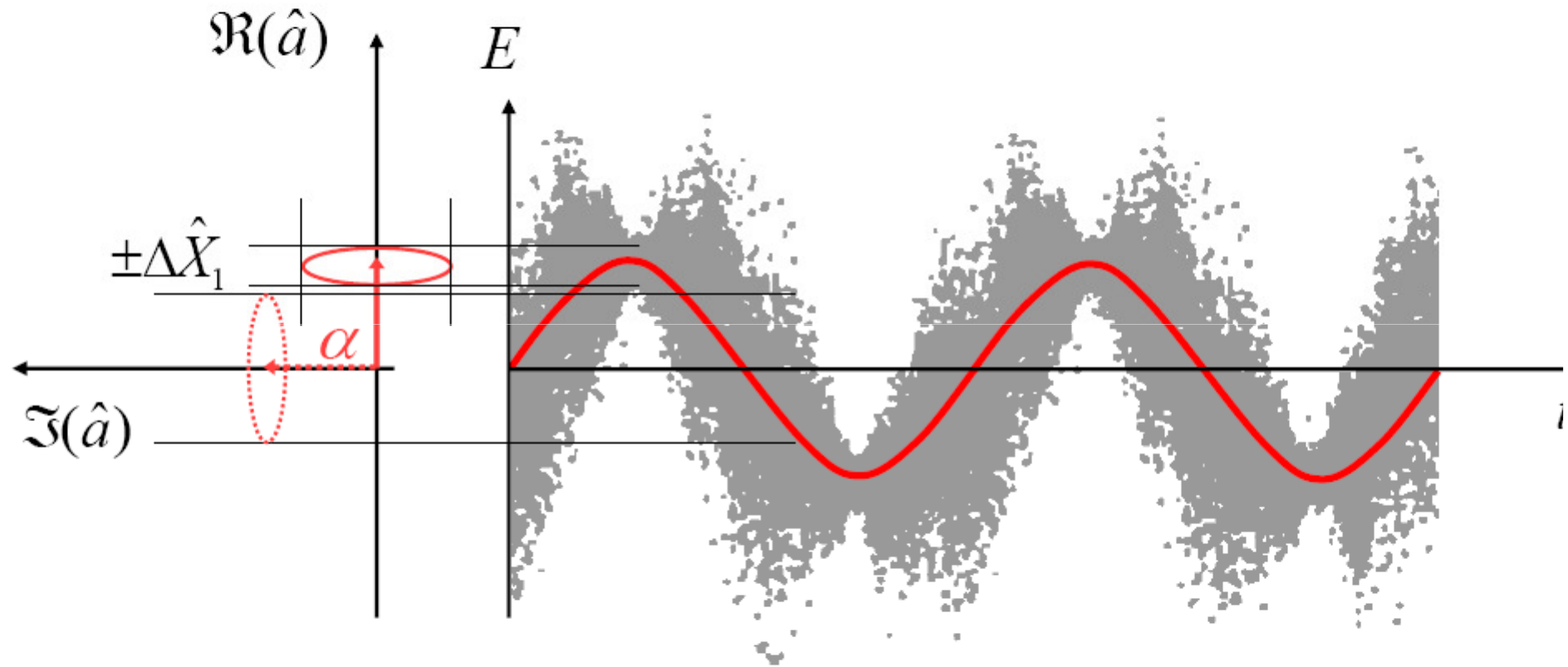
$$\Delta \hat{X}^+ \Delta \hat{X}^- \geq 1$$



Phase Squeezed State



Amplitude Squeezed State



Amplitude squeezed state

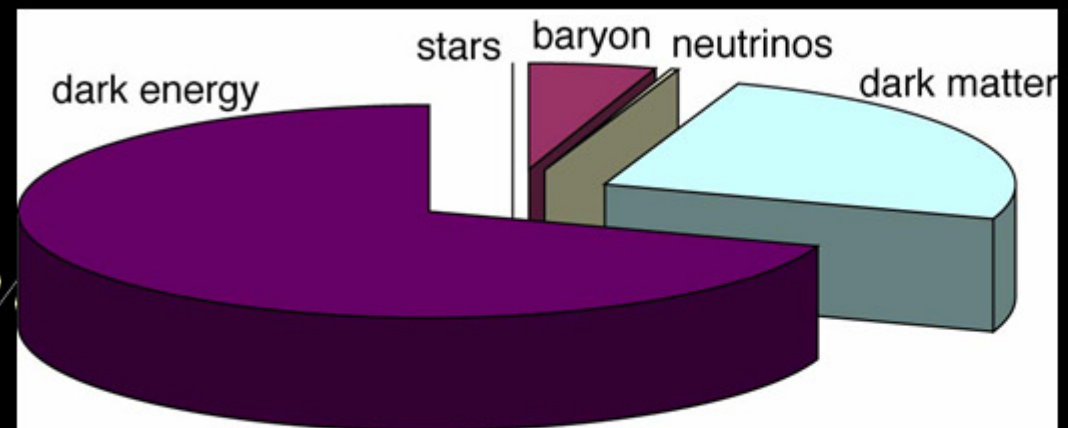
Kvantni šum in kozmozologija

Energijska stanja v vakuumu



Energy budget of Universe

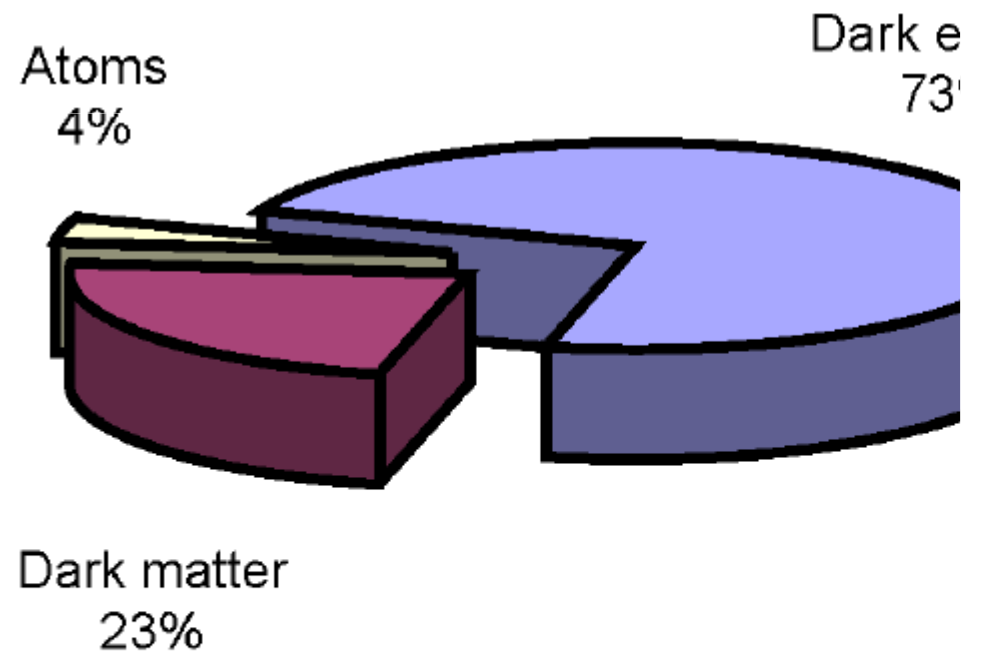
- Stars and galaxies are only $\sim 0.5\%$
- Neutrinos are $\sim 0.3\text{--}10\%$
- Rest of ordinary matter (electrons and protons) are $\sim 5\%$
- Dark Matter $\sim 30\%$
- Dark Energy $\sim 65\%$
- Anti-Matter 0%
- Higgs condensate $\sim 10^{620}\%$



Energy budget of Universe

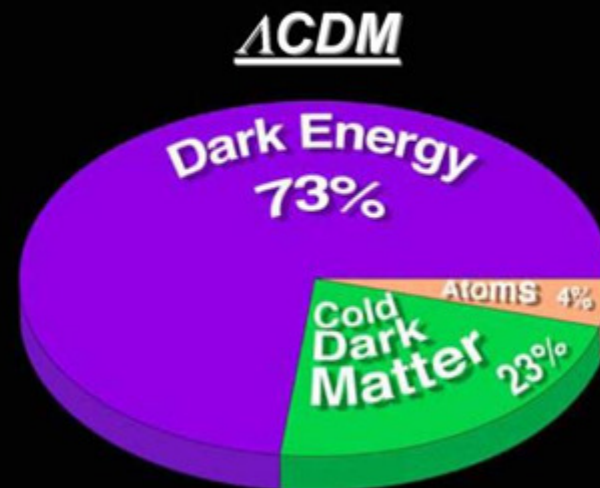
- Antimatter, 0%
- Neutrinos, $\sim 0\%$
- Atoms, $4.4 \pm 0.4\%$
- Dark matter, $23 \pm 4\%$
- Dark energy, $73 \pm 4\%$

96% is a mystery!



Precision Cosmology

- Dark energy ~ 73% of universe
- Dark matter ~ 23% of universe
- Ordinary matter ~ 4% of universe

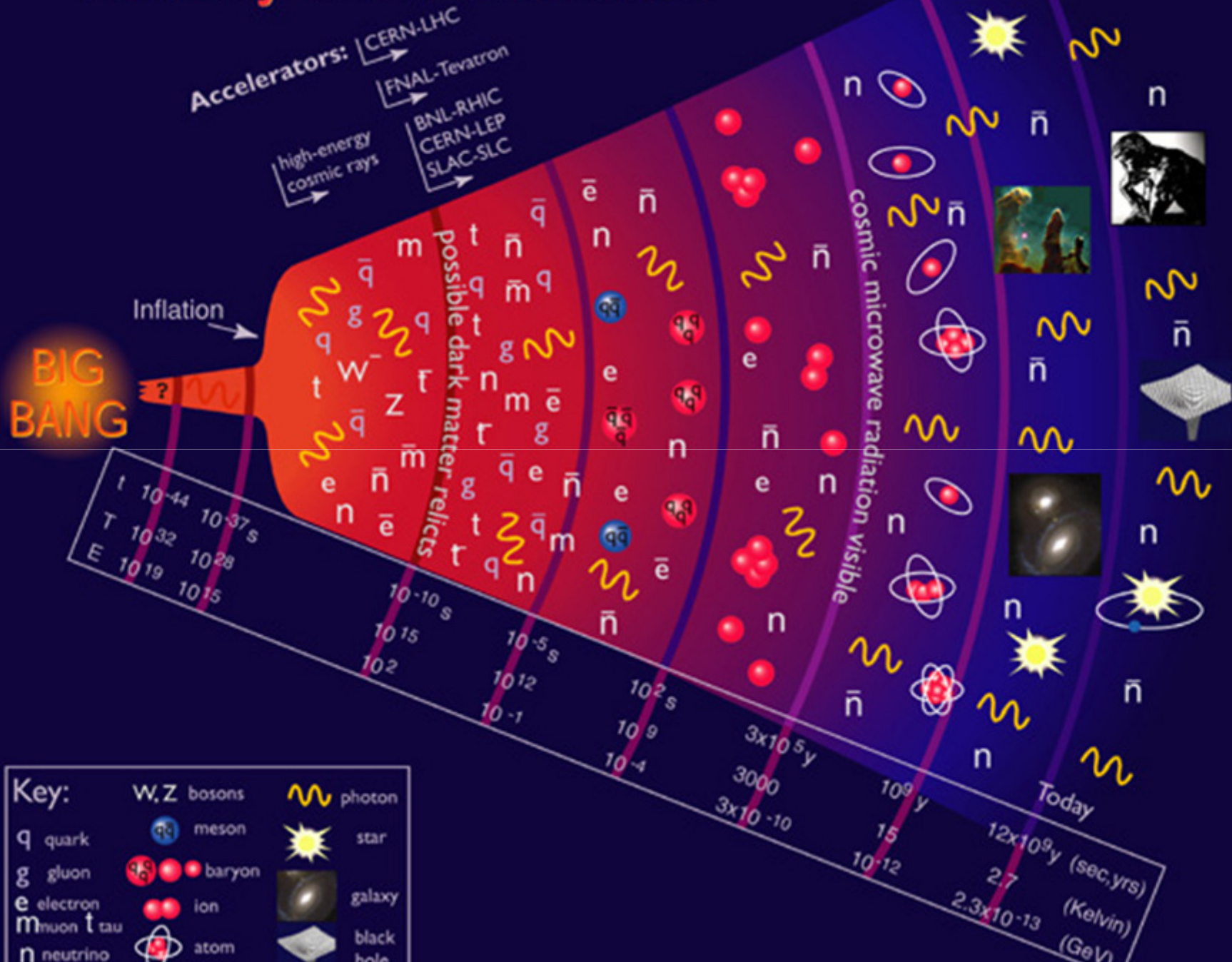


- Inflation-produced perturbations
- Baryogenesis

What is Dark Energy?

- Pundits don't know.
- My guess is that **dark energy** is **positive** zero point quantum vacuum energy with equal and opposite **negative** pressure.
- Einstein's theory of gravity then demands that **dark energy** is a universally **repulsive anti-gravity field** causing the expansion of space to speed up not slow down.

History of the Universe



Conclusions

- The Universe is accelerating
- Dark Energy is therefore the dominant constituent in the universe
- We do not know what dark energy is (vacuum fluctuations? Extra dimensions?)
- We are planning missions which will tell us

It might be quantum mechanical
fluctuations in the vacuum

Vacuum energy is called a *Cosmological Constant*

When we calculate the energy density
associated with vacuum fluctuations ...

The energy is too big by 128 orders of
magnitude:

100,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,
000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,
000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000

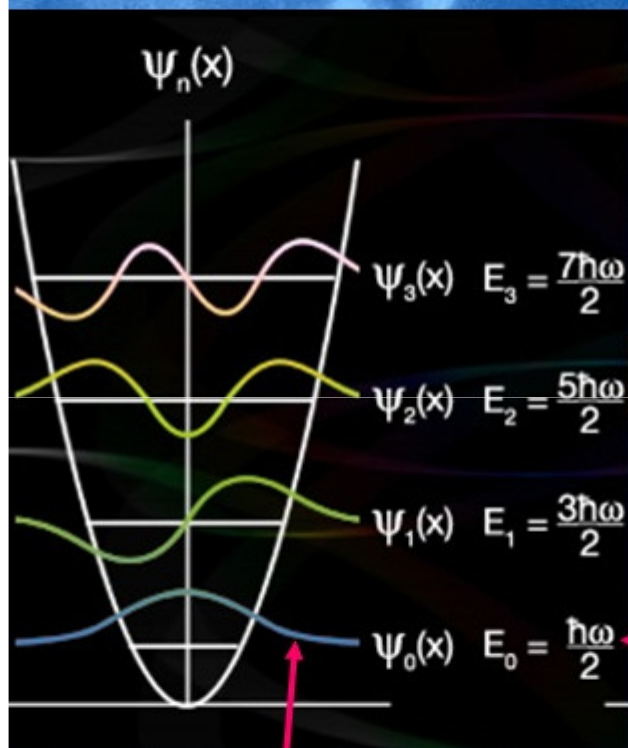
Dark Energy



**Dark energy is likely to be a
fundamentally new
physical phenomenon.**

Vacuum Energy

Quantum Oscillator



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi$$

$$E_n = (n + 1/2)h\omega \quad (n=0,1,2,\dots)$$

Zero-point
'vacuum fluctuation'
energy

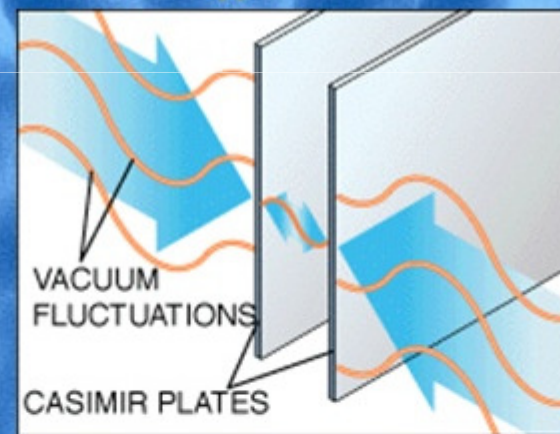
The minimum possible energy for the quantum oscillator is

$$E_0 = \frac{1}{2} h\omega.$$



Hendrik Casimir (1909-2000)

Casimir Effect



Vacuum is a seething fluctuation of electromagnetic field

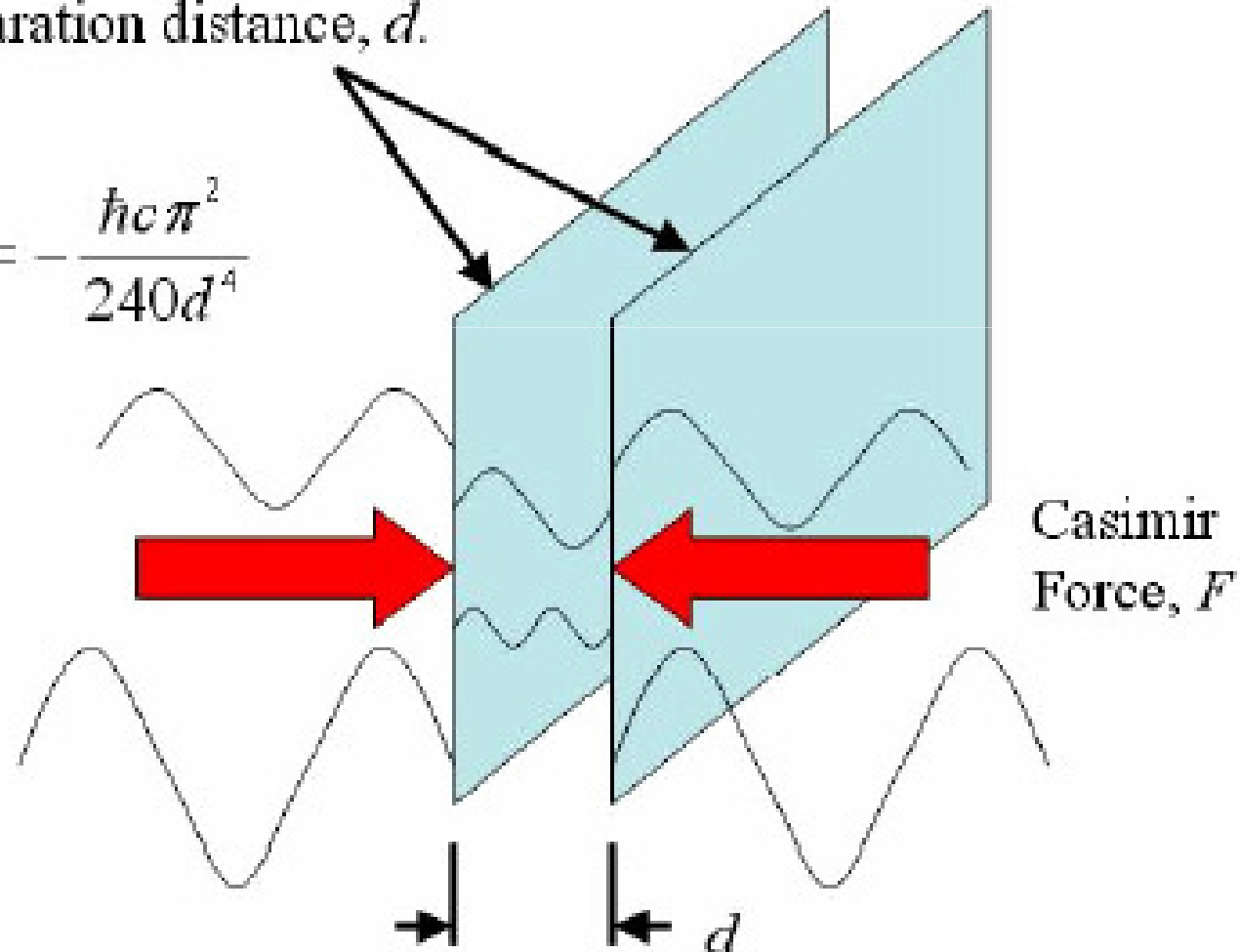
Umetniška upodobitev temne energije

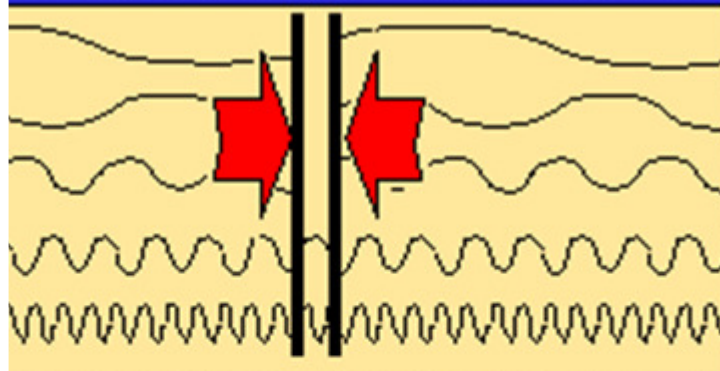


Casimirova sila

Uncharged Metal
Plates of area, A , and
separation distance, d .

$$\frac{F}{A} = -\frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4}$$

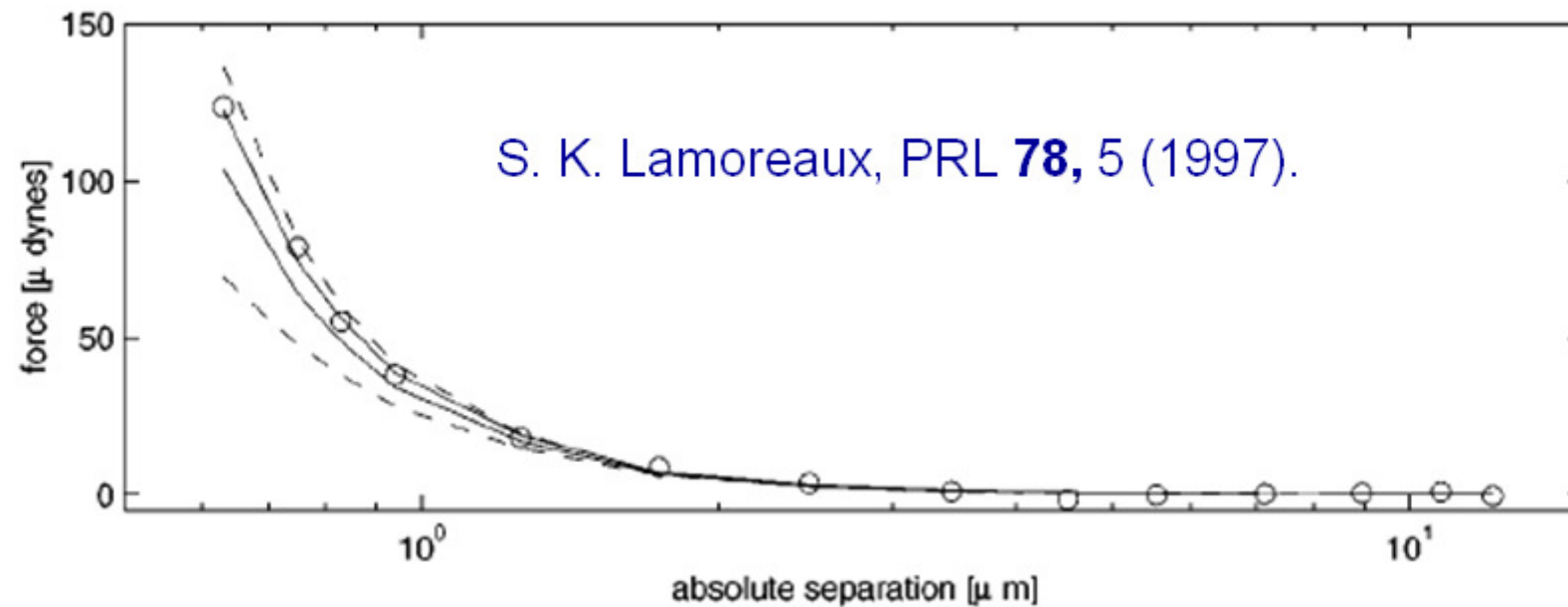




Prediction (1948): A weak attractive force between the two mirrors:

$$F = \frac{\pi \hbar c}{480d^4} (\text{Area})$$

That force was measured in 1996:



Conclusion

The vacuum is a dynamic place:

- Space and time are intertwined.
- Curved by matter; this curvature affects motion.
- A roiling sea of virtual particles created by quantum fluctuations.
- Contains a nonzero energy density that makes up $\sim 70\%$ of the energy of the Universe. The nature of this “dark energy” is almost completely unknown.
- The dark energy propels the accelerating expansion of the Universe.

Perhaps the hottest topic in physics right now.

I AM THE ALPHA & OMEGA



KONEC