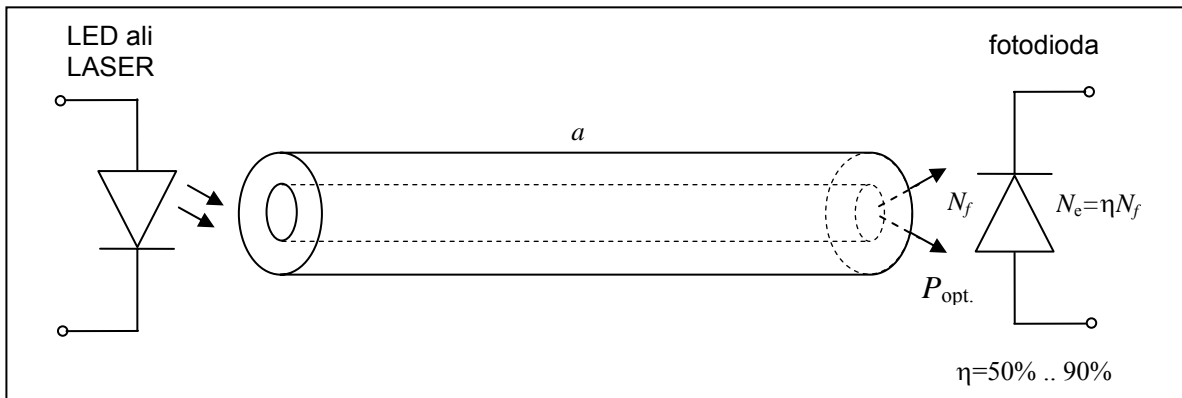


## 16. Šumi v optičnih komunikacijah

Optična zveza je sestavljena iz vira svetlobe (LED ali LASER), optičnega vlakna in detektorske fotodiode. Domet zveze je določen s slabljenjem optičnega vlakna  $a$ . Na koncu optičnega vlakna je signal z močjo  $P_{\text{opt.}}$ , ki vsebuje  $N_f$  fotonov. Izkoristek  $\eta$  nam definira, koliko elektronov dobimo.



Slika 1: Zveza po optičnem vlaknu

Energija enega elektrona znaša

$$W_e = |Q_e|U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV} , \quad (1)$$

kjer je  $Q_e$  naboj elektrona  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ .

Če zanemarimo izkoristek, mora imeti foton, ki izbije elektron, ekvivalentno energijo

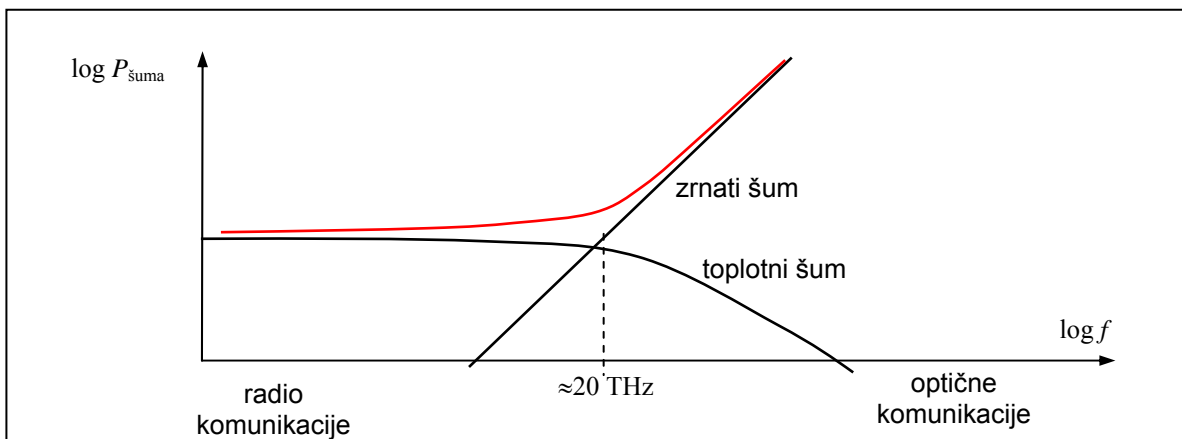
$$W_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c_0}{\lambda_0} , \quad (2)$$

kjer je Plankova konstanta  $h=6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ,  $h_s=6,625 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$ .

Fotoni imajo pri sobni temperaturi (25 K+273 K) energijo

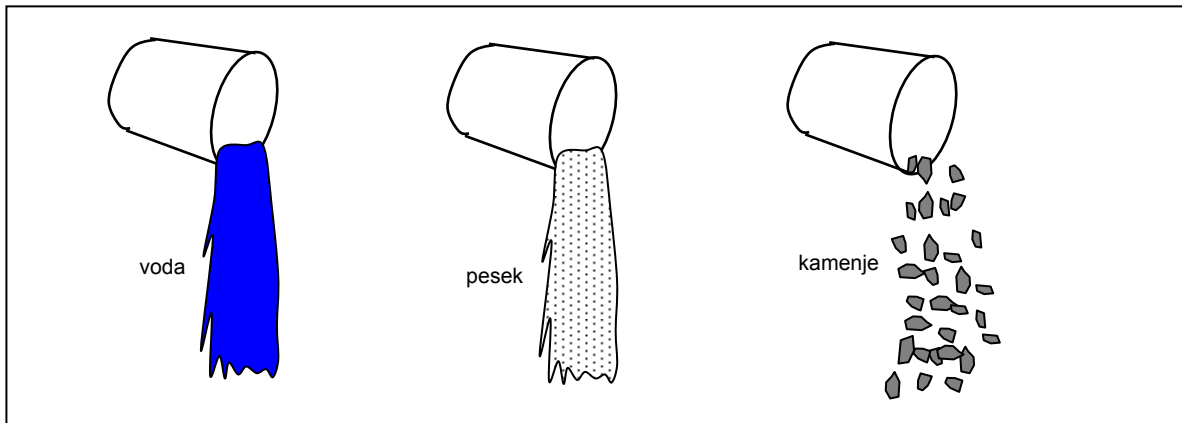
$$k_B \cdot T \approx 26 \text{ meV} , \quad (3)$$

kjer je  $k_B$  Boltzmanova konstanta  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ . Ta energija je precej manjša od energije, ki je potrebna za nastanek enega elektrona. **Toplotni šum**, ki ga proizvajajo s pomočjo toplote pridobljeni fotoni, je v optiki zanemarljiv, ker imamo premalo energije. V radijskih komunikacijah, ki se dogajajo pri nižjih frekvencah, pa je toplotni šum omejujoč dejavnik.



Slika 2: Jakost toplotnega in kvantnega šuma v odvisnosti od frekvence.

Do fotodiode pride vedno celo število fotonov, kar vodi v pojav zrnatosti in s tem v **zrnati** oziroma **kvantni šum**. Zrnat šum simbolično lahko razložimo z vrčem vode, peska ali kamenja, kot prikazuje slika 3. Optični signal ni zvezen (kot voda), temveč zrnat (kot kamenje).

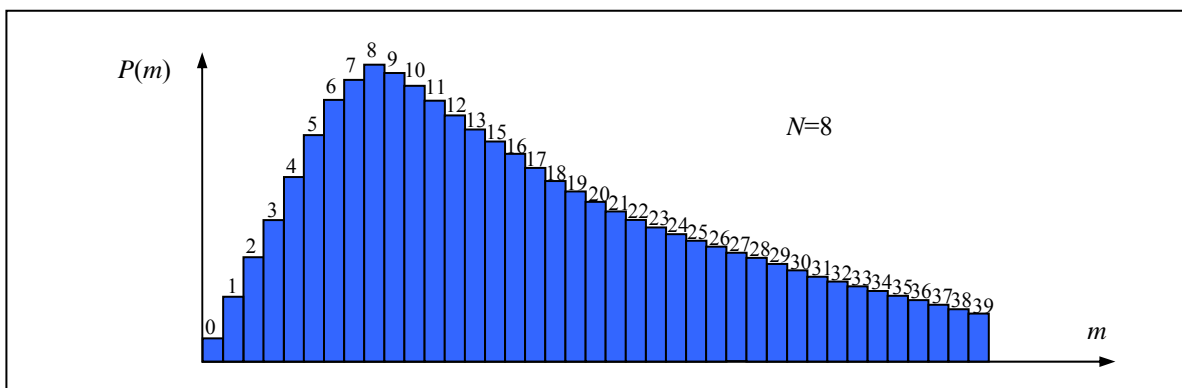


Slika 3: Ponazoritev zrnatosti snovi.

## 16. 1. Kvantna meja občutljivosti optičnega sprejema

Dogovorimo se, da bomo digitalno zvezo izvedli s prenosom logičnega simbola "1", ko bo svetloba in logičnega simbola "0", ko bo tema. Na sprejemu dobimo v primeru "0" nič fotonov, v primeru "1" pa povprečno  $\langle m \rangle$  fotonov, saj fotoni prihajajo naključno s Poissonovo porazdelitvijo, ki jo prikazuje slika 4. Pravimo, da je fotodetekcija naključen proces, ki se pokorava Poissonovi gostoti verjetnosti. Verjetnost, da detektor pride  $m$  fotonov zapišemo

$$P(m) = N^m \cdot \frac{e^{-N}}{m!} . \quad (4)$$



Slika 4: Poissonova porazdelitev, ki prikazuje verjetnost, da pride povprečno število fotonov  $N=8$  fotonov, pri dejanskem številu oddanih fotonov  $m$ .

Verjetnost, da pride nič fotonov ( $m=0$ ), pa zapišemo takole

$$P(0) = N^0 \cdot \frac{e^{-N}}{0!} = e^{-N} . \quad (5)$$

Digitalni prenosni sistem se ovrednoti kot razmerje med napačno sprejetih simbolov in števil vseh oddanih simbolov (angl. Bit Error Rate – BER). Običajno so sistemske zahteve digitalne zveze imeti verjetnost napačno sprejetega bita  $BER=10^{-9}$ .

Verjetnost, da bomo kljub oddani "1" sprejeli "0" mora biti torej manjša od  $10^{-9}$ .

$$P(0) = e^{-N} \leq 10^{-9}$$

Ta nastopi, ko je število elektronov enako

$$N \geq -\ln(10^{-9}) = 20,7$$

$$N_e \geq 21.$$

Kvantno mejo optičnega sprejema lahko torej slikovito izražamo s številom fotonov, ki so potrebni za sprejem z določeno verjetnostjo napake. Število fotonov  $N=21$  na impulz je verjetnost, ki predstavlja idealno spodnjo mejo sprejema pri 100% izkoristku sprejemnika, uresničljivo le v idealnih pogojih na kvantni meji sprejema in nikoli dosegljivo v praksi. Tej meji se v praksi lahko le bolj ali manj uspešno približamo in je nikoli ne dosegamo.

Pri kvantnem izkoristku  $\eta=70\%$ , je število fotonov za "1" enako

$$N_f \geq \frac{N_e}{\eta} = 30. \quad (6)$$

Iz minimalnega števila fotonov lahko izračunamo ustrezno svetlobno moči, ki jo ima "1"

$$P_{\text{opt.}} = \frac{N_f \cdot W_f}{t} = N_f W_f C. \quad (7)$$

Ker je optična moč za "0" enaka nič, je povprečna moč ob predpostavki enakega števila obeh simbolov, ki enako dolgo trajajo, kar povprečna vrednost.

#### Primer:

Izračunajte minimalno optično moč v sprejemniku, ki je potrebna za sprejetje enice v sprejemniku z 70% izkoristkom. Zveza deluje s prenosno hitrostjo  $C=155$  Mbit/s na valovni dolžini  $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ .

$$W_f = h \cdot f = h \cdot \frac{c_0}{\lambda_0} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{1,5 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

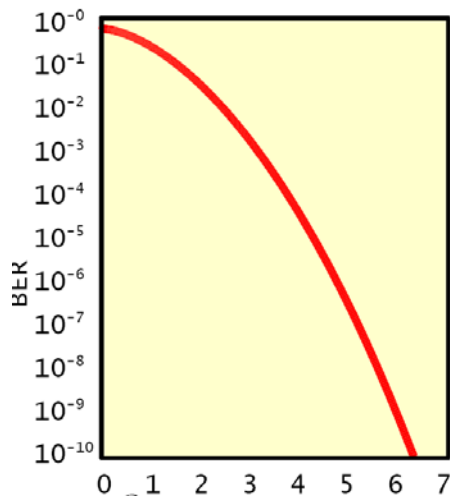
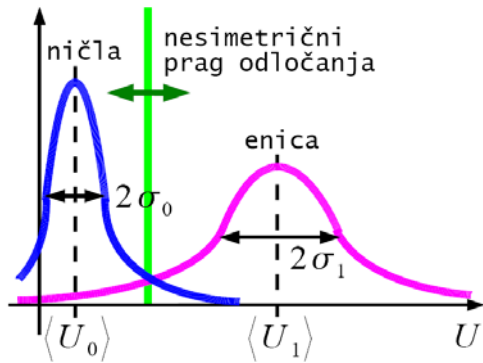
$$P_{\text{opt.}} = N_f W_f C = 30 \cdot 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot 155 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} = 7 \cdot 10^{-10} \text{ W} = \underline{\underline{0,7 \text{ nW}}}$$

$$P_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log \frac{P_{\text{opt.}}}{1 \text{ mW}} = \underline{\underline{-61,5 \text{ dBm}}}$$

Informacijska tehnologija nas uči, da največ informacij prenesemo, če imamo 50 % enic in 50 % ničel.

$$P_{\text{opt.}} = \frac{P_{\text{opt.} "1"} + P_{\text{opt.} "0"}}{2} = \frac{1}{2} P_{\text{opt.} "1"} = 0,35 \text{ nW} = \underline{\underline{-64,5 \text{ dBm}}}$$

## 16. 2. Odločanje o verjetnosti digitalnega signala



Občutljivost svetlobnih sprejemnikov za  $BER=10^{-6}$

vrsta RX @ 1550nm	$\frac{\langle N_f \rangle}{bit}$	155Mb/s	622Mb/s	2.5Gb/s	10Gb/s	40Gb/s
idealni	10.5	-66.8 dBm	-60.8 dBm	-54.7 dBm	-48.7 dBm	-42.7 dBm
vrhunski poskus	50	-60dBm	-54dBm	-48dBm	-41.9 dBm	-35.9 dBm
APD-FET	200	-54dBm	-48dBm	-41.9 dBm	-35.9 dBm	-29.9 dBm
PIN-FET	1000	-47dBm	-41dBm	-34.9 dBm	-28.9 dBm	-22.9 dBm
PIN nizka-z	$10^4$	-37dBm	-31dBm	-24.9 dBm	-18.9 dBm	-12.9 dBm