

Strokovno izobraževanje

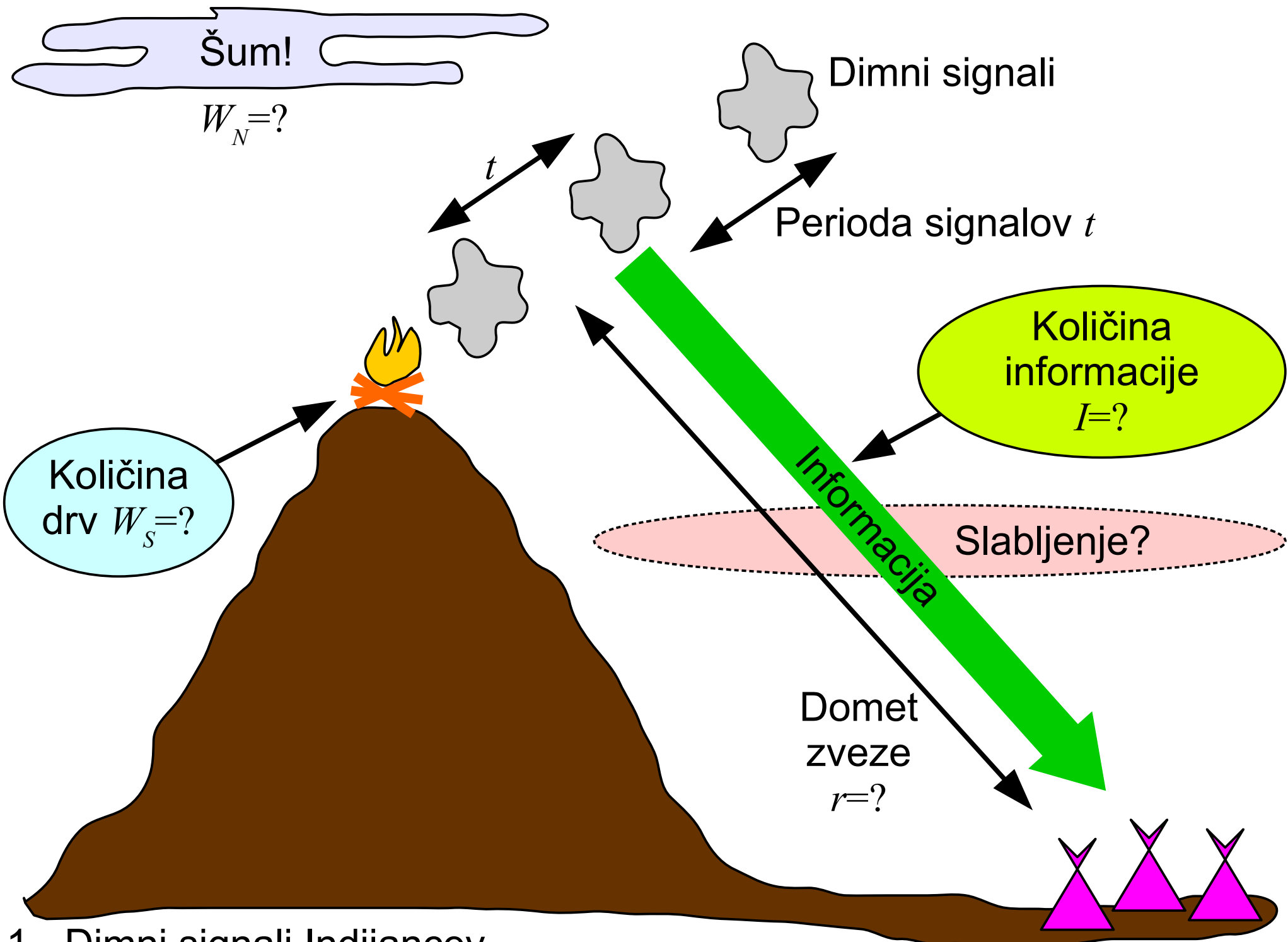
ZMOGLJIVOST ZVEZE

Matjaž Vidmar

AKOS, Ljubljana, 22.5.2015

Seznam prosojnic predavanja: ZMOGLJIVOST ZVEZE

- 1 - Dimni signali Indijancev
- 2 - Informacija in številski zapisi
- 3 - Informacija po Shannonu
- 4 - Pasovna širina in zmogljivost zveze
- 5 - Logaritemske merske enote
- 6 - Zmogljivost telefonskega modema
- 7 - Spektralna gostota naravnega šuma
- 8 - Zmogljivost in spektralna učinkovitost
- 9 - Zmogljivost kot funkcija moči signala
- 10 - Zmogljivost kot funkcija pasovne širine
- 11 - Teoretska zmogljivost optičnega vlakna
- 12 - Teoretska zmogljivost satelitske zveze
- 13 - Zmogljivost prenosa žive slike (televizija)
- 14 - Spektralna učinkovitost televizije
- 15 - Domet vrvičnih in brezvrvičnih zvez
- 16 - Primerjava vrvičnih in brezvrvičnih zvez



1 - Dimni signali Indijancev

Sporočilo: **THEQUICKBROWNFOXJUMPSOVERALAZYDOG**

vsebuje $N=33$ znakov angleške abecede, ki jo pišemo z $m=26$ različnimi črkami (nabor znakov) in vsebuje informacijo I [bit]:

$$I = N \cdot \log_2(m) = 33 \text{ črk} \cdot 4.7 \text{ bit / črka} = 155.1 \text{ bit}$$

Merska enota I : dvojiška številka = bi(nary digi)t = bit

Isto sporočilo lahko zapišemo z različnimi nabori znakov v dogovorjenem vrstnem redu (big-endian ali little-endian):

dvojiško ($m=2$): 0b1110011010101000101011101111...

osmiško ($m=8$): 0o01234567000000765432101234567...

desetiško ($m=10$): 1031478654302297936587210923...

šestnajstiško ($m=16$): 0x0123FFE456789ABCD479EF0B29CDE...

črke ($m=26$): THEQUICKBROWNFOXJUMPSOVERALAZYDOG...

Količina informacije v prisotnosti šuma/motenj/popačenja:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \log_2(1 + S/N)$$

Claude Shannon 1948

$$\log_2 X = \frac{\ln X}{\ln 2} = \frac{\log X}{\log 2}$$

$$I = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{W_S}{W_N} \right)$$

Šum (naključni) W_N sestavljajo:

- (1) naravni šum (toplotni, zrnati),
- (2) umetni šum električnih naprav,
- (3) motnje drugih uporabnikov in
- (4) popačenje lastnega signala.

W_S [J] \equiv energija enega signala (enega prenesenega znaka)

W_N [J] \equiv vsota energije vseh šumov, motenj in popačenj

I [bit] \equiv prenesena informacija v enem znaku (gornja meja)

$$B [\text{Hz}] = \frac{1}{2t}$$

Harry Nyquist 1924

t [s] \equiv perioda signala (čas prenosa enega znaka)

B [Hz] \equiv frekvenčna pasovna širina signala

C [bit/s *ali* bps] \equiv zmogljivost zveze

$$C [\text{bit/s}] = \frac{dI}{dt} = \frac{I}{t} = 2B \cdot I$$

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

P_S [W] \equiv povprečna moč signala

P_N [W] \equiv povprečna moč šuma

C [bps] \equiv zmogljivost zveze

Neper

$$a_{Np} = \ln \frac{|\hat{U}_1|}{|\hat{U}_2|}$$

$$P = \frac{|\hat{U}|^2}{2Z_K} \quad |\hat{U}| = \sqrt{2Z_K P}$$

$$a_{Np} = \ln \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

Decibel

$$a_{dB} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}$$

$$a_{dB} = 10 \cdot \log \left| \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} \right|^2 = 20 \cdot \log \frac{|\hat{U}_1|}{|\hat{U}_2|}$$

$$a_{dB} = \frac{20}{\ln 10} \cdot \ln \frac{|\hat{U}_1|}{|\hat{U}_2|} = \frac{20}{2.3026} \cdot a_{Np}$$

Logaritemske enote za moč

$$P_{dBm} = 10 \cdot \log \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad P_{dBW} = 10 \cdot \log \frac{P}{1 \text{ W}}$$

$$1 \text{ kW} = +60 \text{ dBm} = +30 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ W} = +30 \text{ dBm} = 0 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ mW} = 0 \text{ dBm} = -30 \text{ dBW}$$

$$1 \mu \text{ W} = -30 \text{ dBm} = -60 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ nW} = -60 \text{ dBm} = -90 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ pW} = -90 \text{ dBm} = -120 \text{ dBW}$$

$$1 \text{ fW} = -120 \text{ dBm} = -150 \text{ dBW}$$

$f_{MIN}=300\text{Hz} \equiv$ spodnja frekvenčna meja analognega telefona

$f_{MAX}=3400\text{Hz} \equiv$ gornja frekvenčna meja analognega telefona

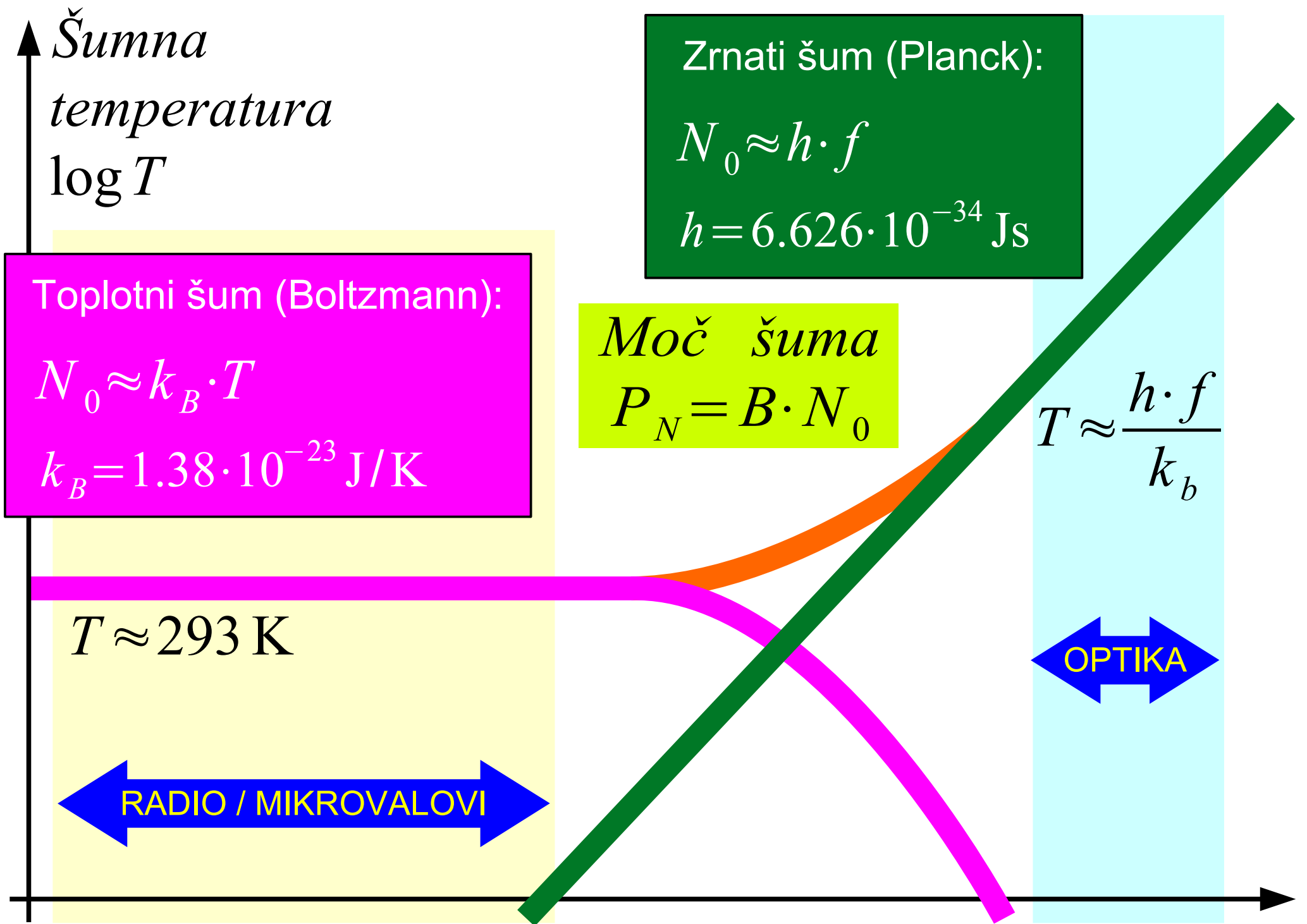
$B=f_{MAX}-f_{MIN}=3100\text{Hz} \equiv$ frekvenčna pasovna širina analognega telefona

$10\log(S/N)=37\text{dB} \equiv$ CODEC v telefonski centrali omejuje razmerje S/N

$P_S/P_N=10^{(37/10)}=10^{3.7}\approx 5012 \equiv$ dosegljivo razmerje signal/šum

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) = 3100 \text{ Hz} \cdot \frac{\ln(1 + 5012)}{\ln 2}$$

$$C = 3100 \text{ s}^{-1} \cdot 12.291 \text{ bit} = 38103 \text{ bit/s} = 38.1 \text{ kbps}$$



7 - Spektralna gostota naravnega šuma

Shannon-ov izrek o zmogljivosti zveze

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{B \cdot N_0} \right)$$

$$N_0 = k_B \cdot T \equiv \text{toplotni šum}$$

$$N_0 = h \cdot f \equiv \text{zrnati šum}$$

B [Hz] \equiv frekvenčna pasovna širina

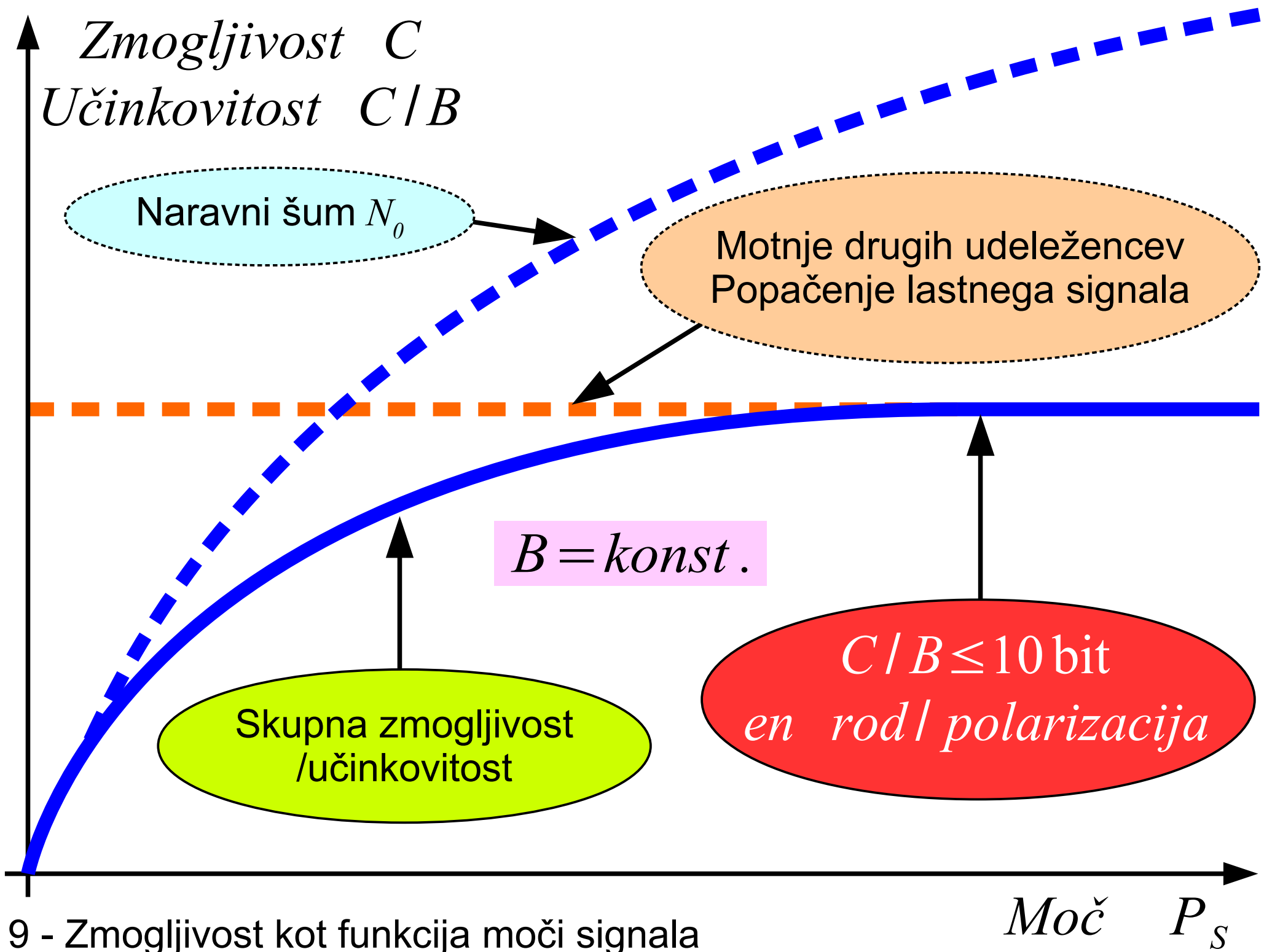
P_s [W] \equiv povprečna moč signala

N_0 [W/Hz *ali* Ws *ali* J] \equiv spektralna gostota moči šuma

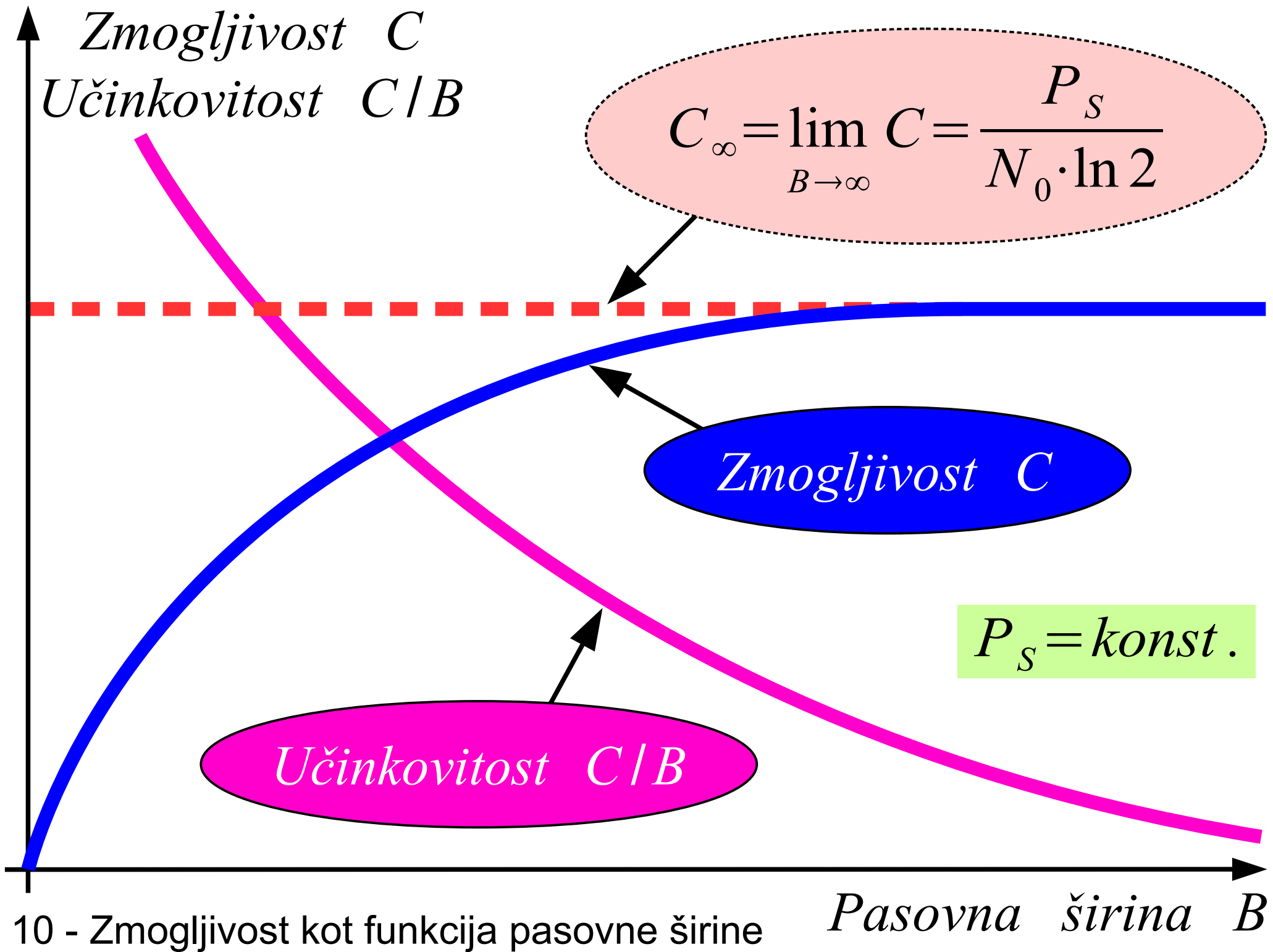
C [bps] \equiv zmogljivost zveze

C/B [bit/s/Hz *ali* bps/Hz *ali* bit] \equiv spektralna učinkovitost zveze

$$C/B = \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{B \cdot N_0} \right)$$



9 - Zmogljivost kot funkcija moči signala



$P_s=1\text{mW}=10^{-3}\text{W} \equiv$ dopustna moč signala v svetlobnem sprejemniku

$\lambda_0=1.55\mu\text{m} \equiv$ valovna dolžina signala v praznem prostoru

$f=c_0/\lambda_0=193.5\text{THz} \equiv$ osrednja frekvenca svetlobnega signala

$N_0=h\cdot f=1.282\cdot 10^{-19}\text{W/Hz} \equiv$ spektralna gostota moči zrnatega šuma

$B=8\text{THz}=4\text{THz} \times 2$ polarizaciji \equiv pasovna širina Er^{3+} ojačevalnika $\times 2$

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{B \cdot N_0} \right) = 79.5 \text{ Tbit/s}$$

$$C/B = 9.93 \text{ bit} \quad (\text{dve polarizaciji})$$

$$C_\infty = \lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{P_s}{N_0 \cdot \ln 2} = 11250 \text{ Tbit/s} \quad (B = ?)$$

PON
(pasivno optično omrežje) to
ONEMOGOČA!
PON vsiljuje
miljonkrat manj!

$f=12\text{GHz} \equiv$ osrednja frekvenca satelitske oddaje

$B=2\text{GHz}=1\text{GHz} \times 2$ polarizaciji \equiv dodeljena pasovna širina

$d=30\text{cm} \equiv$ premer (velikost) majhne sprejemne antene

$S/N=P_S/P_N=10\text{dB}=10 \equiv$ dosegljivo razmerje S/N z majhno anteno

$$C/B = \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) = 3.459 \text{ bit}$$

$$C = 6.919 \text{ Gbit/s}$$

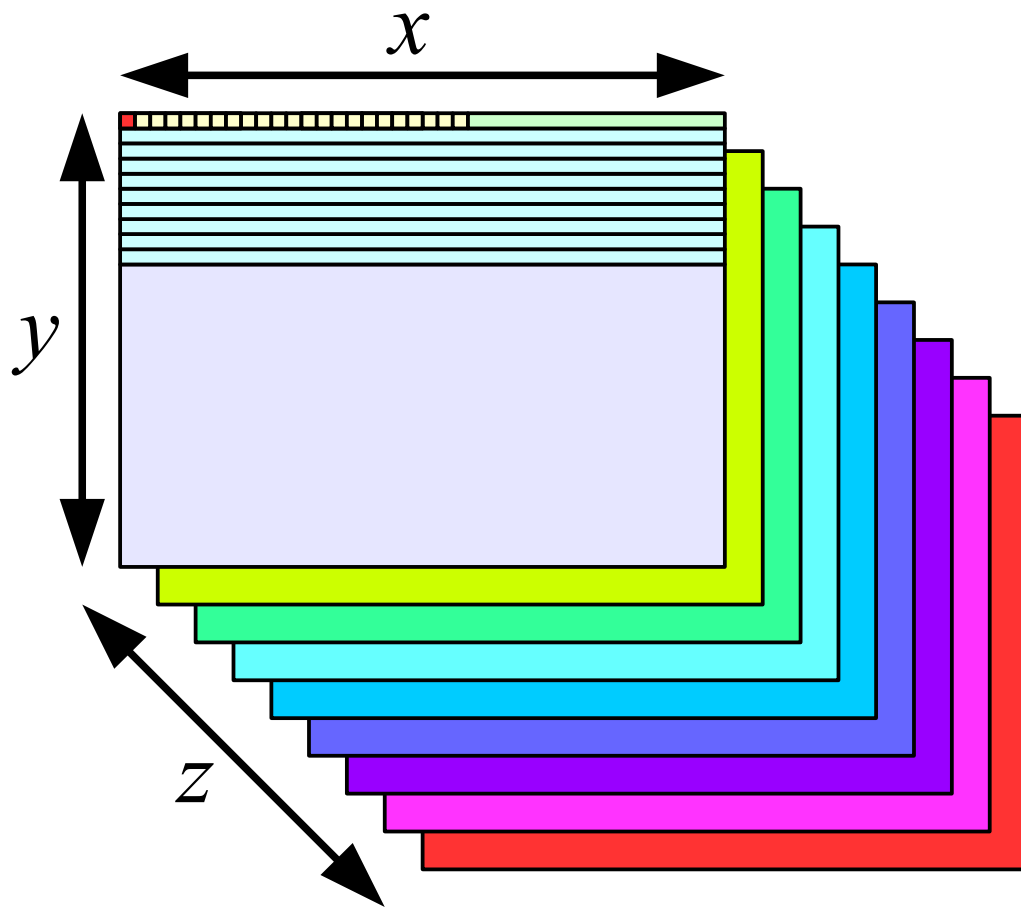
$d=30\text{m} \equiv$ premer (velikost) velike sprejemne antene (+40dB)

$S/N=P_S/P_N=50\text{dB}=10^5 \equiv$ dosegljivo razmerje S/N z veliko anteno

$$C/B = \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) = 16.61 \text{ bit}$$

$$C = 33.22 \text{ Gbit/s}$$

Eno optično vlakno >1000 (tisoč) satelitov!



$$(S/N)_{dB} = 10 \log(S/N) = 48 \text{ dB}$$

$$6 \text{ dB} = 1 \text{ bit razmerja } (S/N)_{dB}$$

$$b = (S/N)_{dB} / 6 \text{ dB} = 8 \text{ bit/pika}$$

Tri dimenzije televizije:
 $x = 800$ pik/vrsta
 $y = 600$ vrst/slika (format 3:4)
 $z = 25$ slik/s (živa slika)

$$C = b \cdot x \cdot y \cdot z$$

$$C = 8 \text{ bit/pika} \cdot 800 \text{ pik/vrsta} \cdot 600 \text{ vrst/slika} \cdot 25 \text{ slik/s}$$

$$C = 96000000 \text{ bit/s} = 96 \text{ Mbit/s}$$

13 - Zmogljivost prenosa žive slike (televizija)

$C=96\text{Mbit/s} \equiv$ zahtevana zmogljivost prenosa žive slike

$B=7\text{MHz} \equiv$ dodeljena pasovna širina analognega televizijskega kanala

C/B [bit] \equiv spektralna učinkovitost analognega televizijskega kanala

$P_S/P_N \equiv$ zahtevano razmerje signal/šum analogne televizije

$$C/B = \frac{96 \text{ Mbit/s}}{7 \text{ MHz}} = 13.7 \text{ bit}$$

ANALOGNA TELEVIZIJA

$$P_S/P_N = 2^{C/B} - 1 = e^{C/B \cdot \ln 2} - 1 = 13440 = 41.3 \text{ dB}$$

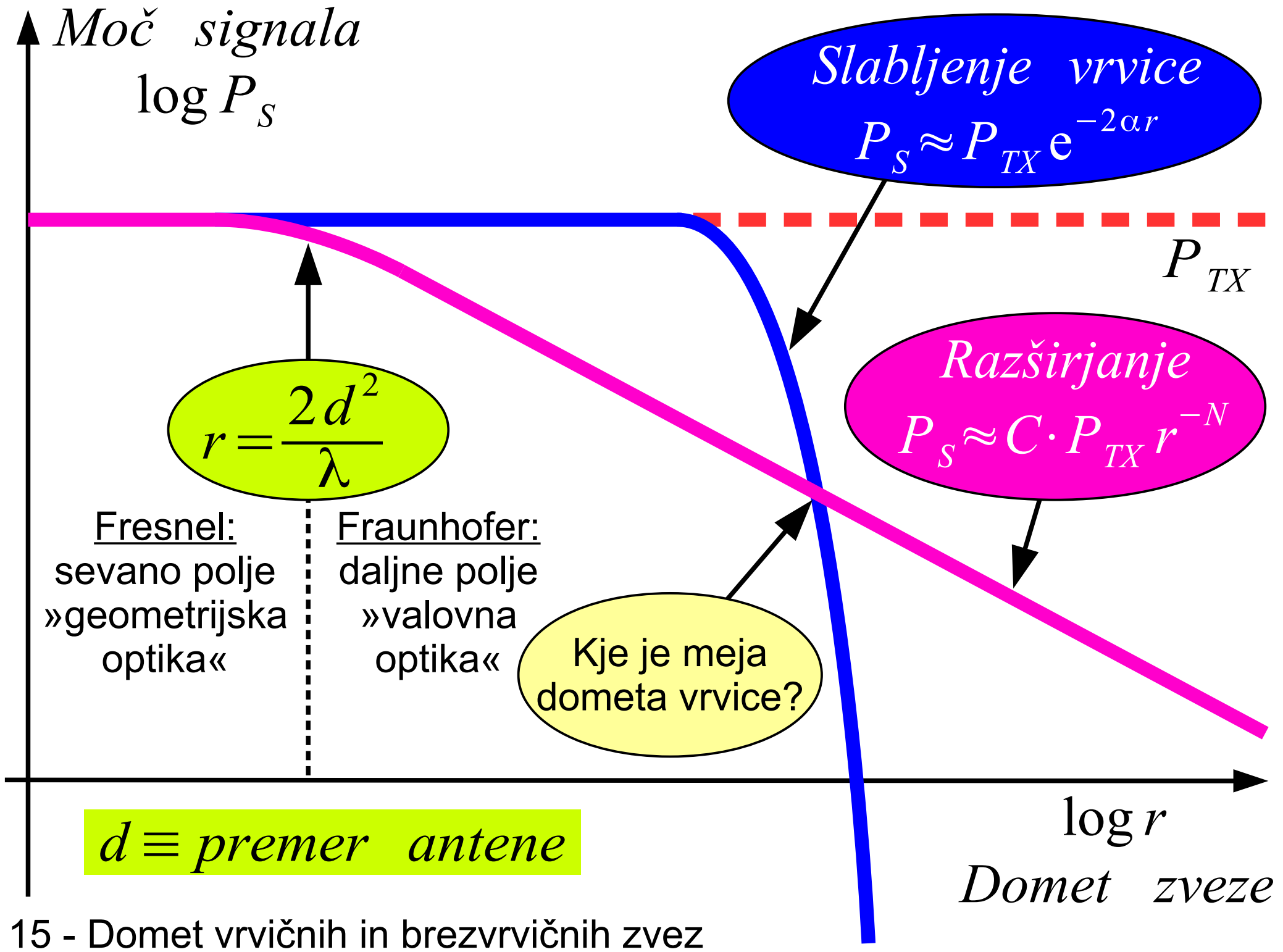
$k \approx 3 \equiv$ faktor kompresije izgubnega kodiranja v vsaki dimenziji

$n=3 \equiv$ število dimenzij žive slike

C' [Mbit/s] \equiv zmogljivost po izgubni kompresiji v treh dimenzijah

$$C' = C/k^n \approx C/27 = 3.56 \text{ Mbit/s}$$

DIGITALNA TELEVIZIJA



15 - Domest vrvičnih in brezvrvičnih zvez

Vrvična zveza:
slabljenje vrvic

$$P_S \approx P_{TX} e^{-2\alpha r}$$

α [Np/m] \equiv konstanta slabljenja

koaksialni kabel 40dB/km
optično vlakno 0.2dB/km

$B \approx 400\text{MHz}$ koaksialni kabel
 $B \approx 8\text{THz}$ optično vlakno (Er^{3+})

$r \approx 1\text{km}$ domet koaksa

$r \approx 200\text{km}$ domet vlakna

povečevanje zmogljivosti:

- m vzporednih vrvic $\equiv m \cdot C$

Brezvrvična zveza:
razširjanje valovanja

$$P_S \approx C \cdot P_{TX} r^{-N}$$

$N = 2$ prazen prostor
 $N = 3 \dots 5$ mestno okolje

$B \approx 100\text{GHz}$ radio v teoriji

$B \approx 10\text{GHz}$ radio v praksi

$B \approx 100\text{THz}$ prostožračna optika

povečevanje zmogljivosti:

- ponavljanje frekvenčnih kanalov na dovolj veliki razdalji
- uporaba obeh polarizacij
- uporaba usmerjenih anten
- uporaba MIMO / Fresnel