

Kapaciteta komunikacijskega kanala

- Informacijski prenosni kanal
- Kapaciteta in spektralni izkoristek kanala
- Shannonova mejna vrednost
- Približevanje Shannonovi meji z razvojem modulacije
- Nelinearni kanal in prenos po več poteh
- Spektri mobilnih zvez

Information Theory



“Claude Shannon's clever electromechanical mouse, which he called Theseus, was one of the earliest attempts to "teach" a machine to "learn" and one of the first experiments in artificial intelligence.” Source: Bell Labs

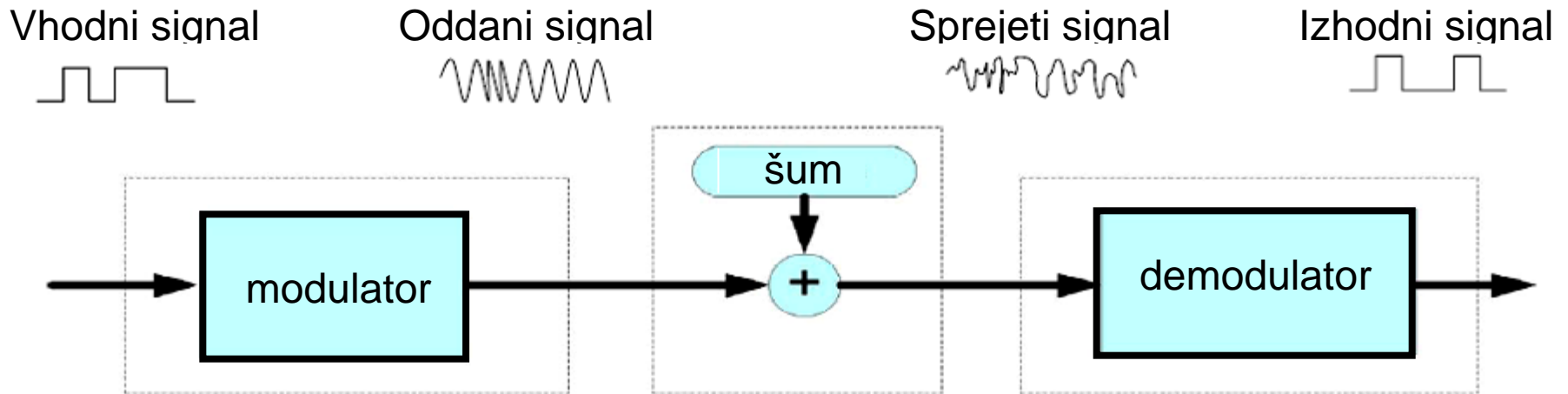


Claude Elwood Shannon (1916-2001)
(photographed 17 April 1961 by Göran Einarsson)

Informacijski prenosni kanal

- Linearnost (oz. nelinearnost) kanala
- Prisotnost aditivnega belega šuma

- zveza T-T
- zveza MT-MT



Skozi kanal želimo prenesti največjo možno informacijo
Glavna parametra, s katerima je določena prenosna
zmogljivost digitalnega komunikacijskega kanala:

- Širina frekvenčnega pasu Δf v Hz (prednost OK !)
- Razmerje *moč signala/moč šuma* P_S/P_N ali S/N (prednost RK !)

Cilji

Doseganje:

- Max: bitna hitrost prenosa B (b/s)
- Max: E_b/N_0 (energija bita/spektralna gostota šuma)
- Min: bitni pogrešek BER
- Min: prenašana moč P
- Min: širina prenosnega spektra Δf
- Max: uporabnost
- Min: kompleksnost

Kapaciteta kanala

Predpostavka:

linearni frekvenčno omejen kanal z aditivnim belim šumom

Kapaciteta kanala: $C = \Delta f \log_2(1 + S/N)$, b/s

Spektralni izkoristek: $C/\Delta f = \log_2(1 + S/N)$, b/s/Hz

$N = N_0 \Delta f$, $N_0 \dots$ gostota šuma

$S = E_b C$, $E_b \dots$ energija bita

Spektralni izkoristek:

$C/\Delta f = \log_2(1 + E_b C/N_0 \Delta f)$, b/s/Hz

Lastnosti

1. Dani komunikacijski sistem zmore neko največjo teoretično dosegljivo hitrost prenosa informacije C v bit/s, ki ji pravimo kapaciteta kanala. Kapaciteta kanala C je osnovna karakteristika sistema oz. zveze.
2. Pri bitni hitrosti $B < C$ lahko v načelu dosežemo v prisotnosti šuma z dobro tehniko modulacije in kodiranja poljubno majhno napako v prenosu. Shannon trdi le, da taka možnost obstaja, ne pove pa kako.
3. Pri bitni hitrosti $B > C$ niti teoretično ni mogoče najti modulacije in kodiranja za prenos brez napake.

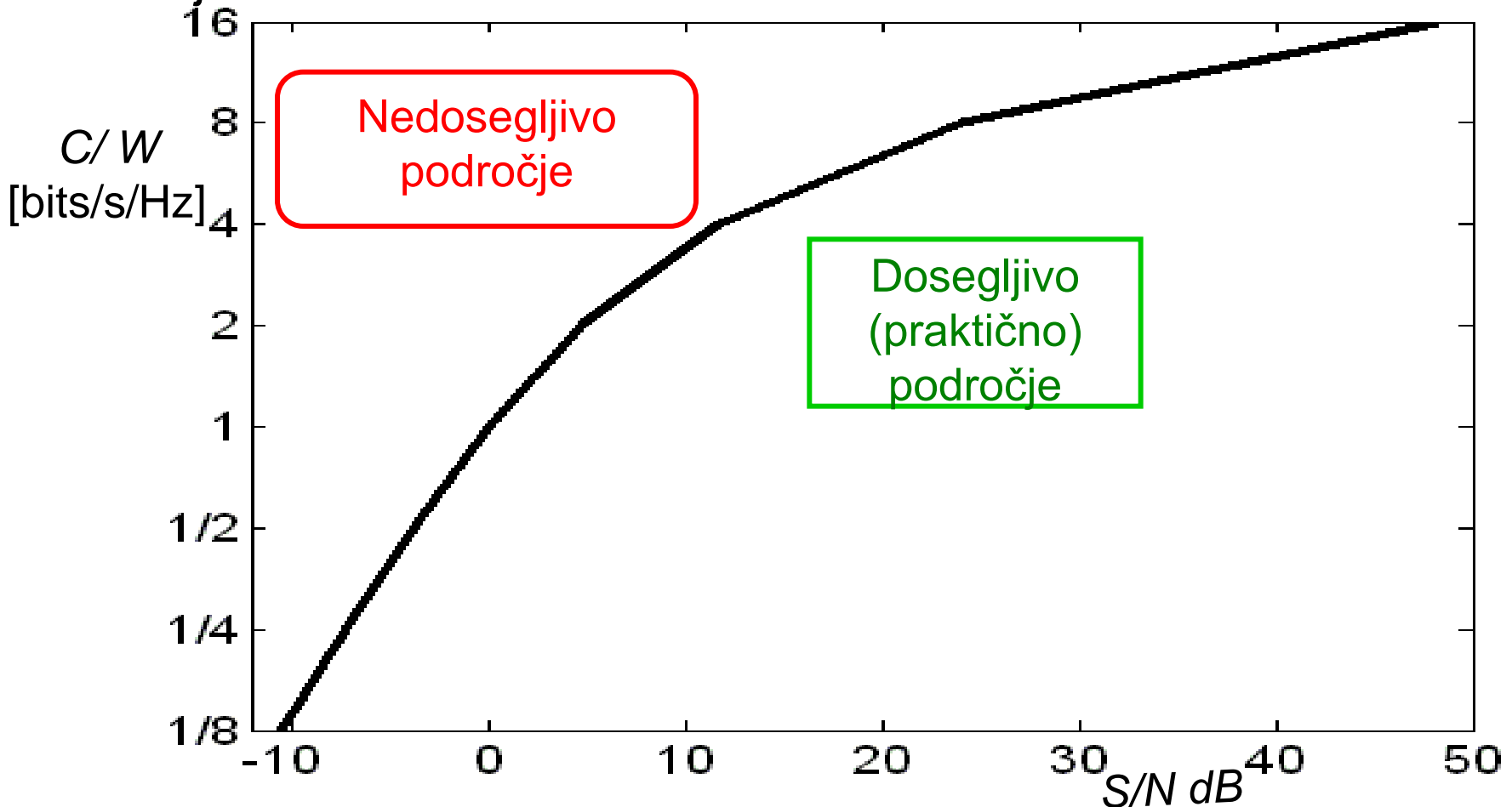
Posebni primeri

4. Pri velikem S/N dobimo velik spektralni izkoristek C tudi pri manjši širini Δf - primer radijskih komunikacij.
5. Pri zelo velikem Δf proti neskončnosti (primer optičnih komunikacij) gre kapaciteta kanala proti maksimalni vrednosti $C_{\max} = (S/N_0)\log_2 e = 1,44 (S/N_0)$, kjer je N_0 šumna gostota.
6. Pri velikem S/N je prenos mogoč tudi pri majhni širini pasu Δf .
7. Tudi pri $S/N < 1$ (signal v šumu, neg. dB) je prenos mogoč, če je širina pasu Δf dovolj velika.

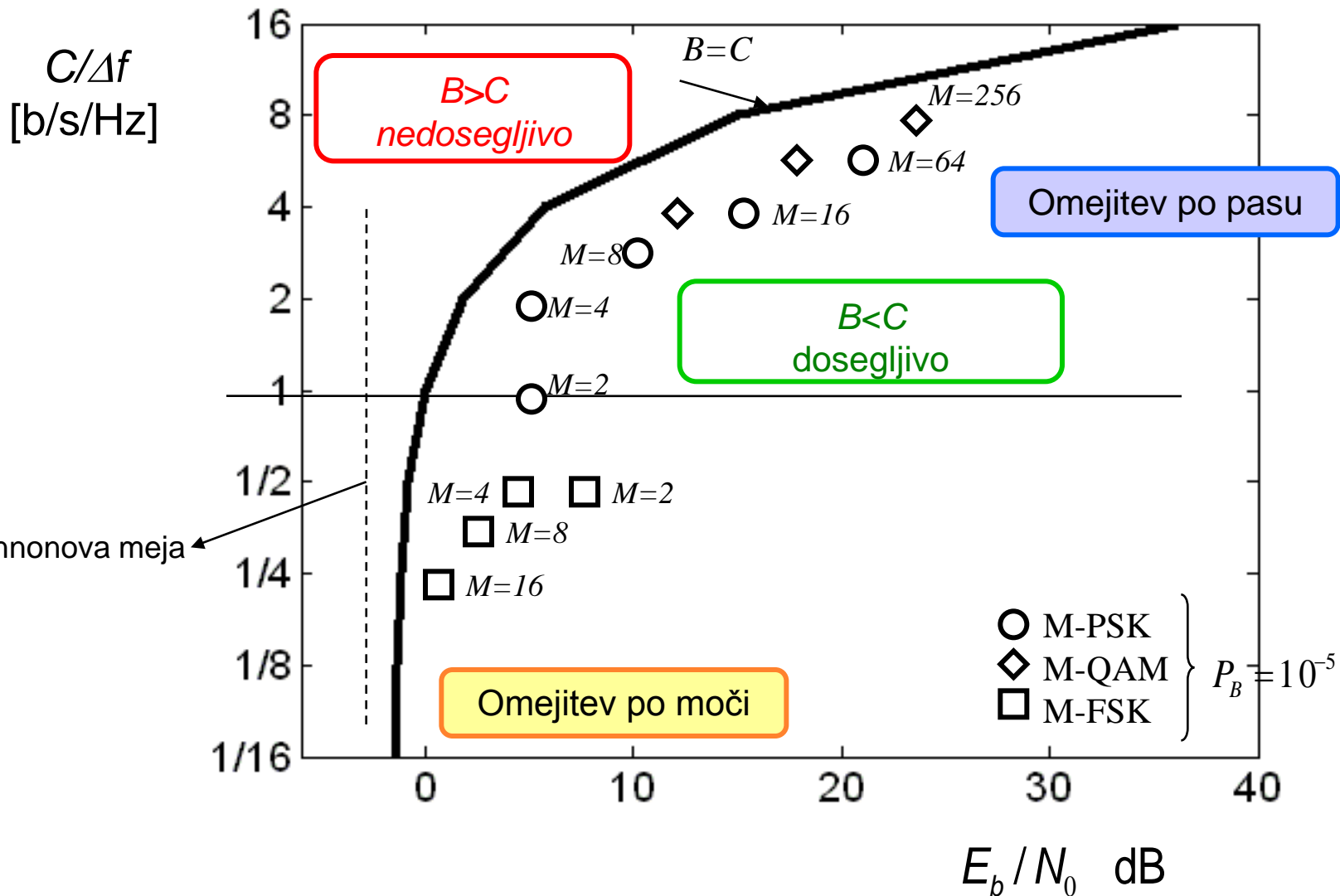
Shannonova meja

Z zahtevnimi digitalnimi komunikacijami se v najboljših pogojih obratovanja približujemo Shannonovi meji.

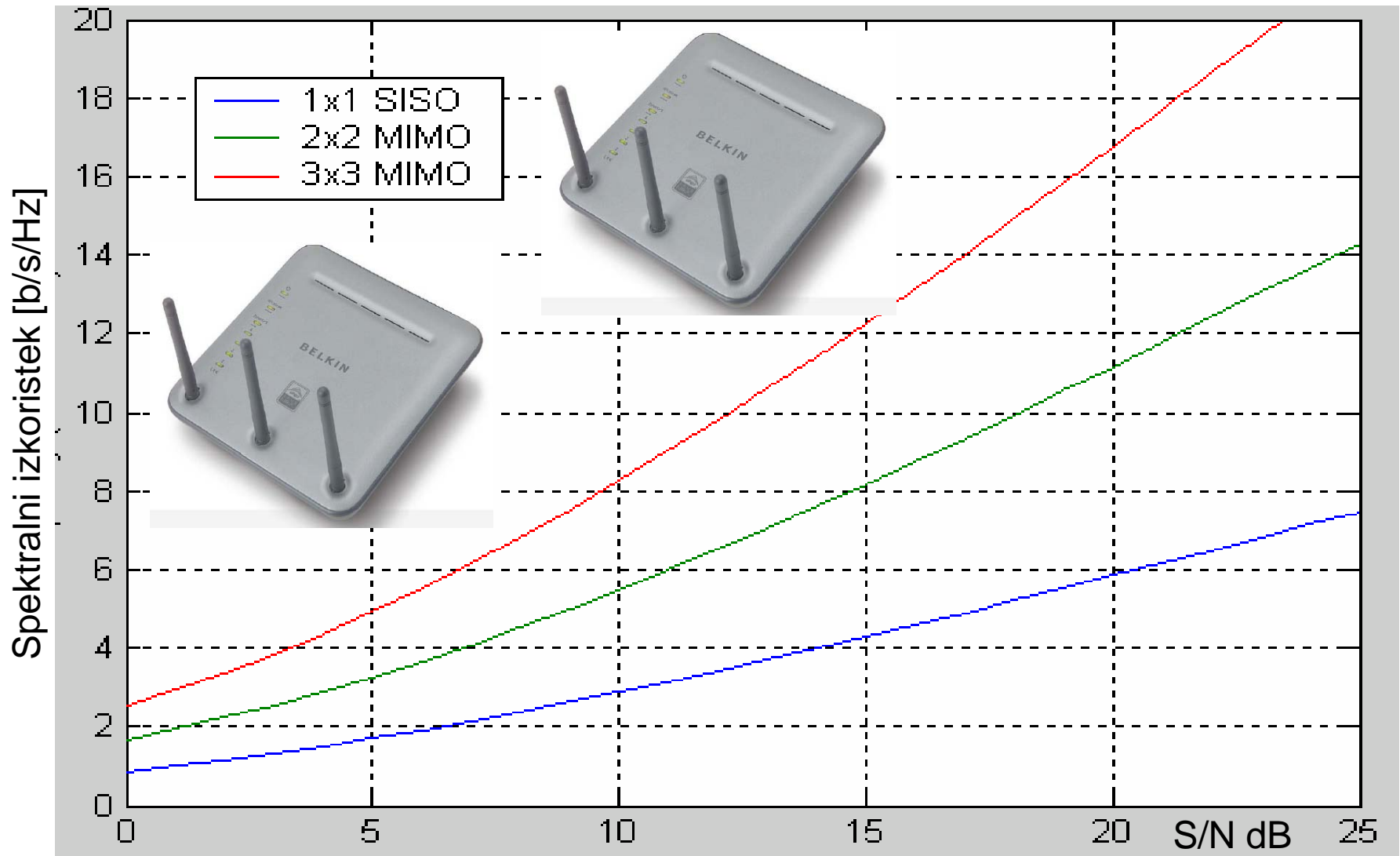
Zaradi tehnoloških pomanjkljivosti je dosežena kapaciteta manjša od možne.



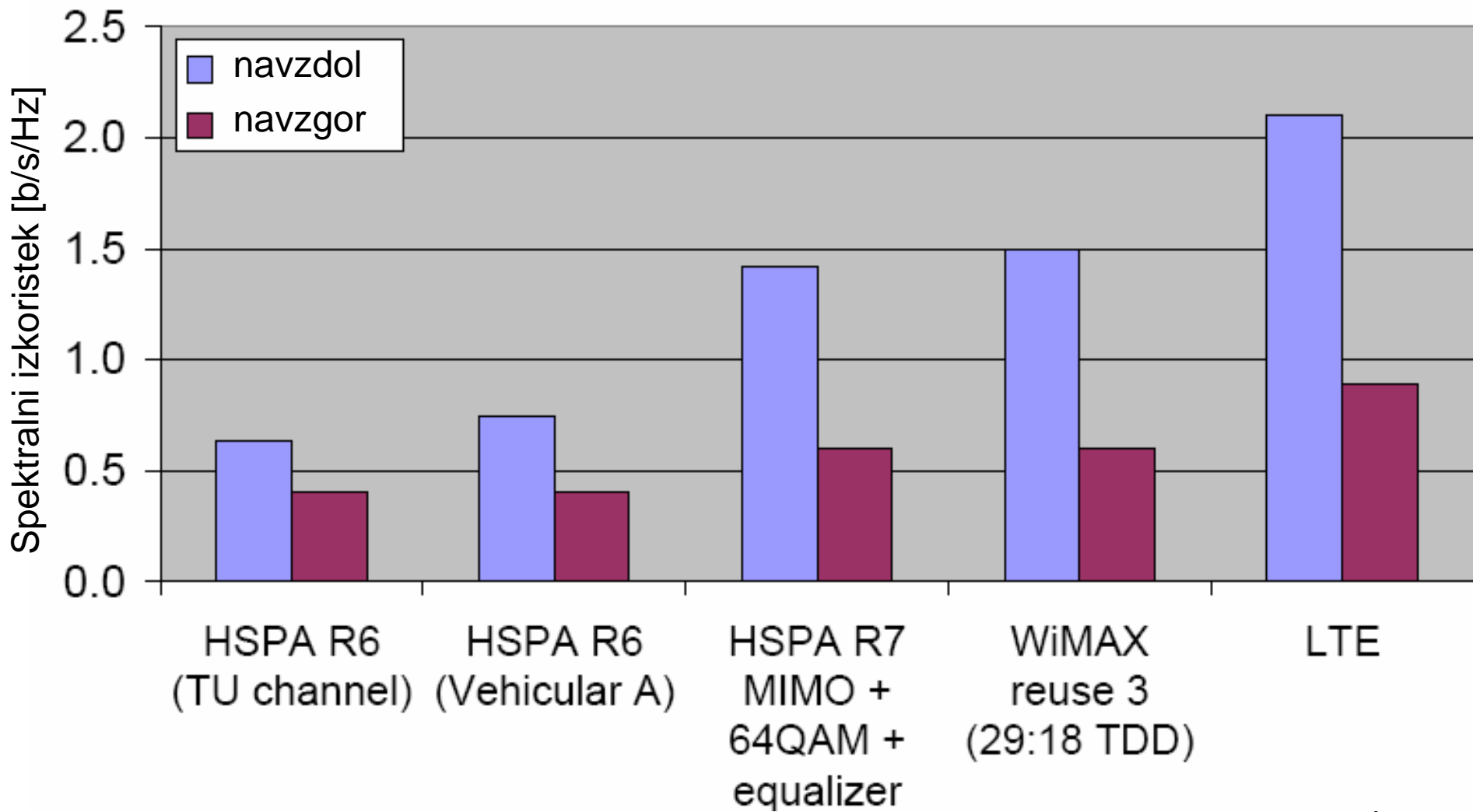
Približevanje Shannonovi meji



Spektralni izkoristek - MIMO

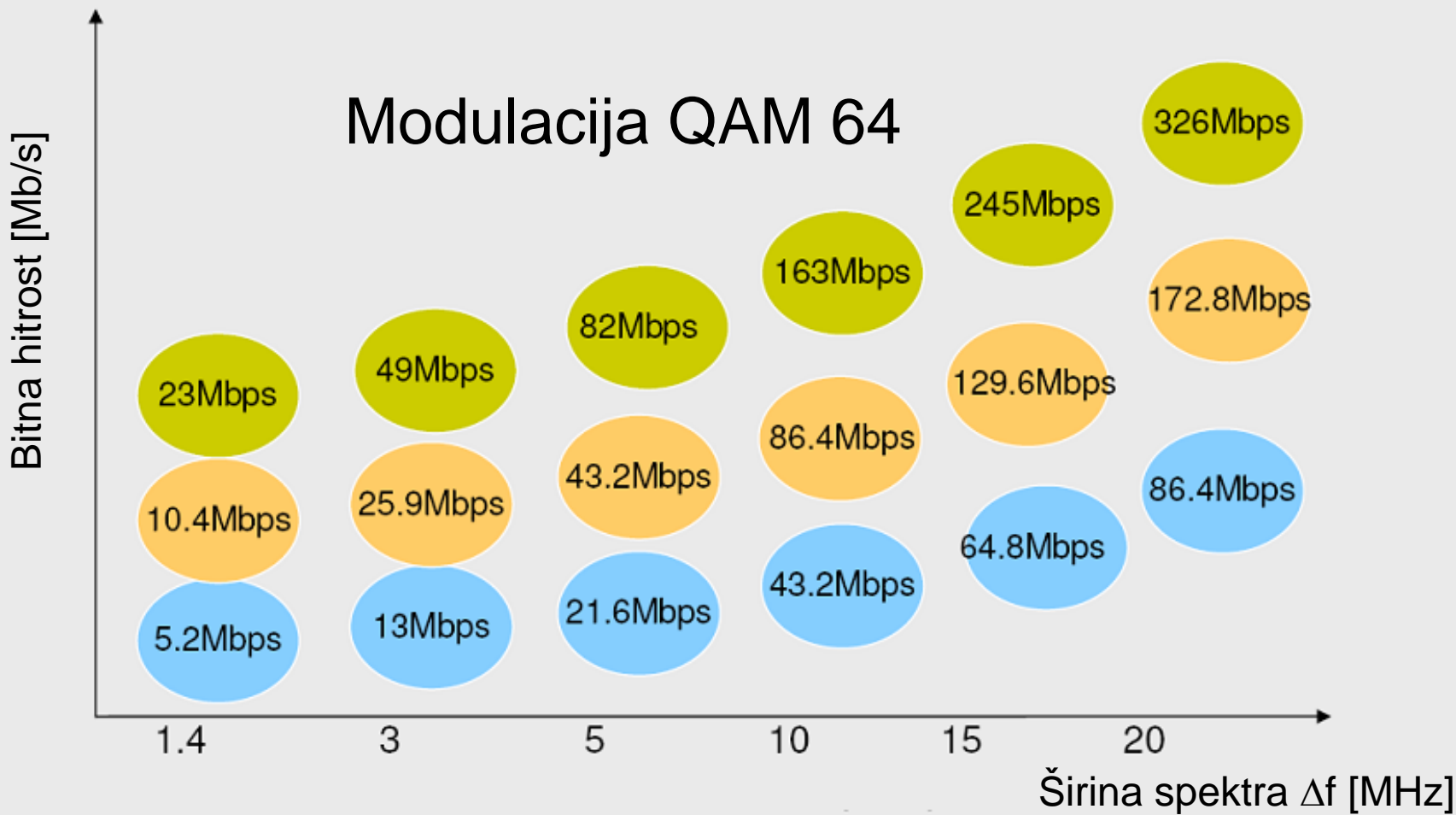


Mobilne zveze – spektralni izkoristek



LTE – bitna hitrost sistemov MIMO

Modulacija QAM 64



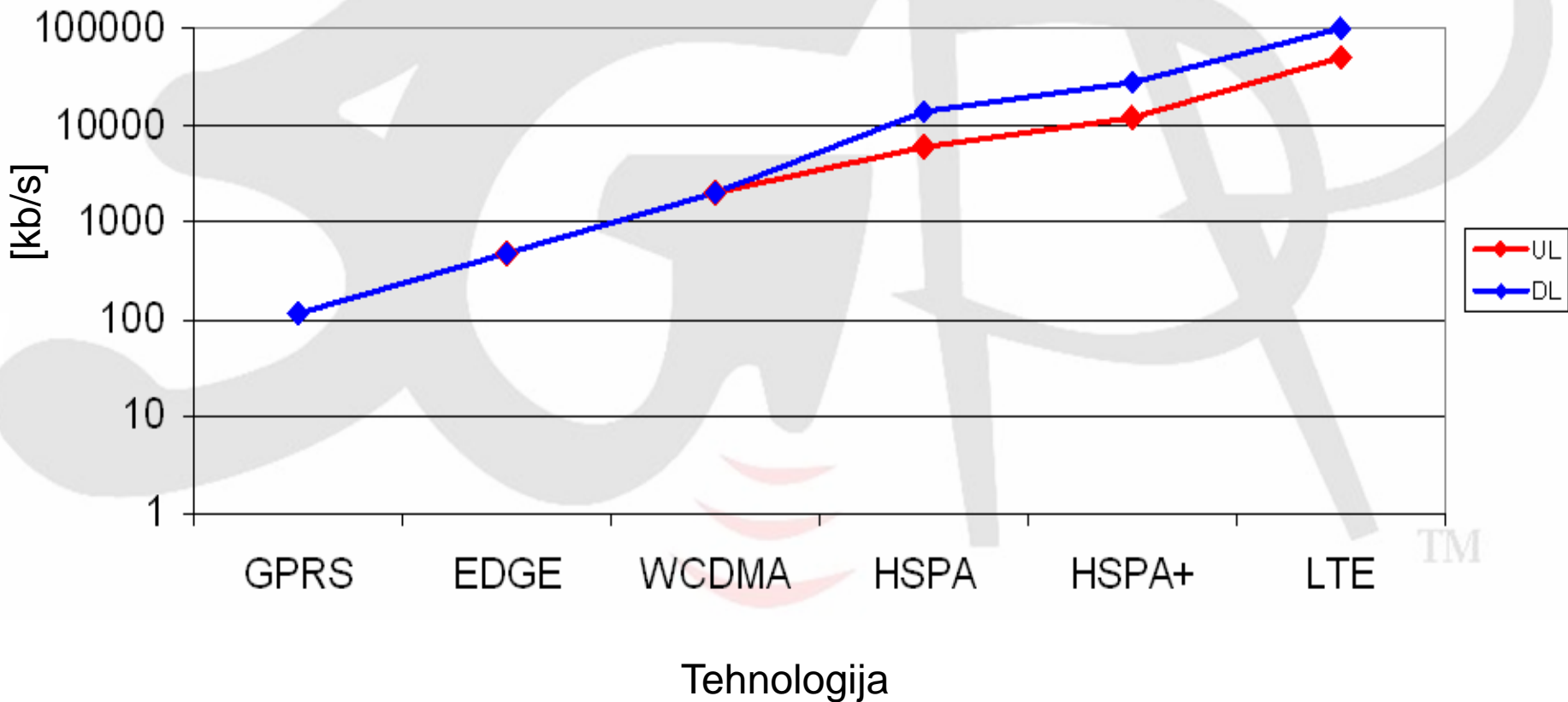
Vrsta MIMO (število anten)

SISO

2x2
MIMO

4x4
MIMO

LTE 3GPP – bitna hitrost



LTE – cilji razvoja

LTE – Long Term Evolution

Širina frekvenčnega pasu kanala

1,25 - 20 MHz

Zveza navzdol:

- Bitna hitrost 8 - 100 Mb/s
- Spektralni izkoristek 5b/s/Hz

Zveza navzgor:

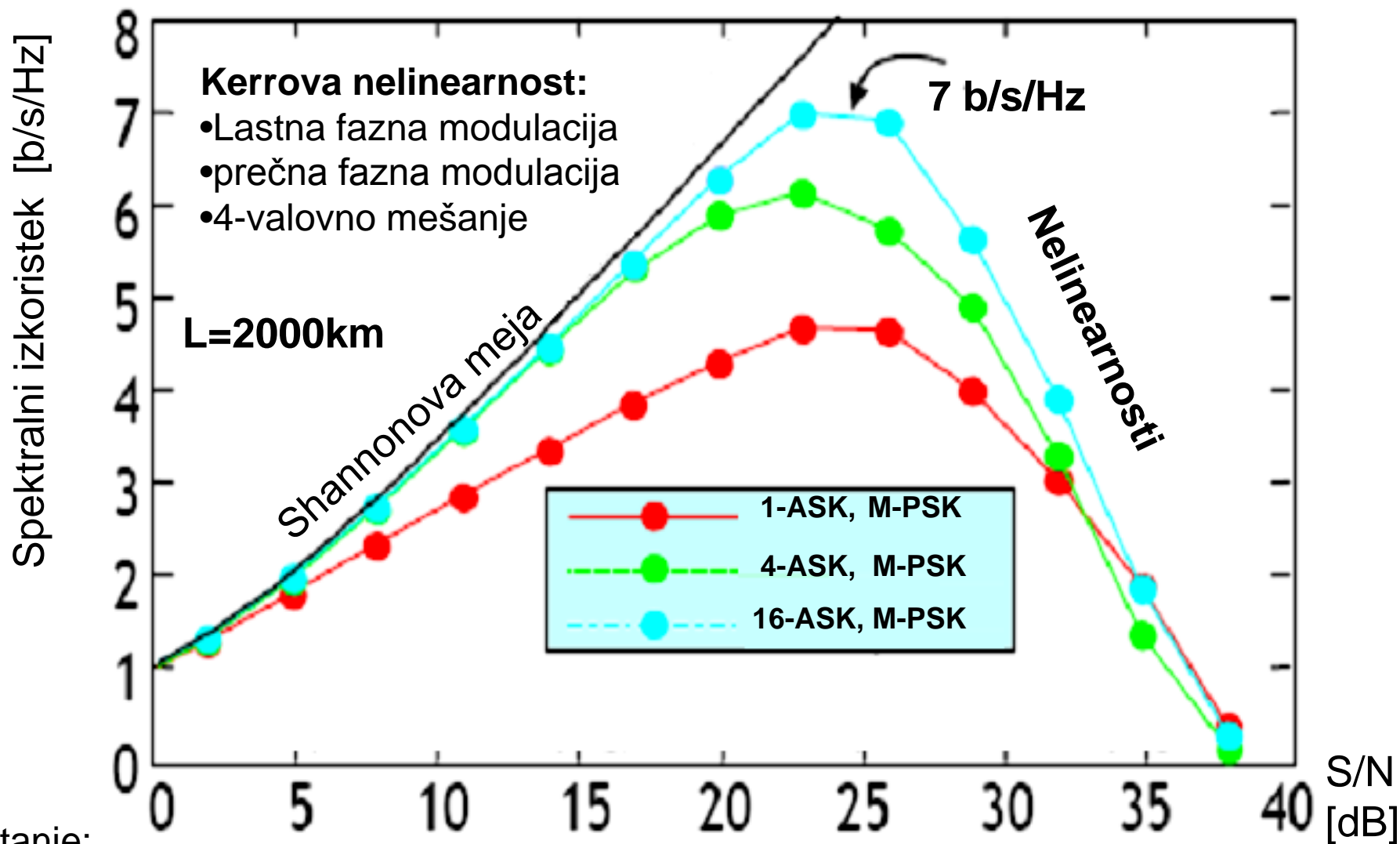
- Bitna hitrost 4 – 50 Mb/s
- Spektralni izkoristek 2,5 b/s/Hz
- (2- do 4-kratno povečanje izkoristka glede na HSPA)

Vlakna v optickém kablů

125 μm



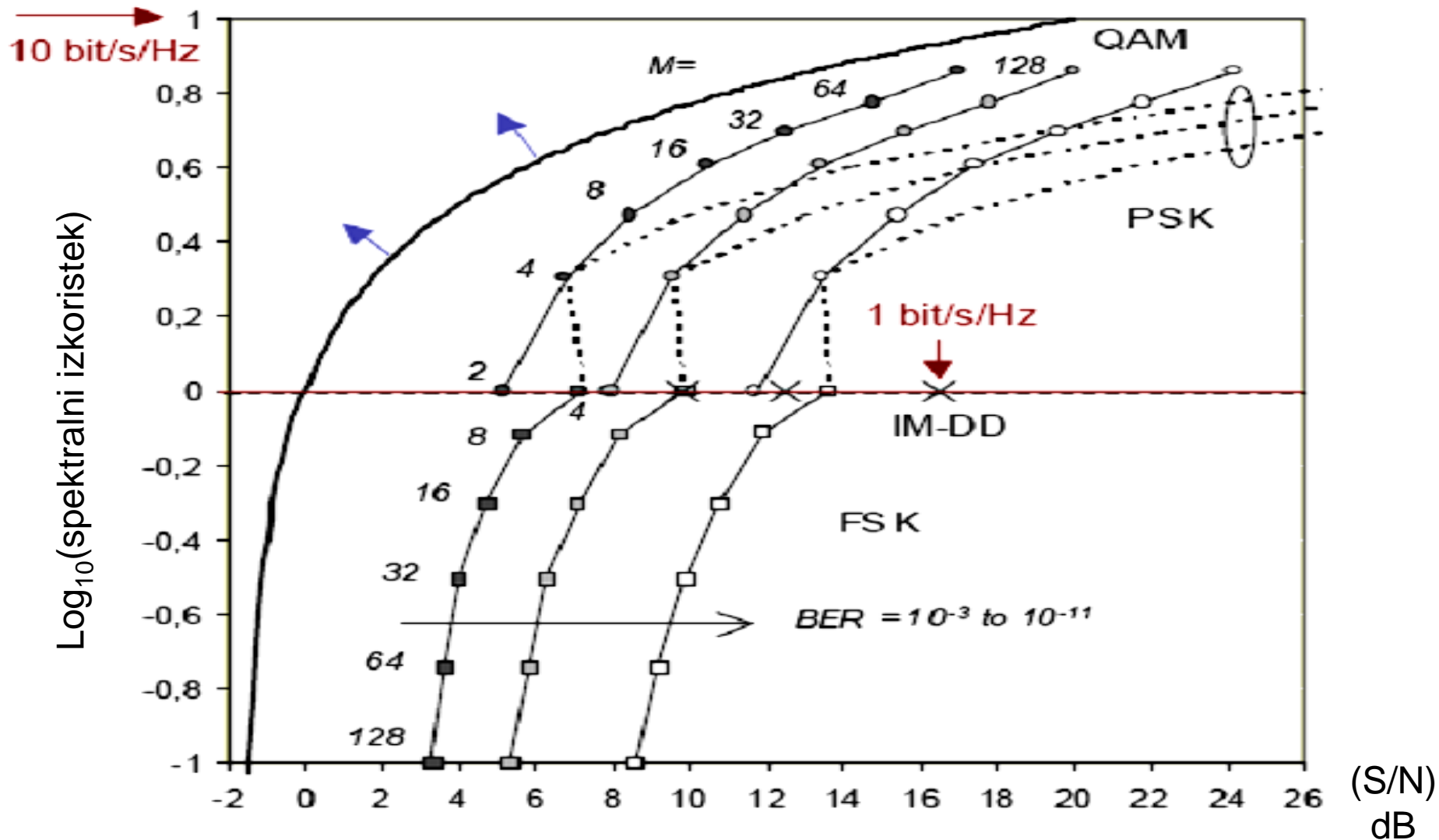
Spektralni izkoristek v nelinearnem optičnem kanalu



Stanje:

- Največji spektralni izkoristek je 7 b/s/Hz. Praktični sistemi zaostajajo do 10 krat.

Spektralni izkoristek pri QAM in M-PSK



- M-QAM in M-PSK dajeta visok spektralni izkoristek, npr. 10 b/s/Hz pri $M > 256$

Napovedi v optičnih komunikacijah

2010: 100 GbE na 50 GHz WDM mreži (2 b/s/Hz)

2015: 400 GbE na 100 GHz WDM mreži (4 b/s/Hz)

2017: 400 GbE na 50GHz WDM mreži (6 b/s/Hz)

2020: 1 TbE na 100 GHz WDM mreži (10 b/s/Hz)

Če bi promet naraščal z “2 dB/leto”, bi potrebovali:

2020: 10 TbE na 200 (!?!) b/s/Hz)

Teorem vzorčenja

Sampling theorem, 1949

If the real signal $s(t)$ is

- integrable over the whole real axis
- band limited by B , i.e.

$$s(t) \leftrightarrow S(f): S(f) = 0 \quad \forall |f| \geq B$$

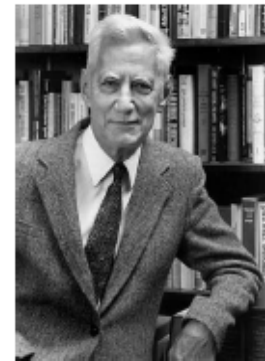
then

$s(t)$ is determined by its values $s(k\Delta t)$,

$k \in \mathbb{Z}$, periodically taken at the time

difference $\Delta t = \frac{1}{2B}$:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi B(t - k\Delta t)}{2\pi B(t - k\Delta t)}$$



Claude E. Shannon, 1916 – 2001

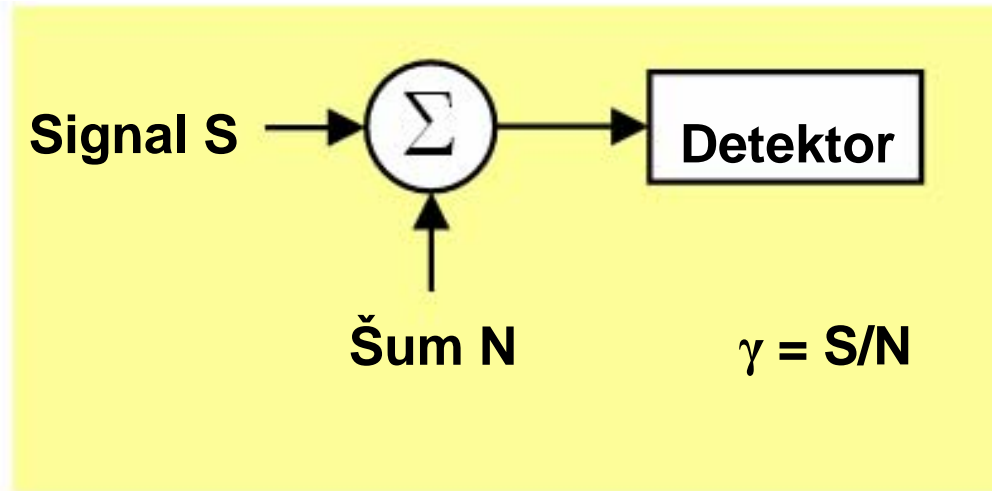
- Source coding
- Channel coding (FEC)
- Cryptographic coding

Spektralni izkoristek v linearnem kanalu

- Linearni kanal
- Aditivni beli Gaussov šum



Claude E. Shannon
1916–2001



Shannonova limita

$$C = \Delta f \log_2(1 + \gamma) \quad \text{Bit/s}$$

$$\eta = \frac{C}{\Delta f} = \log_2(1 + \gamma) \quad \text{Bit/s/Hz}$$

- Kapaciteta kanala = spektralna širina kanala × spektralni izkoristek

Shannon limit ...

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

$$\begin{cases} S = E_b C \\ N = N_0 W \end{cases}$$



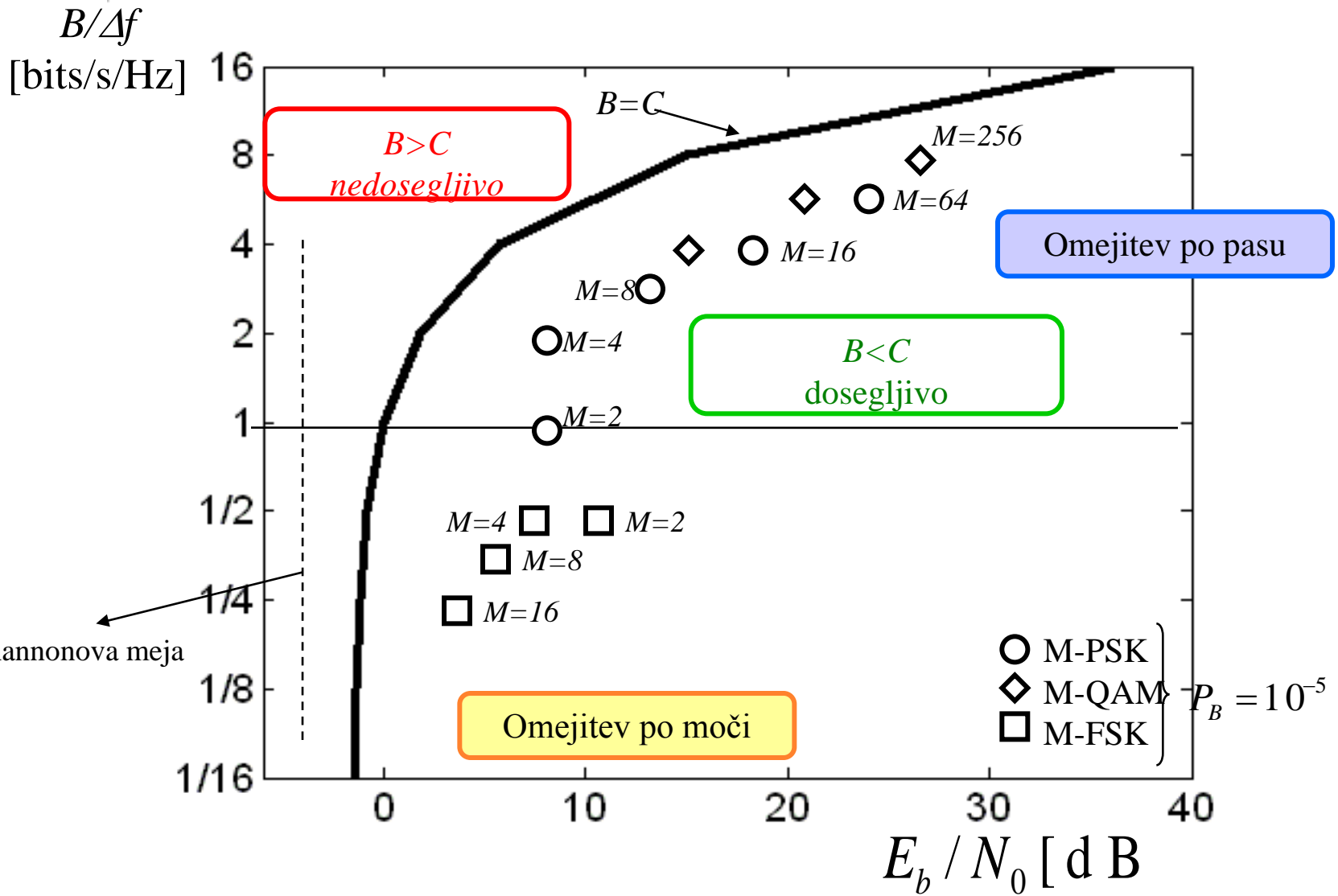
$$\frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{E_b}{N_0} \frac{C}{W} \right)$$

As $W \rightarrow \infty$ or $\frac{C}{W} \rightarrow 0$, we get

$$\frac{E_b}{N_0} \rightarrow \frac{1}{\log_2 e} = 0.693 \approx 31.6 \text{ [dB]} \rightarrow \text{Shannon limit}$$

- There exists a limiting value of E_b / N_0 below which there can be no error-free communication at any information rate.
- By increasing the bandwidth alone, the capacity can not be increased to any desired value.

Približevanje Shannonovi meji



LTE (– cilji razvoja

LTE design targets

- Downlink and uplink 100 Mbits/s and 50 Mbits/s respectively at 20MHz spectrum allocation (5bits/s/Hz and 2.5 bits/s/Hz)
- High user throughput, spectrum efficiency, mobility, coverage, enhanced MBMS

LTE Standard goals

- Peak 8Mbps download, 4Mbps upload (1.25MHz channel)
- Bandwidth flexibility 1.25MHz to 20MHz
- 2x-4x spectral efficiency over HSxPA