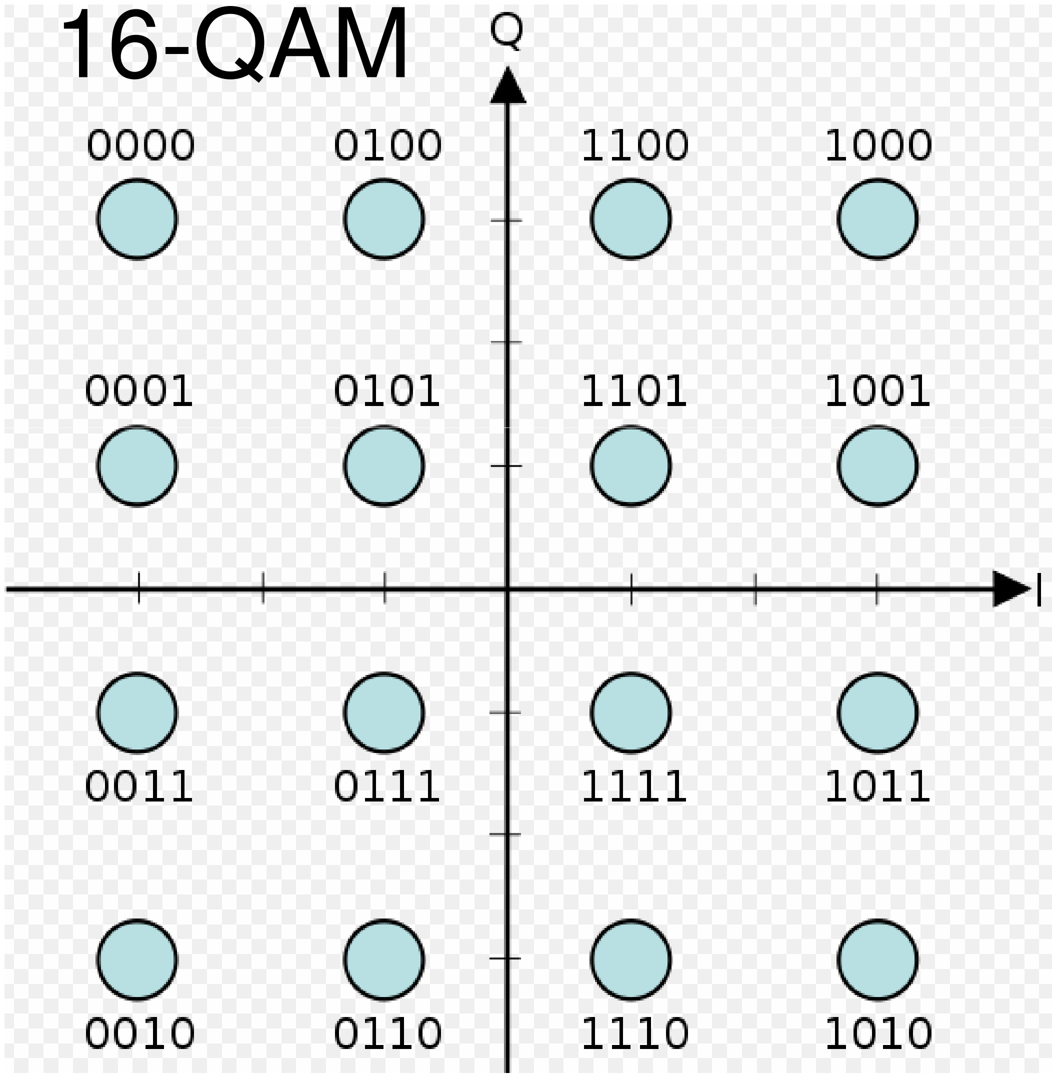
Modulacijski formati



Mobitel d.d., izobraževanje

14. 5. 2010, predavanje 9

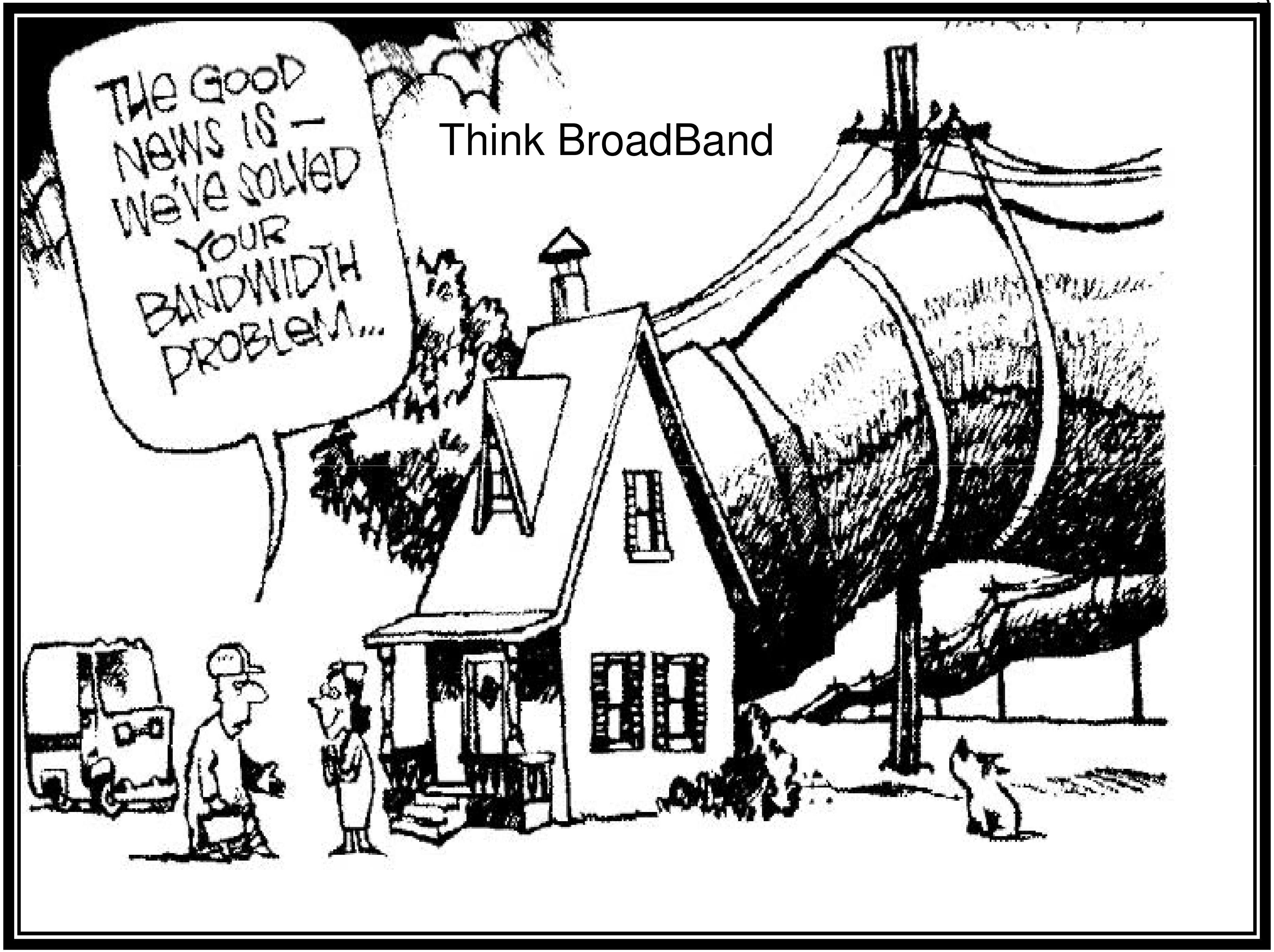
Prof. dr. Jožko Budin

Vsebina

1. Vrste modulacij
2. Modulacijske definicije, biti in simboli
3. Parametri modulacijskih formatov
4. Vrste analogne modulacije in analogne impulzne modulacije ter digitalne intenzitetne modulacije RZ, NRZ
5. Vrste digitalnih modulacij:

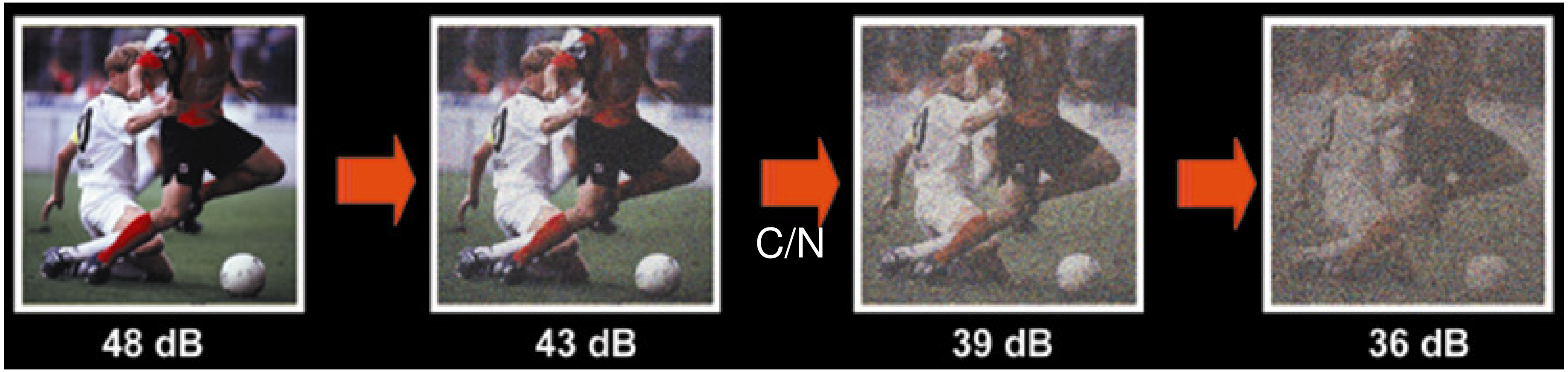
- ASK, FSK, PSK, QPSK, DPSK, DQPSK
- (4-QAM), 16-QAM, 64-QAM in druge

6. C/N, BER in MER
7. Modulacija in kapaciteta kanala
8. Modulatorji digitalnih formatov
9. OFDM


THE GOOD NEWS IS — WE'VE SOLVED YOUR BANDWIDTH PROBLEM...
Think BroadBand

Zakaj digitalna modulacija?

- Za prenos analogno moduliranega slikovnega signala je potrebno visoko razmerje signala proti šumu in motnjam (FCC: C/N > 43 dB min.). Primer slabšanja kakovosti slike pri upadajočem razmerju C/N (nosilnik/šum):



Prenos digitalno moduliranega signala ima dve prednosti:

- kvaliteta sprejema je skoraj neobčutljiva na šum in motnje, dokler signal ne pade pod določen prag, ko sprejem preneha.
- spektralni izkoristek dosega vrednost, ki se najbolj približa mejni vrednosti po Shannonu.

Cilji telekomunikacij in pogoji delovanja

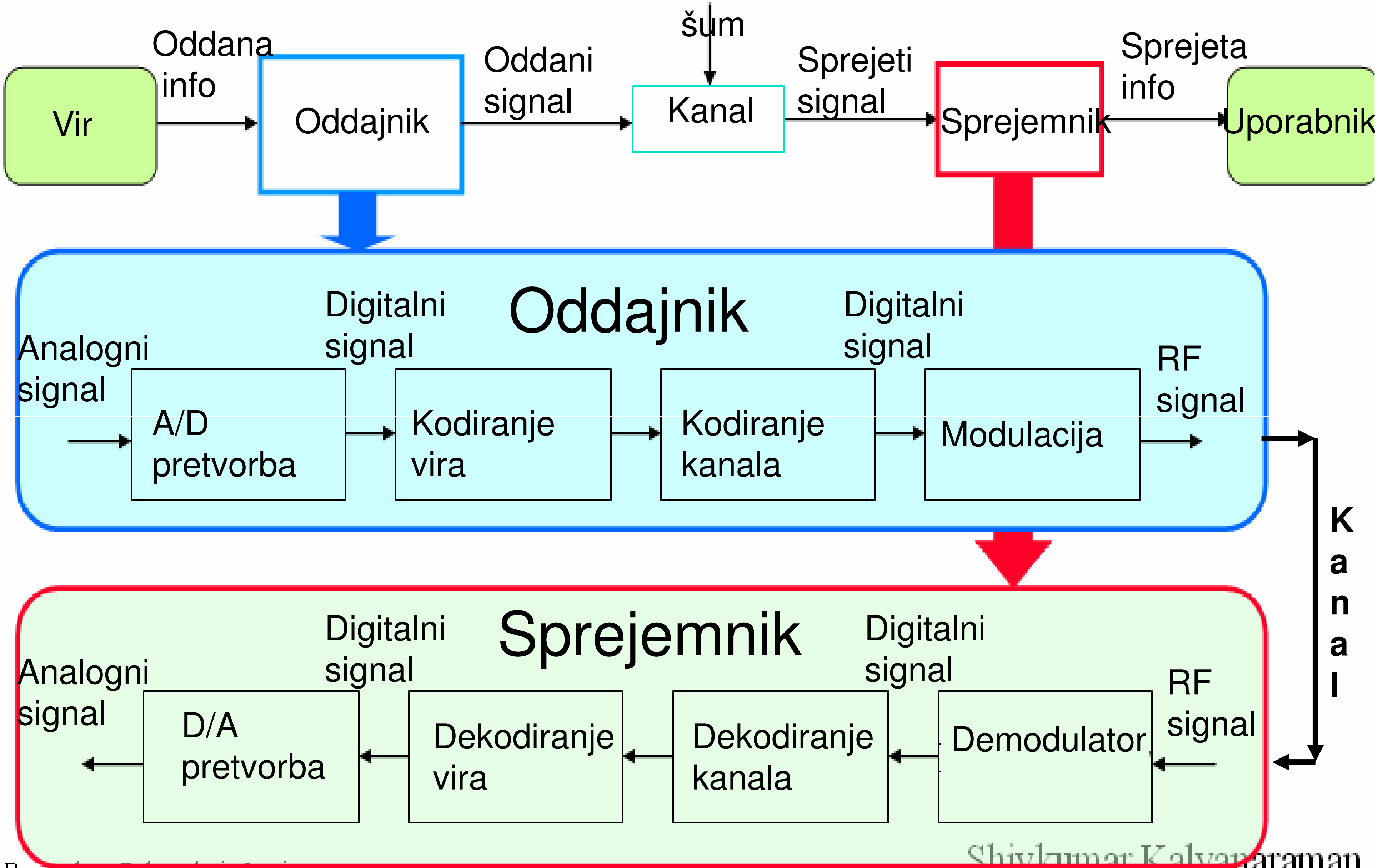
Cilji in zahteve:

- prenos čim večje množine informacije na sekundo R (b/s) (bitni pretok, bitna hitrost) pod Shannonovo mejno kapaciteto kanala
- oz. čim višji spektralni izkoristek $\eta = R/W$
- čim manjša verjetnost pogreška P_b oz. BE
- čim ožja širina uporabljenega frekvenčnega pasu W (Hz)
- zadostno razmerje energije bita E_b in šumne gostote moči N_0 (E_b/N_0)
- čim večje število uporabnikov
- najmanjša tehnična zahtevnost in najnižji stroški.

Pogoji:

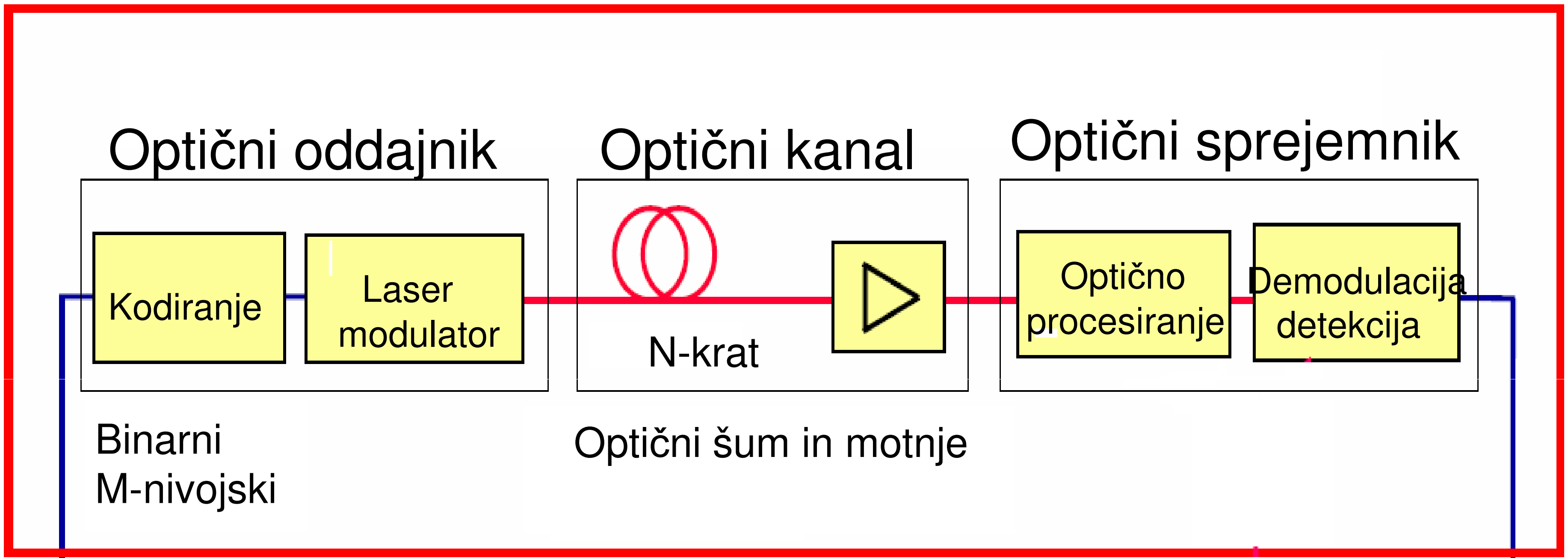
- omejena širina frekvenčnega pasu W
- omejeno razmerje signal/šum S/N
- Prenos bi lahko povečali z dvigom S/N ali širjenjem W. Način ni želen zaradi motenja in drugih pojavov (npr. nelinearnosti)

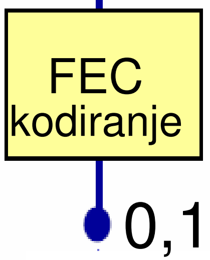
Radijski digitalni komunikacijski sistem



Optični digitalni komunikacijski sistem

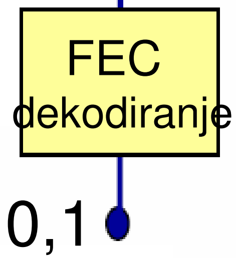
Optični digitalni kanal





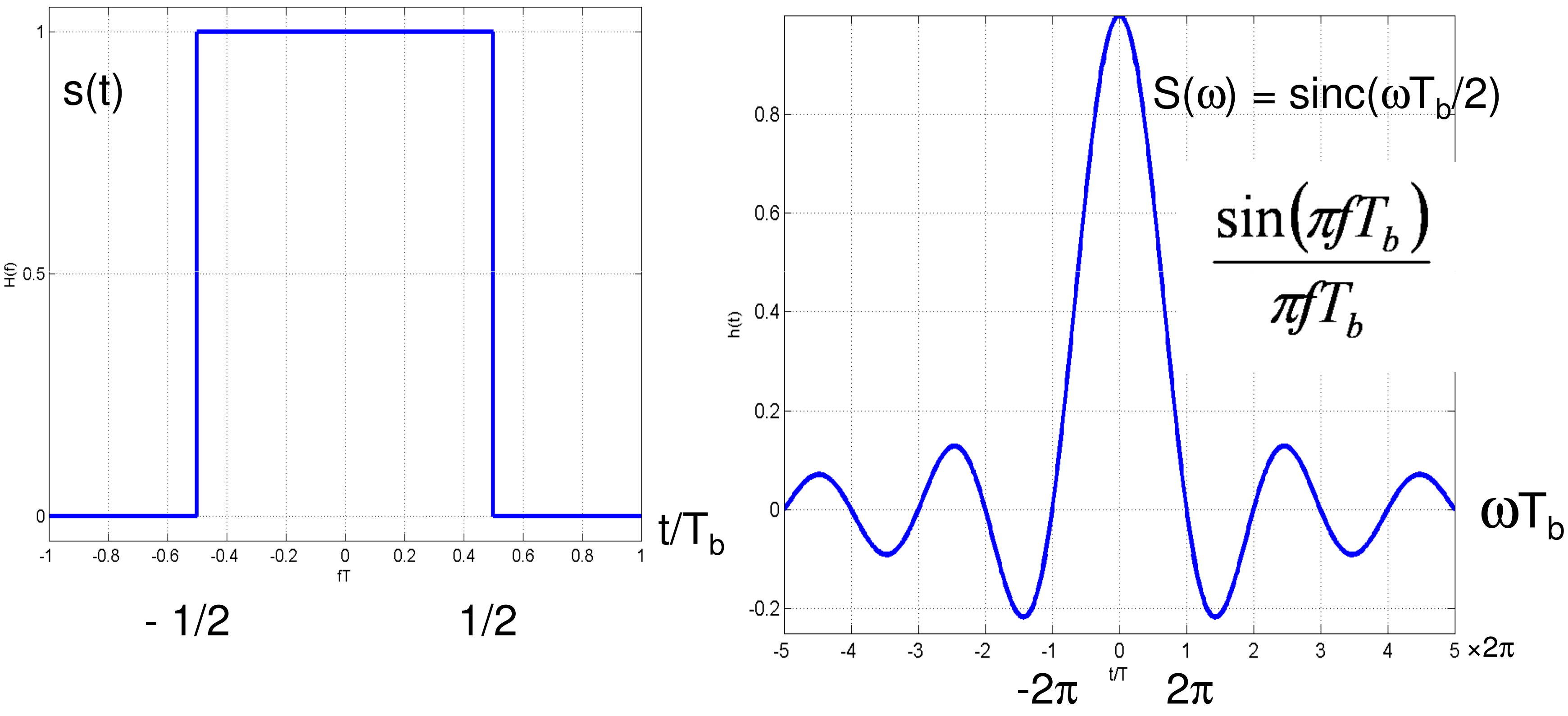
ITU-T G.709,
e.g. RS(255,239,17)

- V optičnih komunikacijah se je doslej pretežno uporabljala digitalna intenzitetna modulacija NRZ. V teku je uvajanje digitalnih modulacij DPSK, QPSK, QAM in drugih formatov ter uvajanje koherentne detekcije.



Signal in spekter

Signal $s(t) = F^{-1}(S(\omega))$ Spekter $S(\omega) = F(s(t))$



Spekter je (direktna) Fourierjeva transformacija signala
Signal je inverzna Fourierjeva transformacija spektra

"Everything
should be made
as simple as possible,
...but not simpler."

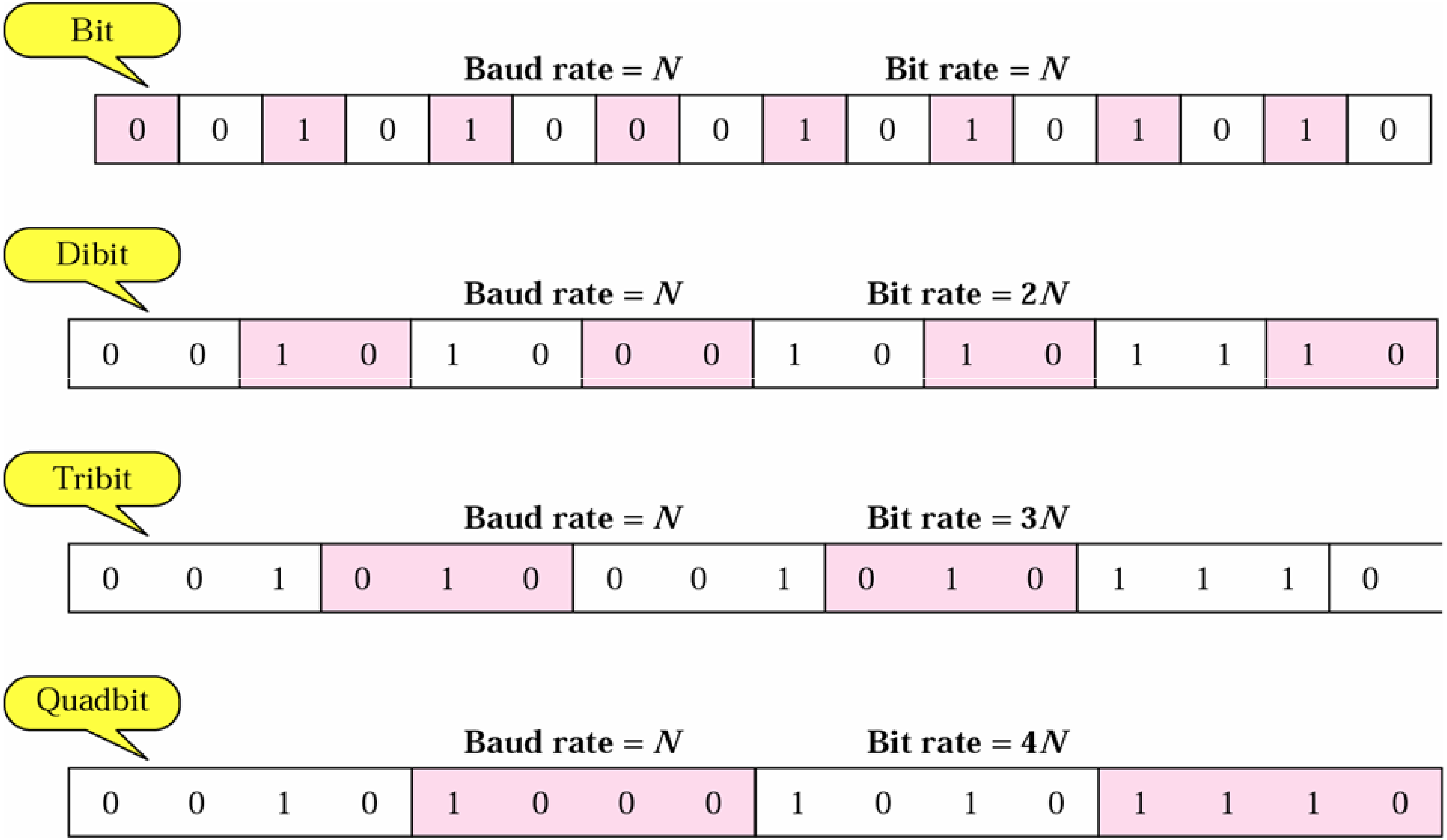
Albert Einstein

Definicije, bitni in simbolni pretok

Elementi digitalnega signala: čip, bit, simbol, paket

- bit b, število N — enota informacije, impulz 1, 0
- simbol S, število $M = 2^k$ — signalni element, skupek k bitov
- število bitov k v simbolu — zapis konstelacije
- bitni pretok R_b (b/s) — pretok informacije, bitna hitrost
- kapaciteta kanala — največji možni bitni pretok v kanalu
- simbolni pretok R_s (S/s), Baud — prenosna hitrost, simbolna hitrost
- signal/šum S/N — razmerje moč signala/moč šuma
- nosilnik/šum C/N — razmerje moč nosilnika/moč šuma
- kvaliteta modulacije MER — analogija s S/N oz. C/N
- verjetnost pogreška P_b
- bitni pogrešek BER — delež napačnih bitov
- simbolni pogrešek SER — delež napačnih simbolov
- vnaprejšnje kodiranje FEC — kanalsko kodiranje

Biti in simboli (znamenja)

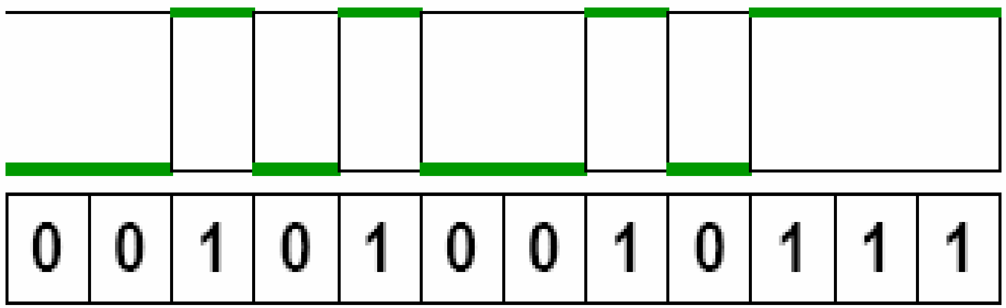


Bitna hitrost (b/s) in simbolna hitrost (S/s) ali Baud (bod)

Bitna hitrost:
Prenašana množina bitov na sekundo

N bit/s

N Baud

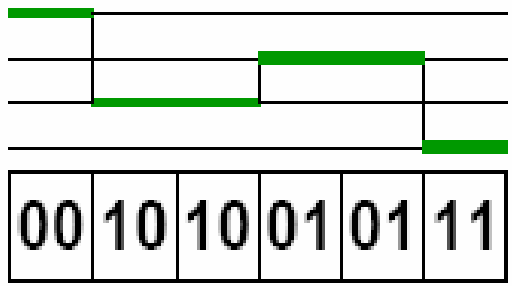


Biti in enobitni simboli

Simbolna hitrost:
Prenašana množina simbolov na sekundo

2N bit/s

N Baud



Dvobitni simboli

Vrste modulacij

1. Analogna modulacija

   Sporočilni signal je analogen

- Amplitudna modulacija (AM)
- Frekvenčna modulacija (FM)
- Fazna modulacija (PM)
- Drugo

2. Digitalna modulacija

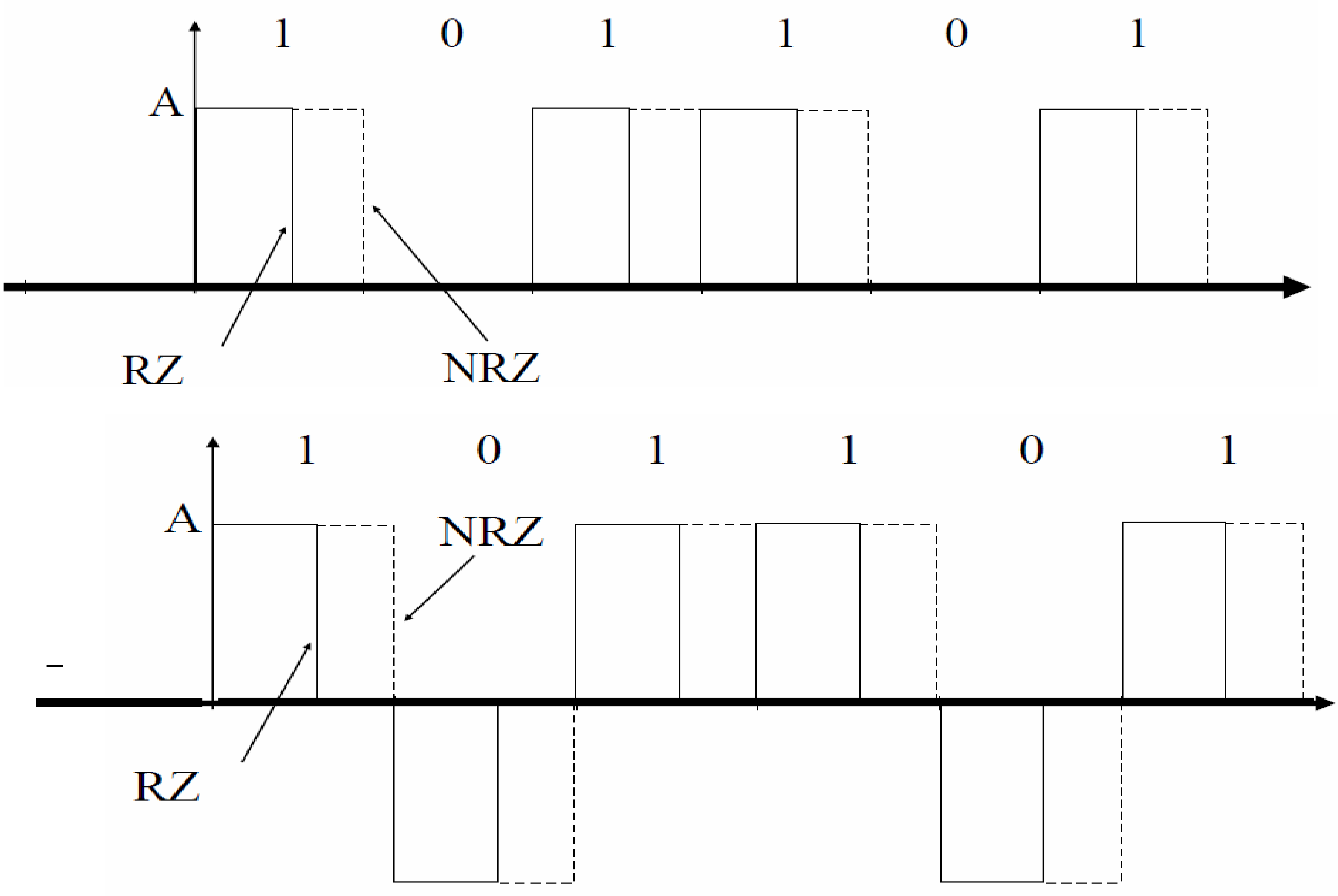
   Sporočilni signal je digitalen

- Amplitudni preskok (ASK)
- Frekvenčni preskok (FSK)
- Fazni preskok (PSK)
- Amplitudno–fazni preskok (QAM), ASK-PSK, hibridni, drugo

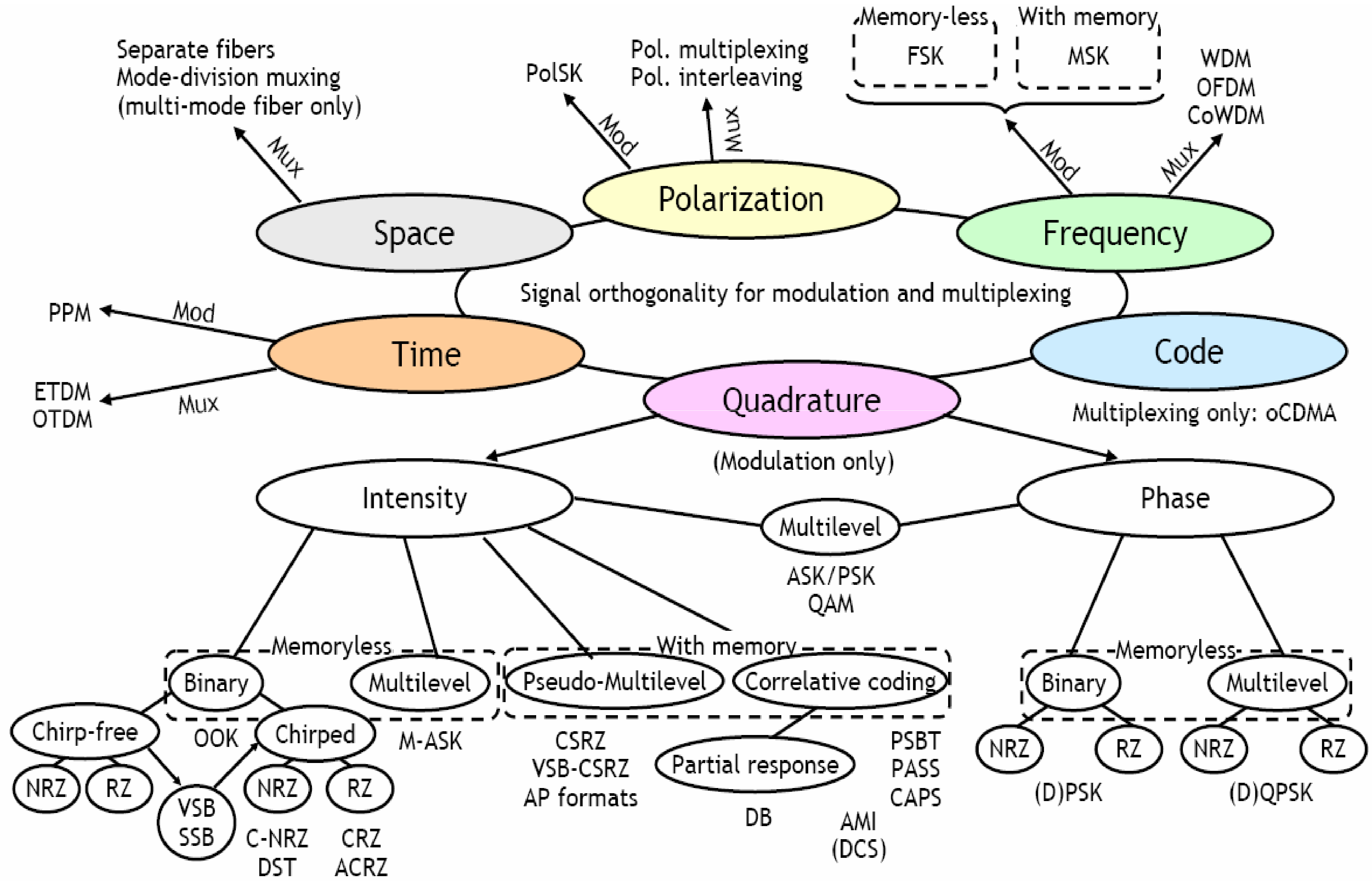
Bitna hitrost in simbolna hitrost

Modulacija	Enota	bit/s/baud	baud	bit/s
ASK, FSK, 2-PSK	Bit	1	N	N
4-PSK, 4-QAM	Dibit	2	N	2N
8-PSK, 8-QAM	Tribit	3	N	3N
16-QAM	Quadbit	4	N	4N
32-QAM	Pentabit	5	N	5N
64-QAM	Hexabit	6	N	6N
128-QAM	Septabit	7	N	7N
256-QAM	Octabit	8	N	8N

Unipolarni in bipolarni RZ ter NRZ



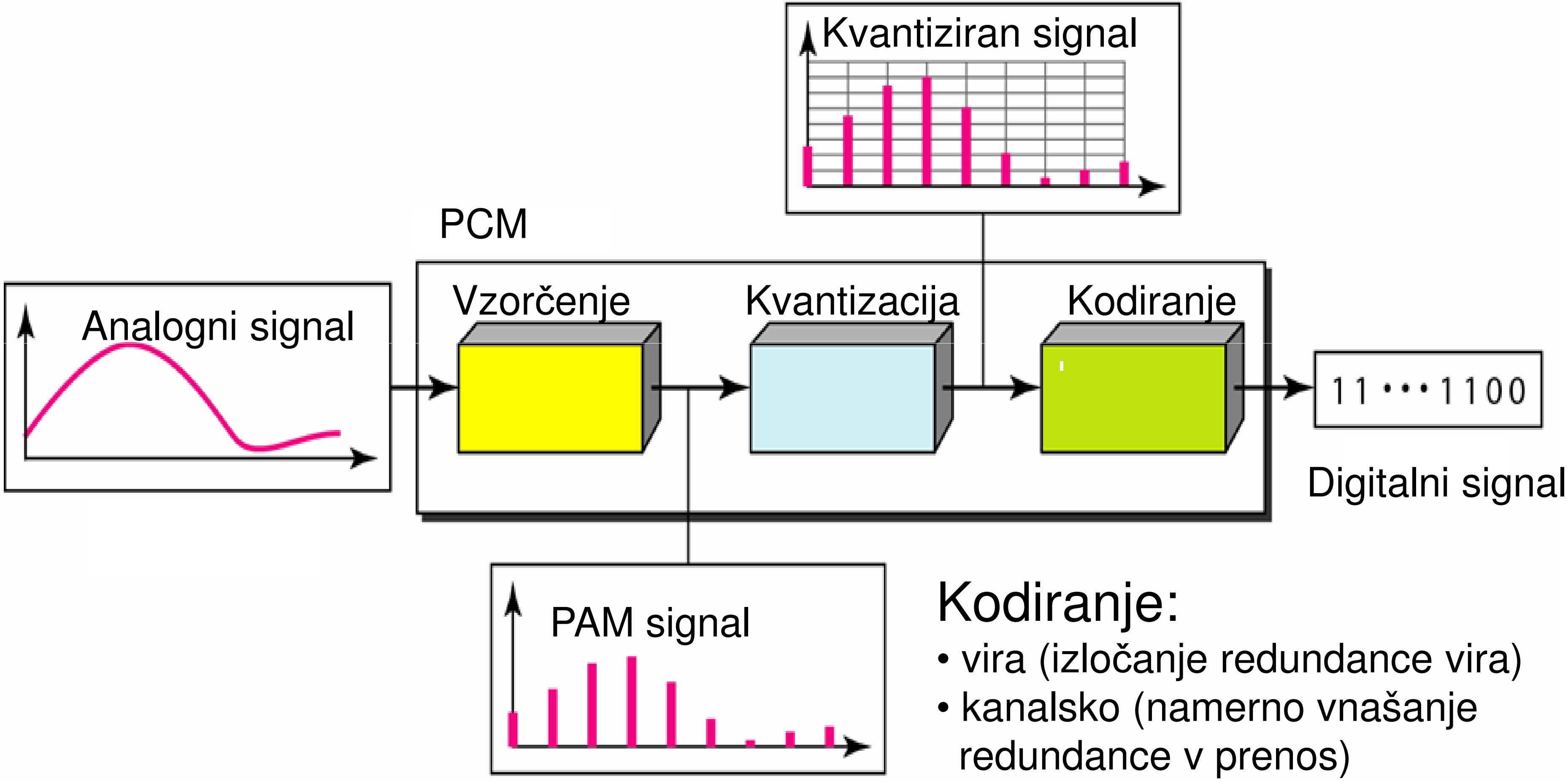
Parametri modulacijskih formatov (OK)



Peter Winzer, Alcatel-Lucent, SOK, 2008

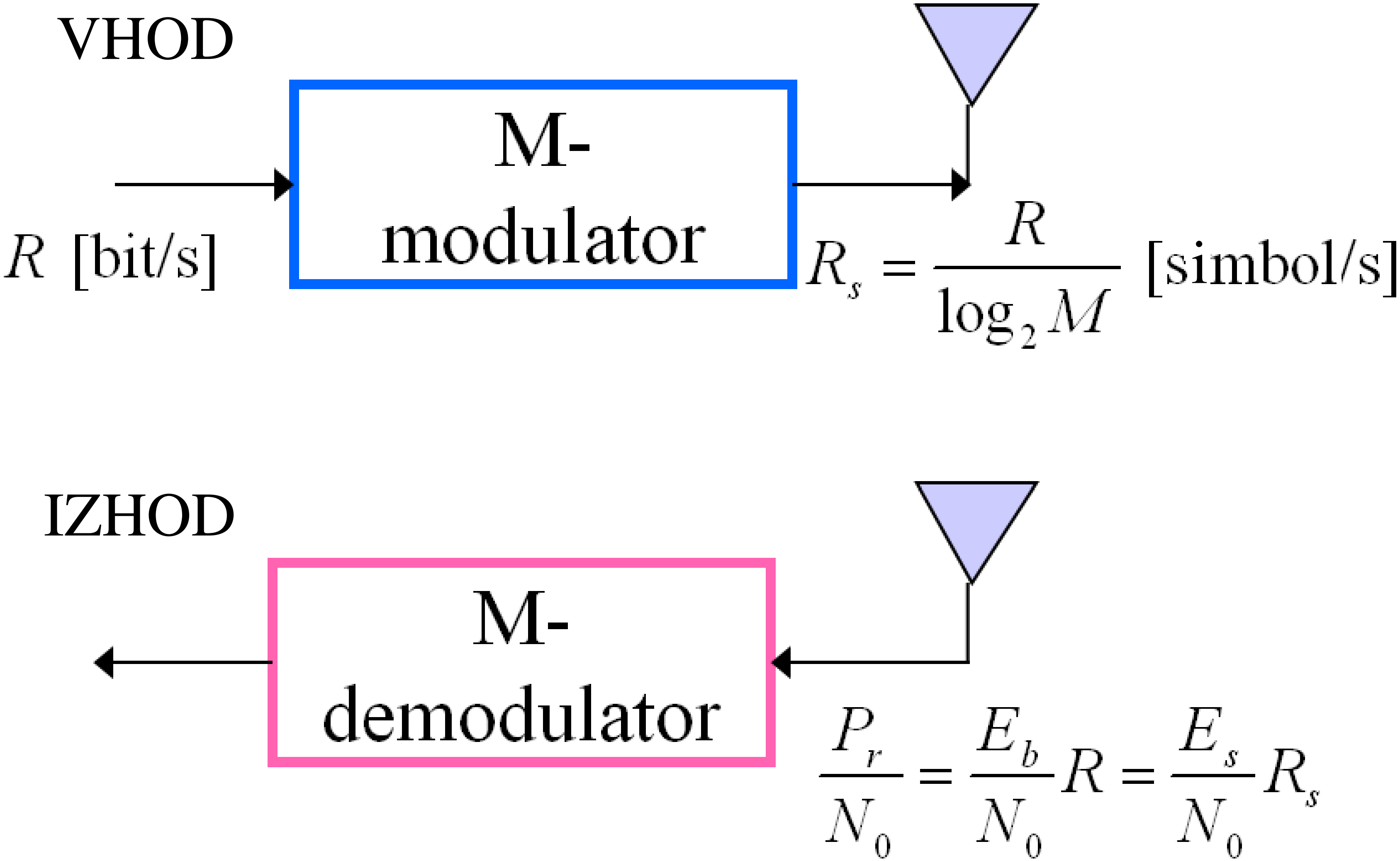
Vzorčenje, kvantizacija, digitalizacija

- A/D pretvorba

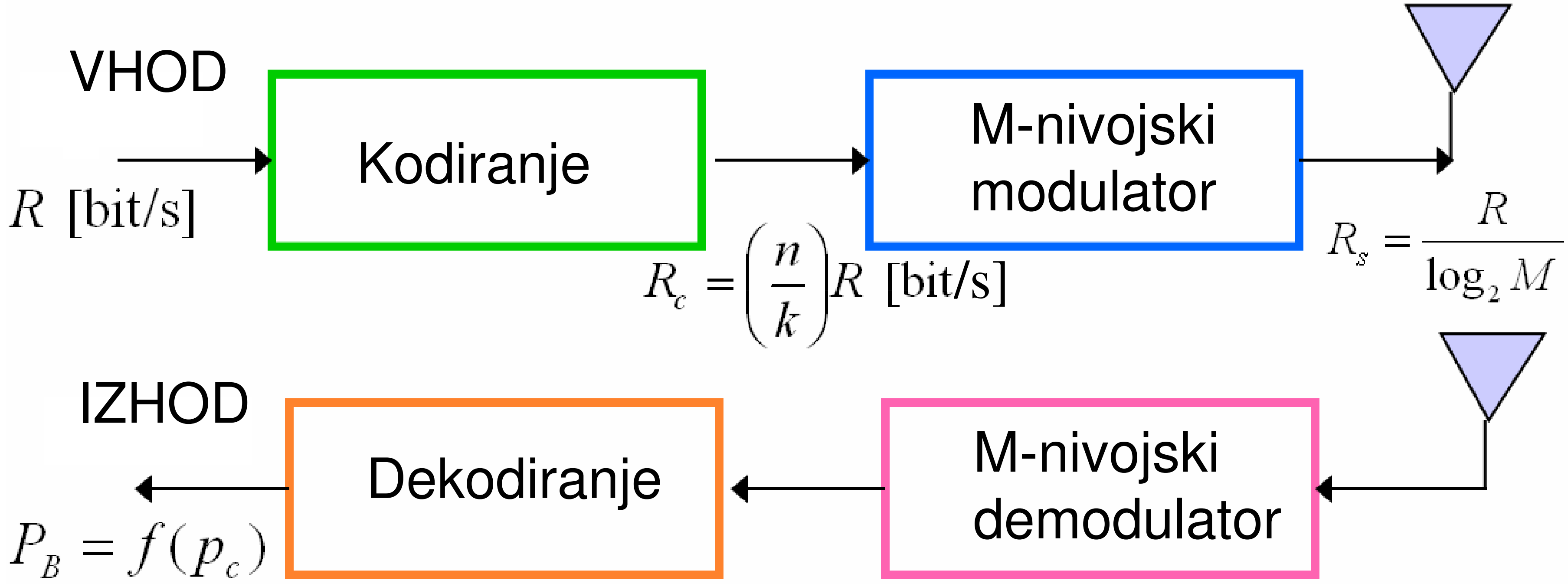


Kodiranje:
- vira (izločanje redundance vira)
- kanalsko (namerno vnašanje redundance v prenos)
- linijsko (večanje odpornosti)

Modulacija - demodulacija



Kodiranje - modulacija



$$P_E(M) = f\left(\frac{E_s}{N_0}\right), \quad p_c = g[P_E(M)]$$

$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} R = \frac{E_c}{N_0} R_c = \frac{E_s}{N_0} R_s$$

Biti in simboli, bitna in simbolna hitrost

k ... število bitov v simbolu
T_b(s) ... trajanje bita
R_b(b/s) ... bitna hitrost

M ... število simbolov v konstelaciji
T_s (s) ...trajanje simbola
R_s(simboli/s) ... simbolna hitrost

$$M = 2^k, \quad k = \log_2 M$$

$$R\ (bit/s) = \frac{k}{T_s} = \frac{\log_2 M}{T_s}$$

$$T_b = \frac{1}{R} = \frac{T_s}{k} = \frac{1}{kR_s}$$

$$R_s(simbol/s) = \frac{R}{\log_2 M}$$

Modulacije

Parametri signala

Izmenični signal amplitude A, frekvence ω_c in faze Φ:

$$x(t) = A\cos[\omega_c t + \Phi(t)] = \Re\{Ae^{j[\omega_c t + \Phi(t)]}\}$$

A oz. A(t) je konstantna ali spremeljiva amplituda nosilnika

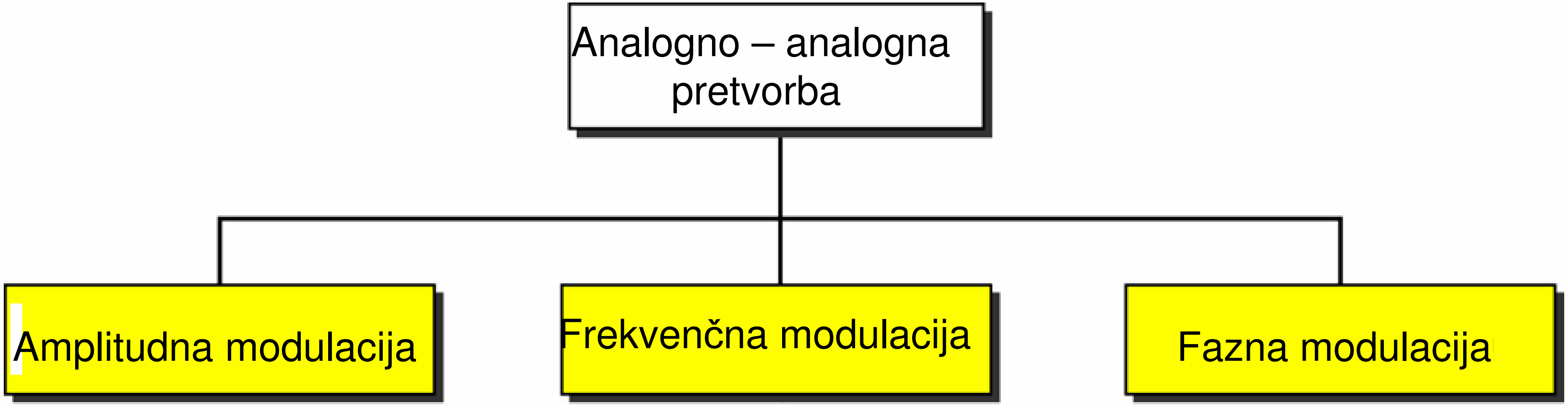
Trenutna faza nosilnika:

$$\Theta_i(t) = \omega_c t + \Phi(t),$$

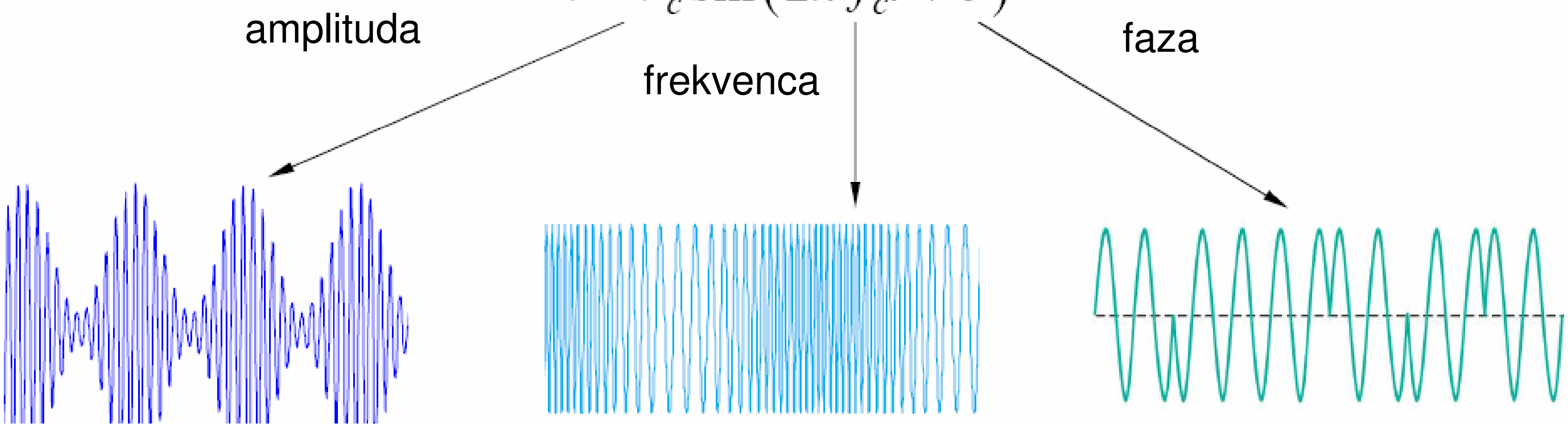
Trenutna frekvenca nosilnika:

$$\omega_i(t) = \frac{d\Theta_i(t)}{dt} = \omega_c + \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

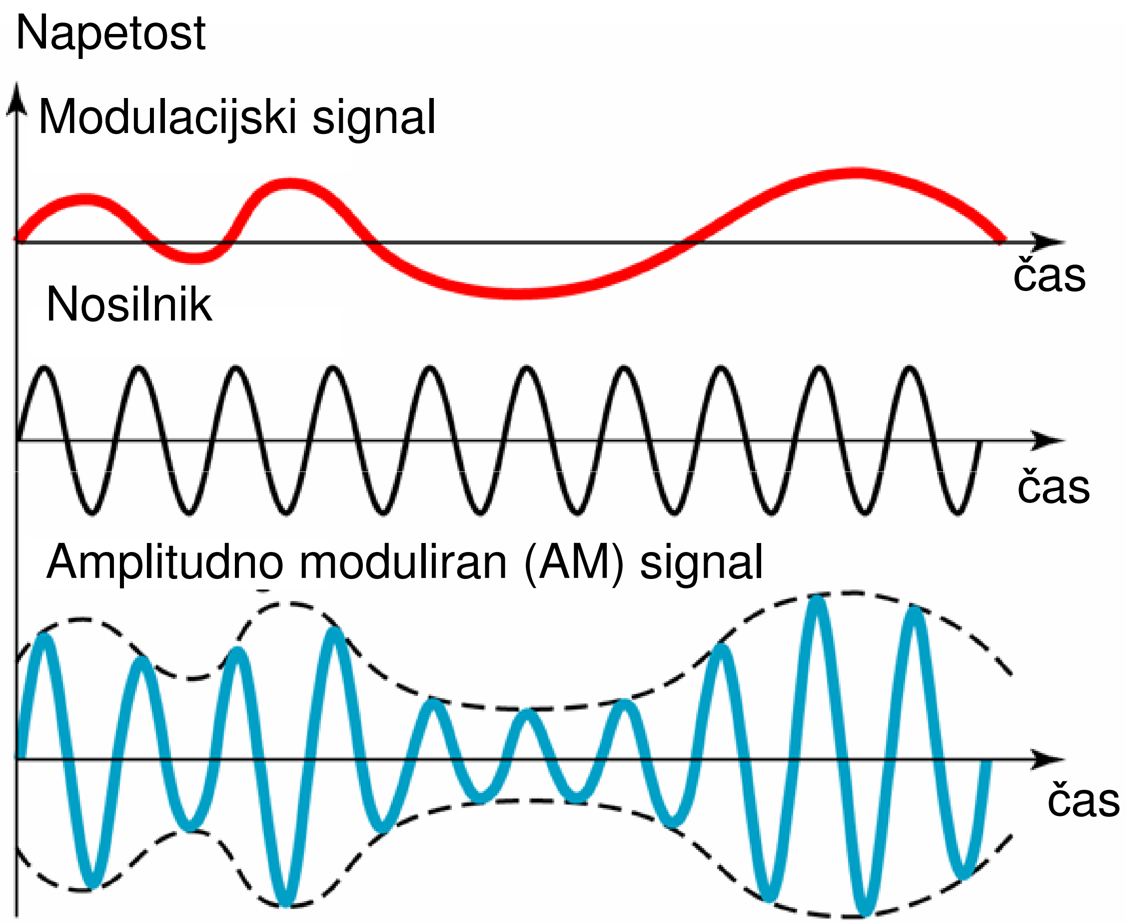
Analogna modulacija

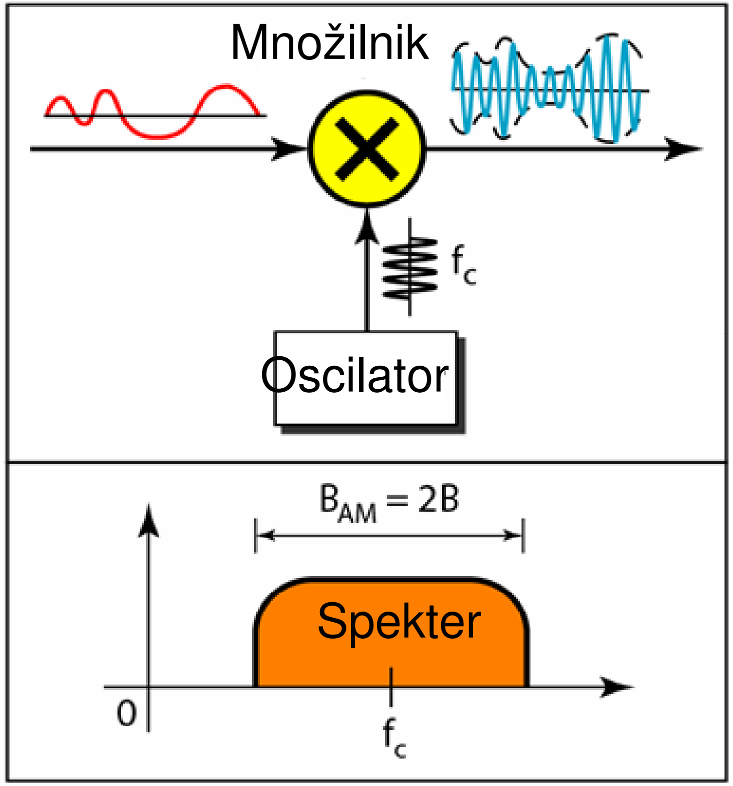


$$v = V_c \sin\left(2\pi f_c t + \theta\right)$$

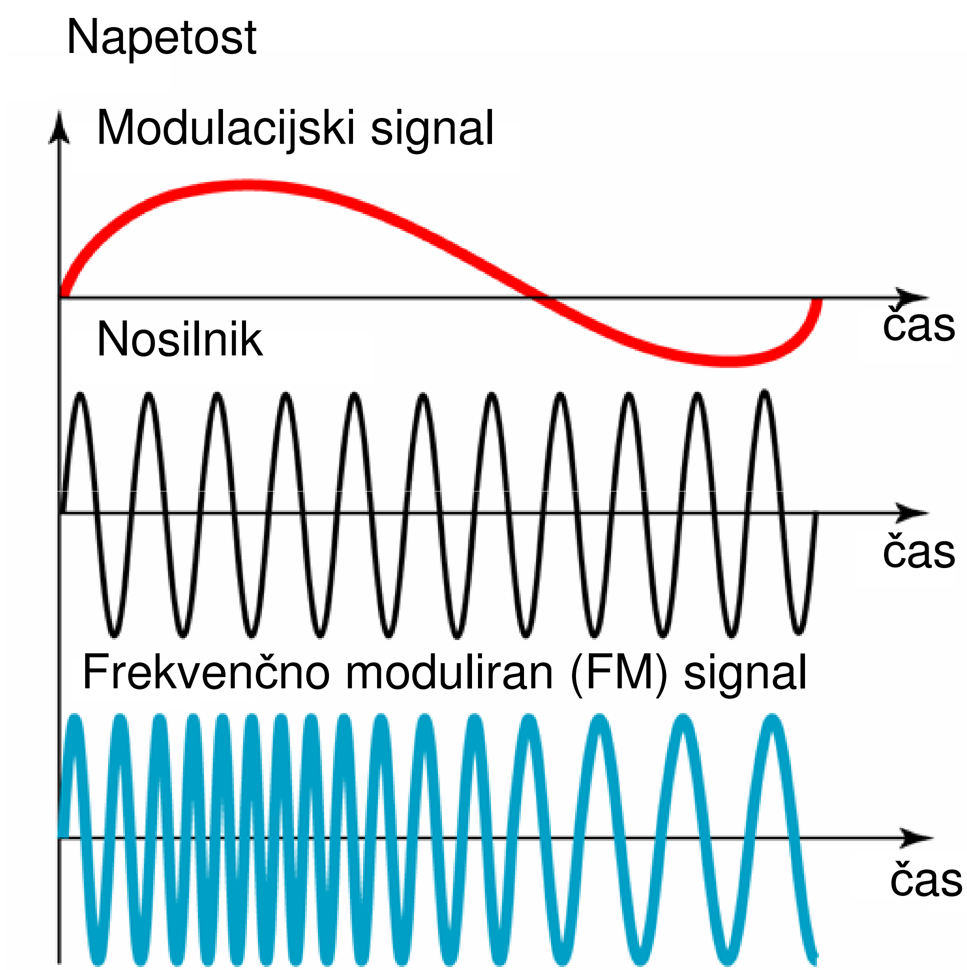


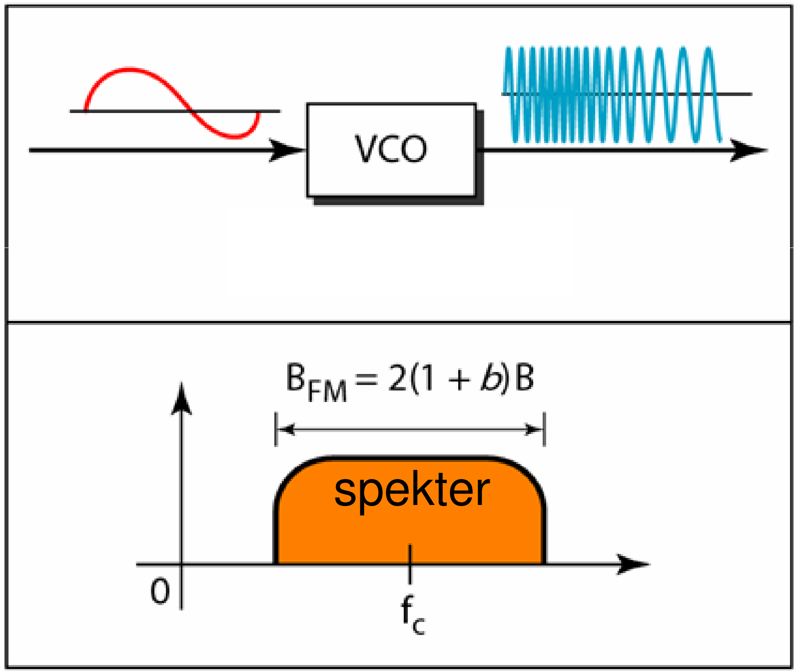
Analogna amplitudna modulacija





Analogna frekvenčna modulacija





Analogna FM, modulacijski pas

- Širina spektra Frekvenčno Moduliranega (FM) signala

Signal: $$v_{FM}(t) = v(t) = A\cos\left[\omega_c t + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{\mathrm{mod}}}\right)\sin(\omega_{\mathrm{mod}} t)\right]$$

Carsonovo pravilo: $$B = 2(\Delta_f + f_{\mathrm{mod}})$$

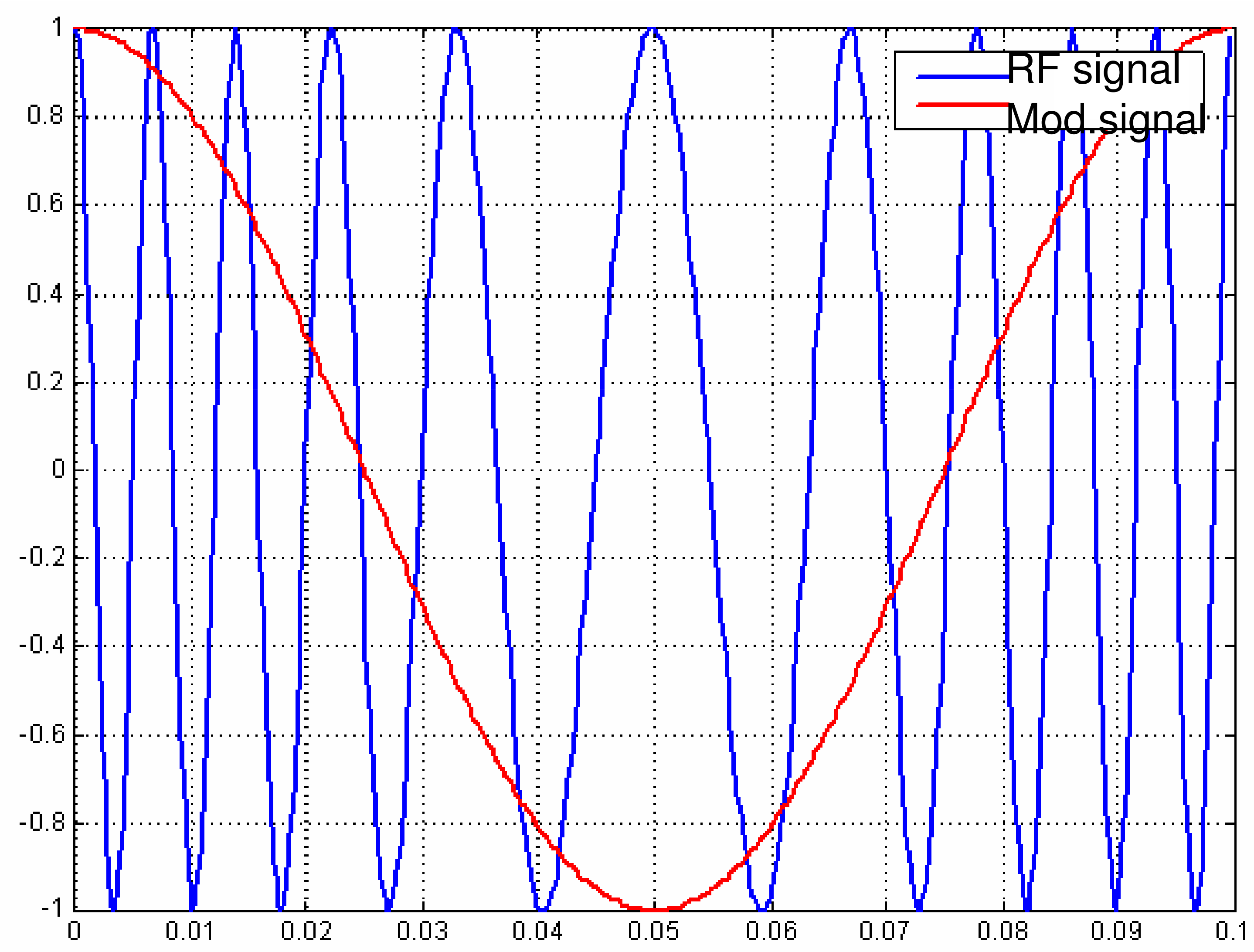
Frekvenčna deviacija

Modulacijska frekvenca

Praktični pas: $$B = 2(\Delta_f + f_{\max})$$

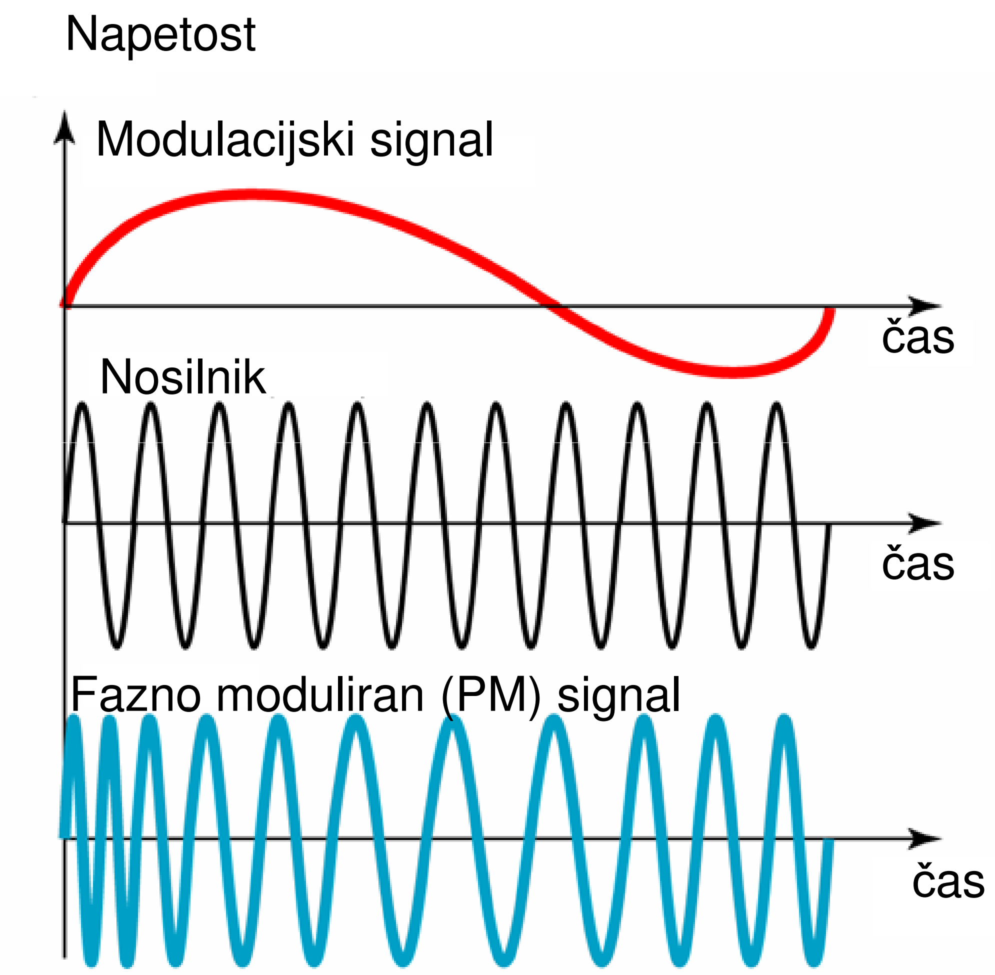
Najvišja modulacijska frekvenca

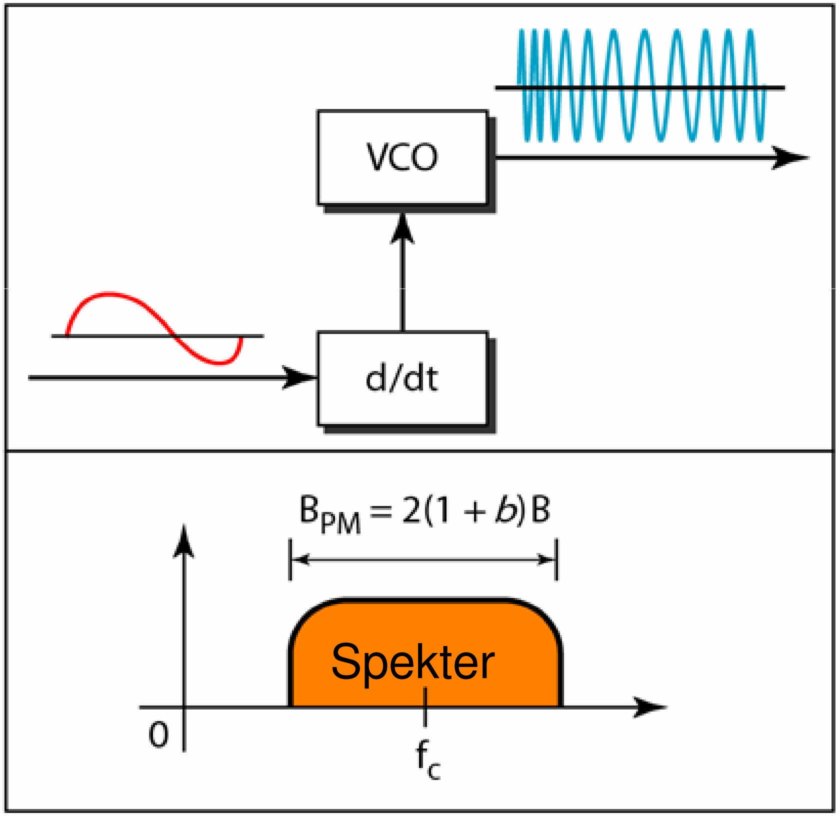
FM signal



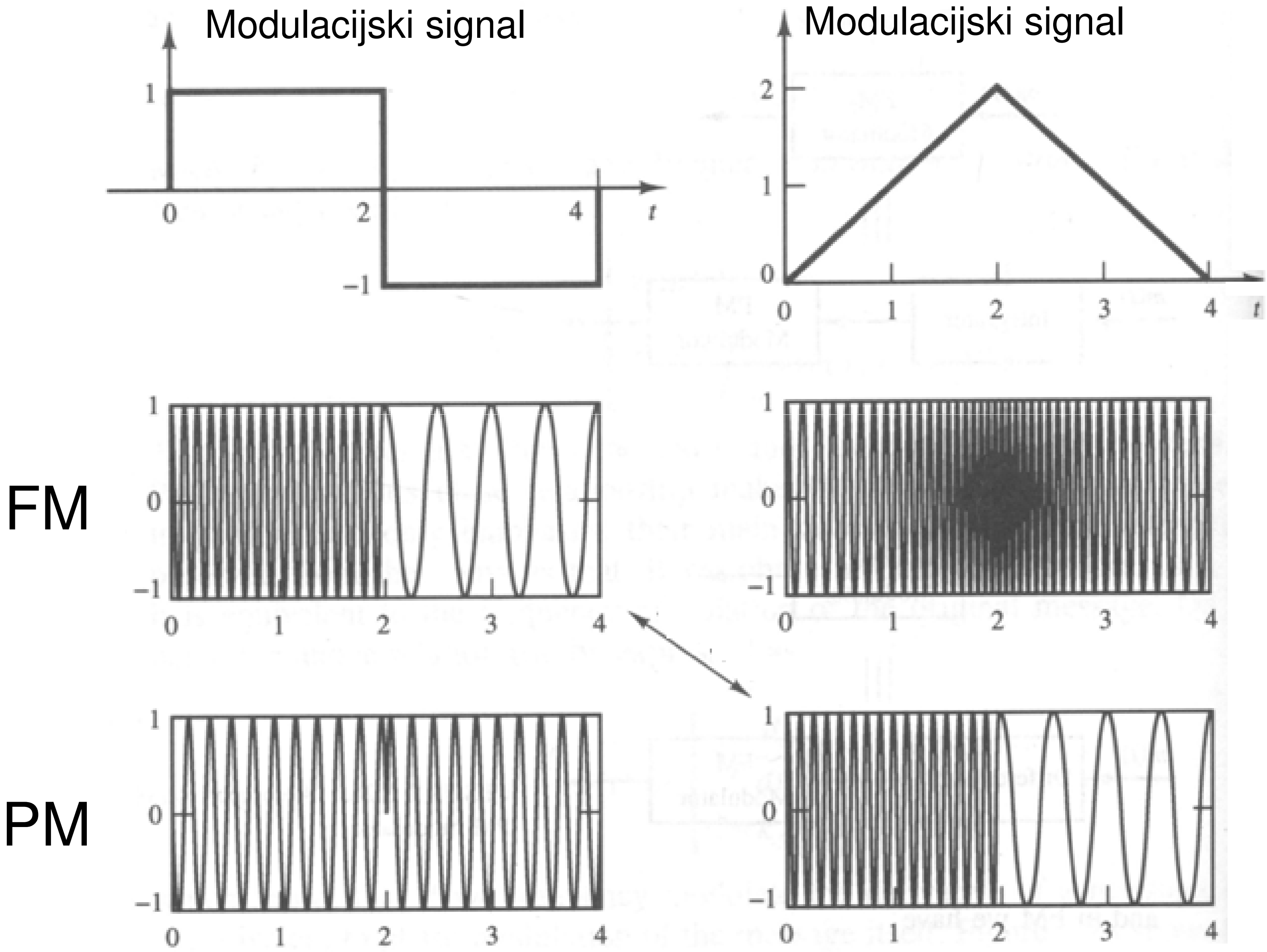
RF signal
Mod.signal
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1

Analogna fazna modulacija



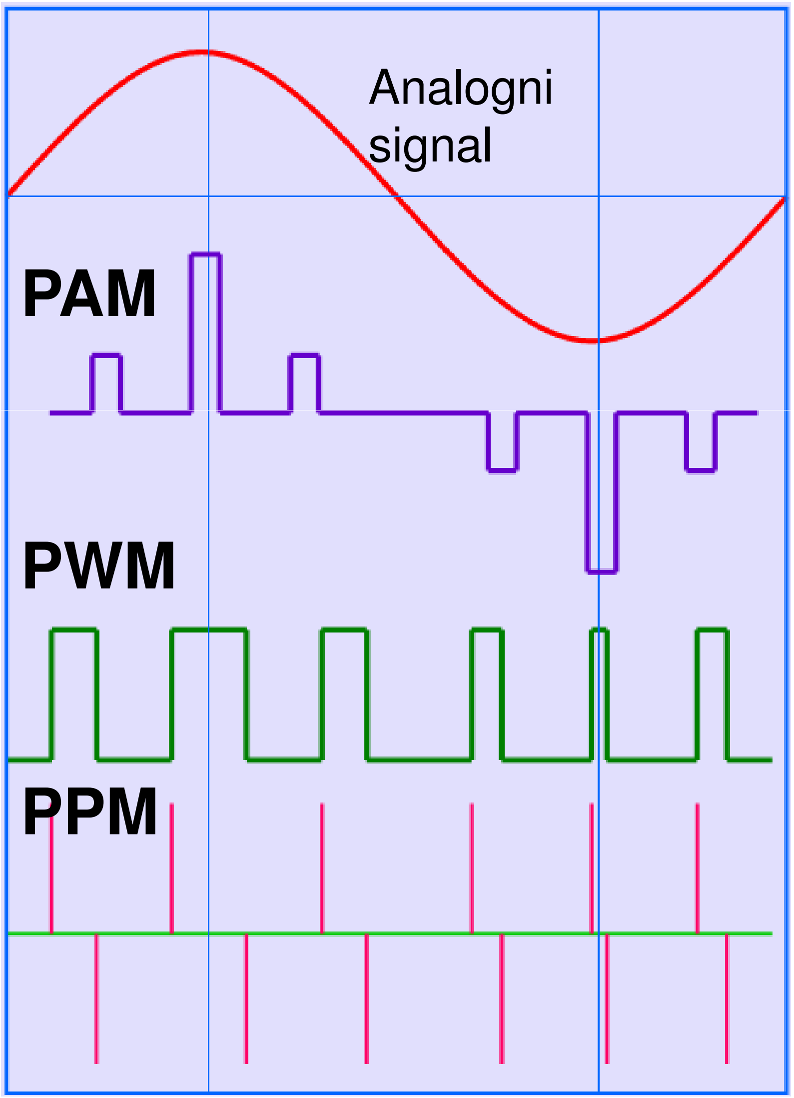


Kotna modulacija z nesinusnim signalom

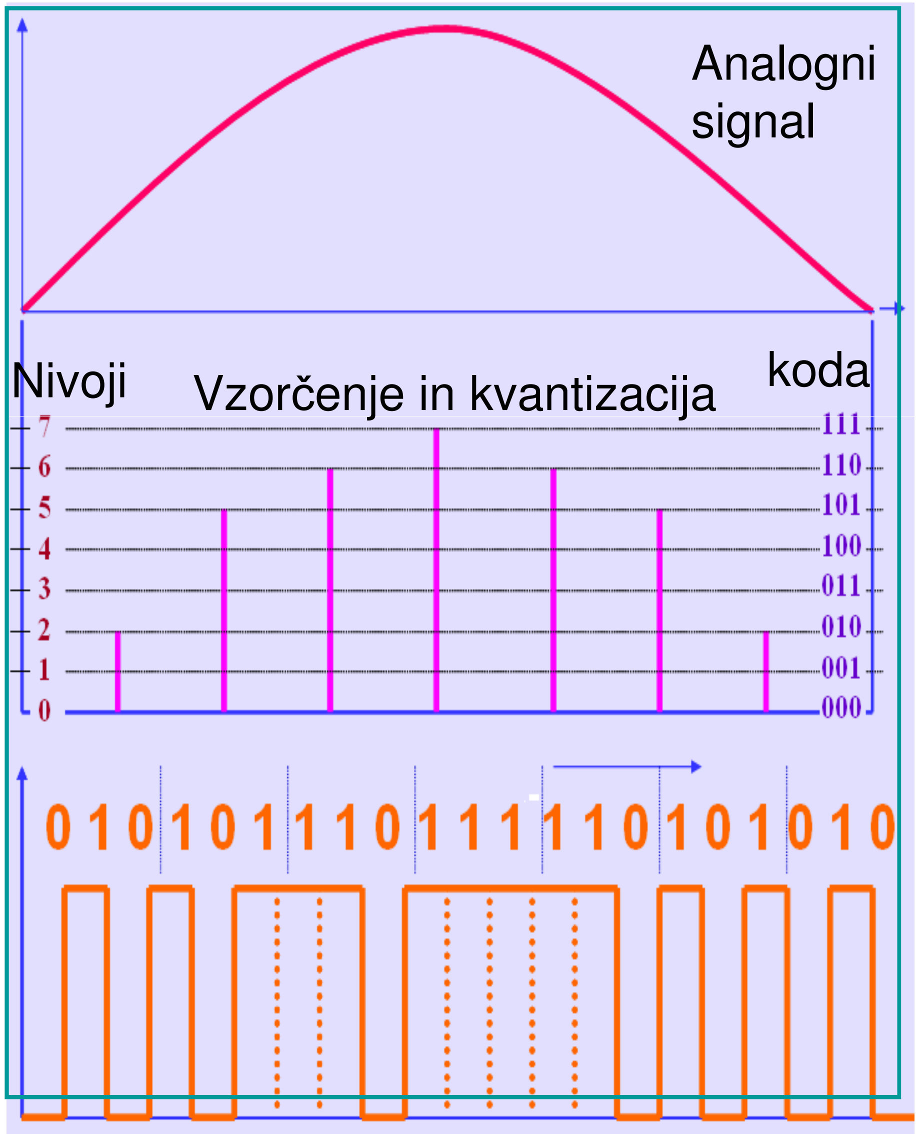


Analogna in digitalna impulzna modulacija

- analogna modulacija

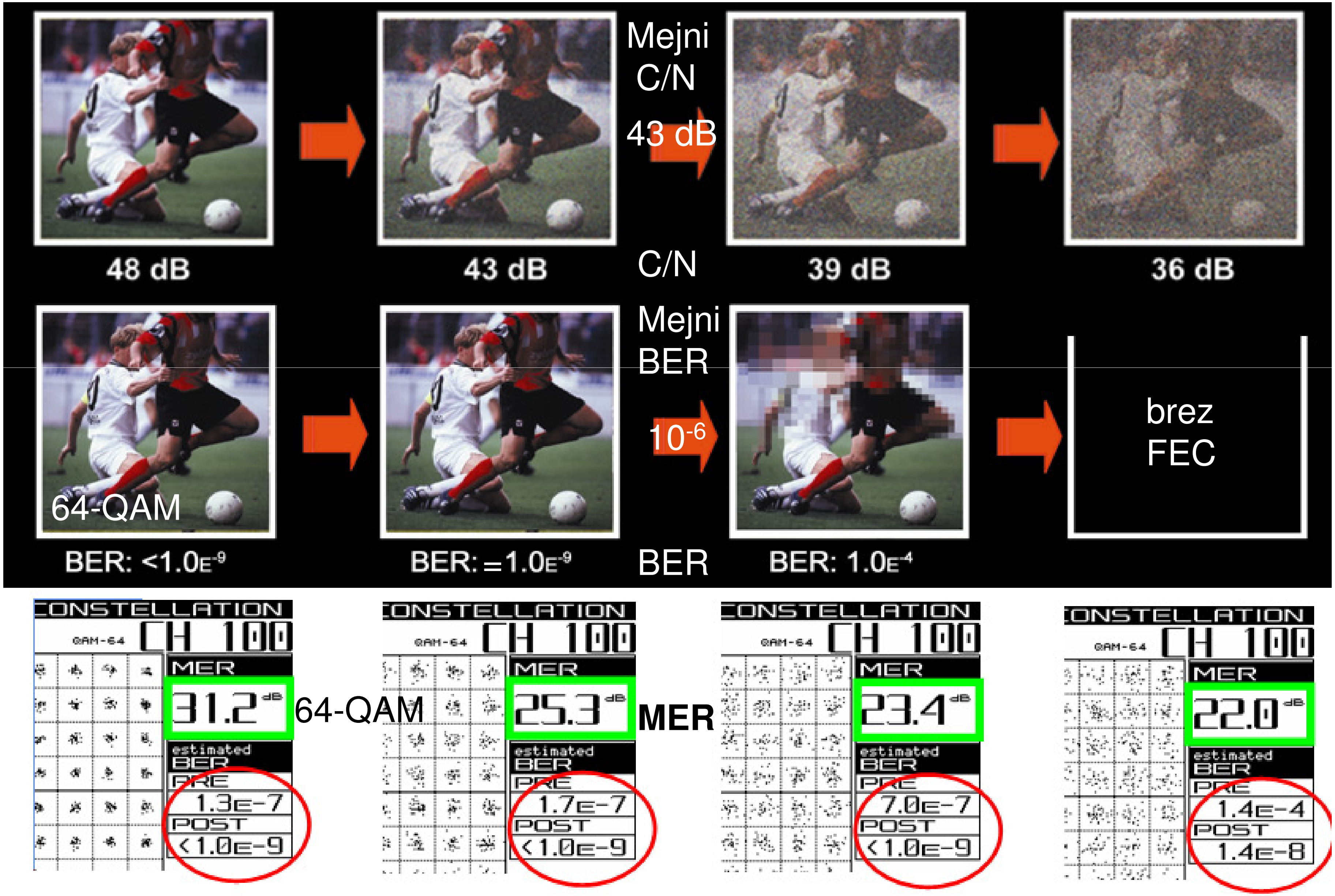


- Kodirana (numerična, digitalna) modulacija



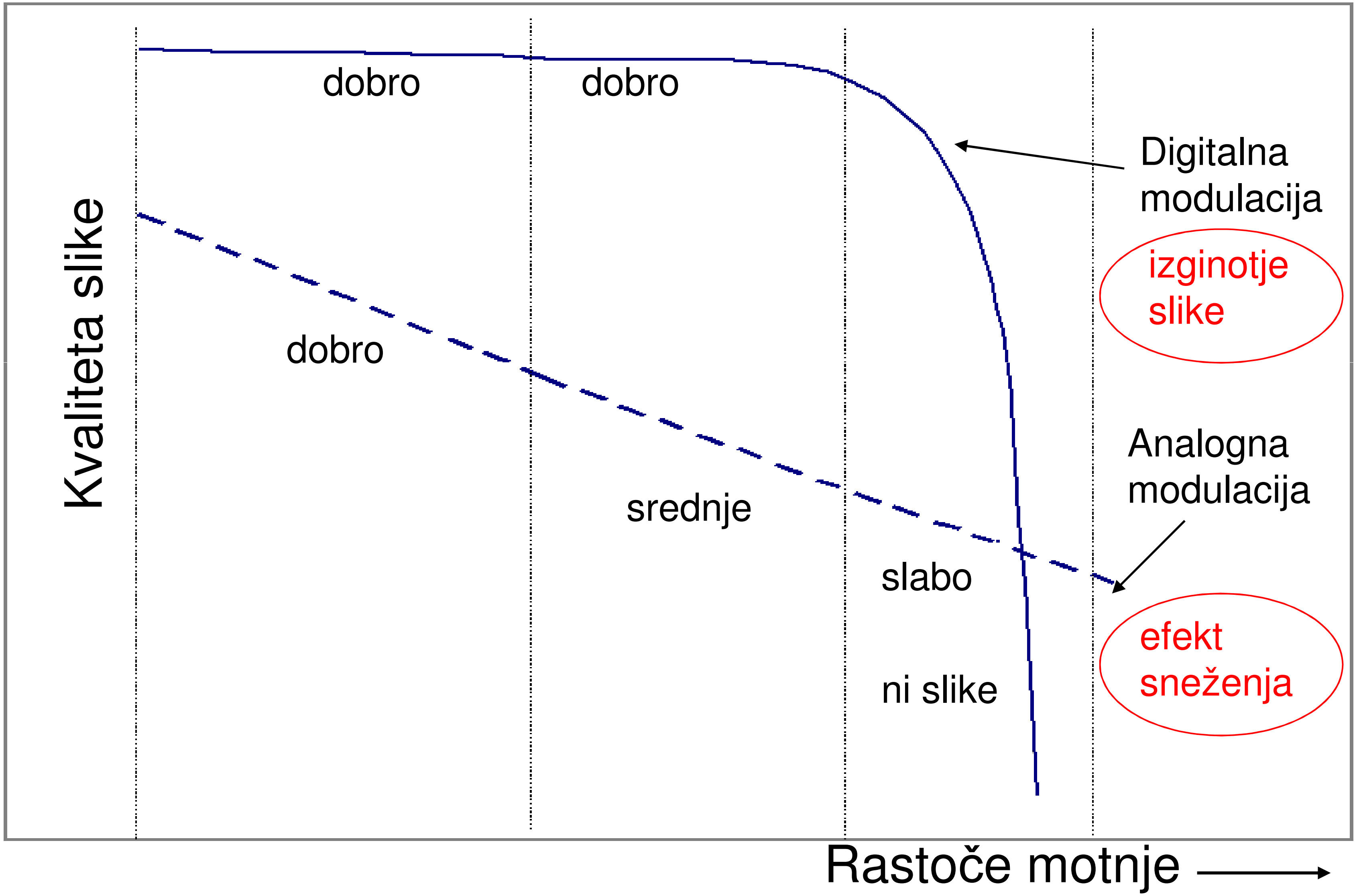
C/N, BER in MER

Primerjava upadanja kakovosti pri analogni in digitalni modulaciji



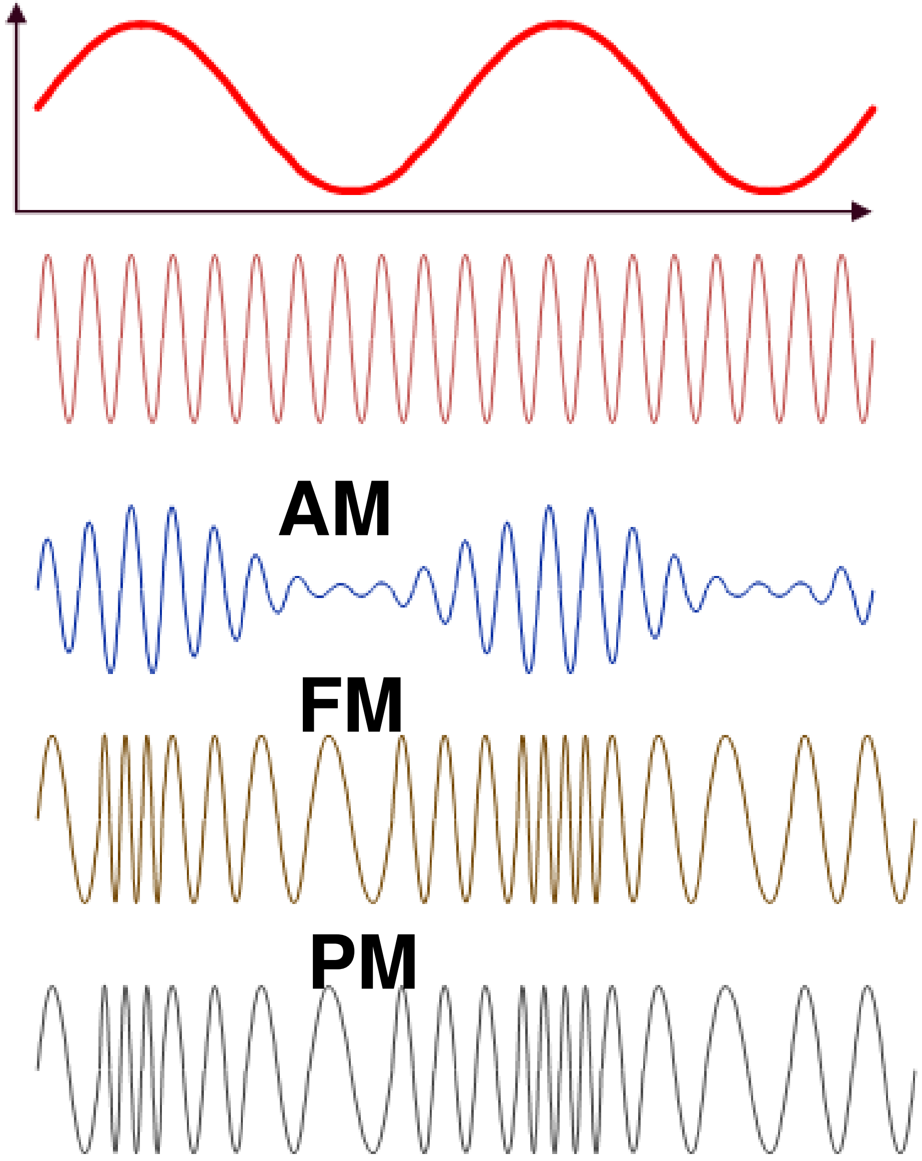
Motnje in kvaliteta slike

- Digitalna modulacija je pri dobrem signalu najprej neobčutljiva na rastoče motnje, nad določenim pragom motenj pa ima nenaden ("prepadni") padec kvalitete slike

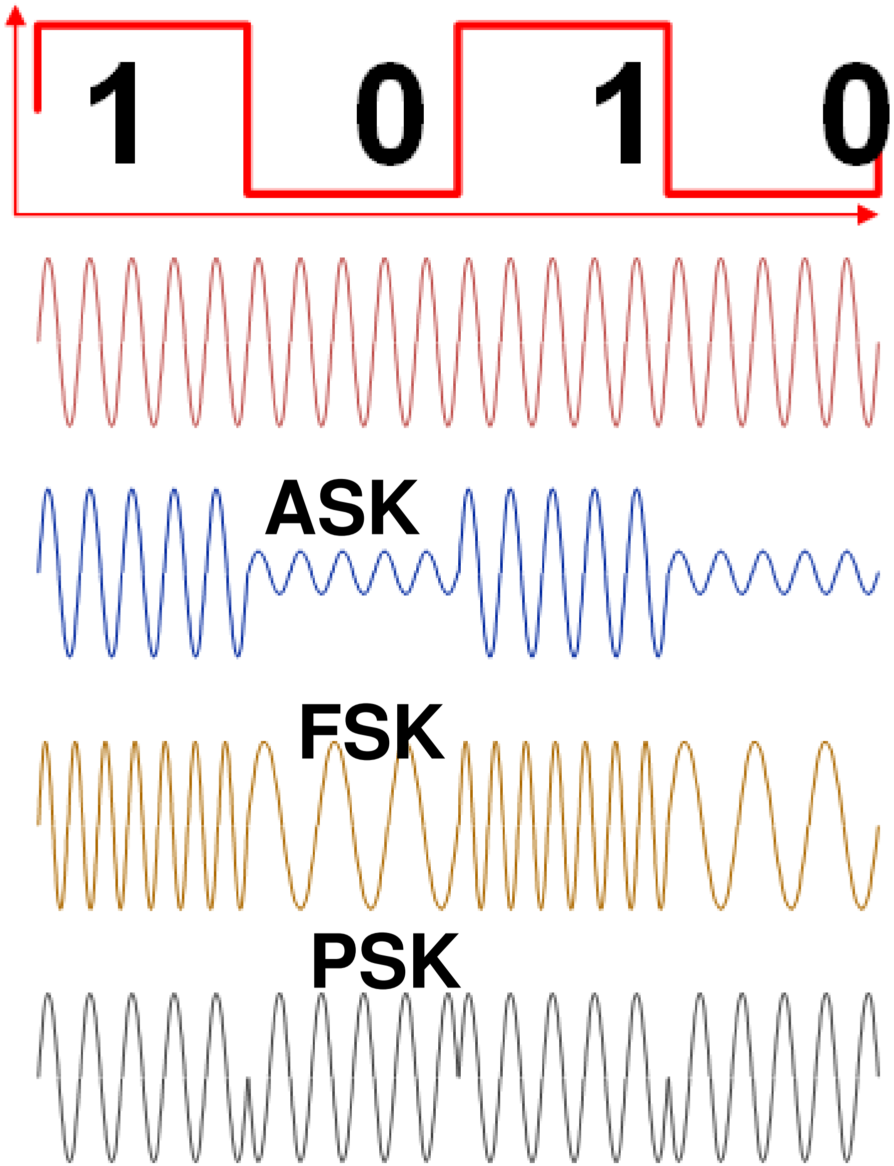


Pregled: analogne in digitalne modulacije

- Analogne modulacije



Digitalne enonivojske modulacije



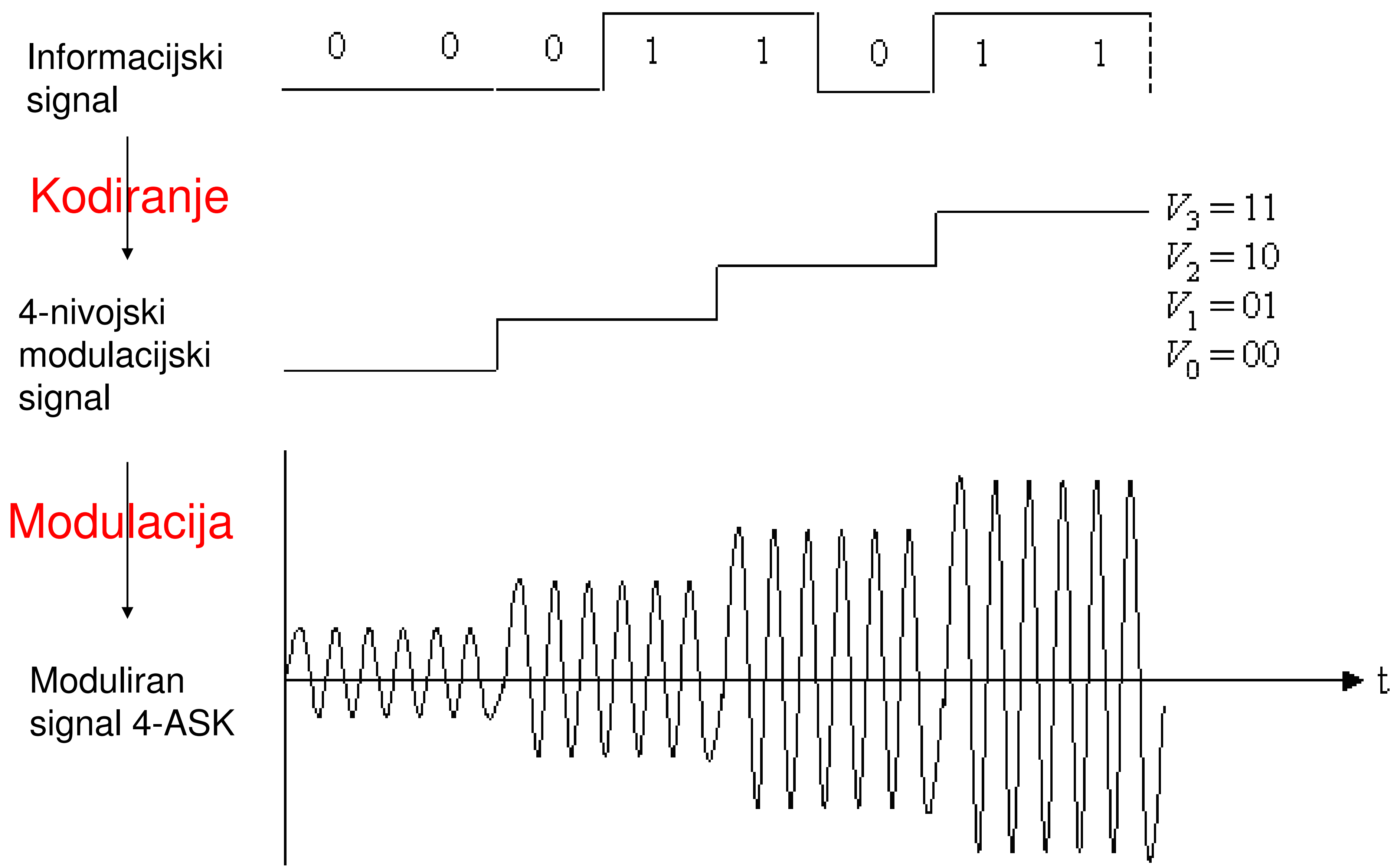
Načelo izkoriščanja spektra

- Omejitev širine spektra npr. na pas 1Hz še ne pomeni omejitve pretoka informacije.Signal lahko zavzame večje število “nivojev”. Če jih lahko pri sprejemu med seboj razločimo, dobimo povečano informacijo v ozkem pasu 1 Hz. Za razločitev je potrebno veliko razmerje S/N na sprejemnem mestu.

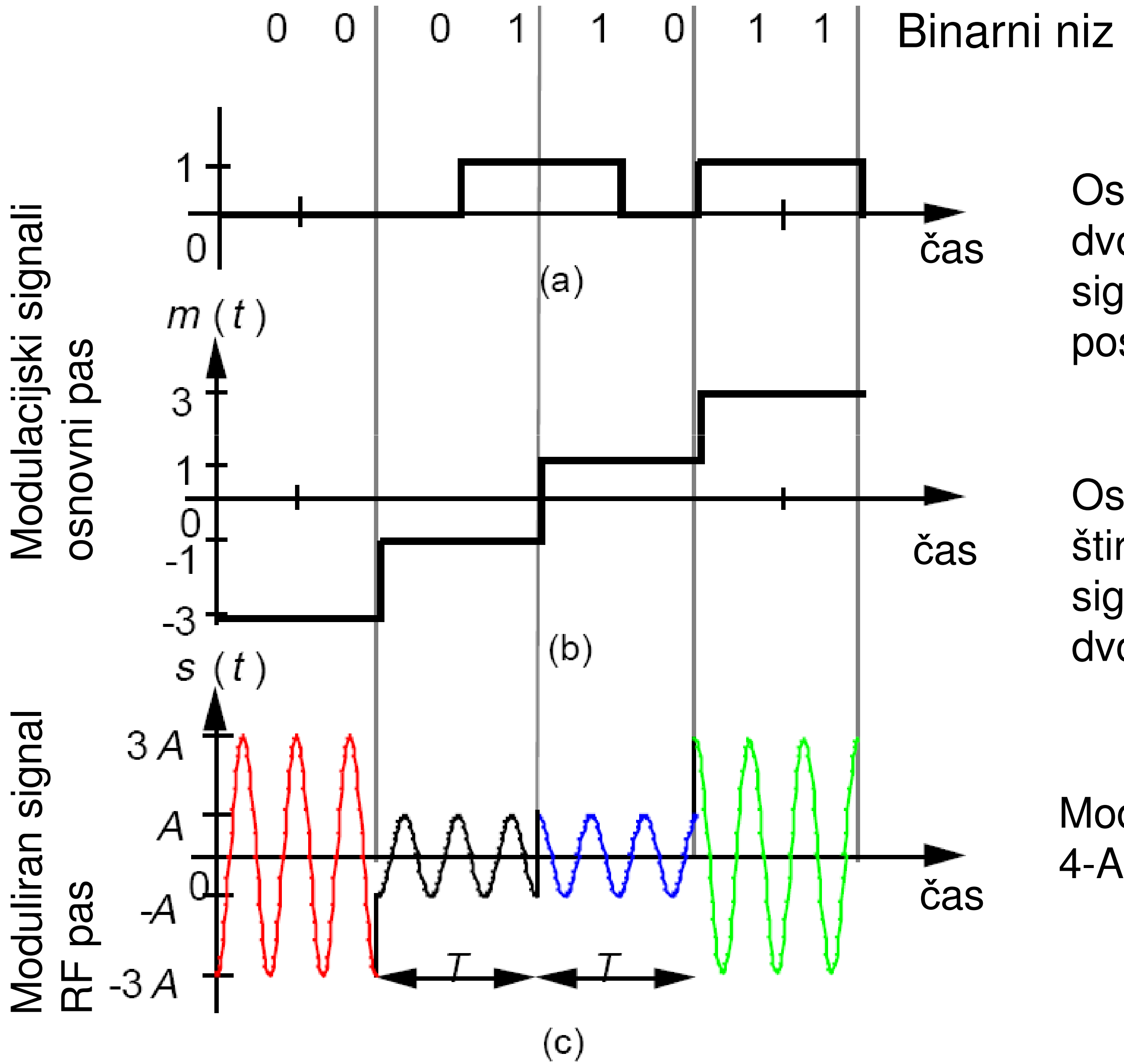
- Šum onemogoča razlikovanje med signalnimi nivoji, zato je pri nizkem razmerju signal/šum mogoče zagotoviti pretok povečane informacije le z razširitvijo spektra.

- Pri danem razmerju S/N izberemo kompleksna (amplitudno-fazna) stanja signala, tako da jih z veliko verjetnostjo lahko med sabo razločimo. Tako lahko z večnivojsko modulacijo povečamo bitni pretok nad Nyquistovo mejno vrednost 2 bita/Hz za enonivojski prenos.

Informacijski, modulacijski in RF signal



Večnivojski osnovni in modulirani signali

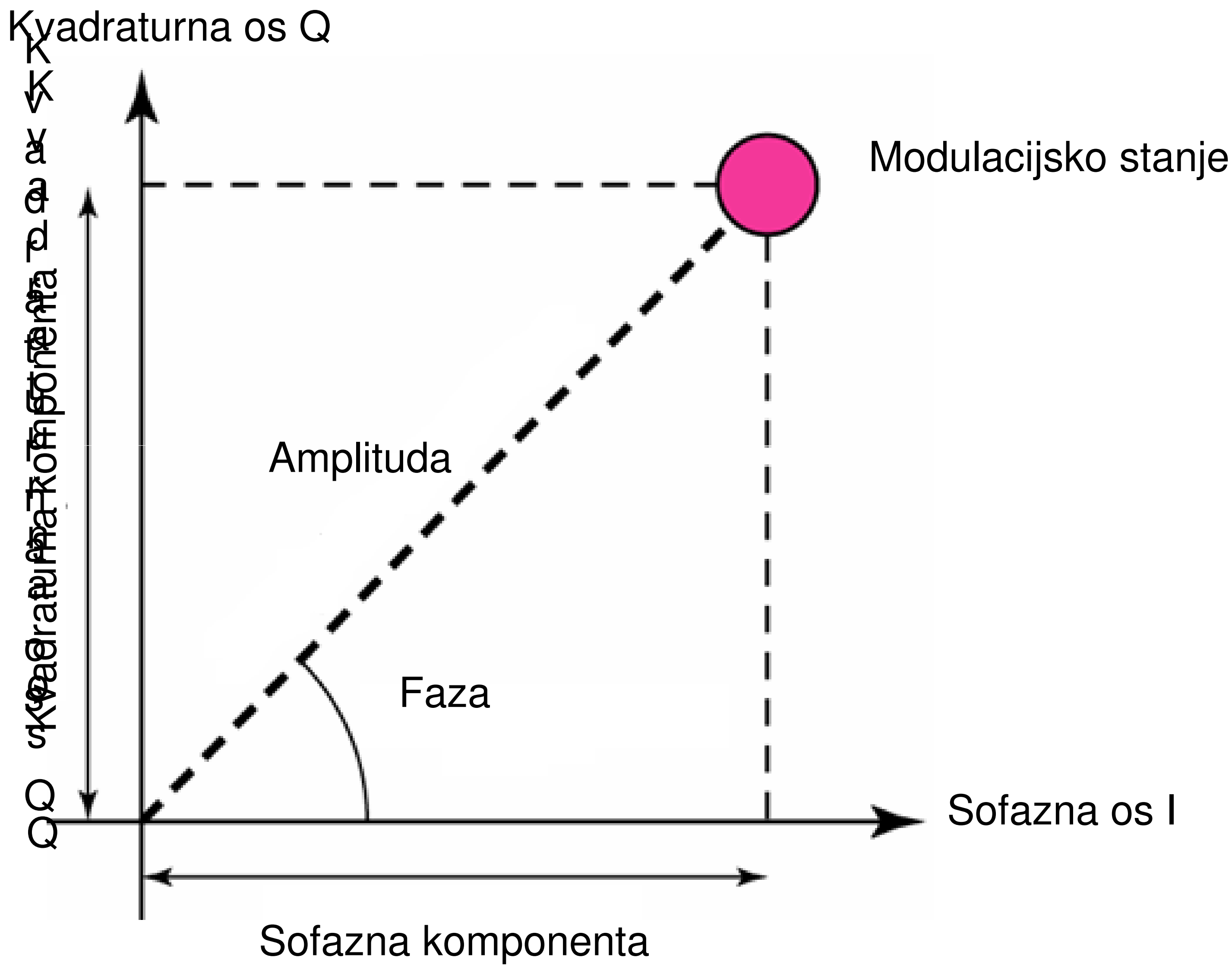


Osnovni pas: digitalni dvonivojski modulacijski signal; impulz predstavlja posamezni bit (0,1)

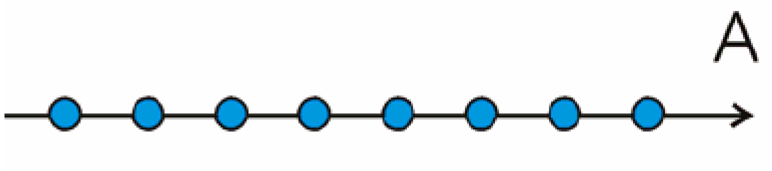
Osnovni pas: digitalni štirinivojski modulacijski signal; simbol predstavlja dvojico bitov (00,01,...)

Moduliran RF signal: 4-ASK/PSK

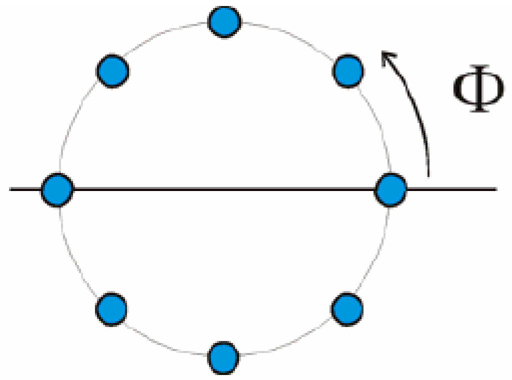
Zasnova konstelacije



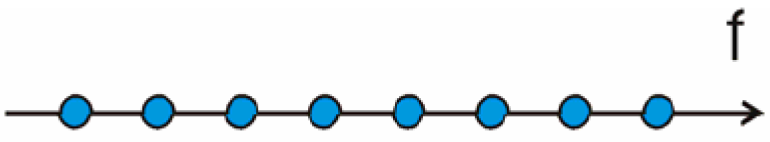
Večnivojske modulacije



Večnivojska ASK: M-ASK
M je število nivojev amplitude



Večnivojska PSK: M-PSK M je število stanj faze



Večnivojska FSK: M-FSK
M je število frekvenc

- Povečanje informacijskega pretoka kot $\log_2 M$
- Povišana občutljivost na šum in motnje

Konstelacija QPSK

Modulacijski signal

Simbol dvojice	Simbol faza	Simbol amplituda
00	225°	1.0
01	135°	1.0
10	315°	1.0
11	45°	1.0

Moduliran RF signal

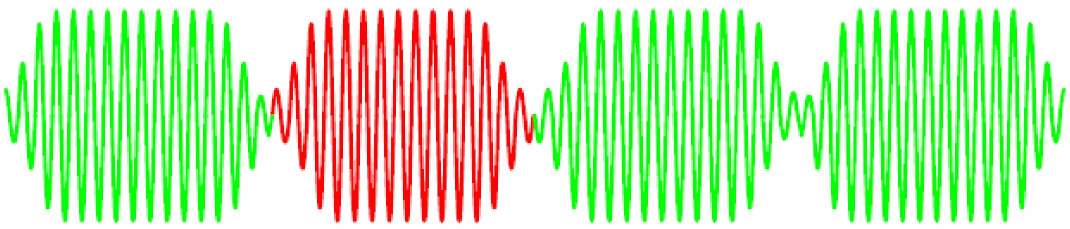
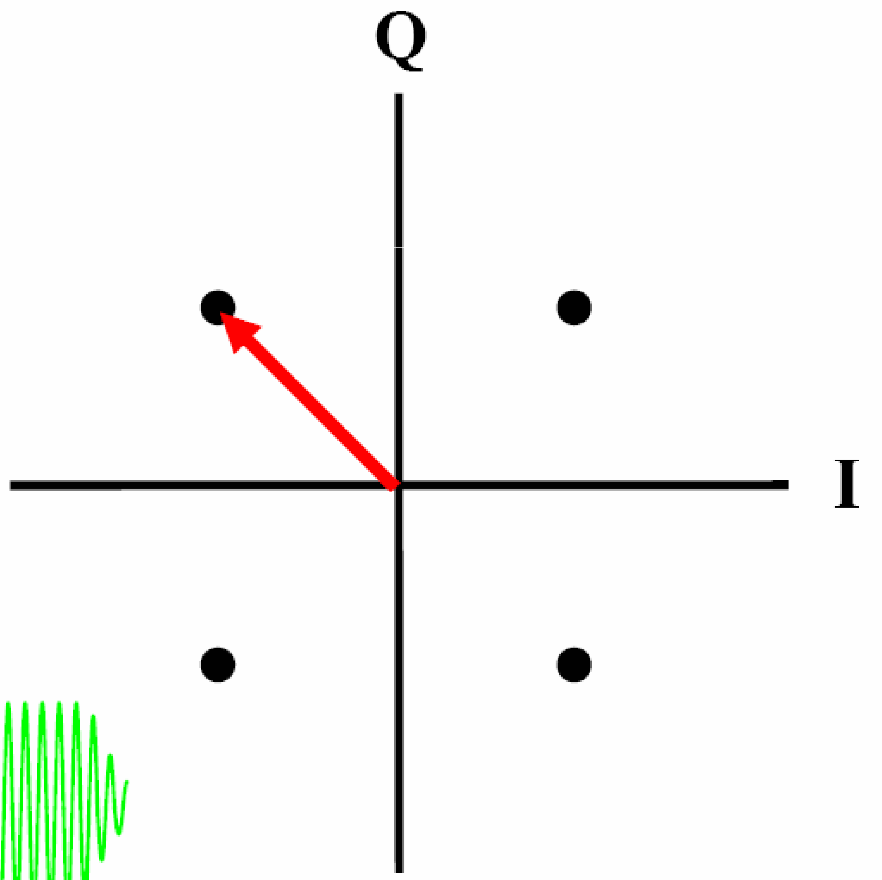
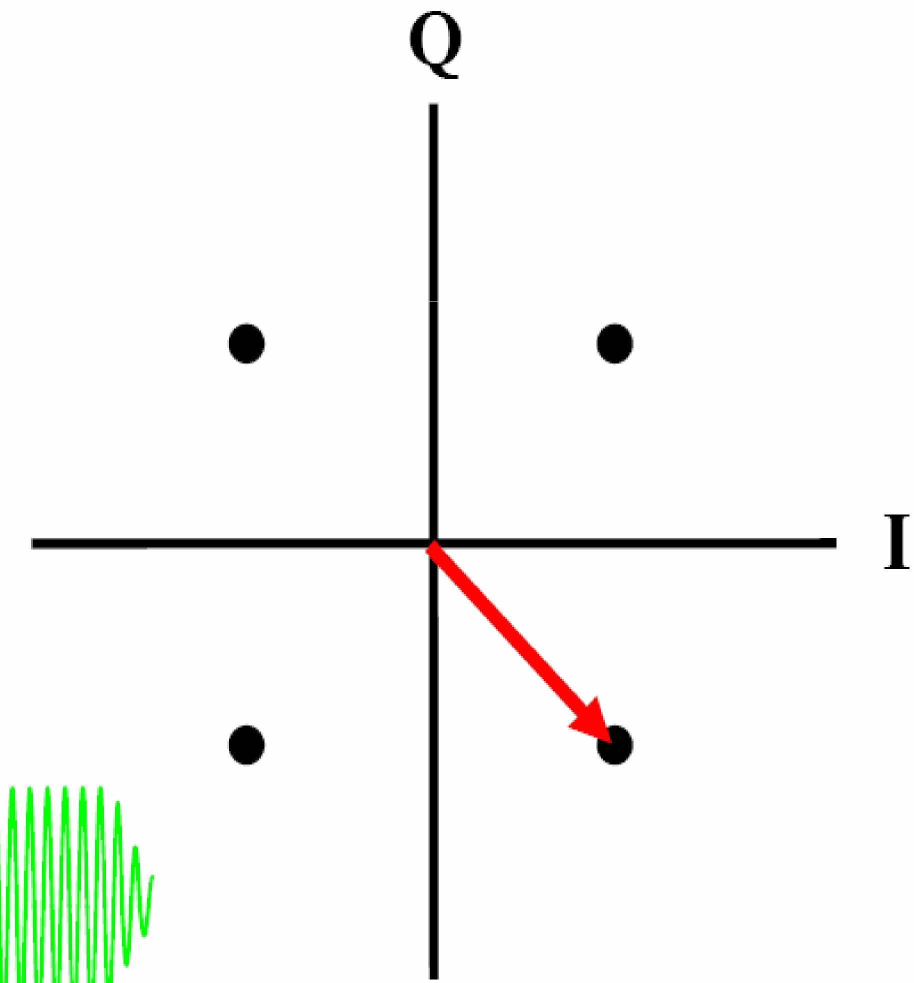


Diagram I - Q



Konstelacija QPSK

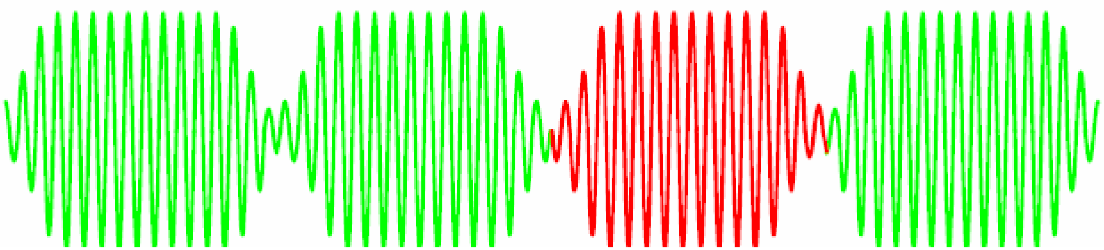
Diagram I - Q



Modulacijski signal

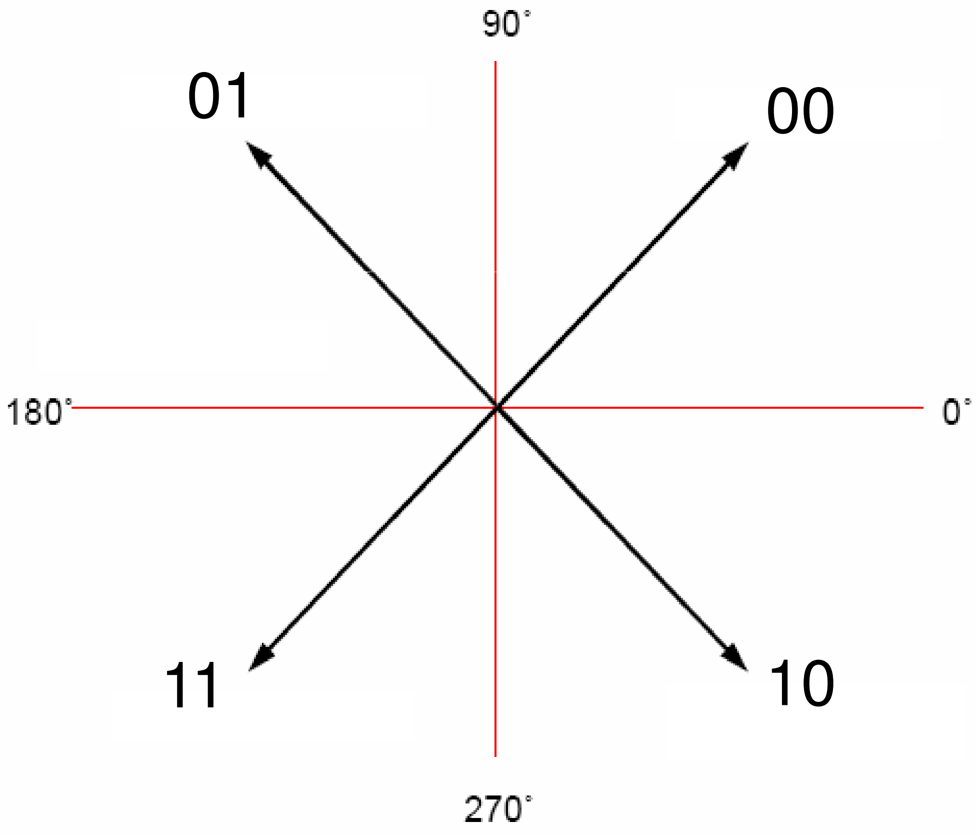
Simboli dvojice	Simbol faza	Simbol amplituda
00	225°	1.0
01	135°	1.0
10	315°	1.0
11	45°	1.0

Moduliran RF signal

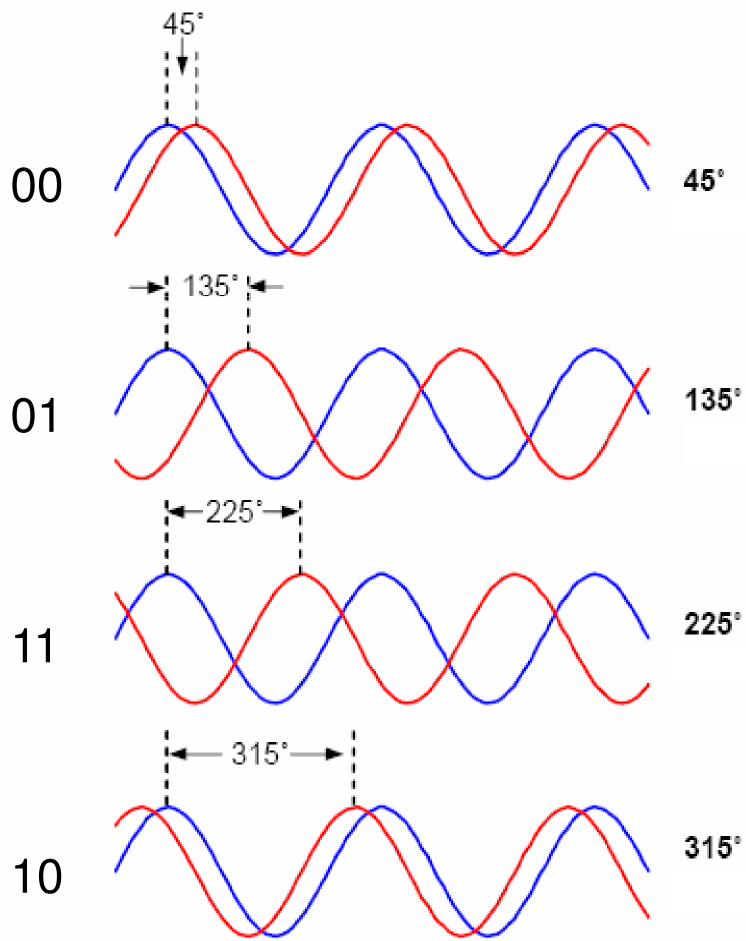


Konstelacija QPSK

Diagram I - Q

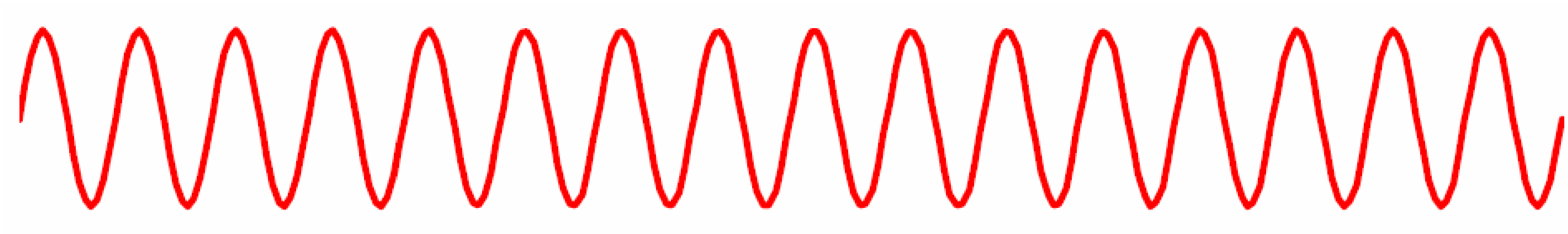


Simbolni signali

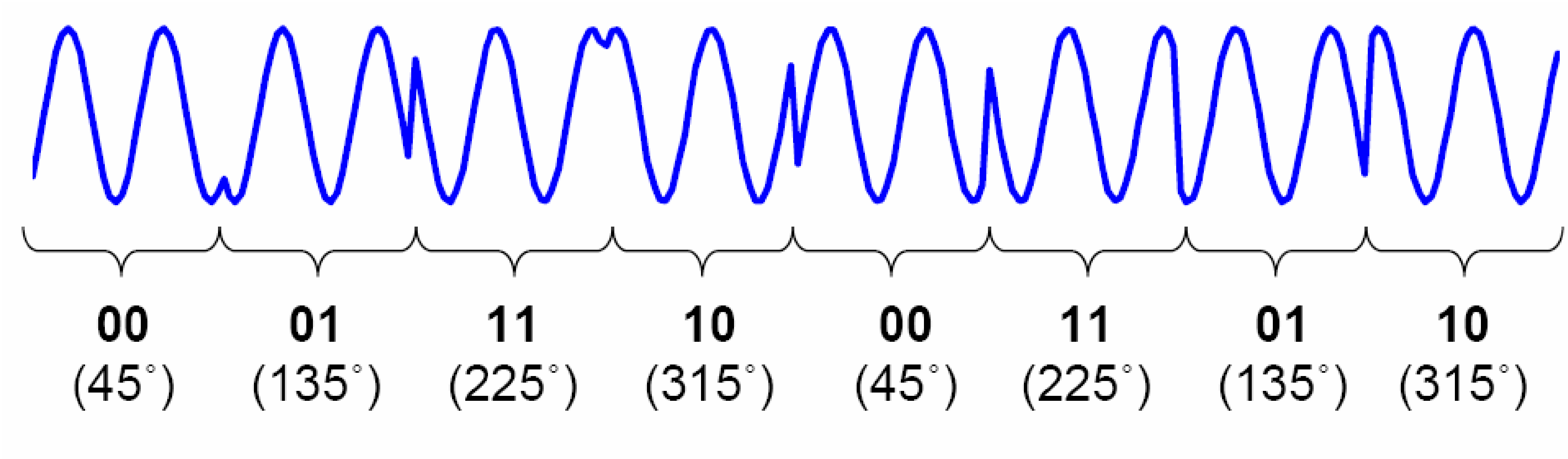


Modulirani QPSK signal

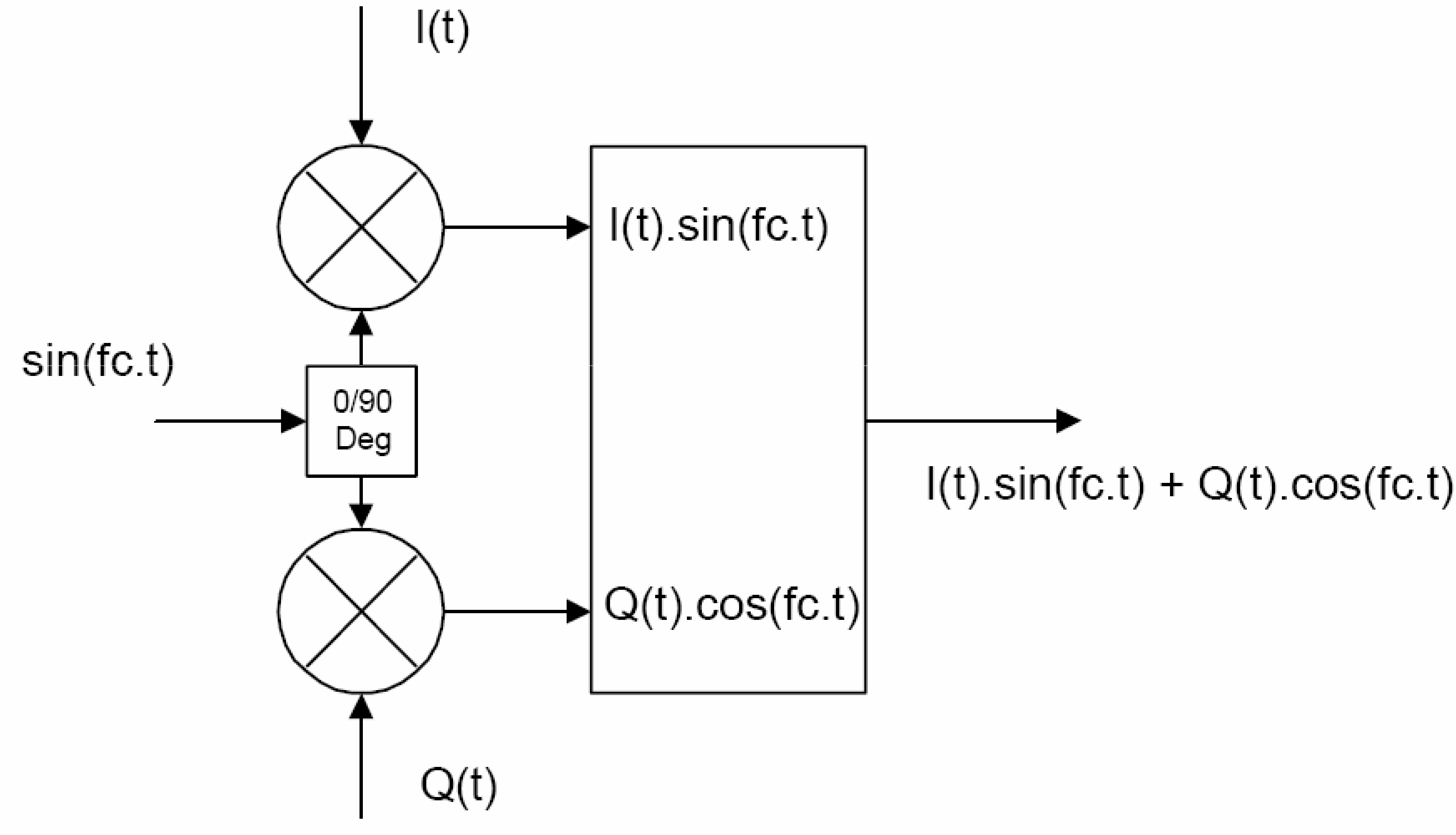
RF nosilnik



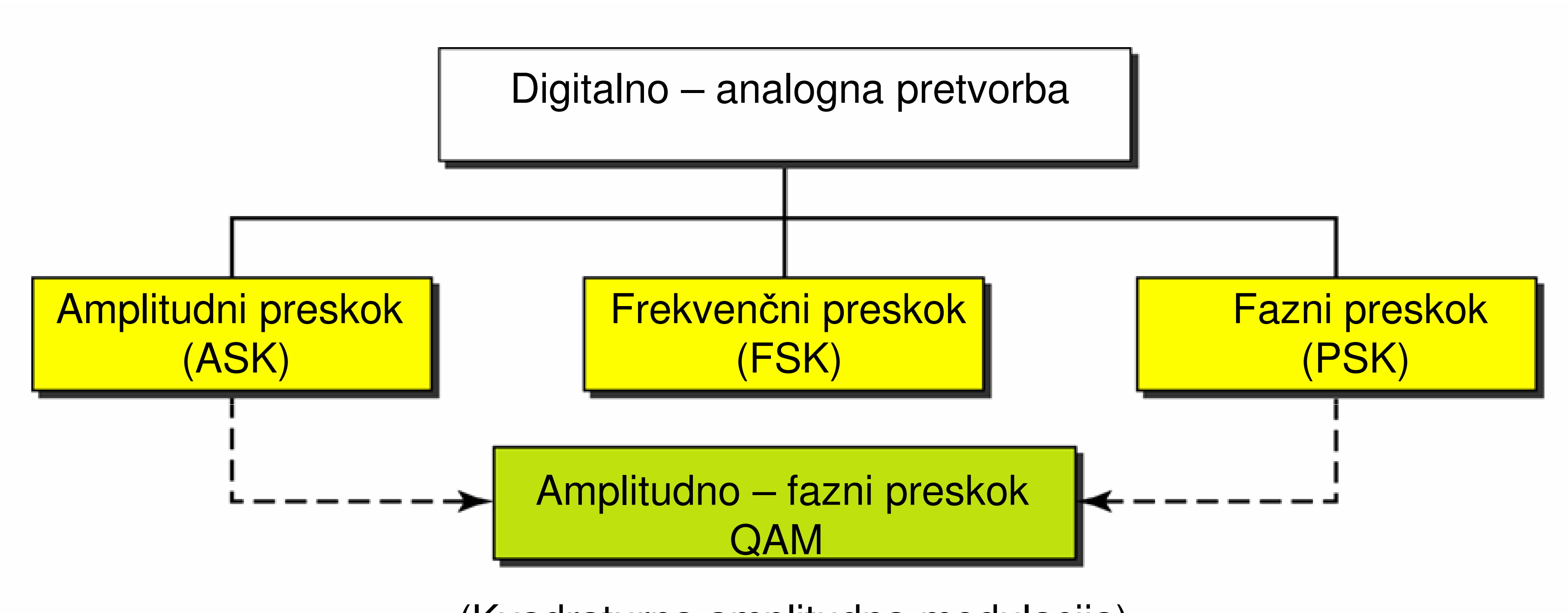
Modulirani RF QPSK signal in bitni niz



Modulacija I - Q



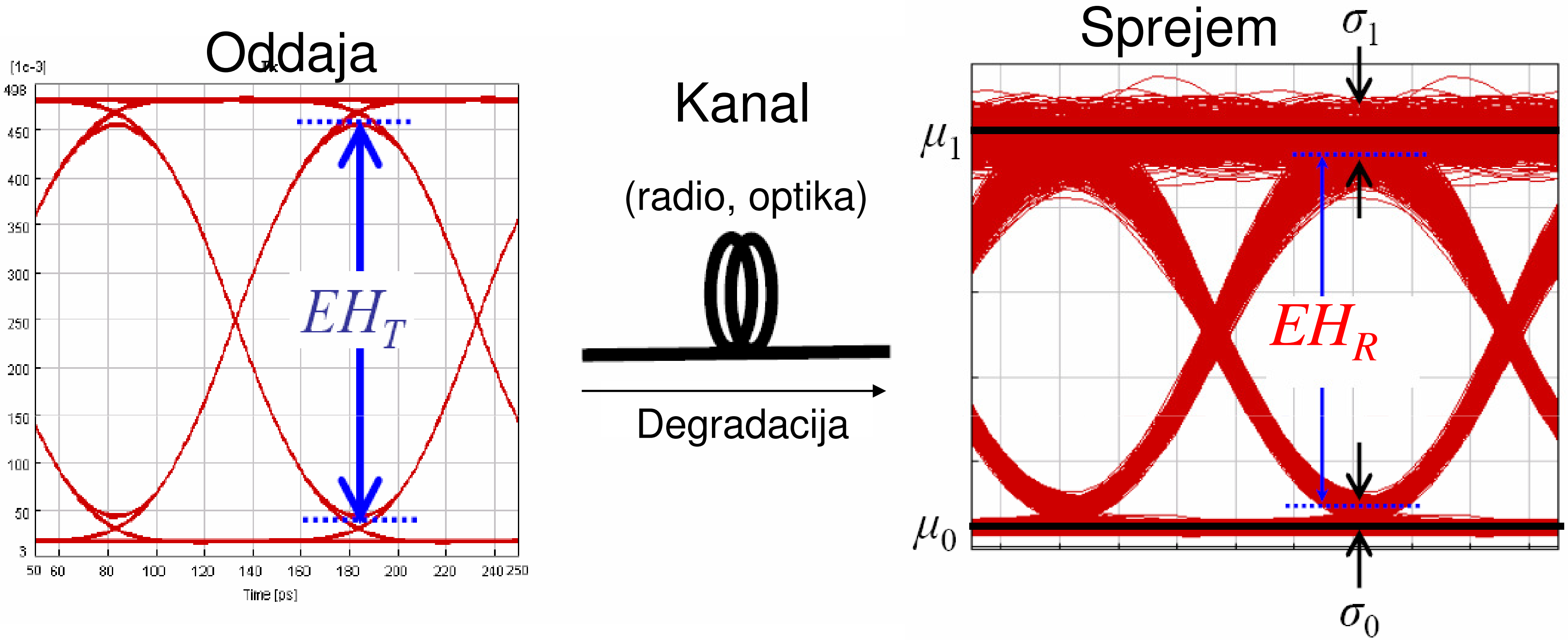
Digitalne modulacije



(Kvadraturna amplitudna modulacija)

Kompleksna modulacija QAM (vključuje QPSK kot 4-QAM) postaja najpogostejša in najbolj perspektivna nova vrsta modulacije v radijskih in optičnih komunikacijskih sistemih

Kvaliteta Q, očesni diagram



$$Q = 0,5\,(S/N)^{1/2}$$

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{2\mathcal{R}P(r-1)}{\Sigma(r+1)}$$

– $\mathcal{R}$ =odzivnost PD – $r = \mu_1/\mu_0$

– P =sprejeta moč – $\Sigma = \sigma_1 + \sigma_0$

EH_T – višina očesa pri oddaji

EH_R - višina očesa pri sprejemu

$$EH = (\mu_1 - \mu_0) - (\sigma_1 + \sigma_0)$$

Definicije, signal in šum

P ... moč signala v W,
Δf ... frekvenčni pas (Hz)
R ... bitna hitrost (pretok)v b/s

$N = N_0\Delta f$ ... moč šuma v W
N_0 ... spektralna gostota šuma
$E_b = P/R$, energija bita v Ws

$S/N = E_bR/N_0\Delta f$

$E_b/N_0 = S\Delta f/NR$

Verjetnost pogreška:

$$Q = 0{,}5\ (S/N)^{1/2}$$

$$BER(Q) = \frac{1}{2}\left[1 - erf\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)\right] \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{\exp(-Q^2/2)}{Q}$$

NRZ

Kapaciteta kanala

Shannon

Bell Labs Journal, 1948

C kapaciteta AWGN kanala v b/s, ki je ni mogoče preseči (R≤C)

$$C = \Delta f \log_2(1 + S/N), \text{ b/s}$$

R bitna hitrost (b/s)

Δf širina prenašanega pasu v Hz

S signalna moč v W

N šumna moč v W

C/Δf spektralni izkoristek kanala v b/s/Hz, ki ga ni mogoče preseči (izkoristek η ≤ C/Δf)

$$C/\Delta f = \log_2(1 + S/N), \text{ b/s/Hz}$$

Pri S/N = 1 dobimo 1b/s/Hz

Shannonov spektralni izkoristek

Spektralni izkoristek η = kapaciteta kanala/širina spektra

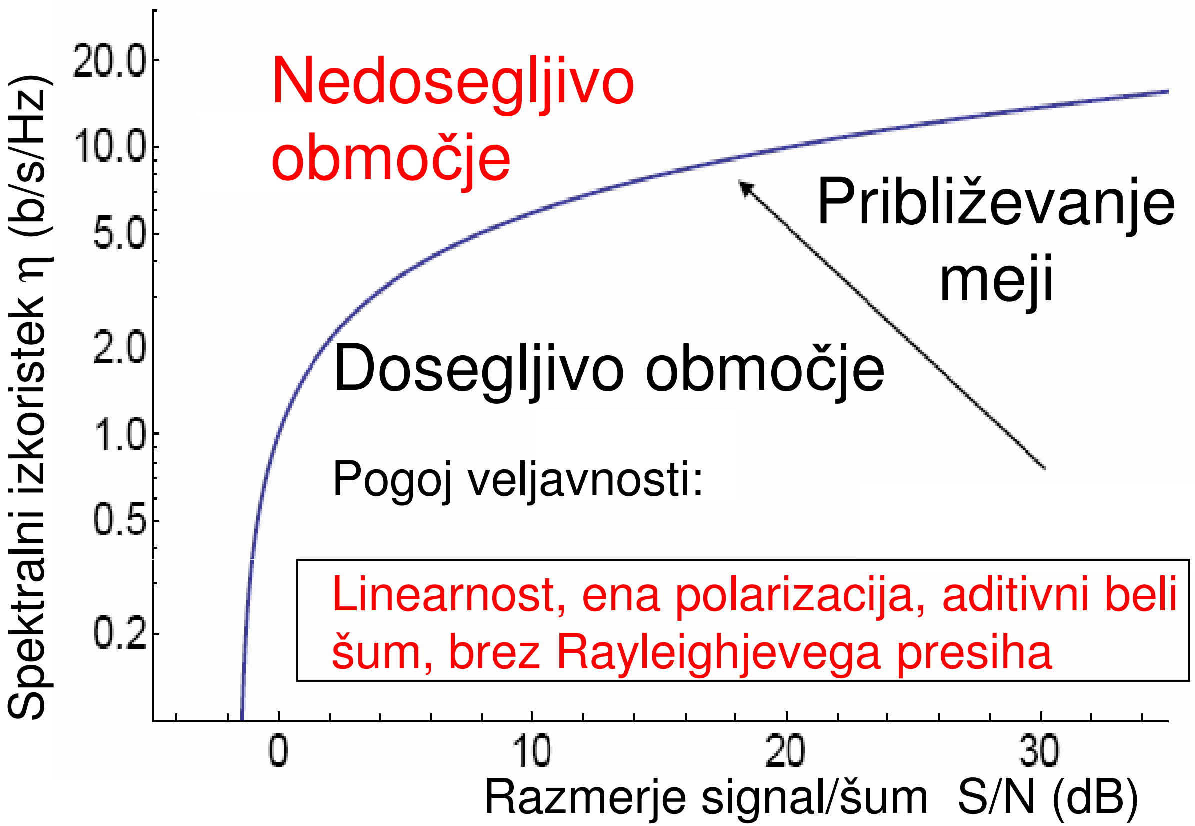
$$\frac{C}{W} = \log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) \qquad [\text{bit/s/Hz}]$$

Pri bitnem pretoku R ≤ C lahko po Shannonu najdemo način kodiranja tako, da je verjetnost napake nična ali minimalna.

Pogoji veljavnosti:

1. Šum AWGN
2. Odsotnost Rayleighjevega presiha
3. Odsotnost nelinearnosti (v optičnem vlaknu)
4. Velja za posamezno polarizacijo.

Shannonova mejna kapaciteta kanala



$$R <= C \quad b/s$$

$$C = \Delta f \log_2(1 + S/N)$$

$$\eta = C/\Delta f$$

$$S = P = E_b R$$ moč signala

$$N = N_0 \Delta f$$

$$C = \Delta f \log_2\left(1 + \frac{P}{N_o \Delta f}\right)$$

Kapaciteta v optiki:

$$C_\infty = \frac{P}{N_o} \log_2 e$$

Omejena!

Načini doseganja večjega sprektralnega izkoristka:

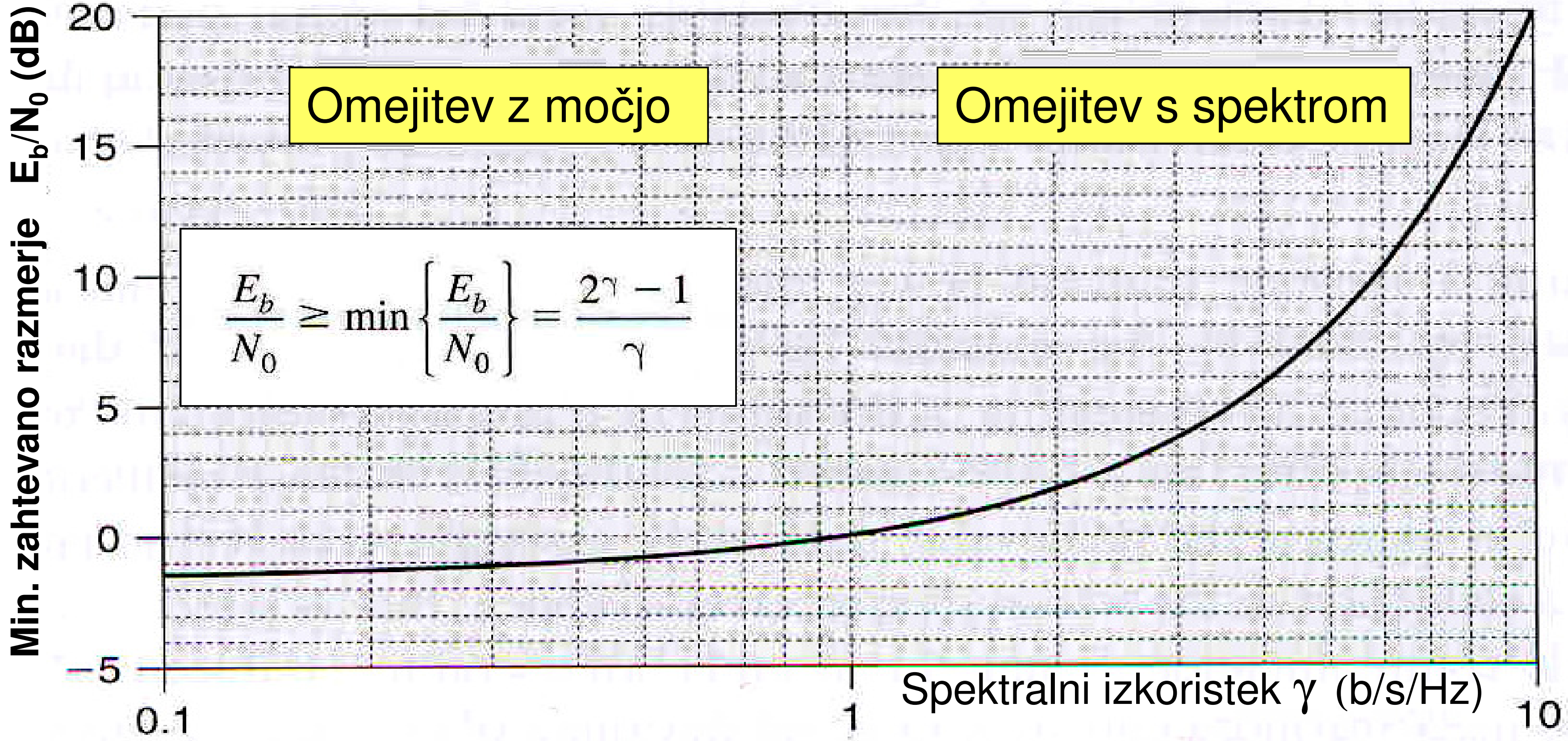
- Večje razmerje S/N, širši spekter
- **Zahtevnejši modulacijski formati**
- Dva polarizacijsko ortogonalna kanala
- OFDM in koherentni sprejem

Kapaciteta AWGN kanala in spektralni izkoristek

$$B \le C = \Delta f \cdot \log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) = \Delta f \cdot \log_2\left(1+\frac{E_b \cdot B}{N_0 \cdot \Delta f}\right)$$

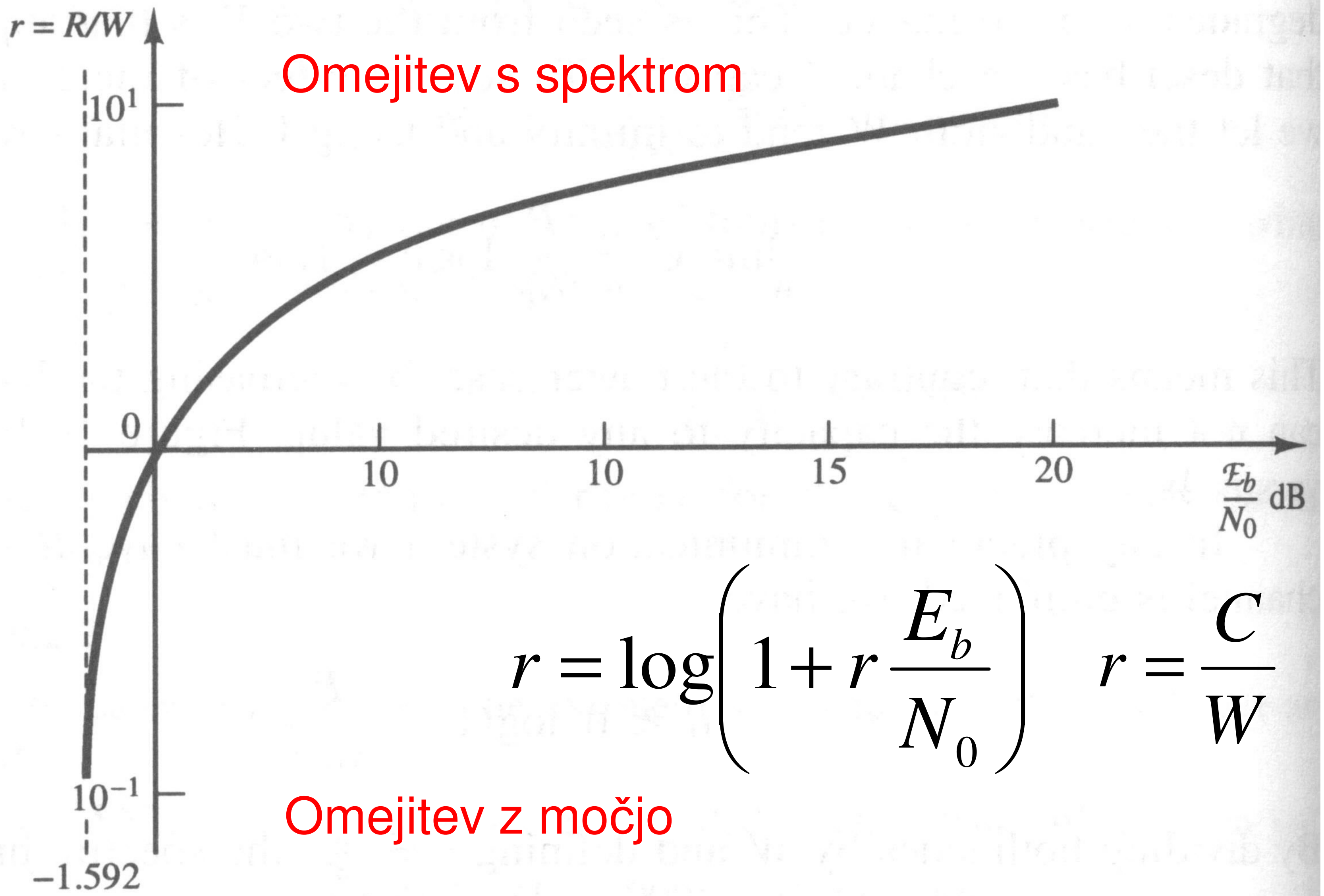
B (b/s) bitna hitrost Δf (Hz) širina pasu **$\gamma = B/\Delta f$ spektralni izkoristek**

E_b (J) energija bita N_0 (W/Hz) gostota šumne moči



$$\frac{E_b}{N_0} \ge \min\left\{\frac{E_b}{N_0}\right\} = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma}$$

Spektralni izkoristek



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

Približevanje Shannonovi kapaciteti

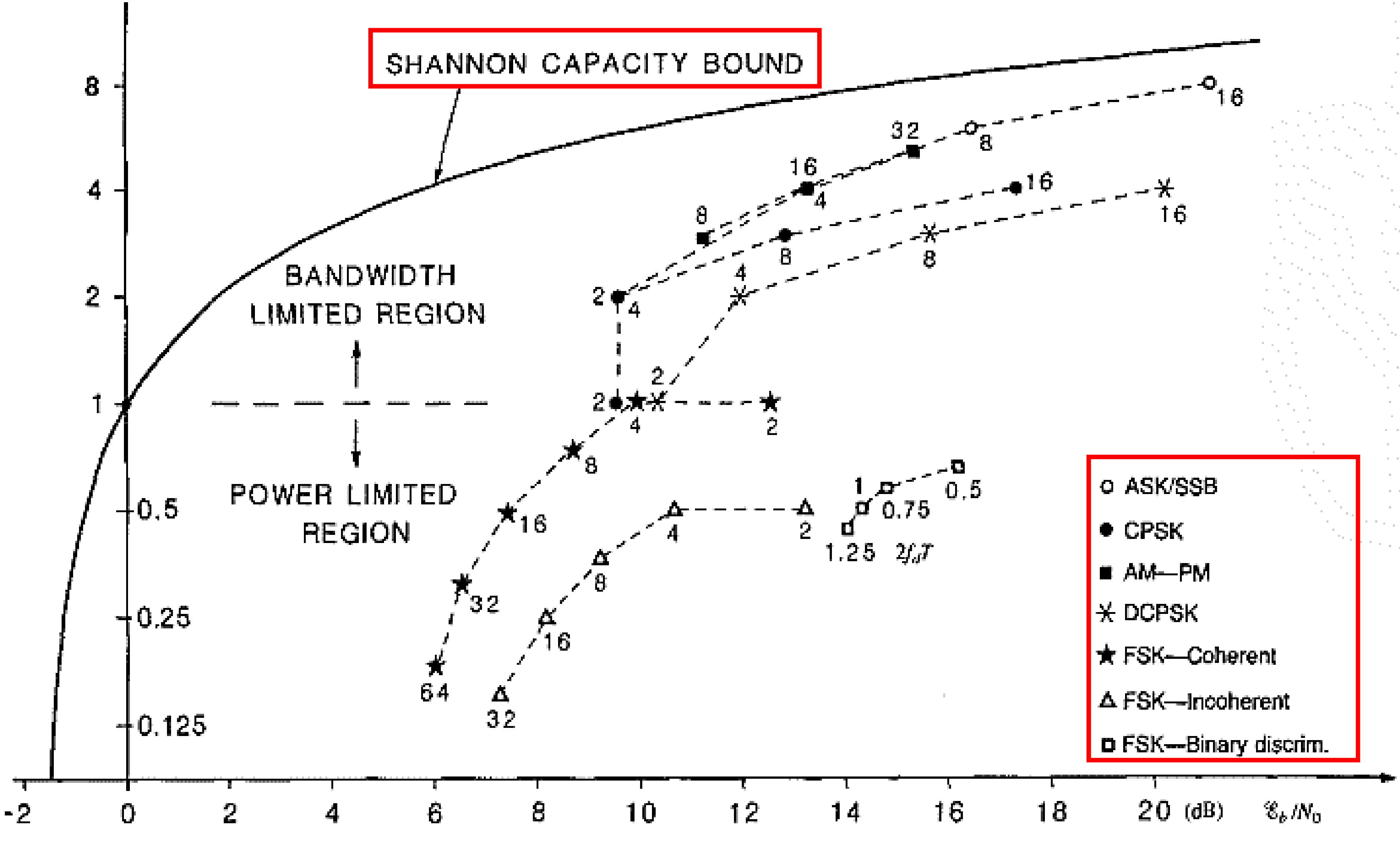
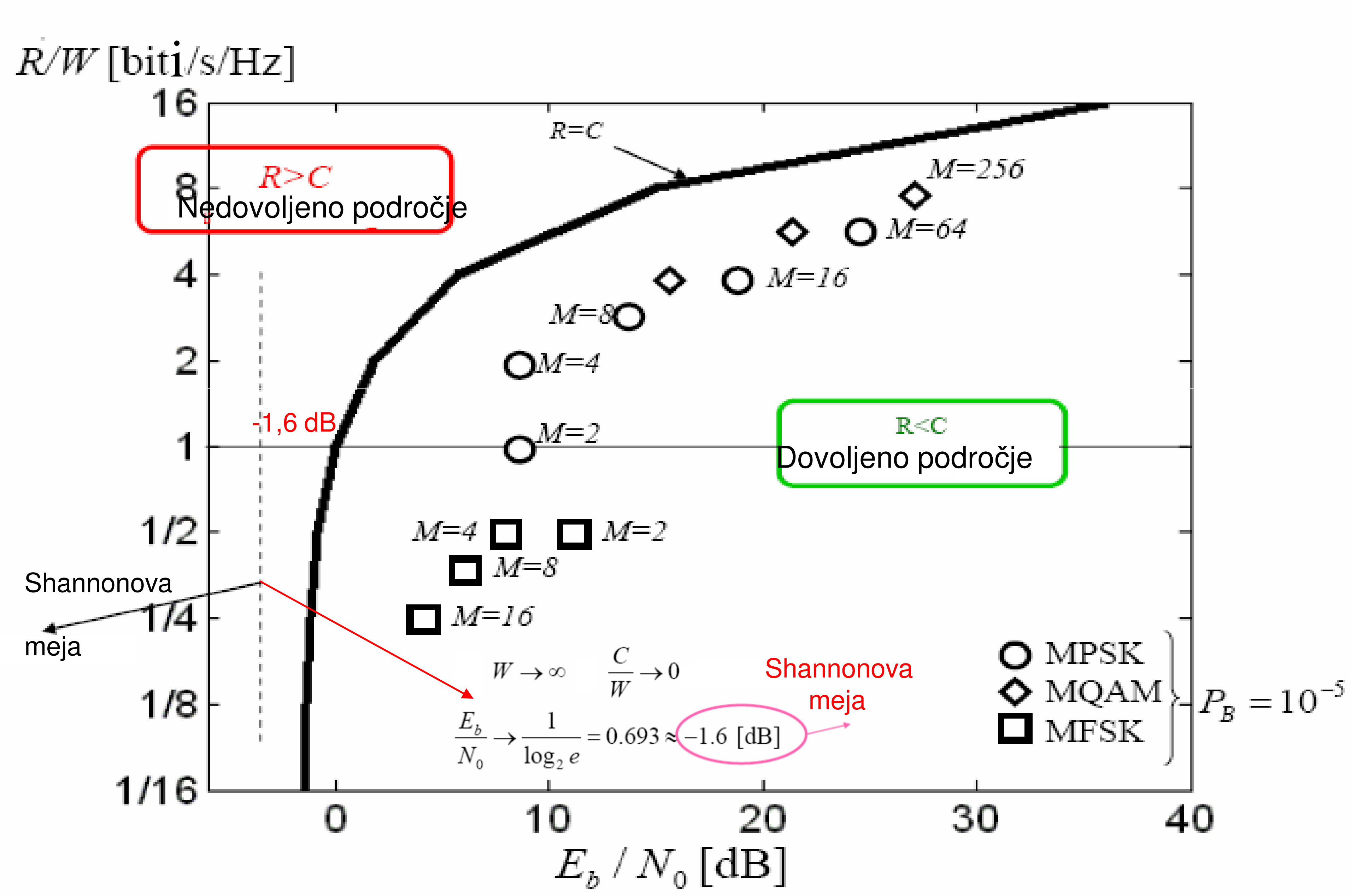
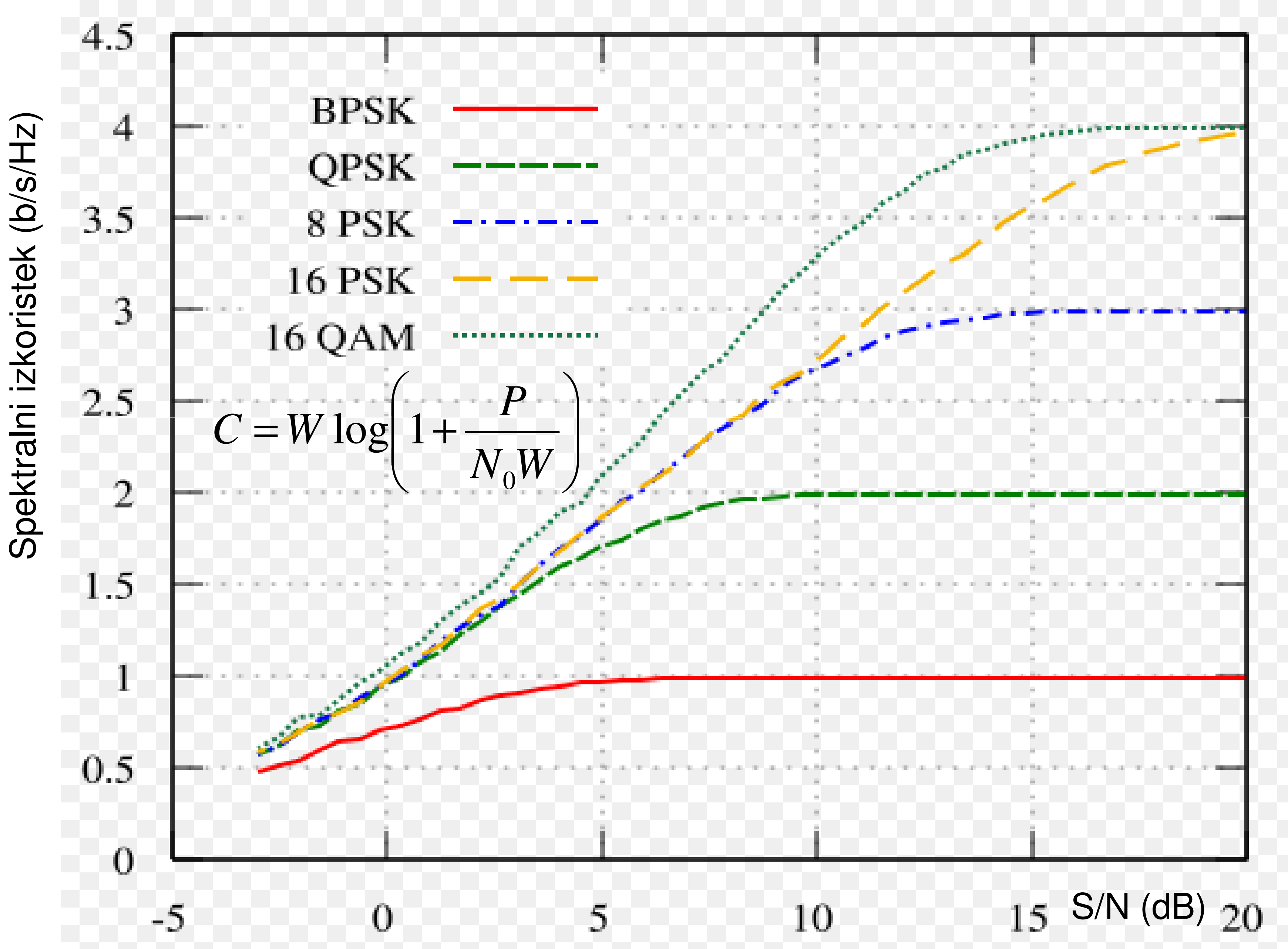


Figure 5.39 Comparison among different modulation schemes on the bandwidth-efficiency plane for a bit error probability $P_b(e) = 10^{-5}$.

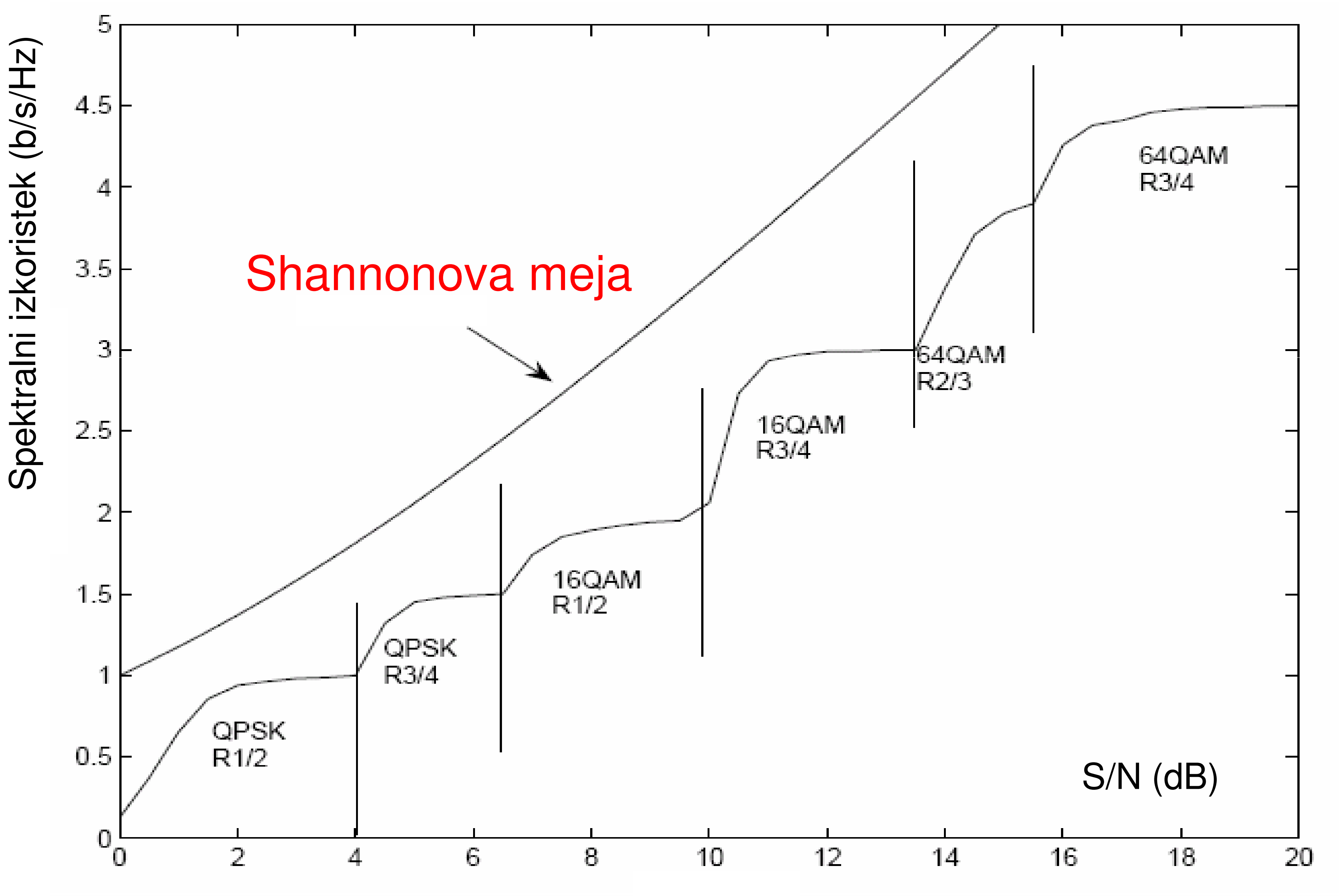
Dosežki digitalnih modulacij



Kapaciteta kanala pri različnih modulacijah



Odvisnost spektralnega izkoristka od adaptivne modulacije in kodiranja (AMC)

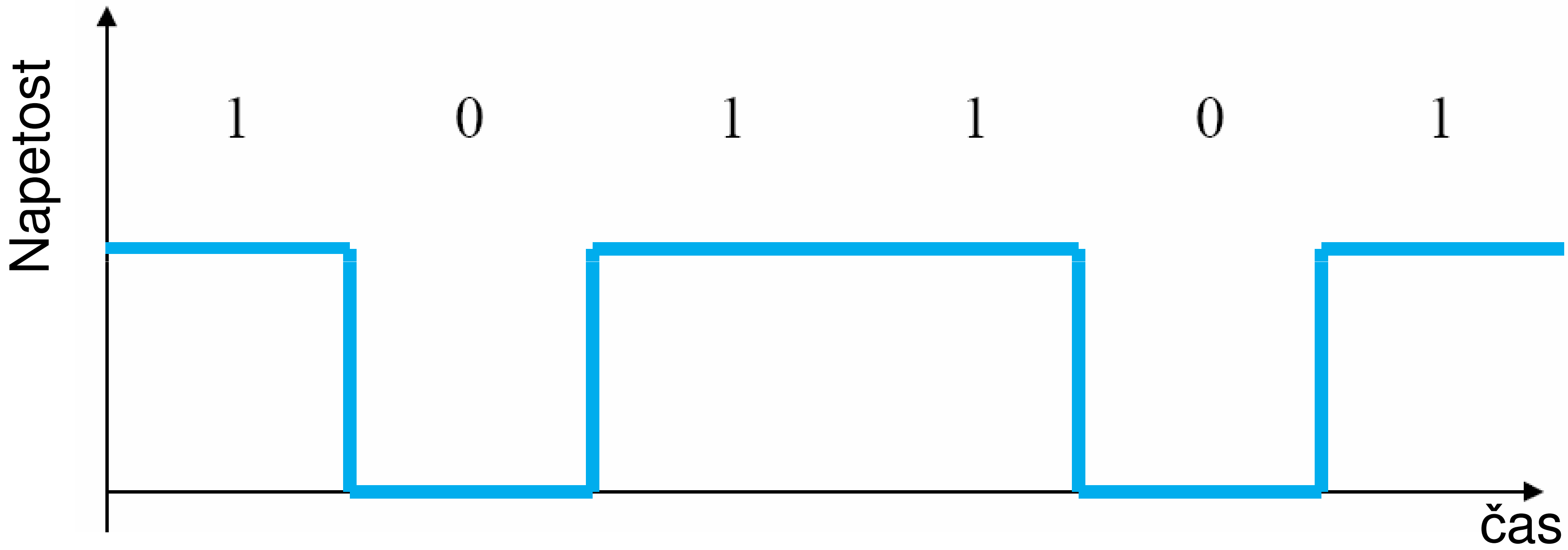


Spektralni izkoristek - odvisnost od FEC kodiranja

Modulation Bits/Sym →	BPSK 1	QPSK OQPSK 2	8PSK 8QAM 3	16QAM/16APSK 4
FEC Code Rate	Efficiency in Bits/Hz at 3 dB Bandwidth			
5/16	0.3125	0.625	0.9375	1.25
0.453	0.453	0.906	1.359	1.812
21/44	0.477	0.95	1.43	1.91
1/2	0.50	1.00	1.50	2.00
3/5	0.60	1.20	1.80	2.40
2/3	0.66	1.33	2.00	2.66
3/4	0.75	1.50	2.25	3.00
4/5	0.80	1.60	2.40	3.20
5/6	0.833	1.667	2.50	3.333
7/8	0.875	1.75	2.625	3.50
0.922	0.922	1.844	2.766	3.688
0.95	0.95	1.90	2.85	3.80

Modulacije

Binarni signal

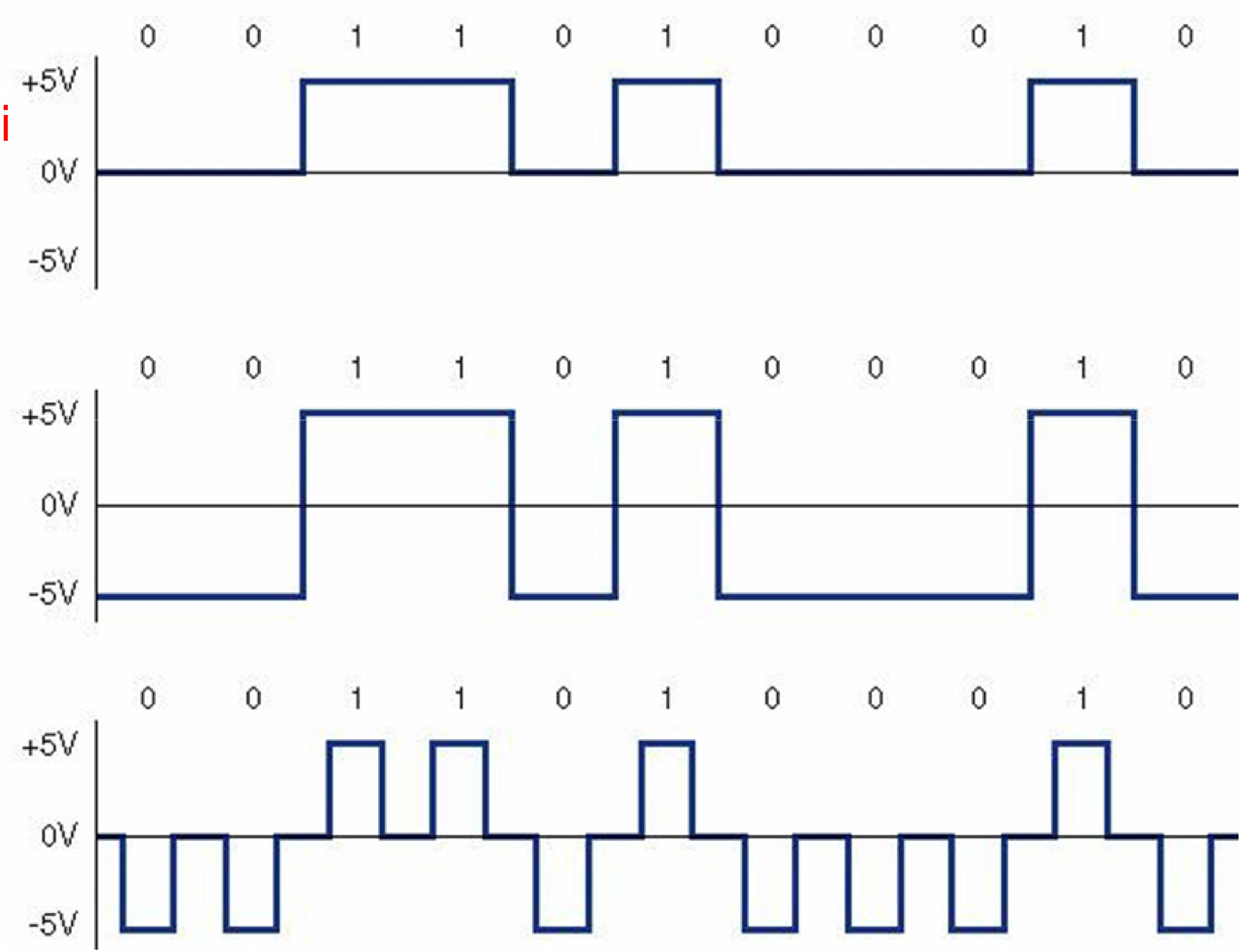


Binarni signali v osnovnem pasu

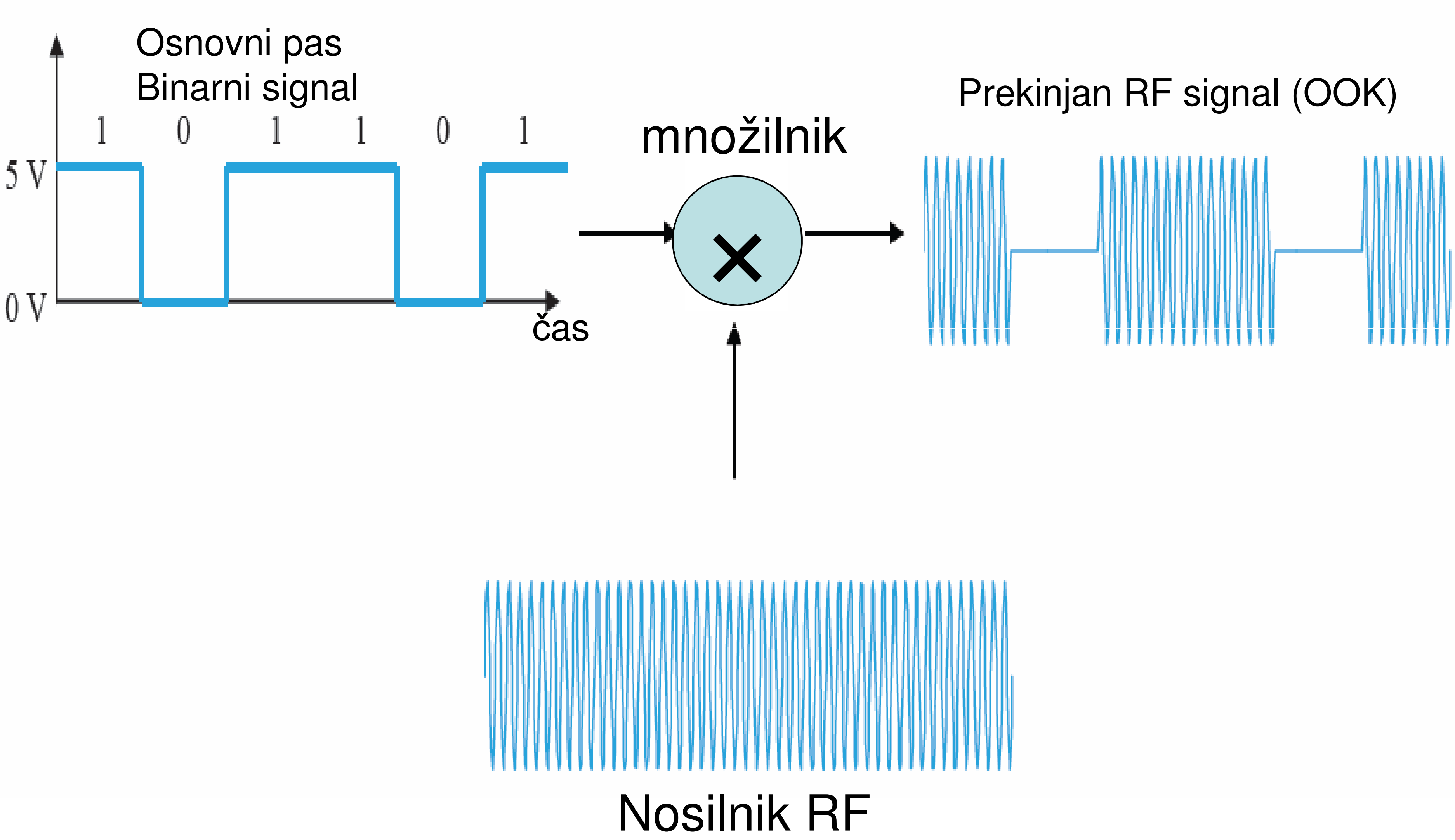
Unipolarni NRZ

Bipolarni NRZ

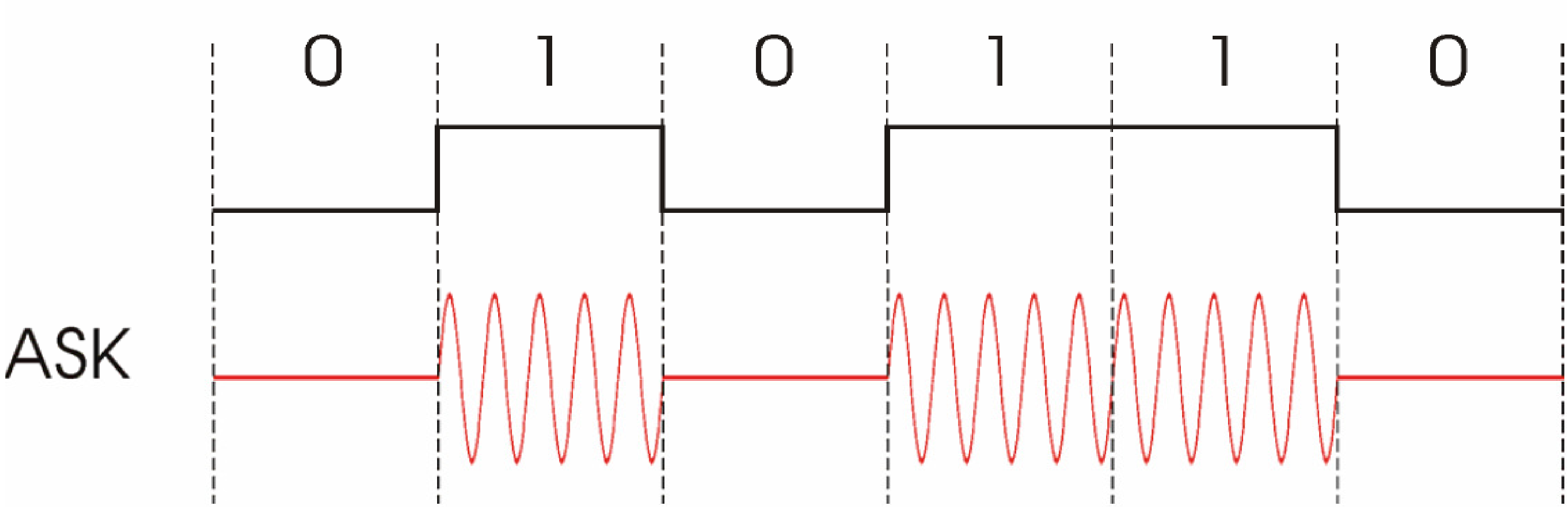
Bipolarni RZ



Modulacija OOK (ASK)



Amplitudna (ASK)

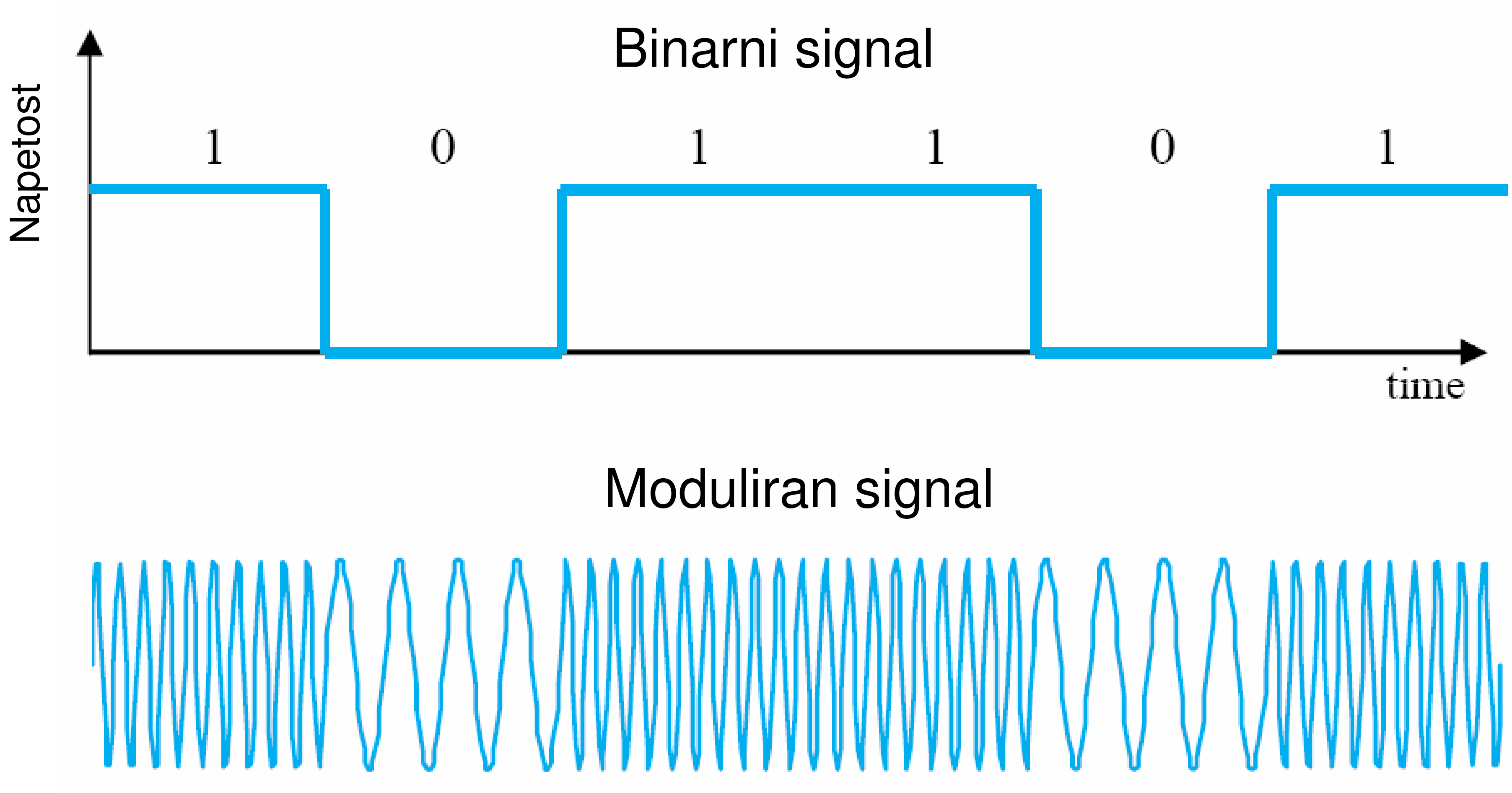


$$s(t) = \begin{cases} A_0 \cos(2\pi f_c t), & \text{binary } 0 \\ A_1 \cos(2\pi f_c t), & \text{binary } 1 \end{cases}$$

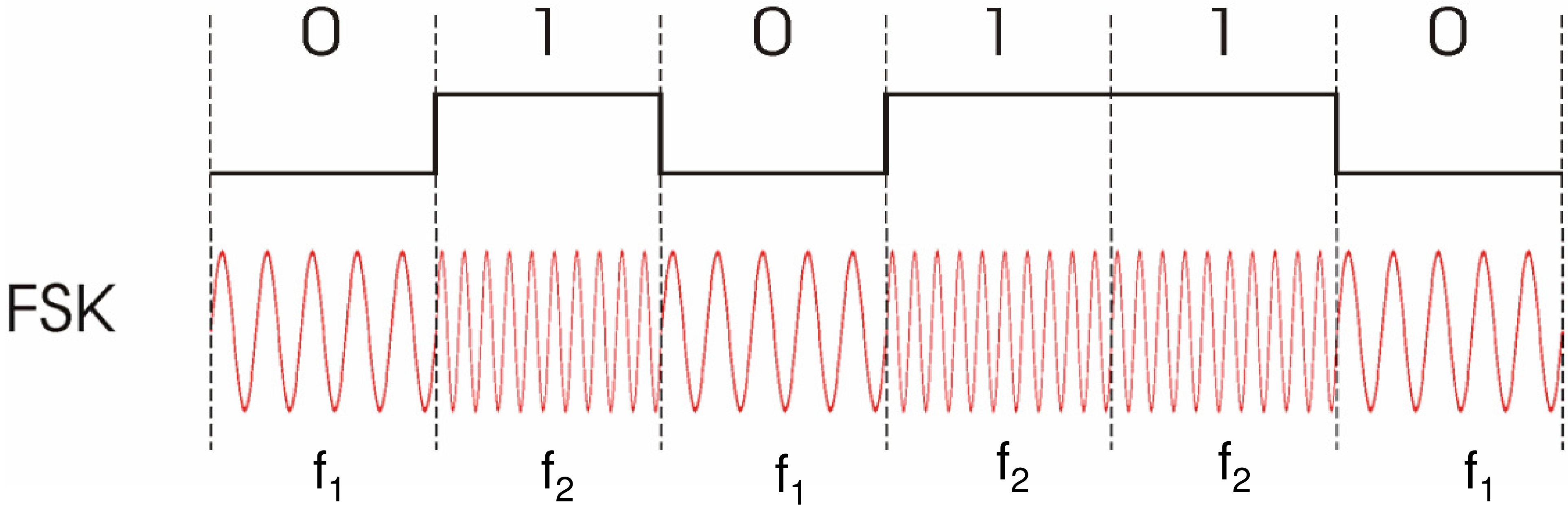
$$= \begin{cases} 0, & \text{binary } 0 \\ A\cos(2\pi f_c t), & \text{binary } 1 \end{cases}$$

Prednost: preprostost
Pomanjkljivost: velika občutljivostna šum in motnje
Uporaba: optične komunikacije

Modulacija FSK



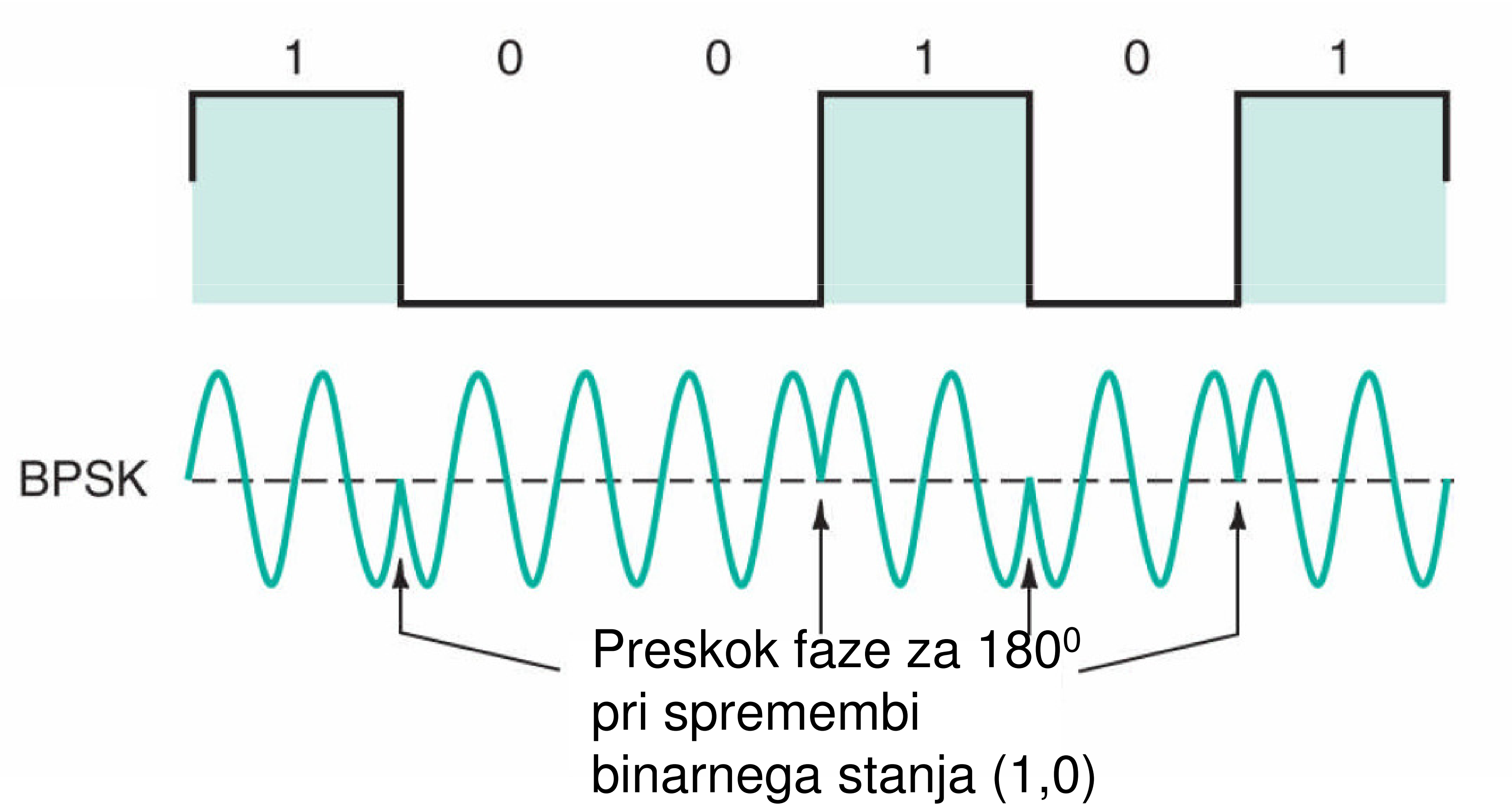
Frekvenčna (FSK)



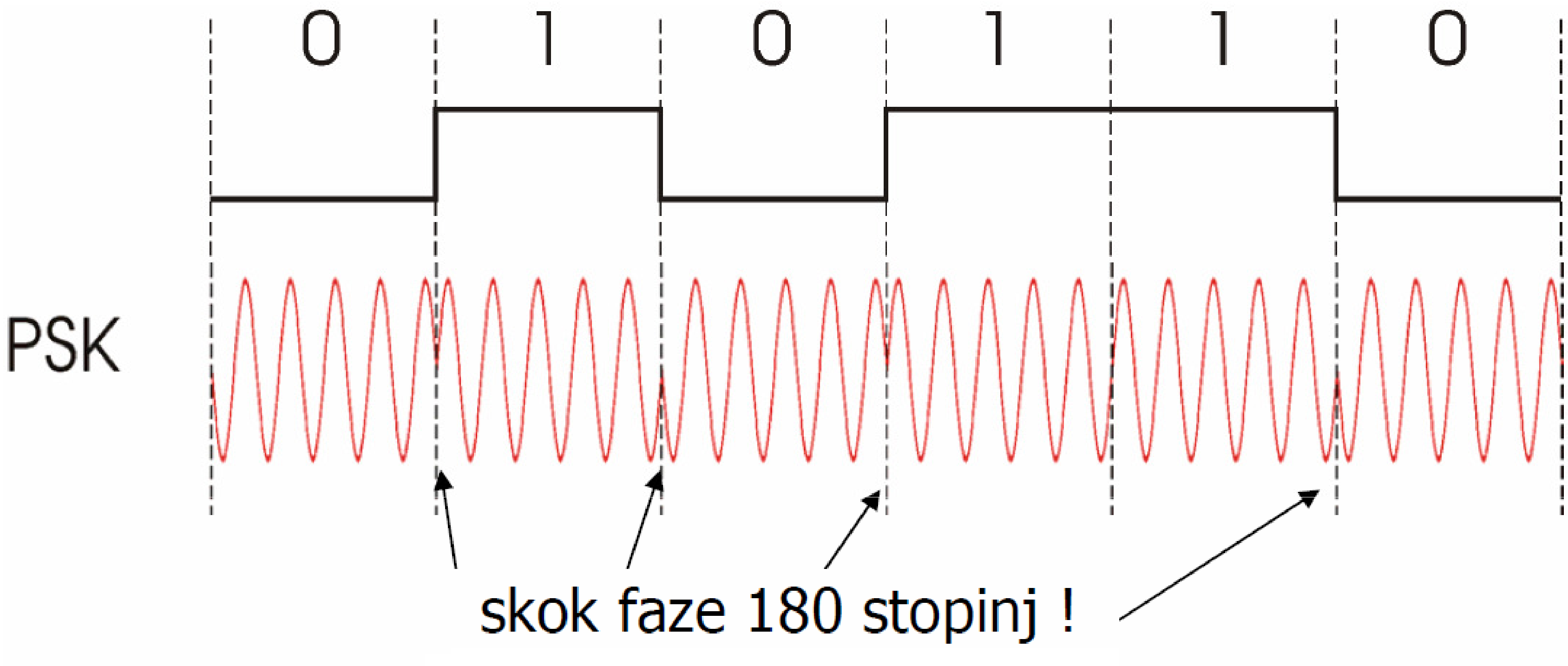
$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_1 t), & \text{binarna } 0 \\ A\cos(2\pi f_2 t), & \text{binarni } 1 \end{cases}$$

Prednost; velika odpornost na šum in motnje, neobčutljivost na spremembo frekvence in Dopplerjev pomik (100Hz)
Pomanjkljivost: podvojen spekter v primerjavi z ASK, nizek spektralni izkoristek

Diferenčna BPSK



Fazna (PSK)



$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t), & \text{binarni } 1 \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi), & \text{binarna } 0 \end{cases}$$

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t), & \text{binarni } 1 \\ -A\cos(2\pi f_c t), & \text{binarna } 0 \end{cases}$$

Prednost; velika odpornost na šum in motnje in enaka širina spektra kot pri ASK, neobčutljivost na nelinearne pojave
Pomanjkljivost: zahtevnejša detekcija kot pri ASK ali FSK

Signali ASK/PSK

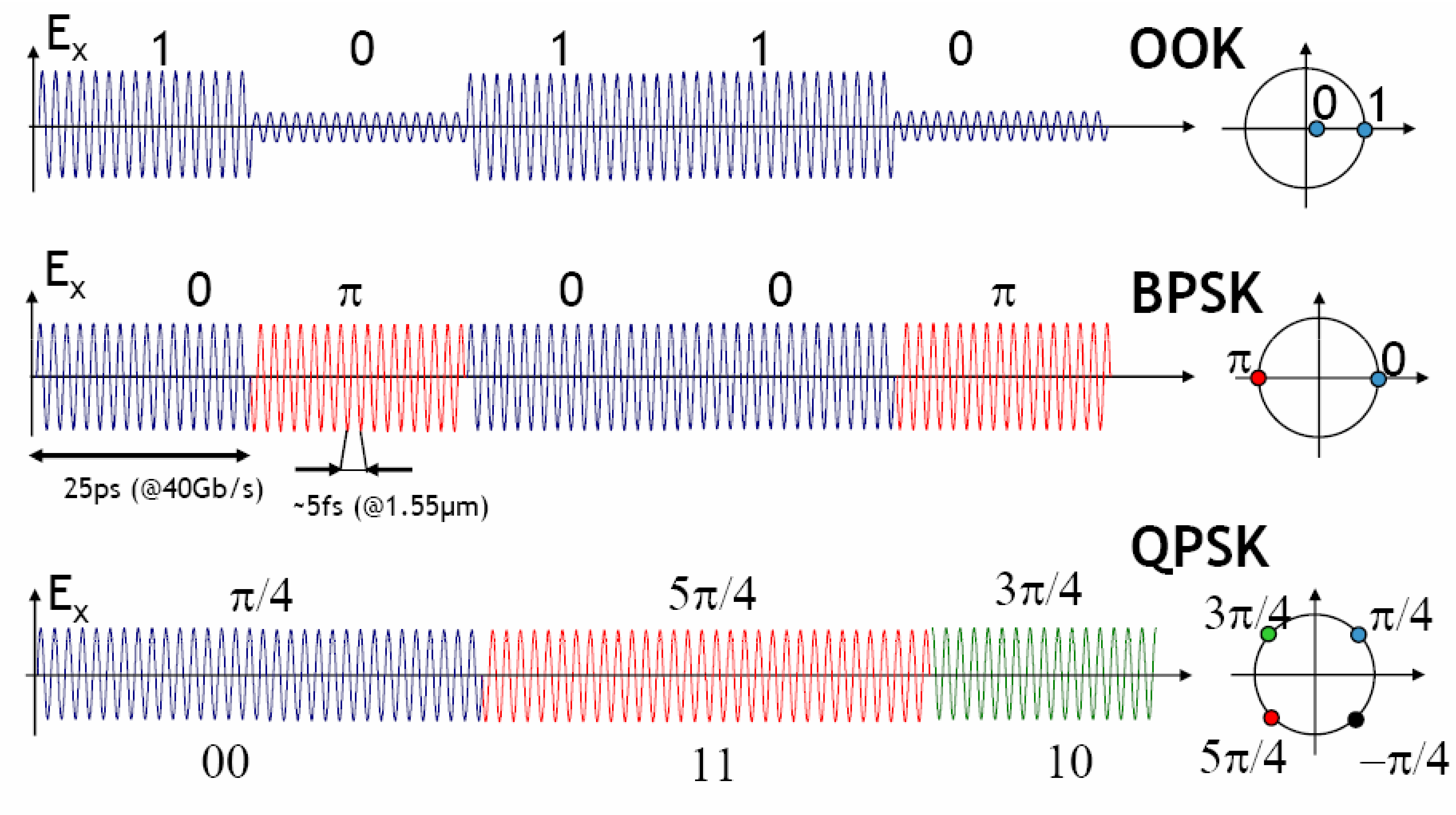
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(\omega_0 t + \phi_i(t))$$

$$i = 1,2,\ldots, M \quad \phi_i(t) = 2\pi i / M,$$

$$0 \le t \le T$$

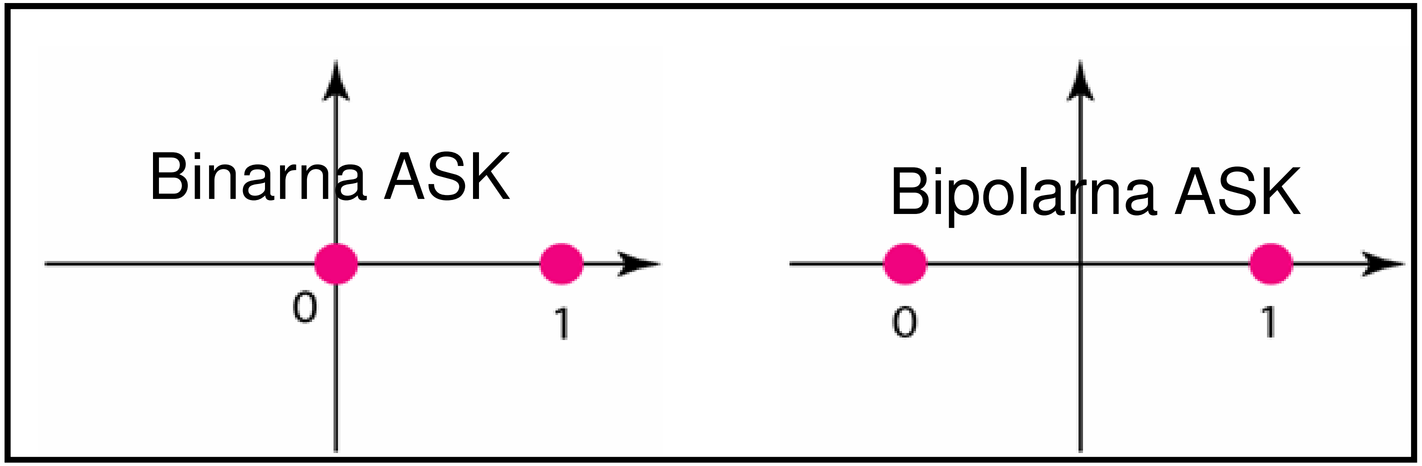
Osnovni modulacijski formati v OK

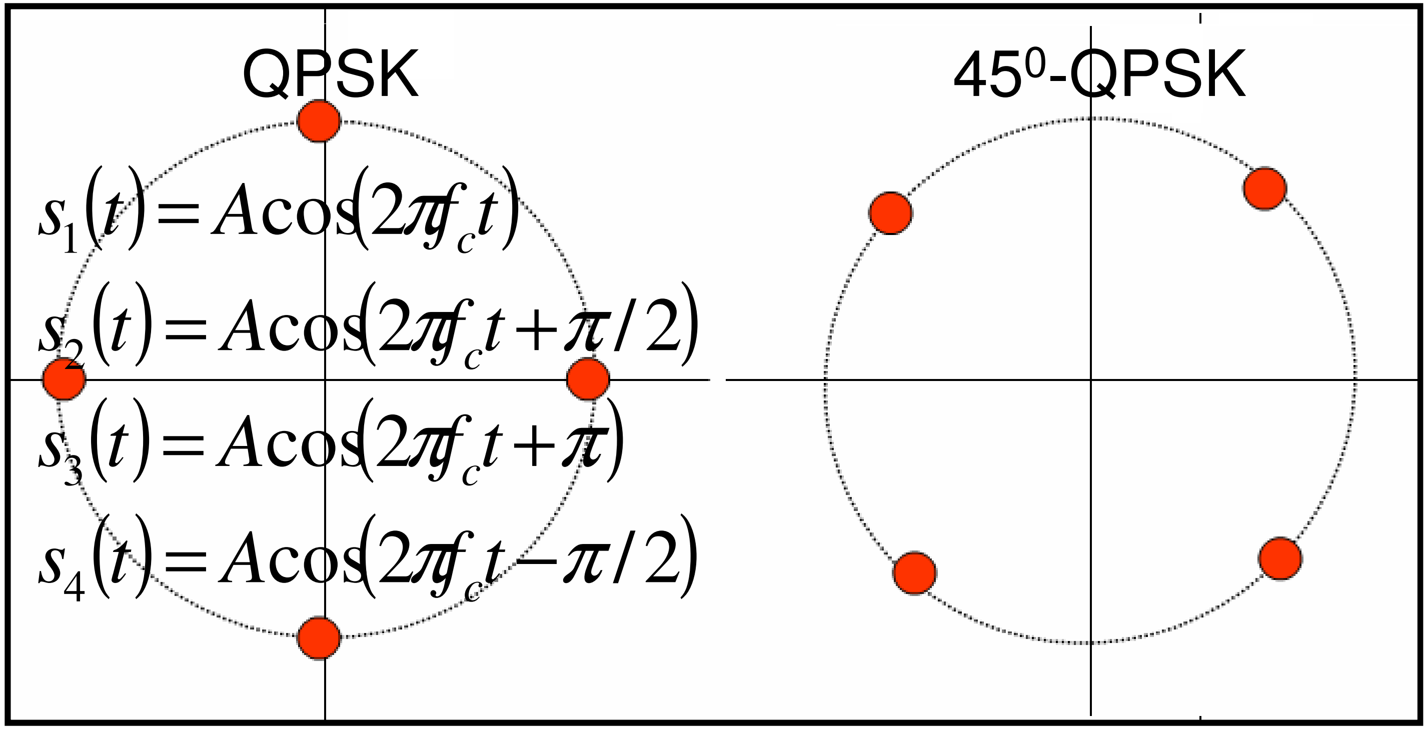
Svetloba ν = 193 THz



NFOEC 2009, Alcatel Lucent

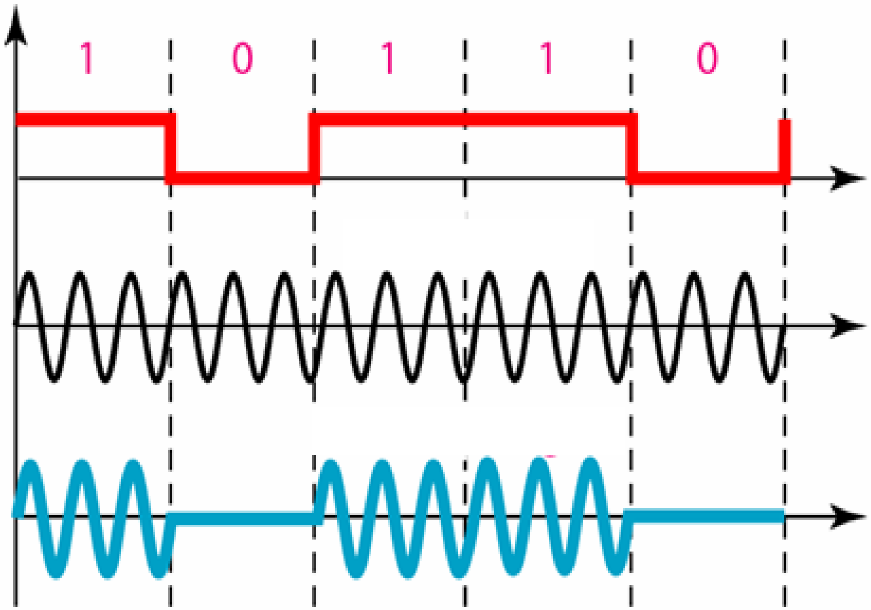
Najpreprostejši modulacijski formati

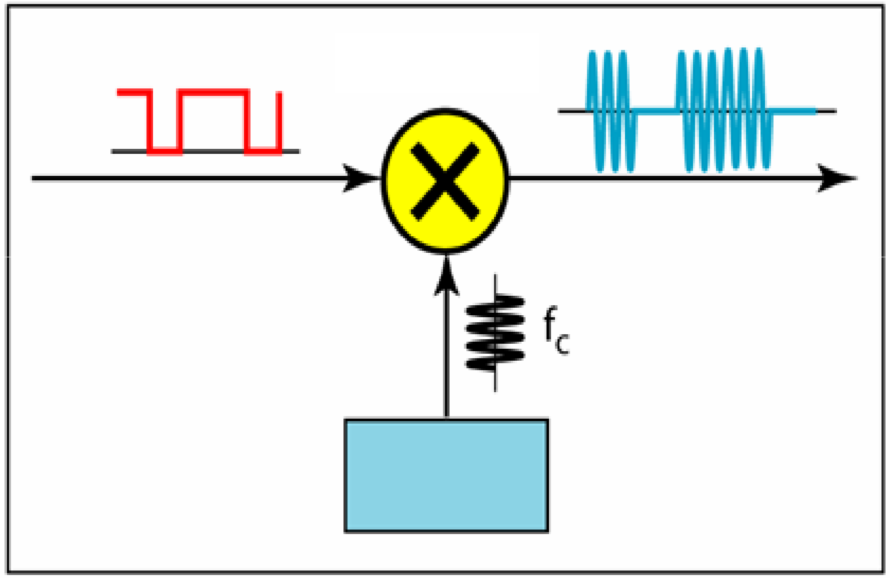




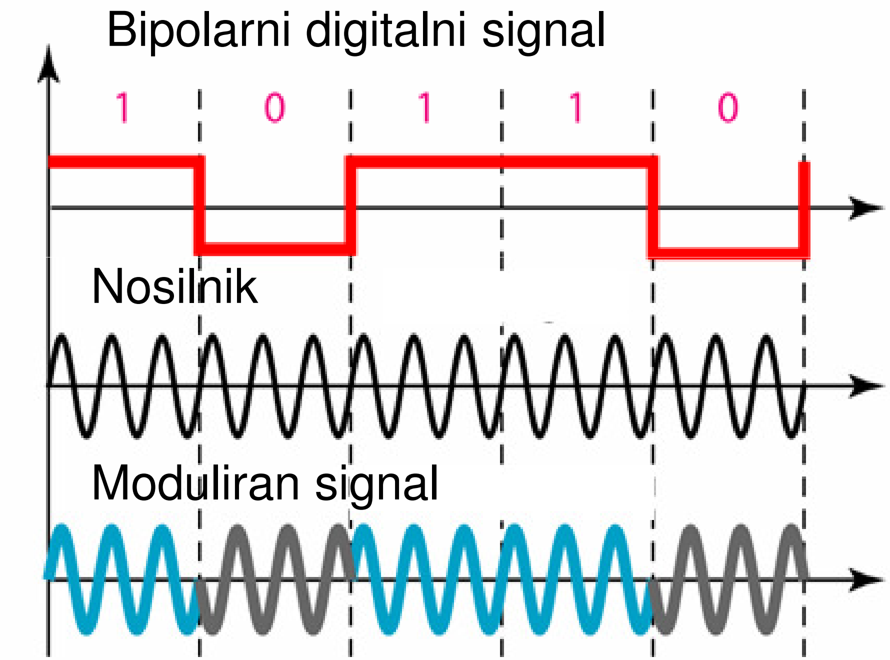
$$s_1(t) = A\cos(2\pi f_c t)$$
$$s_2(t) = A\cos(2\pi f_c t + \pi/2)$$
$$s_3(t) = A\cos(2\pi f_c t + \pi)$$
$$s_4(t) = A\cos(2\pi f_c t - \pi/2)$$

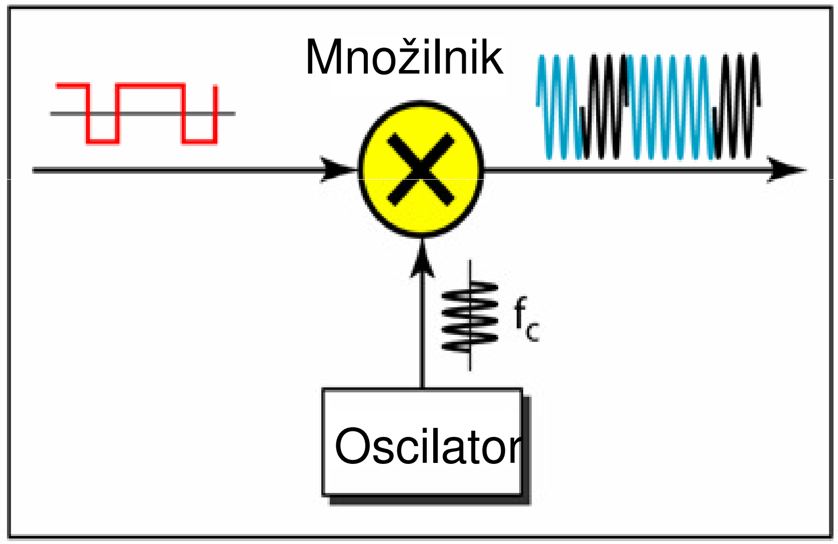
Binarna ASK



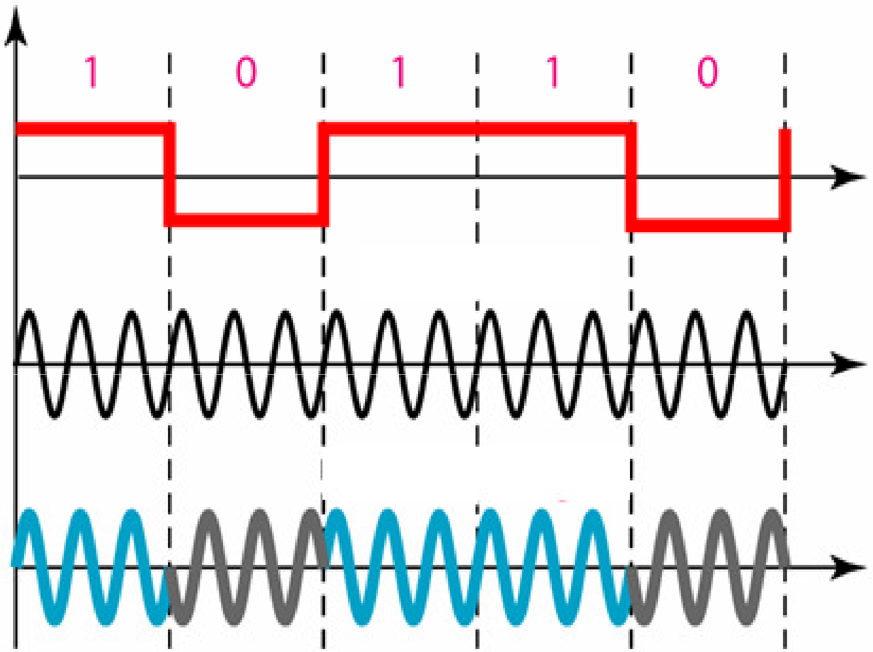


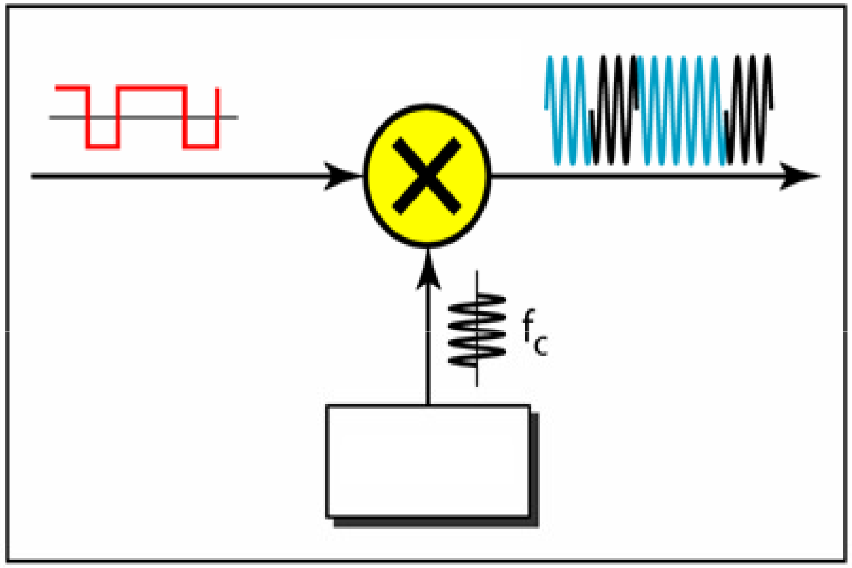
Bipolarna ASK (B-ASK)



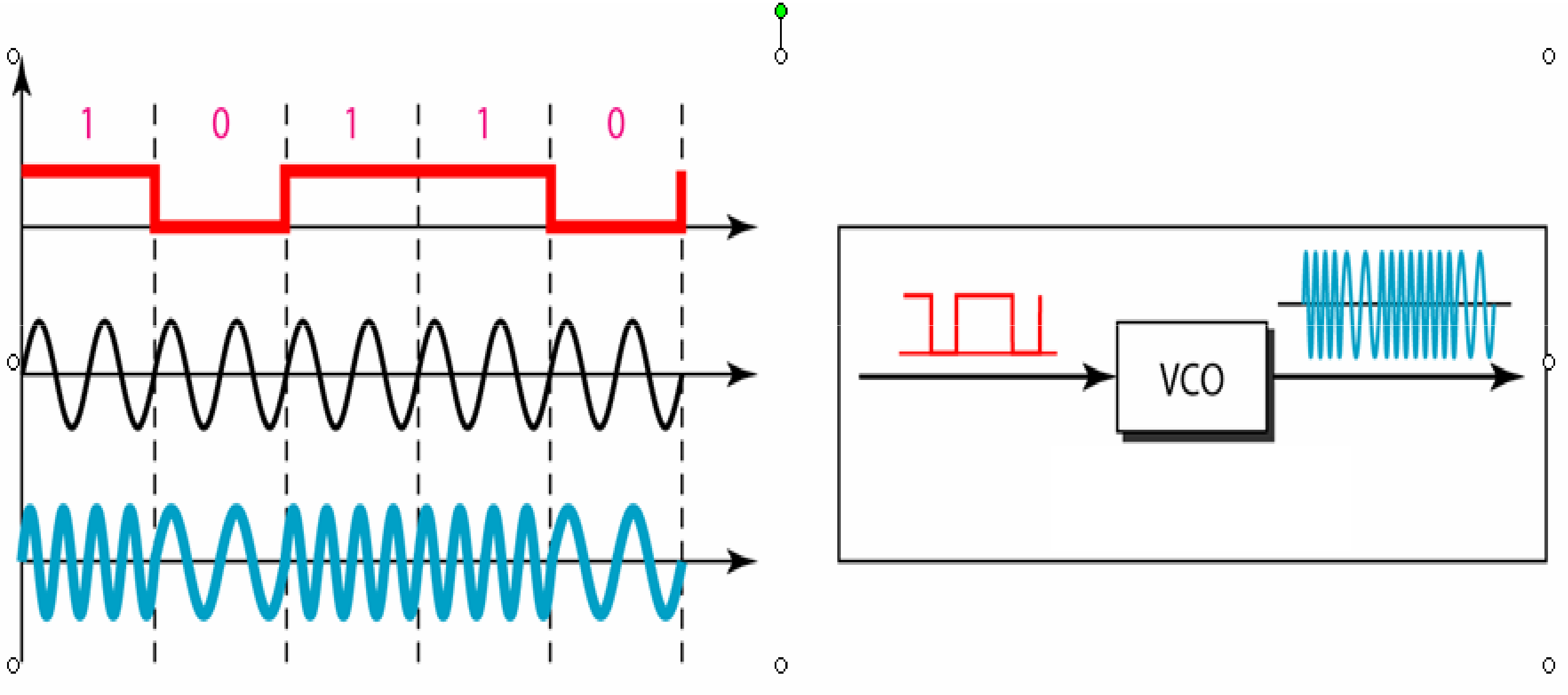


Binarna PSK

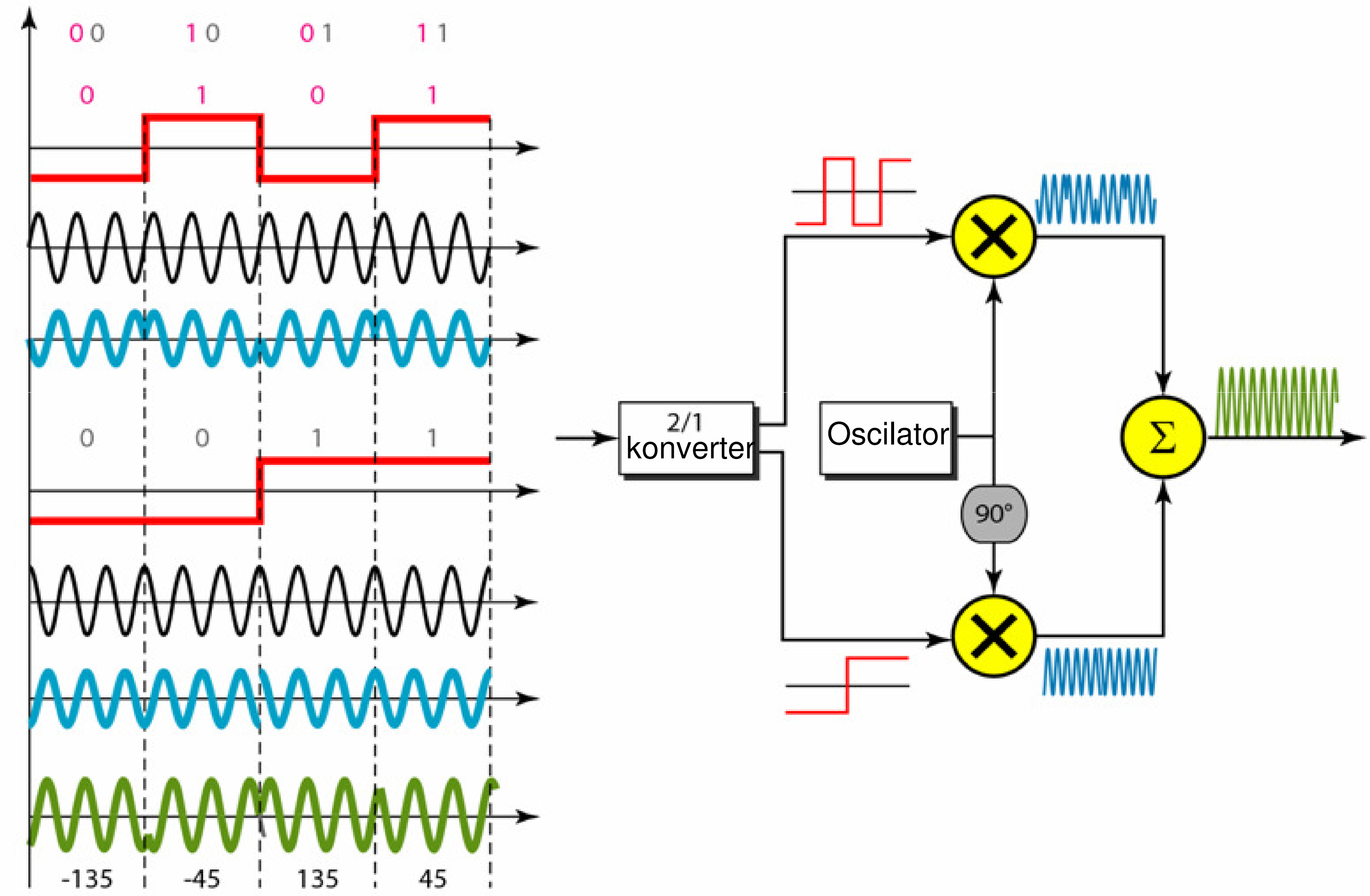




Binarna FSK

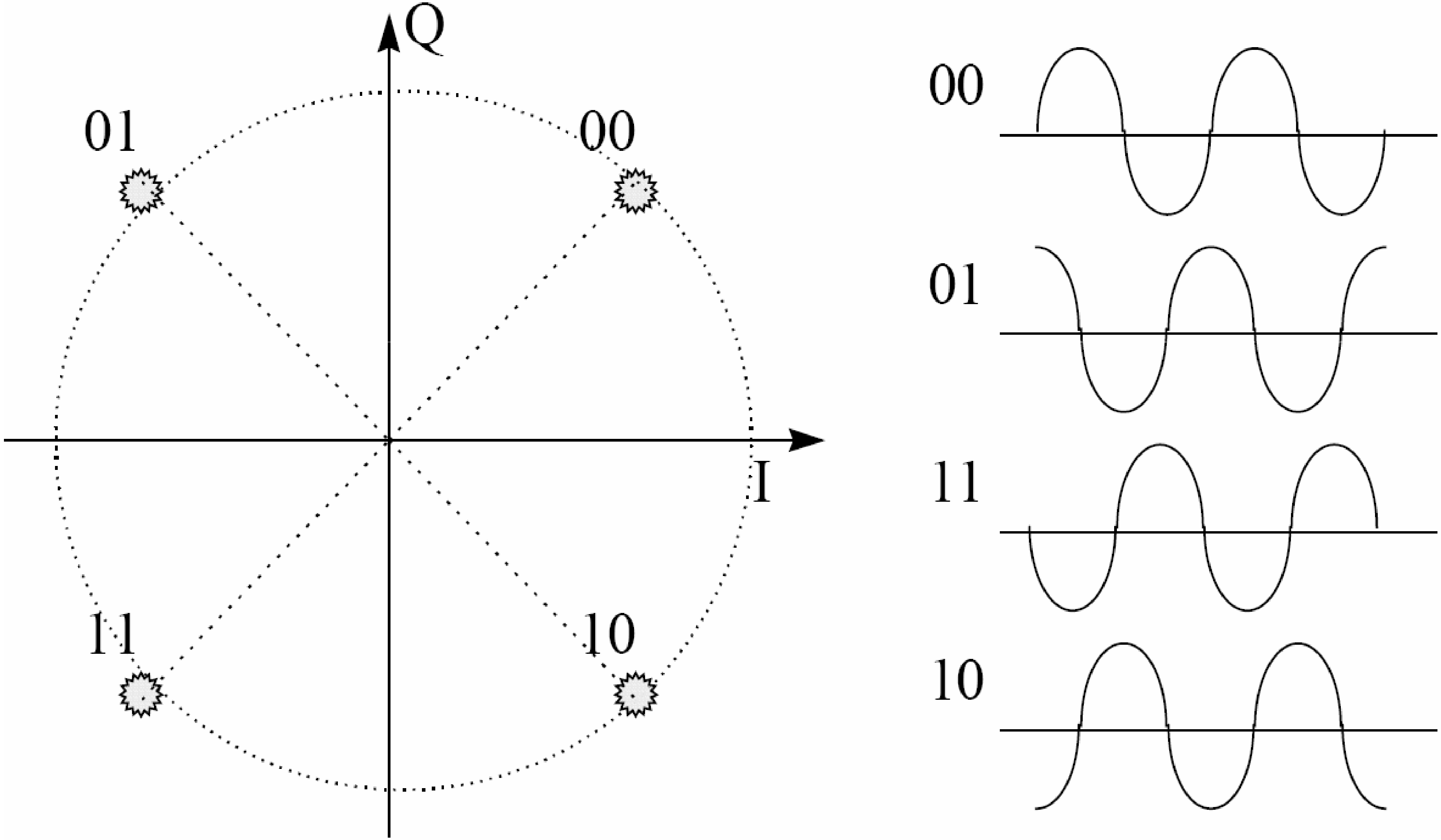


QPSK modulator



Pregled digitalnih modulacijskih formatov

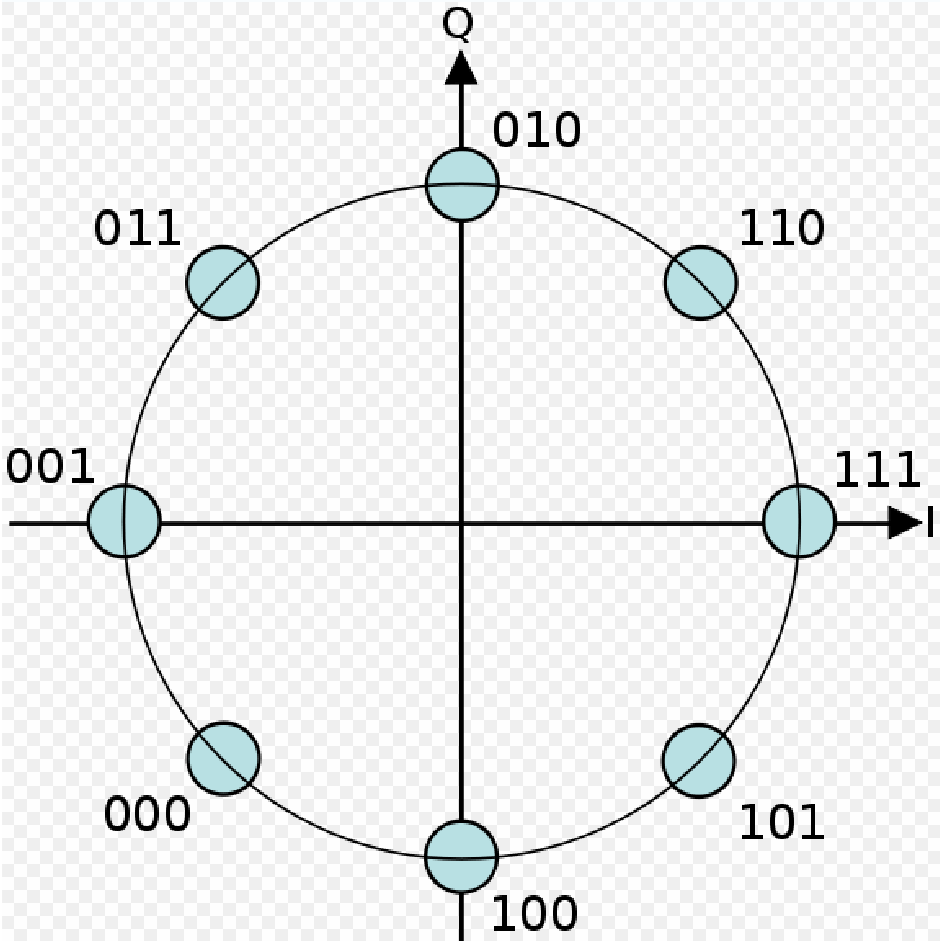
QPSK-45^0, konstelacija in simboli

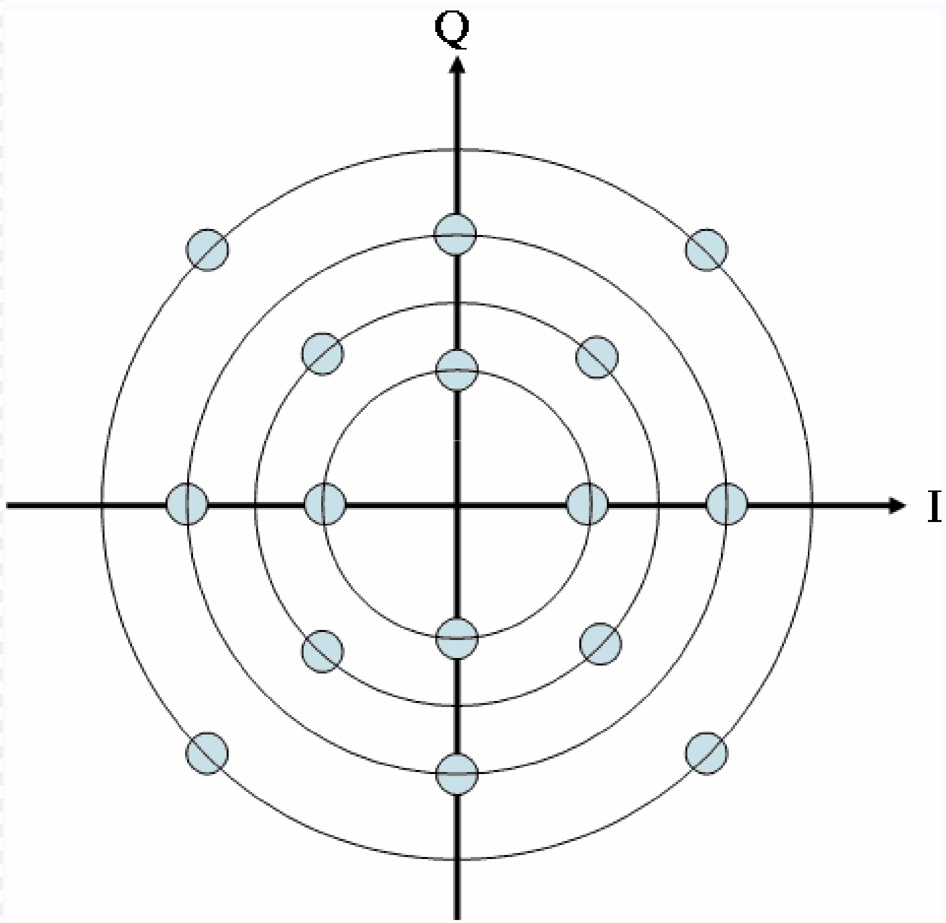


QPSK signali

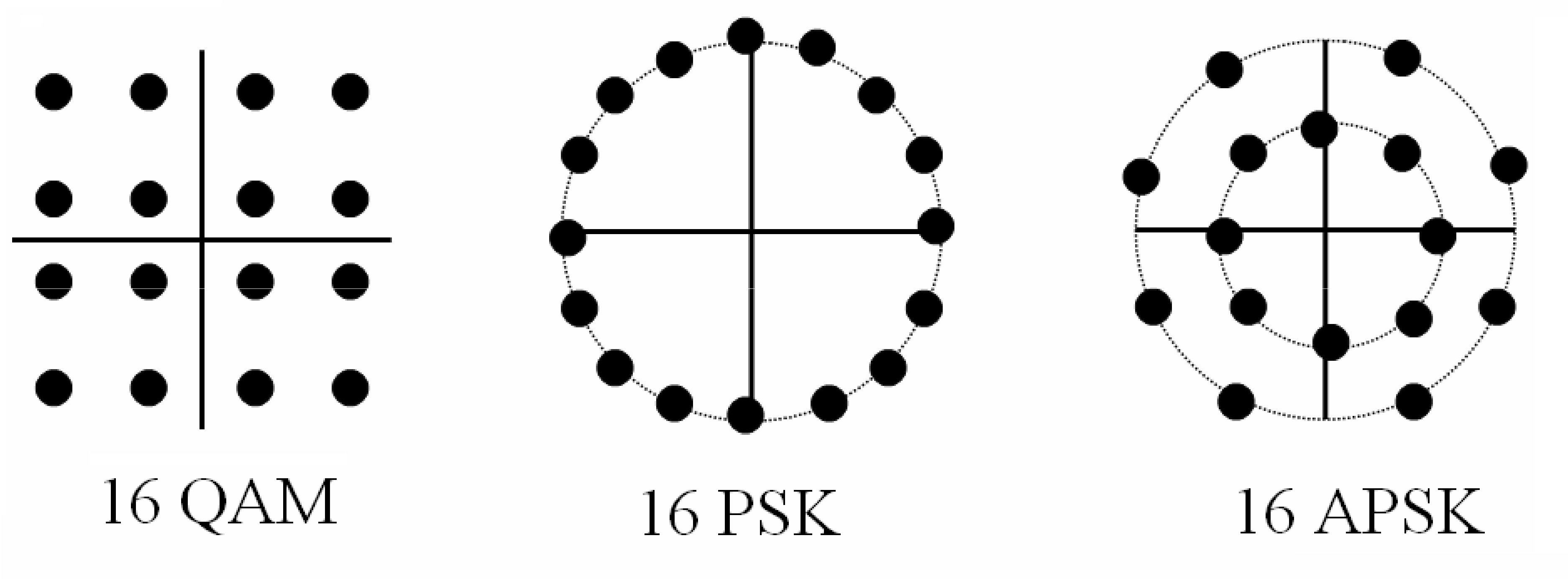
$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t), & \text{binarni } 00 \\ A\cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}), & \text{binarni } 01 \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi), & \text{binarni } 10 \\ A\cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{2}), & \text{binarni } 11 \end{cases}$$

Konstelacija 8-PSK in 4-ASK/PSK





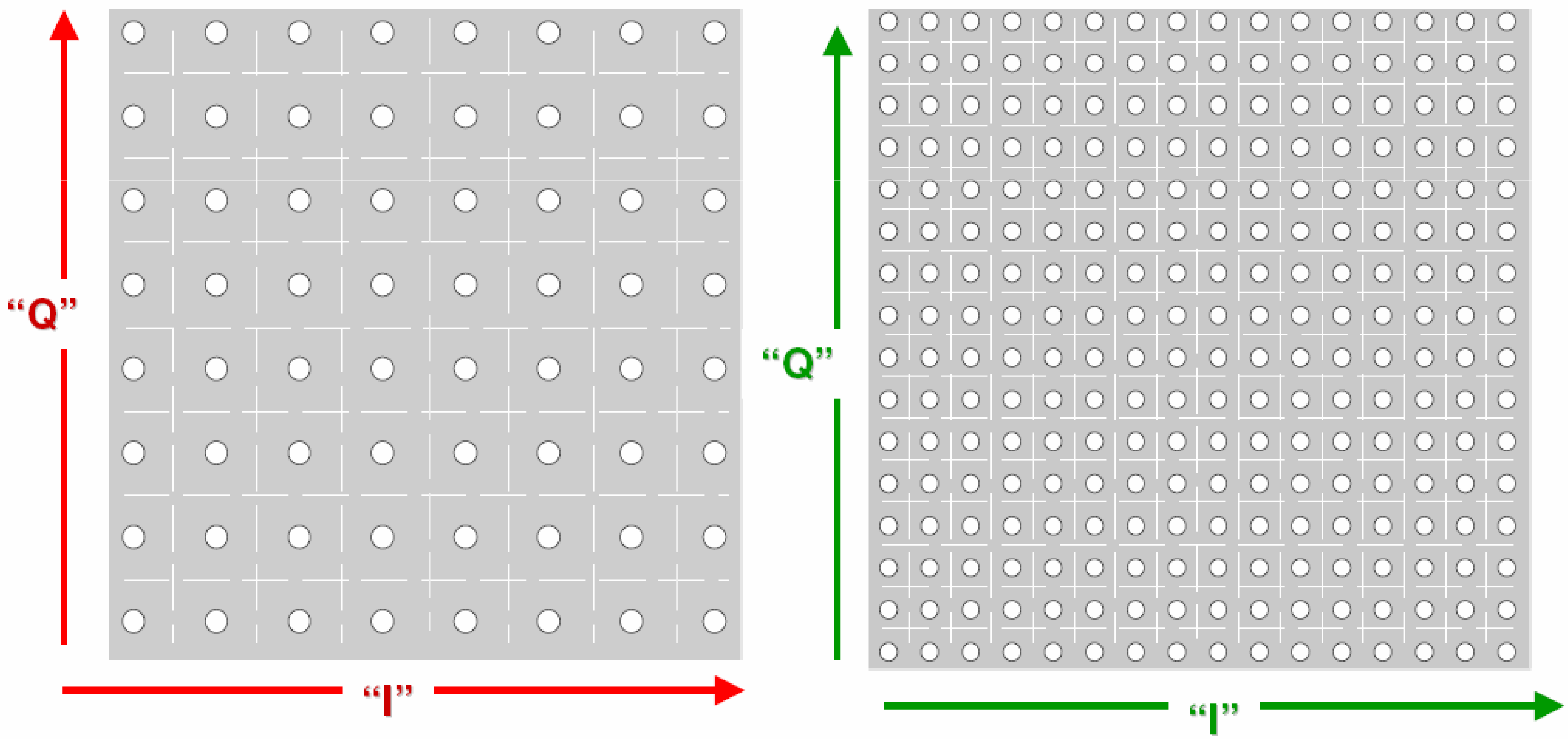
Različni modulacijski formati



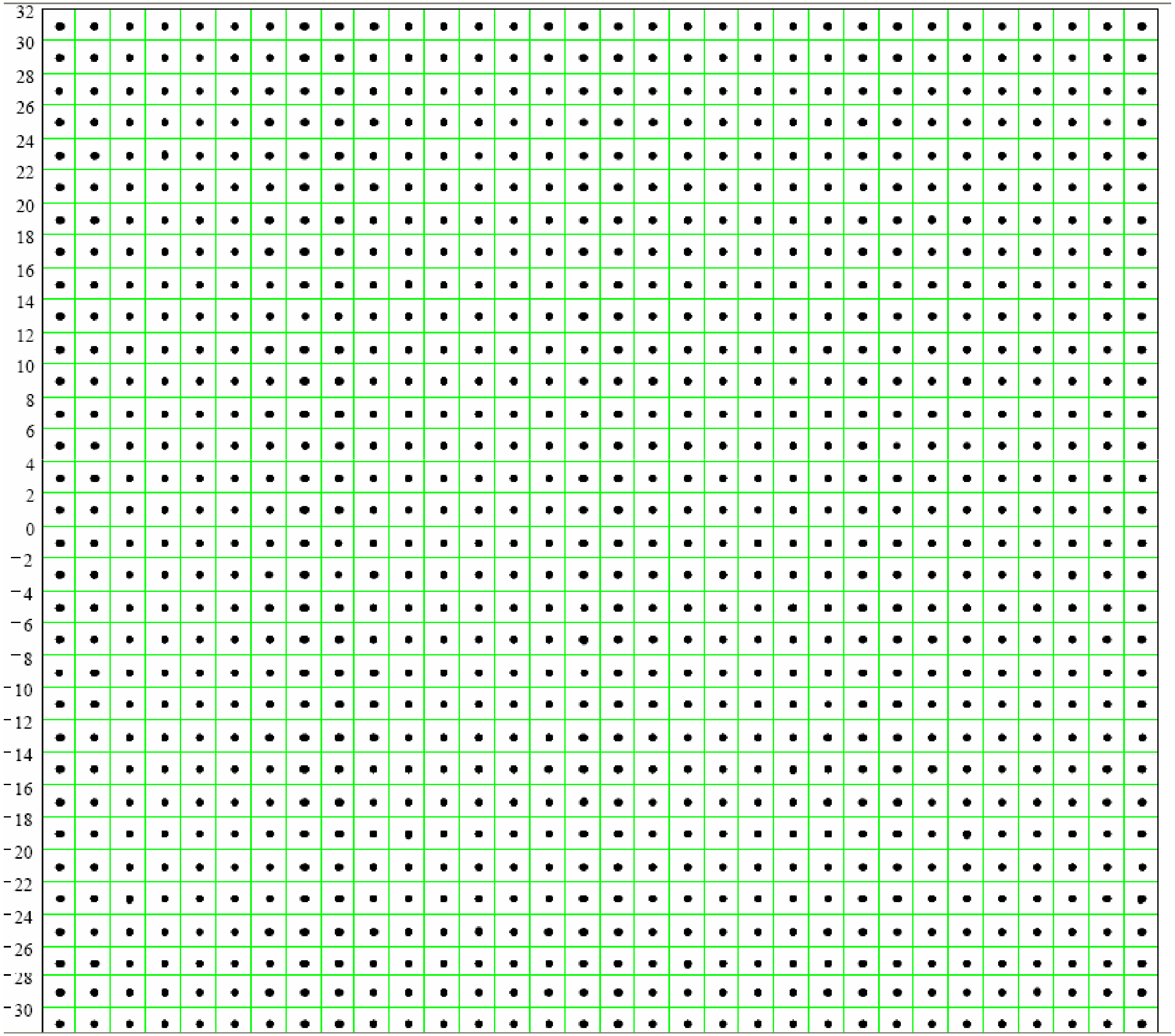
Razdalja
med simboli
se skrajšuje!

64-QAM in 256-QAM

Konstelacijski diagram za primer velikega števila M simbolov
V napravah se že uveljavlja 64 - QAM

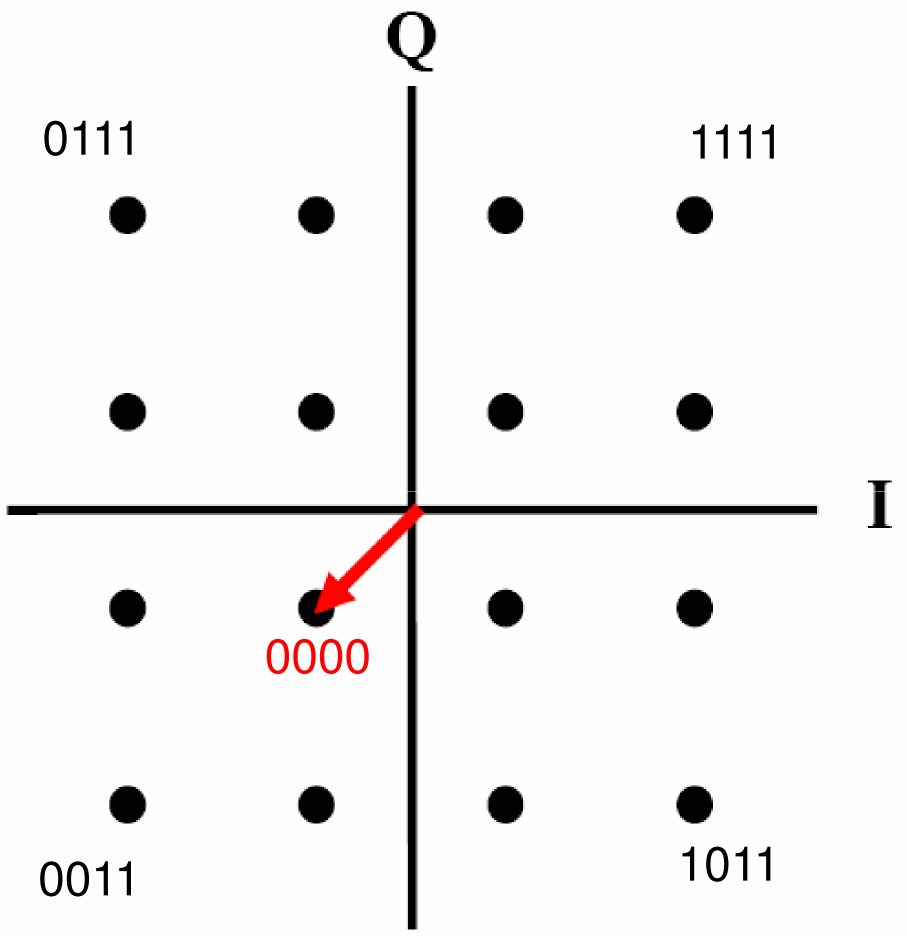


Konstelacijski diagram 1024-QAM



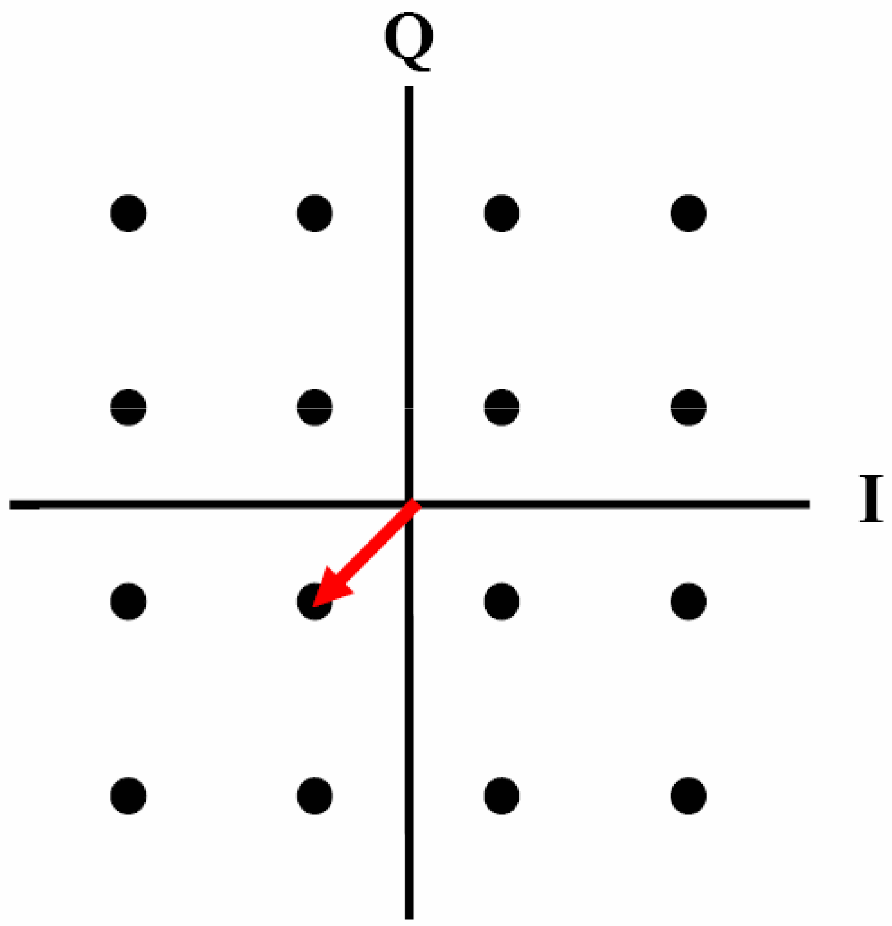
Modulacija 16 - QAM

Simboli	Faza simbolov	Amplituda simbolov
0000	225°	0.33
0001	255°	0.75
0010	195°	0.75
0011	225°	1.0
0100	135°	0.33
0101	105°	0.75
0110	165°	0.75
0111	135°	1.0
1000	315°	0.33
1001	285°	0.75
1010	345°	0.75
1011	315°	1.0
1100	45°	0.33
1101	75°	0.75
1110	15°	0.75
1111	45°	1.0

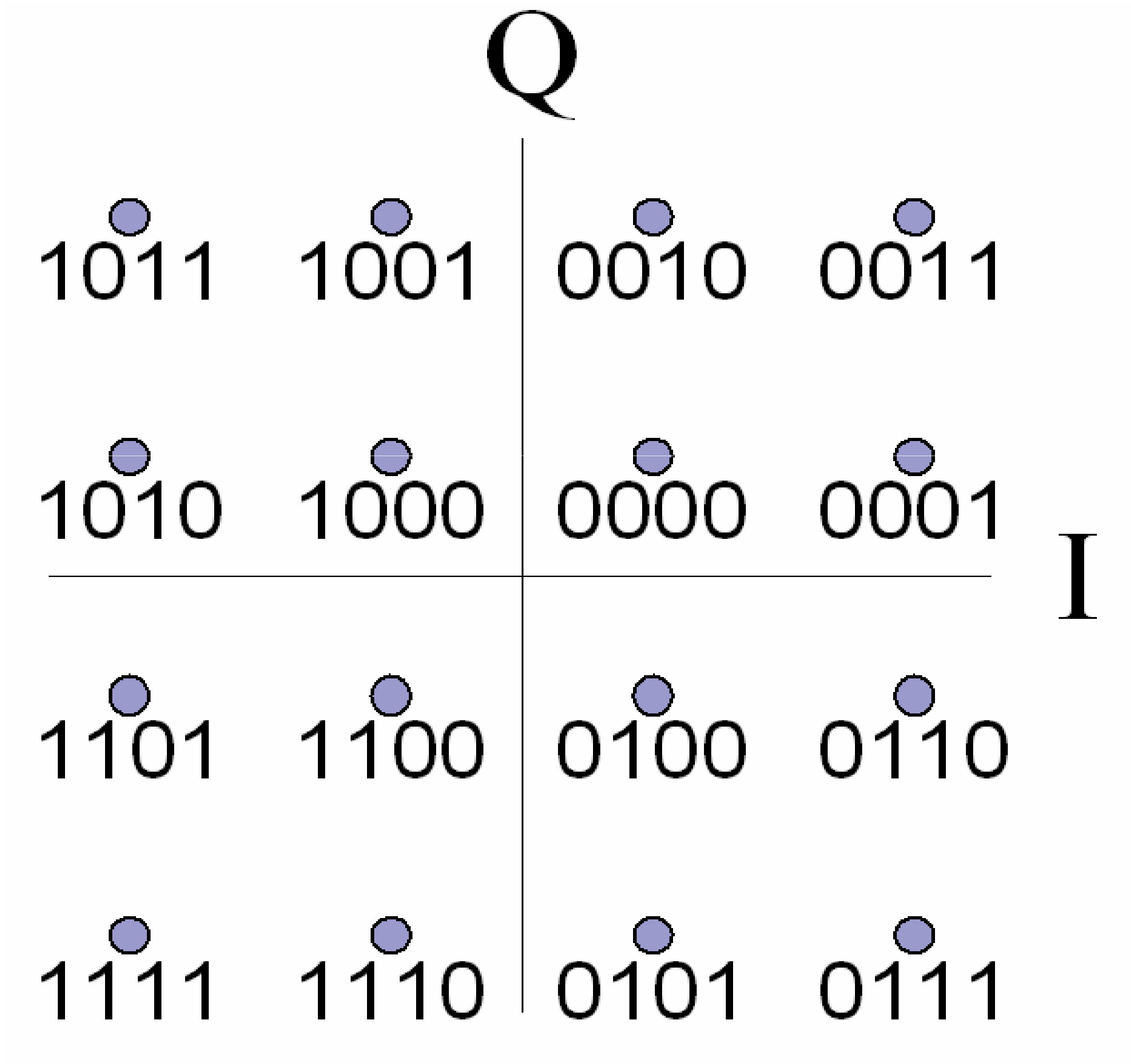


16 - QAM

Symbol Transmitted	Carrier Phase	Carrier Amplitude
0000	225°	0.33
0001	255°	0.75
0010	195°	0.75
0011	225°	1.0
0100	135°	0.33
0101	105°	0.75
0110	165°	0.75
0111	135°	1.0
1000	315°	0.33
1001	285°	0.75
1010	345°	0.75
1011	315°	1.0
1100	45°	0.33
1101	75°	0.75
1110	15°	0.75
1111	45°	1.0

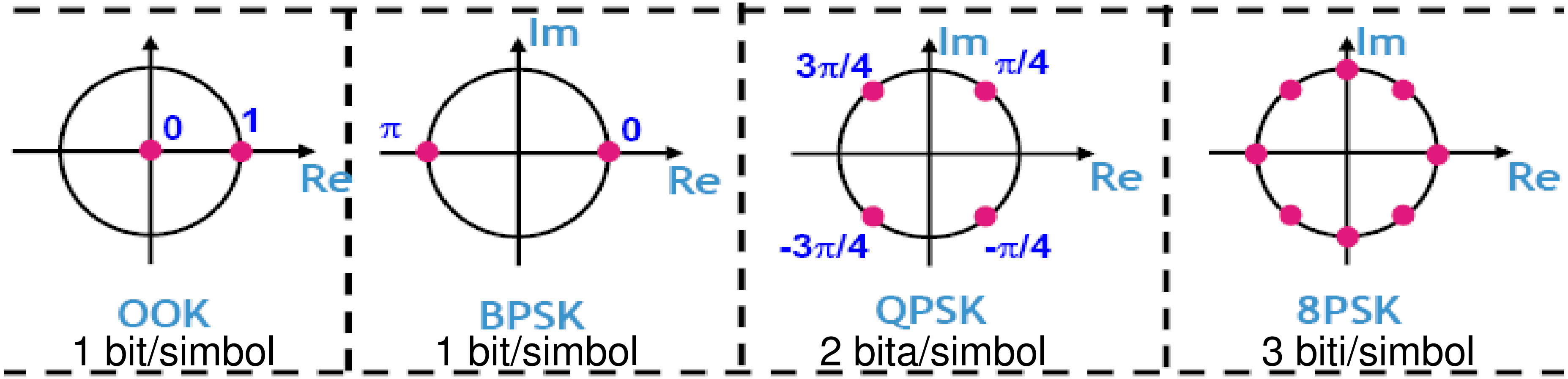


Konstelacija 16-QAM



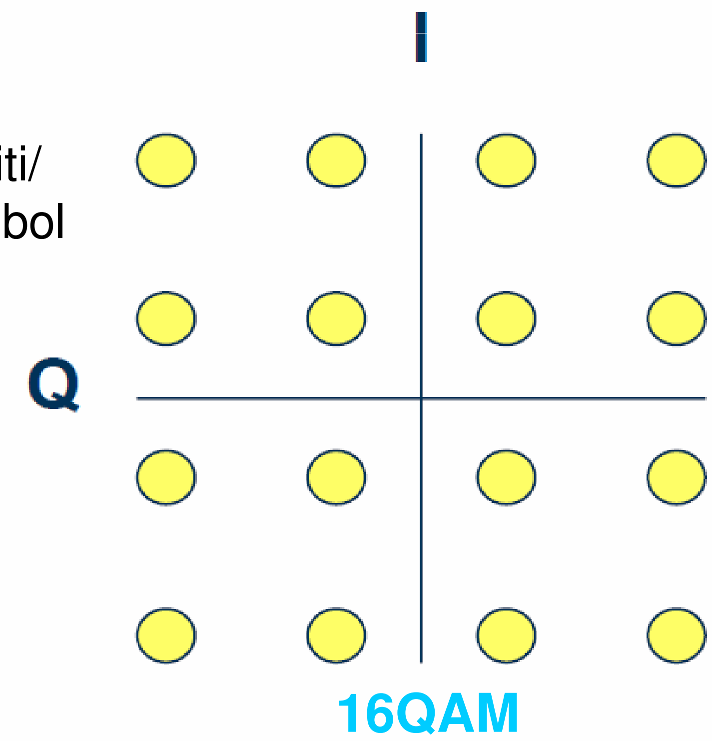
Konstelacija glavnih digitalnih formatov

Pregled spektralno učinkovitih digitalnih modulacijskih formatov

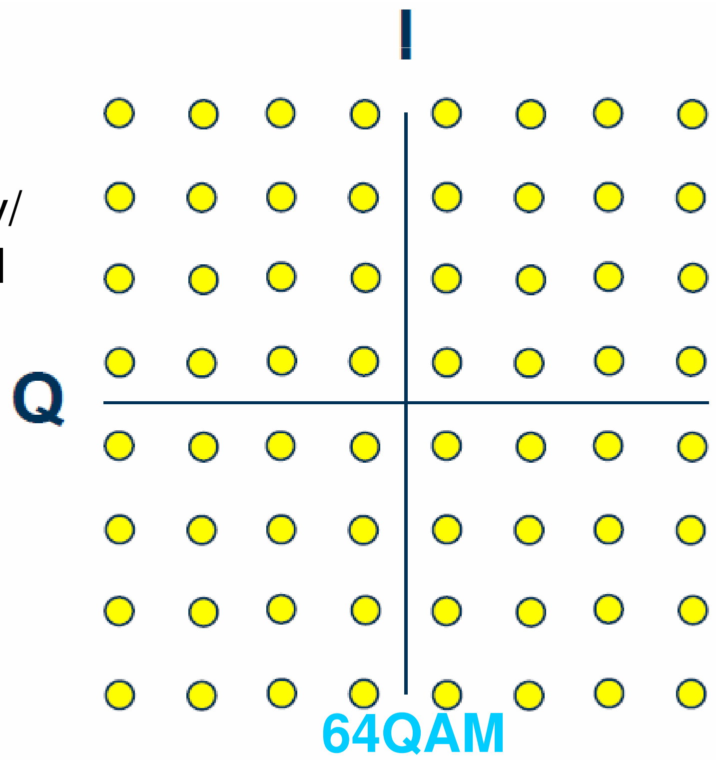


QAM:

4 biti/ simbol

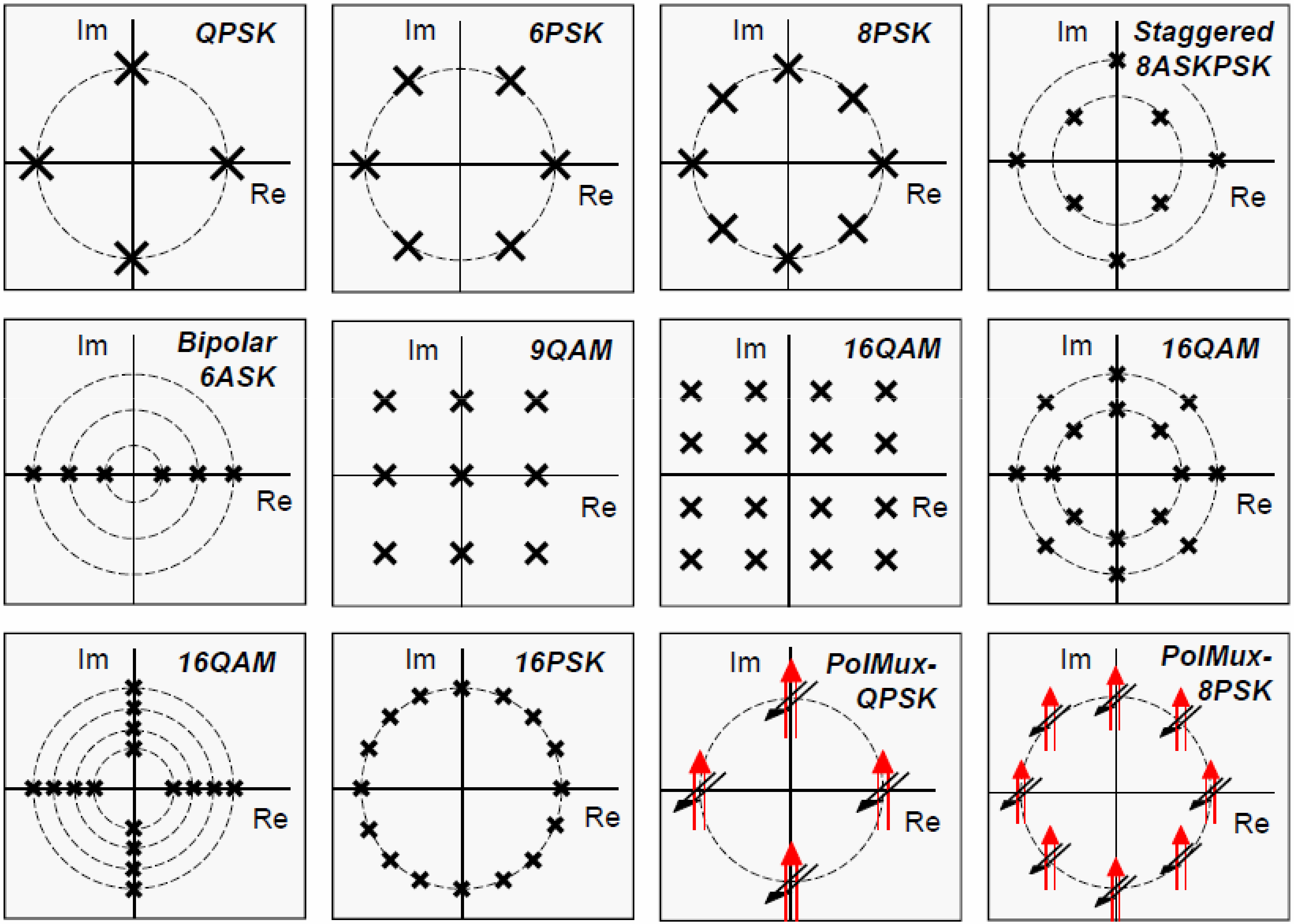


6 bitov/ simbol



Konstelacije različnih drugih formatov

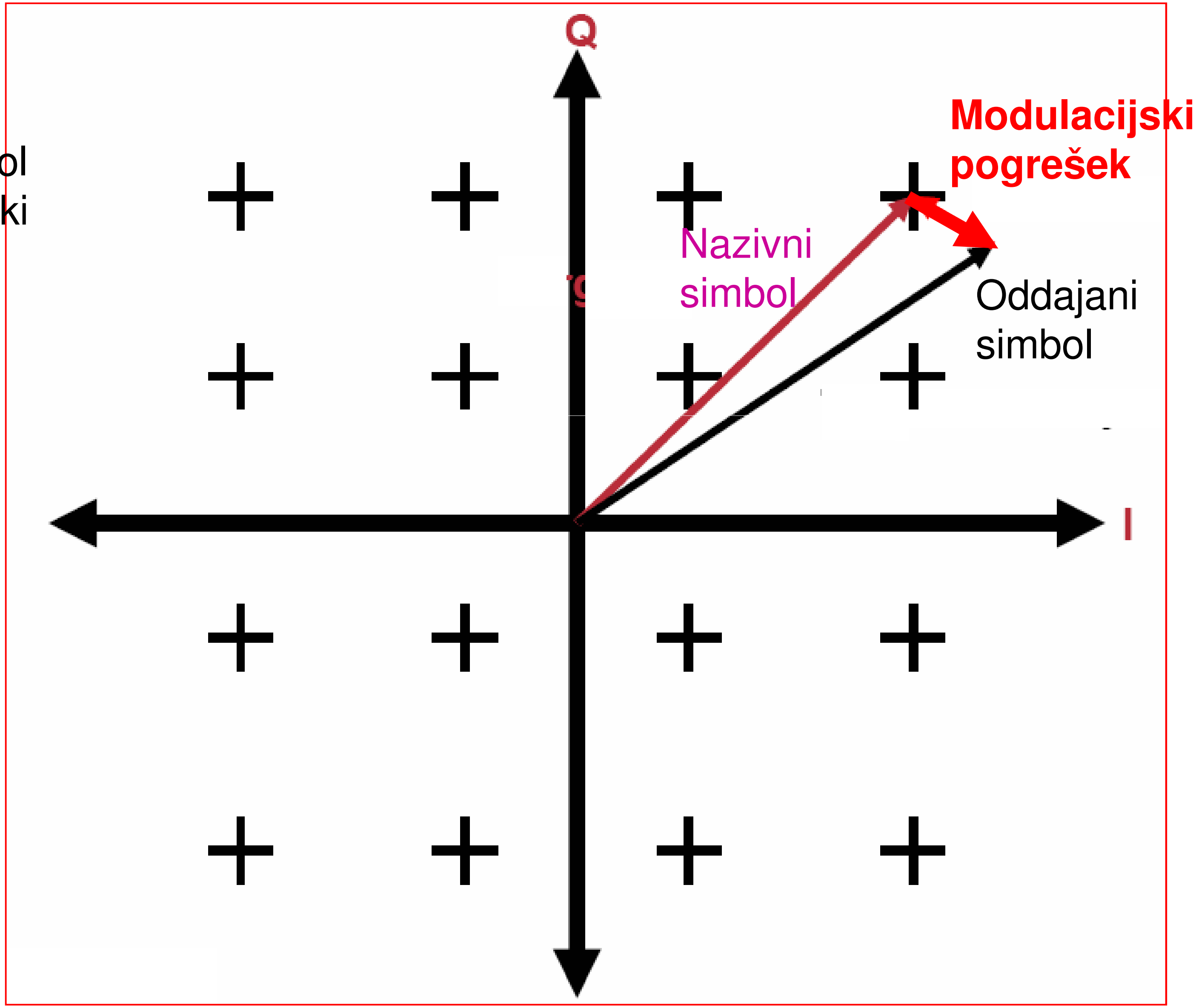
Pregled različnih mnogo-nivojskih digitalnih modulacijskih formatov



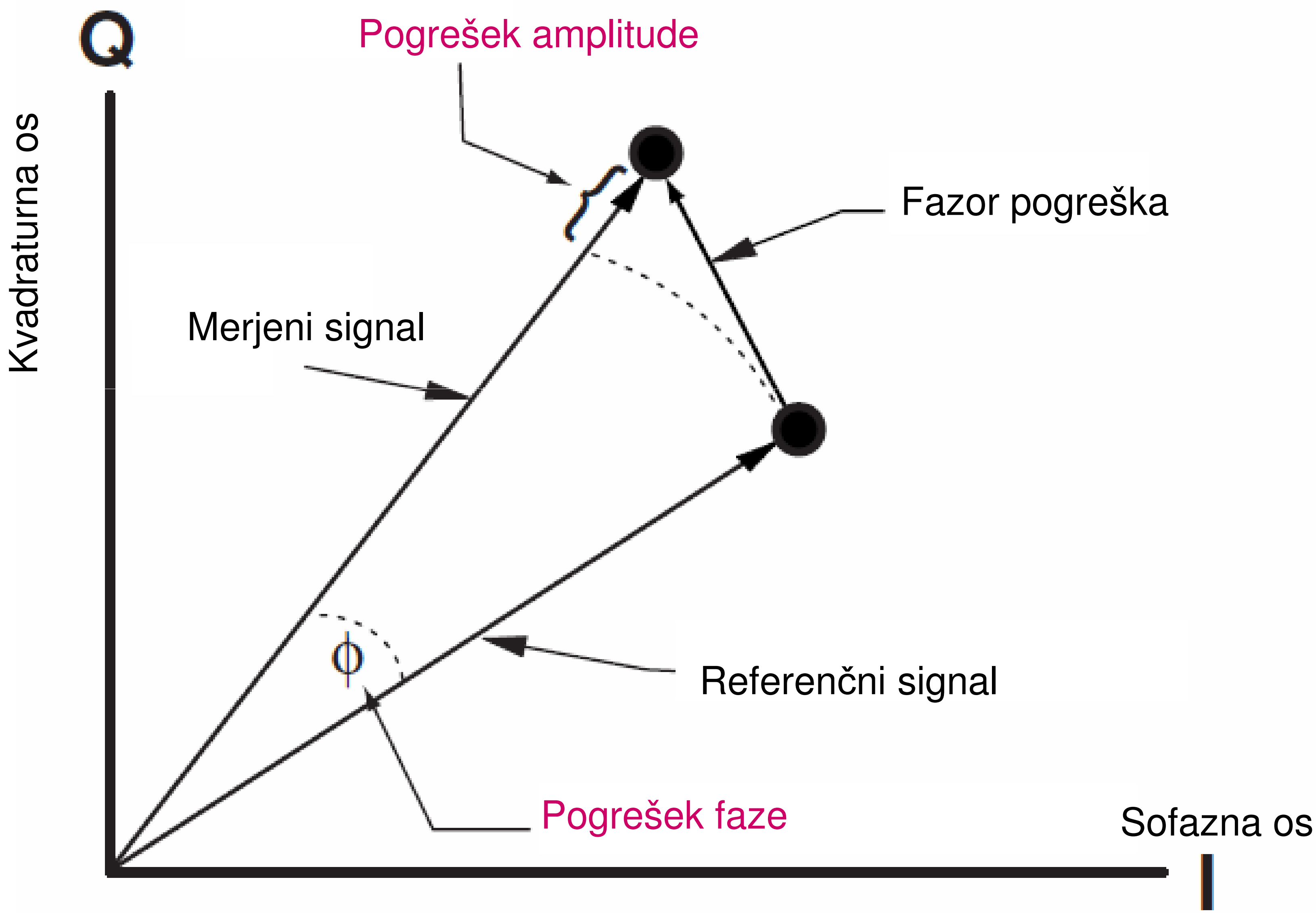
Kvaliteta digitalne modulacije

Modulacijski pogrešek

Oddajani simbol = nazivni simbol + modulacijski pogrešek



Pogrešek amplitude in faze

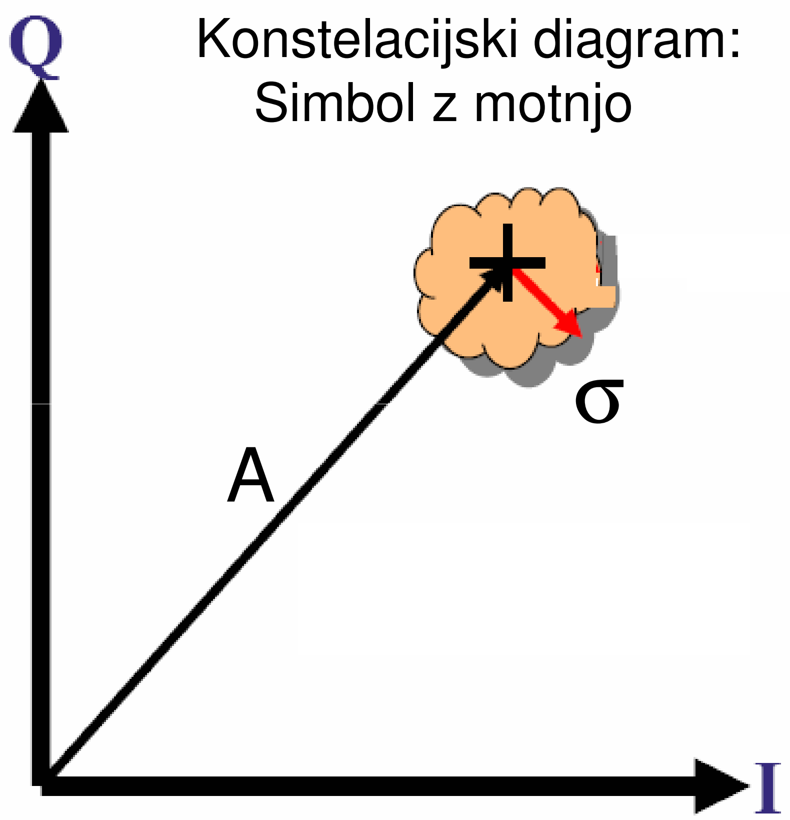


Razmerje modulacijskega pogreška

MER – modulation error ratio
– merilo kakovosti modulacije

$$MER_{dB} = 20 \log A/\sigma = $$
$$= 20 \log \frac{\text{amplituda}}{\text{RMS motnja}}$$

MER soroden:
$SNR_{dB} = 10 \log S/N$

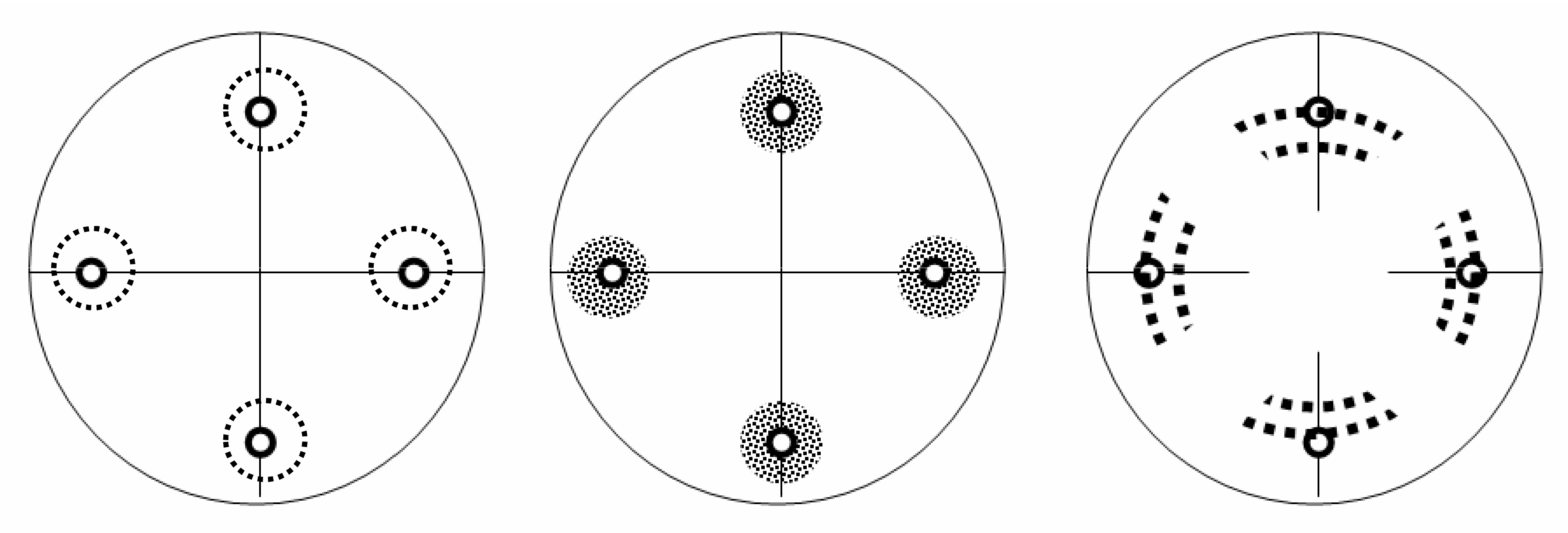


Zahteve za različne QAM formate:

4-QAM	M > 18 dB
16-QAM	M > 24 dB
64-QAM	M > 27 dB
256-QAM	M > 31 dB

Vrste simbolnih motenj

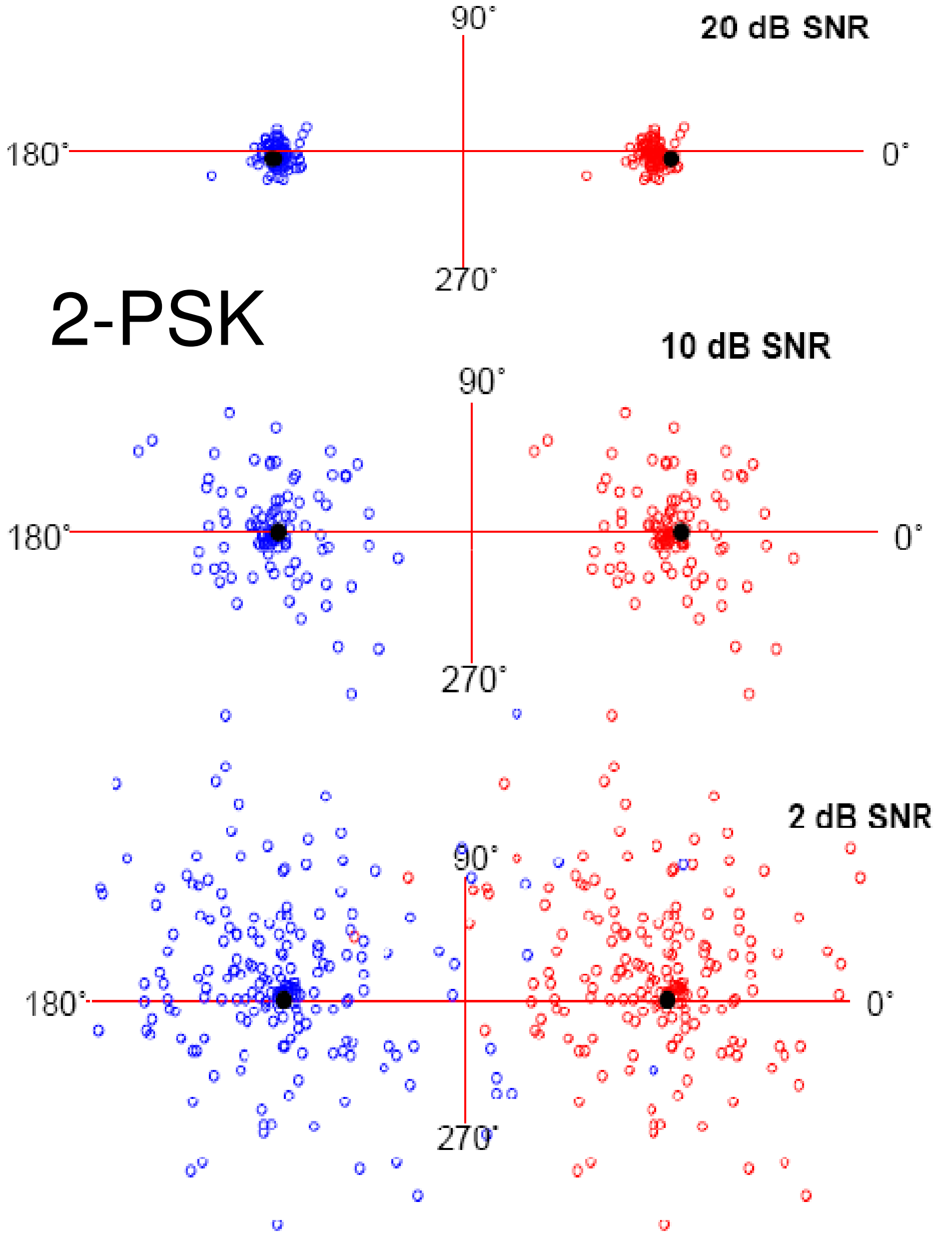
Učinek različnih oblik motenja na konstelacijski diagram



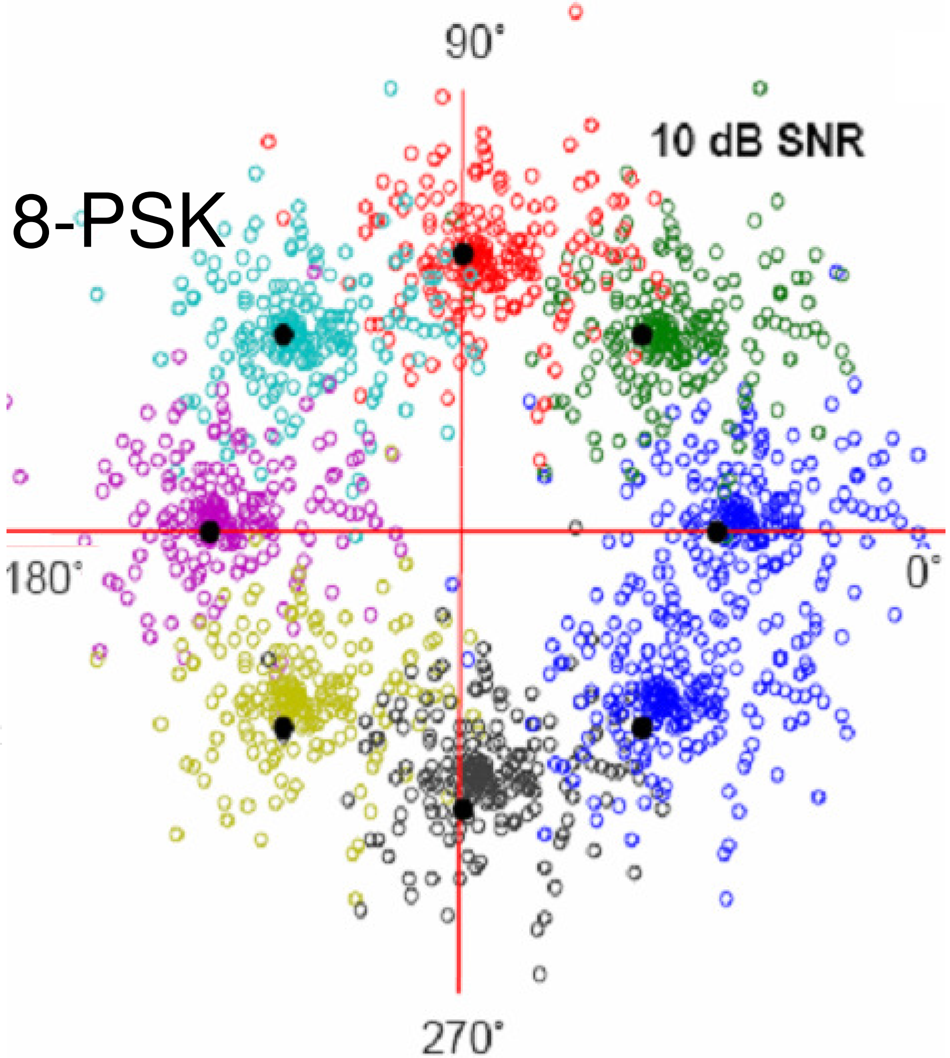
RF motnja | Beli šum | Fazno drhtenje

Učinek šuma (2-PSK, 8-PSK)

2-PSK

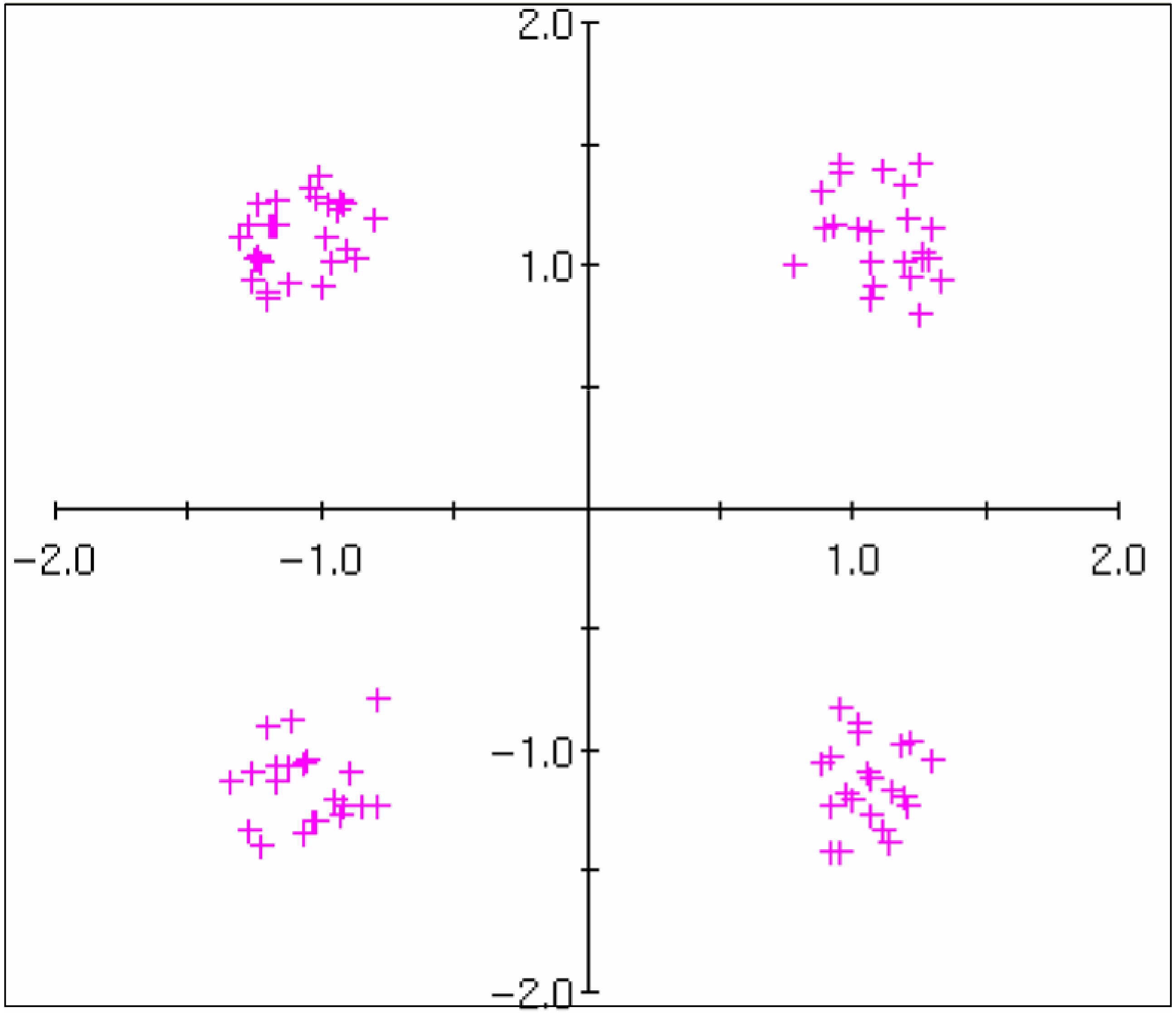


8-PSK

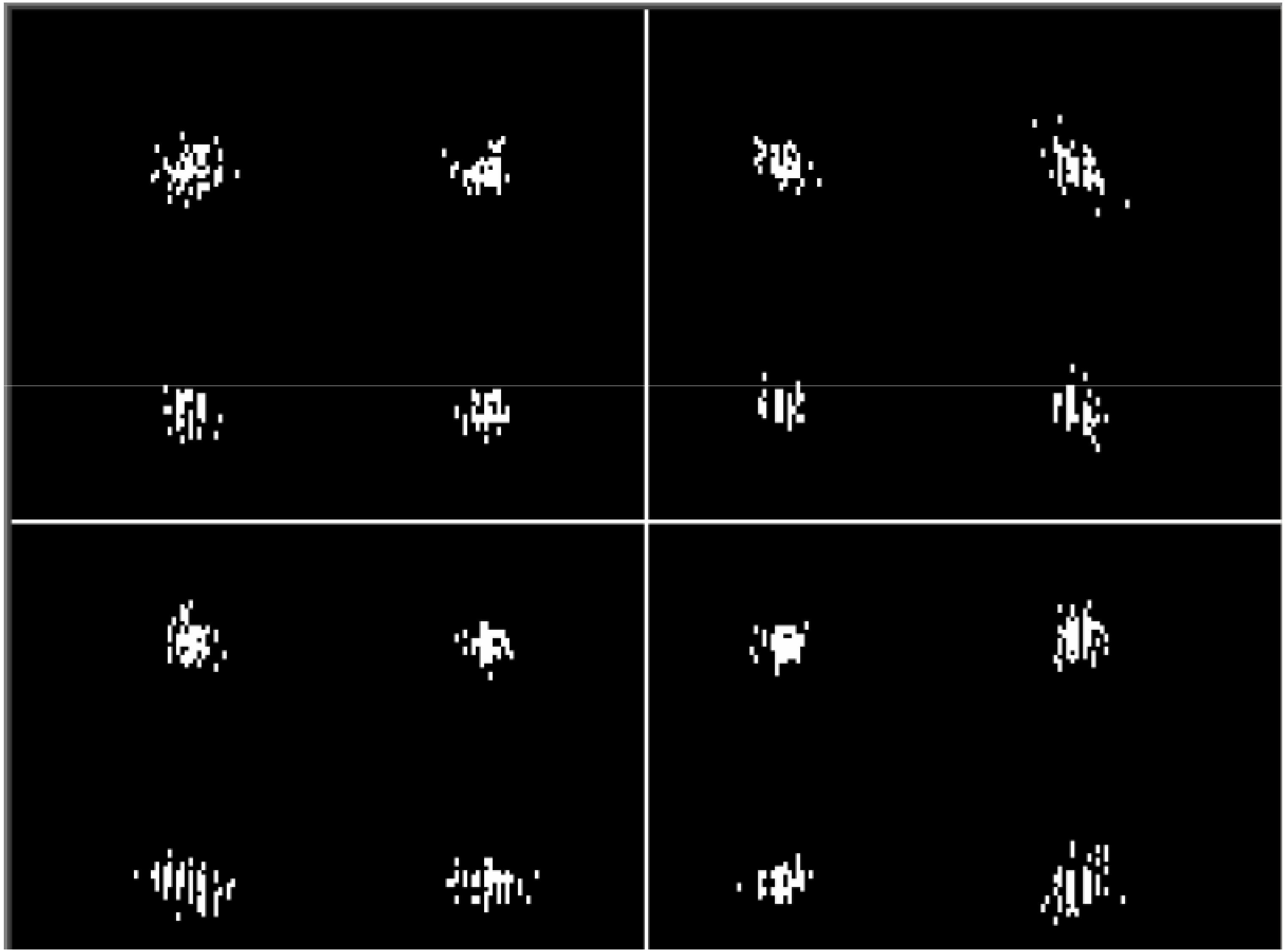


Simboli s pogreškom

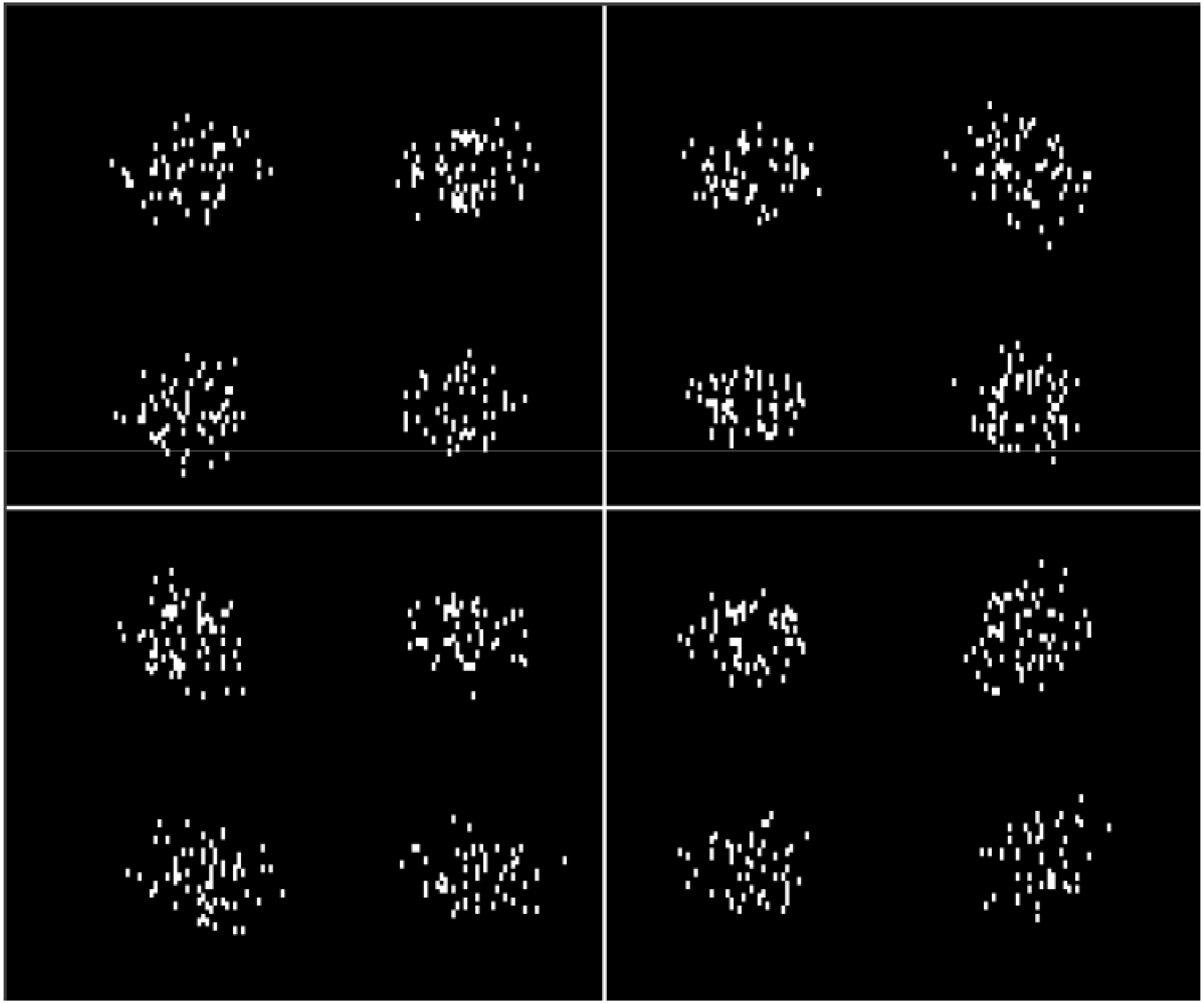
Primer
4 – QAM



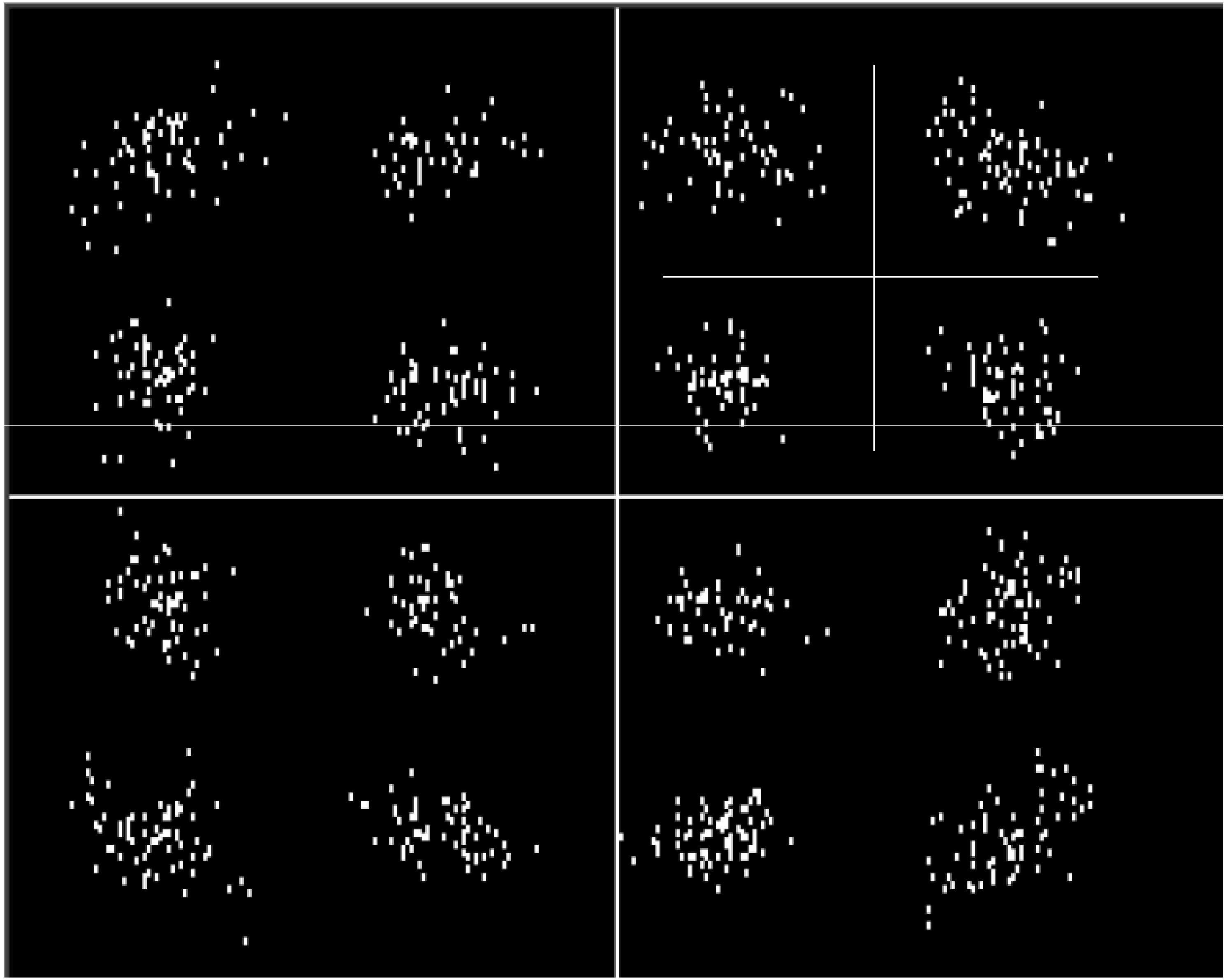
Primer 16–QAM, manjši simbolni šum



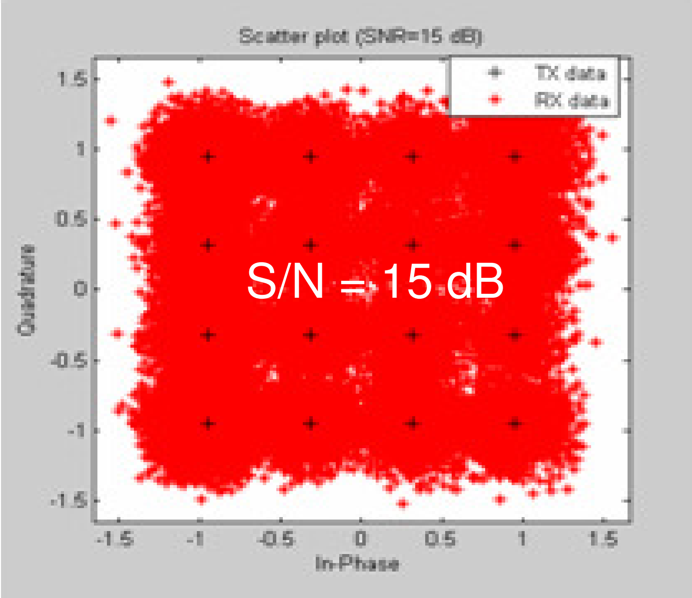
Primer 16–QAM, srednji simbolni šum

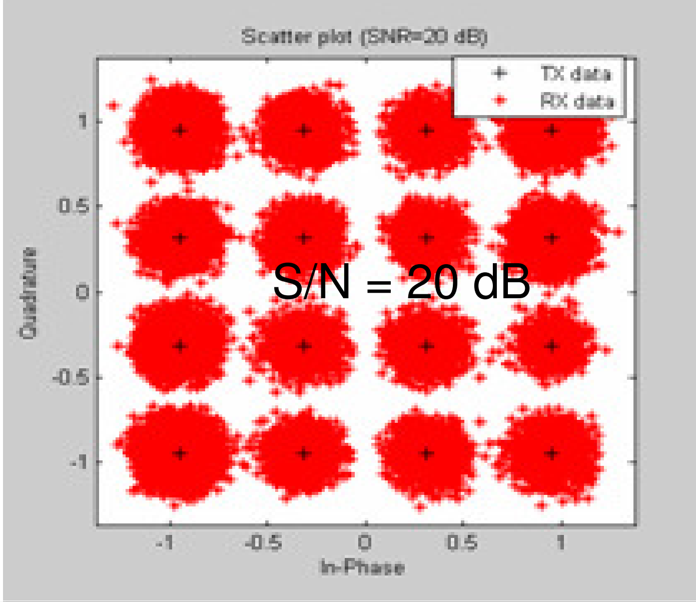


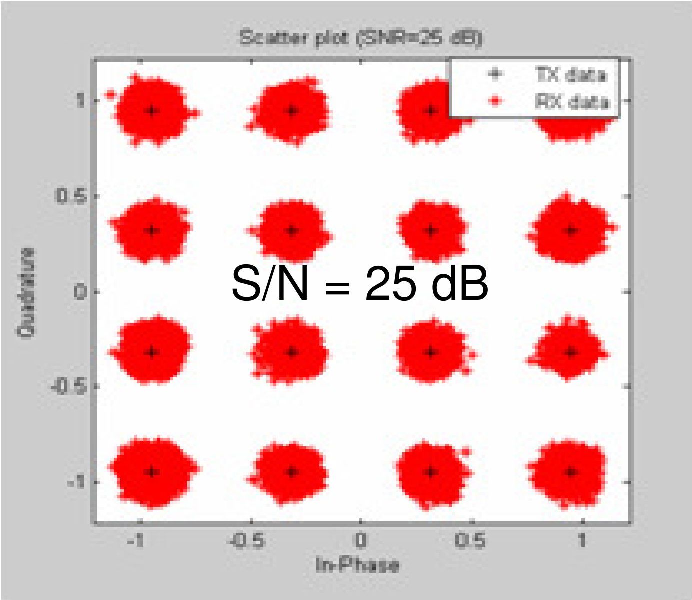
Primer 16–QAM, večji simbolni šum

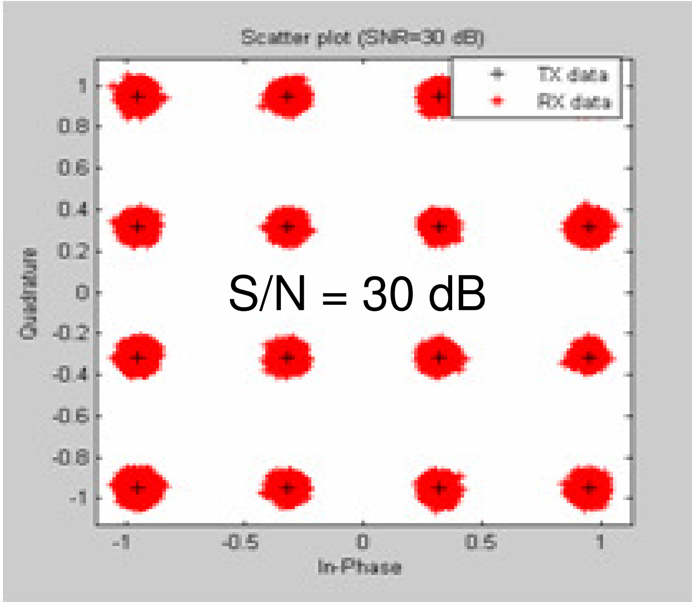


Primer 16-QAM pri različnem S/N



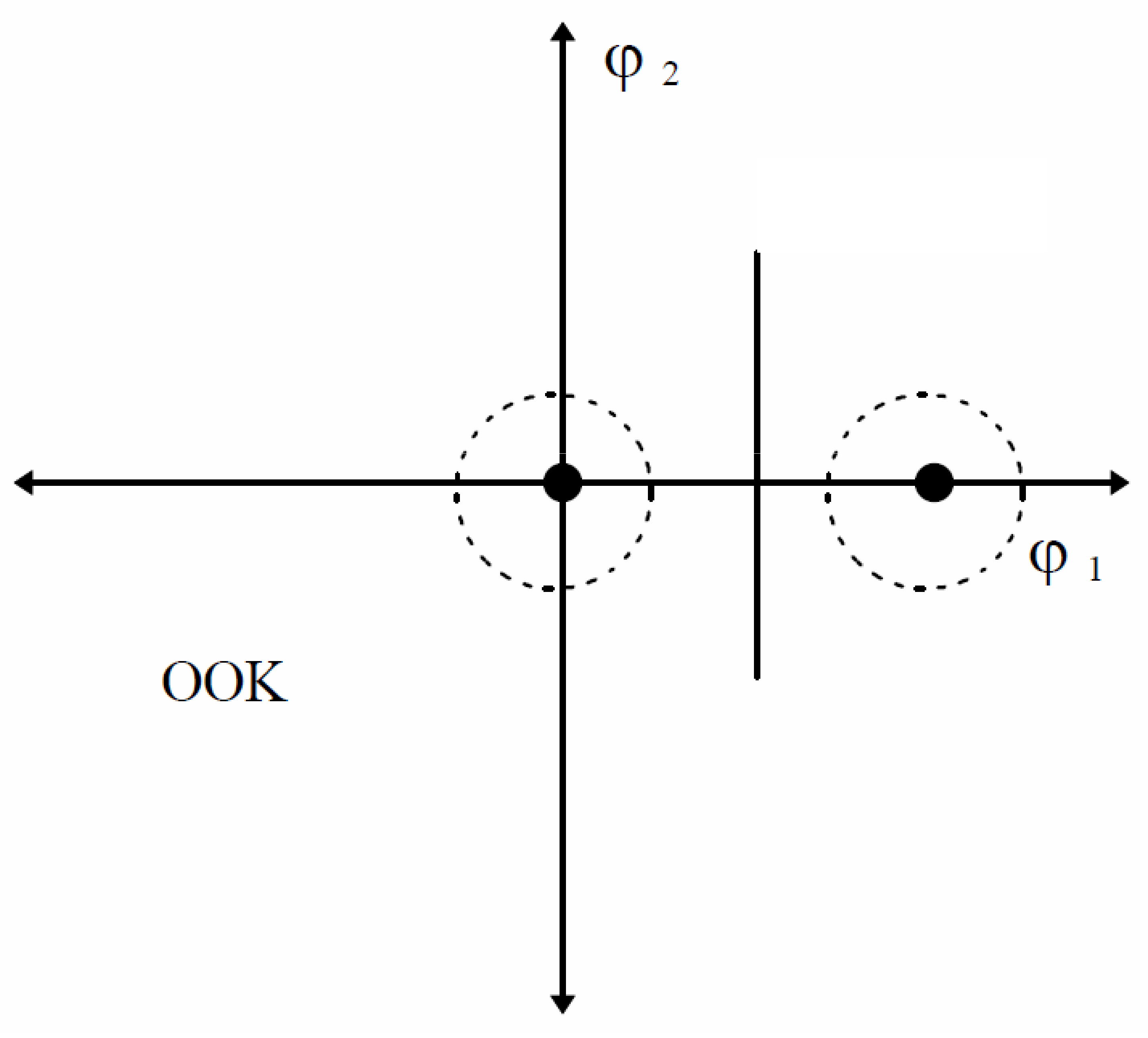




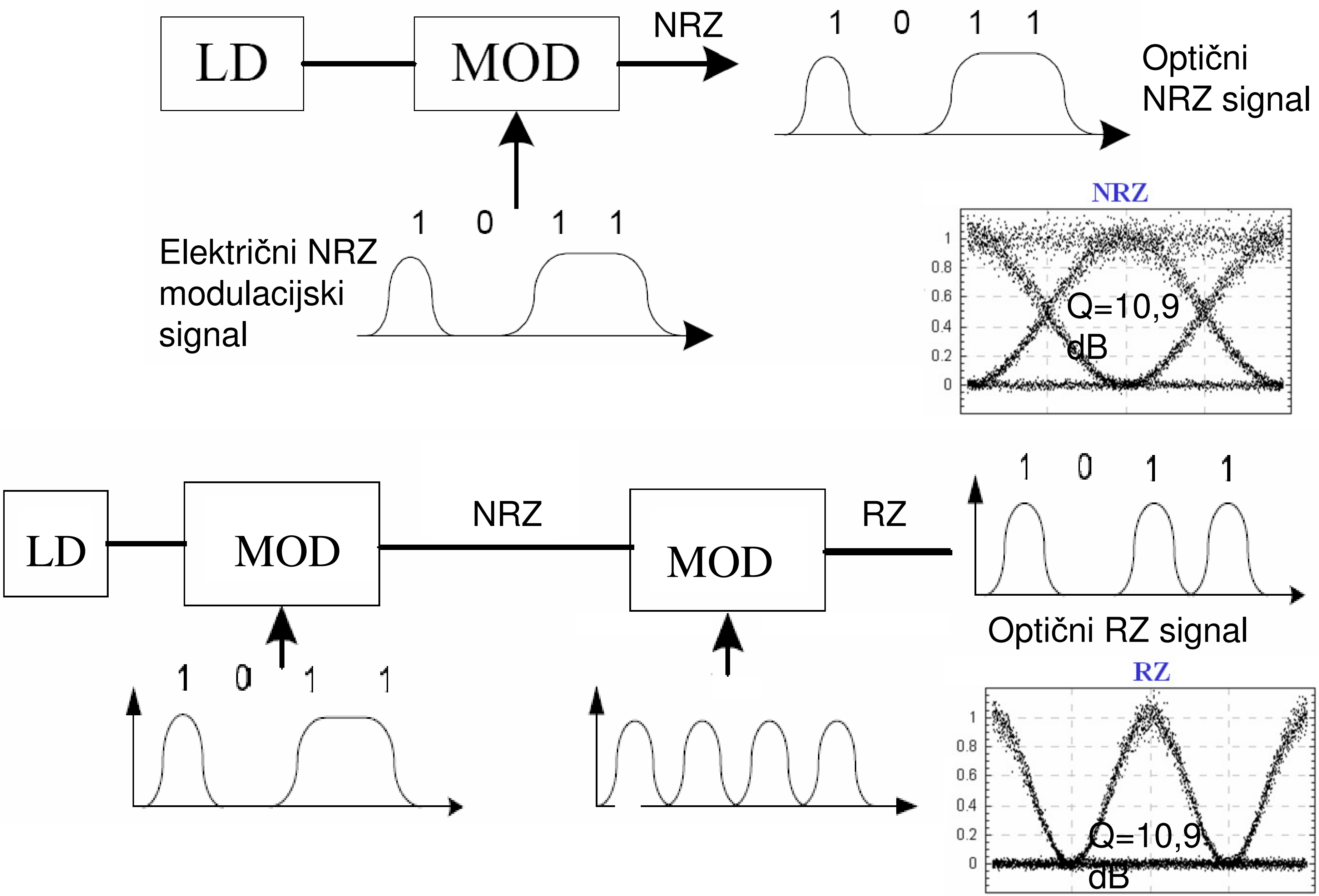


Modulacijski načini

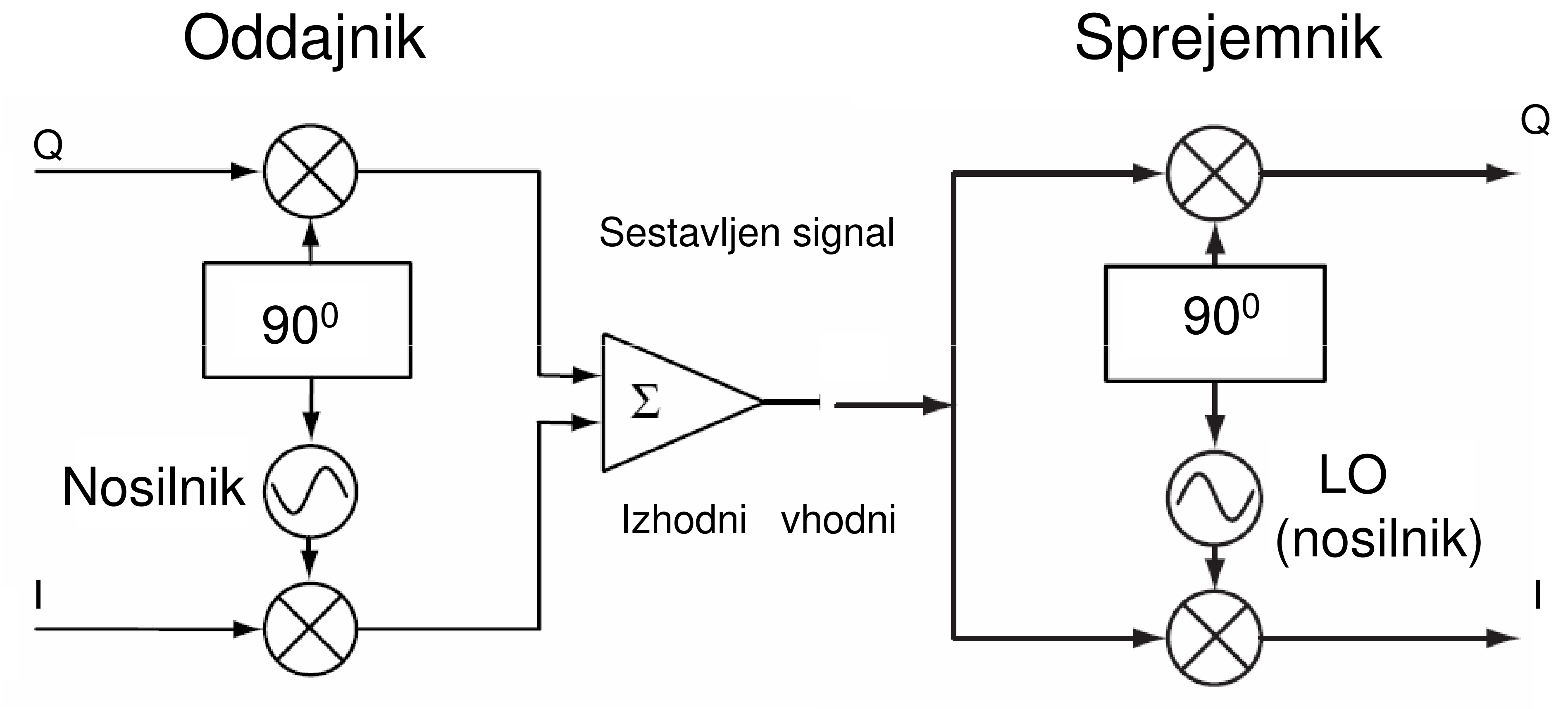
Konstelacija OOK



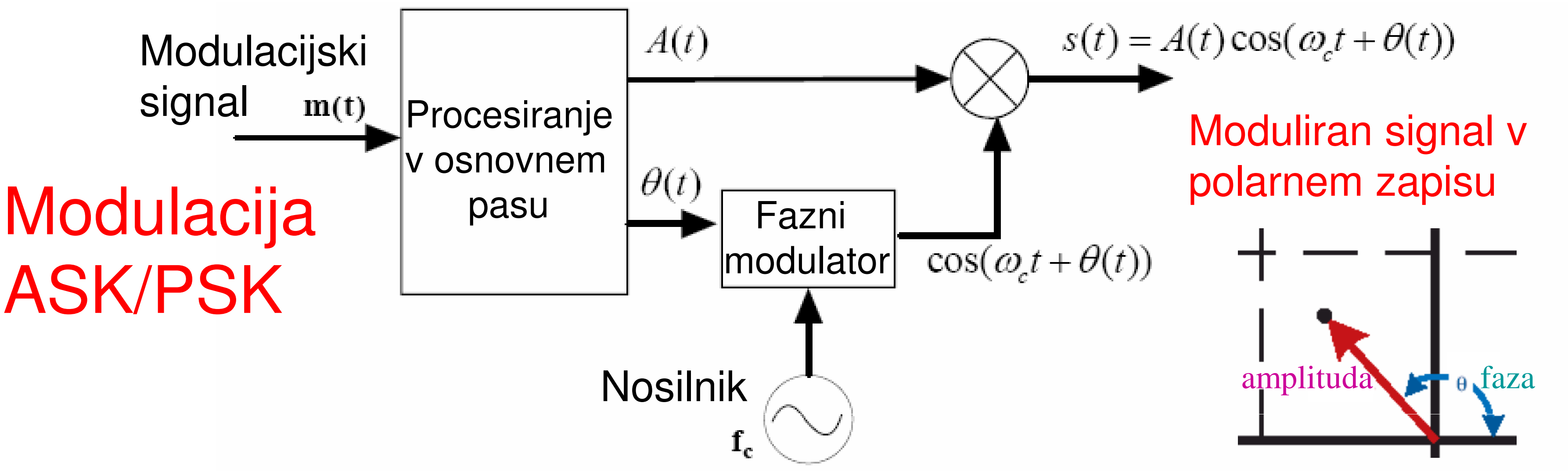
Optika - NRZ in RZ

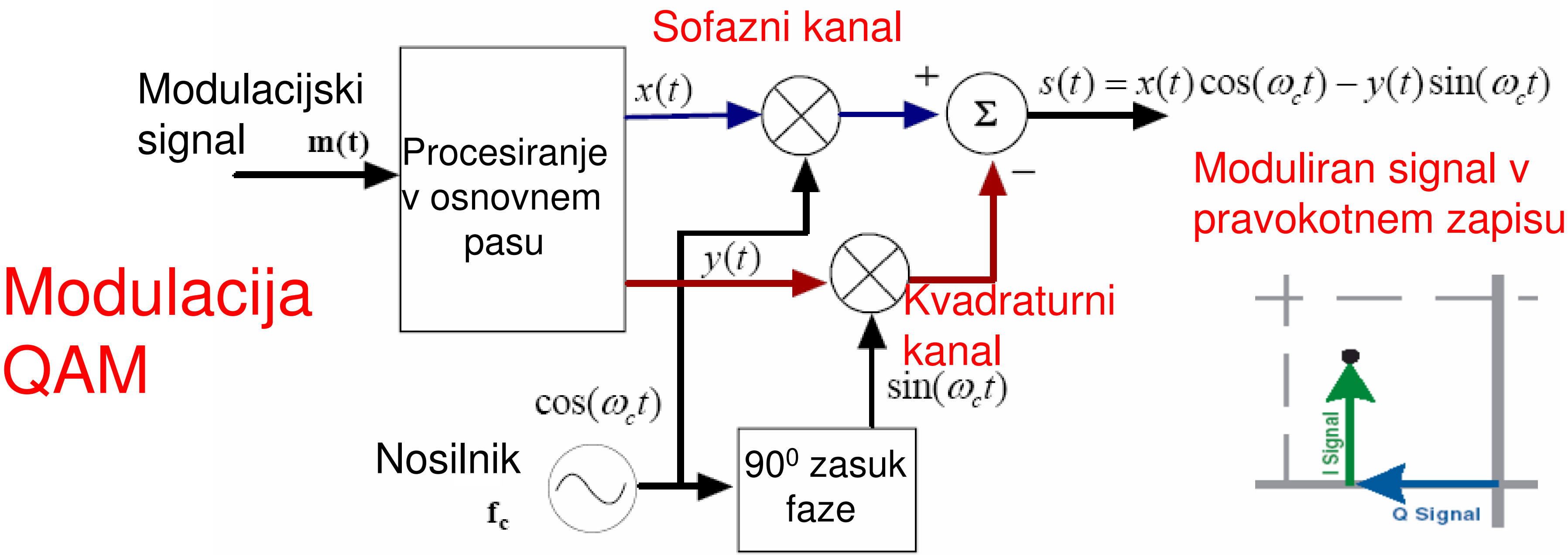


Kvadraturna modulacija in demodulacija

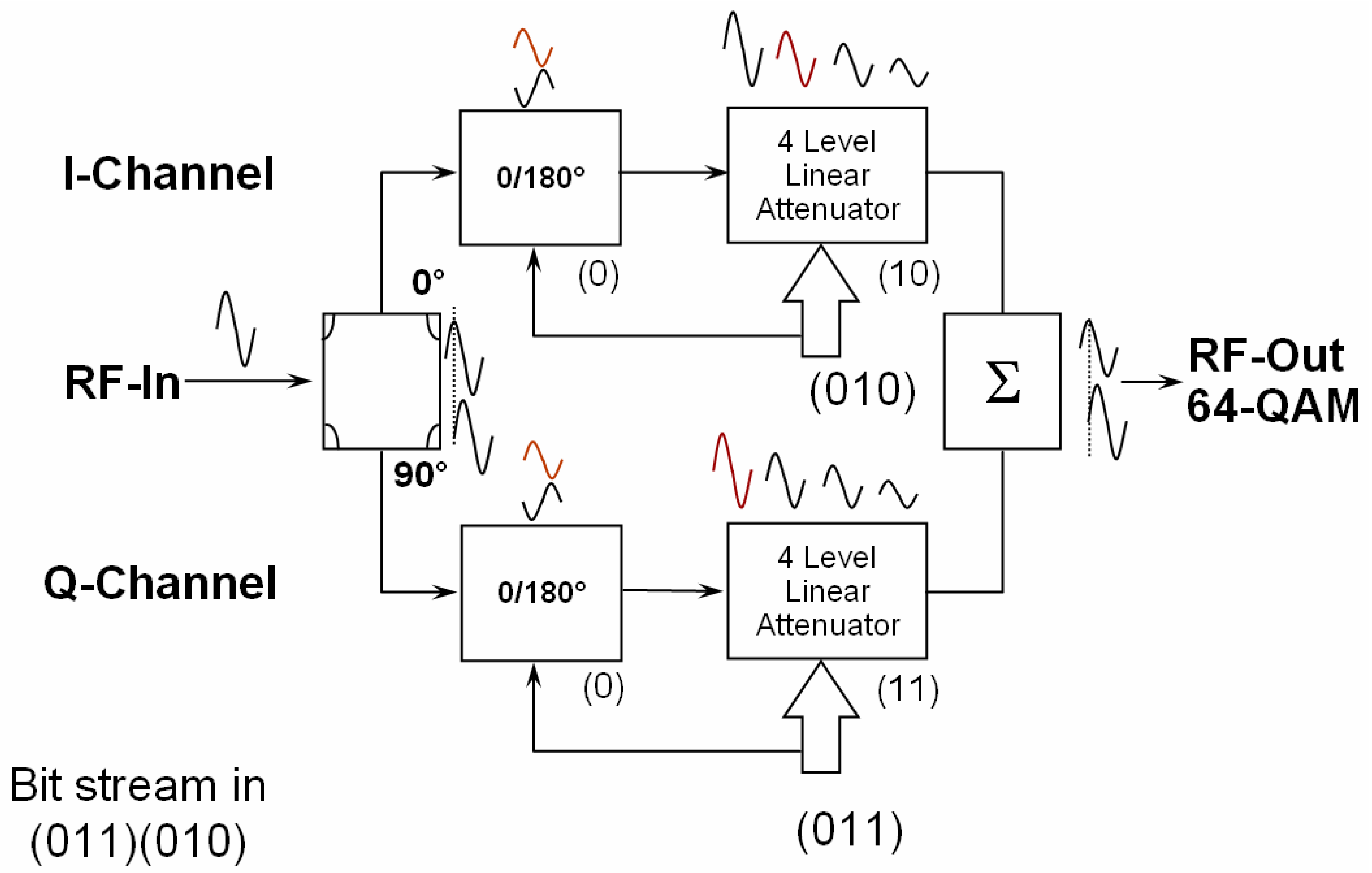


Modulacija ASK/PSK in QAM





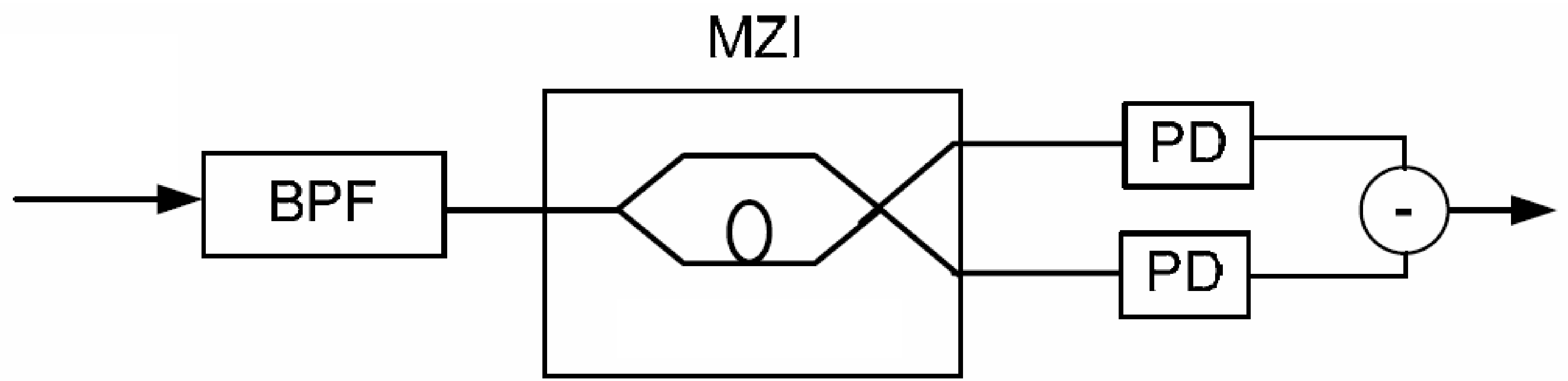
Modulacija 64-QAM



Primerjava modulacijskih formatov

Modulation Format	Bandwidth efficiency C/B	Log2(C/B)	Error-free Eb/No
16 PSK	4	2	18dB
16 QAM	4	2	15dB
8 PSK	3	1.6	14.5dB
4 PSK	2	1	10dB
4 QAM	2	1	10dB
BFSK	1	0	13dB
BPSK	1	0	10.5dB

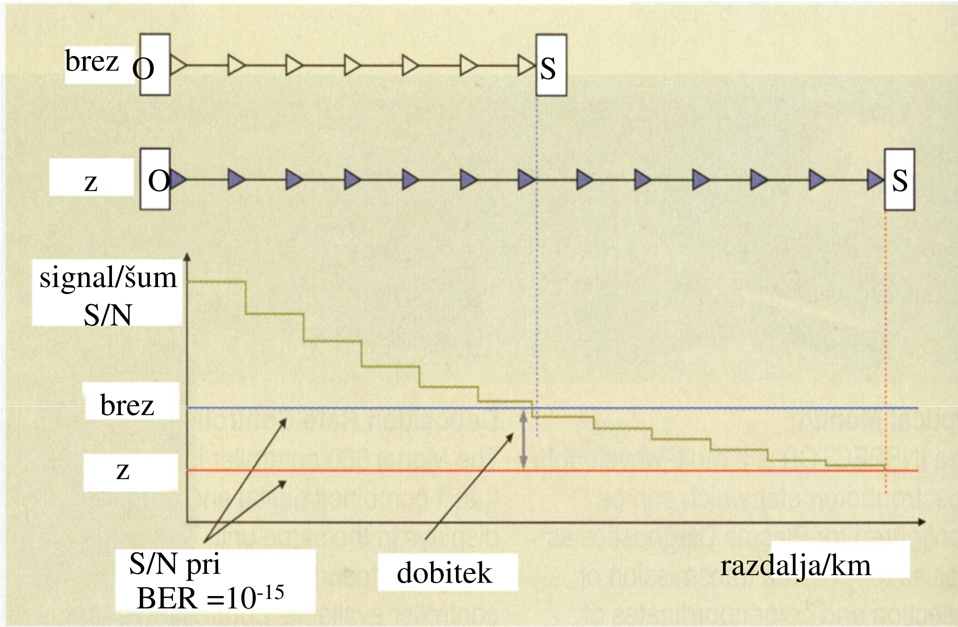
Sprejemnik NRZ-DPSK

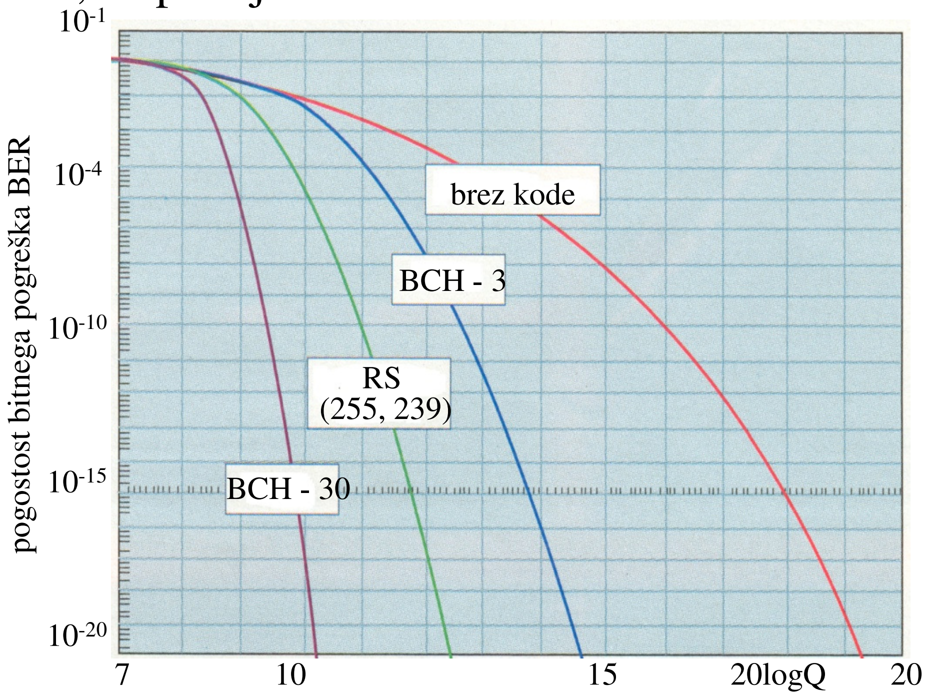


Zakasnilni interferometer
1 bit

VNAPREJŠNJA KOEKCIJA POGREŠKA (FEC)

- Način za znatno znižanje pogostosti bitnega pogreška (BER), efektivno povišanje razmerja signal/šum (S/N), oz. povečanje dosega optične zveze zlasti pri bitnih hitrostih B > 40 Gb/s
- Zmanjšanje posledic naključne motnje zaradi šumov, disperzije in nelinearnosti





Značilni rezultati:

- 40 Gb/s + 7% režije = 42,8 Gb/s
- BER (brez FEC) 2.10^{-3} --> BER (z FEC) 10^{-13}

- kodirni dobitek večji od 6 dB pri BER = 10^{-15}
- podvojitev razdalje

- korekcijski (redundantni) biti potujejo skupaj z informacijskimi biti v smeri naprej od oddajnika proti sprejemniku (režija)
- različne korekcijske kode dajejo različen kodirni dobitek in imajo različno režijo
- najpogosteje uporabljana Reed-Solomonova koda RS (255, 239) ima režijo okoli 7%, kodirni dobitek 5,5 dB pri BER = 10^{-12} in pri naključnih pogreških

BER

QAM Data Capacity

(Annex B, 6MHz)

	64 QAM	256 QAM	1024 QAM
Symbol Rate (Msps)	5.0569	5.3605	5.3605 (assumed)
Bits per symbol	6	8	10
Channel Data Rate (Mbps)	30.3417	42.8843	53.606
Info bit rate(Mbps)	26.9704	38.8107	~51
Overhead	11.11%	9.5%	~9.0 (asssumed)

ACTERNA

BER

Modulacija BPSK:

$$BER = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \approx \frac{0.2821}{\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}} e^{-\frac{E_b}{N_o}}$$

Modulacija DBPSK:

$$BER_{DBPSK} \approx 2BER_{BPSK} = \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \approx \frac{0.5642}{\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}} e^{-\frac{E_b}{N_o}}$$

Modulacija QPSK:

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \approx \frac{0.2821}{\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}} e^{-\frac{E_b}{N_o}}$$

BER in število napak

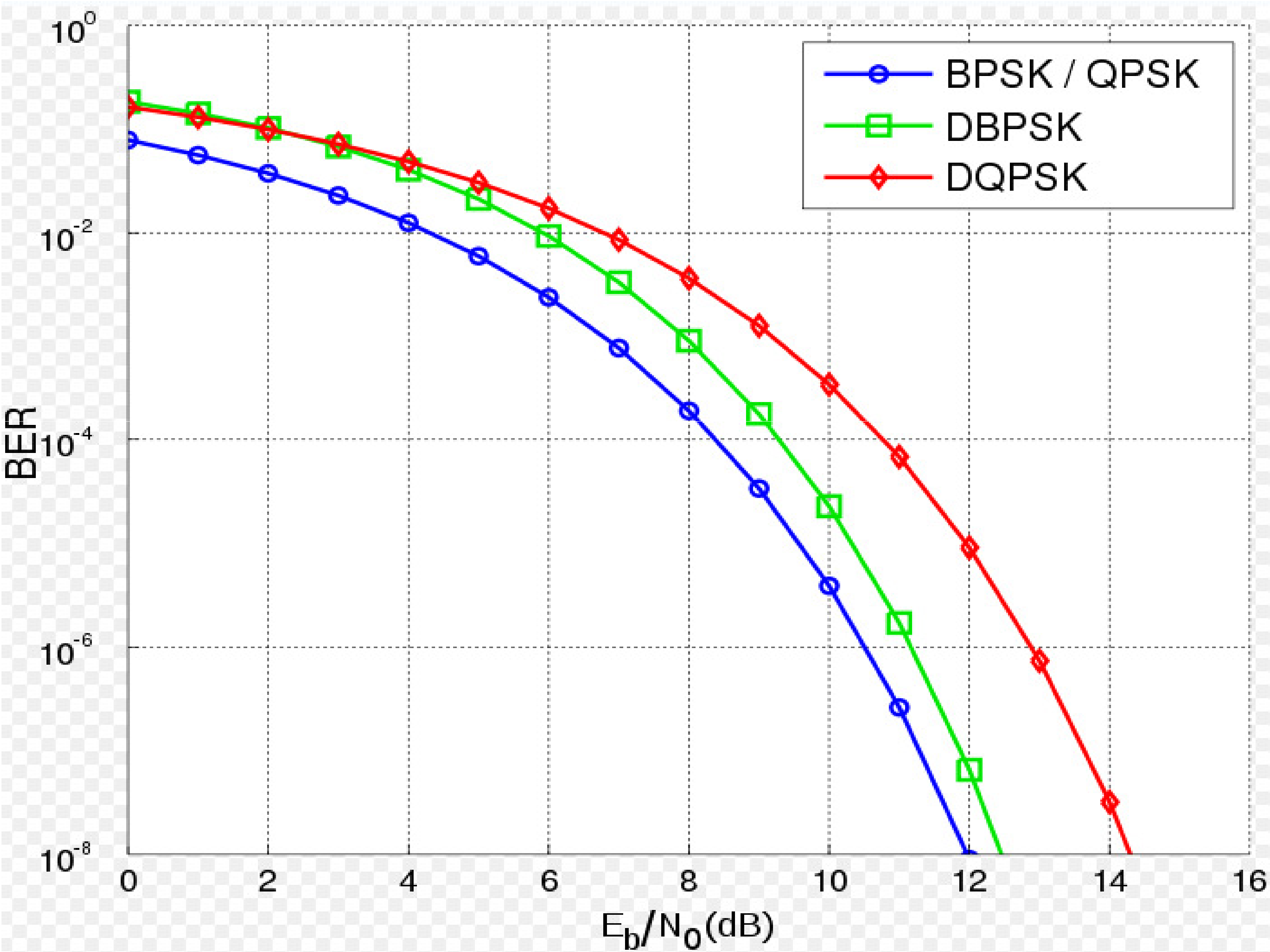
Primer: simbolni pretok R_S = 5 MS/s, simboli k = 8 mestni

BER	Error Frequency	Error Incident
10^{-12}	1 in 1 Trillion bits	25000 secs between errs (6.94 hrs)
10^{-11}	1 in 100 Billion bits	2500 secs between errs (41.67 mins)
10^{-10}	1 in 10 Billion bits	250 secs between errs (4.167 mins)
10^{-9}	1 in 1 Billion bits	25 seconds between errors
10^{-8}	1 in 100 Million bits	2.5 seconds between errors
10^{-7}	1 in 10 Million bits	4 errors per second
10^{-6}	1 in 1 Million bits	40 errors per second
10^{-5}	1 in 100 Thousand bits	400 errors per second
10^{-4}	1 in 10 Thousand Bits	4000 errors per second
10^{-3}	1 in 1 Thousand bits	40000 errors per second

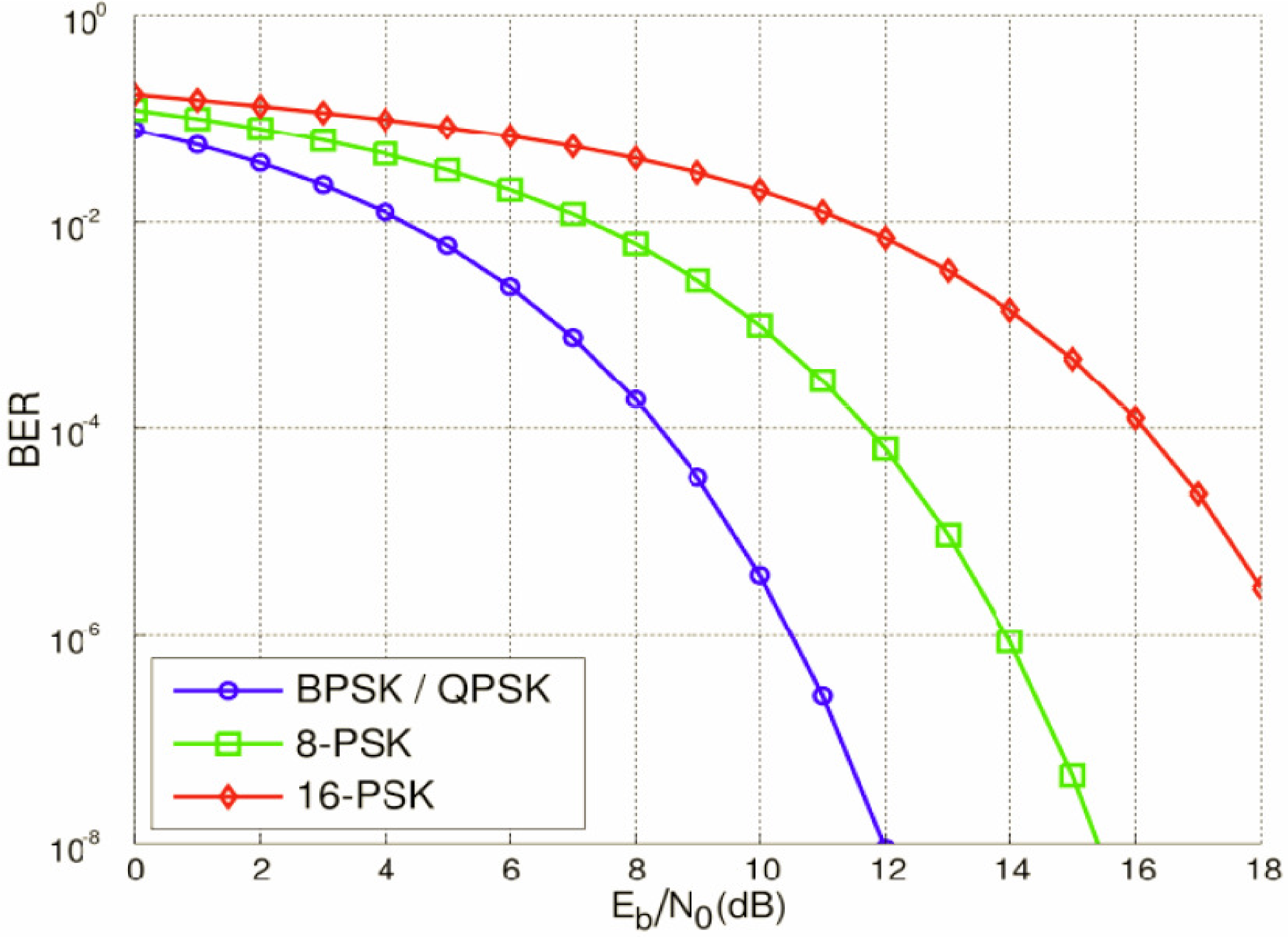
$SER = R_S \times BER$

Število bitnih napak/s = $R_b \times BER = R_S \times k \times BER$ = 40 napak/s

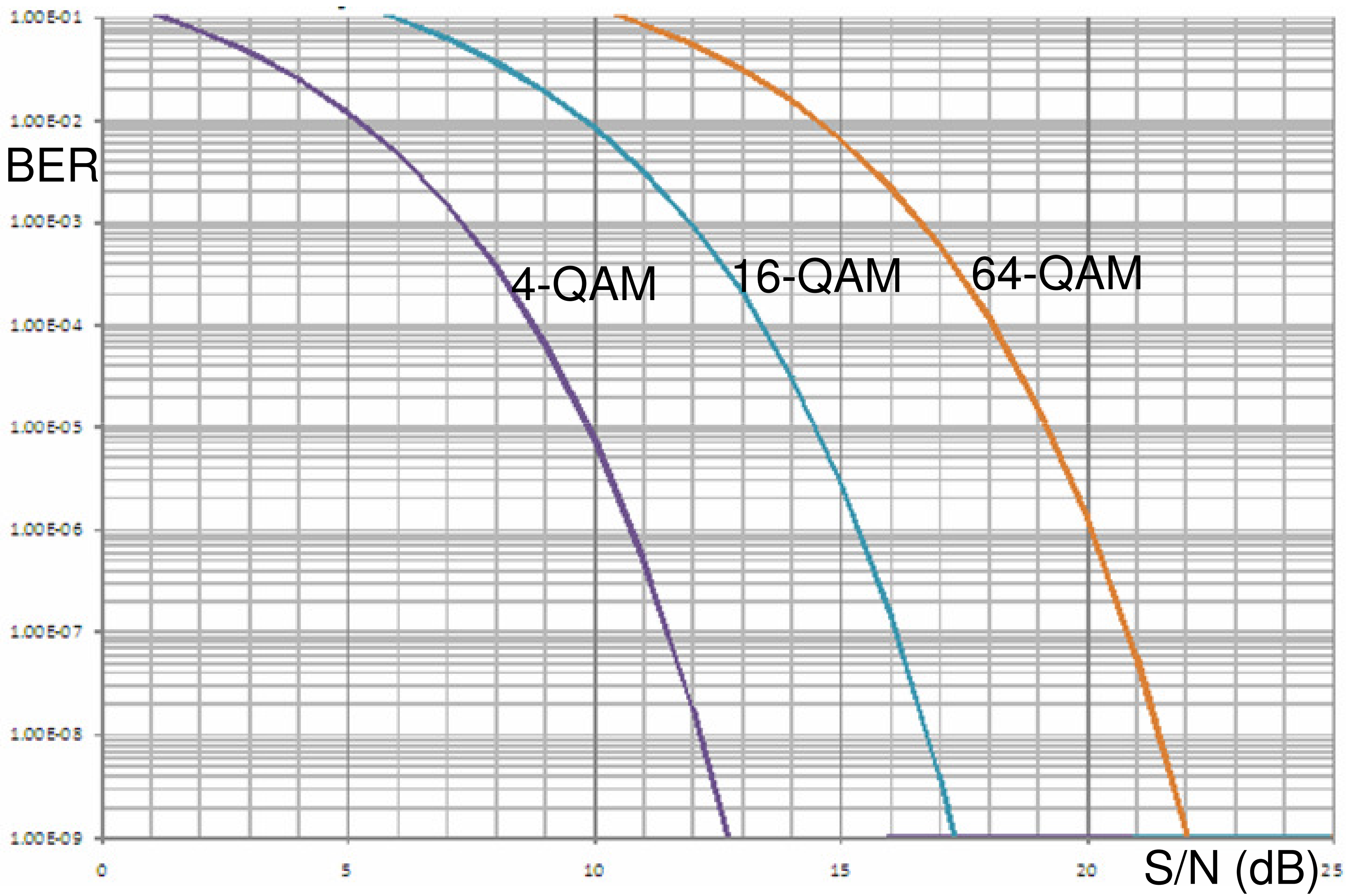
BER za BPSK/QPSK, DBPSK, DQPS



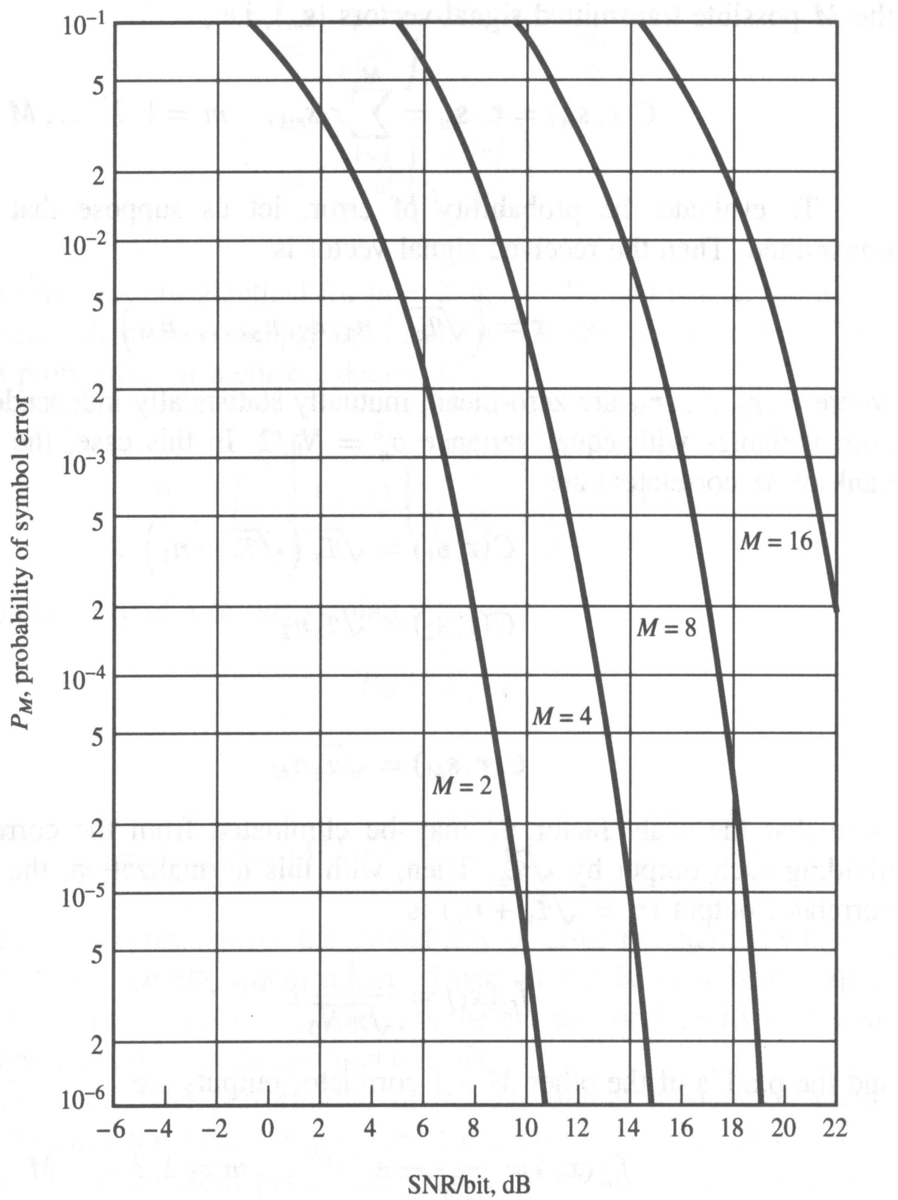
BER za QPSK in M-PSK

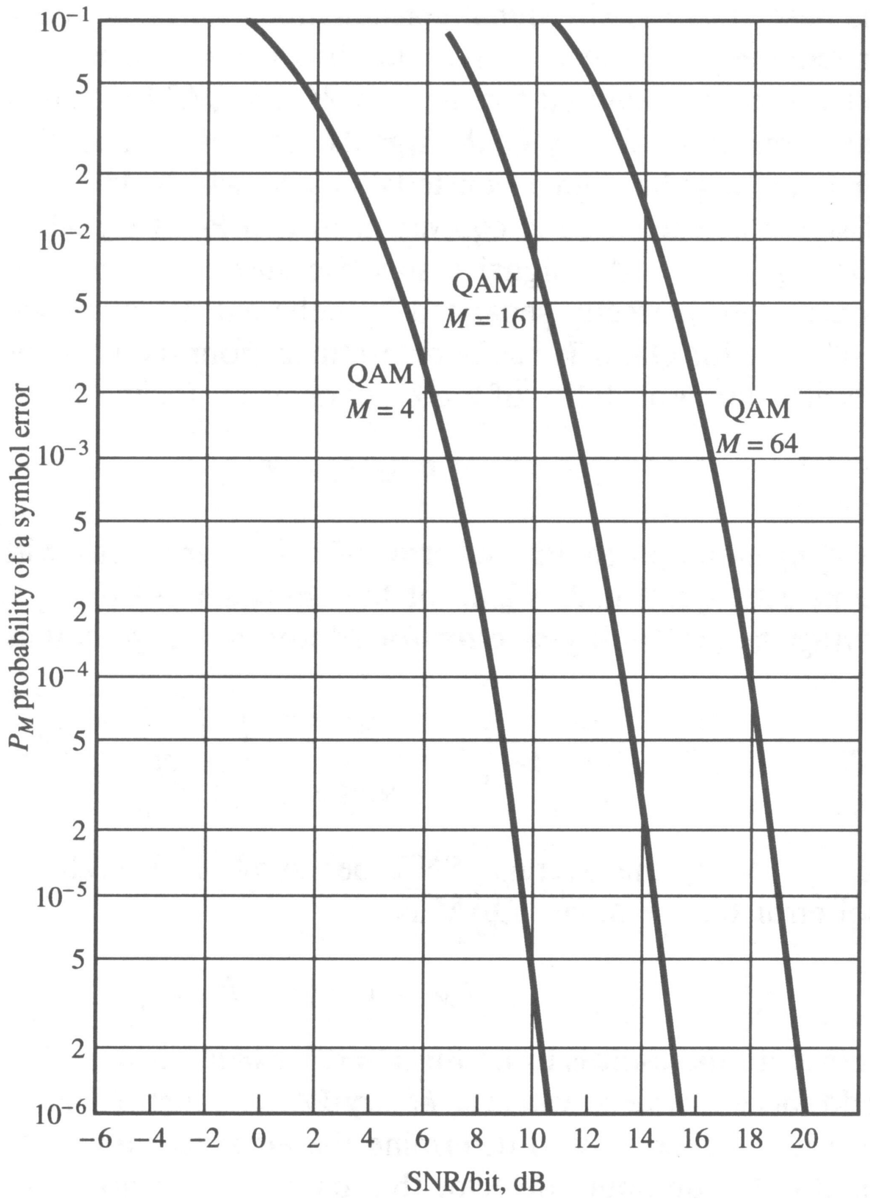


BER za 4-QAM, 16-QAM in 64-QAM

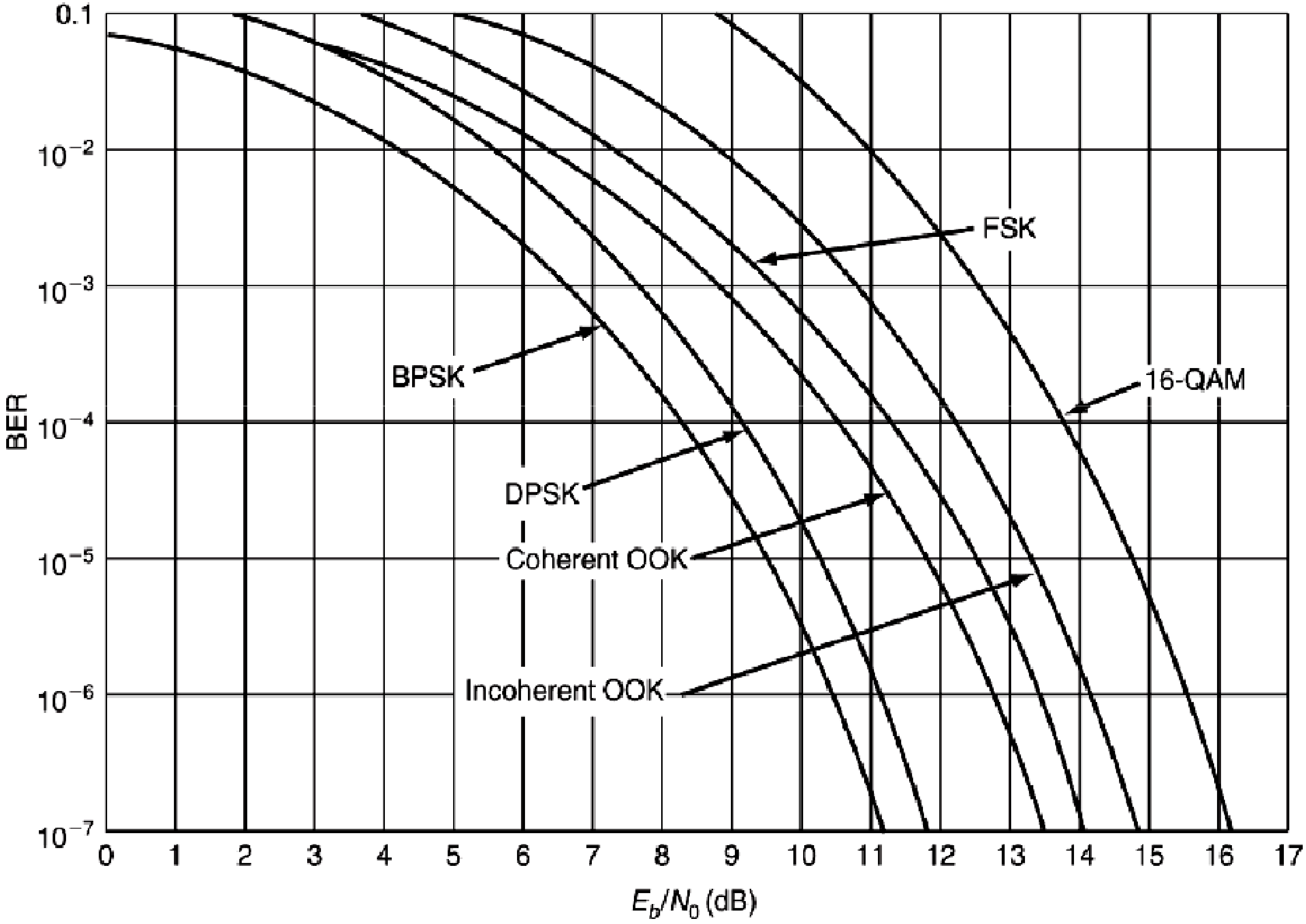


BER za M-PSK in M-QAM

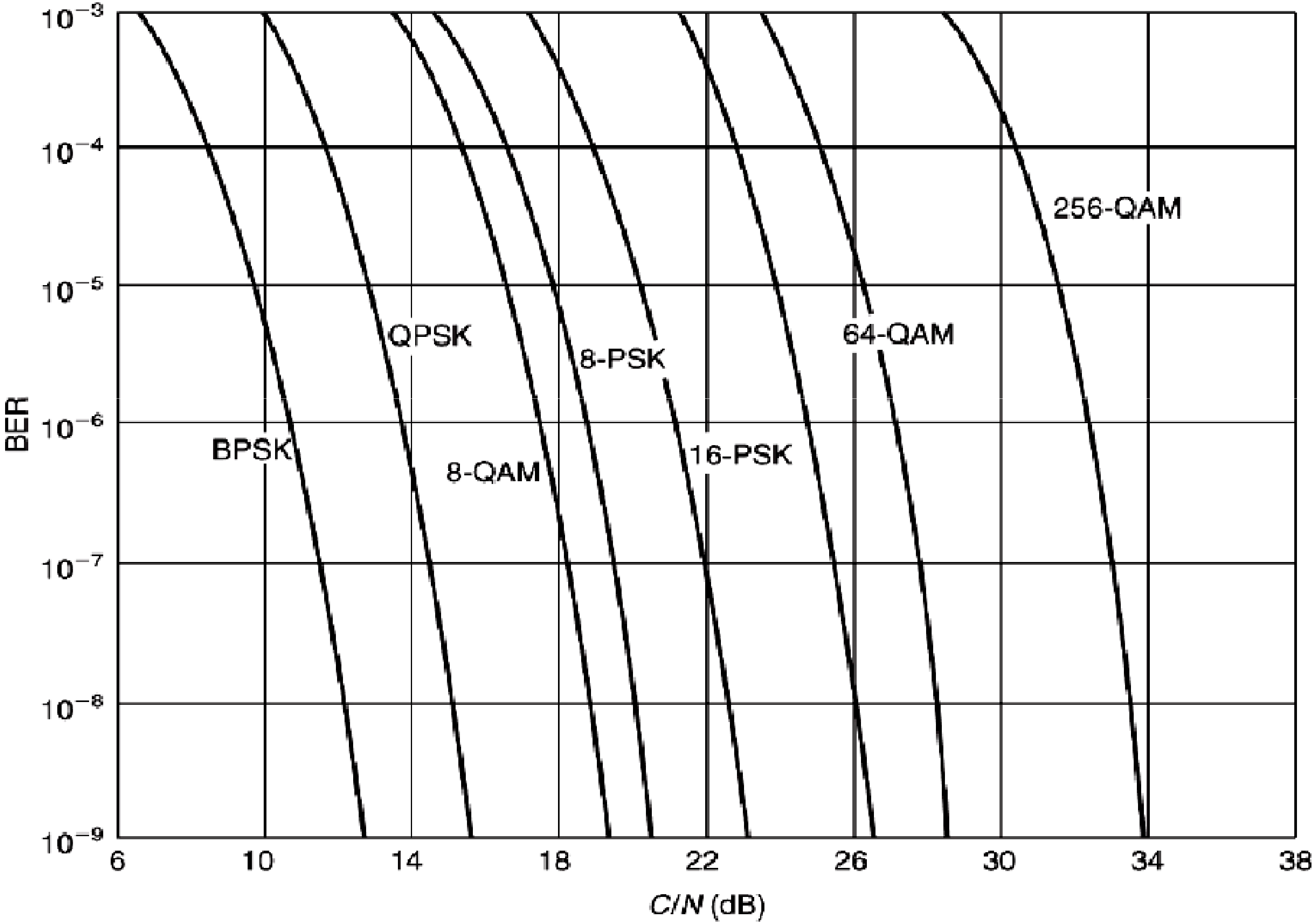




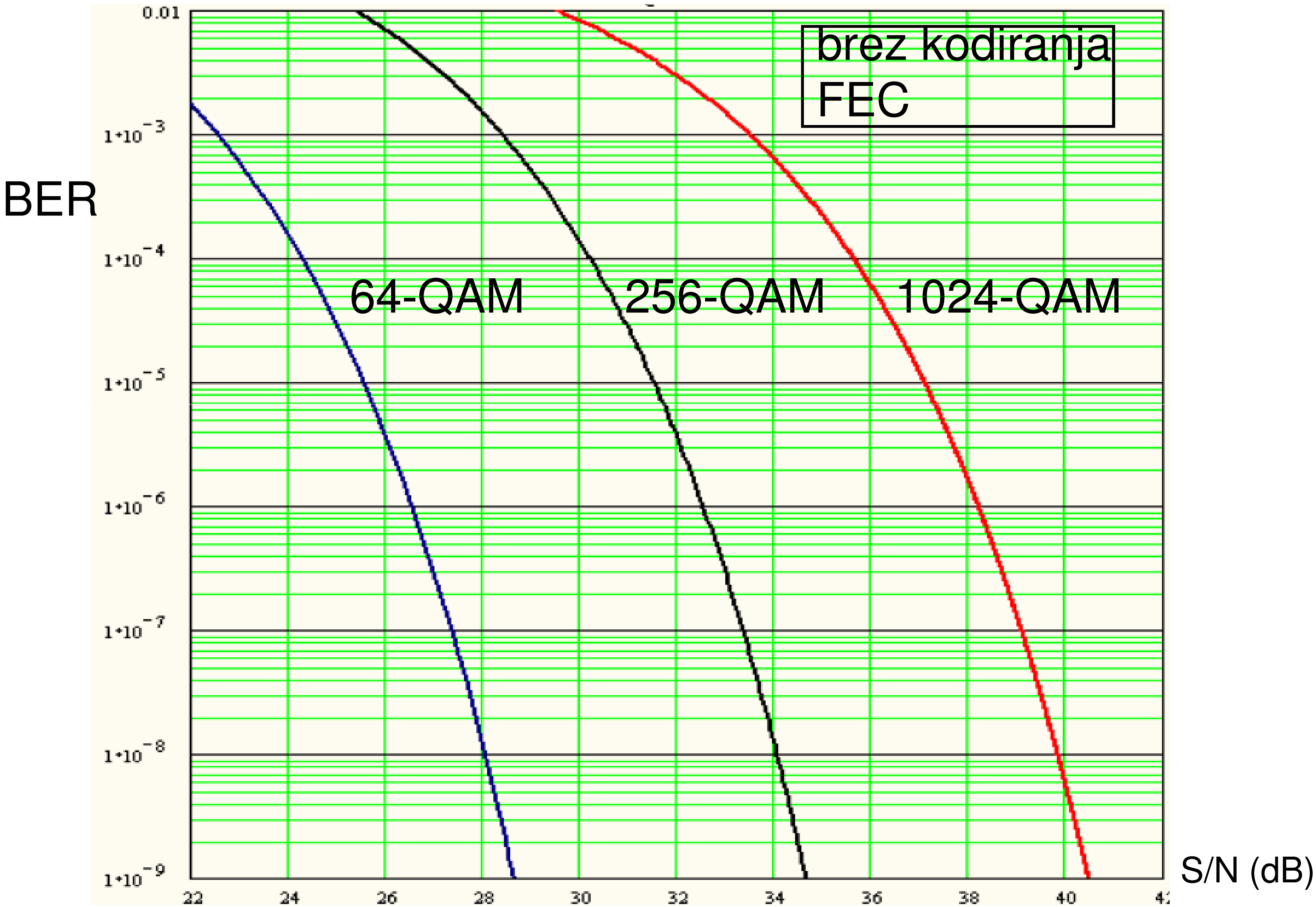
Bitni pogrešek BER



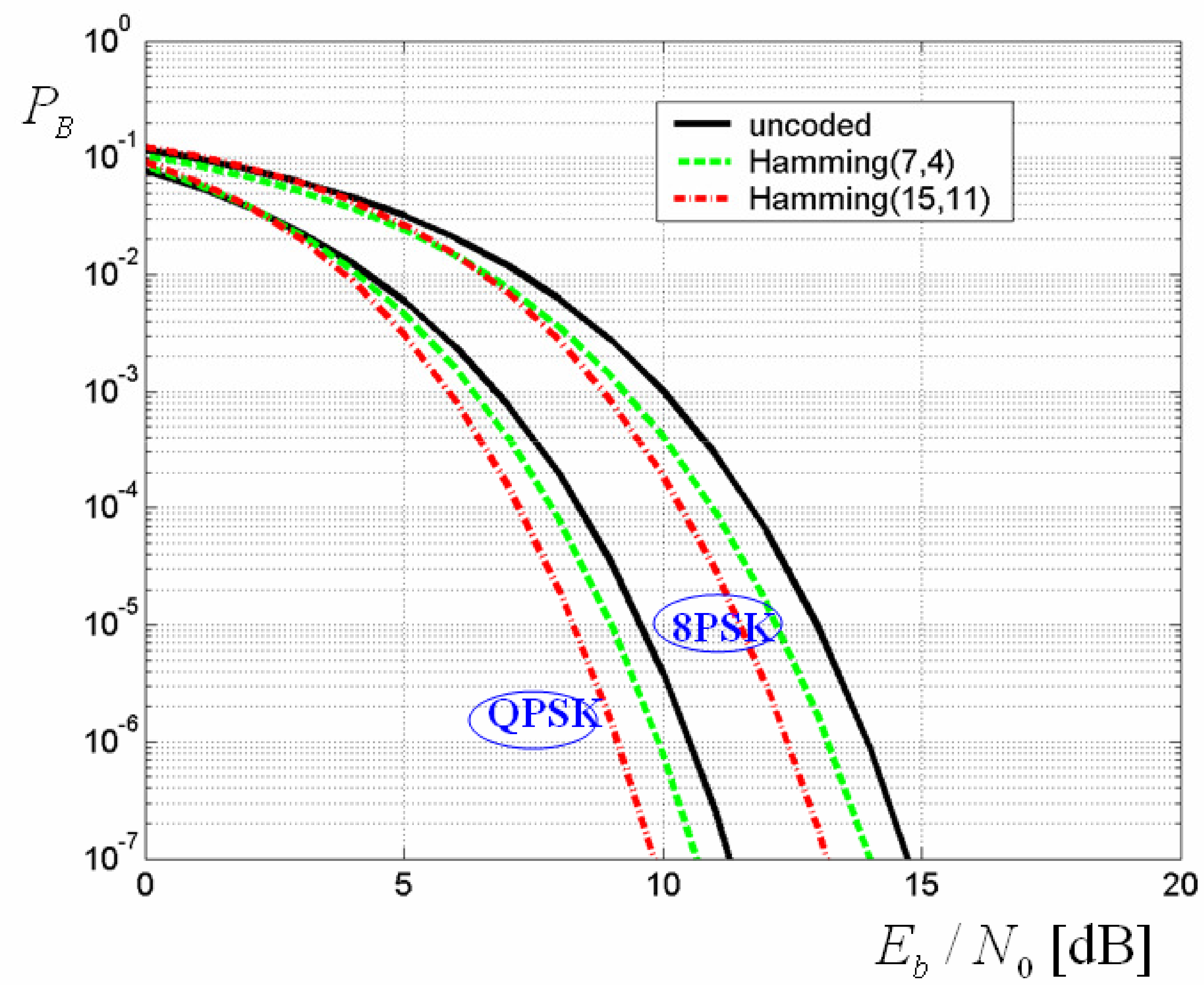
Bitni pogrešek BER



BER za QAM


BER
0.01
1*10^-3
1*10^-4
1*10^-5
1*10^-6
1*10^-7
1*10^-8
1*10^-9
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
brez kodiranja
FEC
64-QAM
256-QAM
1024-QAM
S/N (dB)

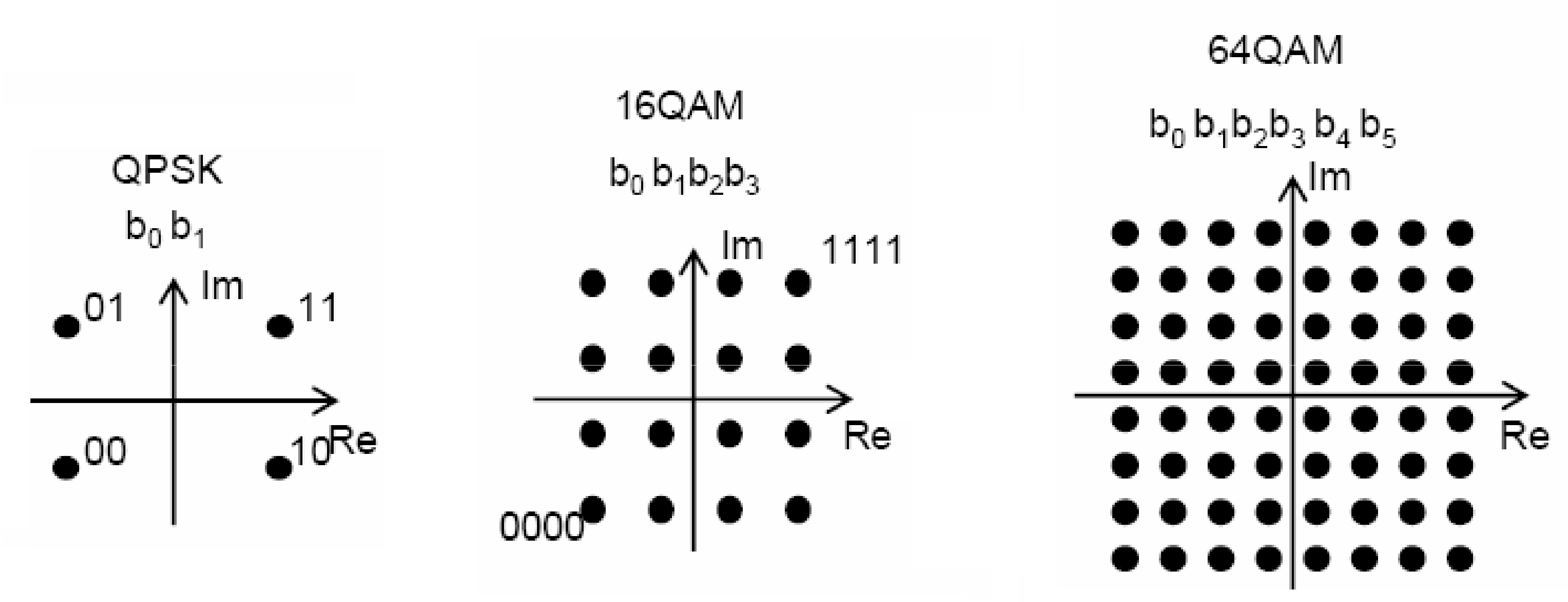
Odvisnost pogreška od kodiranja



BER za različne formate

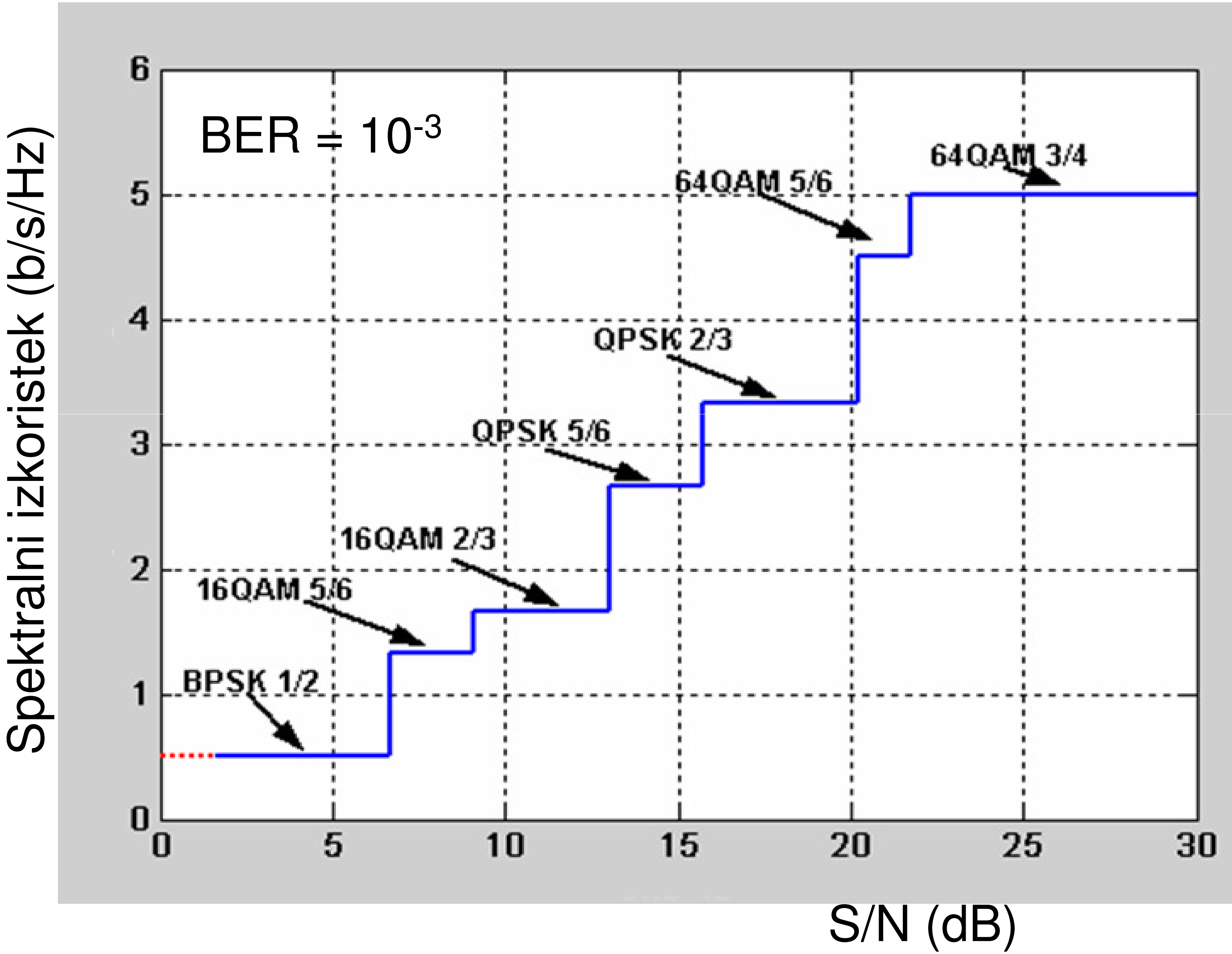
Modulation Scheme	Theoretical BER Calculation
Coh-PSK	BER = 0.5*ERFC(SQRT((Eb/No)))
Coh-DPSK	BER = ERFC(SQRT((Eb/No)))-0.5*(ERFC(SQRT((Eb/No))))^2
Coh-QPSK	BER = ERFC(SQRT((Eb/No)))-0.25*(ERFC(SQRT((Eb/No))))^2
Ncoh-QPSK(Dif)	BER = ERFC(SQRT(2*(Eb/No))*SIN(PI()/4))
Coh-8-PSK	BER = ERFC(SQRT(3*(Eb/No))*SIN(PI()/8))
Ncoh-8PSK(Dif)	BER = ERFC(SQRT(2*3*(Eb/No))*SIN(PI()/(2*8)))
16-QAM	BER = ((1-1/K)/(LOG(K)/LOG(2)))*ERFC(SQRT(3*(LOG(K)/LOG(2))/(K^2-1)*(Eb/No))) Where K = 4
32-QAM	BER = ((1-1/K)/(LOG(K)/LOG(2)))*ERFC(SQRT(3*(LOG(K)/LOG(2))/(K^2-1)*(Eb/No))) Where K = 6
64-QAM	BER = ((1-1/K)/(LOG(K)/LOG(2)))*ERFC(SQRT(3*(LOG(K)/LOG(2))/(K^2-1)*(Eb/No))) Where K = 8
256-QAM	BER = ((1-1/K)/(LOG(K)/LOG(2)))*ERFC(SQRT(3*(LOG(K)/LOG(2))/(K^2-1)*(Eb/No))) Where K = 16
Coh-4FSK	BER = 0.5*ERFC(SQRT((Eb/No)/2))

Modulacijske sheme za WiMax in LTE

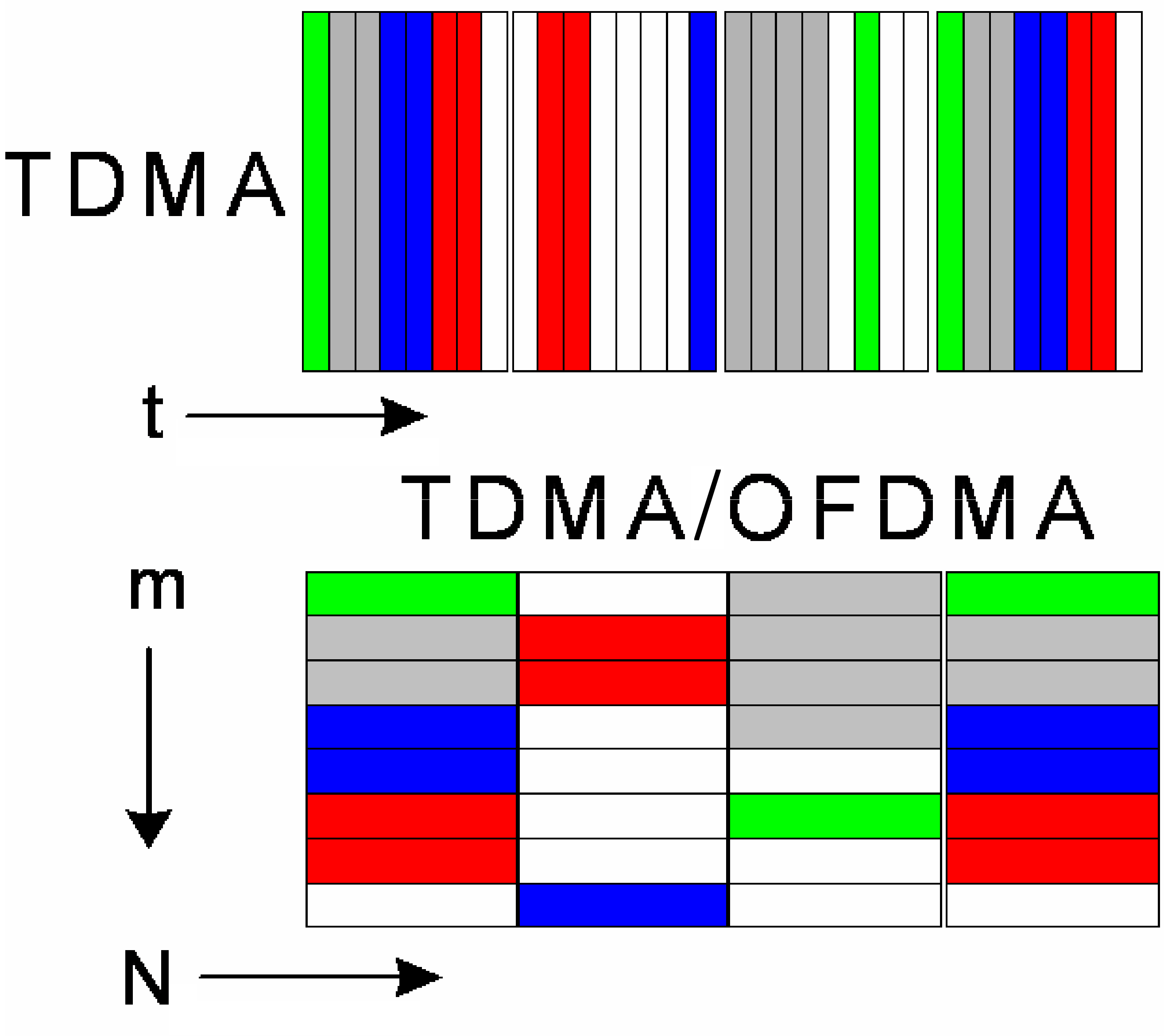


256-QAM bo naslednji modulacijski format za široko uporabo.

Spektralni izkoristek



Mnogonosilniški sistemi

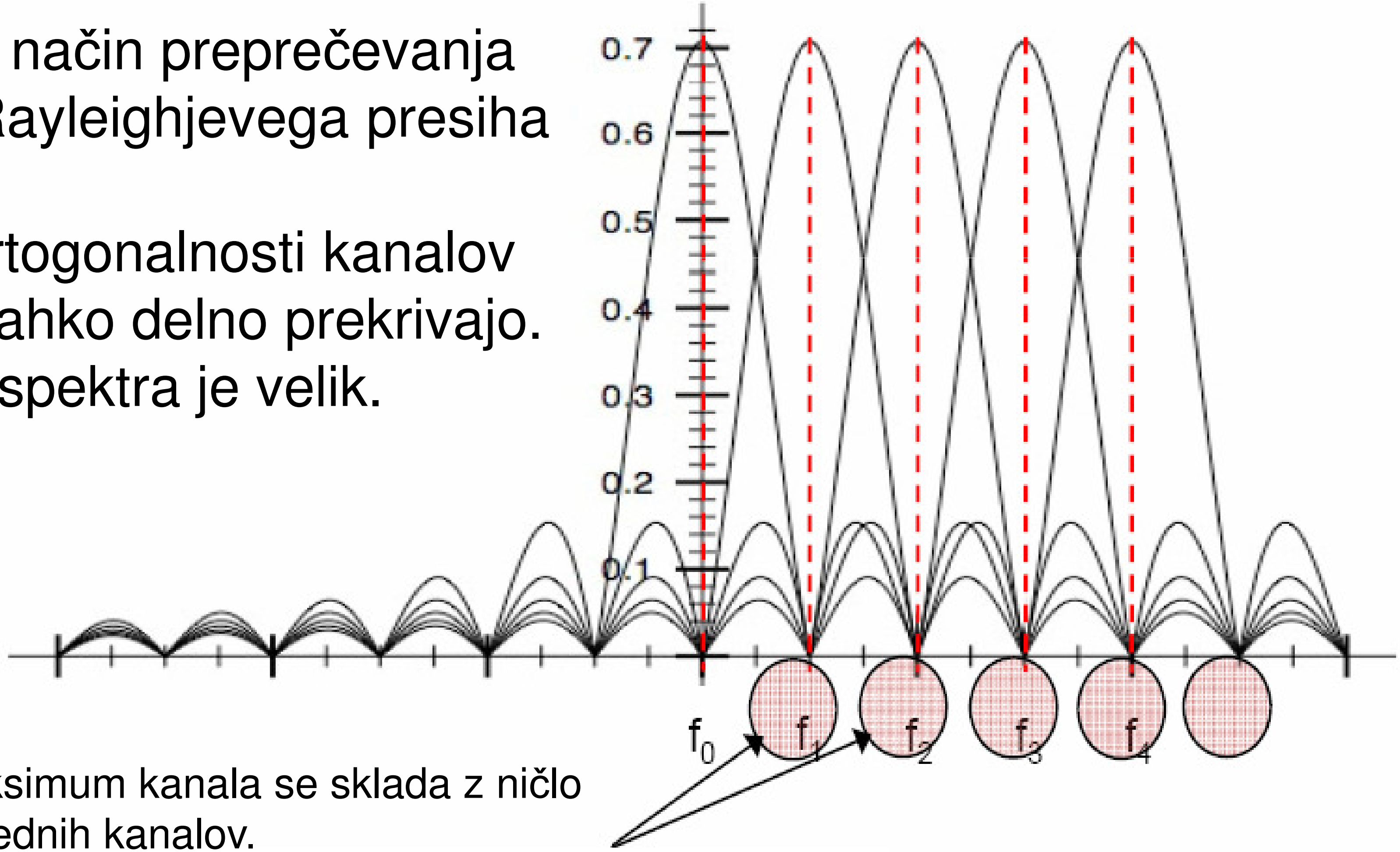


OFDM – mnogonosilniški pasovi

$$f_n = f_0 + nf_s = f_0 + n\frac{1}{T_s} \qquad n = \ldots -1, 0, 1, 2 \ldots$$

- OFDM je način preprečevanja posledic Rayleighjevega presiha

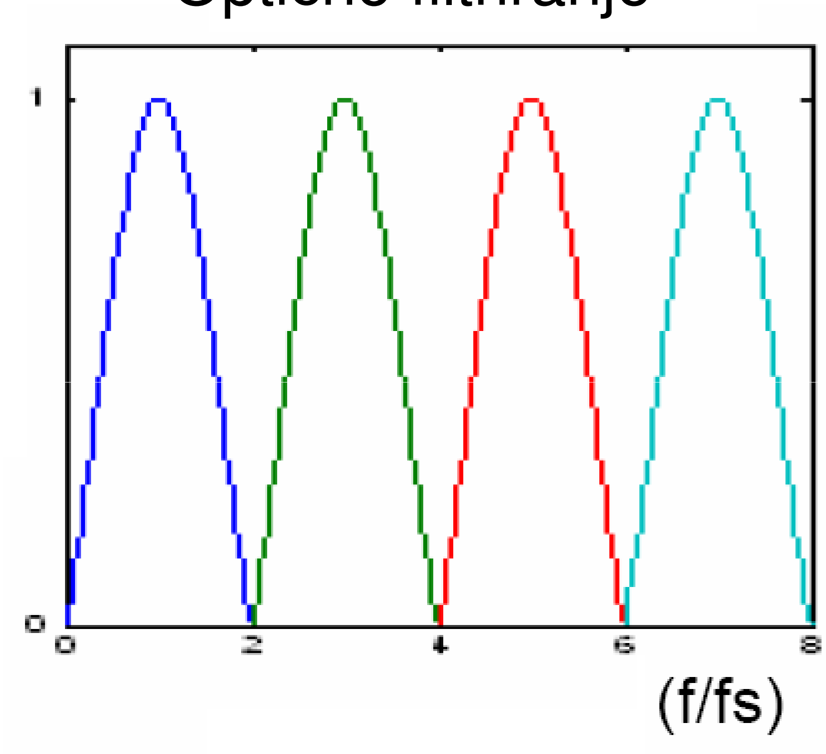
- Zaradi ortogonalnosti kanalov se kanali lahko delno prekrivajo. Izkoristek spektra je velik.



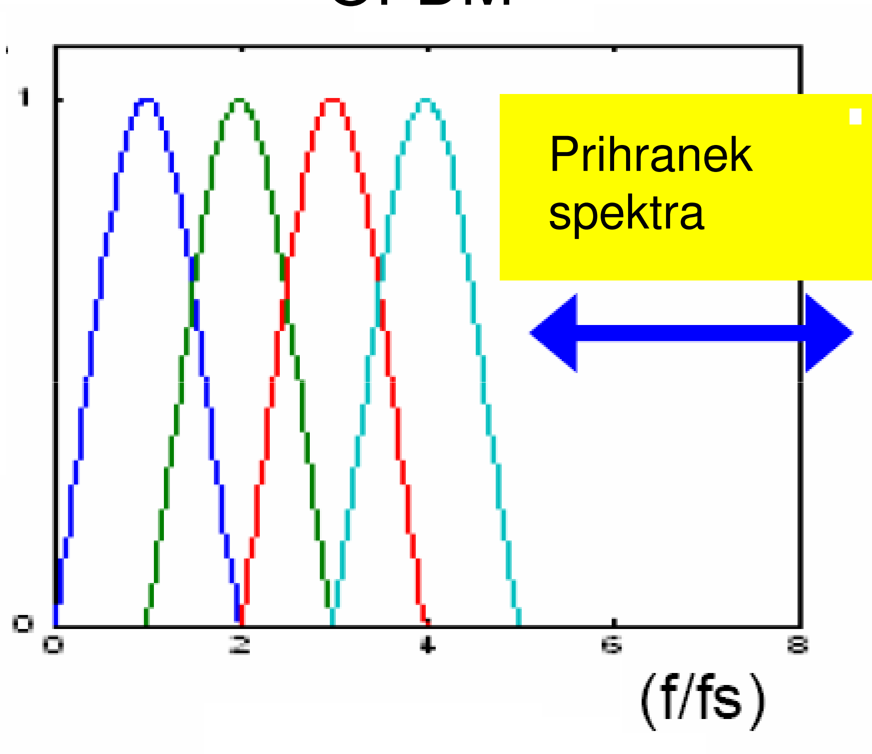
Maksimum kanala se sklada z ničlo sosednih kanalov.

OFDM – prihranek spektra

Optično filtriranje



OFDM



Sklep

Z višanjem reda modulacije in kodiranja zvišujemo kapaciteto in znižujemo odpornost

- Modulacija : QPSK, 16QAM, 64QAM, (DQPSK)

QPSK	16QAM	64QAM

← Večja odpornost

Višja kapaciteta →

- Popravek napake: Kodiranje–konvolucijske kode (1/2 - 7/8)

1/2	2/3	3/4	5/6	7/8

← Večja odpornost

Višja kapaciteta →

Ni mogoče hkrati doseči večje odpornosti in višje kapacitete.

KONEC