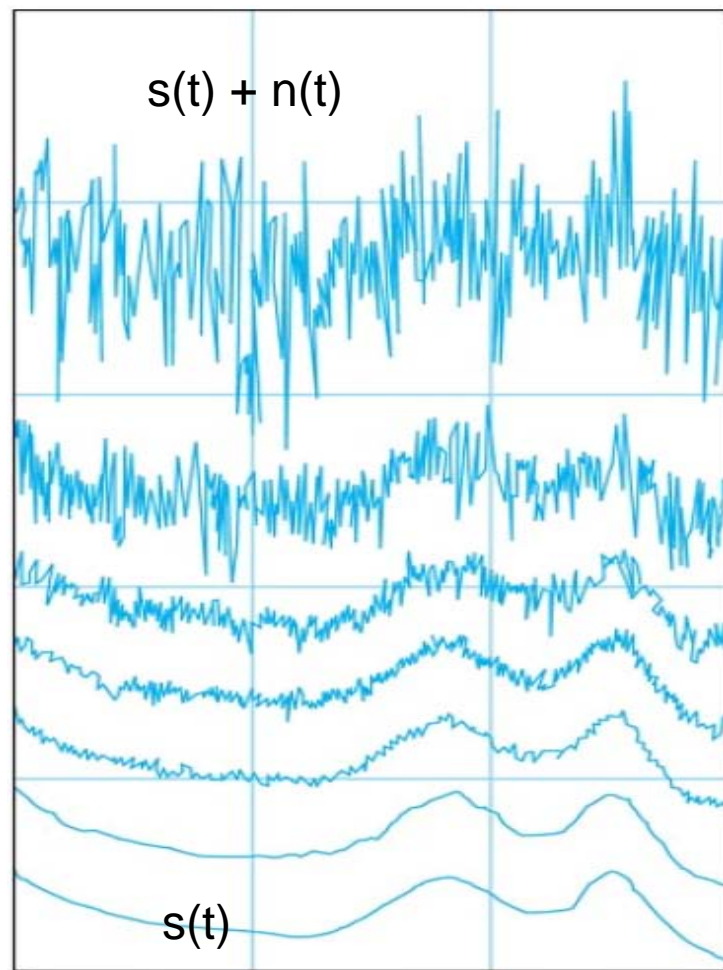


Signal, šum in spekter

- Analogni in digitalni signali
- Koherenca in interferenca
- Viri šumov
- Termični in kvantni šum
- Planckov zakon sevanja črnega telesa
- Digitalne modulacije
- Spektri mobilnih zvez

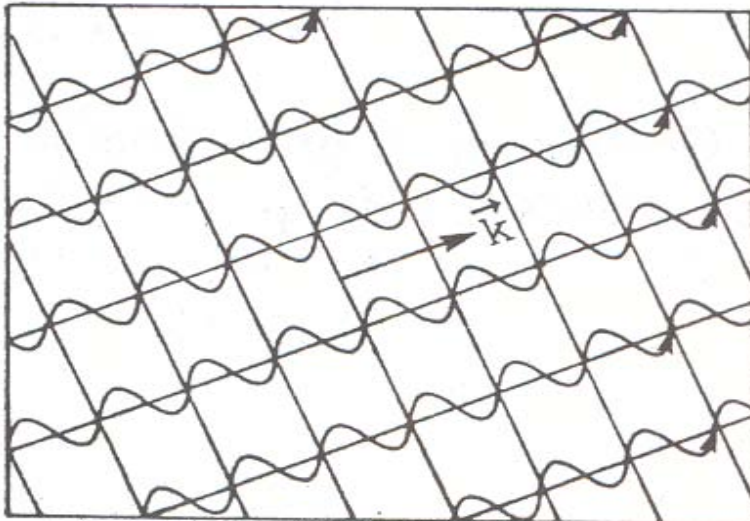


Analogni in digitalni signali

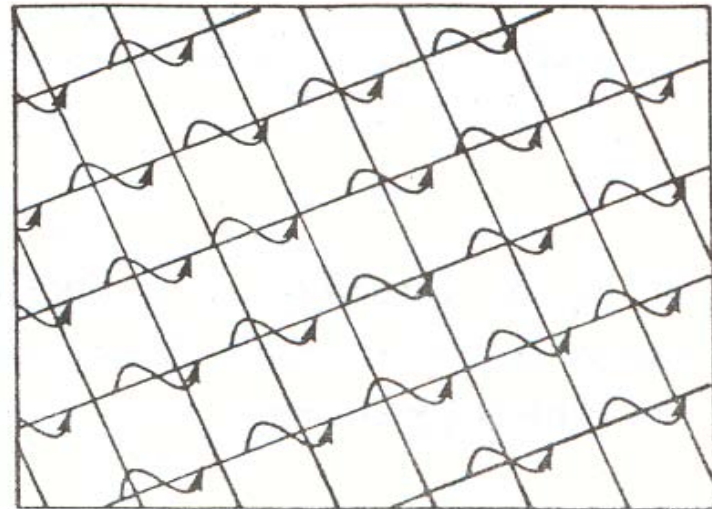
- Analogni signali:
 - Koherentni, monokromatski
 - Nekoherentni, polikromatski
- Digitalni:
 - Večnivojski
 - Binarni

Monokromatski in polikromatski ravninski val

Ravninski monokromatski val



Ravninski polikromatski val

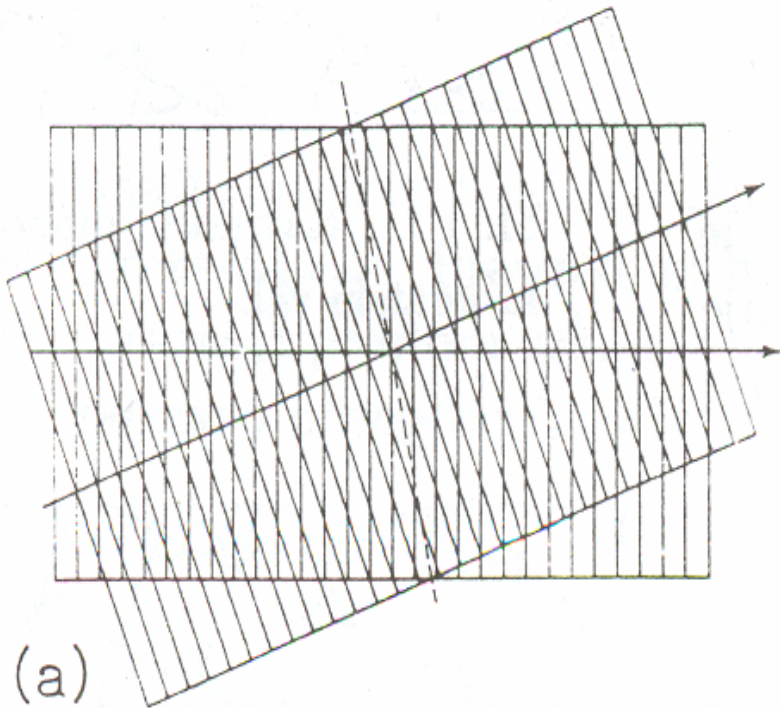


- Ena frekvenca
- Konstantna faza
- Nepretrganost vala

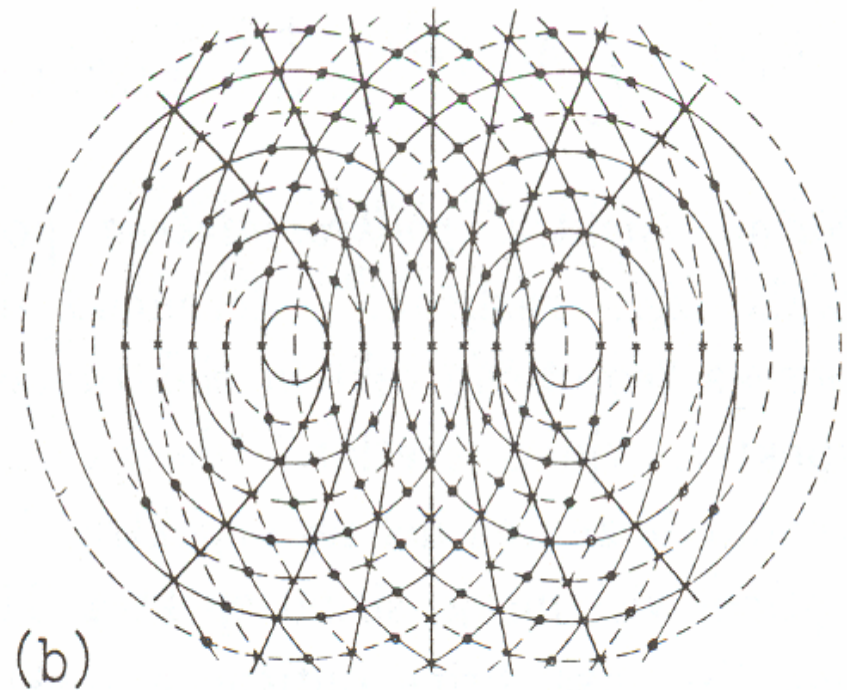
- Širok spekter diskretnih ali zveznih frekvenc
- Naključna faza
- Pretrgani valovni paketi

Interferenca v prostoru

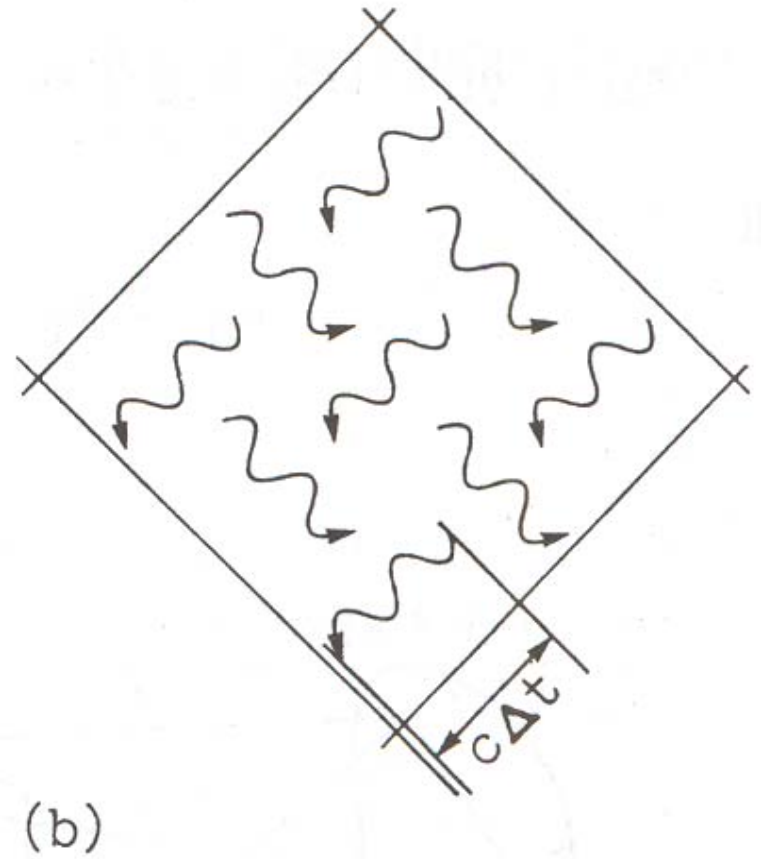
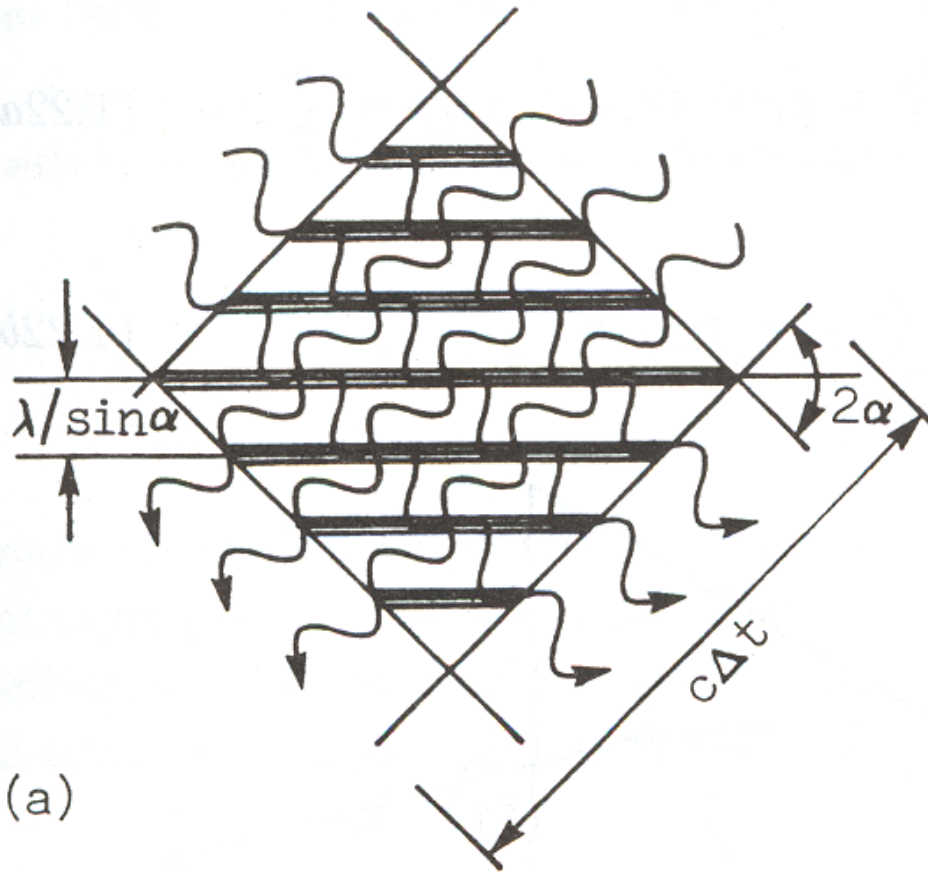
- Interferenca koherentnih ravninskih valov



- Interferenca koherentnih valjnih valov



Interferenca koherentnih in nekoherentnih valov



Koherenca polja

$E(r,t) = A(r,t)e^{j\phi(r,t)}$, kompleksna časovna fluktuacija amplitude in faze skalarne polja

$E_{tren}(r,t) = \text{Re}[E(r,t)e^{j\omega t}]$, trenutna vrednost poljske jakosti

Stopnja koherence:

Normirana časovna korelacija polj E_1 in E_2 v točkah prostora r_1 in r_2 in ob času t_1 in t_2 s presledkom t :

$$\gamma(r_1, r_2, \tau) = \frac{\overline{E_1(r_1, t + \tau)E_2^*(r_2, t)}}{\sqrt{\overline{E_1(r_1, t)E_1^*(r_1, t)} \overline{E_2(r_2, t)E_2^*(r_2, t)}}}$$

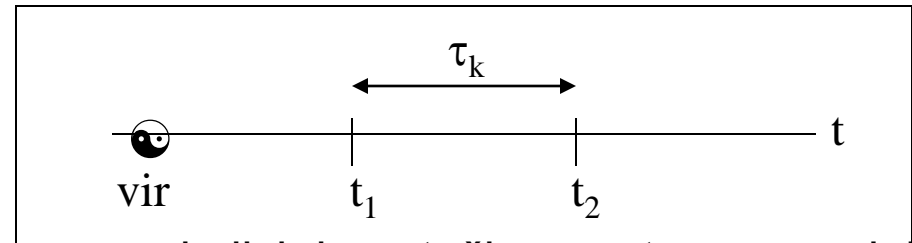
Posebna primera:

- korelacija v dveh časih $\gamma(t_1, t_2)$
- korelacija v dveh točkah $\gamma(r_1, r_2)$

• časovna koherenca:

Polje spektralne širine $\Delta\nu$ ohranja koherenco v dani točki prostora v koherentnem času t_k :

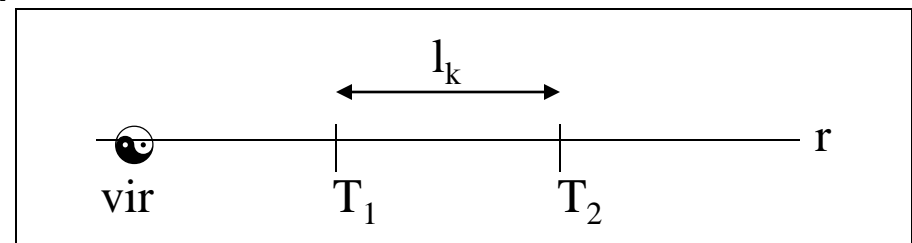
$$\tau_k = \frac{1}{\Delta\nu}, \text{ koherentni čas}$$



• vzdolžna (prostorska) koherenca:

Polje spektralne širine $\Delta\nu$ ohranja koherenco v okolici dane točke prostora na vzdolžni koherentni dolžini l_k v smeri širjenja:

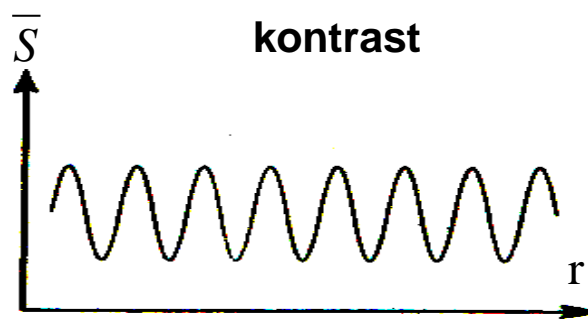
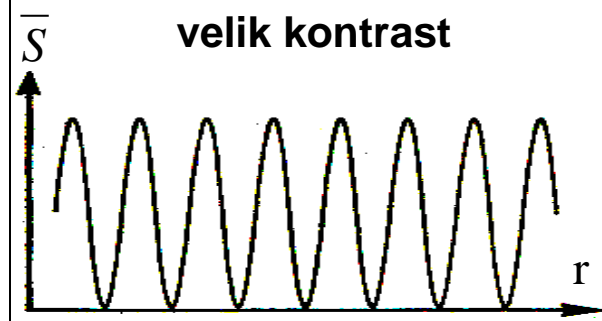
$$l_k = c\tau_k = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \text{ koherentna dolžina}$$



Interferenca in aditivnost

Superpozicija polja virov 1 in 2. Zapis kompl. amplitude polja: $E(r,t) = A(r,t)e^{j\phi(r,t)}$

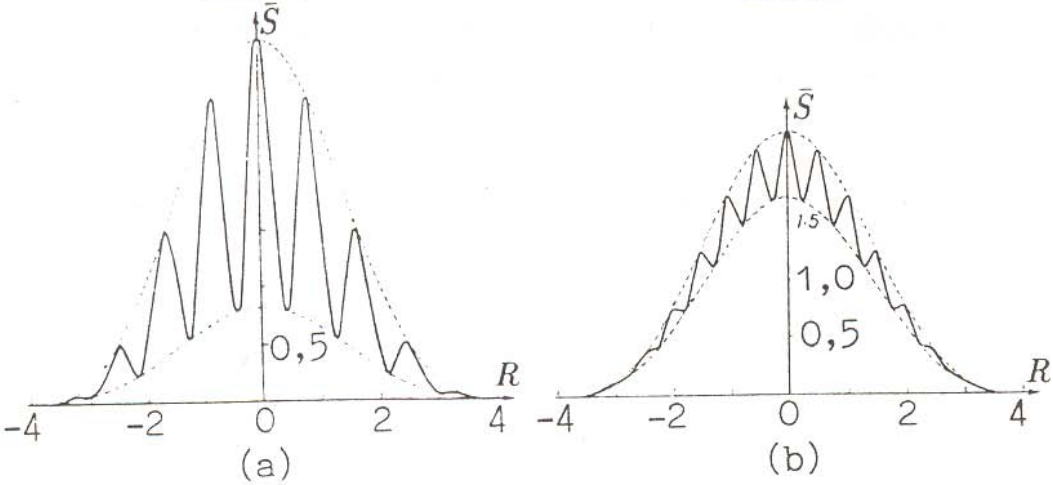
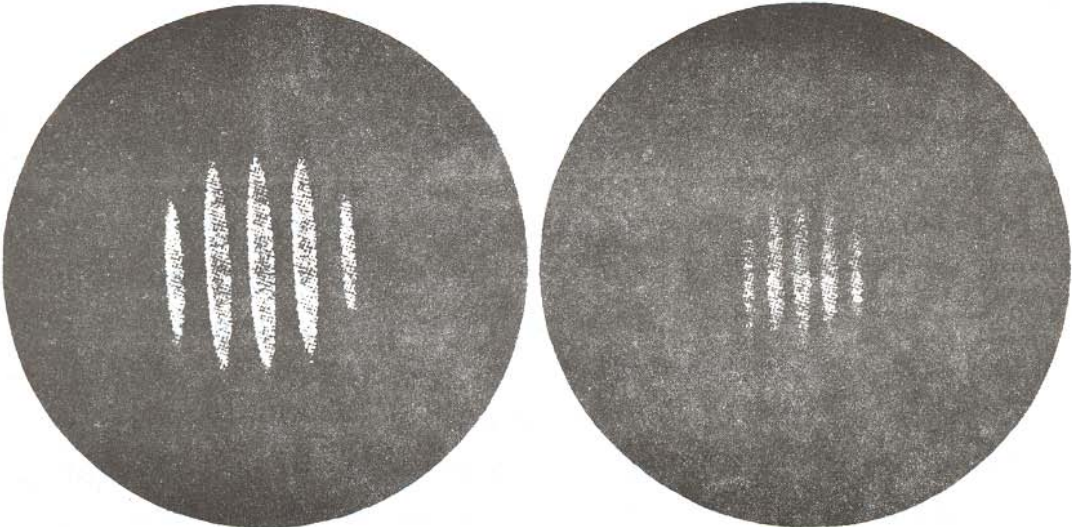
Koherentno polje	Delno koherentno polje	Nekoherentno polje
$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = \max$ $\gamma = 1$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2} + 2\sqrt{\overline{S_1 S_2}} \cos \phi$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} \neq 0$ $0 < \gamma < 1$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2} + \frac{1}{Z_0} \operatorname{Re} \left[\overline{E_1 E_2^*} \right]$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = 0$ $\gamma = 0$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2}$



KOHERENCA: aditivnost po polju (ni aditivnosti po moči)

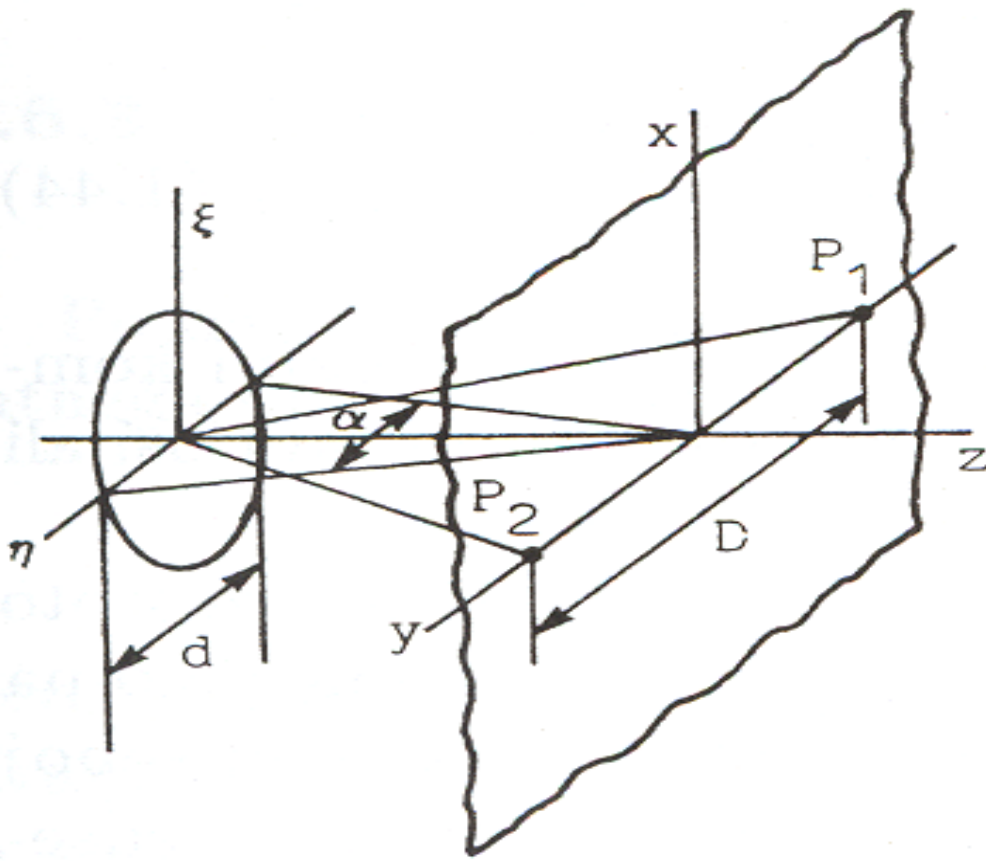
NEKOHERENCA: aditivnost po polju in aditivnost po moči

Primer interference svetlobe

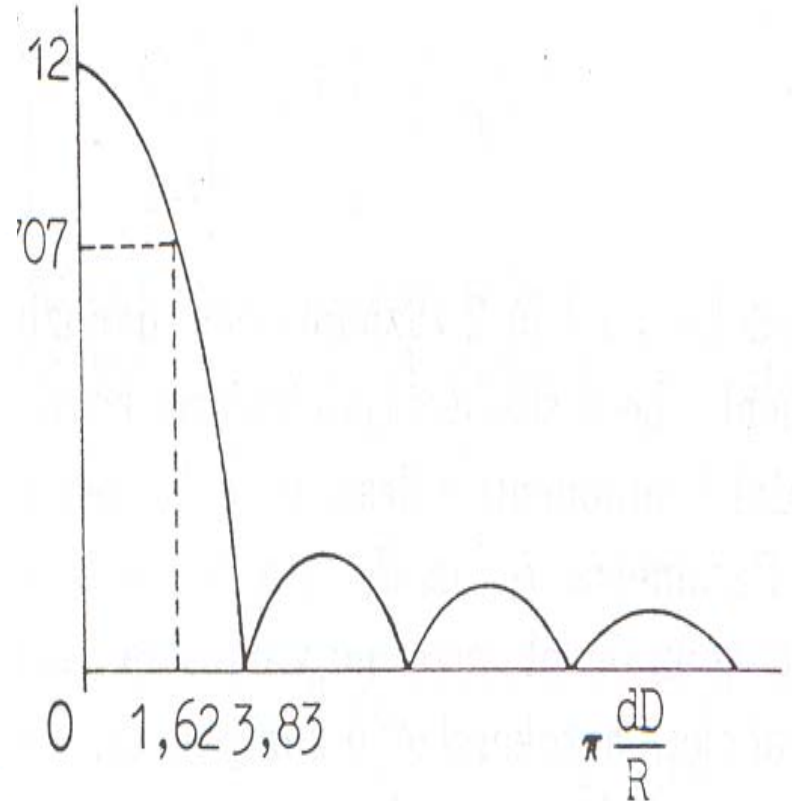


Stopnja prečne koherence

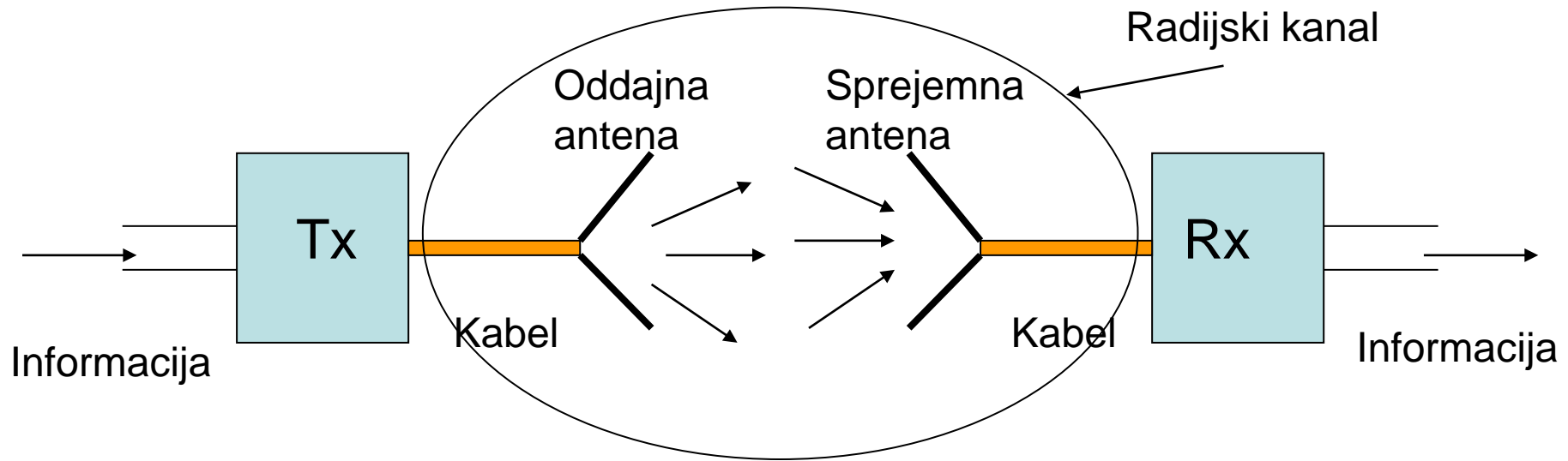
- Porazdeljen vir



(a)



Radijski kanal v prostoru



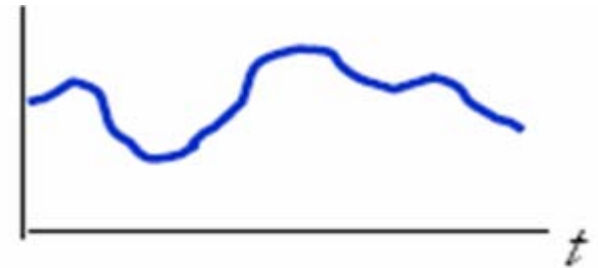
- Modulator v oddajniku pretvarja informacijski (bitni) signal v radiofrekvenčni signal

- Demodulator v sprejemniku povrne radiofrekvenčni signal v informacijski (bitni) signal

Analogni, digitalni in binarni signal

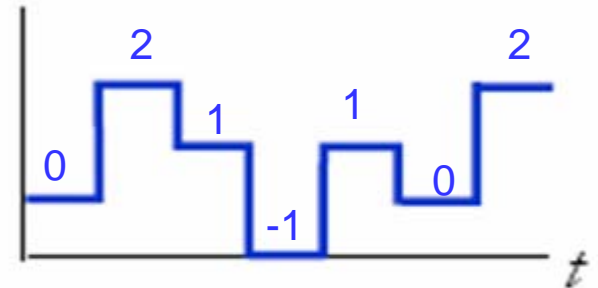
Analogni signali

Signal zavzema poljubne vrednosti



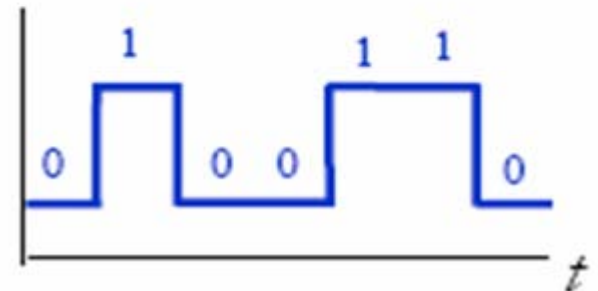
Digitalni signali

Signal zavzema pozitivne in negativne diskretne vrednosti v več nivojih

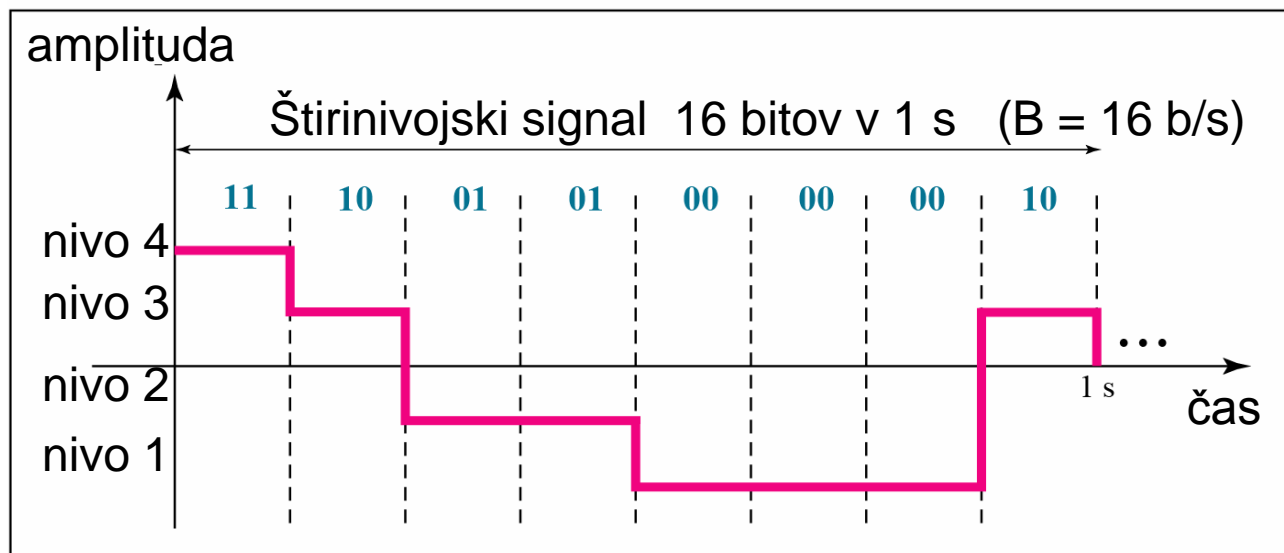
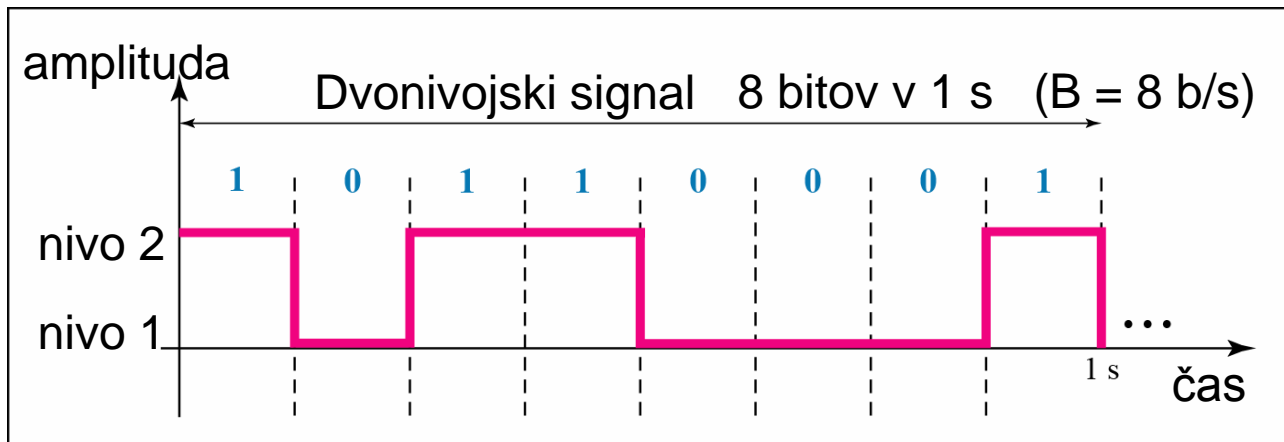


Binarni signali

Signal zavzema dve diskretni vrednosti (0 in 1)



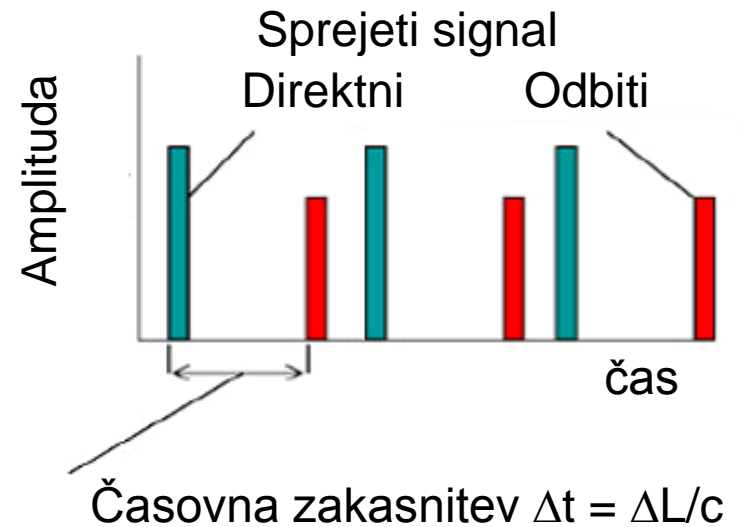
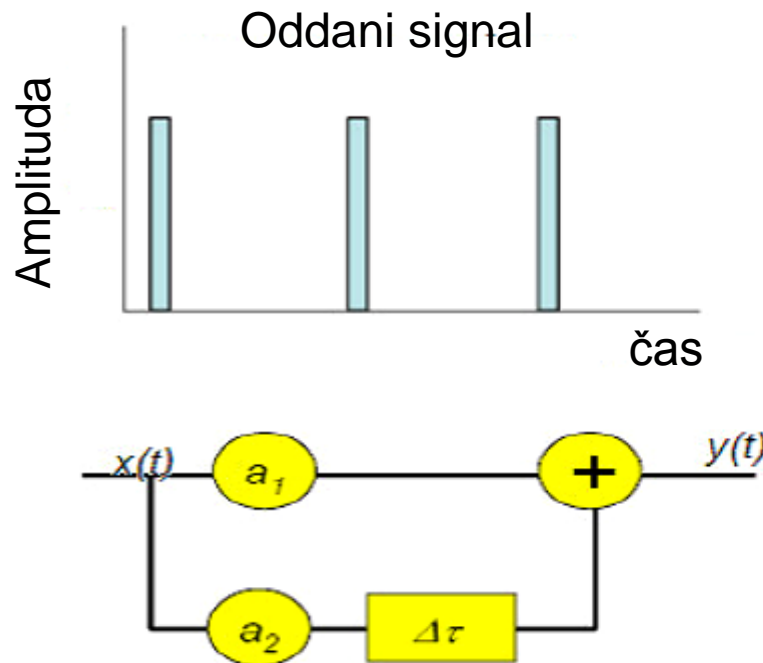
Dvo- in večnivojski signali



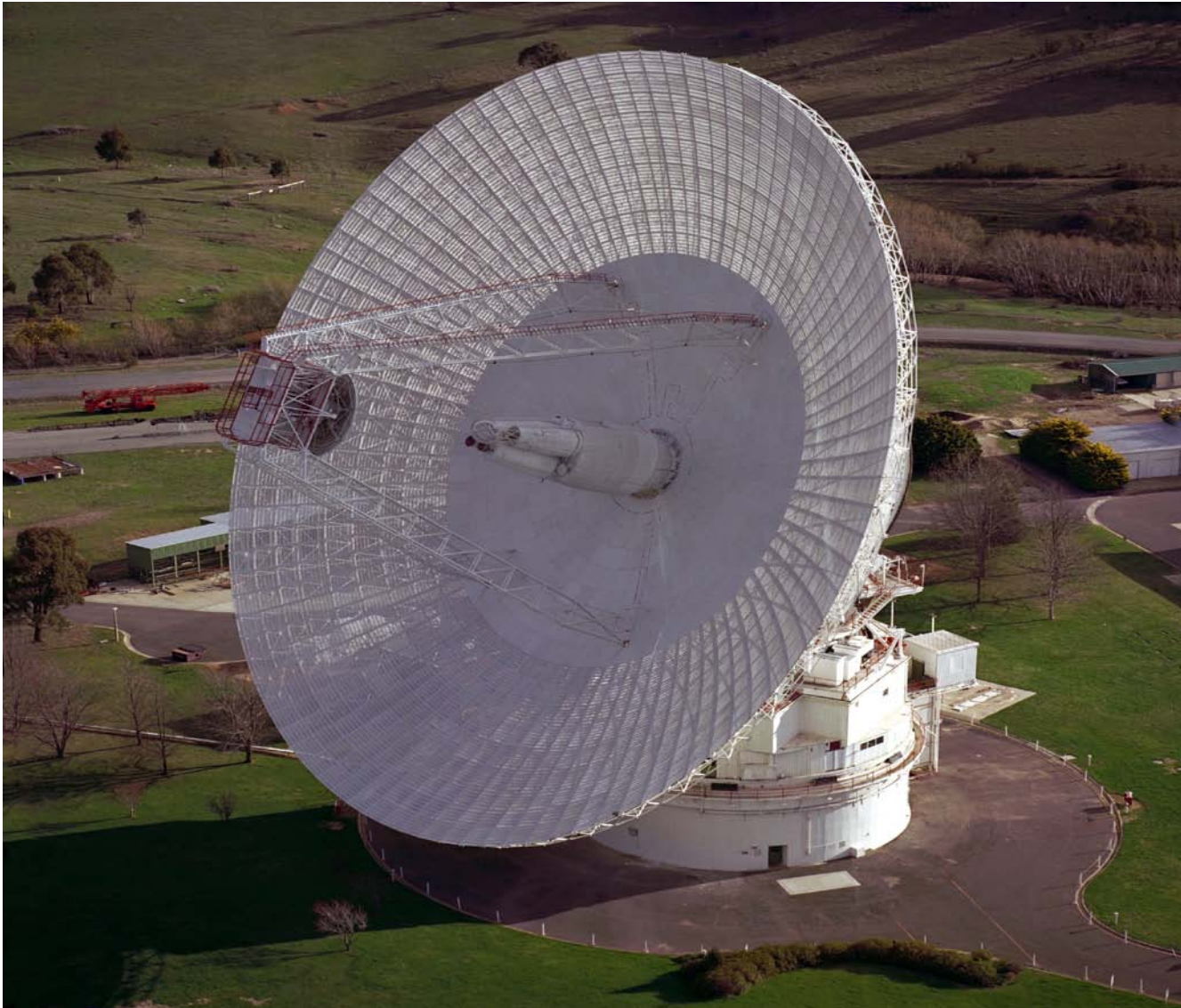
Popačitve signala

Razširjanje po več prenosnih poteh

- Selektivni presih
- Intersimbolna interferenca
- OFDM in MIMO



Šum v Radiokomunikacijah



Satelitska zemeljska antena

Planckov zakon s kvantnim šumom

- **Vakuumsko polje** (ničelna energija, vakuumske fluktuacije, kvantni šum)
- **Razširjen Planckov zakon** (1911)

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \left(\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} + \frac{h\nu}{2} \right) \text{Jsm}^{-3}$$

Toplotni in kvantni šum

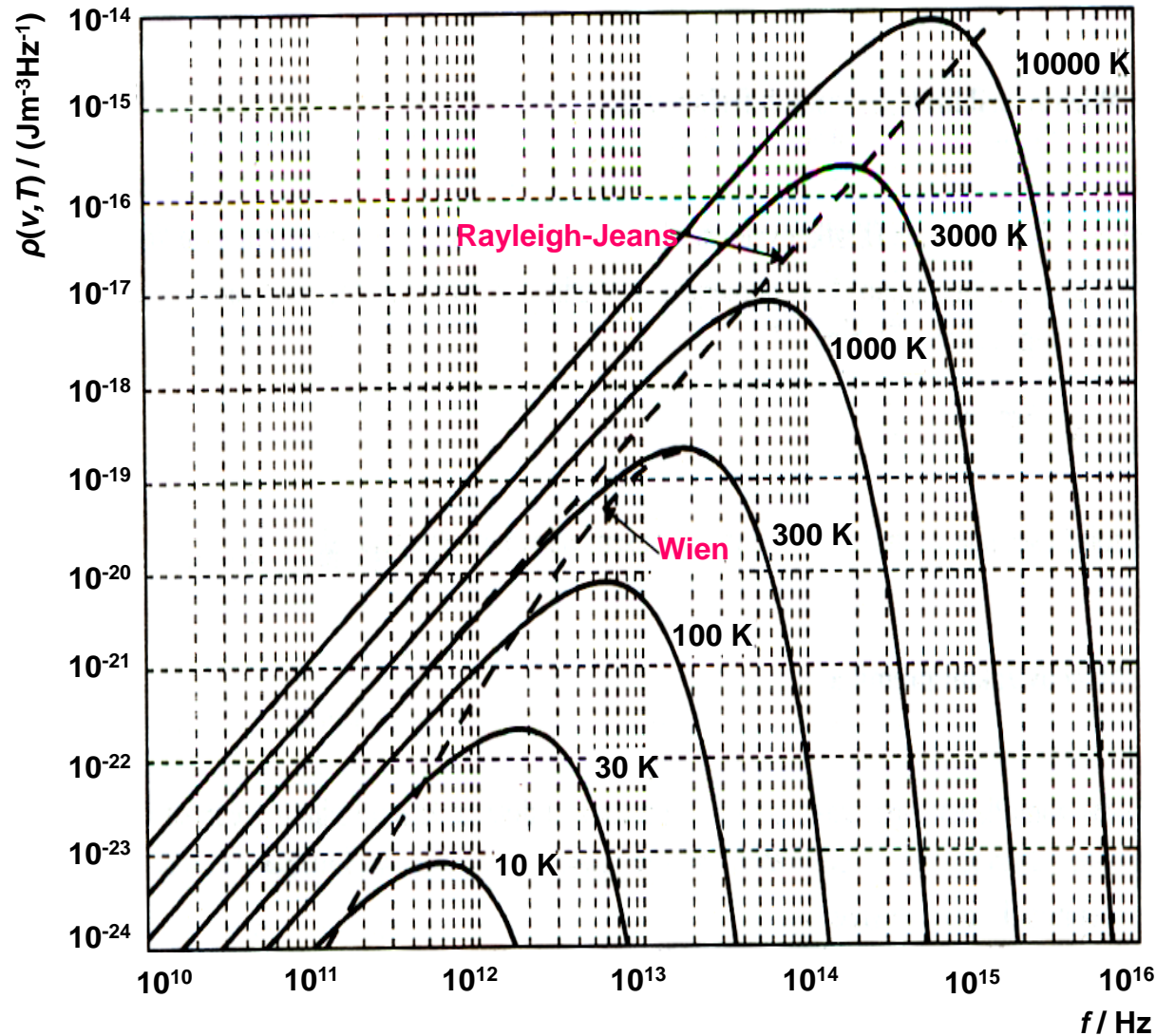
Nekaj posebnosti:

- obstoj (začetne) ničelne energije v fizikalnem vakuumu (prostor brez masnih delcev (atomov) in energijskih delcev (fotonov)). Fizikalni vakuum torej ni prazen prostor.
- Ni energijskega stanja z energijo nič (tudi pri $T = 0$).
- vakuumsko polje je posledica ali (vzrok) kvantne nedoločenosti (Heisenbergov princip nedoločljivosti, 1927)

Učinki:

- povzroča kvantni šum, ki je pomemben v optičnih komunikacijah
- sproža spontano emisijo (ta pa sproža stimulirano emisijo)

Planckov zakon - približki



- **Rayleigh-Jeansov približek** za radiofrekvenčno področje ($h\nu \ll k_B T$)

$$\rho(f, T) \doteq \frac{8\pi f^2}{c^3} k_B T \quad \text{Jm}^{-3}\text{Hz}^{-1}$$

- Wienov približek za infra rdeče in naslednja valovna področja ($h\nu \gg k_B T$)

$$\rho(f, T) \doteq \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{-\frac{h\nu}{k_B T}} \quad \text{Jm}^{-3}\text{Hz}^{-1}$$

- Wienov zakon premika ($d\rho/d\nu = 0$)

$$\lambda_{max} T = 0,2898 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$$

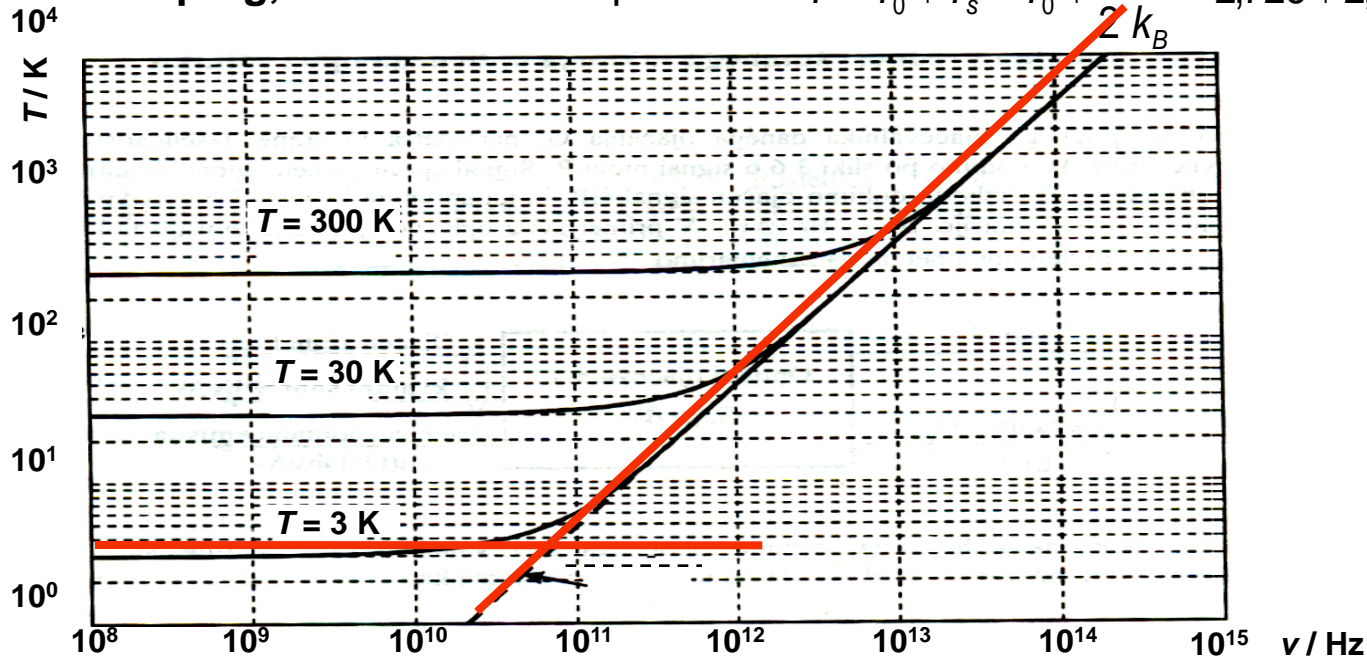
- Stefan-Boltzmannov zakon

$$P = \sigma A T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$P = \sigma A (T^4 - T_0^4), \quad A \text{ površina telesa}$$

Osnovni šumni prag

- Toplotni šum kozmičnega ozadja, šumna temperatura $T_0 = 2,725 \text{ K}$
- Kvantni šum (vakuumska fluktuacija), ekvivalentna šumna temperatura $T_{\dot{s}} = \frac{1}{2} \frac{hf}{k_B}$
- Osnovni šumni prag, ekvivalentna temperatura $T = T_0 + T_{\dot{s}} = T_0 + \frac{1}{2} \frac{hf}{k_B} = 2,725 + 2,4 \cdot 10^{-2} f_{\text{GHz}}$



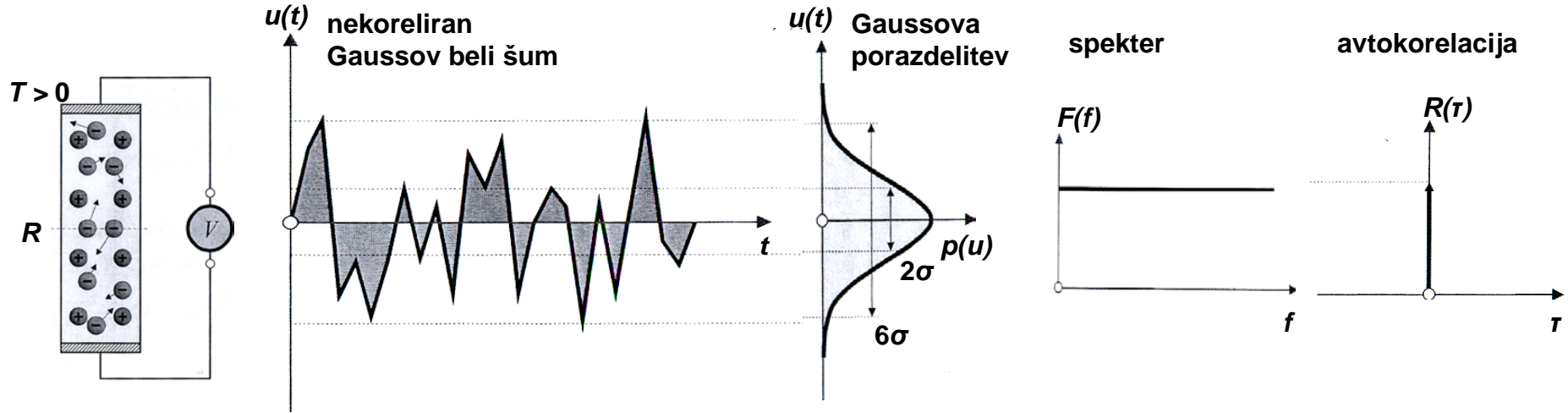
Radiokomunikacije

- nizko do srednje slabljenje ozračja
- nizek šum kozmičnega ozadja
- neznamen kvantni šum
- toplotni šum odvisen od T

Teraherčno področje in optika

- nizko slabljenje ozračja (vidni spekter) in zelo visoko slabljenje ozračja (teraherčno področje, submilimeterski valovi)
- znaten in prevladujoč kvantni šum
- šum neodvisen od T

Johnson-Nyquistov šum



- Šumno napetost na upor povzroča vzdolžna komponenta hitrosti termično vzbujenih elektronov. Upor obravnavamo kot enorazsežni resonator, ki ima število rodov $N_1 = 4/c \text{ (Hz}\cdot\text{m)}^{-1}$. Iz gostote energije ρ po Planckovem zakonu oziroma iz gostote energije po Rayleigh-Jeansovem približku dobimo spektralno gostoto šumne moči S .

$$S = c\rho = cN_1 E = 4 \frac{hv}{e^{k_B T} - 1} \text{ W/Hz}$$

Planckov oz. Rayleigh-Jeansov šum

- Šumna moč upora v frekvenčnem pasu Δf je

$$P = S\Delta f = 4k_B T \Delta f \text{ W}$$

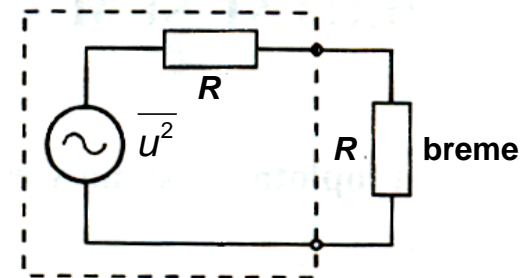
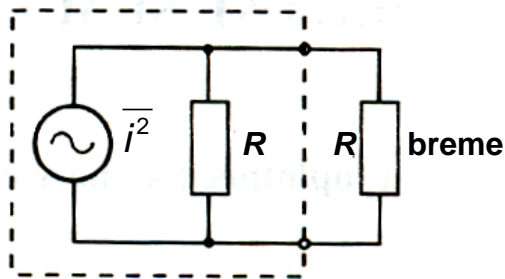
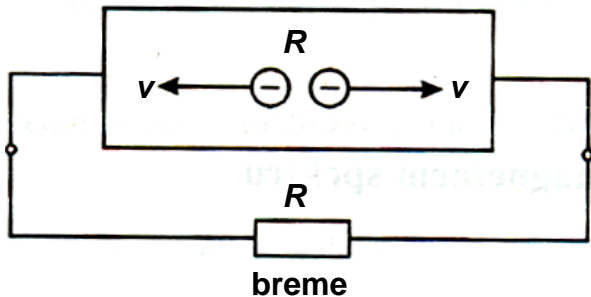
Johnson-Nyquistov šum (1928)

- Šumna moč v prilagojenem bremenu

$$P = k_B T \Delta f \text{ W}$$

Johnson–Nyquistov šum (nadaljevanje)

šumeči upor



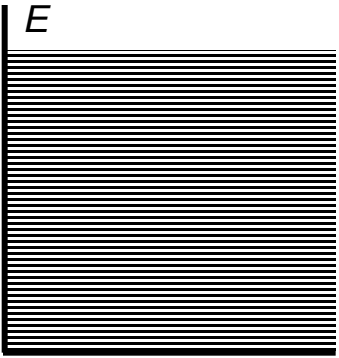
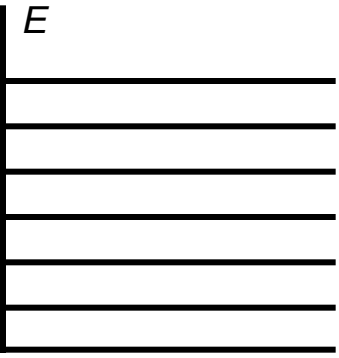
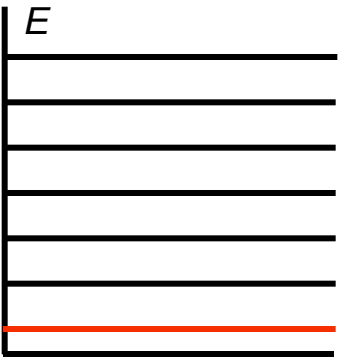
- srednjekvadratni šumni tok nadomestnega generatorja po Nortonu je

$$\overline{i^2} = \frac{4}{R} \frac{hv\Delta f}{e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1} \quad (\text{Planck}) \quad \doteq \frac{4k_B T \Delta f}{R} \quad (\text{Rayleigh - Jeans})$$

- srednjekvadratna šumna napetost nadomestnega generatorja po Theveninu je

$$\overline{u^2} = 4R \frac{hv\Delta f}{e^{\frac{hv}{k_B T}} - 1} \quad (\text{Planck}) \quad \doteq 4k_B T R \Delta f \quad (\text{Rayleigh - Jeans})$$

Kvantizacija energijskih stanj

	<p>Klasična fizika Zvezna porazdelitev energijskih stanj</p> <p>Termodinamično ravnotežje $T = \text{konst}$ Boltzmannova porazdelitev zasedbe zveznih energijskih stanj</p> $p(E) = \frac{1}{k_B T} e^{-\frac{E}{k_B T}}$ <p>$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmannova konstanta</p>
	<p>Kvantna fizika Fizika osnovnih delcev Diskretna porazdelitev energijskih stanj Kvant (odmerek) energije $h\nu$</p> <p>Termodinamično ravnotežje $T = \text{konst}$ Boltzmannova porazdelitev zasedbe diskretnih energijskih stanj</p> $\frac{N_j}{N_i} = e^{\frac{E_j - E_i}{k_B T}} = e^{-\frac{(j-i)h\nu}{k_B T}}$ <p>$h\nu < k_B T$ pri $\nu < 6 \text{ THz}$ ($\lambda < 48 \text{ }\mu\text{m}$)</p>
	<p>Kvantna fizika Energijski nivoji z upoštevanjem ničelne energije $E_{\min} = \frac{1}{2} h\nu$</p> <p>Koncept ničelne energije (vakuumska energija, vakuumska fluktuacija, drhtenje, nemir vakuuma) ima velik pomen v kozmologiji. V radijskih in optičnih komunikacijah pomeni ničelna energija kvantni šum, ki je osnovna omejitev optičnih zvez.</p>

Osnovni nivo radijskega šuma

$$P_W = k_B T_K \Delta f_{\text{Hz}}, \quad k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

$$P_{\text{dBm}} = -174 + 10 \log_{10} \Delta f_{\text{Hz}} \quad \text{pri } T = 273 \text{ K}$$

Pas	Moč (dBm)	
1 Hz	-174	
10 Hz	-164	
1000 Hz	-144	
10 kHz	-124	FM 500 kHz

Osnovni nivo optičnega šuma

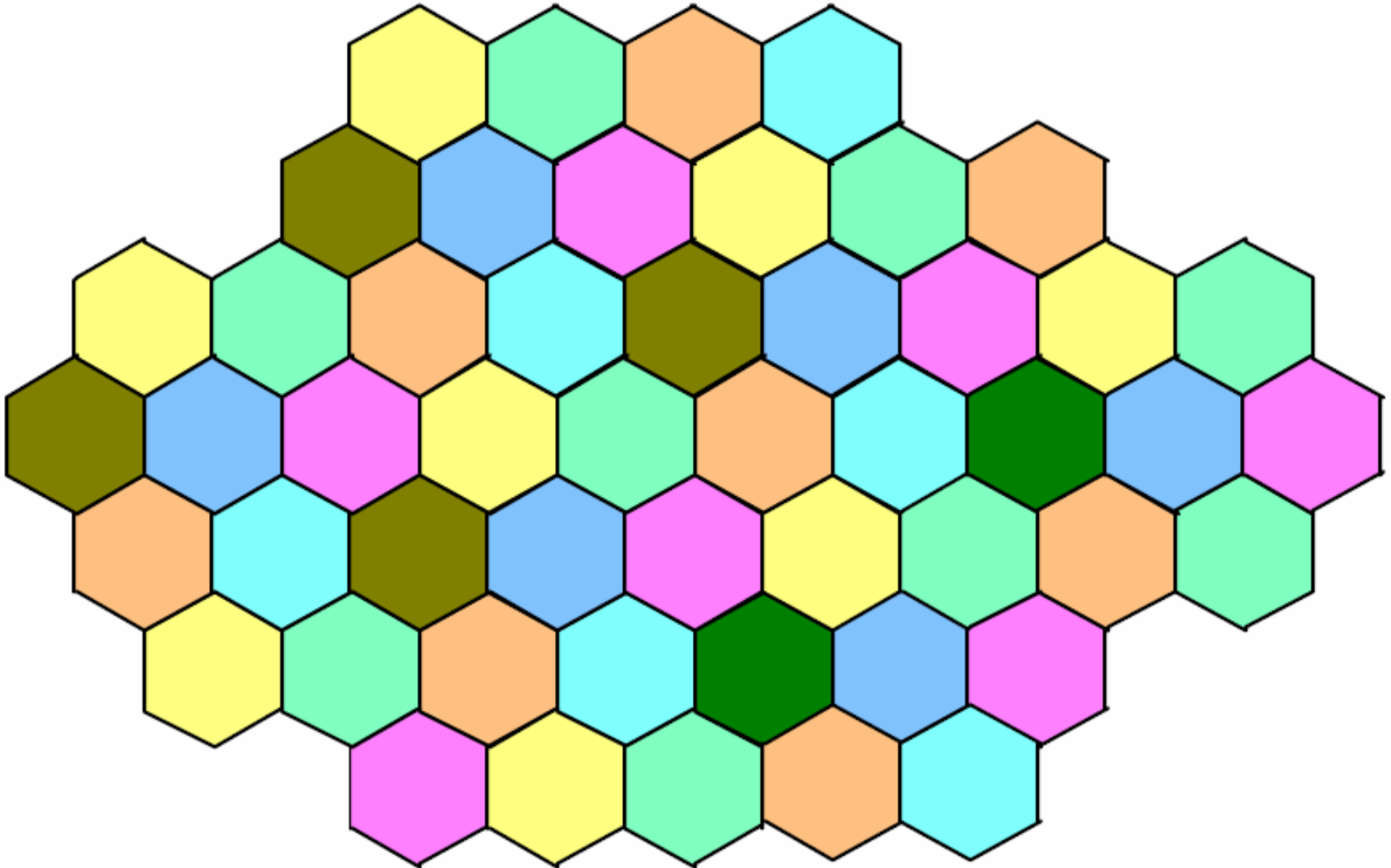
$$v \Delta v, \quad h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$0 \text{ THz } (\lambda = 1,55 \text{ } \mu\text{m})$$

$$- 68.8 + 10 \log(\Delta v_{\text{GHz}})$$

Pas (GHz)	Moč (dBm)
0,1	- 78,8
1	- 68,8
2	- 65,8
10	- 58,8
20	- 55,8

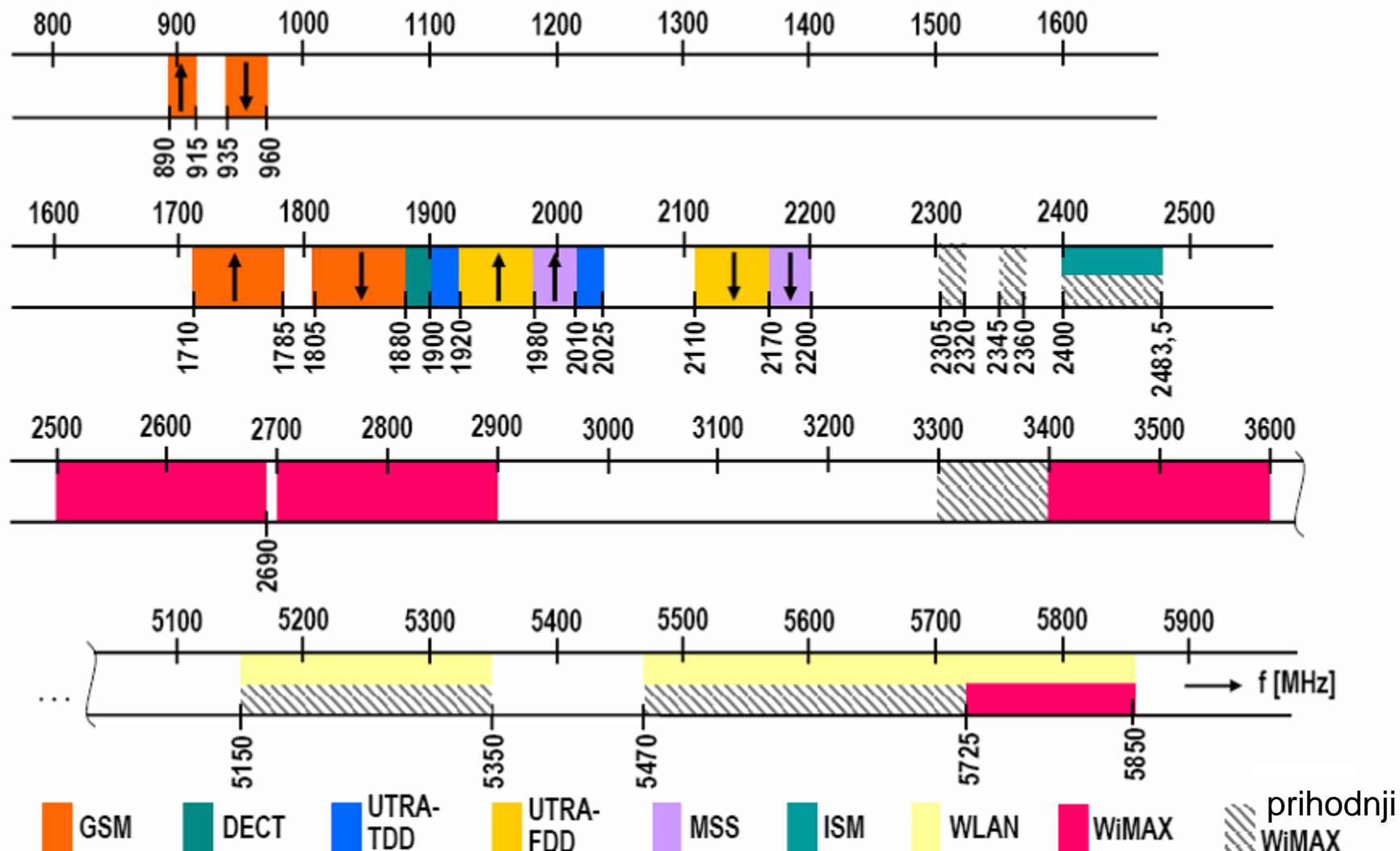
Mobilni sistemi



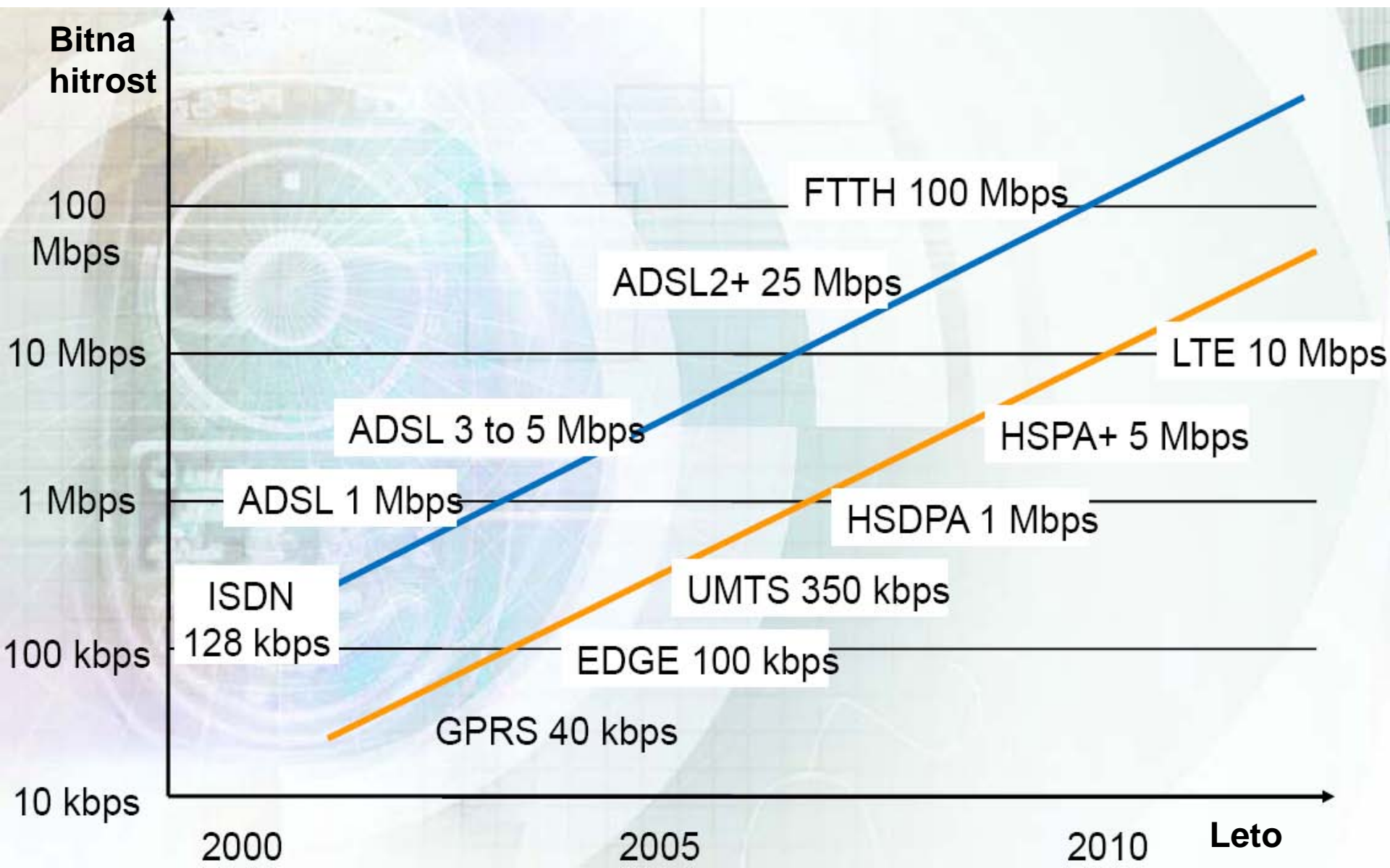
Primerjava UMTS, WiMax, LTE

	UMTS	802.16e	LTE
Način dostopa	CDMA	OFDMA, SOFDMA	SOFDMA
Frekvenčni pas	~ 2 GHz 2,5 ÷ 2,7 GHz	2,3 GHz 2,5 ÷ 2,7 GHz 3,5 GHz	900, 1800 ? ~ 2 GHz
Frekvenčni pas kanala	5 MHz	1,75 MHz ÷ 28 MHz	1,25 MHz ÷ 20 MHz
Bitna hitrost	2 Mbit/s (Rel 4) 14,4 Mbit/s (Rel 5) 5,8 Mbit/s (Rel 6)	63 Mbit/s (↓) 28 Mbit/s (↑)	100 Mbit/s (↓) 50 Mbit/s (↑)
Način	FDD (TDD)	TDD, (FDD)	FDD, TDD ?

Spekter za mobilne komunikacije v Evropi



Žicni, optični in radijski dostop – bitna hitrost



Digitalne modulacije

- Intenzitetne: najpreprostejša
 - OOK, IM/DD, OOK NRZ, OOK RZ
- Amplitudne:
 - ASK, M-ASK (NRZ, RZ)
 - M-QAM
- Fazne:
 - M-PSK, QPSK, DPSK, DQPSK
- Amplitudno – fazne:
 - M-APSK

Velika večina sistemov v praktičnih optičnih sistemih uporablja danes OOK NRZ

Modulacije

$$s(t) = a(t) \cos\{2\pi[f_c + f_i(t)]t + \varphi(t)\}$$

a Amplituda

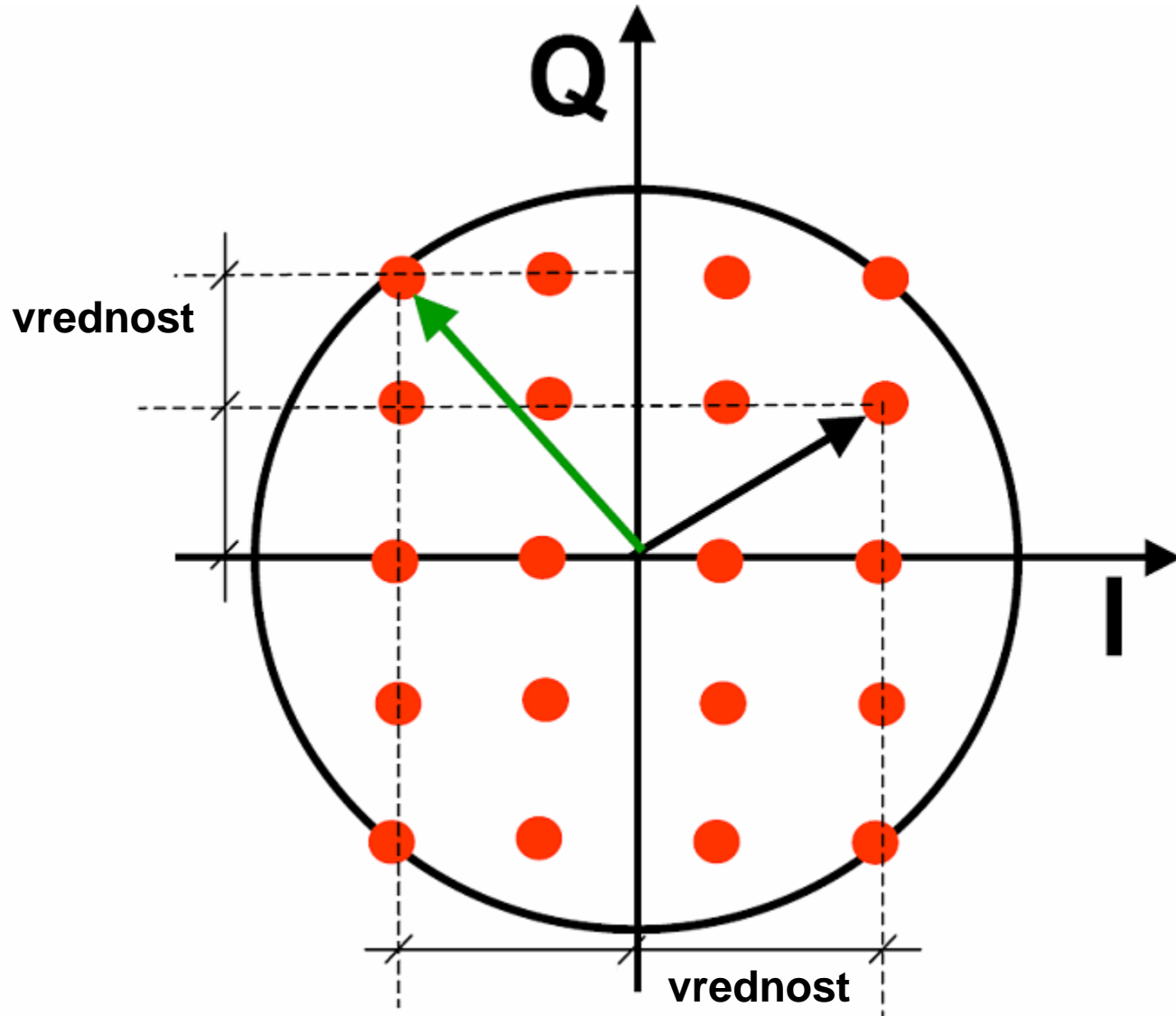
f_c Frekvenca nosilnika

φ Faza

f_i Informacijska frekvenca

analogna	digitalna	več nosilnikov	razpršeni spekter
<ul style="list-style-type: none">▪ AM▪ SSB▪ RSB▪ FM	<ul style="list-style-type: none">▪ ASK▪ FSK▪ PSK▪ QAM	<ul style="list-style-type: none">▪ based on FFT<ul style="list-style-type: none">• DMT• OFDM• COFDM	<ul style="list-style-type: none">▪ DS▪ FH▪ TH

I – Q konstelacija

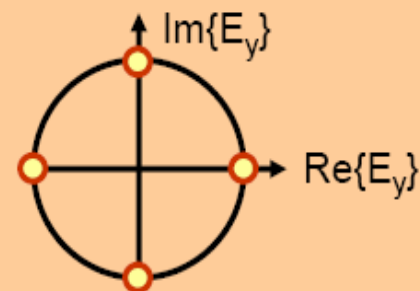
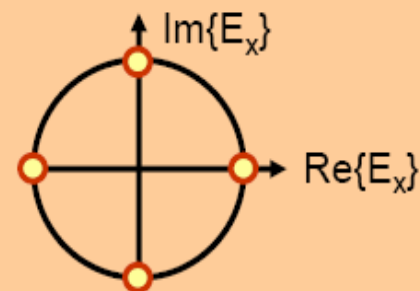
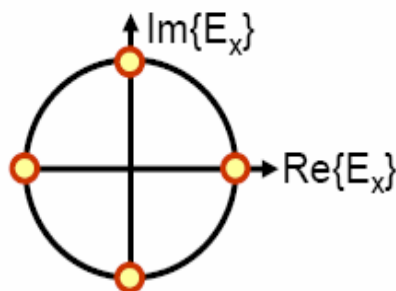
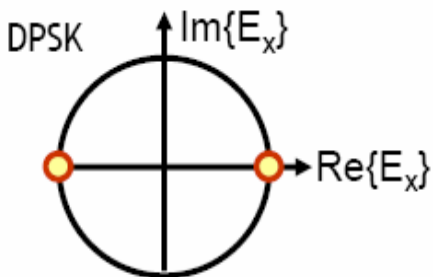
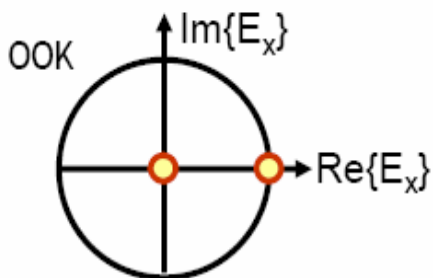


Modulacijski formati

1 bit/simbol
(OOK, DPSK)

2 bita/simbol
(DQPSK, PDM OOK)

4 biti/simbol
(PDM (D)QPSK, 16 QAM)



E_x ... x-polarizacija polja
 E_y ... y-polarizacija polja

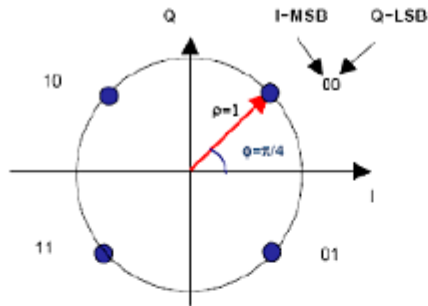
Modulacijski formati
1 – 4 bitov/simbol

4 – PSK (QPSK)

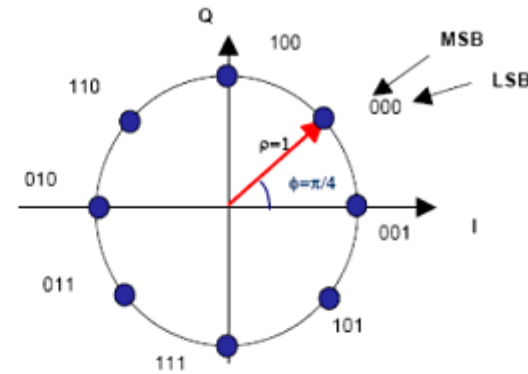
$$s(t) = \begin{cases} A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right) & 11 \\ A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right) & 01 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right) & 00 \\ A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right) & 10 \end{cases}$$

Modulacijski formati - konstelacije

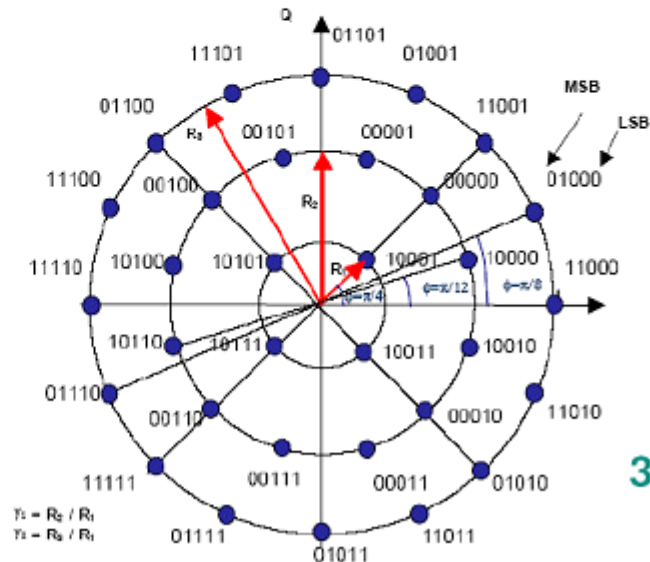
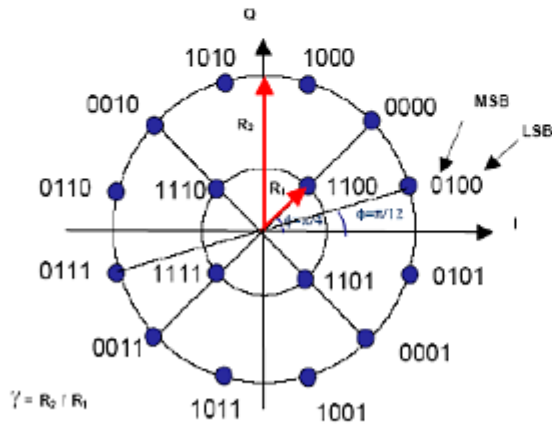
QPSK



8-PSK

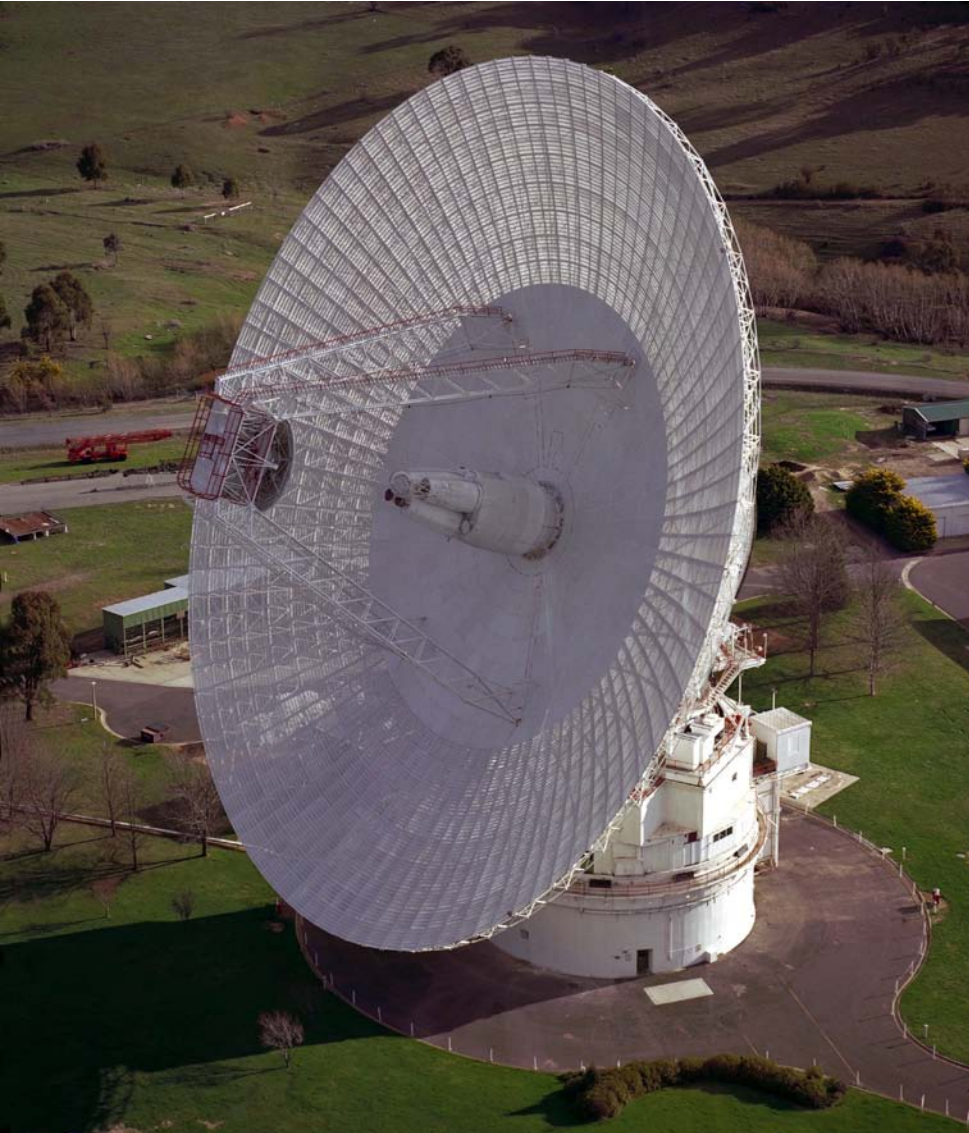


16-APSK



32-APSK

Radiokomunikacije



Satelitska zemeljska antena



Usmerjene zveze