

23. Seminar Optične Komunikacije

Laboratorij za Sevanje in Optiko

Fakulteta za Elektrotehniko

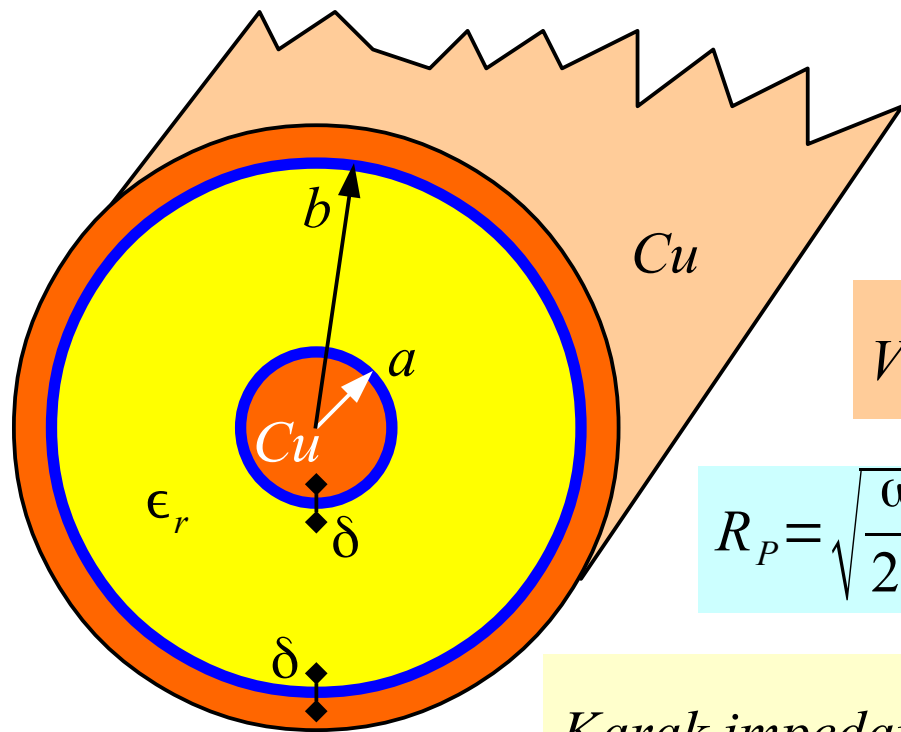
Ljubljana, 1. - 3. februar 2017

Optične ali radijske komunikacije?

Matjaž Vidmar

..... Seznam prosojnic:

- Slika 1 – Omejitve kovinskih vodnikov
- Slika 2 – Enorodovno svetlobno vlakno
- Slika 3 – Prekooceanska zveza
- Slika 4 – Cenena optika
- Slika 5 – Prepustnost zemeljskega ozračja
- Slika 6 – Statika, Fresnel in Fraunhofer
- Slika 7 – Induktivni sklop v bližnjem polju
- Slika 8 – Prečna koherenca anten
- Slika 9 – Rayleigh-jeva razdalja
- Slika 10 – Friis-ova enačba
- Slika 11 – Usmerjene radijske zveze
- Slika 12 – Radijske zveze z večpotjem
- Slika 13 – Pozabljeni Fresnel?
- Slika 14 – Večrodovni prenos
- Slika 15 – MIMO brez večpotja
- Slika 16 – Visokozmogljiva zveza na kratko razdaljo
- Slika 17 – Težnje industrije polprevodnikov
- Slika 18 – Posledice novih radijskih tehnologij?



Koaksialni kabel $a = 2 \text{ mm}$ $b = 7 \text{ mm}$
 $\epsilon_r = 2.2$ $f = 100 \text{ MHz}$
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ $\gamma_{Cu} = 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Vdorna globina $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma_{Cu}}} \approx 6.73 \mu\text{m} \ll a, b$

$$R_P = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2 \gamma_{Cu}}} \approx 2.66 \text{ m}\Omega$$

$$R/l = \frac{R_P}{2\pi a} + \frac{R_P}{2\pi b} \approx 0.272 \Omega/\text{m}$$

Karak. impedanca $Z_K = \frac{Z_0}{2\pi \sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \approx \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \approx 50.7 \Omega$

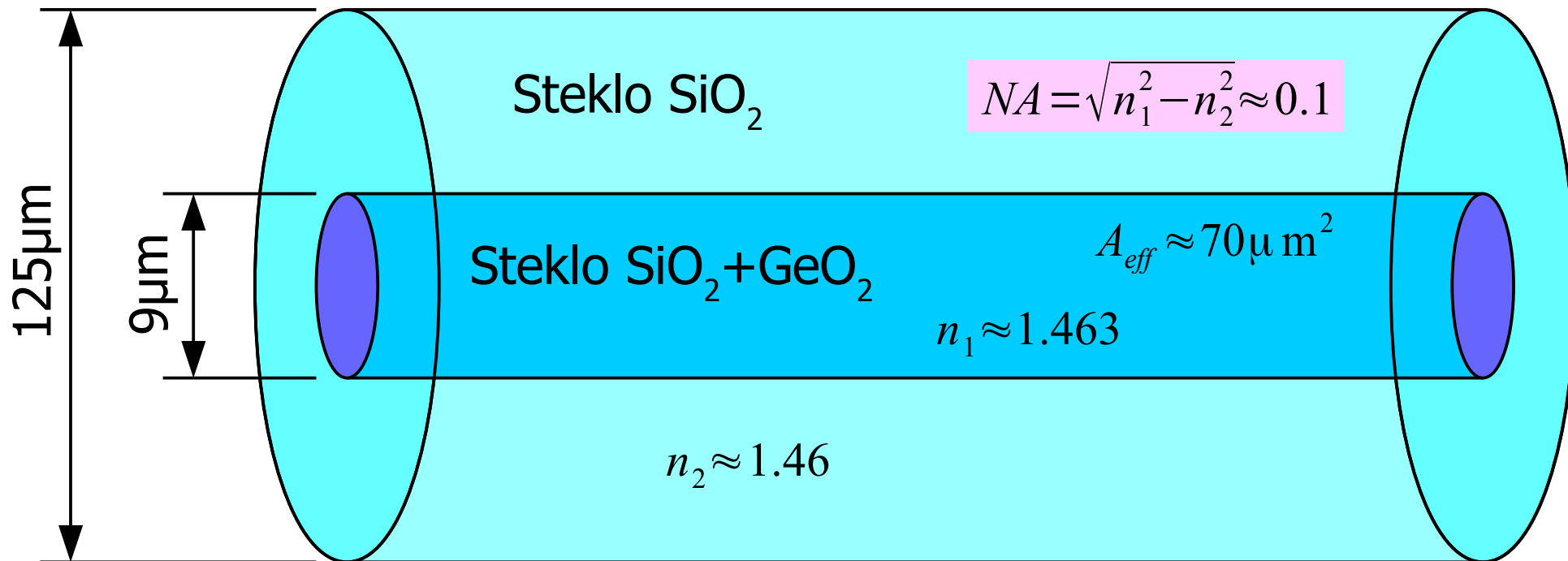
Slabljenje na enoto dolžine $a_{dB}/l = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{R/l}{2 Z_K} \approx 0.0233 \text{ dB/m} = 23.3 \text{ dB/km}$

Pasovna širina $B \approx f_{TE_{11}} \approx \frac{c_0}{\pi(a+b)\sqrt{\epsilon_r}} \approx 7.2 \text{ GHz}$ (*nastop višjega rodu TE₁₁*)

Praktična pasovna širina
Konektor SMA 26.5GHz
Konektor W (1mm) 110GHz

Praktični domet
 140Mbit/s PDH cca 2km
Kabelska TV cca 500m
 UTP Ethernet cca 100m

1 – Omejitve kovinskih vodnikov



$\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$

Slabljenje $a \approx 0.2 \text{ dB/km} = 0.0002 \text{ dB/m}$

Nelinearni pojavi $P_{\text{MAX}} = 10 \dots 100 \text{ mW}$

$B_{\text{MAX}} \approx 20 \text{ THz}$

$B \approx 4 \text{ THz}$ (Er ojačevalnik)

Barvna razpršitev $\Delta t_g = D \cdot l \cdot \Delta \lambda_0$

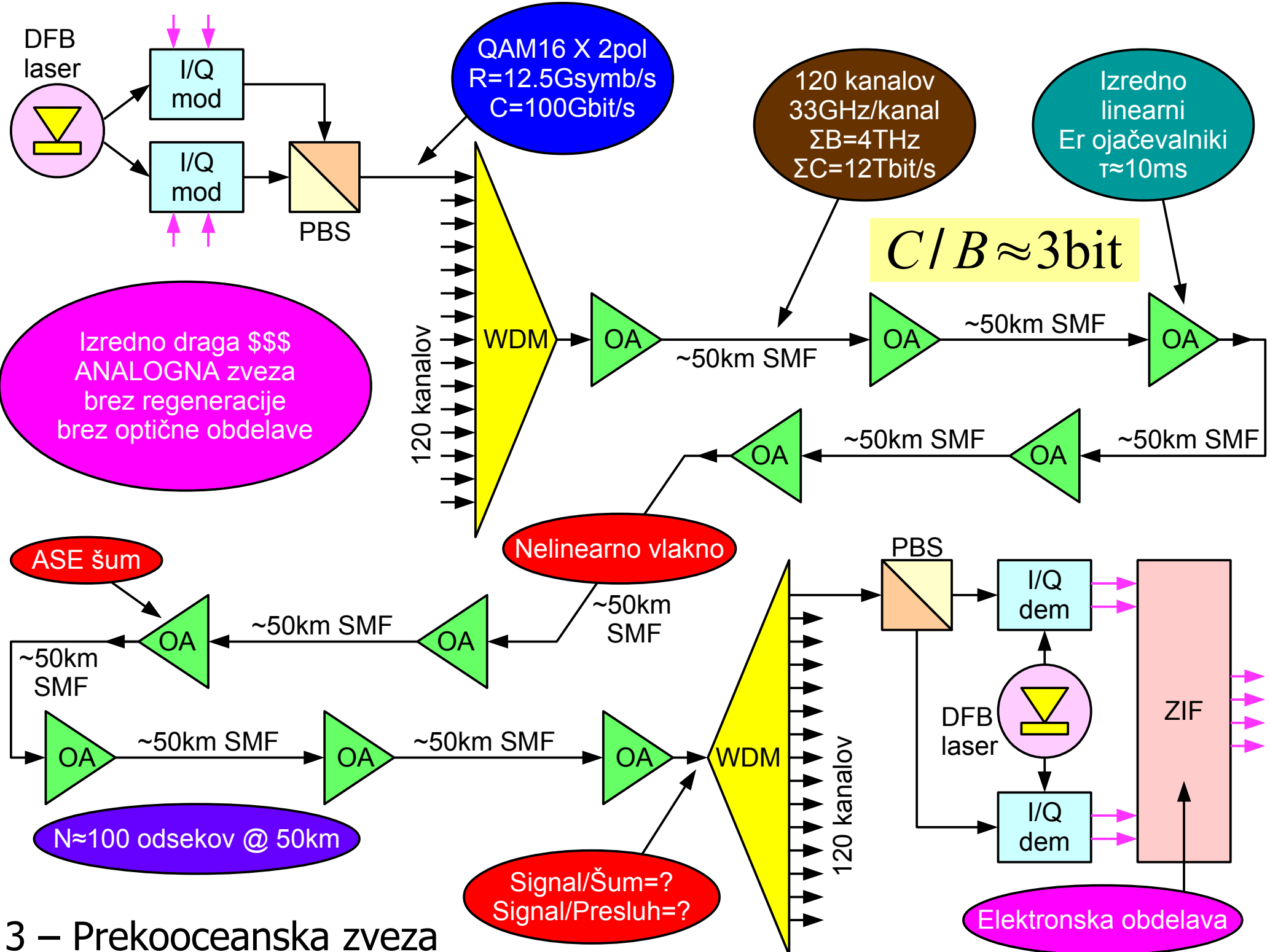
$D(\lambda_0) = 3 \dots 17 \frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$

Izrojenost HE_{11} $\Delta t_{\text{PMD}} = D_{\text{PMD}} \cdot \sqrt{l}$

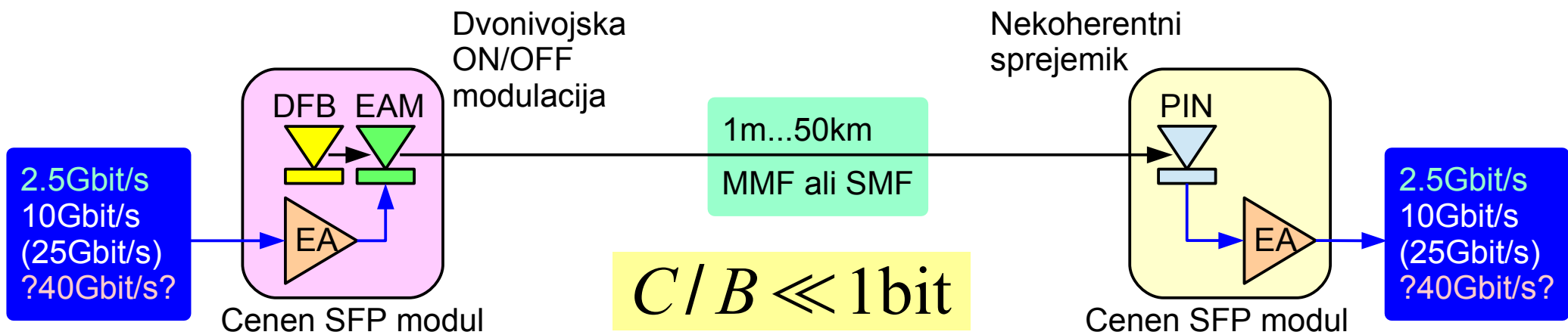
$D_{\text{PMD}} = 0.1 \dots 10 \frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$

Praktična meja
simbolne hitrosti

$R_{\text{MAX}} \approx 20 \text{ Gsymb/s} \ll B$



3 – Prekooceanska zveza

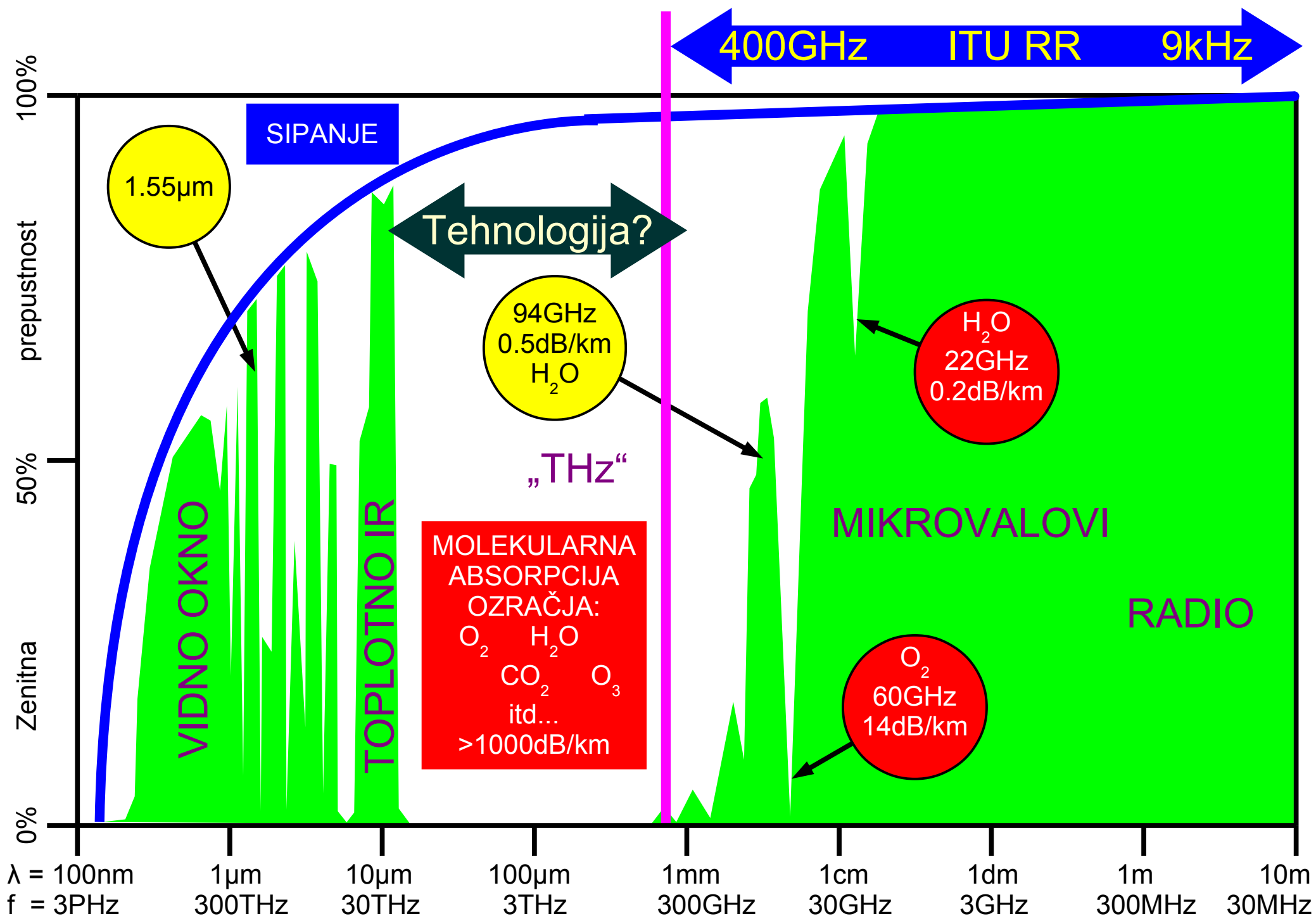


Prevezave na kratke razdalje <100m (backplane):

- 4 ali 10 vzporednih vlaken za 40Gbit/s oziroma 100Gbit/s
- Coarse (grobi) WDM s 4 oziroma 10 valovnimi dolžinami
- Bakreni vodniki konkurenčni na manjših razdaljah $r < 10\text{m}$!

Omejitev uporabniških računalnikov in programske opreme:

- Enemu uporabniku popolnoma zadošča $C < 30\text{Mbit/s}$???
- Cenene 10Gbit/s zveze zadoščajo celo za hrbtenične povezave v manjšem omrežju ???
- Zmogljivost ene same 2.5Gbit/s ali 10Gbit/s zveze lahko delimo med večje število uporabnikov v pasivnem optičnem omrežju (PON) ???
- Kaj prinašajo novotarije kot je Internet-Of-Things?



5 – Prepustnost zemeljskega ozračja

Fraunhofer:
daljne polje
valovna optika

$$\frac{E}{H} = Z_0$$

Dve polarizaciji
(dva rodova)
 $C/B \leq 20 \text{ bit}$

MIMO:
 $C/B \approx 20 \text{ bit}$

Fresnel:
sevno polje
geometrijska optika

Večrodovni prenos
 $C/B \gg 20 \text{ bit}$

$$r = \frac{2d^2}{\lambda}$$

Samo tu obstajajo:

$D, G,$
 $F(\Theta, \Phi),$

Friisova enačba

Gulielmo
Marconi

$$\frac{E}{H} \approx Z_0$$

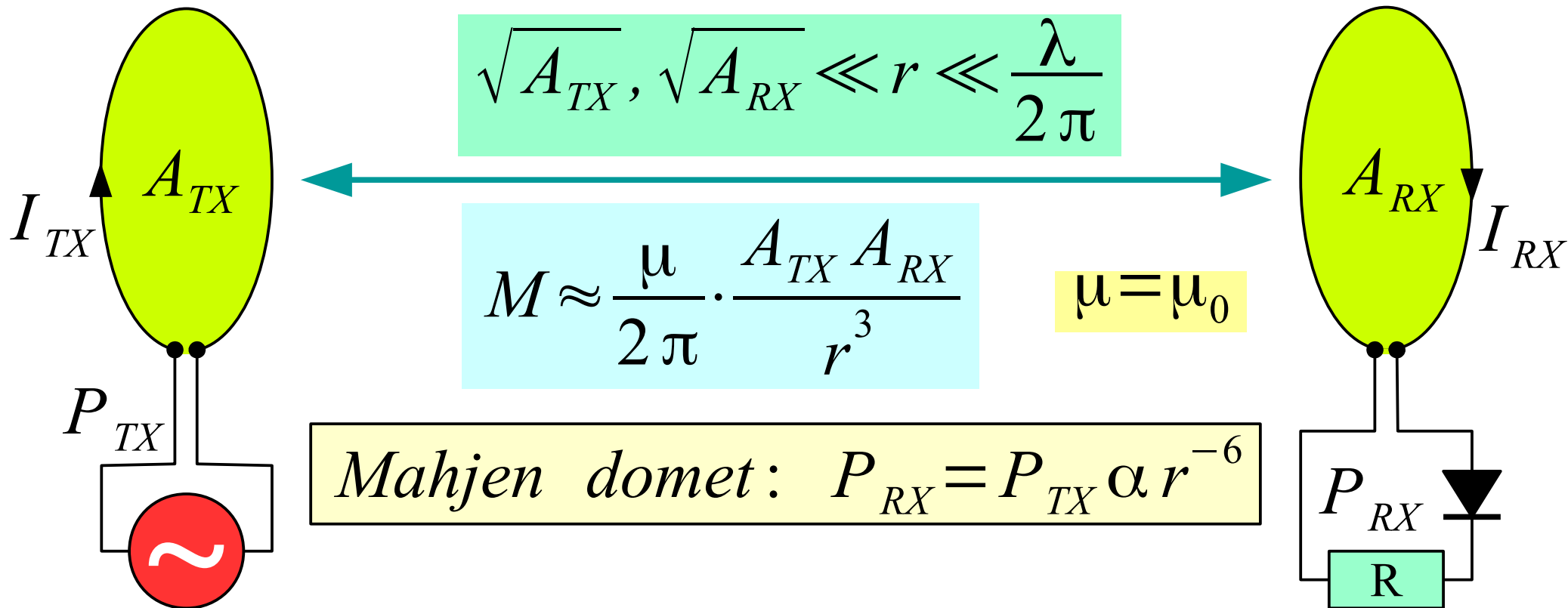
$$\frac{E}{H} \neq Z_0$$
$$r = \frac{\lambda}{2\pi}$$

Statika:
bližnje polje

Nikola
Tesla

Točkasti
vir sevanja

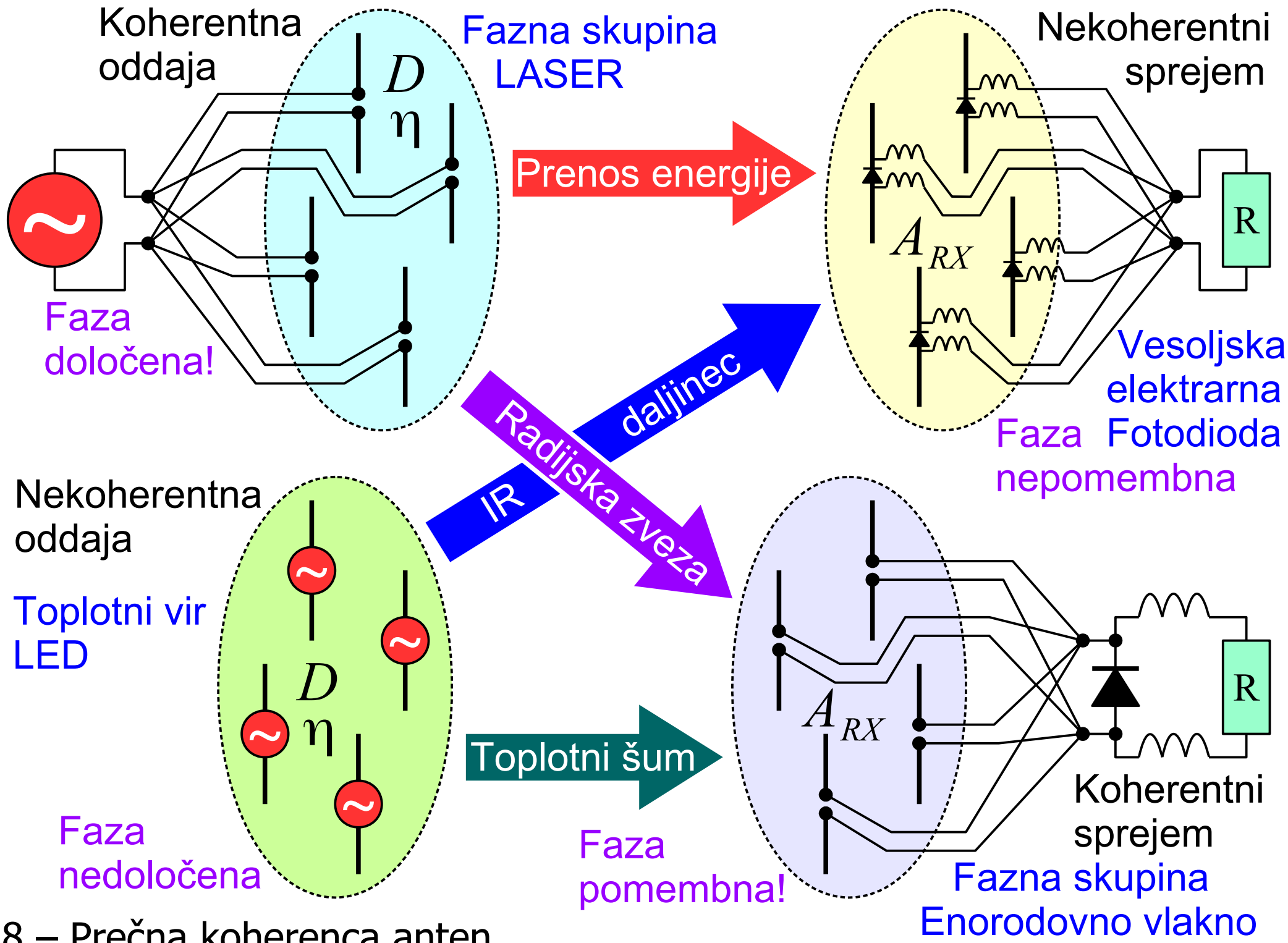
$\frac{E}{H} \neq Z_0 \rightarrow$ Potrebna ločena meritev \vec{E} ter \vec{H}



$\text{Re}[\vec{S}] = f(I_{TX}, I_{RX})$
Brez sevanja!

Uporaba:

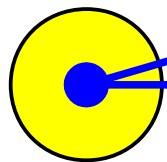
RFID in druge zveze kratkega dosega
Prenos energije (brezžično polnjenje)



8 – Prečna koherenca anten

$$\Delta l \approx d^2 / 8r$$

Točkasti vir sevanja



Pogoj faze stroži od amplitude $A > A_{RX}$

$$\Delta P_{dB} \approx 20 \log_{10} \frac{\sin \Delta \varphi / 2}{\Delta \varphi / 2}$$

$r + \Delta l$

$r \gg d$

λ

d

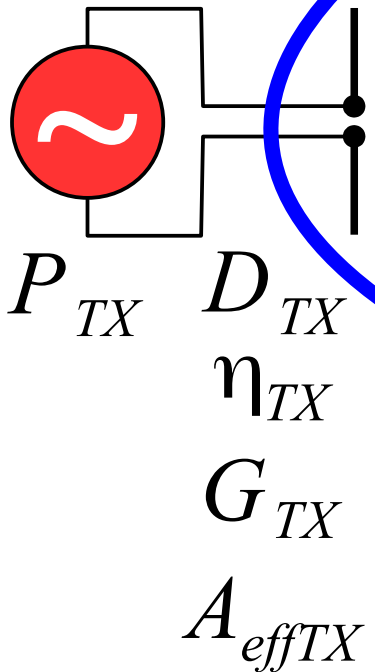
Koherentni sprejem

A_{RX}

Faza pomembna!

Δl	$\Delta \varphi$ [rd]	ΔP [dB]	$r \geq$	Uporaba
$\lambda/2$	π	-3.922	$d^2/4\lambda$	Globinska ostrina fotoaparata
$\lambda/4$	$\pi/2$	-0.912	$d^2/2\lambda$	Lord Rayleigh 1891
$\lambda/8$	$\pi/4$	-0.224	d^2/λ	
$\lambda/16$	$\pi/8$	-0.056	$2d^2/\lambda$	Meritev radijskih signalov

Koherentna oddaja

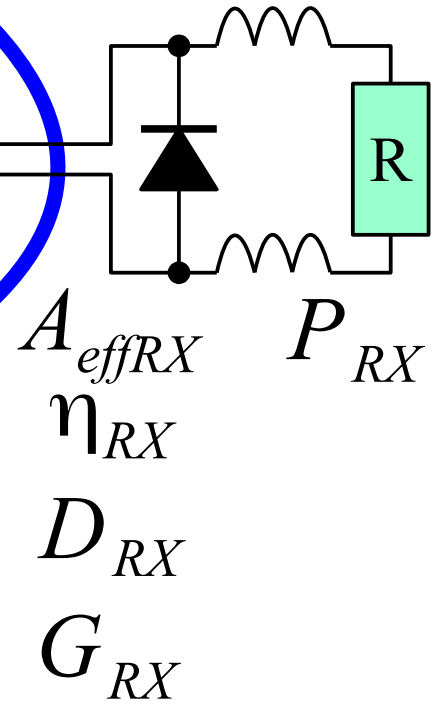


$$r \geq \frac{2d_{TX}^2}{\lambda} + \frac{2d_{RX}^2}{\lambda}$$

Prazen prostor

Harald Friis 1945

Koherentni sprejem



$$P_{RX} = P_{TX} \frac{\eta_{TX} D_{TX} A_{effRX} \eta_{RX}}{4\pi r^2}$$

Zapis z dobitki anten:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

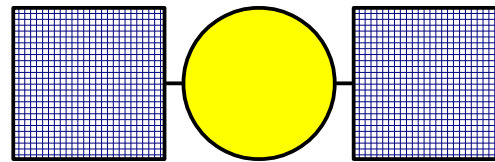
Recipročnost!

Zapis s površinami anten:

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{\eta_{TX} A_{effTX} A_{effRX} \eta_{RX}}{\lambda^2 r^2}$$

Fraunhofer $r \gg \frac{2d^2}{\lambda}$

$A_{TX}, A_{RX} = konst.$



Omejena moč TX!

Domet $P_{RX} = P_{TX} \cdot \alpha \lambda^{-2} r^{-2} \rightarrow$ visoke f

- Večina moči oddajnika se širi v prostor
 - Visoko zahtevano razmerje S/N
 - Velik razpon moči signalov
- Potreben strog nadzor in licenciranje

Satelitska zveza

BPSK...QAM64
obe polarizaciji
 $C/B = 1 \dots 10 \text{ bit}$

$r \approx 40000 \text{ km}$

$d \approx 1 \text{ m}$

$r \approx 40 \text{ km}$

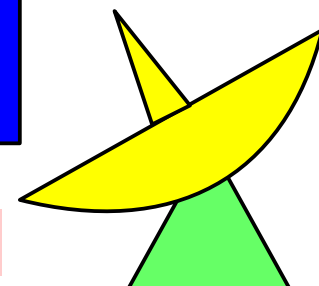
$d \approx 1 \text{ m}$

QAM16...QAM4096
obe polarizaciji
 $C/B = 4 \dots 20 \text{ bit}$

Zemeljska zveza

Slabljenje ozračja:
redki primeri uporabe
svetlobnih frekvenc,
medsatelitske zveze?

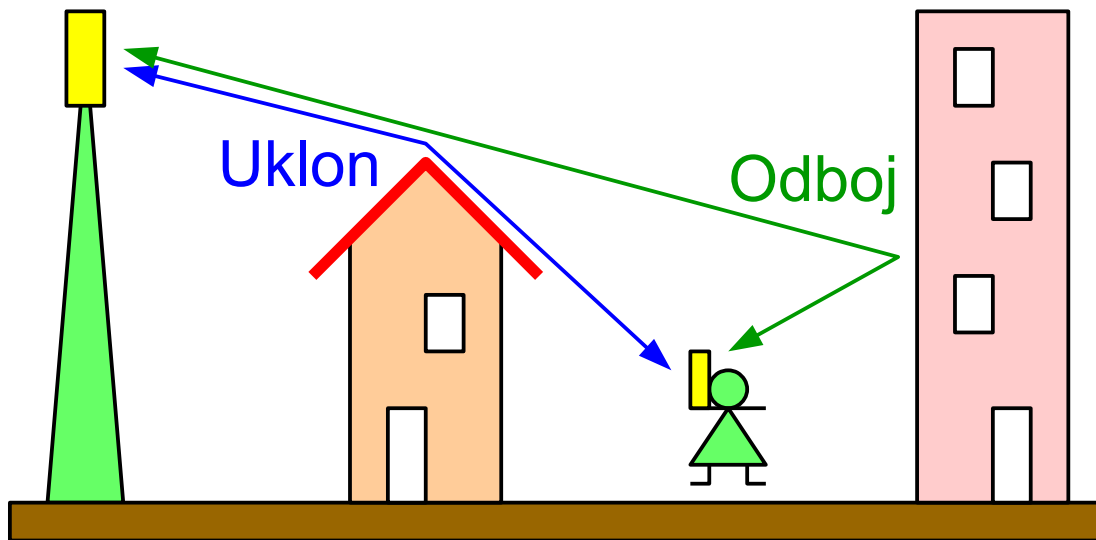
$d \approx 10 \text{ m}$



Fraunhofer $r \gg \frac{2d^2}{\lambda}$

$G_{TX}, G_{RX} = konst.$

Domet $\langle P_{RX} \rangle \approx P_{TX} \cdot \alpha \lambda^2 r^{-4} \rightarrow nizke f$



Protikrepi proti popačenju večpotja:

- Adaptivna izravnalna sita
- Razširjeni spekter in CDMA
- Razdeliti širokopasovni uporabnik na množico ozkopasovnih ($\eta_{TX}=?$):
 - > Večtonski modem (~1950)
 - > OFDM (WiFi ~2000)

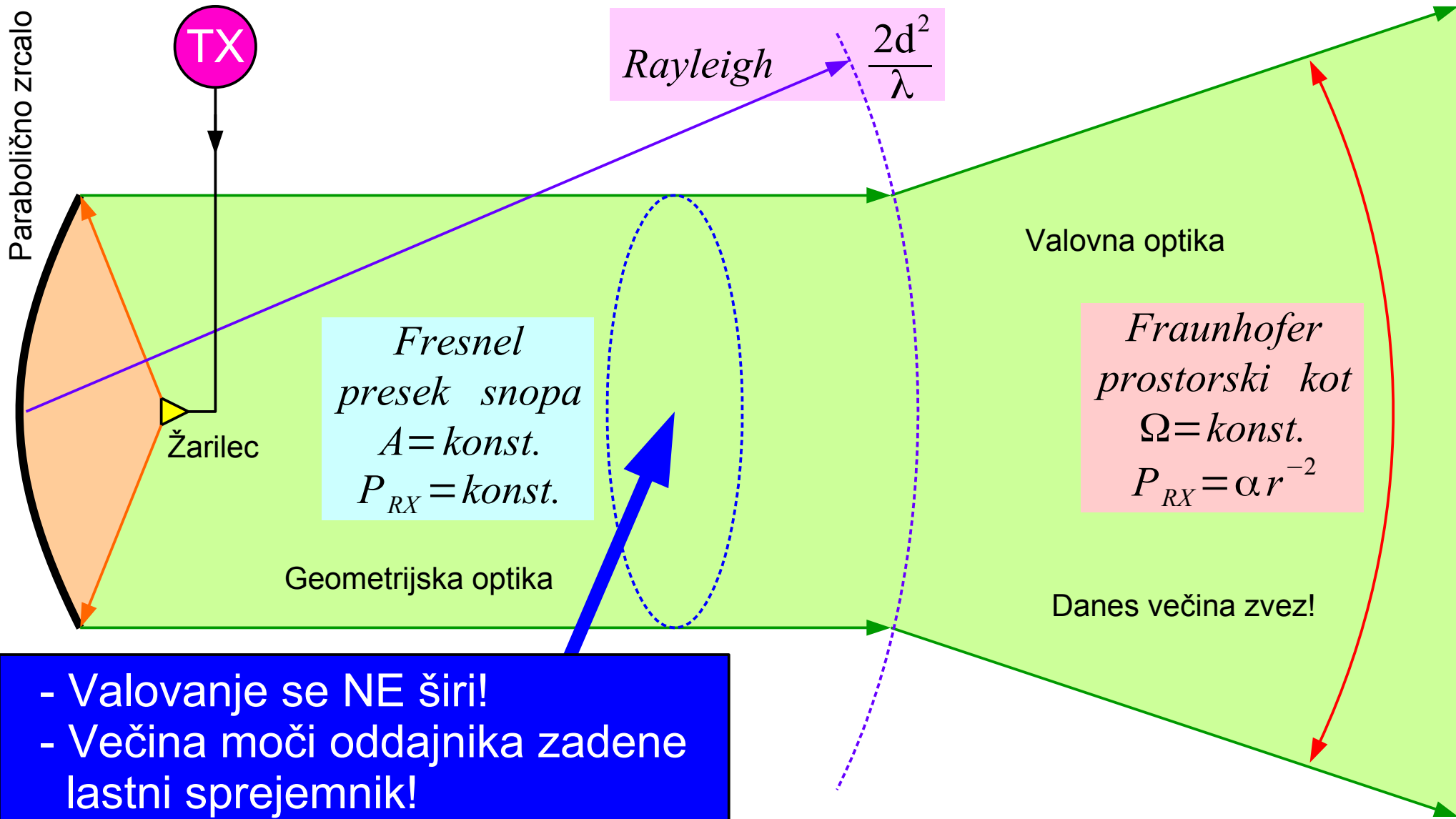
- Majhen radijski doomet
 - Nizko razmerje S/N
 - Reševanje motenj med uporabniki istega omrežja
 - Možnost enofrekvenčnega omrežja (SFN)
- Manj strog nadzor oziroma nelicencirana uporaba

OFDM je prilagodljiv:

- Hitra sinhronizacija (WiFi):
 - > nizko število nosilcev
- Enofrekvenčno omrežje SFN (DVB-T):
 - > visoko število nosilcev

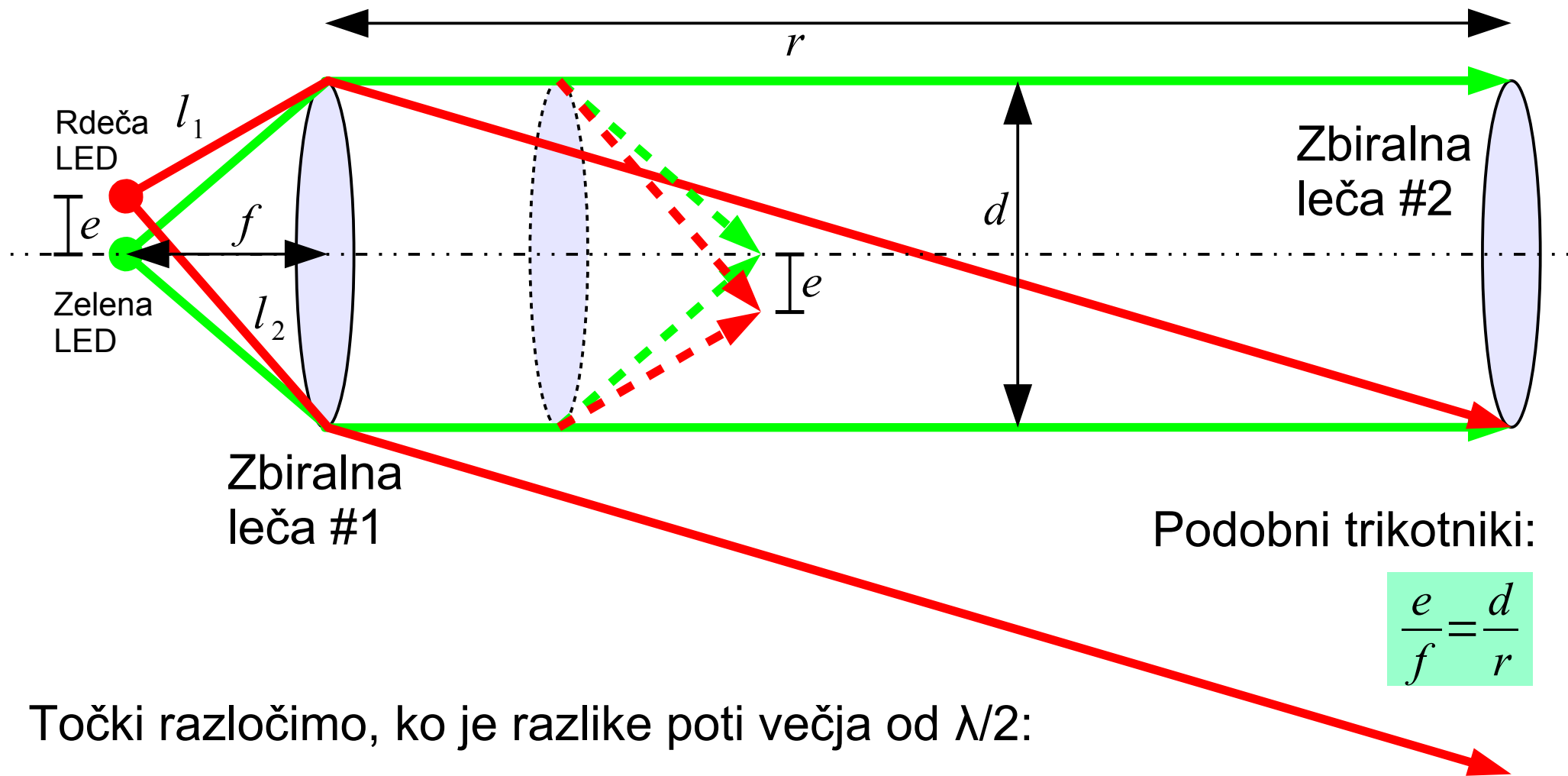
Večpotje omogoča več rodov:

MIMO povečuje zmogljivost in spektralni izkoristek kljub slabemu razmerju S/N



- Valovanje se NE širi!
- Večina moči oddajnika zadene lastni sprejemnik!
- Nizko slabljenje zveze!
- Nadzor nepotreben!
- Licenciranje nesmiselno!
- **VEČRODOVNI PRENOS!**

Najprimernejše frekvence za zveze v Fresnelovem področju padejo v „THz“ področje, kjer je slabljenje ozračja zelo visoko!



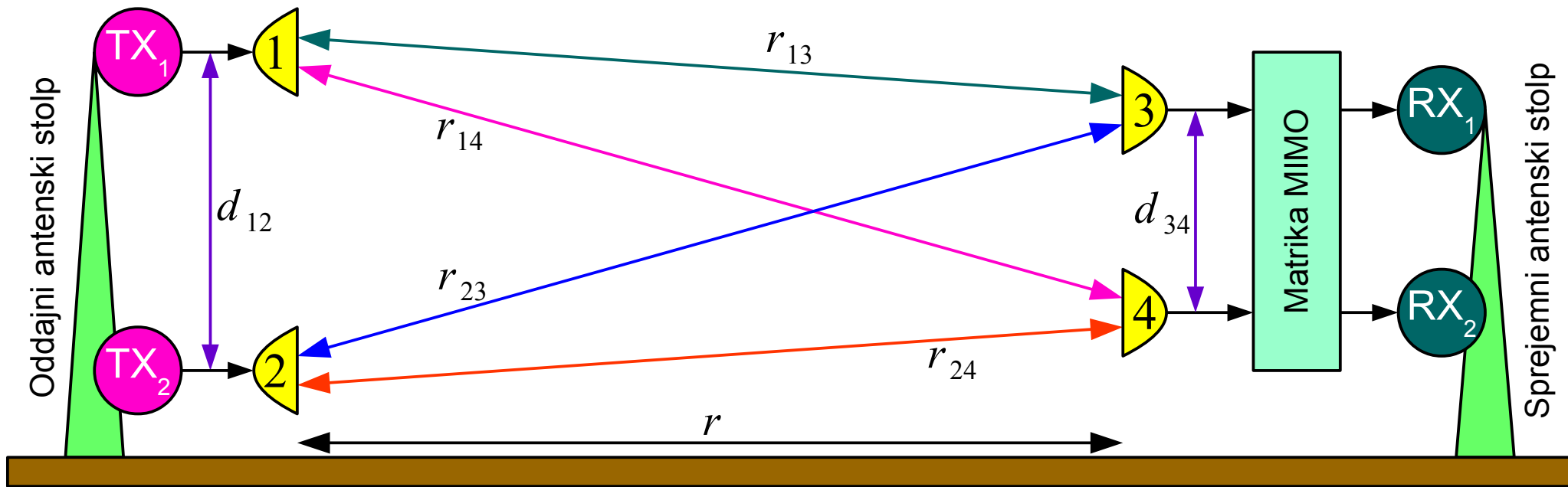
$$\frac{e}{f} = \frac{d}{r}$$

Točki razločimo, ko je razlike poti večja od $\lambda/2$:

$$l_2 - l_1 = \sqrt{f^2 + (d/2 + e)^2} - \sqrt{f^2 + (d/2 - e)^2} \approx \frac{de}{f} > \frac{\lambda}{2}$$

Če obe enačbi združimo, dobimo znan pogoj: $r < \frac{2d^2}{\lambda}$

Podvojevanje C/B mikrovalovne zveze \equiv Line-Of-Sight MIMO



Pogoj za $\max \det[MIMO]$: $r_{14} - r_{13} - r_{24} + r_{23} = \lambda/2$

$C/B > 40 \text{ bit}$

$$r_{13} = r_{24} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{d_{12} - d_{34}}{2}\right)^2} \approx r + \frac{d_{12}^2 - 2d_{12}d_{34} + d_{34}^2}{8r}$$

$$r_{14} = r_{23} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{d_{12} + d_{34}}{2}\right)^2} \approx r + \frac{d_{12}^2 + 2d_{12}d_{34} + d_{34}^2}{8r}$$

$$r_{14} - r_{13} - r_{24} + r_{23} \approx \frac{d_{12}d_{34}}{r} \rightarrow d_{12}d_{34} = r \cdot \lambda/2$$

Zgled:

$$r = 10 \text{ km} \quad f = 15 \text{ GHz}$$

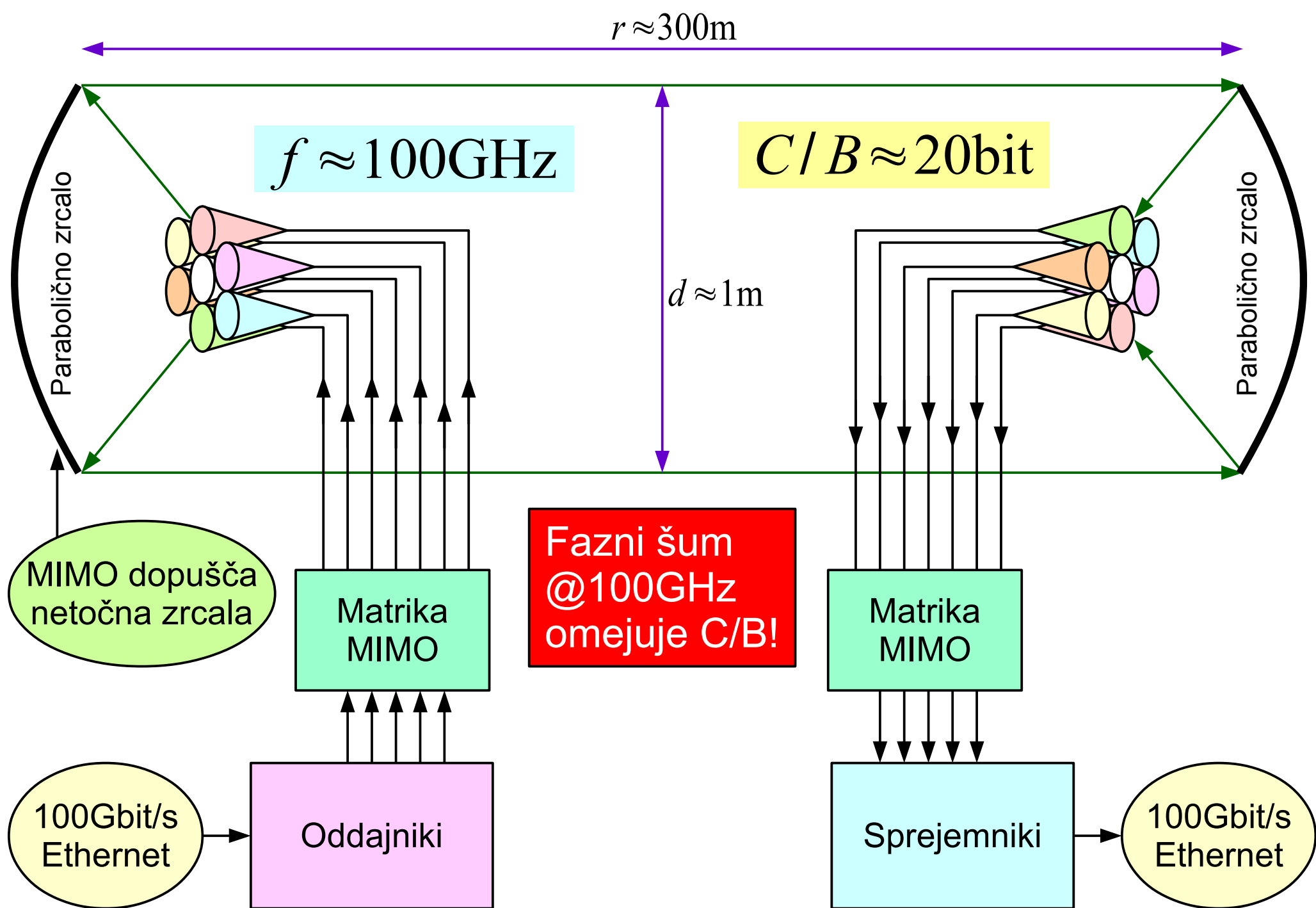
$$\lambda = c_0 / f = 2 \text{ cm}$$

$$\langle d \rangle = \sqrt{d_{12}d_{34}}$$

$$\langle d \rangle = \sqrt{r \cdot \lambda / 2} = 10 \text{ m}$$

Preizkus:

$$r = \frac{2\langle d \rangle^2}{\lambda} = 10 \text{ km}$$



16 – Visokozmogljiva zveza na kratko razdaljo

Izreki industrije polprevodnikov:

III-V polprevodniki so bili včeraj tehnologija bodočnosti.

III-V polprevodniki so danes tehnologija bodočnosti.

III-V polprevodniki bojo jutri tehnologija bodočnosti.

Silicij je bil včeraj tehnologija sedanjosti.

Silicij je danes tehnologija sedanjosti.

Silicij bo jutri tehnologija sedanjosti.

Fizika in tehnologija:

Iz silicija zaenkrat ne znamo izdelati kakovostnih svetlobnih virov niti primernih detektorjev. Optika zahteva III-V polprevodnike.

Nepričakovan razvoj dogodkov?

Računalniška industrija je zavrgla optični IRDA vmesnik in ga zamenjala z radijskim Bluetooth podobne zmogljivosti.

Cenene Si oziroma SiGe tehnologije danes presegajo $f > 500\text{GHz}$.

Številne razvojne skupine po svetu se ukvarjajo z razvojem čipov za cenene radijske zveze zmogljivosti $C \approx 100\text{Gbit/s}$.

Visokozmogljive radijske zveze bojo v nekaj letih presegle zmogljivosti cenene optike na kratkih razdaljah $r < 1\text{km}$.

Mogoče nam bojo vse skupaj prodajali pod imenom „5G“?

Licenciranje radijskih zvez v Fresnelovem področju ni potrebno niti smiselno. Večrodovne radijske zveze ne potrebujejo kopanja jarkov, so odporne na buldožerje in gasilce ter celo na nemarno postavljene lastne antene.

Z razvojem radijskih zvez postane upravičenost FTTH vprašljiva?

Oprema PON je nevaren odpadek, ker vsebuje strupene snovi (arzen ipd).