

24. Seminar Optične Komunikacije

Laboratorij za Sevanje in Optiko

Fakulteta za Elektrotehniko

Ljubljana, 30. januar - 1. februar 2019

**Kaj so nam prinesle
Optične komunikacije?**

Matjaž Vidmar

..... Seznam prosojnic:

Slika 1 – Razvoj električne telegrafije (digitalni signal)

Slika 2 – Razvoj telefonije (analogni signal)

Slika 3 – Razvoj svetlobnega vlakna

Slika 4 – Lastnosti svetlobnega vlakna

Slika 5 – Vlakenski svetlobni ojačevalnik

Slika 6 – Solitonski prenos

Slika 7 – Analogni prekooceanski kabel

Slika 8 – Optični balon se razpoči

Slika 9 – Teorija informacije

Slika 10 – Mikroračunalnik v telekomunikacijah

Slika 11 – ISO/OSI referenčni model zgradbe protokolov

Slika 12 – Sestava podatkovnih okvirjev

Slika 13 – Mejniki razvoja TCP/IP/Ethernet

Slika 14 – Kompresija slik in videa

Slika 15 – Računalniški duh uide iz steklenice

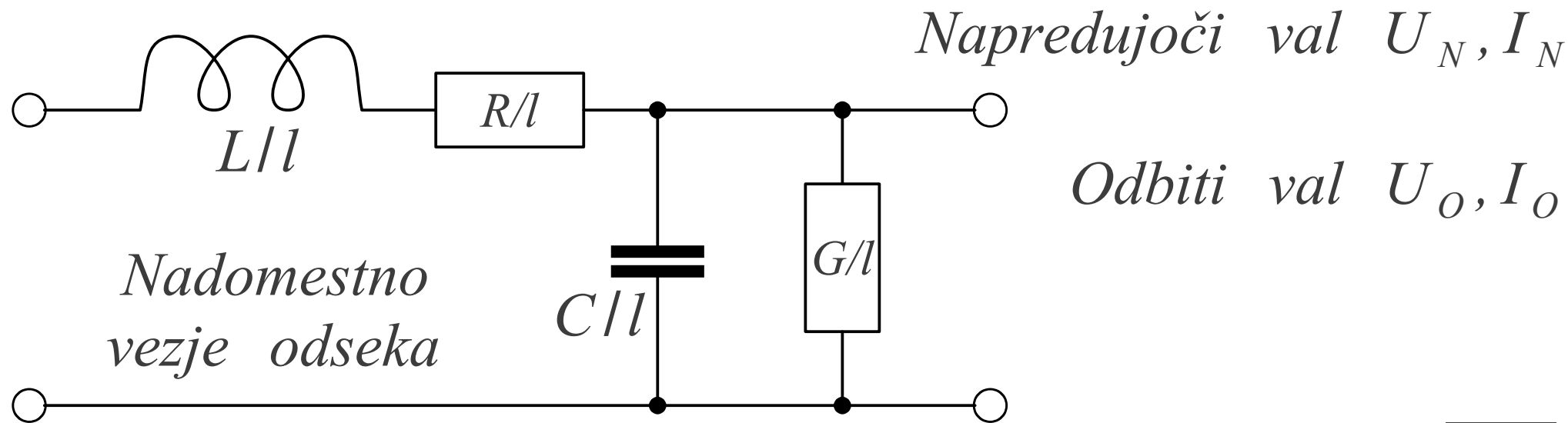
Slika 16 – Zahteve sodobnih uporabnikov

Slika 17 – Sodobna cenena optika

Slika 18 – Sodobna vrhunska optika

Slika 19 – Optične komunikacije v zrelih letih

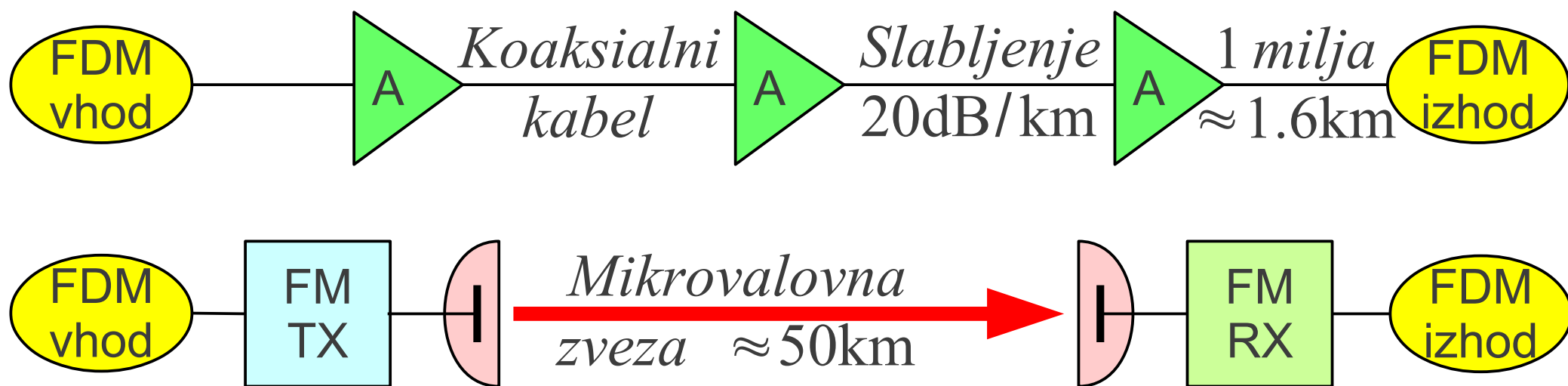
1800... ročni elektro-mehansko-kemijski telegrafi, 1 do 35 žic!
 1837 Samuel Morse, zapis sprejema na trak, 1 žica, poslovni uspeh
 1848 Friedrich C. Gerke izboljšano kodiranje, mednarodna koda 1865
 1857 prvi prekooceanski telegrafski kabel (odpove še isto leto)
 1874 Emile Baudot strojni elektro-mehanski telegraf
 1880... Oliver Heaviside telegrafska enačba



Karakteristična impedanca $Z_K = \frac{U_N}{I_N} = \frac{-U_O}{I_O} \approx \sqrt{\frac{L/l}{C/l}}$

Slabljenje na enoto dolžine $a/l [\text{dB/m}] \approx \frac{10}{\ln 10} \frac{R/l}{Z_K}$

1850... poskusi električnega telefona, enostaven za uporabo!
1876 Alexander Graham Bell poslovni uspeh
1878 ročna telefonska centrala poveča uporabnost telefona
1900... ojačevalnik (ogljeni mikrofoni!) omogoča velik domet zveze
1911... frekvenčni multipleks (FDM) povečuje zmogljivost žičnih vodov
1919... avtomatske telefonske centrale zamenjujejo ročne centrale



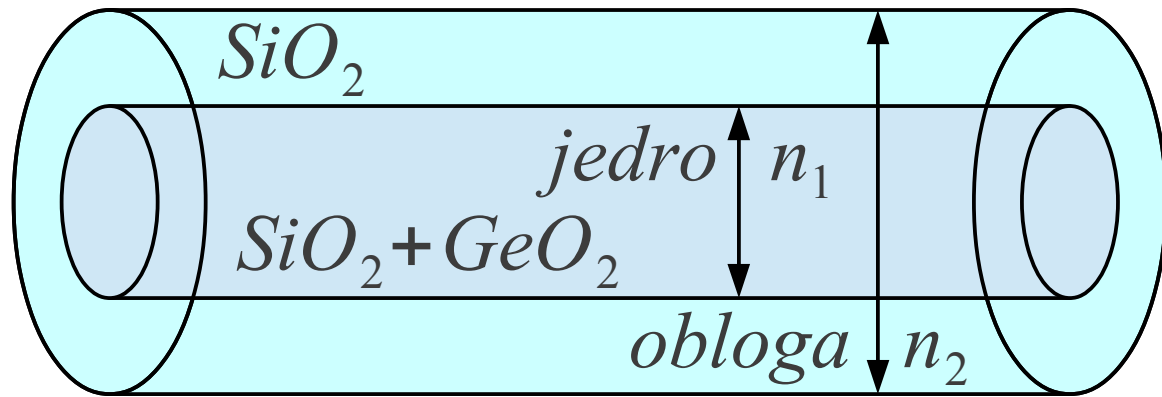
1960... analogne telefonske centrale drage, potratne, nezanesljive!
Cenena in enostavna digitalna komutacija zahteva PCM prenos!
1970... analogni 60MHz/10800 kanalov FDM > digitalni 140Mbit/s TDM
Regeneratorji digitalnega signala zamenjajo analogne ojačevalnike.

1956 prvo svetlobno vlakno z jedrom in oblogo iz različnih stekel
1965 prva komunikacija po svetlobnem vlaknu, slabljenje 1000dB/km
1970 svetlobno vlakno z nizkim slabljenjem Corning 17dB/km
1977 slabljenje znižano na teoretsko mejo 0.2dB/km
1990... svetlobna vlakna z dodatnimi lastnostmi DSF, PANDA, DCF...
2000... zaostrovanje toleranc izdelave svetlobnega vlakna

1970... LED oddajnik in PIN sprejemnik za 850nm (prvo okno)
Omejitev LED: nizka moč, mnogorodovno 100 μ W, enorodovno 3 μ W,
ON/OFF modulacija, C<10Mbit/s po mnogorodovnem vlaknu l<10km

1985... razvoj InGaAsP LASER za 1300nm (drugo okno), Ge APD,
ON/OFF modulacija, C<1Gbit/s po enorodovnem vlaknu l<50km

1988... vlakenski (Er) ojačevalnik svetlobe za 1550nm (tretje okno),
analogni sistemi z dometom l<10000km
1990... ozkopasovni DFB LASER, zunanji modulator, InGaAs PIN/APD,
WDM kretnice, ON/OFF modulacija C<40Gbit/s/kanal, C<1Tbit/s/WDM
2000... zahtevnejše modulacije QPSK, QAM, dvopolarizacijski prenos,
upoštevanje Shannona C<100Gbit/s/kanal, C<10Tbit/s/WDM



jedro/obloga [μm]
Mnogorodovno SI 100/140
Mnogorodovno GI 50/125
Enorodovno SI 9/125
Enorodovno posebno 9/80

Numerična apertura $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx 0.1 (SMF) \dots 0.2 (MMF)$

Mnogorodovna razpršitev $B = D_M / l$ $D_M \approx 0.1 \dots 1 \text{ GHz.km}$

Barvna razpršitev $\Delta t = D_B \cdot \Delta \lambda \cdot l$ $D_B \approx 5 \dots 17 \text{ ps/nm.km}$

Polarizacijska razpršitev $\Delta t = D_P \cdot \sqrt{l}$ $D_P \approx 0.1 \dots 10 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$

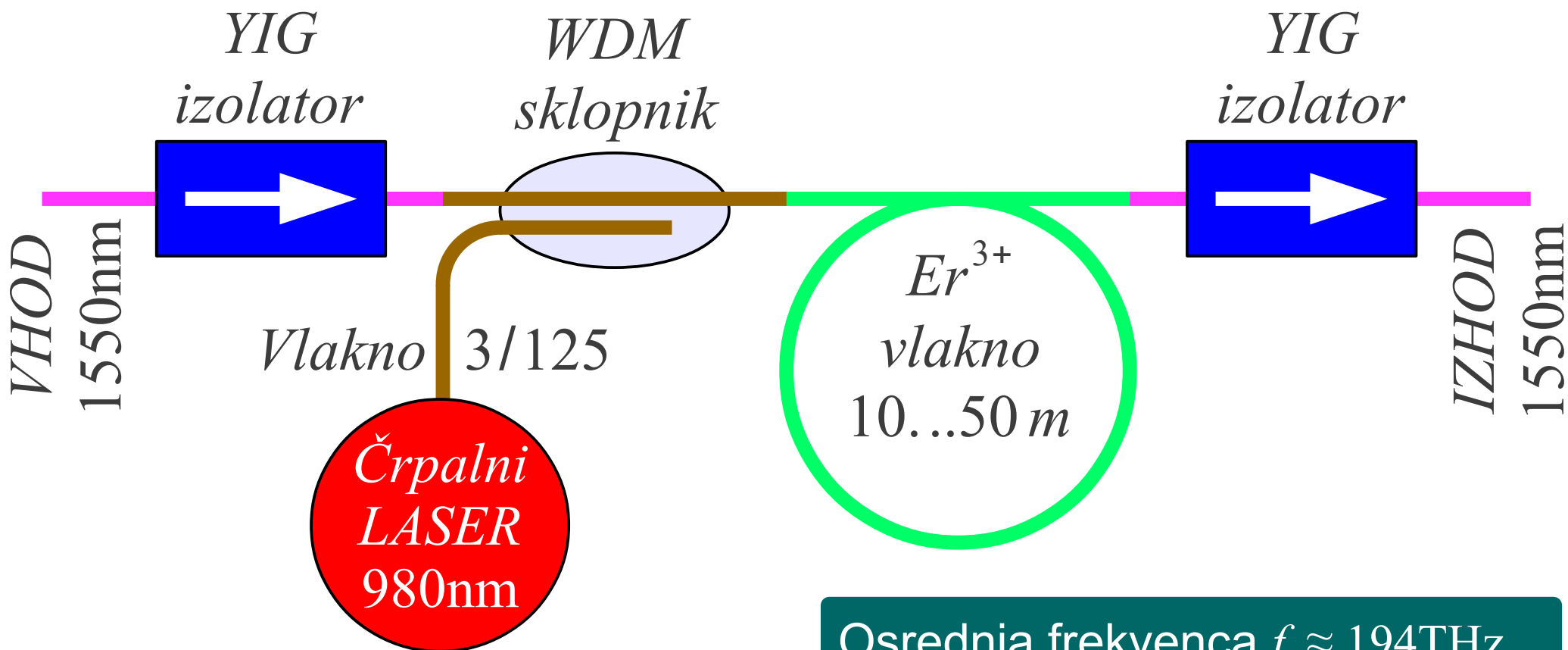
Občutljivost sprejemnika $P_{RX} (1 \text{ Gbit/s}) \approx -30 \text{ dBm} = 1 \mu \text{ W}$

Nelinearnosti $P_{TX} < 100 \text{ mW} = +20 \text{ dBm}$

Zmogljivost (Shannon) $C \approx 10 \text{ Tbit/s}$

Simbolna hitrost $R < 20 \text{ Gsimbolov/s}$

**Pri $C \gg R$ popačenja
 zahtevajo večtonski
 modem FDM
 (OFDM, WDM)**

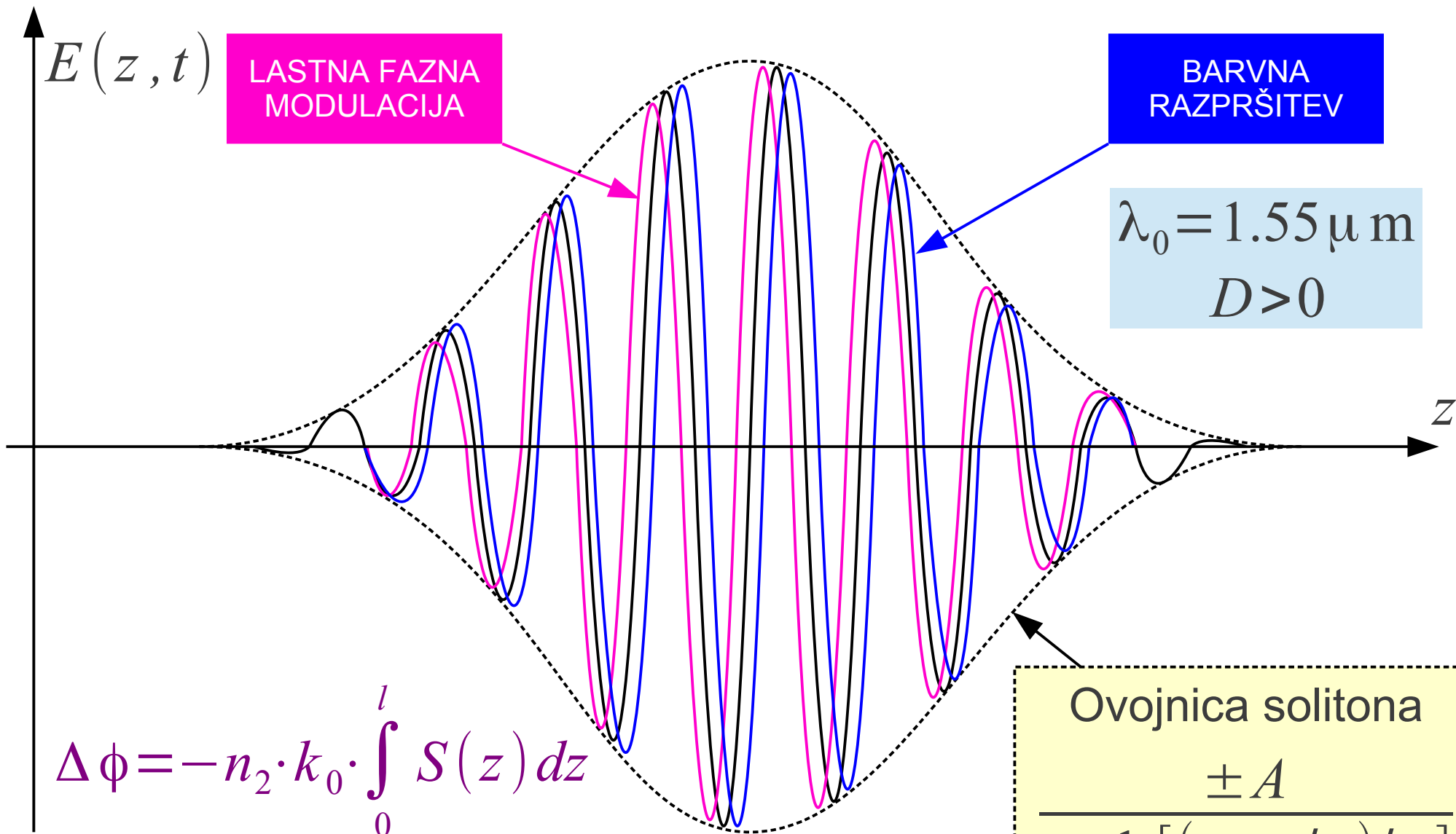


LASER je dvosmerni ojačevalnik!
 YIG izolatorji niso vlakenski!
 Zanesljivost črpalnega LASERja?
 Velike izmere
 Nezmožnost integracije
 Zažig konektorjev?
 Nadomestilo za regeneratore?

Osrednja frekvenca $f_0 \approx 194\text{THz}$
 Sovpada z min slabljenja vlakna!
 Pasovna širina $B \approx 4\text{THz}$
 Časovna konst. črpanja $\tau \approx 10\text{ms}$
 Vgrajen AGC!
 Visoka vršna moč $P_{MAX} \gg P_{POVPR.}$
 Obe polarizaciji enakovredni
 Omogoča solitone
 Omogoča analogni FDM (WDM)

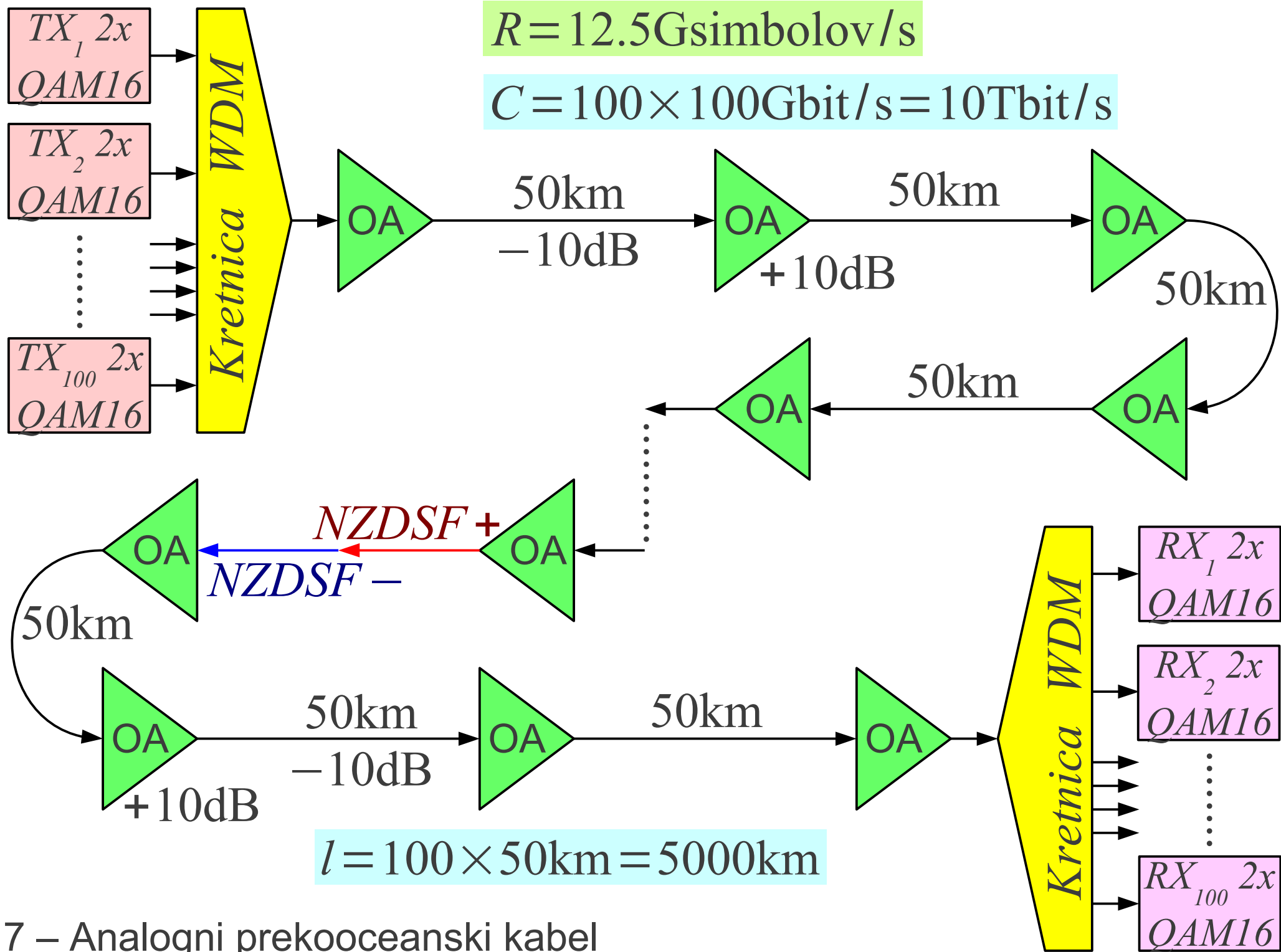


Ojačevana prekooceanska zveza brez regeneracij



$$\Delta\phi = -n_2 \cdot k_0 \cdot \int_0^l S(z) dz$$

6 – Solitonski prenos **Praktično neuporaben!**



7 – Analogni preoceanski kabel

2001 Velika finančna polomija: optični balon se razpoči!
Znani proizvajalci, raziskovalne skupine in razvojni oddelki propadejo.

Razlogi: vlaganja v napačne razvoje (na primer solitonski prenos), neupoštevanje informacijske teorije, neupoštevanje dejanskega stanja tehnologije, neupoštevanje višjih OSI plasti, neupoštevanje potreb uporabnikov, naslanjanje na prazne „znanstvene“ članke.

Optični tranzistor oziroma enakovreden gradnik z enosmernim ojačanjem, ki ga je možno integrirati, niti danes sploh ne obstaja!

Brez optičnega tranzistorja ne moremo graditi optičnih računalnikov.
Brez optičnega računalnika je kakršnakoli zahtevnejša obdelava signalov oziroma usmerjanje prometa v omrežju nemogoče.

Iz tega izhaja vrsta neizpolnjenih obljub: vseoptično omrežje, optično usmerjanje, optični 3R regeneratorski element, optični pretvornik valovne dolžine.

Optično omrežje je danes razpeto med hitro digitalno elektroniko na eni strani in analogno tehniko WDM na drugi strani.

Claude Shannon 1948

$W_S \equiv$ energija signala

$W_N \equiv$ energija šuma

$$\text{Informacija } I[\text{znakov}] = \frac{1}{2} \cdot \log_m \left(1 + \frac{W_S}{W_N} \right)$$

$m \equiv$ nabor znakov

Angleška abeceda $m=26$

Dvojiški prenos $m=2 \rightarrow I[\text{bit}] \quad C[\text{bit/s}]$

$$\text{Zmogljivost } C[\text{znakov/s}] = B \cdot \log_m \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

$P_S \equiv$ moč signala

$P_N \equiv$ moč šuma

$B \equiv$ pasovna širina

$N_0 \equiv$ spektralna gostota šuma

$$\text{Zmogljivost } C[\text{znakov/s}] = B \cdot \log_m \left(1 + \frac{P_S}{B \cdot N_0} \right)$$

$$\lim_{B \rightarrow 0} C = 0$$

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{P_S}{N_0 \cdot \ln m}$$

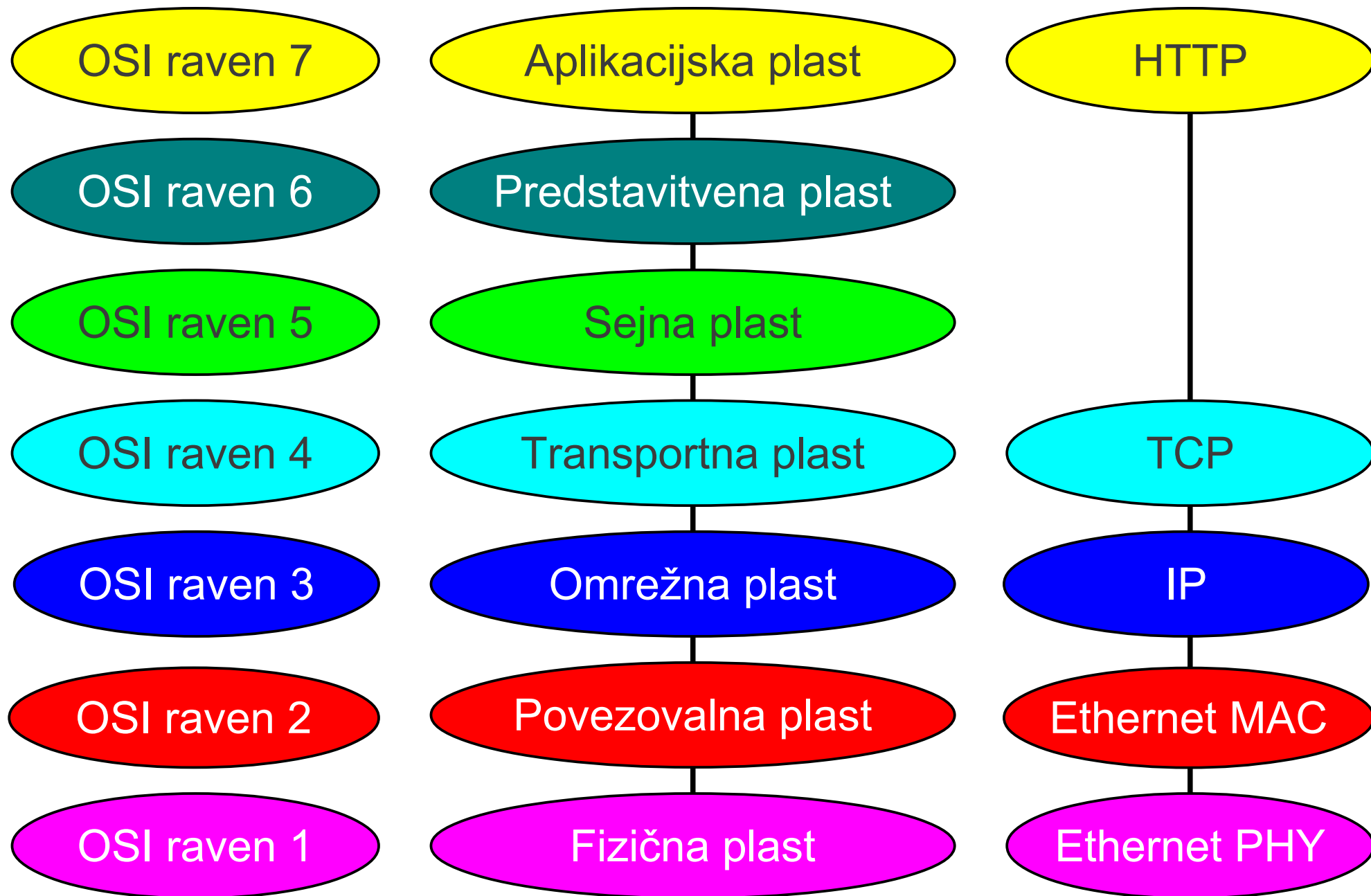
~1850 telegraf zahteva šolanega telegrafista na obeh koncih zveze
~1950 radio zahteva šolanega operaterja na obeh koncih zveze
Tehnične omejitve zahtevaja potratna in draga tokokrogovna omrežja!

1955... računalnik v sobi z omarami >10000 germanijevih tranzistorjev
1965... miniračunalnik v omari s karticami ~1000 TTL čipov (Si BJT)
1975... mikroračunalnik na kartici z ~10 MOS čipi (CPU, ROM, RAM...)
1985... mikrokrmilnik na enem samem CMOS čipu (mala poraba!)

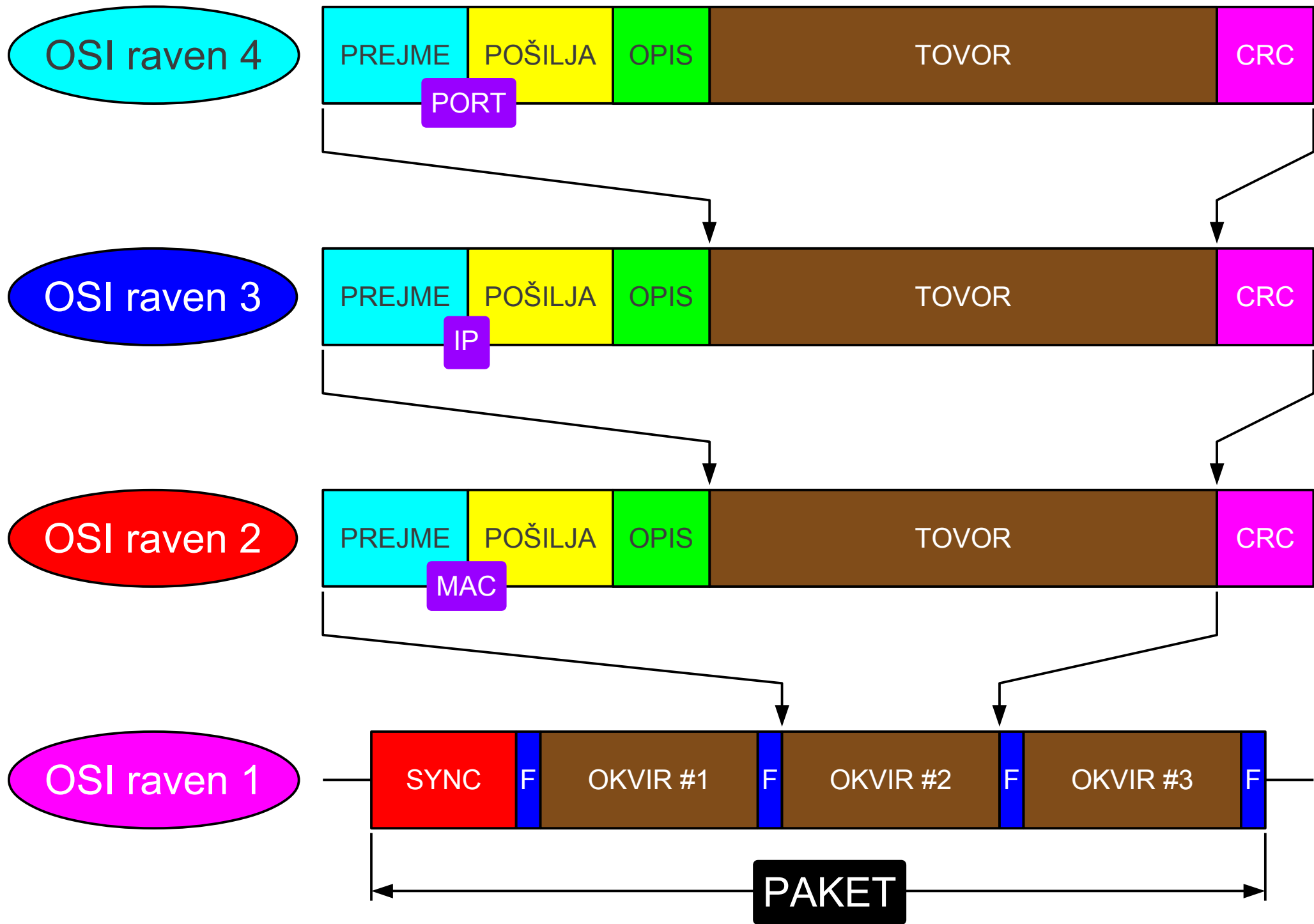
1970–1980 mikroračunalnik prinese vrsto novosti v telekomunikacije:

- * samodejno uglaševanje radijske postaje
- * samodejno iskanje proste frekvence / časovne rezine
- * javna mobilna radijska omrežja, preprosta za uporabo
- * paketni prenos po žici (Ethernet) oziroma radiu (ALOHA net)
- * CSMA (Carrier-Sense Multiple Access) dostop do skupnega kanala
- * samodejno potrjevanje sprejetih sporočil
- * samodejno ponavljanje izgubljenih sporočil
- * samodejno zaznavanje trčenj CD (Collision Detect)

Mikroračunalnik omogoči učinkovita paketna omrežja (naravni pristop)!

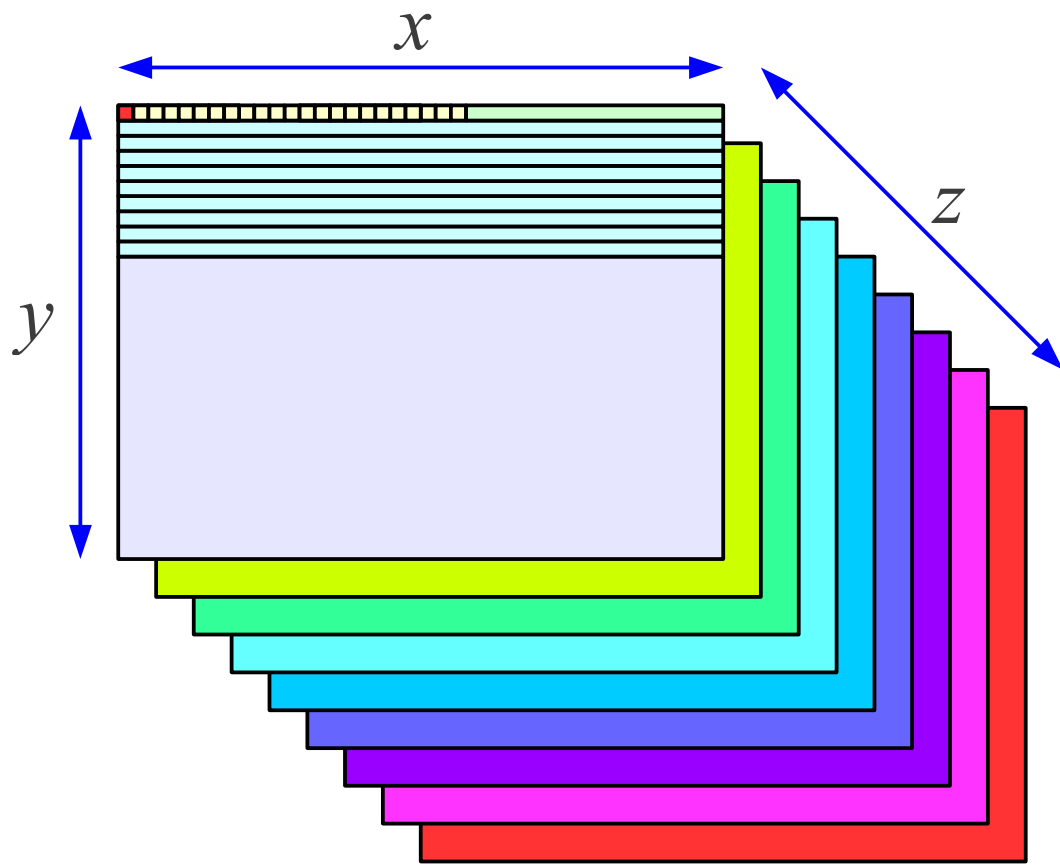


Nevarnost podvajanja plasti!



12 – Sestava podatkovnih okvirjev

- 1973 prvi Ethernet 2.94Mbps, 8-bitni naslovi, CSMA/CD sodostop (Xerox, ZDA)
 - 1974 prvi predlog za standardiziran protokol paketnega omrežja TCP/IP
 - 1980 DIX Ethernet 10Mbps, 48-bitni MAC naslovi, 16-bitni opis vsebine
 - 1981 standardiziran TCP/IPv4
 - 1982 10Mbps 10BASE5 Thick Ethernet, domet 500m skupni dragi RG8X
 - 1985 10Mbps 10BASE2 Thin Ethernet, domet 185m skupni ceneni RG58
 - 1986 nasičenje TCP/IP omrežja, upad prepustnosti za tri velikostne razrede!
 - 1988... razvoj TCP Congestion Control
 - 1990 10Mbps 10BASE-T, dve parici (UTP), domet 100m točka-točka+hub
 - 1995 100Mbps 100BASE-TX, dve parici (UTP), domet 100m točka-točka+switch
 - 1998 grobi predlog IPv6 z daljšimi naslovi, nezdržljiv z IPv4
 - 1998 1Gbps 1000BASE-X, MMF/SMF 850/1310/1550nm, domet 200m...70km
 - 1999 1Gbps 1000BASE-T, štiri parice (UTP), 100m
 - 2003 PoE (UTP) in 10Gbps ETH po svetlobnem vlaknu
 - 2010... standardi za 40Gbps, 100Gbps, 400Gbps Ethernet
- 13 – Mejniki razvoja TCP/IP/Ethernet



$(S/N)_{dB} = 10 \log(S/N) = 48 \text{ dB}$
 $6 \text{ dB} = 1 \text{ bit razmerja } (S/N)_{dB}$
 $b = (S/N)_{dB} / 6 \text{ dB} = 8 \text{ bit/pika}$

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

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

$$C = 8 \text{ bit/pika} \cdot 800 \text{ pik/vrsta} \cdot 600 \text{ vrst/slika} \cdot 25 \text{ slik/s} = 96 \text{ Mbit/s}$$

1992 izgubna kompresija JPEG z diskretno kosinusno transformacijo: popačenje DCT je silno podobno uklonskim pojavom, kar obdelava slike v človeških možganih privzeto izloča!

$n = 2$ (2D slika)

$n = 3$ (3D video)

$k \approx 4 \equiv$ faktor izgubne kompresije

Spremenljiv pretok → paketni prenos!

$$C' = C / k^n \approx C / 64 \approx 1.5 \text{ Mbit/s}$$

LETO	1990	10 let	2000
OSEBNI RAČUNALNIK	širokopotrošni izdelek najslabše kakovosti	>>>>>	vrhunska računalniška tehnologija
PCB	LEPENKA (EMC?)	>>>>>	VEČSLOJNI FR4 (Zk)
CPU	8bit/16bit	X4	32bit/64bit
TAKT	25MHz	X100	2.5GHz
DISK	40Mbyte	X1000	40Gbyte
STORITEV	BESEDILO (EN FONT) GROBA GRAFIKA	>>>>>	BARVNE SLIKE ŽIV VIDEO, HTTP
PROTOKOL	PISANA MNOŽICA PROTOKOLOV	>>>>>	TCP/IP
MREŽA	PISANA MNOŽICA MREŽ	X1000	ETHERNET 100Mbps 100BASE-TX
ZVEZA	TELEFONSKI MODEM 20kbps	X100	ADSL 2Mbps



Zmogljivost obdelave (video)

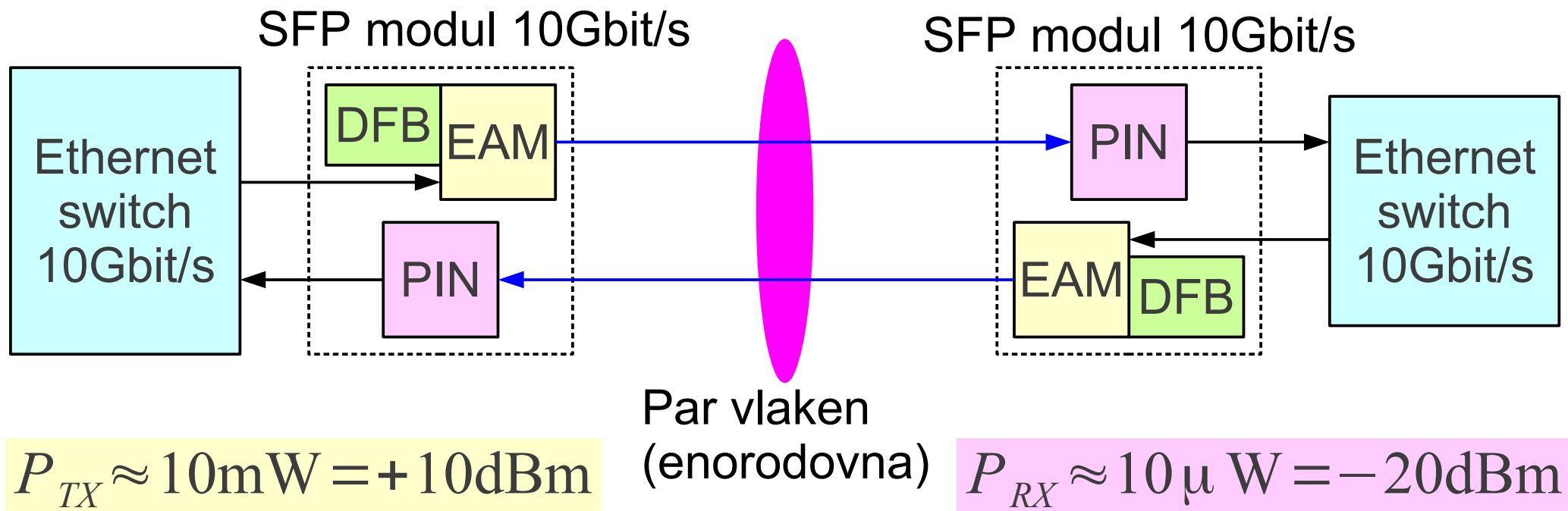
$$C \approx \frac{N_{jeder} \cdot f_{ura}}{1000}$$

$$C \approx \frac{4 \text{ jedra} \cdot 2.5\text{GHz} / \text{jedro}}{1000} = 10\text{Mbit/s}$$

Povezava
C=10Mbit/s

A horizontal double-headed arrow with the text 'Povezava C=10Mbit/s' centered above it, pointing towards the computer system on the left.

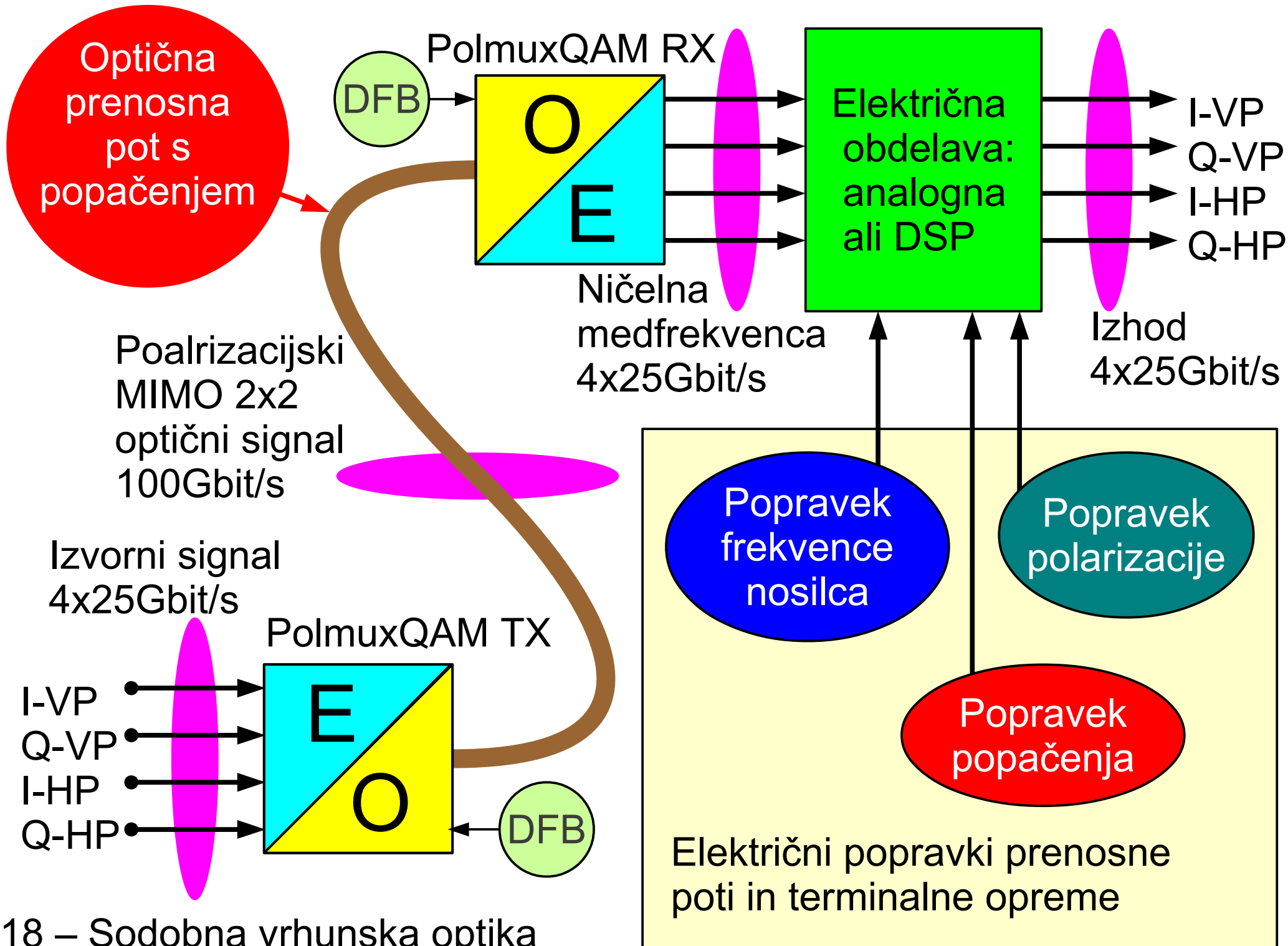
Aplikacije z zahtevnejšimi povezavami v svet (še) niso zaživele:
Peer-to-peer omrežja? (Veliki ne znajo nadzorovati majhnih?)
Storitve (hramba) v oblaku? (Nezaupanje v oblake?)
Igre? Kriptovalute? Windows13 update? Kaj še bolj neumnega?



Domet $\approx 30\text{dB}$ ali 50km

*Preprosta modulacija ON/OFF
nekoherentni sprejem*

Zmogljivost 10Gbit/s in domet 30dB danes delimo med množico uporabnikov v pasivnem dostopovnem omrežju PON. Žal bistvena nadgradnja zmogljivosti takšnega sistema ni trivialna. Kakršnokoli povečanje zahtev uporabnikov naredi PON ozko grlo.



Najugodnejši vodnik ostaja enorodovno stekleno vlakno G.652

Uporabno pasovno širino 4THz določa erbijev ojačevalnik

Vrhunska elektronika in omrežna oprema pogojujeta razvoj optike

Celotno obdelavo optičnega signala na obeh polarizacijah mešanih v kvadraturi na ničelno medfrekvenco (ZIF) opravi elektronika

Prekooceanske zveze na velike razdalje ostajajo analogni WDM s smiselno zmogljivostjo v velikostnem razredu $\sim 10\text{Tbit/s}$

Sklad protokolov TCP/IP/Ethernet je izpodrinil vse druge protokole

Večrodovna in večjedrna vlakna so predraga

Razvoj novih vrst vlaken zaenkrat (še) ni dal uporabnih rezultatov

Svetlobni ojačevalniki večje pasovne širine $>4\text{THz}$ so predragi

Izkoriščanje teoretske zmogljivosti G.652 okoli $\sim 100\text{Tbit/s}$ je predrago

Zahtevnejša optična obdelava signalov ostaja zaenkrat neizvedljiva

Razvoj je pogosto zašel na neuporabne stranpoti (solitoni)