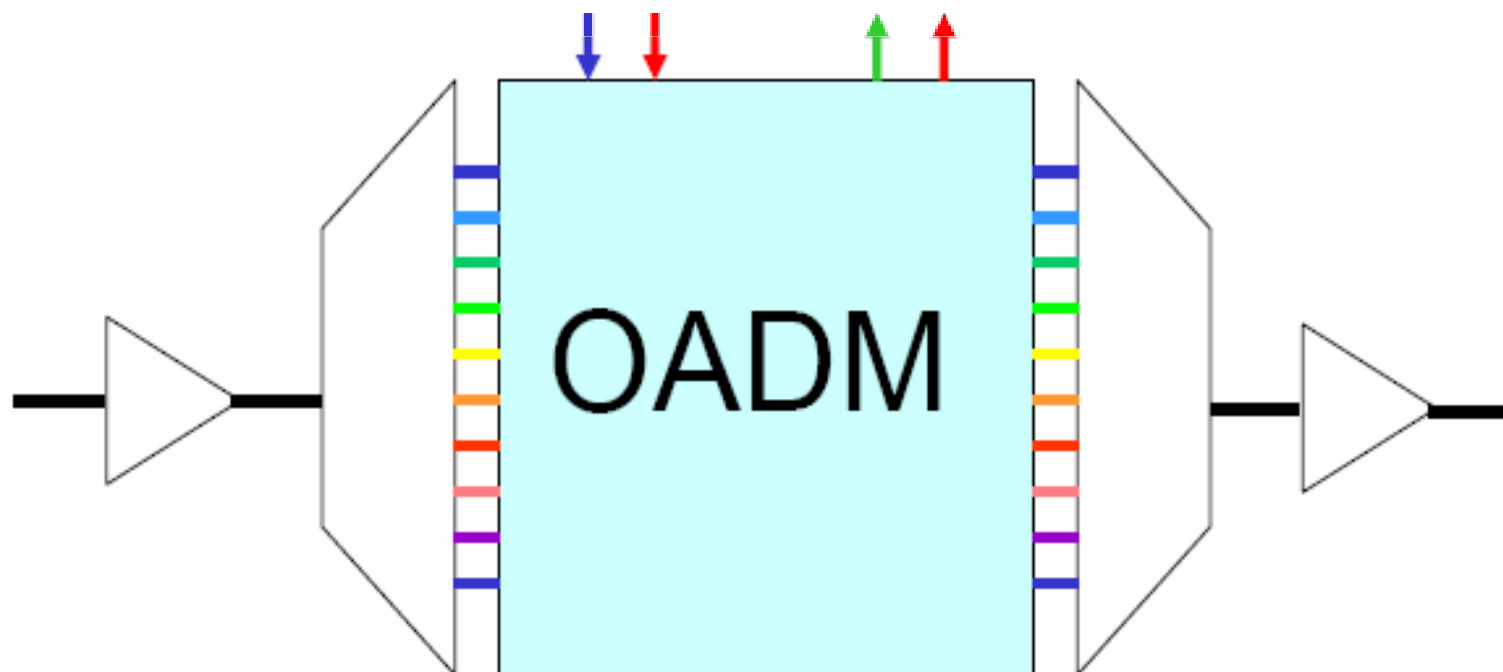


Optična zveza

Mobitel d.d.,
izobraževanje
8. 10. 2010,

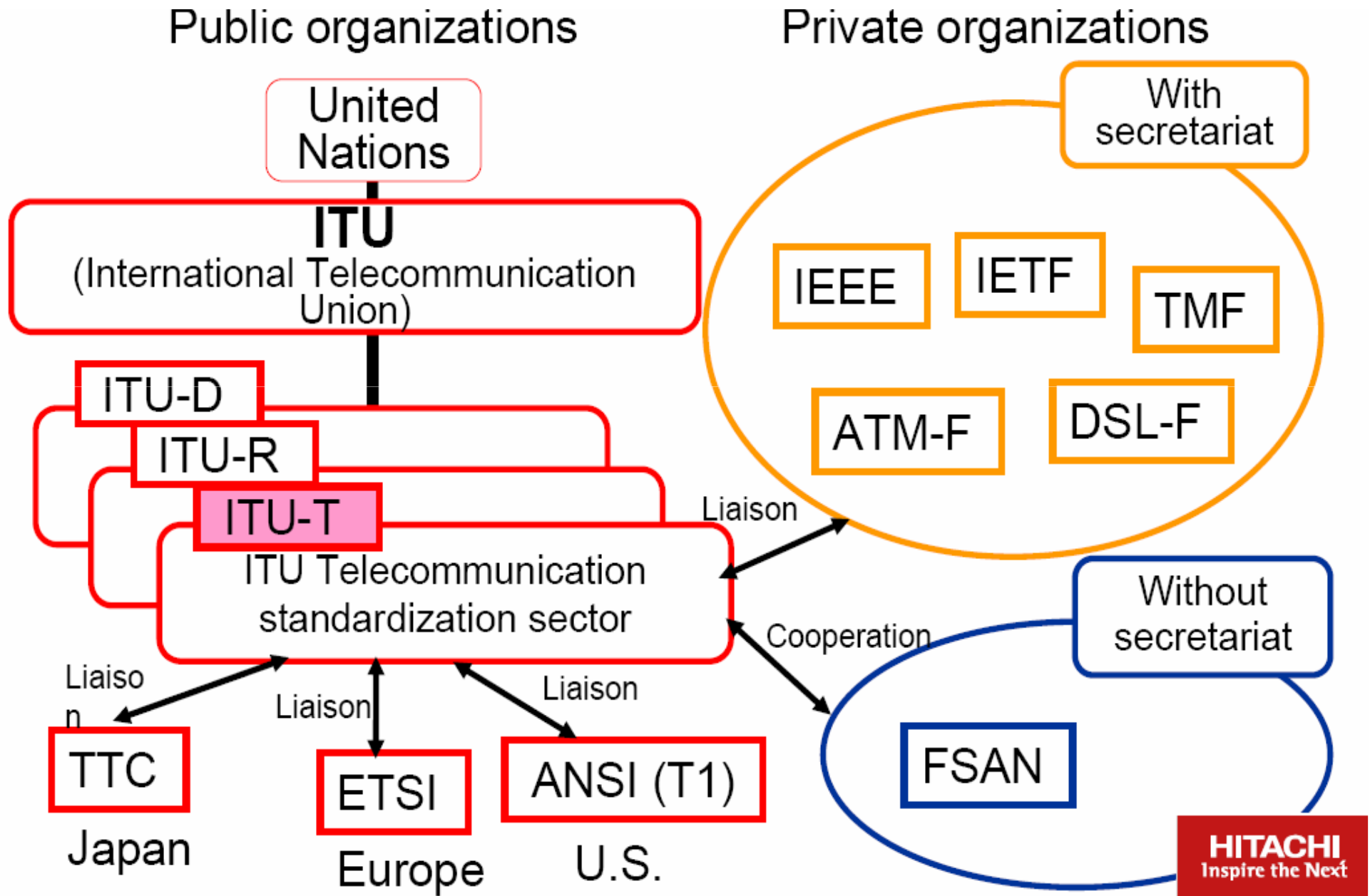
Predavanje 18
Prof. dr. Jožko
Budin



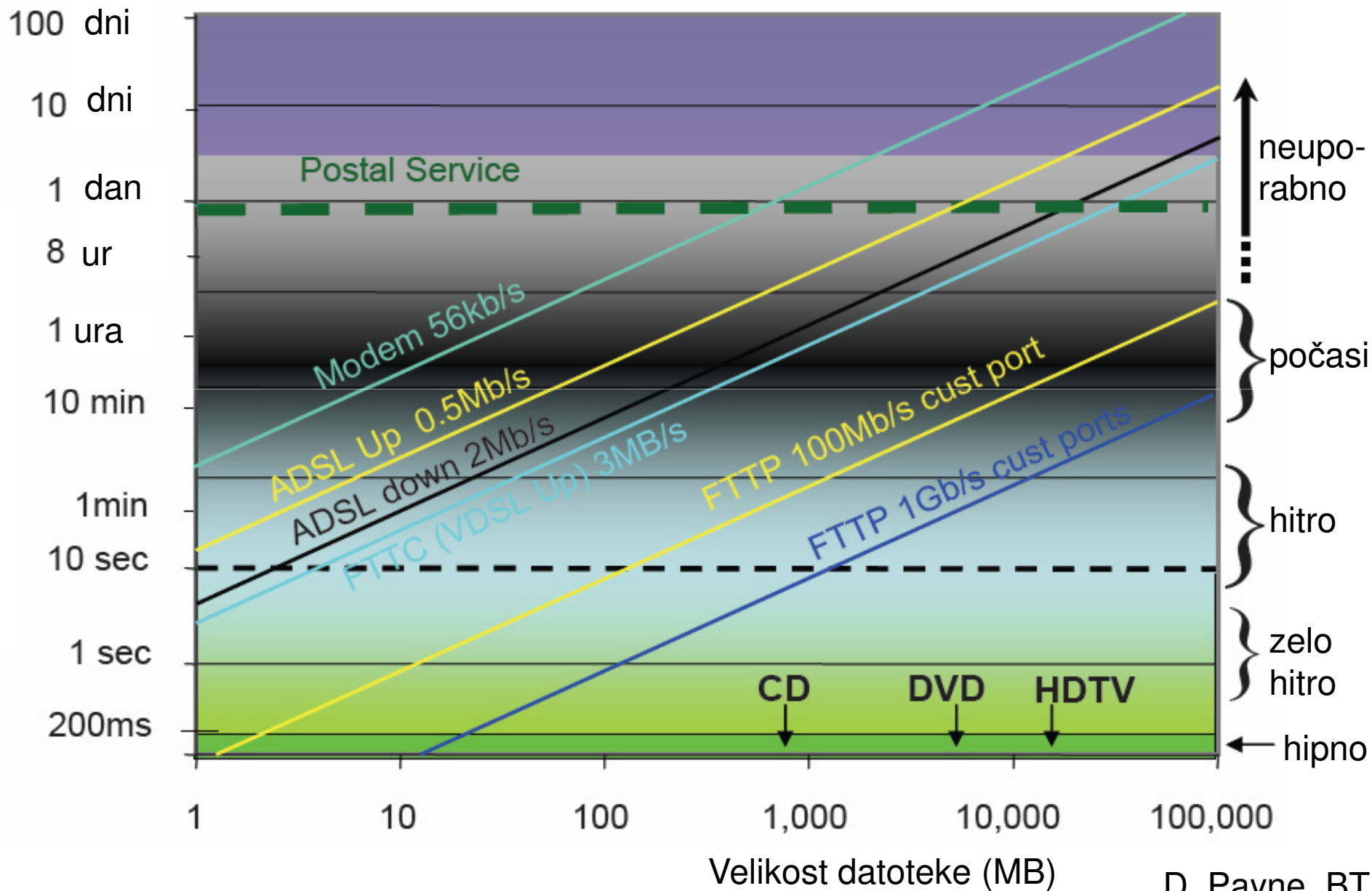
Vsebina

1. Optična zveza WDM
2. Sestavni deli optične zveze
3. Ojačevanje in regeneracija
4. Značilni parametri optične zveze
5. OOK, NRZ, RZ
6. Ojačevana optična zveza
7. Omejevalni pojavi
8. Očesni diagram, Q, BER, FEC
9. Omejitve nekoherentne in koherentne zveze
10. Stanje 2010
11. Razvojne perspektive (ECOC 2010)

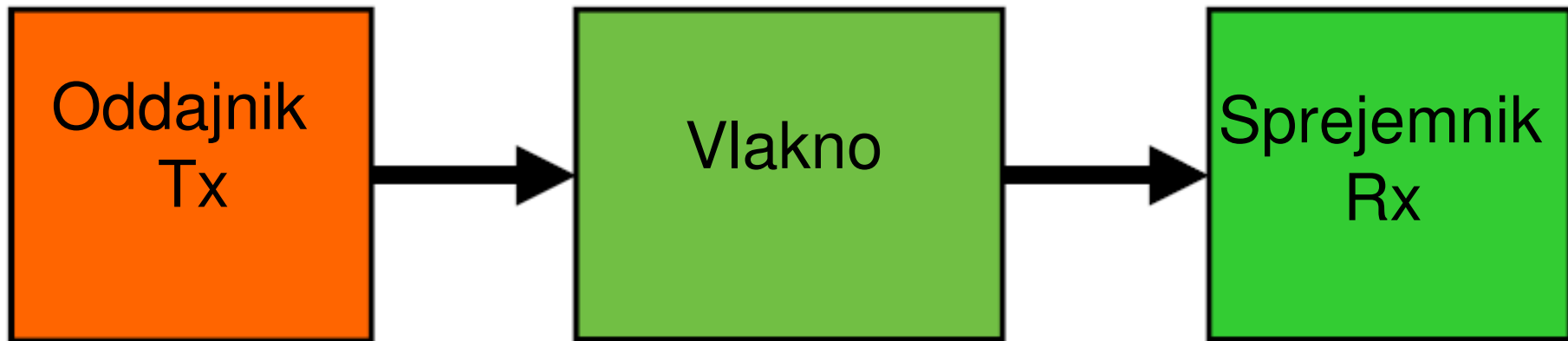
Svetovne organizacije za standardizacijo



Čas sprejema podatkovnih paketov

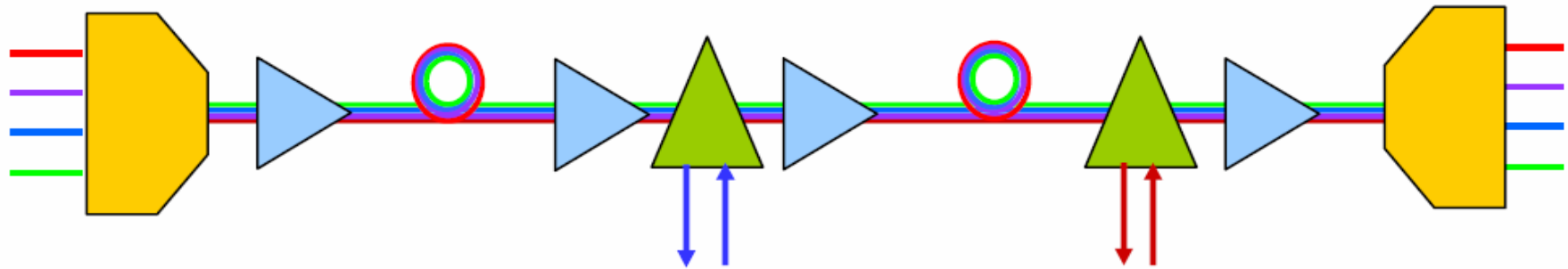


Optična zveza



1. Oddajnik: Kodiranje, modulacija za čim višji spektralni izkoristek
2. Vlakno: Prenos pri nizki nelinearnosti in ojačevanje s čim višjim OSNR, optična kompenzacija disperzije
3. Sprejemnik: Dekodiranje, demodulacija za čim višjo občutljivost sprejema
Digitalno precesiranje signala (DSP) za kompenzacijo kromatske disperzije, polarizacijske rodovne disperzije in nelinearnosti

Optična WDM vlakenska zveza

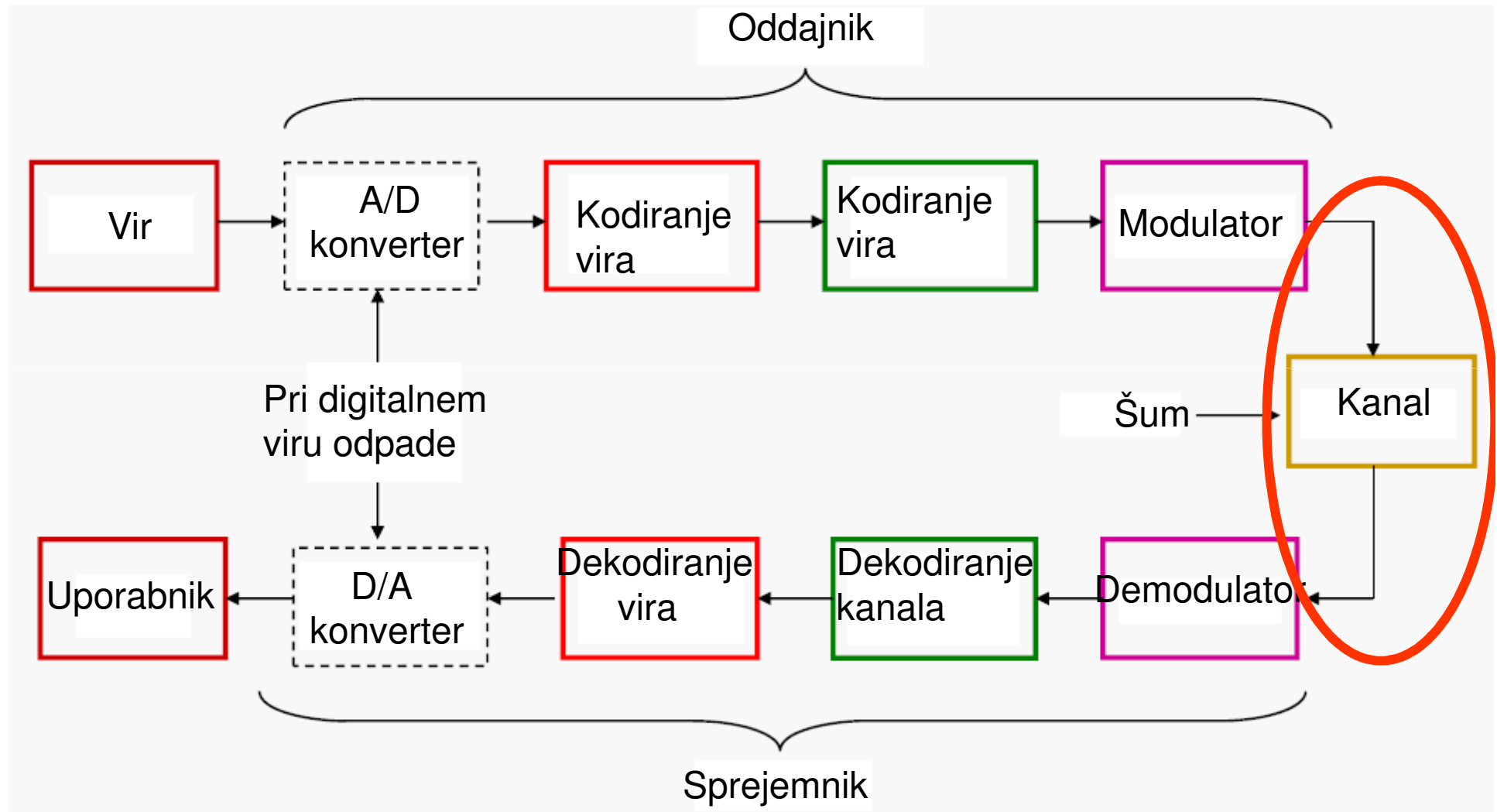


Sestavni deli:

- optični WDM razvrstilnik AWG (Arrayed Waveguide Grating)
- optični vlakenski ojačevalnik s kompenzatorjem disperzije
- odsek prenosnega vlakna
- optični vstopno-izstopni razvrstilnik OADM (Optical Add/Drop Multiplexer)

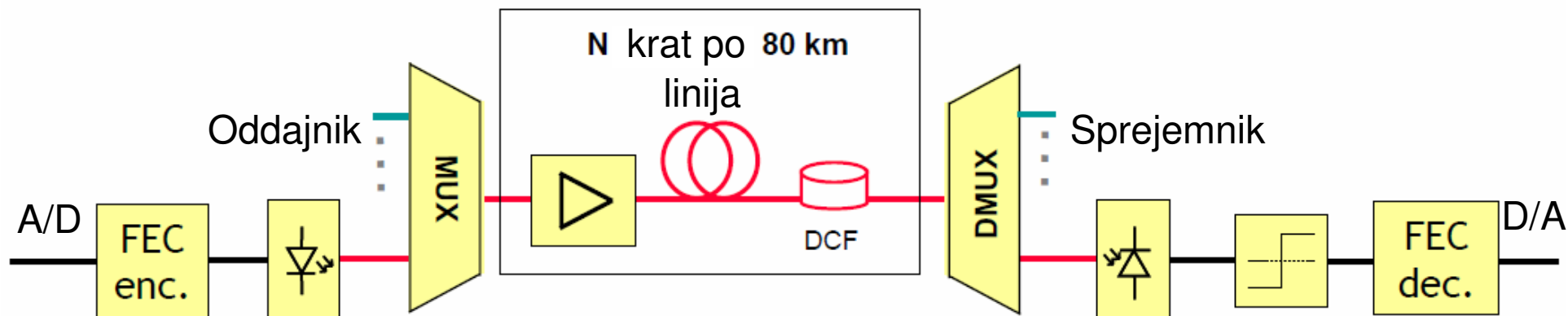
OFC 2010: z WDM prenosom po enem samem vlaknu lahko prenašamo (na kratko razdaljo) rekordno število okoli 70 Tb/s, torej več kot milijardo 64-kb/s telefonskih pogovorov.

Digitalni komunikacijski sistem



Optična zveza

Konvencionalna ojačevana WDM vlakenska zveza na večje razdalje

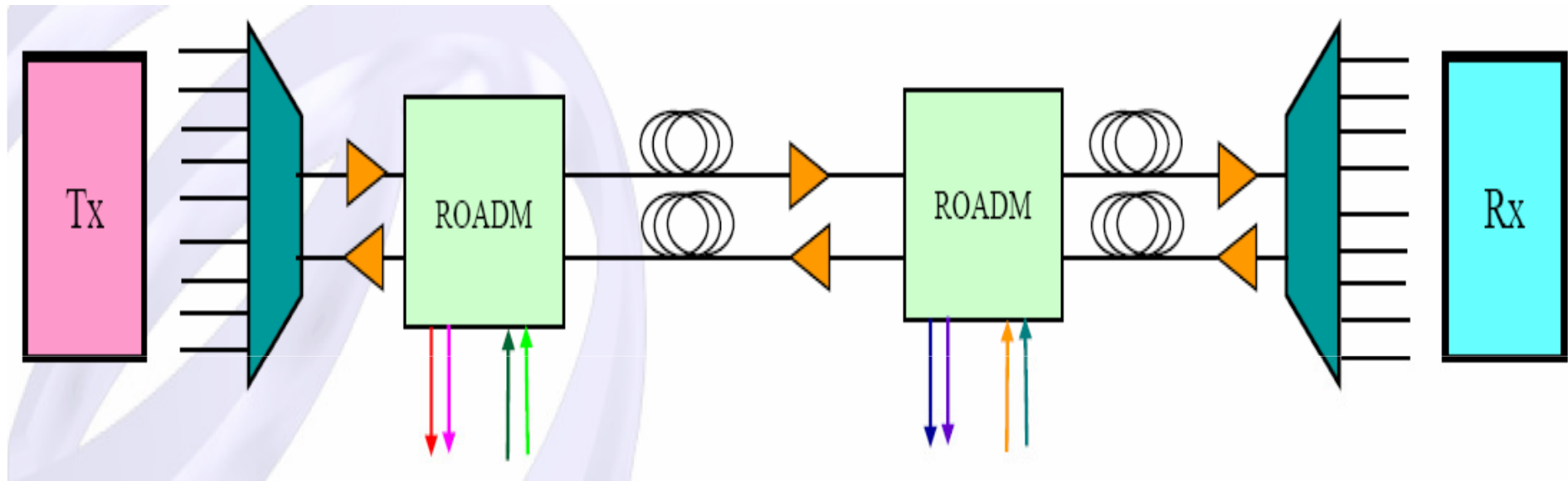


Funkcije:

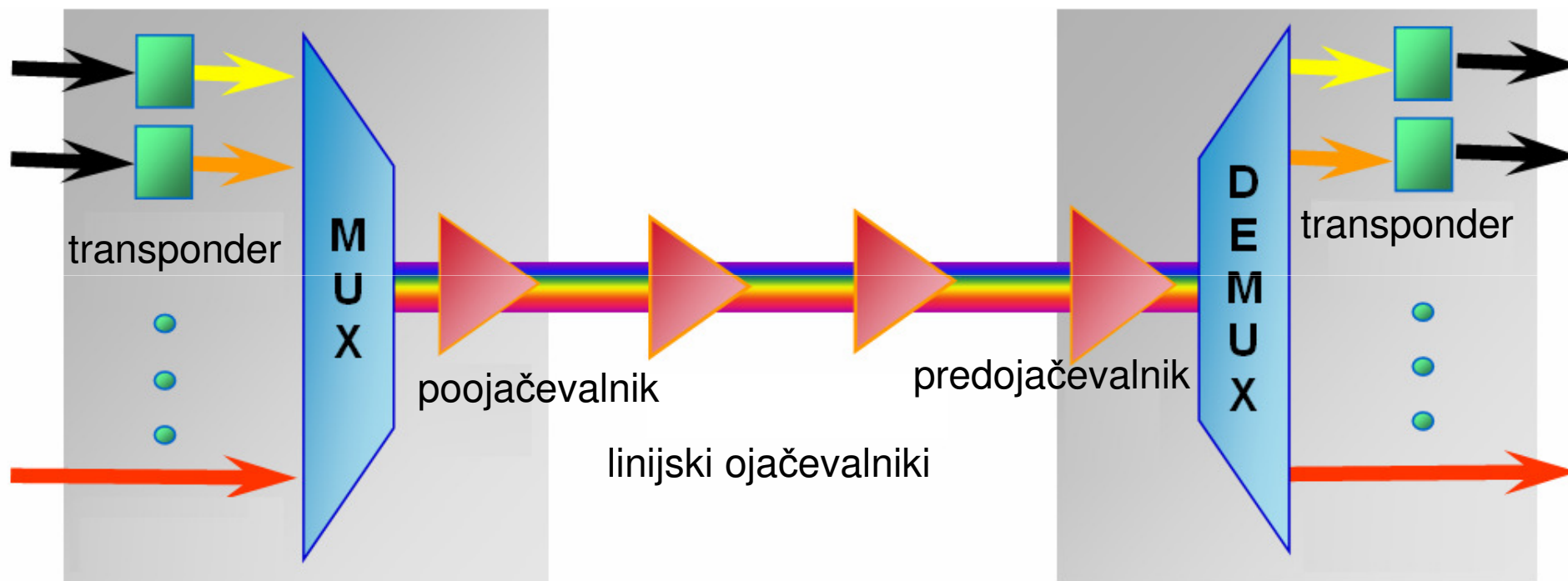
- FEC, kanalsko kodiranje
- Oddajnik, dig.modulacija (RZ, NRZ)
- Multipleksiranje: časovno, valovno, frekvenčno ortogonalno
- Vlakensko ojačevanje ali regeneracija
- Prenos po odseku vlakna, N krat
- Optična kompenzacija disperzije
- Demultipleksiranje
- Sprejemnik, detekcija (DD)
- Ojačevanje v osnovnem pasu
- FEC, kanalsko dekodiranje

Z novimi tehnologijami se bo prihodnja vlakenska zveza močno spremenila. Sedanji sistem (OOK IM/DD) izhaja iz nekdanje telegrafije oz. iz radijskih komunikacij pred preходом na analogno modulacijo. Prihodnji sistem OK naj bi se s preходом na **koherentni sprejem** približal radijskim komunikacijam.

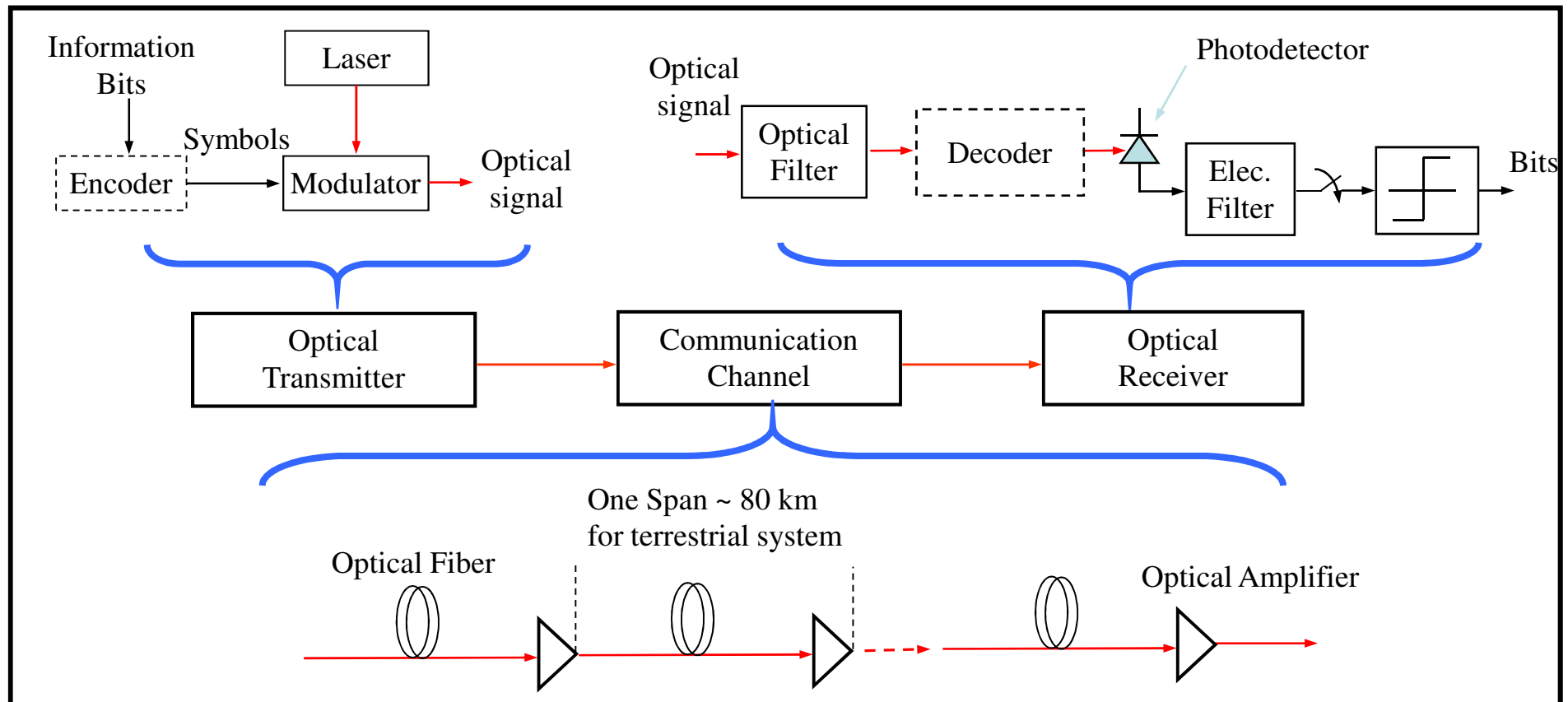
Optična zveza WDM



WDM ojačevana zveza

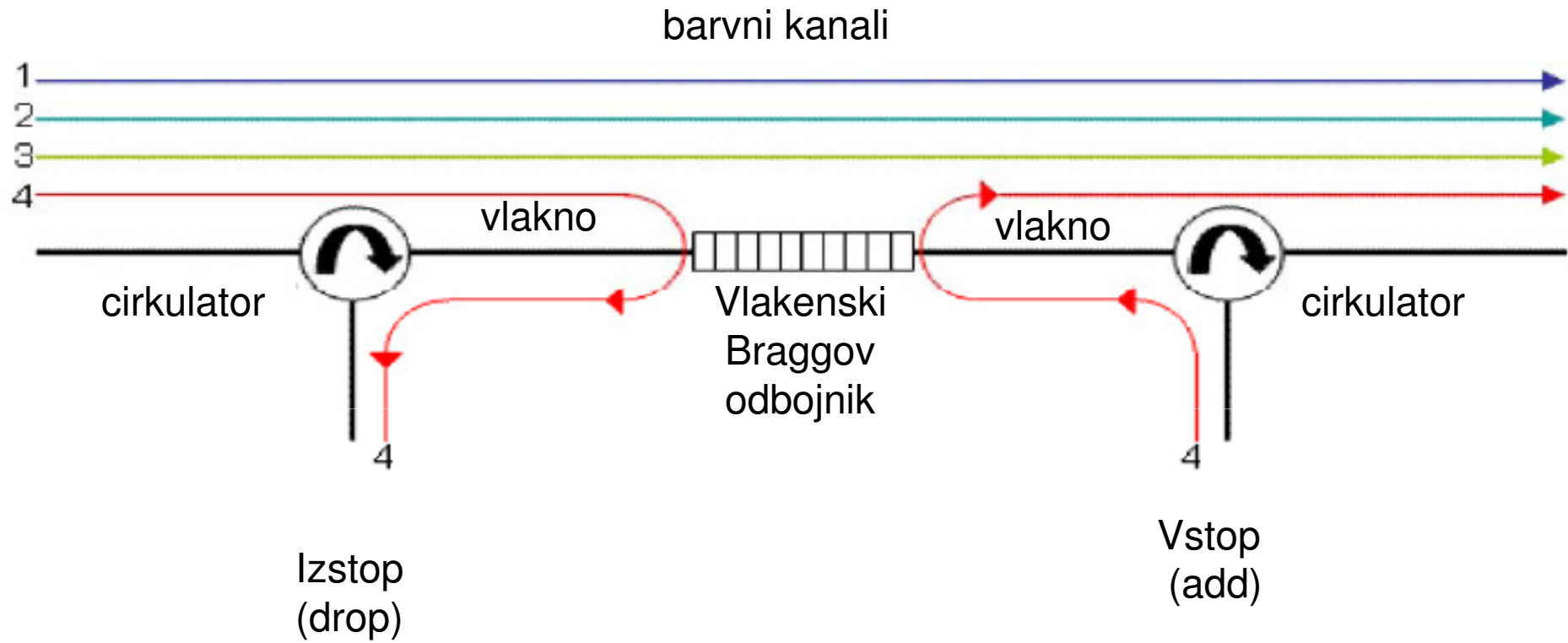


Tipična optična zveza na velike razdalje



- ❖ Performance measure: Bit Error Ratio (BER). Required: $10^{-9} \sim 10^{-14}$.
- ❖ Dominant noise is Amplified-Spontaneous-Emission (ASE) noise from optical amplifiers.
- ❖ Capacity record (2002): 40 Gb/s/channel, 64 channel, 4000 km, BER $< 10^{-12}$. **Using DPSK.**

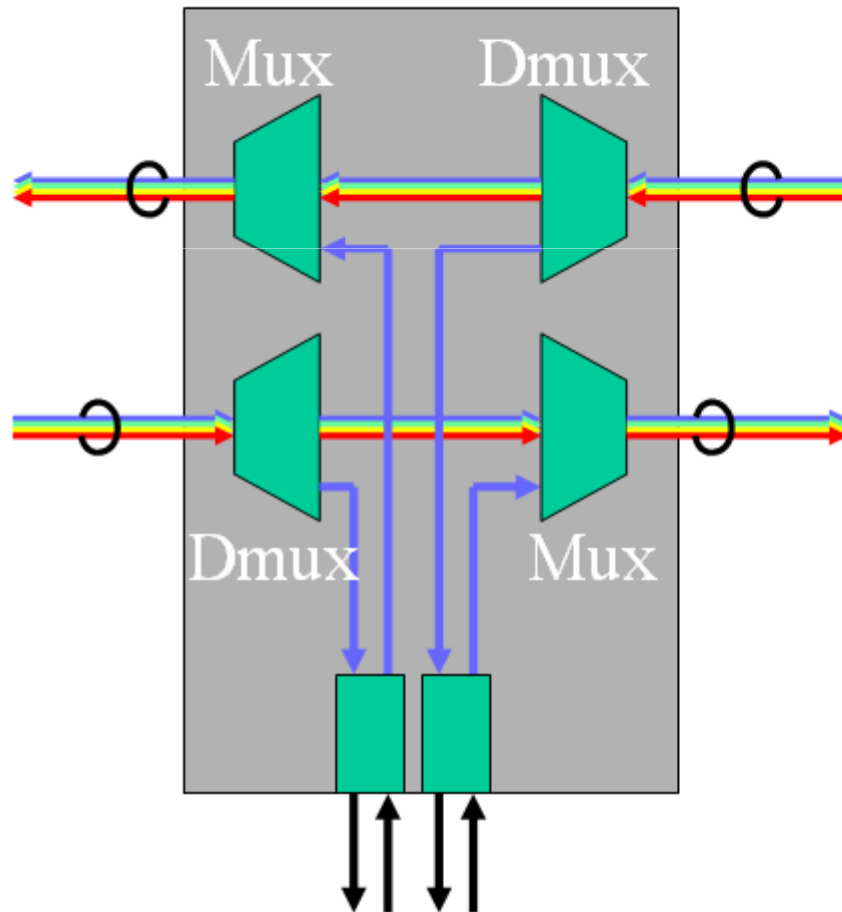
Vstopno-izstopni razvrstilnik



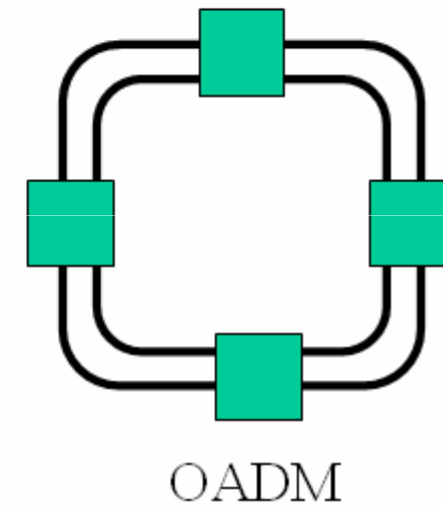
(O)ADM – (Optical) Add Drop Multiplexer

Multipleksor (O)ADM

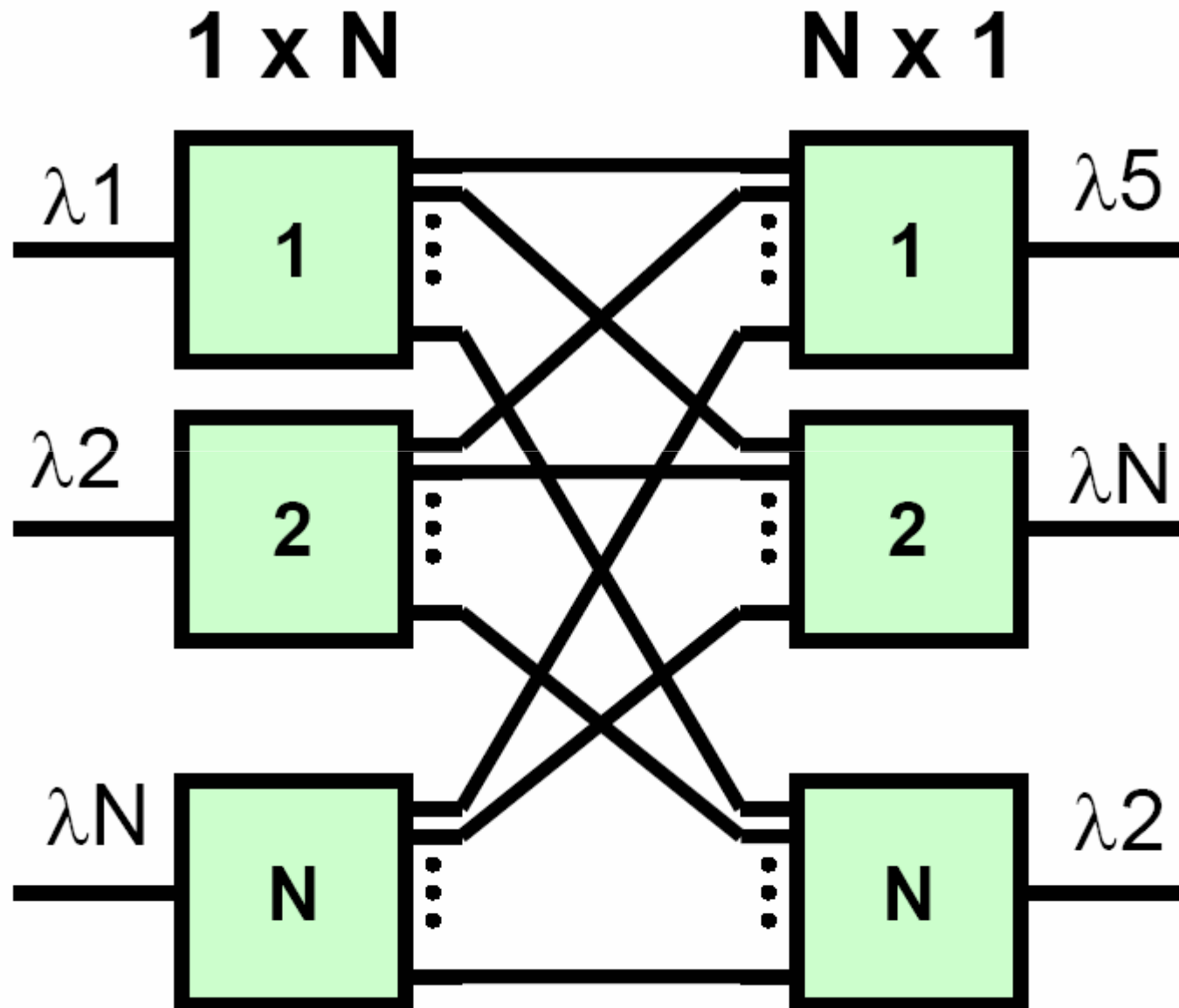
ADM na dvovlakenski zvezi



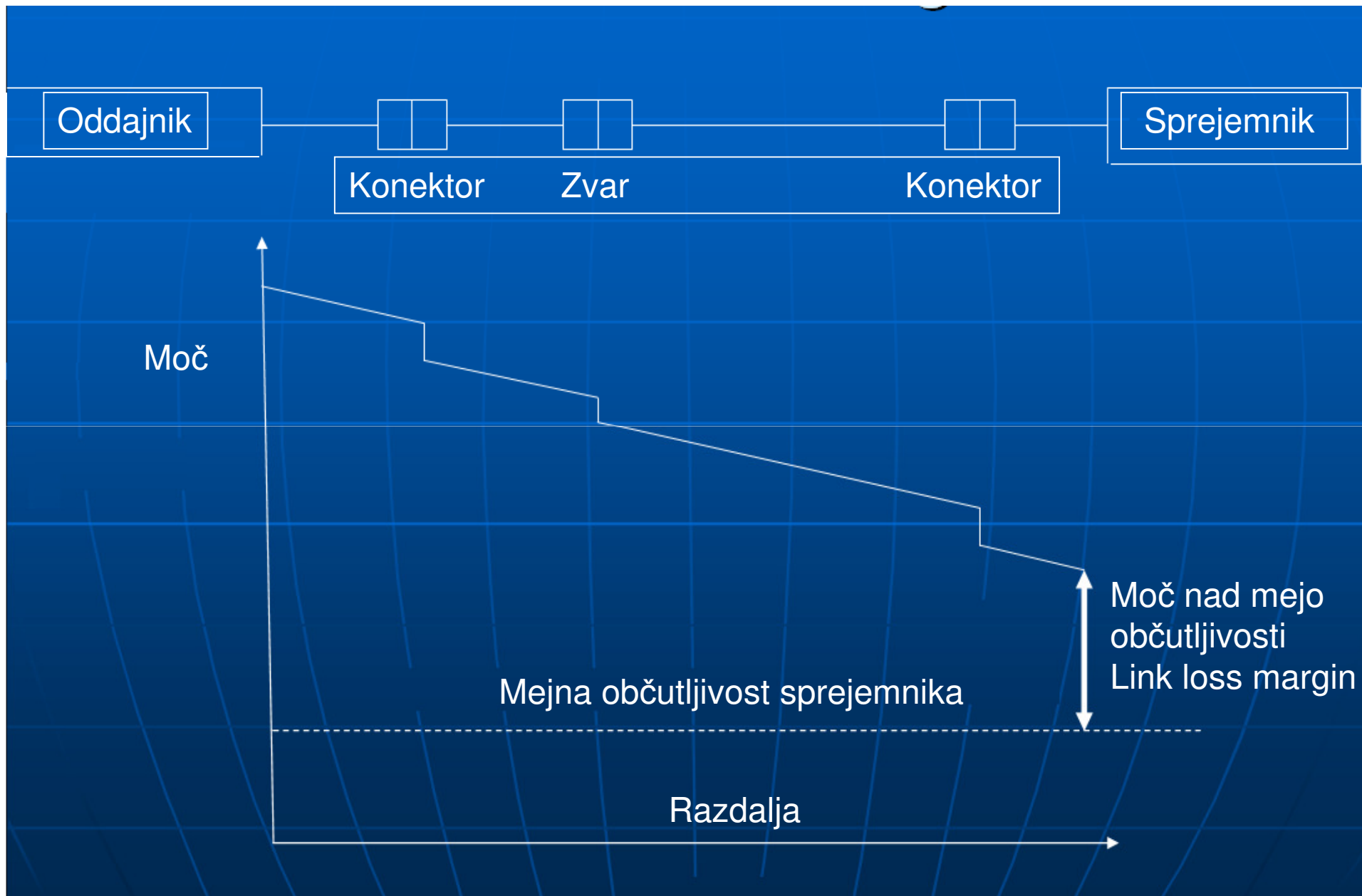
ADM na obroču



Optični barvni prevezovalniki



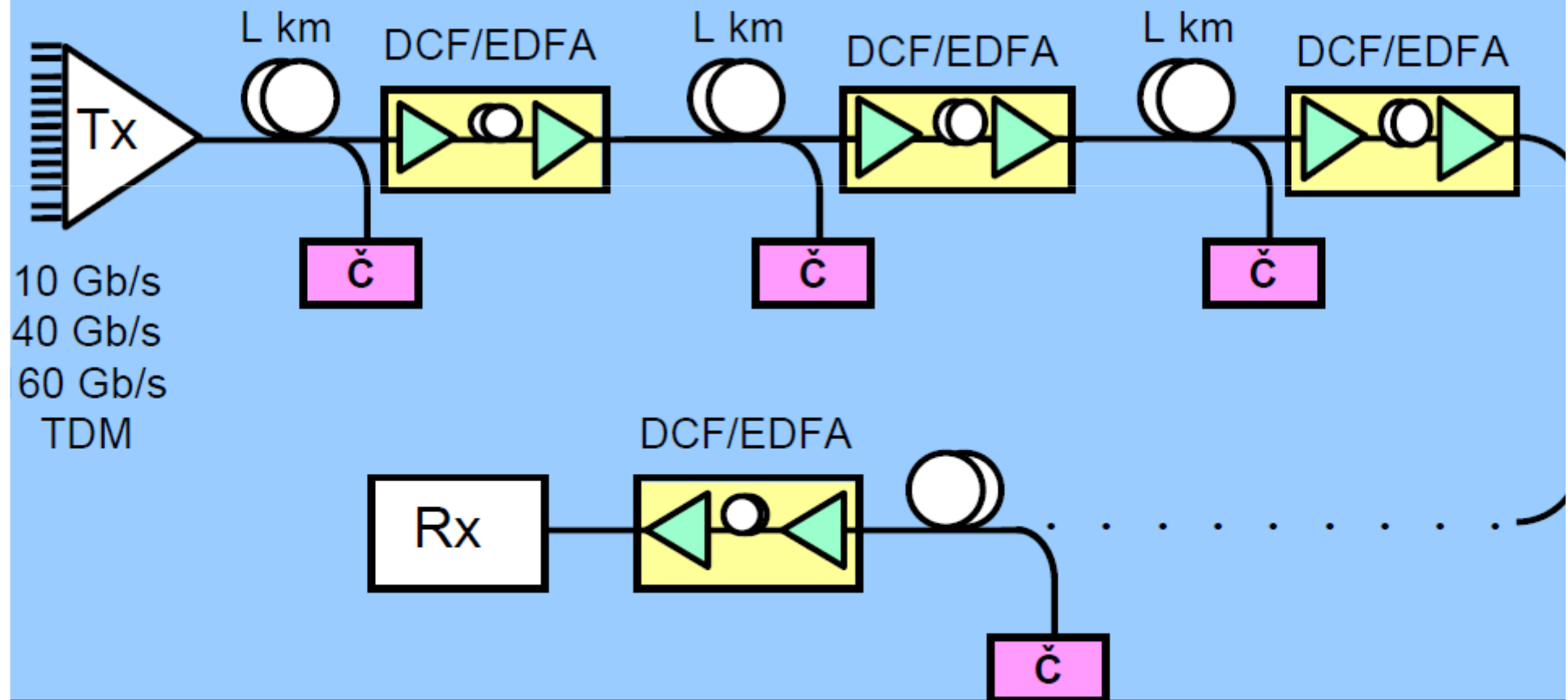
Budžet moči na zvezi



HRBTENIČNA OPTIČNA ZVEZA WDM/TDM

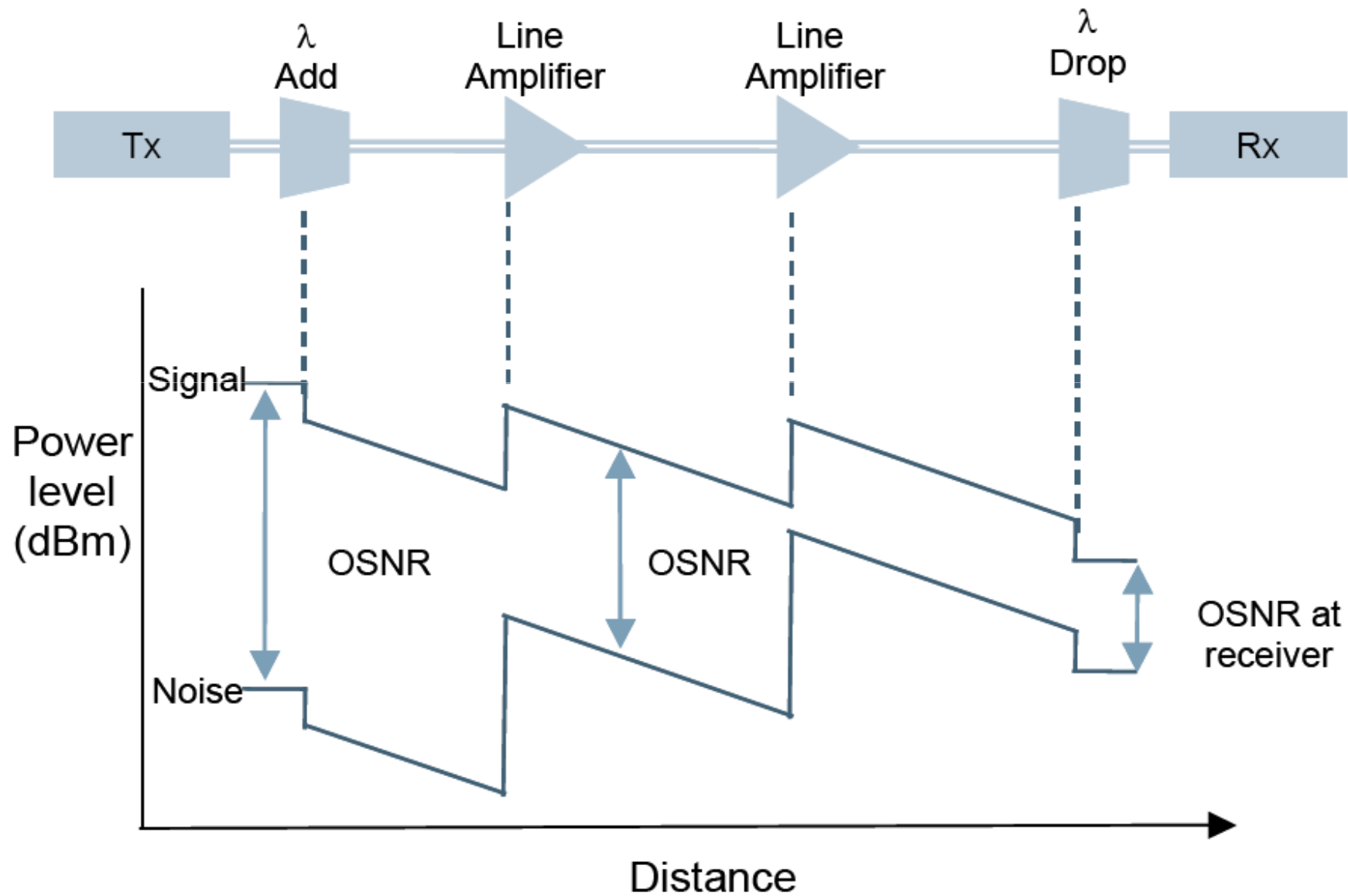
- razdalja med optičnimi ojačevalniki 60 – 100 km
- razdalja med regeneratori (3R) 500 – 1000 km

N kanalov
WDM



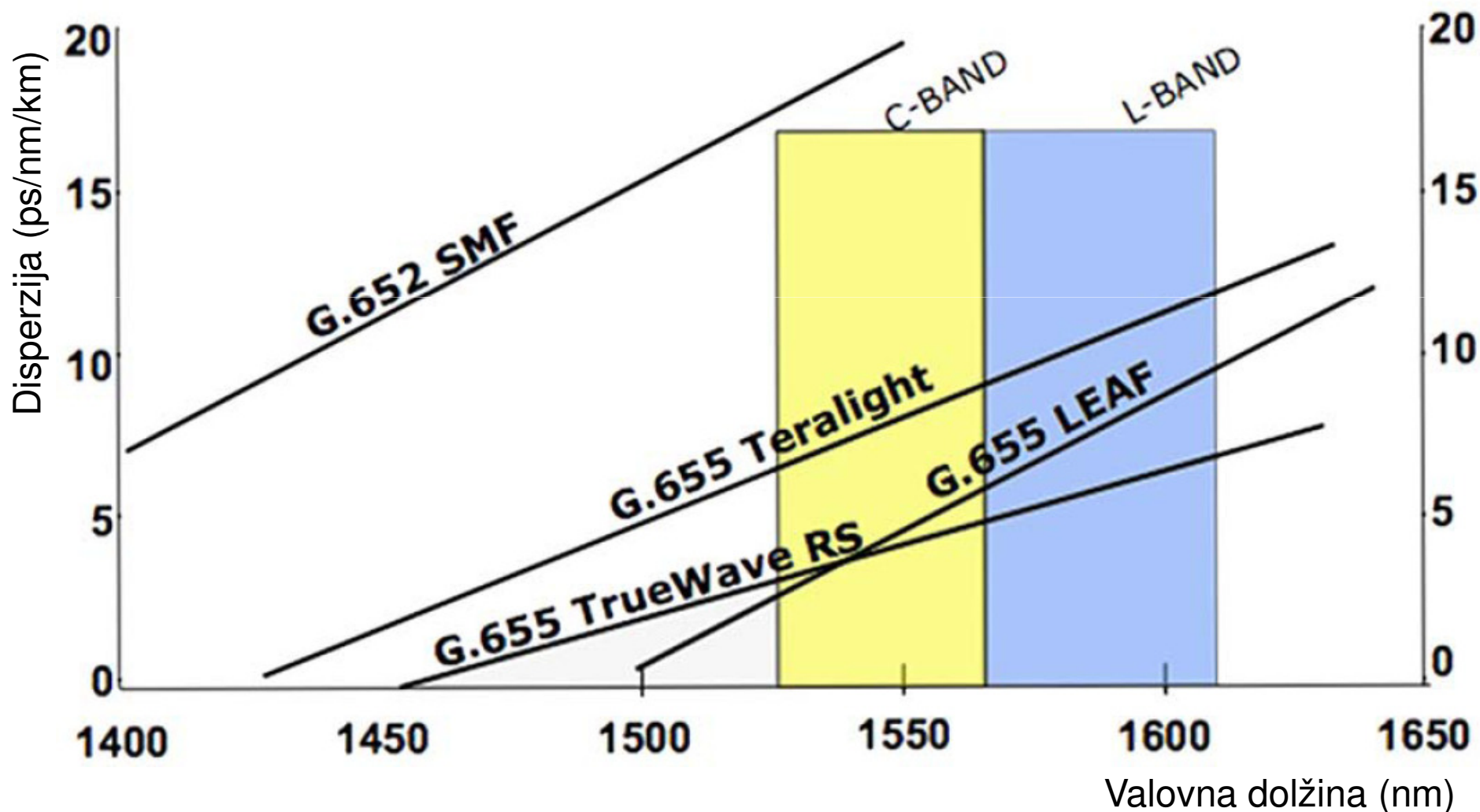
EDFA - vlakenski erbijev ojačevalnik

Zmanjševanje razmerja OSNR



Glavna komercialna vlakna

Slabljenje vlaken v področju 1550 nm je 0,2 do 0,25 dB/km



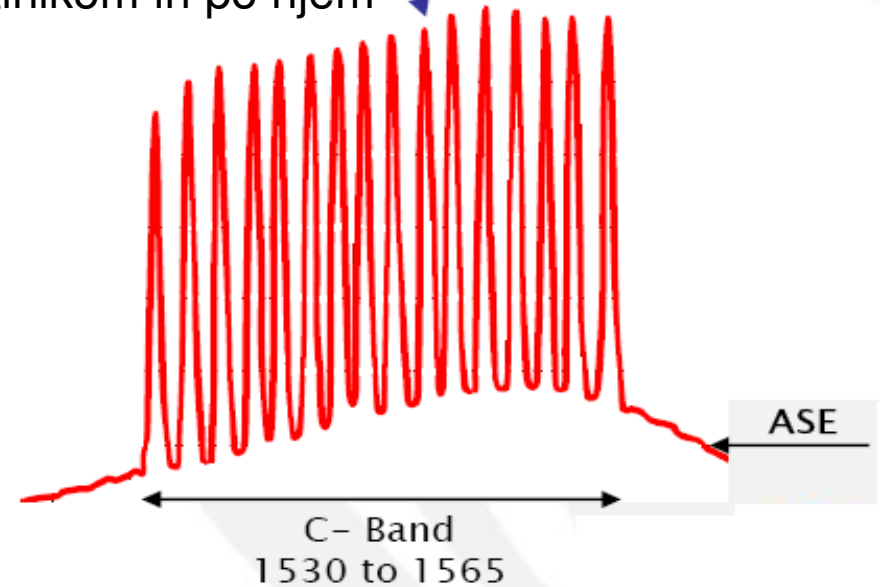
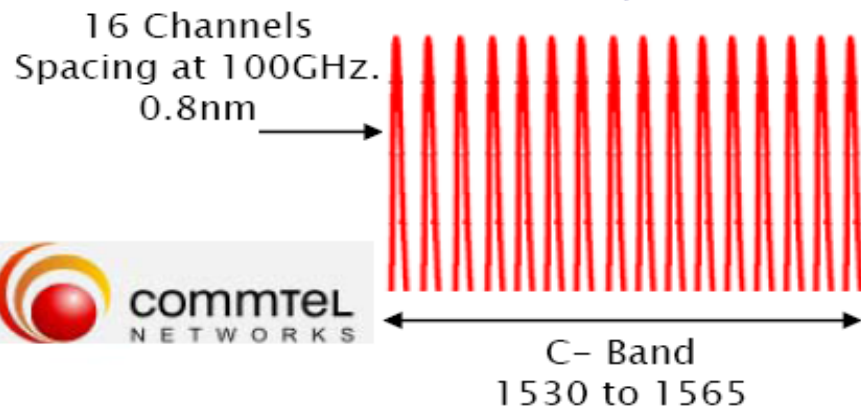
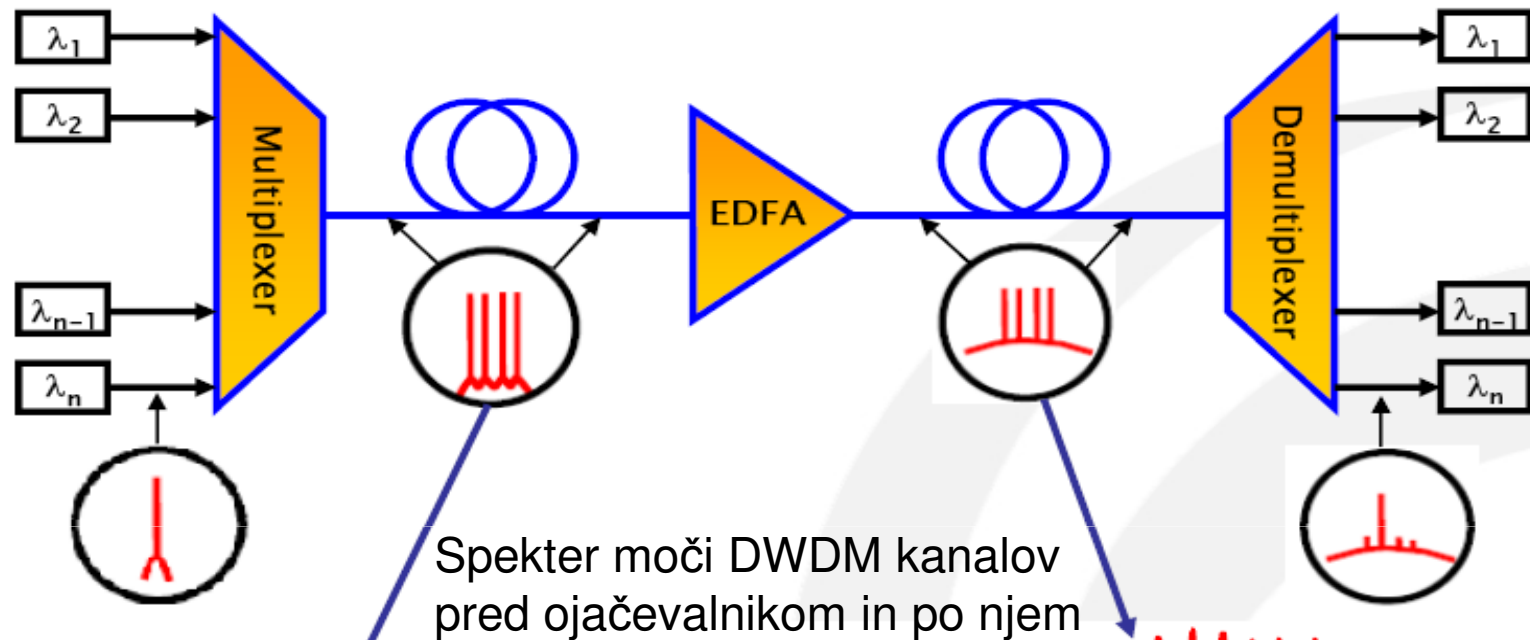
Karakteristike kompenzacijskih vlaknen

	Dispersion D @ 1550nm [ps/nm/km]	Dispersion slope S @1550nm [ps/nm ² /km]	Nonlinear refractive index n_2 [10^{-20} m ² /W]	Effective core area A_{eff} [μm^2]	Fiber attenuation α [dB/km]
Standard SMF	17	0.058	2.8	80	0.25
DCF for SSMF	-90	$0.058 \times \frac{-90}{17}$	4.3	14.3	0
TW	3.5	0.08	3.45	45	0.25
DCF for TW	-90	$0.08 \times \frac{-90}{3.5}$	4.3	14.3	0
TW-RS	4.4	0.045	3.2	55	0.25
DCF for TW-RS	-90	$0.045 \times \frac{-90}{4.4}$	3.0	14.3	0
LEAF	3.7706	0.11	3.0	72	0.25
DCF for LEAF	-90	$0.11 \times \frac{-90}{3.7706}$	4.3	14.3	0

Standardni podatki

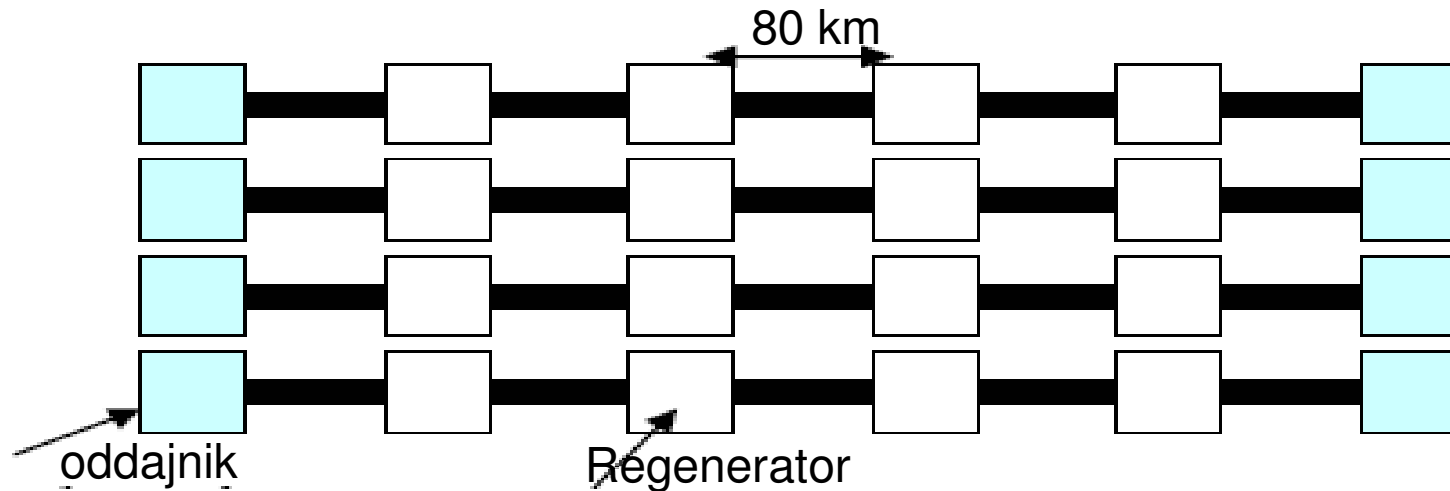
Standard for connector loss	0.5 dB
Typical cable attenuation at 1310nm	0.4 dB
Typical cable attenuation at 1550nm	0.25 dB
Typical splice attenuation	0.1 dB
Typical distance between splices	6 km
Typical safety margin	3 dB
*) CD penalty	1 dB

Šum ASE na DWDM zvezi



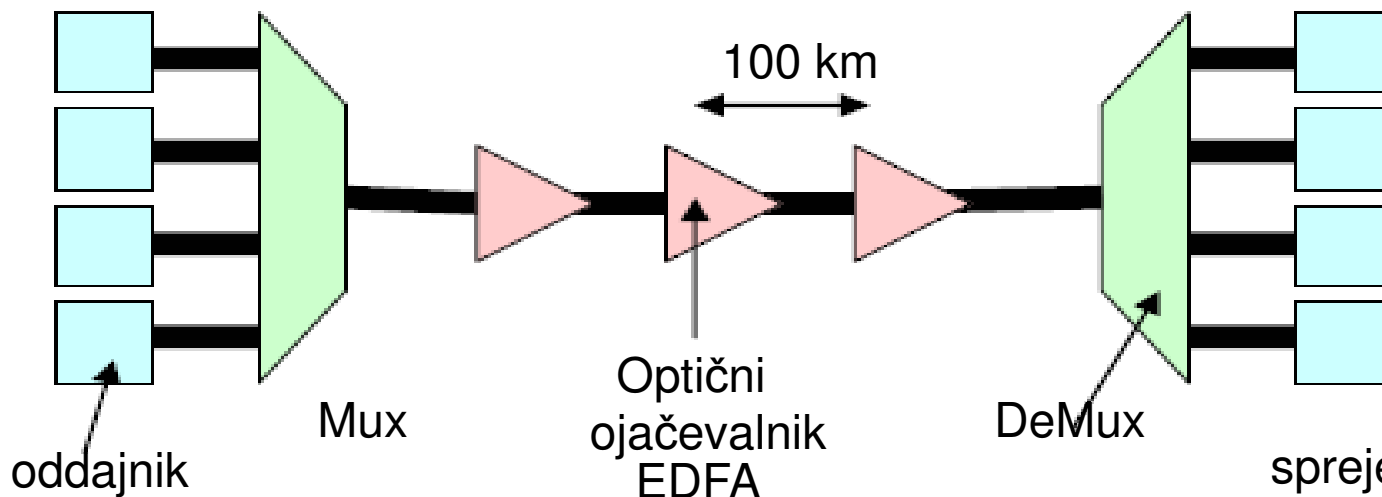
Regeneracija in ojačevanje

Optična zveza z regeneratorji



Uporaba pred uvedbo optičnega ojačevalnika

Optična zveza z ojačevalniki

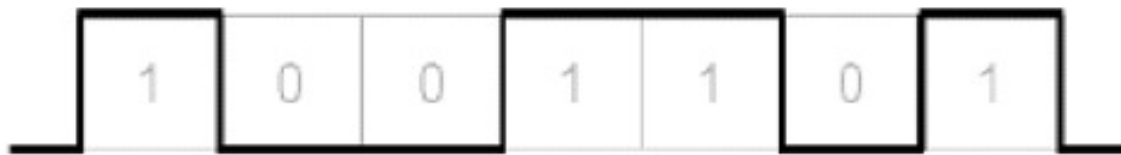


Po določenem številu ojačevalnih odsekov se vstavlja 3R regenererator

Regeneracija 3R

- Reamplifying – ojačitev
- Reshaping – oblikovanje
- Retiming - sinhronizacija

3R = ojačitev + oblikovanje + sinhronizacija



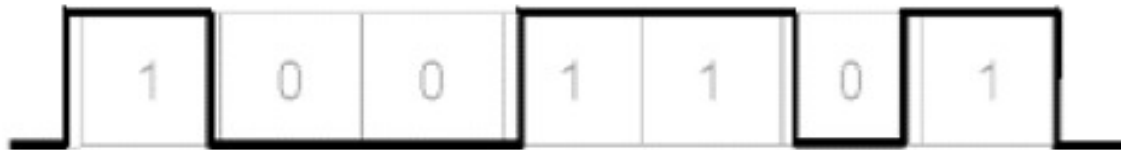
Prenašani signal



Oslabljen signal



Ojačen signal

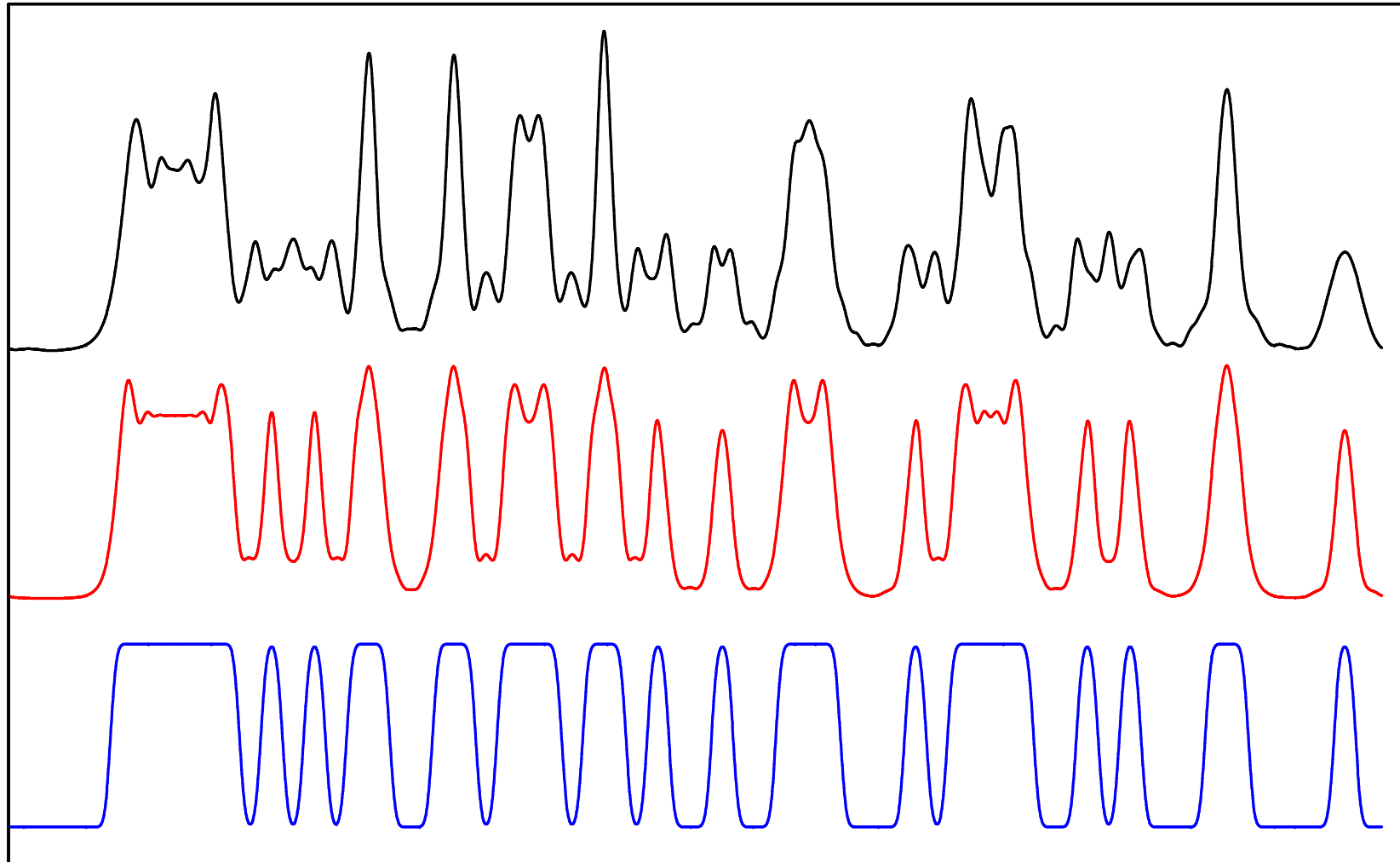


Preoblikovan signal



Sinhroniziran signal

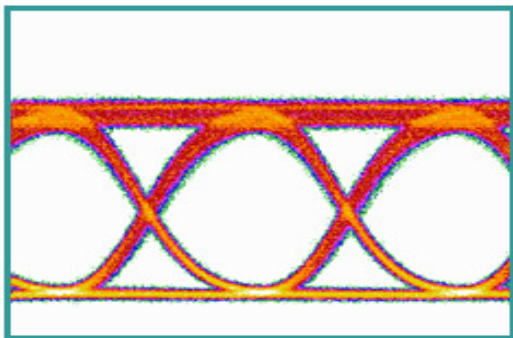
RZ



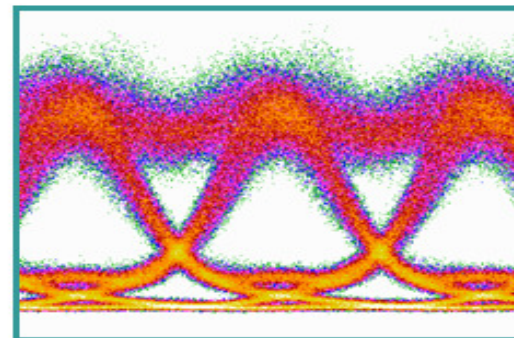
Degradacija prenašanega signala



Signal na začetku zveze



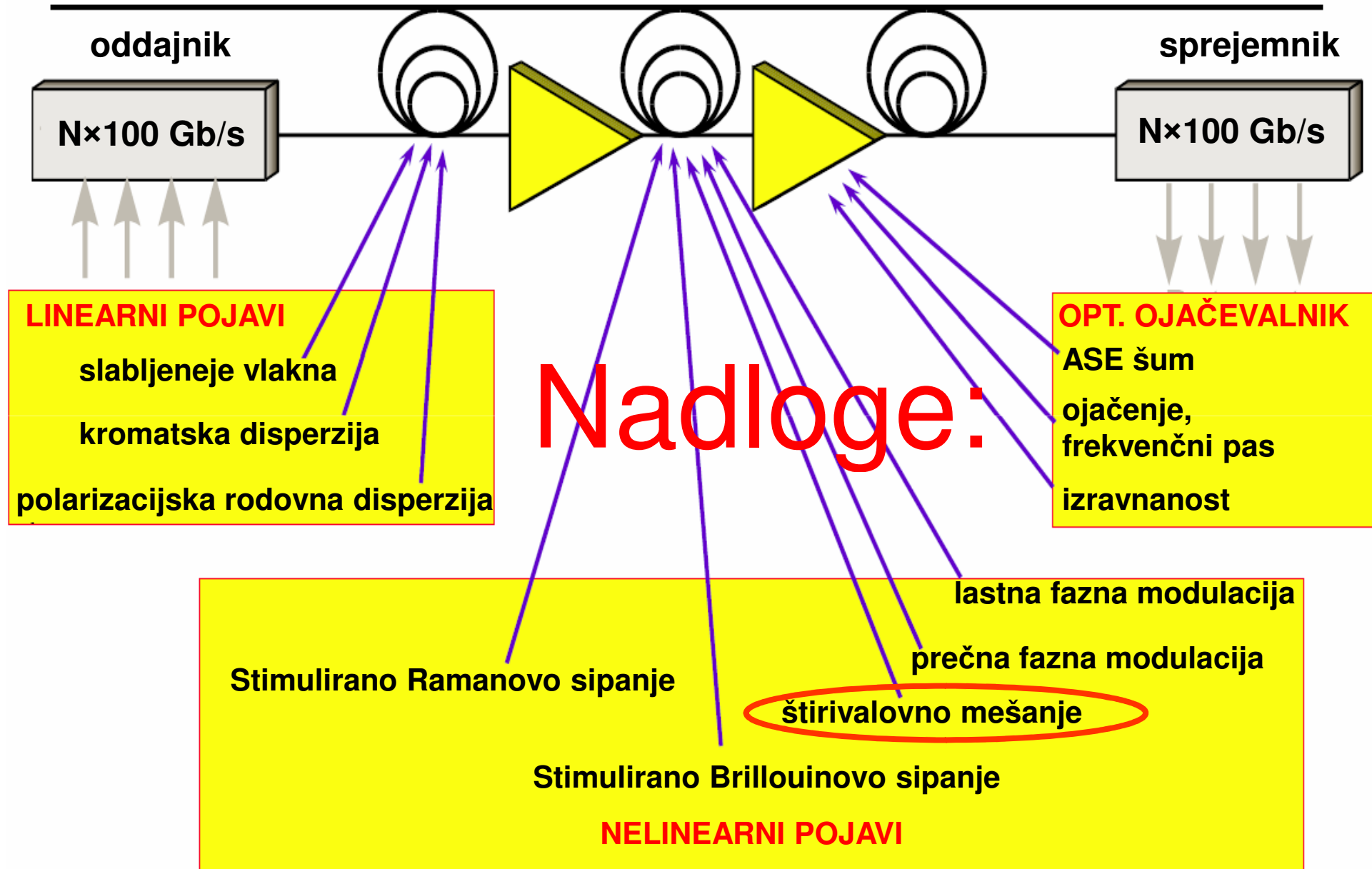
Signal na koncu zveze



Očesni diagram

Signal je analogen ali digitalen, generacija, prenos in detekcija so samo analogni.

Nadloge optične vlakenske zveze



Trije linearni vzroki za okvaro impulza

Attenuation: pulse amplitude reduction limits “how far”



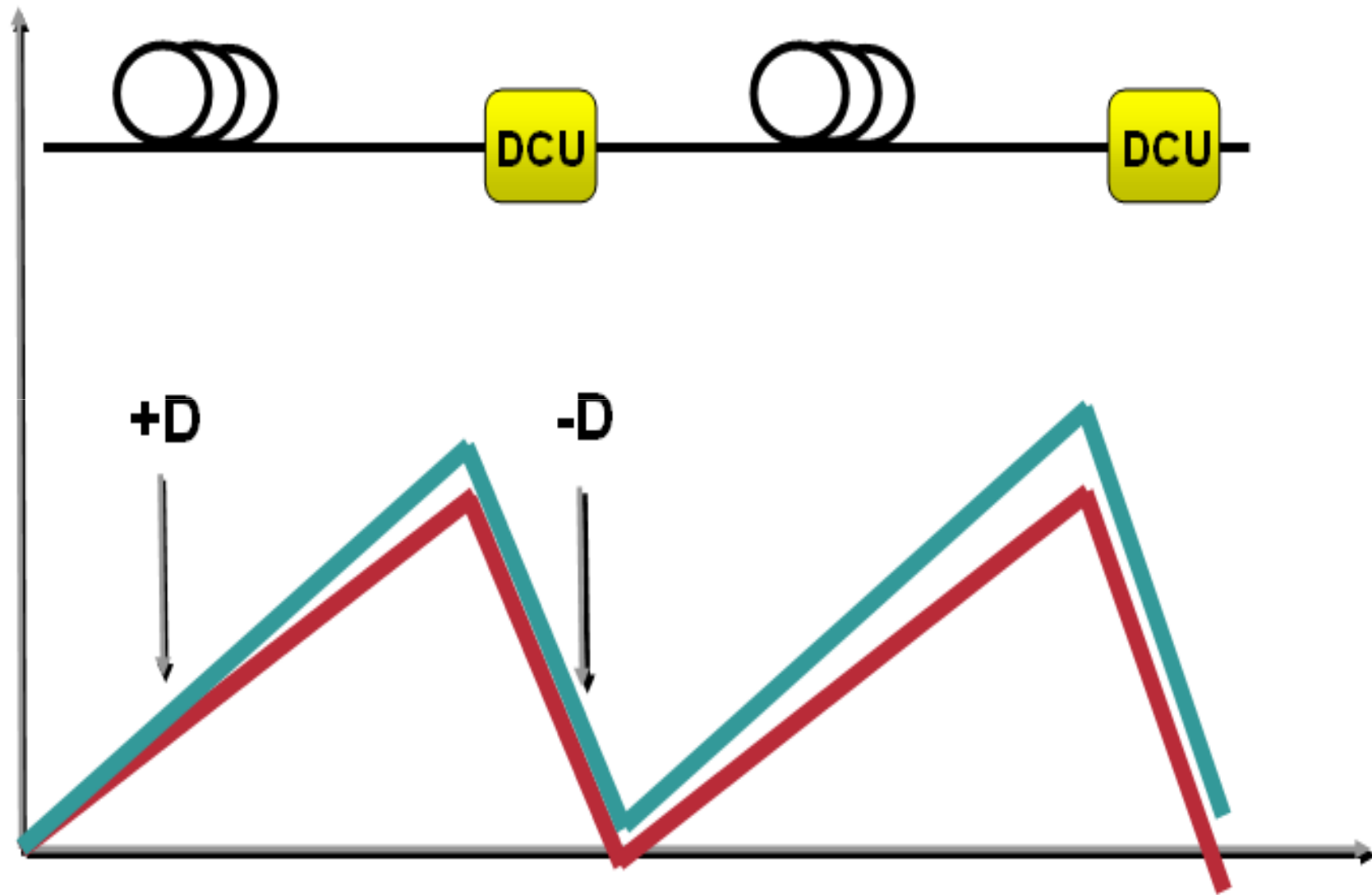
Chromatic Dispersion: spreading of the pulse from different colored light traveling at different speeds within the fiber



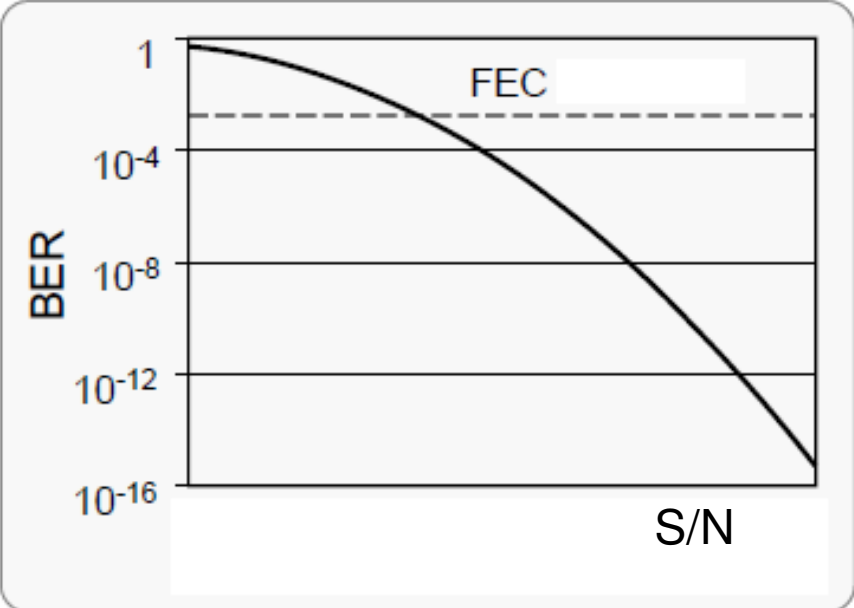
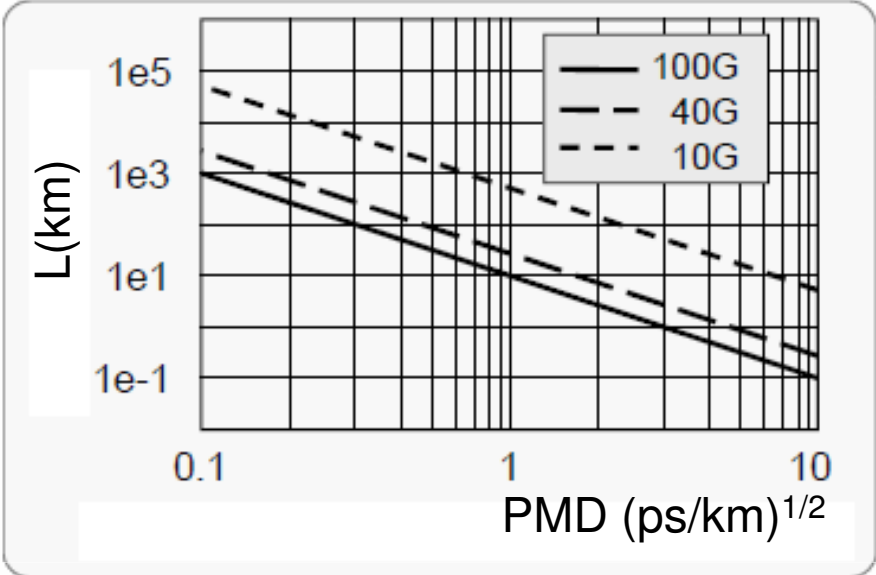
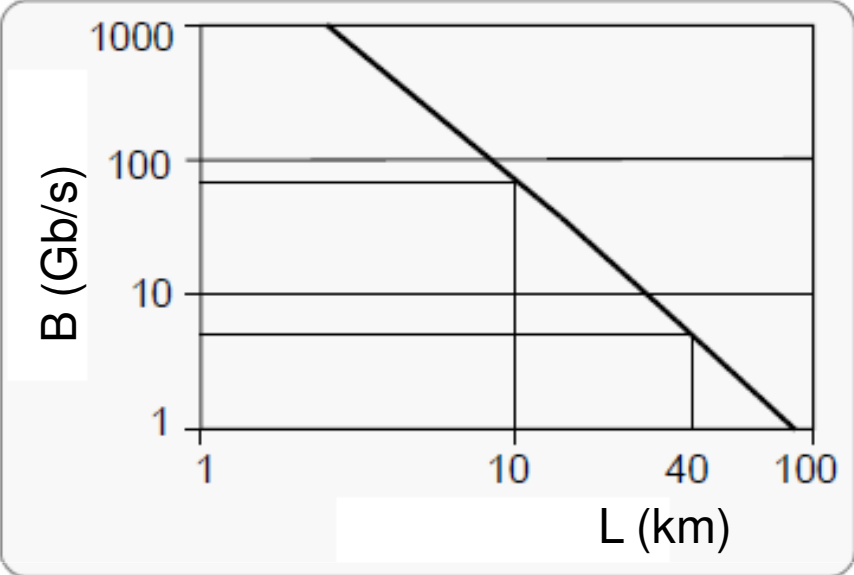
Polarization Mode Dispersion: spreading of the light pulse from fast and slow axes having different group velocities



Optična kompenzacija disperzije

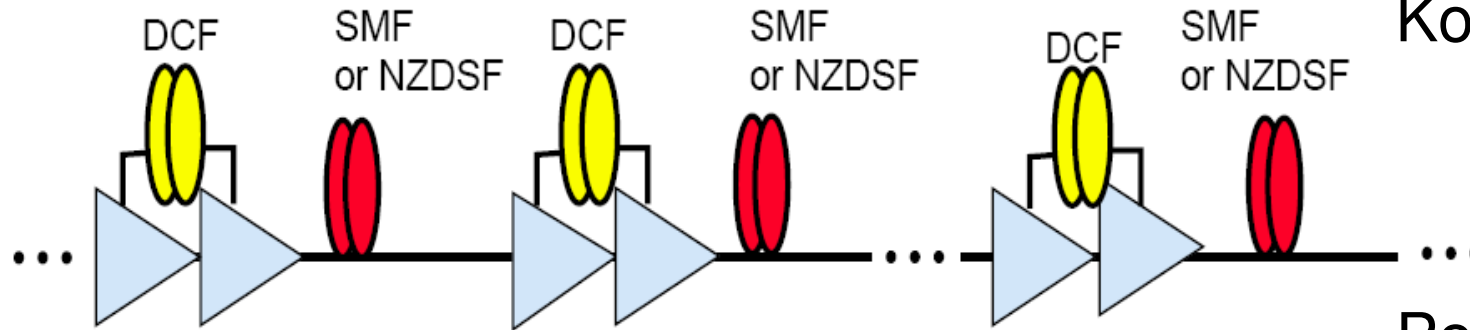


Omejitve z CD in PMD ter vpliv FECa



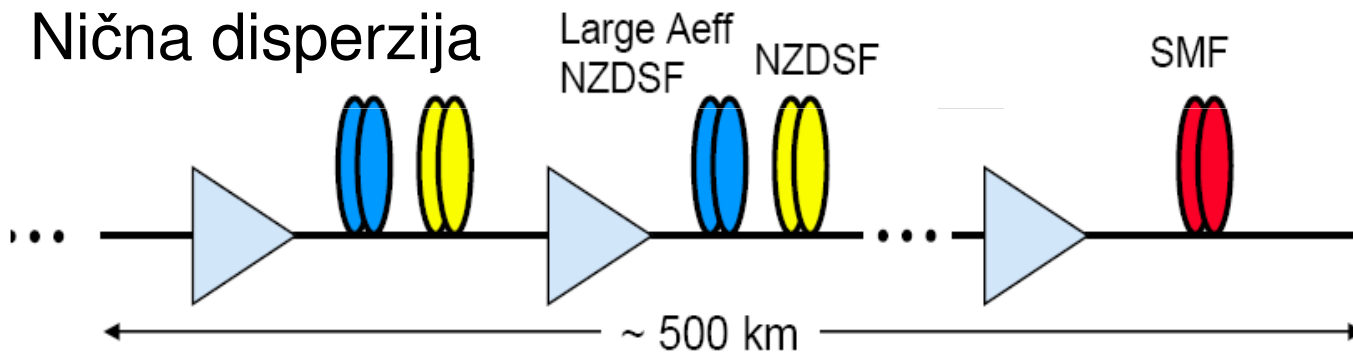
Načini optične kompenzacije disperzije

Kopenske zveze

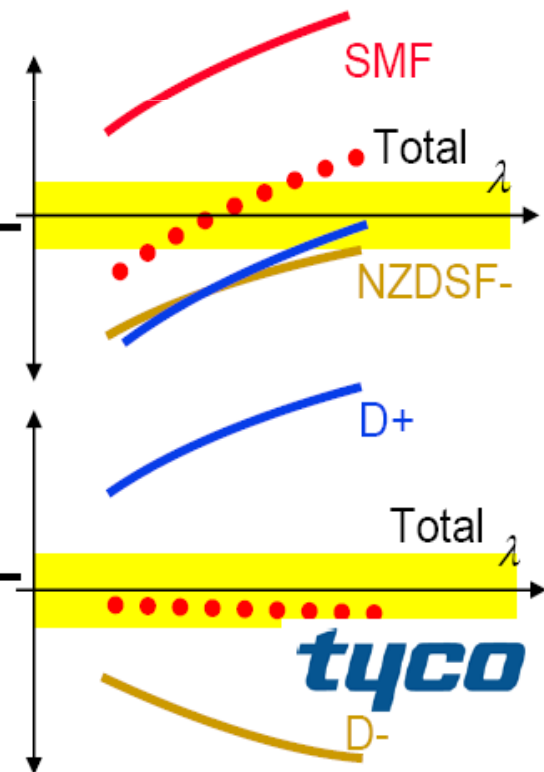
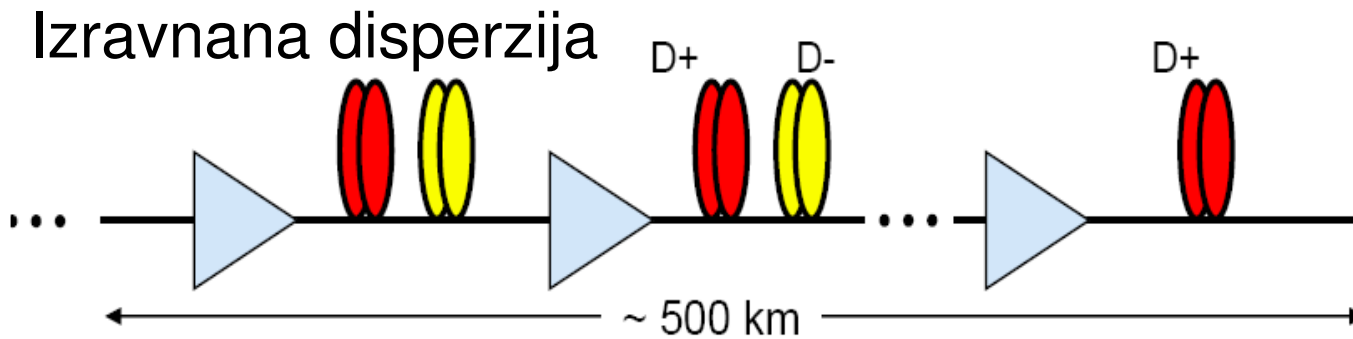


Podmorske zveze

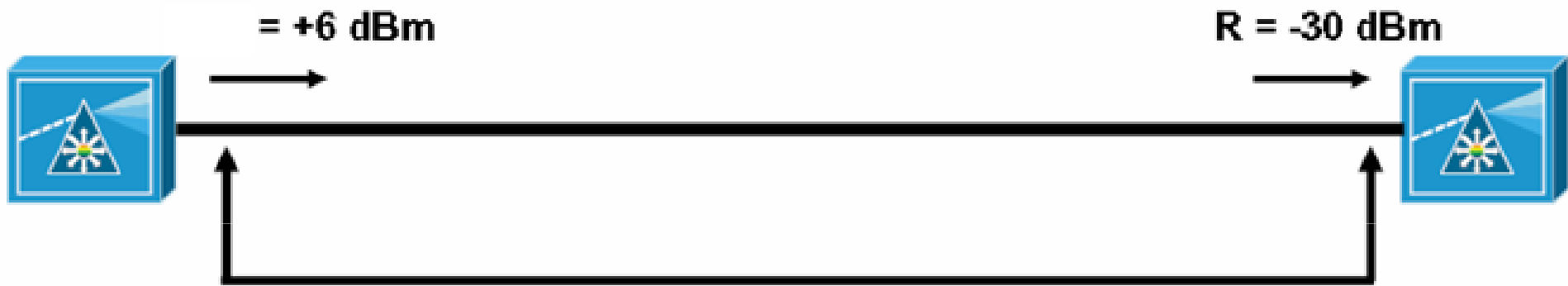
Nična disperzija



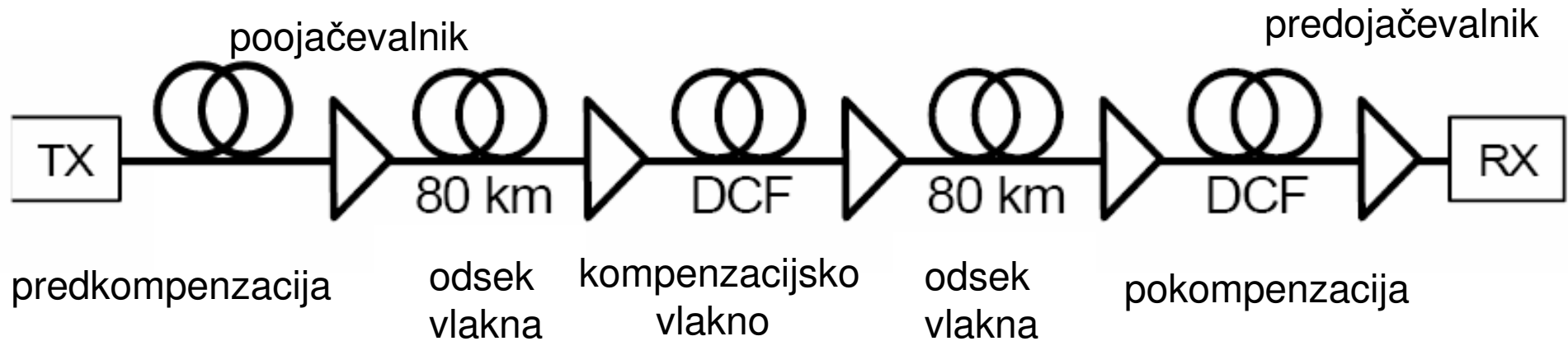
Izravnana disperzija



Budžet moči optične zveze



Ojačevanje in disperzijska kompenzacija



Sestavni deli:

- Oddajnik
- Optični predkompensator disperzije
- Poojačevalnik
- Linijski odseki vlakna
- Linijski ojačevalniki z linijskimi optičnimi kompenzatorji disperzije
- Predojačevalnik (in optični pokompensator disperzije)
- Sprejemnik

Optična zveza OOK - definicije

Pomembni parametri optične zveze:

- $B = 1/T_b$ (b/s) bitna hitrost OTDM kanala, 1 Mb/s - 200 Gb/s, potencialno do 1000 Gb/s
- $N \cdot B$ (b/s) skupna bitna hitrost WDM zveze, 100 Gb/s - 10 Tb/s, potencialno >100 Tb/s
- $L \cdot B$ (b/s · km) zmogljivost zveze, do potencialno > 100 Pb/s km
- η (b/s/Hz) spektralni izkoristek, 0,4 do potencialno >10
- $OSNR_{0,1nm}$ razmerje optičnih moči signala in šuma v spektru 0,1 nm, 10 - 35 dB
- SNR ($ESNR$) razmerje električnih moči signala in šuma 21,6 dB pri $BER = 10^{-9}$
- BER pogostost bitnega pogreška, razpon vrednosti $10^{-9} - 10^{-12} - 10^{-15}$
- Q decizijski faktor sprejema, razpon vrednosti 6 - 7,03 - 7,94 pri gornjih vrednostih BERa
- Q_{dB} $10 \log Q^2 = 20 \cdot \log Q$, 15,6 - 16,94 - 18 dB

Zveza med zahtevanim Q , $ESNR$ in $OSNR$

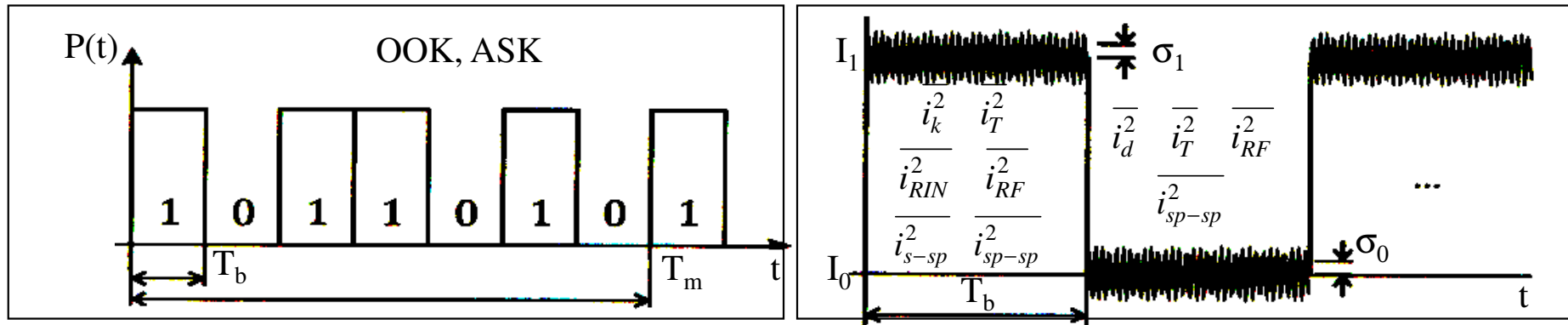
$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{ESNR}$$

$$Q = \frac{2OSNR}{1 + \sqrt{1 + 4OSNR}} \sqrt{\frac{\Delta\nu}{\Delta f}}$$

Δf 3 dB širina električnega spektra

$\Delta\nu$ 3 dB širina optičnega spektra

Optični in električni šumi



1. Šumi v času trajanja impulza (bitna perioda 1)

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}
- intenzitetni šum P_{RIN}

• šumi v električnem delu zveze

- zrnati (kvantni in plazovni) šum $\overline{i_k^2}$
- mešalni šum signala in ASE $\overline{i_{ASE}^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- relativni intenzitetni šum $\overline{i_{RIN}^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

2. Šumi v odsotnosti impulza (bitna perioda 0) pri idealnem ugasnem razmerju

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum (vakuumsko polje) P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}

• šumi v električnem delu zveze

- šum temnega toka $\overline{i_d^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

Tok signala in šumni tokovi, ponovitev

- Neojačevana optična zveza (odsotnost šuma ASE)

Total current

$$I_1 = (\eta e / h\nu)P + i_S + i_T + i_D$$

Responsivity (A/W)
 $P =$ optical power (W)

Dark current
Thermal noise
Shot noise
Signal photocurrent

Shot noise
Beating of signal and noise optical fields

$$\sigma_S^2 = \langle i_S^2 \rangle = 2eI_1\Delta f$$

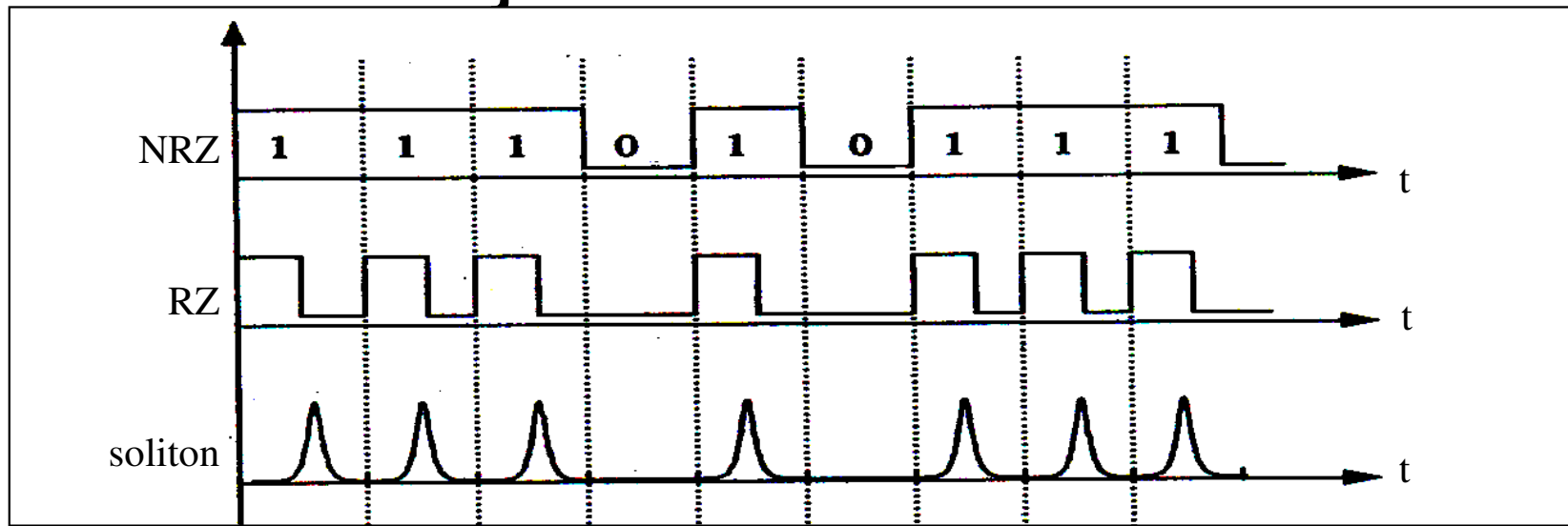
Thermal noise
Thermal motion of electrons passing across a resistor

$$\sigma_T^2 = \frac{4kT}{R_L} F_N \Delta f$$

Noise figure of electrical amplifier

In practice...
 $\sigma_T \gg \sigma_S$

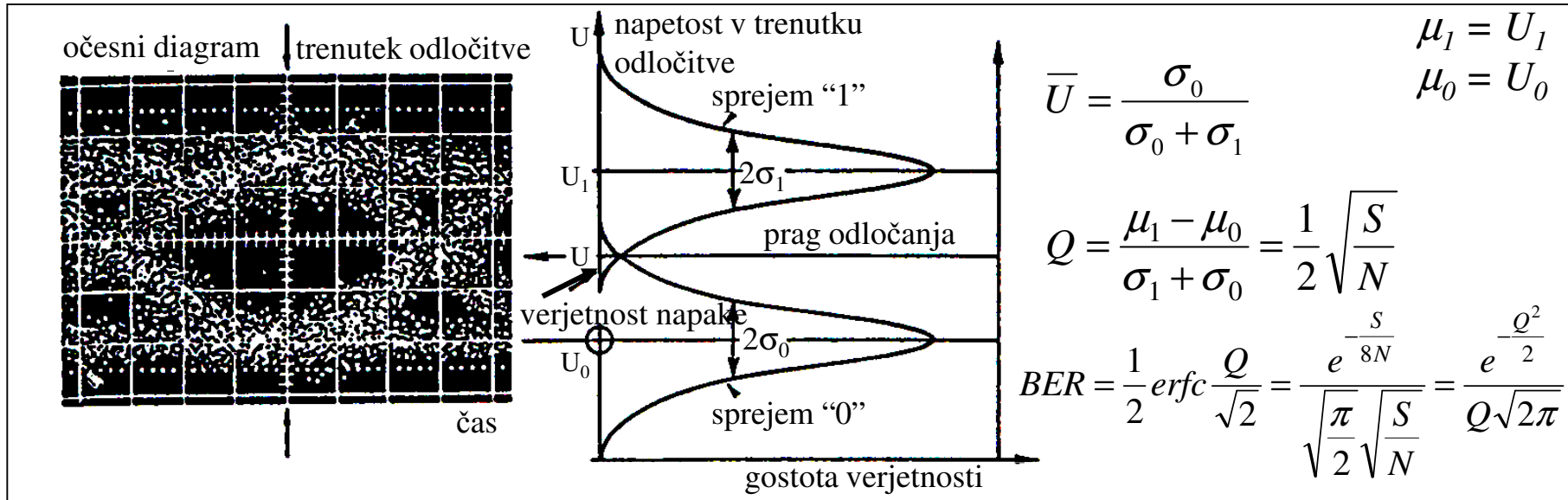
Modulacijski formati NRZ in RZ



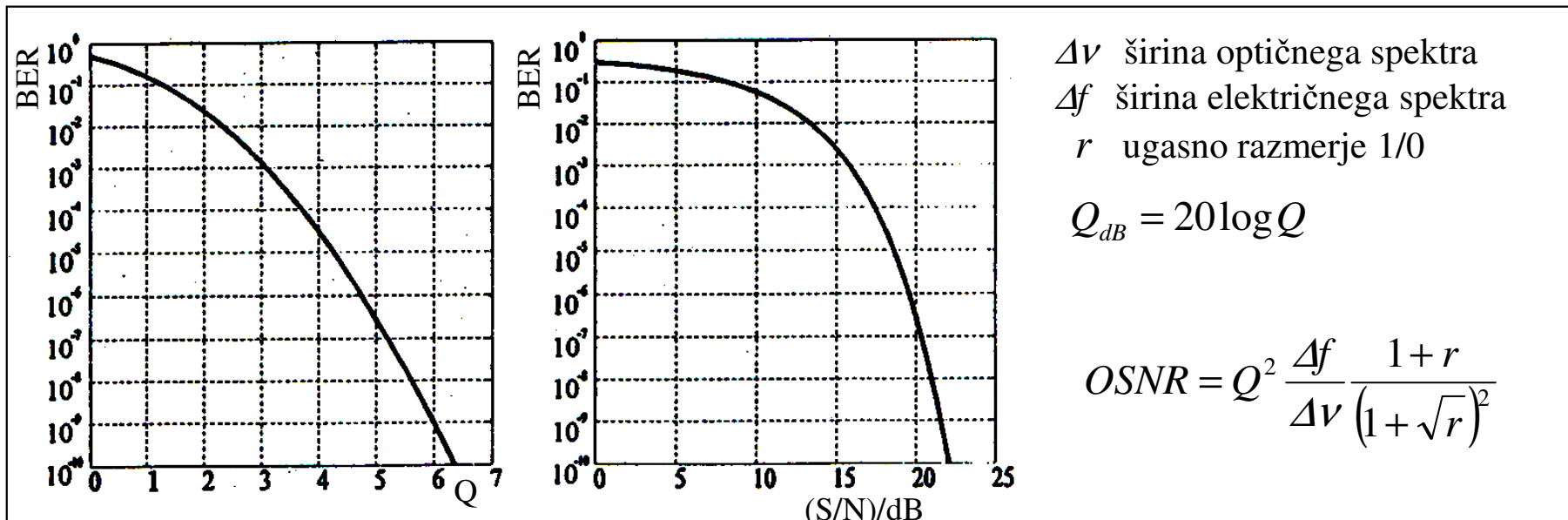
- **Nepovratni (NRZ - Non Return to Zero)** - preprost, najbolj razširjen, najožji spekter (tipično 2B med ničloma), primeren za WDM, občutljiv na šume in nelinearnosti
- **Povratni (RZ - Return to Zero)** - širši spekter (tipično 4B med ničloma), manj občutljiv na šume, PMD in nelinearnosti, bolj občutljiv na disperzijo in časovno drhtenje
- **Solitoni so posebna oblika RZ** - ovojnica $\text{sech}(t)$ (Schrodinger) ali Gauss (disperzijsko uravnani)
- **RZ s potlačenim nosilnikom (CS - RZ - Carrier Suppressed RZ)** - manj občutljiv na nelinearnost kot RZ, zmerna širina spektra
- **RZ z notranjim žvižgom (CRZ - Chirped RZ)** najmanj občutljiv na nelinearnosti, širši spekter, uporaba v podmorskih zvezah.
- **Drugi** (VSB, bipolarni, duobinarni in drugi)

Optična zveza OOK

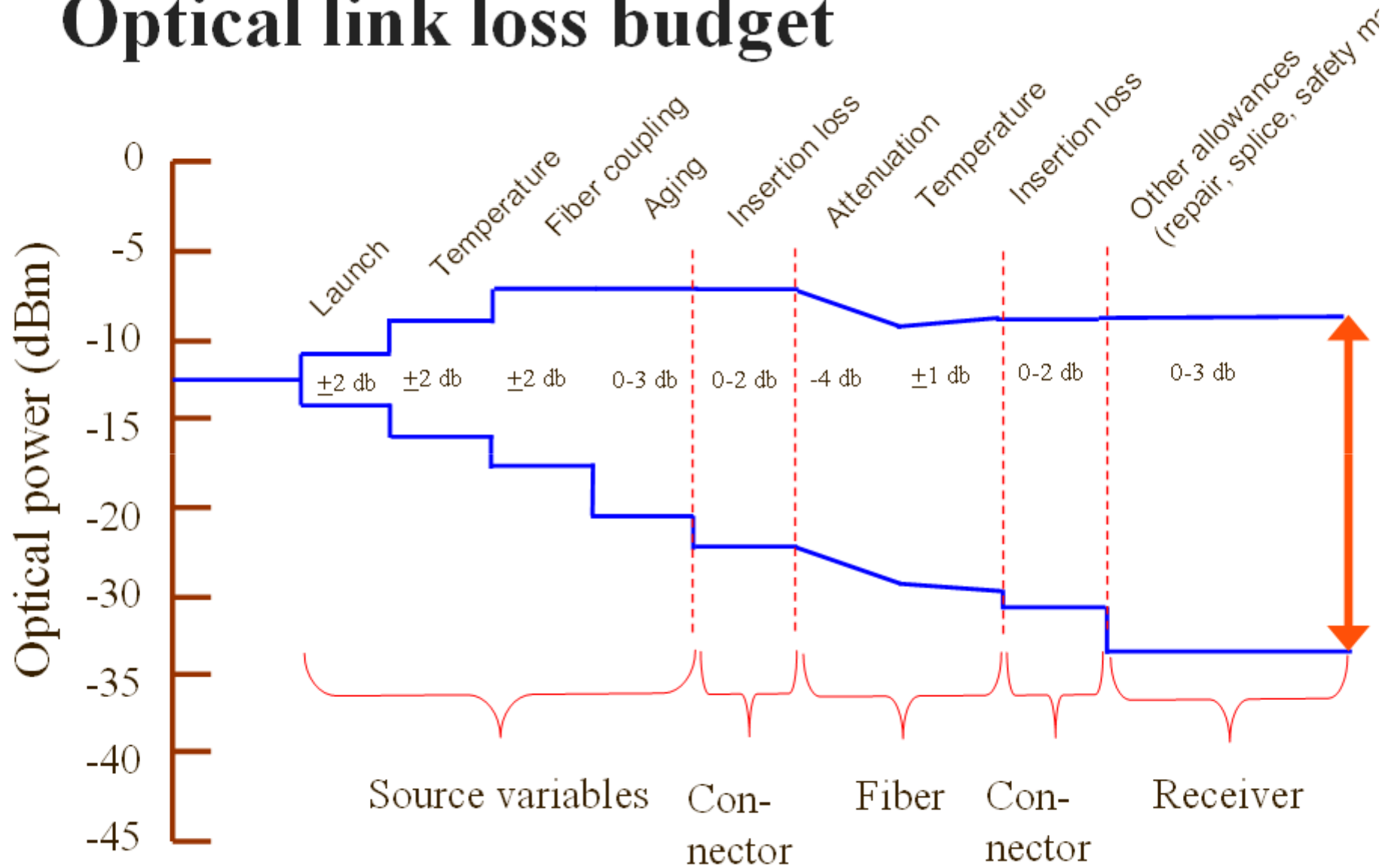
• Očesni diagram in vzorčena izhodna napetost:



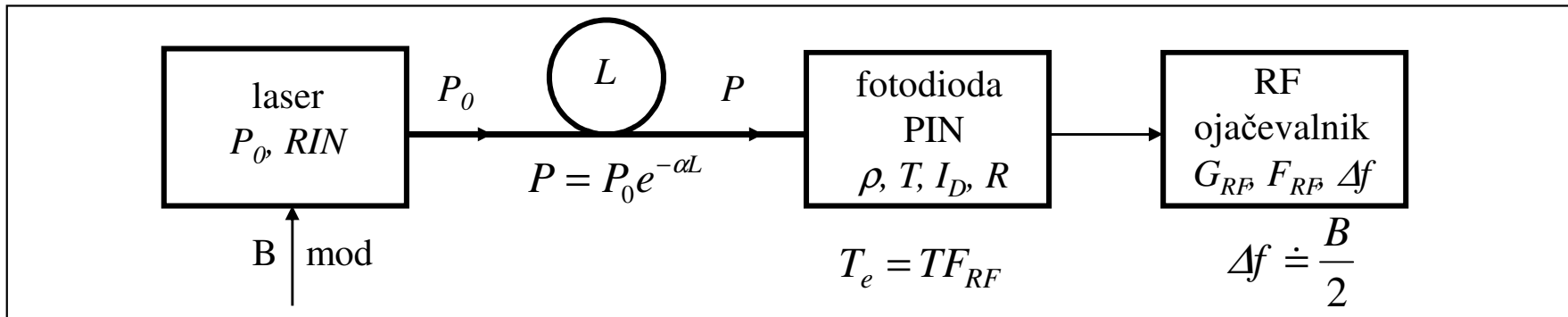
• Bitni pogrešek:



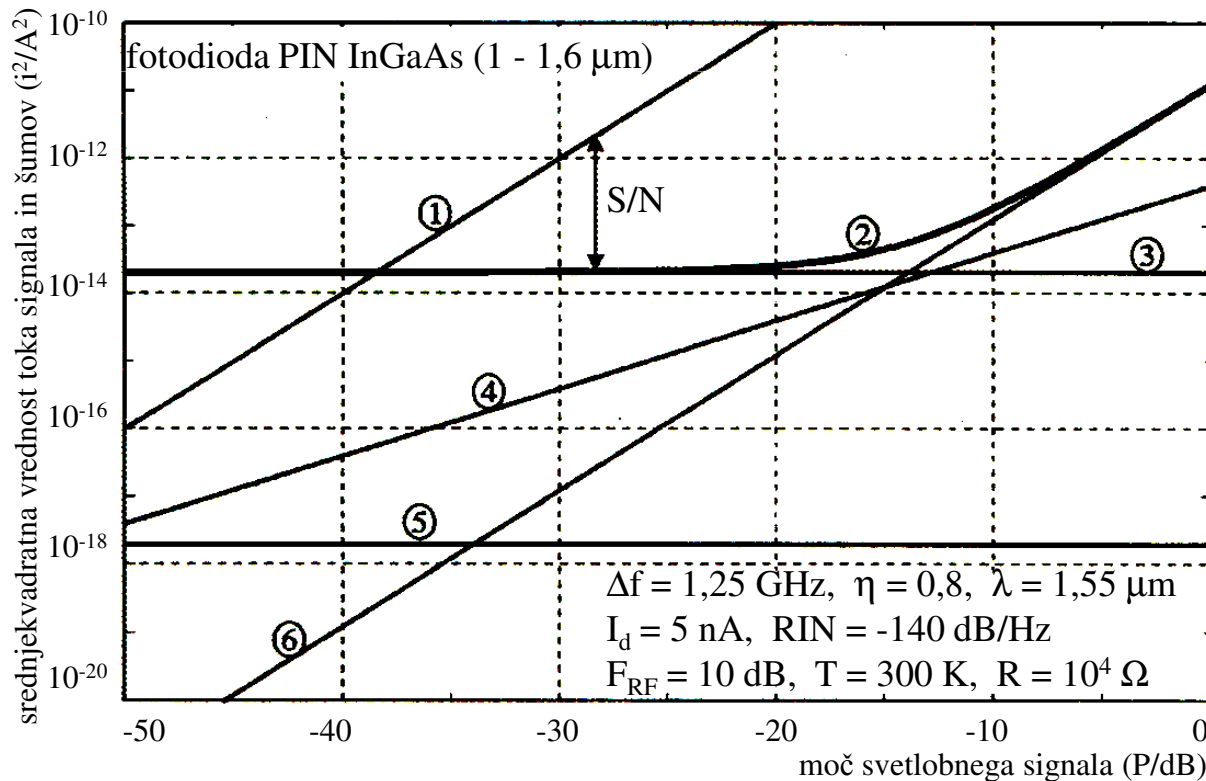
Optical link loss budget



Neojačevana optična zveza – dioda PIN



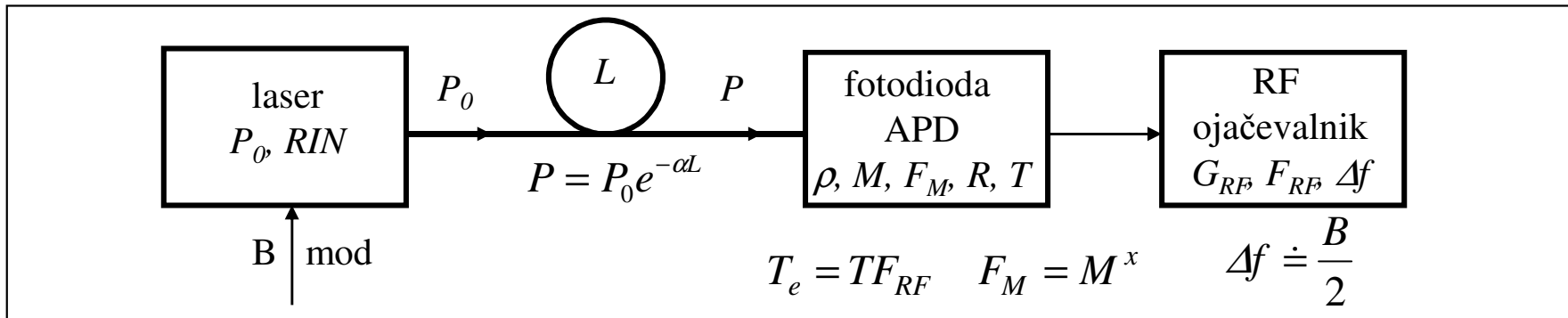
$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(\rho P)^2 R}{(2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF})\Delta f} \doteq \frac{(\rho P)^2 R}{4kTF_{RF}\Delta f} \quad \text{termična meja}$$



srednjekvadratni tok signala in šumov:

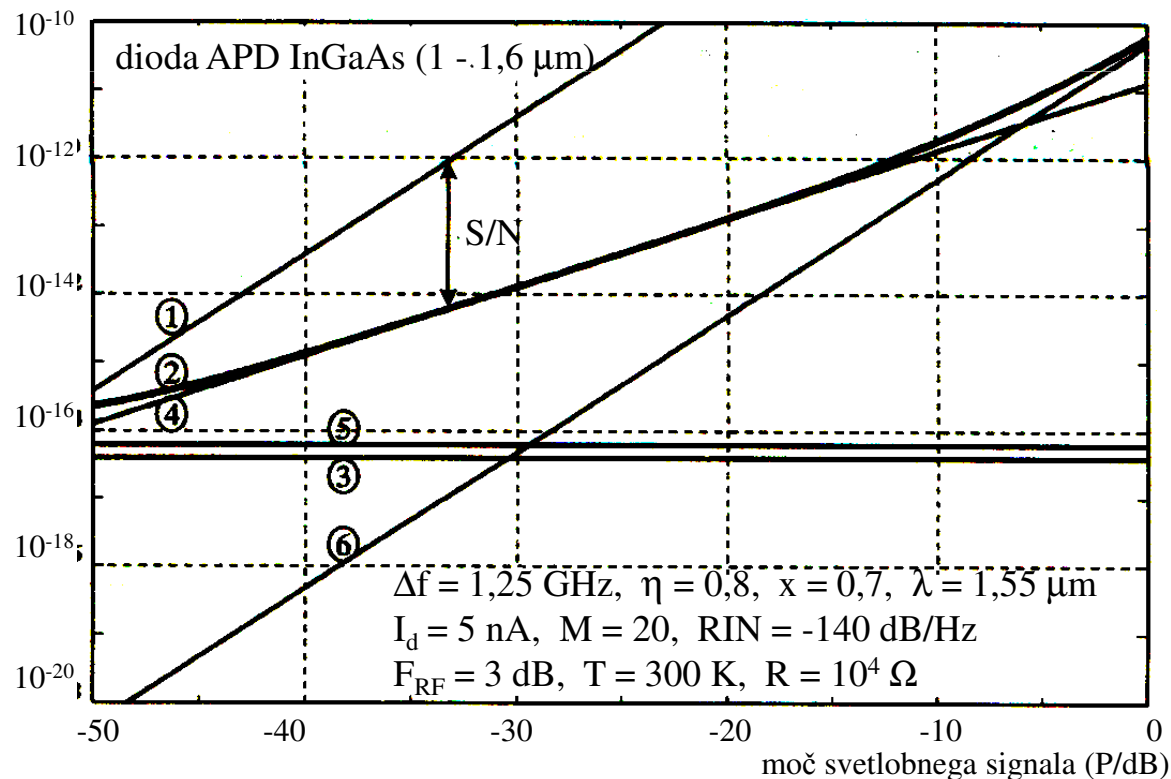
- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni šum signala
- 5 kvantni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Neojačevana optična zveza – dioda APD



$$(SNR)_{el} = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(M\rho P)^2 R}{\left(M^2 F_M 2e(\rho P + I_D)R + (\rho P)^2 RIN \cdot R + 4kTF_{RF} \right) \Delta f} \doteq \frac{\rho P}{F_M 2e \Delta f} \text{ kvantna meja}$$

srednjekvadratna vrednost toka signala in šumov (i^2/A^2)

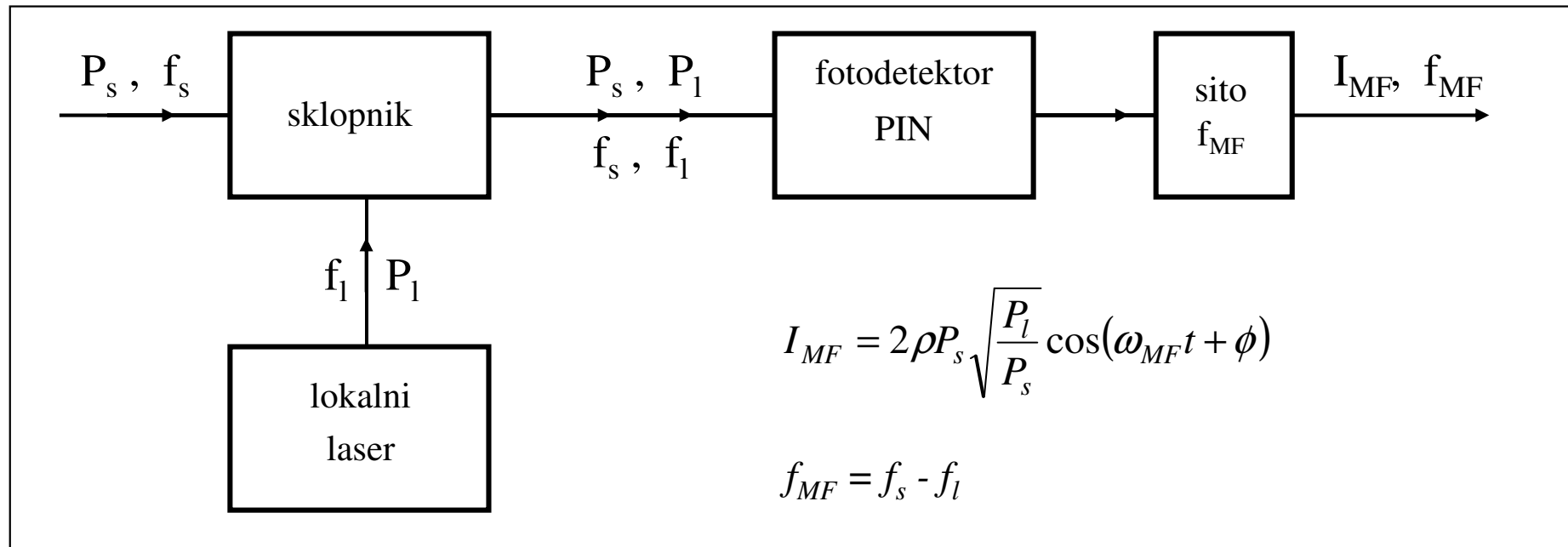


srednjekvadratni tok signala in šumov:

- 1 signal
- 2 skupni šum
- 3 termični šum
- 4 kvantni (in plazovni) šum signala
- 5 kvantni in plazovni šum temnega toka
- 6 relativni intenzitetni šum

Ojačenje pri koherentnem sprejemu

Mešanje dveh optičnih signalov na fotodetektorju

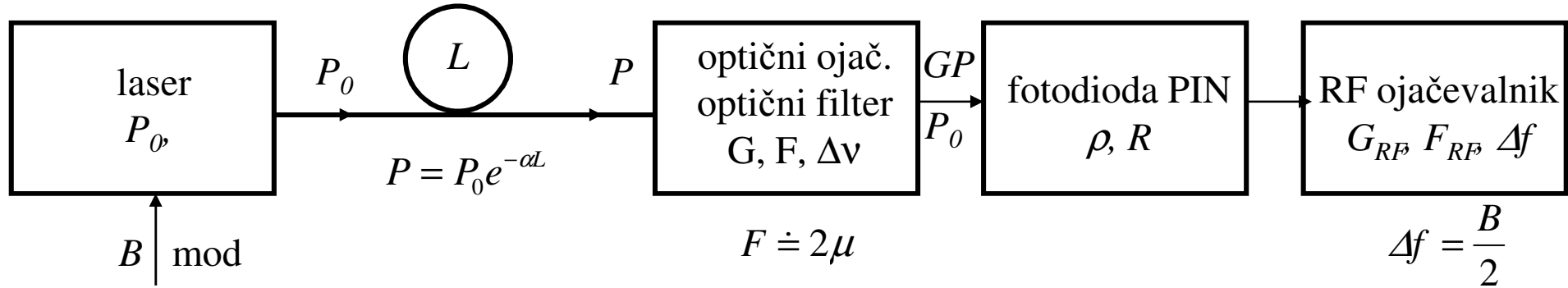


- **občutljivost**, ojačenje za faktor $2\rho\sqrt{P_l/P_s}$
- **selektivnost**, $f_{MF} = f_s - f_l$, frekvenca v radijskem področju

Pogoj delovanja: visoka koherenca in stabilnost frekvence lokalnega oscilatorja. Optična fazno uklenjena zanka ni uresničljiva. Šele napredek v hitrem digitalnem procesiranju je prinesel nove možnosti koherentnega sprejema v sedanjem času.

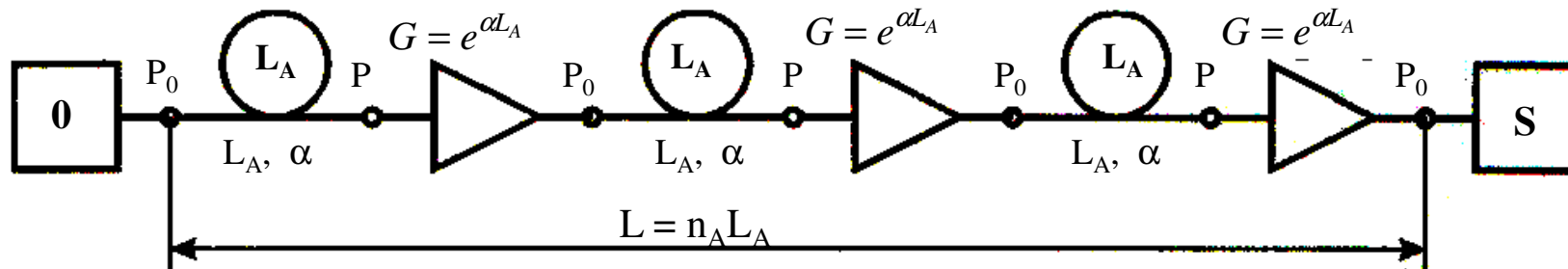
Ojačevana optična zveza

• Ojačevana optična zveza:



$$ESNR = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(\rho GP)^2}{(4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu + 4\rho^2 (G-1)^2 (\mu h\nu)^2 \Delta\nu) \Delta f} \doteq \frac{P}{F 2h\nu \Delta f}$$

• Veriga iz n_A ojačevanih vlakenskih odsekov ojačenja $G = e^{\alpha L}$:



$$ESNR = \left(\frac{S}{N} \right)_{el} = \frac{(\rho P_0)^2}{n_A (4\rho^2 P_0 (G-1)\mu h\nu + 4\rho^2 (G-1)^2 (\mu h\nu)^2 \Delta\nu) \Delta f} \doteq \frac{P_0}{n_A G F 2h\nu \Delta f}$$

Razmerje ESNR naraste, če dolg ojačevan odsek nadomestimo z verigo krajših ojačevanih odsekov

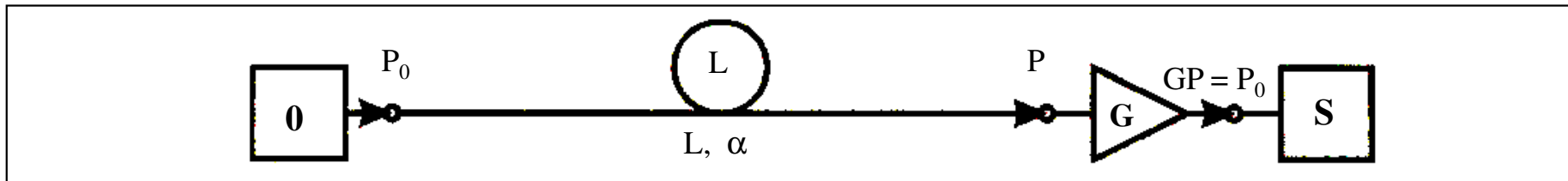
Veriga ojačevanih odsekov

- **Neojačevan vlakenski odsek dolžine L :**

optično razmerje signal / šum v decibelih: $OSNR_{dB} = (S/N)_{opt,dB} = 58 + P_{0dBm} - \alpha_{dB} - F_{dB,spr}$

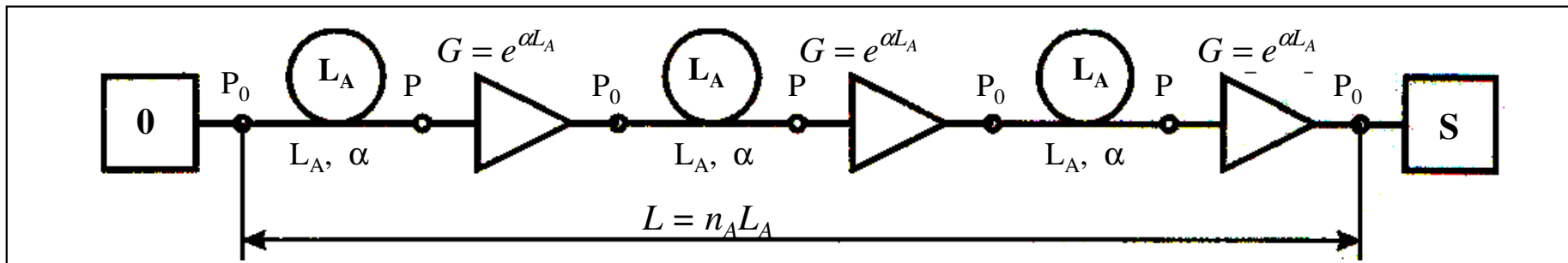
- **Ojačevan vlakenski odsek dolžine L :**

optično razmerje signal / šum v decibelih: $OSNR_{dB} = (S/N)_{opt,dB} = 58 + P_{0dBm} + G_{dB} - \alpha L_{dB} - F_{dB,EDFA}$

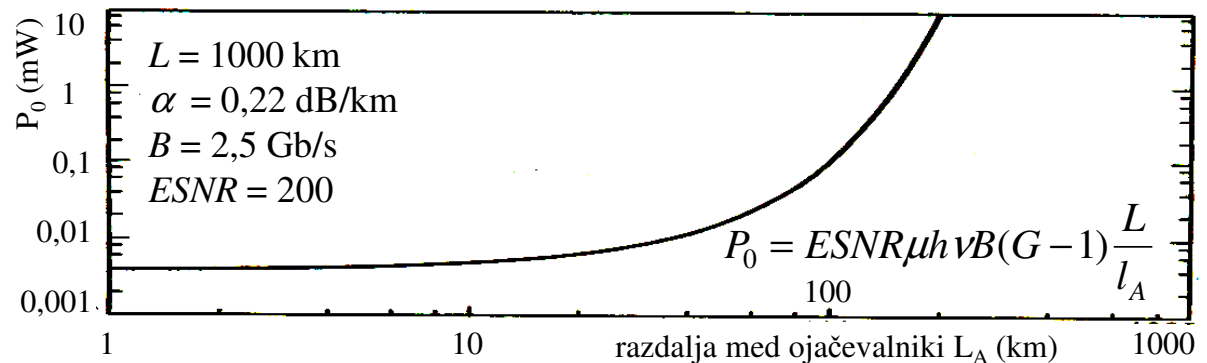


- **Veriga iz n_A ojačevanih vlakenskih odsekov dolžine L_A na skupni dolžini $L = n_A L_A$:**

optično razmerje signal / šum v dB: $OSNR_{dB} = (S/N)_{opt,dB} = 58 + P_{0dBm} - \alpha L_{A,dB} - F_{dB,EDFA} - 10 \log n_A$



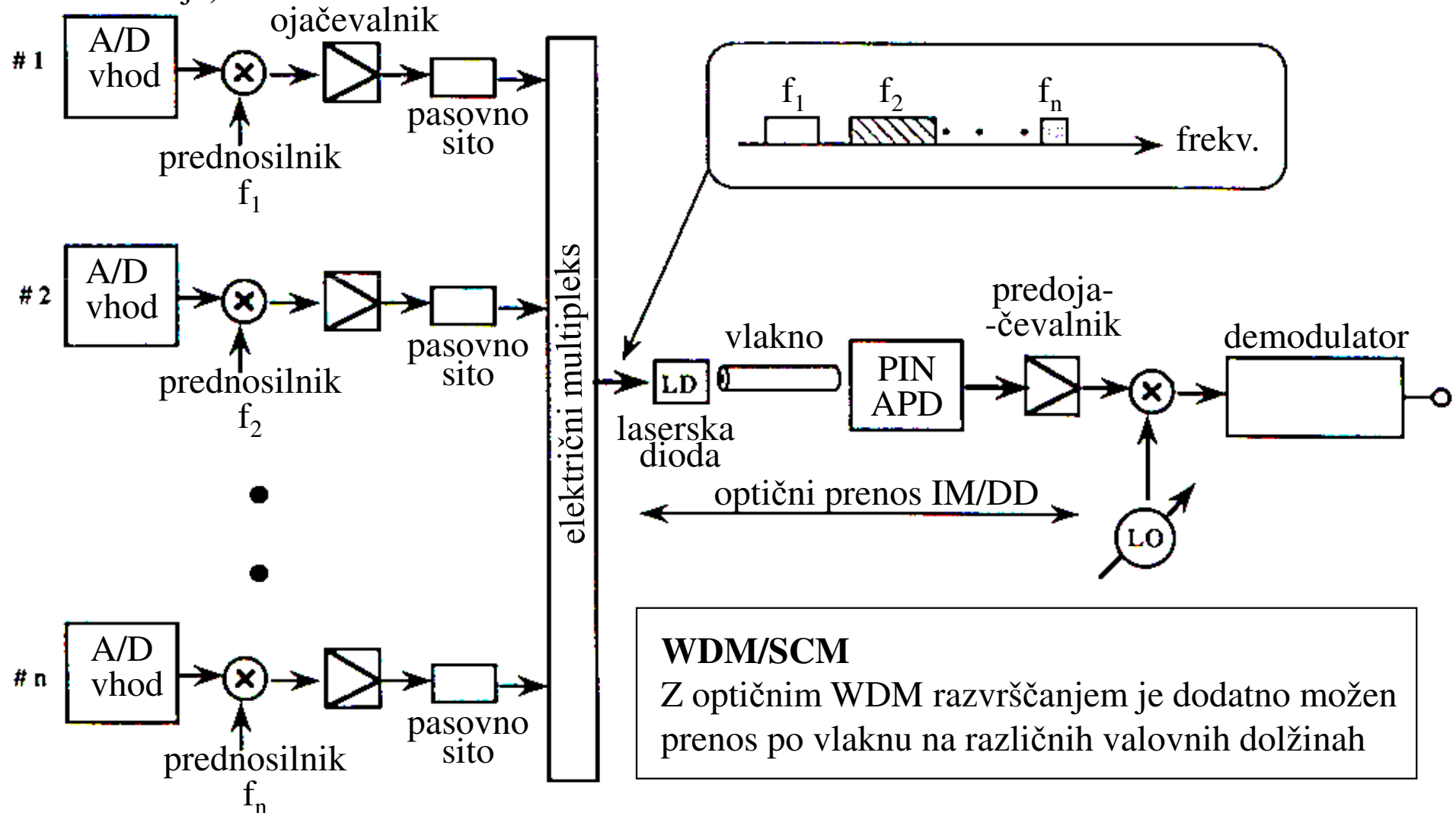
Pri dani vrednosti razmerja ESNR se potrebna vhodna optična moč zmanjšuje z manjšanjem dolžine L_A in večanjem števila n_A ojačevalnih odsekov. **Prednost ima čimbolj porazdeljeno ojačevanje.**



Multipleksiranje na podnosilniku - SCM

Električno razvrščanje na radijskih podnosilnikih in el. multipleks:

- intenzitetna modulacija (IM) laserja, prenos po vlaknu in direktna detekcija (DD)
- koherentni sprejem v radijskem spektru (mešanje detektiranega signala s signalom lokalnega oscilatorja)



Omejitve s kromasko disperzijo

Omejitveni pogoj $B^2|D|L < 104.000$ (Gb/s) ps/nm

Omejitev dolžine L prenosnega vlakna različne disperzije D (ps/nm/km) pri nekaterih bitnih hitrostih B (Gb / s) in omejitev dopustne vrednosti $T = |D|L$ (ps/nm) :

- vlakno SMF (G.652) disperzije $D = 17$ ps/nm/km in dolžine L_1
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 8$ ps/nm/km in dolžine L_2
- vlakno NZDF (G.655) disperzije $D = \pm 4$ ps/nm/km in dolžine L_3

B (Gb/s)	L_1 (km)	L_2 (km)	L_3 (km)	T (ps/nm)
2,5	1000	2000	4000	
10	60	130	250	1000
40	4	8	16	65
80	1	2	4	16
160	0,25	0,5	1	4

Na optičnih zvezah, ki uporabljajo ozkopasovni laserski vir (dioda DFB ali DBR z zunanjo modulacijo), omejuje disperzija doseg zveze pri bitnih hitrostih $B > 10$ Gb/s. Pri manjših bitnih hitrostih $B < 10$ Gb/s je zveza omejena predvsem s slabljenjem.

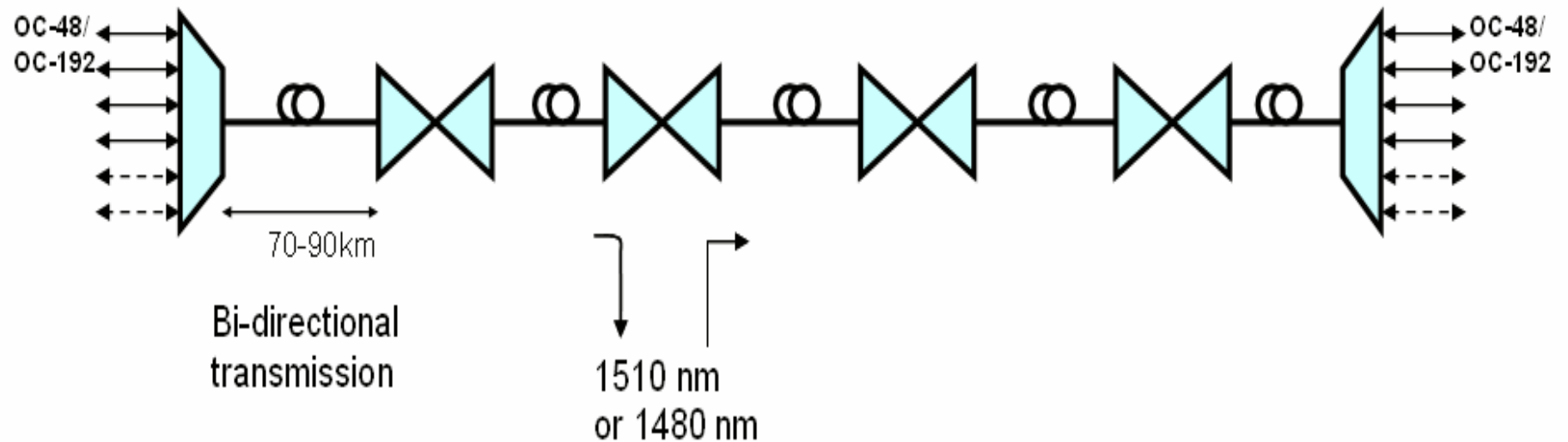
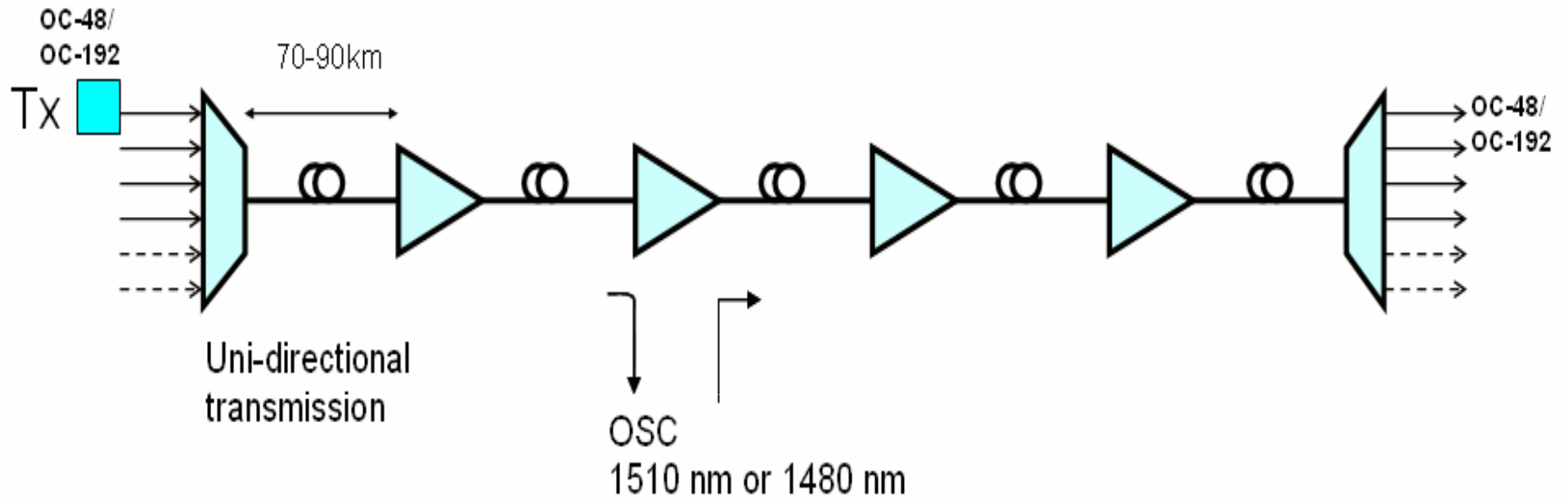
Disperzija je linearen pojav in ga je zato mogoče kompenzirati optično in softversko (DSP)

Občutljivost zveze na disperzijo

- Optična zveza 40 Gb/s na dolžini 100 km
- Vlakno SMF 28, $D = 16,7 \text{ ps}/(\text{nm km})$, $\text{PMD} = 0,2 \text{ ps}/(\text{km})^{1/2}$

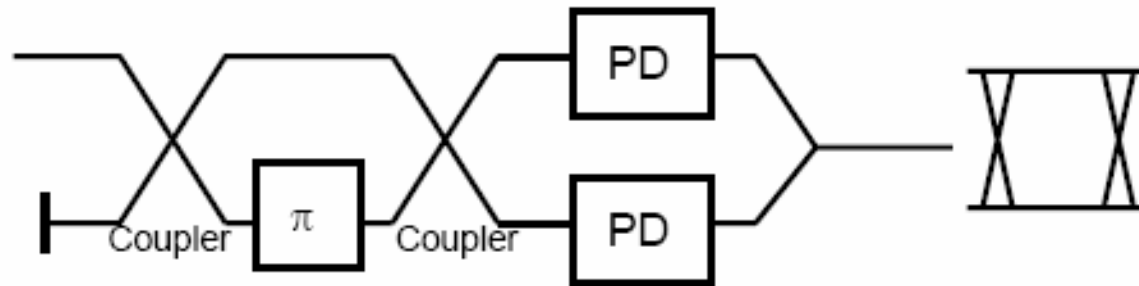
	OOK	PSBT	DPSK	DQPSK	QPSK	PM-(D)QPSK
OSNR Sensitivity	16dB/	16dB/	13dB/	15dB/	13dB/	11dB/
	0.1nm	0.1nm	0.1nm	0.1nm	0.1nm	0.1nm
PMD Tolerance	1ps	2.5ps	2.51ps	5ps	5ps	10ps
CD Tolerance	+/- 50ps/nm	+/- 150ps/nm	+/- 100ps/nm	+/- 200ps/nm	+/- 200ps/nm	+/- 800ps/nm
Electronics Complexity	Medium	Medium	Medium	Low	Low	High
Photonics Complexity	Low	Low	Low	Medium	High	High

Eno- in dvosmerna optična zveza

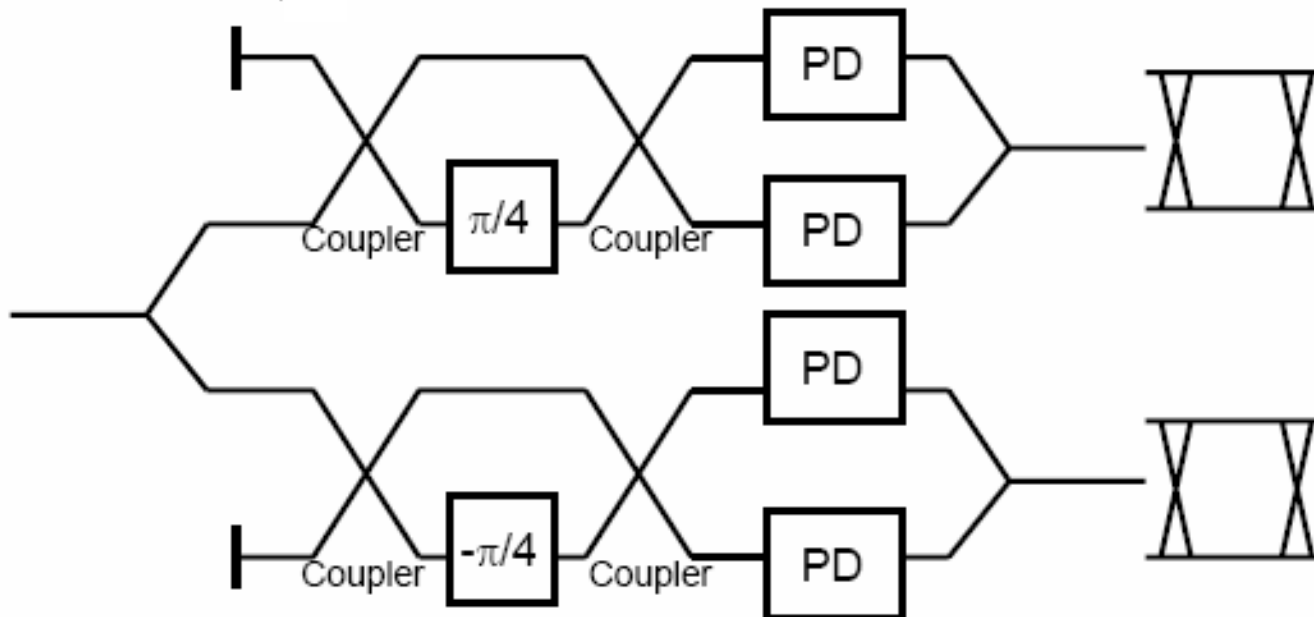


Direktni sprejem IM/DD

Sprejemnik za direktno detekciju DPSK:

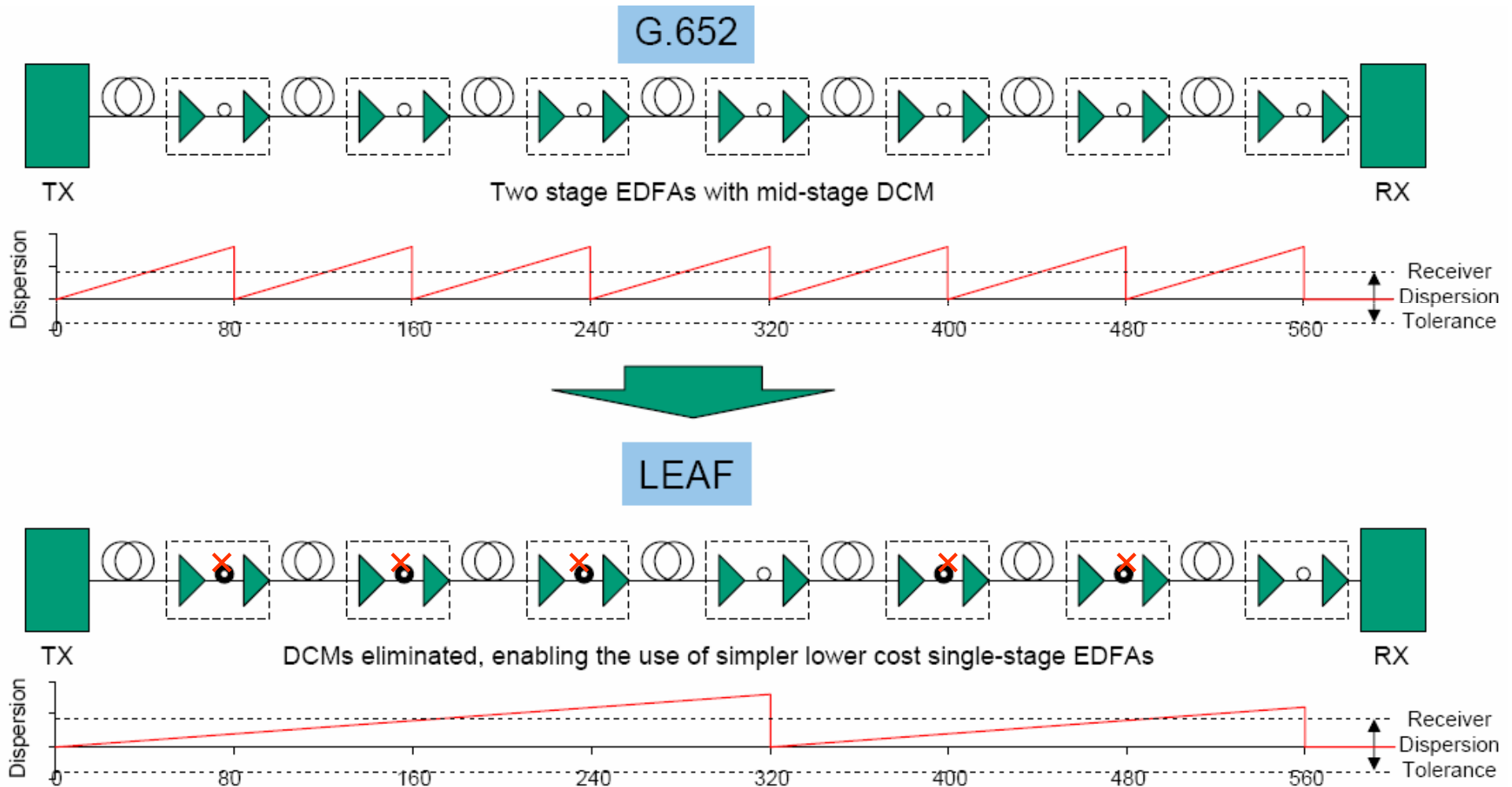


Sprejemnik za direktno detekciju DQPSK:



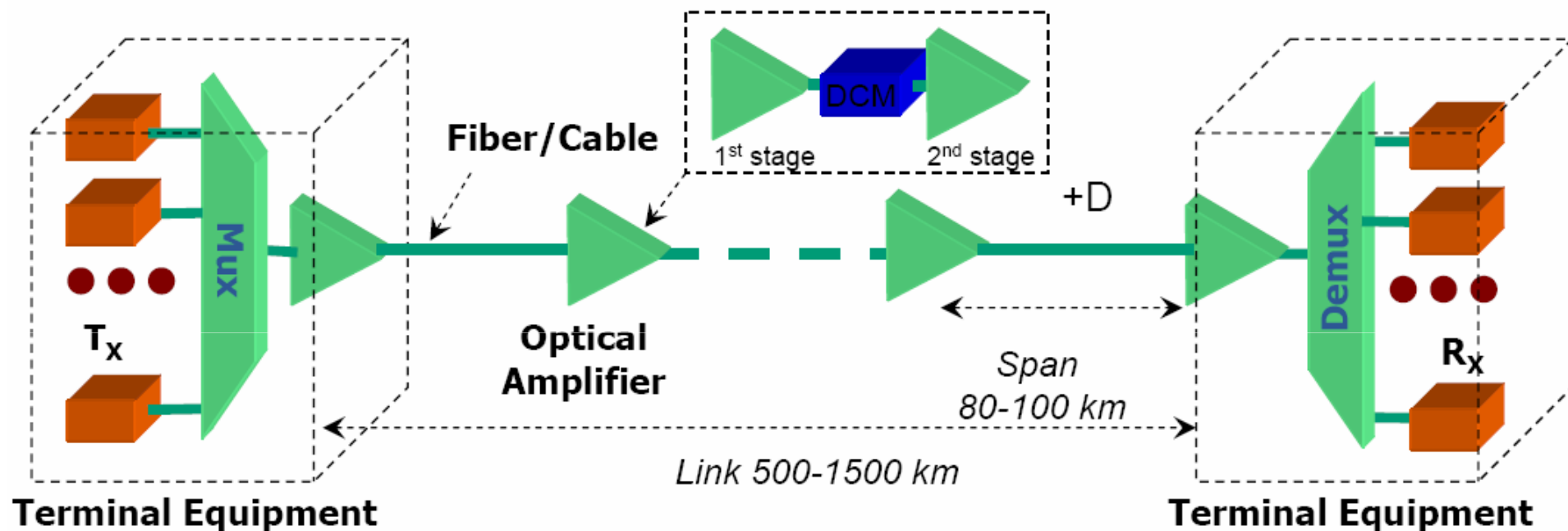
Ojačevanje in optična kompenzacija disperzije

- Primerjava kompenzacije disperzije na zvezah z vlaknoma G.652 in LEAF:



Uporaba vlakna LEAF zmanjšuje potrebo po kompenzaciji disperzije na odsekih 80 km.

Hrbtenična WDM zveza v praksi



- Link length 200-1500 km with span lengths of 80-100 km
- Bit Rate 10/40 Gb/s, 100 or 50 GHz channel spacing on ITU grid
- C band (1530 – 1565 nm) and L band (1570 -1625 nm)
- Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) with 2 stages for DCM

Primer dolge ojačevane optične zveze

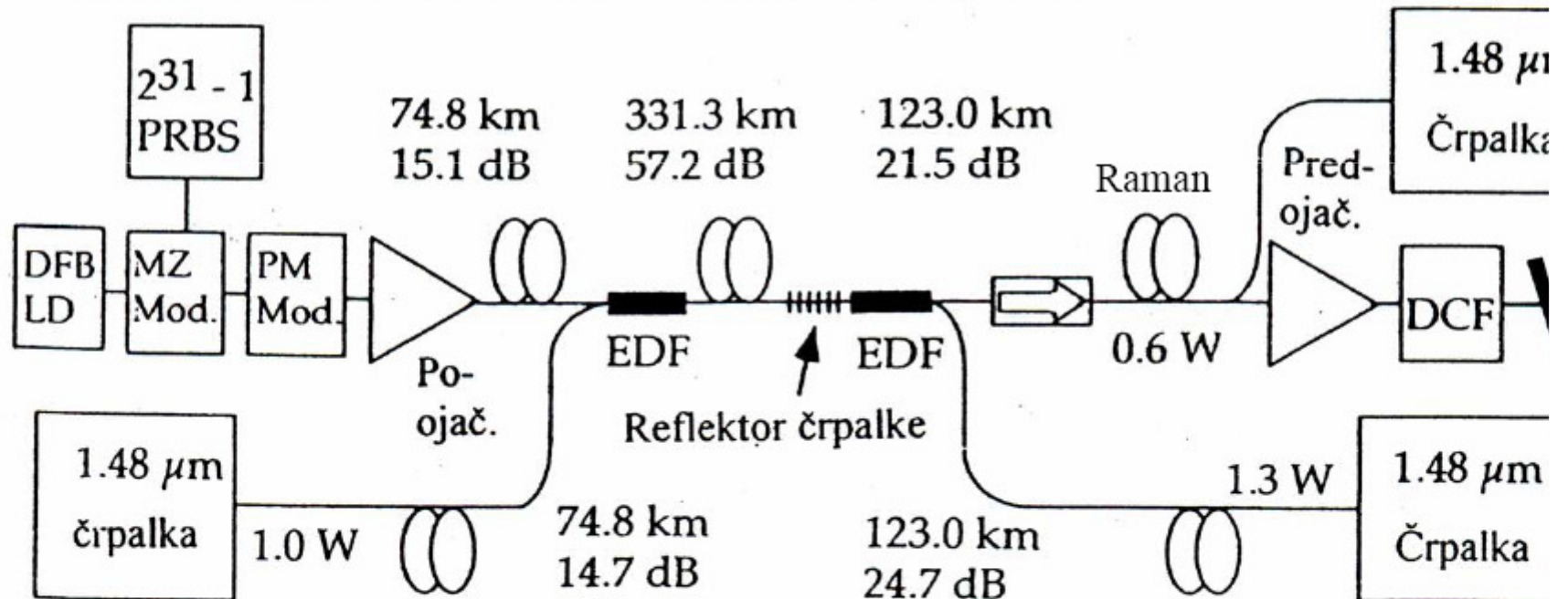
<i>Description</i>	<i>Link Loss</i>	<i>Dispersion</i>	<i>SNR</i>
Optical fiber loss at 1310 nm: 250 km length at 0.35 db/km; 0.6 ps/nm/km	-87.5 dB	150 ps	
Splice loss: 10 splices at 0.1 db/splice	-1 dB		
Connection loss: 20 connections at 0.5 db/connection	-10 dB		
4 amplifiers, gain of 20 dB each	80 dB	4 ps	-12 dB
1 repeater, gain of 20 dB; n equally spaced repeaters reduces dispersion by factor of n+1	20 dB		6 dB
Design margin	<u>-10 dB</u>		
Total link loss (a)-(f)	-8.5 dB	77 ps	
Transmitter avg. output power	-10 dBm		29 dB
Receiver input power (h+g)	-18.5 dBm	77 ps	23 dB
Receiver dynamic range	-10 to -25 dBm		
Receiver specs at BER 10-9	-25 dBm	80 ps	20 dB
Remaining margin (k-i)	6.5 dB	3 ps	3 dB

Primer kratke optične zveze

(a)	Optical fiber loss at 1310 nm: 15.5 km length at 0.35 db/km	5.4 db
(b)	Splice loss: 2 splices at 0.1 db/splice	0.2 db
(c)	Connection loss: 2 connections at 0.5 db/connection	1.0 db
(d)	Other component losses	0.0 db
(e)	Design margin	2.0 db
(f)	Total link loss (a)-(e)	8.6 db
(g)	Transmitter avg. output power	-10.0 dBm
(h)	Receiver input power (g-f)	-18.6 dBm
(i)	Receiver dynamic range	-10 to -25 dBm
(j)	Receiver sensitivity at BER 10 ⁻⁹	-25 dBm
(h)	Remaining margin (h-j)	6.4 dB

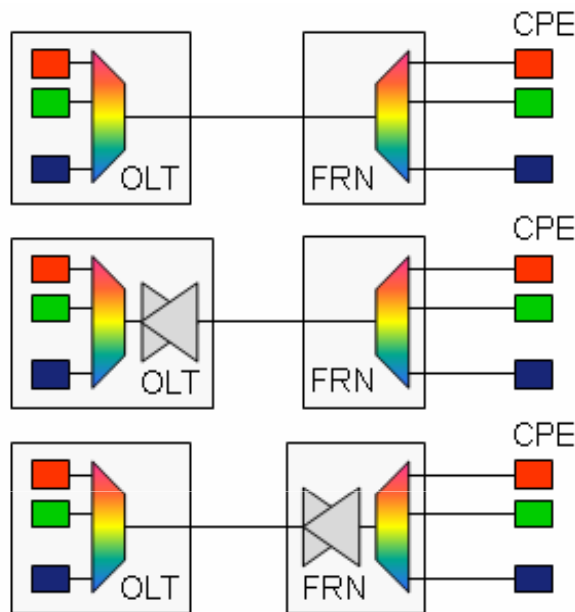
5.4 OPTIČNA OJAČEVANA ZVEZA BREZ VMESN PONA VLJALNIKA

- **premoščanje znatne razdalje** (do 500 km) z vmesnim ojačevanjem, ki uporablja črpalke, nameščeni na terminalnih lokacijah. Dodatno ojačevanje daje Ramanov pr ojačevalnik.
- **dosegaje visoke zanesljivosti** podmorske zveze. Vsa aktivna oprema je nameščen terminalnih lokacijah. vzdrževanje zveze ie preprosteiše.



- **posebnosti:**
 - EDF vlakno, obogateno s primesjo Er^{3+}
 - vlakni PSCF dolžine 74,8 km in 123 km za dovod črpalnega signala 1,48 μm ojačevalnih vlaken

Izračuni dostopovne optične zveze

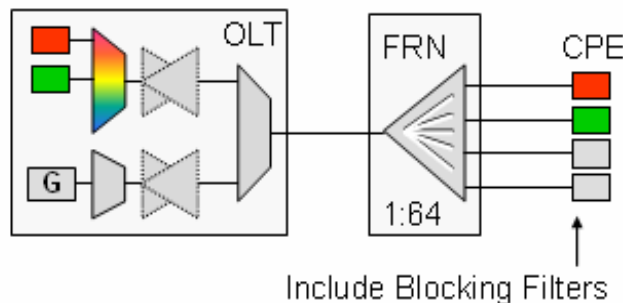


WDM-PON, DFW

	Unamplified	OLT amp*	FRN amp**
Power budget	32.0 dB	32.0 dB	60.0 dB
Filter losses	12.0 dB	6.0 dB	12.0 dB
Patch cord/connector losses	0.9 dB	0.6 dB	1.2 dB
Optical path penalty	2.0 dB	2.0 dB	3.0 dB
System margin	1.0 dB	1.0 dB	1.0 dB
Link budget	16.1 dB	25.8 dB	42.8 dB
Link loss/km	0.3 dB	0.3 dB	0.3 dB
Link length in km	53.7 km	74.7 km	142.7 km

*) With EDFA-C-S20-GCB

**) With EDFA-C-D20-VGC and DCG dispersion compensation

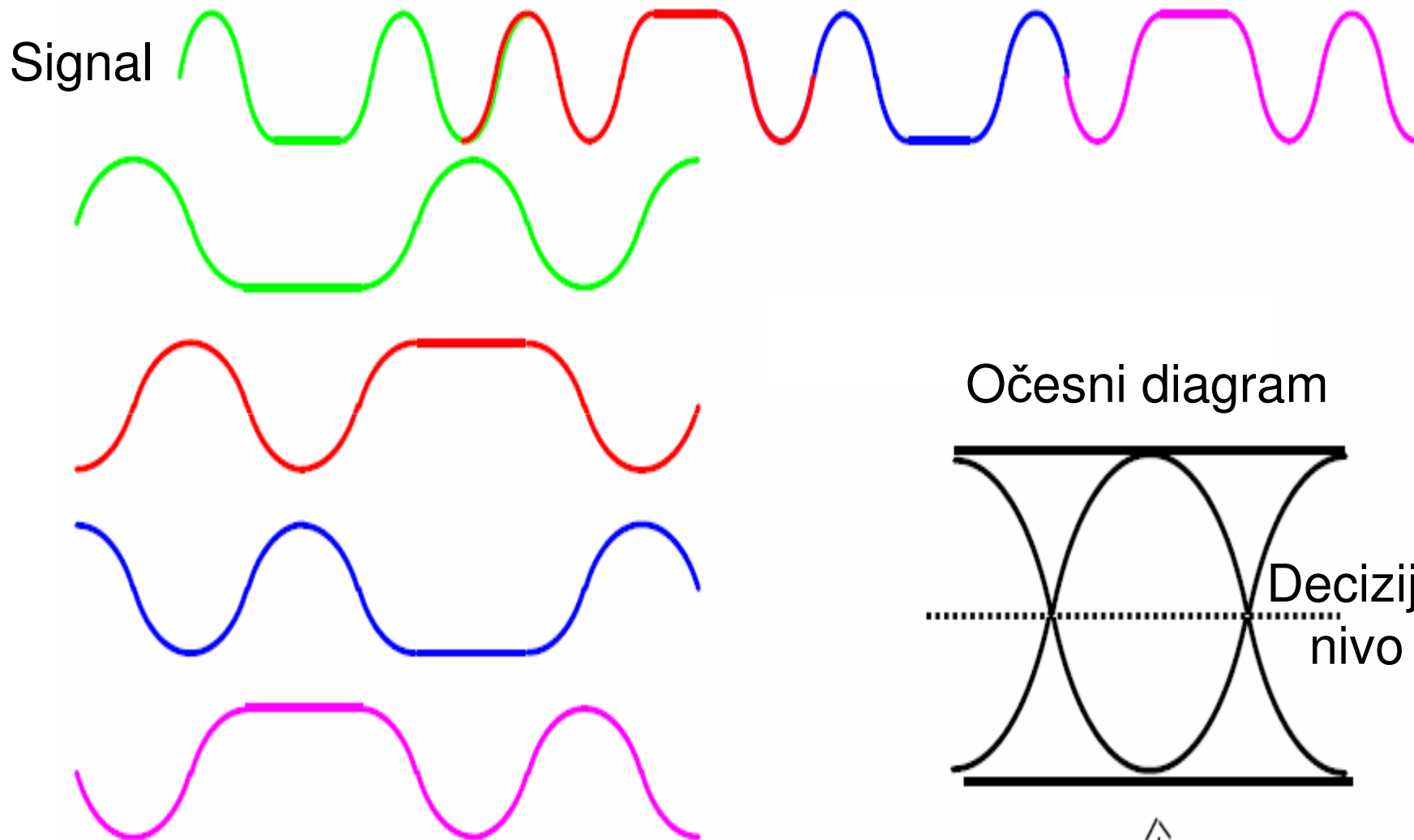


NG-GPON

	GPON unampl.	WDM unampl.	GPON OLT ampl.	WDM OLT ampl.
Power budget	33.0 dB	36.0 dB	37.0 dB	36.0 dB
Filter and splitter losses	22.0 dB	27.0 dB	22.0 dB	22.0 dB
Patch cord/connector losses	0.9 dB	1.2 dB	0.9 dB	0.9 dB
Optical path penalty	1.0 dB	1.0 dB	1.0 dB	1.0 dB
System margin	1.0 dB	1.0 dB	1.0 dB	1.0 dB
Link budget	8.1 dB	5.8 dB	12.1 dB	11.1 dB
Link loss/km	0.4 dB	0.3 dB	0.4 dB	0.3 dB
Link length in km	20.3 km	19.3 km	30.3 km	37.0 km

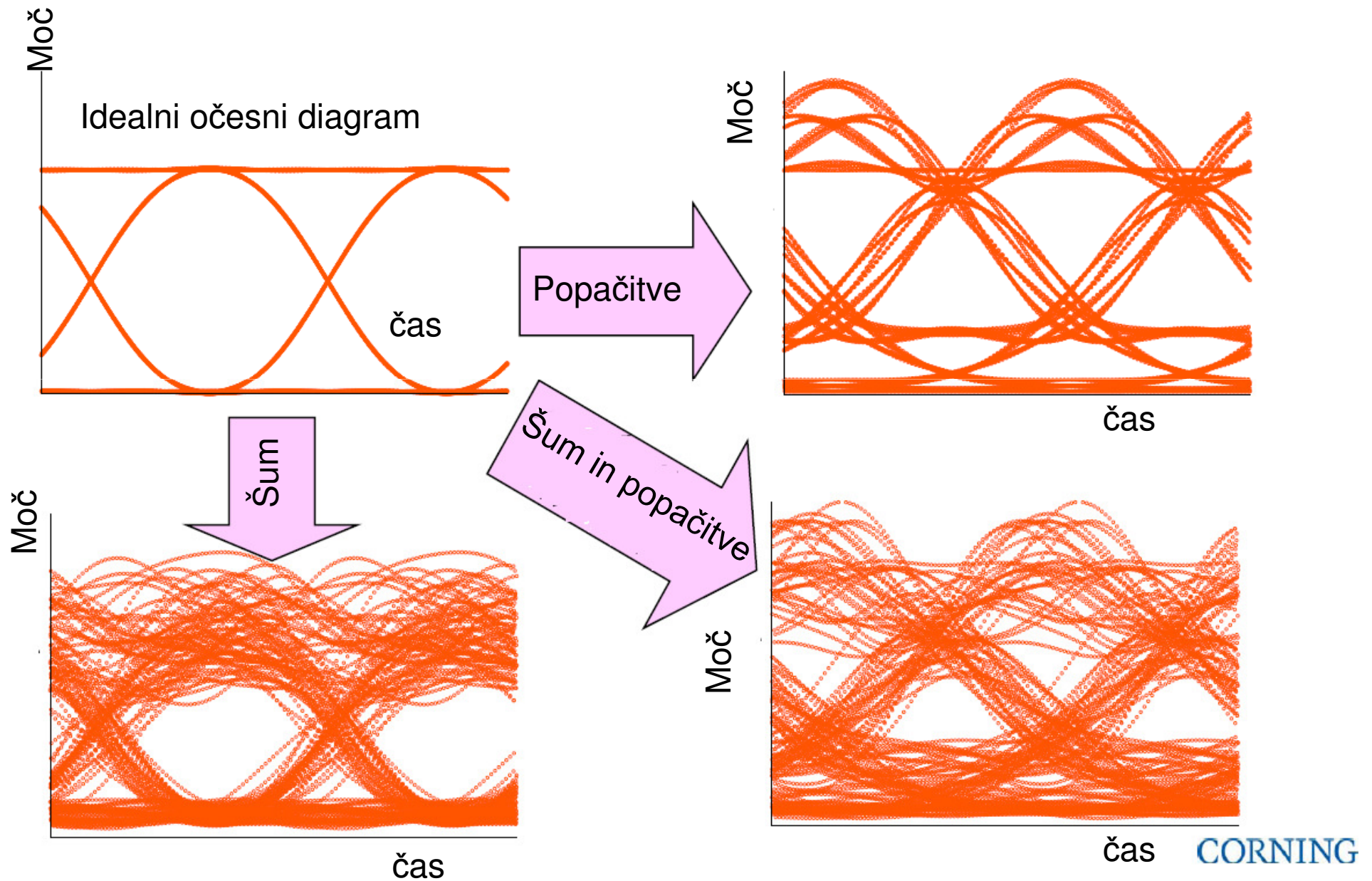
33 dB (10G): +4 dBm...-26 dBm + 3 dB FEC gain, 36 dB (2G5): +4 dBm...-32 dBm

Očesni diagram

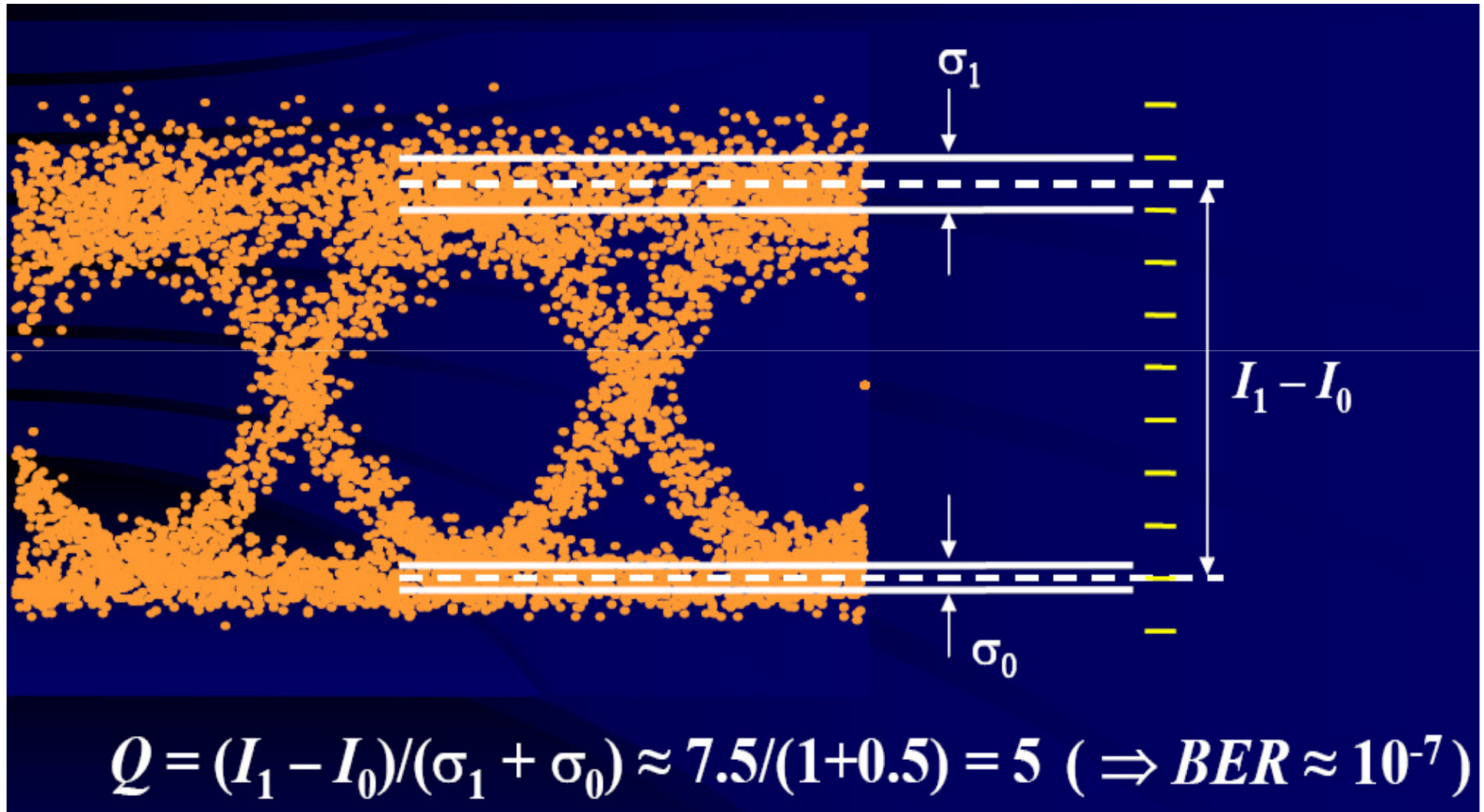


Odseki signala za upodobitev očesnega diagrama

Očesni diagram, vpliv šuma in popačitve

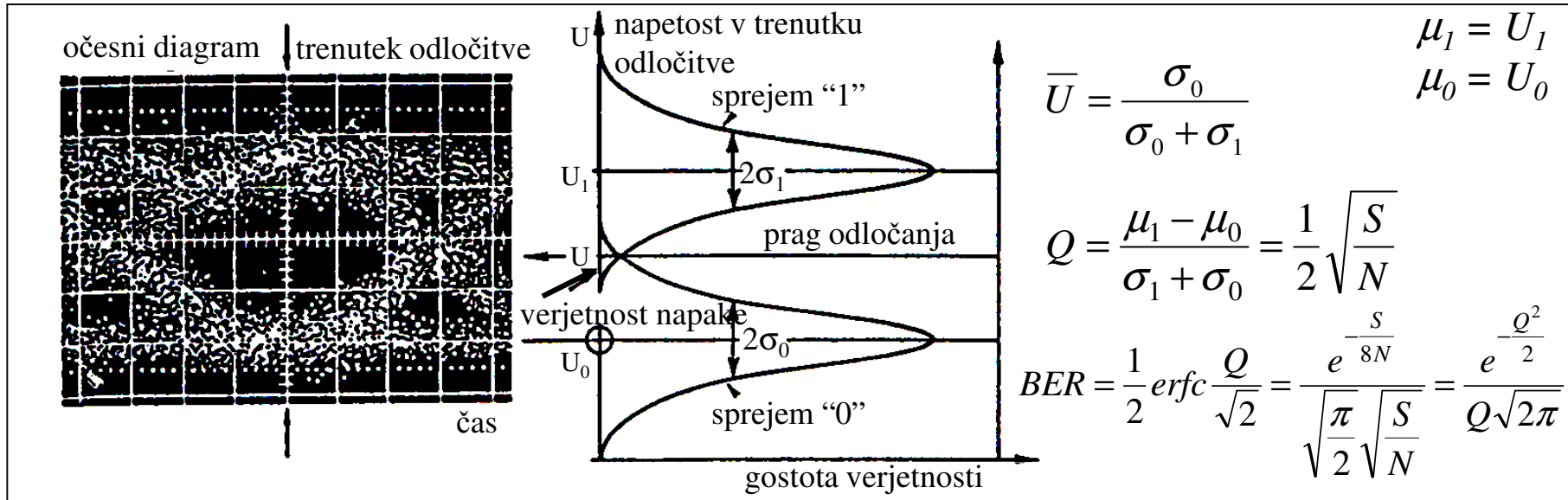


Očesni diagram, faktor Q

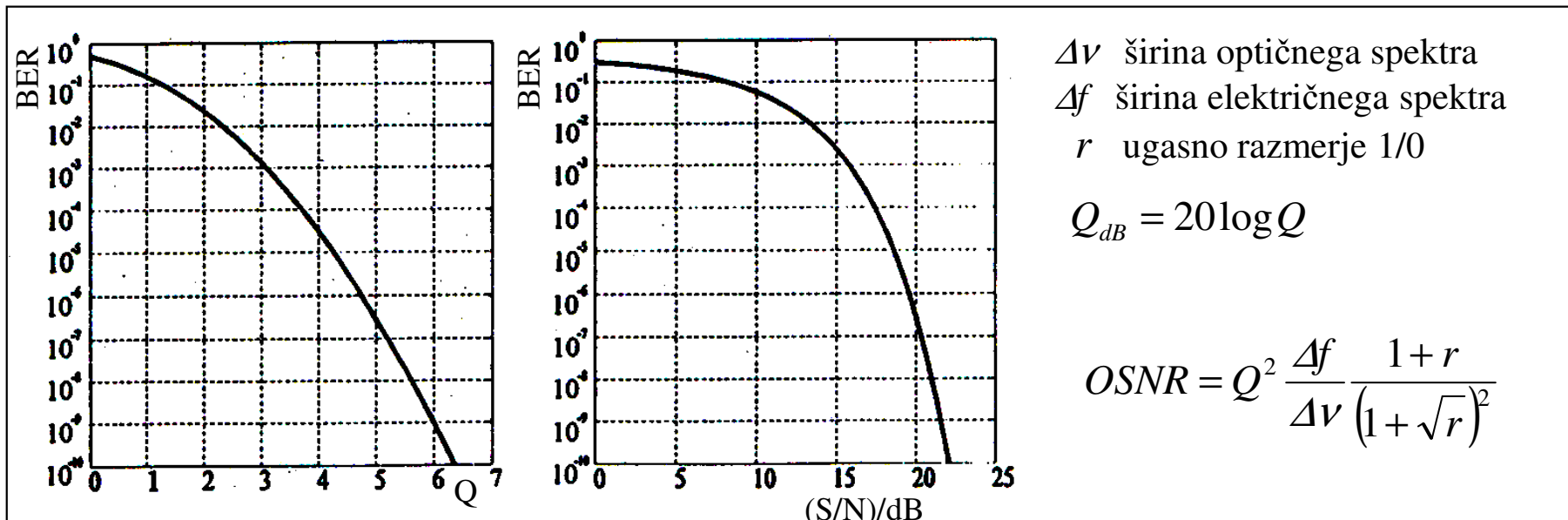


Optična zveza OOK

• Očesni diagram in vzorčena izhodna napetost:

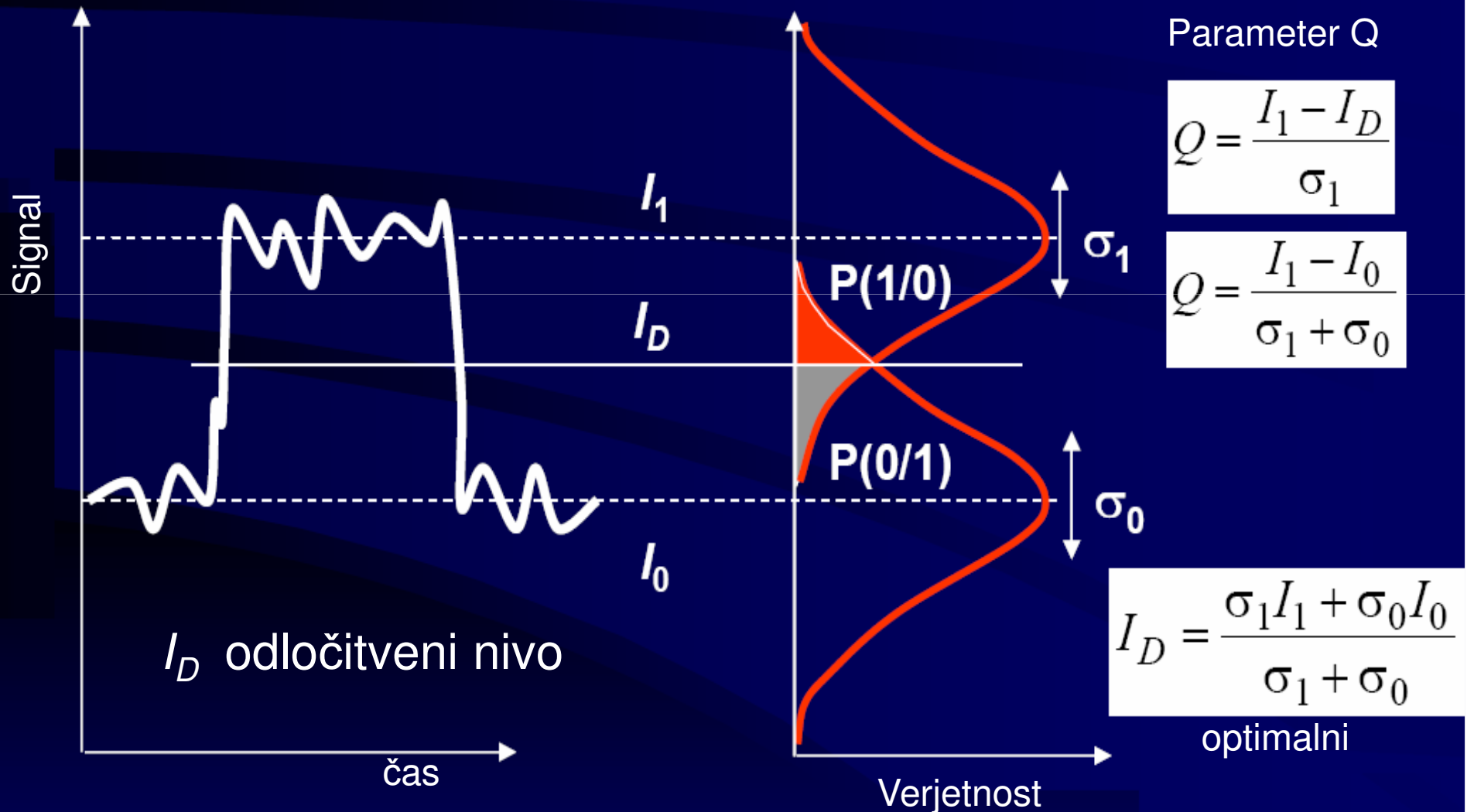


• Bitni pogrešek:



Q in BER

$$BER = p(1) P(0/1) + p(0) P(1/0)$$

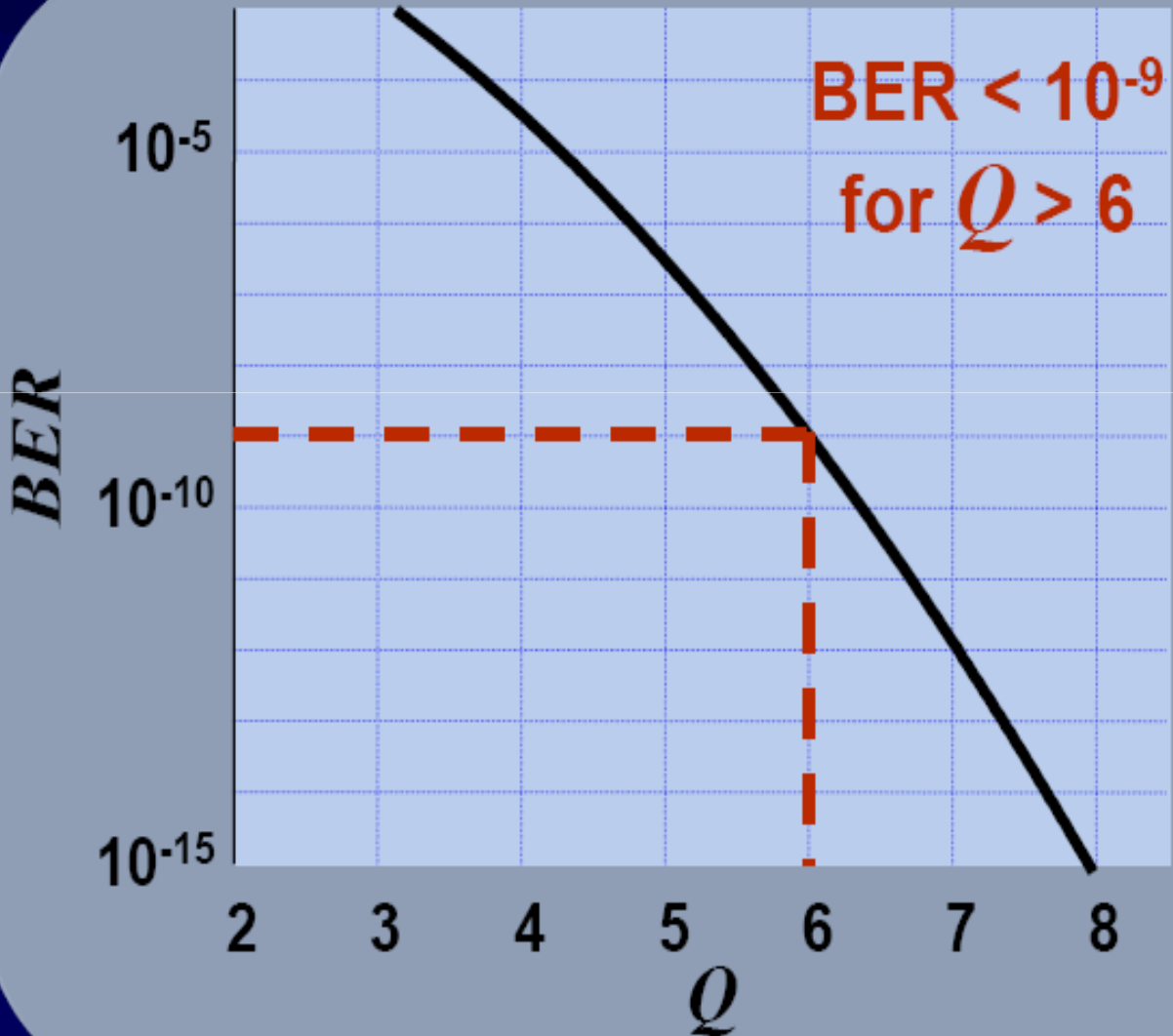


Odvisnost BERa od Q

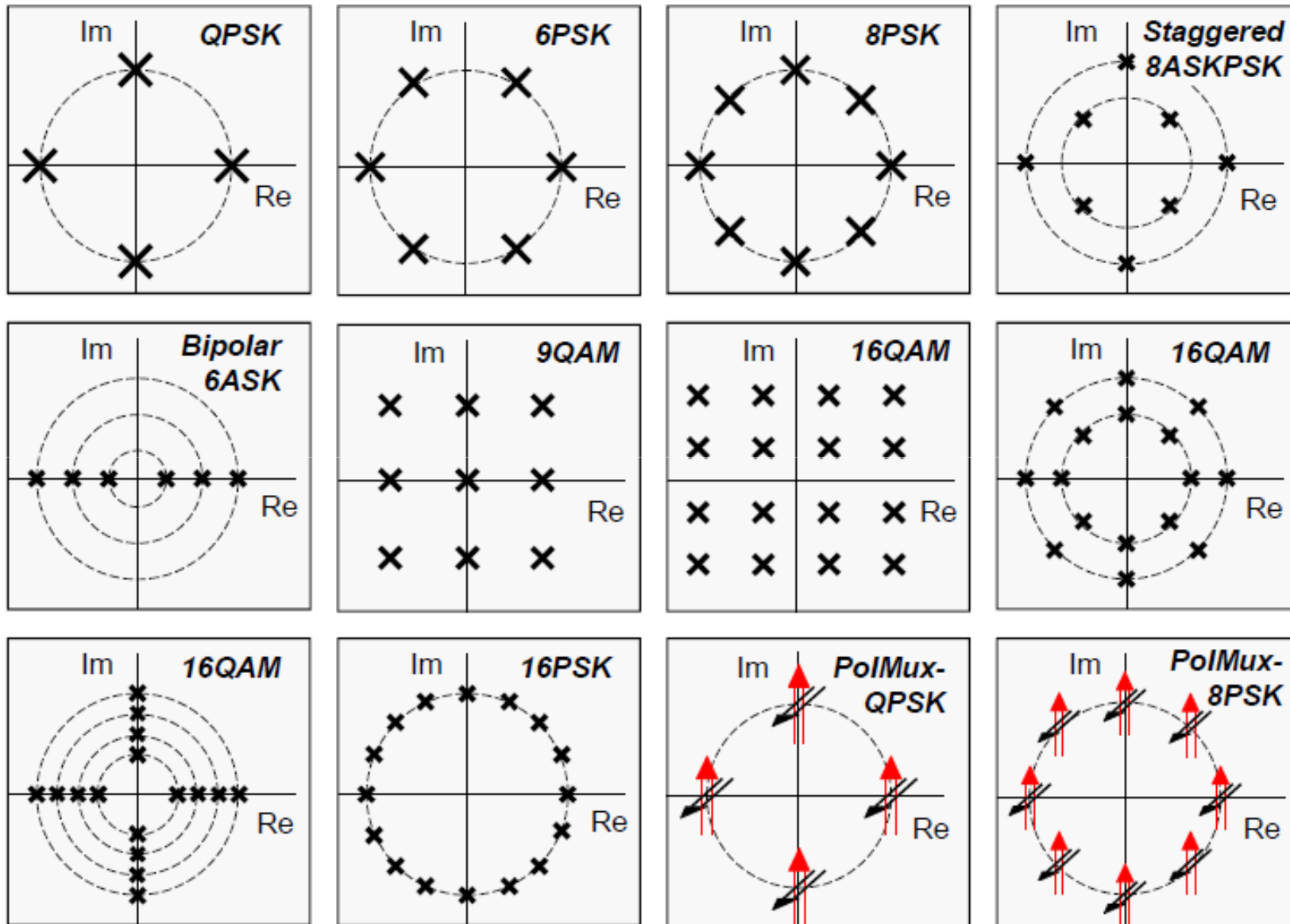
$$\text{BER} \cong \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}}$$

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$Q^2 \approx \text{SNR}$$



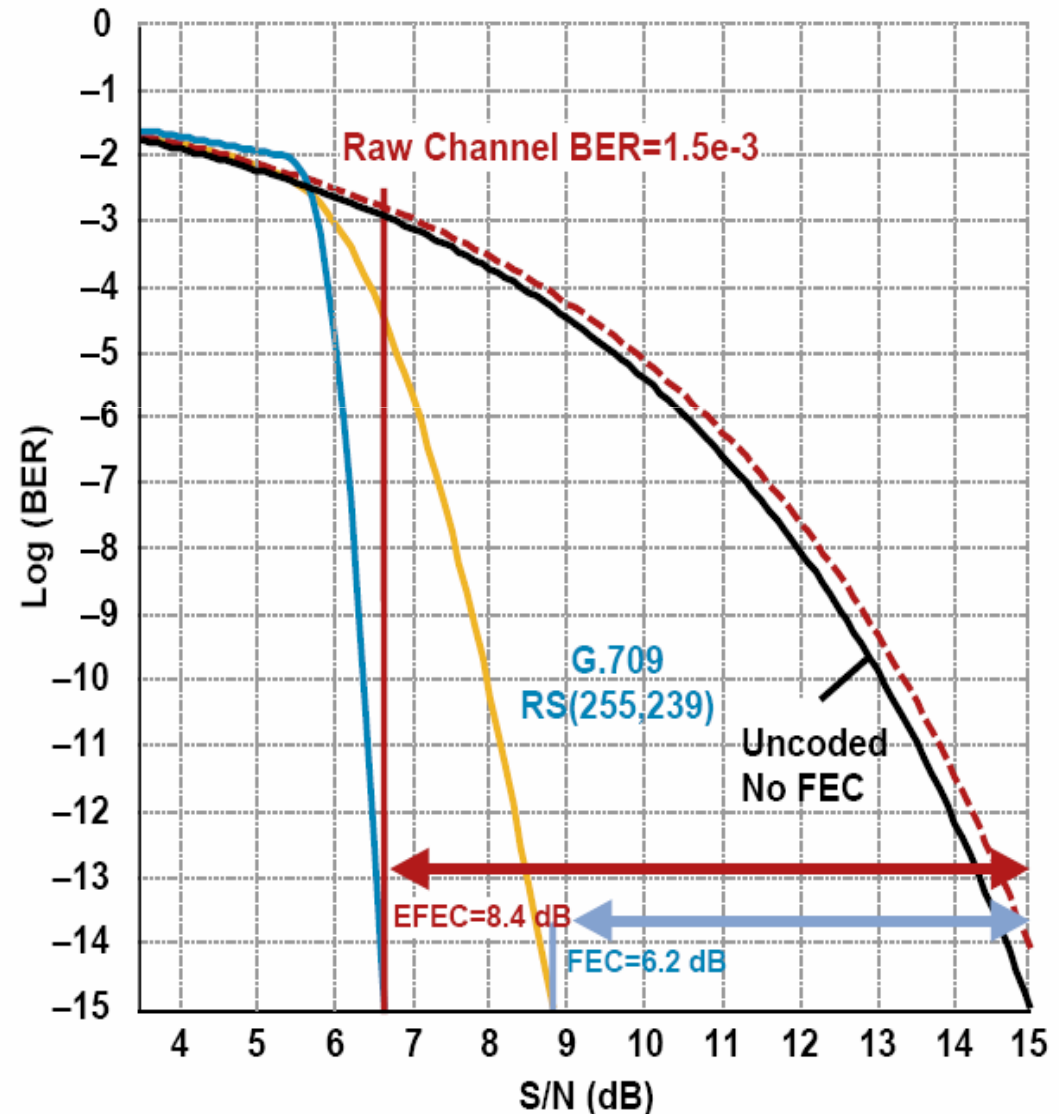
Primeri različnih konstelacij



Naprejšnje kodiranje - FEC

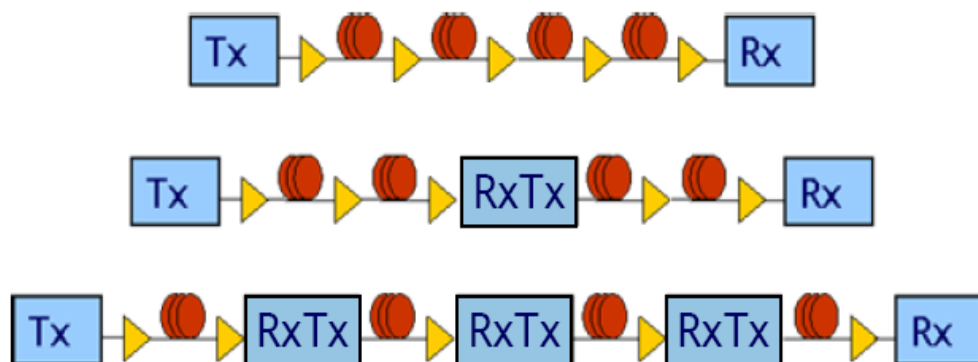
- FEC je preprost, učinkovit in splošno razširjen način za bistveno zniževanje BERa oz. za bistveno povečevanje dosega optične zveze.

- FEC extends reach and design flexibility, at “silicon cost”
- G.709 standard improves OSNR tolerance by **6.2 dB** (at 10^{-15} BER)
- Offers intrinsic performance monitoring (error statistics)
- Higher gains (**8.4dB**) possible by enhanced FEC (with same G.709 overhead)



Spektralni izkoristek optične zveze

Ojačevalniki in ponavljalniki:

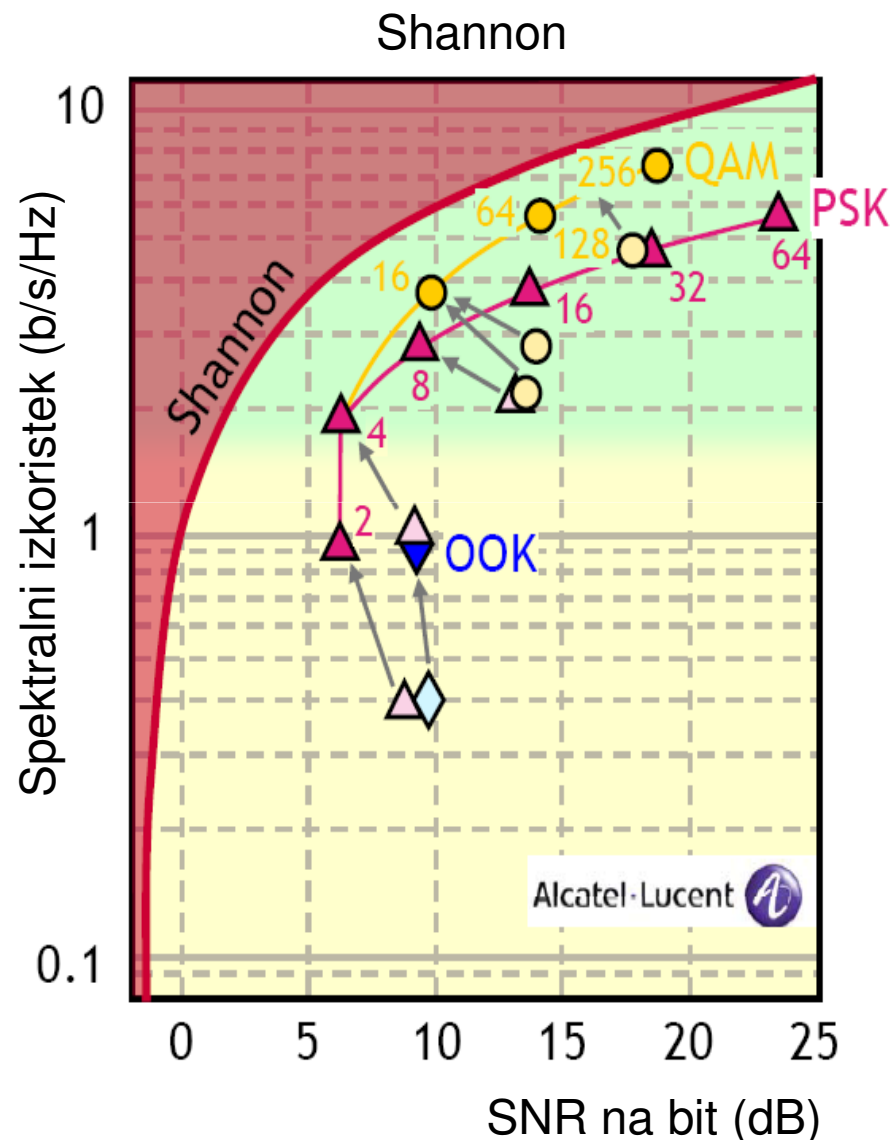


- Optične zveze z ojačevalniki na razdalji 60 do 100 km.
- Optične zveze z ojačevalniki in ponavljalniki Razdalja med ponavljalniki do 500 km.
- Optoelektronski pretvorniki porabljajo veliko moči.

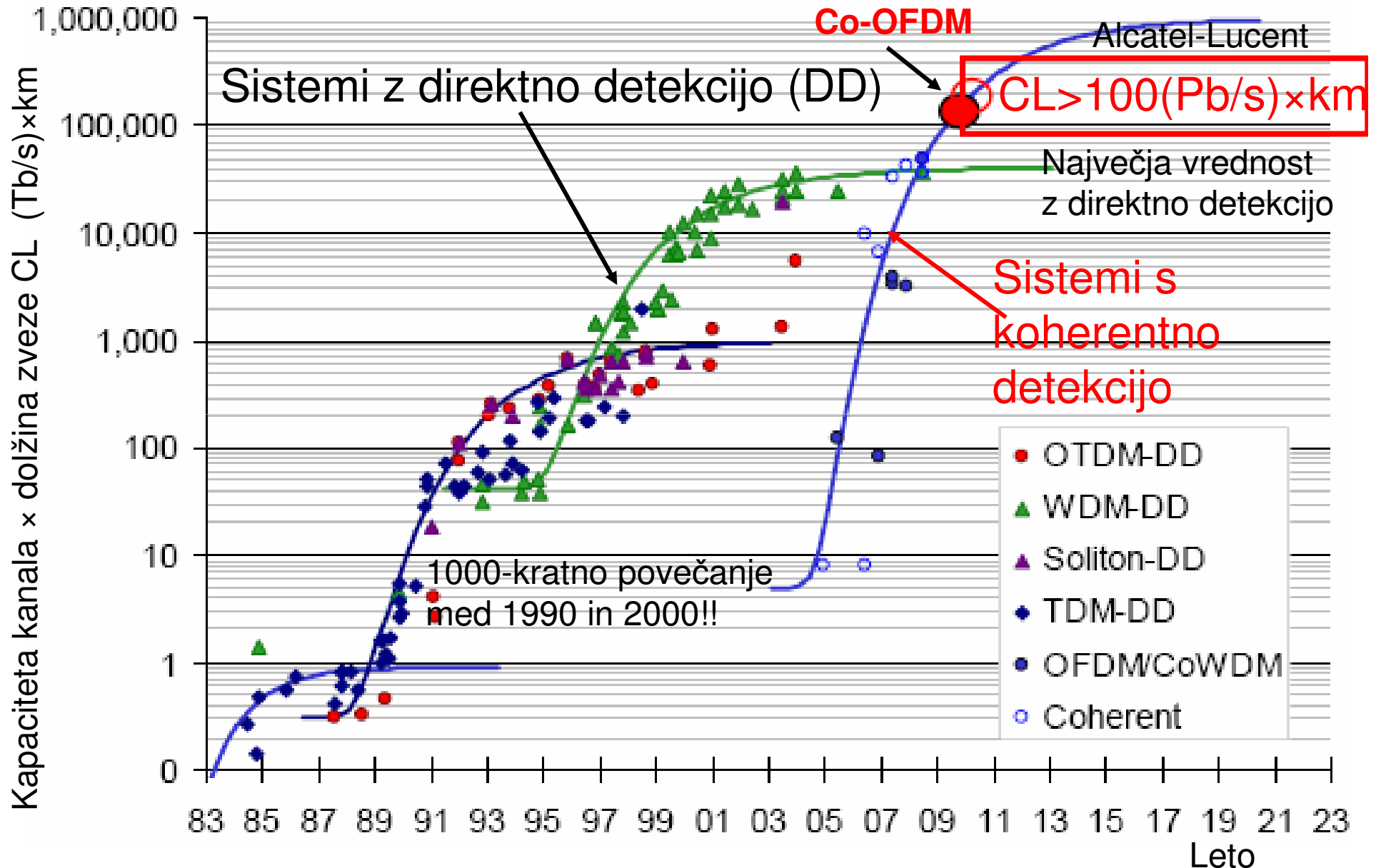
OOK - On-Off Keying

PSK - Phase shift Keying

QAM - Quadrature Amplitude Keying

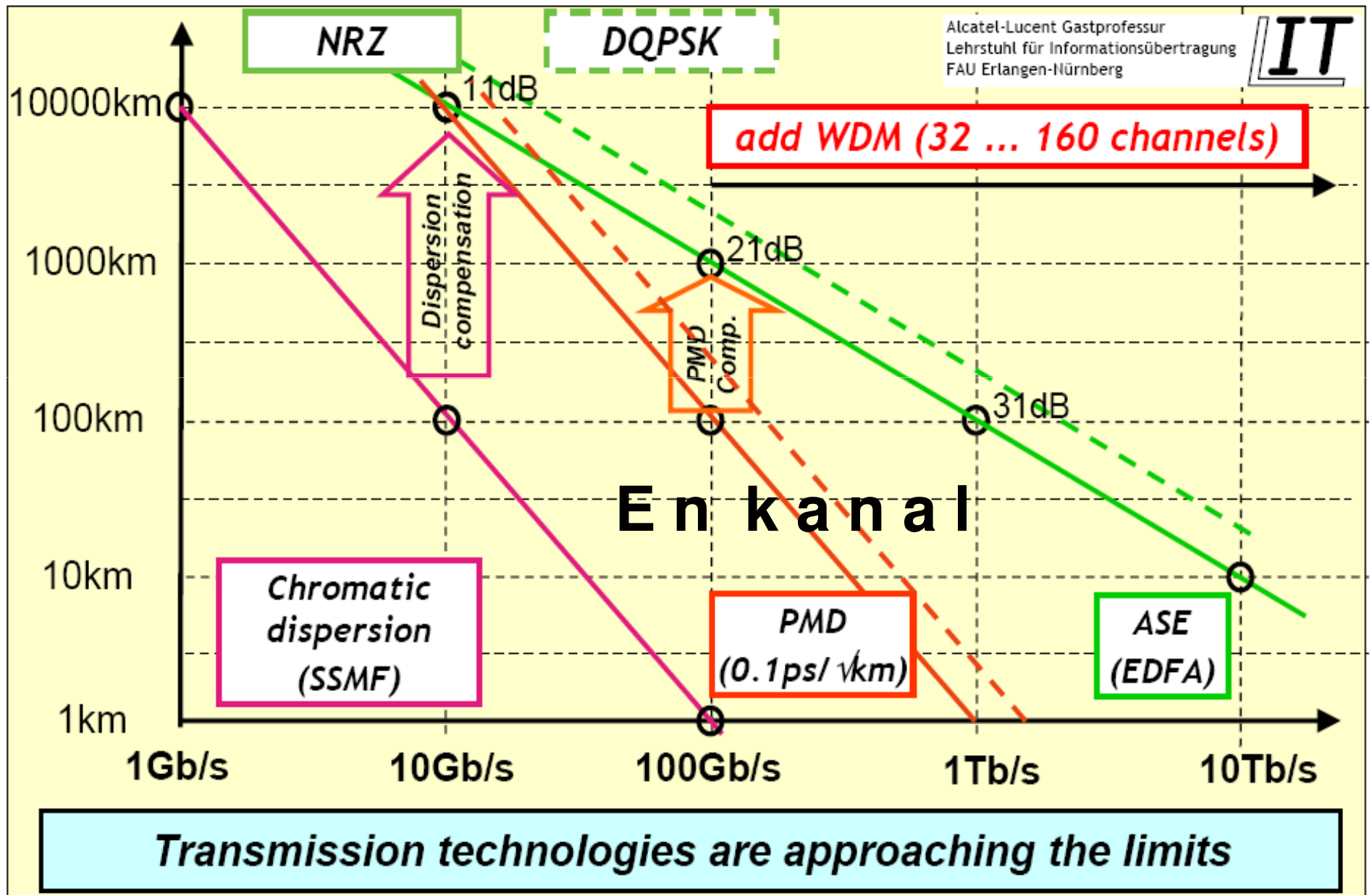


Zmogljivost sedanjih in prihodnjih sistemov

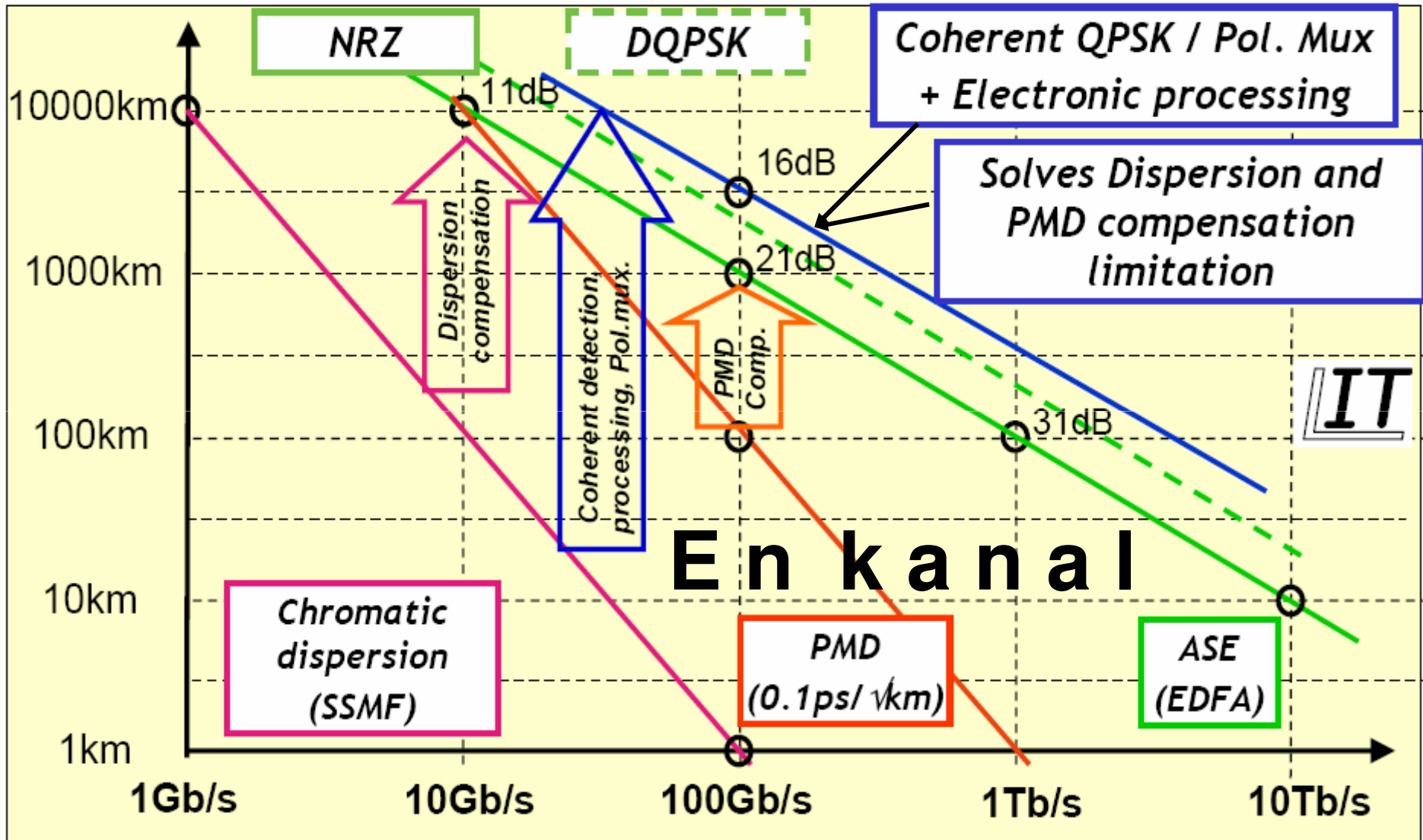


Koherentni sistemi v l. 2010 že presegajo dosedanje sisteme z direktno detekcijo

Omejitve nekoherentne optične zveze



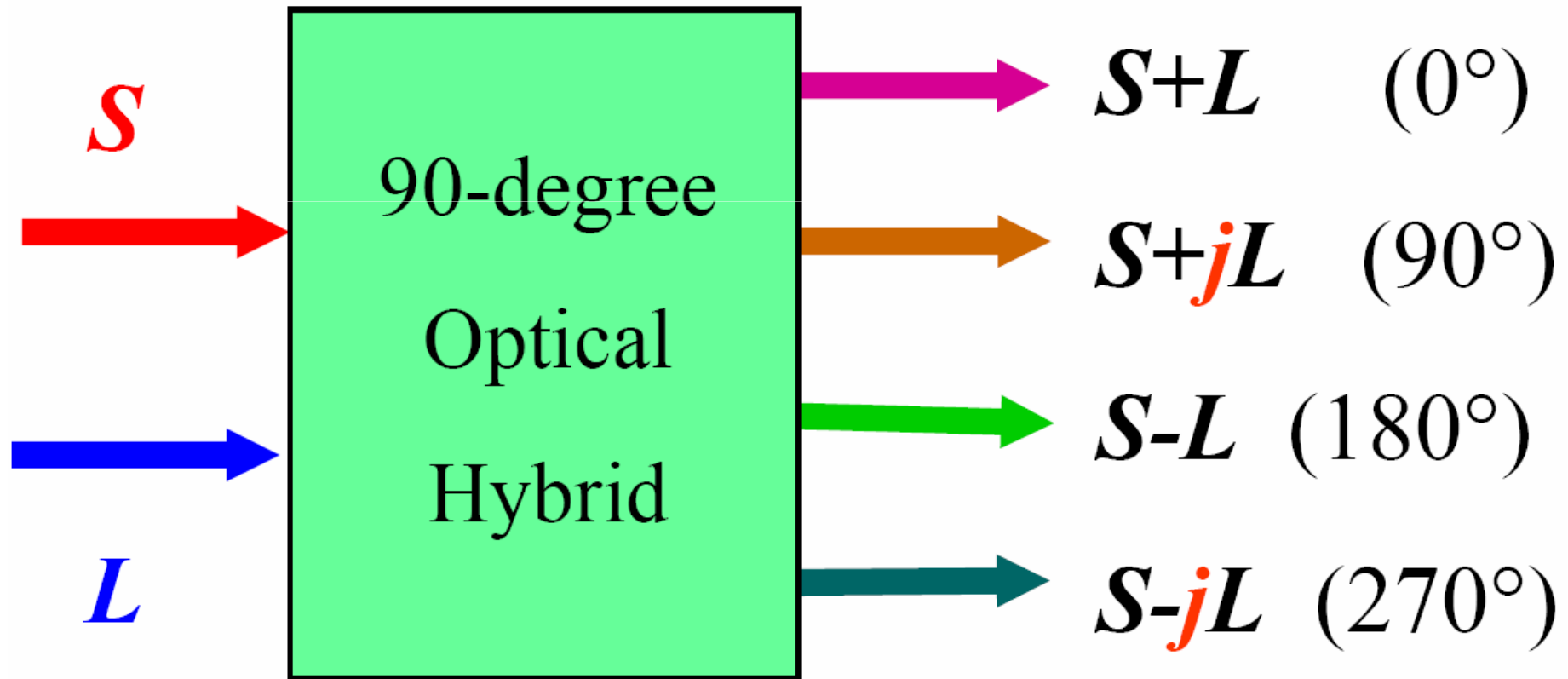
Omejitve koherentne optične zveze



Advanced transmission technologies to achieve higher data rates

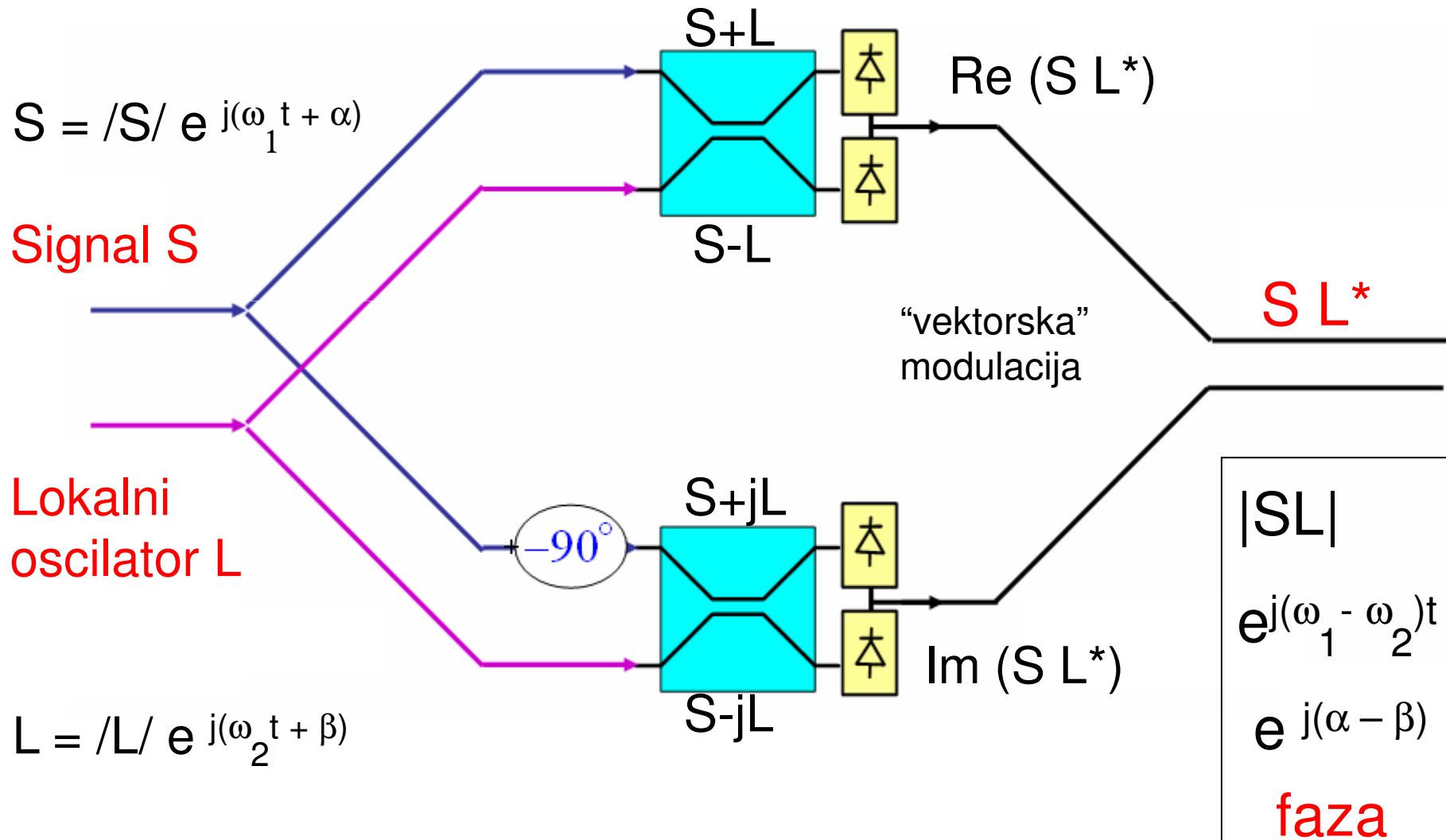
90° optični hibrid

- množični sestavni del oherentnega sprejemnika

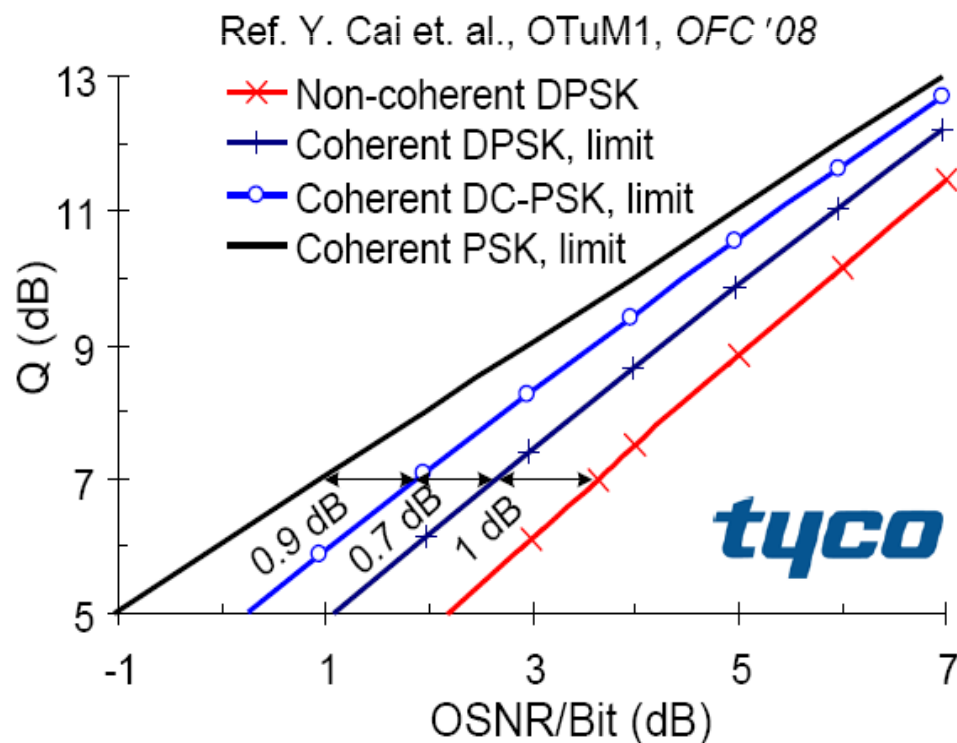
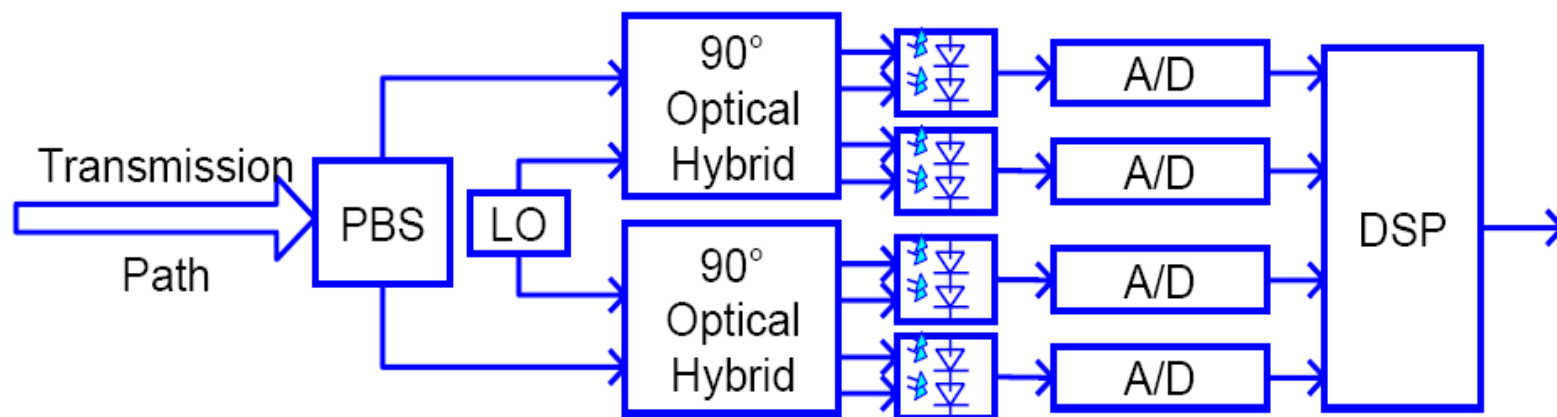


Koherentni sprejemnik–prednja stopnja

Koherentni sprejem obravnavamo s kompleksnimi signali. Izhodni signal SL^* je sorazmeren amplitudi vhodnega signala in ohranja njegovo fazo (linearnost):

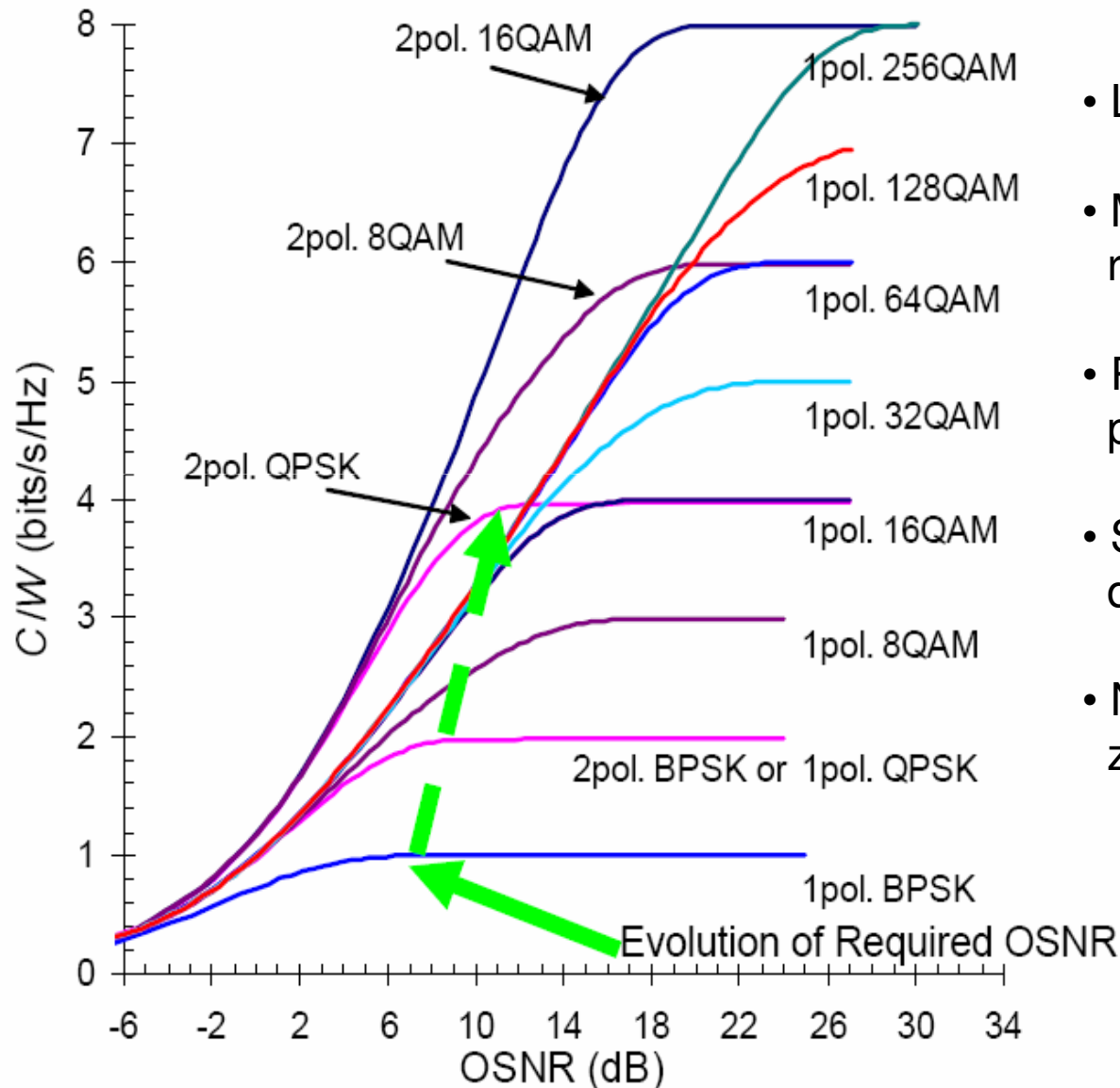


Občutljivost zveze s koherentno detekcijo



- Coherent Rx improves Rx sensitivity
- Soft-decision front end compatible with soft decision FEC
- Compensation of the dispersion in DSP
- Potential nonlinearity compensation in DSP
- **All of the above helps with nonlinearity**

Spektralni izkoristek modulacijskih formatov



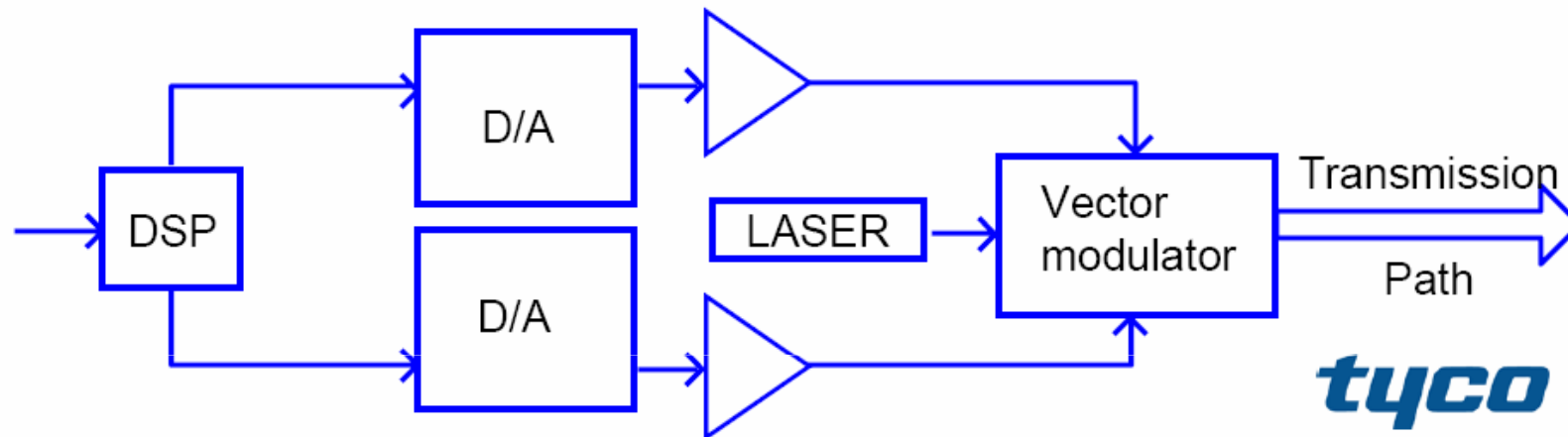
- Linearno vlakno
- Mnogonivojske modulacije višjega reda zahtevajo višji OSNR
- PolMux dvopolarizacijski kanali podvojijo spektralni izkoristek
- Spektralni izkoristek $C/W = 10$ dosežemo teoretično pri 2pol. 32C
- Nelinearnost vlakna bistveno zmanjšuje rezultate.

Definicija:

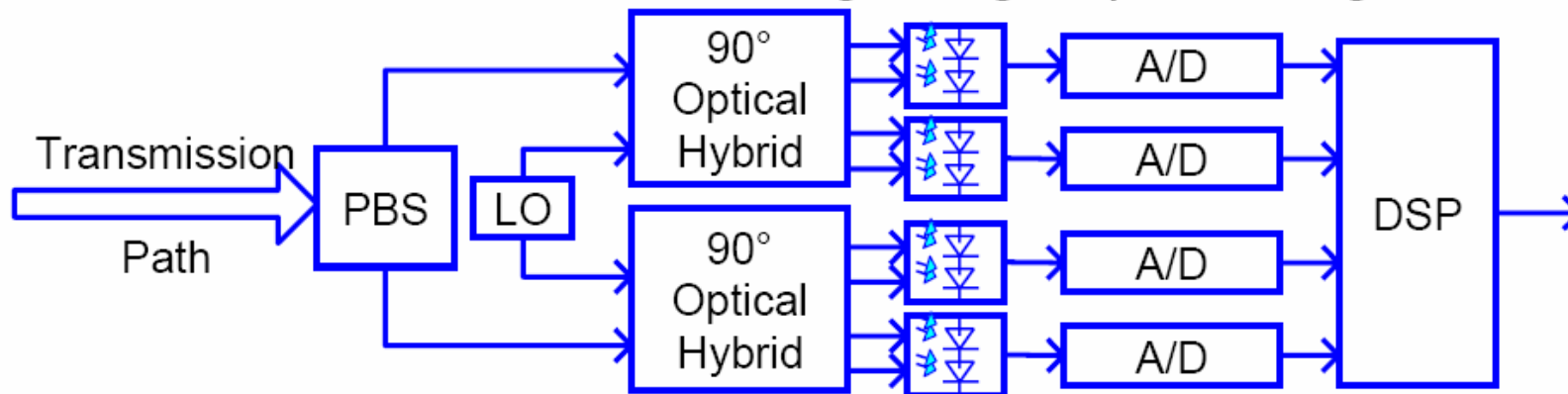
OSNR (dB)/spektralni izkoristek

DSP v Tx in Rx

Pre-distortion Tx with digital signal processing

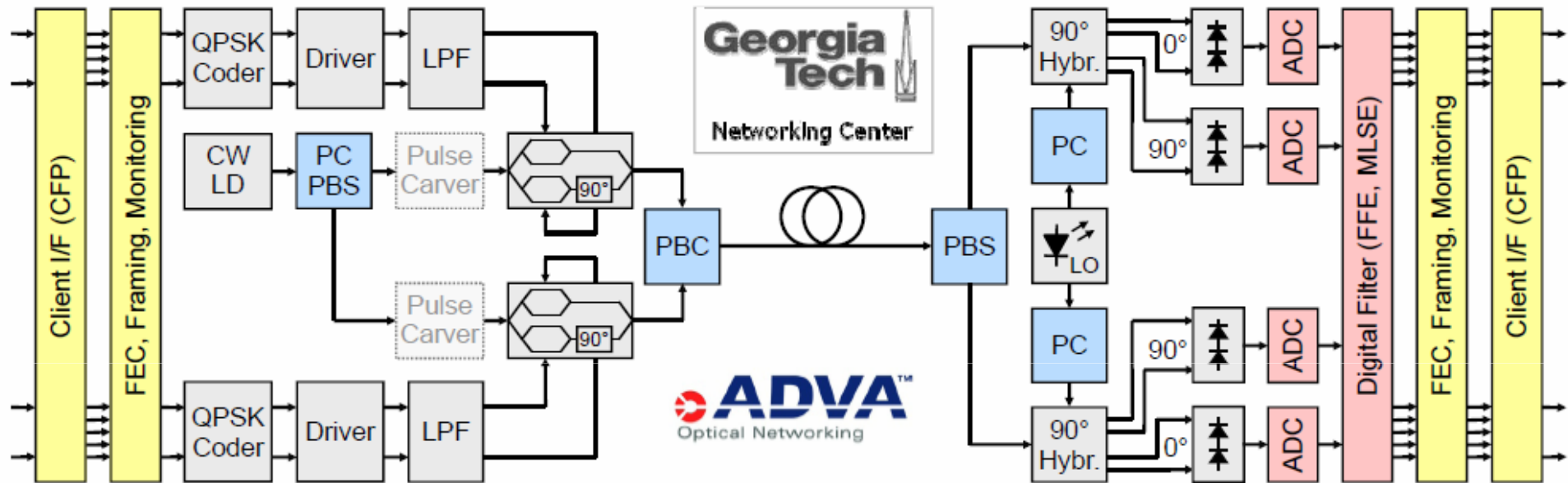


Coherent Rx with digital signal processing

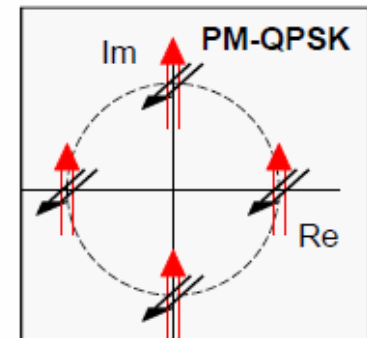


- Both schemes allow to implement nonlinearity compensating algorithms in DSP

112 Gb/s coherent PolMux QPSK



- ▶ Highest **performance** 100G transport, but highest **complexity**
- ▶ Supports 50 GHz DWDM with 28 GBd and **2 (b/s)/Hz** spectral efficiency, ROADM networking, and **2000 km** reach
- ▶ Digital filter for 4x28 Gb/s **not yet available**
- ▶ ADVA follows **early-follower** approach once components are stable
- ▶ ADVA is part of **Georgia Tech** consortium which follows PM-QPSK



Novosti s konference ECOC 2010

ECOC 2010:

3M

- **M**ulti-level modulation
- **M**ulti-core fiber
- **M**IMO

3M tehnologijami naj bi bilo mogoče v naslednjih desetih letih razviti sisteme z bitno hitrostjo 1000 Gb/s (1 Pb/s) po kanalu.

Pomembno vlogo pri večanju TDM prenosa ima napredek v hitri elektroniki.

Velika pozornost se posveča rešitvam majhno porabo energije.

KONEC