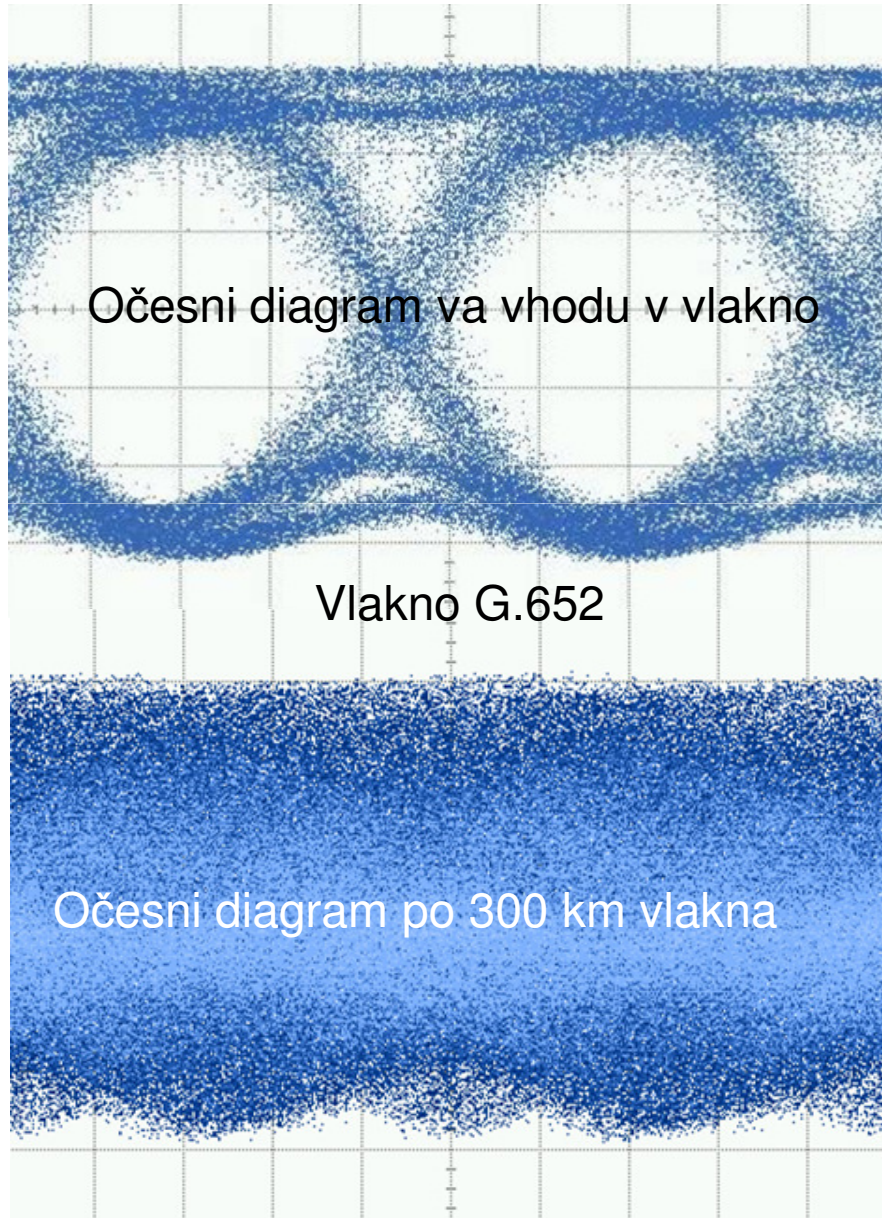


# Kompenzacija disperzije



Mobitel d.d.,  
izobraževanje

23. 4. 2010,  
predavanje 6

Prof. dr. Jožko  
Budin

# Vsebina

## 1. Vrste in načini kompenzacije:

- Kompenzacija s kompenzacijskim vlaknom
- Elektronska kompenzacija

## 2. Karakteristike kompenzacijskega vlakna

- Slabljenje, disperzija in disperzijska strmina

## 3. Primeri kompenzacije optičnih zvez

# Princip kompenzacije disperzije

Transmission fiber



Positive dispersion  
(Negative dispersion)

Longer wavelength  $\Rightarrow$  Slow (Fast)

Shorter wavelength  $\Rightarrow$  Fast (Slow)

Dispersion compensating fiber (DCF)

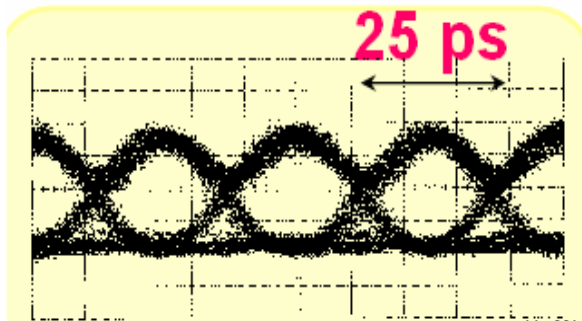


Negative dispersion  
(Positive dispersion)

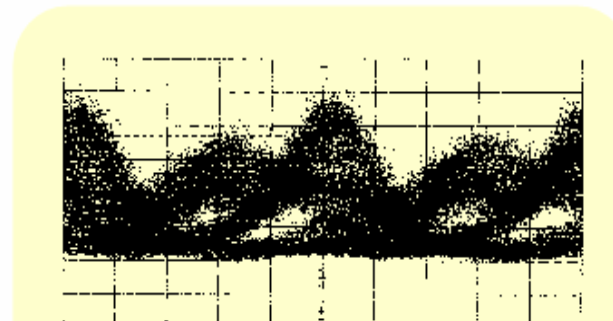
Longer wavelength  $\Rightarrow$  Fast (Slow)

Shorter wavelength  $\Rightarrow$  Slow (Fast)

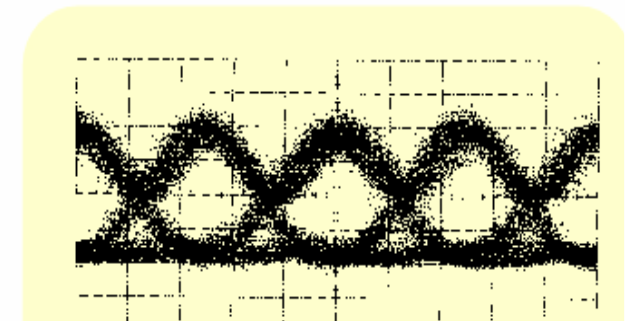
40 Gb/s optical signal



Transmitter output

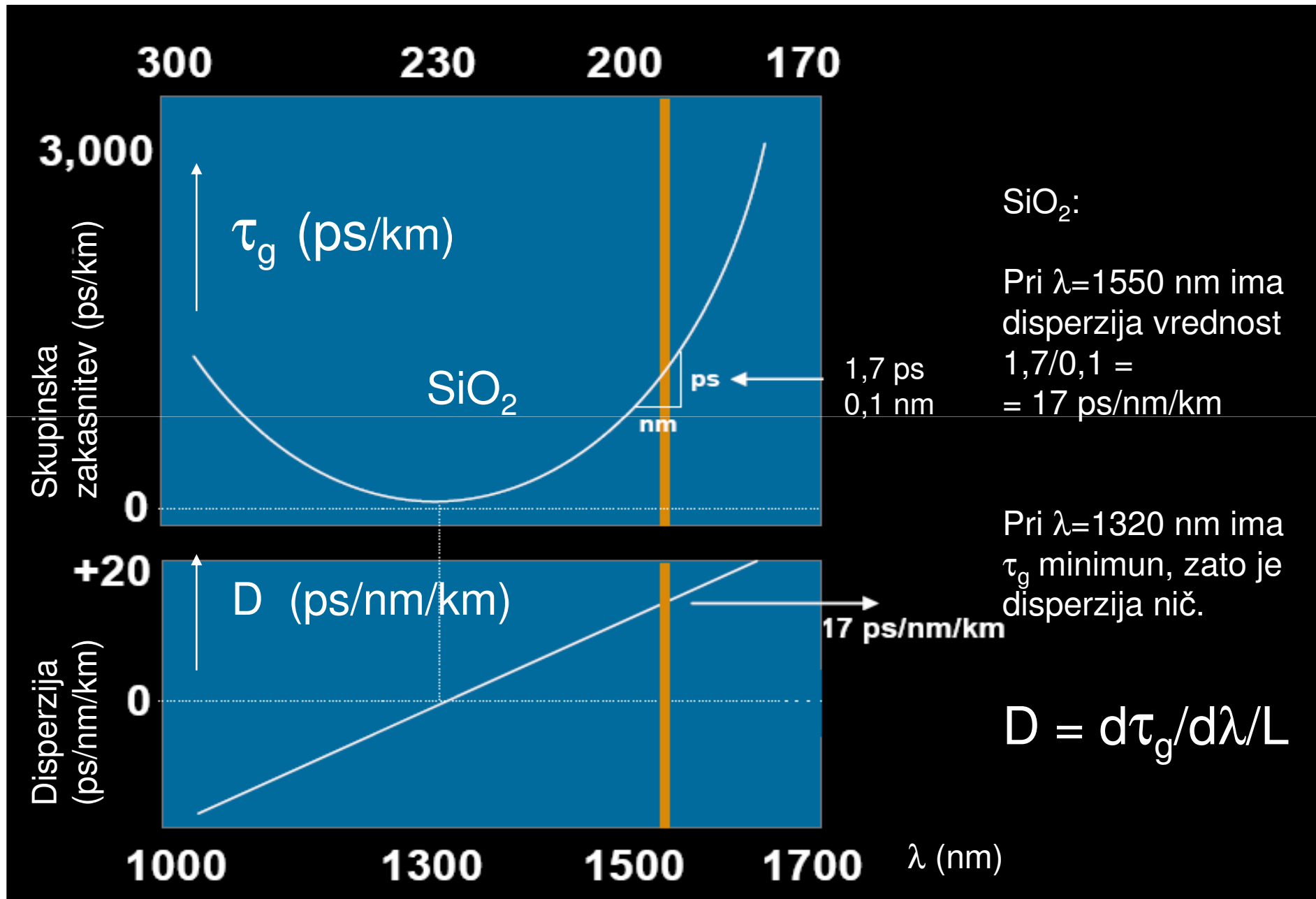


After fiber transmission



After dispersion comp.

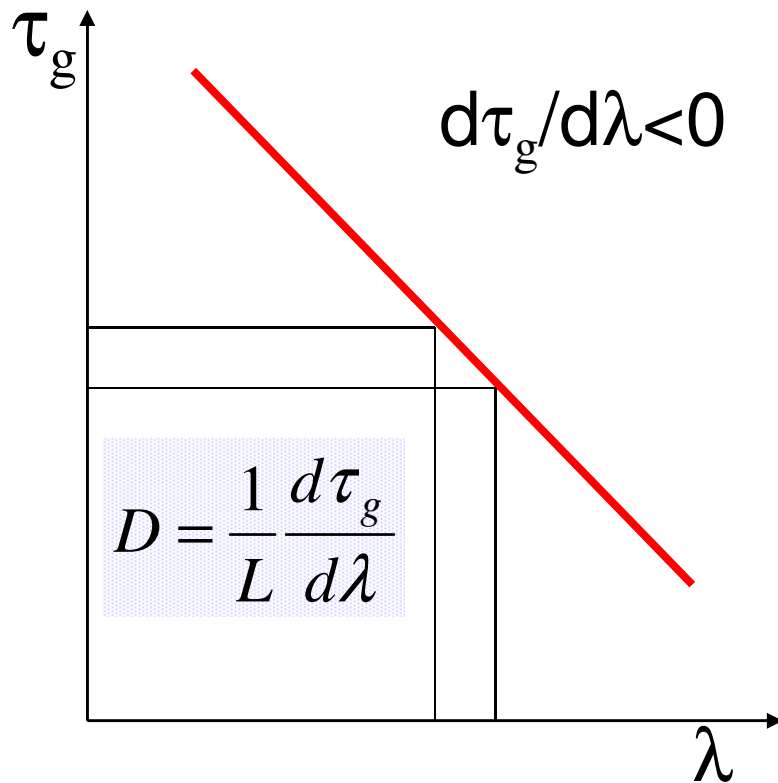
# Skupinska zakasnitev in disperzija



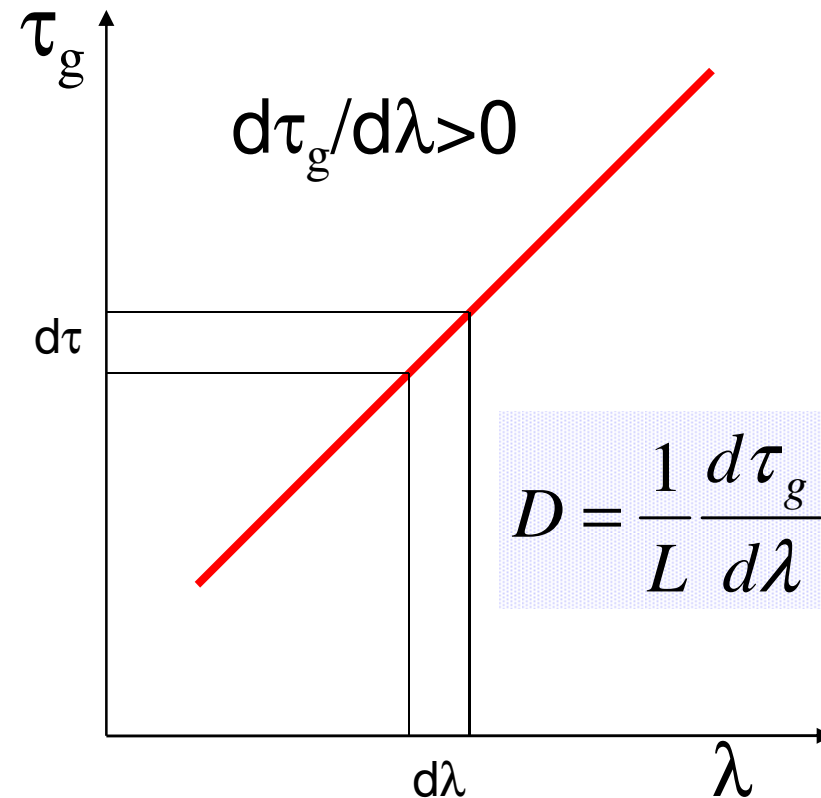
# Normalna in anomalna disperzija

Normalna disperzija  $D < 0$

Anomalna disperzija  $D > 0$



Pri krajših valovnih dolžinah je zakasnitev manjša.



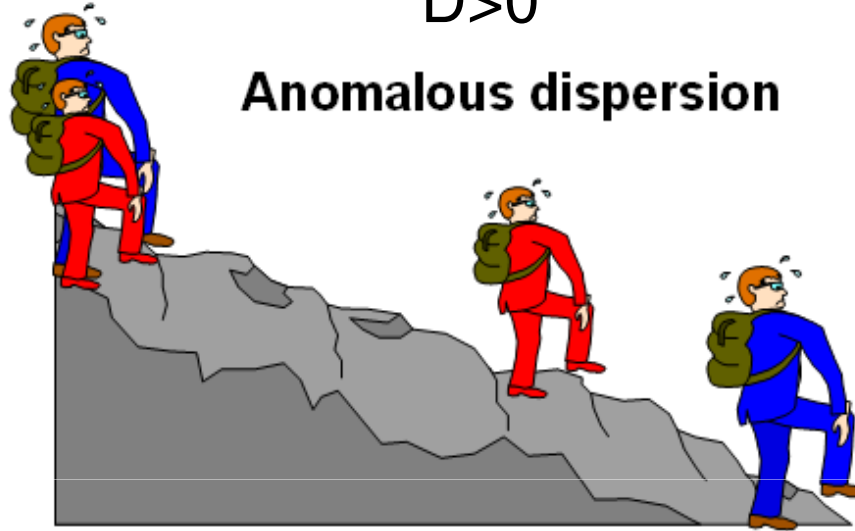
Pri daljših valovnih dolžinah je zakasnitev večja.

# Disperzija v sliki

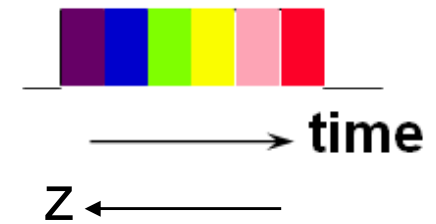
$$D > 0$$

Anomalous dispersion

Transmission fiber



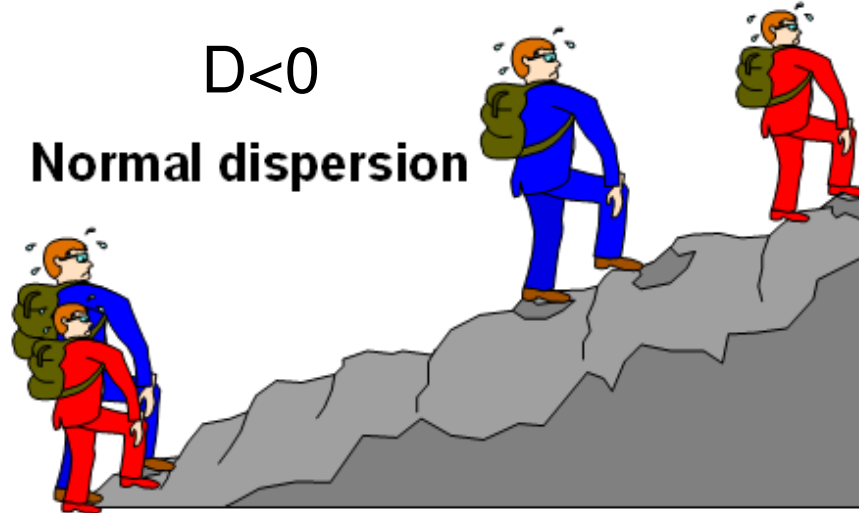
Fiber output



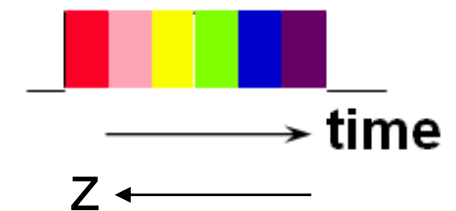
$$D < 0$$

Normal dispersion

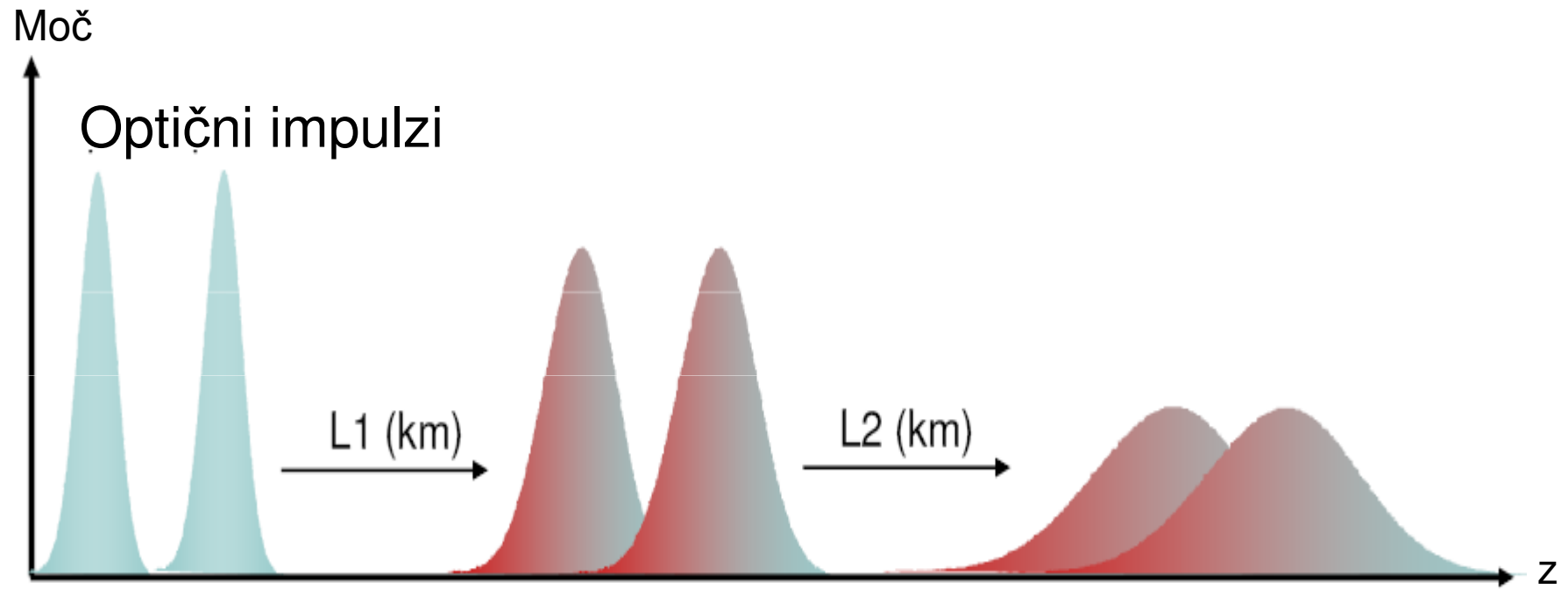
Dispersion compensator



Dispersion compensator output



# Disperzija in razpršitev impulzov v vlaknu <sup>7</sup>

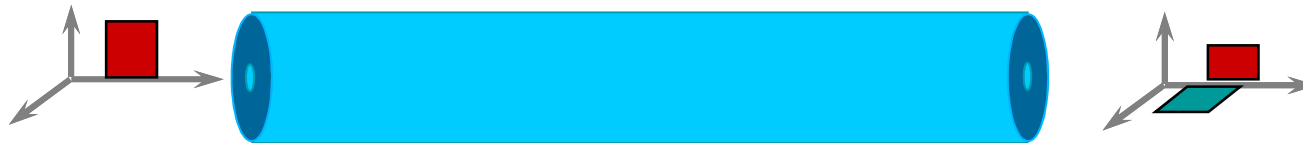


# Disperzija



- **Kromatska disperzija:**

Različne valovne dolžine prenašanega spektra potujejo z različno skupinsko hitrostjo, zato se impulz na koncu razprši (razširi)

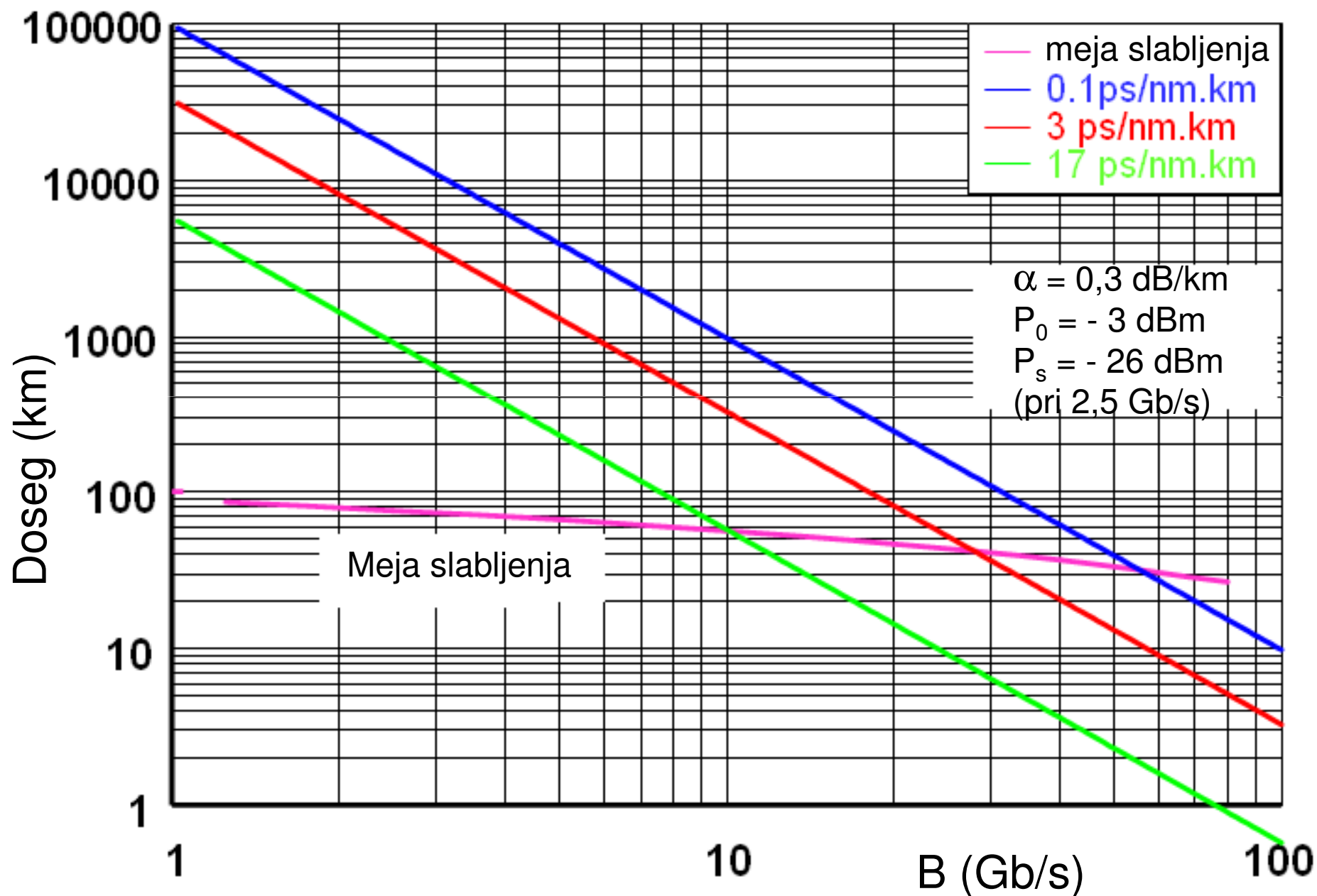


**Polarizacijska (rodovna) disperzija:**

Osnovni rod se širi po vlaknu v dveh ortogonalnih polarizacijah. Če je vlakno dvolomno, se ortogonalna rodova širita z različno skupinsko hitrostjo in postaneta njuna impulza krajevno premaknjena



# Meja slabljenja in barvne disperzije



# Načini kompenzacije disperzije

## 1. Mesto kompenzacije:

- Linijska kompenzacija (prenosno vlakno)
- Predkompenzacija (oddajnik)
- Pokompenzacija (sprejemnik)

## 2. Tehnologija kompenzacije:

- Optična (disperzijsko kompenzacijsko vlakno)
- Elektronska (digitalno procesiranje signala – DSP)

## 3. Način kompenzacije:

- OFDM (mnogonosilniški prenos ozkih spektrov)
- Fazna konjugacija (spektralna inverzija sredi prenosnega vlakna)
- Kompenzacijska naprava:
  - **Kompenzacijsko vlakno**
  - Braggova periodična struktura

# Kromatska (barvna) disperzija

Podobnega pomena kot razklon vidne svetlobe na prizmi je kromatska (snovna in valovodna) disperzija v kremenovem vlaknu. V prenosnem mediju, čigar prenosna karakteristika  $\beta(\omega)$  odstopa od linearne frekvenčne odvisnosti, se posamezni deli spektra signala različnih frekvenc širijo z različno skupinsko hitrostjo (razpršitev skupinske hitrosti). Je linearnen pojav, pri katerem se ohranja amplituda prenašanega spektra, zakasnitev (oz. hitrost širjenja) spektralnih komponent pa se spremeni, zato se ovojnica (impulz) razširi tem bolj, čim večja je širina  $\Delta\lambda$  spektra.

$$\Delta\tau_g = DL\Delta\lambda$$

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} \left( \frac{\beta}{k_0} \right) = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$$

$$n_e = \frac{\beta}{k_0}$$

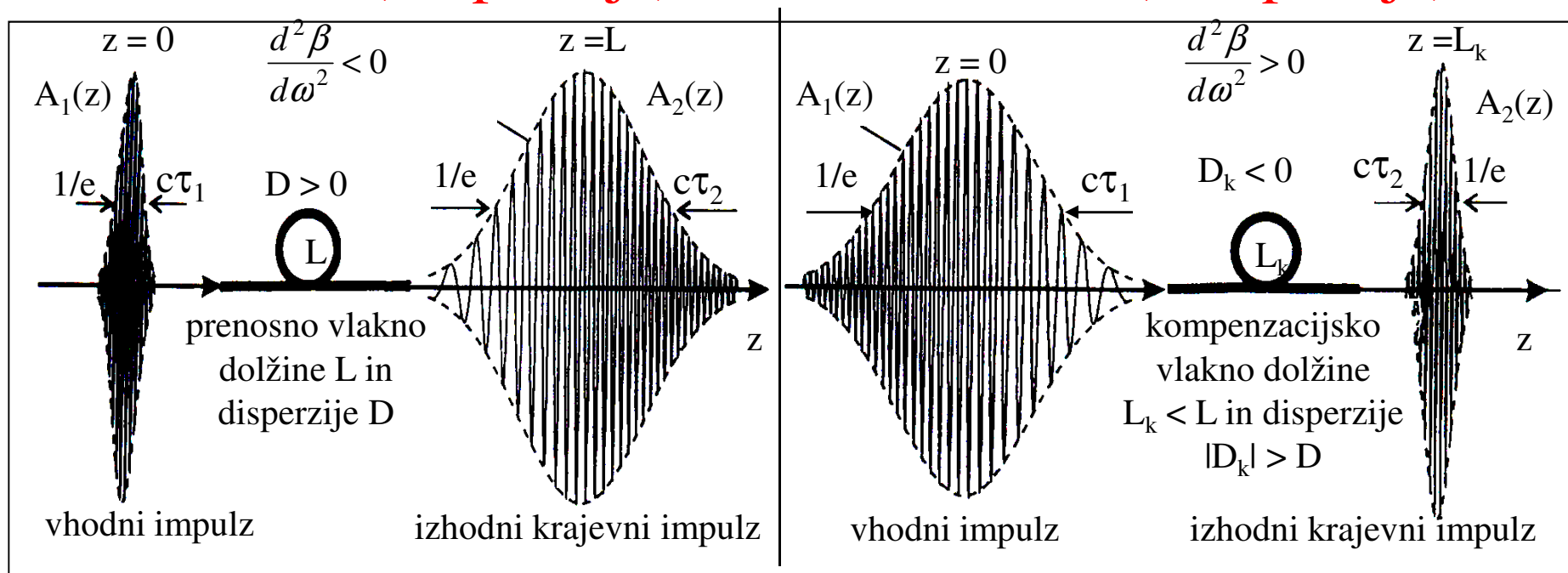
$\Delta\tau_g$  razširitev impulza

$D$  disperzijski koeficient v ps/nm/km

$n_e$  efektivni lomni količnik

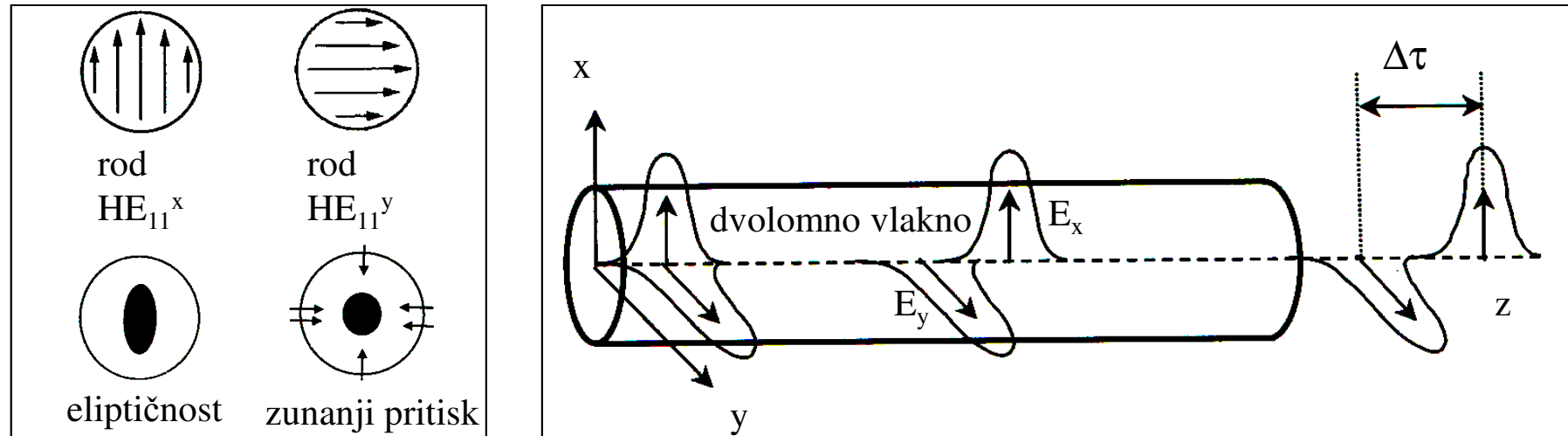
razširitev (ekspanzija)

skrčitev (kompresija)



## 2.8 POLARIZACIJSKA RODOVNA DISPERZIJA

Naključna dvolomnost (različna skupinska hitrost širjenja dveh ortogonalnih polj) vzdolž optične poti (vlakna). Impulz skupne moči dveh polarizacij se raztegne.



Povprečna vrednost diferenčne skupinske zakasnitve

$$\sigma = D_p \sqrt{L}, \quad \sigma = \sqrt{\Delta\tau^2} \quad D_p \text{ koeficient polarizacijske rodovne disperzije}$$

$$D_p \text{ položenih vlaken} \quad D_p = 0,1 - 1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

$$D_p \text{ novih vlaken} \quad D_p = 0,05 - 0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

$$D_p \text{ vrhunskih (prihodnjih) vlaken} \quad D_p < 0,01 - 0,05 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

Zaradi svoje statistične narave in odvisnosti od zunanjih vplivov je polarizacijska rodovna disperzija tehnično težko obvladljiva. Postaja končna omejitev pri zelo hitrih optičnih zvezah.

# Cilji disperzijske kompenzacije

- Zmanjšati ali izničiti barvno disperzijo in polarizacijsko rodovno disperzijo vlakenskega odseka
- Kompenzira naj se, kjer je potrebno, tudi disperzijska strmina
- Kompenzacija naj deluje v zahtevanem valovnem pasu
- Kompenzacija naj vnaša minimalno dodatno slabljenje in minimalne nelinearne pojave
- Kompenzacija naj bo polarizacijsko neodvisna
- Kompenzacija naj ne vnaša drugih motenj

# Omejitev dosega optične zveze z disperzijo

Razširitev NRZ impulza zaradi disperzije ne sme preseči določene tolerance; izhodni impulz mora ostati znotraj bitnega intervala. Ta je tem manjši, čim večja je bitna hitrost. Omejitev zveze zaradi disperzije zato narašča z bitno hitrostjo. Razlikujemo:

- **kromatska disperzija - nezahtevna optična zveza.** V spektru prevladuje spekter vira nad modulacijskim spektrom ( $\Delta v \gg \Delta f$ ). Vir je npr. laser F-P.

$$4BL|D|\Delta\lambda \leq 10^3$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrtni bitnega intervala

$B$	bitna hitrost v Gb/s
$L$	dolžina vlakna v km
$\Delta\lambda$	širina spektra v nm
$D$	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo že pri bitnih hitrostih pod 1 Gb/s.

- **Kromatska disperzija - sodobna optična zveza.** V spektru prevladuje modulacijski spekter nad spektrom vira ( $\Delta f \gg \Delta v$ ). Vir je npr. laser DFB ali DBR z zunanjo modulacijo.

$$B^2 L |D| \leq 10^5$$

omejitev pri pogoju, da se impulz razširi za največ četrtni bitnega intervala

$B$	bitna hitrost v Gb/s
$L$	dolžina vlakna v km
$D$	koeficient kromatske disperzije v ps/nm/km

Disperzija omejuje optično zvezo že pri bitnih hitrostih  $B > 10$  Gb/s.

- **Polarizacijska rodovna disperzija - zelo hitra optična zveza:**

$$B^2 L D_p^2 \leq 10^4$$

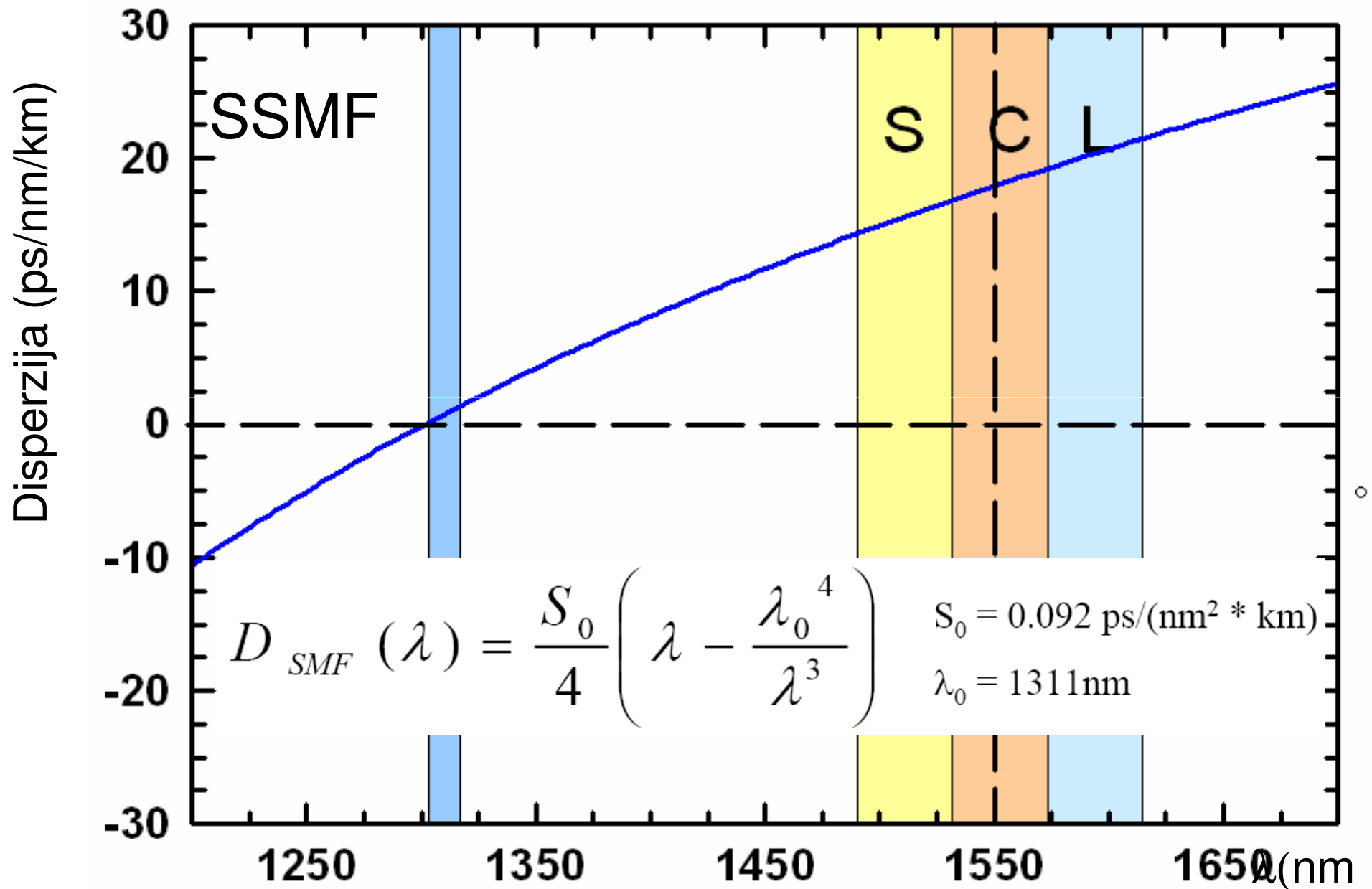
omejitev pri pogoju, da se impulz razširi največ za 0,1 bitnega intervala

$B$	bitna hitrost v Gb/s
$L$	dolžina vlakna v km
$D_p$	koeficient polarizacijske rodovne disperzije v ps/km <sup>1/2</sup>

Disperzija močno omejuje optično zvezo pri bitnih hitrostih  $B > 40$  Gb/s.

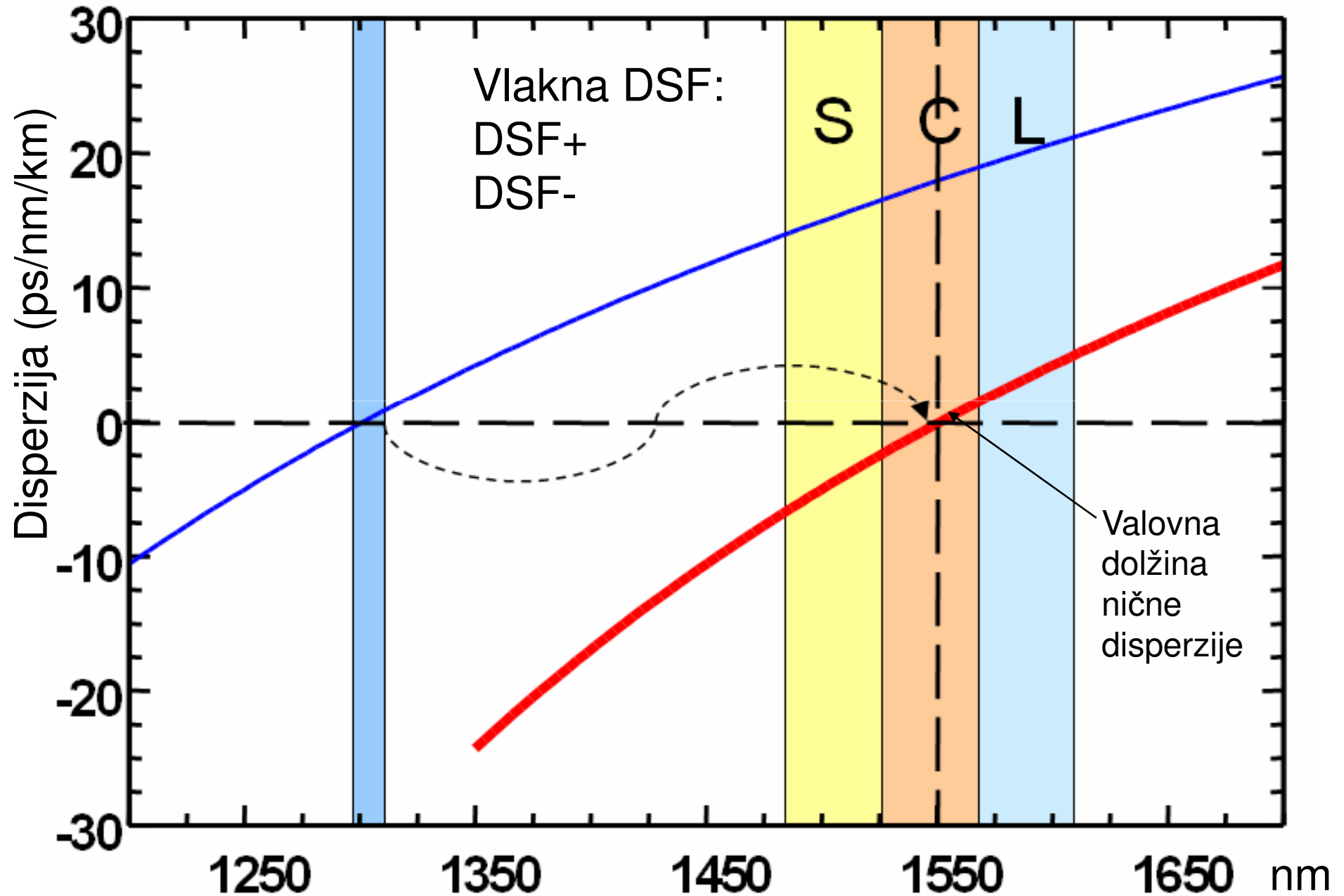
# Vlakna za prenos in kompenzacijo

# Standardno enorodovno optično vlakno





# Premik nične disperzije vlakna



# Disperzijsko premaknjena vlakna

Premik nične disperzije v področje nizkegslabljenja okoli  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

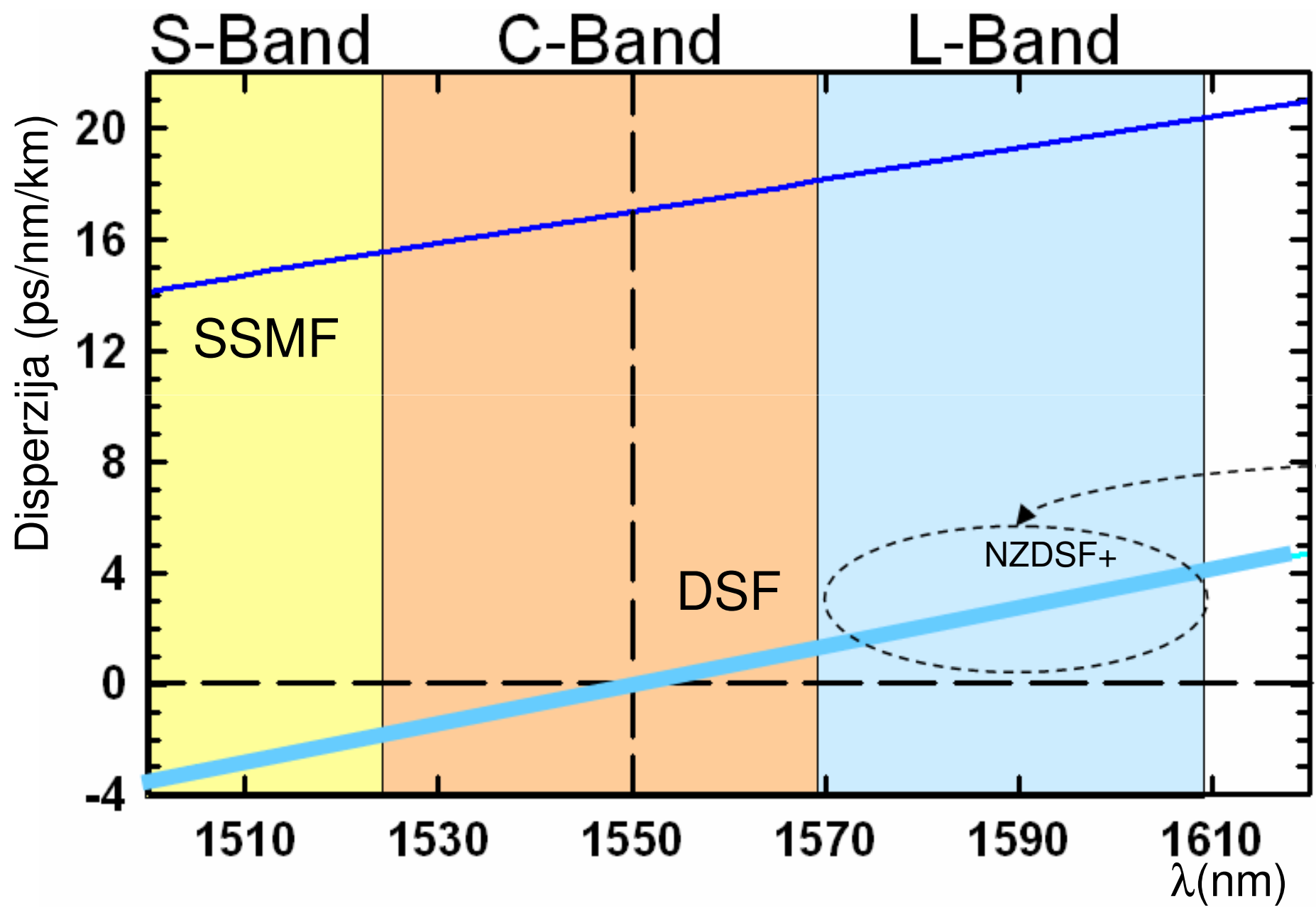
- DSF: nična disperzija pri  $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- NZDSF+: znižana pozitivna disperzija ( $D = 2, 4, 8 \text{ ps/nm/km}$ ) pri  $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- NZDSF- : znižana negativna disperzija ( $D = -2, -4, -8 \text{ ps/nm/km}$ ) pri  $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- NZDSF: znižana (ali povišana) vrednost strmine  $S$
- NZDSF LEAF: vlakno povečane efektivne površine  $A_{\text{ef}}$

Pravilo kompenzacije:

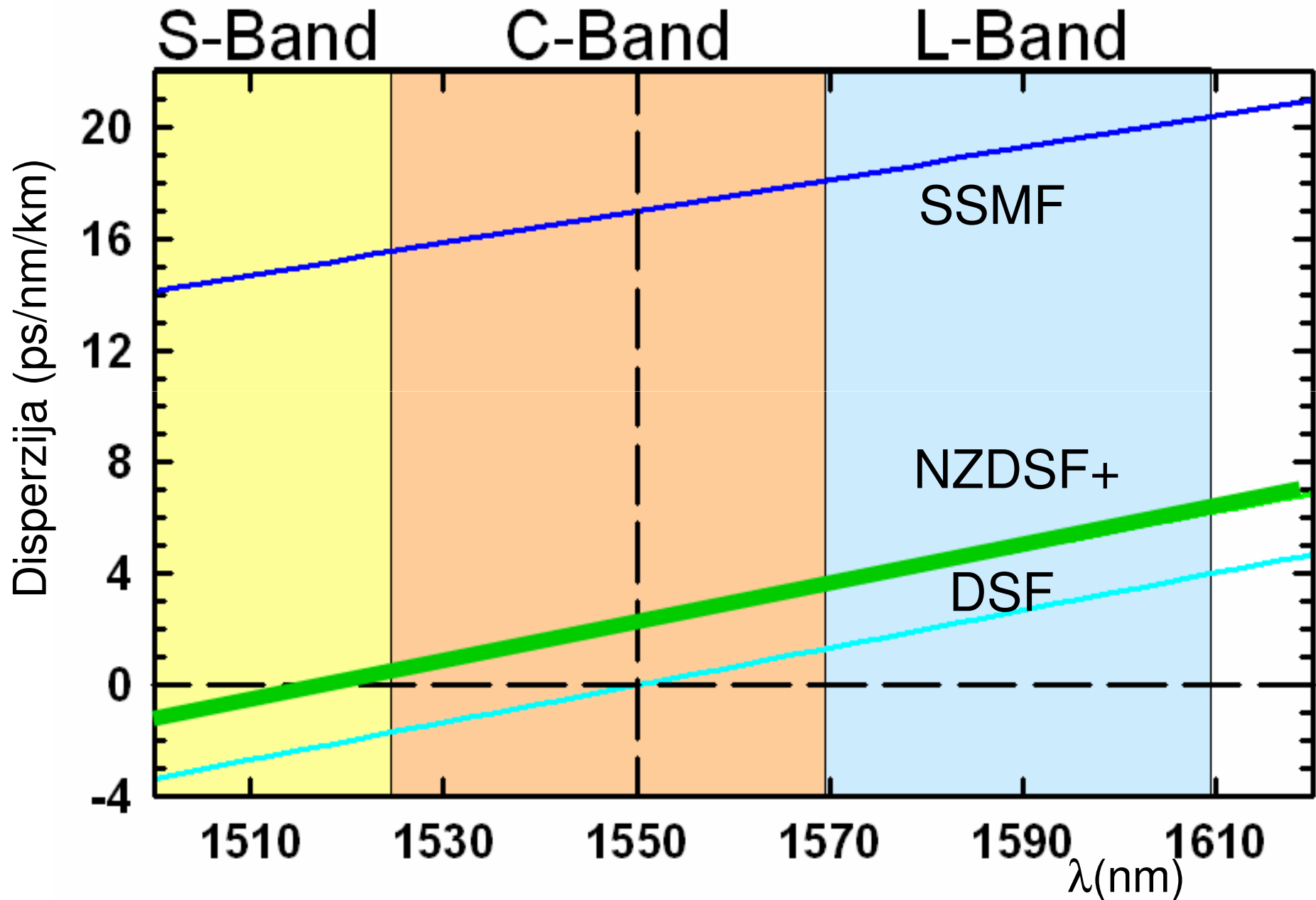
$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \text{ in v posebnih primerih:}$$

$$S_1 = - S_2$$

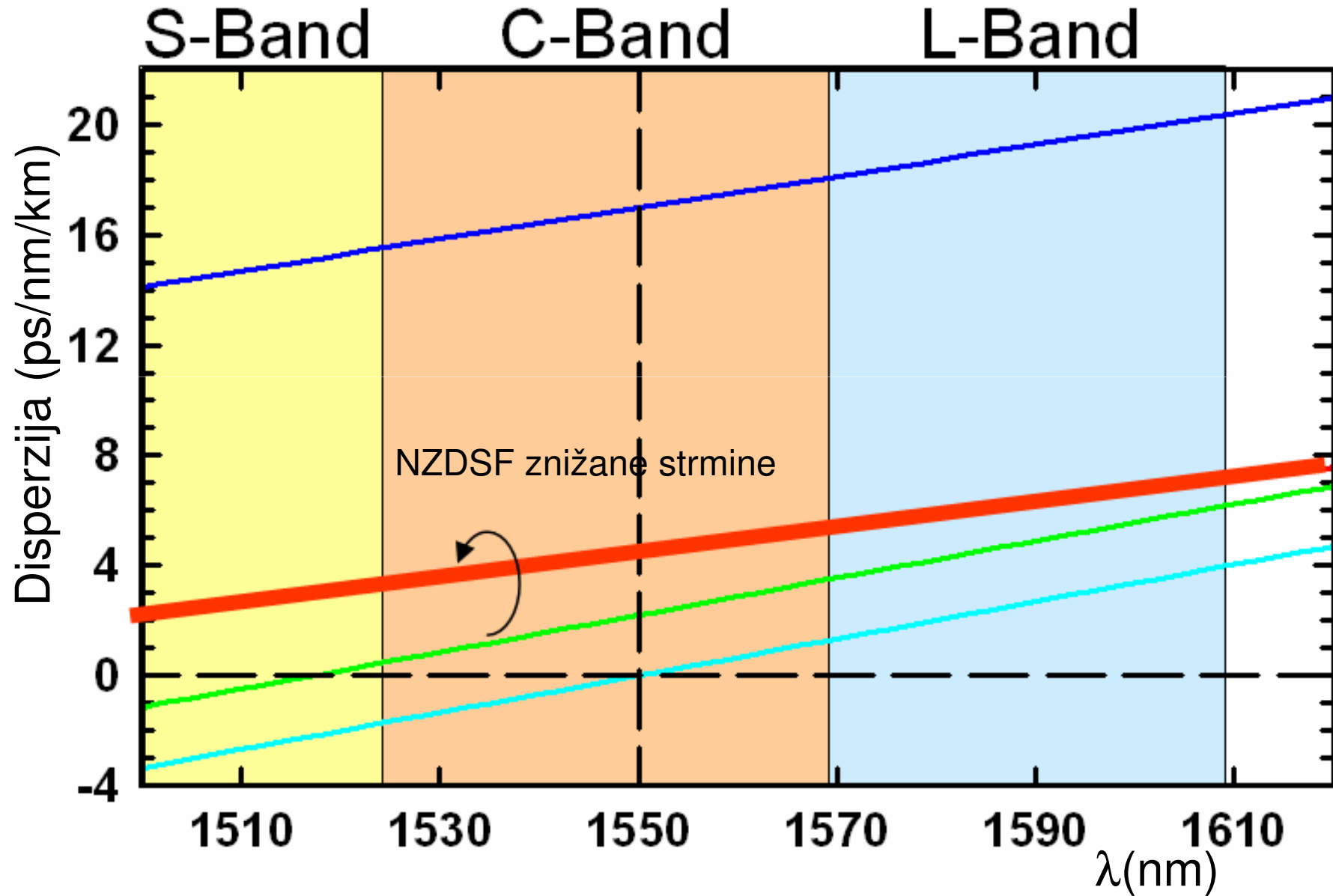
# Disperzijsko premaknjeno vlakno (DSF)<sup>19</sup>



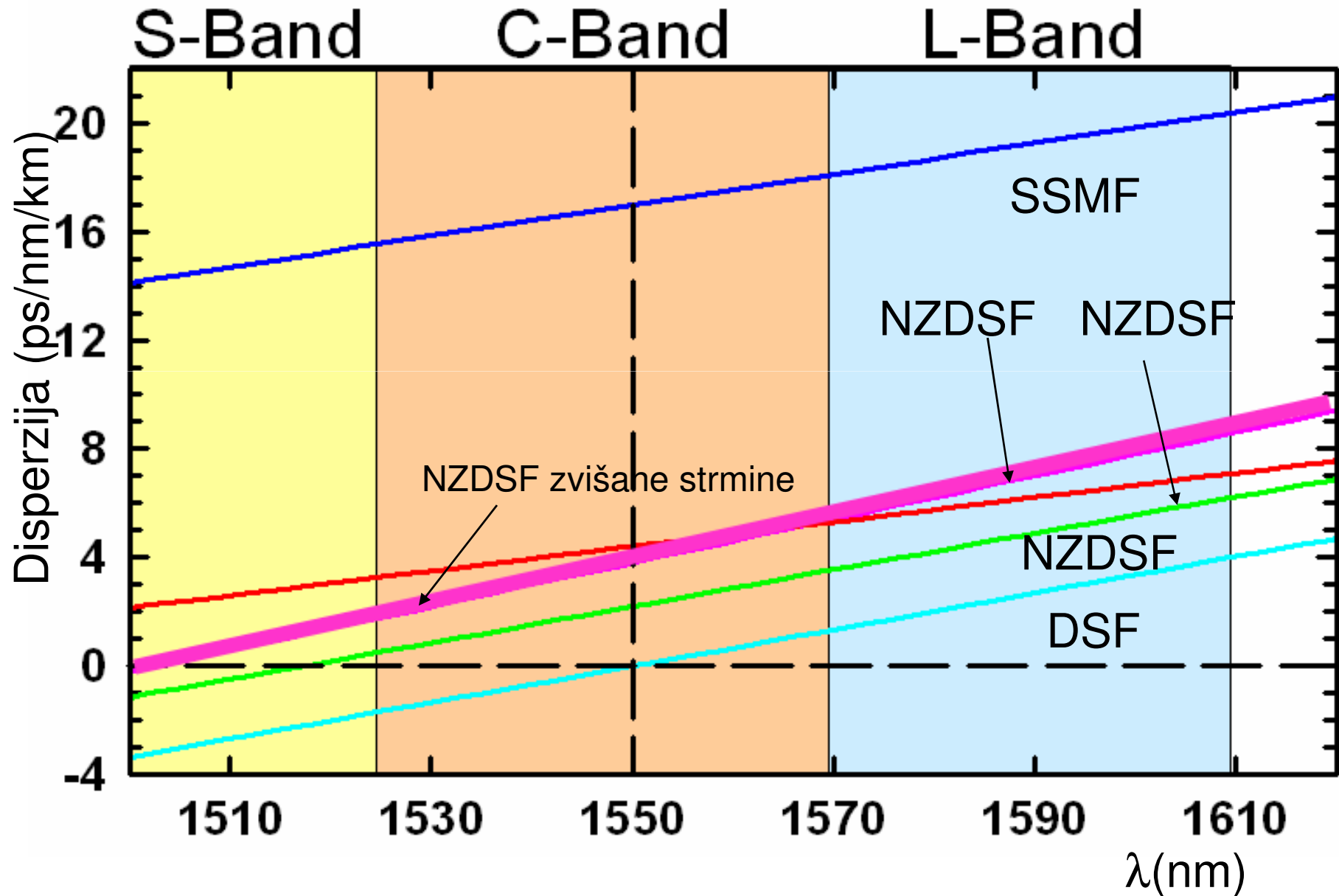
# Disperzijsko premaknjeno vlakno (NZDSF)<sup>20</sup>



# Disperzijsko premaknjeno vlakno (NZDSF)<sup>21</sup>

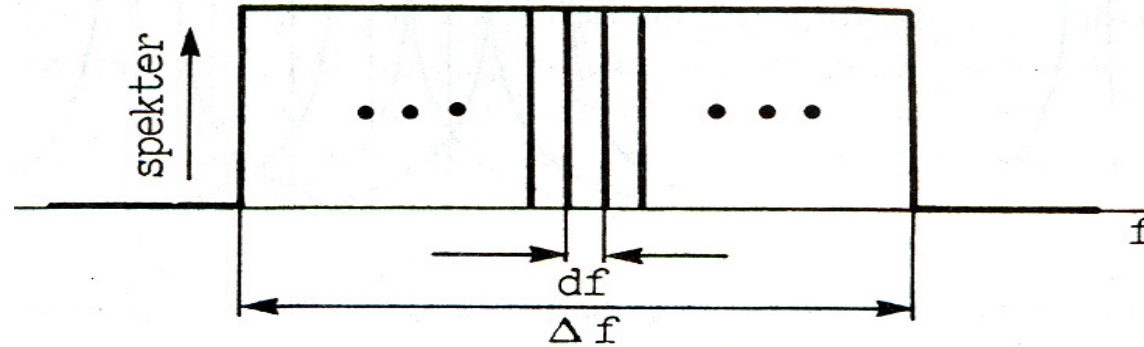


# Disperzijsko premaknjeno vlakno (NZDSF)



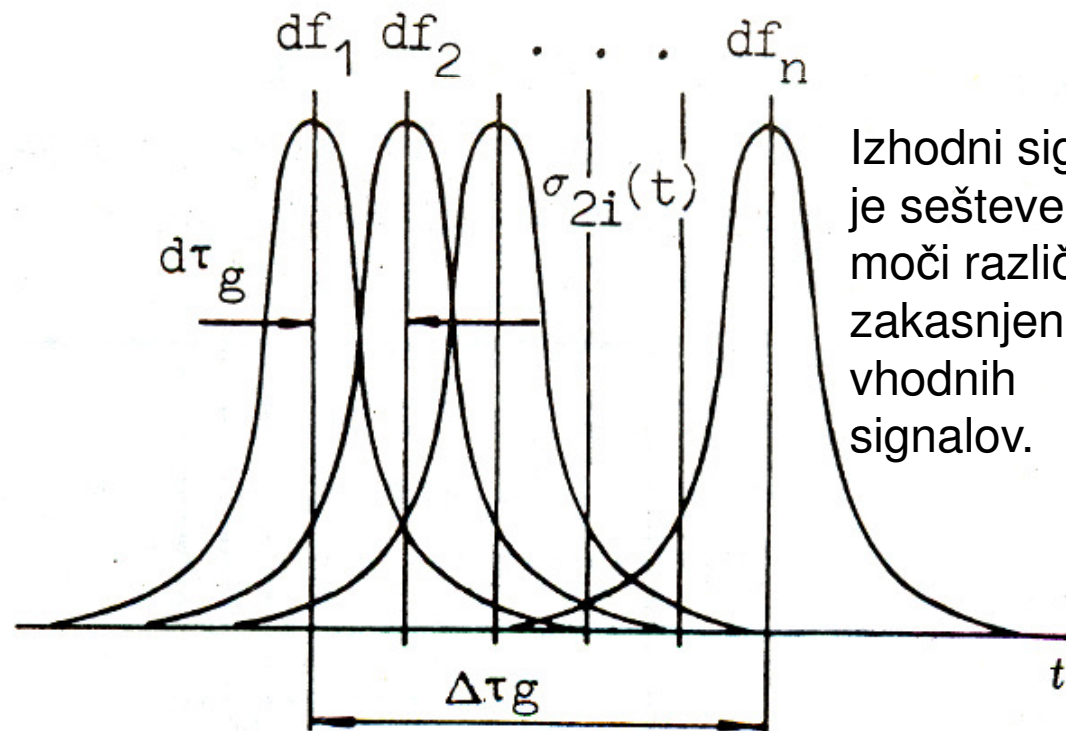
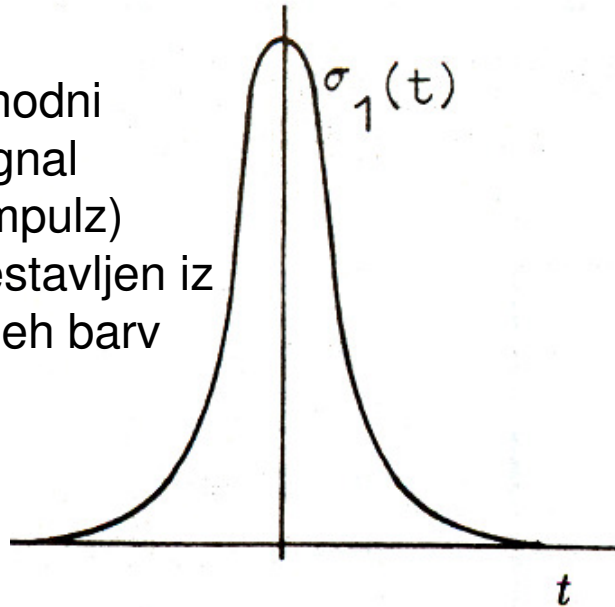
# Kromatska disperzija

- Spektralni paketi



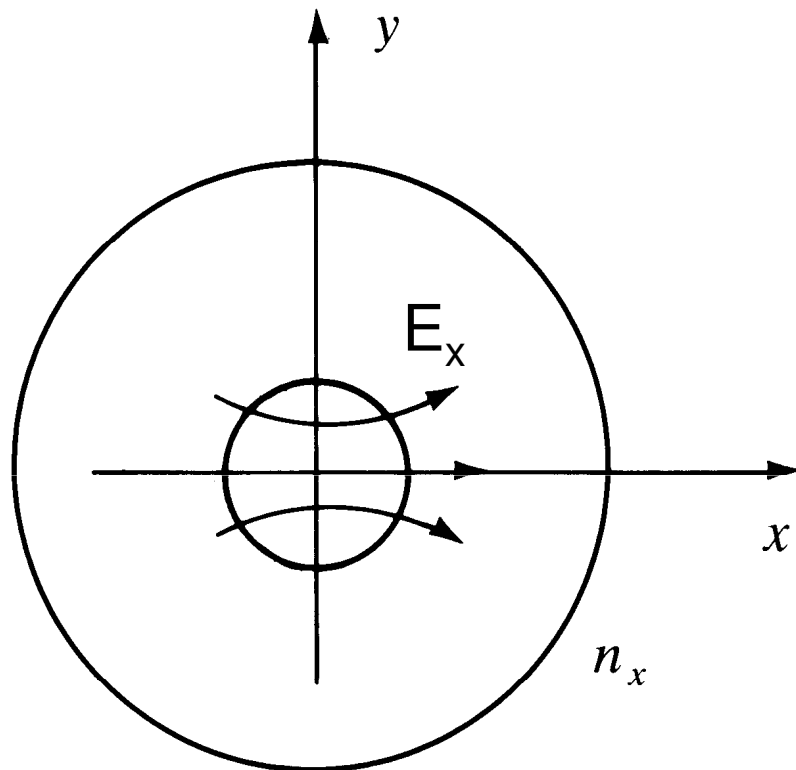
- Valovni paketi

Vhodni signal (impulz) sestavljen iz vseh barv

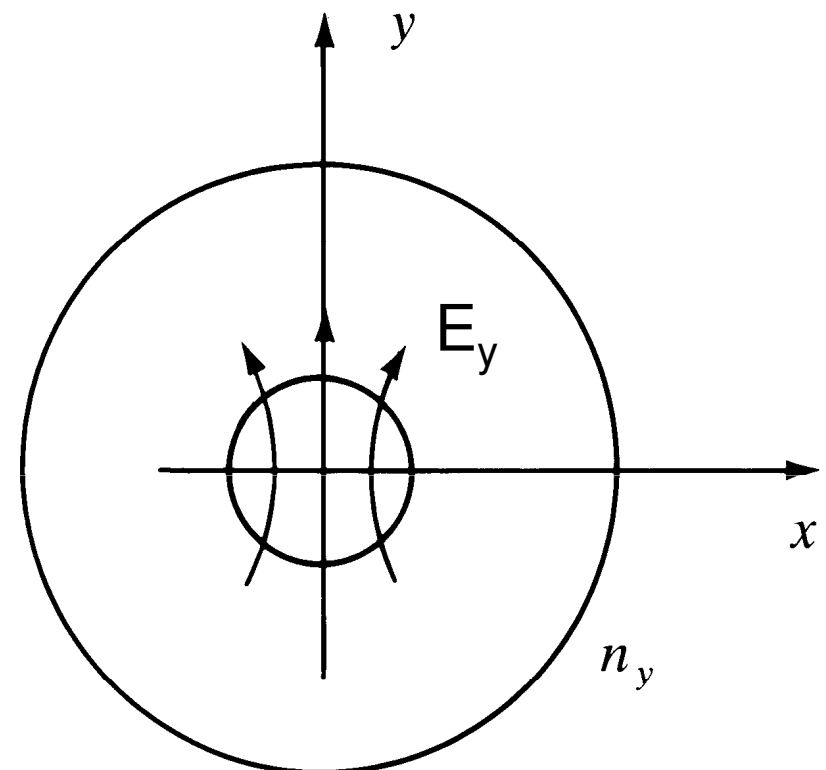


Izhodni signal je seštevek moči različno zakasnenih vhodnih signalov.

# Polarizacijska rodovna disperzija



Horizontal mode

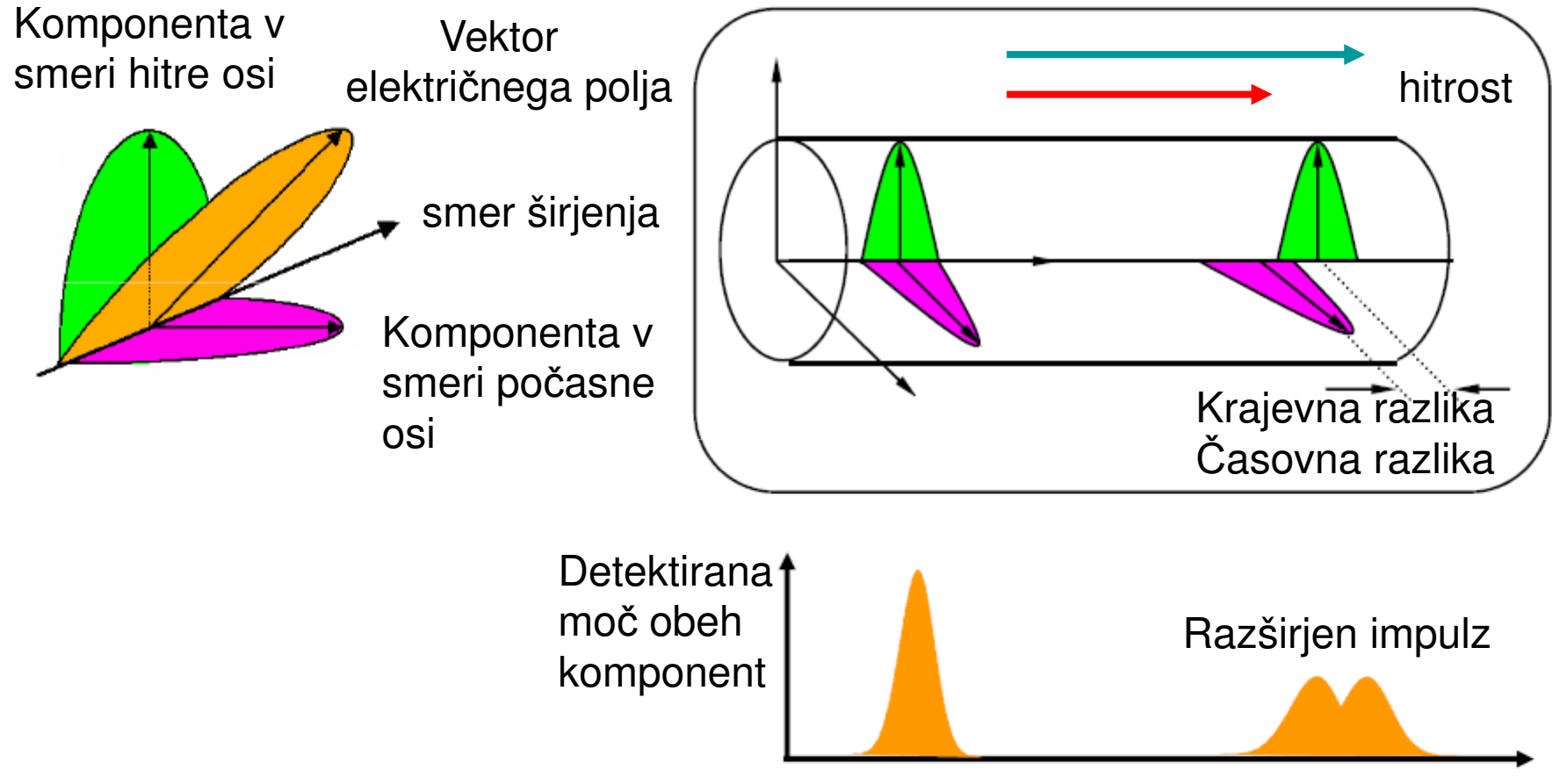


Vertical mode

V primeru, da sta  $n_x$  in  $n_y$  različna, je vlakno dvolomno. Valova  $E_x$  in  $E_y$  se širita z različno hitrostjo.



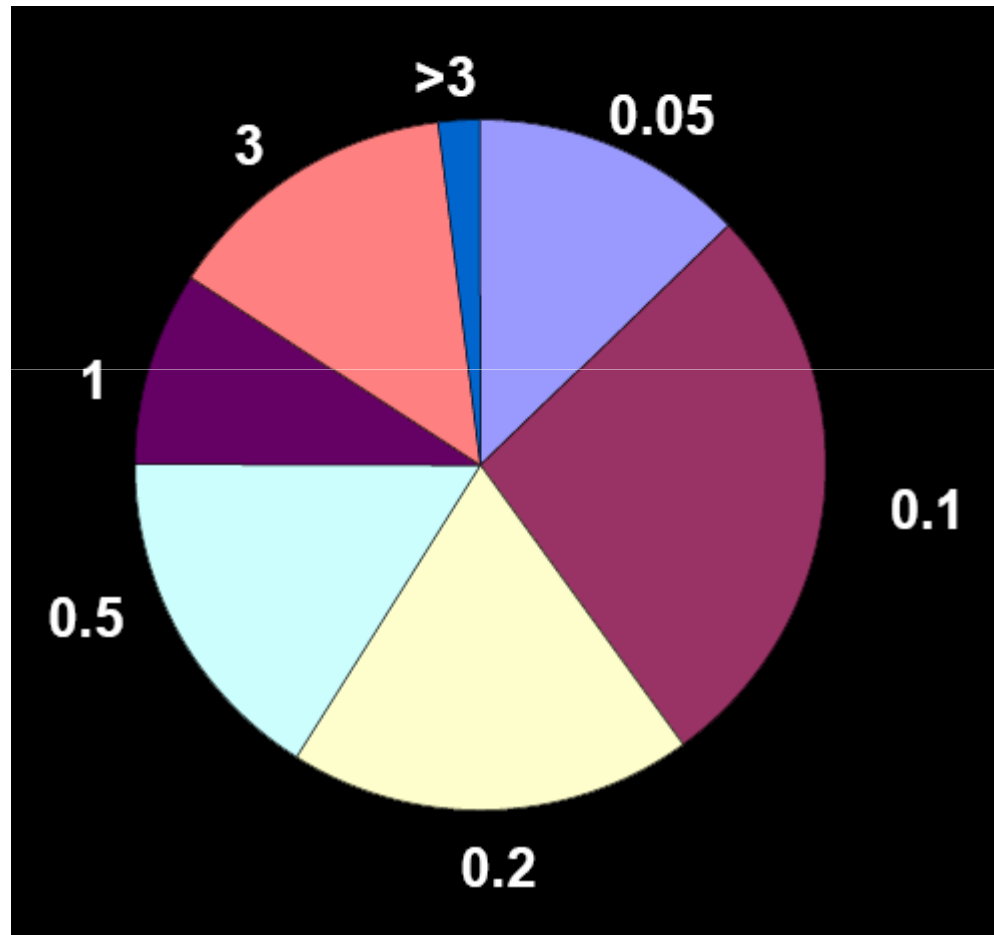
# Polarizacijska rodovna disperzija (PMD)



Zaradi zunanjih vplivov na vlakno se hitra in počasna os krajevno spreminjata.

# Polarizacijska rodovna disperzija

Koeficient PMD (ps/(km)<sup>0,5</sup>)



- Merjeno na 2266 odsekih dolžine 80 km
- Starejša vlakna imajo visoko vrednost PMD
- Novejša vlakna imajo PMD 0,1 ali manj, npr. <0,05

Starejša položena vlakna za prenos kanalov bitne hitrosti > 10 Gb/s niso uporabna,

# Parametri prenosnega vlakna

- **Slabljenje  $\alpha$**  (attenuation):

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P(0)}{P(L)} = 4,343\alpha,$$

kjer je  $P(0)$  moč na začetku vlakna in je  $P(L)$  moč na koncu vlakna dolžine  $L$ .

- **Koeficient kromatske disperzije  $D$**  (chromatic dispersion coefficient):

$$D(\text{ps/nm/km}) = \frac{1}{L} \frac{d\tau}{d\lambda} \doteq \frac{1}{L} \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda},$$

kjer je  $\Delta\tau$  razširitev impulza (razlika v skupinski zakasnitvi) in je  $\Delta\lambda$  širina optičnega spektra.  $L$  je dolžina vlakna.

- **Strmina disperzije  $S$**  (dispersion slope):

$$S(\text{ps/nm}^2/\text{km}) = \left. \frac{dD}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \doteq \frac{\Delta D}{\Delta\lambda}$$

kjer je  $\lambda_0$  valovna dolžina nične disperzije. V njeni okolici je disperzija  $\Delta D \doteq S\Delta\lambda$

- **Krivina disperzije  $C$**  (dispersion curvature):

$$C(\text{ps/nm}^3/\text{km}) = \left. \frac{dS}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_0} \doteq \frac{\Delta S}{\Delta\lambda}$$

- **Koeficient polarizacijske rodovne disperzije  $D_p$**  (PMD - Polarization Mode Dispersion):

$$D_p(\text{ps}/\sqrt{\text{km}}) = \frac{\sigma}{\sqrt{L}}, \quad \sigma = \sqrt{(\Delta\tau)^2}$$

kjer je  $\sigma^2$  srednjekvadratna vrednost razlike časovnih zakasnitev med ortogonalno polariziranima osnovnima rodovoma v vlaknu.

# Karakteristike kompenzacijskih vlaken

- **Kakovost, dobrota** (Figure of Merit)

$$FOM(\text{ps/nm/dB}) = \frac{|D|}{\alpha}$$

kjer je  $D$  koeficient disperzije in  $\alpha$  slabljenje.

- **Relativna disperzijska strmina** (Relative Dispersion Slope)

$$RDS(\text{nm}^{-1}) = \frac{S}{D} \quad \text{ali} \quad \kappa(\text{nm}) = \frac{D}{S}$$

kjer je  $S$  disperzijska strmina in  $D$  disperzijski koeficient. Vlakno SSMF ima razmerje  $RDS = 0,0033$ .

- **Kompenzacijsko razmerje** (Dispersion to Slope Compensation Ratio)

$$DSCR = \frac{D_p / S_p}{D_k / S_k} = \frac{\kappa_p}{\kappa_k}$$

kjer sta  $D_p$  in  $D_k$  koeficienta disperzije in  $S_p$  ter  $S_k$  koeficienta disperzijske strmine prenosnega in kompenzacijskega vlakna. Želena vrednost tega razmerja je 1.

# Omejitve s kromatsko disperzijo

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

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) :

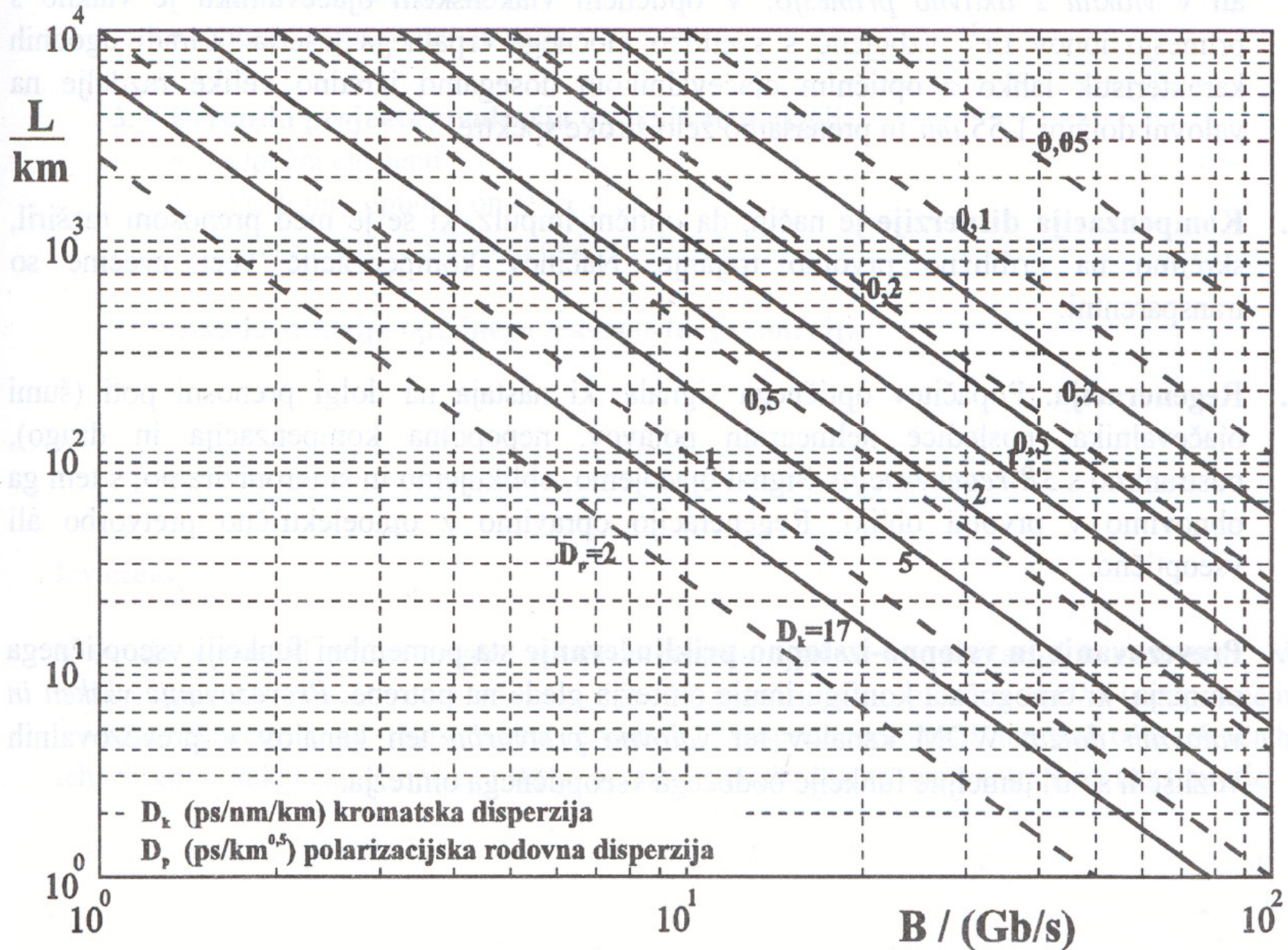
- vlakno SMF (G.652) disperzije  $D = 17$  ps/nm/km in dolžine  $L_1$
- vlakno NZDF (G.655) disperzije  $D = \pm 8$  ps/nm/km in dolžine  $L_2$
- vlakno NZDF (G.655) disperzije  $D = \pm 4$  ps/nm/km in dolžine  $L_3$

<b>B (Gb/s)</b>	<b><math>L_1</math> (km)</b>	<b><math>L_2</math> (km)</b>	<b><math>L_3</math> (km)</b>	<b>T (ps/nm)</b>
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. Pri bitnih hitrostih  $B > 80$  Gb/s, je potrebna dinamična kompenzacija disperzije.**

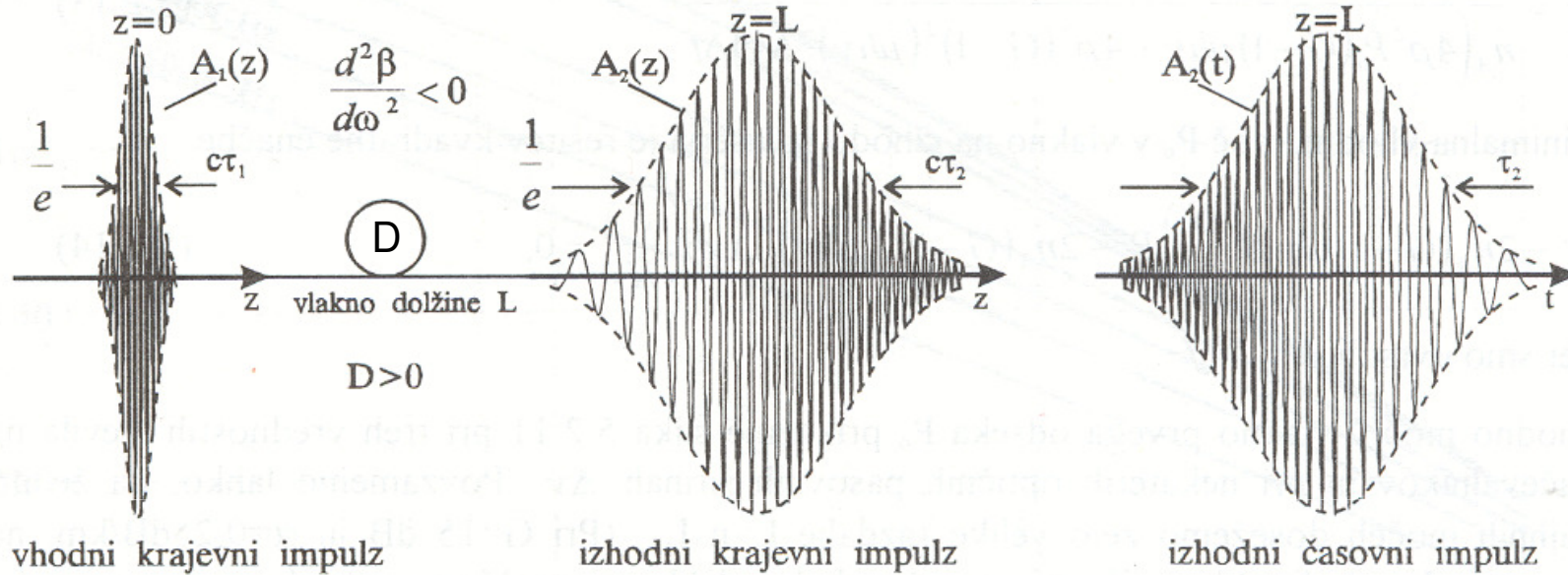
# Omeiitev dolžine z disperziijo



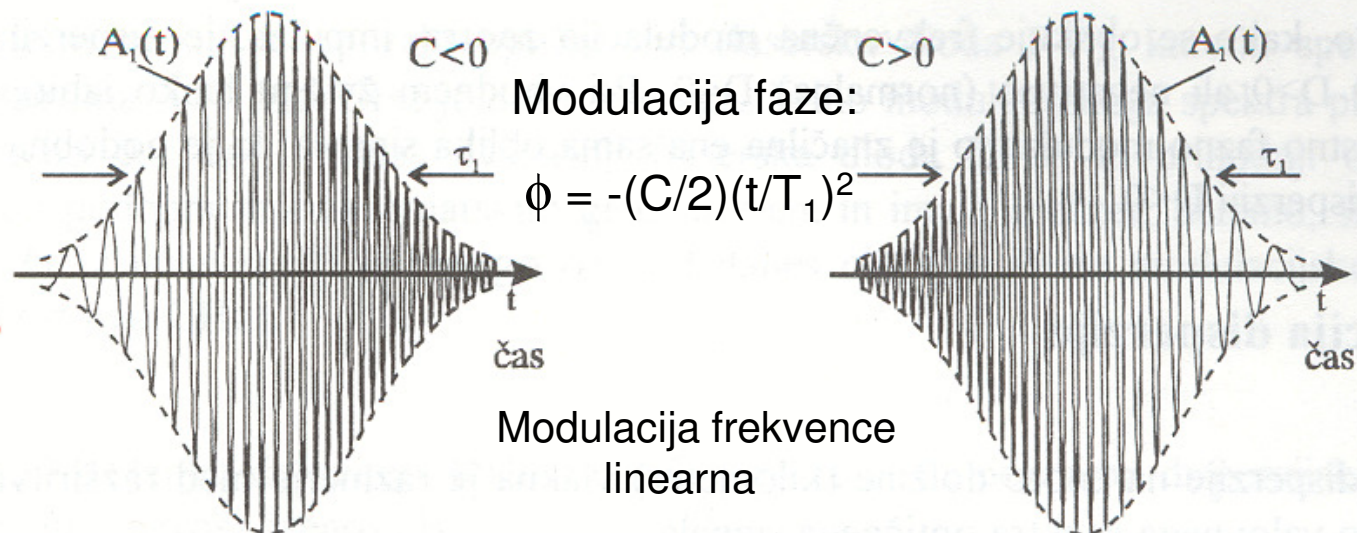
# Predkompenzacija z modulacijo

# Notranja fazna modulacija

## 1. Razširitev impulza in notranja fazna modulacija na dolžini L disperznega vlakna



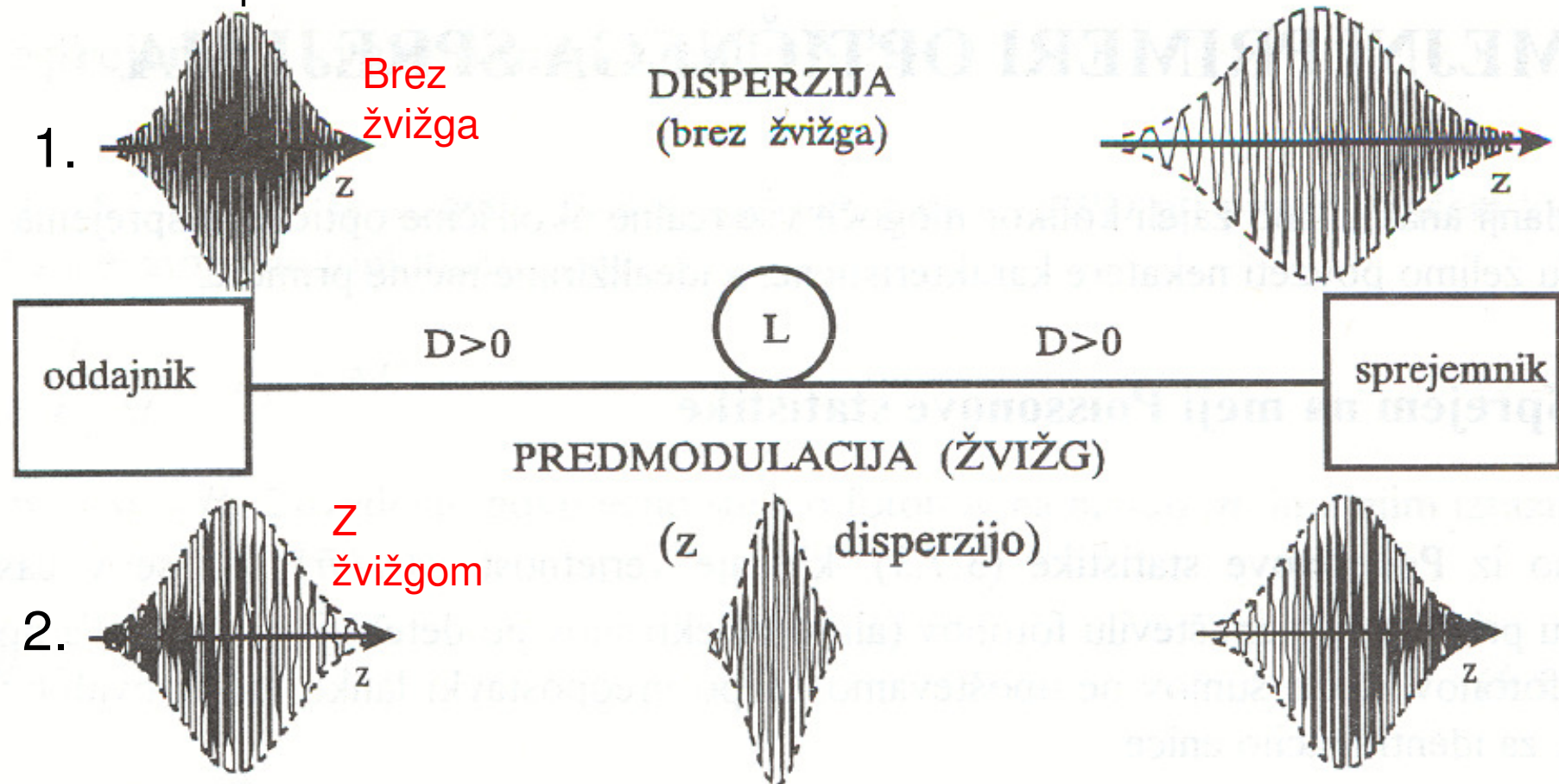
## 2. Impulz na vhodu vlakna: notranja fazna modulacija po predmodulaciji v oddajniku.





# Fazno nemoduliran in moduliran impulz

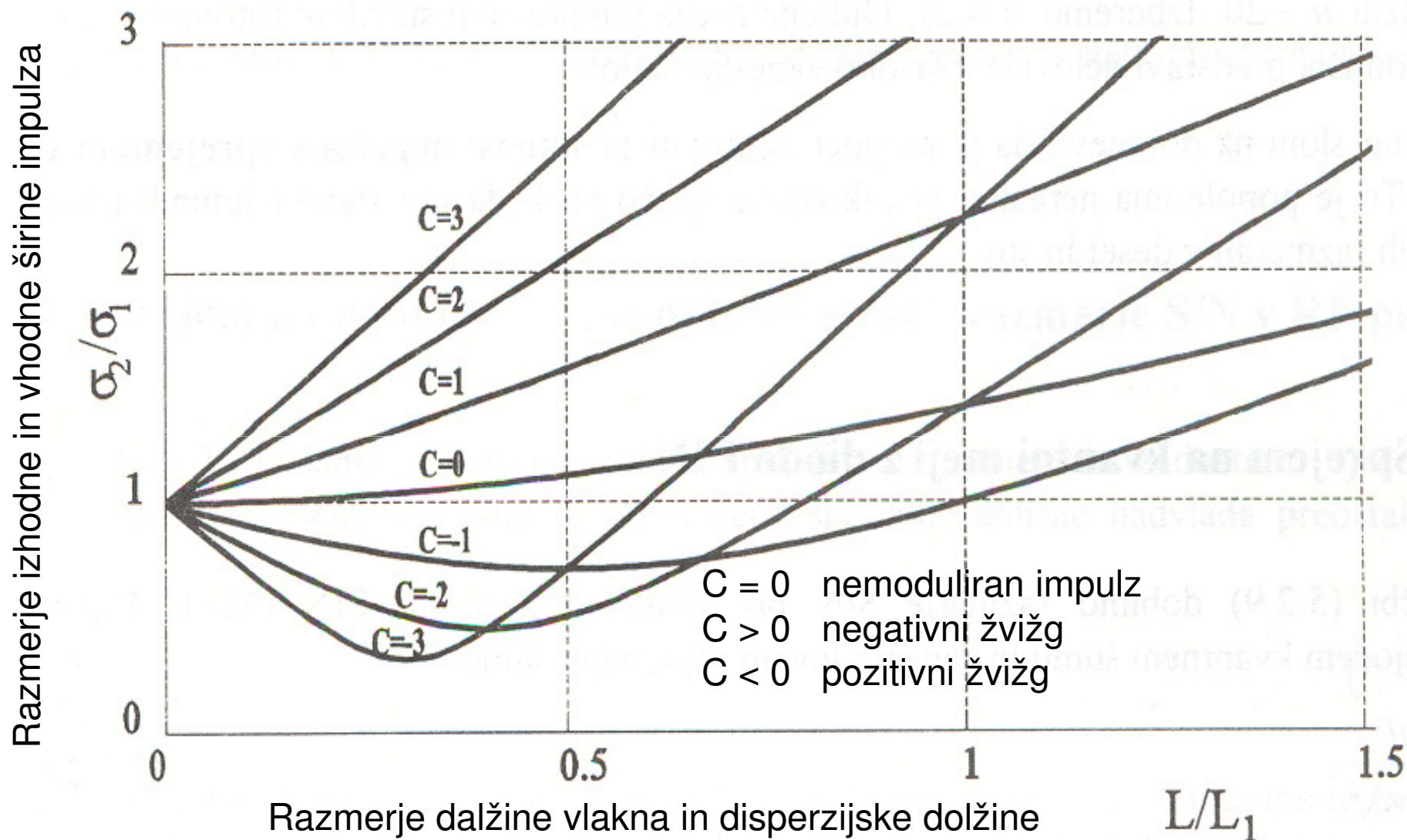
1. Vhodni fazno nemoduliran impulz se na koncu disperznega vlakna oslabi in razširi ter postane fazno oz. frekvenčno moduliran.



2. Primerno notranje fazno moduliran impulz se na vlaknu najprej skrči in postane nemoduliran, nato pa se povrne v prvotno širino in postane nasprotno moduliran.

# Širitev in krčitev moduliranega impulza

34



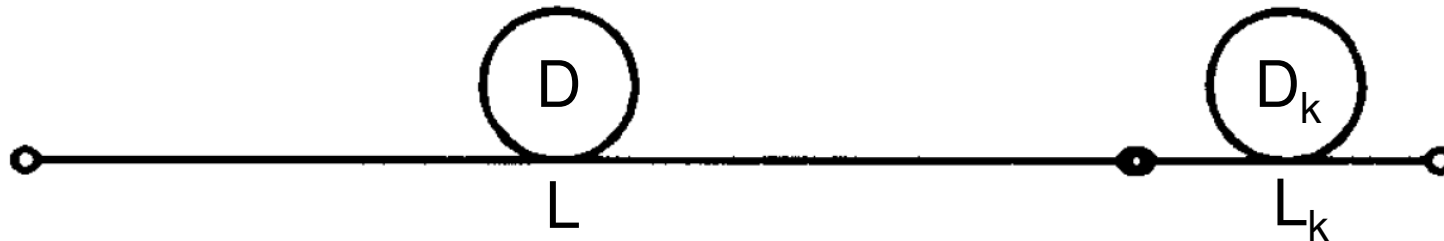
- Disperzijska dolžina  $L_1$  je dolžina vlakna, pri kateri se nemonuliran vhodni impulz razširi za koren iz 2.  $C$  je koeficient fazne modulacije

# Kompenzacija z vlaknom in periodično strukturo

Predkompenzacija  
Linijska kompenzacija  
Pokompenzacija

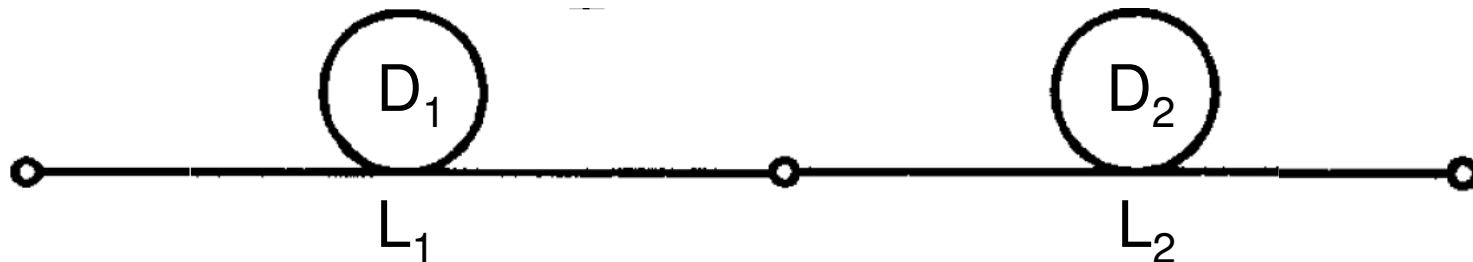
# Kompenzacija z vlaknom

1. Kompenzacija s kolutom kompenzacijskega vlakna



Pogoj kompenzacije:  $DL + D_k L_k = 0$

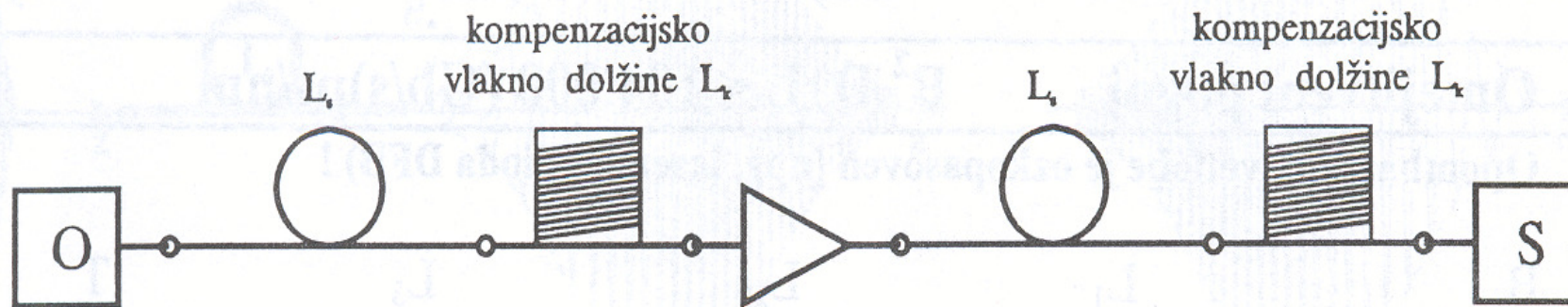
2. Kompenzacija dveh prenosnih vlaken nasprotne disperzije



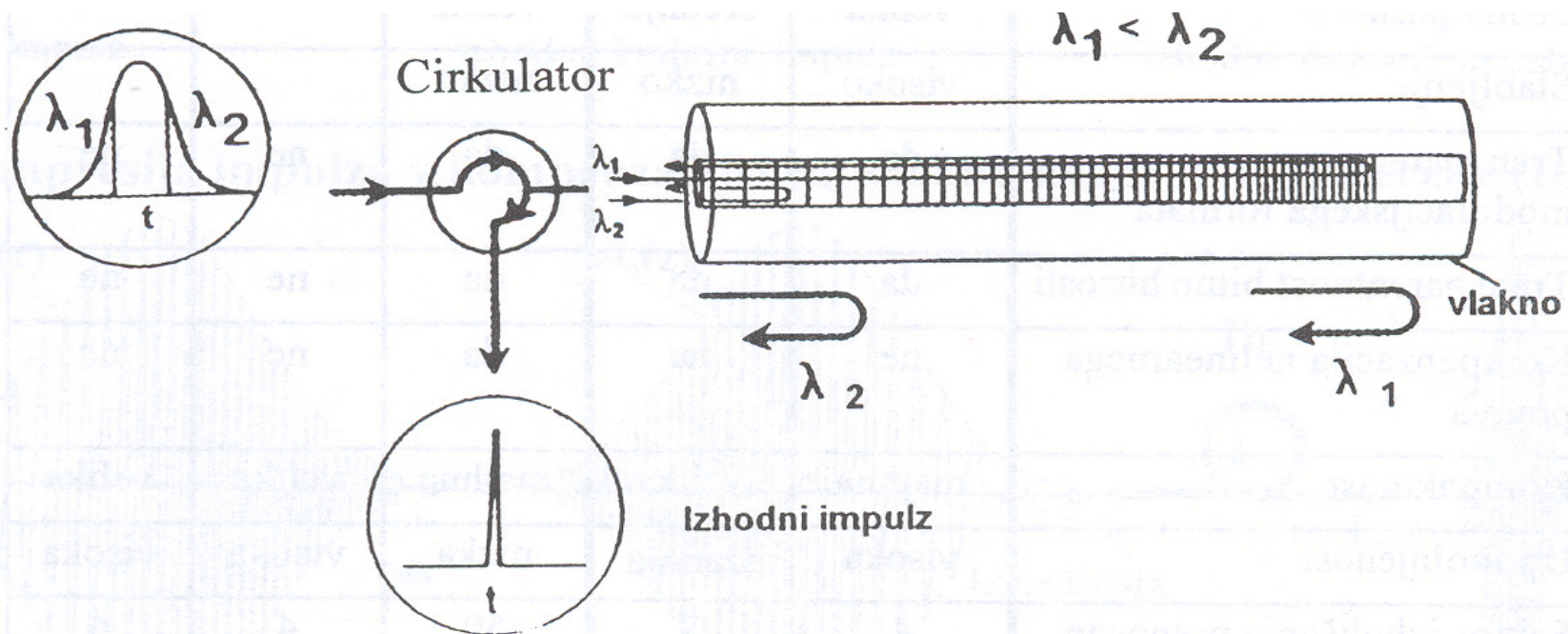
Pogoj kompenzacije:  $D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0$

# Načini kompenzacije disperzije

- Odsek kompenzacijskega vlakna



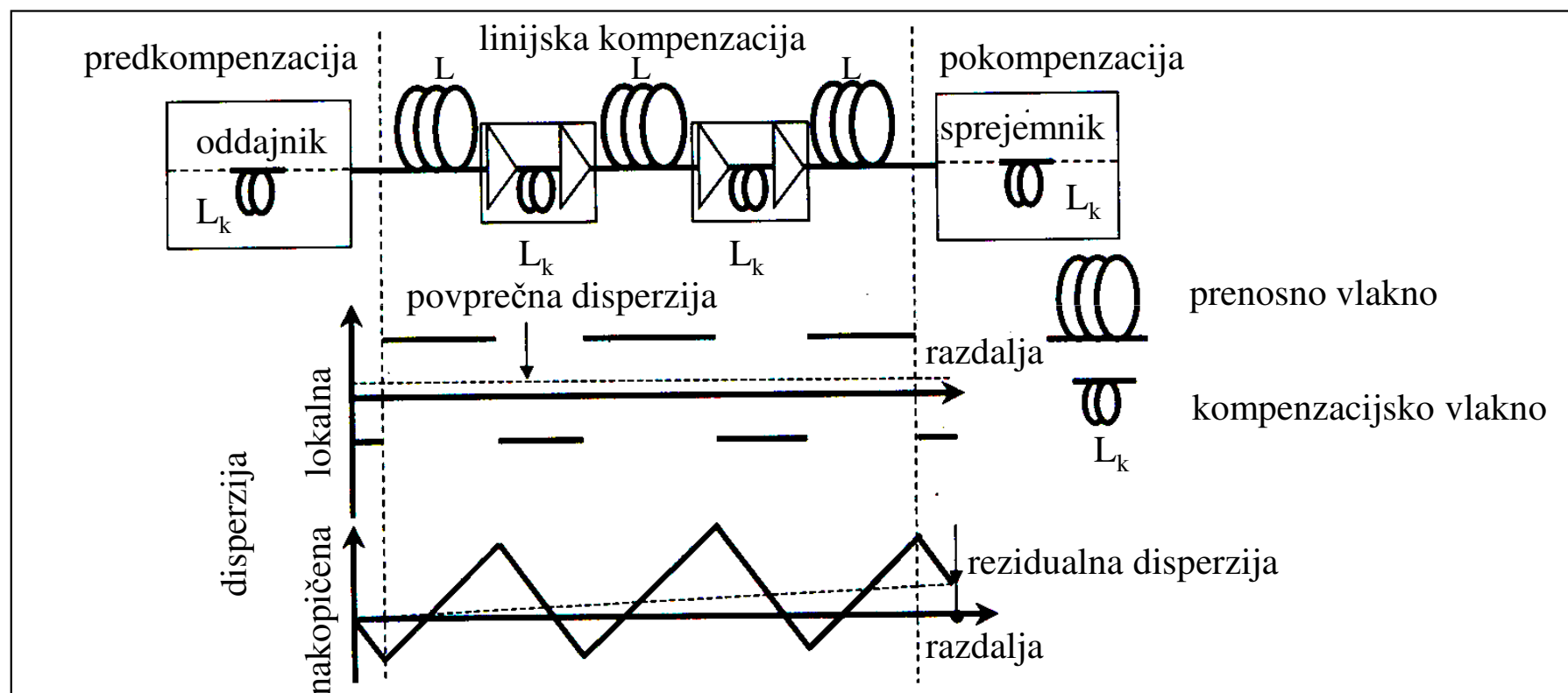
- Priodična struktura



# Načela za kompenzacijo kromatske disperzije

- **Mesto kompenzacije:**

- **predkompenzacija** (oddajnik: kompenzacijsko vlakno, modulacija žvižga)
- **linijska kompenzacija** (na odsekih prenosnega vlakna)
- **pokompenzacija** (sprejemnik: kompenzacijsko vlakno)

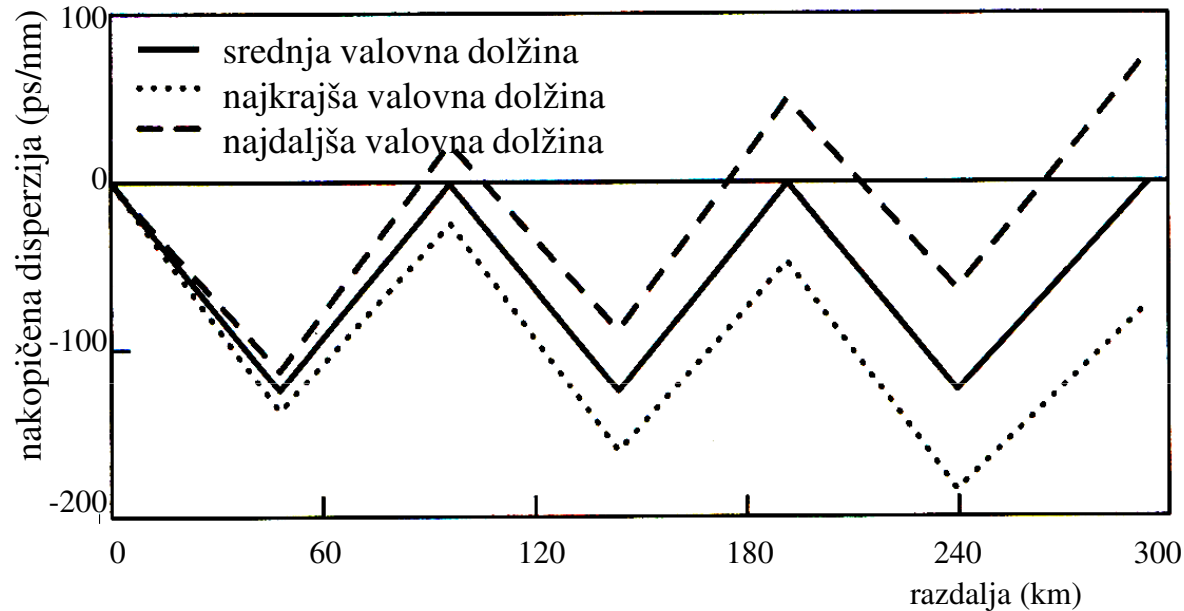


- **Načela:**

- **visoka vrednost lokalne disperzije** ( $D > 4$  ps/nm/km) je potrebna za kompenzacijo nelinearnih pojavov.
- **nizka vrednost nakopičene (integralne) disperzije** na vhodu v sprejemnik je potrebna za zniževanje bitnega pogreška

# Disperzijski načrt kanalov WDM na dolgi optični zvezi

Prikaz nakopičene disperzije srednjega in obeh skrajnih kanalov zveze WDM, sestavljene iz šestih kompenzacijskih odsekov.



- odseki dolžine 50 km z disperzijo  $D = \pm 2,5 \text{ ps/nm/km}$
- kompenzacija rezidualne disperzije kanalov v sprejemniku

$$\text{Strmina disperzije } S = \frac{dD}{d\lambda} \quad (\text{ps/nm}^2/\text{km})$$

$$\text{Disperzija } i \text{ - tega kanala } D_i = D_0 \pm iS\Delta\lambda$$

**Koliko je vreden čas pri disperzijski kompenzaciji?**

Primer:

disperzija:

$$D = 4 \text{ ps/nm/km}$$

dolžina vlakna:

$$L = 10^8 \text{ km}$$

kompenziran čas:

$$t_k = 4 \cdot 10^{-4} \text{ s/nm}$$

strošek kompenzacije

$$S = 10^9 \text{ \$}$$

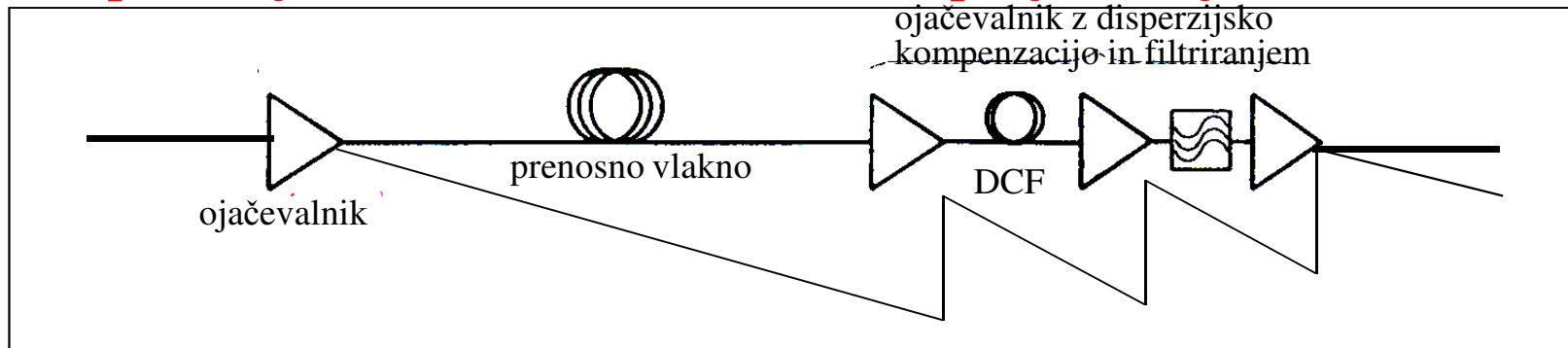
**cena za kompenzacijo**

$$\text{sekunde/nm: } \Sigma = 0,25 \cdot 10^{13} \text{ \$}$$

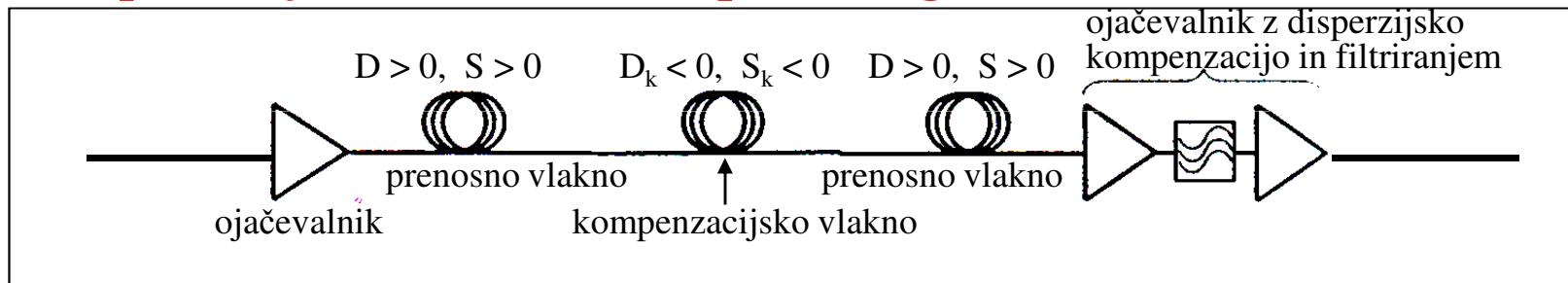


# Načini kompenzacije z vlaknom

- Kompensacijsko vlakno na kolotu v dvostopenjskem ojačevalniku:**



- Kompensacijsko vlakno kot del prenosnega vlakna:**

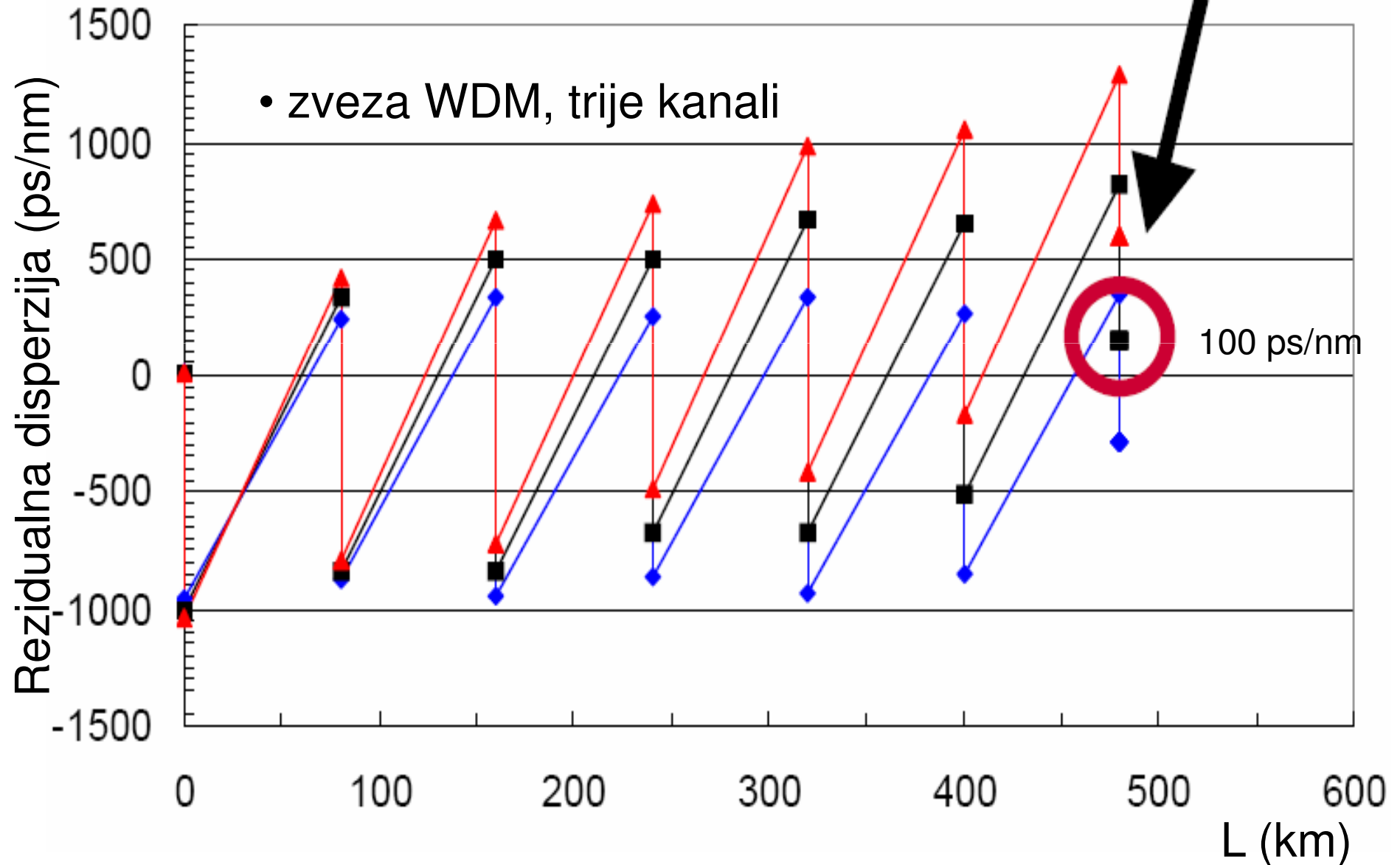


- Največja dopustna disperzija (toleranca) in največja dolžina zveze, ki omogoča optični prenos brez kompenzacije disperzije:**

Bitna hitrost (Gb/s)	Dopustna toleranca disperzije (ps/km)	Največja prenosna dolžina (km)	
		SSMF ( $D = 16,5 \text{ ps/nm/km}$ )	NZDSF ( $D = 4,5 \text{ ps/nm/km}$ )
1,0	+/- 247.000	15.300	56.000
2,5	+/- 15.000	927	3.400
10	+/- 1.000	58	213
40	+/- 60	3,6	13



# Rezidualna disperzija

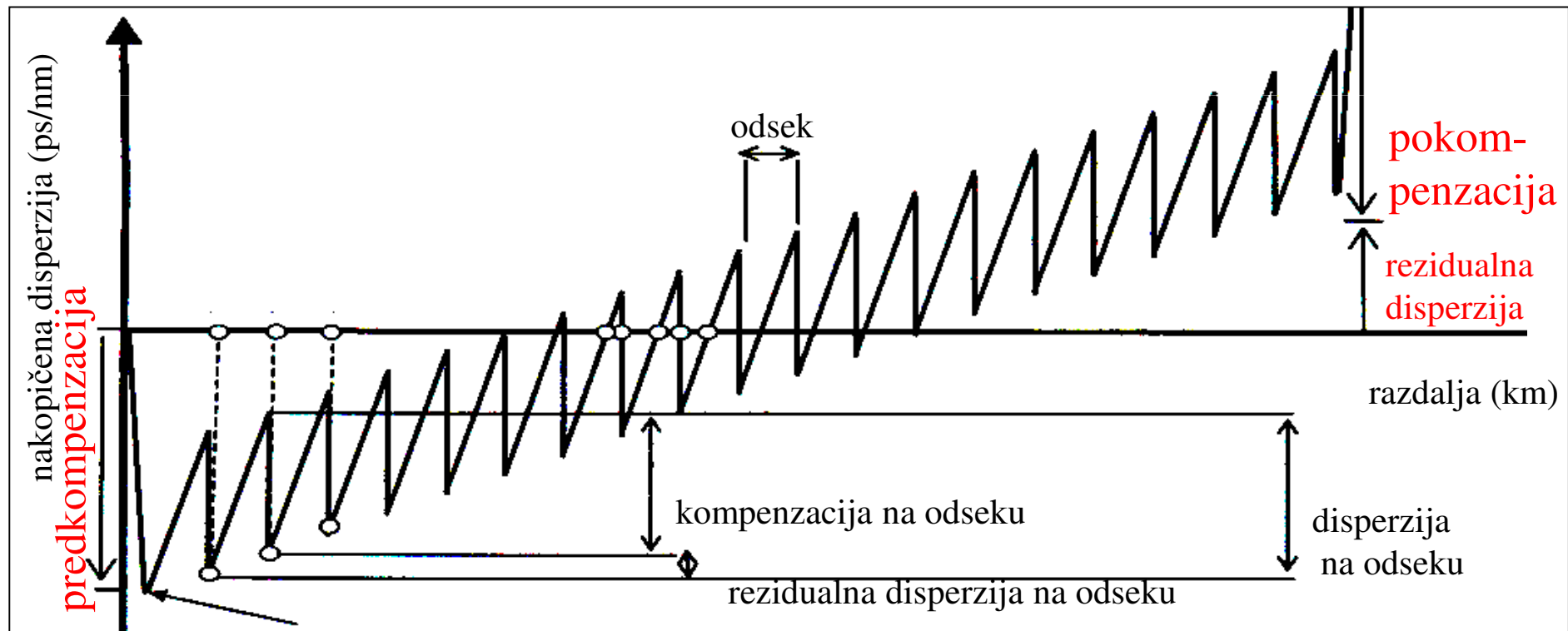


# Disperzijski načrt kompenzacije

Prikaz poteka nakopičene (integralne) disperzije posameznega kanala na optični zvezi pri velikem številu kompenzacijskih (in ojačevalnih) odsekov

## • Posebnosti:

- predkompenzacija je negativna
- nakopičena disperzija na posameznem odseku zveze je večja od disperzije kompenzacijskega vlakna ( $DL > |D_K|L_K$ ) (pri drugih kanalih so razmere lahko obratne)
- pokompenzacija je negativna
- rezidualna disperzija se kompenzira posebej v sprejemniku



# POLARIZACIJSKA RODOVNA DISPERZIJA - omejitve in dinamična kompenzacija

Polarizacijska rodovna disperzija je končna omejitev pri višanju bitne hitrosti nad 40 Gb/s in pri povečevanju dosega. Vlakna imajo različne vrednosti PMD:

**stara vlakna:**

$$D_p = (0,1 - 0,5) \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

**nova vlakna:**

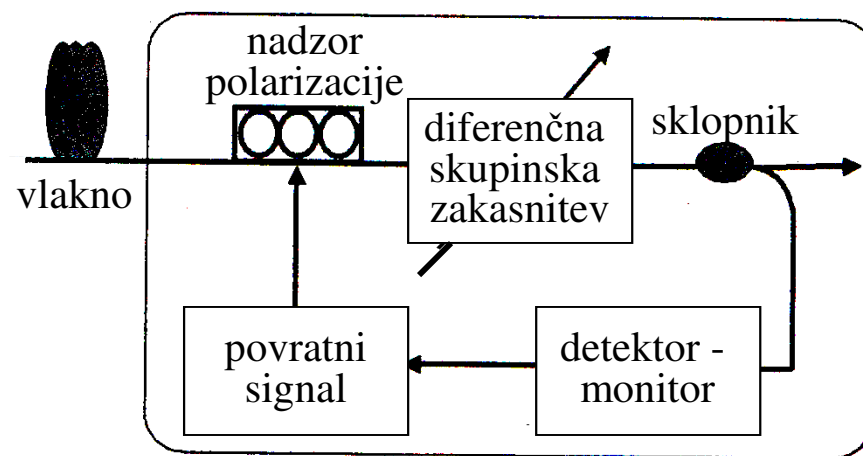
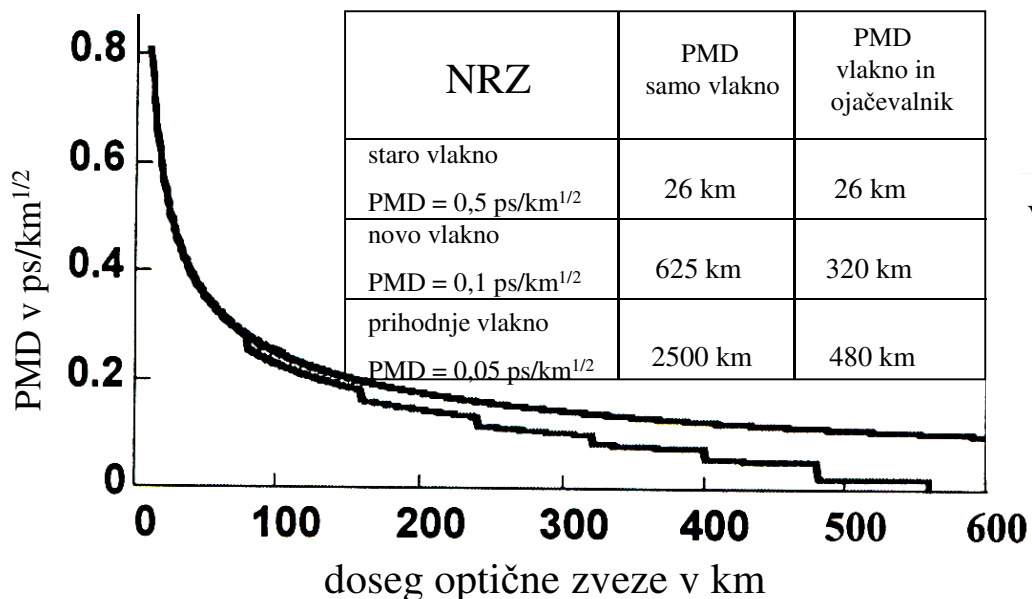
$$D_p = (0,05 - 0,1) \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

**prihodnja vlakna:**

$$D_p = (0,01 - 0,05) \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$$

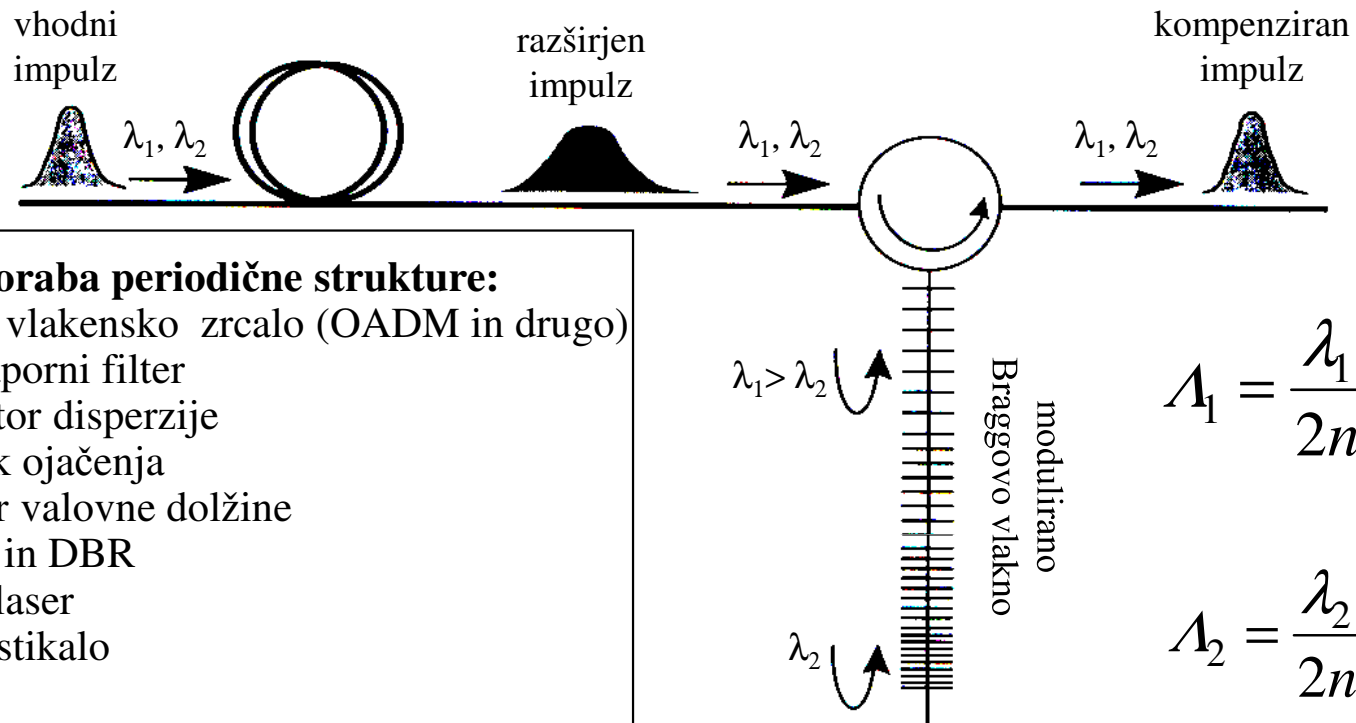
- Omejitev dosega optične zveze pri B = 40 Gb/s zaradi PMD vlakna in dodatno zaradi PMD ojačevalnika

- Naprava za dinamično kompenzacijo PMD na optični zvezi. Realizacija naprave je izredno zahtevna.



# Primeri uporabe periodičnih struktur

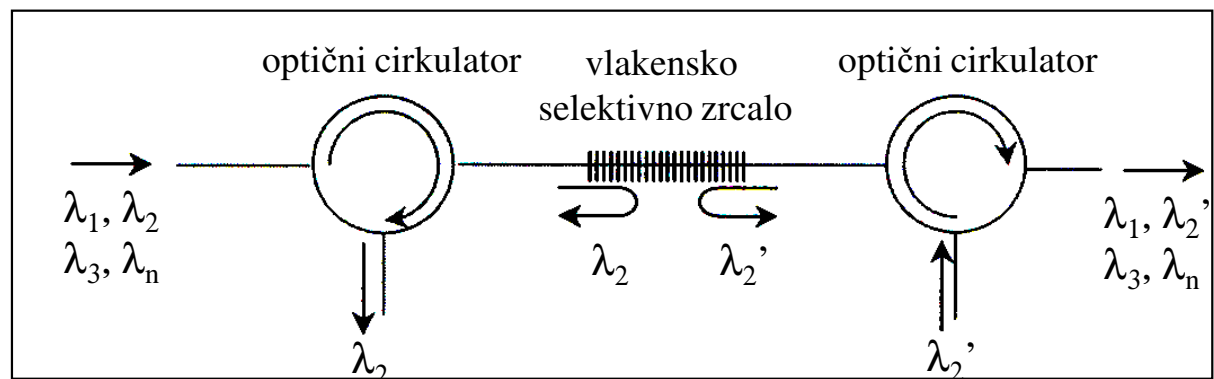
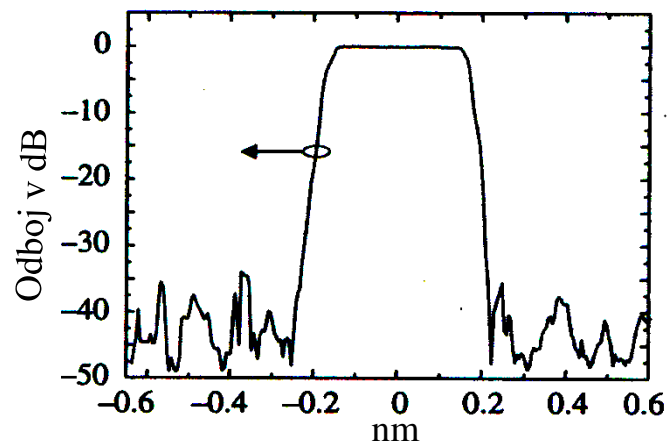
## Kompenzator disperzije na osnovi moduliranega Bragovega vlakna:



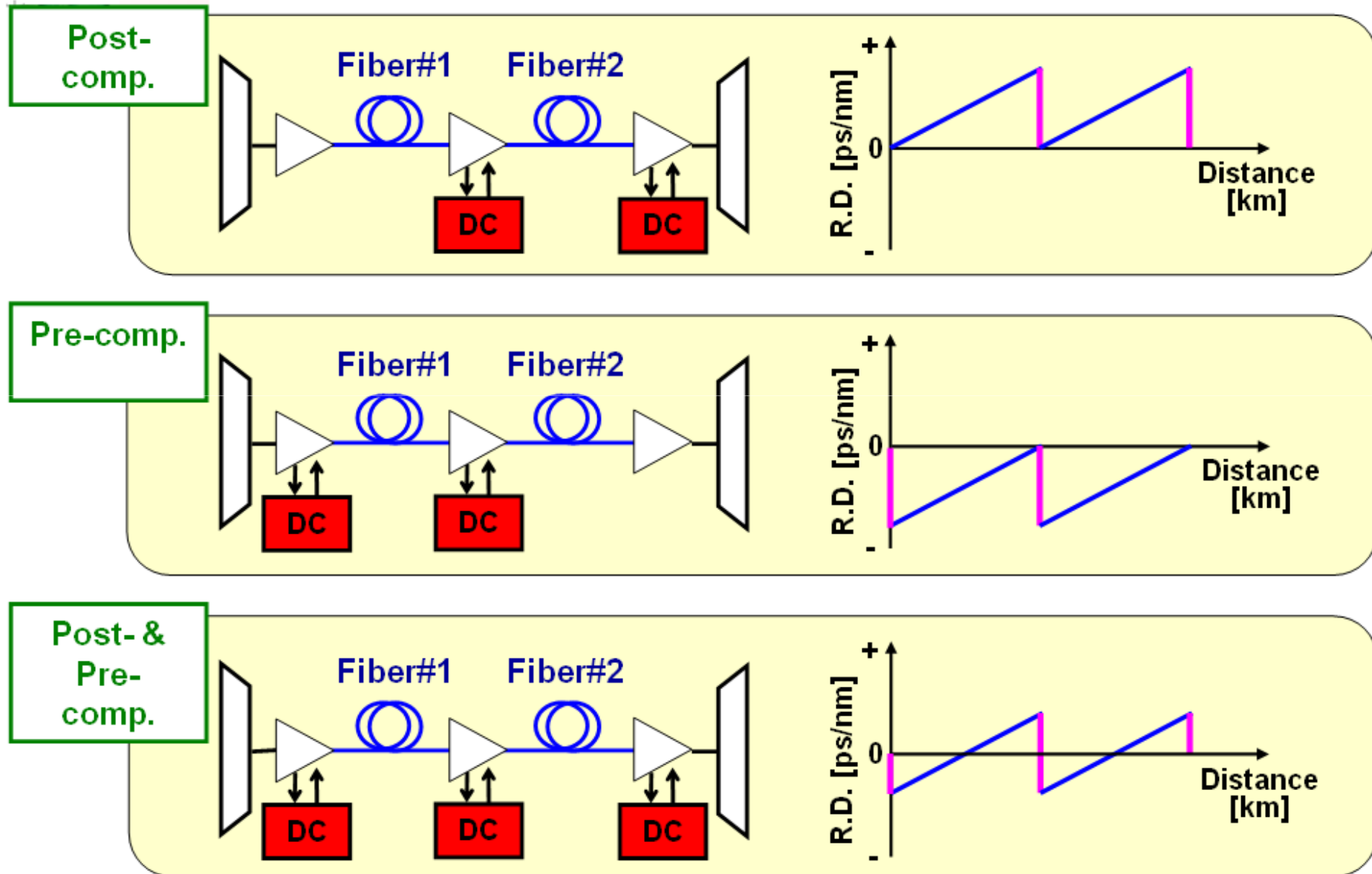
### Splošna uporaba periodične strukture:

- selektivno vlakensko zrcalo (OADM in drugo)
- pasovni zaporni filter
- kompenzator disperzije
- izravnalnik ojačenja
- stabilizator valovne dolžine
- laser DFB in DBR
- vlakenski laser
- svetlobno stikalo
- modulator

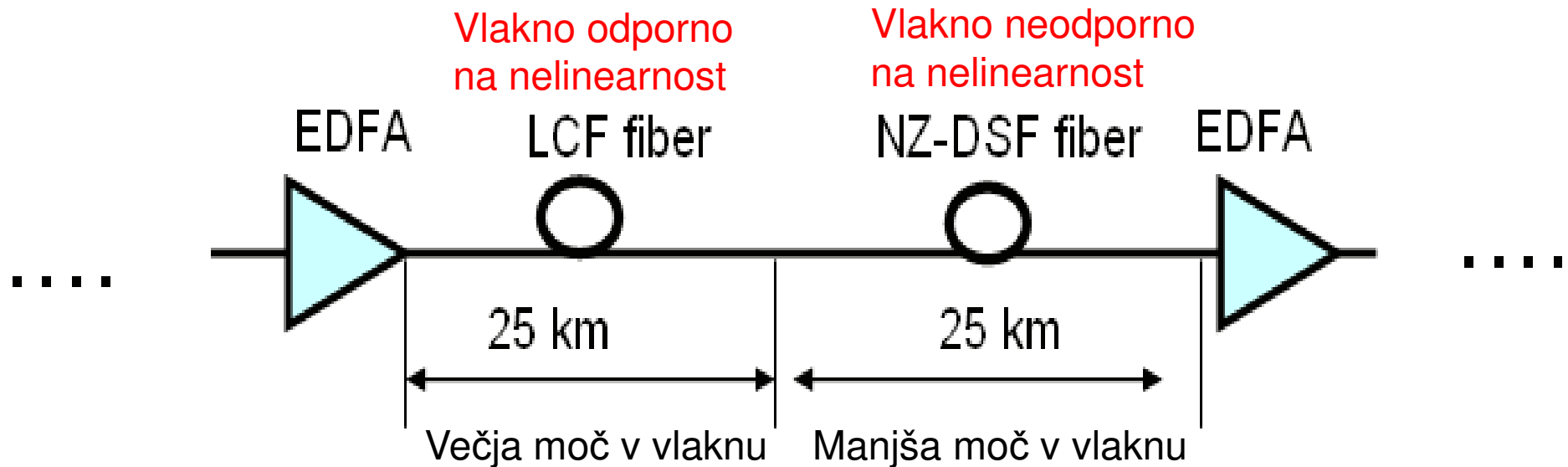
## Periodična struktura kot pasovni filter: Primer uporabe periodične strukture kot vlakenskega zrcala pri OADM:



# Linijska pred- in pokompenzacija

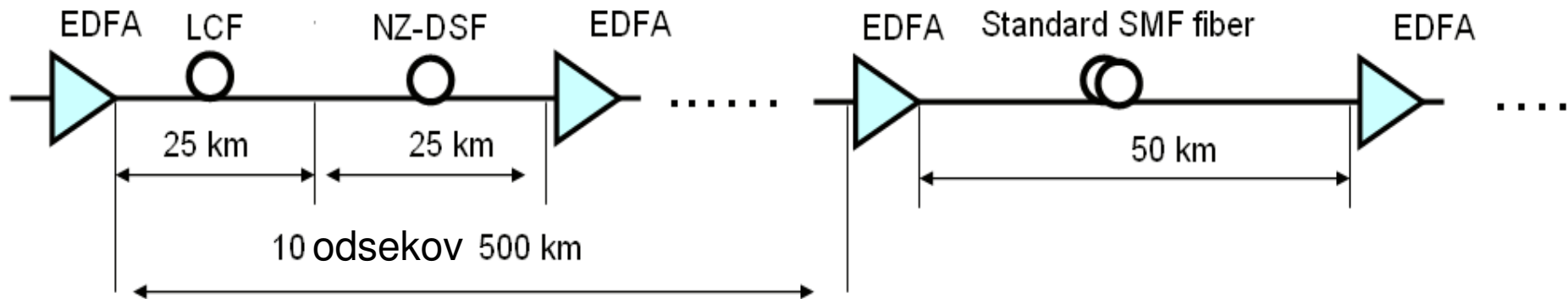


# Odsek zveze LCF - NZDSF



- LCF (Large Core Fiber) vlakno velike efektivne površine, odporno na nelinearnost. Disperzija na 1550 nm je  $-2$  ps/nm/km, strmina  $S < 0$
- NZ DSF ( Non Zero Dispersion Shifted Fiber) vlakno nenične disperzije. Disperzija na 1550 nm je  $-2$  ps/nm/km, Strmina  $S < 0$ .

# Kompenzacija disperzije na dolgih zvezah



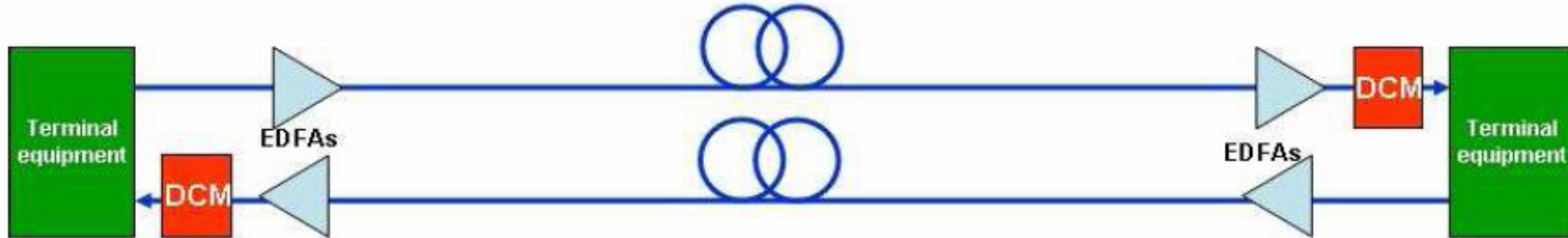
Vlakna negativne disperzije

Vlakno pozitivne disperzije

- 10 odsekov vlakna negativne disperzije v skupni dolžini 500 km se kompenzira z odsekom vlakna SSMF visoke pozitivne disperzije, nizkega slabljenja, velike efektivne površine in dolžine nekaj več kot 50 km.
- Odsek vlakna za ojačevalnikom ima povečano  $A_{ef}$  (npr. vrste LEAF).

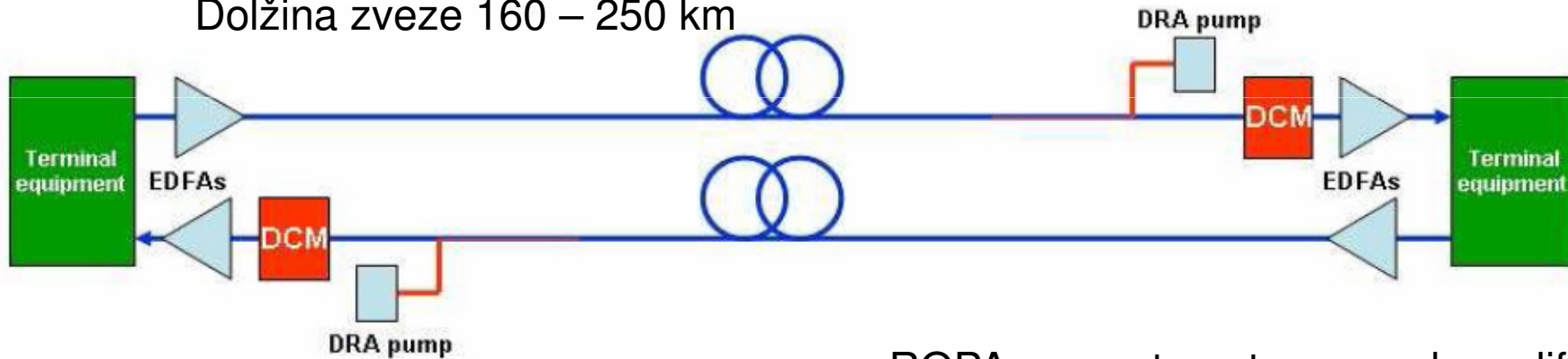
# Pokompenzacija disperzije

Dolžina zveze 80 – 160 km



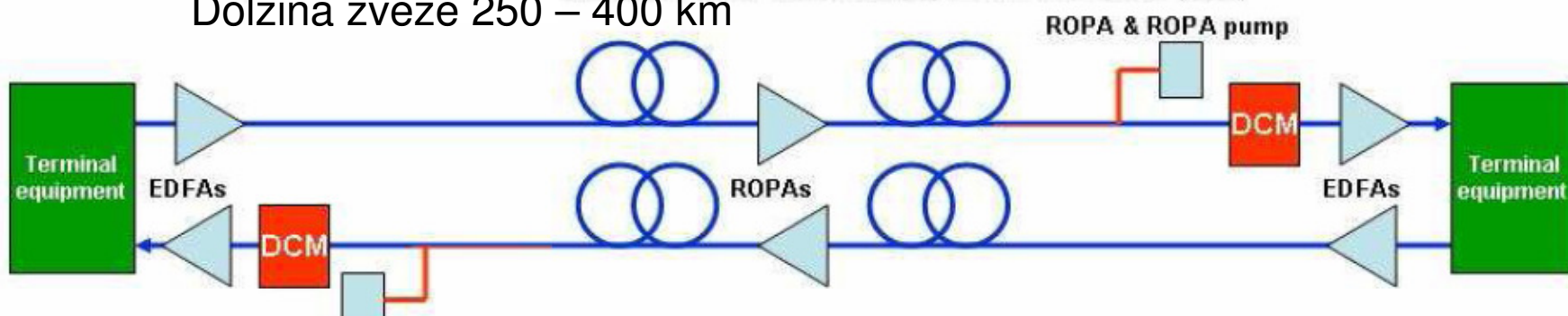
DRA - distributed Raman amplifier

Dolžina zveze 160 – 250 km



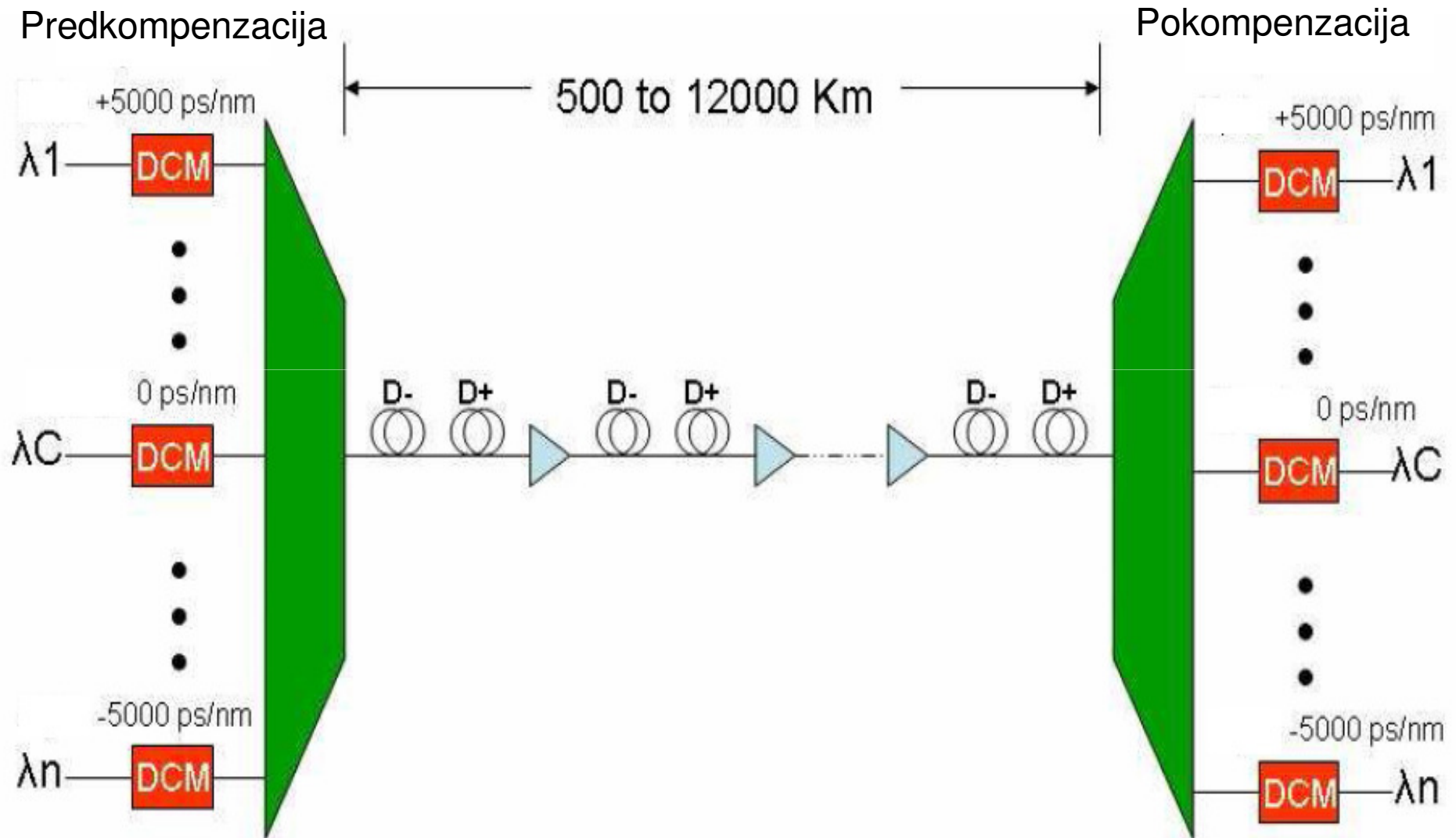
ROPA – remote opt. pumped amplifier

Dolžina zveze 250 – 400 km





# Pred- in pokompenzacija WDM zveze



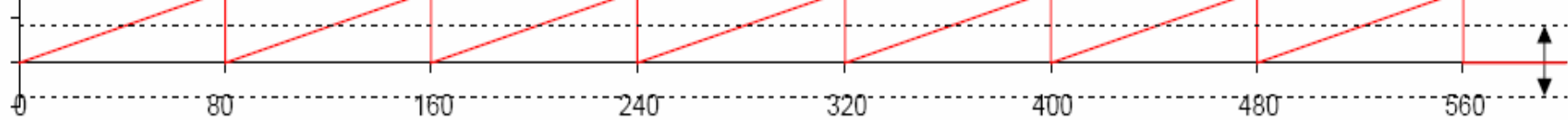
# Linjska kompenzacija

- Zveza SSMF

G.652  $D = 17 \text{ ps/nm/km}$



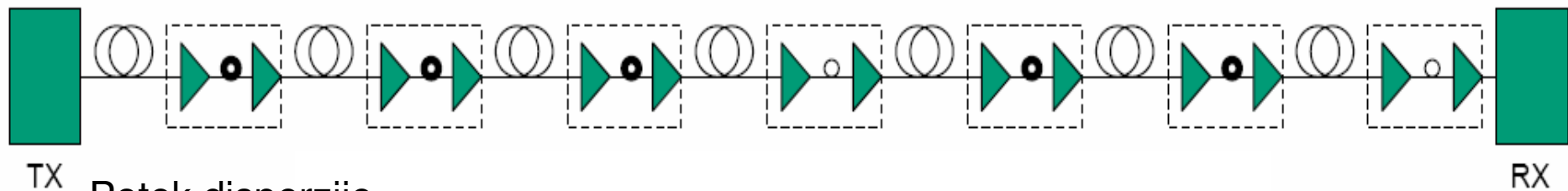
Potek disperzije



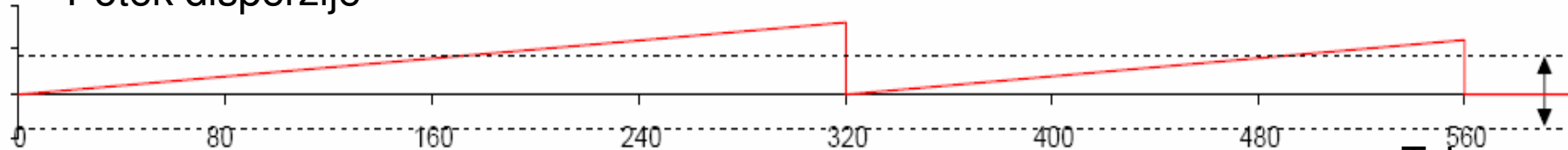
Toleranca

- Zveza LEAF

LEAF  $D = 4 \text{ ps/nm/km}$



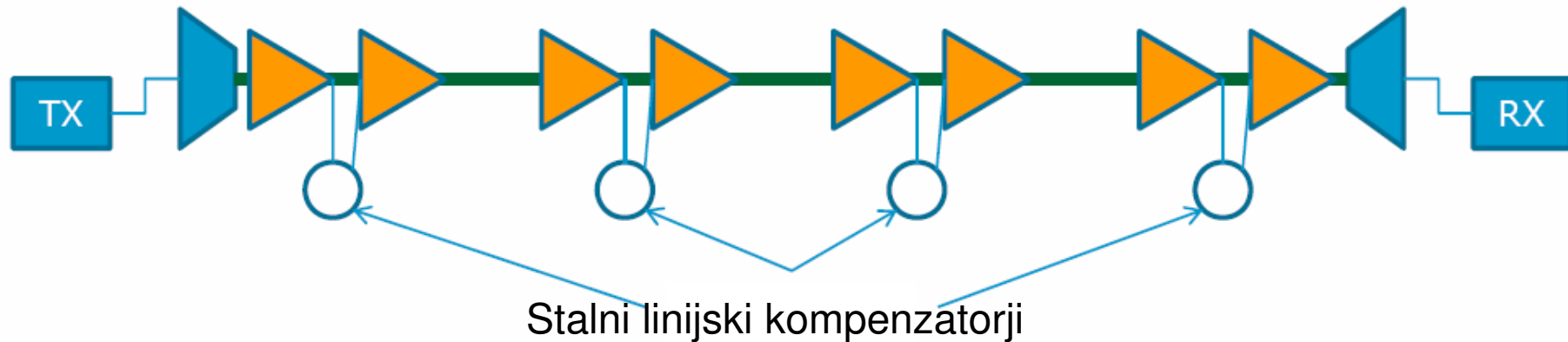
Potek disperzije



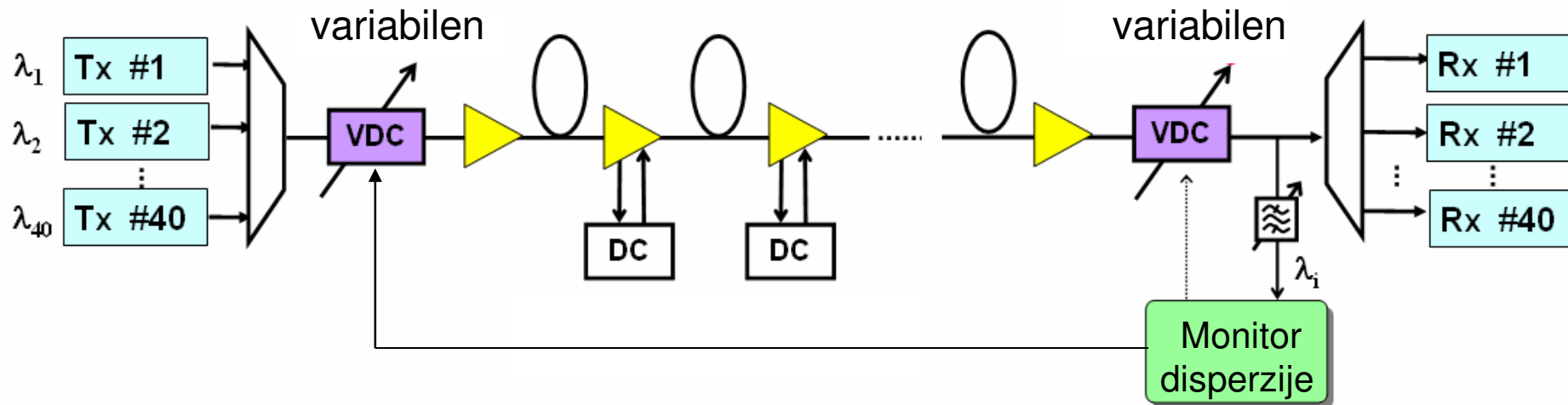
Toleranca

# Statična in dinamična kompenzacija <sup>51</sup>

- statična kompenzacija z dvostopenskimi ojačevalniki za kritje izgub v kompenzatorjih

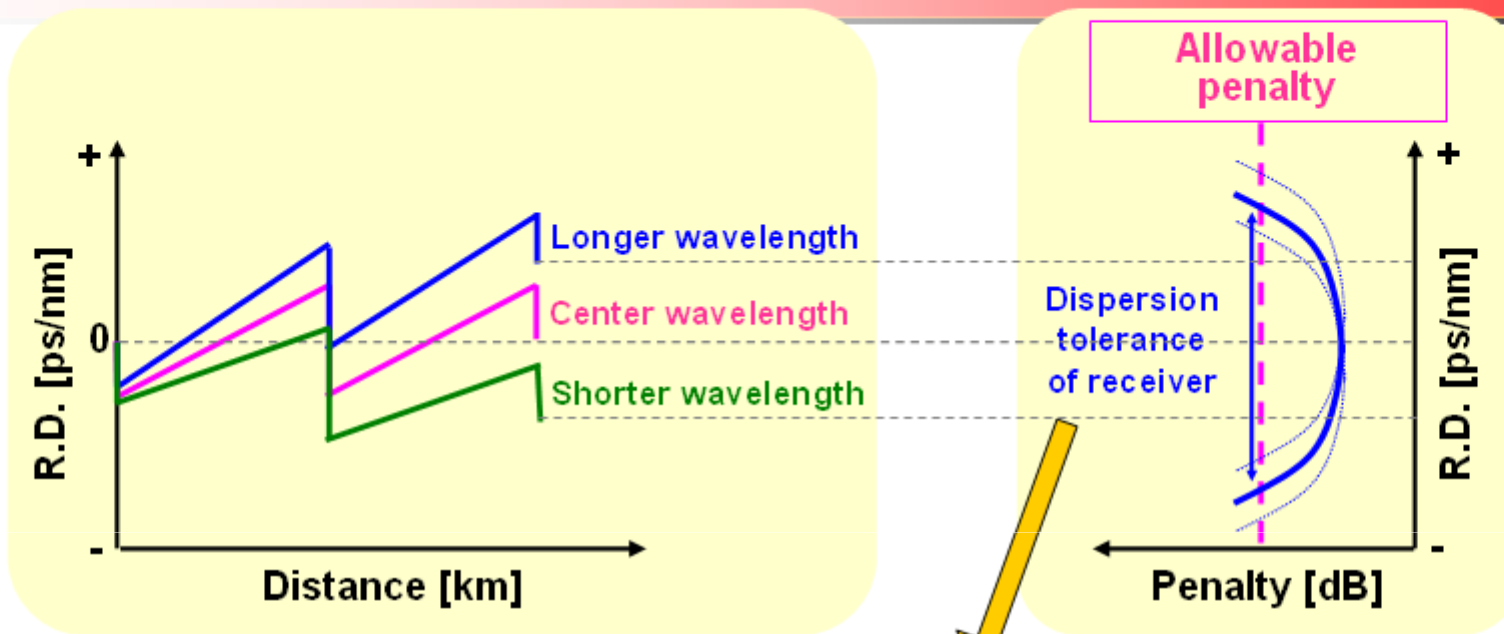


- dinamična kompenzacija z regulacijo kompenzacije





# Residual dispersion and tolerance of receiver

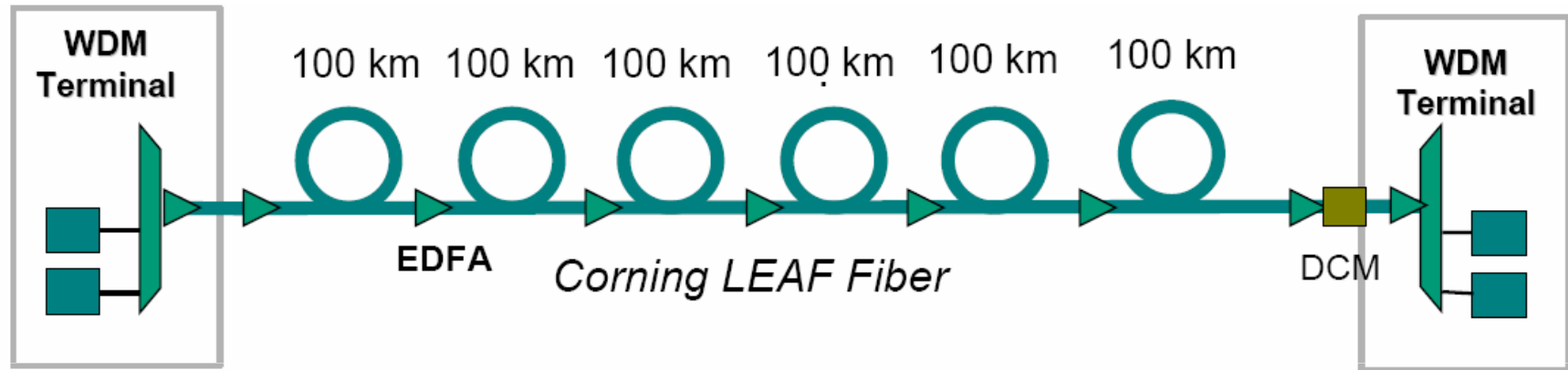


## Parameters affecting to the tolerance

- Signal bit rate
- Channel counts and spacing
- Distance or number of spans
- Fibre type
- Fibre input power
- Pre-chirping of transmitter
- Modulation scheme of transmitter
- DC allocation / value

Need to consider the variation of tolerance due to characteristics of transmitter, fibre non-linear effects and dispersion map.  
Even if residual dispersion values are same, the received waveforms are different, affected by these parameters.

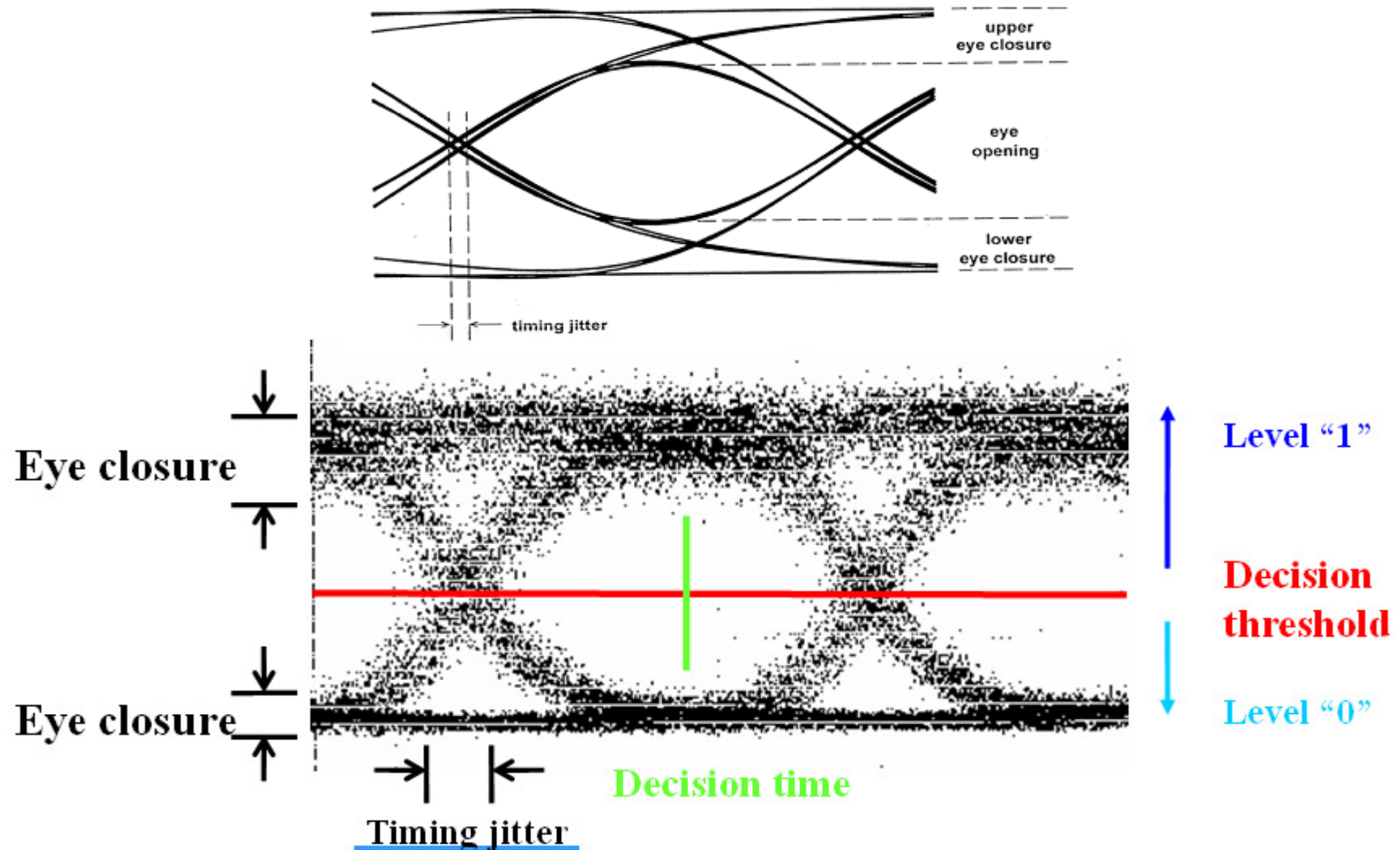
# Vlakno LEAF na dolžini 600 km



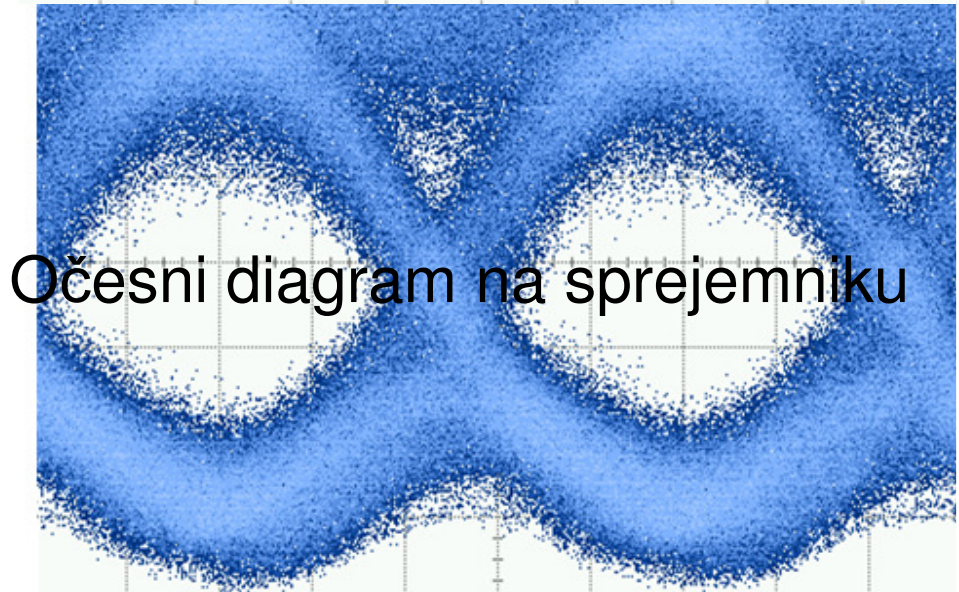
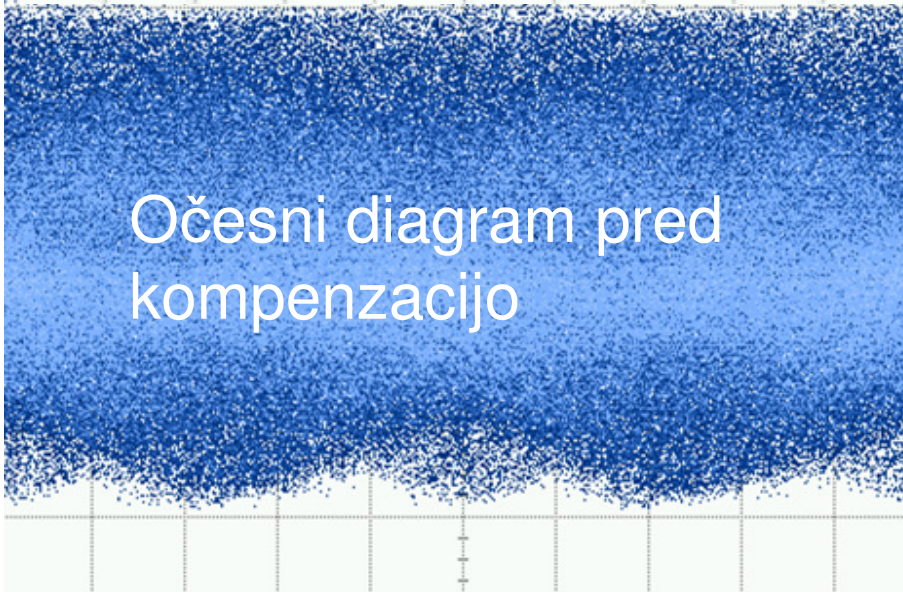
- Optična zveza dolžine 600 km brez linijskih kompenzacijskih modulov (DCM)
- DCM za pokompenzacijo (lahko tudi predkompenzacijo)
- Na zvezah, kjer uporabljamo vlakna nizke disperzije, se kompenzacija močno poenostavi.

# Očesni diagram

## Periodic superposition of data



# Očesni diagrami



# PMD in doseg optične zveze

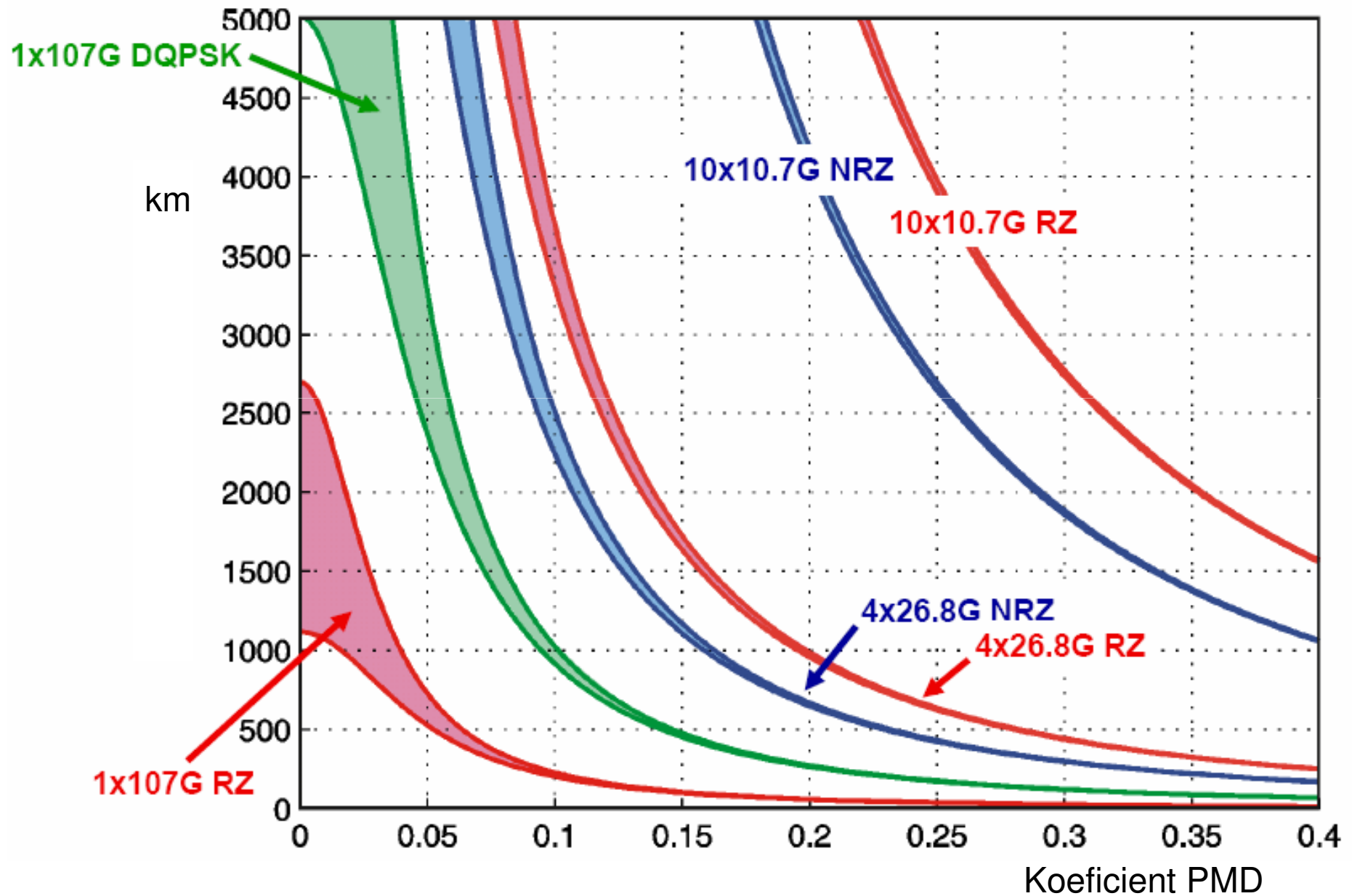
- Koeficient PMD =  $0,1 \text{ ps}/(\text{km})^{0,5}$

	<b>NRZ</b>	<b>50% RZ (OOK ali DPSK)</b>	<b>50% RZ DQPSK</b>
<b>10 Gbps</b>	14,000-15,700 km	20,600-23,100 km	
<b>12 Gbps</b>	9,700-10,900 km	14,300-16,000 km	
<b>20 Gbps</b>	3,500-3,900 km	5,100-5,800 km	
<b>25 Gbps</b>	2,200-2,500 km	3,300-3,700 km	
<b>40 Gbps</b>	870-980 km	1,290-1,450 km	5,800-6,500 km
<b>80 Gbps</b>	220-245 km	320-360 km	1,450-1,620 km
<b>100 Gbps</b>	140-160 km	205-230 km	925-1040 km
<b>120 Gbps</b>	100-110 km	140-160 km	640-720 km

- Primer za BER =  $10^{-3}$  ( meja FEC)
- Najpogostejši modulacijski formati označeni v sivem
- Polarizacijska rodovna disperzija postane resen problem šele pri ekstremno visokih bitnih hitrostih in na zelo velikih razdaljah.



# PMD in doseg optične zveze

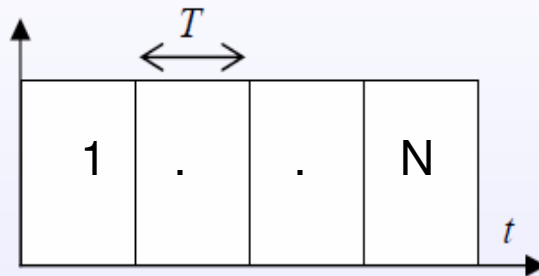


# OFDM

- Na oddajni strani razdelimo visokobitni signal (npr. 40Gb/s, 100 Gb/s ali več) z enim nosilnikom na več (ali mnogo) nizkobitnih kanalov (npr. 1Gb/s) vsakega na svojem nosilniku (mnogonosilniški prenos).
- Nizkobitni kanali so mnogo bolj odporni na disperzijo in zato disperzija ne omejuje razdalje.
- Na sprejemni strani opravimo obraten postopek.
- Primer: pri 1 Gb/s dosežemo z valknom SSMF 6.000 km.

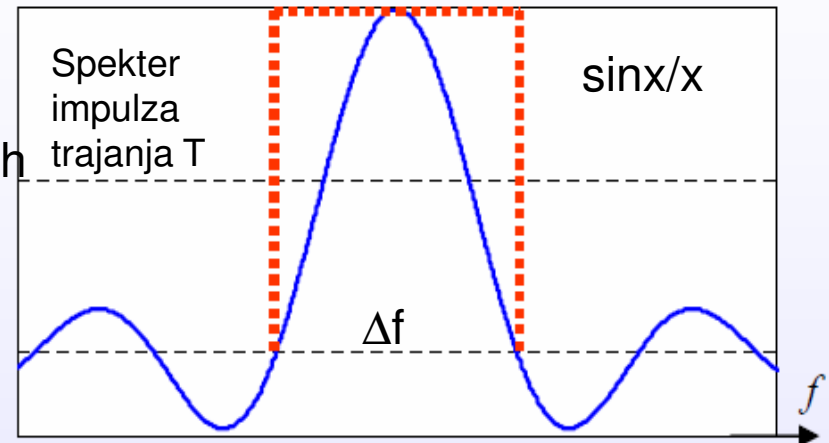
# Princip OFDM

## TDM:

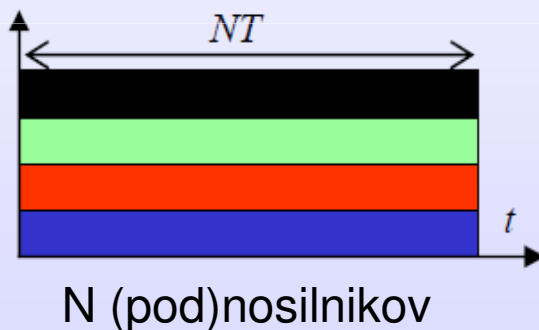


## Enonosilniški:

- N časovno razvrščenih bitov trajanja T
- Širok spekter  $\Delta f$  bita kratkega trajanja T

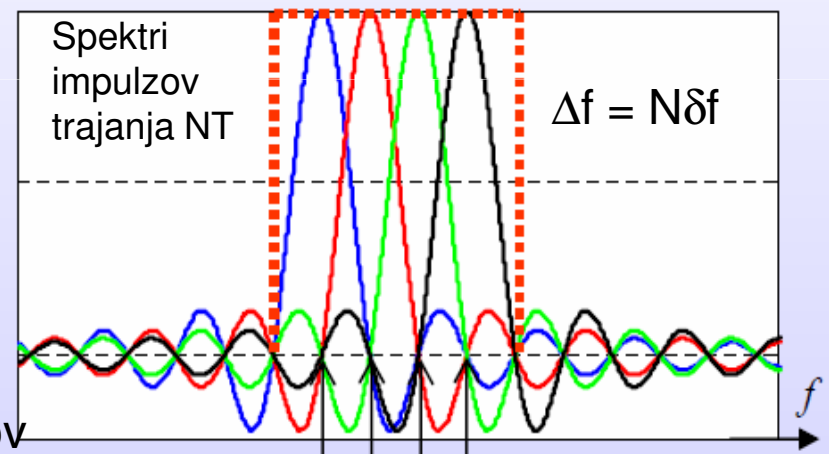


## OFDM:



## Mnogonosilniški:

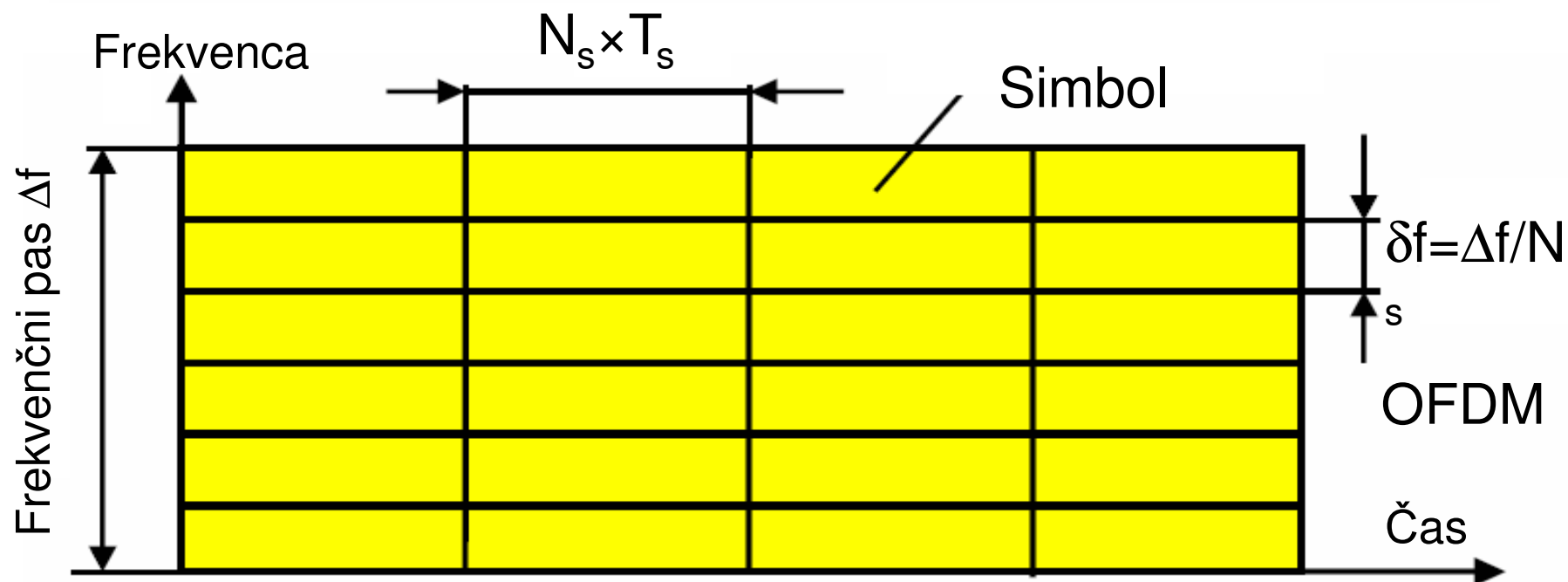
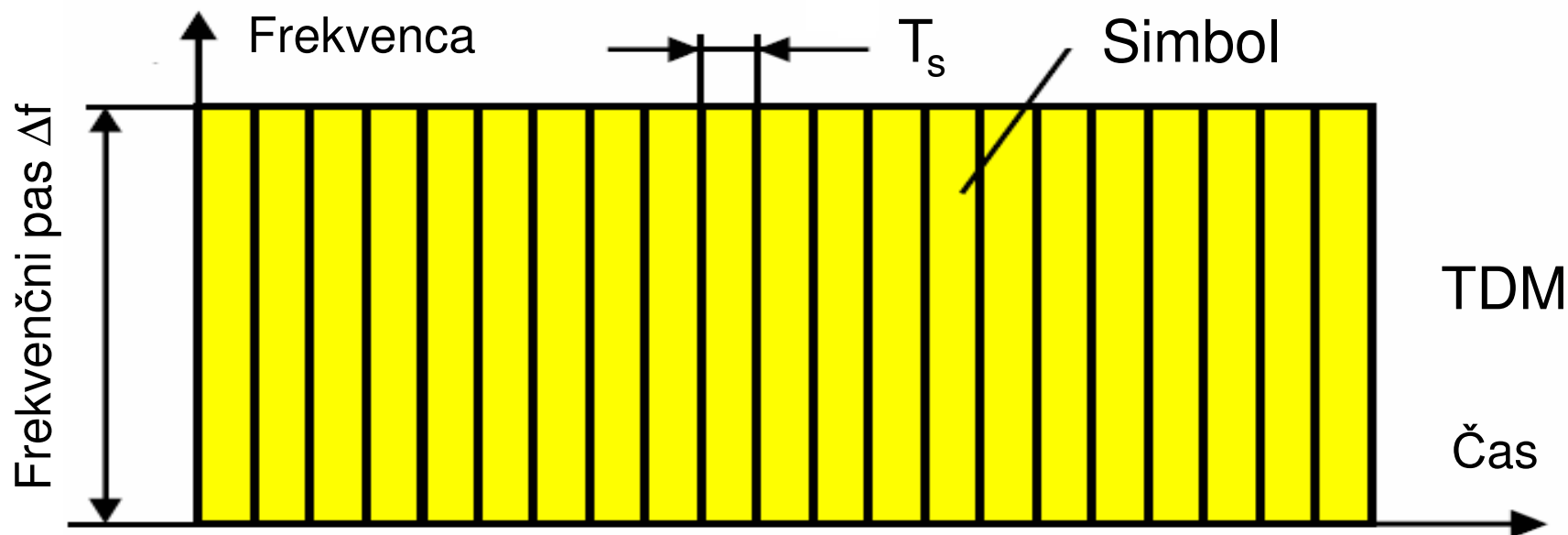
- N istočasnih frekvenčno razvrščenih bitov
- ozki spektri  $\delta f = \Delta f/N$  impulzov dolgega trajanja NT
- ortogonalnost spektrov



## Prednosti OFDM:

- dolgo trajanje NT impulzov daje odpornost na časovno disperzijo (intersimbolna interferenca ISI)
- ortogonalnost spektrov (na maksimumu spektra so vsi drugi enaki nič) pomeni, da ni sklopa med kanali kljub prekrivanju in je izkoristek spektra maksimalen.

# TDM in OFDM



# Digitalno signalno procesiranje (DSP)

- Kompenzacija kromatske disperzije (CD) in polarizacijske rodovne disperzije (PMD) po načinu DSP je novejša in mnogo obetajoča metoda.
- Kompenzacijo opravimo v koherentnem sprejemniku.
- Elektronska kompenzacija pomeni nekaj večjo porabo moči.

# Konec