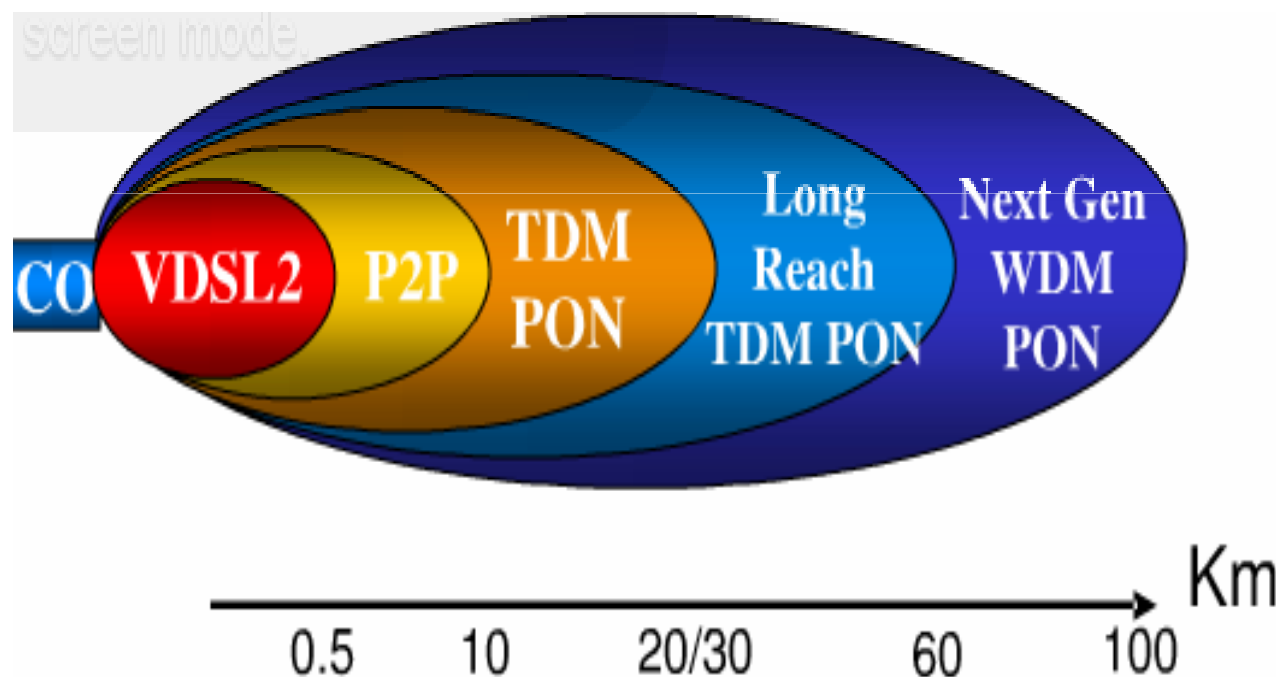


# Vsebina naslednjih predavanj

1. Optika za bazne postaj  
ROF (SCM, WDM/SCM, OFDMA)
2. Več o uvajanju novih tehnologij
3. Ekonomika, regulacija, politika, itd.

# konferenčne novosti, 2010

## Evolucija PONa



- *Večanje dosega*
- *Večanje kapacitete*

Mobitel d.d.,  
izobraževanje

12. 11. 2010,  
predavanje 20

Prof. dr. Jožko  
Budin

# Vsebina

1. Splošno o konferencah s področja OK
2. Razvoj in novosti v transportnem omrežju
3. Razvoj in novosti v dostopovnem omrežju
4. Nove tehnologije v transportu in dostopu:
  - WDM v dostopu
  - Mnogonosilniški sistemi OFDM(A)
  - Mnogovhodni – mnogoizhodni sistemi (MIMO)
  - Koherentna detekcija (CO)
5. Nekaj napovedi razvoja

## OFC 2010

- Letna ameriška konferenca 2010 o vlakenskih komunikacijah, 21.–25. marec, 2010, San Diego, ZDA

Naslednja konferenca OFC bo v Los Angelesu, marec 2011.

## ECOC 2010

- 36. Evropska konferenca o Optičnih komunikacijah 19. – 23. september 2010, Torino, Italija

Naslednja, 37. konferenca, bo v Ženevi, september 2011.

# Organizacija konferenc

Organizacijska podobnost evropske in ameriške konference. S polletnim presledkom prinašata zadnje novosti na področju razvoja, aplikacij in tržnih novosti.

- Delavnice
- Tutoriali (60 min.)
- Vabljen predavanja (30 min.)
- Avtorska predavanja – ustna predstavitev (15 min.)
- Avtorska predavanja – plakatna predstavitev
- Tematski simpoziji
- Tržni pregled

# OFC/NFOEC'10

## Pregled tem o dostopovnih omrežjih:

- OML: Radio over Fiber I
- OTuF: Radio over Fiber II
- OTuO: Next Generation Access Network
- OWQ: Integrated Optical and Wireless Access
- OWG: Novel Component Technology for WDM-PON
- OWX: 10G-PON Advanced Technologies
- NWB: Access Networks
- OThG: Future WDM-PON
- OThO: Radio Over Fiber Access Networks
- OThW: Novel PON Technologies
- NThB: Optical Access Technologies

# Vsebina konference ECOC 2010

## Pregled vseh tematskih področij:

- Vlákna, vlakenske naprave in ojačevalniki
- Valovodne in optoelektronske naprave
- Podsistemi in sestavni deli optičnih omrežij
- Prenosni sistemi
- Hrbtenična in jedrna omrežja
- Dostopovna omrežja in LAN
- Sekcija CLEO:  
fotonika, metamateriali, plazmoni, nelinearna optika, ultrahitri pojavi in naprave

Program konference je organiziran v 5-tih vzporednih sekcijah.

# ECOC 2010

## Pregled teme o dostopovnih omrežij in LANu:

- Optical access systems: architecture, design, performance, control, and management
- Optical access network experiments
- Optical access network demonstrations and field trials
- Local area networks (LANs) at 10G and beyond
- In-house optical networks
- High-speed optical interconnects for consumer electronics
- Rack-to-rack optical communications
- Optical networks for automotive applications
- Optics in storage area networks (SANs)
- Multimode and plastic optical fibre systems
- Optical Ethernet access networks
- Fibre to the X (FTTx)
- Passive optical networks (PONs)
- Hybrid wireless-optical access networks
- Microwave photonics
- Analogue optical systems
- Multiple access techniques (e.g., code-division multiple access (CDMA))
- Interoperability demonstrations
- Access system reliability, availability, and security
- Techno-economic comparison between different access network architectures and technologies



# Napoved razvoja: **3M** tehnologije

- 2010: Maksimalna bitna hitrost kanala: 100Gb/s
- 2020: Maksimalna bitna hitrost kanala: **1 Tb/s**
- 2020: WDM prenos po vlaknu >> **100 Tb/s**

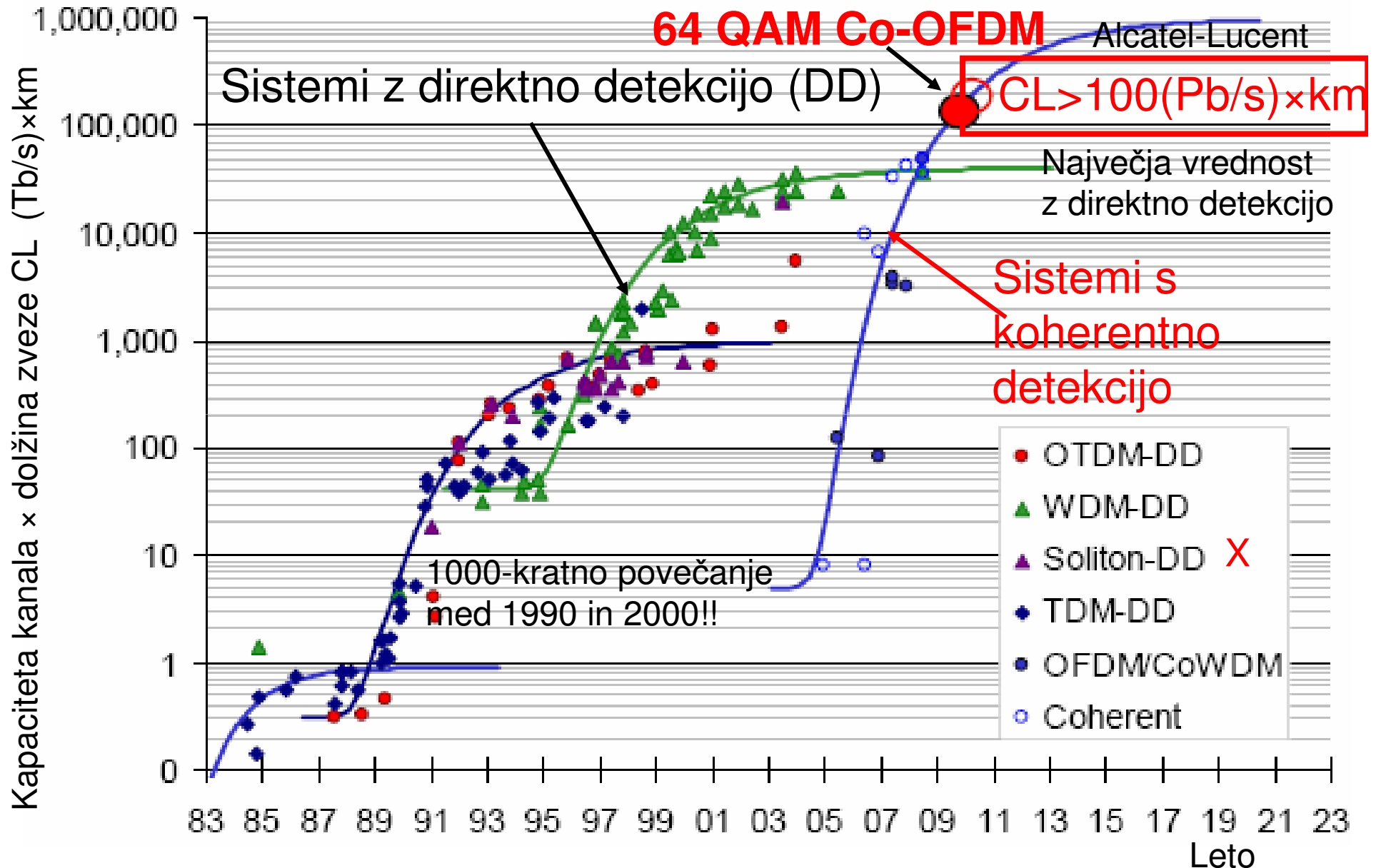
## **3M** tehnologije:

1. **M**nogonivojski modulacijski formati
2. **M**nogojedrno optično prenosno vlakno
3. **M**IMO mnogovhodni-mnogoizhodni sistemi

A

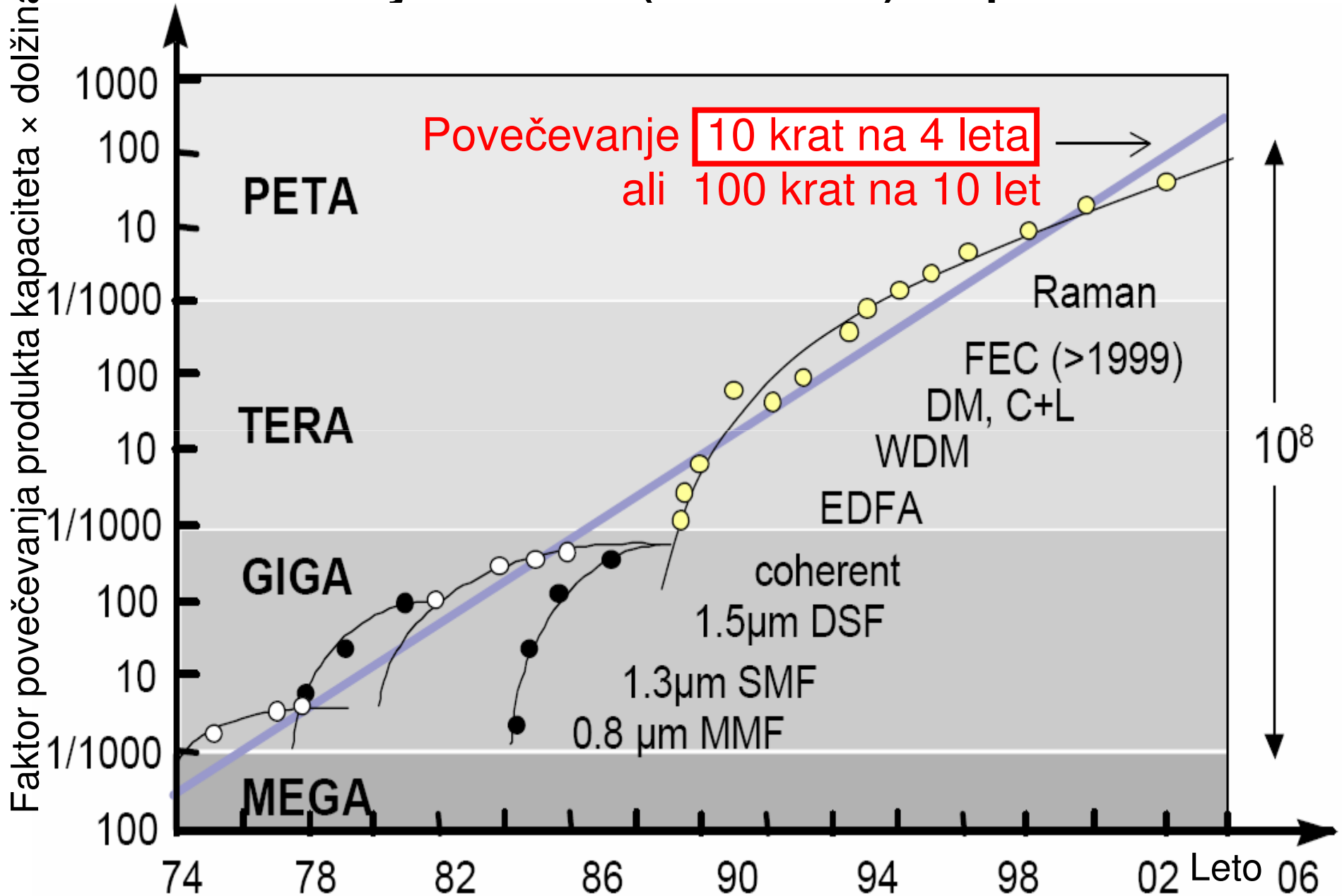
Razvoj in novosti  
v transportnem  
omrežju

# Zmogljivost sedanjih in prihodnjih sistemov

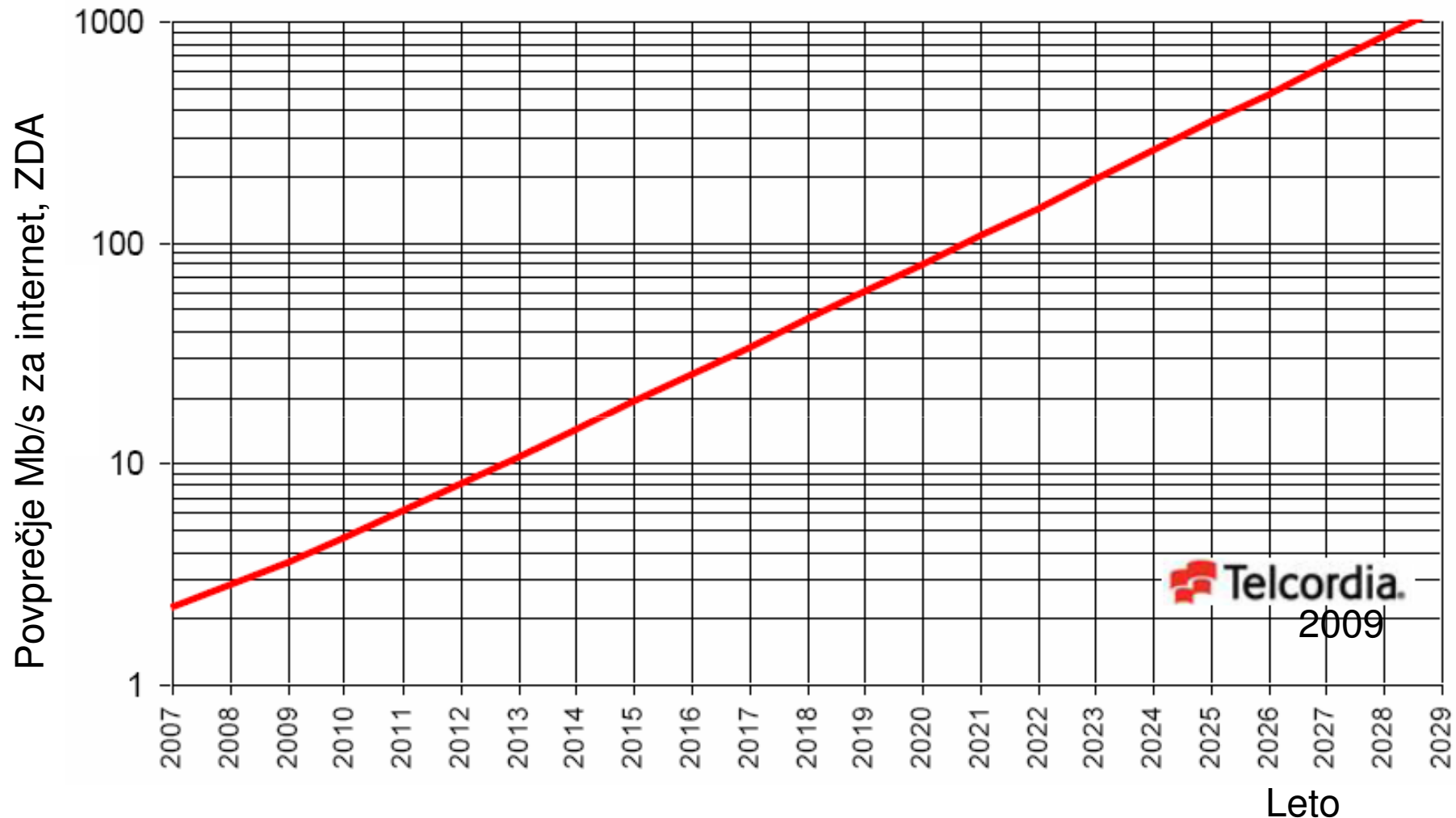


Koherentni sistemi v l. 2010 že presegajo dosedanje sisteme z direktno detekcijo

# Povečevanje $C \times L$ (b/s km) v preteklosti

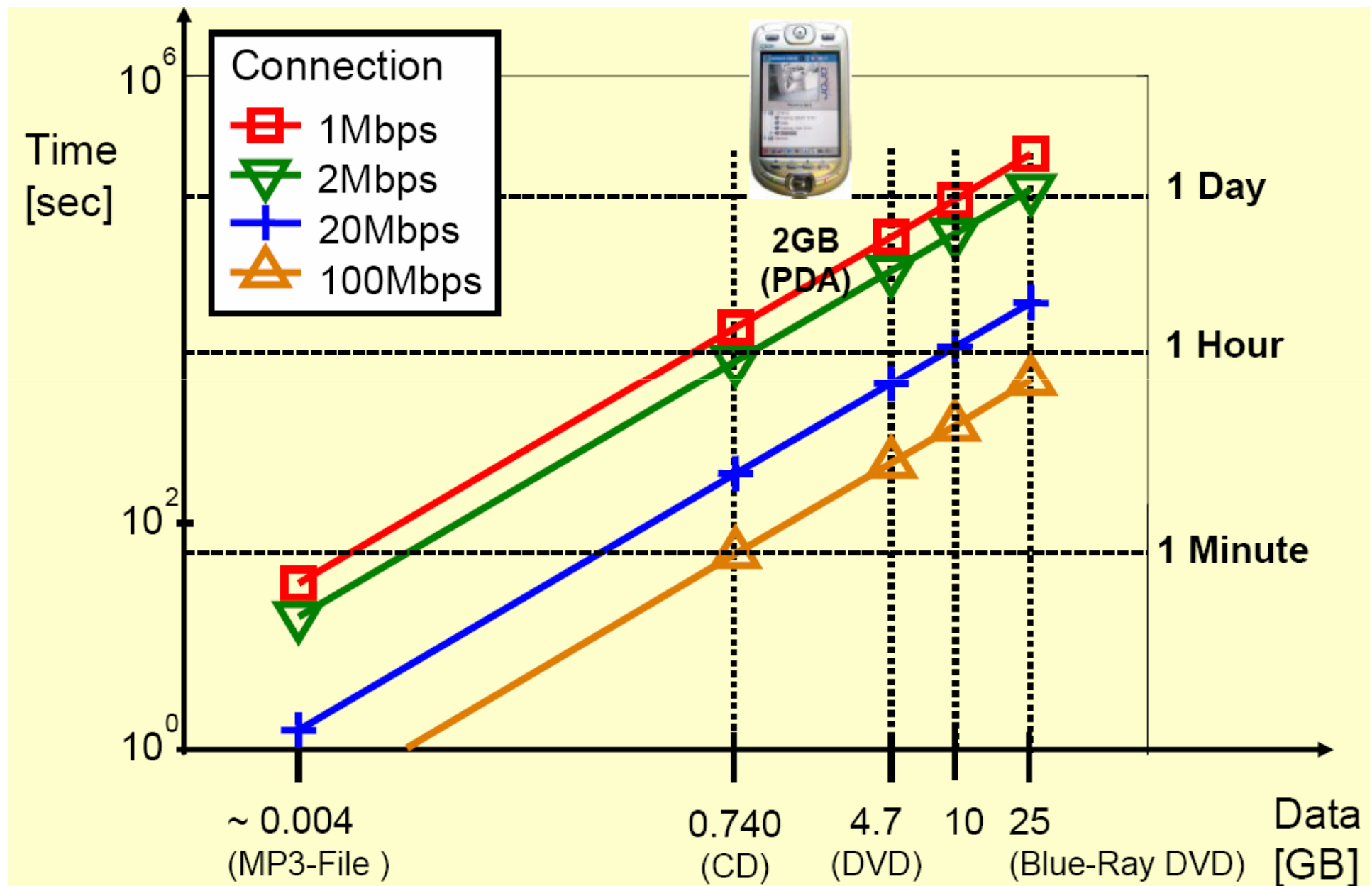


# Internet, dolgoročne potrebe

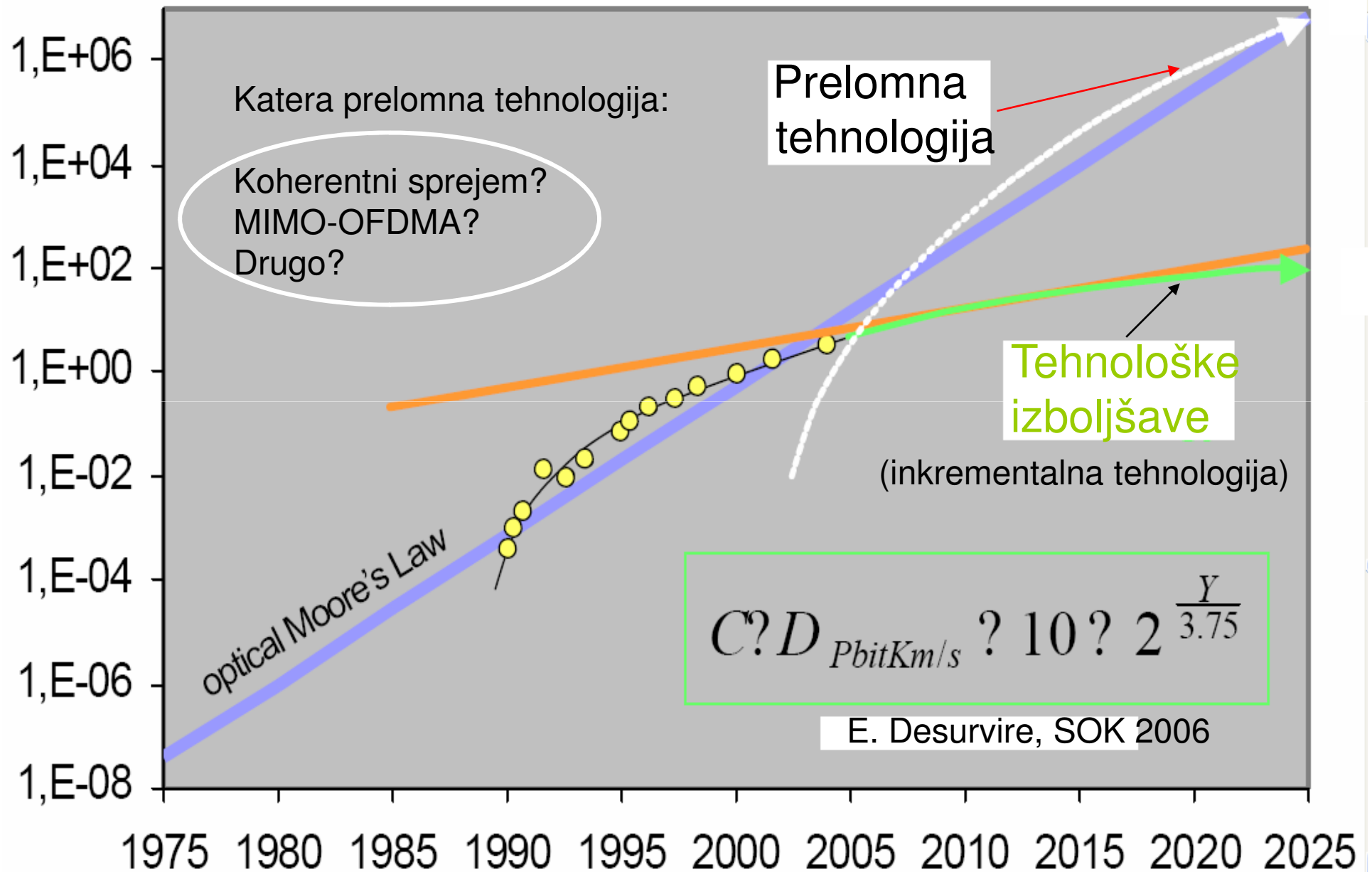


Globalna povprečna rast interneta je bila 40% do 60% na leto. Znižana prihodnja rast 40% (faktor 10 v 8 letih) je osnova za diagram.

# Čas sprejema informacije

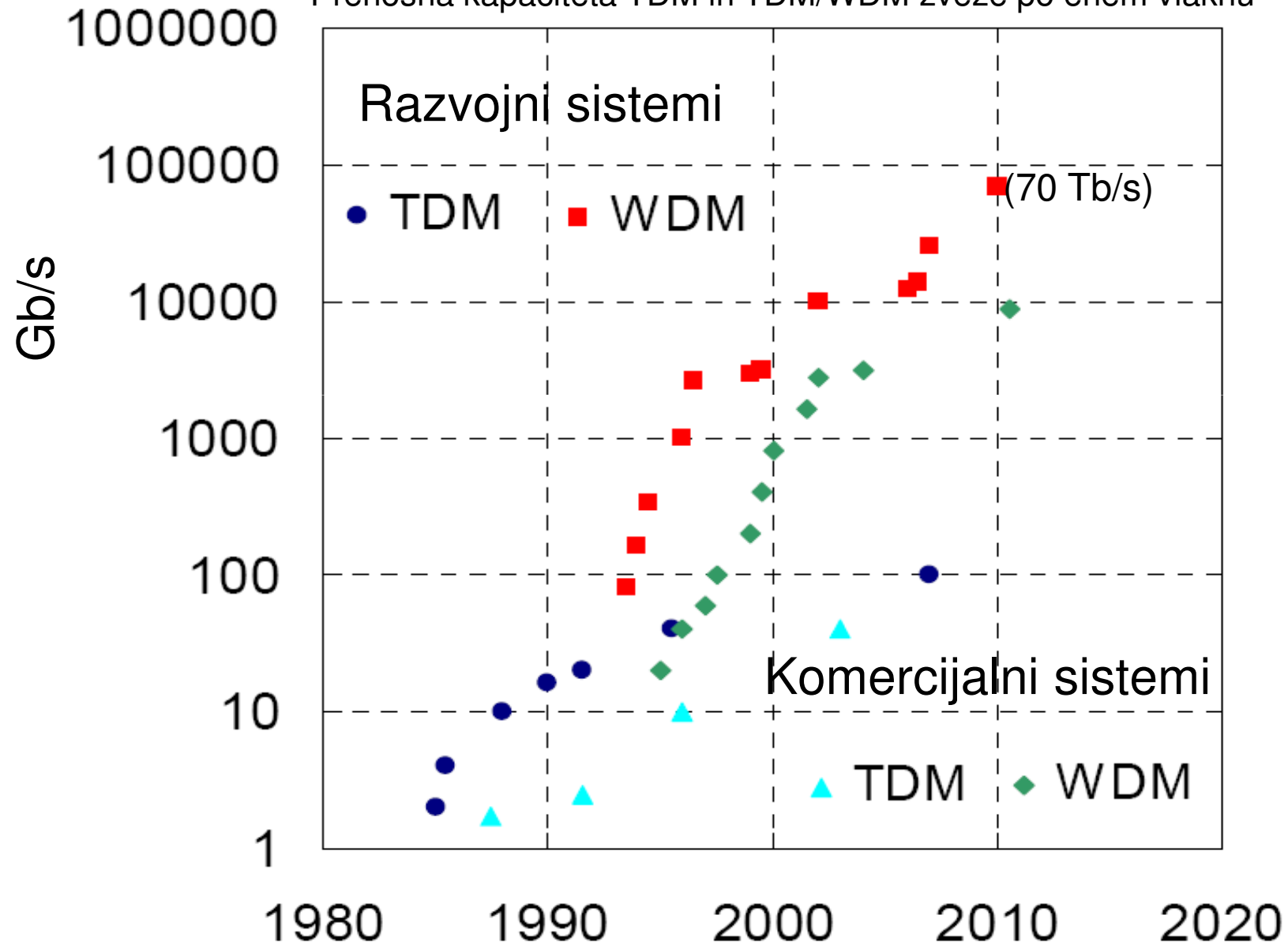


# Potreba po novih tehnologijah



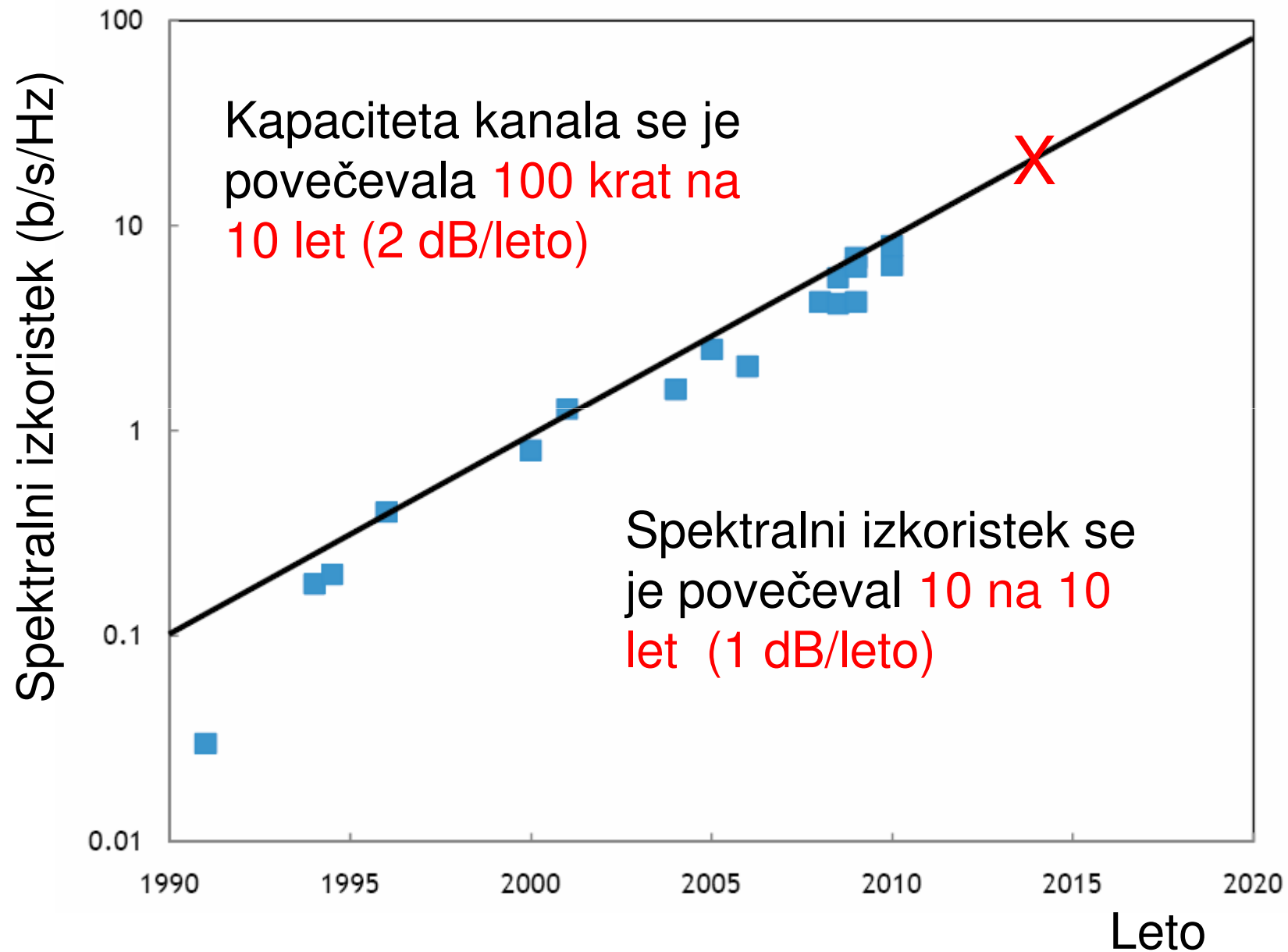
# Razvoj in aplikacije

Prenosna kapaciteta TDM in TDM/WDM zveze po enem vlaknu






# Spektralni izkoristek



# Razvoj sistemov 1990 - 2020

1990s	2000	2010	2020
■ 2.5-10 Gb/s channel rate	■ 10 Gb/s channel rate	■ 100 Gb/s channel rate	■ 1 Tb/s ! channel rate
■ 8, 16, 40 Channels	■ 100 Channels	■ 100 channels	■ 100 Channels
■ 20-160 Gb/s Capacity	■ 1 Tb/s Capacity	■ 10 Tb/s Capacity	■ 100 Tb/s Capacity
■ SE = .025-.05	■ SE = 0.2	■ SE = 2.0	■ SE = 20 !
		sedanjost	prihodnost

Pesimisti trdijo, da bo v letu 2020 naraščanje prometa 10-krat  prehitevalo naraščanje kapacitete omrežja!! - Ko sedanje in nove tehnologije ne bodo omogočale ustreznega povečevanja kapacitete vlakna, bodo množili število vlakenskih zvez v omrežju (prostorski multipleks, SDM). **To pomeni dražjo varianto razvoja.**

# Plenarno predavanje: 3M tehnologije

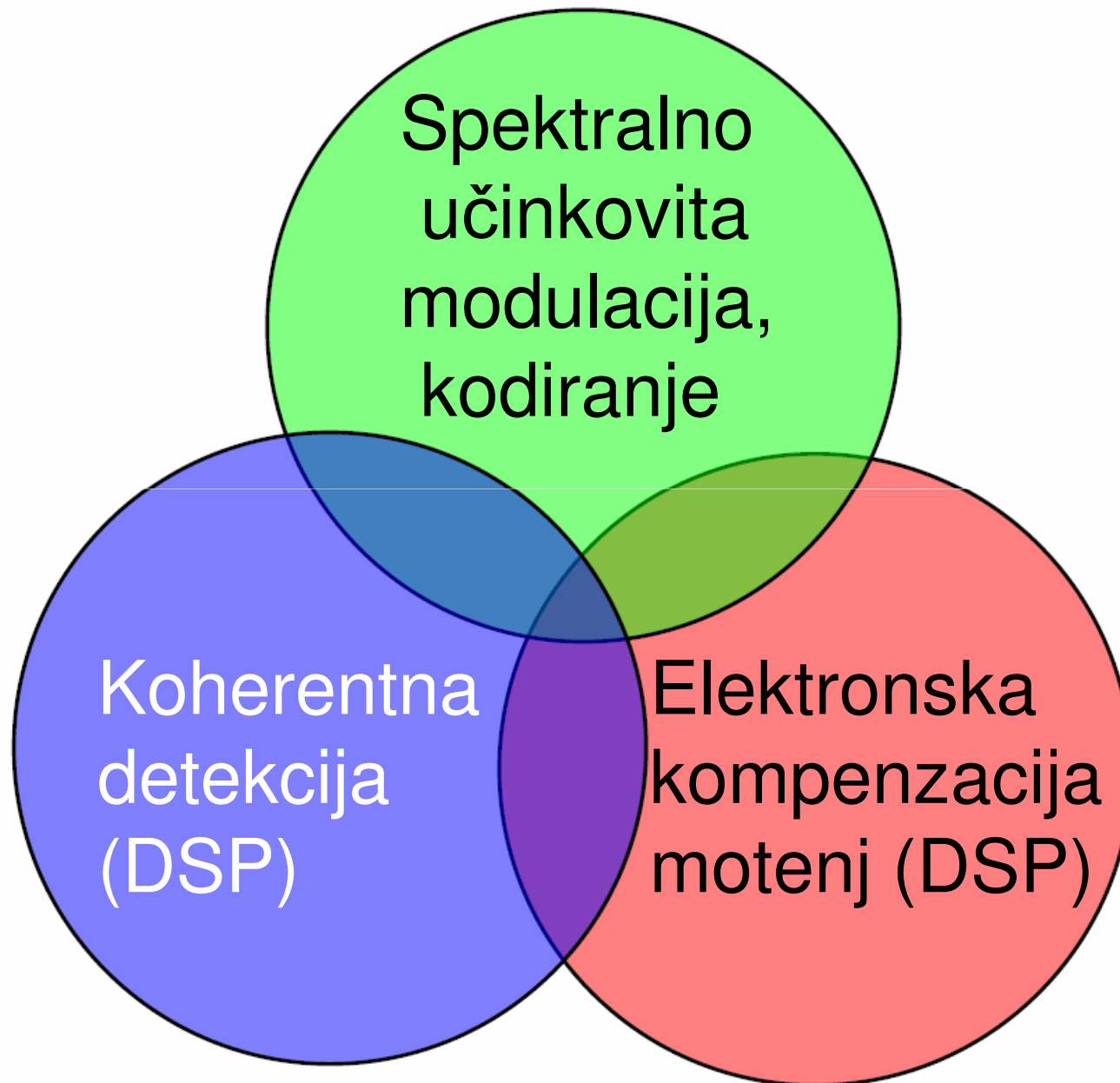
Masataka Nakazava, ECOC 2010: Velik skok v optičnih tehnologijah do leta 2030 in pozneje (Japonski projekt Extreme Advanced Transmission, EXAT):

- Sedanja letna rast kapacitete kljub gospodarski krizi še vedno raste 40% letno
- Čez 20 let bomo potrebovali Peta b/s ali celo Exa b/s pretok za potrebe Super-HDTV ali 3DTV.
- Maksimalna kapaciteta kanala se bo od sedanje 100 Gb/s bližala mejni vrednosti 1000 Gb/s (1 Tb/s, femtosekundna TDM), maksimalna kapaciteta vlakna pa vrednosti 100 Tb/s.
- Razvoj optičnih tehnologij, imenovanih 3M, za višjo kapaciteto:

1. Mnogonivojski modulacijski farmati
2. Mnogojedrno optično prenosno vlakno
3. MIMO dvopolarizacijski PolMux (in mnogorodovni SDM)

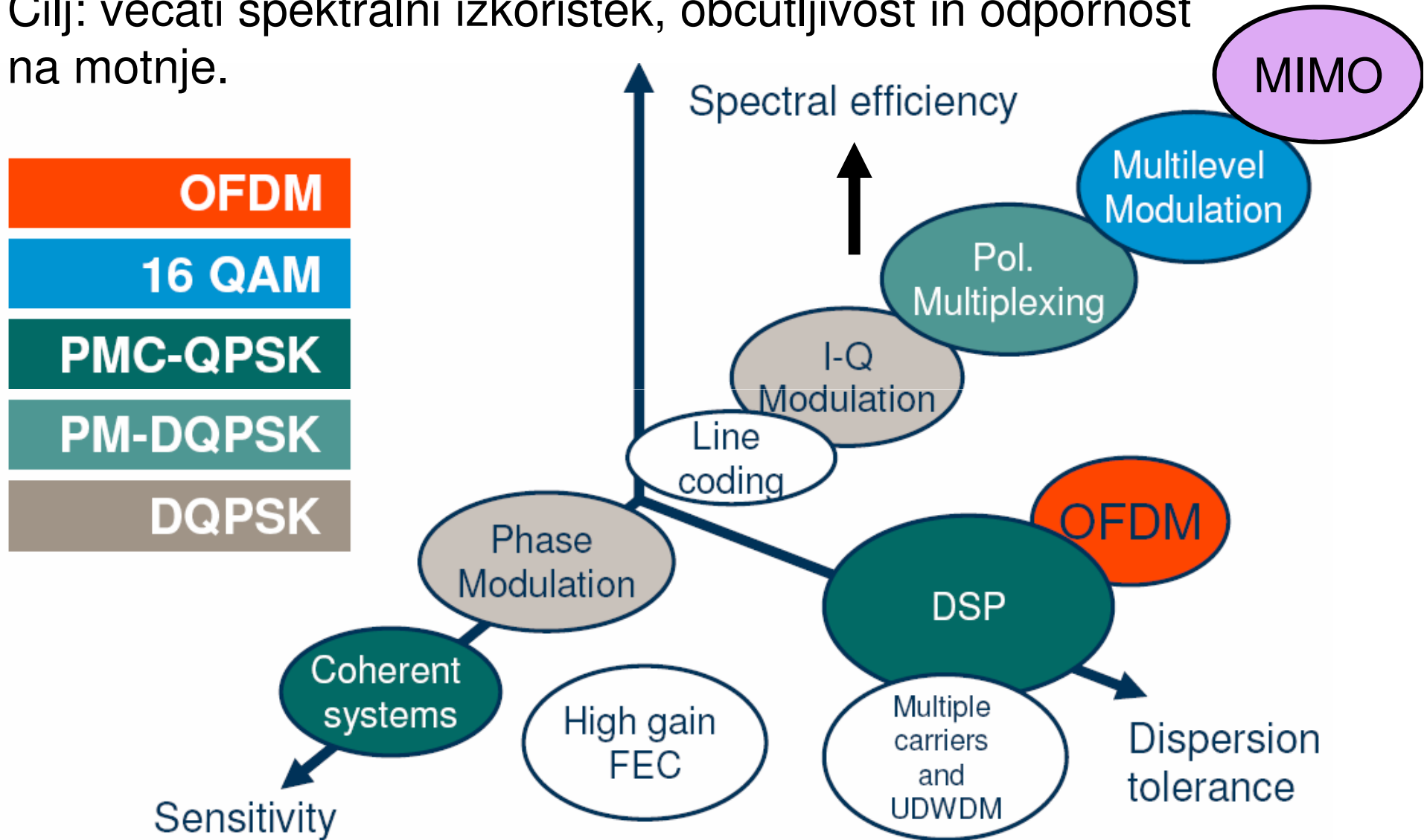
3M

# Nove optične in elektronske tehnologije

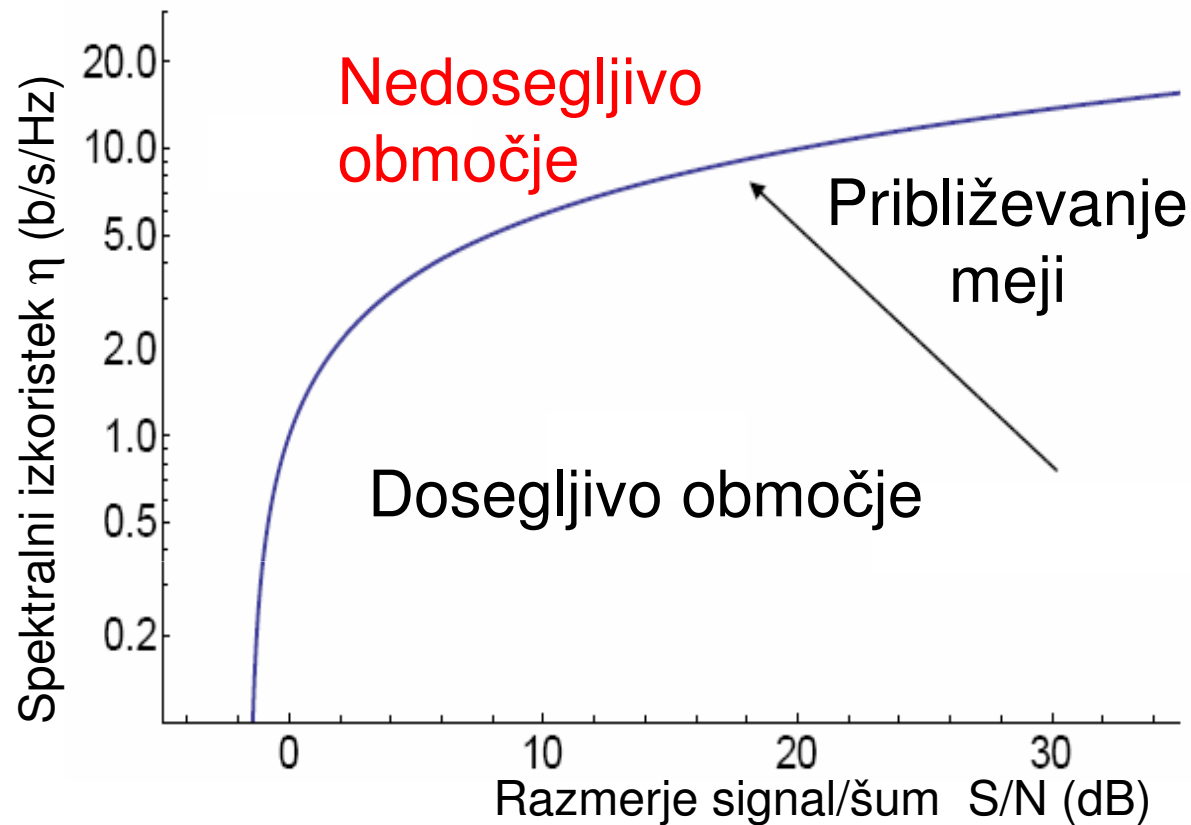


# Učinek tehnologij

Cilj: večati spektralni izkoristek, občutljivost in odpornost na motnje.



# Shannonova mejna kapaciteta kanala



Načini doseganja večjega spektralnega izkoristka:

- Večje razmerje S/N
- Zahtevnejši modulacijski formati
- Dva polarizacijsko ortogonalna kanala
- OFDM in koherentni sprejem

$$B \leq C \quad \text{b/s}$$

$$C = \Delta f \log_2(1 + S/N)$$

$$\eta = C/\Delta f$$

$$S = E_b B$$

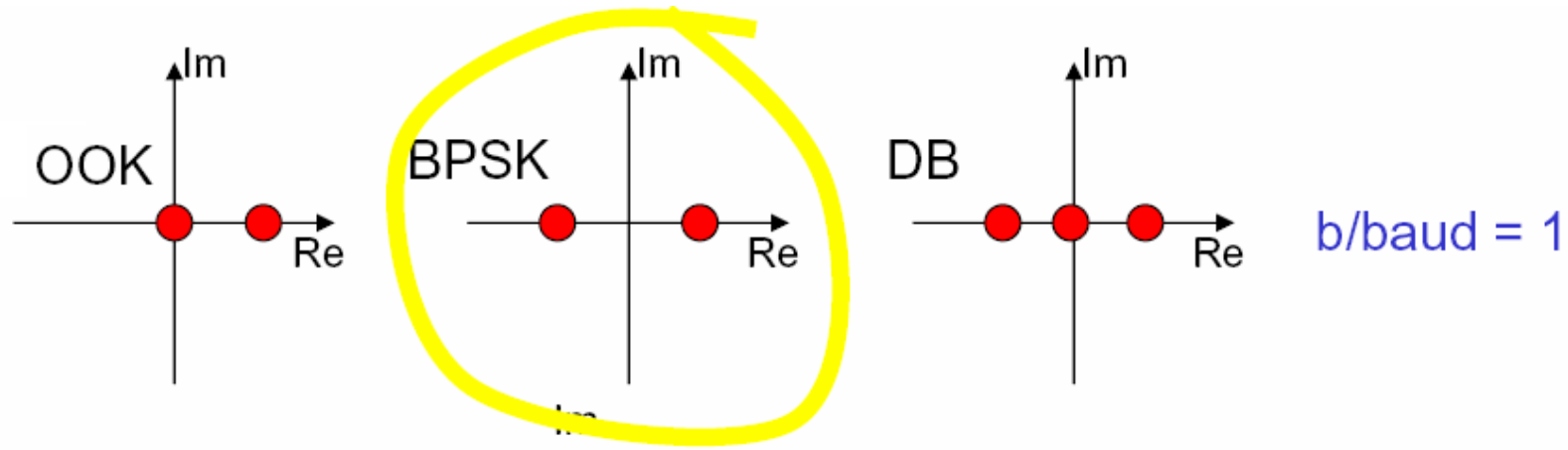
$$N = N_0 \Delta f$$

$$C = \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0 \Delta f} \right)$$

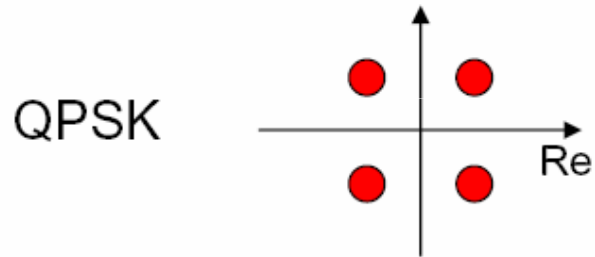
Kapaciteta v optiki

$$C_\infty = \frac{P}{N_0} \log_2 e$$

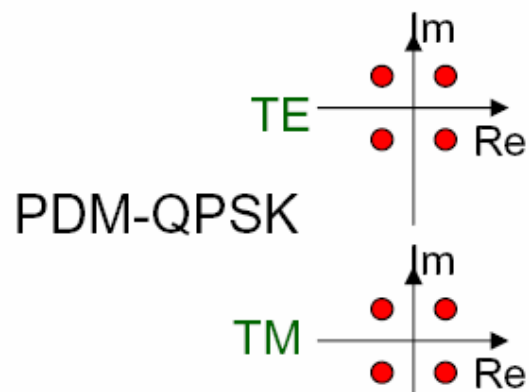
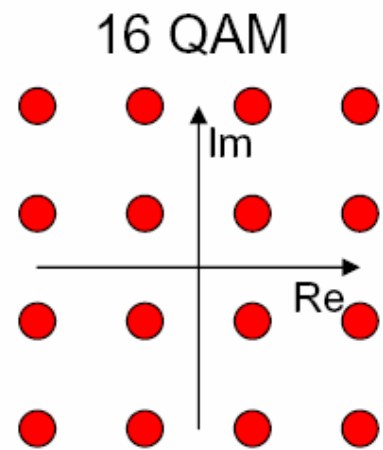
# Modulacijski formati nižjega reda



b/ baud = 1



b/ baud = 2



b/ baud = 4

OOK = on-off keying  
BPSK = binary phase-shift keying  
DB = duobinary  
QPSK = quadrature phase-shift keying  
QAM = quadrature amplitude modulation  
PDM = polarization-division multiplexed

# Prednostni razvojni pristop

Načini in možnosti večanja zmogljivosti  $C \times L$  optičnega omrežja:

- 1. Intenzivno** večanje kapacitete omrežja z večanjem kapacitete  $C$  in dolžine  $L$  optične zveze po posameznem vlaknu – prednosni pristop. Večanje  $C \times L$  optične zveze pri izkoriščanju celotnega spektra optičnega ojačevalnika (40 nm in več).
- 2. Ekonomija:** Pravilo: 4 kratno povečanje kapacitete prenosa zahteva 2,5 kratno povečanje stroškov.
- 3. Ekstenzivno** večanje kapacitete omrežja s pomnoževanjem števila optičnih zvez in širjenjem optičnega omrežja.  $N$ -kratno večanje zahteva  $N$ -kratne stroške.
4. Večanje  $C \times L$  naj dohiteva rast potreb po Mooreu (2 krat na 18 mesecev).
- 5. Sistemi optičnih komunikacij se bližajo zgornji meji fizikalnih zmogljivosti (terabitni kanali, petabitno vlakno)!!**



# Optične tehnologije, pomen $C \times L$

Večanje kapacitete **C** (b/s):

**Ovira:** kromat. disperzija (CD), pol. rodovna disperzija (PMD), **nelinearnost**. Disp. je presežena.

## Način večanja **C**:

- Časovni multipleks (ETDM, OTDM)
- Valovno-dolžinski multipleks (grobi, gosti) (CWDM, DWDM)
- Digitalni modulacijski formati (QPSK, QAM in drugi)
- **Ortog. frekvenčni multipleks (OFDM)**
- **Koherentni sprejem (CO)**

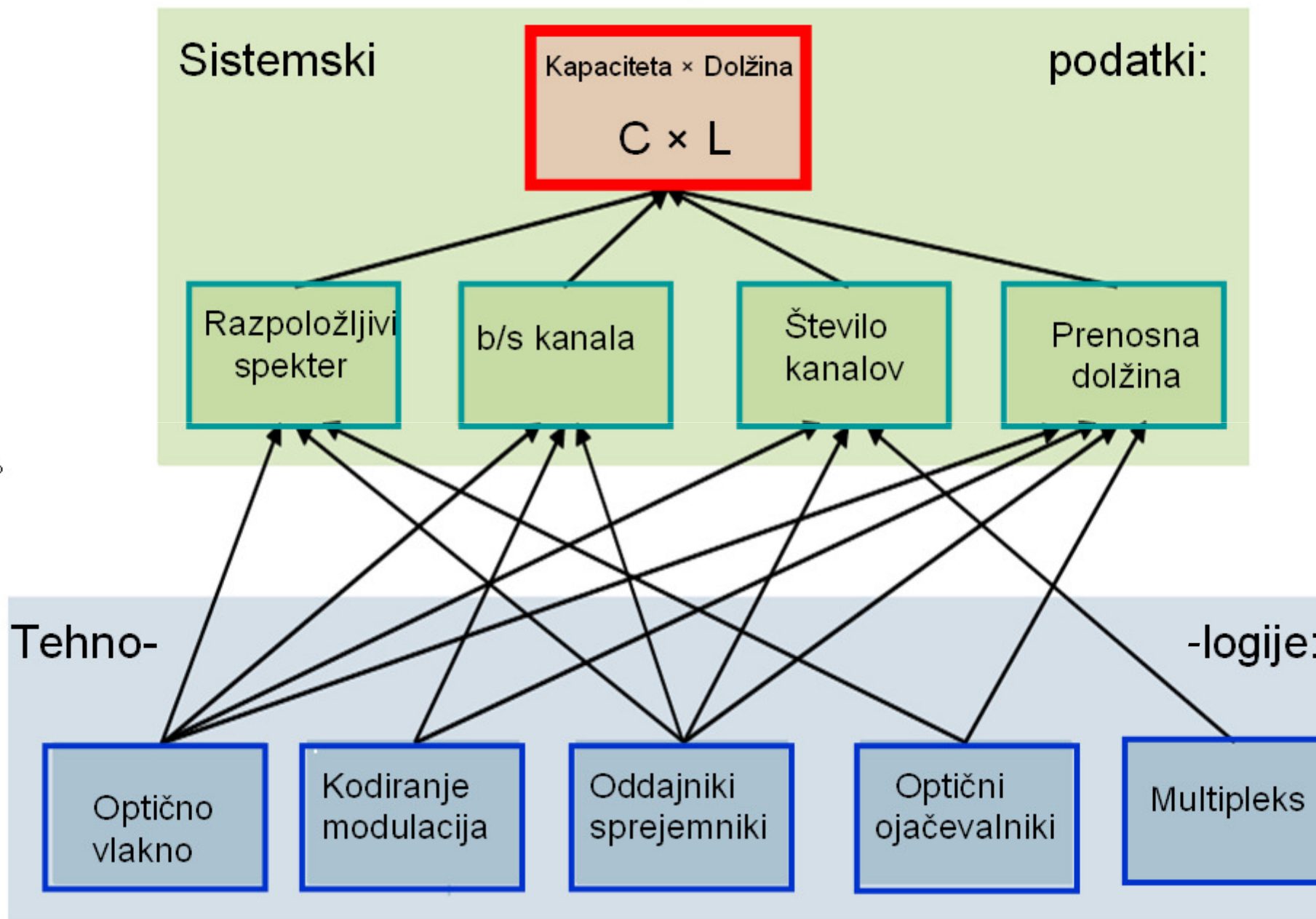
Večanje dolžine **L** (km):

**Ovira:** **slabljenje, nelinearnost**, disperzija je presežena

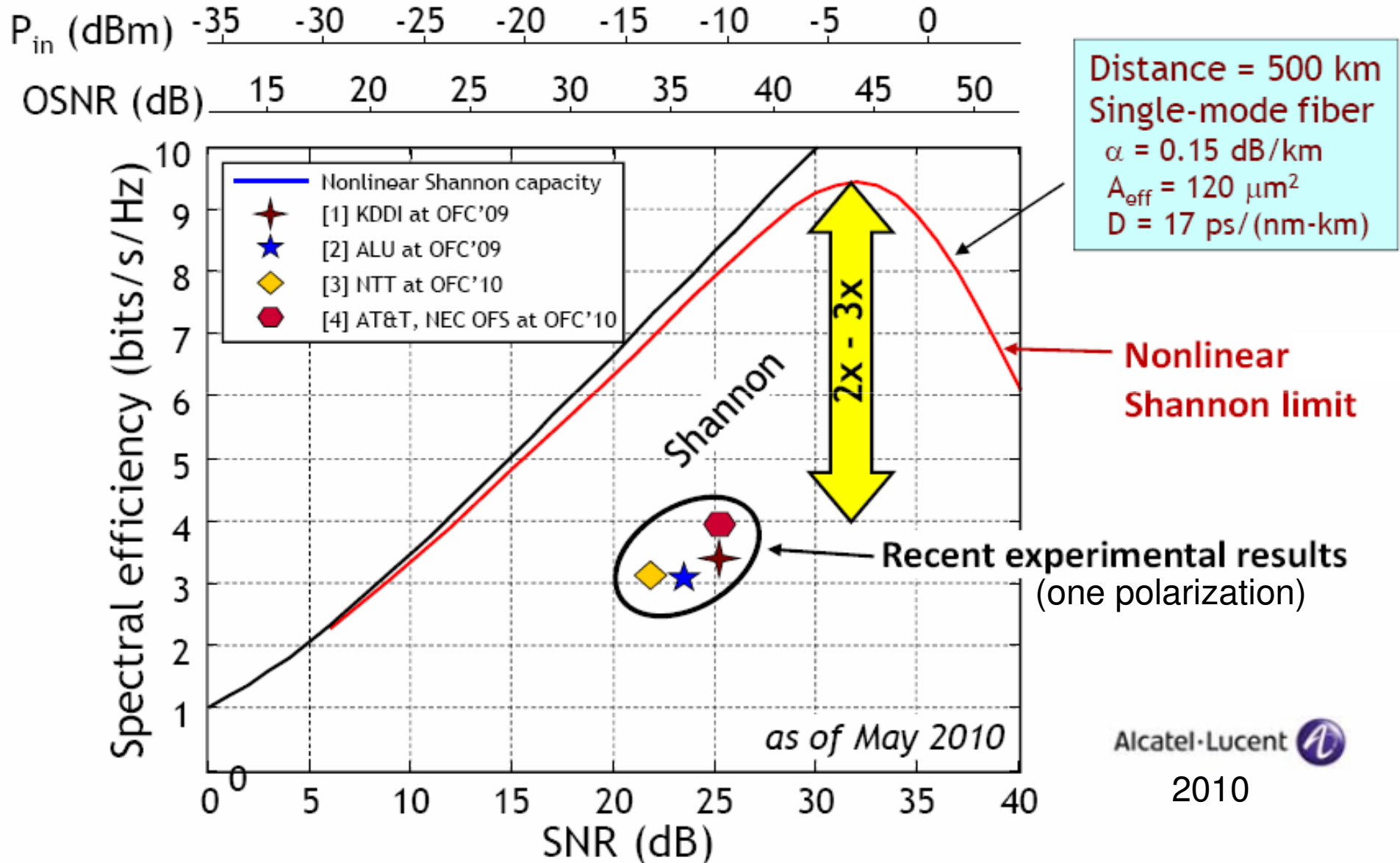
## Način večanja **L**:

- Zniževanje slabljenja vlakna SSMF, PSCF, PCF?
- Erbijski vlakenski ojačevalnik (EDFA), Ramanski vlakenski ojačevalnik (RA)
- Solitoni (ni aktualno)
- **Ortog. frekvenčni multipleks (OFDM)**
- **Koherentni sprejem (CO)**

# Načini večanja zmogljivosti zveze C×L



# Spektralni izkoristek nelinear. vlakna



Nelinearni pojavi so še neobvladana omejitev optičnega vlakna

# Kaj prinaša koherentna detekcija

## Coherent Detection

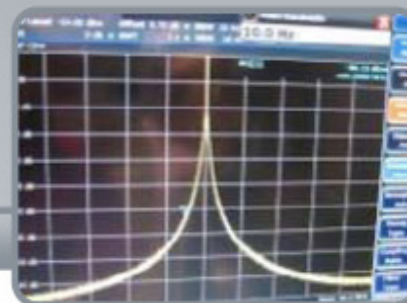
- High wavelength density
- High receiver sensitivity

### Electronic Signal Processing

- Relaxed tunable lasers requirements
- High flexibility in modulation concepts
- Software defined radio for carrier recovery and channel decoding

### Low-cost Tunable Lasers

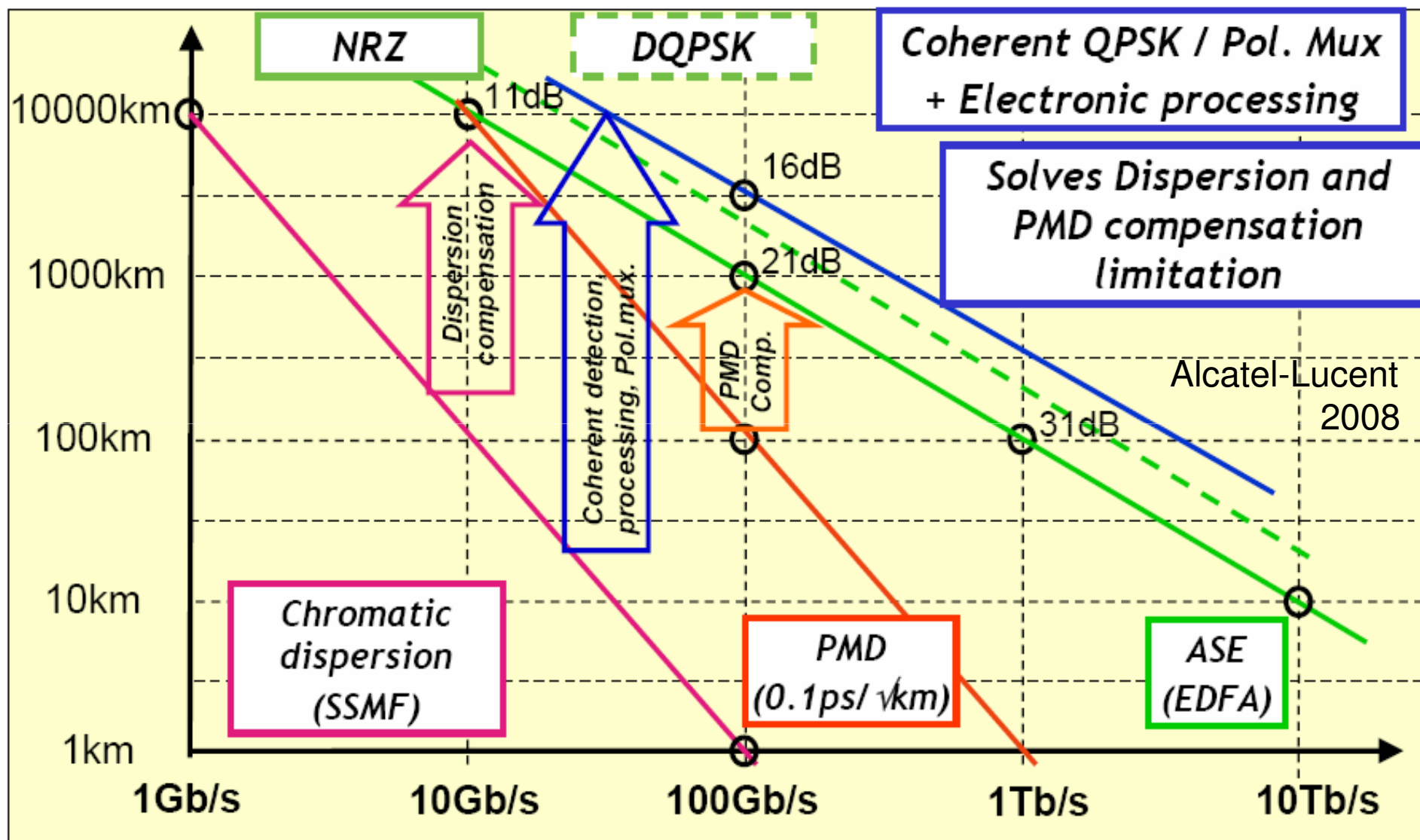
- Linewidth  $< 200$  kHz
- Serves as local oscillator for coherent detection
- Serves as upstream signal



### Photonic Integration

- Single integrated ONU optical component
- Single integrated OLT optical component
- Generation of multiple downstream wavelengths out of a single laser source

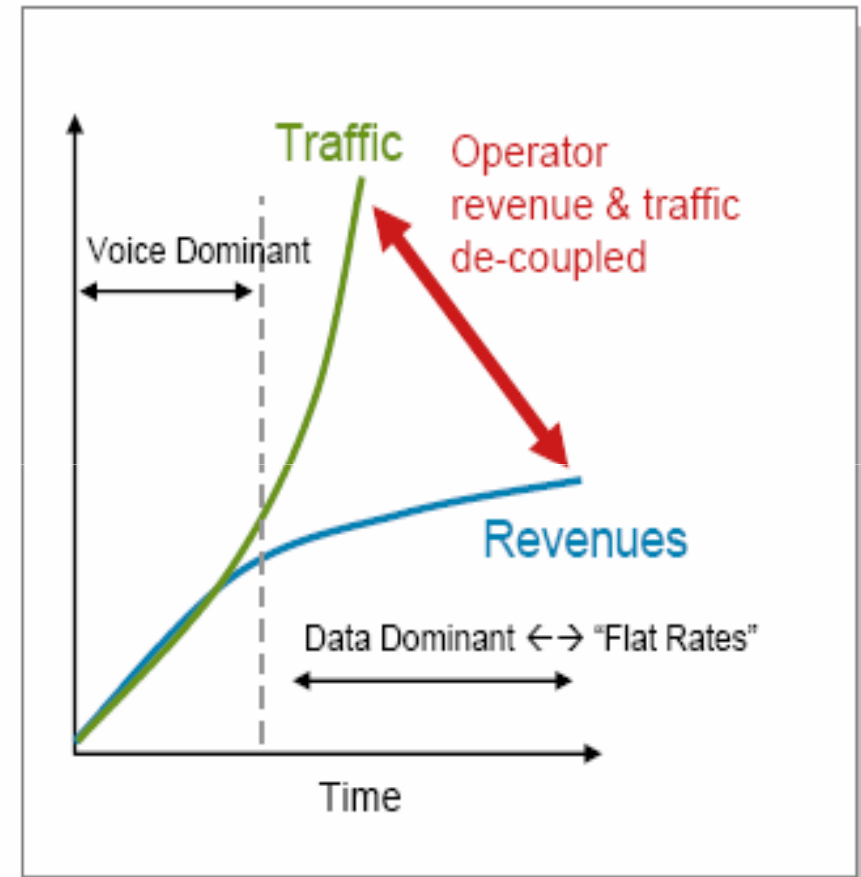
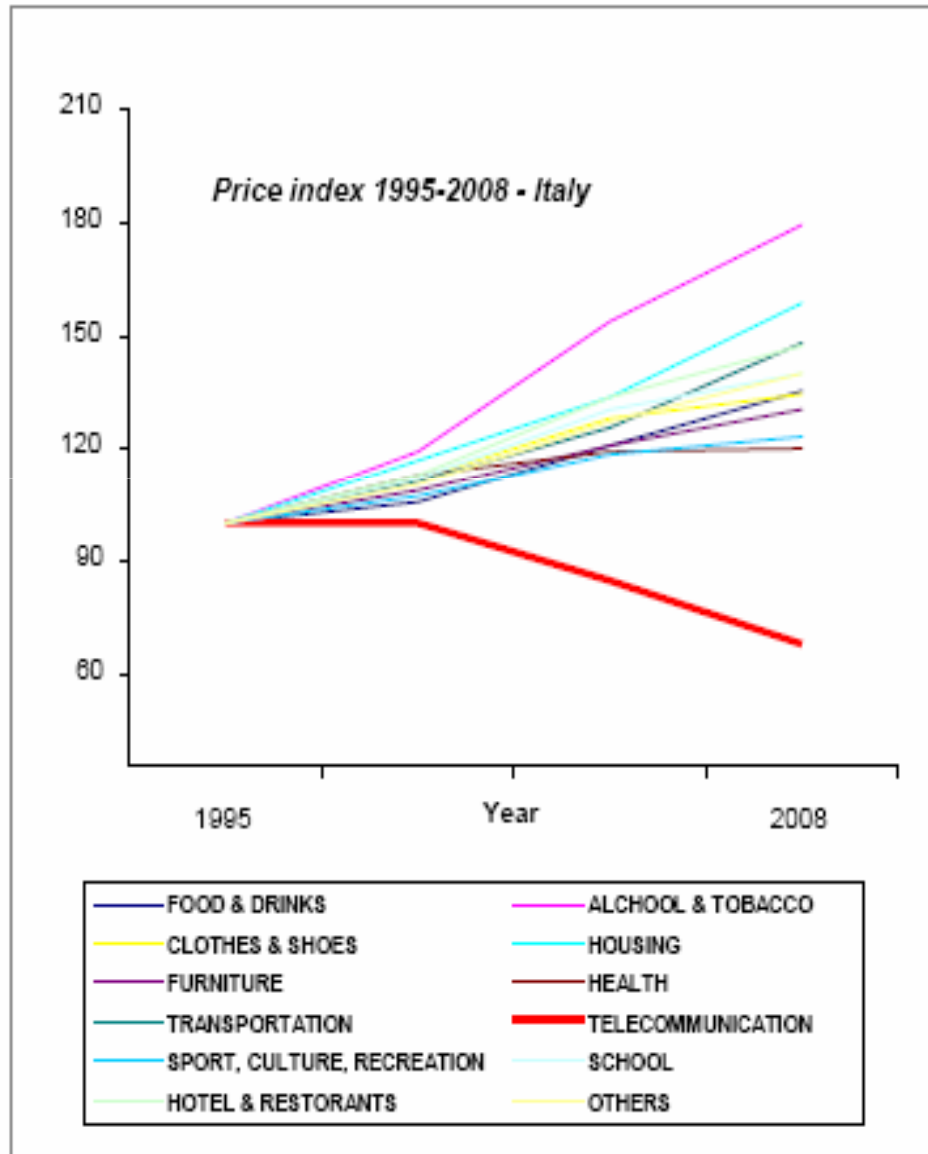
# Doseg optične zveze



S kompenzacijo disperzije in ob zanemaritvi nelinearnosti doseže koherentna optična zveza 3000 km pri bitni hitrosti 100 Gb/s in 300 km pri bitni hitrosti 1 Tb/s.

# Prikaz cen, prometa in prihodka

- Primer Italija



Rastoč razkorak med prometom in prihodki



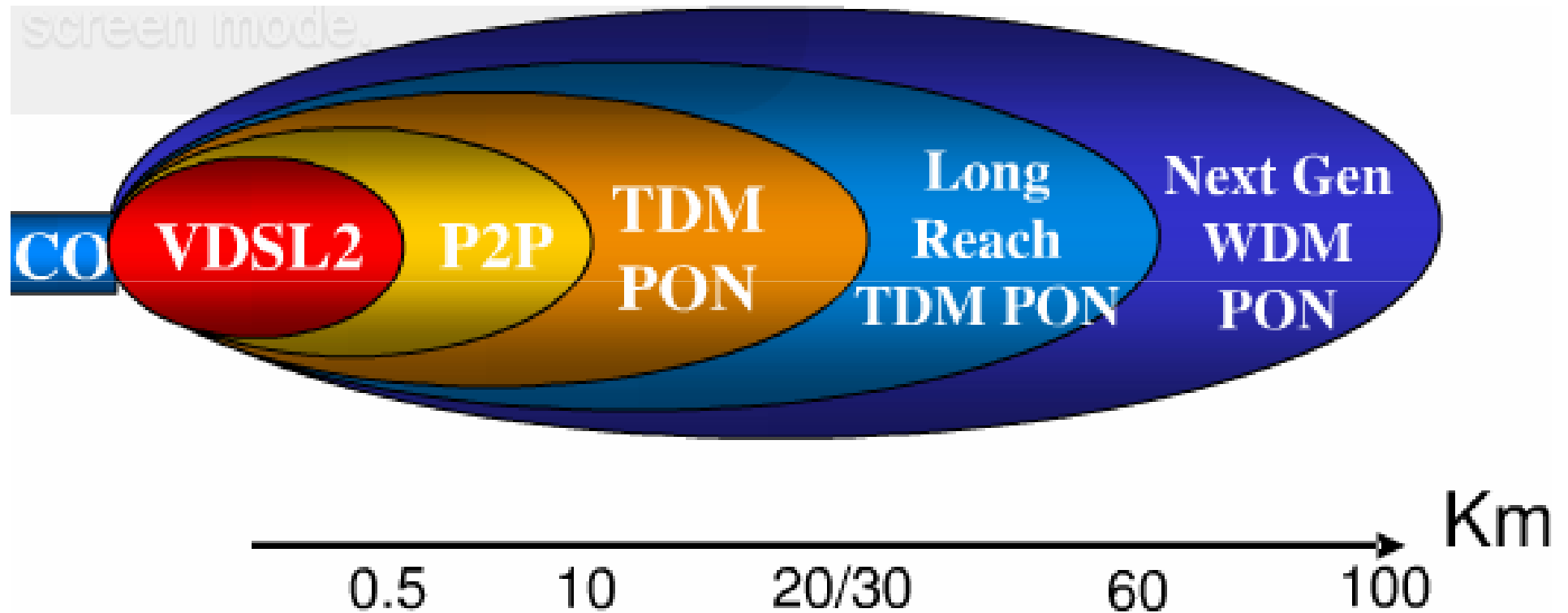
P. Solina

Ecoc 2010

B

Razvoj in novosti v  
dostopovnem  
omrežju  
NGOA

# Smer razvoja dostopovnega omrežja



- *večanje dosega*
- *večanje b/s*



# PON v dostopovnem omrežju

- GPON
- EPON
- ER/LR PON – nadgradnja GPON
- WDM PON – nadgradnja GPON
- WDM/TDM PON
- LR WDM PON (VelePON)
- LR WDM/TDM PON
- OFDMA - PON
- Koherentni PON

# 3K - težnje

## 1. Konvergenca

Zlitje mobilnih in fiksnih storitev, naprav, aplikacij in omrežij; prepletanje RK in OK.

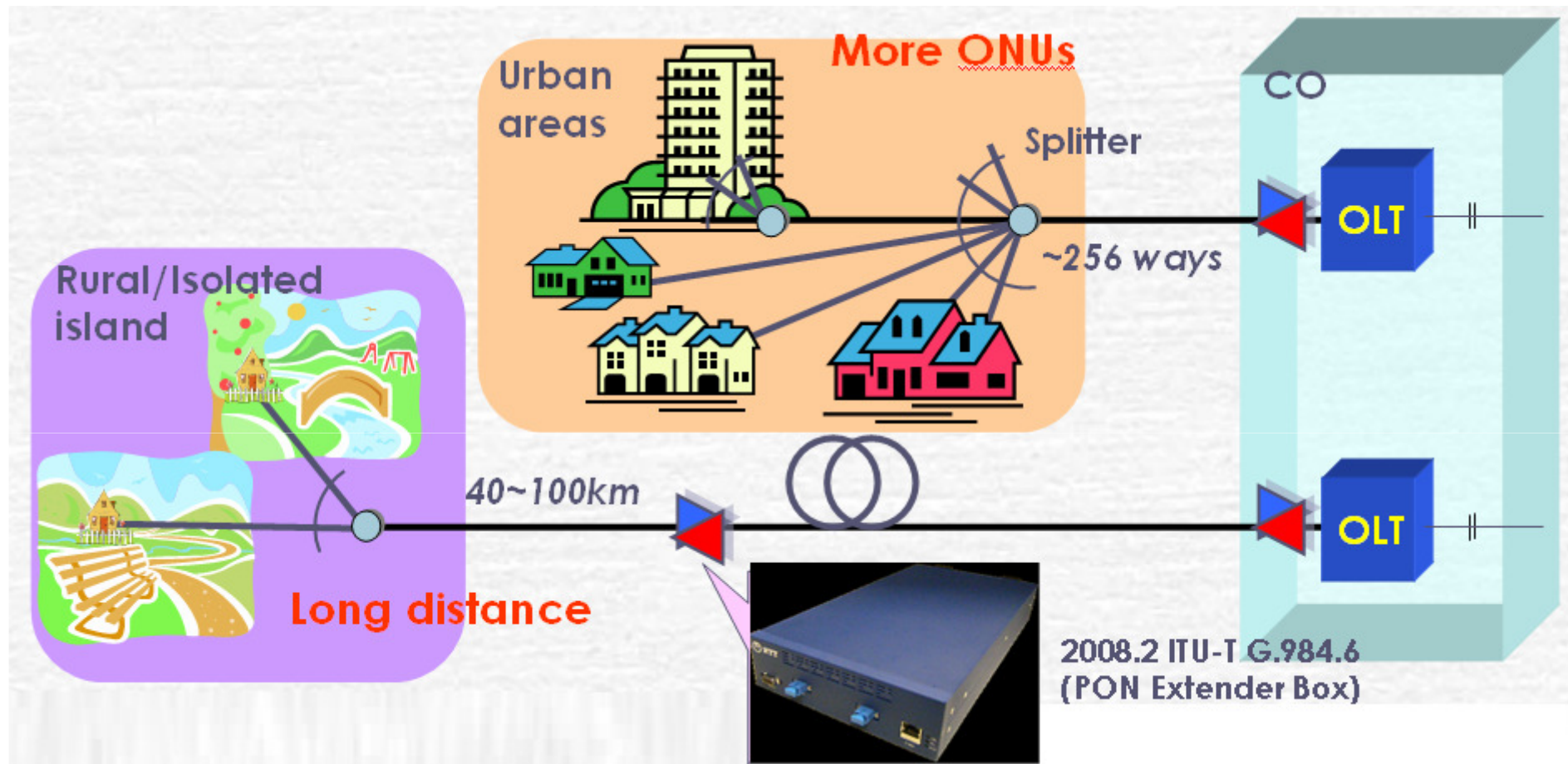
## 2. Koeksistenca

Sobivanje različnih arhitektur in tehnologij omrežja, ki ga nadgrajujemo za nove potrebe. Staro omrežje je osnova za nadgradnjo in koeksistira z novim.

## 3. Konsolidacija

Strnitev omrežja, zmanjšanje števila central (CO) in drugi ukrepi na fizičnem nivoju, ki znižujejo CAPEX in OPEX.

# PON za urbano in ruralno področje



- vprašanje stroškov za pokritje ruralnih področij?
- sodelovanje države in lokalnih skupnosti!

# Koncept razvoja NGOA 1/2

## Cilji širokopasovnega dostopovnega omrežja:

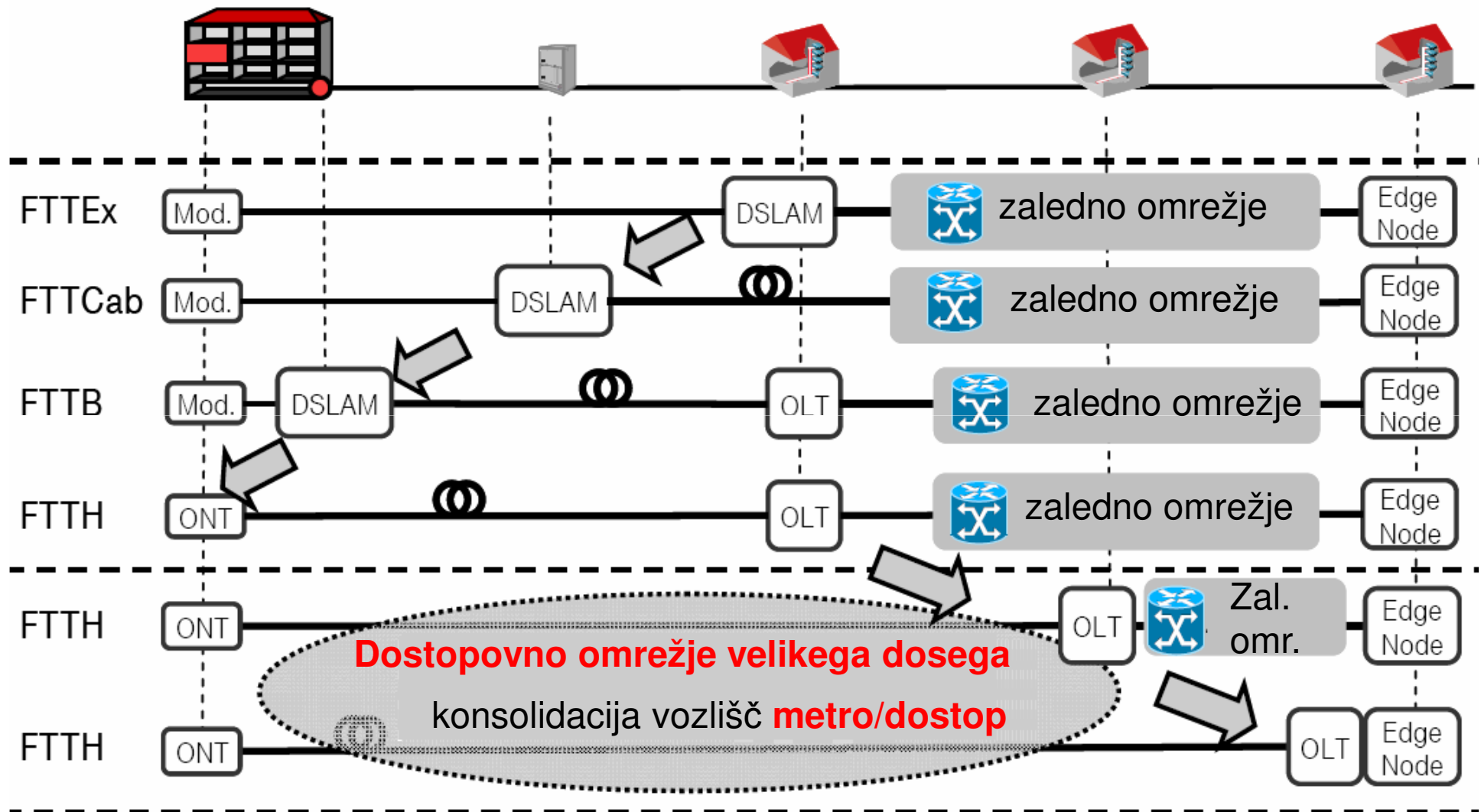
- Konvergenca omrežne infrastrukture. Sobivanje prejšnjih in novih sistemov. Stare zveze delujejo naprej
- Hierarhija omrežja: jedrno omrežje se nadaljuje v dostopovnem omrežju. Metro omrežje ni potrebno
- Omrežje je zasnovano tako, da omogoča nadgradnjo v primeru povečanih potreb ali novih tehnologij
- Znižanje CAPEXa in zlasti OPEXa
- Znižanje porabe moči
- Povečanje QoS

# Koncept razvoja NGOA 2/2

## Novo omrežje kot nadgradnja PONa:

- Razvojno naravnano omrežje s fazami PON1, PON2, PON3, PON4 v letih 2010 – 2030
- Osnovna topologija je PON. Topologija T-T se vključi v omrežje za potrebe zahtevnejših naročnikov
- Tehnologija omrežja TDM / WDM PON za potrebe majhnih in srednjih naročnikov. (Prikluček TDM z delilnikom moči oz. WDM z valovnim razvrstilnikom)
- Omrežje ima močno zmanjšano število central, ki postanejo vozlišča jedrnega omrežja
- Omrežje ima podaljšan doseg (ER-PON) ali velik doseg (LR-PON)

# PON jutri: konsolidacija vozlišč



Dostopovno in (vele)mestno omrežje naj bi se združila v eno omrežje (Metro/Access) z razsežnostjo tudi do 100 km (velePON).

# Valovni pasovi

Naziv pasu	Meje pasu (nm)	Širina pasu (nm/THz)
O Band	1260 – 1360	100 / 17.5
E Band	1360 – 1460	100 / 15.1
S Band	1460 – 1530	70 / 9.4
C Band	1530 – 1565	35 / 4.4
L Band	1565 – 1625	60 / 7.1
U Band	1625 – 1675	50 / 5.5

Pas C (konvencionalni) in L (dolgi) imata prednost nizkega slabljenja vlakna.

# Optično (opto-elektronske) komunikacije

- **Optične zveze in omrežja – ključne naprave**  
optično vlakno, optični ojačevalnik, opto-elektronski multipleks.

- **Nove optične in elektronske tehnologije**  
spektralno učinkovite modulacije in kodiranje, koherentna detekcija, kompenzacija motenj (DSP).

- **Optični dostop – arhitekture in tehnologije**  
TMT/TT, TDM/WDM/OFDMA/SCM, E-R/L-R  
(podaljšan doseg, velik doseg).



# Multipleksiranje (razvrščanje) v dostopu

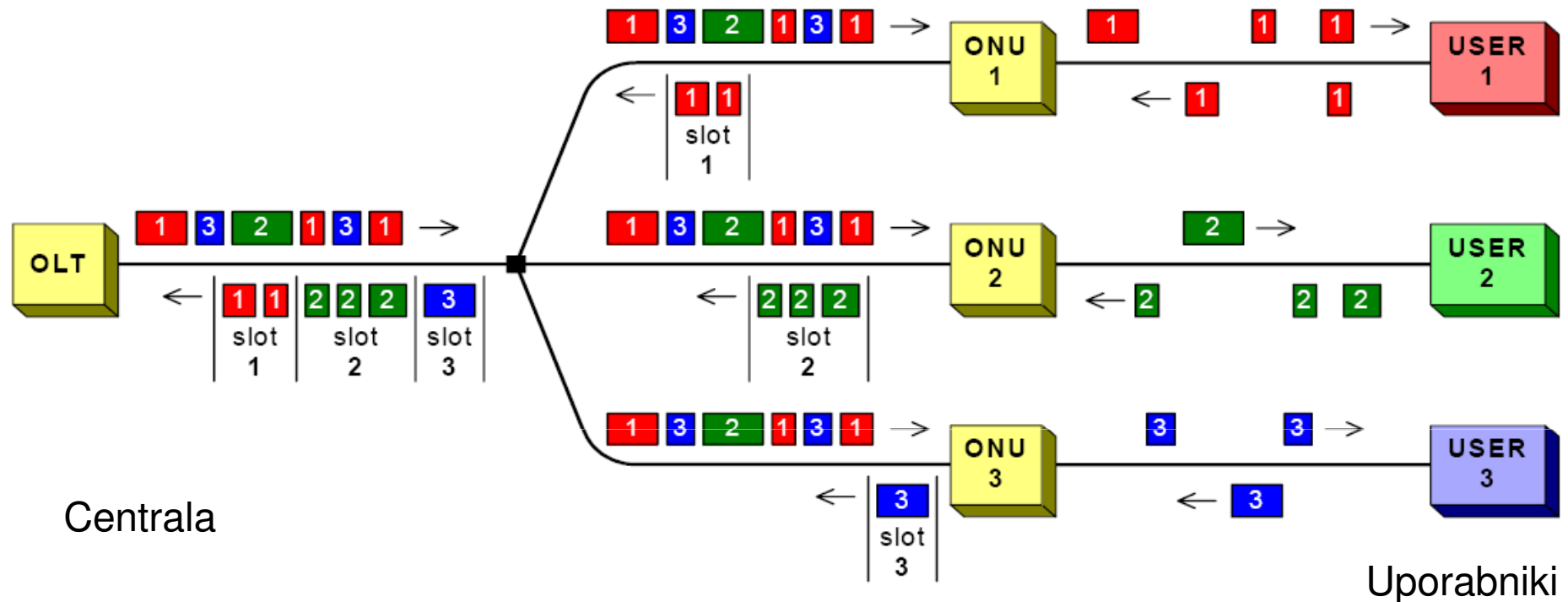
## Osnovne vrste:

1. SDM (prostorsko)
2. TDM(A) (časovno)
3. WDM(A) (valovno-dolžinsko)
4. OFDM(A) (ortogonalno frekvenčno)
5. CDM (kodno)

## Kombinirane vrste:

6. TDM/WDM (HPON) (hibridno)
7. SCM/OFDM (e/o podnosilniško)

# TDM/TDMA, dotok in odtok



## ▪ Dotok [→] TDM

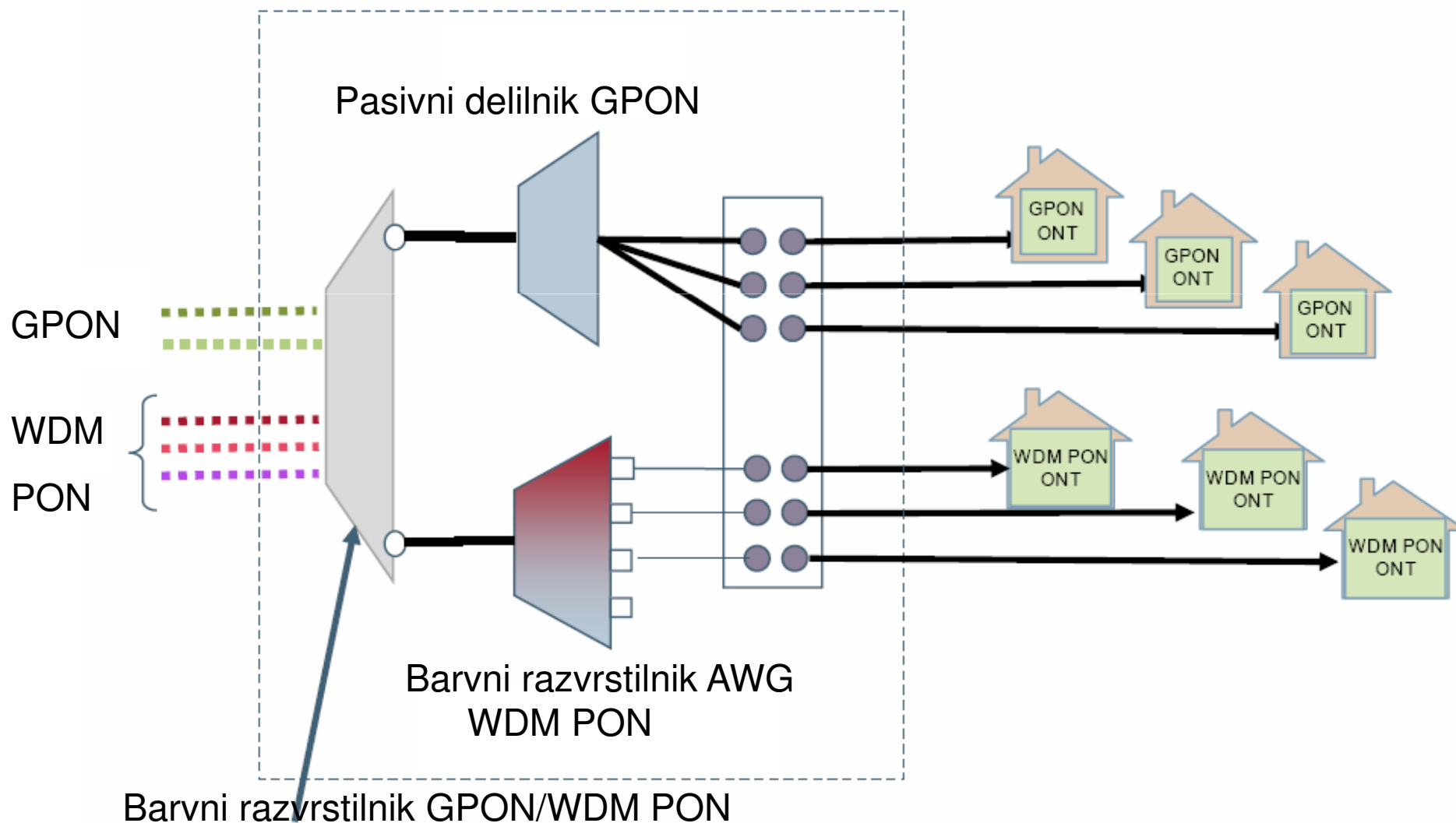
- Vse sprejemne enote (ONU) prejmejo enako vsebino (broadcast)
- Sprejemne enote z enkripcijo izločijo njim namenjeno vsebino in s tem zagotavljajo zasebnost,.

## Odtok [←] TDMA

- Sprejemne enote sinhronizirajo oddajo posameznega uporabnika v časovne intervale tako, da se ne prekrivajo.

# Koeksistenca GPONa in WDM PONa

Nadgradnja omrežja z novo tehnologijo ne sme spremeniti pogojev delovanja obstoječih tehnologij v skupnem omrežju.



# Načini komunikacijskega povezovanja

V radiodifuziji, radijskih komunikacijah, govornih in podatkovnih zvezah ter zvezah med računalniki so se uveljavili naslednji načini komunikacijskih povezav:

- **Broadcast:**

**En** vir pošilja informacijo **vsem** uporabnikom v omrežju. (razpršena komunikacija, difuzija). Poseben primer: Broadcast and Select.

- **Multicast:**

**Eden** ali **več** virov pošilja informacijo **več** uporabnikom v omrežju. (omrežje T-MT ali MT-MT))

- **Unicast:**

**En** vir pošilja informacijo **enemu** uporabniku v omrežju. Omrežje ima dve vozlišči (omrežje T-T)

# Območja dostopovnega omrežja

## 1. Novo dostopovno območje (greenfield):

- območje stanovanjskih hiš (SFU, single flat unit)
- območje stanovanjskih blokov (MDU, multi dwelling unit)

## 2. Obstoječe dostopovno omrežje (brownfield):

- Gosto pozidano urbano področje, mestna jedra

## 4. Regulacija:

- Razvezava zanke (Japonska, Koreja, Eu)
- Novo grajena omrežja izvzeta iz razvezave (ZDA)
  - učinek na povečanje števila novozgrajenih priključkov (Verizon, AT&T, pooblaščne organizacije – “incumbent”)

# Večje novosti, ki jih prinaša NGOA

## 1. Omrežna hierarhija:

Novo dostopovno omrežje NGOA bo neposredno priključeno na jedrno omrežje. Omrežje metro, ki je povezovalo dostop in jedro, ne bo potrebno kot samostojno omrežje v sedanji obliki.

## 2. Omrežna topologija:

NGOA je zasnovano na topologiji PON za večinski del uporabnikov in topologiji točka-točka za zahtevnejše uporabnike (banke, podjetja, ustanove, državna uprava).

## 3. Omrežni doseg in konsolidacija vozlišč:

Da bi kolikor mogoče znižali CAPEX in zlasti OPEX, ima NGOA povečan (ER, Extended Reach) ali velik (LR, Long Reach) doseg in hkrati manjše število central, ki so hkrati centrale jedrnega omrežja.

## 4. Omrežna tehnologija:

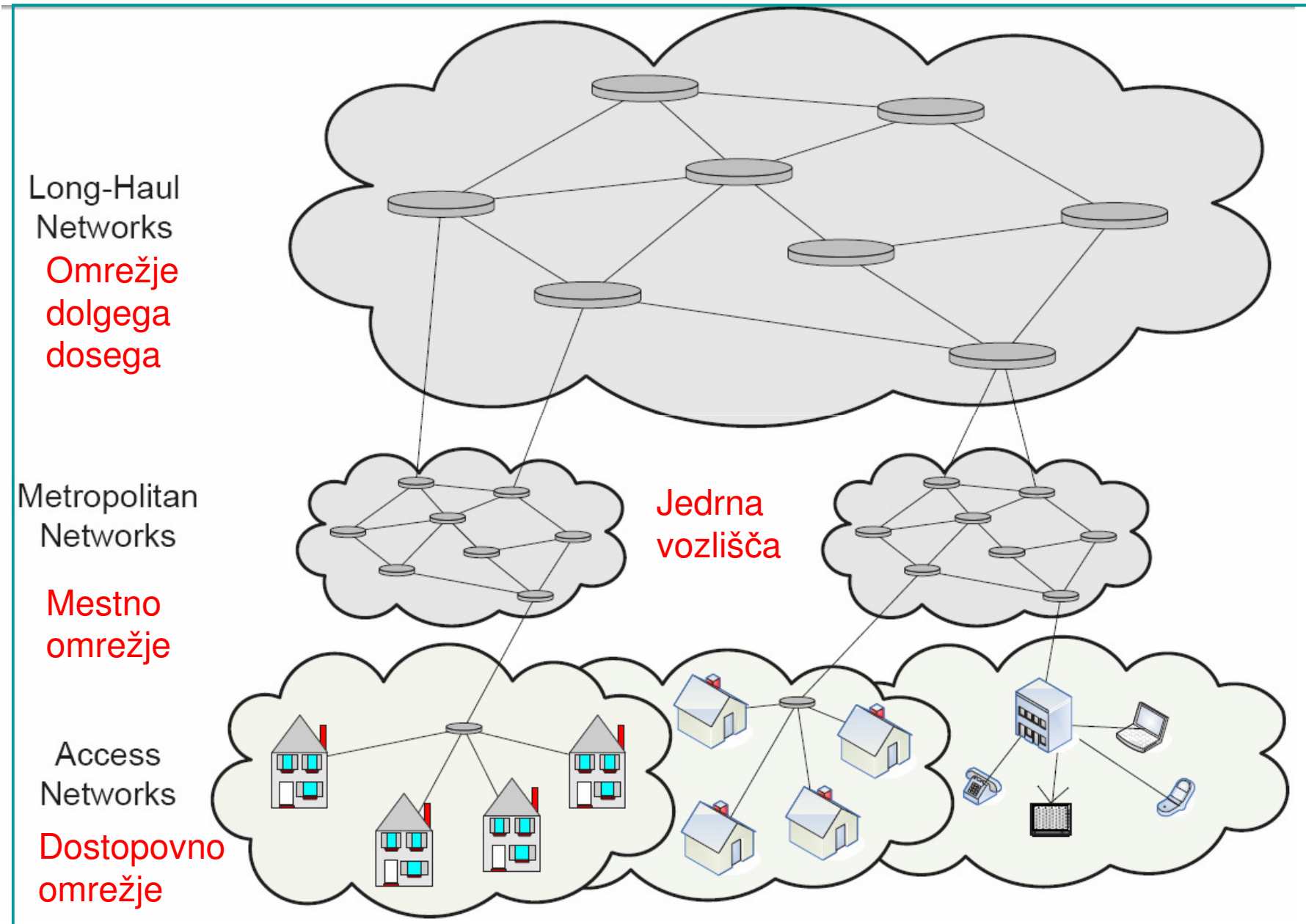
NGOA uporablja osnovno tehnologijo TDM/WDM PON z možnostjo uporabe OFDMA in kasnejše dopolnitve koherentnega sprejema.

## 5. Koeksistenca:

Omrežje upošteva načelo sobivanja starih in novih sistemov in storitev.

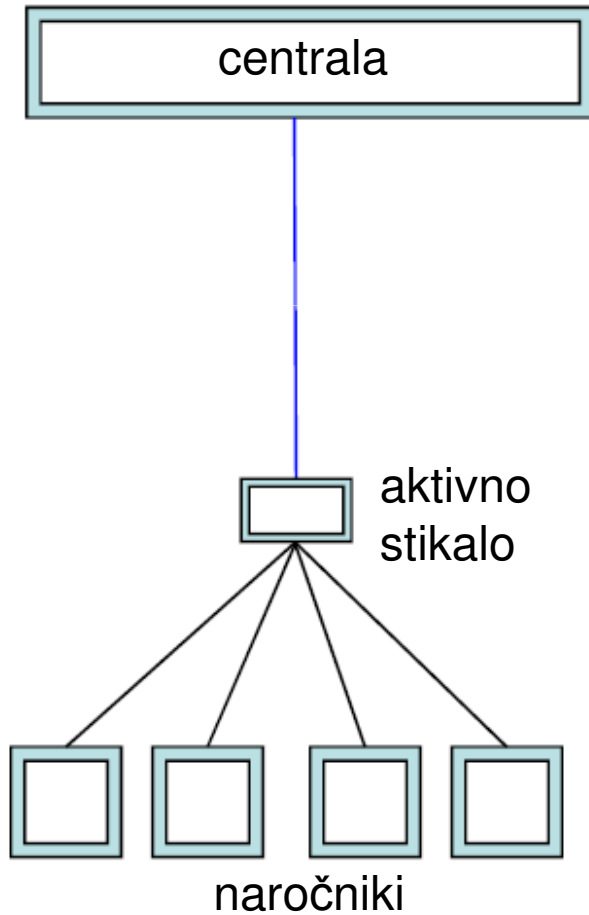
## 6. Nadgradnja: Omrežje se nadgrajuje po načelu “pay as you grow”.

# Nekdanja omrežna hierarhija



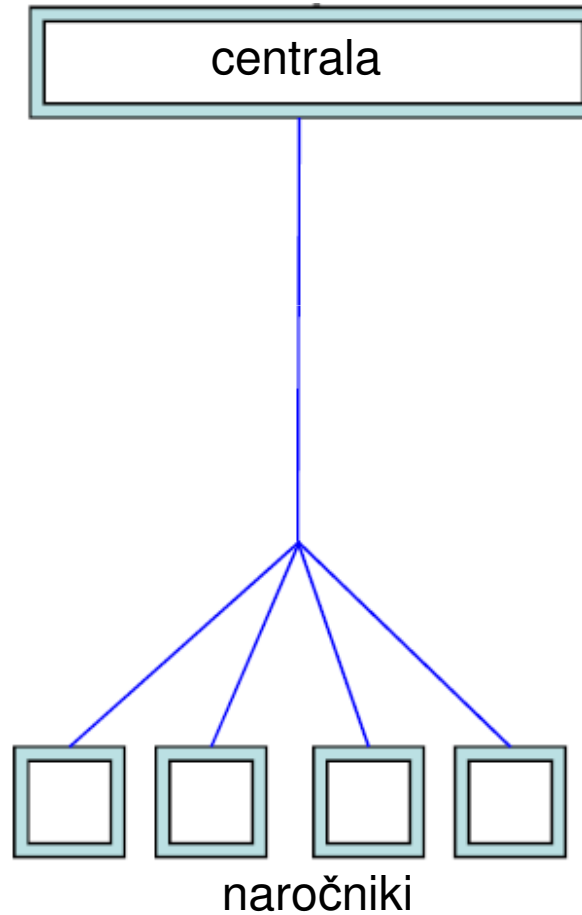
# Tri glavne dostopovne topologije

AON



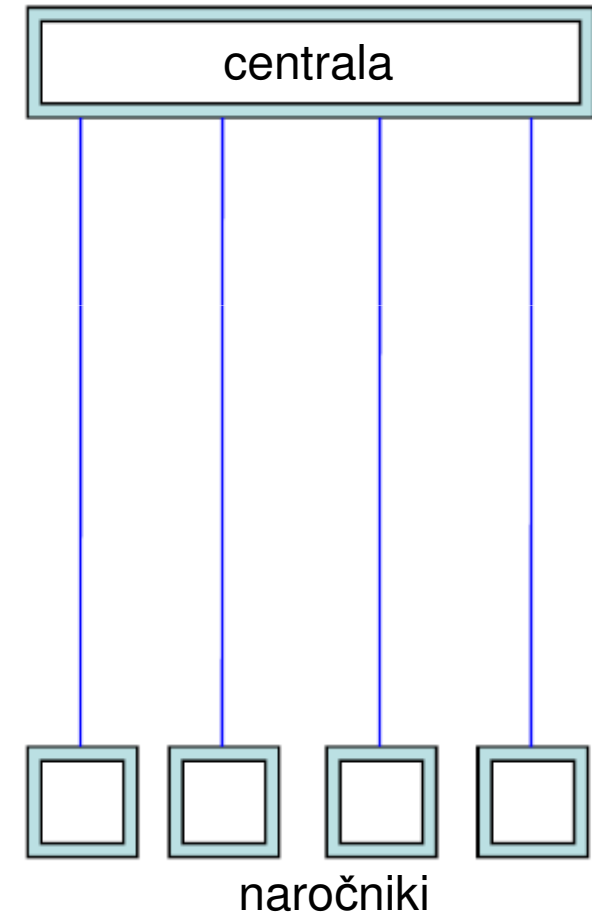
T-MT (PON)

Točka-mnogo točk



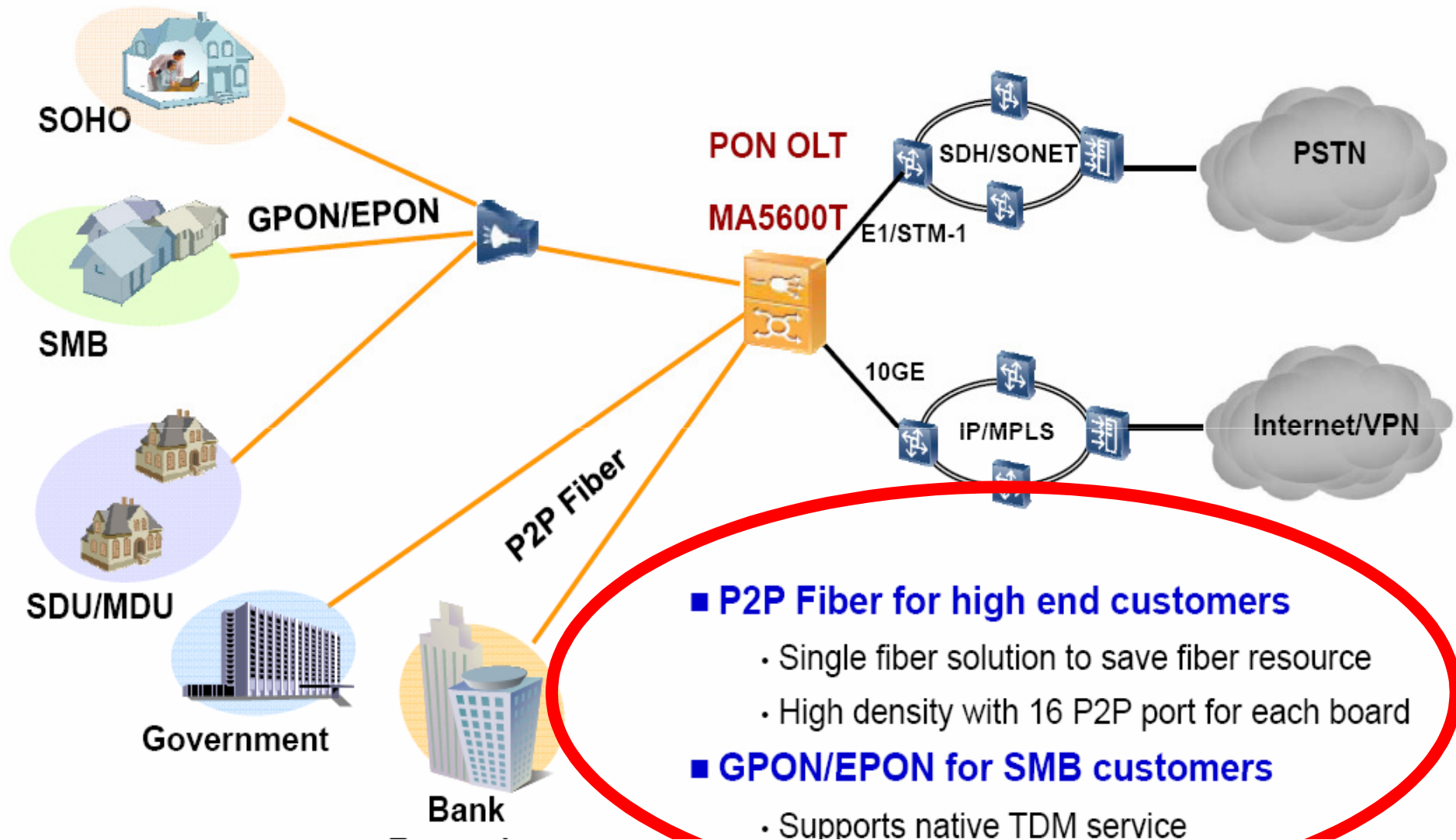
T-T

Točka točka





# PON in T-T skupaj v omrežju



*In practice both Point to Point and Passive Optical Networks will co-exist in the network for different market situations. However PON will be the mass market solution.*

# Od T-T do NGOA

Arhitekturi T-T in PON imata vsaka svoje prednosti in pomanjkljivosti.

T-T ima prednost za zahtevne uporabnike, PON za množične uporabnike (stroški).

Arhitektura WDM PON združuje prednosti obeh in je najbolj perspektivna.

LR WDM/TDM PON je najobetavnejša in najcenejša izbira prihodnjega NGOA.



# Tehnologije dostopovnega omrežja

## Aktualne tehnologije (2010):

- GPON (Gigabit PON), xGPON; priporočila ITU
- EPON (Ethernet PON), GEPON; standardi IEEE
- Eth. T-T (Ethernet T-T)
- AON (aktivni elementi v omrežju, ojačevalniki, stikala)

## Nove tehnologije (2010 – 2020):

- WDM PON (CWDM, DWDM, standard v pripravi)
- WDM T-T
- TDM/WDM PON

## Prihodnje tehnologije (2010 – 2030):

- NG PON1, nova generacija LR PONa za velike razdalje
- NG PON2, NG PON3,...

# FTTH po svetu – dilema T-T in PON

- Graditelji omrežij PON in T-T

	Europe	Rest of the world
<b>PON</b>	<b>Telefonica</b> <b>France Telecom</b> <b>Deutsche Telecom</b> <b>British Telecom/Open Reach</b> <b>Portugal Telecom</b> <b>Telenor</b> <b>SFR</b> <b>Eircom</b> <b>Soneacom</b>	<b>Verizon</b> <b>AT&amp;T</b> <b>NTT</b> <b>KDDI</b> <b>Korea TELECOM</b> <b>LG Powercom</b> <b>China Telecom</b> <b>M-NET</b> <b>Lafayette Utilities System</b>
<b>P2P</b>	<b>I3</b> <b>Free</b> <b>Lyse Telecom</b> <b>Reggefiber</b> <b>Swisscom</b> <b>Teliasonera</b>	<b>Openet Singapore</b>

**86%**

**14%**



# Operaterji in tehnologije

<i>FTTH operator</i>	<i>Technology deployed</i>	<i>Location</i>
BT	GPON	Ebbsfleet, UK
FT	GPON	France
Lyse	PTP	Norway
NTT	EPON	Japan
SK Telecom	GPON	South Korea
Swisscom	PTP	Switzerland
Telekom Slovenije	PTP	Slovenia
Unet	WDM PON	The Netherlands
Verizon	GPON	USA
Virgin Media	Cable	UK

Figure 6.1: Case studies [Source: Analysys Mason, 2010]

# 10 največjih telekomov v svetu

	Carrier	Employee	Market Cap	GPON	EPON
①	NTT	205,000	\$3,071B		■
②	AT&T	310,000	\$152.57B	■	
③	Verizon	224,000	\$89.19B	■	
④	Telefonica	250,000	\$88.63B	■	
⑤	France Telecom	185,000	\$62.58B	■	
⑥	Deutsche Telekom	230,000	\$55.19B	■	
⑦	China Telecom	285,000	\$31.05B	■	■
⑧	Telecom Italia	80,000	\$18.94B	■	
⑨	China Unicom	200,000	\$13.83B	■	■
⑩	British Telecom	112,000	\$12.40B	■	

Prednost v opredelitvi telekomov ima GPON in njegove prihodnje izpeljanke.

# FTTx, 10 največjih operaterjev

Rank	Operator	Country	Main technology & architecture	FTTx subscribers
1	NTT	Japan	FTTH/B GEPON	11 793 000
2	China Telecom (1)	China	FTTH - FTTx+LAN EPON LAN/DSL	11 160 000
3	KT	South Korea	FTTB EPON/GEPON	3 555 644
4	Verizon	USA	FTTH BPON/GPON	3 100 000
5	SK Broadband	South Korea	FTTB/LAN GEPON	2 733 141
6	AT&T	USA	FTTN VDSL2	1 585 000
7	LG Powercom	South Korea	FTTH/B EPON/GEPON	1 504 090
8	Chunghwa Telecom	Taiwan	FTTB GEPON	1 342 000
9	KDDI	Japan	FTTH/B EPON/GEPON	1 211 000
10	Beeline	Russia	FTTB EP2P	724 000

(1) 560 000 FTTH subscribers and 10.6 millions FTTx/LAN subscribers

- Izmed 10 največjih svetovnih operaterjev jih je 7 iz Azije, 2 iz Severne Amerike in 1 iz Rusije. Med njimi ni nobenega iz Zahodne Evrope.
- NTT je največji svetovni operater, tesno mu sledi ChinaTelecom.



# Nekaj proizvajalcev WDM opreme

The screenshot displays the Light Reading Europe website with several news articles related to WDM-PON technology. The top article is titled "Nortel JV Buys WDM-PON Specialist" dated August 04, 2008. Below it is "ADVA Unleashes WDM-PON" dated September 29, 2008. The bottom article is "Tellabs Lays Out WDM-PON Plan" dated June 17, 2008, which includes a sub-section titled "Lauds WDM-PON's Potential". The website header includes the Light Reading Europe logo and a navigation menu.

List of companies that has/are developing WDM-PON products:

- ADC
- ADVA
- Alcatel-Lucent
- Applied Optoelectronics Inc.
- Ericsson
- Genexis
- IGnis
- LG Nortel
- OKI
- Optiblue
- Pirelli Broadband Solutions
- Teldat
- Tellabs

Source: The Product Group LLC  
2009

# Telecom Italia – načrt PONa

## TI's NGAN Plan 2012 -2018

**2012**

- ▶ **Start of FTTH deployment in 13 cities with GPON technology**
- ▶ **1,3 million Households passed**



**2018**

- ▶ **10 million Households passed (50% of Italian population)**
- ▶ **GPON for FTTH and FTTC Backhoulng**

# Spekter, storitve in tehnologije

VOD – video na zahtevo

## STORITVE:

3DTV1 : 30 Gb/s/kanal  
 3DTV2 : 30 Gb/s/kanal  
 3DTV3 : 300 Gb/s/kanal

Internet  
 Video konf., video telefon  
 SDTV- standardna TV (VOD)  
 Podatkovne baze  
 SDTV oddaje  
 Igre in učenje na daljavo  
 Lokalno omrežje  
 Telemedicina  
 Velike podatkovne baze  
 HDTV-TV visoke razločljivosti (VOD)  
 HDTV (3x)  
 3DTV, naslednja generacija (3x)

FTTP

FTTP

## TEHNOLOGIJE:

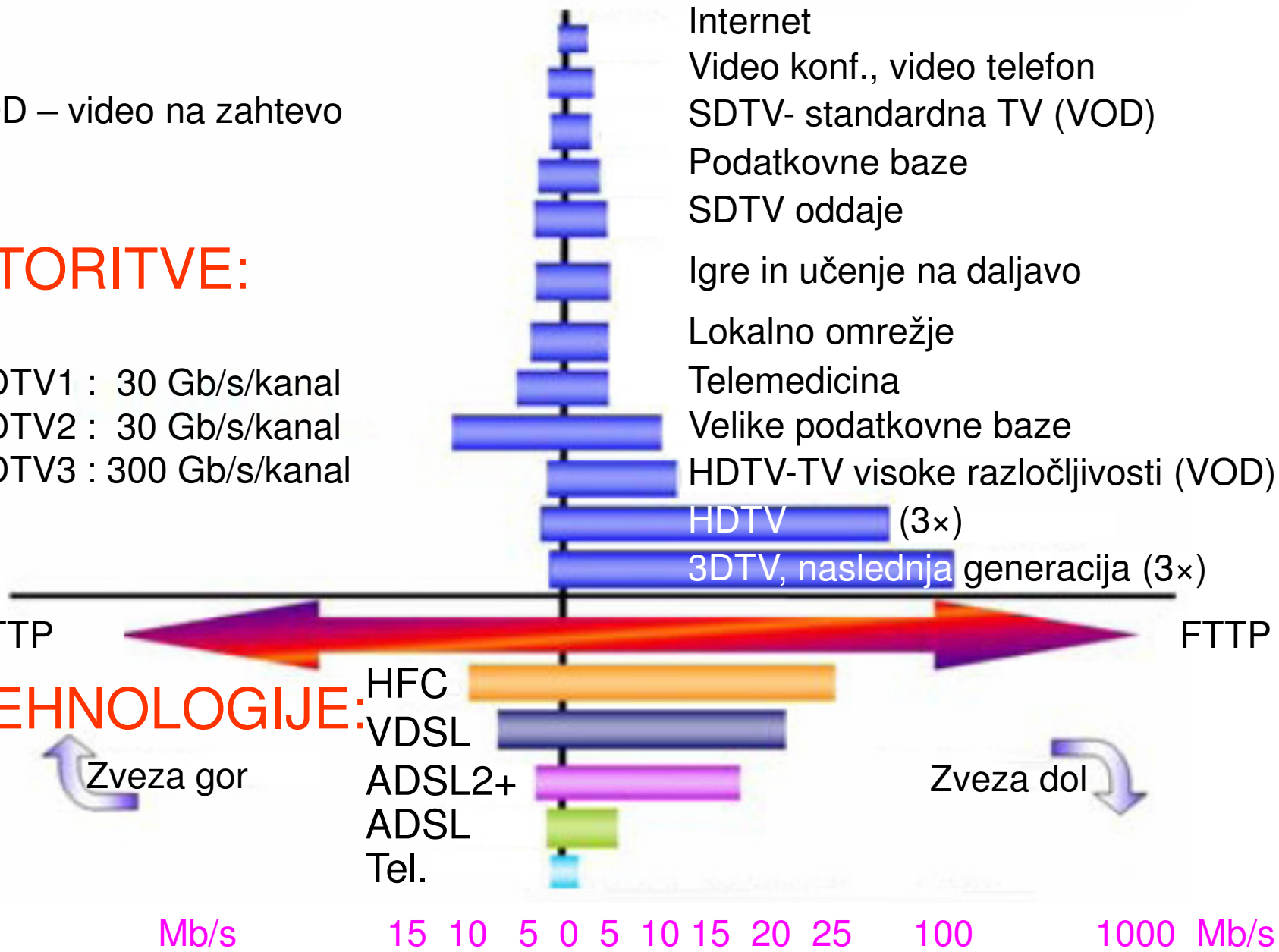
Zveza gor

Zveza dol

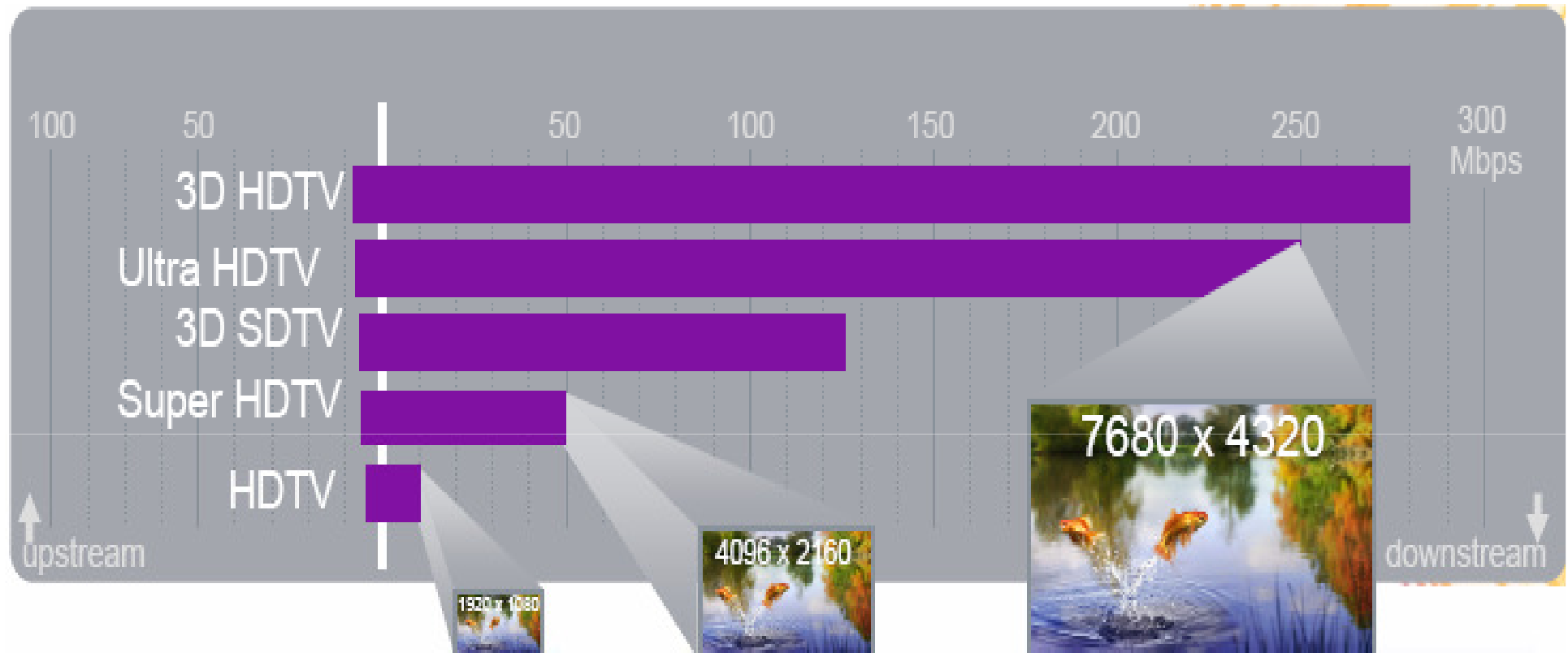
HFC  
 VDSL  
 ADSL2+  
 ADSL  
 Tel.

Mb/s

15 10 5 0 5 10 15 20 25 100 1000 Mb/s



# TV formati



Napoved:

3D HDTV 2010

Ultra HDTV 2011 - 2012

Nokia Siemens, 2010

# IPTV – dvorazsežnostna televizija

## 1. 2D TV:

### 1.1 2D SD TV

Standardna razločljivost

MPEG2 2 – 5 Mb/s/kanal, MPEG4 1 - 3 Mb/s/kanal

### 1.2 2D HD TV

visoka razločljivost, 1920×1080 sl. el.

MPEG4 6 – 13 Mb/s

### 1.3 2D ultraHD TV

ultravisoka razločljivost, 7680×4320 sl. el.

Mb/s/kanal

\*Šteje se, da naročniškemu priključku pripadajo 3 kanali, npr. za 3 kanale visoke razločljivosti potrebujemo 18 - 39 Mb/s. MPEG4 uporablja 1/2 bitov.

# IPTV – trirazsežnostna televizija

## 2. 3D TV:

### 2.1 3D SD TV

standardna razločljivost, 30 Mb/s/kanal, leto 2015

### 2.2 3D HD TV

visoka razločljivost, 100 Mb/s/kanal, leto 2025

### 2.3 3D ultraHD TV

ultravisoka razločljivost, 300 Mb/s/kanal, leto 2035

- Šteje se, da naročniškemu priključku pripadajo 3 kanali, npr. za 3 kanale standardne razločljivosti potrebujema 90 Mb/s/priključek

# Tehnologije dostopovnega omrežja

## Aktualne tehnologije (2010):

- GPON (Gigabit PON), xGPON; priporočila ITU
- EPON (Ethernet PON), GEPON; standardi IEEE
- Eth. T-T (Ethernet T-T)
- AON (aktivni elementi v omrežju, ojačevalniki, stikala)

## Nove tehnologije (2010 – 2020):

- WDM PON (CWDM, DWDM, standard v pripravi)
- WDM T-T
- TDM/WDM PON

## Prihodnje tehnologije (2010 – 2030):

- NG PON1, nova generacija LR PONa za velike razdalje
- NG PON2, NG PON3,...

# Kaj pomenijo?

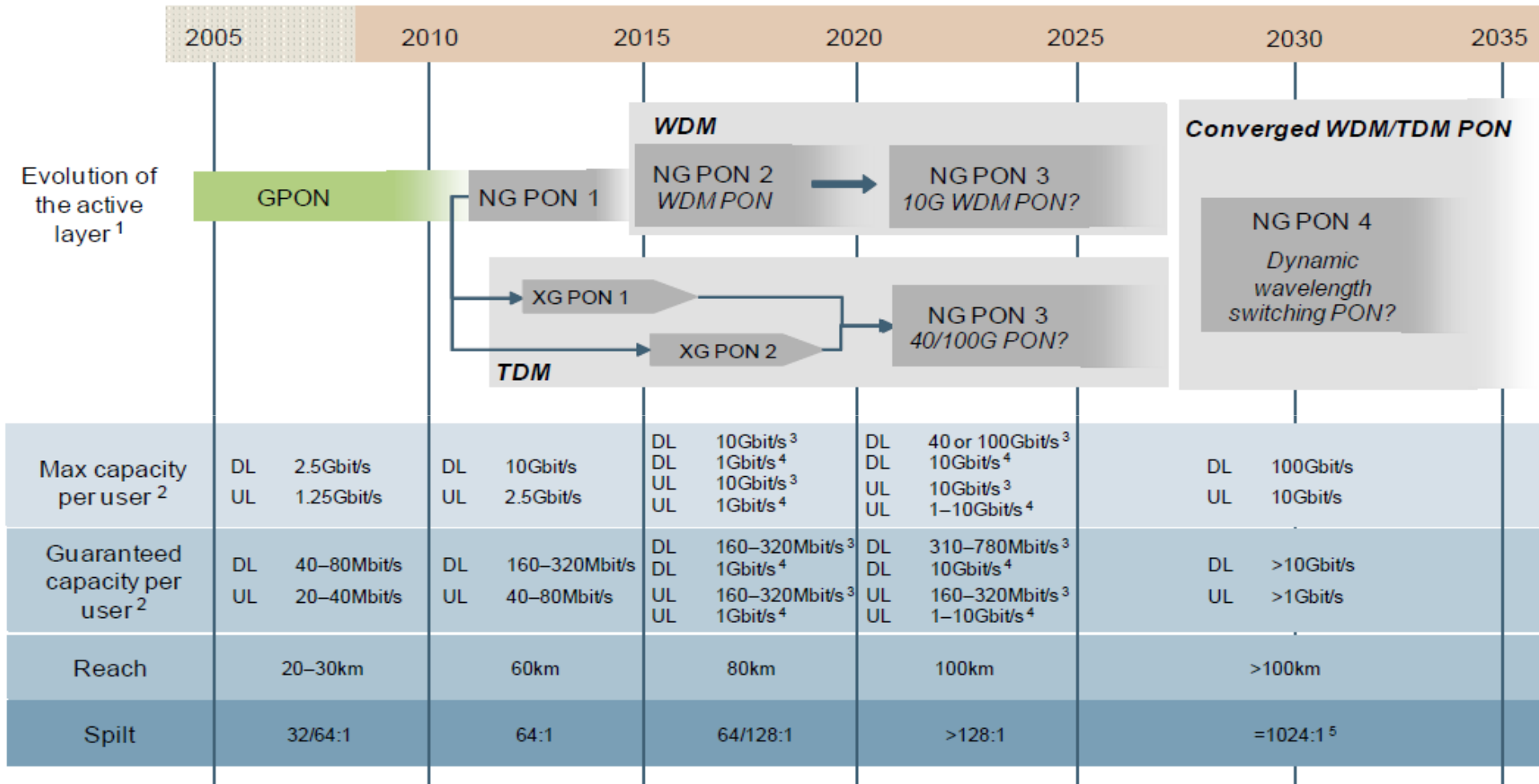
TDM/TDMA PON

WDM/WDMA PON



# NG PON 1,2,3,4—predvidevanje razvoja

*Expected deployment*



OFCOM 2010

**Key**

DL = downlink  
UL = uplink

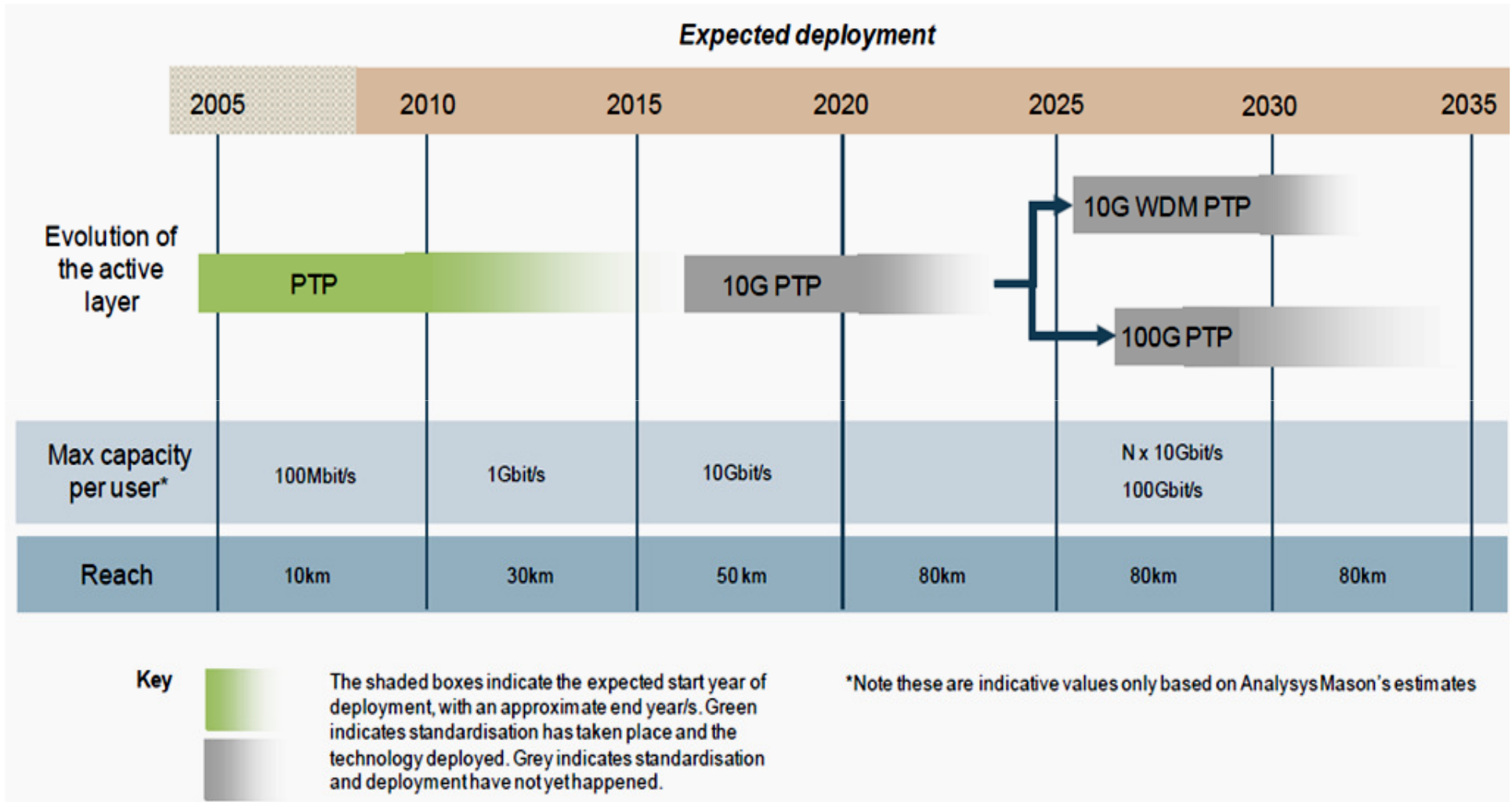
XG and 10G = 10 gigabit



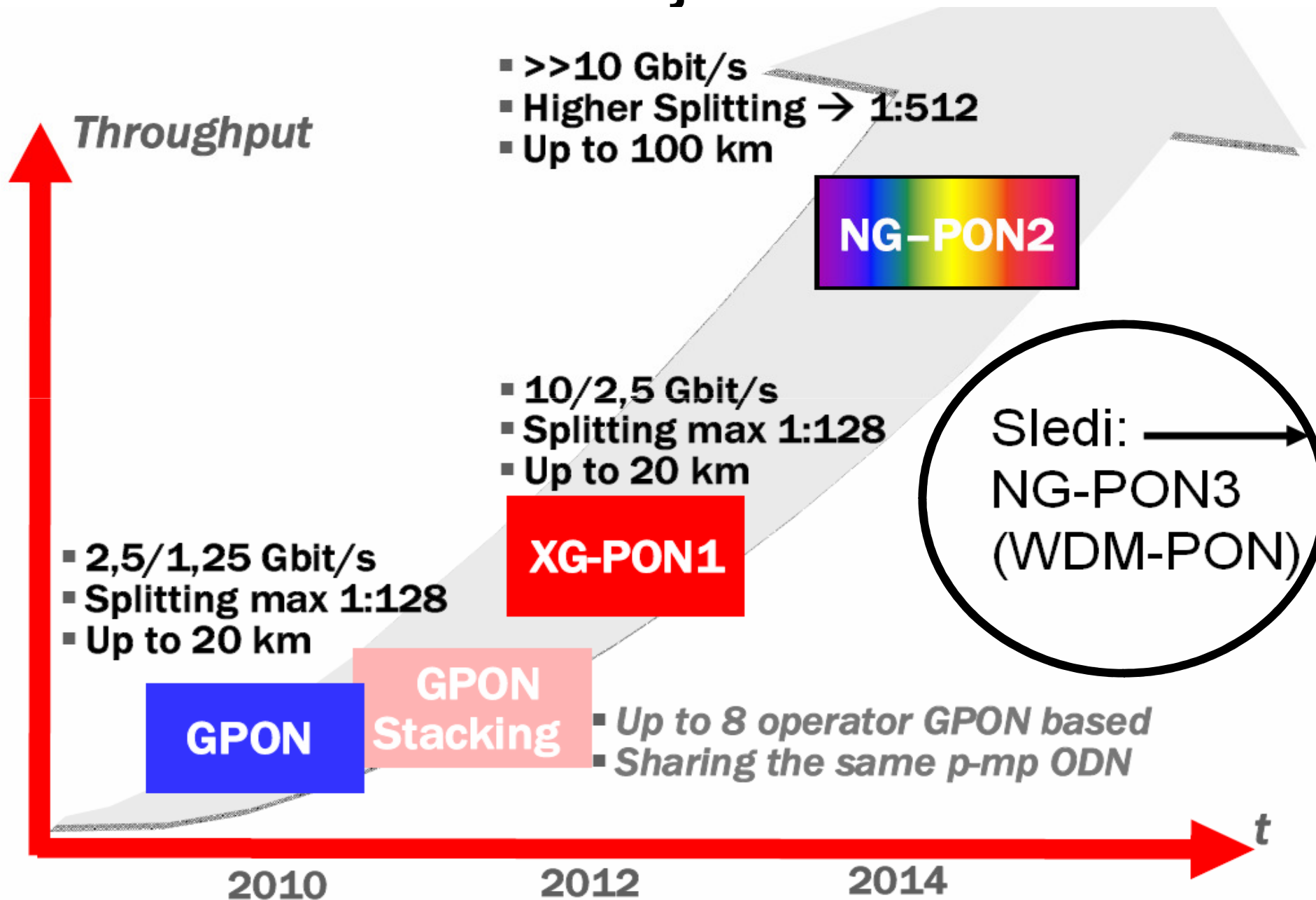
The shaded boxes indicate the expected start year of deployment, with an approximate end year/s. Green indicates standardisation has taken place and the technology deployed. Grey indicates standardisation and deployment have not yet happened.

<sup>1</sup> Deployment plans are based on information issued by the ITU and FSAN  
<sup>2</sup> Note these are indicative values only based on AnalysysMason's estimates  
<sup>3</sup> Applicable to TDM GPON  
<sup>4</sup> Applicable to WDM GPON  
<sup>5</sup> Please note that a maximum of 32 users per wavelength will be allocated

# T-T – predvidevanje razvoja



# Standardizacija NG-PONa



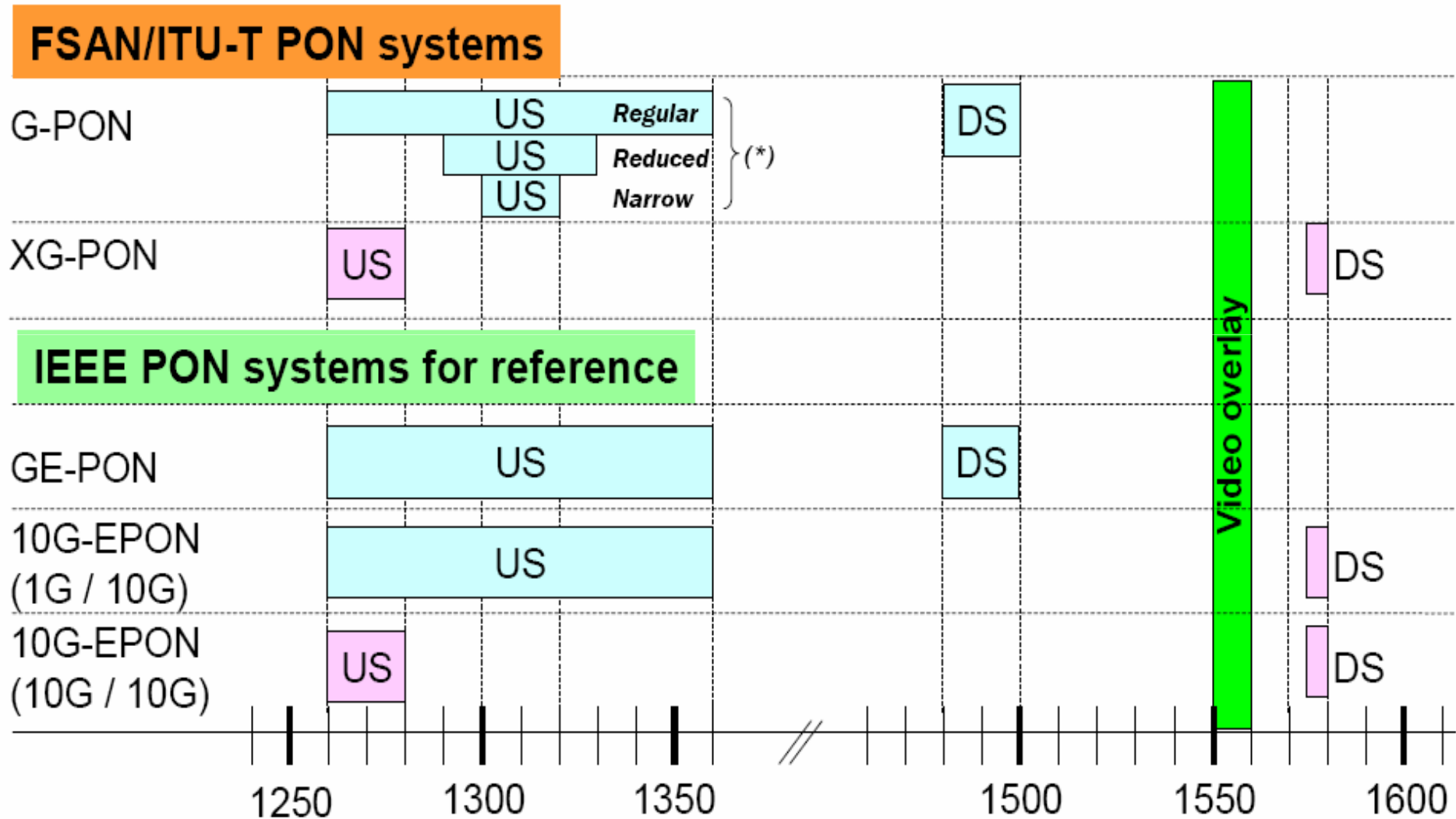
# Nova generacija NG – PON 1

- 2010 - 2015
- TDM PON
- Kompatibilnost z GPON in GEAPON
- 10 Gb/s dotok, 2,5 (ali 10) Gb/s odtok
- Zagotovljeni b/s na uporabnika 160 – 320  
Mb/s dotok, 40 – 80 Mb/s odtok
- Delilno razmerje 64 : 1
- Standardizacija 2010, prvi preizkusi konec 2010,  
uvajanje 2012

# Nova generacija NG PON 2

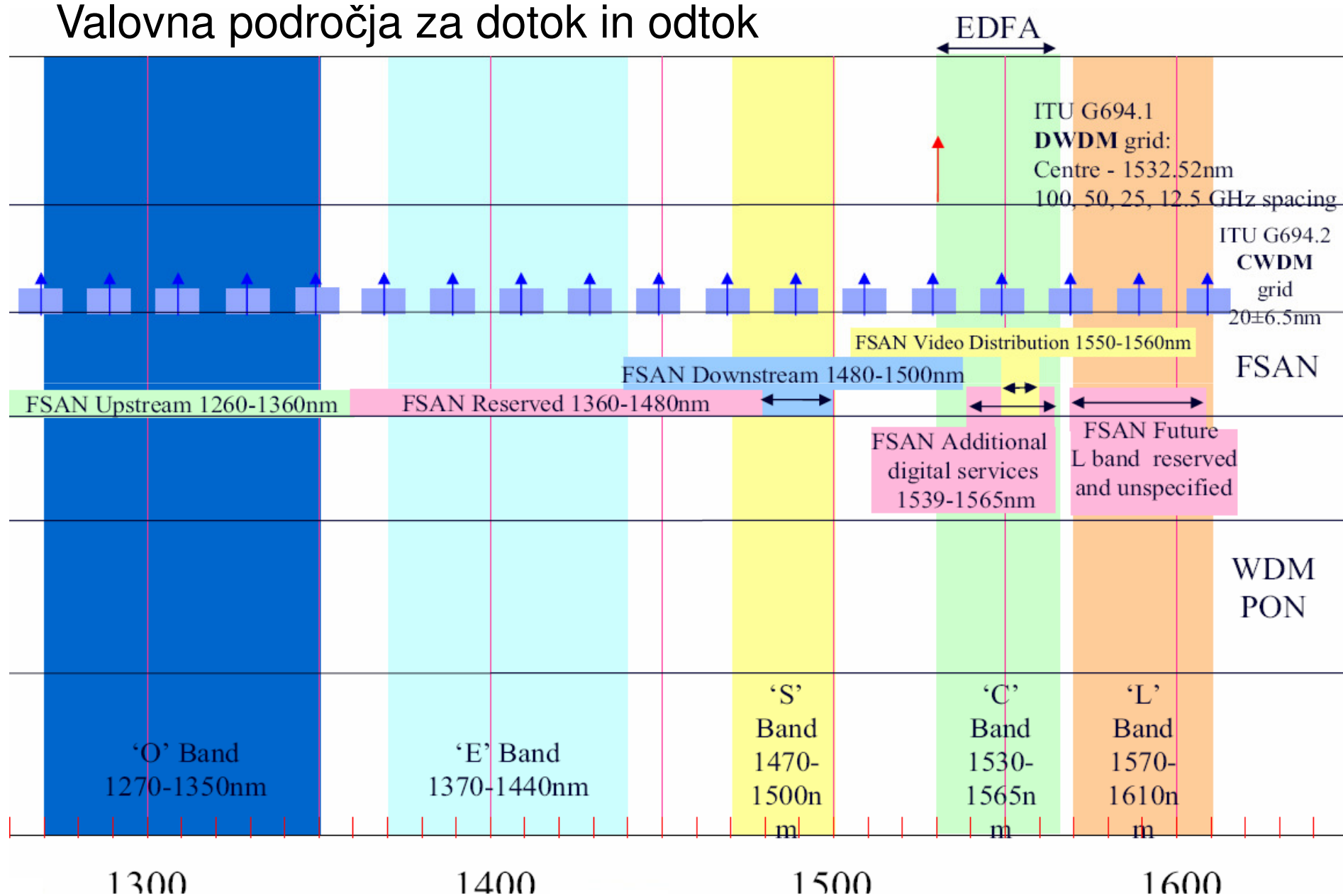
- 2015 - 2020
- HPON – Hybrid TDM/WDM PON
- CDM, OFDM
- 40 Gb/s oz. 1 Gb/s/ $\lambda$
- Doseg 80 - 100 km
- Veliko delilno razmerje 128:1

# Alokacija valovnih dolžin za XG-PON



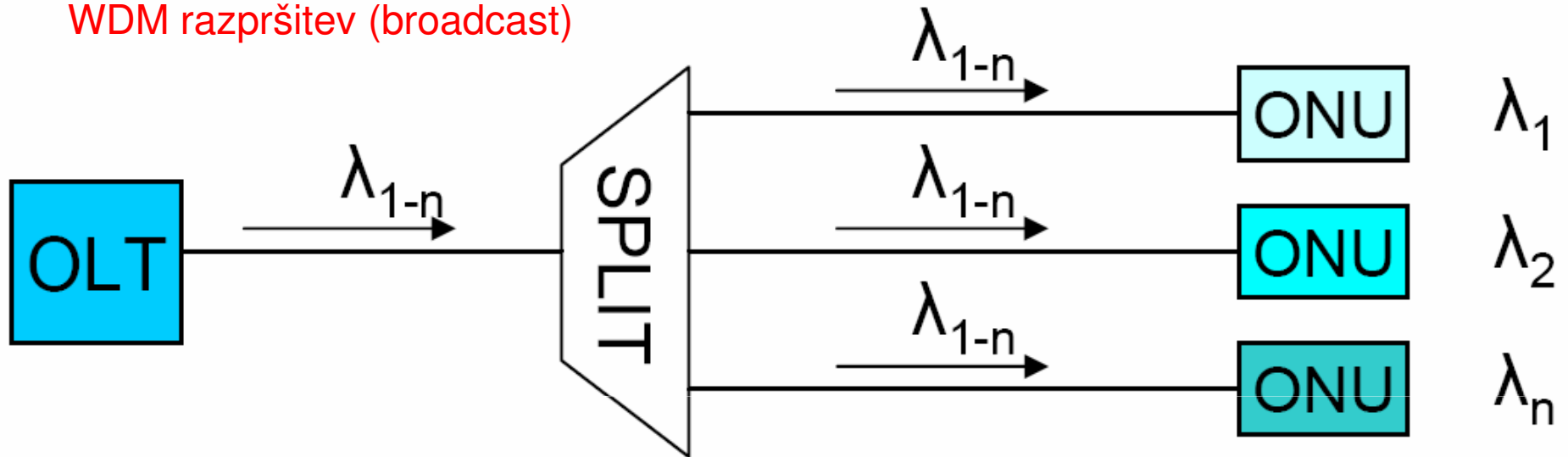
# WDM-PON (CWDM in DWDM)

Valovna področja za dotok in odtok

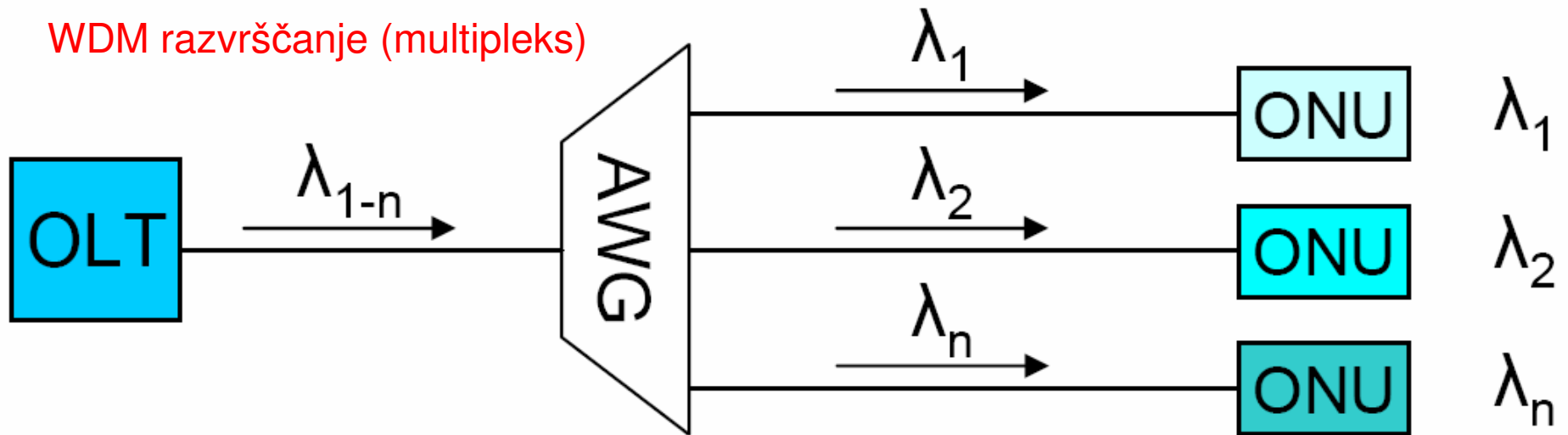


# Barvni delilnik in razvrstilnik

WDM razpršitev (broadcast)



WDM razvrščanje (multipleks)





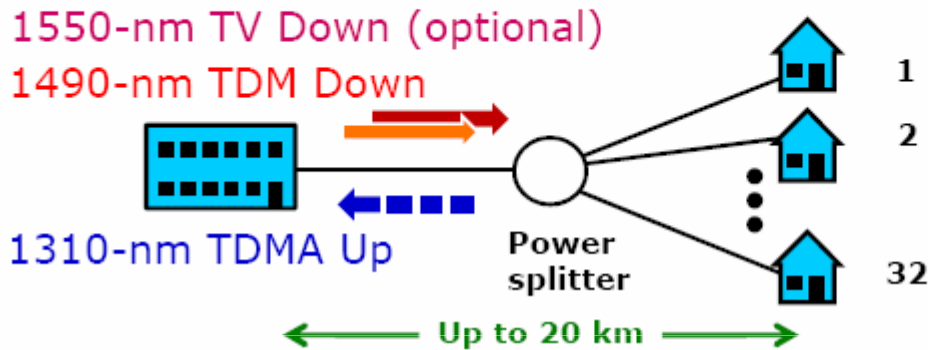
# NG PON – predvidevanje razvoja

	Leto	Skupna kapaciteta	Doseg
• NG PON 1	2010 – 2015	10/2,5 Gb/s	< 60km
• NG PON 2	2015 – 2020	10/10 Gb/s	80 km
• NG PON 3	2020 – 2025	40/10 Gb/s	100 km
• NG PON 4	2025 – 2035	100/10 Gb/s	>100 km

# Stanje in obeti

## 2,5 Gb/s GPON and EPON

Deployments are ongoing



Področje uporabe:

**Danes:**

FTTH, FTT-MDU

## 10 Gb/s TDM PON

Commercially available soon

- IEEE standard is complete
- ITU-T standard nearing completion
- Same outside plant as GPON/EPON

**Bližnja prihodnost:**

FTT-MDU, Backhaul,  
FTTB

**Pozneje:**

FTTH

Both GPON and XG-PON have provisions for adding powered extender boxes

Patrick Ianone, ECOC  
2010



# Nekaj sklepnih misli iz ECOC 2010

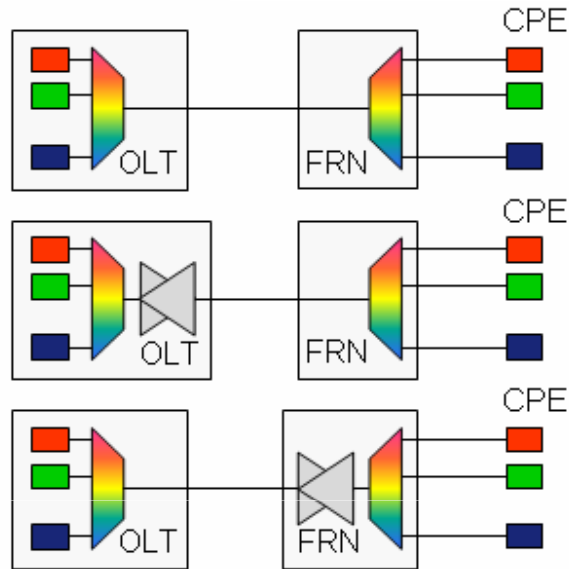
- Network operators do not yet have plans for deploying PONs with aggregate capacities  $\geq 40$  Gb/s
- Several next-gen PON implementations are possible **today**:
  - Stacked PON (i.e. Hybrid CWDM/TDM)
  - WDM PON (Commercially available, multi-vendor)
- Several next-gen candidates lend themselves to native **long-reach PON (100 km)** (i.e. Without a powered mid-span extender): **extended-reach PON (60 km)**
  - WDM PON using conventional DWDM transmitters (future)
  - Coherent PON (future)
  - Optical OFDM PON with coherent detection (future)
- Further component and subsystem innovations are required to bring costs and performance in line with expectations for the PON market (particularly for FTTH applications)

Patrick Ianone, ECOC 2010

**Looking for a radical new PON architecture to claim for your own?....read the literature from the '80s and '90s**



# WDM PON in NG PON, budžet

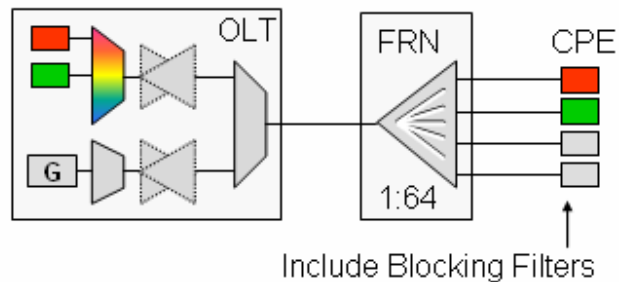


## WDM-PON, DFW

	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	<b>53.7 km</b>	<b>74.7 km</b>	<b>142.7 km</b>

\*) With EDFA-C-S20-GCB

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

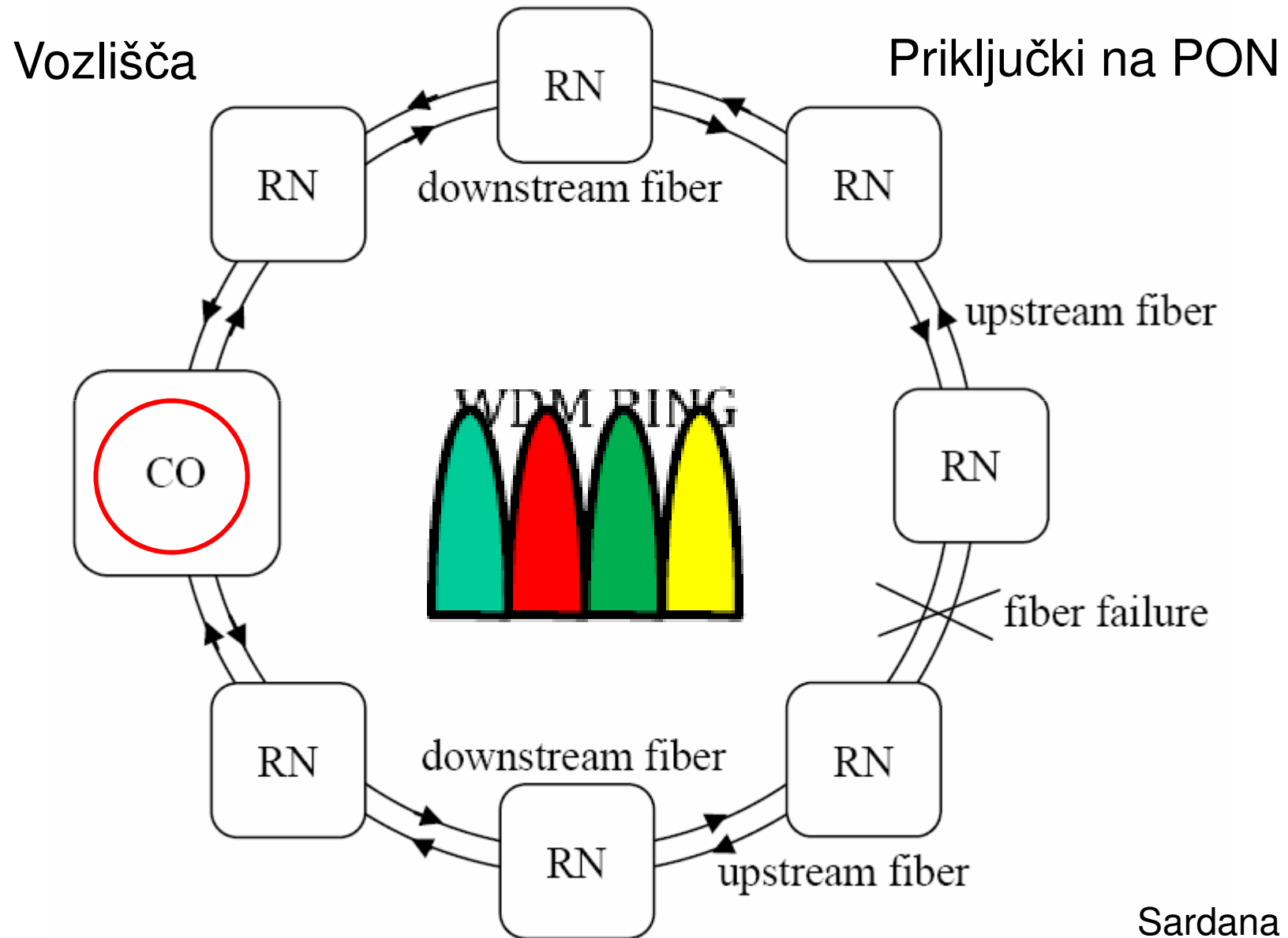


## NG-GPON

	GPON unampl.	WDM unampl.	GPON OLT ampl.	WDM OLT ampl.
Power budget	<b>33.0 dB</b>	<b>36.0 dB</b>	<b>37.0 dB</b>	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	<b>20.3 km</b>	<b>19.3 km</b>	<b>30.3 km</b>	<b>37.0 km</b>

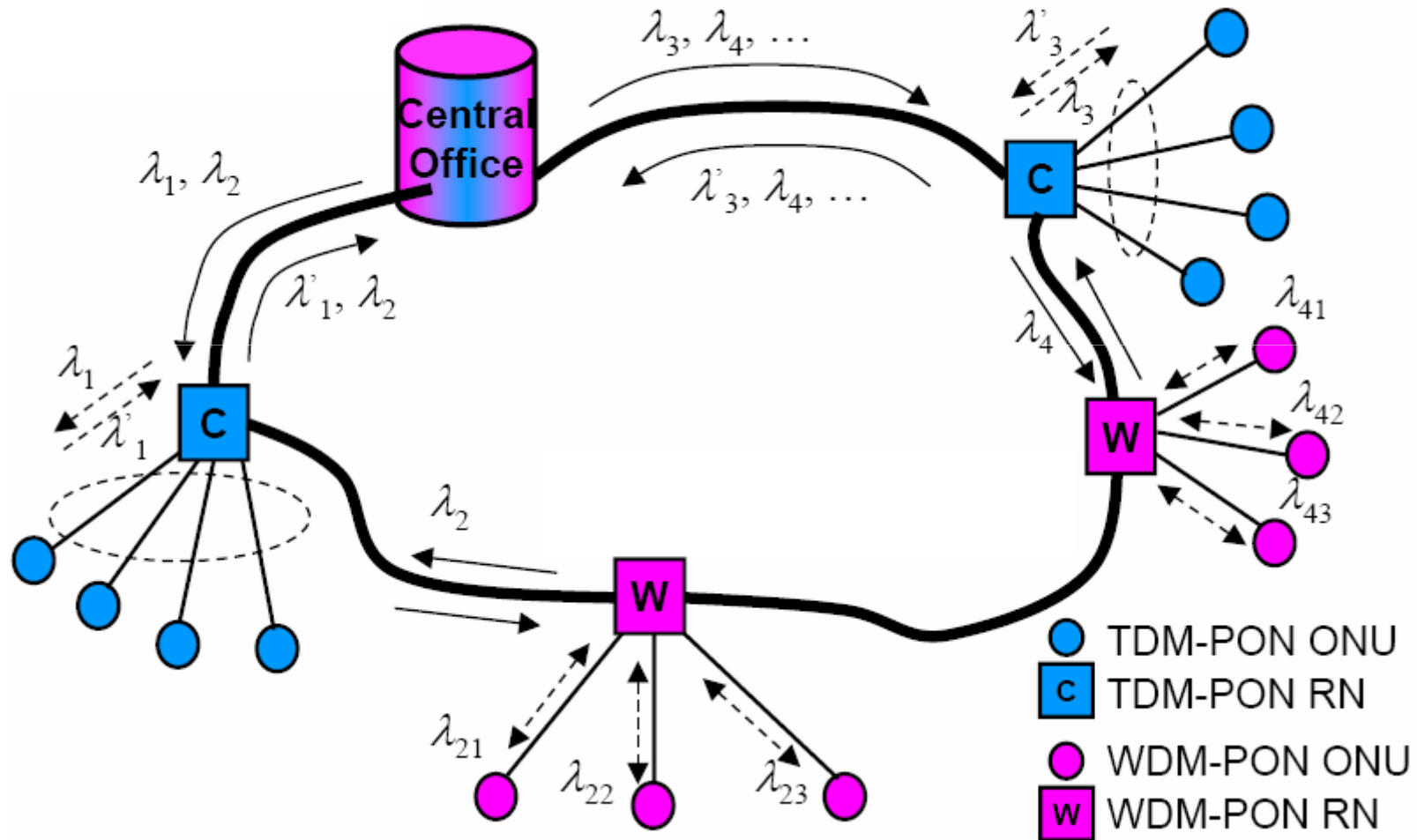
33 dB (10G): +4 dBm...-26 dBm + 3 dB FEC gain, 36 dB (2G5): +4 dBm...-32 dBm

# Arhitektura dvosmernega obroča



# WDM/TDM PON

Vsestransko omrežje, ki omogoča veliko (WDM) in majhno (TDM) delitev spektra.

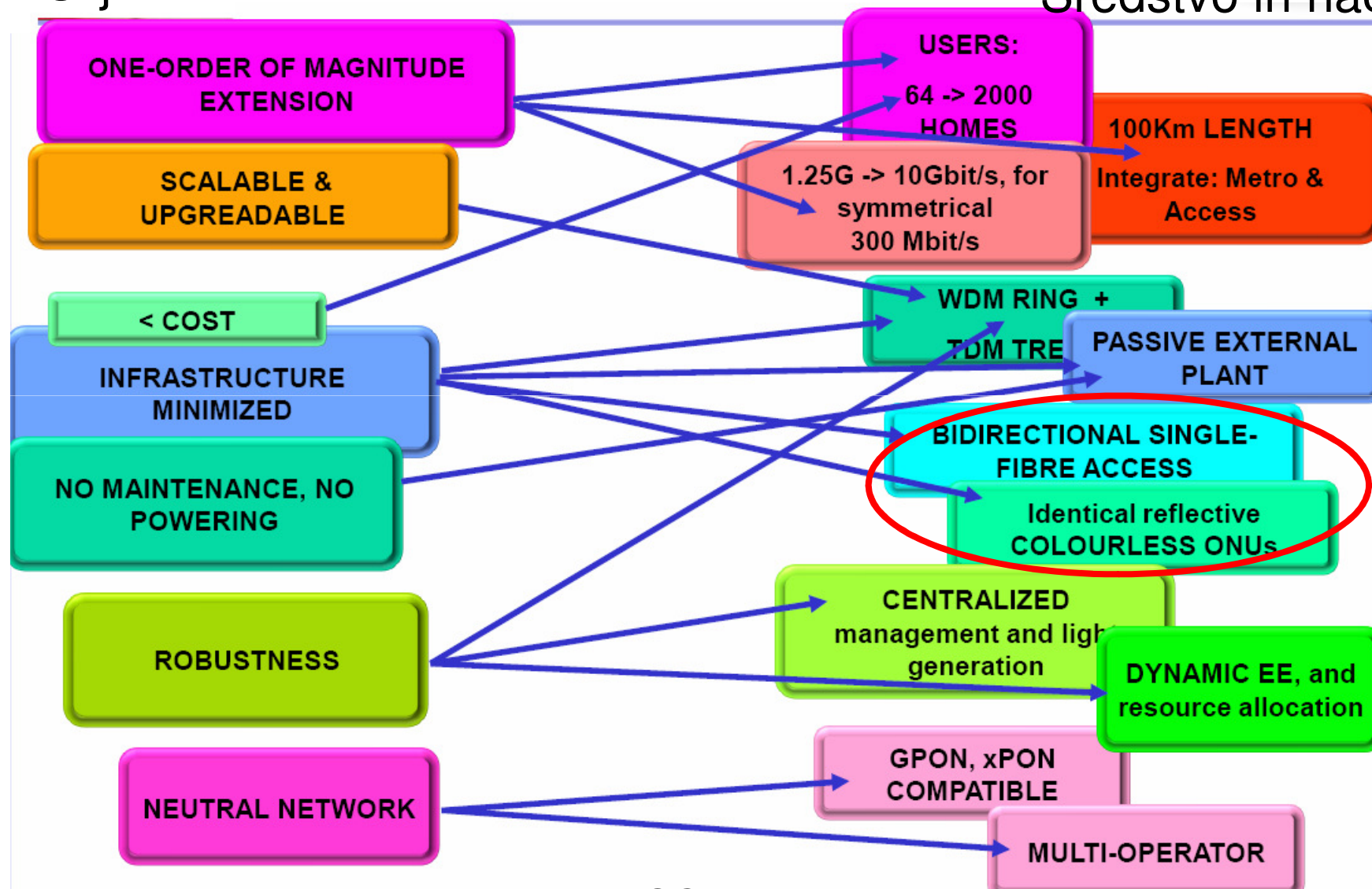


WDM/TDM PON ima velike perspektive v razvoju vele PONa

# Cilji in način doseganja

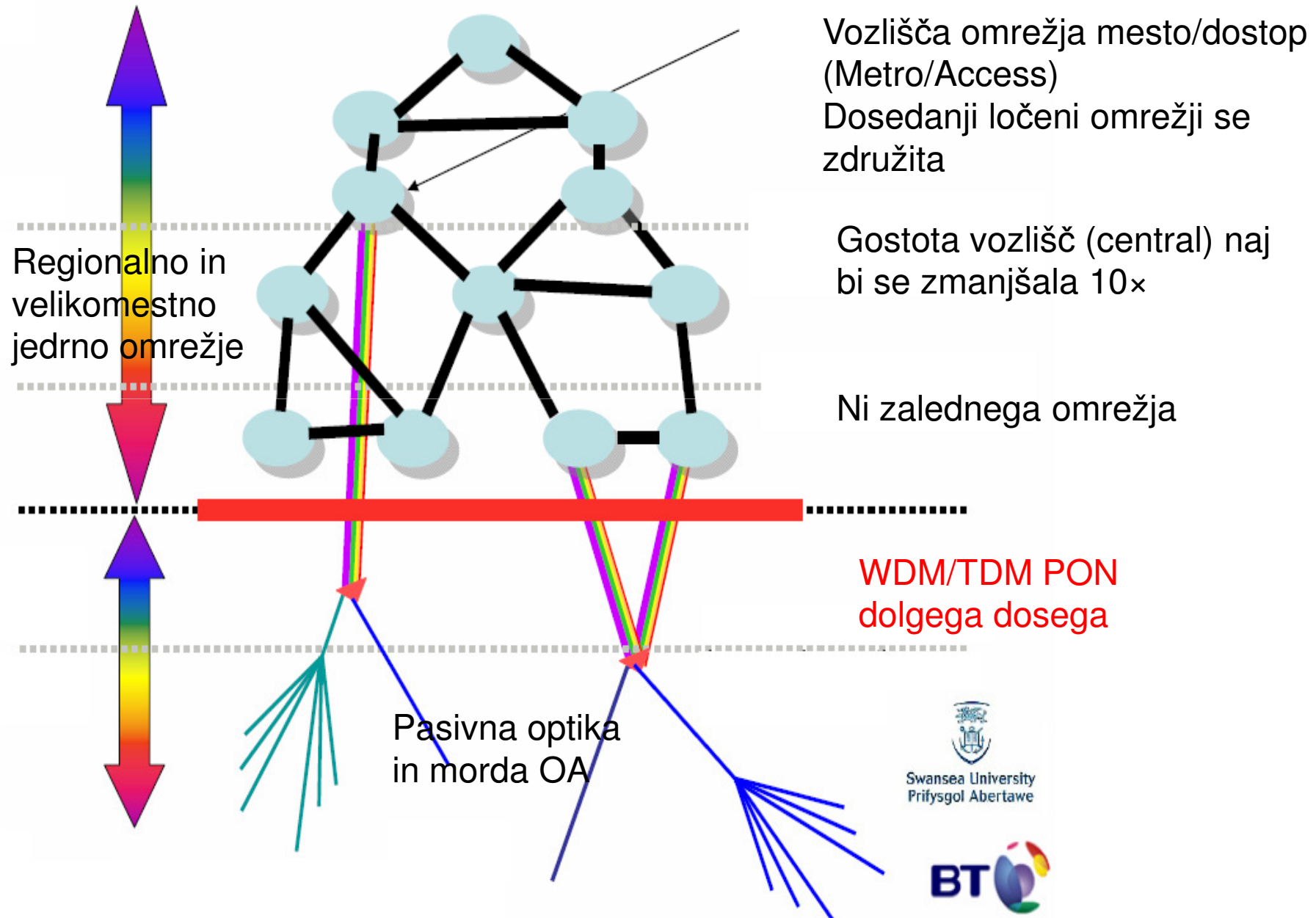
Cilji:

Sredstvo in način:



A. Teixeira, NGON seminar, 2009

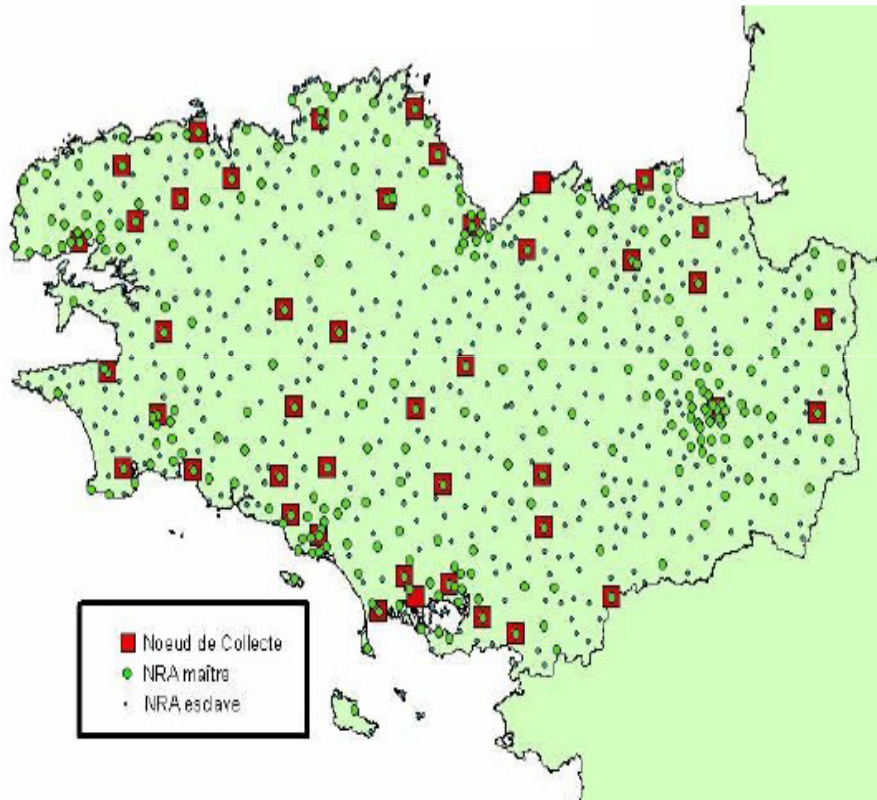
# Jedrna vozlišča in dostopovni priključki



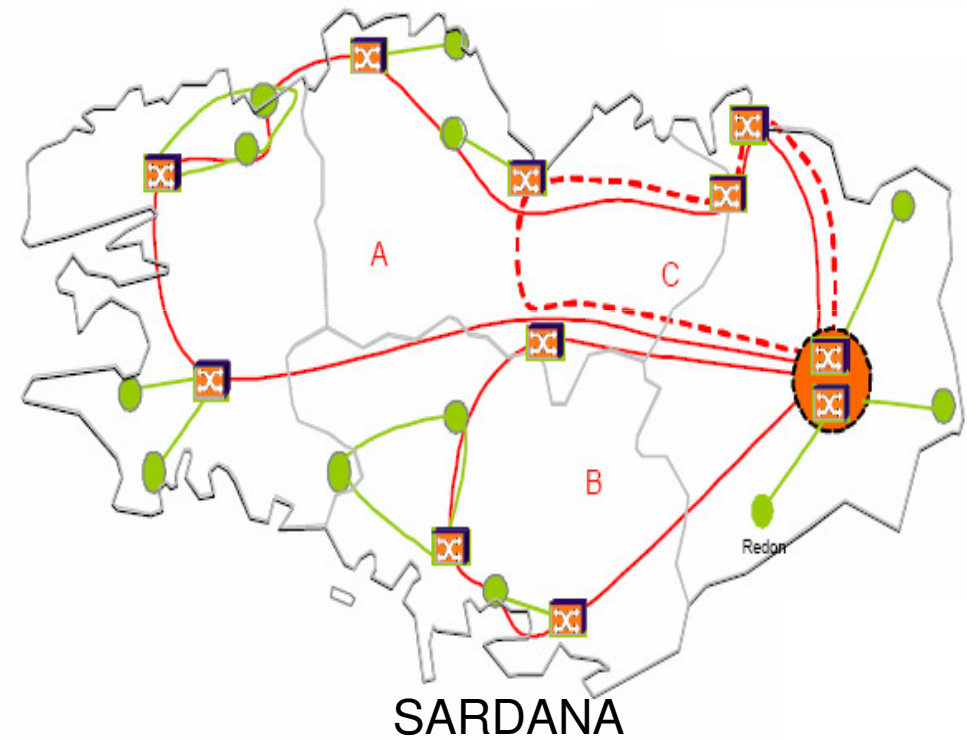


# Primer konsolidacije

Sedaj



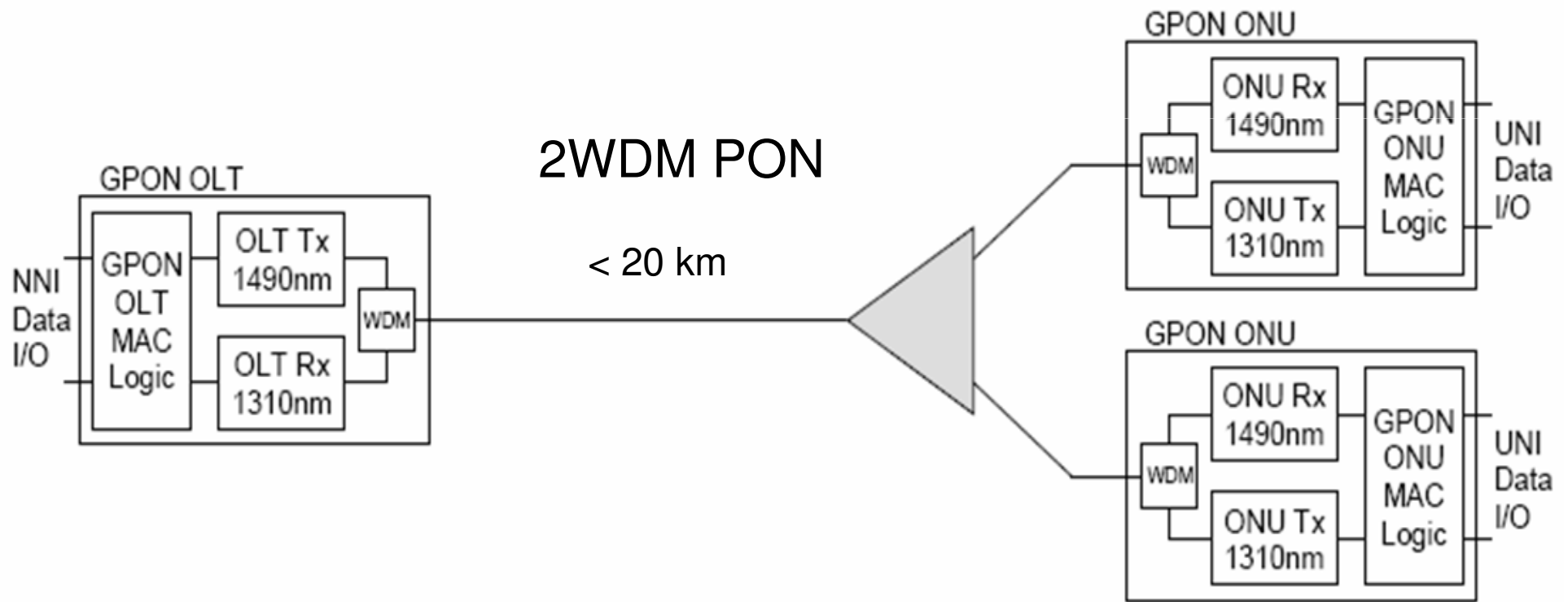
Prihodnje



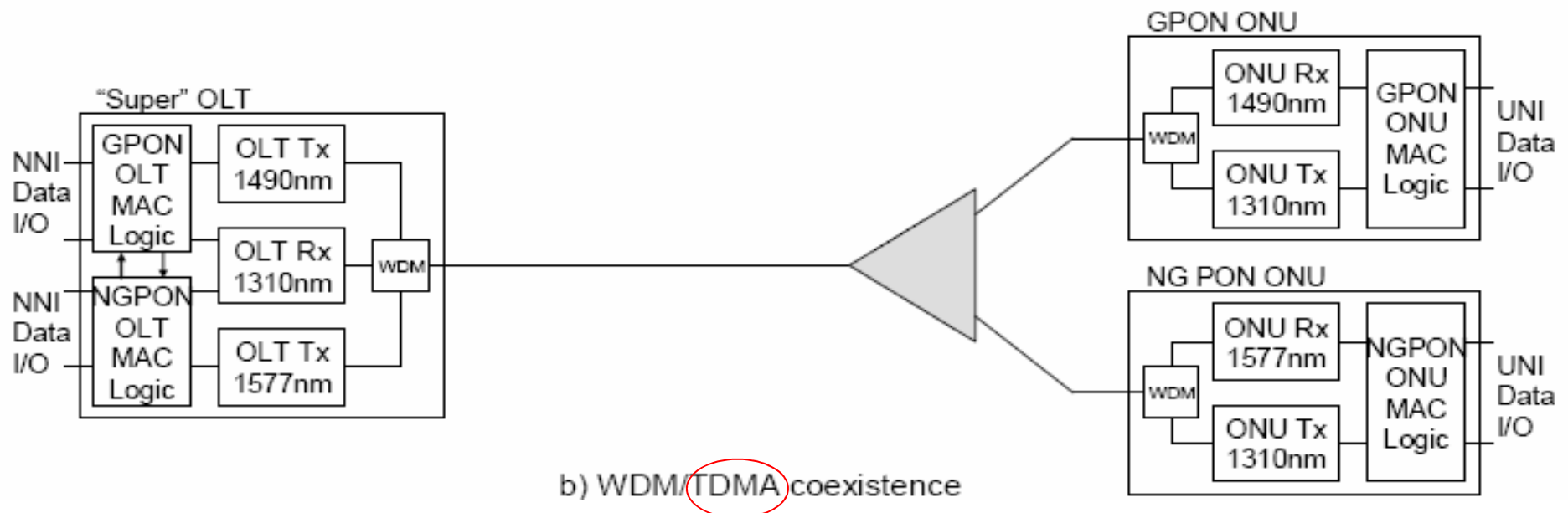
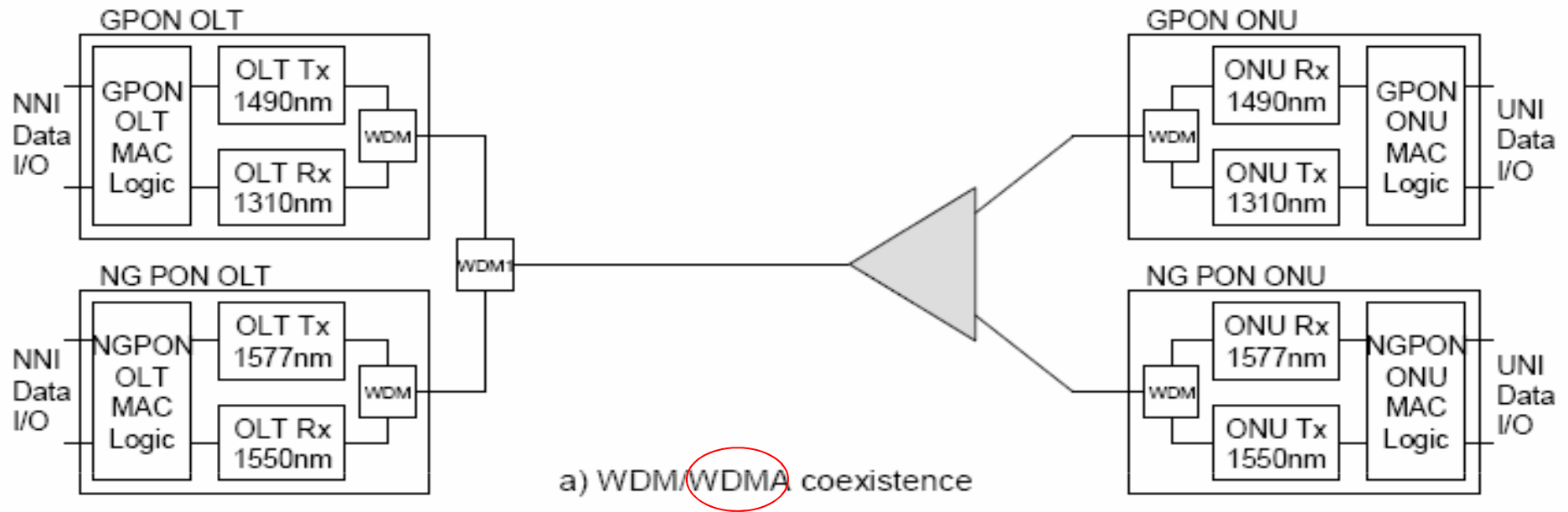
FT/Orange

# PON danes

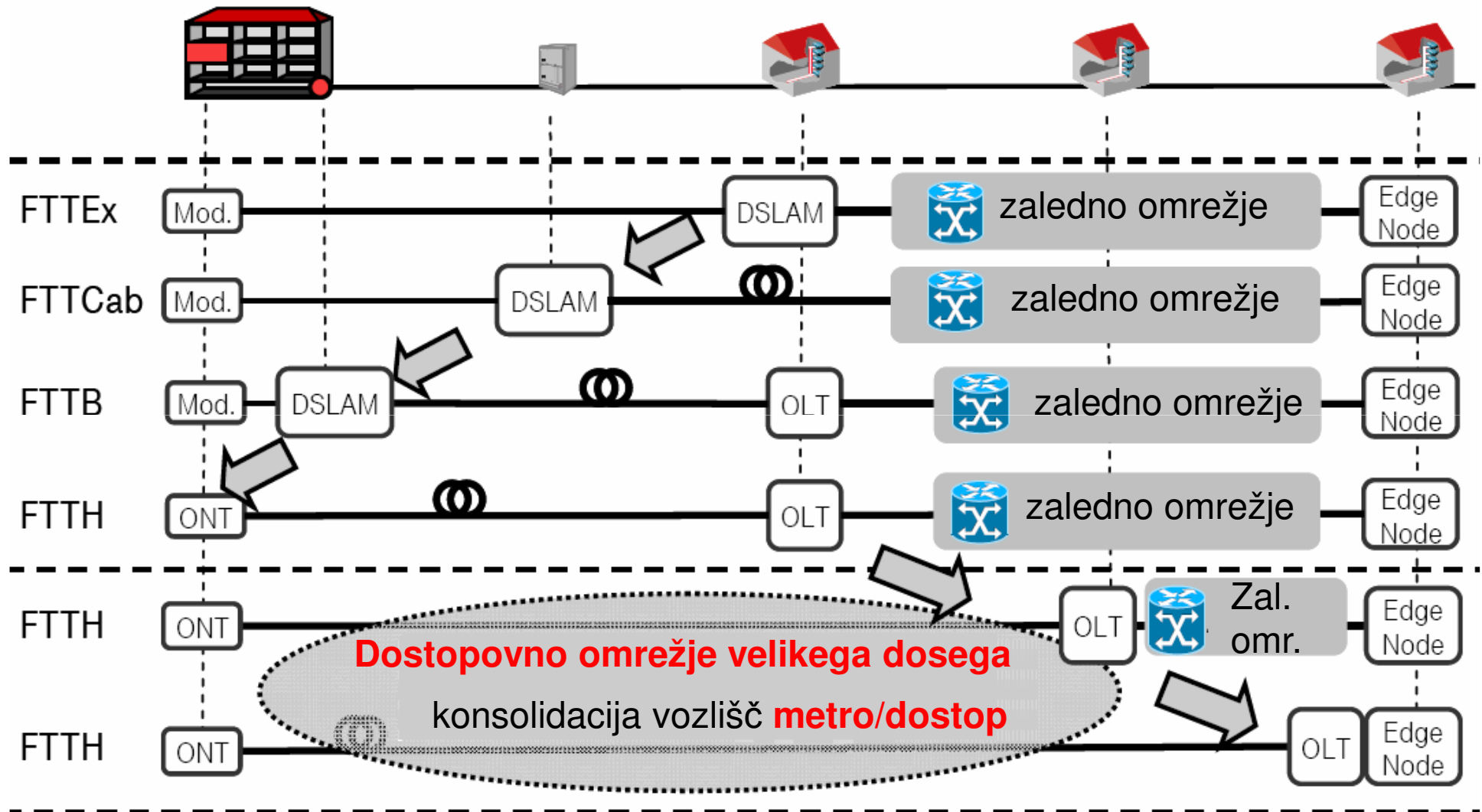
- TDM v dotoku, TDMA v odtoku, dve vlakni
- 2WDM dotok in odtok, eno vlakno



# WDM/WDMA/TDMA koeksistencija

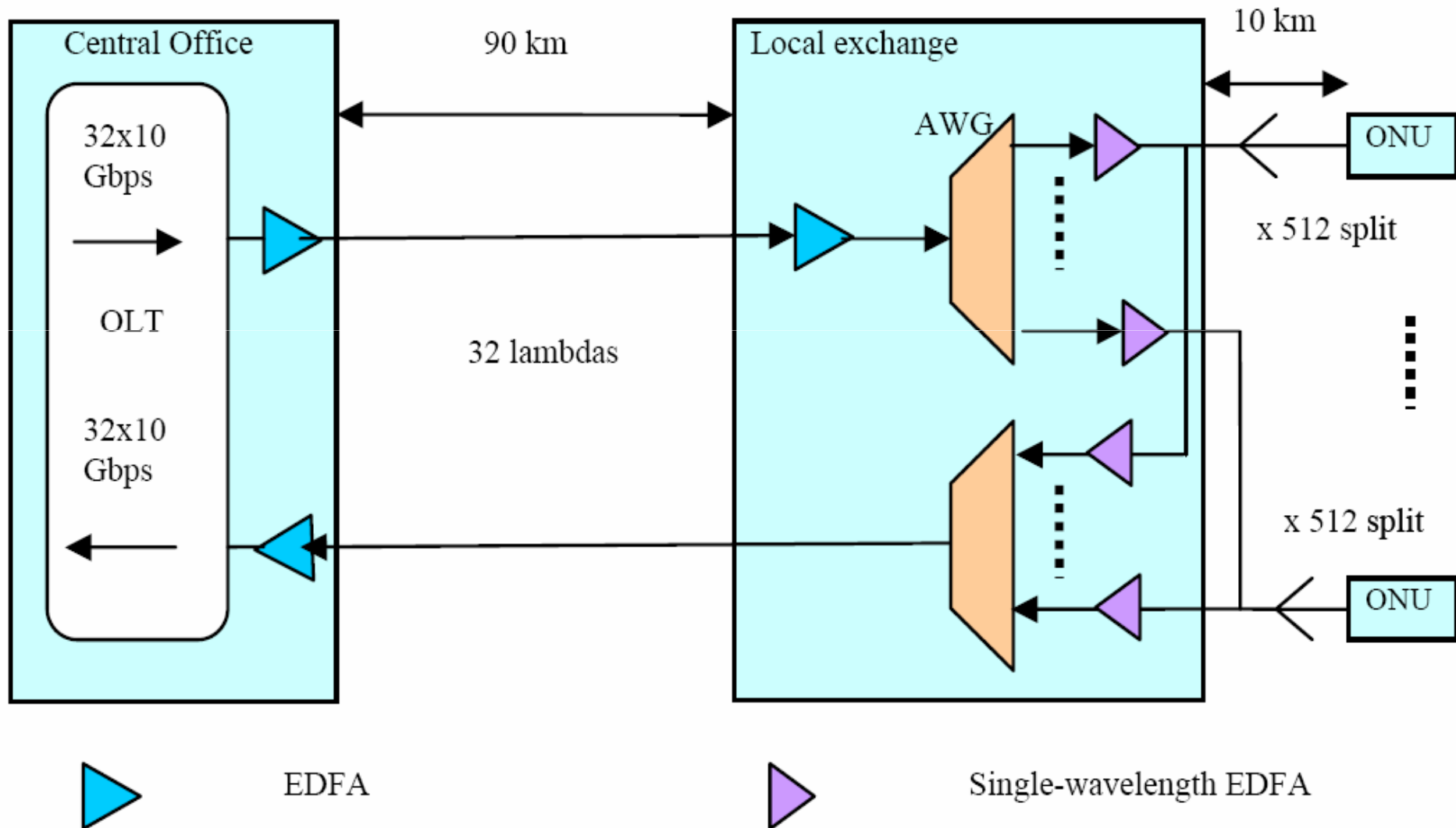


# PON jutri: konsolidacija vozlišč

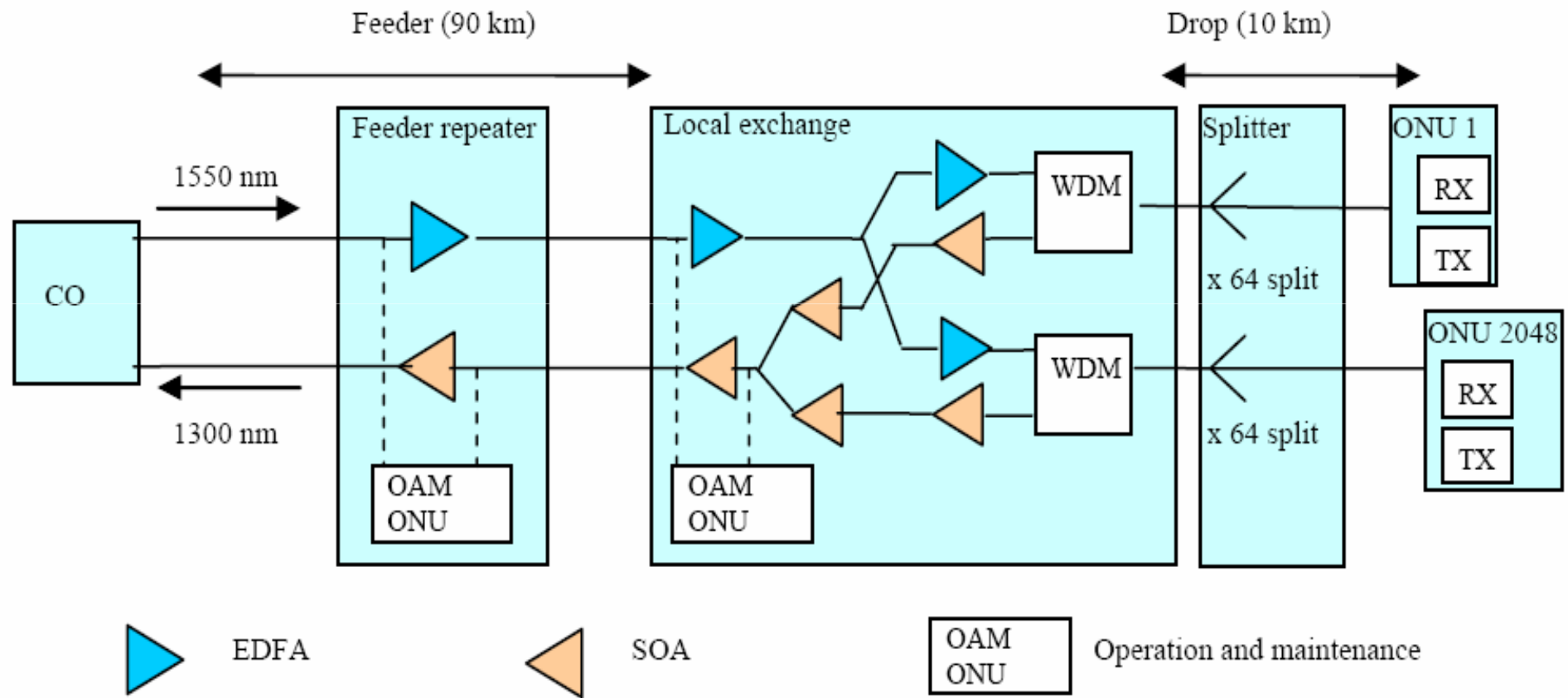


Dostopovno in (vele)mestno omrežje naj bi se združila v eno omrežje (Metro/Access) z razsežnostjo tudi do 100 km (velePON).

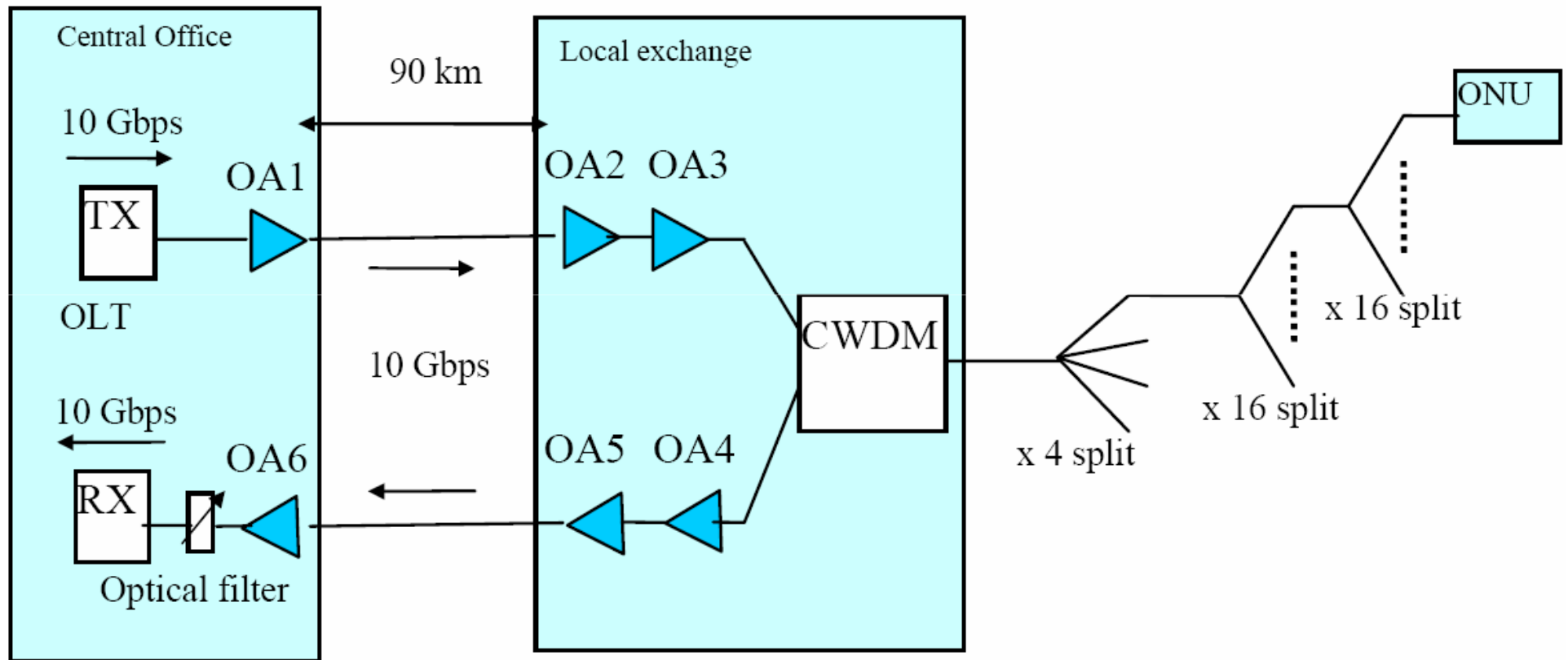
# Primer NG WDM PONa



# Primer NG WDM PONa

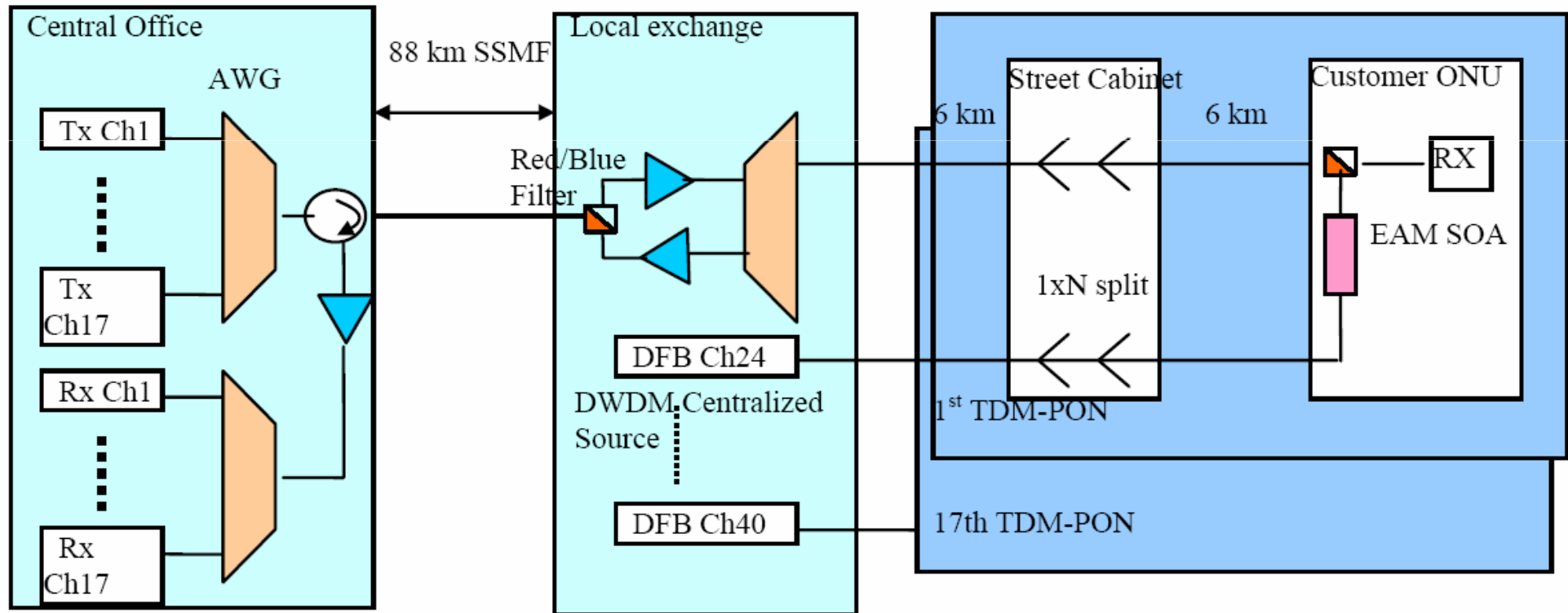


# British Telecom WDM/TDM PON



# British Telecom WDM/TDM PON

- uporablja glavno centralo, lokalno centralo in cestno kabino





# NG PON ONU, 2 izvedbi

## Zahteve:

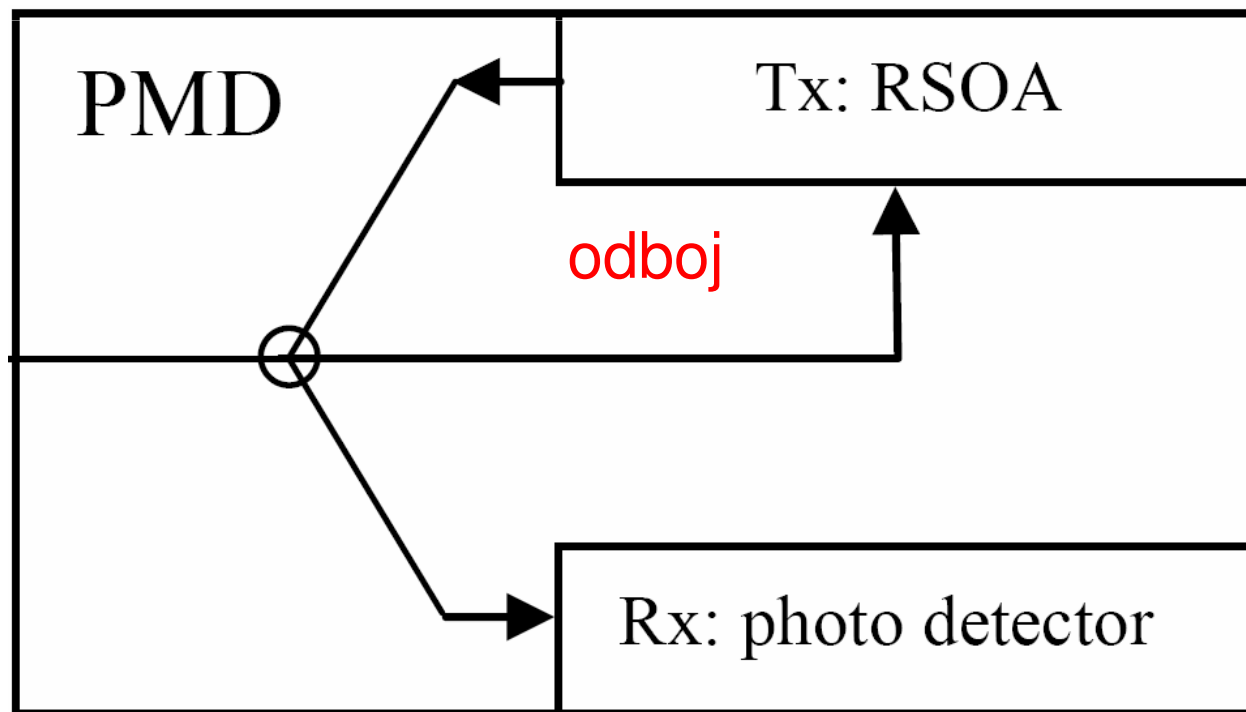
- Preprostost in nizka cena
- ONU mora biti za vse enak, zato mora biti neodvisen od valovne dolžine naročnika (brezbarven, colorless)

## Izvedba:

1. Vir odtočnega signala naj bo nameščen v OLT, v ONU pa naprava, ki ojačuje, odbija in modulira.
2. Laser FP je nameščen v ONU, njegovo frekvenco določi šumna svetloba ASE (LED), ki jo dobimo z narezom šumnega spektra v AWG.

# Evropski projekti za NG PON

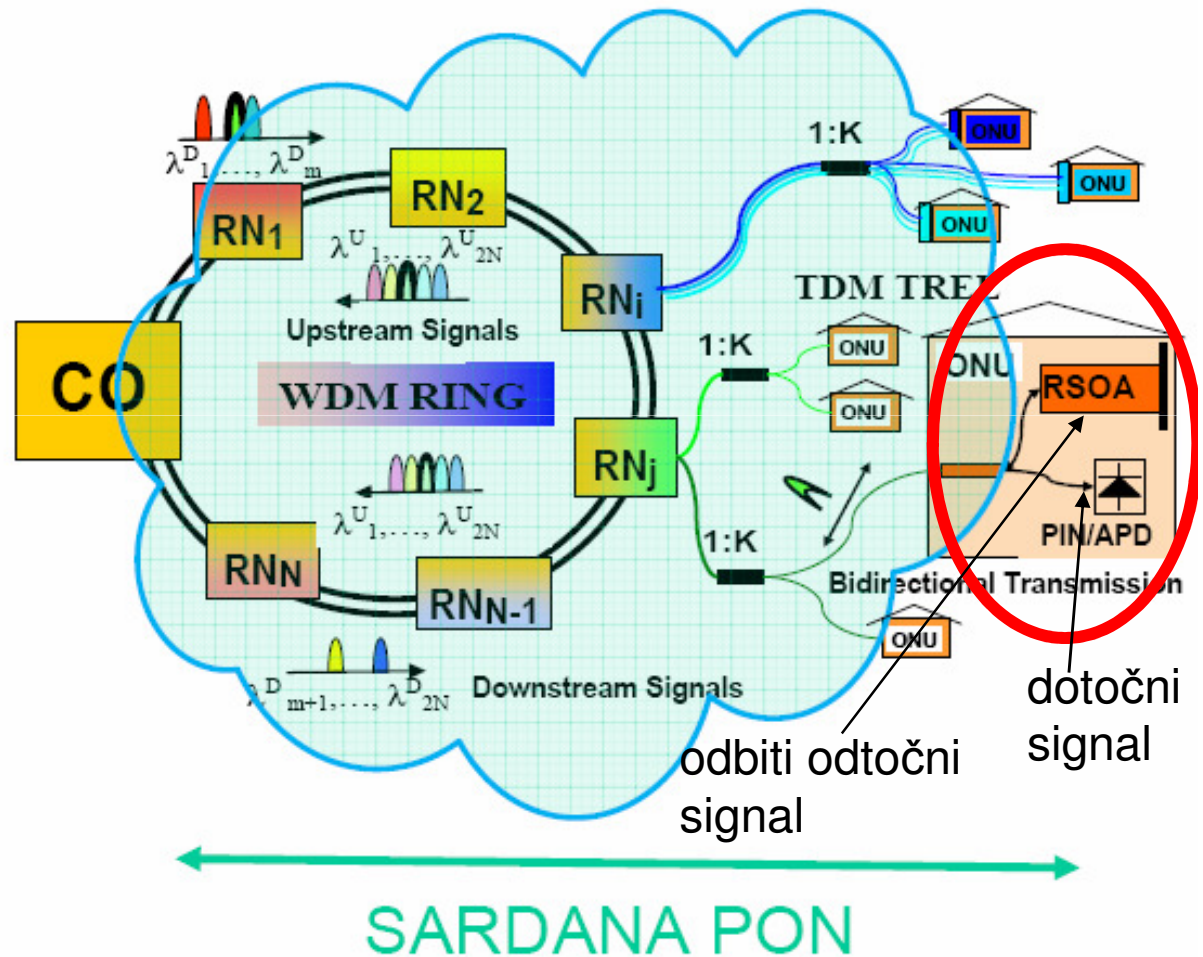
1. MUSE
2. PIEMAN
3. SARDANA



# PON Sardana

- Resilient trunk
- Fully passive
- Hybrid:
  - WDM Metro ring
  - TDM Access trees
- Cascadable remote nodes
- New adoption of remotely-pumped amplification
- Colourless ONU
  - RSOA
  - Tunable laser
- 10G-2.5G (1G-100Mb /user)
- 100 Km reach
- 16 RNs, 32 wl&trees
- 16x2x32 = 1024 users
- Multi-operator
- Based on GPON, but transparent.
  - IP traffic

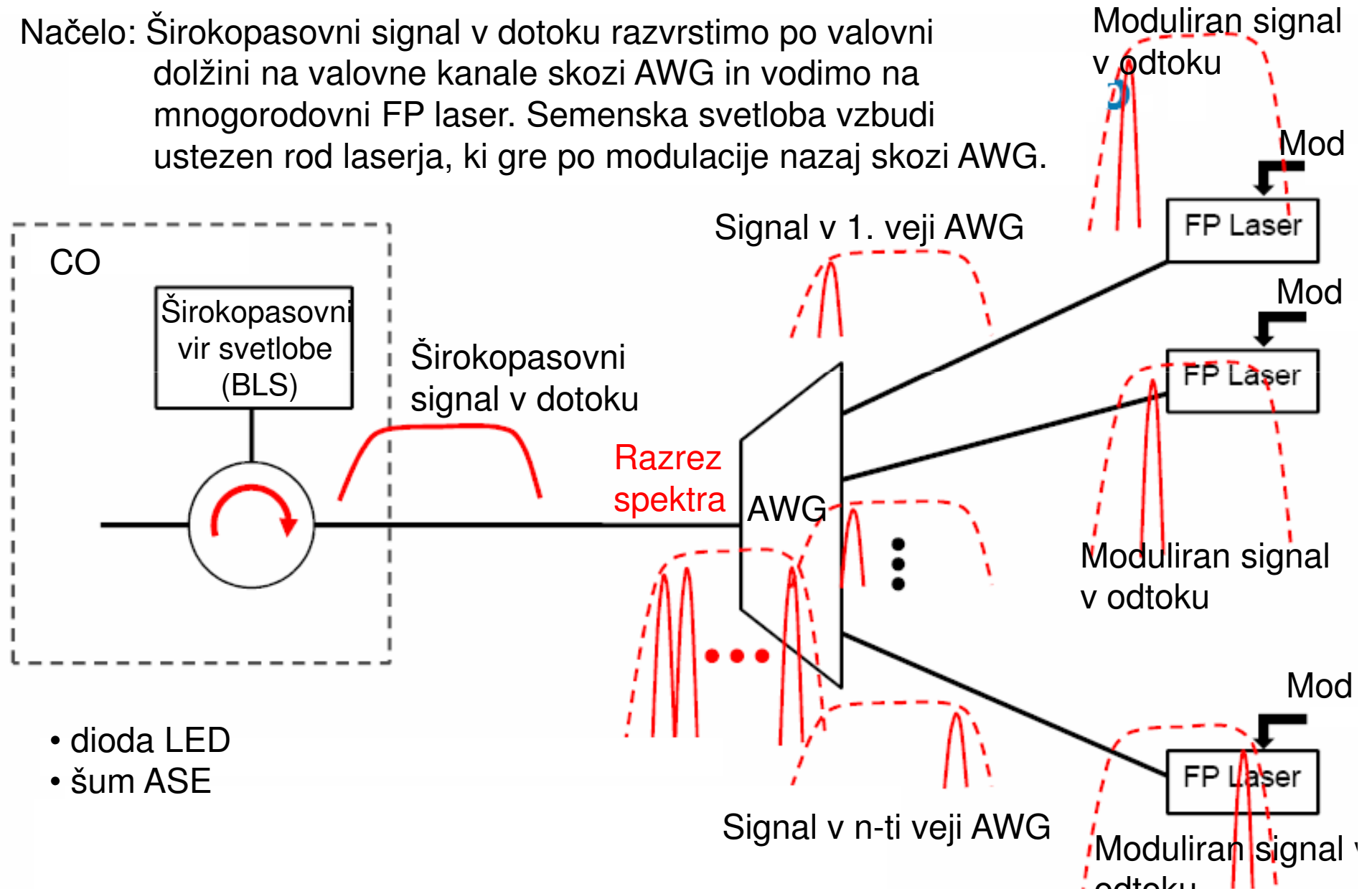
Načelo: ONU mora biti cenen in zato enak (brezbarven) v njem ni vira odtočnega signala



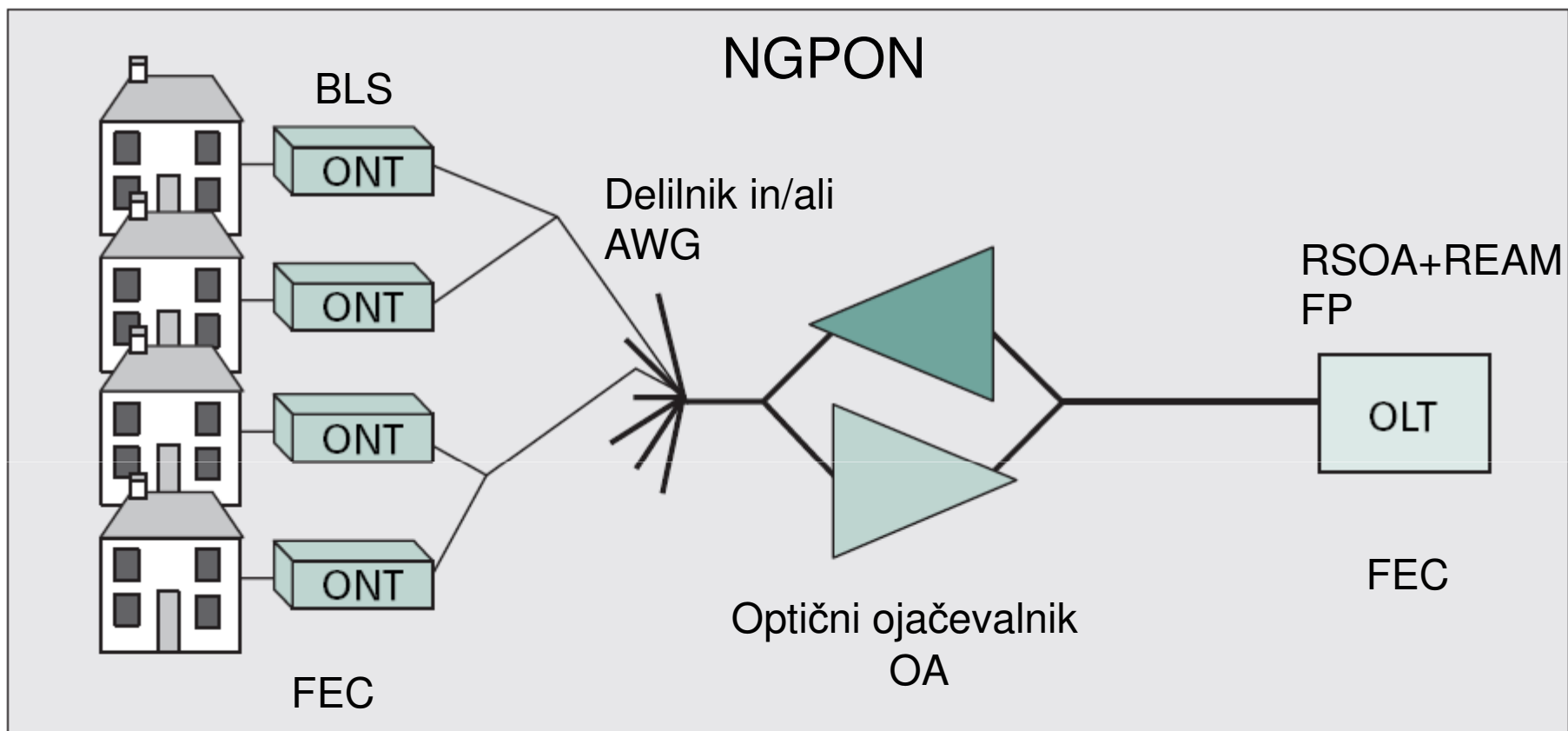
- Vir odtočnega signala v OLTu, skupaj z dotokom pride signal v ONU
- V ONU ga ojačimo, odbijemo in moduliramo (RSOA) kot odtočni signal

# ASE vir za brezbarvni ONU

Načelo: Širokopasovni signal v dotoku razvrstimo po valovni dolžini na valovne kanale skozi AWG in vodimo na mnogorodovni FP laser. Semenska svetloba vzbudi ustezen rod laserja, ki gre po modulacije nazaj skozi AWG.



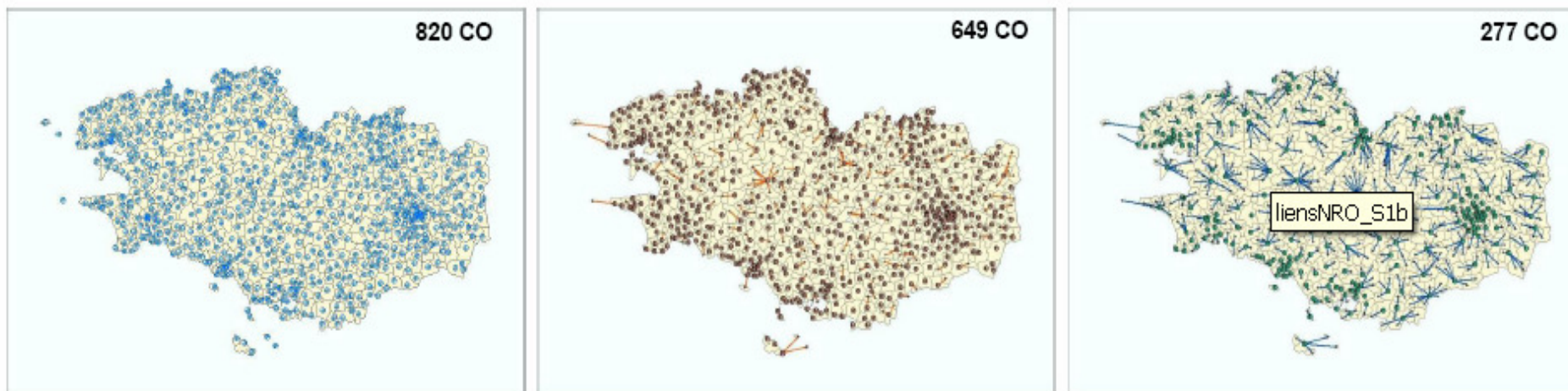
# Nove opcije omrežja nove generacije



- 10, 40 (in 100 Gb/s) PON
- 20, 60, 100 km in več
- veliko delilno razmerje, 512, 1028
- konsolidacija vozlišč
- OA in FEC

- Brezbarvni ONT (RSOA + REAM)
- Brezbarvni ONT (BLS + AWG + FP)
- WDM: CWDM, DWDM
- OFDMA
- CO zlasti za realizacijo DWDM

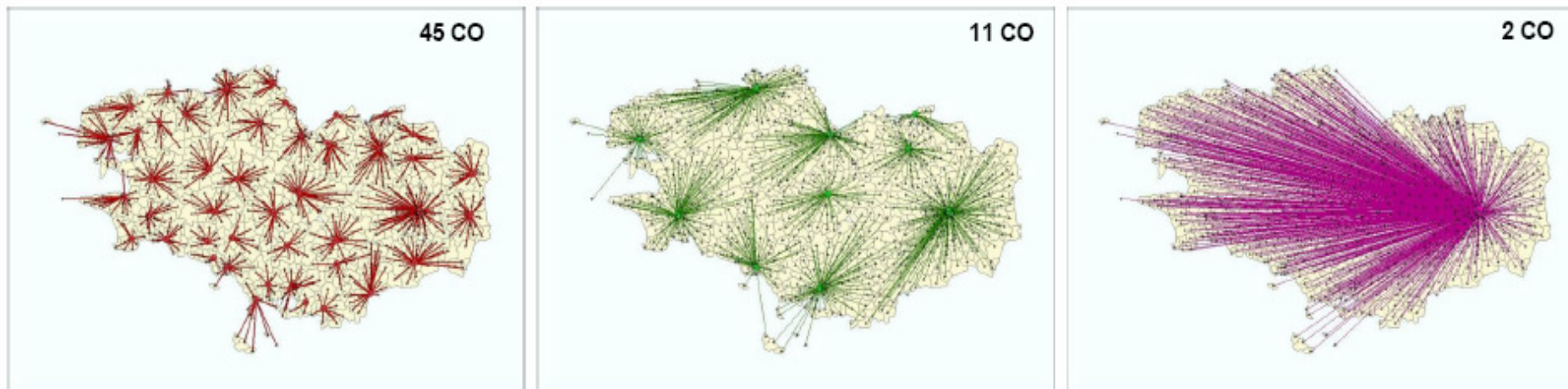
# Zmanjševanje števila central (CO)



DSLAM with fiber link

Master DSLAM

Centrale za veliko in zelo veliko število naročnikov ( $N >$ ,  $\gg 10.000$ )

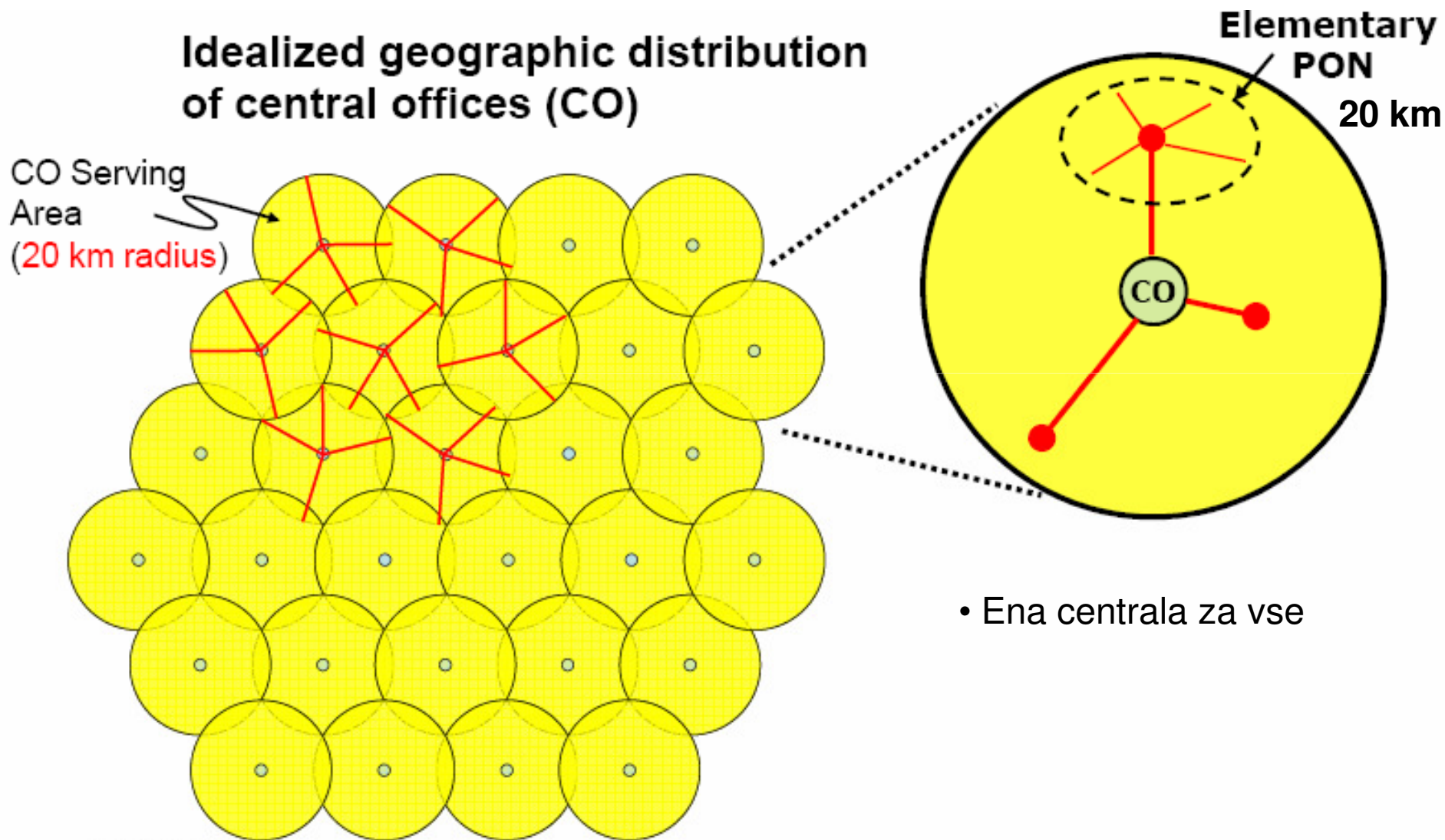


Edge node on 1st and 2nd transmission ring

Edge node only on primary transmission ring

Point of Presence POP

# Konsolidacija vozlišč



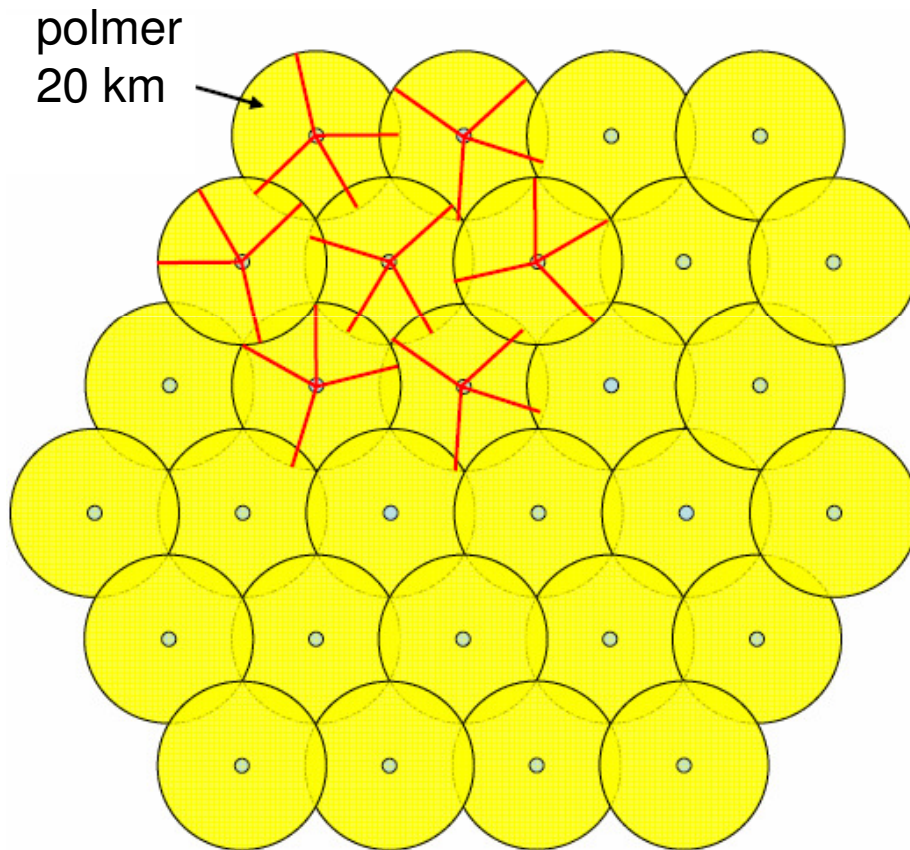
- Ena centrala za vse

• **Central Office**

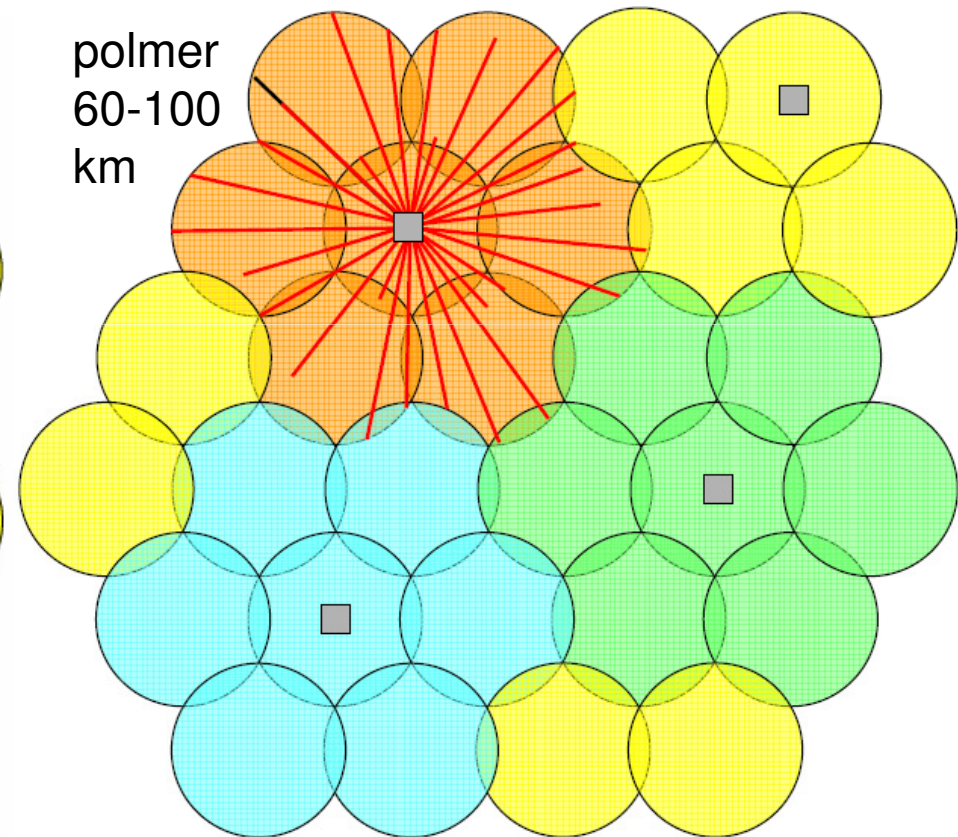
\* D. Payne and R. Davey, "The future of fibre access systems?," *BT Technol. J.*,

# Primer PON in LR (ER) PON

- ER extended reach, razširjen doseg
- LR long reach, dolg doseg



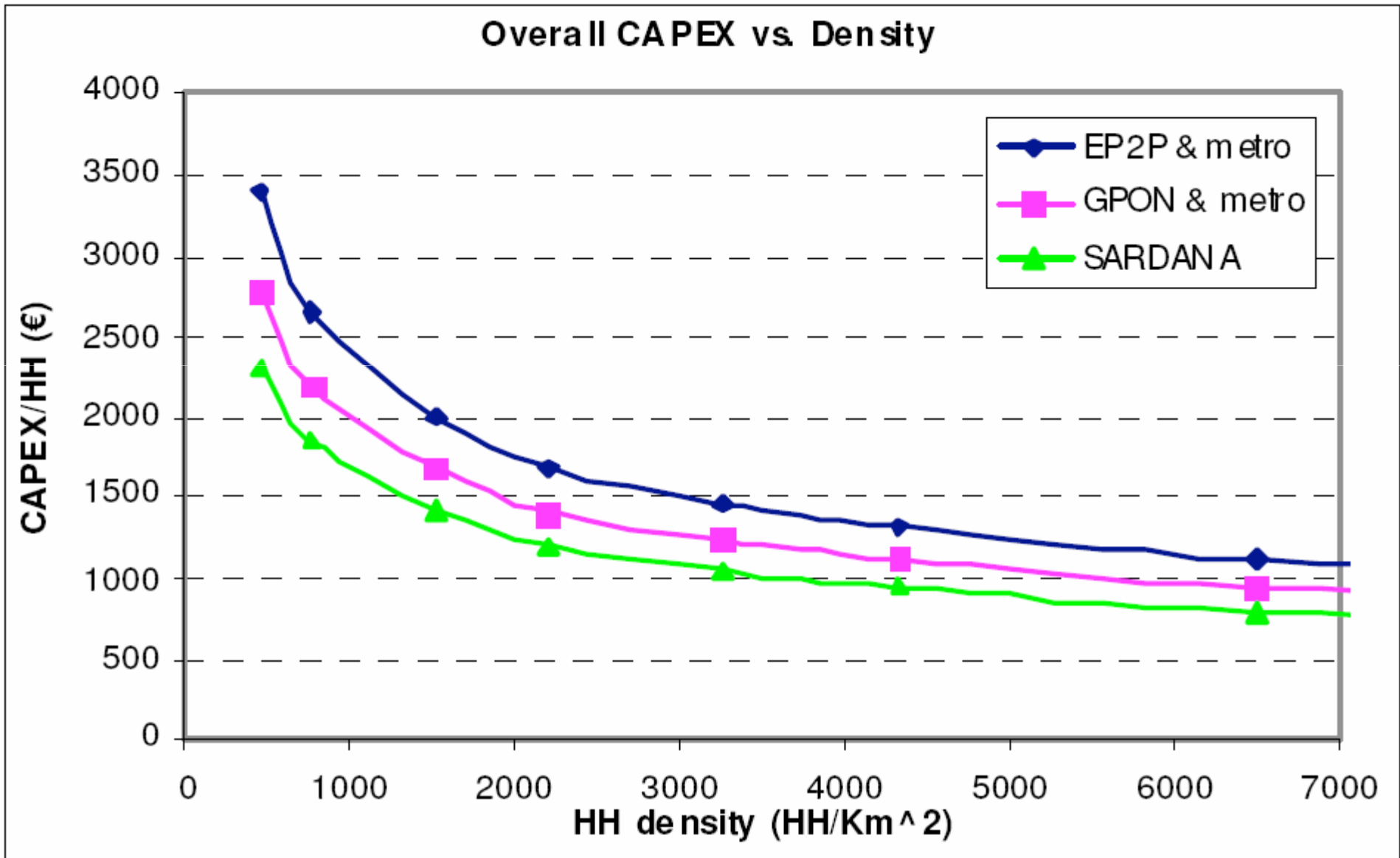
PON – veliko število CO



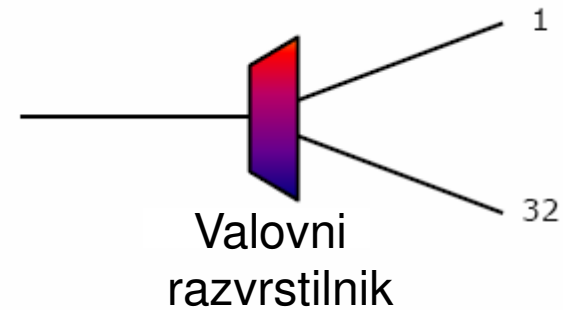
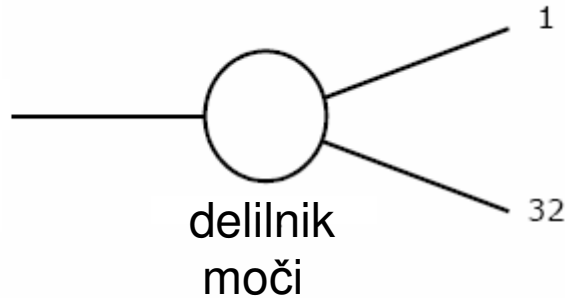
LR (ER) – PON, zmanjšano število CO



# Primerjava CAPEX

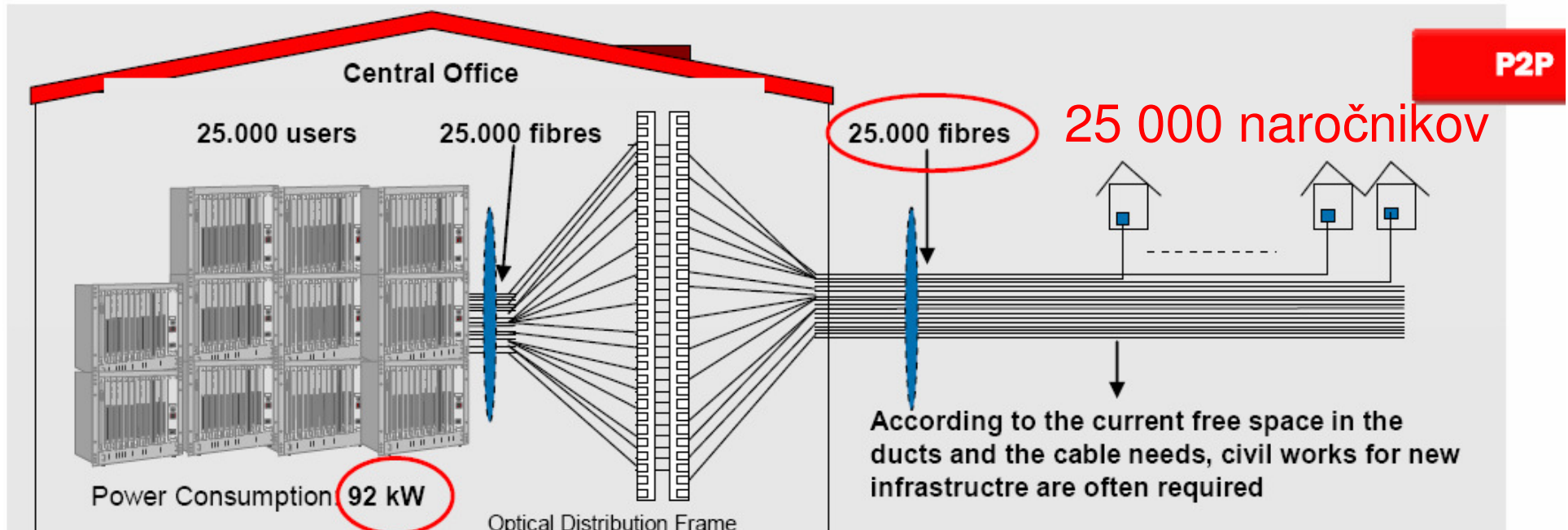
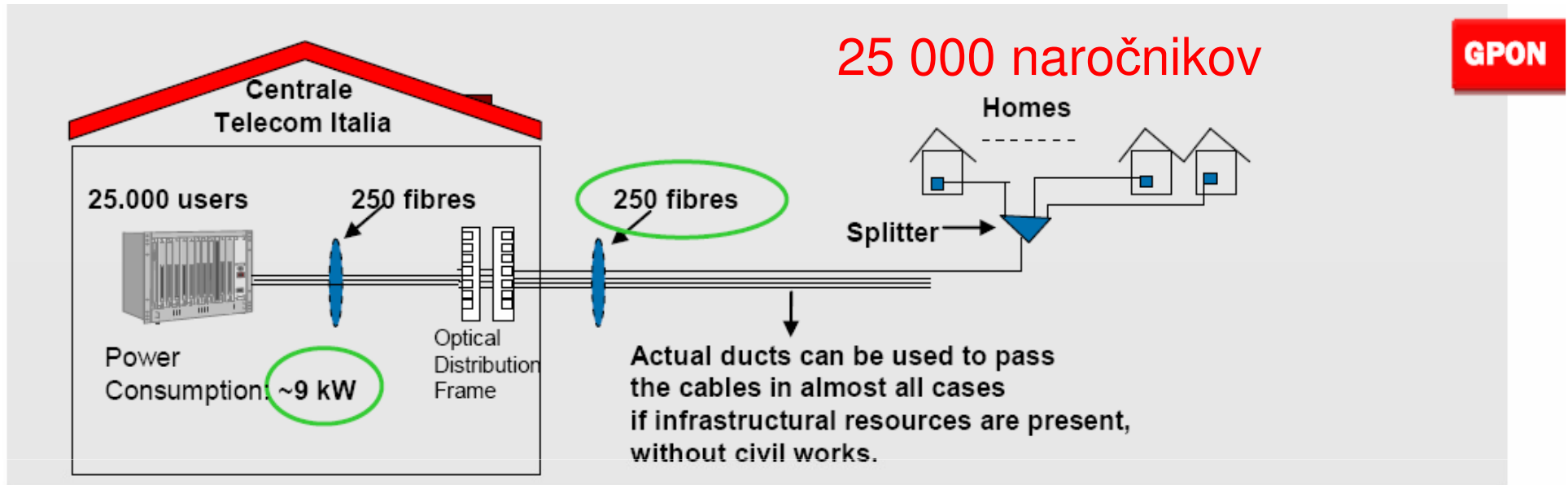


# Migracija PONa



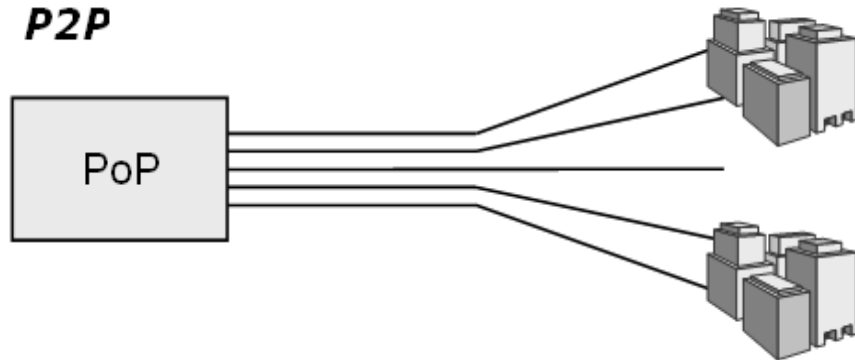
	40-G TDM	Stacked 10-G TDM (4 $\lambda$ s per direction)	OFDM or OCDMA or Coherent DWDM	Stacked 10-G TDM (4 $\lambda$ s per direction)	(D)WDM PON
Optics	Costly optics	Increased ONU complexity ( $\lambda$ -tunable or four types)	Costs?	Increased ONU complexity ( $\lambda$ -tunable or four types)	Increased ONU complexity ( $\lambda$ -tunable or "colorless")
Architecture	Link budget challenges	OLT Mux adds some loss	Untested in the field	Re-use 10-G PON protocols, electronics	Low line rate Pt-to-Pt connections
Muxing	Well understood architecture	Re-use 10-G PON protocols, electronics	Path for continued evolution?	Relaxed loss budget	Upgradeable
Availability	Full stat muxing	<b>Possible today</b>		<b>Possible today</b>	

# T-T in T-MT, primerjava



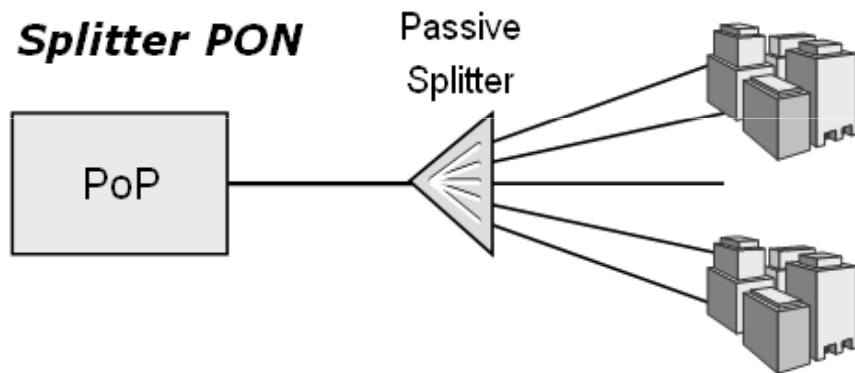
# Primerjave

## **P2P**



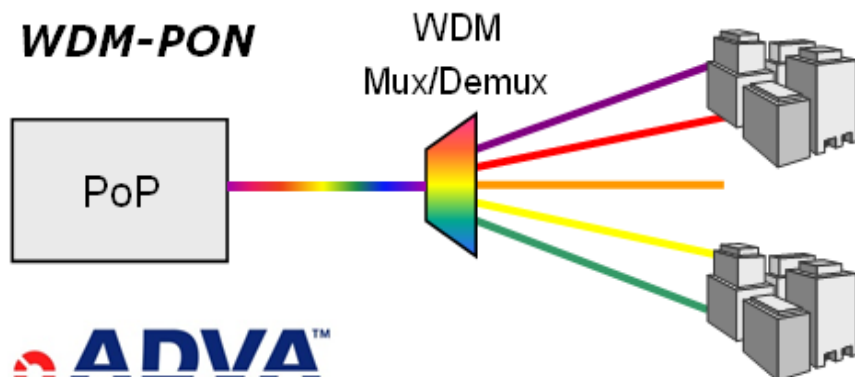
- + Scalable and transparent bandwidth per customer
- + Highest security/availability due to physical/logical separation of customer links
- High fiber count in access network (i.e., high OPEX)
- High space and power consumption

## **Splitter PON**



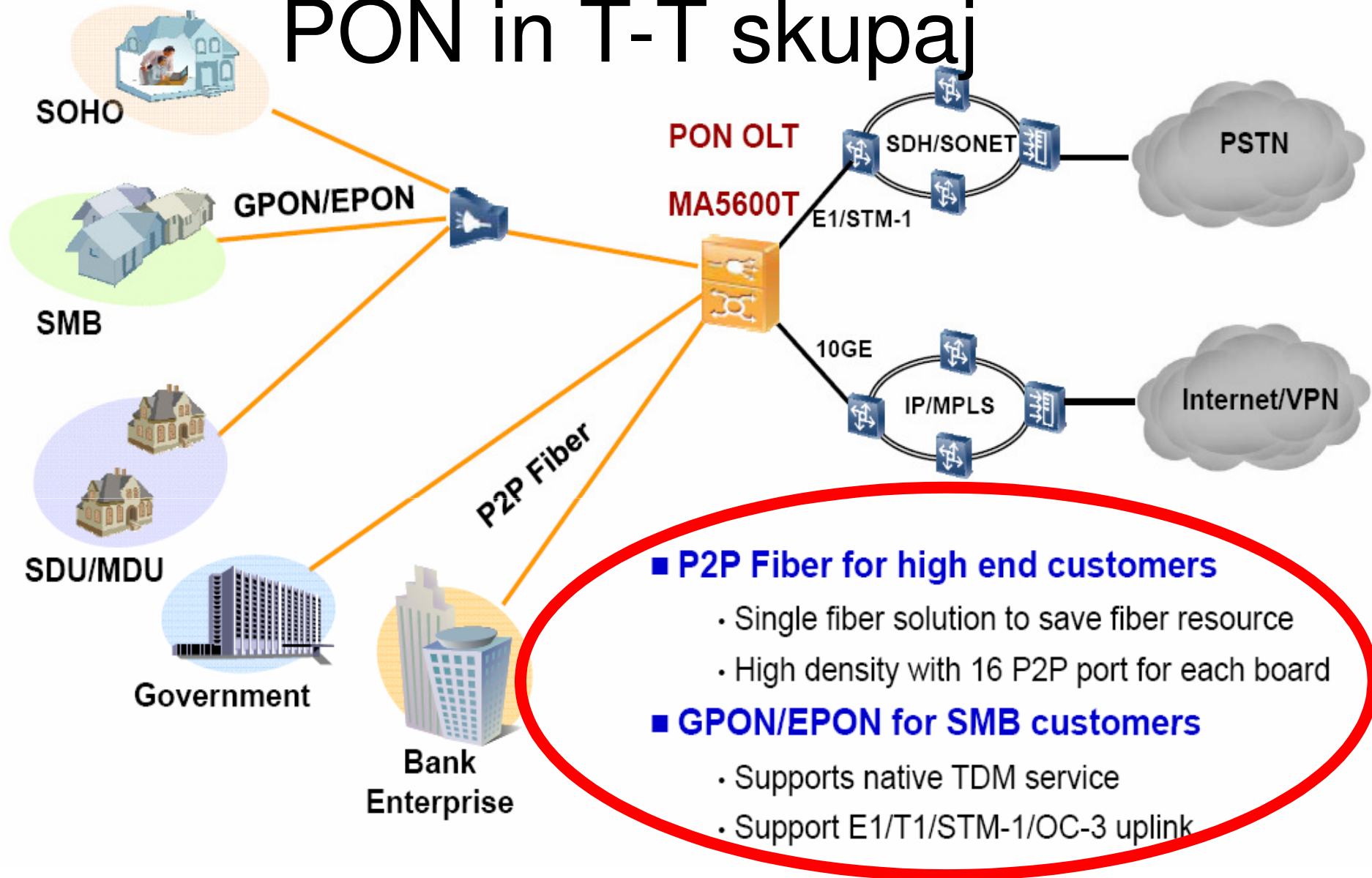
- + Very low fiber count in feeder network part
- + Low port (interface) number, and space and power consumption in PoP
- Limited bandwidth and bandwidth upgrade
- Reduced security/availability in case of TDMA
- High insertion loss, low max. reach

## **WDM-PON**



- + Very low fiber count in feeder network part
- + Scalable and transparent bandwidth per customer
- + High security/availability due to optical/logical separation of customer links
- High port number in PoP equipment

# PON in T-T skupaj



*In practice both Point to Point and Passive Optical Networks will co-exist in the network for different market situations. However PON will be the mass market solution.*

# T-T/PON, evropsko urbano omrežje

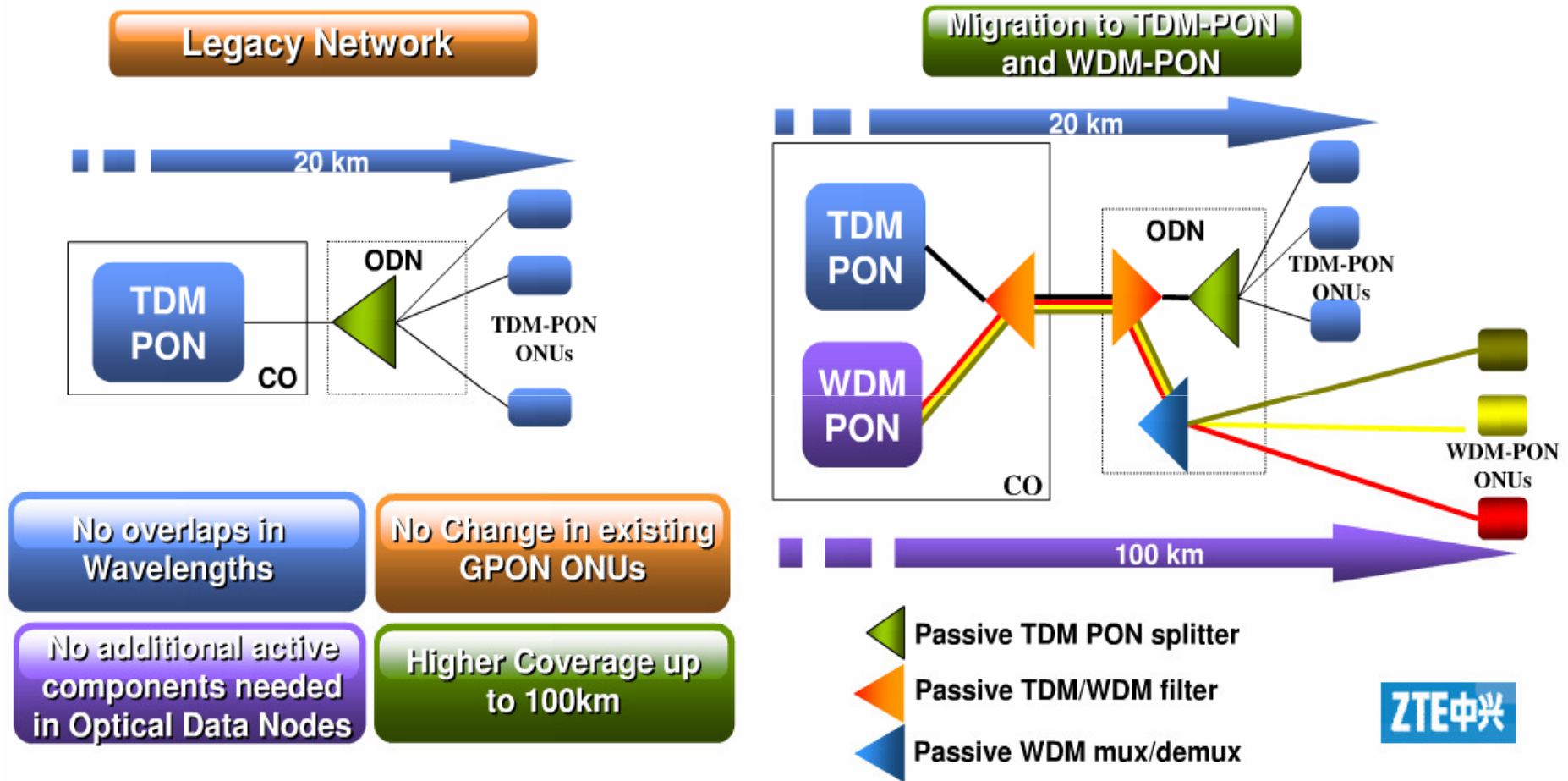
## Primerjava stroškov gradnje

Scenario	p2p cost (€M)	GPON cost (€M)	p2p cost difference
Plenty of ducts (little civil works needed for both)	91	87	5%
Limited ducts (more civil works needed for p2p)	109	87	25%
No ducts (civil works needed for both)	140	137	2%

# Primerjave CAPEX in OPEX

	WDM-PON	Active P2MP	NG-GPON
Equipment CapEx	Higher than active P2MP, similar to NG-GPON	Potentially, <b>lowest</b>	Higher than active P2MP
Fibers	<b>Lowest</b> fiber cost, supports site reduction due to <b>high maximum reach</b>	Higher fiber cost, but potentially high maximum reach	<b>Low</b> fiber cost, but limited in maximum reach
OpEx	Lowest OpEx since <b>application-specific solutions are avoided</b> (also supports P2P WDM). Integrated aggregation, protection, OAM, L2 Eth.	Potentially high due to respective number of systems. Systems may also lack OAM and other capabilities.	<b>Low for low-medium capacity</b> requirements, but may require dedicated P2P solutions for high-capacity applications.
Energy Consumption	For any given product Bandwidth × Distance, WDM-PON can <b>minimize energy consumption</b>	Typically, higher than WDM-PON, specially when amplified (discrete I/Fs, multiple amplifiers)	Only for short distances similar to WDM-PON, otherwise higher

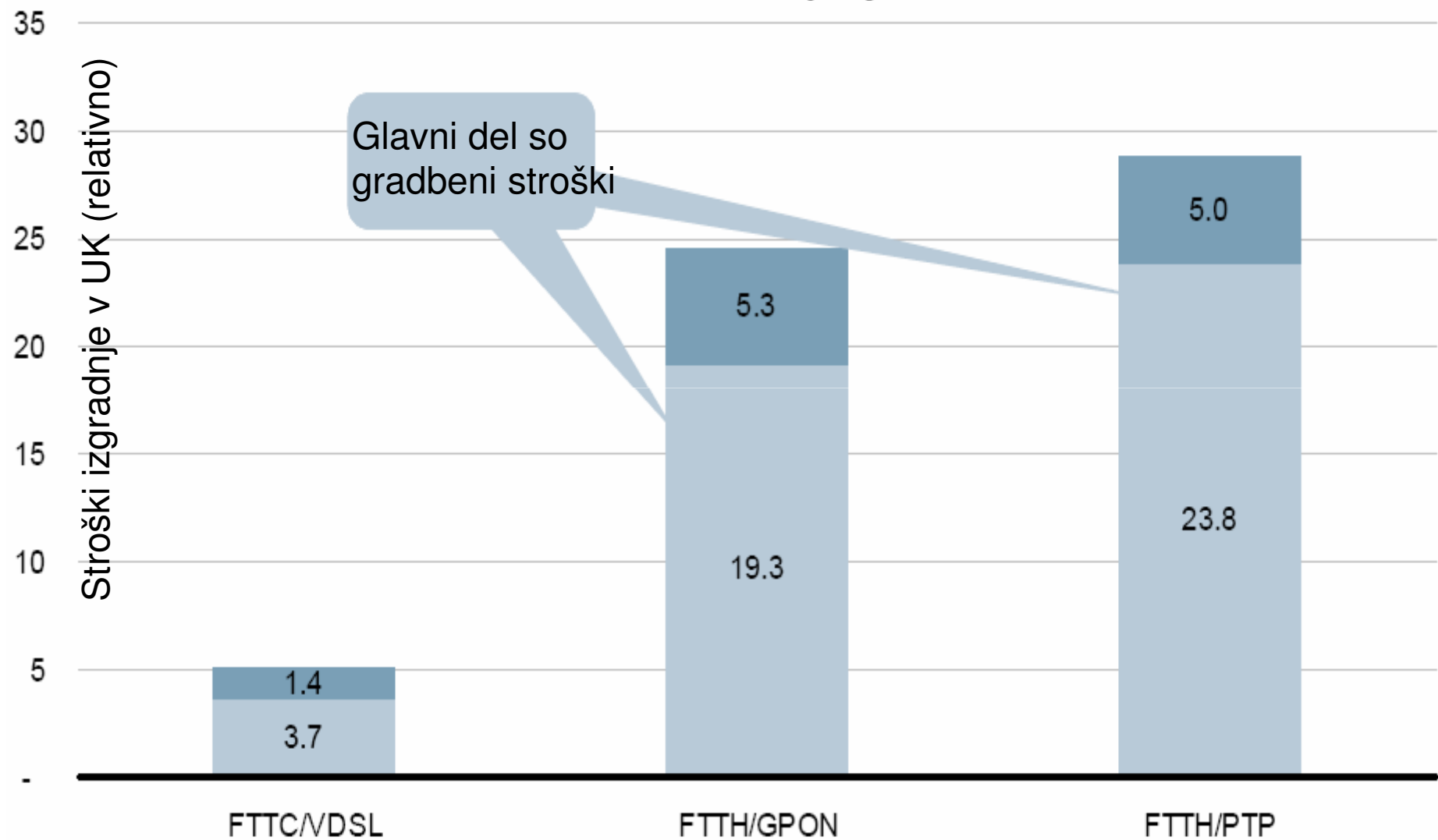
# Koeksistenca TDM POMa in WDM PONa



Possible Coexistence Leads to Preserved Initial Investments



# Primerjava CAPEX – VDSL, GPON, T-T



Stroški: ■ fiksni ■ variabilni

Ofcom 2010

C

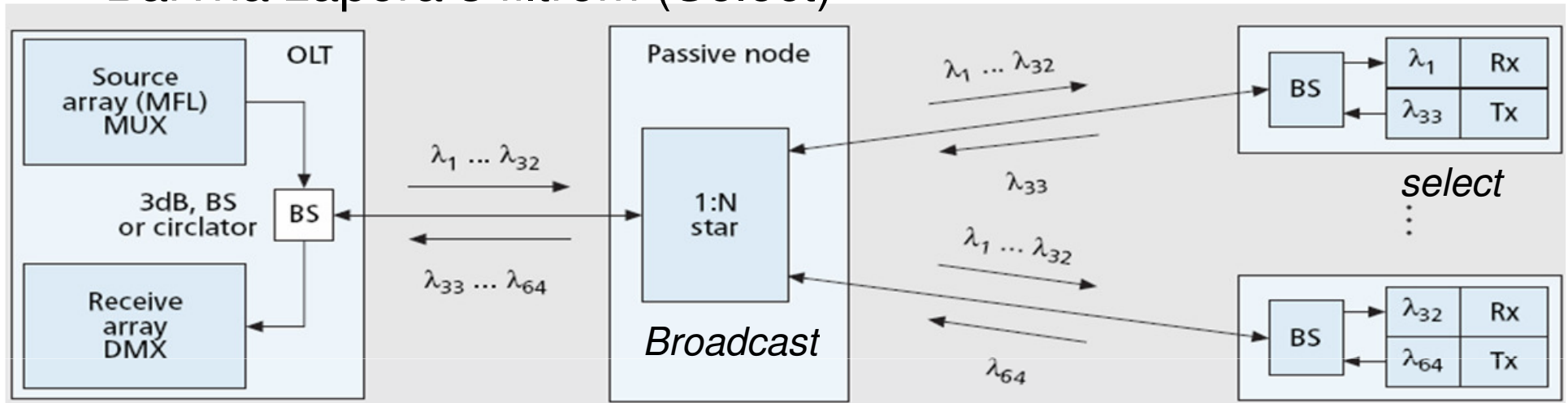
Nove

tehnologije

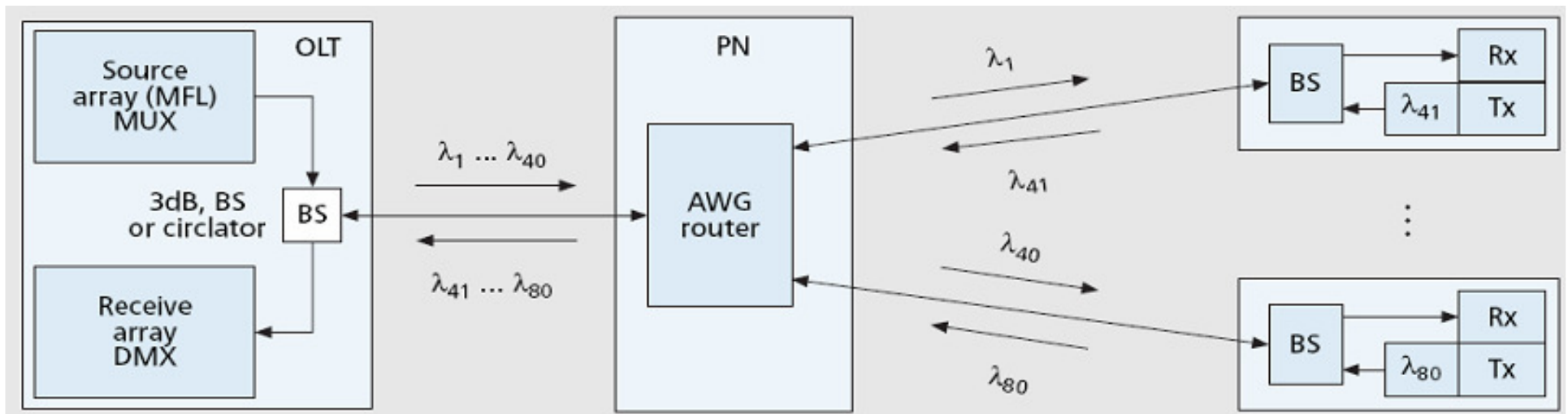
**WDM PON**

# Dva načina razdelitve barvnih kanalov

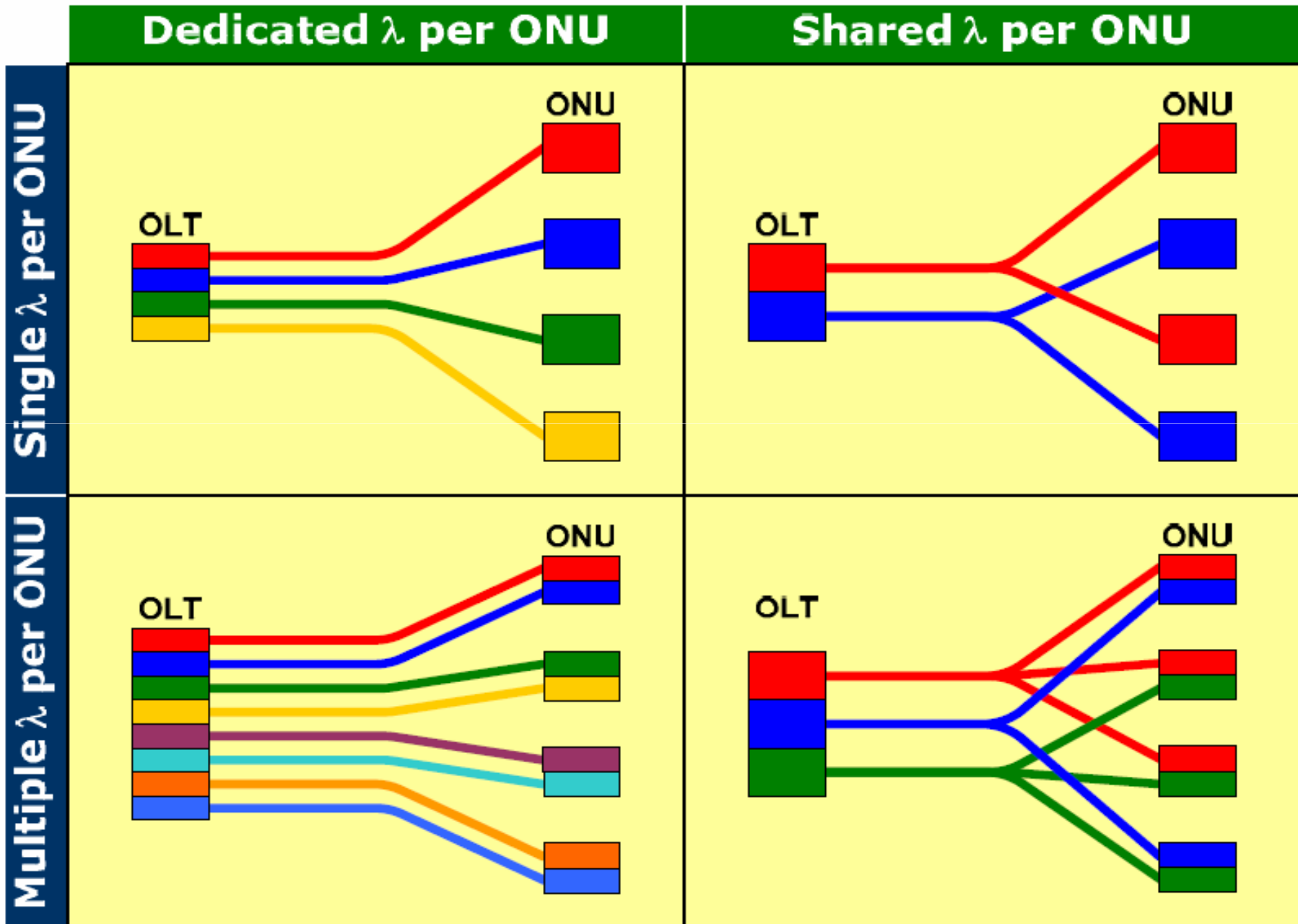
- Delitev s pasivnim delilnikom 1:N (Broadcast)
- Barvna zapora s filtrom (Select)



## Delitev z valovnim usmerjevalnikom (AWG)

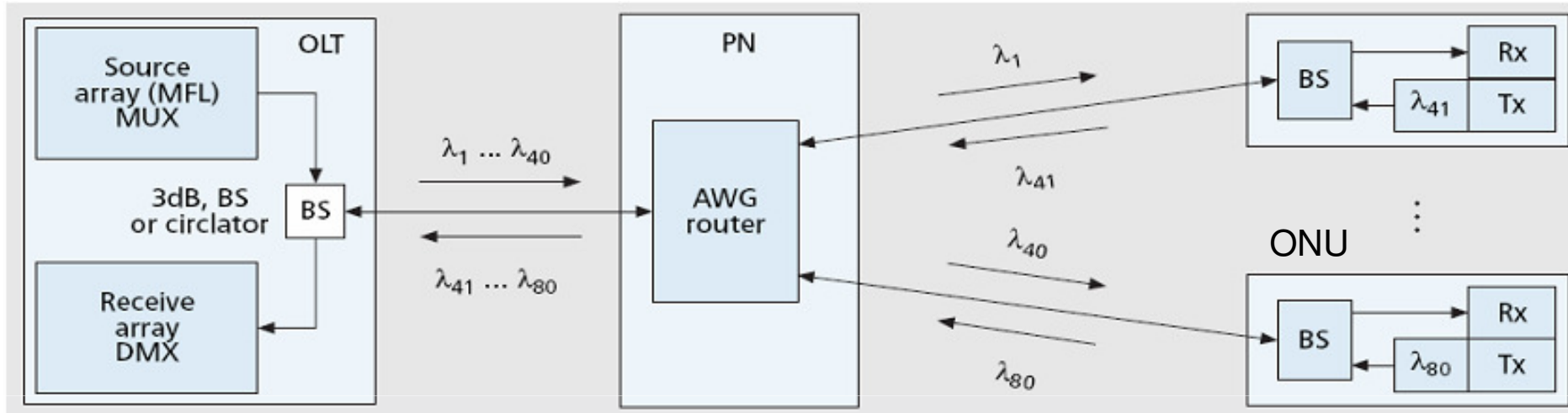


# WDM PON



# Selektivna delitev, neselektiven sprejem

## Wavelength routed (AWG) PON



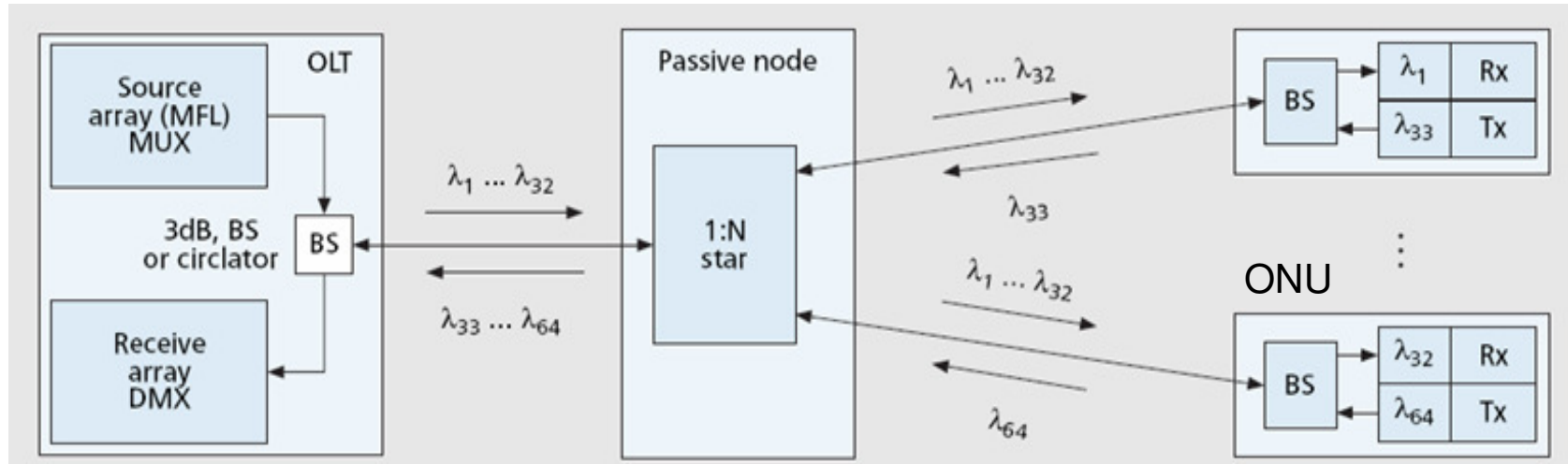
1. Pasivni delilnik nadomestimo z valovnim razvrstilnikom, ki posamezne valovne dolžine usmerja v določene ONU
2. ONU sprejemajo njim usmerjene dotočne signale in oddajajo odtočne signale različnih valovnih dolžin.
3. Različni oddajniki v ONU

Prednosti:

- Veliko delilno slabljenje smo nadomestili z manjšim razvrstilnim slabljenjem (npr. 5 dB).
- Neselektivni (enaki) sprejemniki v ONU.

# Neselektivna delitev, selektiven sprejem

- Broadcast and select

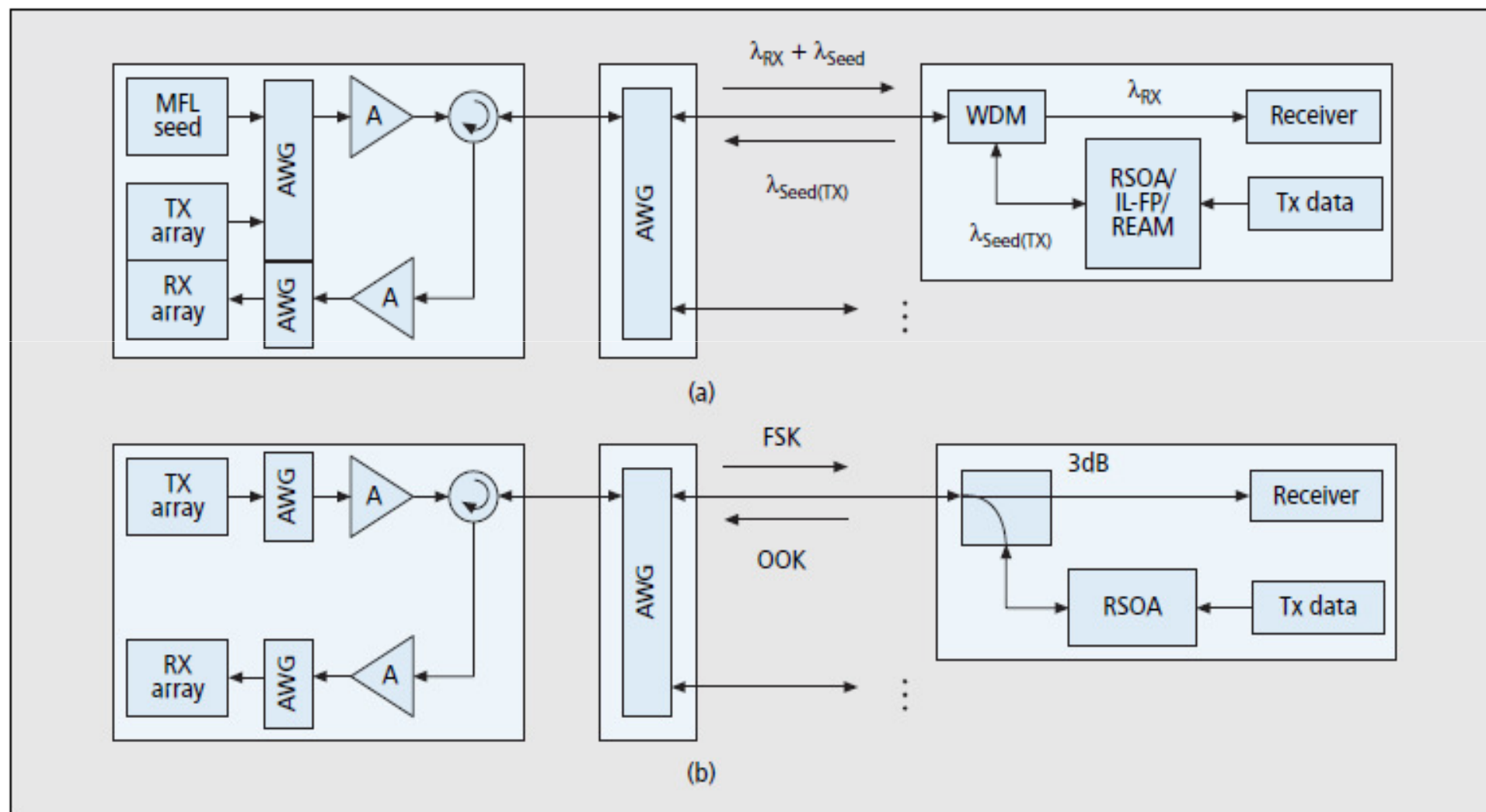


1. OLT oddaja dotočne signale valovnih dolžin  $\lambda_1$  do  $\lambda_{32}$  na pasivni delilnik moči
2. Ta jih enakomerno razprši med ONU, ki signale izbirajo po valovni dolžini.  
ONU sprejemajo nezmanjšano pasovno širino signala.
3. ONU oddaja odtočne signale  $\lambda_{33}$  do  $\lambda_{64}$ .

Pomanjkljivosti:

- Veliko delilno slabljenje pasivnega delilnika (npr. 17 dB pri 1:32)
- Varovanje zasebnosti
- ONU so različni po barvi signala, sistem je zahteven.

# Brezbarvni RSOA

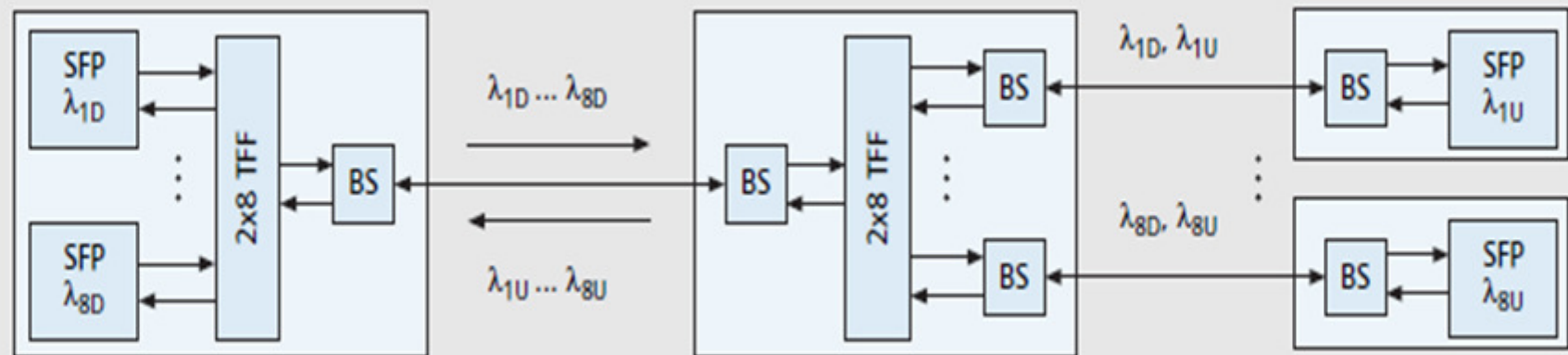


■ **Figure 2.** Colorless ONUs for single-fiber working based on RSOAs, REAMs, or IL-FP lasers: a) different seed and DS payload wavelengths; b) FSK modulation for downstream and OOK for upstream.



# Most Cost effective: CWDM-PON

- 16 CWDM wavelengths on SFW supports 8 ONU's
  - 1270 nm to 1610, ITU-T standard
- High power budget but potential problems with old fibers (OH peak)
- Employs standard low-cost pluggable SFP modules
  - Capex is low, Opex moderate (higher than colourless)
- DWDM much more expensive than CWDM, why?

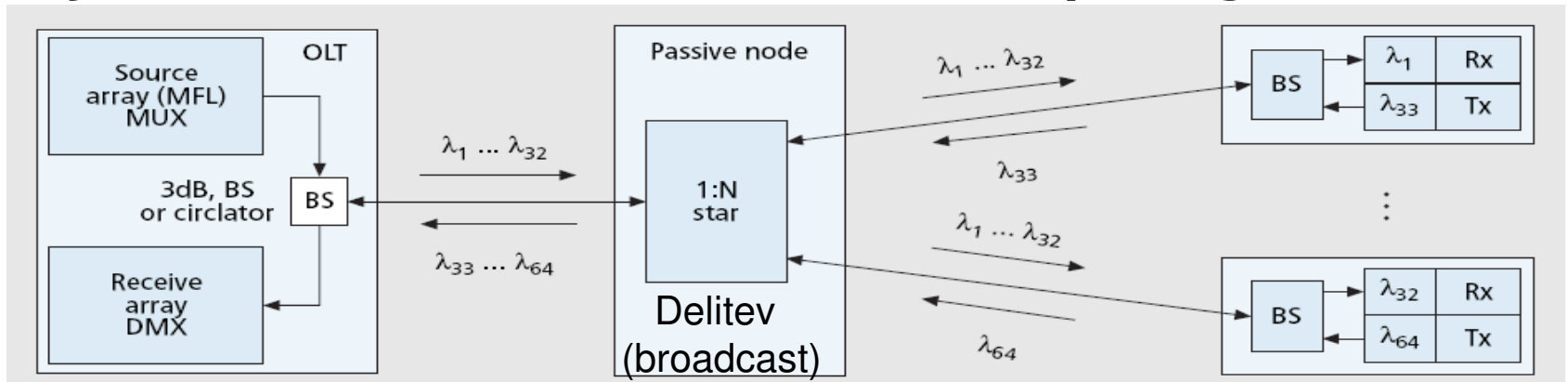


■ Figure 3. A simple CWDM-PON based on CWDM small-form factor pluggables (SFPs). (Note: TFF is a CWDM thin-film filter.)

# Trije načini WDM PONa, pregled

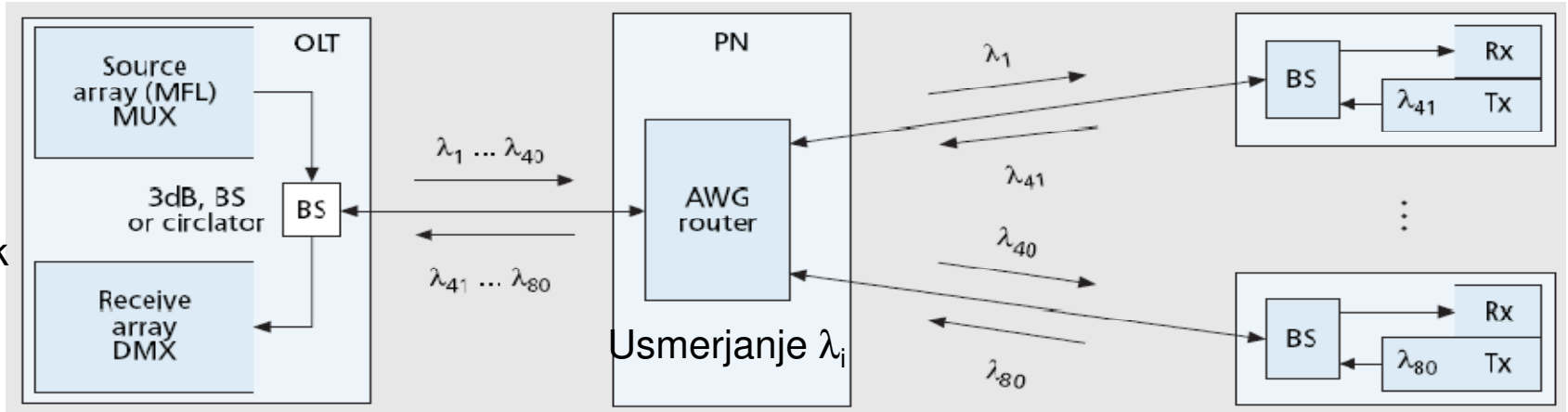
1

Pasivni delilnik  
Barvni filter  
Laser



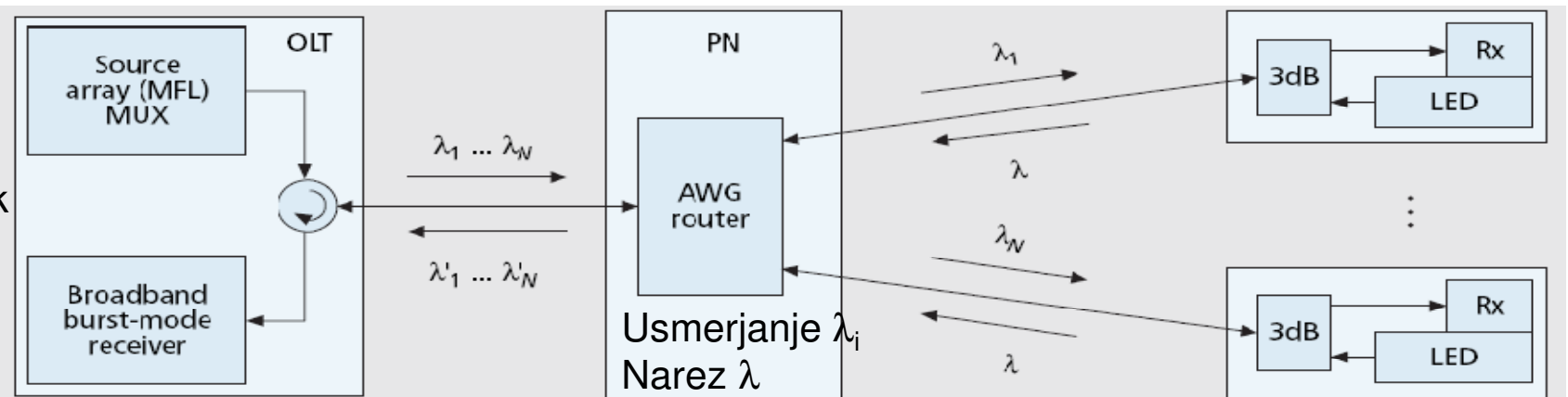
2

Valovni razvrstilnik  
Laser



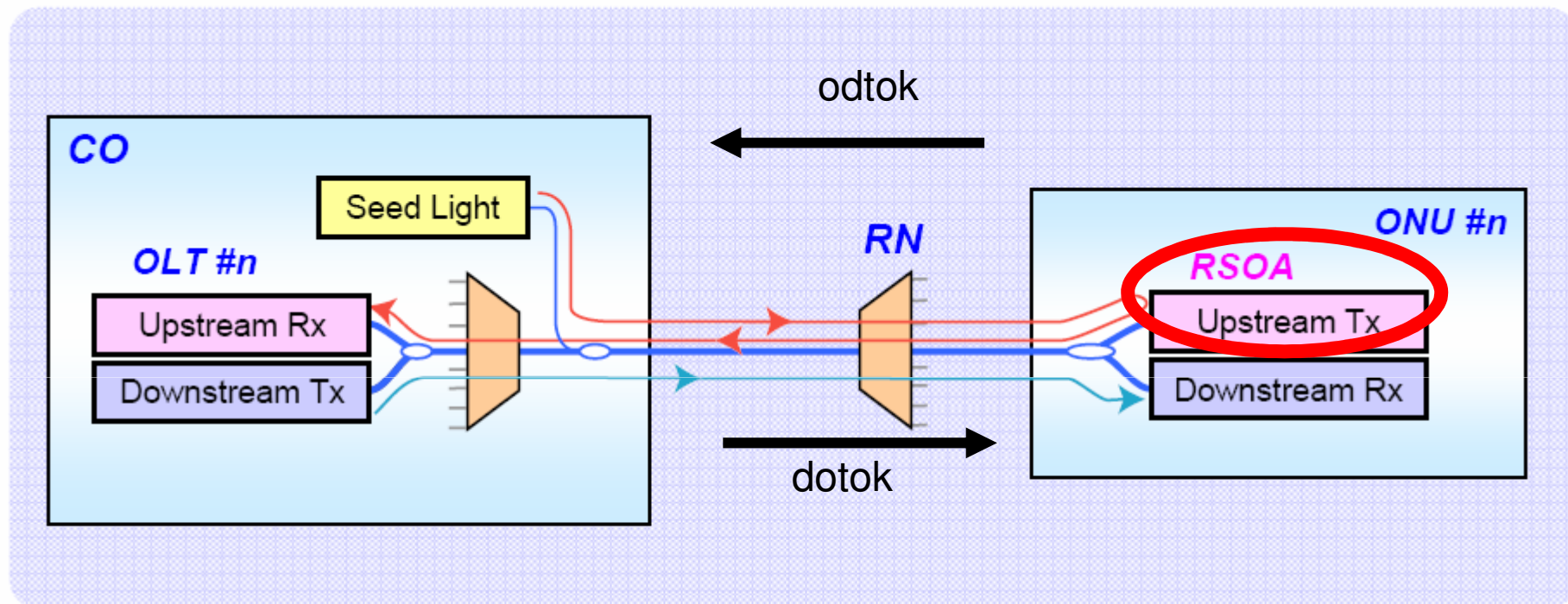
3

Cirkulator  
Valovni razvrstilnik  
LED



# WDM PON z RSOA

RSOA (Reflective Semiconductor Optical Amplifier)



Oddajnik dotočnega signala

Sprejemnik odtočnega signala

Svetlobni vsadek do RSOA:

- dotočni signal
- laserska svetloba
- šum ASE

Sprejemnik dotočnega signala

Odbojni ojačevalnik SOA

Modulator odtočnega signala

Z odsotnostjo vira odtočnega signala v ONU se ta najštevilčnejši sestavni del omrežja najbolj poceni.

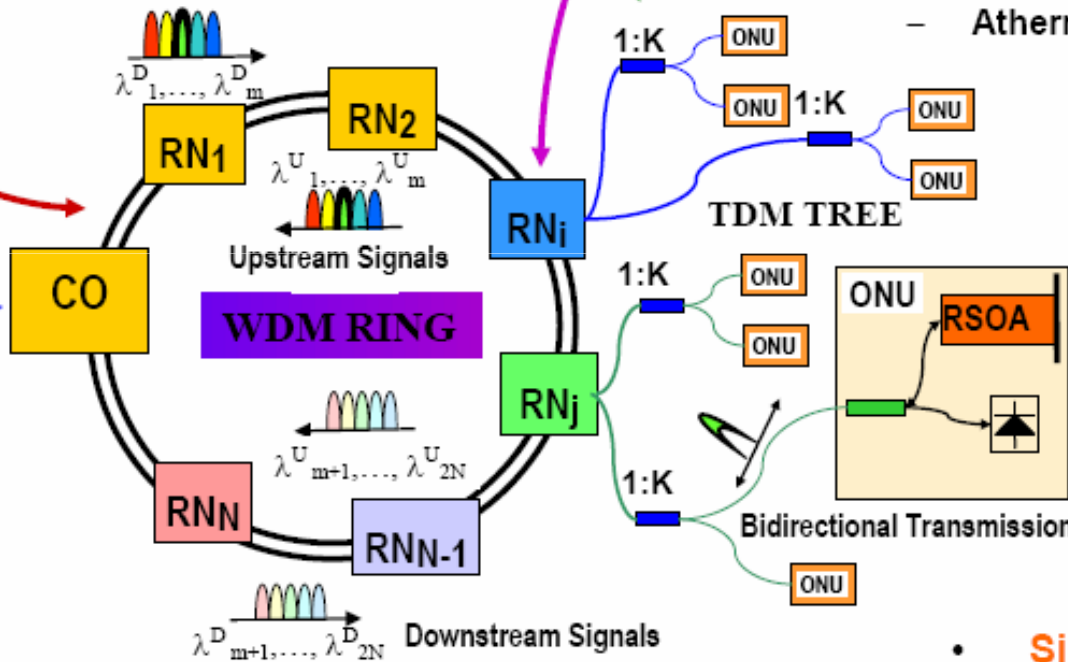
# Sardana SOA + REAM

- **WDM ring: Transport & Resilience**
  - up to 1.2Tbit/s (64  $\lambda$  for 2000 users)

- **TDM trees:**
  - Up to 3  $\lambda$  for 3 operators sharing common infrastructure.

- **Passive Remote Nodes (RN):**

- Cascadable Add&Drop
- 2-to-1 fibre interface
- Remotely pumped (from CO) optical amplification by EDFs
- Athermal splitters and fixed filters



## Načela:

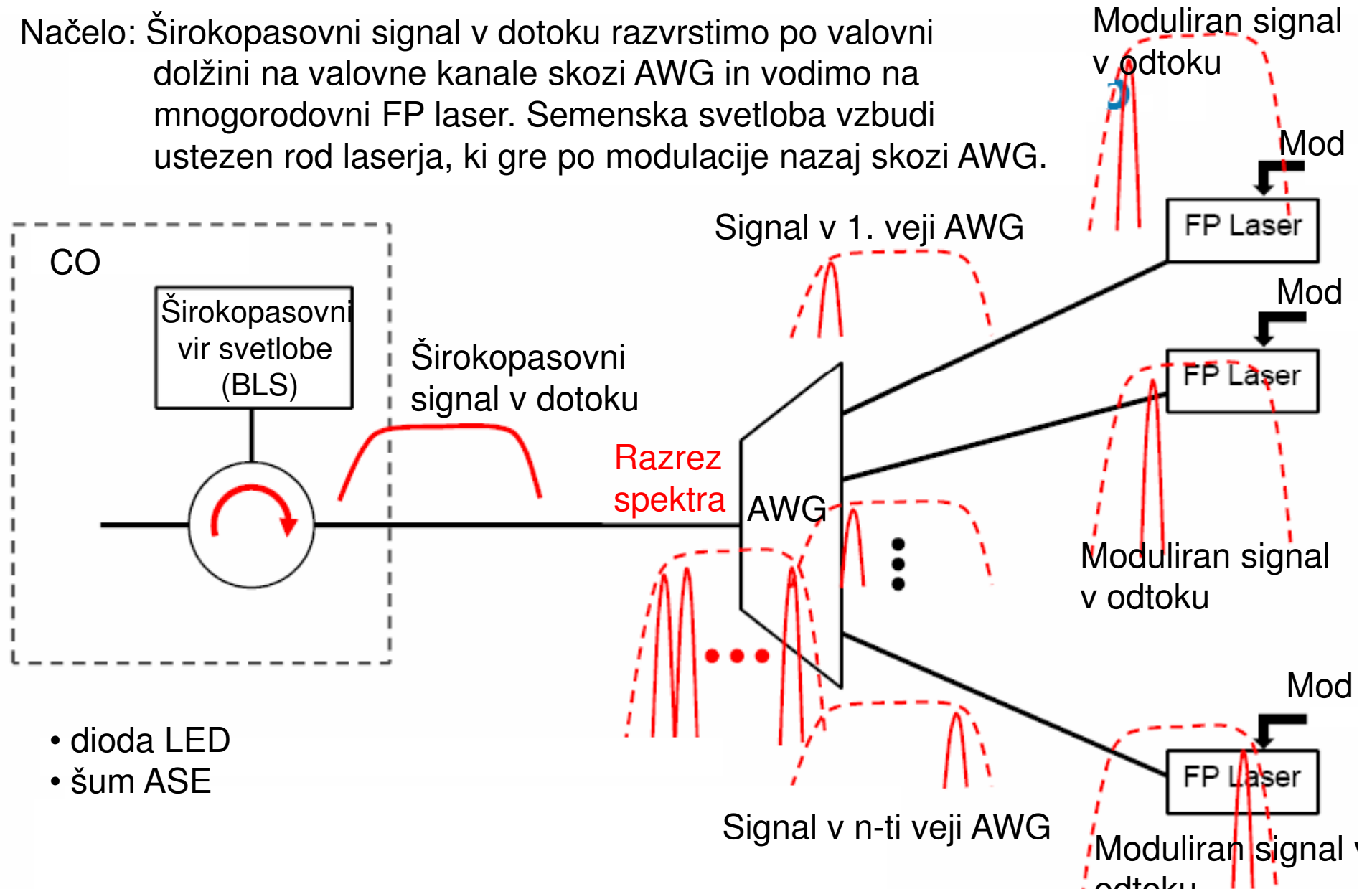
- Vir odtočnega signala v OLT
- ONU brezbarven in brez vira
- ONU: ojačenje, odboj in modulacija

- **CO (OLT):**
  - Centralizes the light generation and control
  - Stack of lasers serving TDM trees
  - Standard G/E-PON equipment adapted to SARDANA
  - WDM is used for wavelength routing at the central ring
  - DBA techniques for TDM trees.

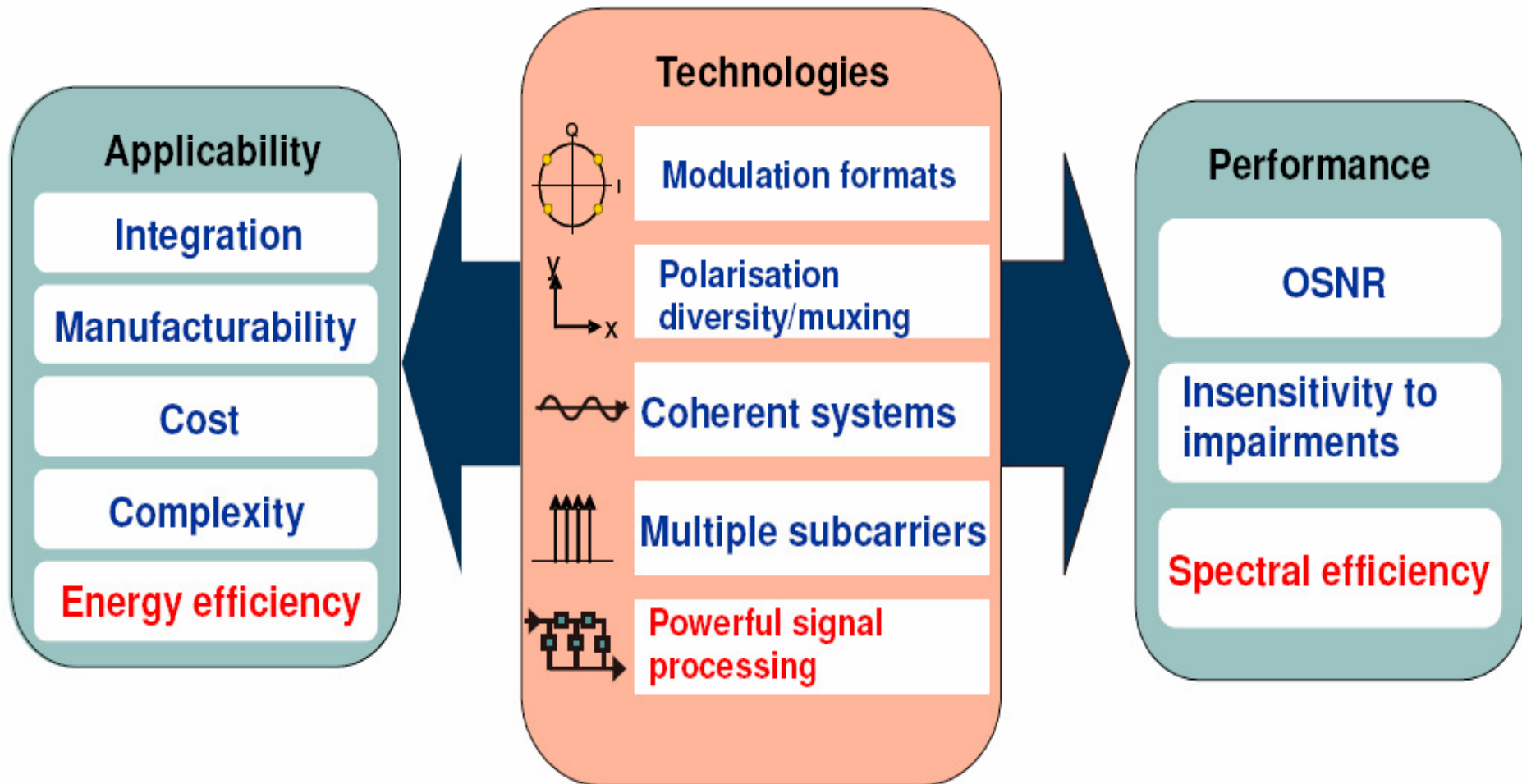
- **Simplest colourless ONU:**
  - In line with techno-economical guidelines
  - High speed RSOA of SOA+REAM for up-stream remodulation

# ASE vir za brezbarvni ONU

Načelo: Širokopasovni signal v dotoku razvrstimo po valovni dolžini na valovne kanale skozi AWG in vodimo na mnogorodovni FP laser. Semenska svetloba vzbudi ustezen rod laserja, ki gre po modulacije nazaj skozi AWG.



# Tehnologije in njihov vpliv



# Nove tehnologije v optičnem prenosu

1. Ortogonalni frekvenčno-delilni multipleks,  
mnogonosilniški prenos

**OFDM (multi-carrier transmission)**

2. Mnogovhodni-mnogoizhodni prenos

**MIMO (multiple input – multiple output)**

3. Koherentna detekcija

**CO (coherent)**

4. Digitalno procesiranje signala

**DSP (digital signal processing)**

**OFDM(A)**



# Radijski in optični OFDM

Podobnosti in razlike:

## 1. (RF) OFDM

Prenosna pot je linearen medij (prostor z razpršilnimi objekti). Prenosni kanal se lahko hitro spreminja (mobilnost, Doppler).

Širina kanala in bitna hitost manjši od 1 GHz oz. Gb/s.

## 2. (O) OFDM

2.1 Enorodovno vlakno (SMF). V vlaknu medsebojno učinkujeta nelinearnost in disperzija. Prenosni kanal se spreminja počasi zato je presih polja počasen.

2.2 Mnogorodovno vlakno (MMF). Vlakno je skoraj linearno, v njem interferira mnogo rodov, optični kanal je podoben radijskemu. Pojavlja se razmeroma počasen mnogostezni presih svetlobe.

Širina kanala znaša več 10GHz, bitna hitrost okoli 100 Gb/s

# Prednosti OFDM

1. Z OFDM odpravljamo posledice presiha s preprostim izravnavanem moči podnosilnikov.
2. OFDM ima visoko spektralno učinkovitost. Spekti kanalov so med sabo ortogonalni, zato se lahko delno prekrivajo (vrh spektra kanala sovpada z ničloma obeh sosednjih kanalov).
3. OFDM kanale generiramo in demoduliramo z Fourierjevo transformacijo (IFFT/FFT), zaradi tega je procesiranje signala preprosto.
4. OFDM je adaptiven prenos. Glede na pogoje širjenja v kanalu se bitna hitrost lahko spreminja.

# Možne posledice uvajanja OFDM

- Barvna disperzija (CD) in polarizacijska rodovna disperzija (PMD) sta doslej bili resni oviri pri prenosu širokopasovnih signalov nad 10Gb/s. Optična kompenzacija disperzije postaja neučinkovita. Veliko naporov je bilo vloženih v razvoj vlaken nizkega koeficienta CD in PMD.
- Spektri mnogonosilniškega prenosa so lahko neprimerno ožji, zato obe disperziji z OFDM izgubita na pomenu.
- Odpira se možnost, da bi lahko nova vlakna imela višjo vrednost koeficienta disperzije (nad današnjo vrednostjo 2 do 10 ps/km/nm). Disperzija v vlaknu je najpreprostejši način za zmanjševanje posledic nelinearnosti v vlaknu (lastna in prečna fazna modulacija, štirivalovno mešanje)

# Prednosti OFDM(A) 1/2

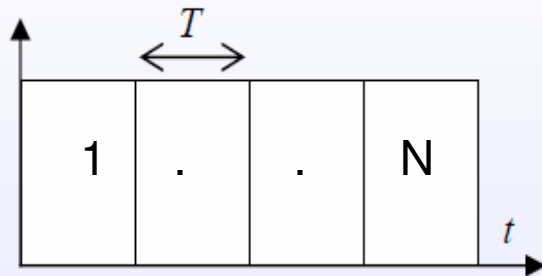
1. Deli podatkovni tok visoke bitne hitrosti na enem nosilniku v več podatkovnih tokov nizke bitne hitrosti na več podnosilnikih
2. V refleksnem prostoru zmanjšuje razpršitev časa zakasnitve impulzov in s tem preprečuje intersimbolno interferenco.
3. S prekrivajočimi ortogonalnimi podnosilniki izkorišča spekter do skrajne možnosti. Ima visok spektralni izkoristek
4. Je odporen na motnje
5. Zaradi ožjega spektra podnosilnikov bistveno povečuje odpornost na disperzijo
6. Je primeren za večnivojske vektorske modulacijske formate

# Prednosti OFDM(A) 2/2

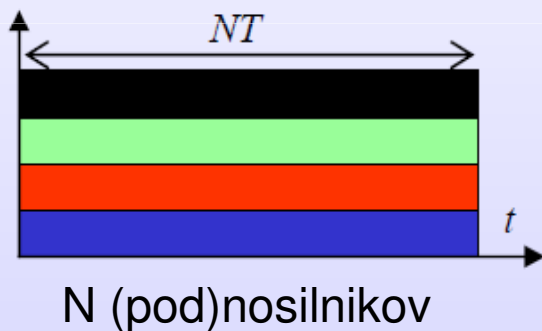
1. OFDM deli **hiter** podatkovni tok visoke bitne hitrosti na enem nosilniku v več **počasnih** podatkovnih tokov nizke bitne hitrosti na več ali mnogo podnosilnikih (mnogonosilniški prenos).
2. V refleksnem ambientu zmanjšuje **razpršitev časa** **zakasnitve** impulzov in s tem preprečuje intersimbolno interferenco.
3. S prekrivajočimi se ortogonalnimi podnosilniki izkorišča spekter do skrajnih možnosti. Ima visok **spektralni izkoristek**
4. Je odporen na motnje
5. Zaradi ožjega spektra podnosilnikov bistveno povečuje odpornost na disperzijo
6. Je primeren za večnivojske vektorske modulacijske formate

# Princip OFDM

TDM:

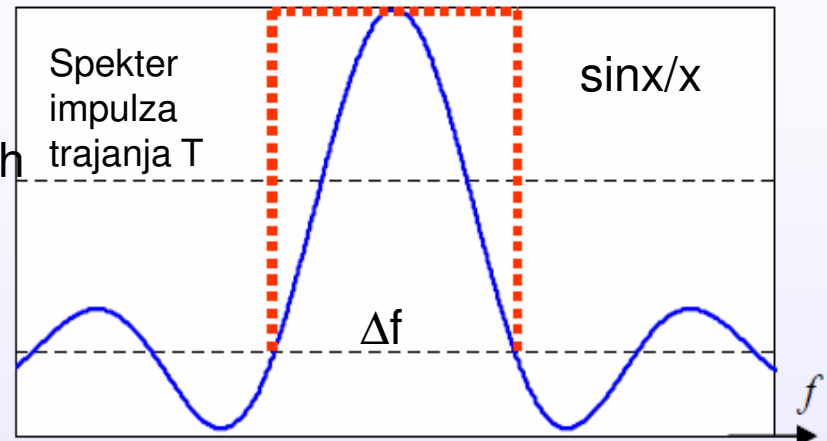


OFDM:



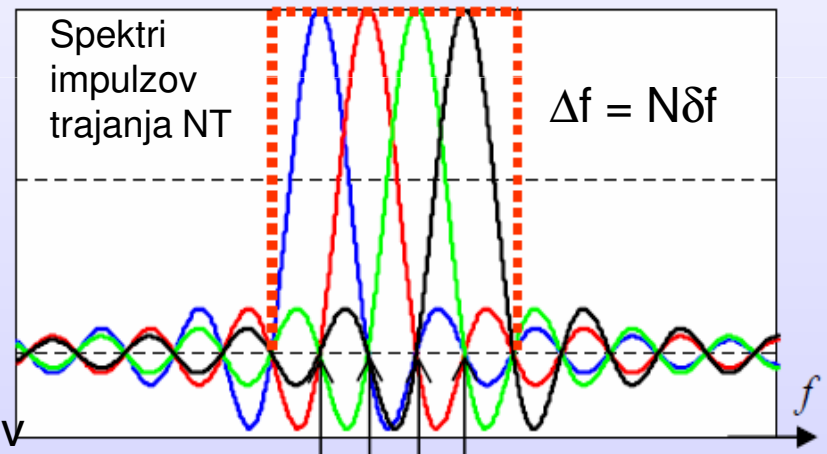
Enonosilniški:

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



Mnogonosilniški:

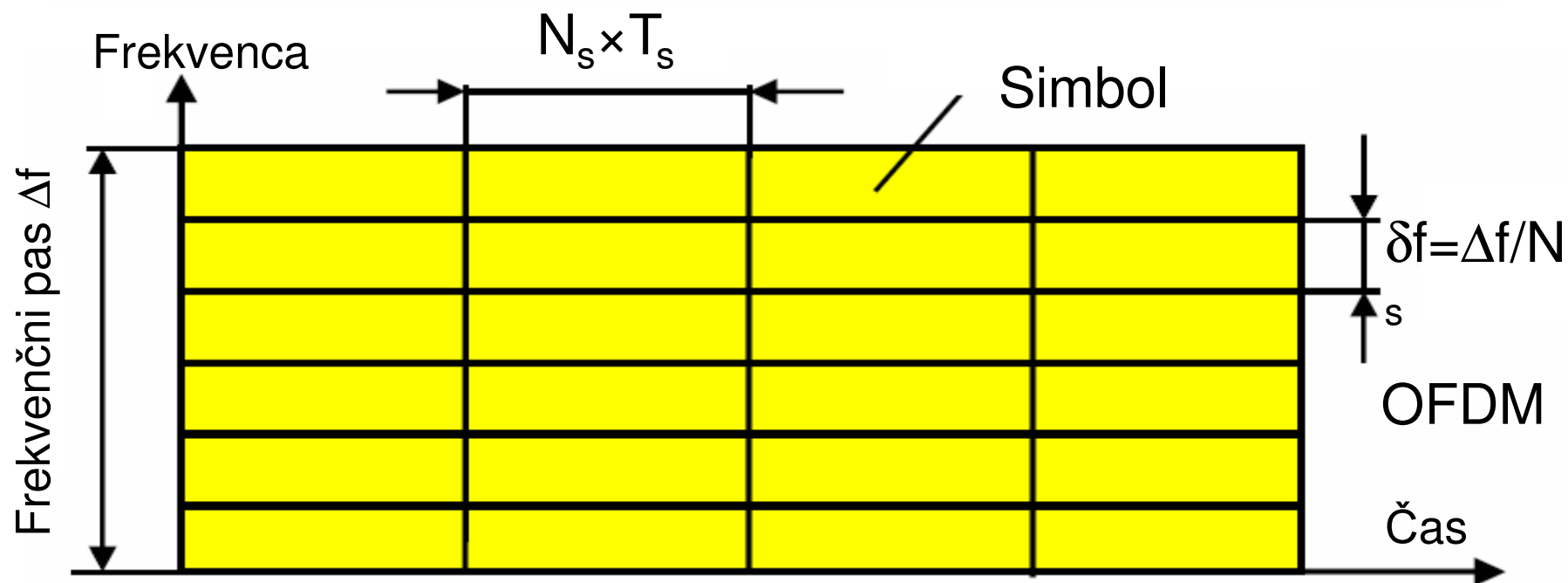
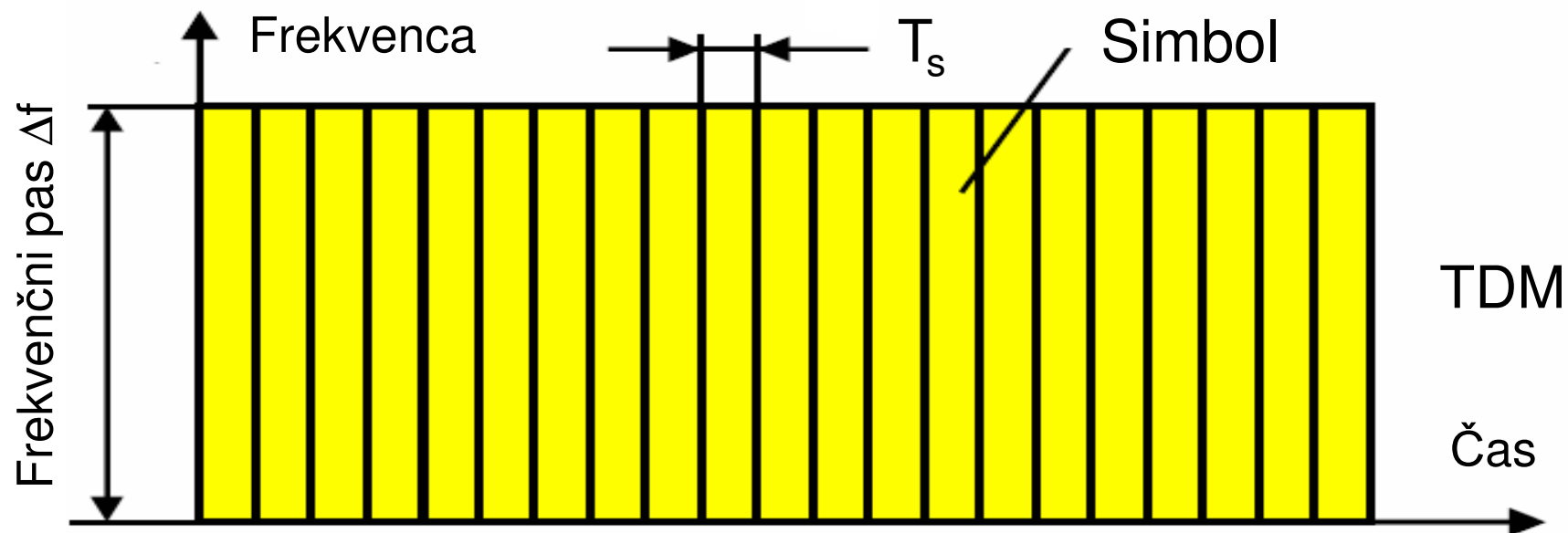
- N istočasni frekvenčno razvrščenih bitov
- ozki spektri  $\delta f = \Delta f/N$  impulzov dolgega trajanja  $NT$
- ortogonalnost spektrov



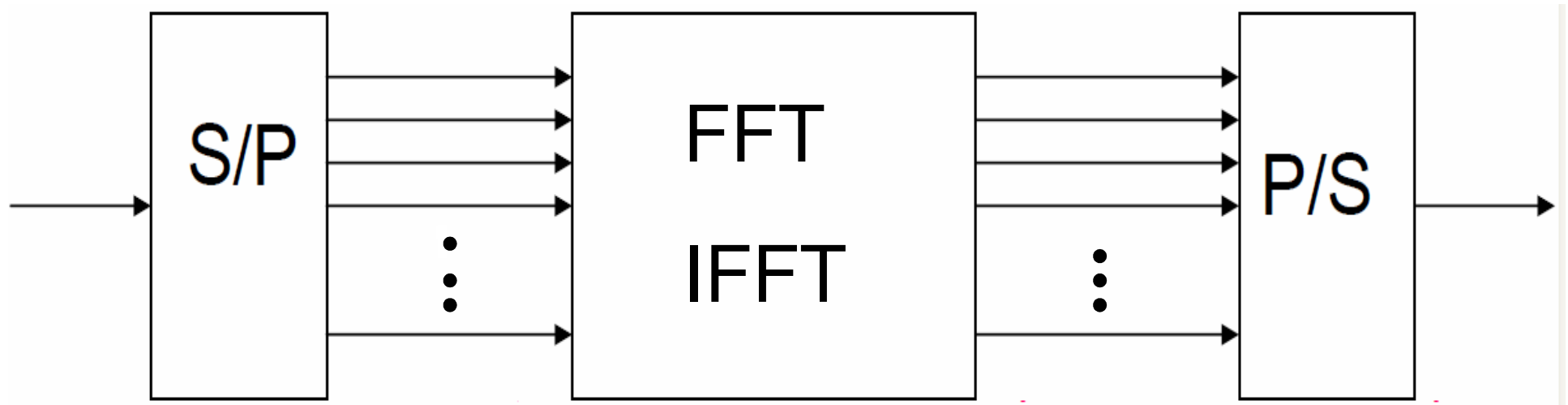
**Prednosti OFDM:**

- 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



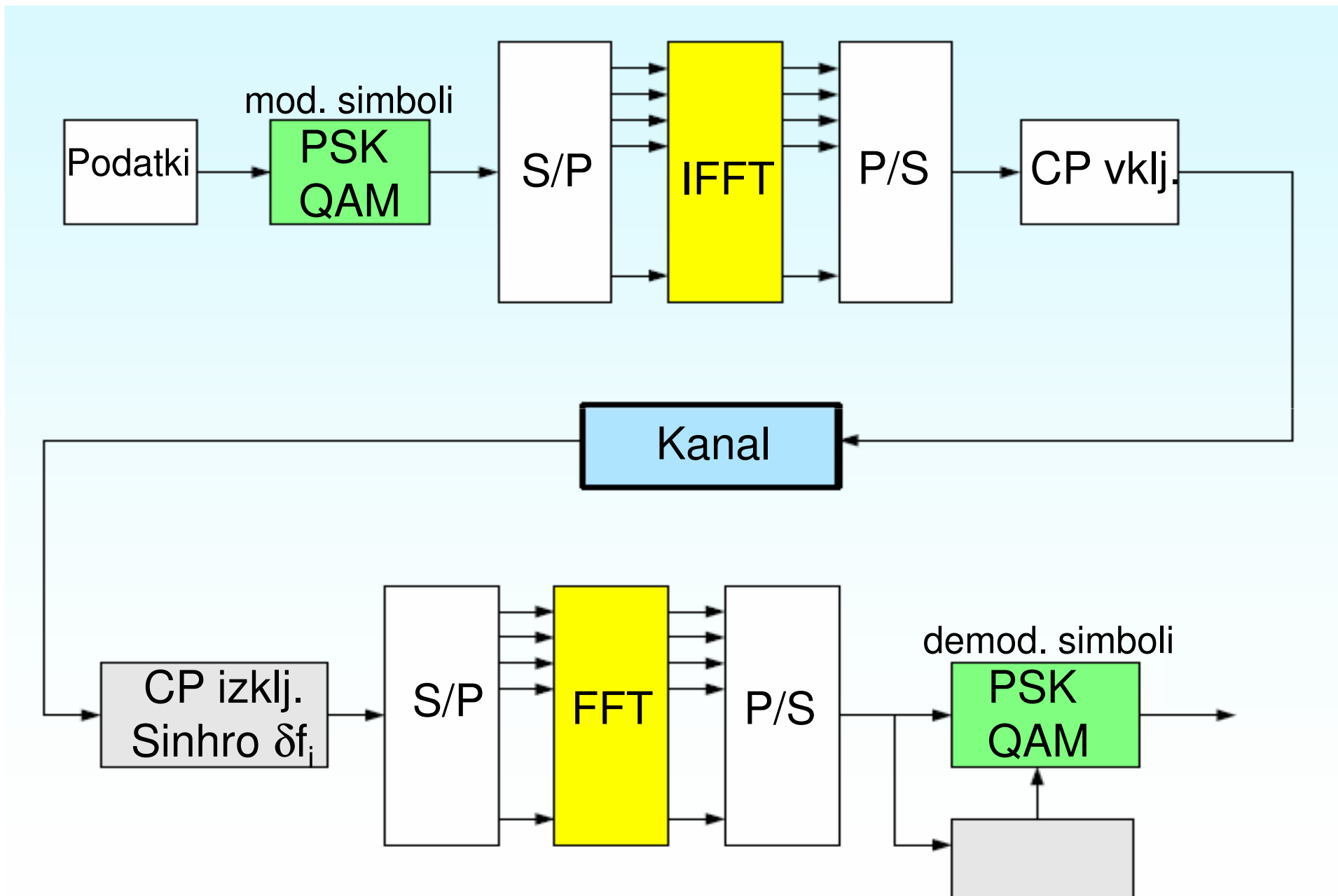
# Osnovne operacije digitalne OFDM



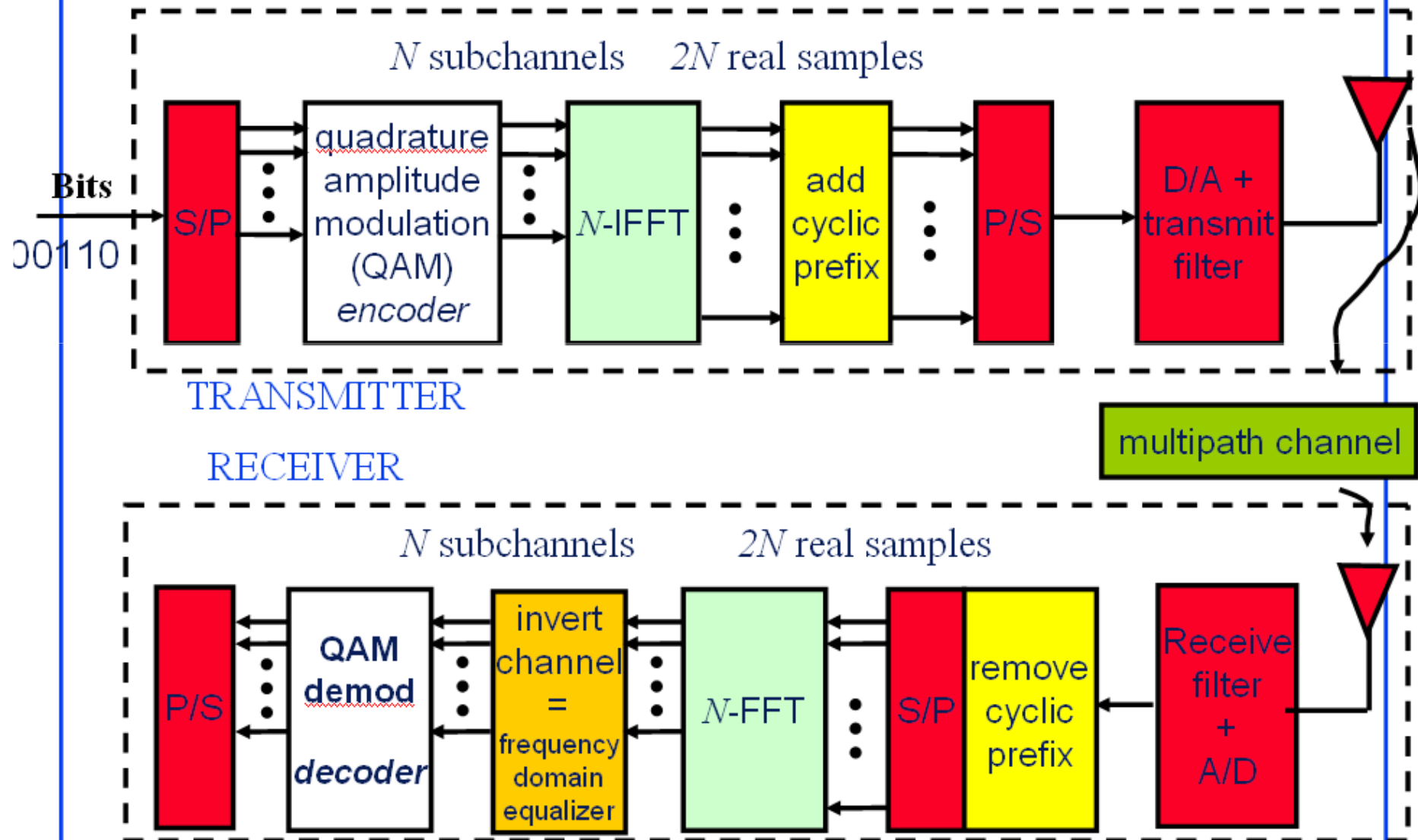
- S/P      zaporedni niz simbolov se pretvori v vzporednega
- FFT      hitra Fourierjeva transformacija, pretvorba signala v spekter, demodulacija
- IFFT      inverzna Fourierjeva transformacija, pretvorba spektra v signal, modulacija
- P/S      vzporedni niz simbolov se pretvori v zaporednega



# OFDM z digitalnim procesiranjem



# Summary: An OFDM Modem



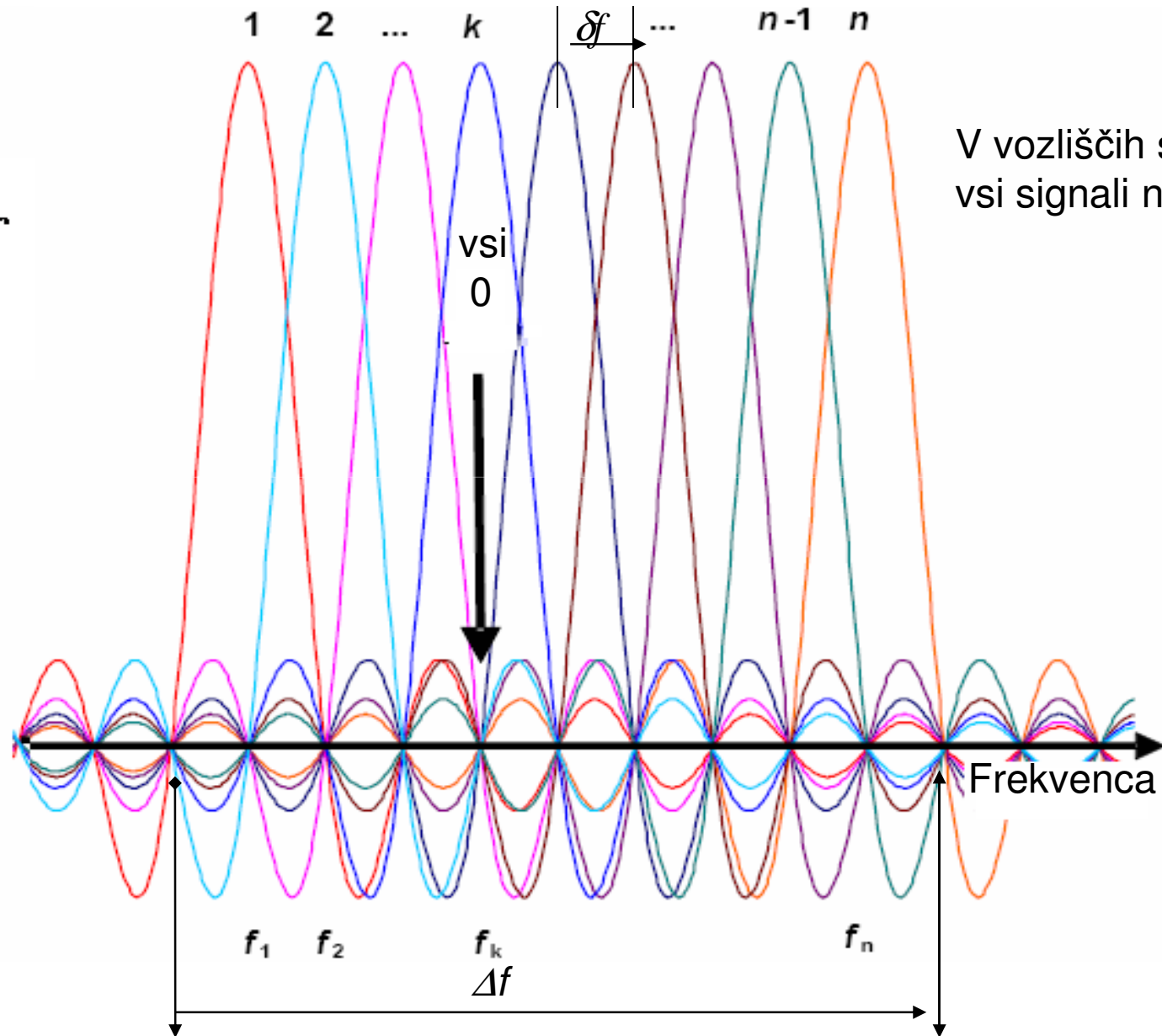
# Spekter ortogonalnih nosilnikov OFDM

$$\frac{1}{T_s} = \delta f$$

$T_s$  trajanje simbola

$\delta f$  širina spektra (pod)kanala

$n$  kanalov



# Področja uporabe OFDM

1. Wide area networks: Ultra high-speed next generation 100 Gb/s and 1 Tb/s Transport using CO-OFDM

*U. of Melbourne [20], KDDI [21], NTT [24], Alcatel-Lucent [25]*

2. Metro area networks: High-speed (>10 Gb/s above) using DDO-OFDM

*Monash University [11], Bangor University [28], U. of Southern California/National Chiao Tung U., Taiwan [17-18]*

3. Local area networks: Multi-access in Local Area Networks

*NEC with DDO-OFDM [29], U. of Melbourne with CO-OFDM [30].*

4. Home area networks or high-speed Interconnect, or Optical discrete multitone (DMT)

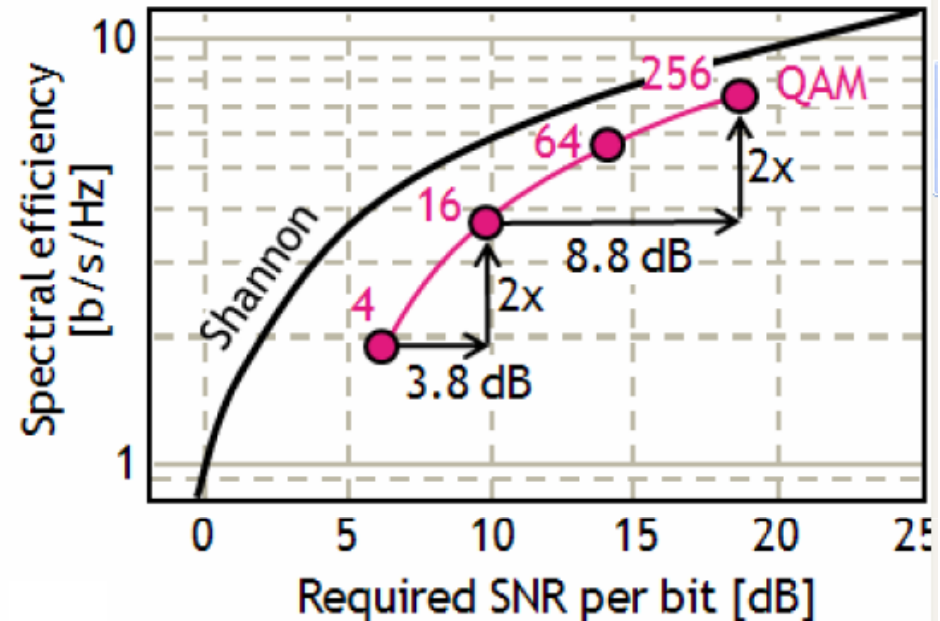
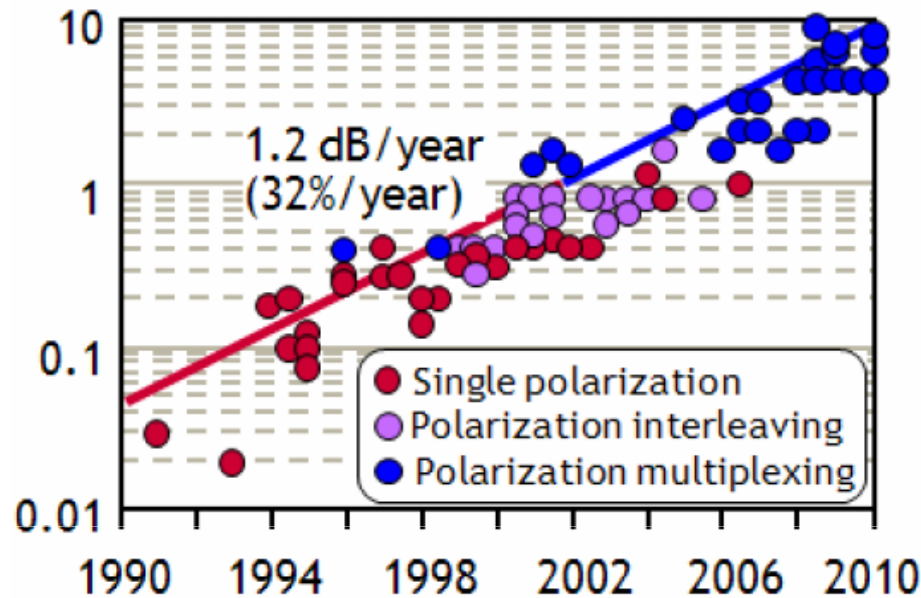
*Tech. U. of Eindhoven/Siemens [31], Bangor University [10]*

5. Free-space optical communications

*NEC [32]*

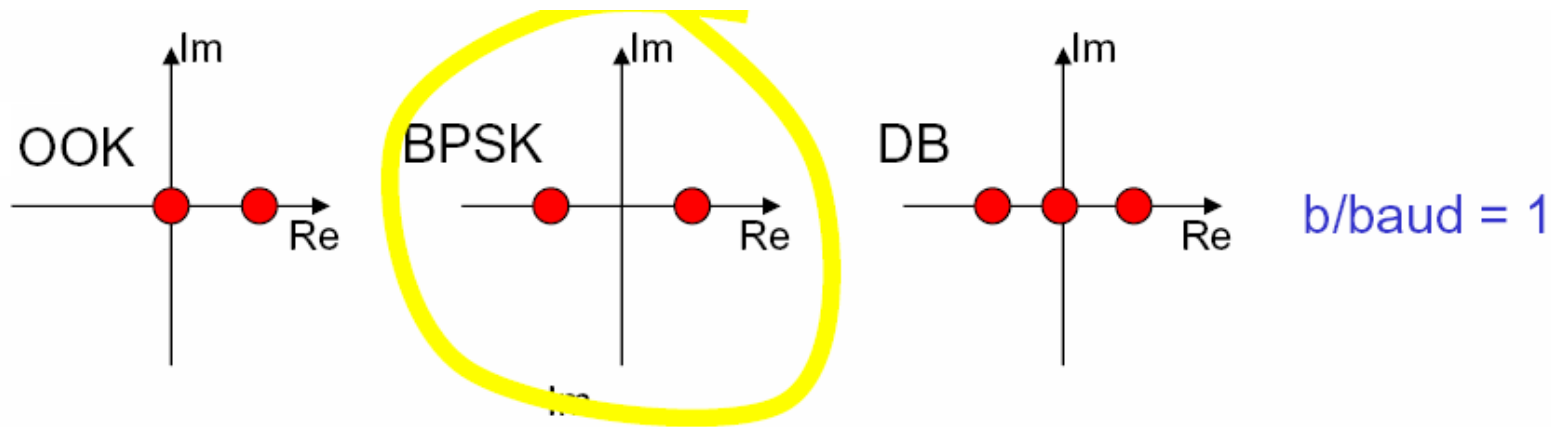
# Modulacijski formati

# Spektralni izkoristek

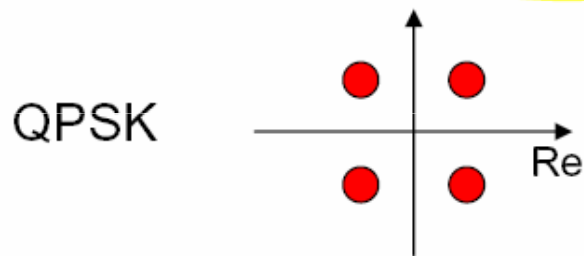


- Rast spektralnega izkoristka v 29- letnem obdobju na področju raziskav je znašala 1,2 dB/leto
- Zahtevnejši modulacijski formati potrebujejo višji S/N, npr. za dvakratno povečanje spektralnega izkoristka pri prehodu s 4 QAM na 16 QAM se S/N mora zvišati za 3,8 dB, pri prehodu s 16 QAM na 256 QAM se S/N mora zvišati za 8,8 dB.
- Mejna vrednost spektralnega izkoristka PDM za 1000 km zvezo je 16 b/s/Hz (nizka nelinearnost, Ramanovo ojačevanje, FEC)

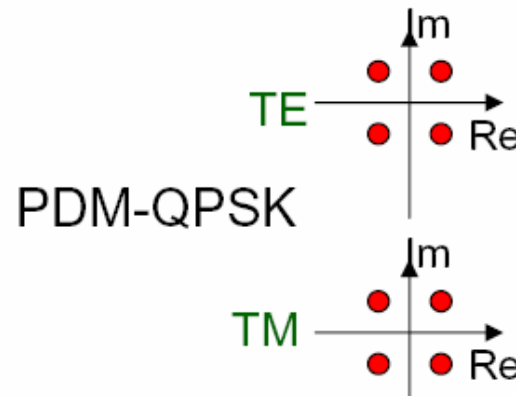
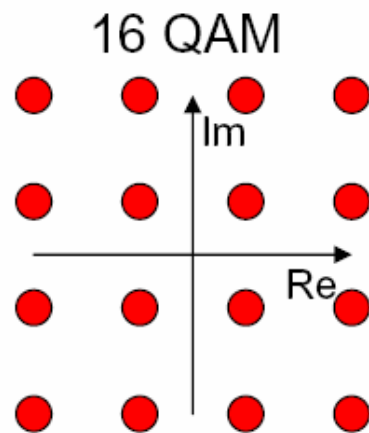
# Modulacijski formati nižjega reda



b/ baud = 1



b/ baud = 2



b/ baud = 4

OOK = on-off keying  
BPSK = binary phase-shift keying  
DB = duobinary  
QPSK = quadrature phase-shift keying  
QAM = quadrature amplitude modulation  
PDM = polarization-division multiplexed

# Več- in mnogonivojska modulacija

- Konstelacijski (vektorski) diagram

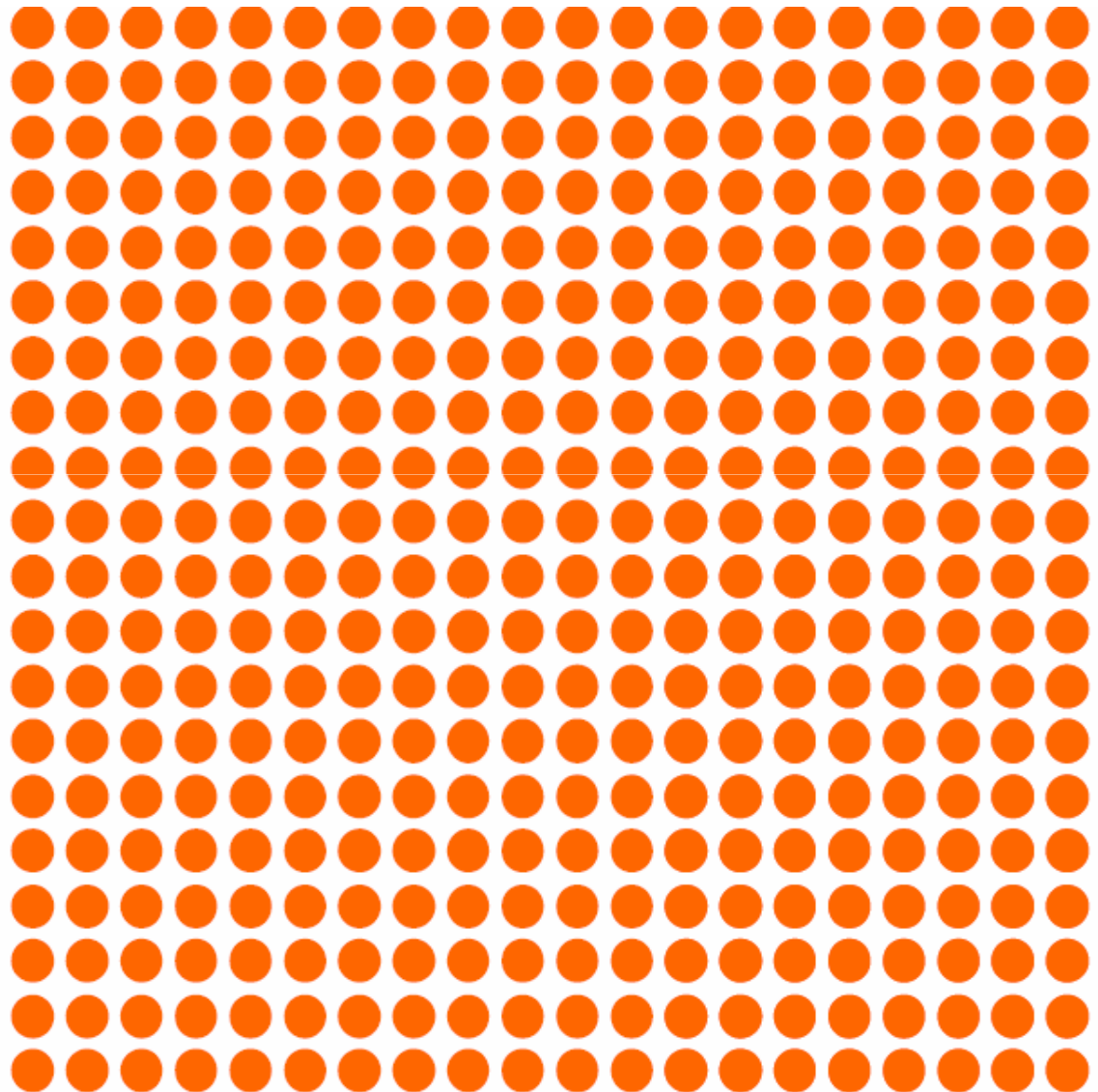
QPSK

2 bit/symbol



e.g. 1024-QAM

10 bit/symbol





**MIMO**

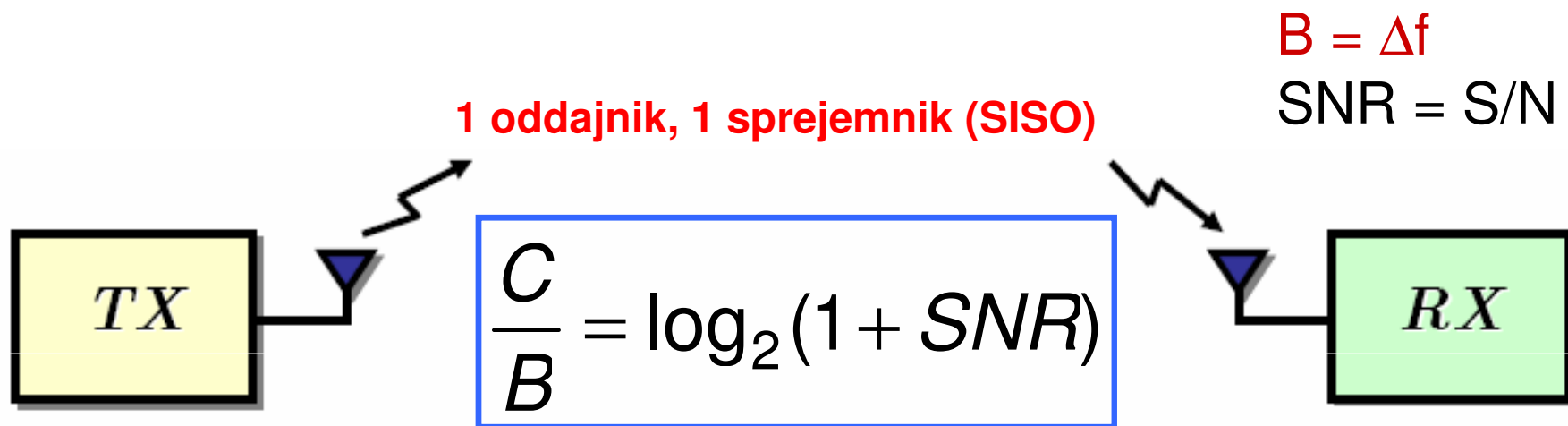
# MIMO

Ortogonalni rodovi širjenja omogočajo prenos pomnožene količine informacije v enakem spektru. Višanje spektralnega izkoristka.

- **Mnogorodovni MM-MIMO** v mnogorodovnem vlaknu
- **Polarizacijski Pol-MIMO** z ortogonalnima polarizacijama

# Shannonova kapaciteta kanala

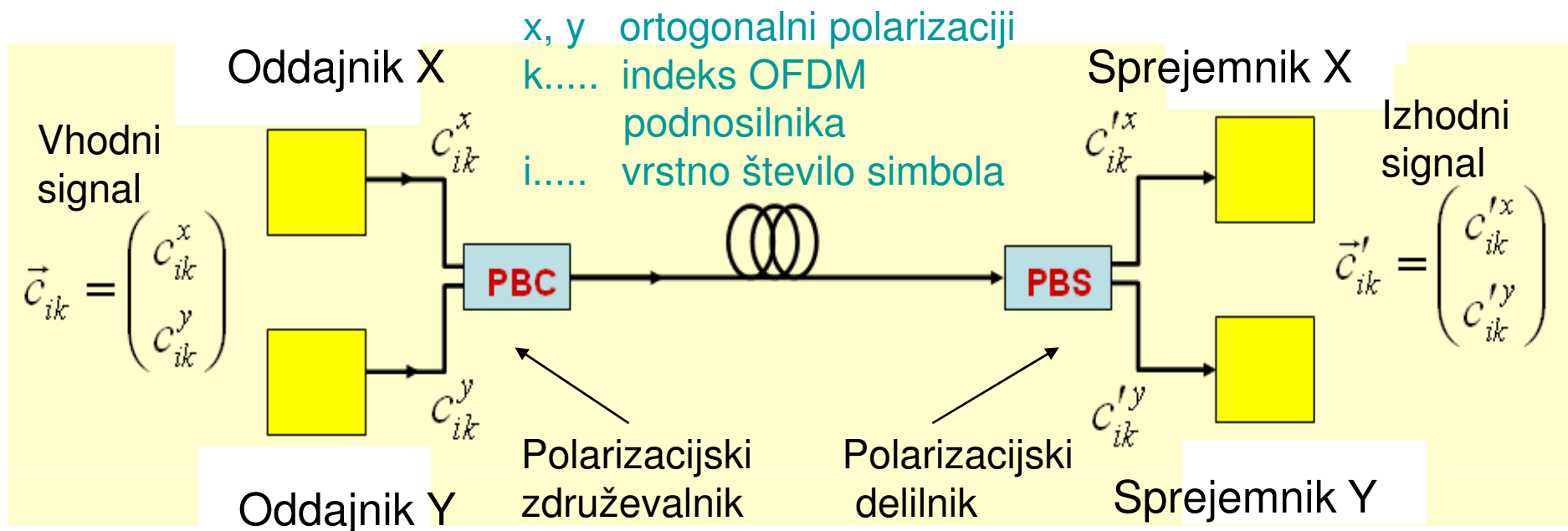
Shannonova kapaciteta kanala z belim Gaussovim šumom (AWGN) podaja mejno vrednost bitnega pretoka, ki se ji lahko približamo s primerno modulacijo:



- Povišanje razmerja S/N za 10 krat (10 dB) prinaša povišanje spektralnega izkoristka kanala C/B (kapaciteta na Hz) za približno 3 b/s/Hz.
- Povišanje razmerja S/N za 1000 krat (30 dB) prinaša povišanje spektralnega izkoristka kanala C za približno 10 b/s/Hz.
- Za vsak dodaten bit/s/Hz moramo razmerje S/N približno podvojiti (3 dB).

**Večanje C z S/N je neučinkovito. MIMO je dobro nadomestilo.**

# OFDM - MIMO polarizacijski multipleks



Izhodni signal in šum

$$\vec{c}'_{ki} = H_k \vec{c}_{ki} + \vec{n}_{ki}^p$$

Polarizacijskaprenosna matrika k-tega podnosilnika

$$H_k = \begin{pmatrix} h_{11}^k & h_{12}^k \\ h_{21}^k & h_{22}^k \end{pmatrix} \quad \text{Matriko ocenimo s pilotskimi signali}$$

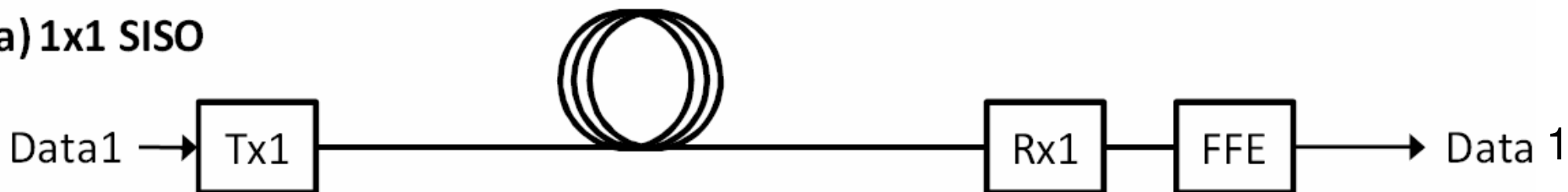
Ocenitev vhodnega signala

$$\hat{c}_{ki} = H_k^{-1} \cdot c'_{ki}$$

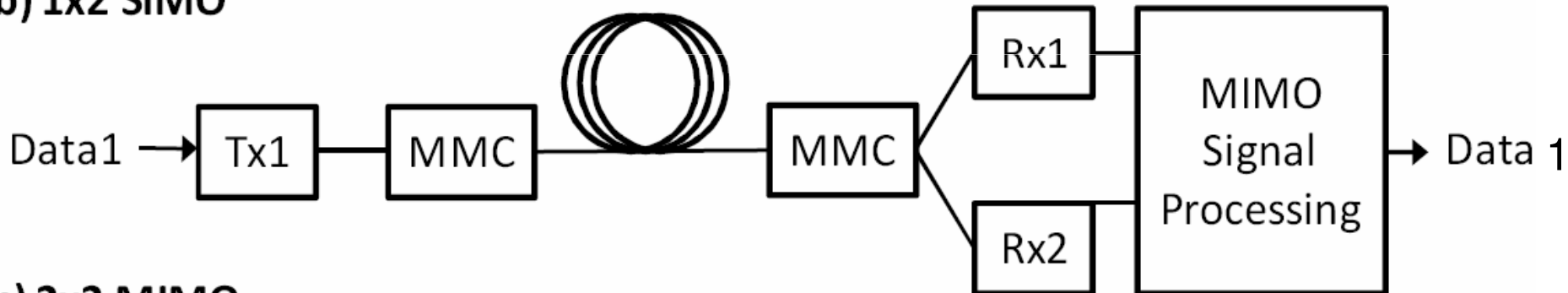
# MIMO 2x2

- Sklopitev dveh podatkovnih kanalov z MM vlaknom
- Prenos po dveh ortogonalnih rodovih
- Ločen sprejem kanalov s sprejemnikoma na izhodu iz vlakna

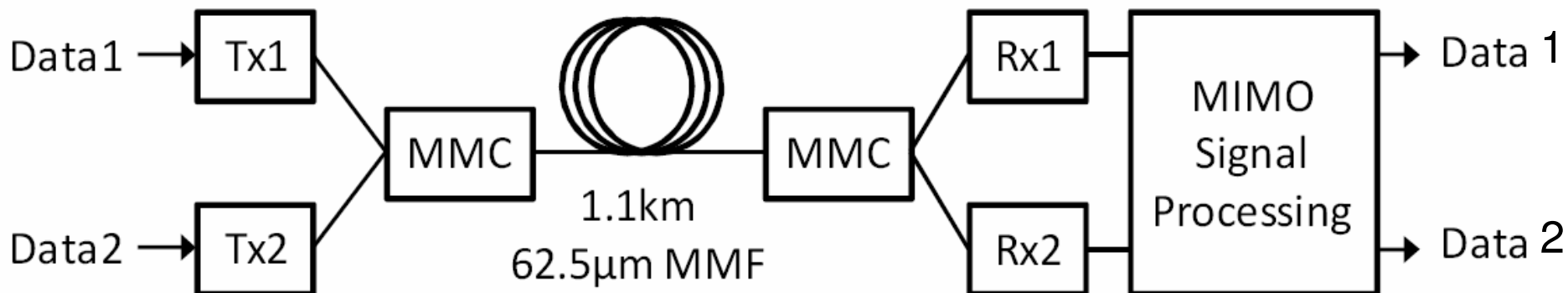
(a) 1x1 SISO



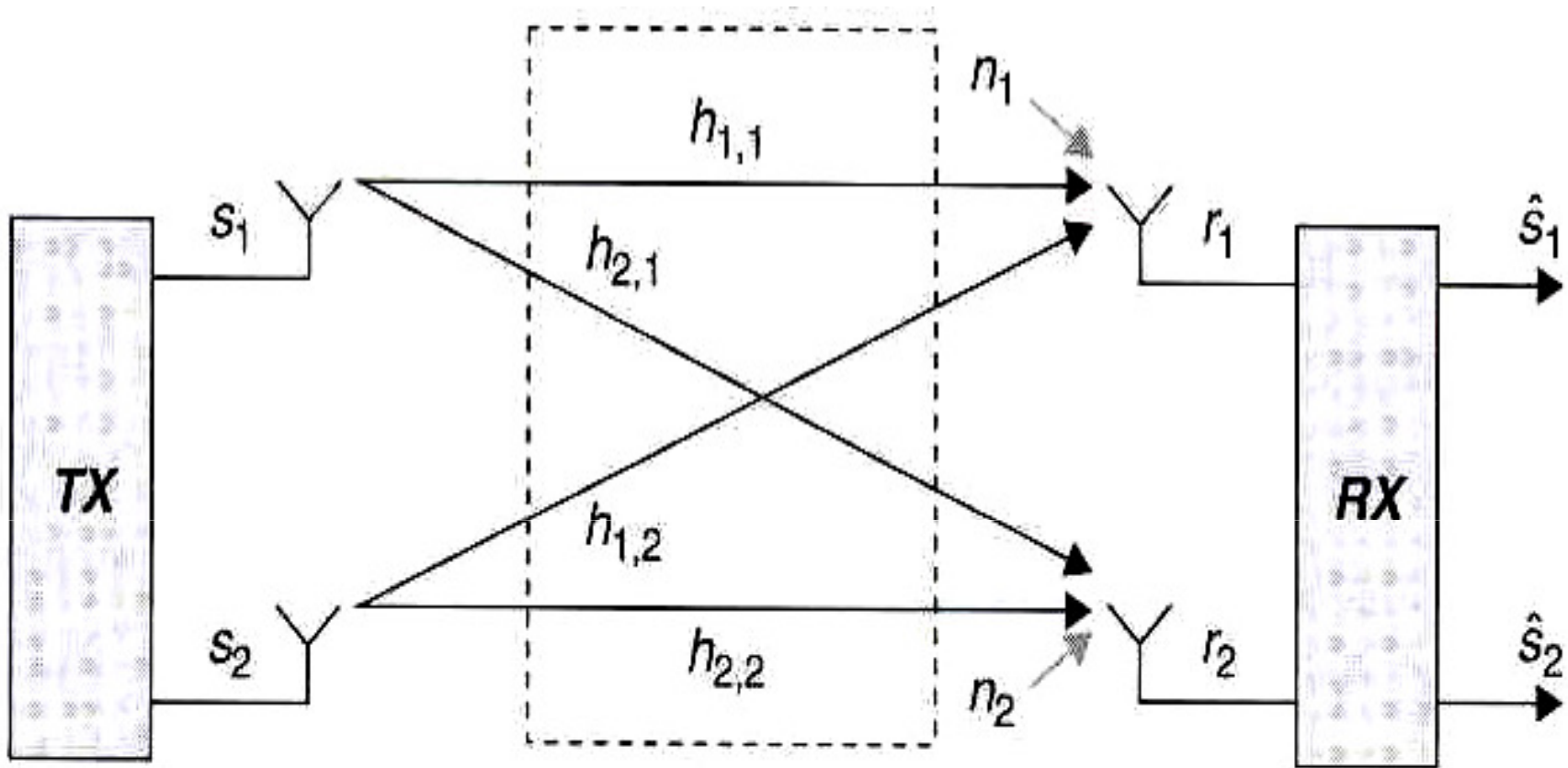
(b) 1x2 SIMO



(c) 2x2 MIMO



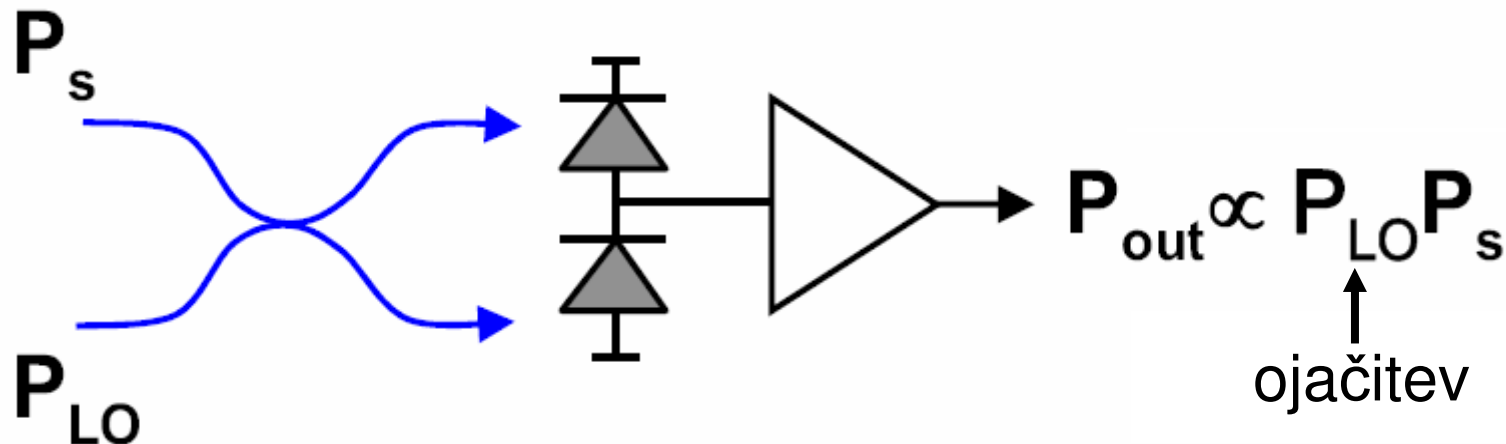
# Model 2x2 MIMO



$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$$

# Koherentna detekcija

# Koherentni sprejem – linearna detekcija



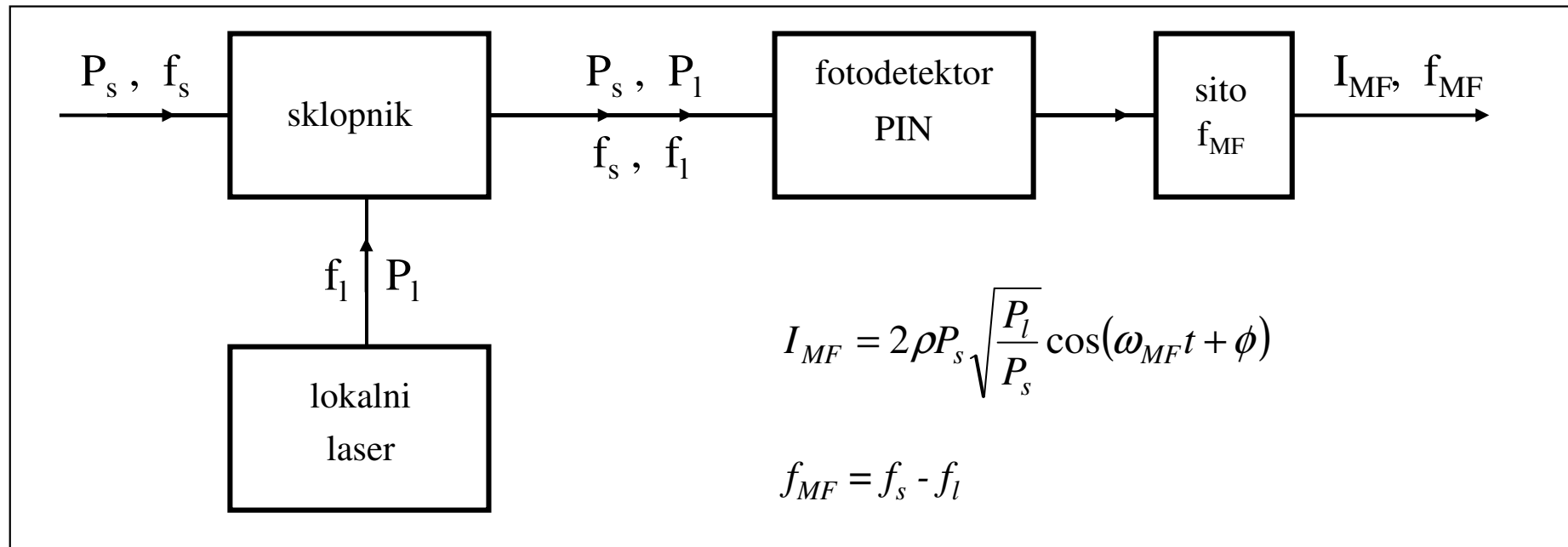
Koherentni sprejem: mešanje sprejemanega signala in signala lokalnega oscilatorja v medfrekvenco ali **osnovni pas**

- Izhodni signal v medfrekvenci ali v osnovnem pasu je sorazmeren moči lokalnega oscilatorja; moč lokalnega oscilatorja deluje kot ojačevalni faktor, ki poviša **občutljivost sistema** (5-6 dB).
- Selektivnost sprejema, ki jo dosegamo v osnovnem pasu (ali v medfrekvenci) je zelo velika in presega **selektivnost ultra goste WDM**. Koherentni sprejemnik deluje kot oster filter.
- Disperzijo, ki je linearen pojav, kompenziramo z elektronskim procesiranjem (DSP). V povezavi z OFDM je optična zveza imuna na **barvno (CD) in polarizacijsko rodovno (PMD) disperzijo**. Dosedanji načini kompenzacije disperzije bodo zastareli.
- Nelinearnost vlakna, ki znižuje Shannonovo mejno kapaciteto kanala, je mogoče ublažiti z višjo vrednostjo disperzije vlakna, ki jo DSP dopušča.



# Ojačenje pri koherentnem sprejemu

Mešanje dveh optičnih signalov na fotodetektorju

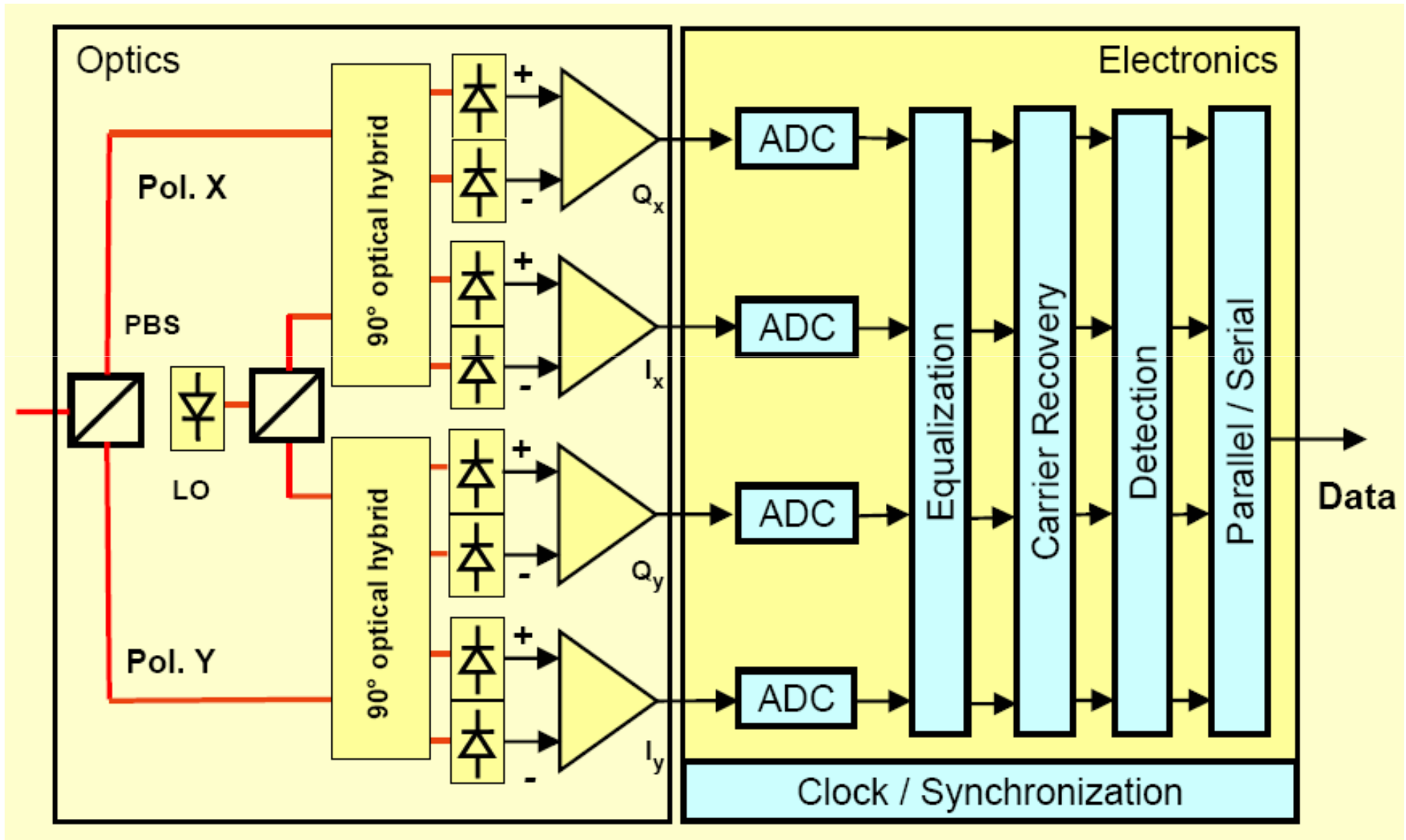


- **občutljivost**, ojačenje za faktor  $2\rho\sqrt{P_l/P_s}$
- **selektivnost**,  $f_{MF} = f_s - f_l$ , frekvenca v radijskem področju

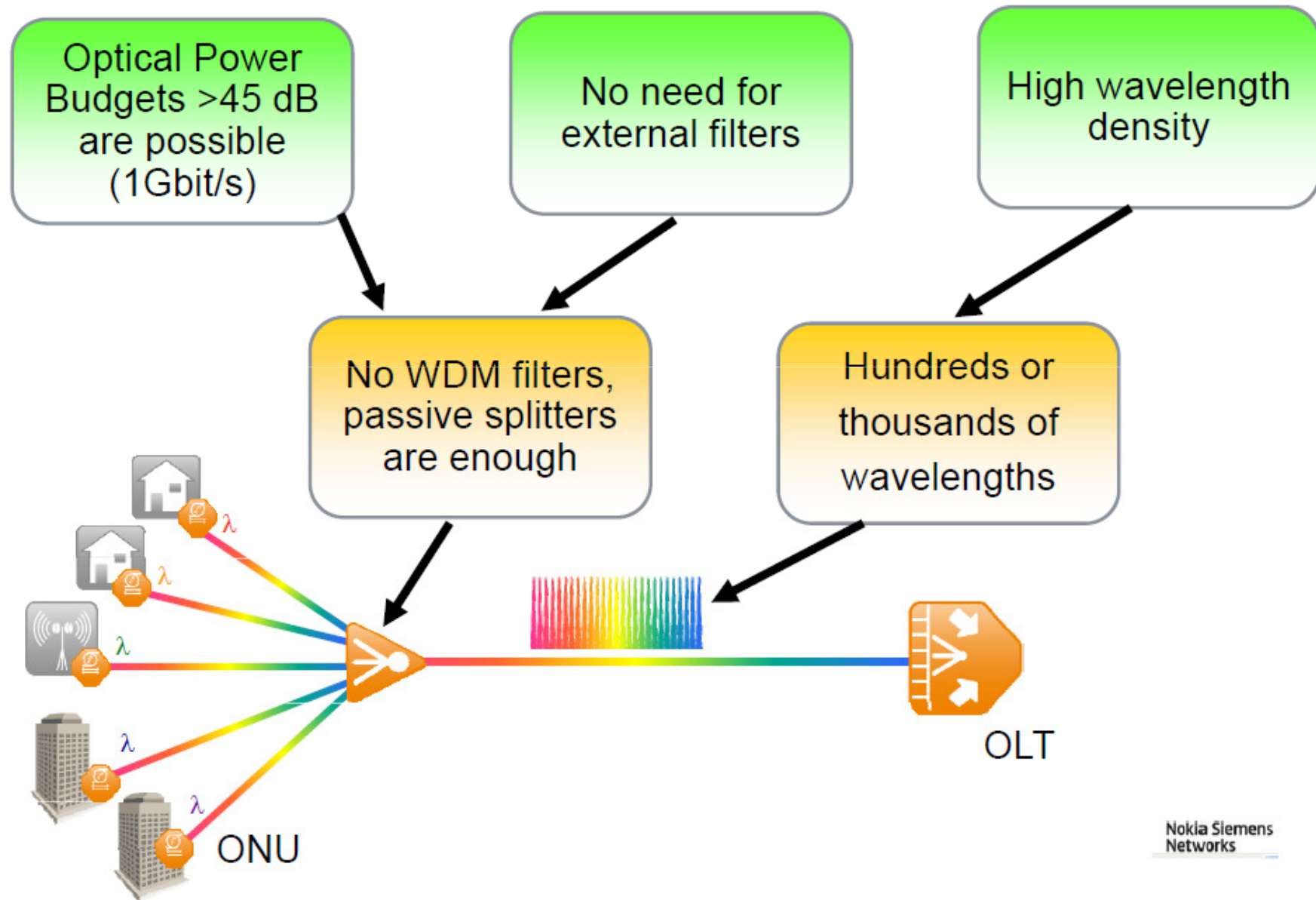
**Pogoj delovanja:** visoka koherenca in stabilnost frekvence lokalnega oscilatorja. Optična fazno uklenjena zanka ni uresničljiva. Šele napredek v hitrem digitalnem procesiranju je prinesel nove možnosti koherentnega sprejema v sedanjem času.

# Koherentni dvopolarizacijski QPSK sprejem

- Polarizacijski diversiti, polarizacijski multipleks



# Selektivnost CO – najgostejši DWDM



# CO, razmerje signal/šum na kvantni meji

**Kvantni šum signala lokalnega oscilatorja**

hf: energija fotona,  
 $\bar{n}_b$ : povprečno število fotonov na bit,  
R:  $\eta e \lambda / hc$  odzivnost fotodiode

Razmerje S/N za primer neojačevane zveze

$$S/N = \frac{\overline{|I(t)|^2}}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$= \frac{2R^2 P_s P_{LO}}{2eRP_{LO}B + 4kTB/R_d}$$

$$\xrightarrow{P_{LO} \rightarrow \infty} \frac{\eta P_s}{hfB} = \eta \bar{n}_b$$

**Termični šum**

B: širina MF ali osnovnega pasu,  
kT: termična energija,  
 $R_d$ : upornost bremena  
 $\eta$ : kvantni izkoristek

Optimalni sprejem **na kvantni meji** pri zadostni moči lokalnega oscilatorja oz. pri prevladujočem kvantnem šumu lokalnega oscilatorja. Homodinski sprejem je za 3 dB občutljivejši od heterodinskega sprejema.

**V praksi se pričakuje 3-5 dB izboljšanje občutljivosti.**

**KONEC**