Plan wykładu

1. Komunikacja wykorzystywana obecnie
2. Skąd wziąć sygnał 100 Gb/s?
3. Co da się modulować a taką szybkością?
4. Multiplexy/przesyłanie rodzaje modulacji
5. Standardy 40GbE, 100GbE i 200-400GbE

Systemy multi – Gb/s – troche historii

lokalne (SB) – metro – sektorlokalne (LH)

1. Systemy 10Gb/s
   Modulacje:
   - bezpośrednia NRZ (głównie 1310 nm)
   - sensoryczna NRZ i RZ (głównie 1550 nm)
   - dualbinarna
   Kompensacja CD - DCF
2. Systemy 40Gb/s (110 notatnej) np Ewopfending, 2010)
   Modulacja sensoryczna RZ, DPSK
3. Czerwiec 2010 - dokument IEEE 802.3ba Ethernet 40/100 Gb
4. ~2011 - Optical Internetworking Forum 1000 Long Haul DWDM
5. ITU 6013 - repeaterzcia standardu G.709 OTS poczęgi 430Gb (112-120 Gb/s)
6. Czerwiec 2015 - OIF 200/400G
7. Grudzień 2017 - dokument IEEE802.3bs Ethernet 200/400Gb

Pożądane cechy systemów >100Gb/s

1. Niskie koszty instalacji i eksploatacji
2. Możliwość przesyłania sygnałów z różnych szybkościach
3. Instalacja w istniejącej infrastrukturze światłowodowej
4. Efektywność pasmowa
5. Wykorzystanie pojedynczego włókna i długości fali

Problemy do pokonania

1. Dyspersja chromatyczna (CD)
2. Dyspersja polaryzacyjna (PMD)
3. Optoniczne pasmo sygnaru (filtry DWDM w istniejących sieciach, ROADM)

Co można modulować 40Gb/s?

1. ~Laser DFB bezpośrednio – miąotanie... (1310 nm)
2. Modulatory RZ LiNbO3 (Ćwrzęp)
   LN05S – 430Gb/s RZ/NRZ
   MACH-40/027/066 - 430Gb/s, modulacja fazy
   MACH-40/086 – 2 x 200Gb/s, QAM/QPSK
   (~4000 euro z Thorlabs.de)

3. Modulatory EA

Co można modulować 100Gb/s?

Prosto nie ... modulatory $LiNbO_3$ o szybkości > 100Gb/s są optyczne w publikacjach, ale handlowo niedostępne!

Laser „mode-locked"...

Skąd wziąć sygnały 40/100Gb/s?

40Gb/s

- multiplexacja elektryczna

Mirdza Ajis BCMEX 1 "Multiplexer and 1:4 Demultiplexer for Serial Communication Systems" on Magnetic Tape, Mirdza Ajis, IEEE, 1:10 MC-1(6), 1978, 17 Nov 12, DOI:10.1109/IEMC.1981.7226.

- multiplexacja WDM

100Gb/s i wiązej

- multiplexacja WDM
- multiplexacja polaryzacyjna
- modulacja wielowartościowa

Modulacje wielowartościowe *(kwadraturowa)*

1. BPSK/DBPSK

2. QPSK/DQPSK

3. Modulacje 16-poziomowe

Modulator Mach-Zehnder'a (M-Z)

$$E_{out} = E_{in} \qquad \Theta_1(t) = \frac{\pi}{2}\frac{V_1(t)}{V_\pi} \qquad \Theta_2(t) = \frac{\pi}{2}\frac{V_2(t)}{V_\pi}$$

$$E_{out} = E_{in}\cos\left(\frac{\Theta_1(t) - \Theta_2(t)}{2}\right) \qquad \Theta_1(t) = -\Theta_2(t)$$

$$E_{out} = E_{in}\cos\left(\frac{\Theta_1(t)}{2}\right)$$

$$\Theta_1 = 2\pi/V_\pi\, x_1 \qquad \Theta_2(t) = \frac{\pi}{2}\frac{V_2(t)}{V_\pi}$$

$$x_1(t) = x_0 + x_1(t)$$

$$x_2(t) = x_0 - x_1(t)$$

Modulacja kwadraturowa

Interferometr modulatori Mach-Zehnder

Modulacja kwadraturowa

Modulator MZM jako modulator, Cartesian modulator

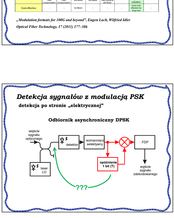
Modulacja kwadraturowa

Porównanie modulacji wielowartościowych

	100 NRZ	dualbinarna 40 Gb/s	DPSK 40 Gb/s	DQPSK 40 Gb/s
zasięg	1	0.4	0.8	0.65
tolerancja CD [ps/nm]	>500	>90	>90	>200
tolerancja PMD [ps]	15	3.5	3.5	8
z fibrów 50GHz	>16	3-5	3-5	8
z fibrów 100GHz	>16	8	8	>12

Porównanie modulacji wielowartościowych

Modulacja	OOK	OOK+CSRZ	DQPSK	DP-QPSK	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-64QAM
Szybkość [Gb/s]	10	10	40	100	400	500	600
Pasmo [GHz]	10	10	20	25	50	62.5	75
Widmowa efektywność [b/s/Hz]	1	1	2	4	8	8	8
Modulator(y)	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder	Mach-Zehnder
Detektor(y)	Fotodioda	Fotodioda	Balansowa fotodioda	Balansowa fotodioda	Balansowa fotodioda	Balansowa fotodioda	Balansowa fotodioda
Podstawowe komponenty	Laser, modulator, fotodioda	Laser, modulator, fotodioda	Laser, modulator, fotodioda, interferometr	Laser, modulator, fotodioda, interferometr	Laser, modulator, fotodioda, interferometr	Laser, modulator, fotodioda, interferometr	Laser, modulator, fotodioda, interferometr
Tolerancja na CD [ps/nm]	500	90	90	200	50	40	30
Tolerancja na PMD [ps]	15	3.5	3.5	8	2	1.6	1.2
Tolerancja na szum [dB]	16	8	8	12	20	22	24
Tolerancja na nieliniowości	Wysoka	Wysoka	Średnia	Średnia	Niska	Niska	Niska
Tolerancja na zanik sygnału	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie	Nie
Tolerancja na zmianę polaryzacji	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę częstotliwości	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę temperatury	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę napięcia	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę wzmocnienia	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę dyspersji	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę szumu	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę nieliniowości	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Tolerancja na zmianę zaniku sygnału	Nie	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak



„Modulation formats for 100G and beyond", Eugen Lach, Wilfried Idler Optical Fiber Technology, 17 (2011) 277–286

Detekcja sygnałów z modulacją PSK

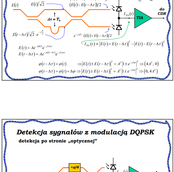
detekcja po stronie „elektrycznej"

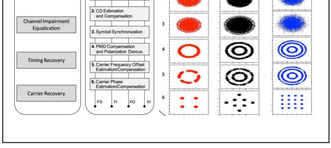
Odbiornik asynchroniczny DPSK

Detekcja sygnałów z modulacją DPSK

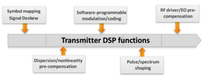
detekcja po stronie „optycznej"

M-Z delay interferometer (MZDI)


$E(t)$
$\sqrt{2}\,E(t)$
$d = T_b$
$E(t-bT)\sqrt{2}$
$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$
$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$
$\Delta\varphi = \frac{\pi}



OIF 400Gb/s – 8 lub 16 QAM + PM

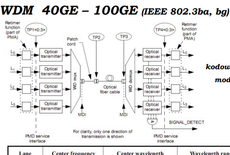


Modulation	QPSK	16QAM	16QAM	8QAM	QPSK	QPSK
Overall Data Rate (Gb/s)	100	400	400	400	400	400
Symbol Rate (Gbaud) with FEC	32	32	64	43	64	32
Number of sub-channels	1	2	1	2	2	4
Nyquist filtering	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Data rate per sub-channel (Gb/s)	100	200	400	200	200	100
Channel occupancy (GHz)	50	75	75	100	150	150
SE (bits/Hz)	2	5.33	5.33	4	2.66	2.66
Required OSNR at BER=10^{-3}	12.5	19.5	22.5	16.5	13.4	12.5
Maximum transmission reach* (km)	~2000	~400	~200	~500	~600	~2000
HW implementation penalty		**	***	***	**	*

A co na to IEEE?
40GbE – 100GbE *(IEEE 802.3ba, bg)*

Nazwa	Opis
40GBASE-KR4	4 x 10Gb/s, min1 m, elektrycznie (84)
40GBASE-CR4	4 x 10Gb/s, min 7 m, elektrycznie różnicowo (85)
40GBASE-SR4	4 x 10Gb/s, min100 m, MMF (86)
40GBASE-FR	1 x 40GB/s, min 2 km, SMF (89)
40GBASE-LR4	4 x 10GB/s, min 10 km, WDM SMF (87)
100GBASE-CR10	10 x 10Gb/s, min 7 m, elektrycznie różnicowo (85)
100GBASE-SR10	10 x 10Gb/s, min 100 m, MMF (86)
100GBASE-LR4	4 x 25Gb/s, min 10 km, WDM SMF (88)
100GBASE-ER4	4 x 25Gb/s, min 40 km, WDM SMF (88)

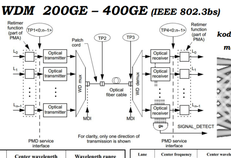
WDM 40GE – 100GE *(IEEE 802.3ba, bg)*



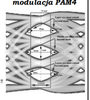
kodowanie 64B66B
modulacja NRZ

Lane	Center frequency	Center wavelength	Wavelength range
L_0	231.4 THz	1295.56 nm	1294.53 to 1296.59 nm
L_1	230.6 THz	1300.05 nm	1299.02 to 1301.09 nm
L_2	229.8 THz	1304.58 nm	1303.54 to 1305.63 nm
L_3	229 THz	1309.14 nm	1308.09 to 1310.19 nm

WDM 200GE – 400GE *(IEEE 802.3bs)*



kodowanie 64B66B
modulacja PAM4



Lane	Center wavelength	Wavelength range
L_0	1271 nm	1264.5 to 1277.5 nm
L_1	1291 nm	1284.5 to 1297.5 nm
L_2	1311 nm	1304.5 to 1317.5 nm
L_3	1331 nm	1324.5 to 1337.5 nm

Lane	Center frequency	Center wavelength	Wavelength range
L_0	231.4 THz	1295.56 nm	1272.35 to 1274.54 nm
L_1	230.6 THz	1277.89 nm	1276.89 to 1278.89 nm
L_2	233.8 THz	1282.26 nm	1281.25 to 1283.27 nm
L_3	231 THz	1286.66 nm	1285.65 to 1287.68 nm
L_4	231.4 THz	1295.56 nm	1294.53 to 1296.59 nm
L_5	230.6 THz	1300.05 nm	1299.02 to 1301.09 nm
L_6	229.8 THz	1304.58 nm	1303.54 to 1305.63 nm
L_7	229 THz	1309.14 nm	1308.09 to 1310.19 nm

Materiały źródłowe

książki

Le Nguyen Binh, „Digital Optical Communications", CRC Press 2009
I. Kaminov et all, „Optical Fiber Telecommunications", Academic Press, 2008 i nast

OIF (Optical Internetworking Forum)

http://www.oiforum.com

100GbE

802.3ba-2010.pdf, 802.3bg-2011.pdf, 802.3bs-2017
J. Anderson, M. Traverso, Optical Transceivers for 100 Gigabit Ethernet and its Transport, IEEE Communications Magazine 2010

materiały firmowe

JDSU
Ciena
Covega
U2T Photonics
Discovery Semiconductors
Opnext