

第12回

WDM伝送技術(2)・ 光通信の最新動向(1)

2010年1月18日(月)

CWDM

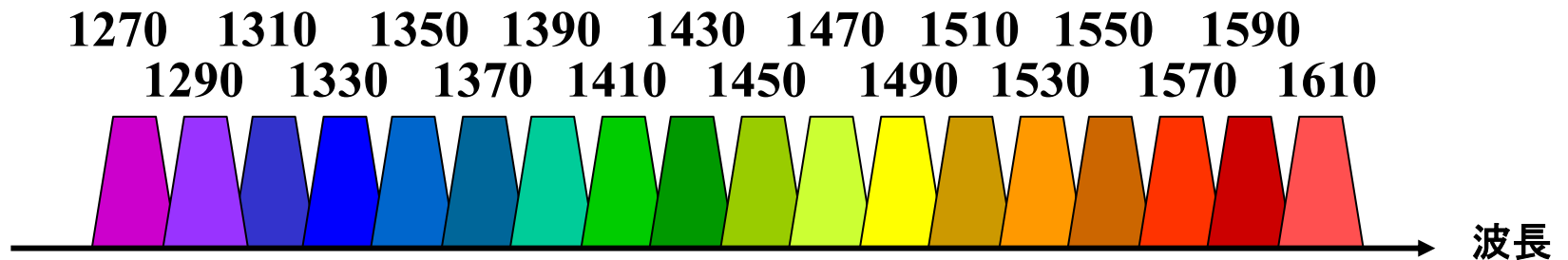
各種WDMとデバイス

杉江, 2003年信学ソ大, SC-6-1 (2003).

	波長間隔等	LD	フィルタ
DWDM (Ex. G.694.1)	$\sim 1000\text{GHz}$	波長制御 + 外部変調	FG、AWG、誘電体 波長制御
SDWDM	$\sim 25\text{GHz}$	波長制御 (波長 ロック) + 外部変調	FG、AWG、誘電体 波長制御
CWDM	1000GHz $\sim 50\text{nm}$	FP-LD、DFB-LD 温度制御	誘電体、ファイバ型、 PLC
Wide passband -WDM (Ex. G.694.2)	波長間隔: 20nm 通過帯域: 約 13nm	DFB-LD (温度制御なし)	誘電体、AWG/PLC、 ファイバ型
Wide-WDM ($1.3/1.5\mu\text{m}$)	$50\text{nm} \sim$	FP-LD	誘電体、ファイバ型

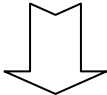
CWDMの仕様

- ・ITU-T G.694.2での標準化
- ・光アンプの使用は想定せず
- ・Uncooledの安価なDFB-LDを使用
- ・現在の製造技術で量産可能なWDMフィルタを使用



WDM用光ファイバ

FWM発生効率

$$\eta = \left[\frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \frac{\alpha}{D} \right]^2$$


A_{eff} : 実効コア断面積

n_2 : 非線形屈折率

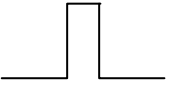
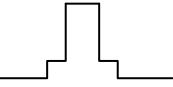
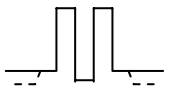
α : 伝送損失

D : 波長分散

FWM抑制の条件

- ① 大 A_{eff}
- ② 大分散
- ③ 低 n_2 : ガラス材料により決まる量
- ④ 低損失 : 十分な低損失を実現済み

大 A_{eff} 光ファイバ

タイプ	屈折率分布	電界分布	$A_{\text{eff}}(\mu\text{m}^2)$ @ 1550nm	MFD (μm) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm/km) @ 1550nm
標準SMF			80~85	10	+17	0.06
階段型DSF			40~50	7.5~8.5	-5~+5	0.07~0.1
セグメンテッドコア型			70~80	8~9	-5~+5	0.10~0.12
中心ディップ型(単リング)			80~120	8~10	-5~+5	0.08~0.09
中心ディップ型(2重リング)			80~150	8~10	-5~+5	0.08~0.09

A_{eff} 大

カットオフ波長の長波長シフト
曲げ損失増大

$A_{\text{eff}} \leq 80 \mu\text{m}^2$

電界分布が中心にディップを持つ

通常ファイバとの接続損失大
(1dB程度)

NZ-DSFファイバの仕様比較

各社ホームページの製品情報より

メーカー	製品名	伝送損失 (dB/km)	分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm ² /km)	PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
住友電工	PureGuide®	≤ 0.22	5.0 - 10.0(C)	≤ 0.063 $\leq @ 1550\text{nm}$	≤ 0.2
Corning	Leaf™	≤ 0.25	2.0 - 6.0(C) 4.5 - 11.2(L)	Not shown	≤ 0.04
Lucent	TrueWave™	≤ 0.25	2.6 - 6.0(C) 4.0 - 8.9(L)	≤ 0.05 $\leq @ 1550\text{nm}$	≤ 0.1
Alcatel	TeraLight™	≤ 0.25	5.5 - 10.0(C) 7.5 - 13.8(L)	0.058 @ 1550nm	≤ 0.08

分散補償ファイバ

屈折率分布	MFD (μm) @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm/km) @ 1550nm	性能指数 (ps/nm/dB) @ 1550nm
	5.0	-70~-90	+0.08	200~250
	5.0	-70~-90	+0.08	200~250
	4.5	-100~-135	-0.2~-0.5	200~300
	RDF 5.8	-15.6	-0.046	62
	5.0	-100~-300	-0.15	300~400

和田 朗, “光ファイバー研究開発の最新動向”, O plus E, pp.68-73 (1999).

分散マネジメント伝送路の例

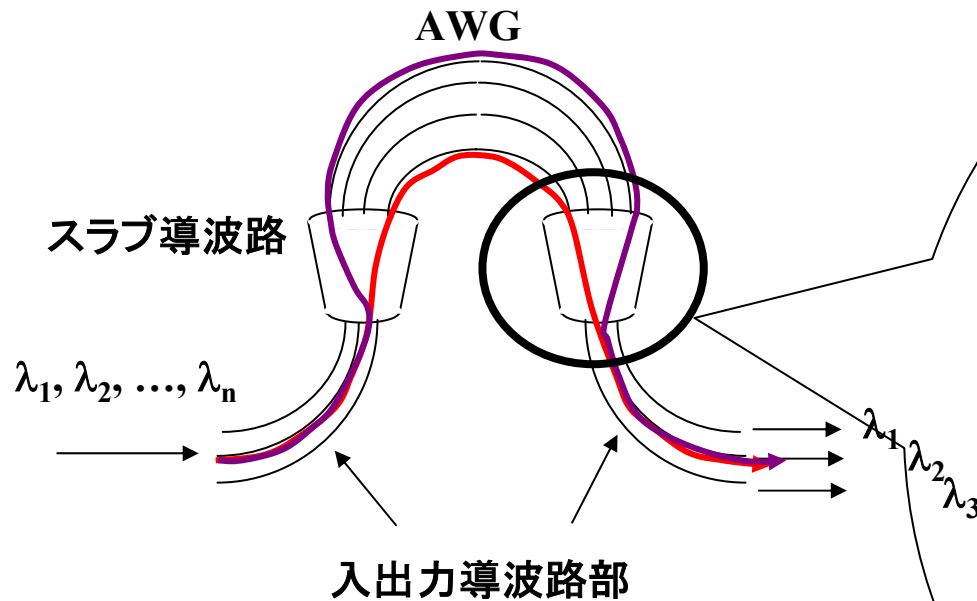
@ 1550nm

ファイバ	損失 (dB/km)	n_2 ($\times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$)	$A_{\text{eff}}(\mu\text{m}^2)$ @ 1550nm	波長分散 (ps/nm/km)	分散スロープ (ps/nm/km)
+D	0.171	2.8	112	+20.6	+0.060
-D	0.296	4.0	19	-55.9	-0.142
+D/-D	0.212	————	79	-1.5	+0.007

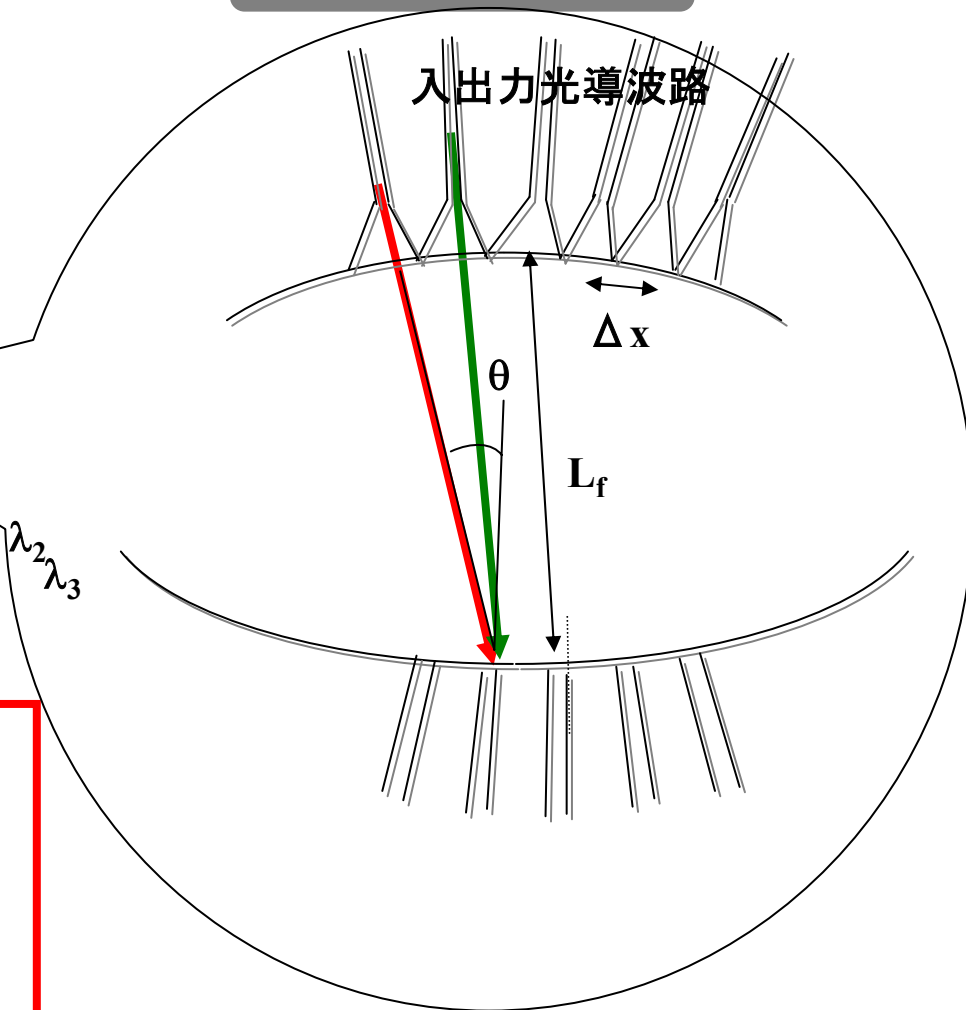
アレイ導波路格子 (AWG)

AWG (Arrayed Waveguide Grating)

AWG概観図



スラブ部分の拡大図



AWG内の光の干渉条件

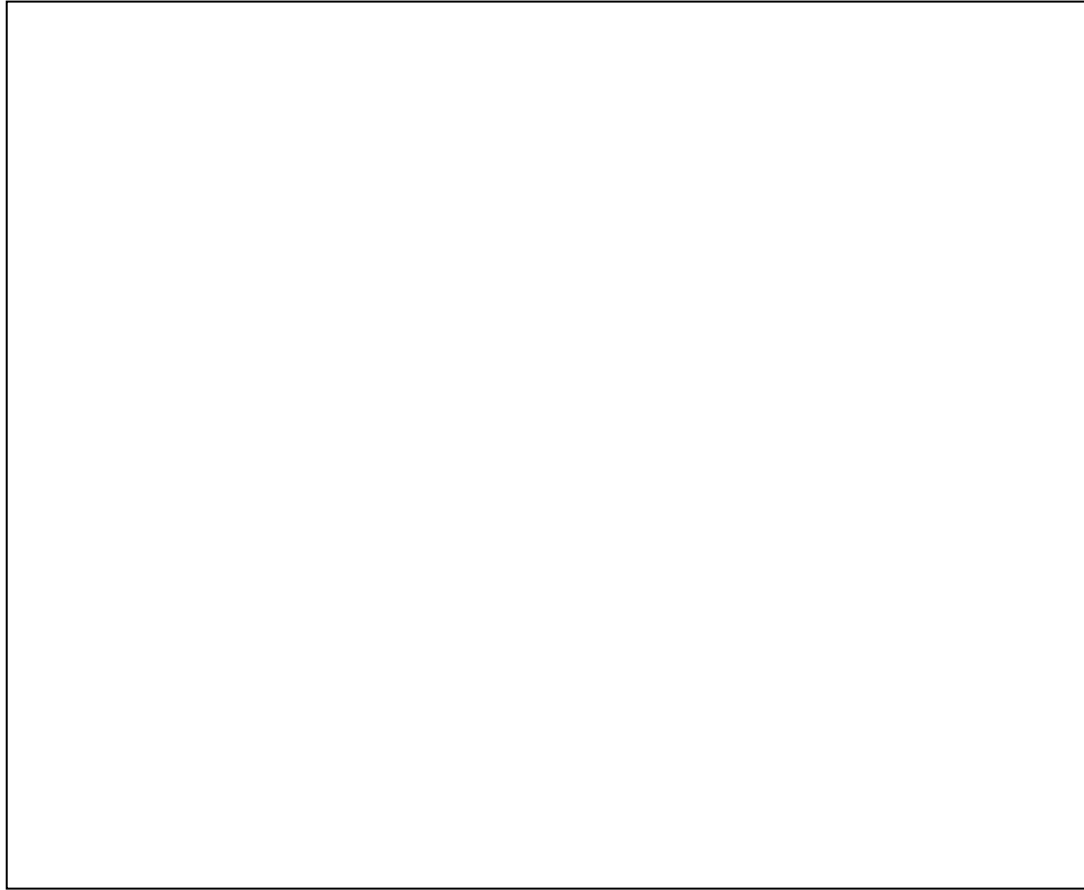
$$n_s d \sin \theta_i + n_c \Delta L + n_s d \sin \theta_o = m \lambda$$

入射側

出射側

グレーティング部

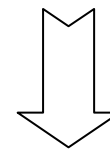
**Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh, T. Shibata, A. Sugita and A. Himeno (NTT),
Electron. Lett., vol. 37, pp.820-821 (2001).**



小型・大規模AWG

6インチウエハ上に作製した
25GHz, 400チャネルAWG

超高 Δ PLC(1.5%, 曲げ半径2mm)の採用



小型・大規模AWGの実現

波長範囲: 1530 – 1610nm

損失: 3.8dB(中央ポート)、6.4dB(端のポート)

隣接クロストーク: -20dB

偏波依存波長シフト: 0.03nm以下

Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh,
T. Shibata, A. Sugita and A. Himeno (NTT),
Electron. Lett., vol. 37, pp.820-821 (2001).

光分散補償器

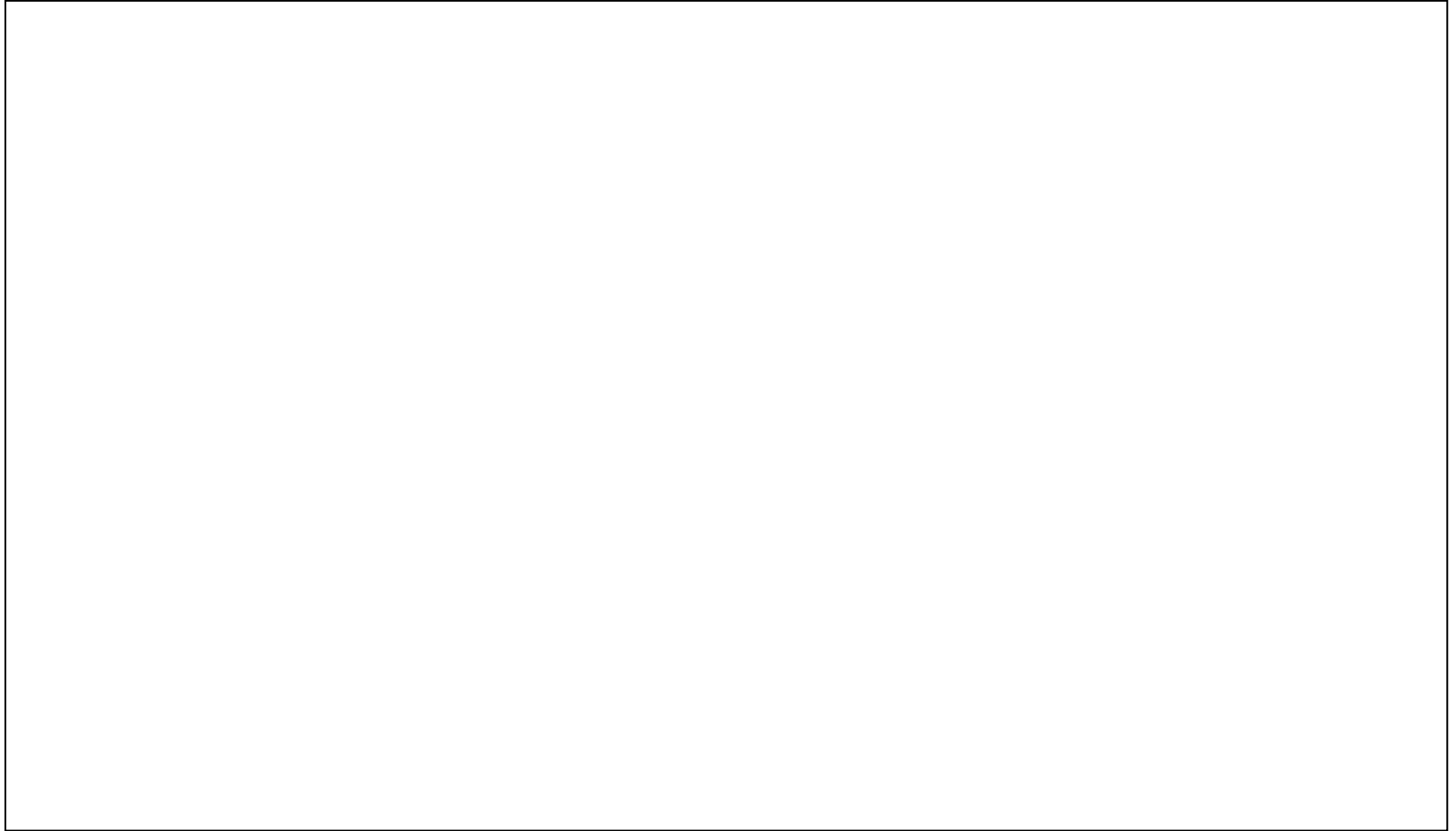
ラティス型フィルタを用いた分散補償器

K. Takiguchi, K. Okamoto, T. Goh, T. Saida and M. Itoh, in Proc. ECOC2000, We. P. 19 (2000).

8チャンネル40Gbps WDM用PLC型分散スロープ補償器



K. Takiguchi, K. Okamoto, T. Goh, T. Saida and M. Itoh, in Proc. ECOC2000, We. P. 19 (2000).



Virtually-Imaged Phased Array (VIPA)

H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahata, H. Isono, and G. Ishikawa, J. Lightwave Technol., vol.20, No.12, pp.2196-2203 (2002).



VIPAの分散特性

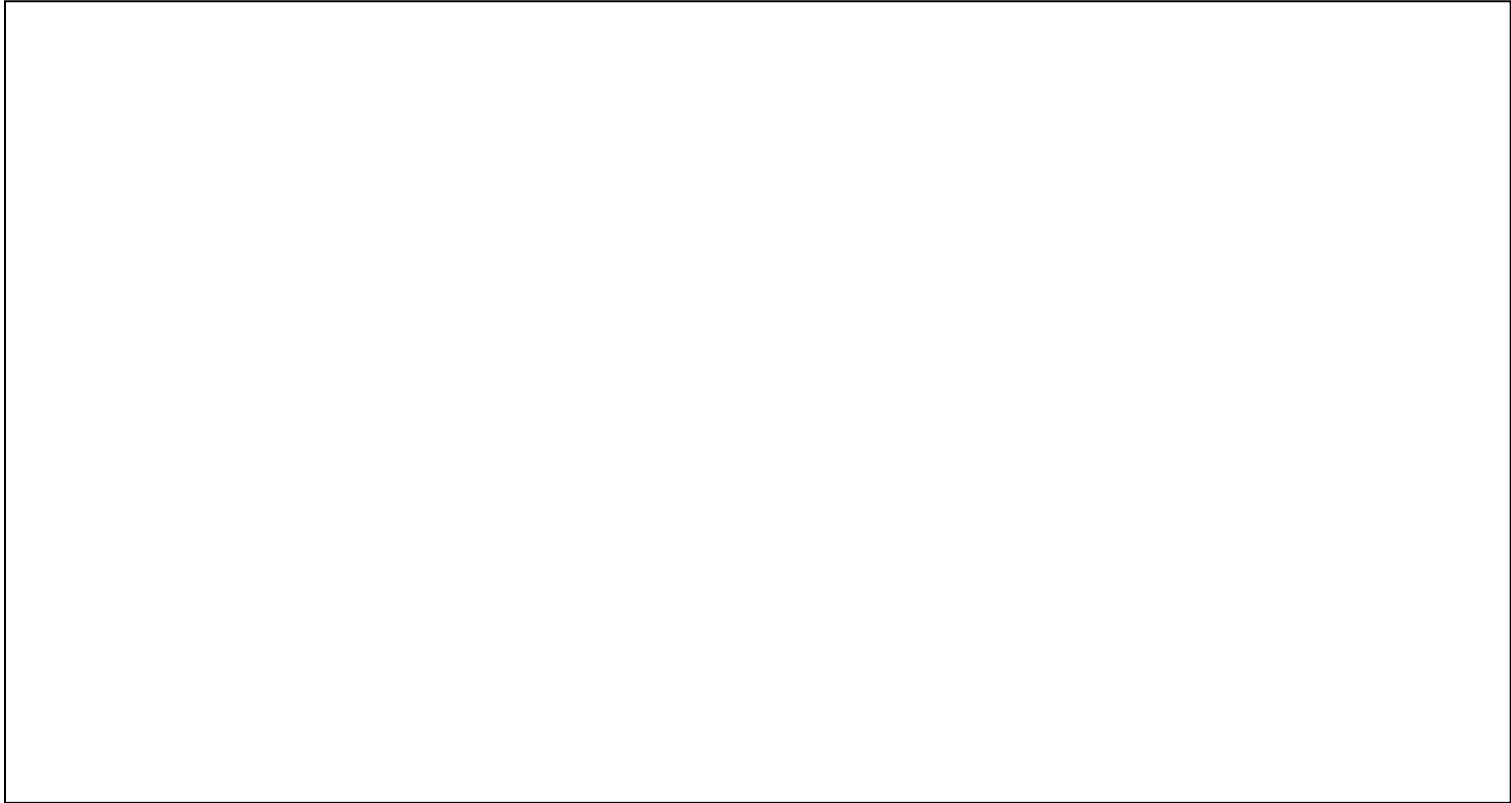
H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahata, H. Isono, and G. Ishikawa, J. Lightwave Technol., vol.20, No.12, pp.2196-2203 (2002).



2009年度
光通信システム

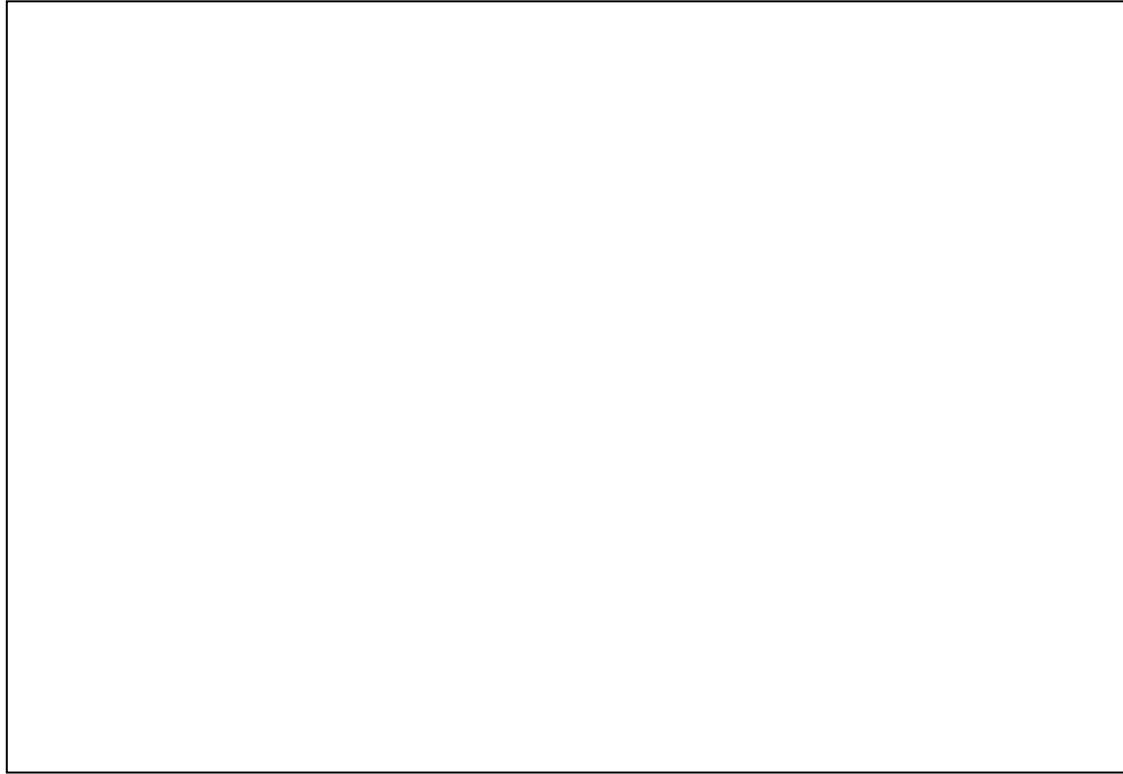
分散マネジメント伝送路とVIPAを用いた40Gbps伝送結果

H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahata, H. Isono,
and G. Ishikawa, J. Lightwave Technol., vol.20, No.12, pp.2196-2203 (2002).



偏光度モニタを用いたPMD補償器

磯村, ラスムッセン, 大井, 秋山, 石川, 2003年信学ソ大, B-10-124 (2003).

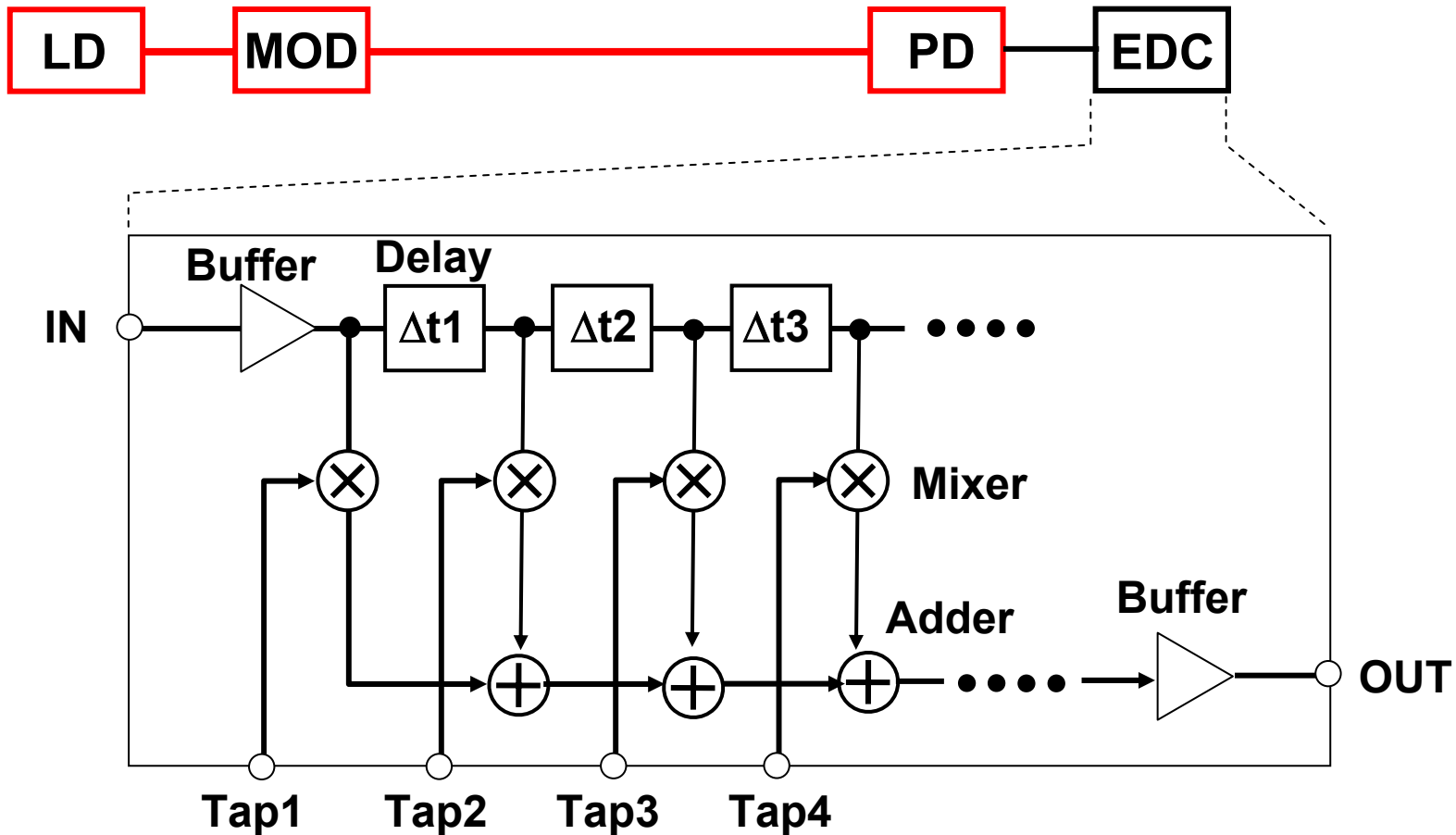


PMD一波長分散同時自動補償実験

大井, ラスムッセン, 高原, 中村, 磯村, 福士, 石川, 2003年信学ソ大, B-10-121 (2003).

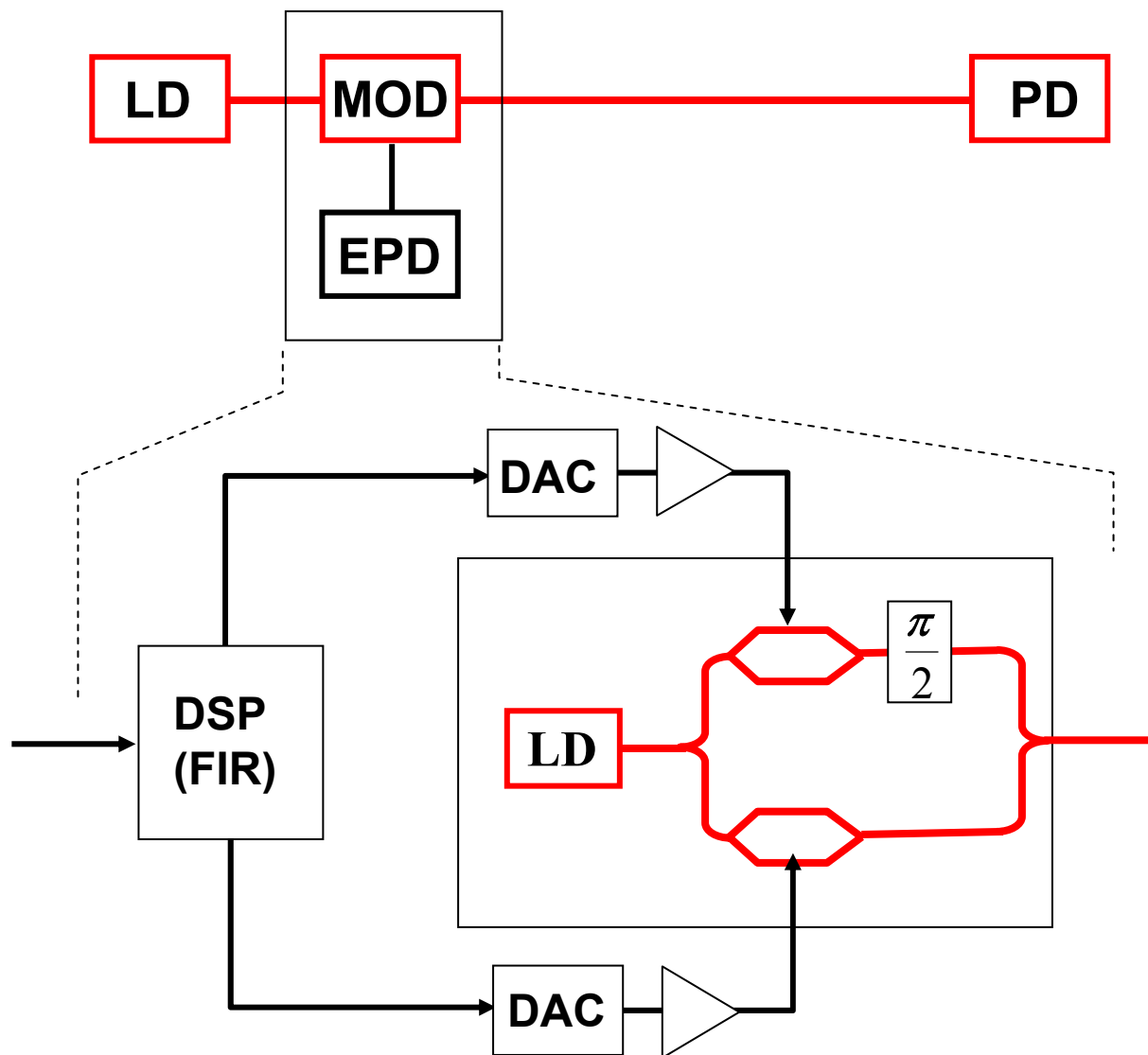


電気分散補償技術



FIR (Finite Impulse Response)フィルタで構成することが多い

プリコンペンセーションの構成(1)



2009年度

光通信システム EDC (Electronic Dispersion Compensation)技術(3)

**J. McNicol, M. O'Sullivan, K. Roberts, A. Comeau, D. McGhan, and L. Strawczynski,
OFC2005, OThJ3.**



第9章

光通信の最新動向

ビデオデータの急増(2005年→2008年統計)

ビットレート : 10Gbps → 40/100Gbps
(IEEE802.3ba国際標準検討中)

テラビット(Tbps)伝送実験の報告例

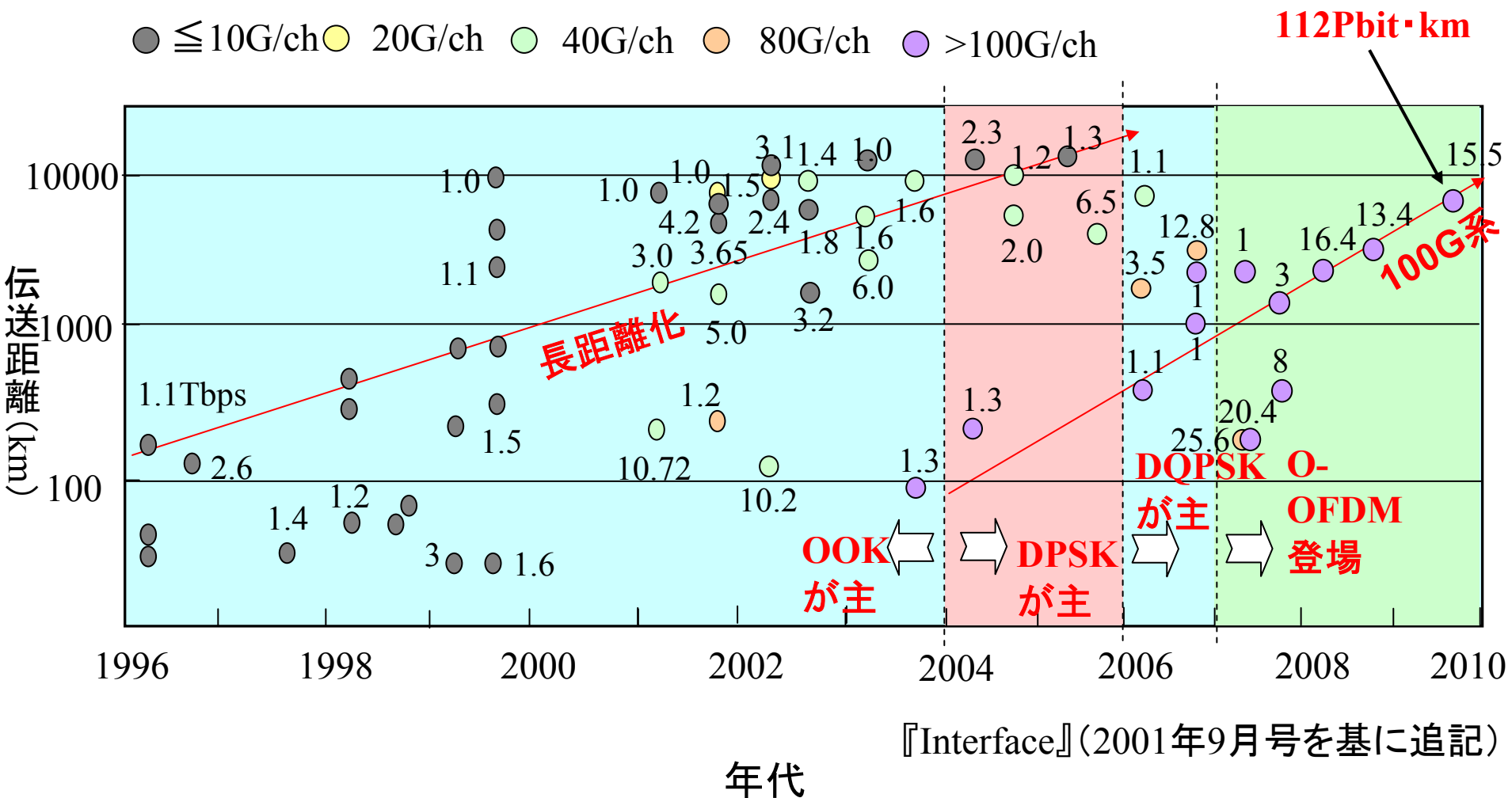
速度:100G超へ

距離: 7,000km超@100Gへ

検波方式: デジタル技術によるコヒーレントの復興

変調方式: 多値 and/or 多キャリア方式へ

● $\leq 10\text{G/ch}$ ● 20G/ch ● 40G/ch ● 80G/ch ● $>100\text{G/ch}$



最近6年間の長距離伝送方式のトレンド

2004～2009年 OFC・ECOCでの変調方式のトレンド(主に>40Gbpsの長距離伝送・
変調方式・PDセッションを中心に調査・デジタルコヒーレントかどうかは区別せず)

学会名	OOK	Duo- binary	(D)PSK	(D)QPSK	多値	OFDM
OFC2004	4	0	9	5	2 16QAM ASK×QPSK	0
ECOC2004	7	3	16	3	1 16-Ary	0
OFC2005	6	0	14	7	1 8DPSK	0
ECOC2005	10	1	8	6	0	0
OFC2006	3	0	6 QPSK>BPSKとなった	8	1 9QAM 8PSK	0
ECOC2006	1	2	4	14	2 128QAM 16APSK	0
OFC2007	6	0	6	8	5 64QAM 多値が増えた 16AQSK	1
ECOC2007	6	0	4	14	4 8DPSK 9QAM	10 OFDMの急増
OFC2008	1	0	4	16	5 8-sAPSK 32APSK	16
ECOC2008	1	0	3	15	12 128QAM (10bit/s/Hz) 8PSK	8
OFC2009	3	0	6	12	10 64/16QAM	21
ECOC2009	1	0	1	17	7 64/32/16QAM	9

光通信技術のパラダイムシフト (無線通信との類似性)

水落,2009年第1回PN新世代懇談会.

光通信は無線・マイクロ波通信のほぼ35年遅れで同じトレンドを示している。

多値変調技術

波長多重数を上げるか、 チャンネルあたり速度の向上か(1)

● ボー・レートの制限(WDMで波長フィルタで合分波を前提)

① 信号帯域／WDMチャンネル間隔 = 0.4bps/Hz, ビットレート40Gbpsの場合

バイナリ変調: チャンネル間隔 = $40\text{Gbps} \div 0.4\text{bps/Hz} = 100\text{GHz} = 0.8\text{nm}$,
 $(1700\text{nm} - 1400\text{nm}) \div 0.8\text{nm} = 375\text{波}$
スループット = $40\text{Gbps} \times 375\text{波} = 15\text{Tbps}$

多値変調(1024QAM:10値多重+PDM):

チャンネル間隔 = $(40\text{Gbps} \div 20) \div 0.4\text{bps/Hz} = 5\text{GHz} = 0.04\text{nm}$,
 $(1700\text{nm} - 1400\text{nm}) \div 0.04\text{nm} = 7500\text{波}$
スループット = $40\text{Gbps} \times 7500\text{波} = 300\text{Tbps}$

② 信号帯域／WDMチャンネル間隔 = 0.4bps/Hz, ビットレート100Gbpsの場合

多値変調(1024QAM:10値多重+PDM):

チャンネル間隔 = $(100\text{Gbps} \div 20) \div 0.4\text{bps/Hz} = 12.5\text{GHz} = 0.1\text{nm}$,
 $(1700\text{nm} - 1400\text{nm}) \div 0.1\text{nm} = 3000\text{波}$
スループット = $100\text{Gbps} \times 3000\text{波} = 300\text{Tbps}$



- ・フィルタ帯域から考えたぎりぎりのチャンネル間隔では、ビットレートを上げてスループットは変わらない。
- ・多値化がスループット向上の有効な手段
(狭帯域化による波長多重数増加になっている)

波長多重数を上げるか、 チャネルあたり速度の向上か(2)

● 波長帯域の限界は？

損失制限: 40Gbpsでの5000km
伝送距離が< 0.2dB/kmより、
1400~1700nm

分散(CD)制限

- ・EDC/EPDを用いて50,000ps/nm
まで耐性があると仮定すると、

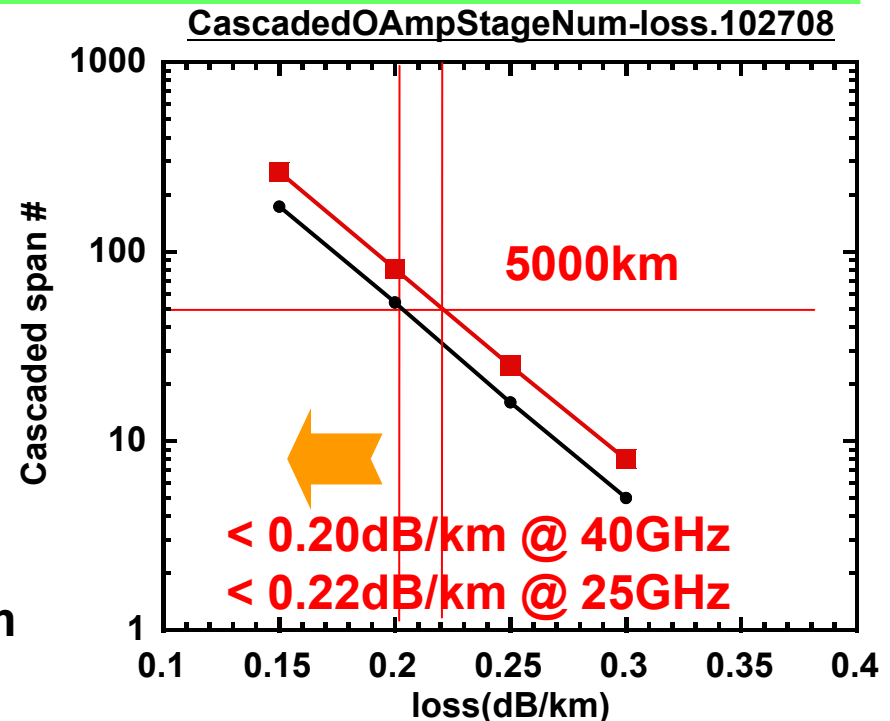
$$50,000\text{ps/nm} \div 5,000\text{km} = 10\text{ps/nm/km}$$

NZ-DSFでは1300~1700nmまで満たす。

➡ 以上から、波長1400nm~1700nm程度までは広帯域化できそう。

- ・1スパン(100km)を分散制限の範囲にとどめる場合は、

$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} [\text{GHz} \cdot \sqrt{\text{km}}] \quad \text{より } B < 20\text{GHz} \text{ に制限}$$



波長多重数を上げるか、 チャンネルあたり速度の向上か(3)

● PMD制限

バイナリ・コード

bit rate	PMD制限距離
20Gbps	520km
40Gbps	130km
100Gbps	21km

PMDの面からも、伝送帯域40Gbps以上は厳しい

● 波形歪の原因

① 波長分散

$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$

② 偏波モード分散

PMDによる波形歪は距離のルートに比例（比例定数をCとおく）

➡ 1タイムスロットの一定割合（kとおく）以内が伝送制限とすると、

$$\frac{k}{B} \geq C\sqrt{L}$$

$$B\sqrt{L} \leq \frac{k}{C} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$

● 波形歪を打ち破る技術

- ① 多値化 → シンボルレートを下げて狭帯域化
- ② 偏波多重 → シンボルレートを下げて狭帯域化
- ③ 等化器 → 時間領域／周波数領域

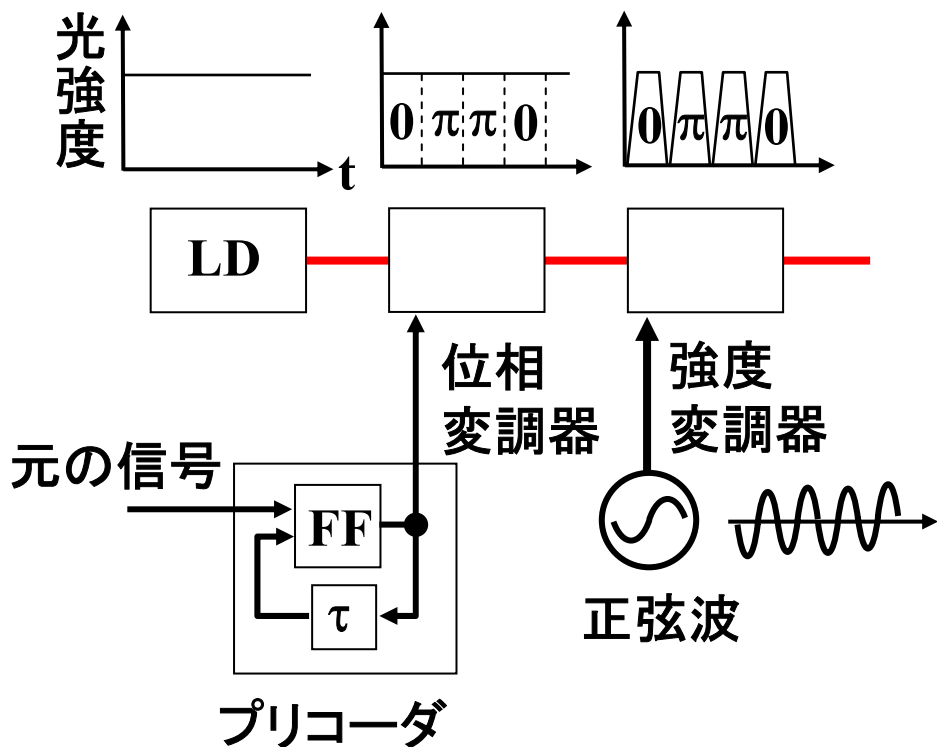
● SNR劣化をうち破る技術

- ① 誤り訂正 → 軟判定FECによる符号化利得向上
- ② 位相変調・同期検波 → デジタル・コヒーレント(イントラダイン)検波

高速デジタルLSIの進展により実現可能となってきた

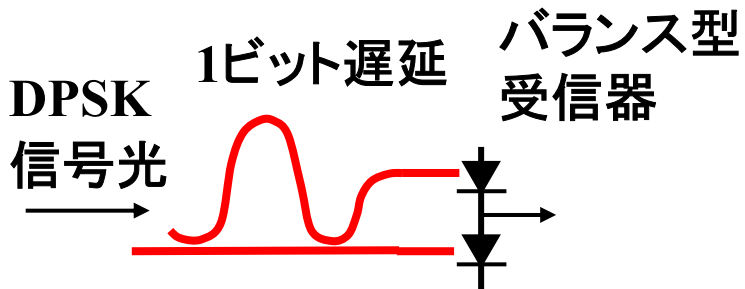
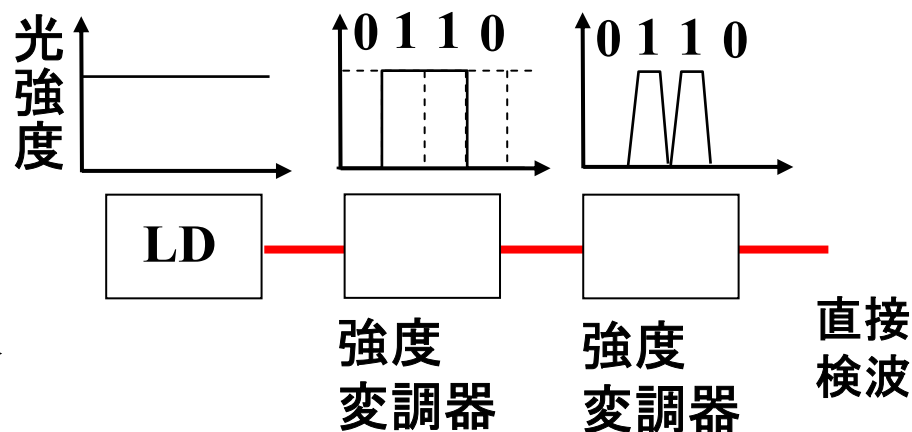
DPSK送信器

RZ-DPSK



RZ-OOK

OOK (On-Off Keying,
強度変調方式の総称)



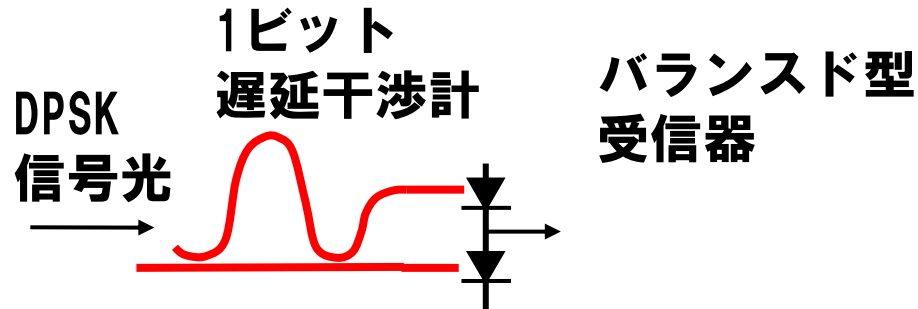
バランス型検波器により光位相 $0, \pi$ を
電気レベル $+1, -1$ に変換
→ 電圧 0 に閾値を設定でき、レベル $0, 1$
の受信より感度を 3dB 改善可能

集積型バランスト型受光器

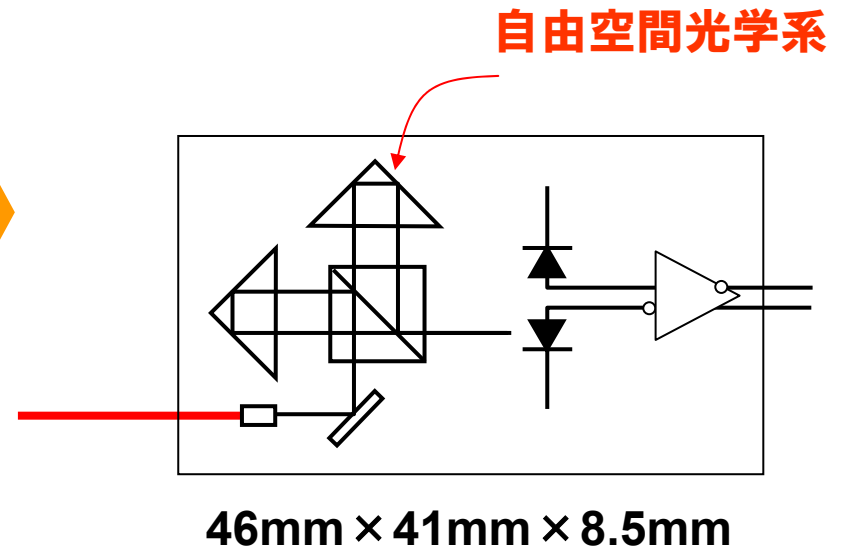
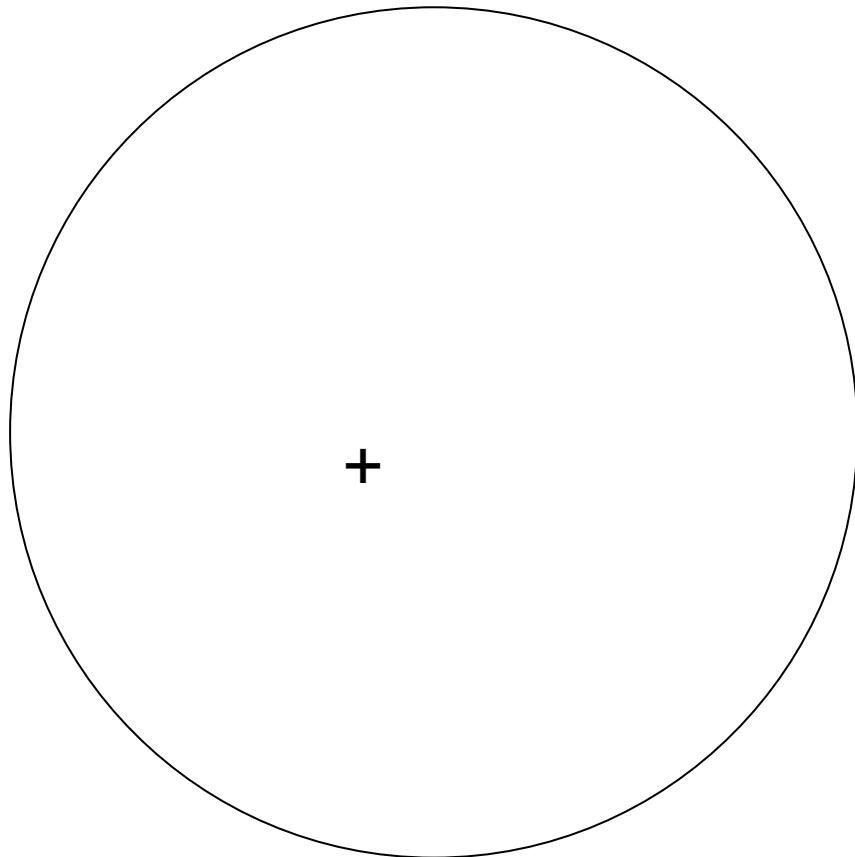
S. Watanabe, K. Shiba, T. Okamoto, T. Chikuma, and K. Makita(NEC), LEOS2007, Tu-BB-2.

- Dark Current: 20, 21nA (-3V)
- Capacitance : < 62fF
- $f_{3dB} > 40\text{GHz}$
- $\eta_{ex} > 0.85\text{A/W}$

小型化が進むDPSK受信回路



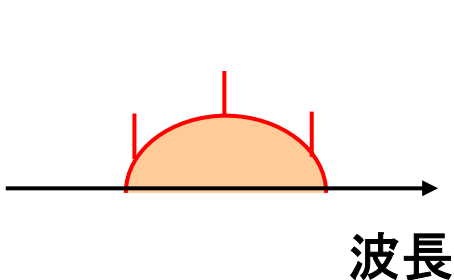
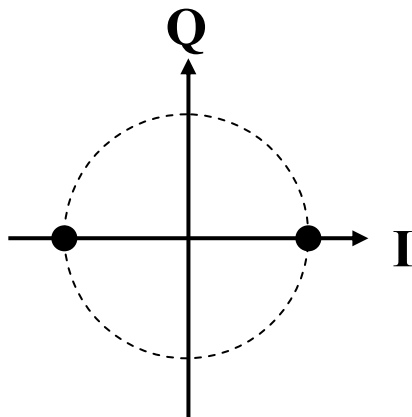
u2t社IDRV(同社HPより)



多値信号の信号点配置

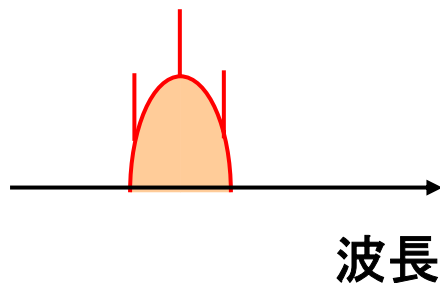
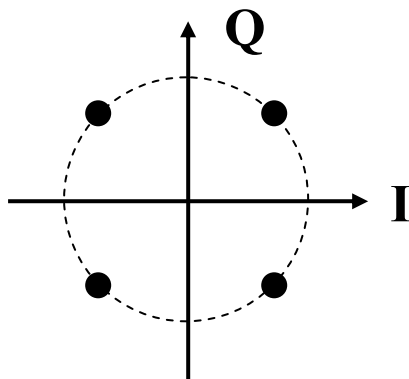
1bit/symbol
(112G symbol/s
=112Gbps)

ASK, (D)PSK



2bit/symbol
(56G symbol/s
=112Gbps)

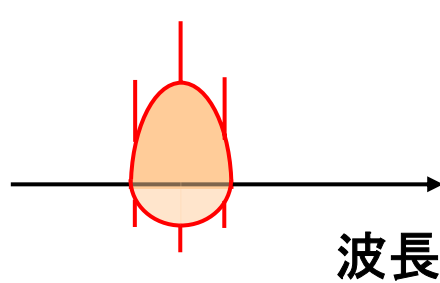
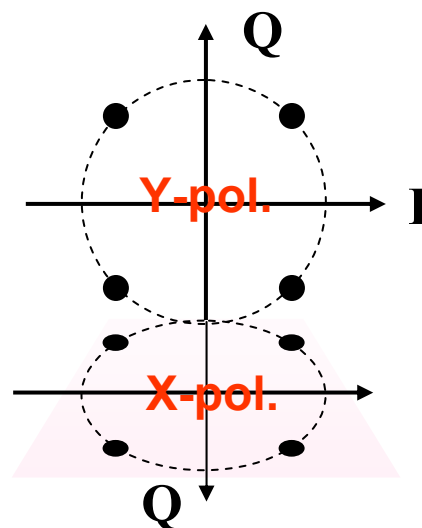
(D)QPSK



4bit/symbol
(28G symbol/s
=112Gbps)

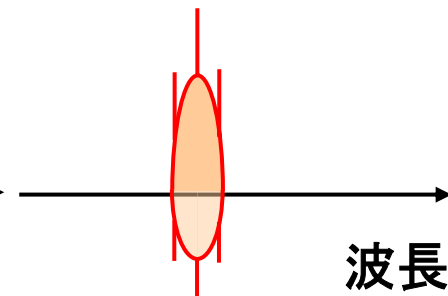
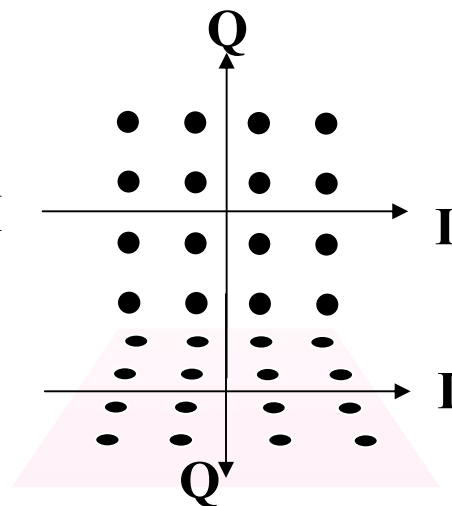
DP- (D)PSK

DP: Dual-Polarization



8bit/symbol
(14G symbol/s
=112Gbps)

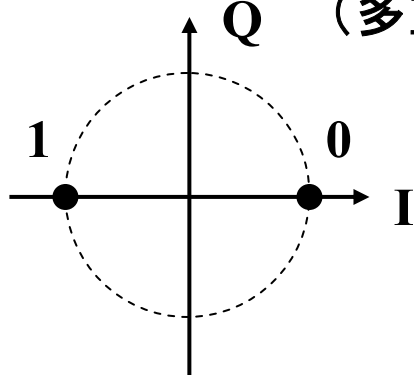
DP-16QAM



DQPSKコンスタレーション生成

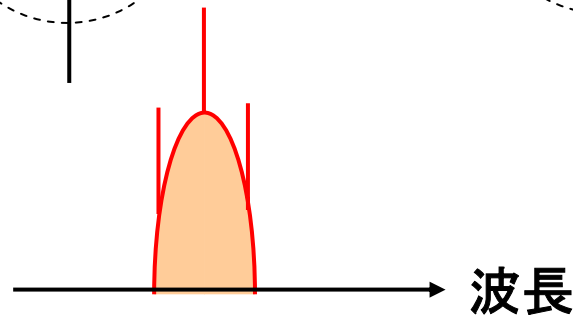
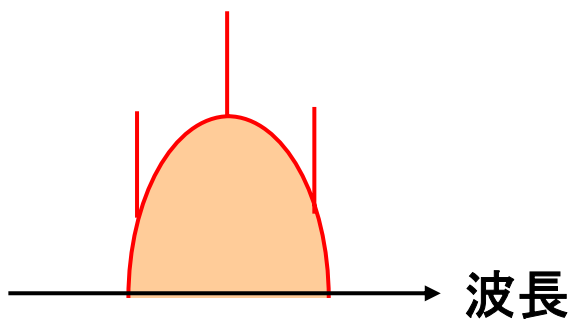
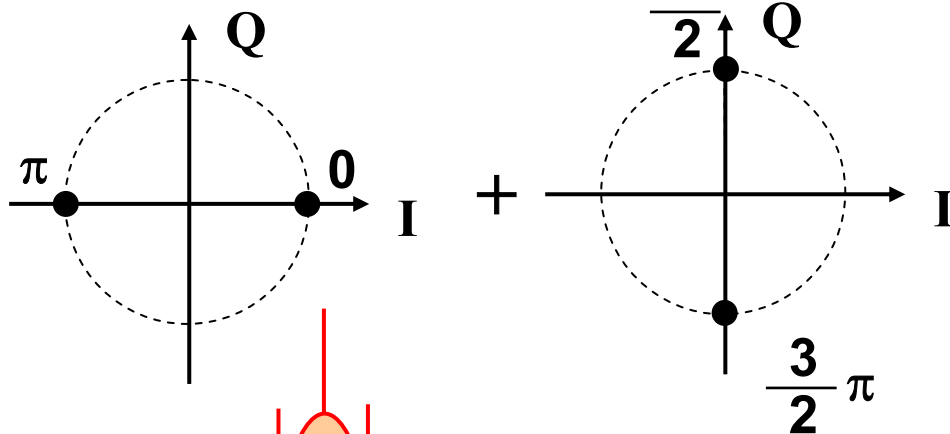
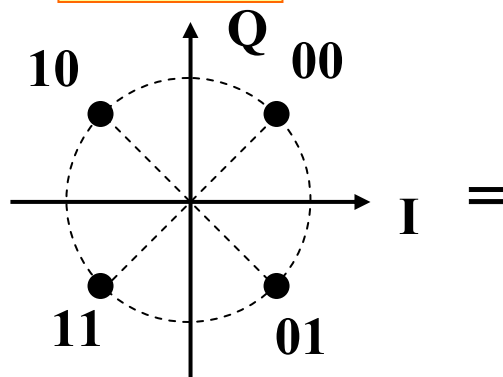
BPSK

1シンボル2値
(多重度1)



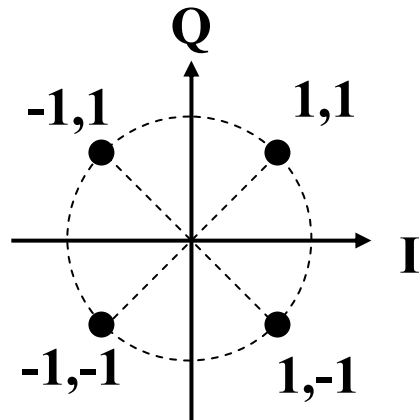
QPSK

1シンボル4値(多重度2)



● 帯域を半分に狭帯域化可能, 高密度WDM・分散の影響低減可能

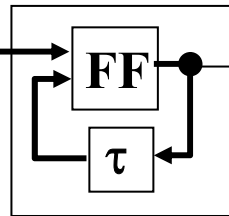
DQPSK送信器



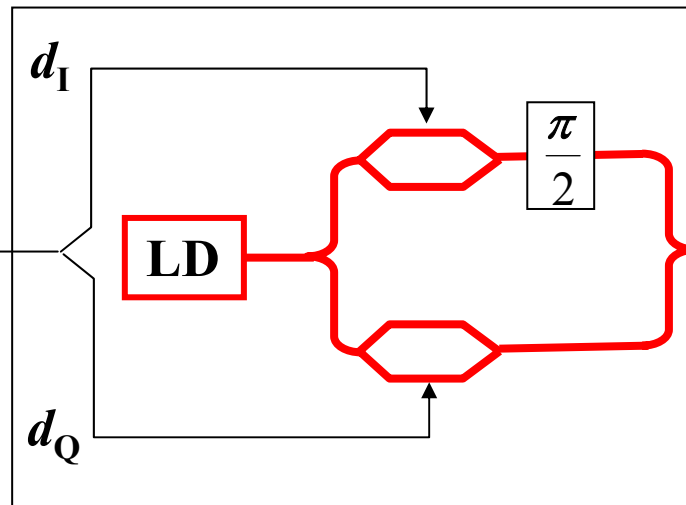
DQPSK : Differential Quadrature Phase Shift Keying

元の信号

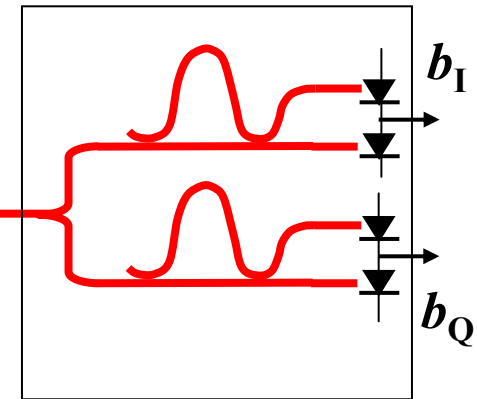
b_I, b_Q



エンコーダ



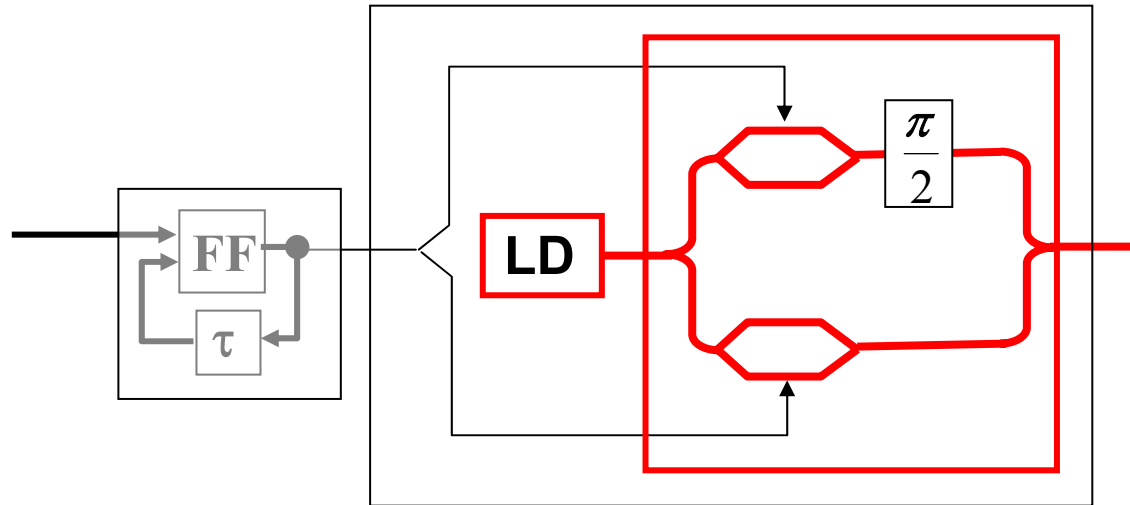
デコーダ



プリコーダ

$$\begin{aligned}
 d_I(n) &= b_I(n) \cdot b_Q(n) \cdot d_I(n-1) + b_I(n) \cdot \overline{b_Q(n)} \cdot d_Q(n-1) \\
 &\quad + \overline{b_I(n)} \cdot \overline{b_Q(n)} \cdot \overline{d_I(n-1)} + \overline{b_I(n)} \cdot b_Q(n) \cdot \overline{d_Q(n-1)} \\
 d_Q(n) &= b_I(n) \cdot b_Q(n) \cdot d_Q(n-1) + \overline{b_I(n)} \cdot b_Q(n) \cdot d_I(n-1) \\
 &\quad + b_I(n) \cdot \overline{b_Q(n)} \cdot \overline{d_I(n-1)} + \overline{b_I(n)} \cdot \overline{b_Q(n)} \cdot \overline{d_Q(n-1)}
 \end{aligned}$$

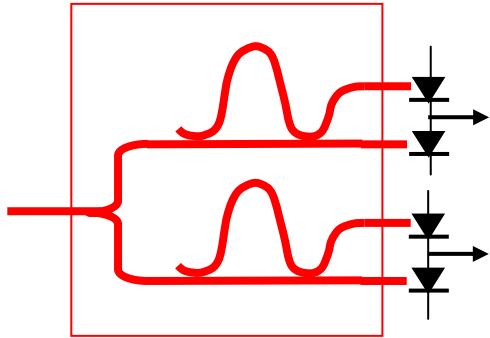
DQPSK用変調器



M. Sugiyama, M. Doi, T. Hasegawa, T. Shiraishi, and K. Tanaka(Fujitsu), ECOC2007, 10.3.4.

- $172 \times 17 \times 14 \text{ mm}^3$
- Bending radius: 1mm
- Driving Voltage: 3.5V

DQPSK受信回路



DPSK復調回路 2 並列を一体化

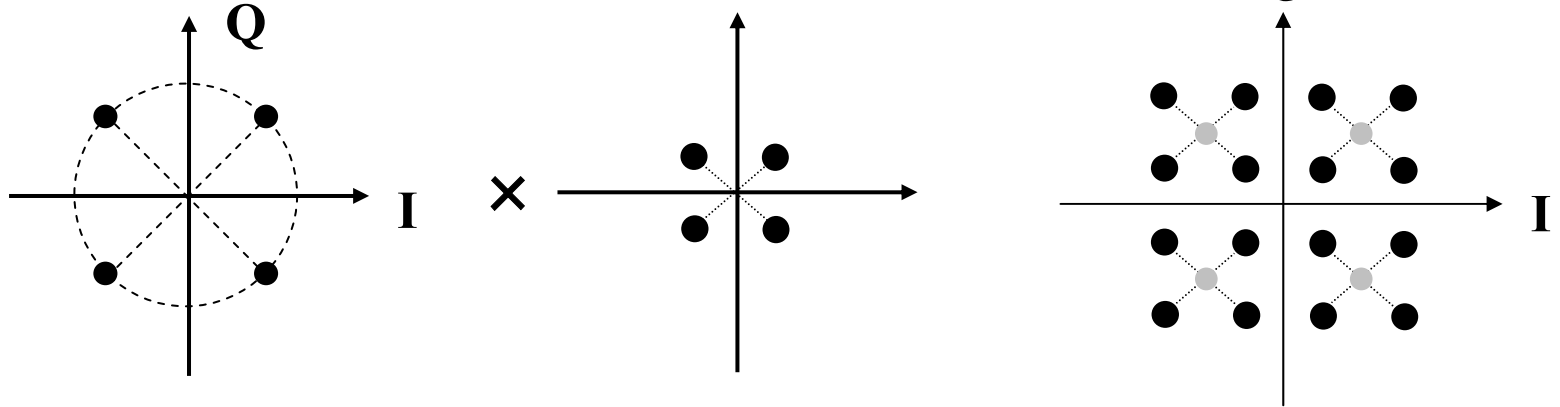
+



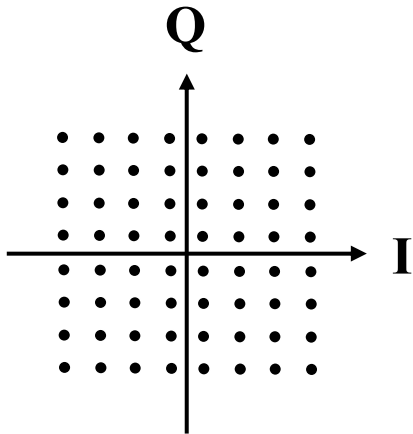
Avensys社HPより

さらなる多値度向上の手法

16QAM



64QAM



多値変調（QAM）用光変調器

T. Sakamoto, A. Chiba, and T. Kawanishi(NiCT), ECOC2008, Tu.1.E.3.



T. Sakamoto, A. Chiba, and T. Kawanishi(NiCT), ECOC2008, Tu.1.E.3.

