

第14回

波長多重(WDM)伝送 (変調技術)

講義スケジュール(1)

	日付	内容
第1回	10/6	光通信システム(基礎・長距離基幹系)
第2回	10/13	光通信システム(メトロ・アクセス・LAN・インターコネクション)
第3回	10/20	光変調符号
第4回	10/27	光変復調技術(強度変調・位相変調)
第5回	11/10	光変復調技術(デジタル・コヒーレント関連技術)
第6回	11/17	光ファイバのモード特性(波動方程式)
第7回	11/24	光ファイバのモード特性(偏波)
第8回	12/1	ファイバの伝送特性(分散による伝送限界)

講義スケジュール(2)

	日付	内容
第9回	12/8	ファイバの伝送特性(分散補償技術)
第10回	12/15	光増幅器
第11回	12/22	ビット誤り率(強度変調・直接検波)
第12回	1/5	ビット誤り率(コヒーレント、多値変調、光増幅)
第13回	1/19	波長多重(WDM)伝送(分散マネジメント技術)
第14回	1/26	波長多重(WDM)伝送(変調技術)
第15回	2/2	光スイッチング技術・最新の光通信関連技術

高周波数利用効率

周波数利用効率: $f_0/\Delta f$ の向上を目指す。

→ **狭帯域変調方式 (NRZ, CS-RZ, DQPK)**

(例) 0.8bps/Hzの時、40Gbps, 50GHz間隔

→ SCL3波長帯の伝送帯域上限16THz × (0.8bps/Hz) = **12.8Tbps**

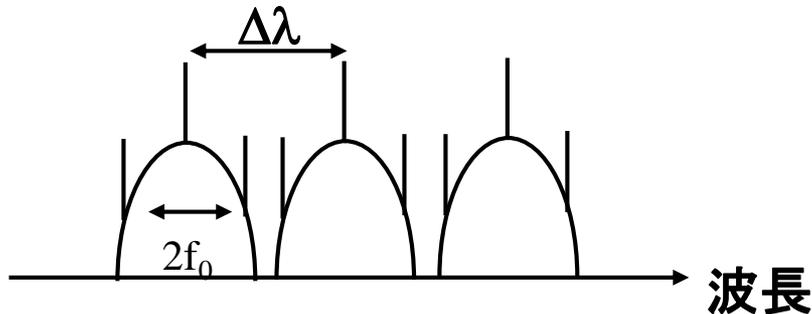
① 波長間隔が変調周波数よりも十分広い場合

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \gg 2f_0$$

$\Delta\lambda$: DWDMの波長間隔

Δf : DWDMの周波数間隔

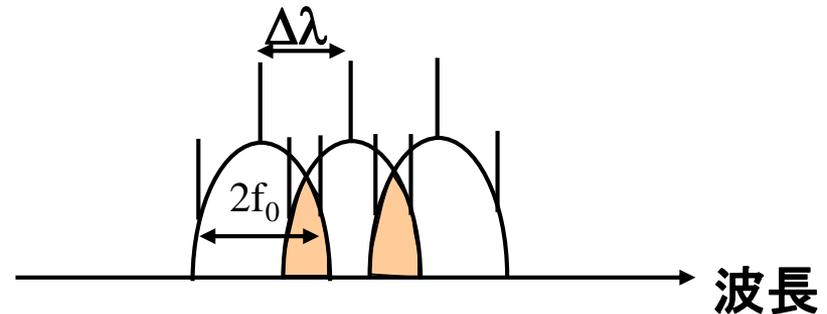
f_0 : 変調周波数



② 波長間隔が変調周波数に対して狭くない場合

$$\Delta f = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda < 2f_0$$

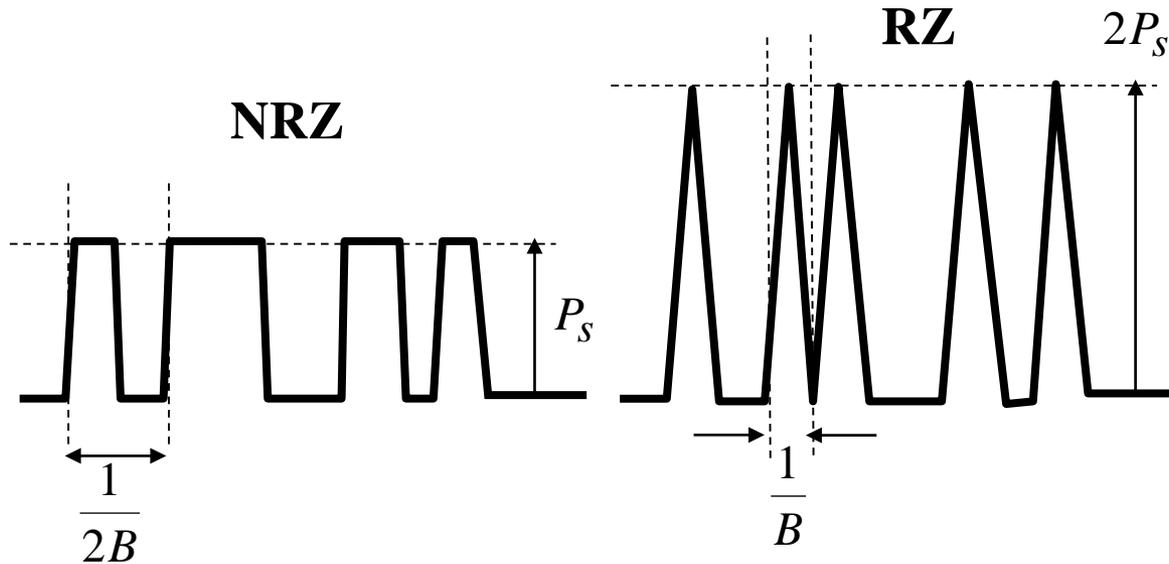
隣接チャネルのバンドが重なってしまい、クロストークとなる



光雑音耐性

同一受信感度に対するSN比の差

→ **高SN比(高受信感度)の変調方式の選択(RZ, DPSK)**



平均受信感度 P_{ave} を用いてRZ・NRZのSNRを比較する。

$$SNR = \left(\frac{e\eta i \frac{GP_s}{\hbar\omega}}{\frac{\sqrt{\sigma_{s,shot}^2 + \sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{s-sp}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2} + \sqrt{\sigma_{sp,shot}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{th}^2}}{2}} \right)^2$$

P_s : RZ = NRZ × 2 (ピーク強度)

$\sigma_{s,shot}^2, \sigma_{s-sp}^2$: RZ = NRZ × 4 (ピーク強度&帯域)

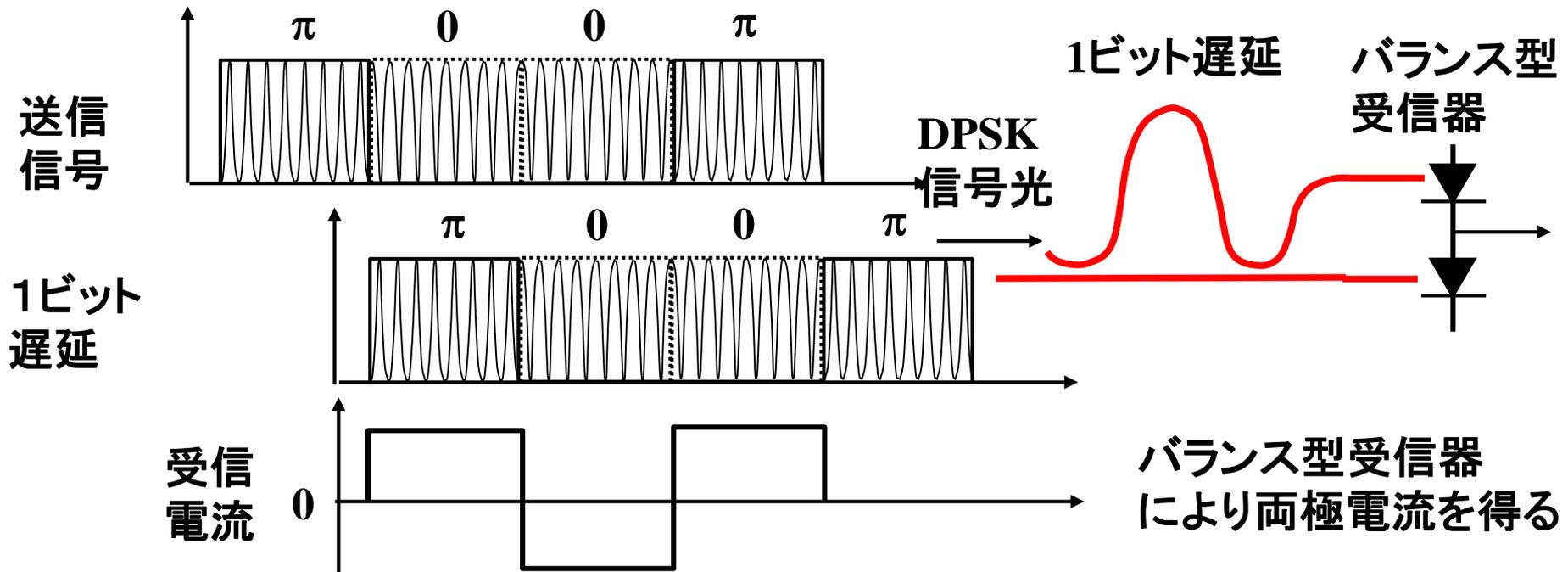
$\sigma_{sp,shot}^2, \sigma_{sp-sp}^2, \sigma_{th}^2$: RZ = NRZ × 2 (帯域)

より、SNR(RZ) > SNR(NRZ)

DPSK変調

DPSK (Differential Phase-Shift-Keying, 差動位相シフトキーイング方式)

- PSK変調の1種でデータ1を隣接ビット間の位相差 π 、データ0を隣接ビット間の位相差0に割り当てたもの。
- 40Gbps DWDMの長距離・受信感度改善を目的にこの5~6年急激に取り組みが盛んになってきた。



バランス型検波器により光位相0, π 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

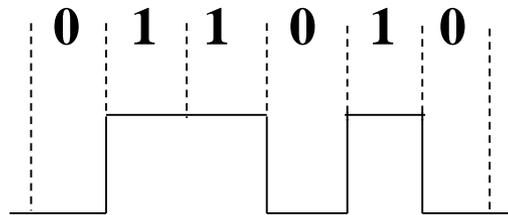
非線形耐力

光ファイバ伝送中の自己位相変調(SPM)による分散の影響を抑える。

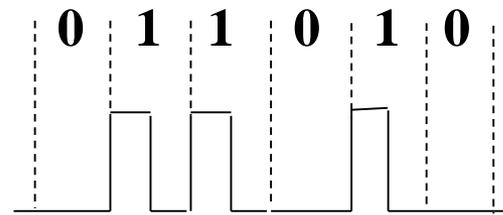
→ ・送信光平均パワーのなるべく小さな変調方式

(例1) NRZはRZの半分の帯域で済むので変調効率の観点では有利だが、1インターバルの平均光パワーが倍のため非線形耐力は劣る。

NRZ



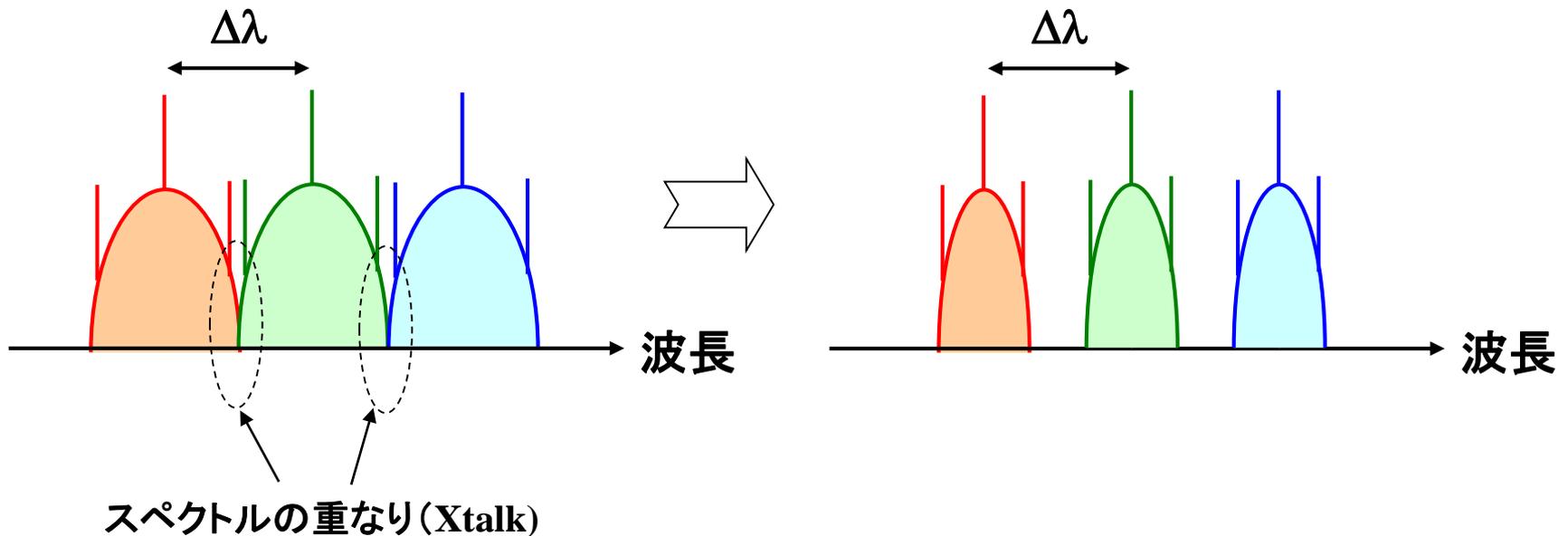
RZ



隣接波長チャンネル間クロストーク耐力

隣接チャンネル間の相互作用(Xtalk)の低減

- 隣接チャンネル間のスペクトル重なりを極力避ける
- **狭帯域の変調方式の採用**
(2値: CS-RZ, Duobinary) (多値: DQPSK)

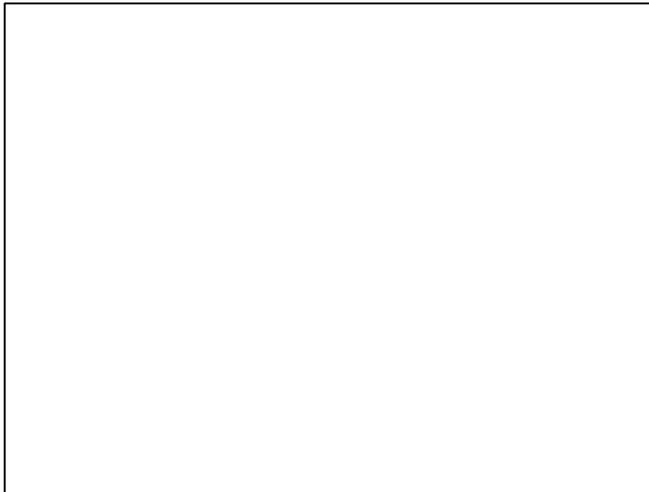


PMD耐性

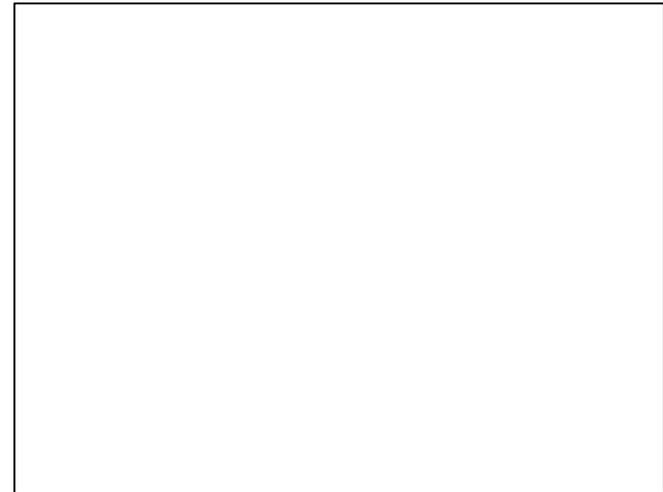
DVD (Differential Velocity Delay) による波形歪の影響の大小
→ 変調波形形状依存

耐性: RZ > NRZ

10Gbps NRZ



10Gbps RZ

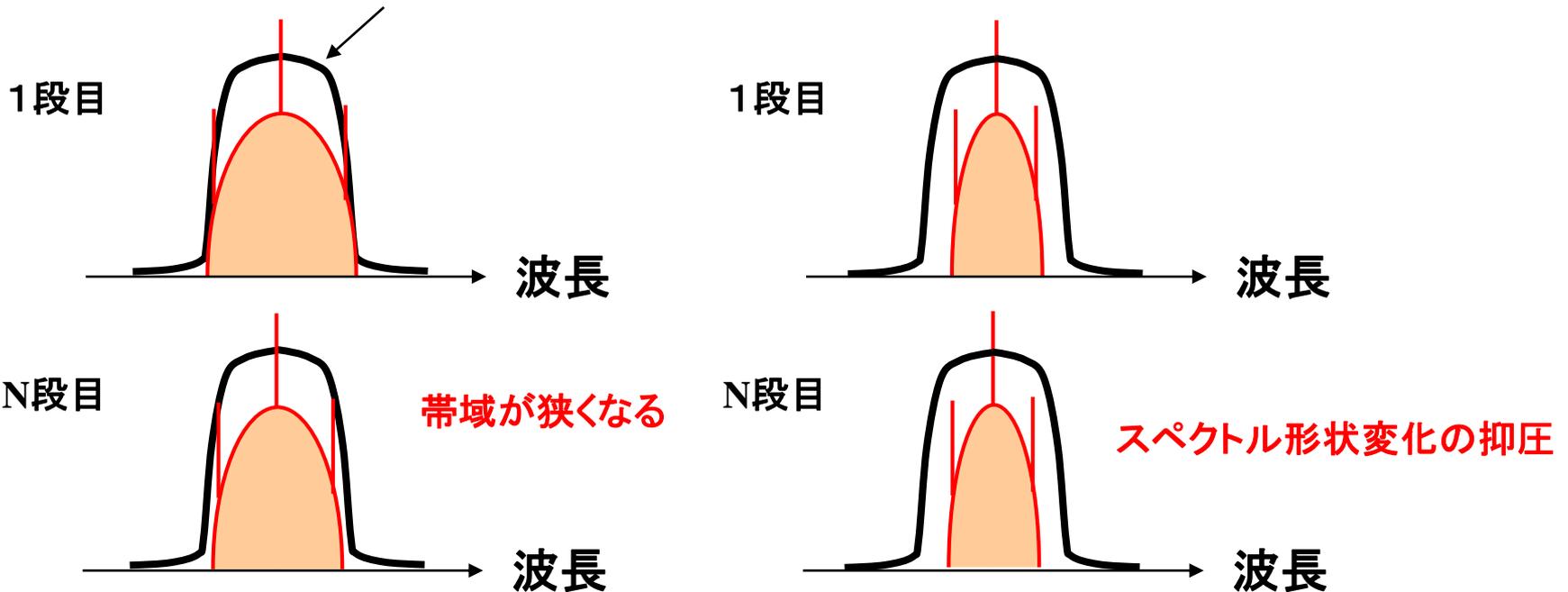


多賀, 鈴木, 波平, 2000年信学会総合大会, SB-8-7 (2000).

波長フィルタ多段透過耐性

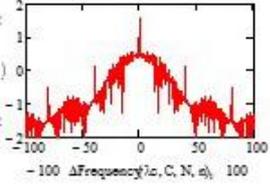
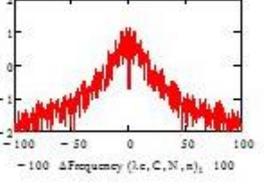
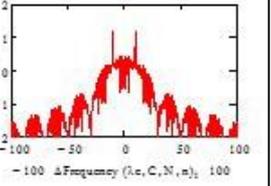
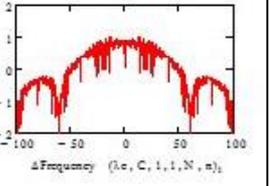
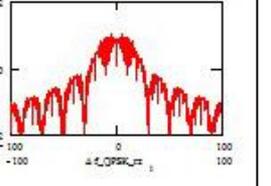
多段フィルタによるスペクトル形状変化・波形劣化
化→**狭帯域スペクトルの変調方式**
(2値: CS-RZ, Duobinary) (多値: DQPSK)

波長フィルタの透過スペクトル



変復調方式の比較(40Gbps以上)

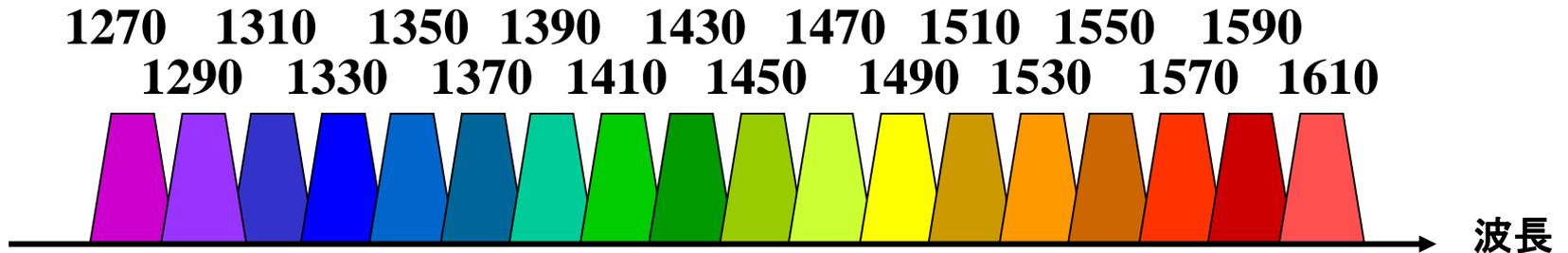
参考文献: 尾中(富士通), NGN時代の光技術・産業懇談会第1回公開討論会資料(2007.5.15)

	NRZ	Duobinary	CS-RZ	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
光スペクトル形状					
光雑音耐力	悪い	悪い	中	非常によい	よい
波長分散耐力	中	よい(線形領域では)	中	中	よい
PMD耐力	悪い	中	中	中	よい
光学非線形耐力	中	悪い	よい	よい	よい
OADMフィルタ透過耐力	よい	非常によい	中	中	非常によい
構成(サイズ/コスト)	小	大	中	大	大

CWDM

CWDMの仕様

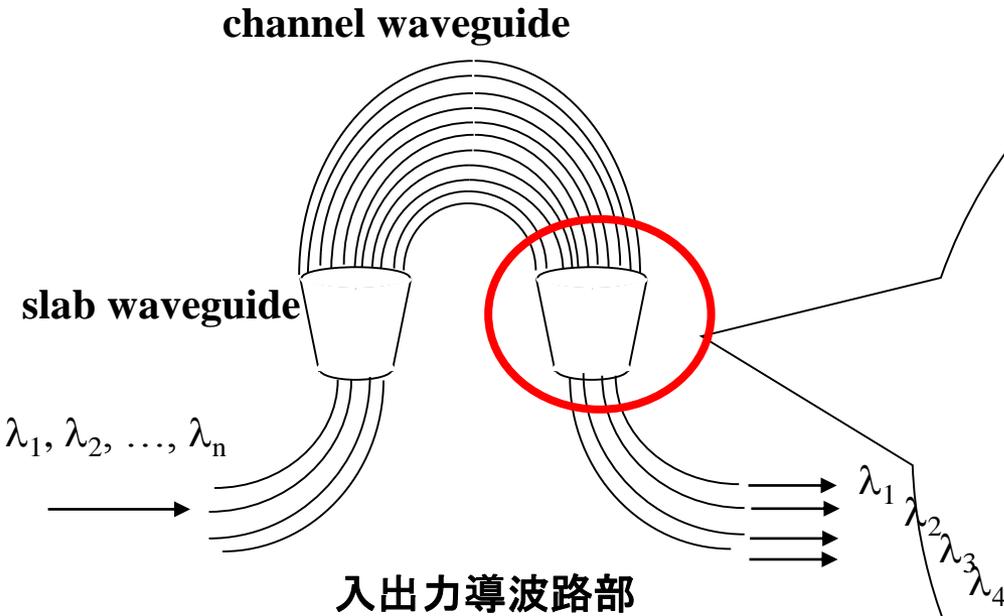
- ・ITU-T G.694.2での標準化
- ・光アンプの使用は想定せず
- ・Uncooledの安価なDFB-LDを使用
- ・現在の製造技術で量産可能なWDMフィルタを使用



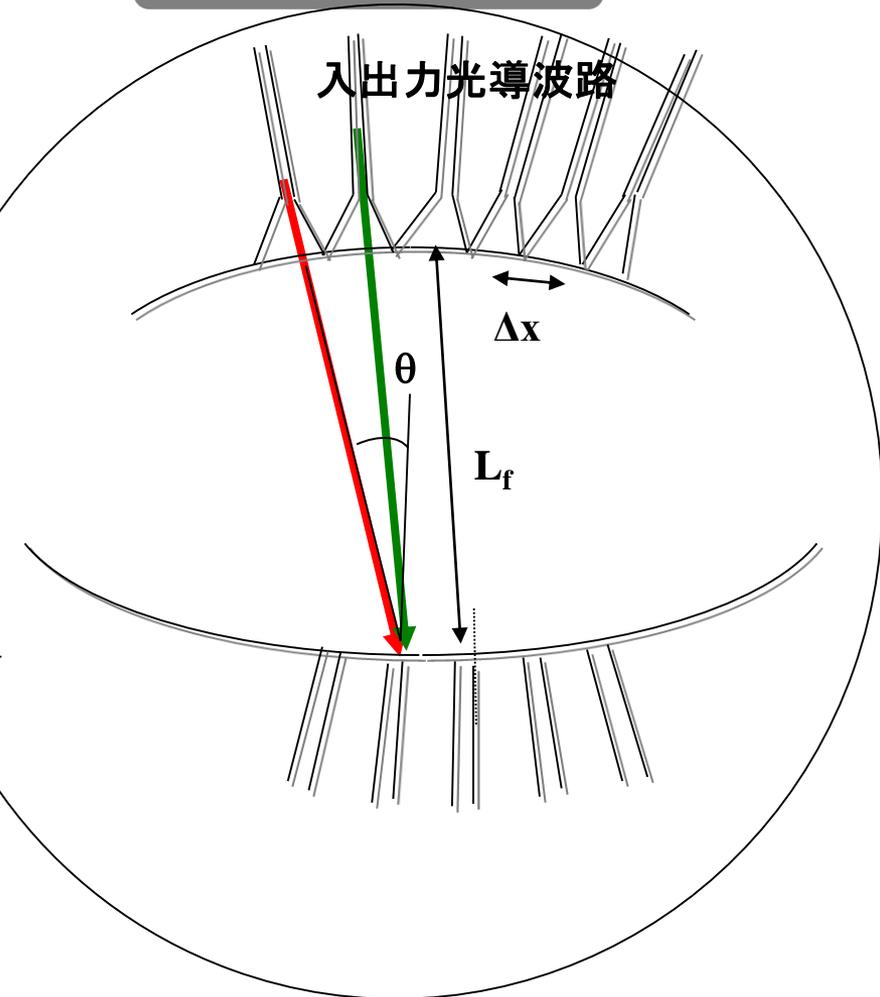
アレイ導波路格子 (AWG)

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

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

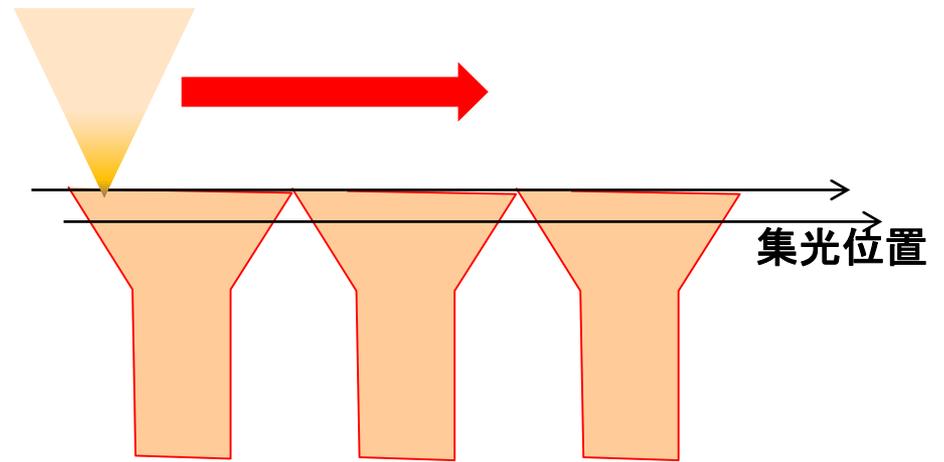
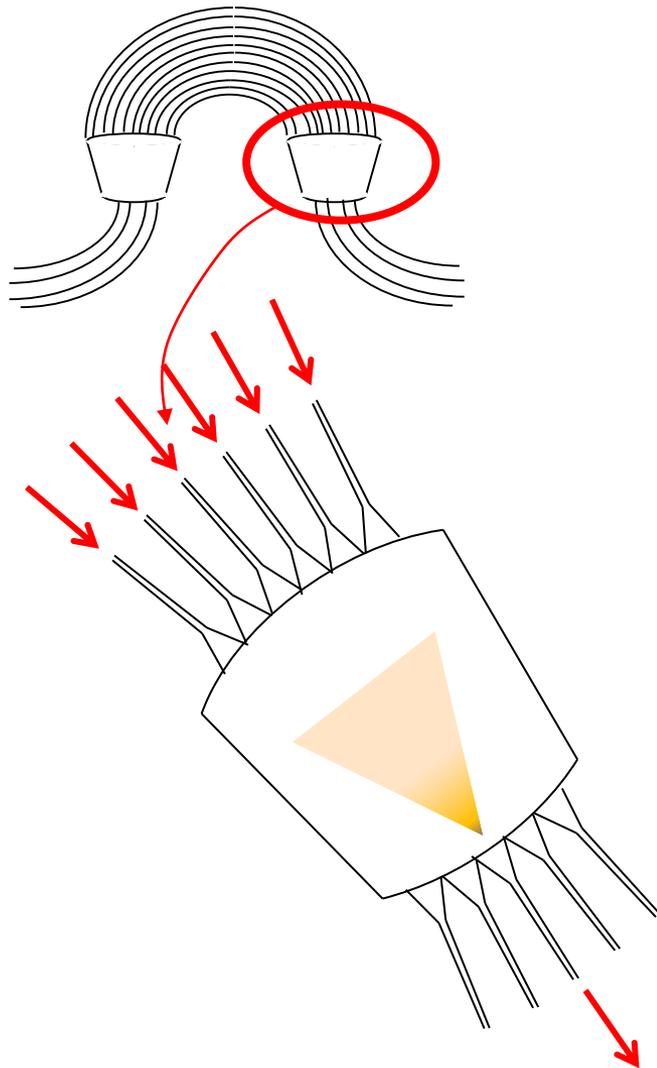
入射側

出射側

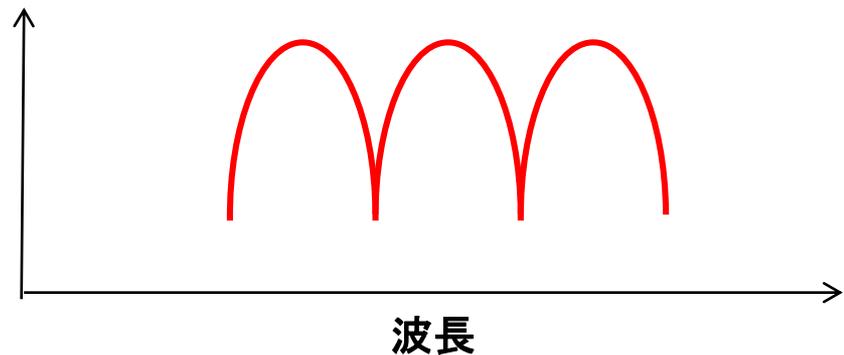
↑
グレーティング部

AWGのガウシアン型透過帯域スペクトル

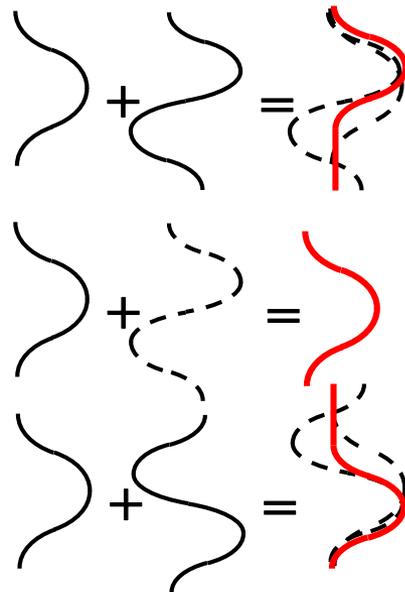
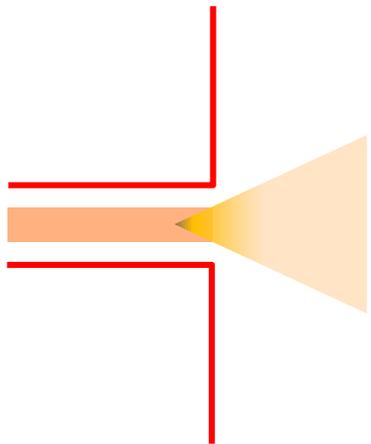
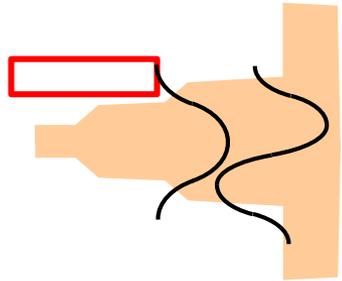
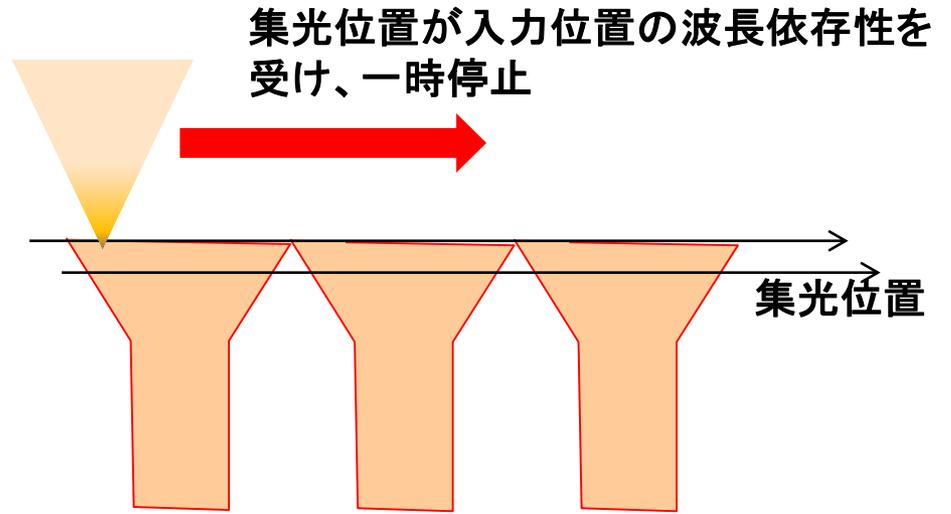
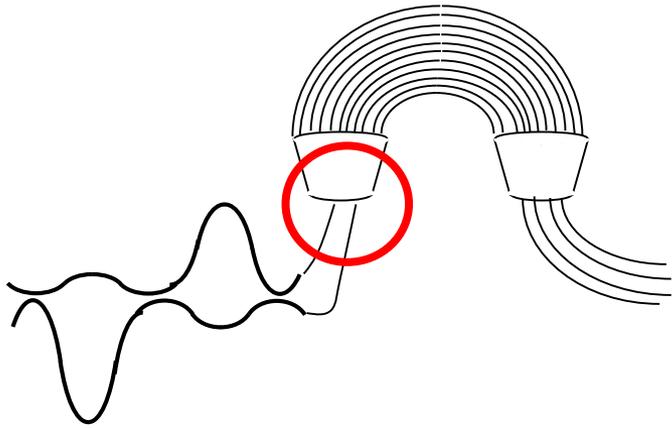
2011年7月29日 平成23年光NW産業・技術研究会第2回公開討論会
高橋浩 『石英平面光波回路の現状と今後の展開』より



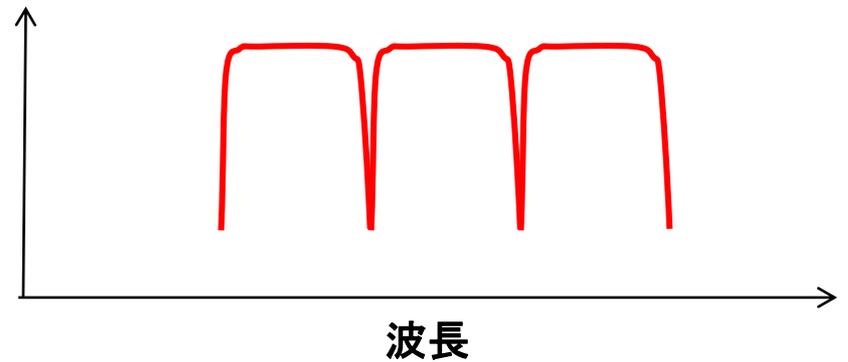
出力導波路群



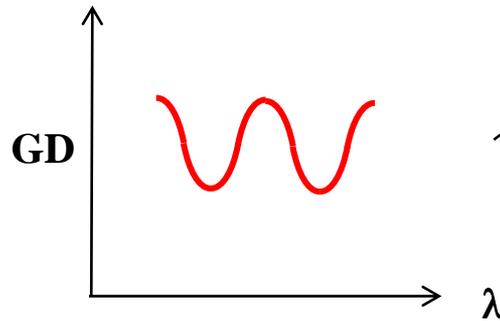
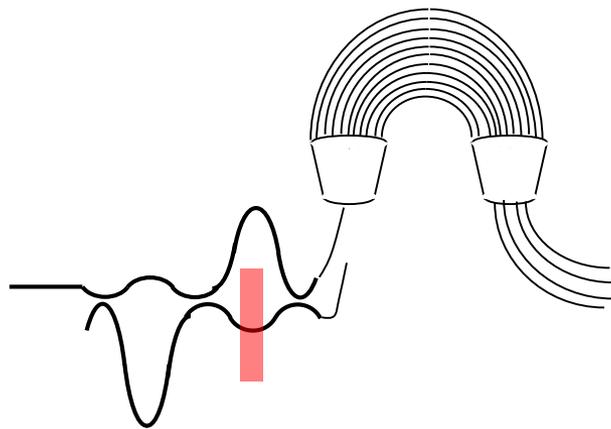
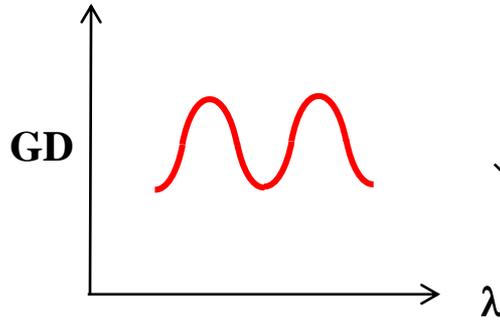
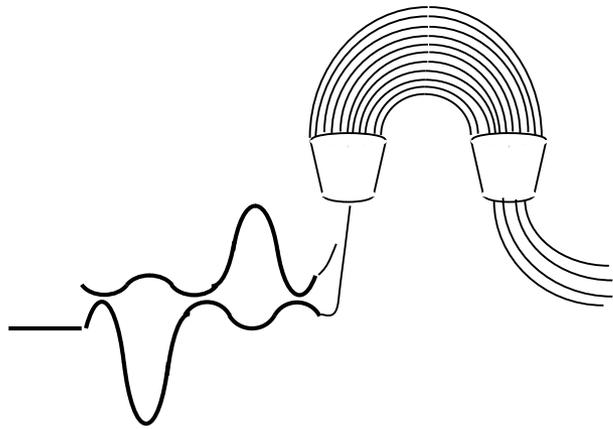
AWG透過スペクトルの高矩形化



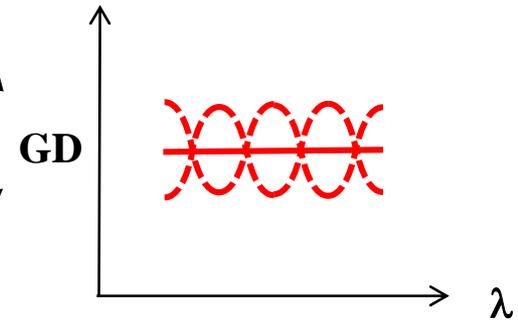
出力導波路群



位相歪解消



合波・分波の合計で
GD平坦化

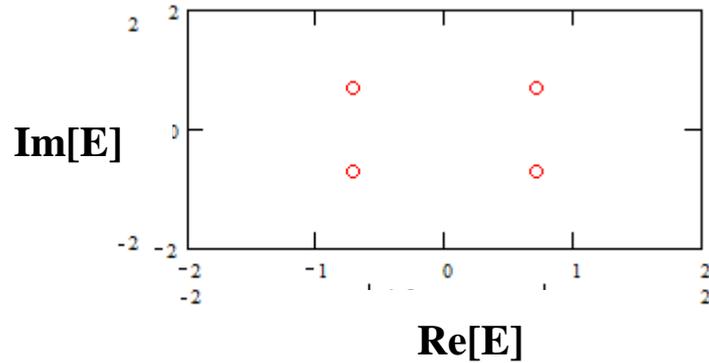


WDM伝送と非線形歪

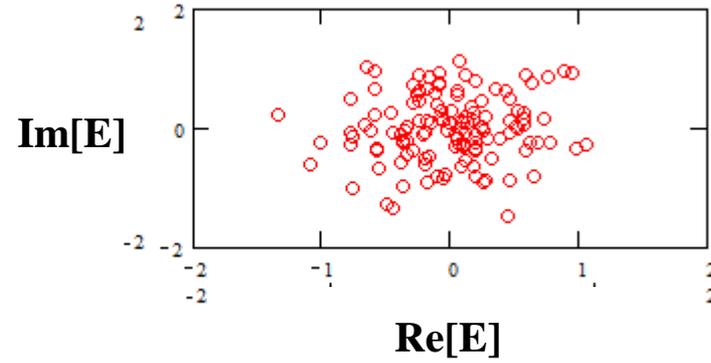
自己位相変調によるコンスタレーション上の変化

40Gbps, RZ-QPSK, SMF伝送距離: 100km, 送信器出力: 0dBm, $n_2=1.22 \times 10^{-22}$ m/V

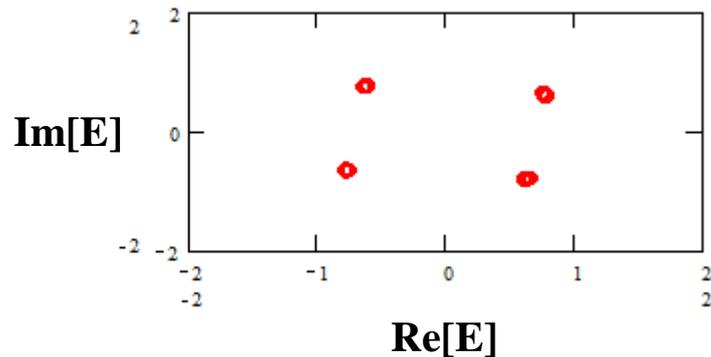
伝送前



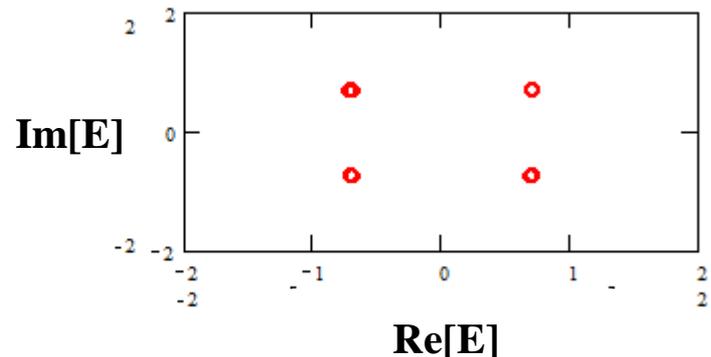
伝送後



線形歪補償のみ



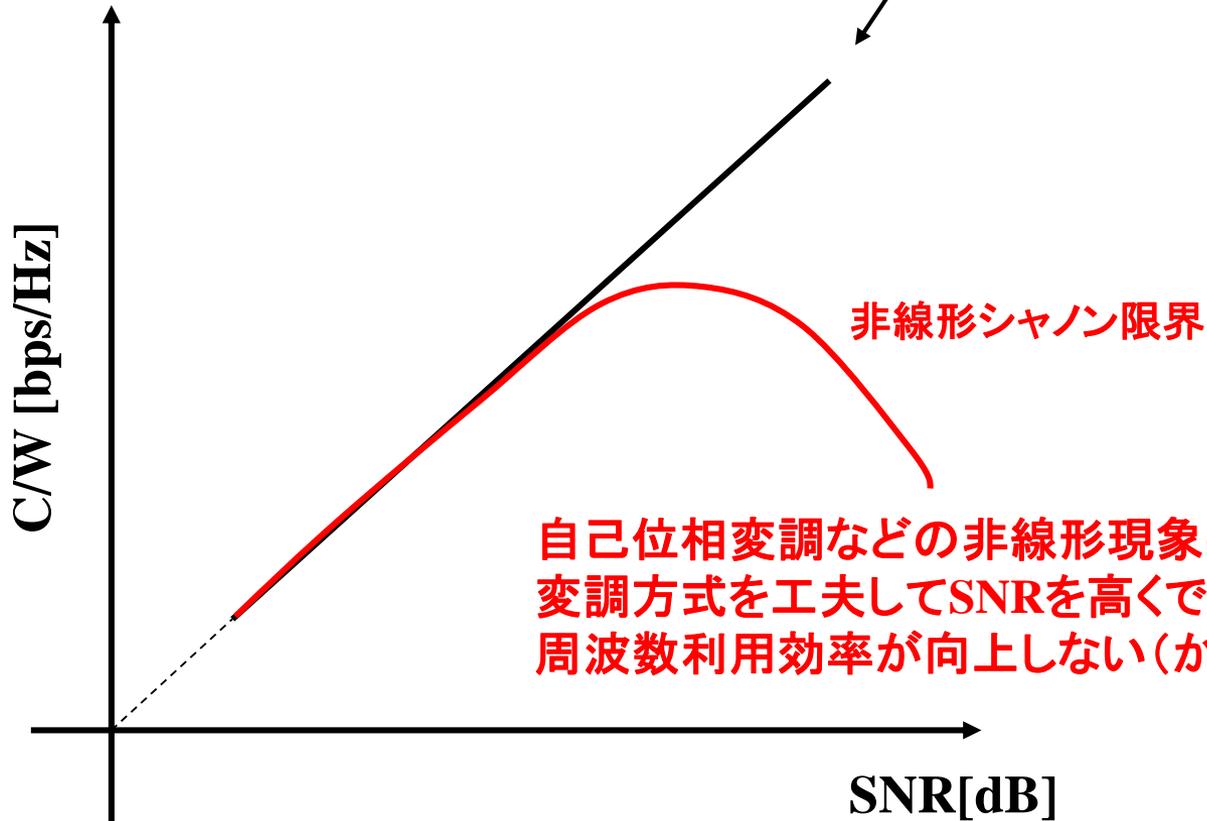
非線形歪補償あり



非線形シャノン限界(1)

SNR $\gg 1$ のとき、

$$\frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \approx \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) = \frac{10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right)}{10 \log_{10} 2}$$



自己位相変調などの非線形現象の影響で
変調方式を工夫してSNRを高くできても
周波数利用効率が向上しない(かえって劣化する！)

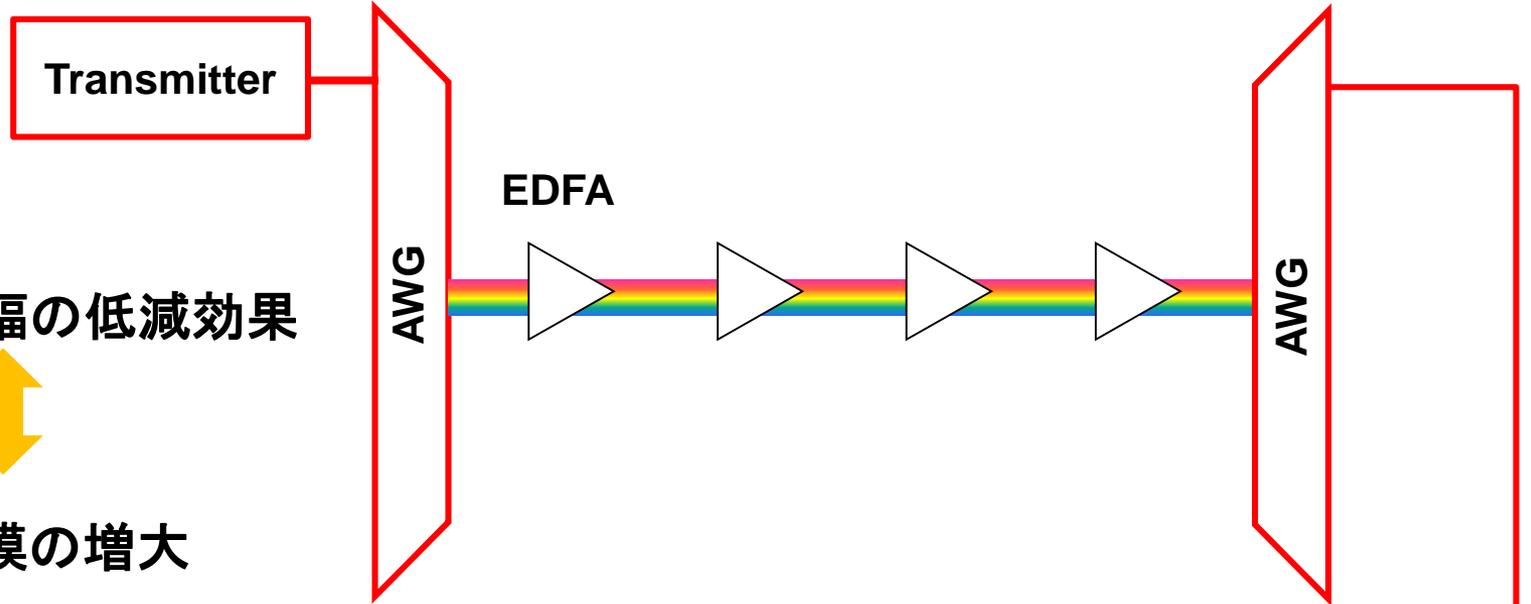
非線形分散補償

DBP: Digital Backward Propagation, デジタル後方伝搬法

● 雑音振幅の低減効果



● 回路規模の増大



Receiver

DSP

Adaptive
Equalizer

ADC

Front-End

LO

