

第3章(続き)

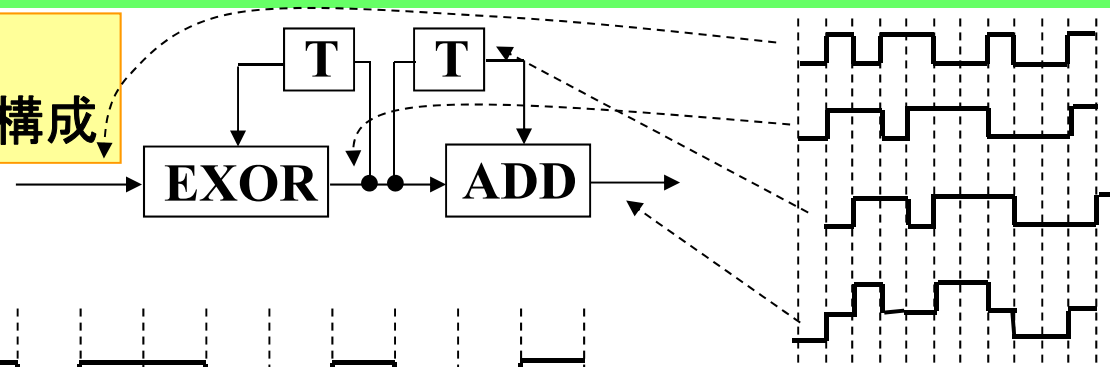
光変復調技術(2)

2011年11月21日(月)

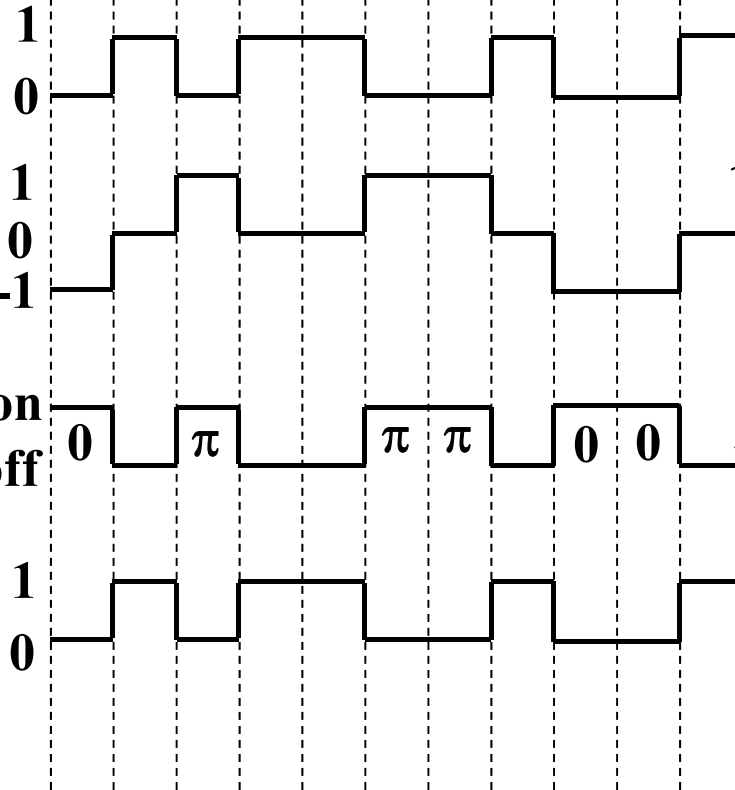
変調符号と変調信号 (バイナリ符号・続き)

光Duo-Binary方式

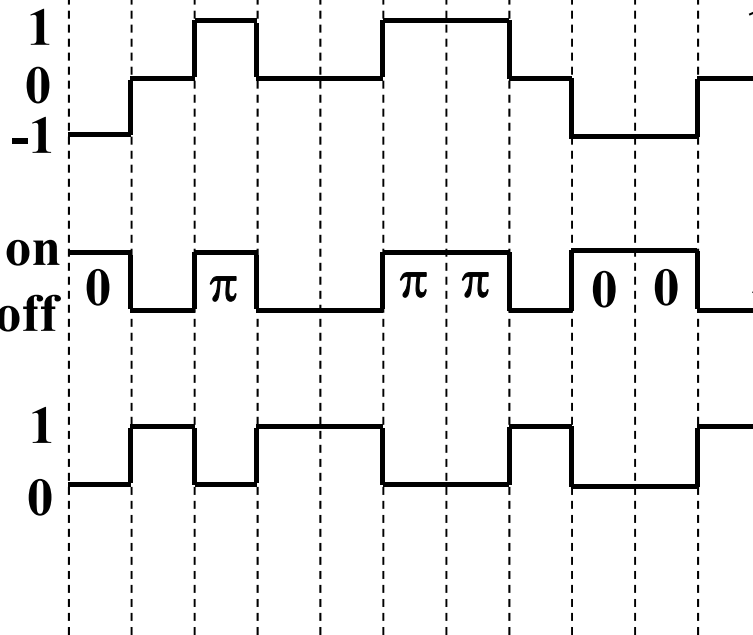
Duobinary
Precoderの構成



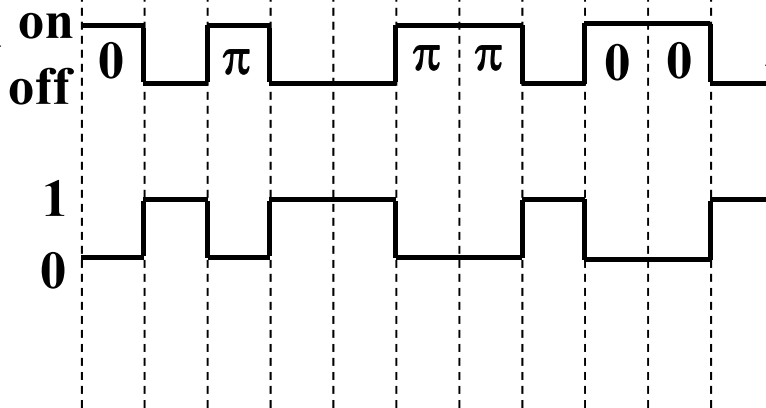
Original
Binary



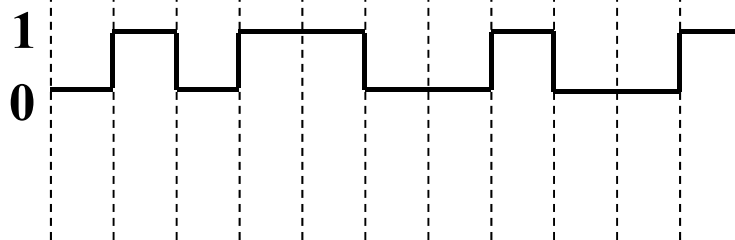
Duobinary
Signal



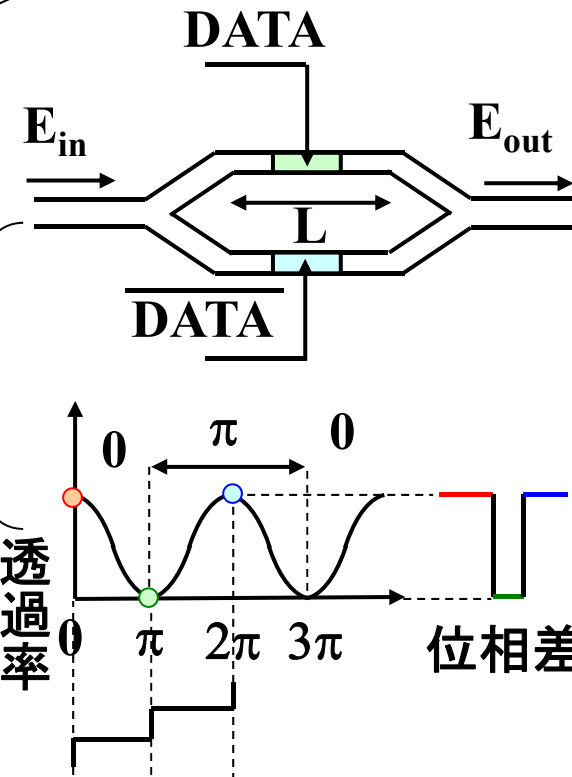
Optical
Duobinary
Signal



Receiver
Output

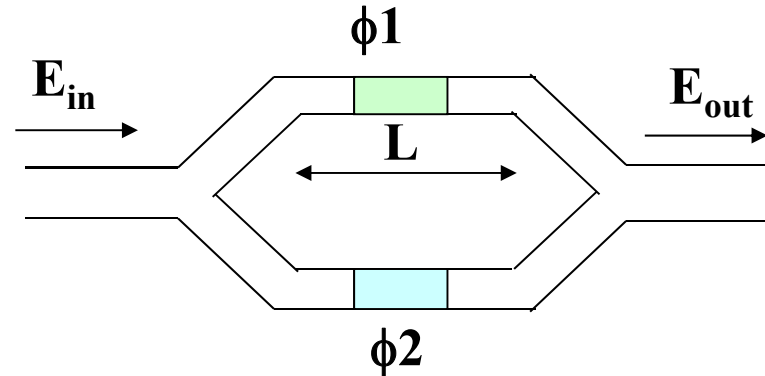


反転



各変調方式の光パルス生成手法(1)

1台のマッハツェンダー型光変調器での生成方法



マッハツェンダー型光変調器における電界の入出力の関係

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \exp\left(j\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right) \\ \phi_1 = \frac{\pi}{2} \frac{V_1}{V_\pi} [\sin(\omega t + \Psi)] + V_{bias1} \\ \phi_2 = \frac{\pi}{2} \frac{V_2}{V_\pi} \sin(\omega t) + V_{bias2} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

各変調方式の光パルス生成手法(2)

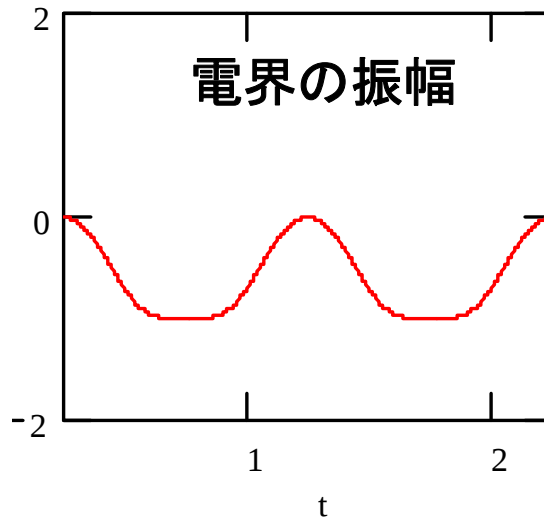
変調方式	CS-RZ	RZ	SSB-RZ	Duobinary
駆動条件	$V_1=V_2=V_\pi$ $\Psi=\pi$ $V_{\text{bias1}}=V_{\text{bias2}}=0$ $\omega=\omega_1=2\pi f_0/2$	$V_1=V_2=V_\pi/2$ $\Psi=\pi$ $V_{\text{bias1}}=\pi/2$ $V_{\text{bias2}}=0$ $\omega=\omega_0=2\pi f_0$	$V_1=V_2=V_\pi/\sqrt{2}$ $\Psi=\pi/2$ $V_{\text{bias1}}=\pi/2$ $V_{\text{bias2}}=0$ $\omega=\omega_0=2\pi f_0$	$V_1=V_2=V_\pi$ $\Psi=\pi$ $V_{\text{bias1}}=V_{\text{bias2}}=\pi$ $\omega=\omega_0=2\pi f_0/2$
位相状態	・位相項一定 ・$f_0/2$周波数で交互に位相反転	・位相項一定 ・f_0周波数の光パルス	・f_0周波数の光パルスにビット同期して位相変調	・位相項一定 ・$f_0/2$周波数で交互に位相反転

RZ方式

$$E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \exp(j\frac{\pi}{4}) \sin(\frac{\pi}{4} \sin \omega_0 t - \frac{\pi}{4})$$

Amplitude

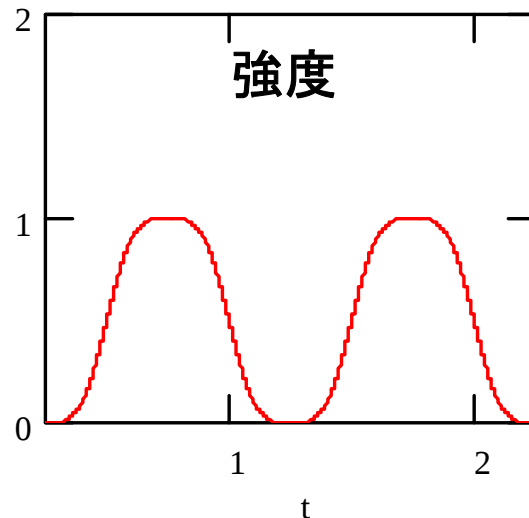
$\text{Erz}(1, t)$



Time

Intensity

$(|\text{Erz}(1, t)|)^2$

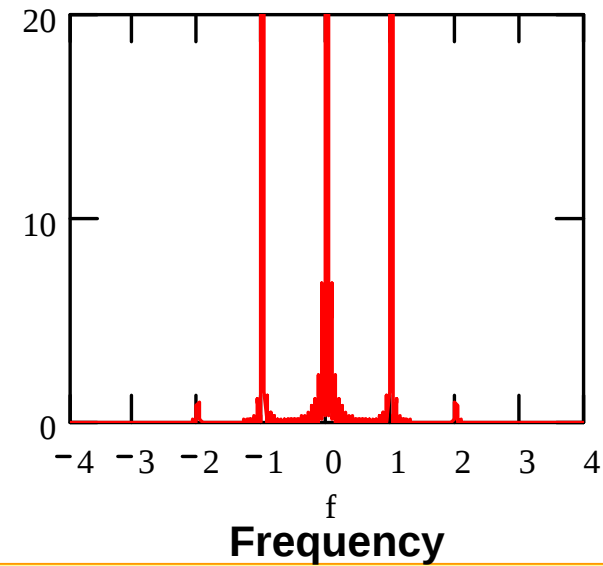


Time

フーリエ変換スペクトル

Intensity

$(|\text{Erz}(f)|)^2$

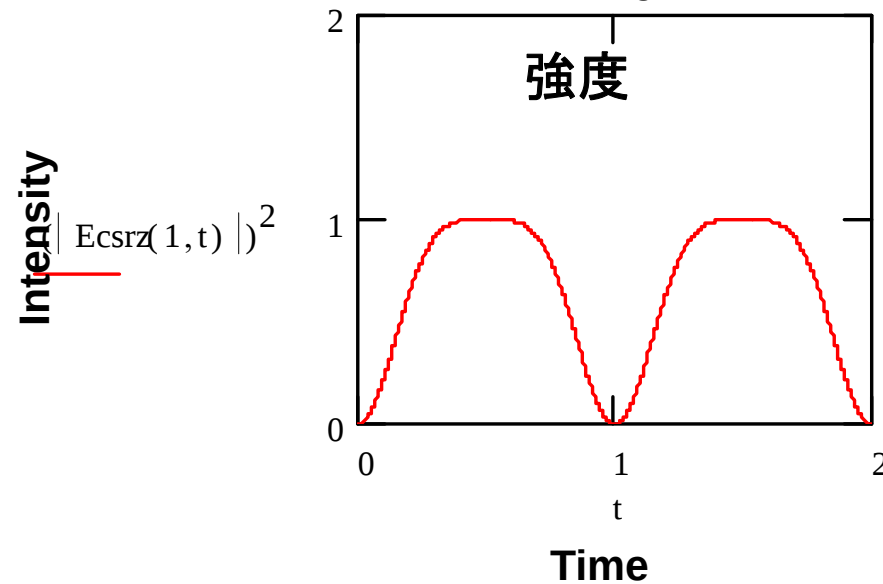
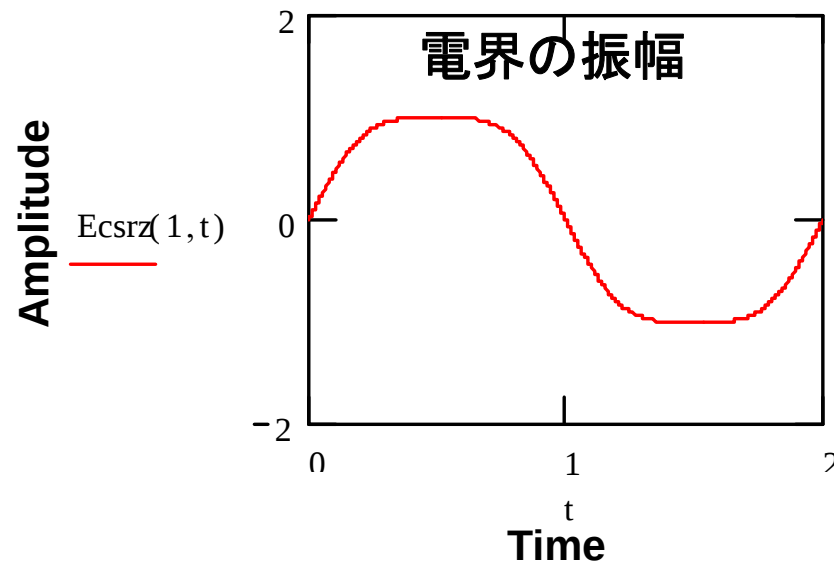


- ・変調周波数 f_0 (図中では1に相当)
- ・各パルスの位相は同相
- ・搬送波成分を中心に $\pm f_0$ の側波帯間隔

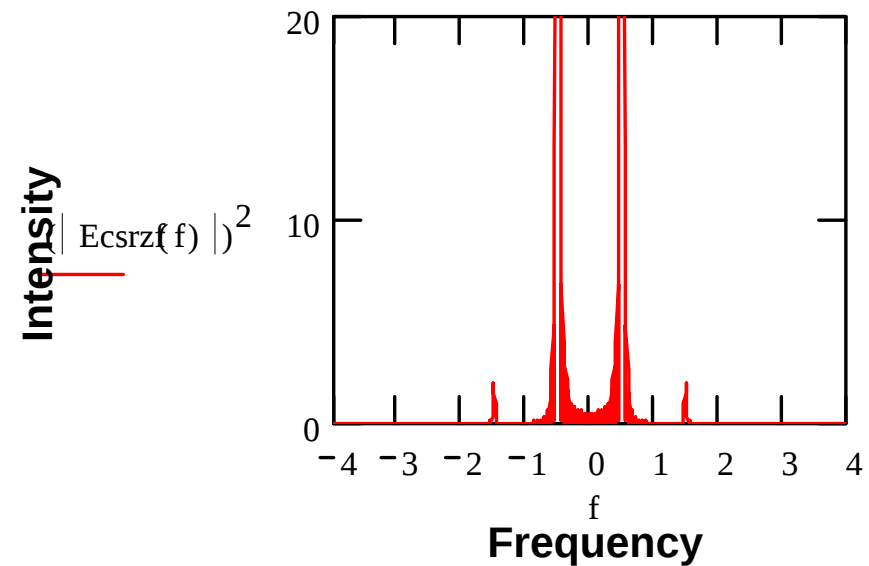
CS-RZ方式

$$E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \sin\left(\frac{\pi}{2} \sin \omega_1 t\right)$$

($\omega_1 = \omega_0/2$)



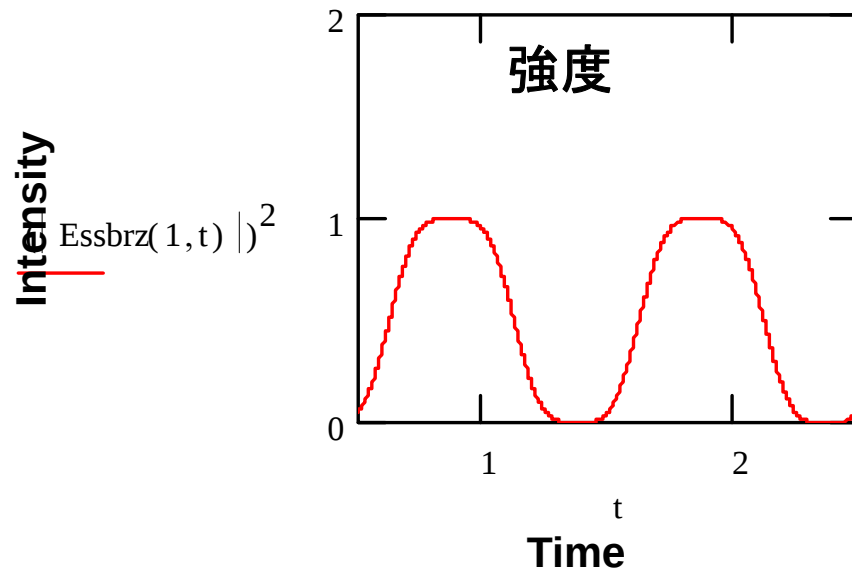
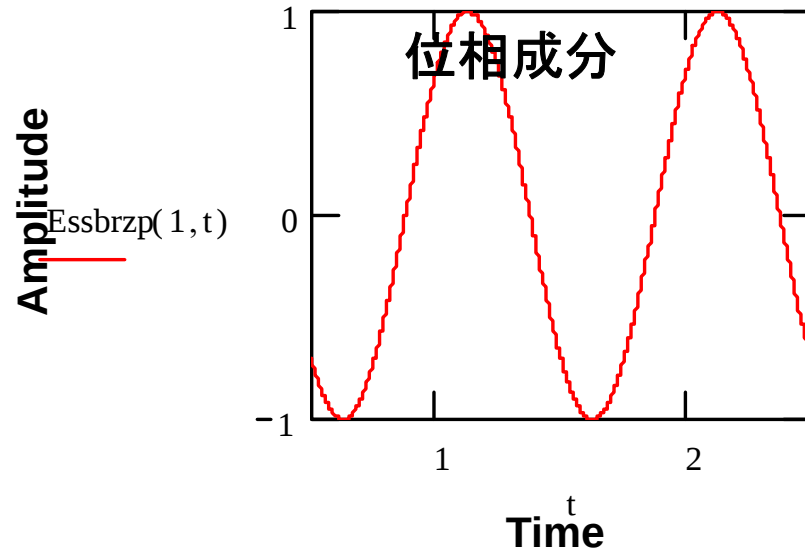
フーリエ変換スペクトル



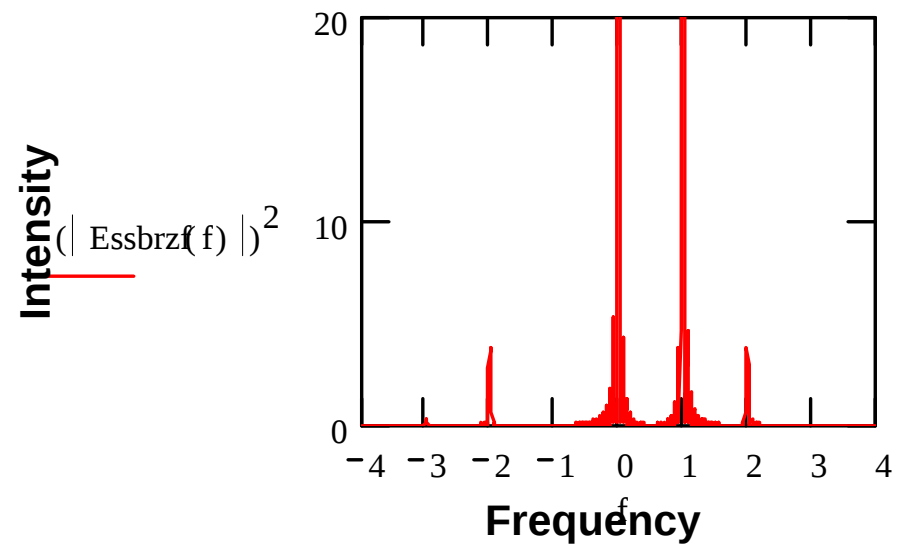
- ・時間周波数 f_0 (図中では1に相当)
- ・隣接パルスの位相は逆相
- ・搬送波成分抑圧、 f_0 の側波帯間隔

SSB-RZ方式

$$E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \exp(j\frac{\pi}{4}) \sin\{\frac{\pi}{4} \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{4}) - \frac{\pi}{4}\} \\ \times \exp\{j\frac{\pi}{4} \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{4})\}$$



フーリエ変換スペクトル



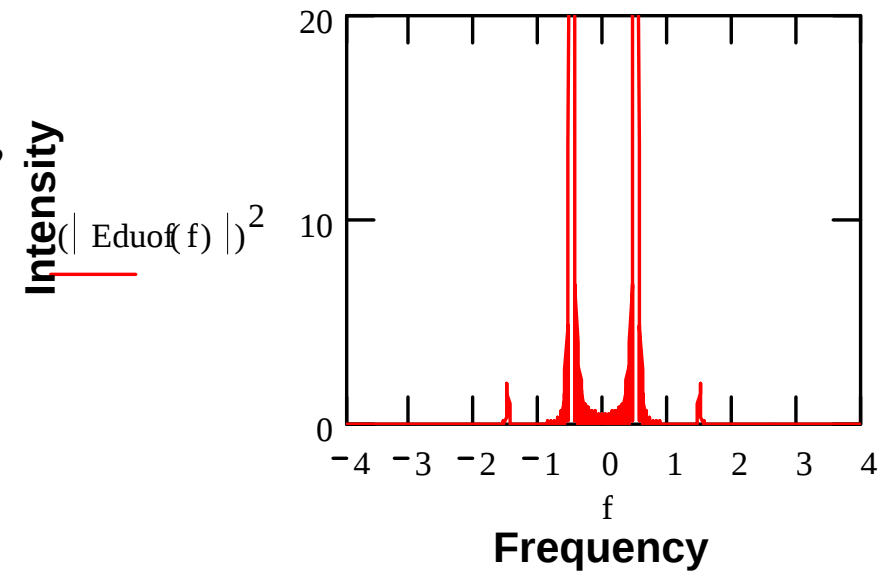
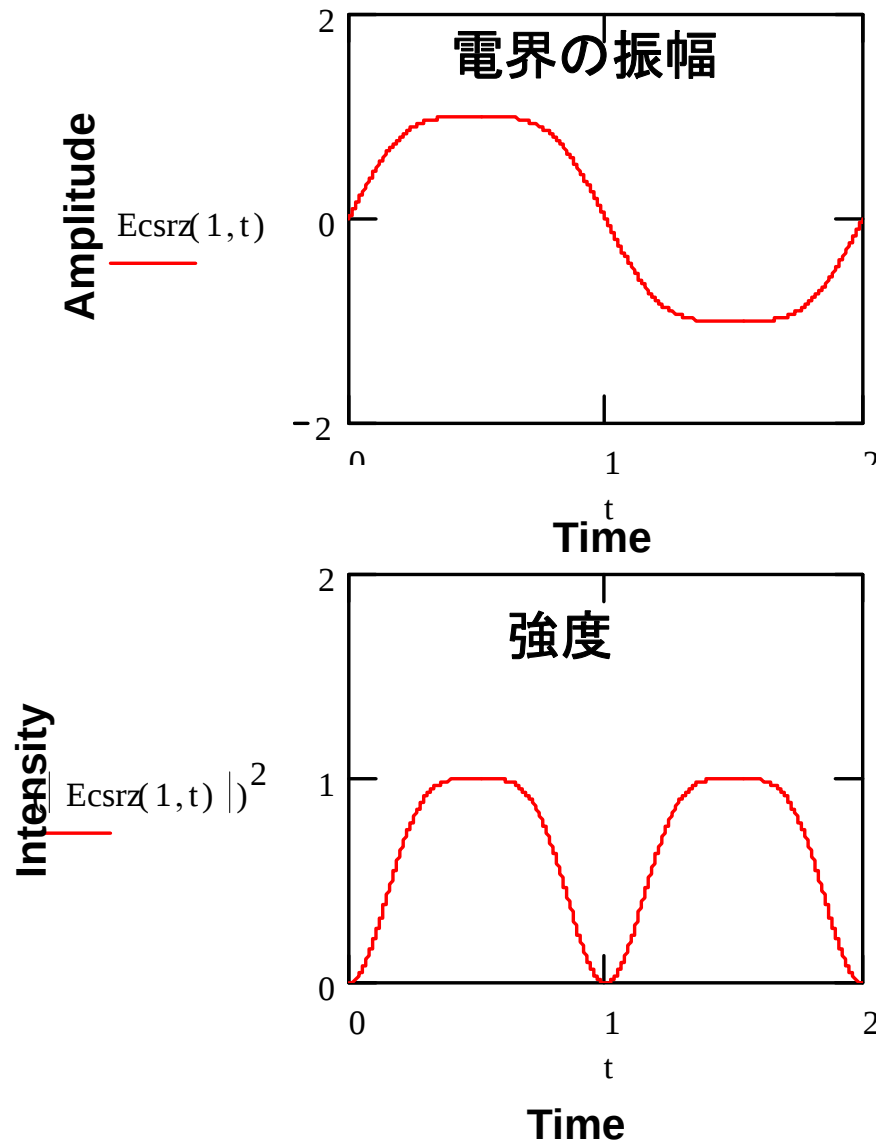
- ・変調周波数 f_0 (図中では1に相当)
- ・各パルスに同期して位相変調
- ・片側側波帯が抑圧

光デュオバイナリ信号のスペクトル

$$E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \sin\left(\frac{\pi}{2} \sin \omega_1 t\right)$$

$$(\omega_1 = \omega_0/2)$$

フーリエ変換スペクトル

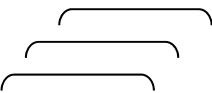
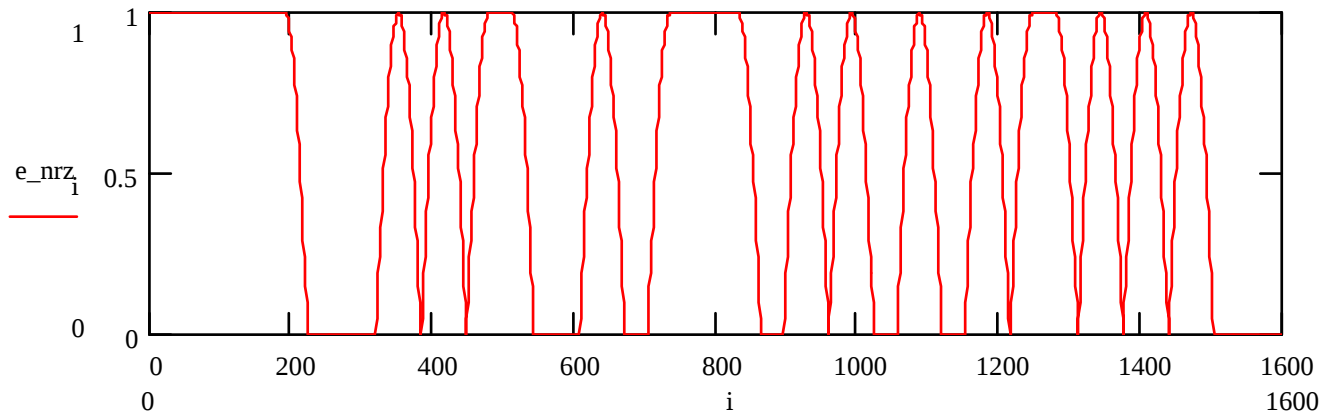


・CS-RZ方式と類似

M系列(Maximal-length linear shift register sequences, M-sequences)とは？

- 擬似ランダム符号(Pseudo random code, PN code)の一種
- 符号長 m のM系列の周期: $2^m - 1$

符号長7のM系列の解析例



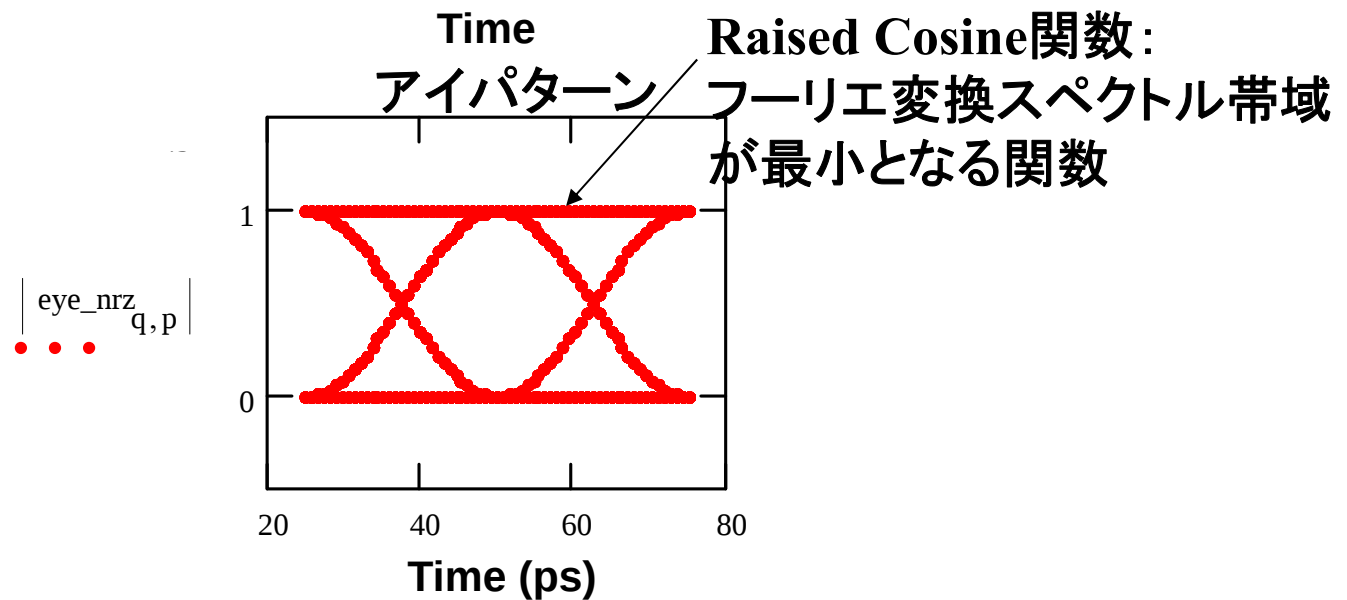
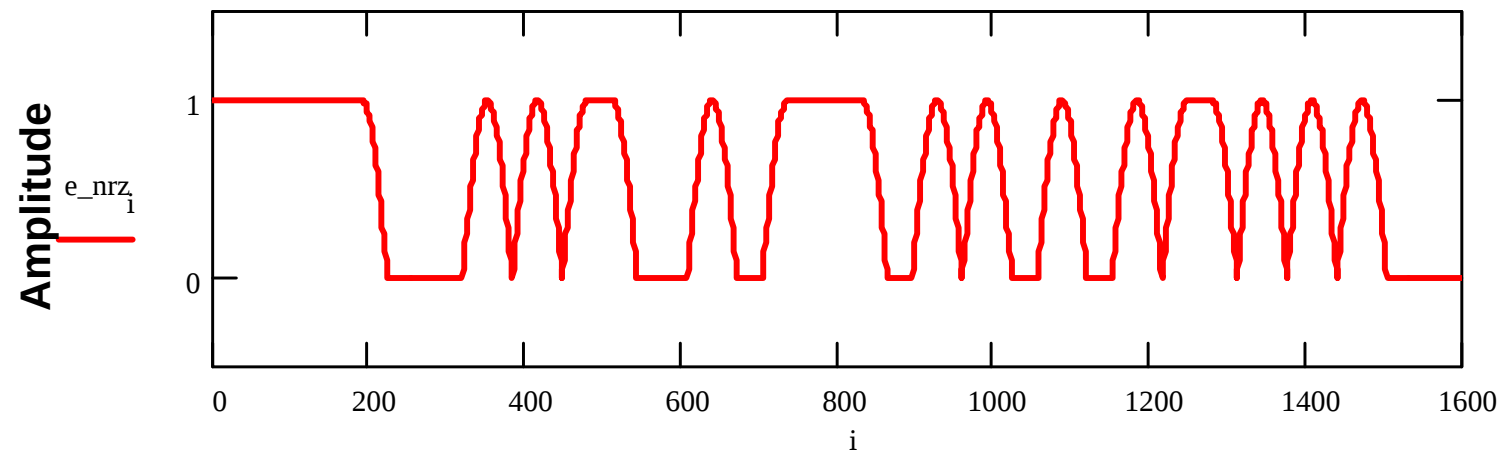
1111111000010101100010011110010100100101101010100000110010000111010111001110001
1011001100000010001111101001101000101111011011101

1ビットずつずらして見た7ビットの符号がすべて異なる(all 0以外すべてを含み、各符号は1回のみ出現)

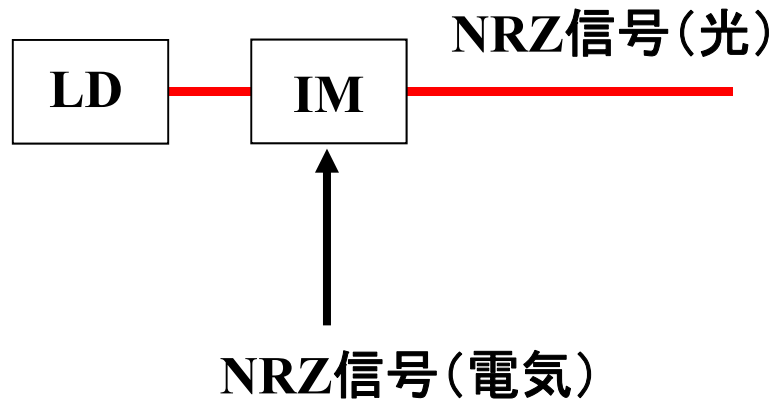
NRZ符号(符号長7のM系列)(1)

計算の参考:『Mathcadによる光システムの基礎』 小関 健, 原田一成 共著, 森北出版

時間波形(電界振幅)

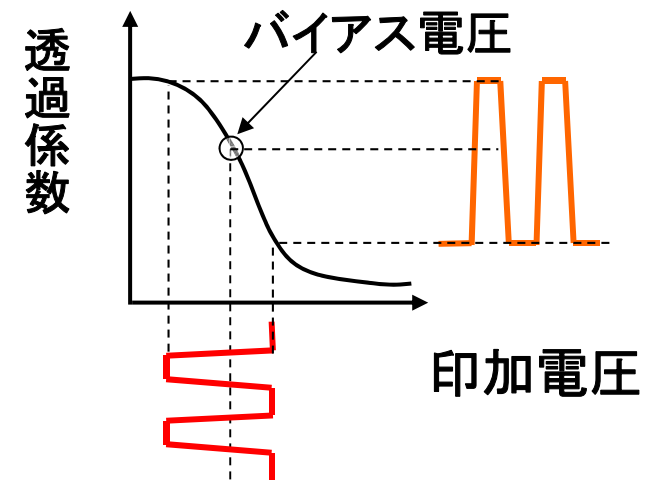
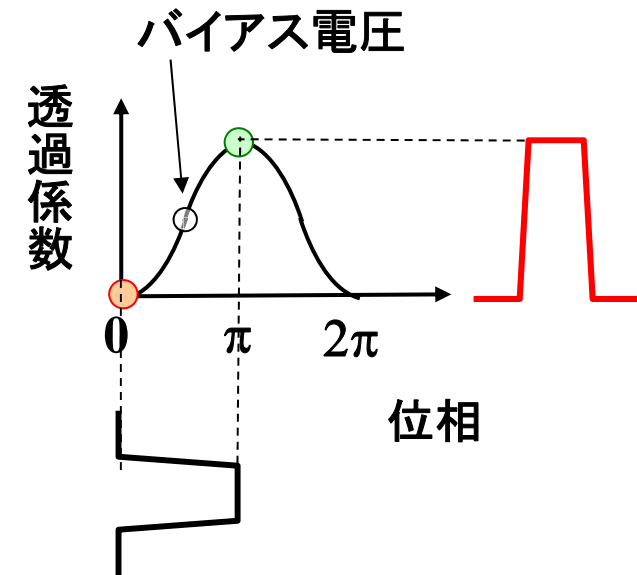


送信器構成

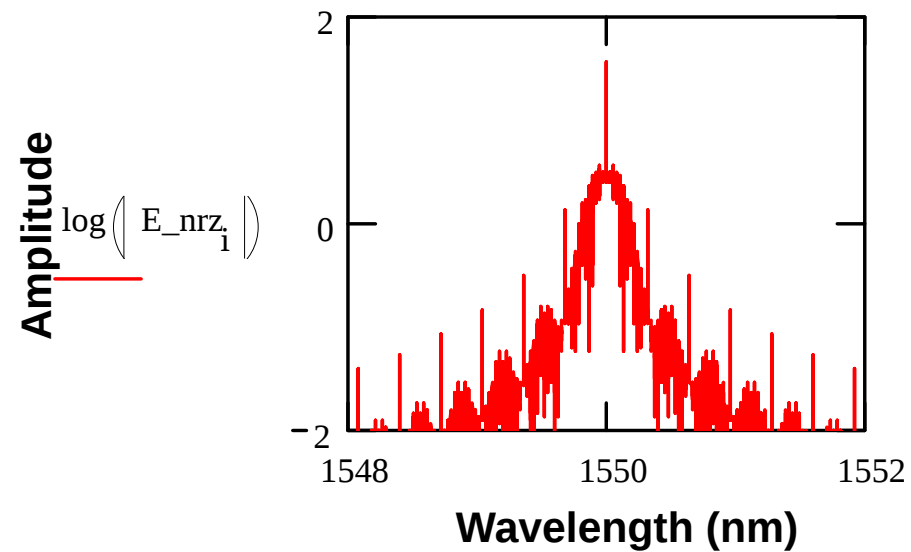


IM: Intensity Modulator (強度変調器)

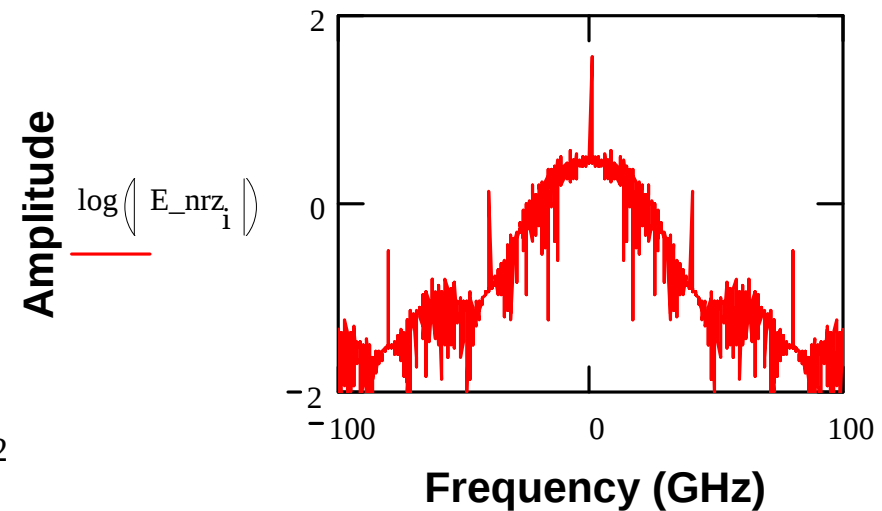
LiNbO₃



フーリエ変換(波長軸)

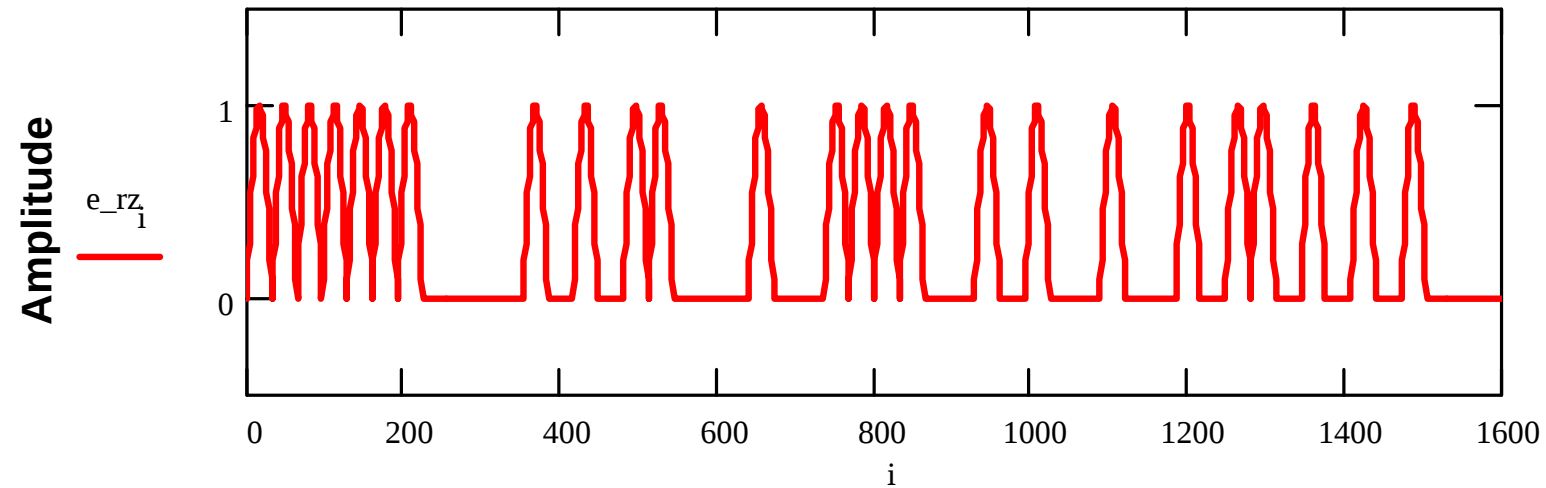


フーリエ変換(周波数軸)

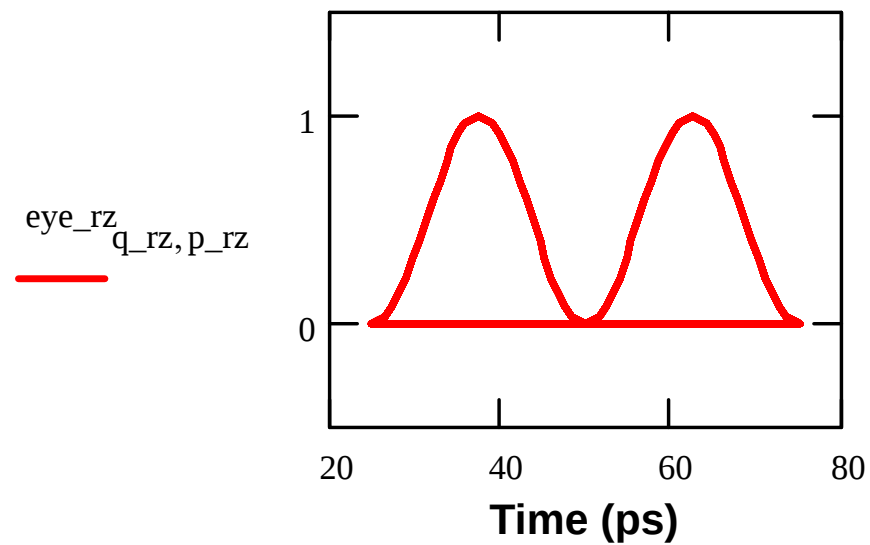


RZ符号(符号長7のM系列)(1)

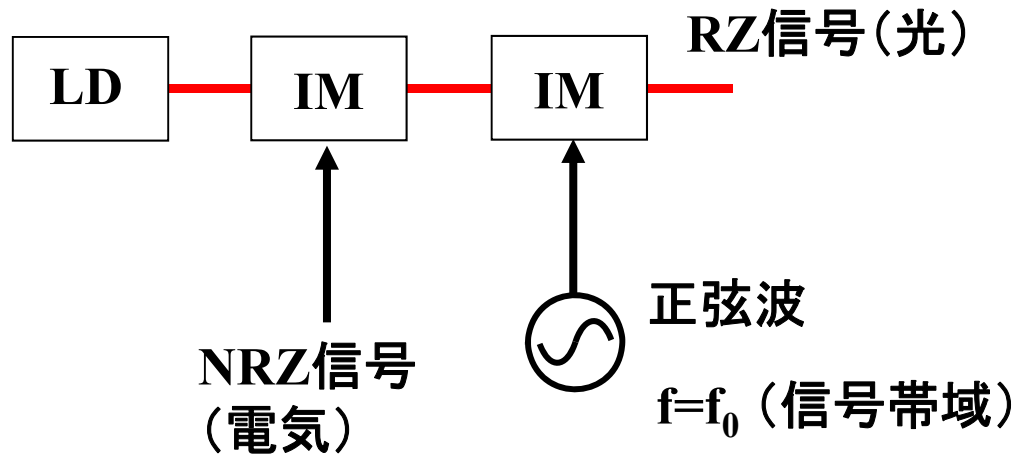
時間波形(電界振幅)



アイパターン

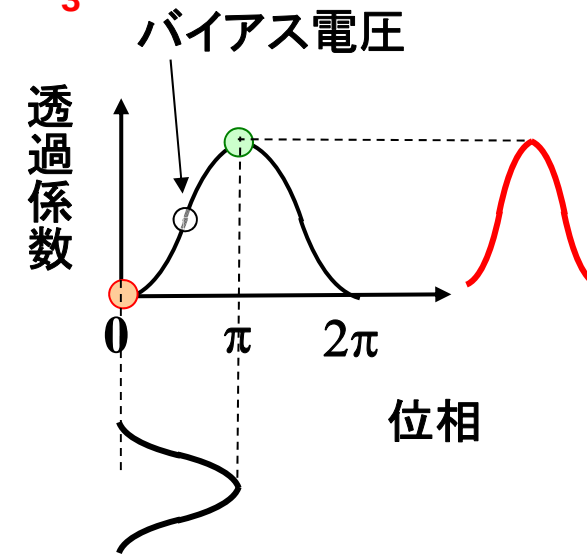


送信器構成

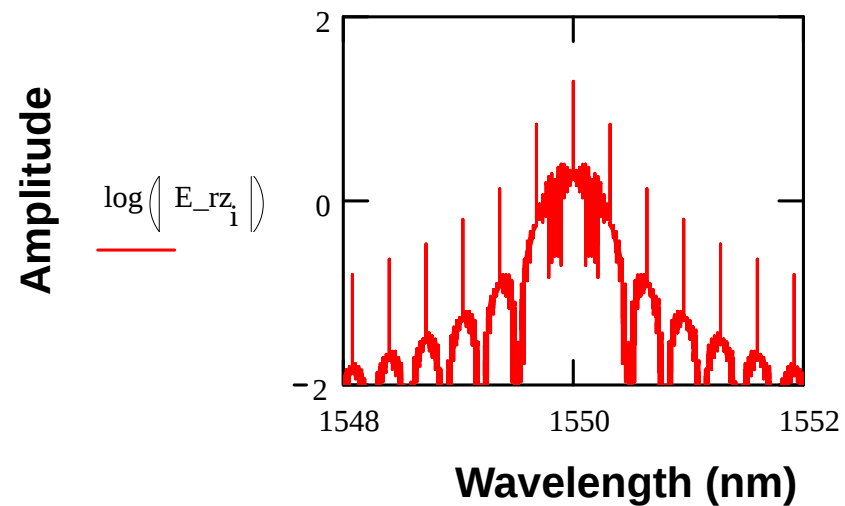


IM: Intensity Modulator (強度変調器)

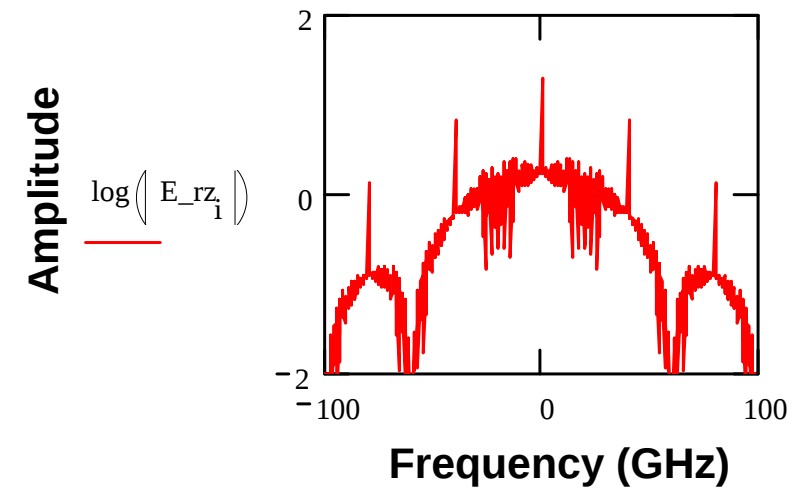
LiNbO_3



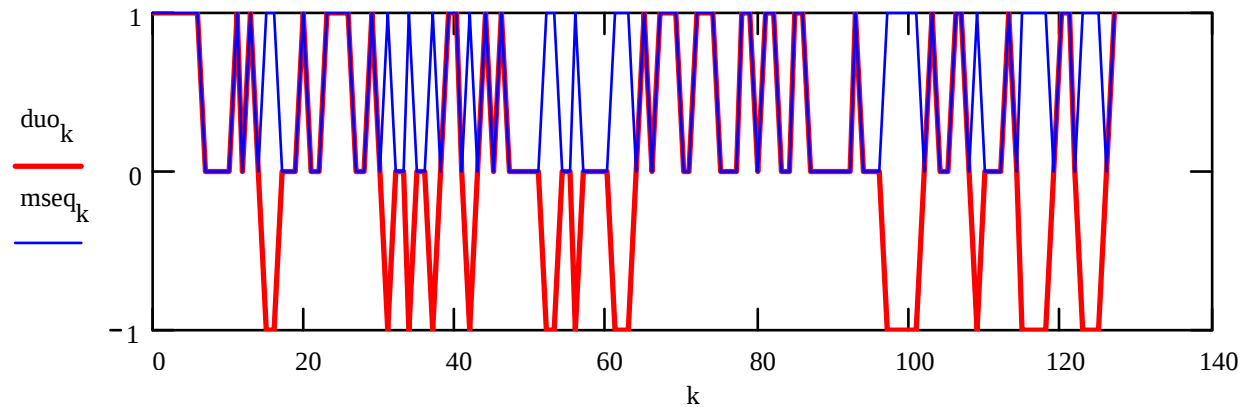
フーリエ変換(波長軸)



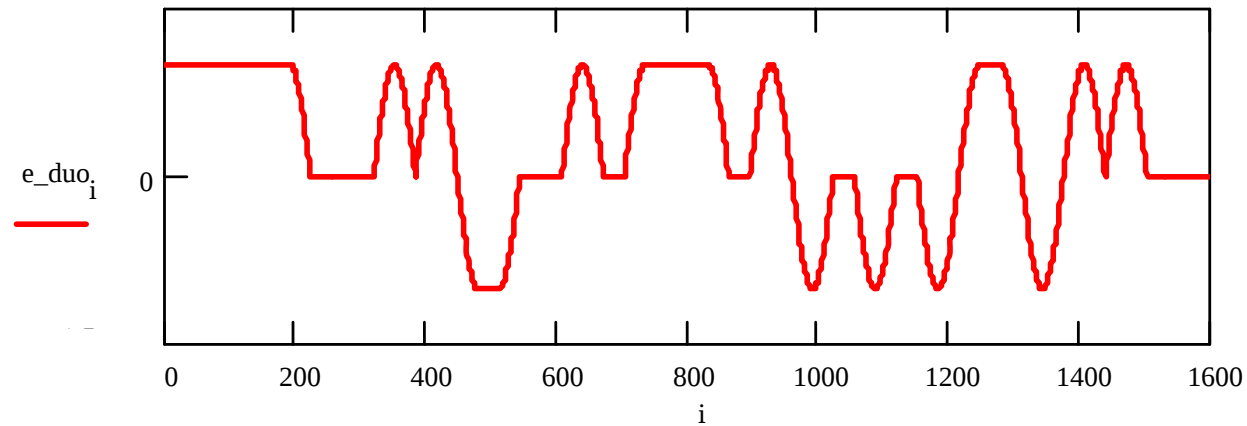
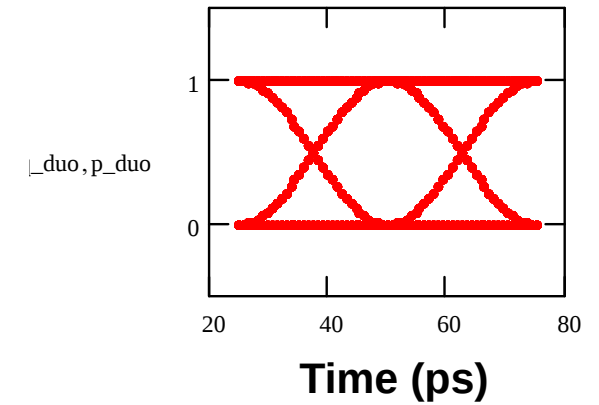
フーリエ変換(周波数軸)



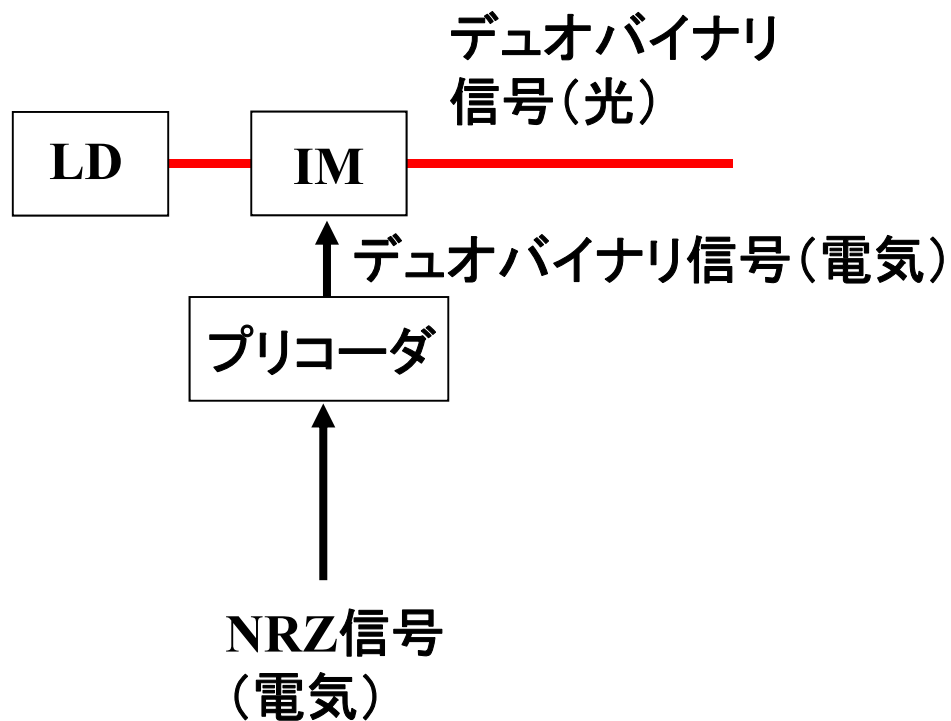
時間波形(電界振幅)



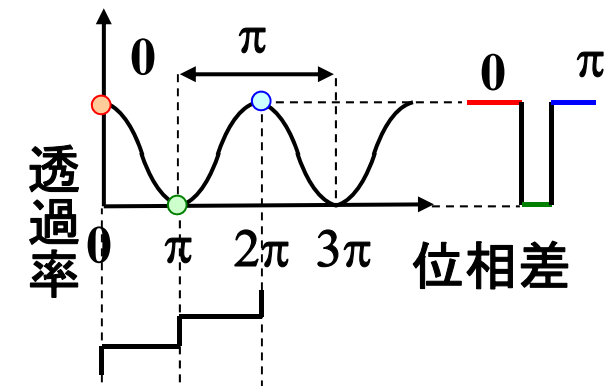
アイパターン



送信器構成

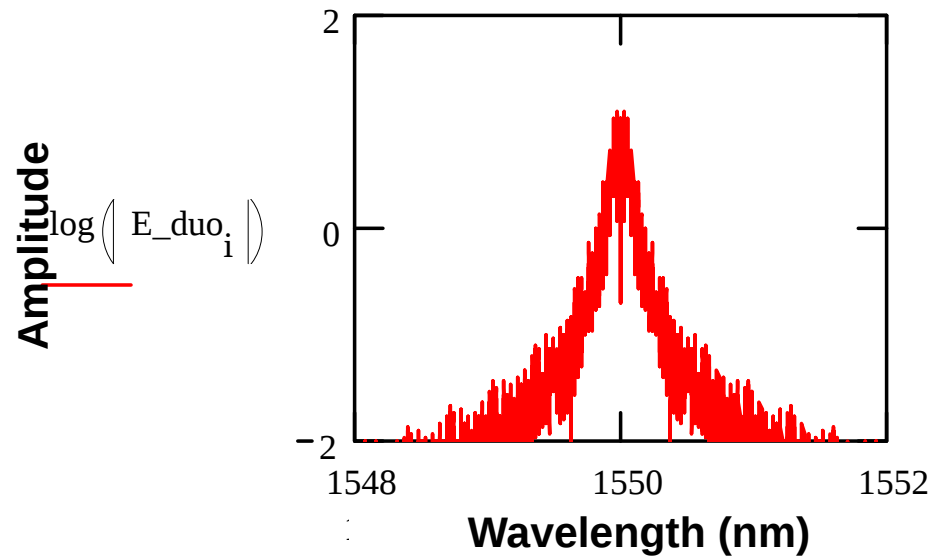


LiNbO₃

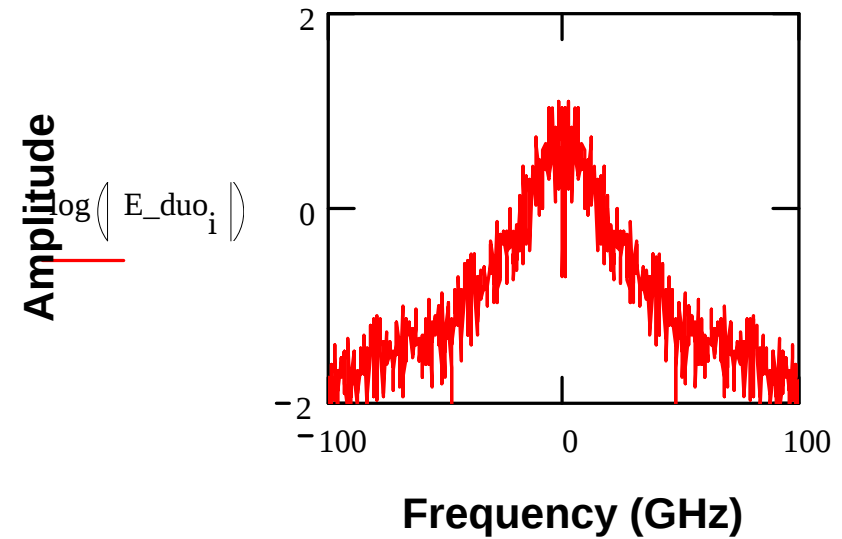


IM: Intensity Modulator (強度変調器)

フーリエ変換(波長軸)

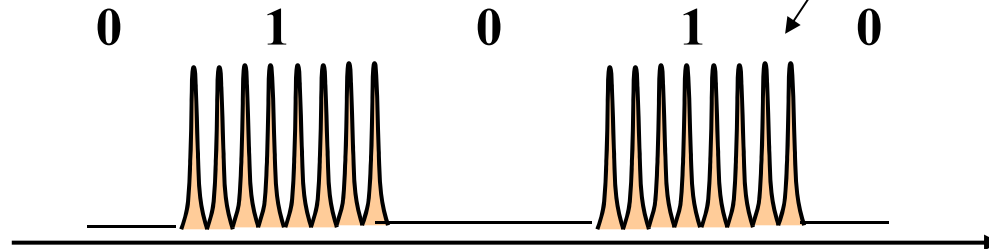


フーリエ変換(周波数軸)



コヒーレント検波の変調方式

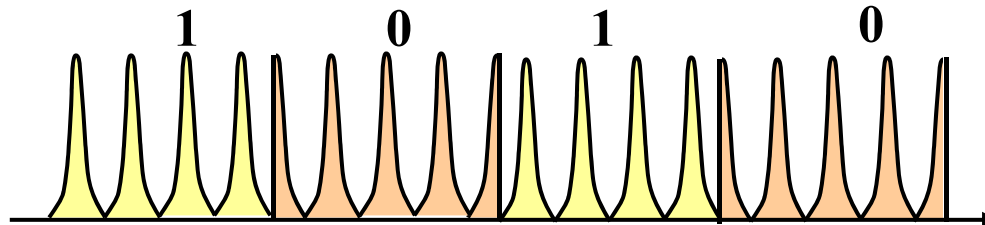
ASK (Amplitude Shift Keying)



振動波形は光の波長レベルでの振動

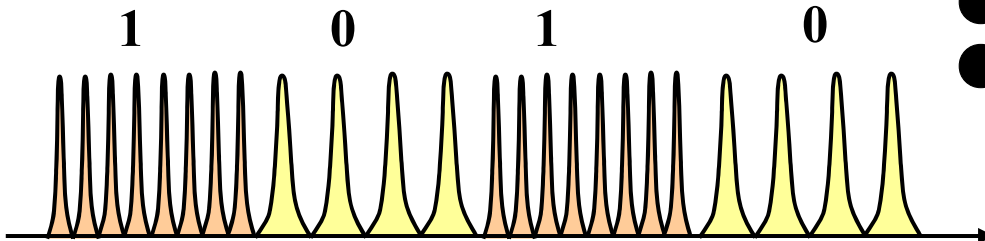
- 振幅の有無にビットを対応
- 振幅の大きさで多値化
(4ASK : 4値の場合
→ 2^2 なので2ビット1シンボル)

PSK (Phase Shift Keying)



- 位相の変化にビットを対応
- 位相の位置で多値化
(QPSK : $0, \pi/2, \pi, 3/2\pi$)

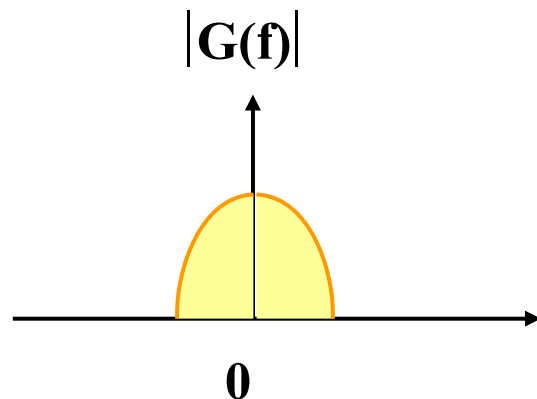
FSK (Frequency Shift Keying)



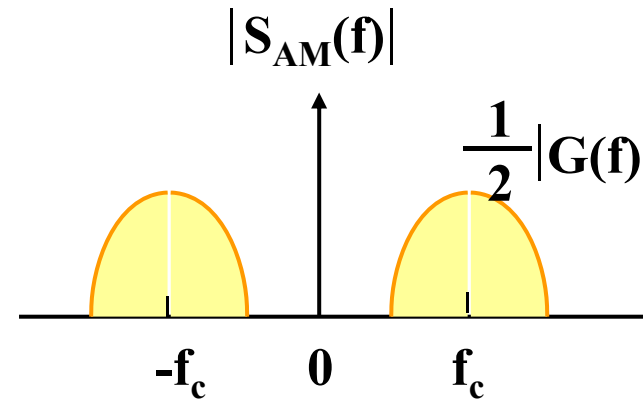
- 周波数の変化にビットを対応
- 周波数の大きさで多値化

ASK(振幅変調)の変調信号(1)

ベースバンド信号



振幅変調波



変調波の一般表現

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

振幅変調では $A(t) \propto g(t)$ ($g(t)$: 変調信号), $\phi(t)=0$ なので、
振幅変調波は以下に書き換えられる。

$$S_{AM}(t) = g(t) \cos(2\pi f_c t)$$

ASK(振幅変調)の変調信号(2)

フーリエ変換して、

$$\begin{aligned} S_{AM}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cos(2\pi f_c t) e^{-j2\pi f t} dt \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp\{-2\pi(f - f_c)t\} dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp\{-2\pi(f + f_c)t\} dt \\ &= \frac{1}{2} G(f - f_c) + \frac{1}{2} G(f + f_c) \end{aligned}$$



- ・s(t)のフーリエ変換スペクトルはG(f)を $\pm f_c$ へ周波数変換
→ 両側帯波搬送波抑圧(Double Sideband Suppressed Carrier : DSB-SC)変調
- ・変調度が1よりも小さいAM変調では搬送波成分が生じ、送信電力効率が低下(g(t)を1+g(t)に置き換えて計算)

PSK(位相変調)の変調信号(1)

変調波の一般表現

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

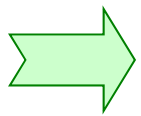
位相変調では $A(t)$:一定, $\phi(t) \propto g(t)$ ($g(t)$: 変調信号) なので、
位相変調波は以下に書き換えられる。

$$S_{PSK}(t) = \cos[2\pi f_c t + g(t)]$$

PSKでは送信する位相情報の不確定性を除去するため、以下の条件を課す。

$$|g(t)| \leq \pi(\text{rad})$$

$$S_{PSK}(t) = \cos[g(t)]\cos(2\pi f_c t) - \sin[g(t)]\sin(2\pi f_c t)$$

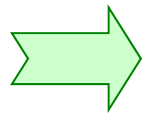


互いに位相が $\pi/2$ 異なる搬送波を、位相偏移量の正弦・余弦で変調し、
それらを合成したもの。

PSK(位相変調)の変調信号(2)

(例①) BPSKの場合

$g(t)=0$ または π



$$S_{PSK}(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t), m(t) = \pm 1$$

両極性矩形パルスでDSB-SC変調

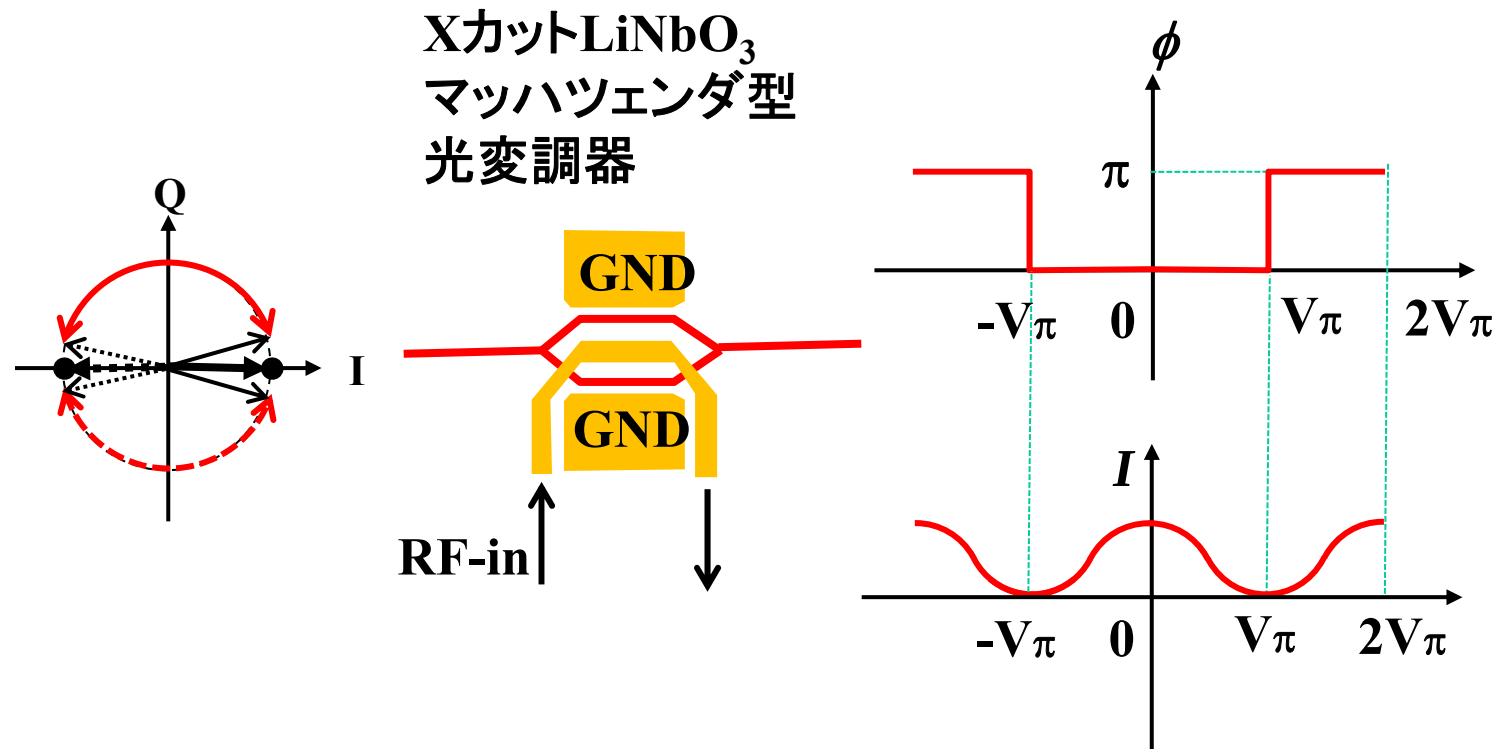
(例②) QPSKの場合: 2つの直交したBPSKを線形加算

$$S_{QPSK}(t) = m_1(t) \cos(2\pi f_c t) - m_2(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$= \cos\left[2\pi f_c t + \tan^{-1} \frac{m_2(t)}{m_1(t)}\right]$$

$$m_1(t), m_2(t) = \pm 1$$

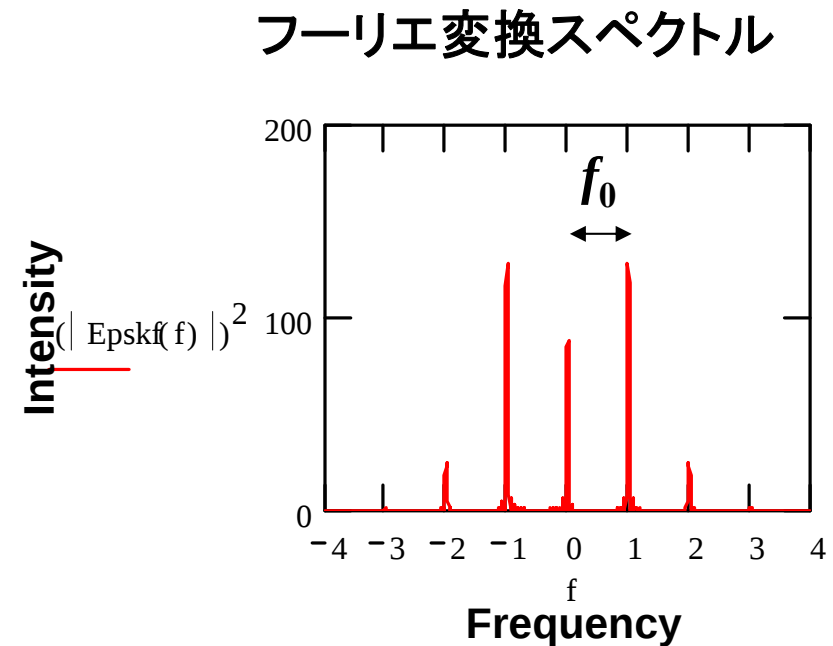
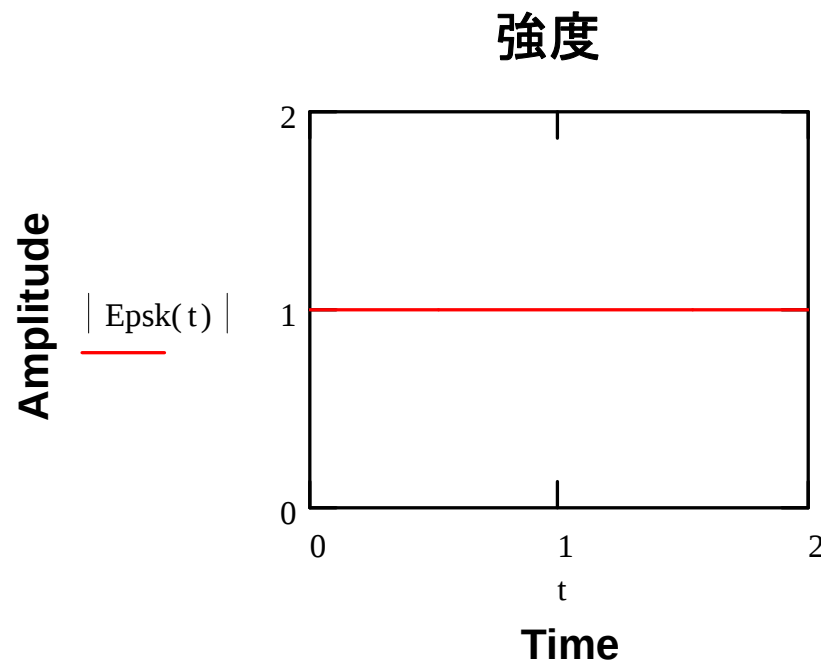
Push-pull 位相変調器による出力信号の位相変化



PSK方式

式(3.1)において、 $V_1 = V_2 = V_\pi$, $\psi = 0$, $V_{bias1} = \pi$, $V_{bias2} = 0$ とおくと、

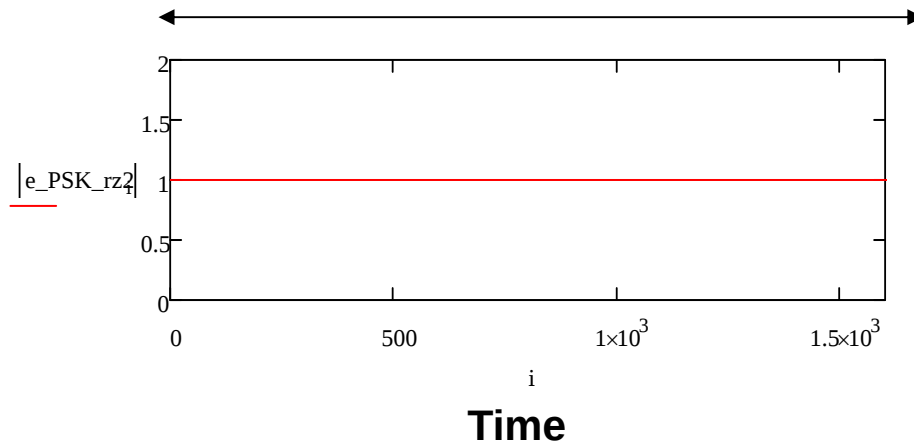
$$E_{out} = -E_{in} \exp(-j\beta L) \exp(j \frac{\pi}{2} \sin \omega t)$$



- ・変調周波数 f_0 (図中では1に相当)
- ・振幅は時間変動せず
- ・搬送波成分を中心に $\pm f_0$ の側波帯間隔

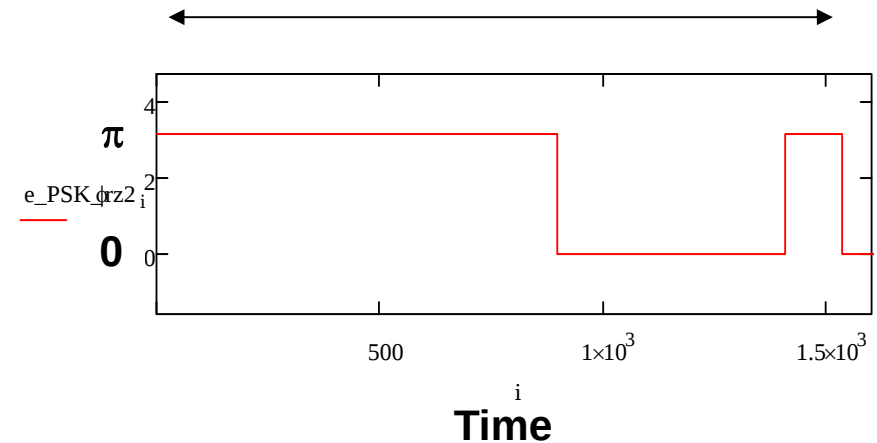
振幅

50bits

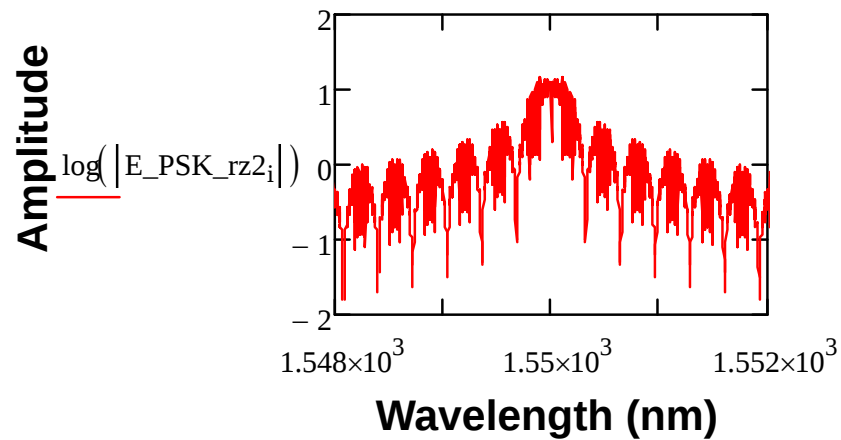


位相

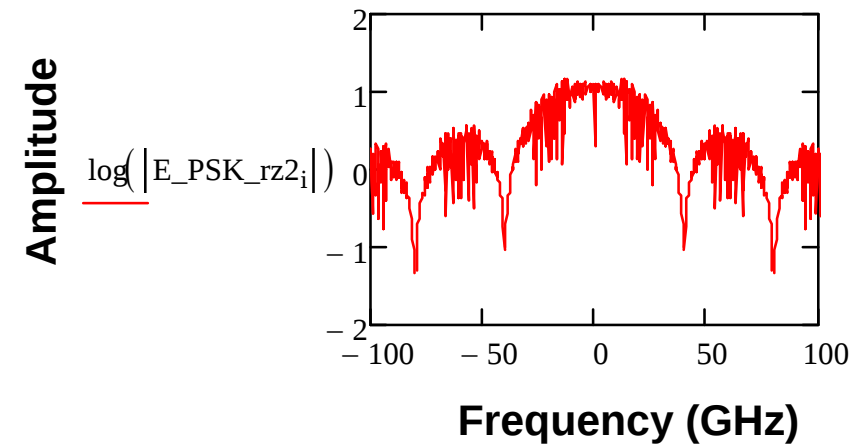
50bits



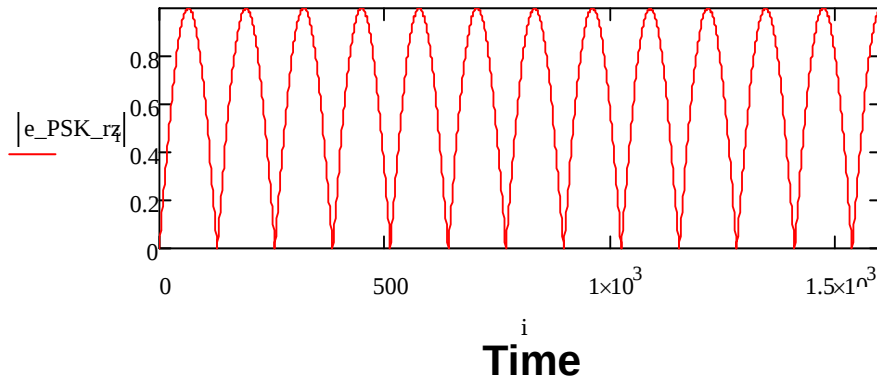
フーリエ変換(波長軸)



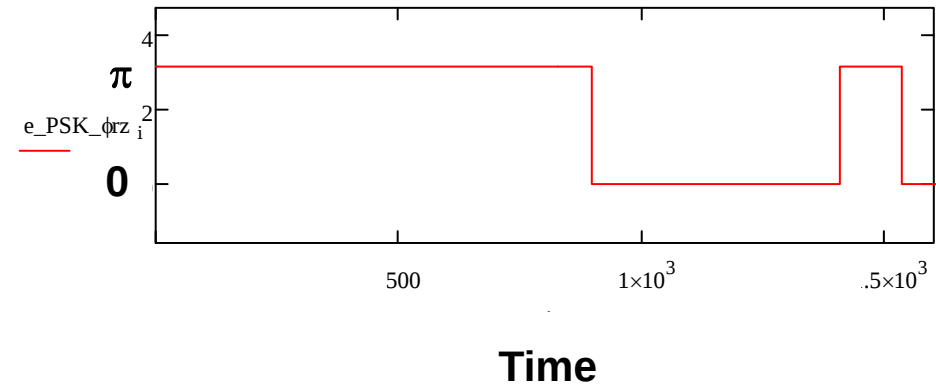
フーリエ変換(周波数軸)



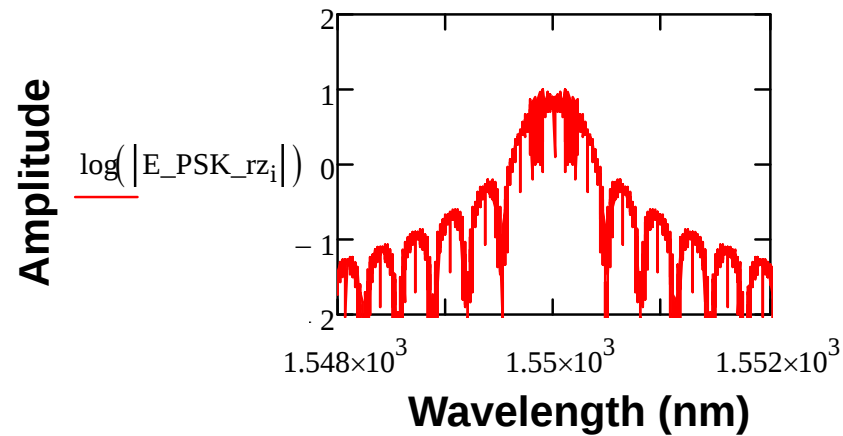
振幅



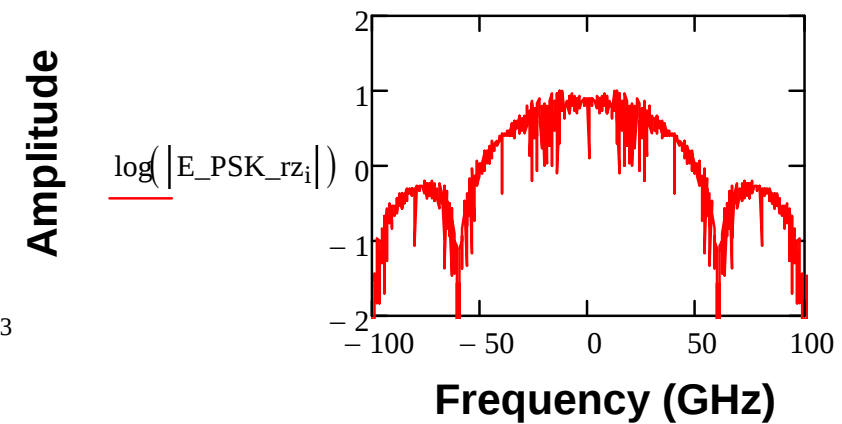
位相



フーリエ変換(波長軸)



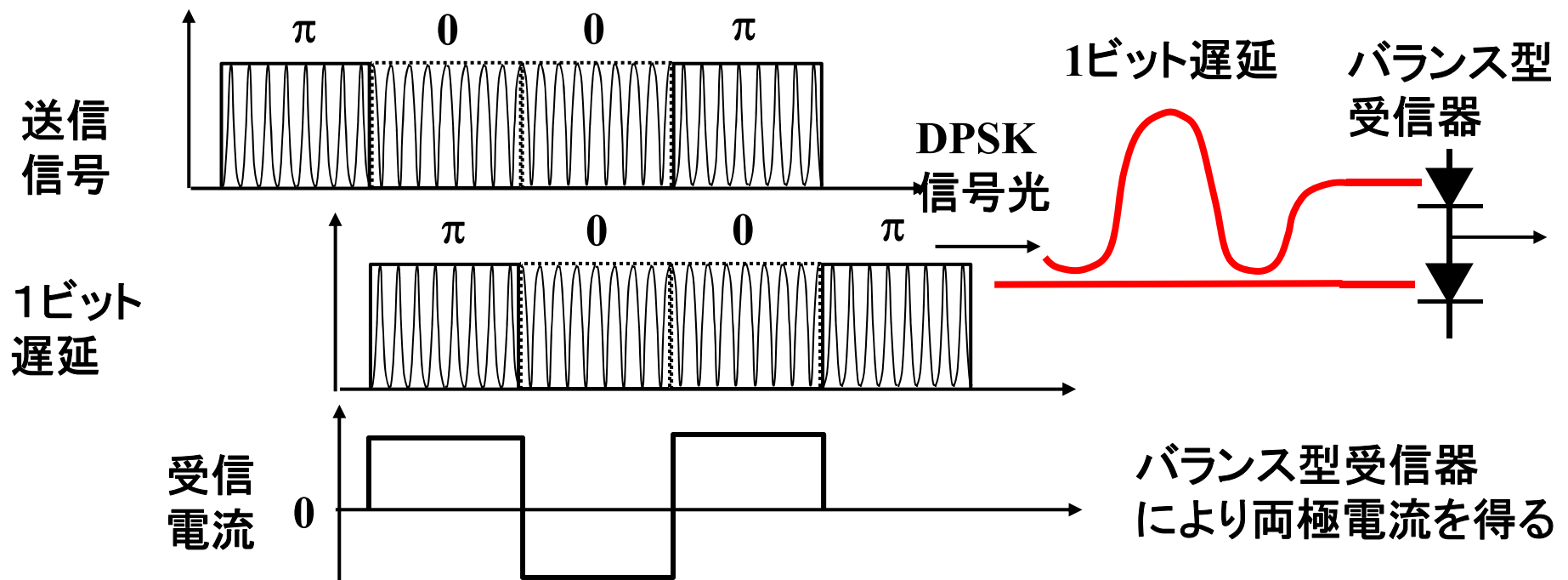
フーリエ変換(周波数軸)



DPSK変調

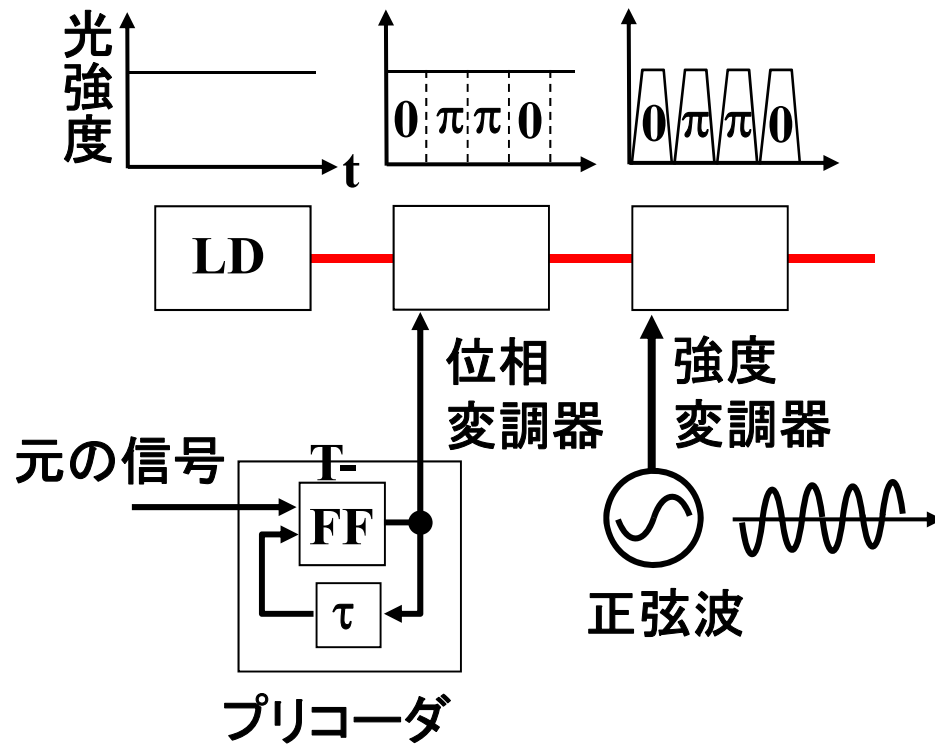
DPSK (Differential Phase-Shift-Keying, 差動位相シフトキーイング方式)

- 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(3dB)を目的にこの2～3年急激に取り組みが盛んになってきた。



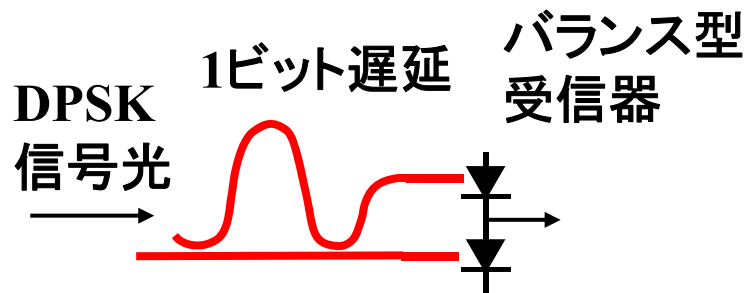
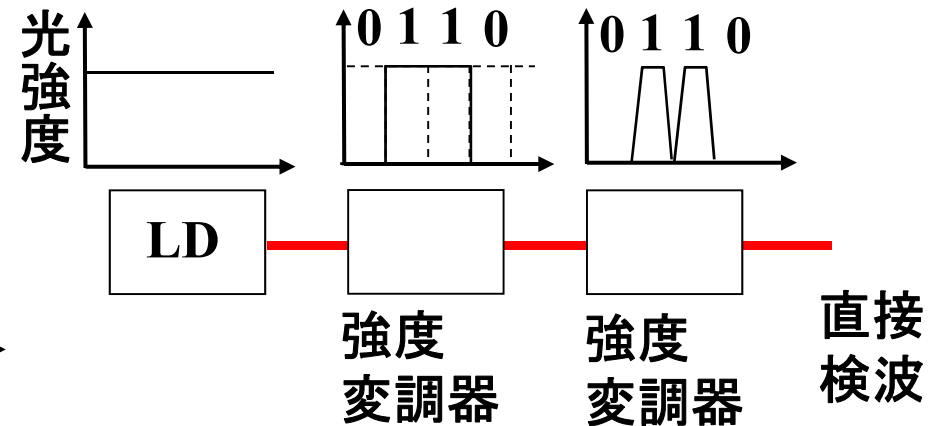
DPSK送信器

RZ-DPSK



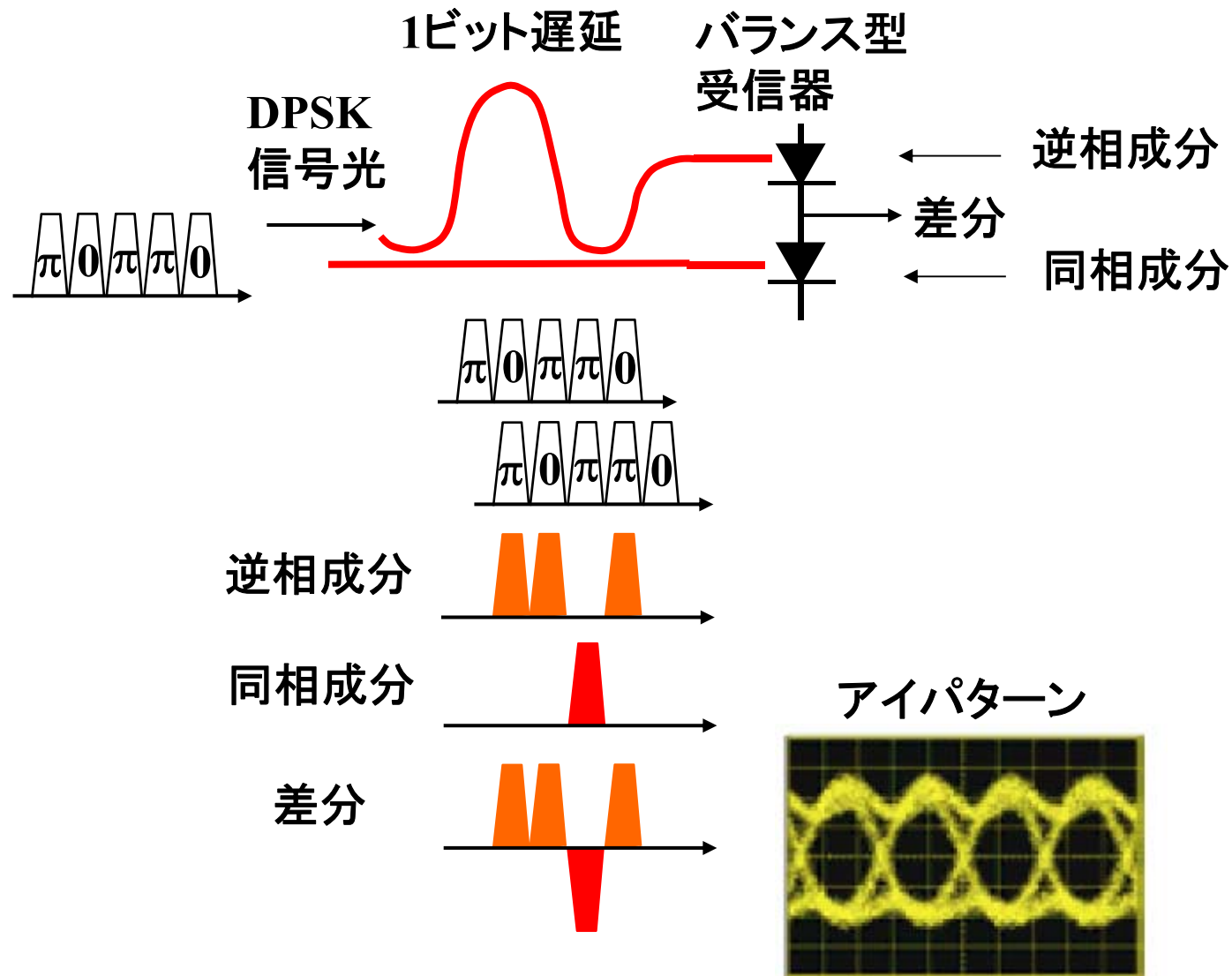
RZ-OOK

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

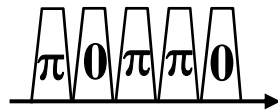
DPSK受信器



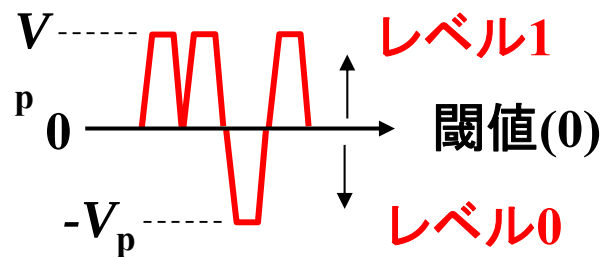
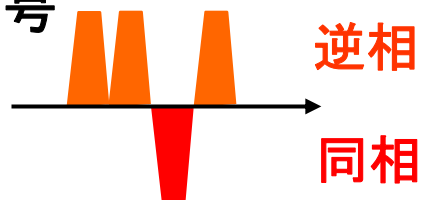
DPSKによる受信感度の改善効果

DPSK

送信信号

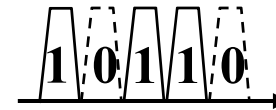


受信信号
(差分)

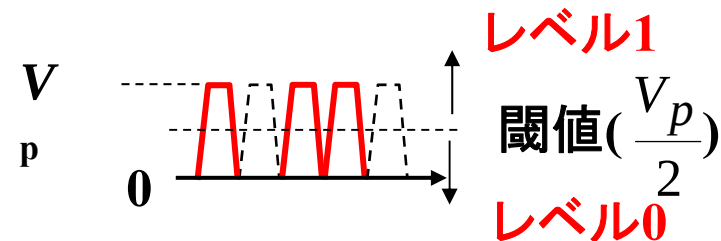


OOK

送信信号



受信信号



● 信号対雑音比の3dB改善 ➡ 受信感度の3dB改善