

2005年度秋期実用マイクロ波講座

無線機設計におけるRF技術のすべて

2005年 9月～12月

松下電器産業(株) 上野 伴希(工学博士)

研修アジェンダ

1. システム設計概要
2. 低雑音アンプ(LNA)その1
3. 低雑音アンプ(LNA)その2
4. ミクサ
5. ローカル発振器
6. 変復調その1
7. 変復調その2
8. パワーアンプ(PA)
9. その他の回路
10. ダイレクトコンバージョンRX / TX

7. 変復調その2 (デジタル変調)

2005年 11月16日(水)

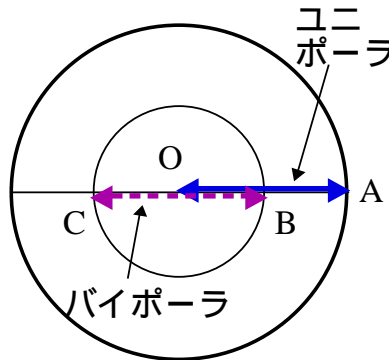
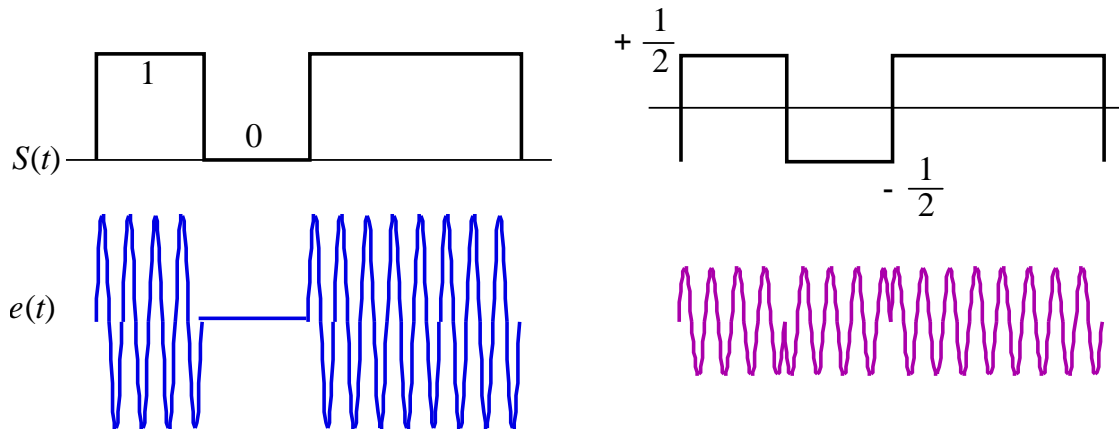
1. ASK, FSK, PSK
2. 帯域制限
3. 符号誤り率
4. BER (Bit Error Rate/ratio)
5. QPSK
6. GMSK
7. QAM
8. OFDM
9. スペクトル拡散

ASK, FSK, PSK

ASK (Amplitude-shift keying)

一般的表現 $e(t) = S(t) \cos(\omega_c t + \theta)$ 原理的にアナログAMと同じ

$S(t)$ は[+1,0](ユニポーラ), [+1/2, -1/2](バイポーラ)の2通りがある。



$$E = S(t)e^{j(\omega_c t + \theta)}$$

ベクトル図

ASK, FSK, PSK

FSK(Frequency-shift keying)

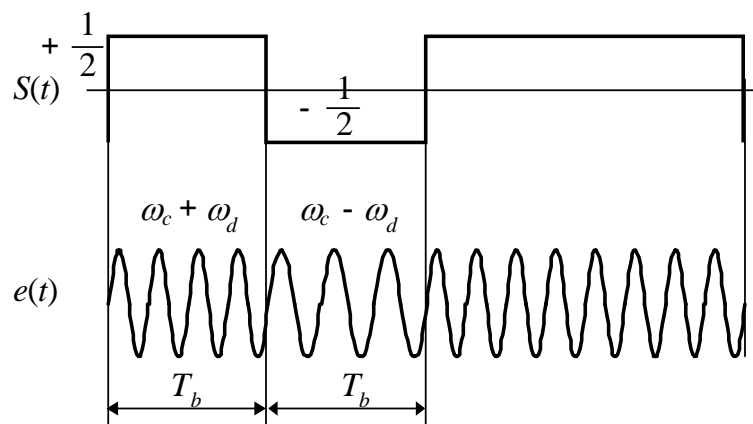
一般的表現 $e(t) = \cos(\omega_c t + \theta + m \int S(t) dt)$

$S(t)$ は $[+1/2, -1/2]$ (バイポーラ)

$$m = 2\omega_d$$

マーク $e(t) = \cos((\omega_c + \omega_d)t + \theta)$

スペース $e(t) = \cos((\omega_c - \omega_d)t + \theta)$



位相が連続につながる条件

$$\omega_d T_b = n\pi$$

$$T_b = 1/f_b$$

ASK, FSK, PSK

FSKベクトル図

マーク $e(t) = \cos((\omega_c + \omega_d)t + \theta)$

スペース $e(t) = \cos((\omega_c - \omega_d)t + \theta)$

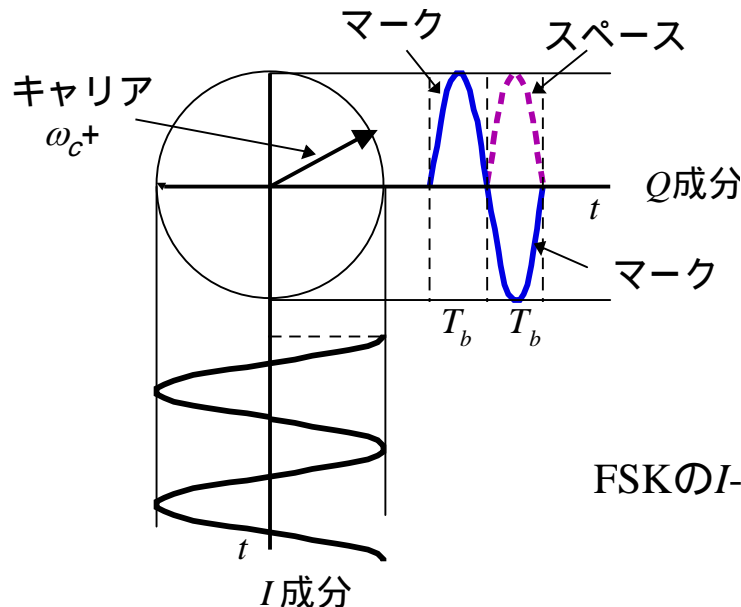
マーク $e(t) = \cos \omega_d t \cos(\omega_c t + \theta) - \sin \omega_d t \sin(\omega_c t + \theta)$

スペース $e(t) = \cos \omega_d t \cos(\omega_c t + \theta) + \sin \omega_d t \sin(\omega_c t + \theta)$

キャリア複素数表現

マーク $e(t) = \text{Re}[\cos \omega_d t \cdot e^{j(\omega_c t + \theta)} + j \sin \omega_d t \cdot e^{j(\omega_c t + \theta)}]$

スペース $e(t) = \text{Re}[\cos \omega_d t \cdot e^{j(\omega_c t + \theta)} - j \sin \omega_d t \cdot e^{j(\omega_c t + \theta)}]$



FSKのI-Qベクトル図

$$V = I + jQ$$

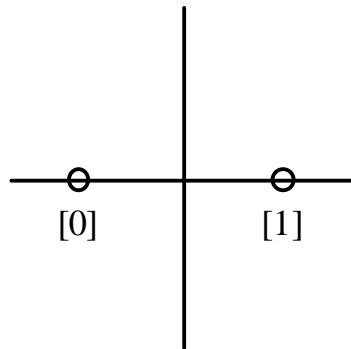
PSK (Phase-shift keying)

一般的表現 $e(t) = \cos(\omega_c t + \phi_k)$

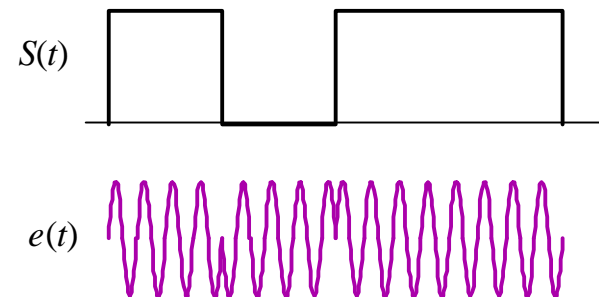
$$E = e^{j\phi_k} e^{j\omega_c t}$$

BPSK $[\phi_0, \phi_1] = [\pi, 0]$

QPSK $[\phi_{11}, \phi_{01}, \phi_{00}, \phi_{10}] = [\pi/4, 3\pi/4, -3\pi/4, -\pi/4]$



BPSKベクトル図

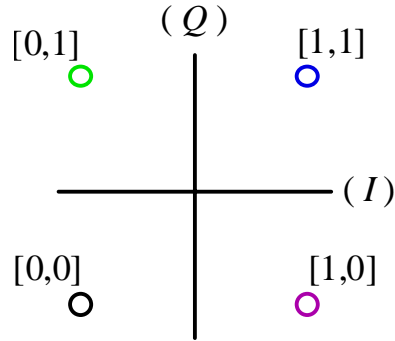


BPSKはバイポーラASKと同じ

ASK , FSK , PSK

QPSK(Quadri-PSK)

$$[\phi_{11}, \phi_{01}, \phi_{00}, \phi_{10}] = [\pi/4, 3\pi/4, -3\pi/4, -\pi/4]$$



QPSKベクトル図

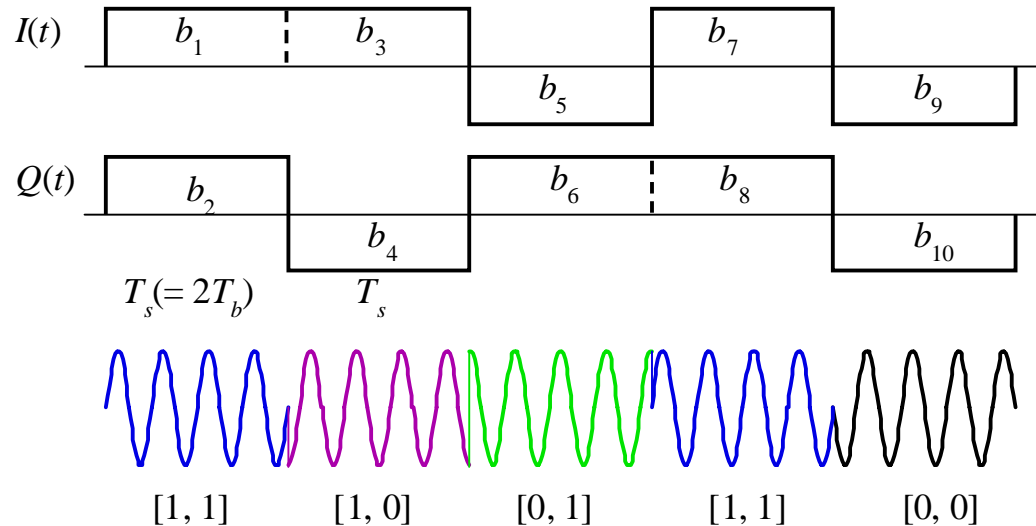
$$E = e^{j\phi_k} e^{j\omega_c t}$$

QPSK変調信号の波形

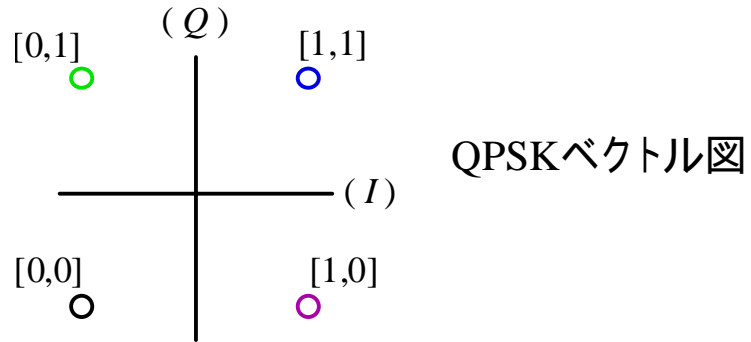
T_b : ビット周期
 $f_b = 1/T_b$: ビットレート

$T_s (= 2T_b)$
 $f_s = 1/T_s$: シンボルレート

$$[\mathbf{b}] = [1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, \dots]$$

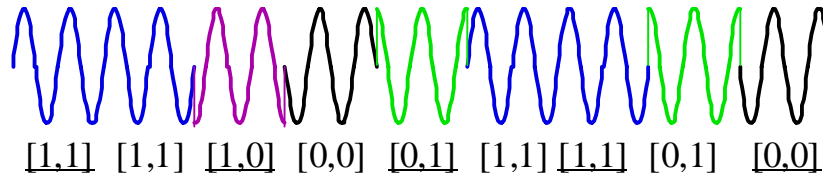
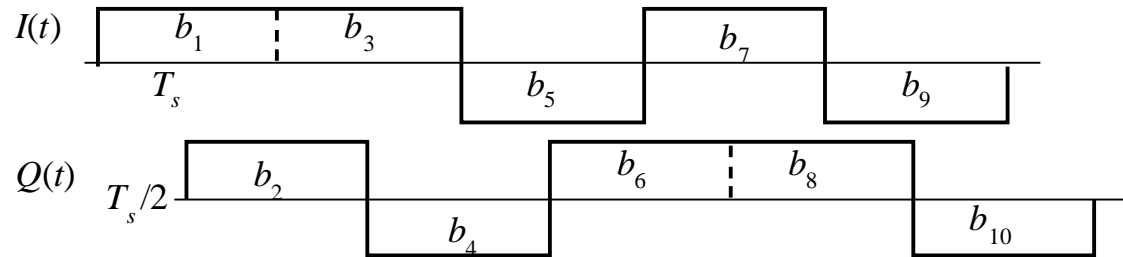


QPSKの変形1



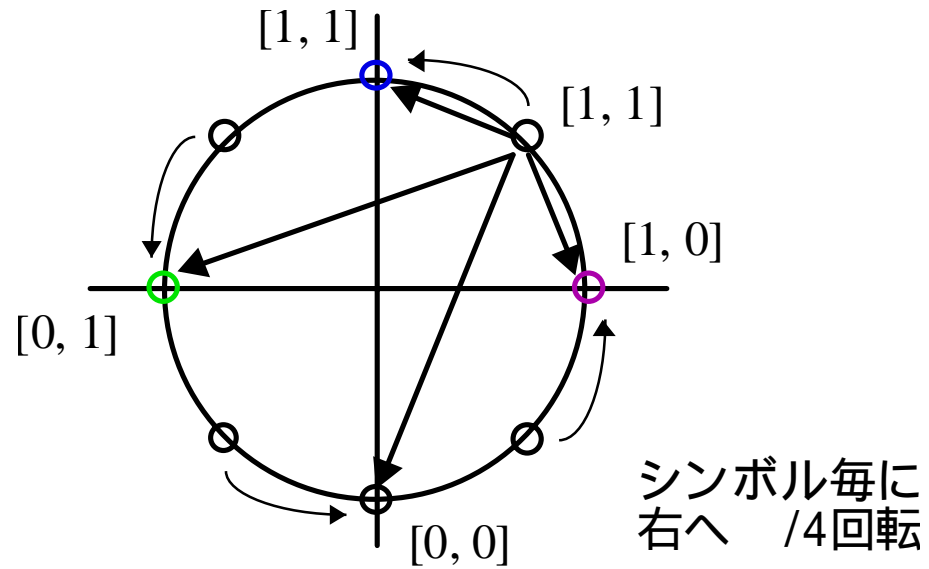
Offset-QPSK

$$[\mathbf{b}] = [1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, \dots]$$



QPSKの変形2

/4シフトQPSK



ベクトル図

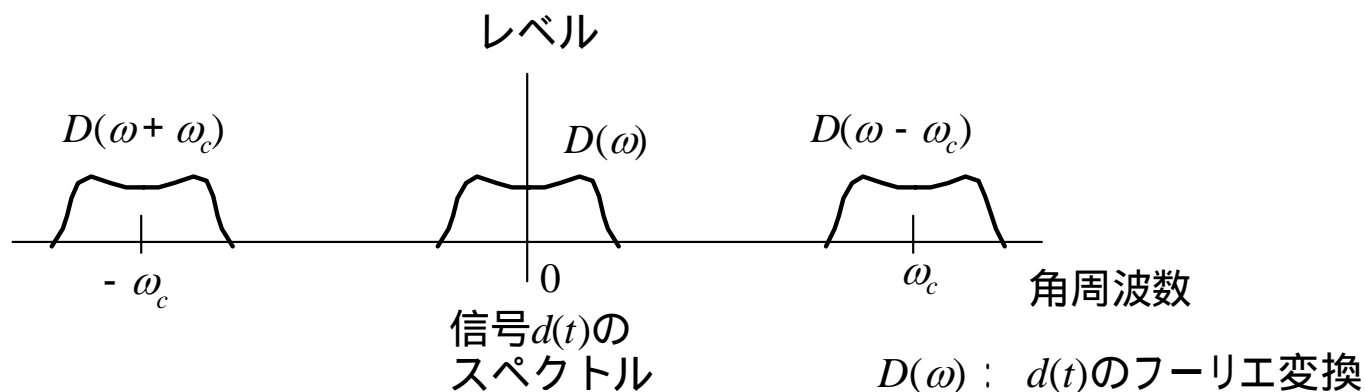
バイポーラデータ信号のモデル

BPSK信号の一般的表現

$$e(t) = d(t) \cos(\omega_c t + \theta) \quad d(t) : \text{バイポーラデータ信号}$$

BPSK信号スペクトル: $e(t)$ のフーリエ変換

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} d(t) \cos(\omega_c t + \theta) e^{-j\omega t} dt$$



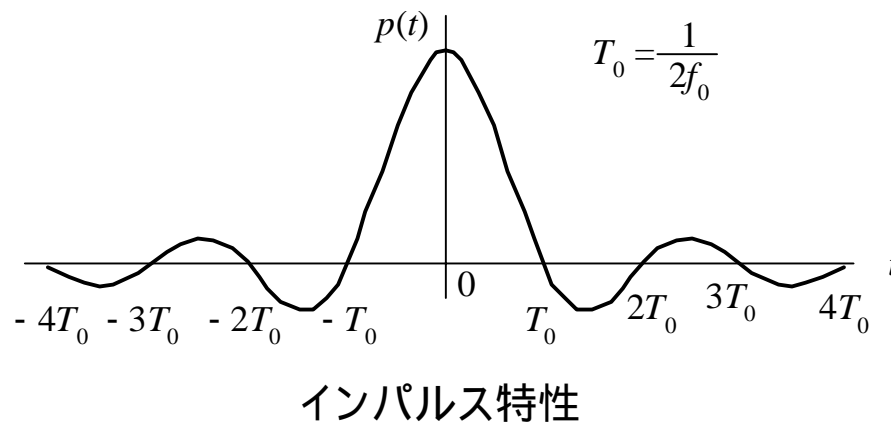
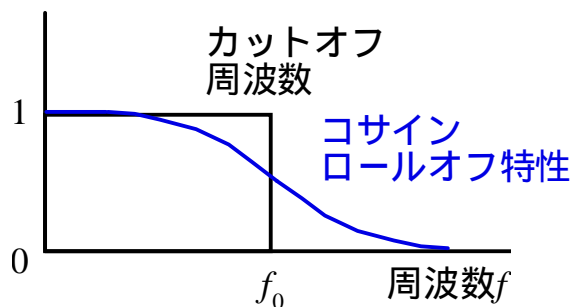
BPSK変調波のスペクトル

ベースバンド帯域制限 = BPSK変調波での帯域制限

帯域制限

フィルタ

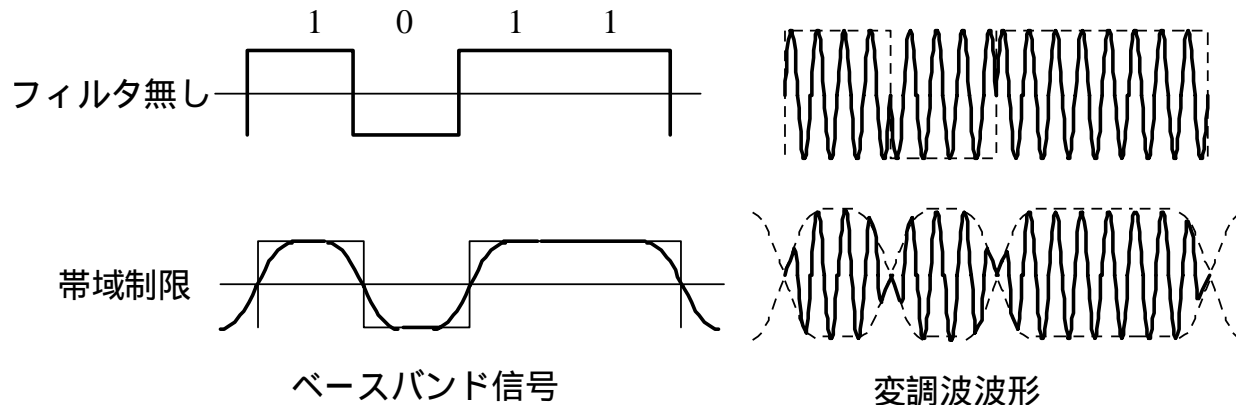
理想フィルタによる帯域制限



(インパルスのデータ信号列では)

ビットレートの半分のカットオフ周波数の理想フィルタは符号間干渉がない
コサインロールオフ特性は理想トランスと同様符号間干渉がない

帯域制限された
BPSKの信号

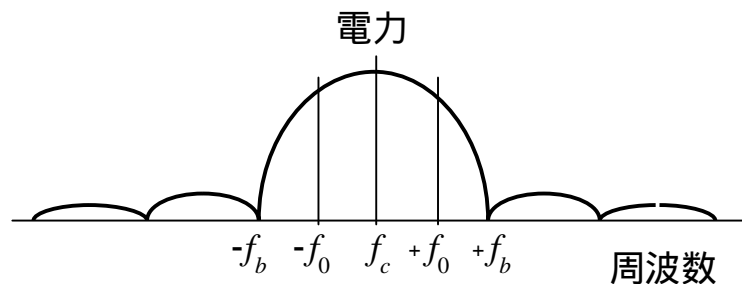


帯域制限

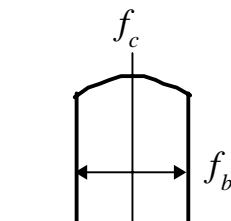
BPSKスペクトル比較

$$B(\omega) = A \left(\frac{\sin(\omega T_b / 2)}{\omega T_b / 2} \right)^2$$

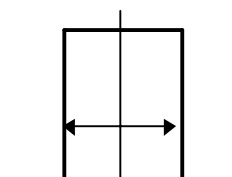
マーク / スペースがランダム等確率なデータ信号スペクトル



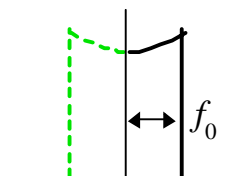
帯域制限なし



理想フィルタ帯域制限



符号間干渉のない
インパルスデータ列の
スペクトル



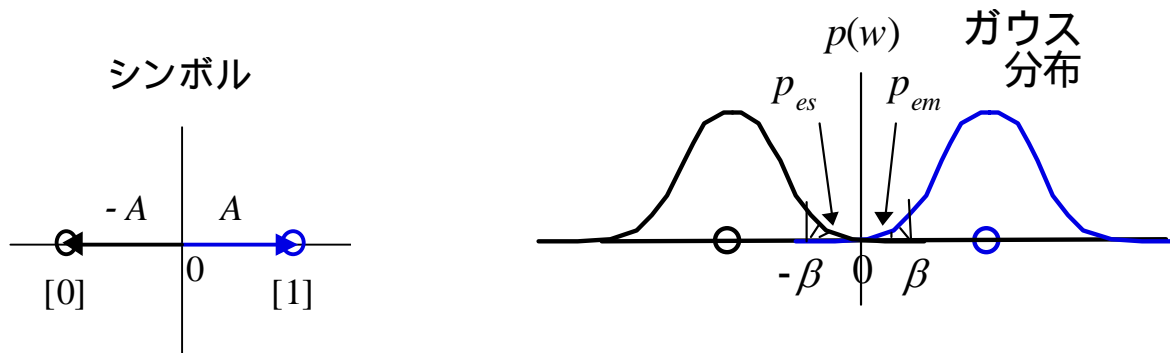
理想フィルタに
追加する特性

BPSK波の必要帯域は f_b , データレートは f_b より1 bit/s/Hz の周波数利用率

QPSKは直交する2つのBPSKの合成と考えられ2 bit/s/Hz の周波数利用率

符号誤り率

BPSKの符号誤り



符号誤り率

$$P_{em} = p_{es} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{C}{N}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \quad \sigma: \text{雑音実効電圧}$$

$$C = E_b f_b \quad N = N_o B$$

E_b : 1bitあたりの電力
 N_o : 1Hzあたりの雑音電力
 B : 受信帯域

符号誤り率

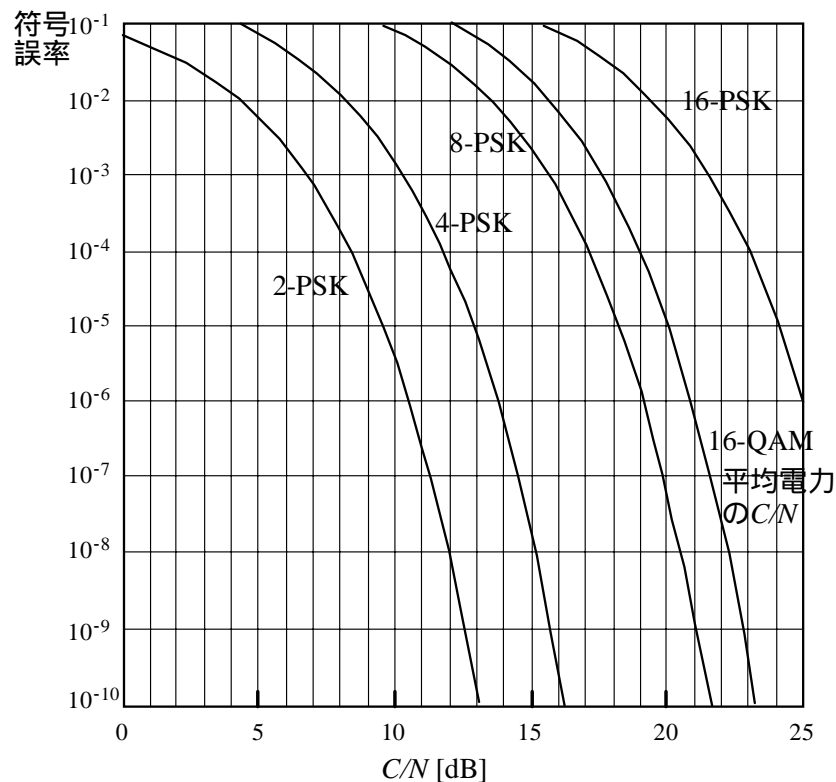
n -PSKの符号誤り

$$P_{n-PSK} = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{C}{N}} \sin \frac{\pi}{n} \right)$$

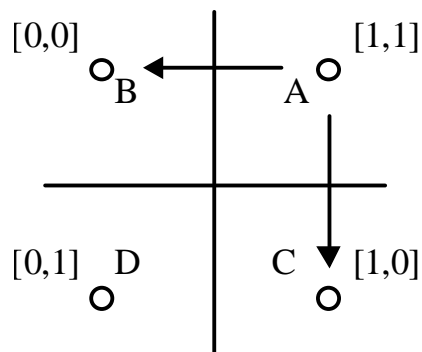
QPSK $P_{QPSK} = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{C/N}{2}} \right)$

n -PSKの C/N と E_b/N_o の関係

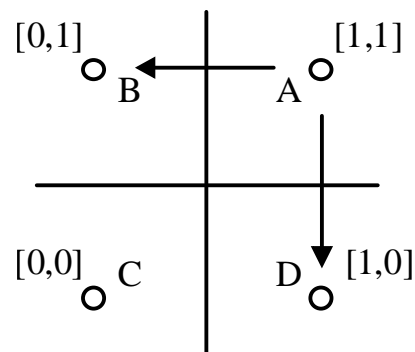
$$C/N = \frac{E_b f_b}{N_o B_n} = \frac{E_b}{N_o} \log_2 n$$



QPSK



自然配列 (回転順)



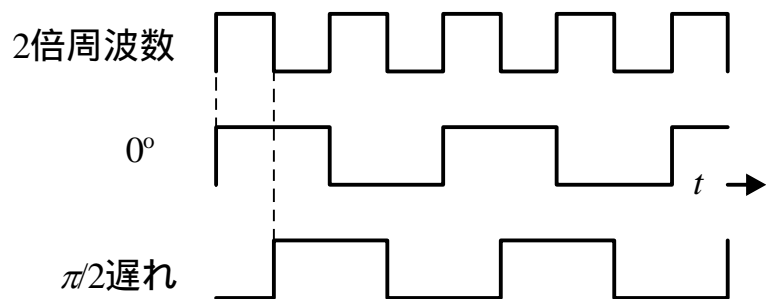
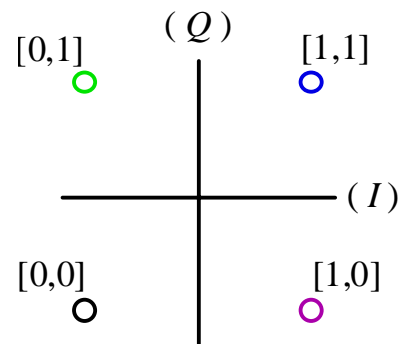
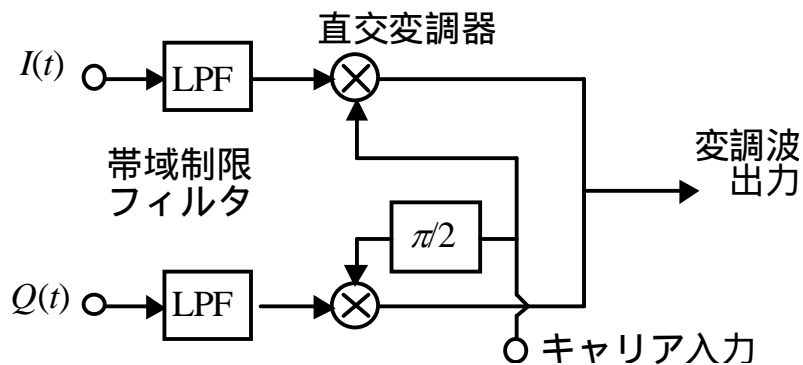
グレイ符号配列

グレイ配列QPSKでは、AからBあるいはCへの符号誤りに対してビットエラーは1回
すなわちBERは符号誤り率の1/2

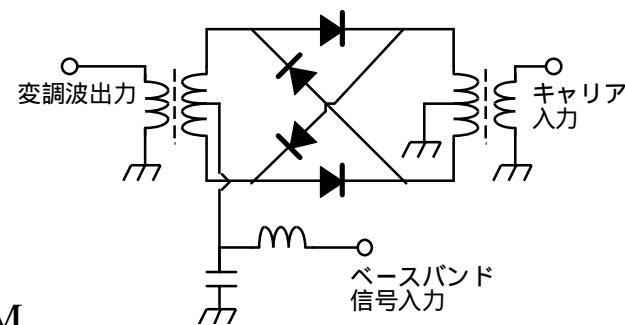
$$BER_{QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{C/N}{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right)$$

QPSK

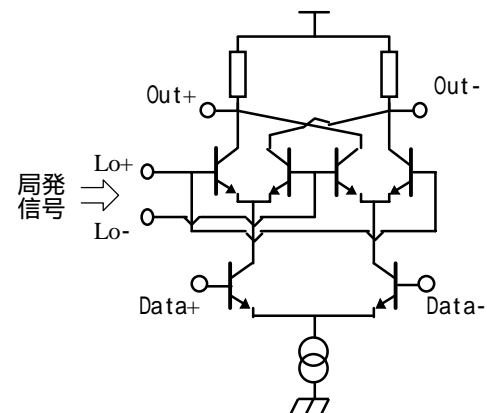
変調回路原理



1/2信号発生回路

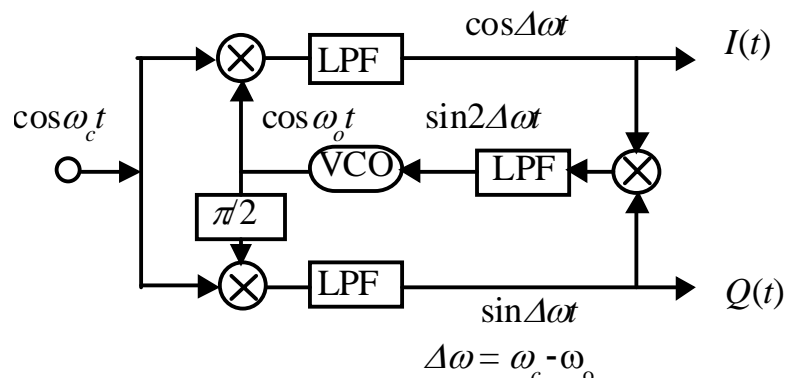


DBM



QPSK

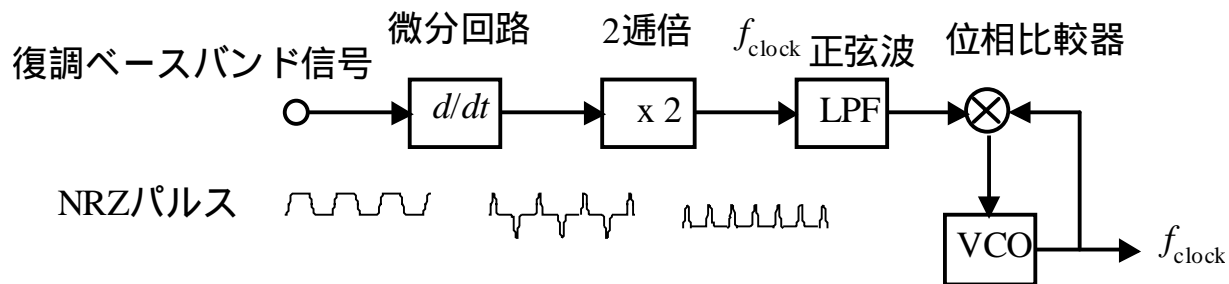
復調回路原理



$$\sin A \cos B = \frac{1}{2} [\sin(A + B) + \sin(A - B)]$$

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} [\cos(A + B) + \cos(A - B)]$$

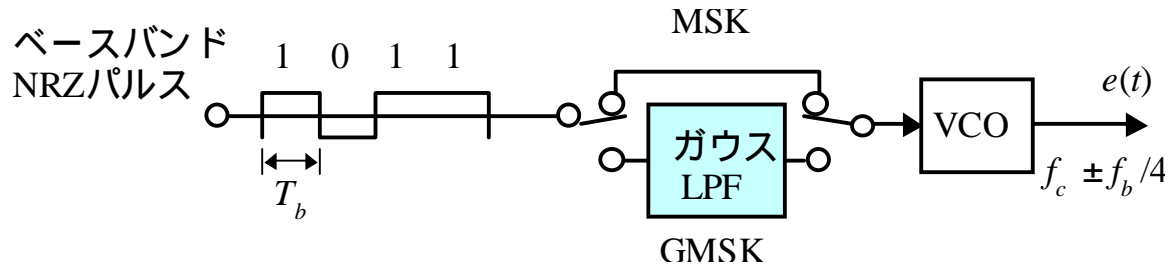
キャリア再生と復調回路



クロック再生回路

GMSK

MSK



MSK(GMSK)の原理回路

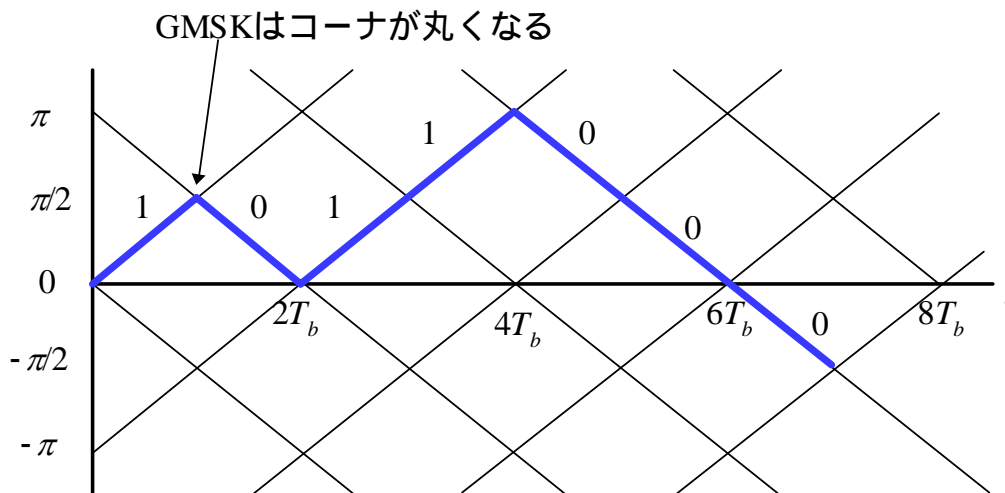
マーク $e(t) = \cos((\omega_c + \omega_d)t + \theta)$

スペース $e(t) = \cos((\omega_c - \omega_d)t + \theta)$

$$f_d = \frac{f_b}{4} = \frac{1}{4T_b}$$

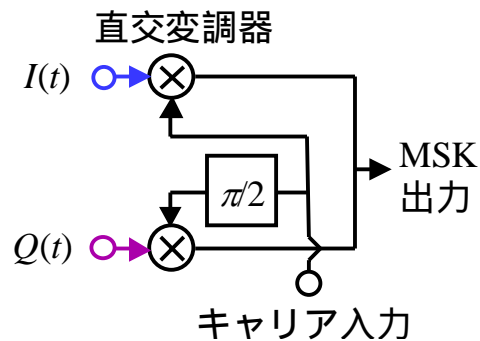
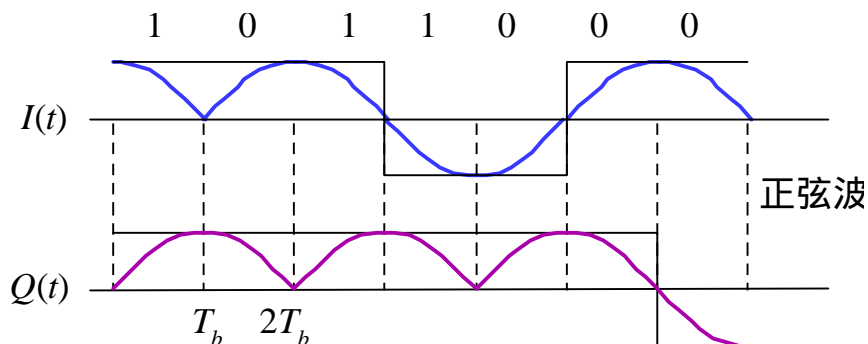
MSKはマーク / スペースに応じて $\pm \pi/2$ キャリア位相が直線的に変化 (FSKは $\pm n$)

MSK(GMSK)の
キャリア位相トレリス
データ[1,0,1,1,0,0,0...]

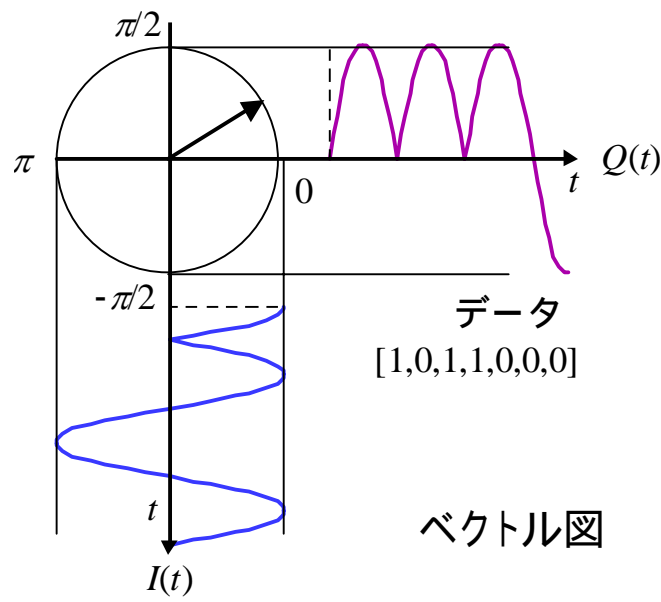


GMSK

MSK変調器



MSK(GMSK) 直交変調回路



MSKの占有帯域はQPSKと同じ $f_b/2$

ガウス特性フィルタで帯域制限

直交性が失われる

符号間干渉が生じる

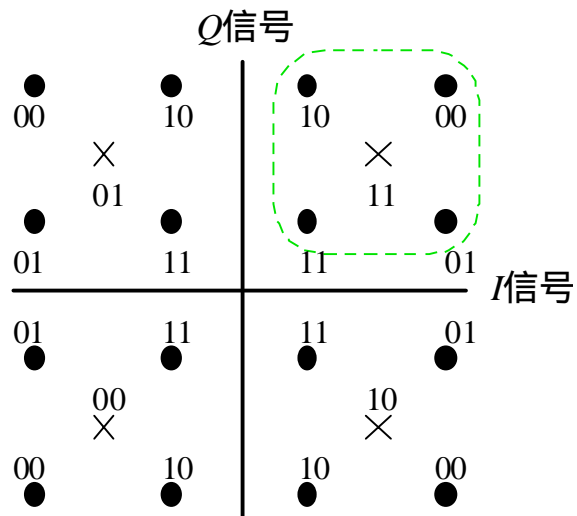
QAM

16QAMの例

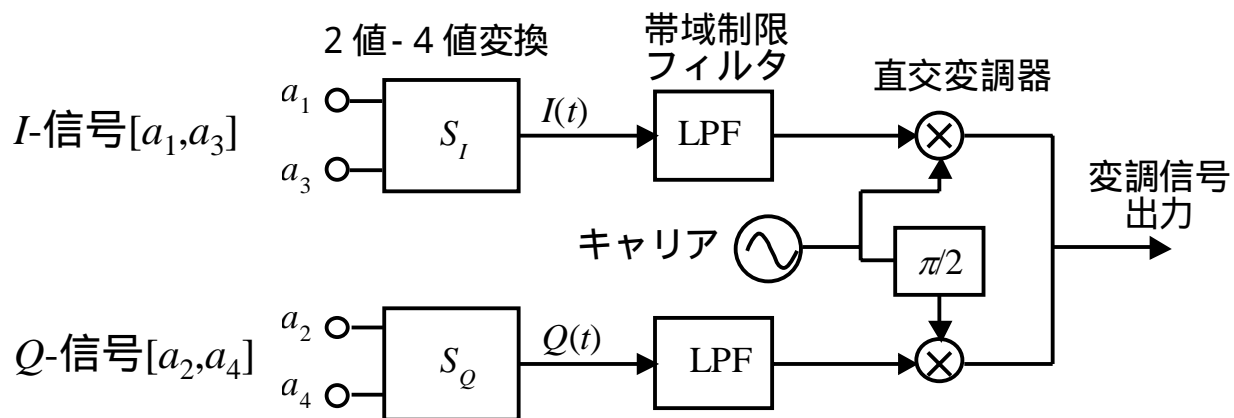
4ビットシンボル $[a_1, a_2, a_3, a_4]$

象限ABCD $[a_1, a_2]$

各象限内 $[a_3, a_4]$

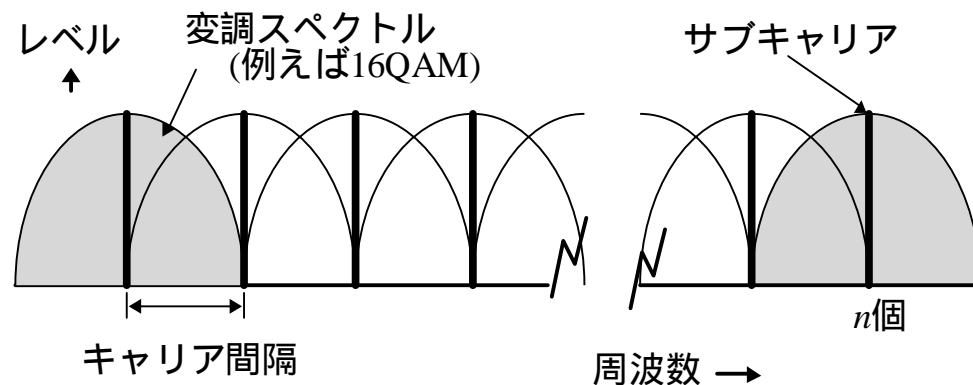


グレイ符号配列の
空間信号図



変調回路ブロック図

スペクトル概要



サブキャリアの並び

多値QAMでは、キャリア間隔 シンボルレート

デジタルTV放送 1kHz

WLAN 312.5kHz

WLANの例

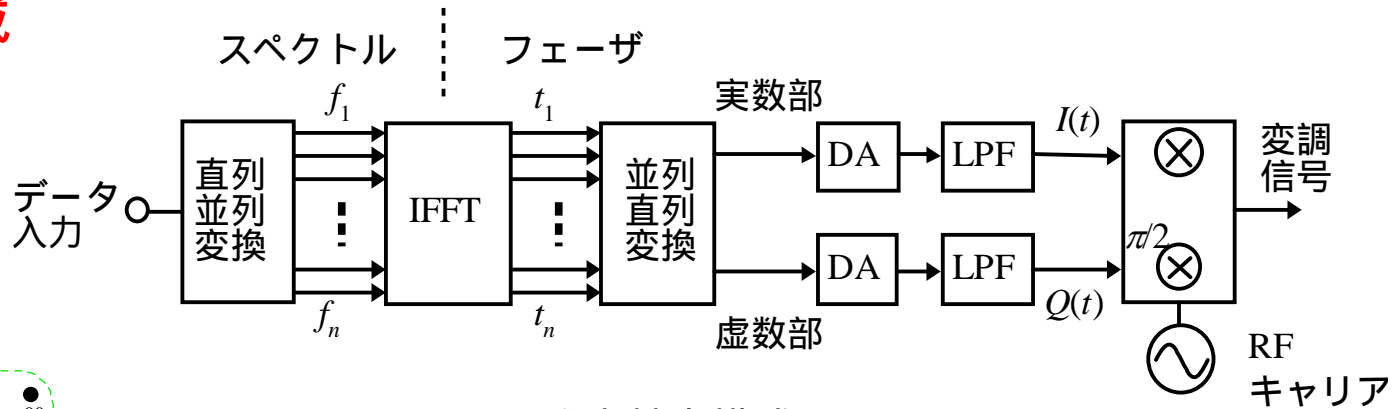
サブキャリア $n = 64$

使用するの $n = 52$

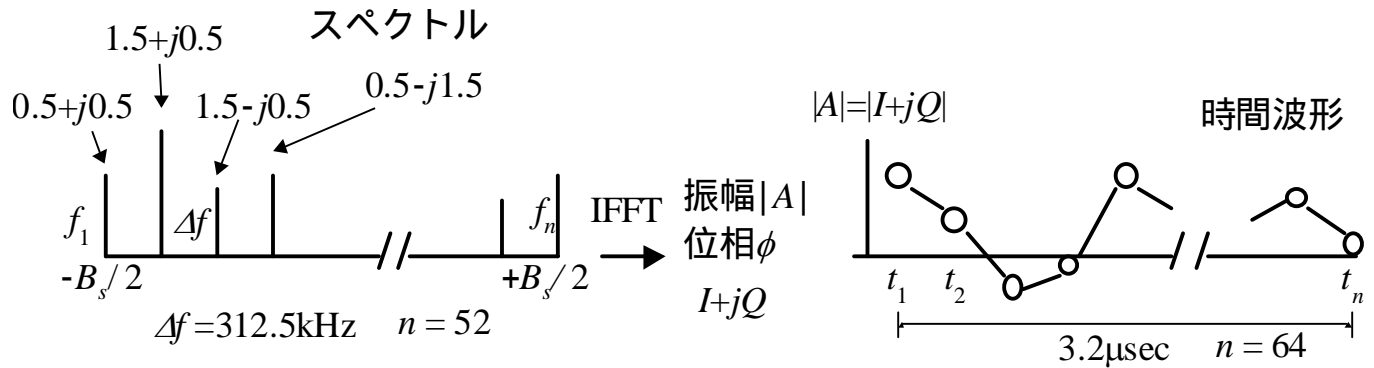
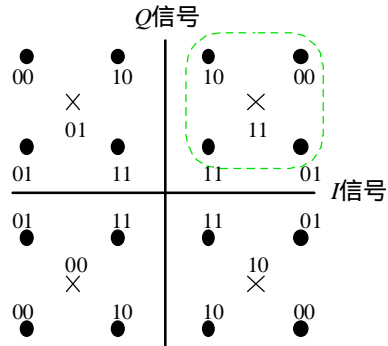
データ変調するのは $n = 48$

OFDM

変調波生成



OFDM発生基本構成図

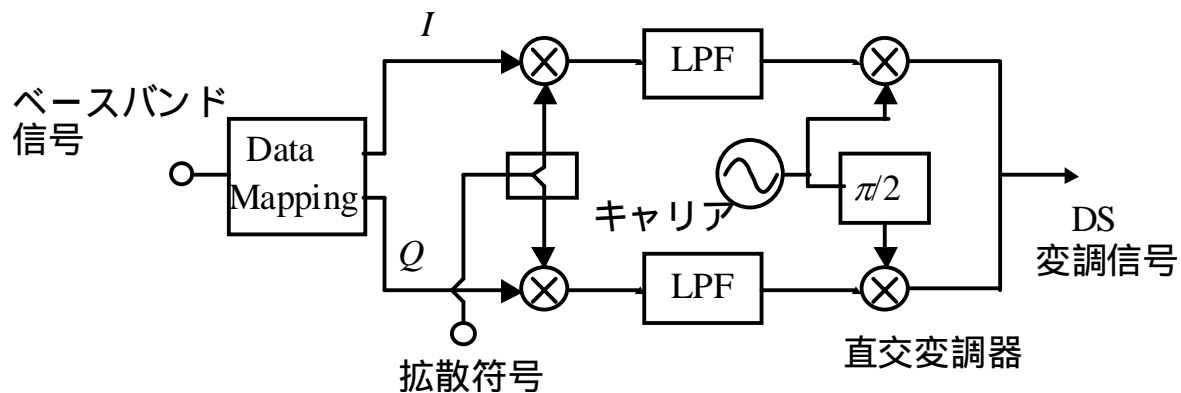


ただしデータで変調するのはそのうちの $n = 48$

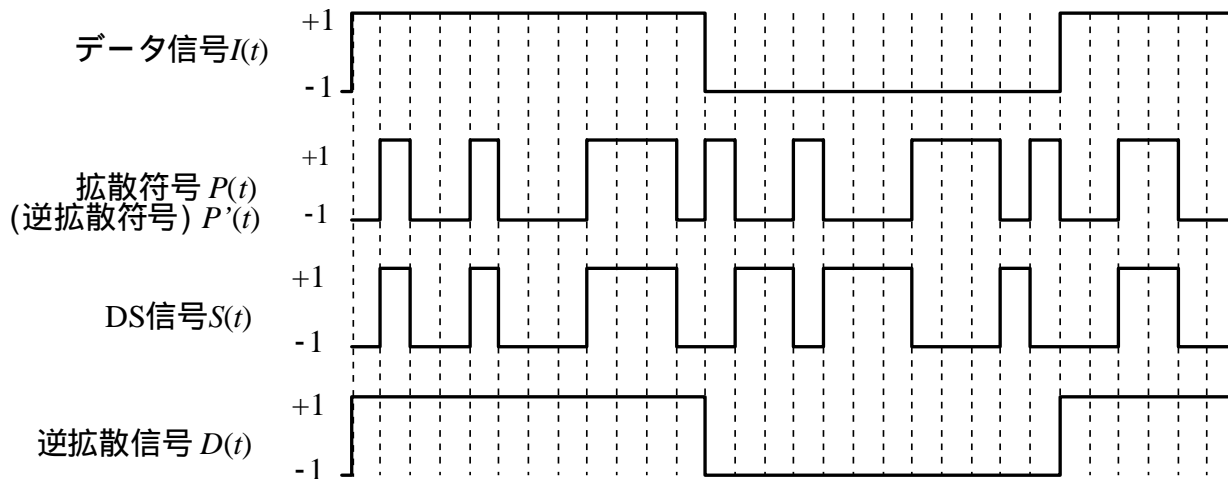
あるシンボルでのスペクトルとベースバンド信号時間波形

スペクトル拡散

原理



拡散の原理的回路



データ信号の直接拡散