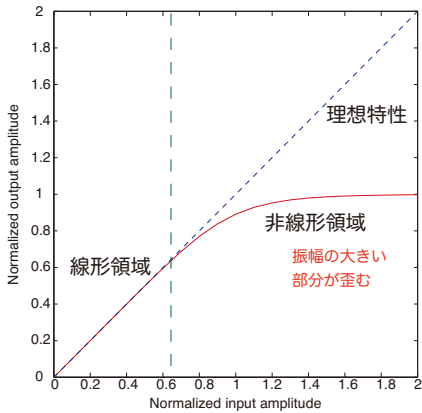


# デジタル変調方式 (2)

## 線形変調の問題

- 送信機の最終段では電波をアンテナで飛ばすために増幅器が必要
- 増幅器は電力効率が優れるものが望まれる
  - 消費電力 (バッテリーの保ち)
- 電力効率に優れる増幅器の多くは非線形増幅器 (C級増幅器等) or 振幅変動の大きい信号を扱うには、線形増幅器でも非線形領域を使わざるを得ない
- 振幅変動をもつ信号を非線形増幅器に通すと、入力波形が歪む (せっかくフィルタリングしたのに、鋭角な波形成分が再び出現 = サイドローブが再び出現)

## 非線形増幅器の入出力特性



## 変調の分類 (おさらい)

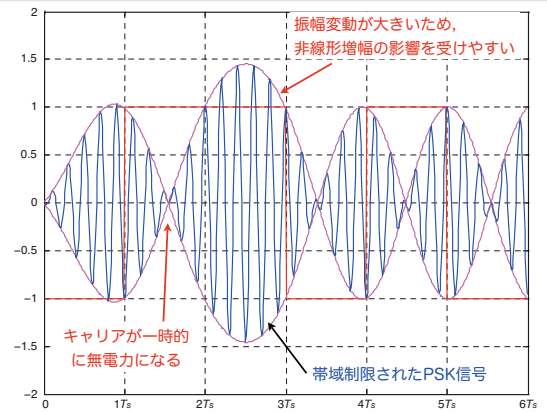
ベースバンド信号のスペクトルを搬送波周波数帯域へ移動

- スペクトルの形を保持 → 線形変調
- スペクトルの形が変化 → 非線形変調

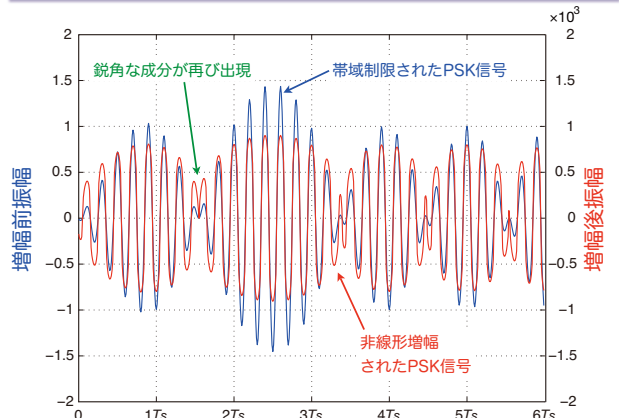
線形変調は? → ASK, PSK, QAM 近年主流 (信号の包絡線が変動する変調)

非線形変調は? → FSK (信号の包絡線が変動しない変調)

## 帯域制限されたPSK信号



## 増幅器の影響



## 何故、線形変調が主流なのか？

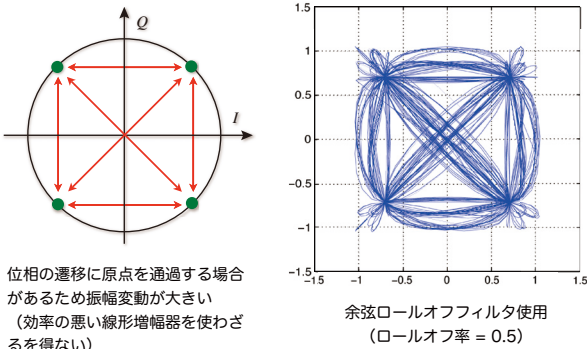
- 📍 F級増幅器に代表される、電力効率に優れた（線形）増幅器が開発され利用可能になってきた
- 📍 移動通信方式のチャンネル容量を増加させるためにセル半径を小さくし、その結果、送信電力が小さくてもよくなった
- 📍 周波数利用効率を向上させるために、変調スペクトル帯域幅の小さな変調方式が望まれてきた
- 📍 PSKは誤り率特性に優れる
- 📍 増幅器の非線形性のある程度カバーできる（振幅変動の少ない）変調方式が開発
- 📍 信号点配置が原点を通過しない変調方式

## MPSK信号の各種数式表現

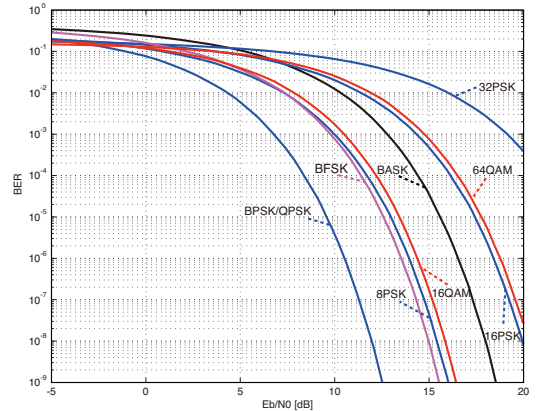
$$\begin{aligned}
 s(t) &= A \cos(2\pi f_c t + \phi_i) & \phi_i: i \text{ 番目のシンボルに対応した位相} \\
 &= \sqrt{2P_c} \cos(2\pi f_c t + \phi_i) & f_c: \text{キャリア周波数} \\
 &= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \phi_i) & A: \text{キャリア振幅} \\
 &= A \cos \phi_i \cos(2\pi f_c t) - A \sin \phi_i \sin(2\pi f_c t) & P_c: \text{キャリアの電力} \\
 &= \frac{A}{2} \left( e^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t} + e^{-j\phi_i} e^{-j2\pi f_c t} \right) & E_s: \text{1シンボル当たりのエネルギー} \\
 &= \text{Re} \left\{ \underline{A e^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t}} \right\} & T_s: \text{シンボル時間} \\
 &= \text{Re} \left\{ \underline{A e^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t}} \right\} & \text{被変調信号の特性をベースバンド領域で考えることができる} \\
 &= \text{Re} \left\{ \underline{A e^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t}} \right\} & \text{= 等価低域信号}
 \end{aligned}$$

複素包絡線 (complex envelope) = 等価低域信号

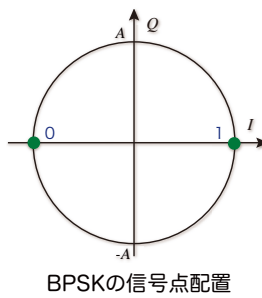
## QPSKの信号点遷移



## 各種変調方式のBERの比較



## 信号点配置 (constellation)



複素包絡線の状態を I-Q 位相平面上に表わしたもの  
(振幅と位相の状態を表示)

例) BPSK信号

$$\begin{aligned}
 \text{複素包絡線} &= A e^{j\phi_i} \\
 &= A(\cos \phi_i + j \sin \phi_i)
 \end{aligned}$$

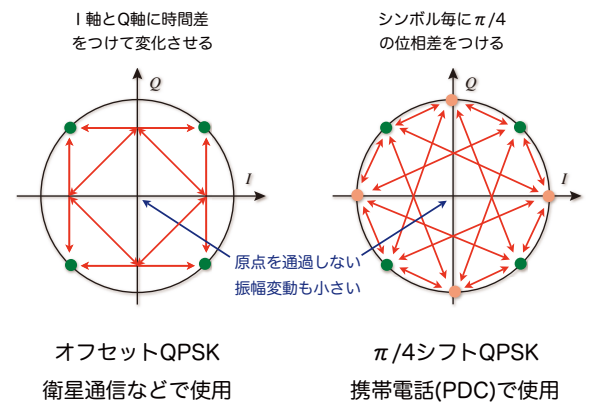
$$\phi_i = \begin{cases} 0, & \text{シンボル1のとき} \\ \pi, & \text{シンボル0のとき} \end{cases}$$

I: in-phase (同相) = cos成分

Q: quadrature phase (直交位相) = sin成分

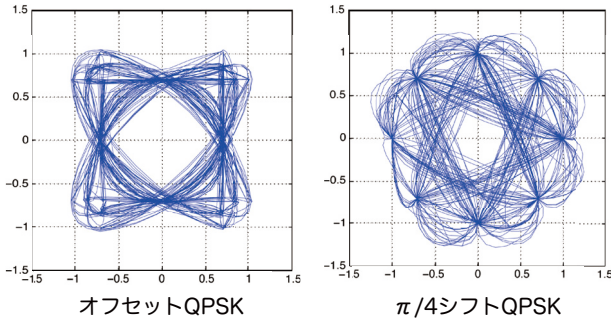
注) constellation: 星座

## オフセットQPSKとπ/4シフトQPSK



## オフセットQPSK / $\pi/4$ シフトQPSK

13



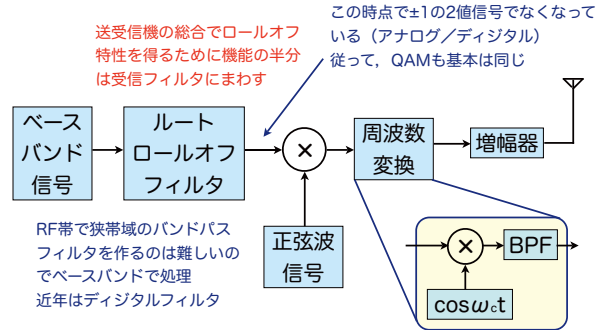
振幅変動の少なさではオフセットQPSKが優れる

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## PSK変調器 (BPSKの場合)

14



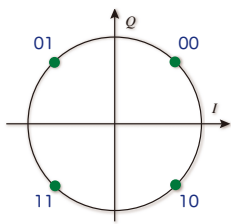
QPSKはどうやって作る?

Takahiko Saba

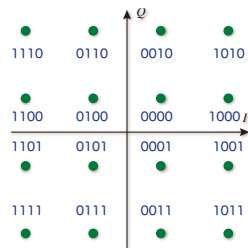
Dept. of Computer Science, C.I.T.

## QAM方式の信号点配置

15



QPSK/4QAMの信号点配置



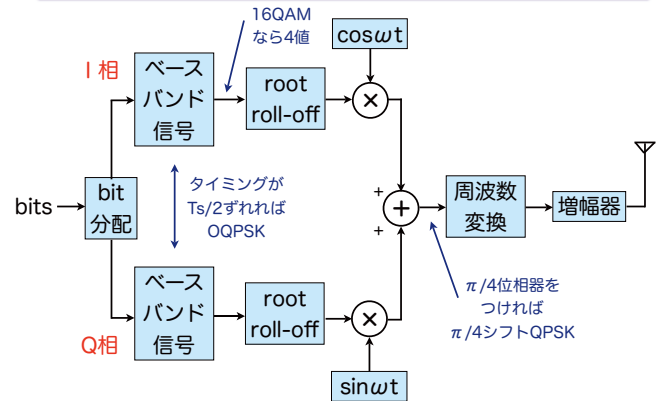
16QAMの信号点配置

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## MPSK/MQAM変調器

16



Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## 同期検波と非同期検波

17

### 同期検波 (coherent detection)

- 送信側で用いた搬送波の周波数, 位相の正確な情報を利用
- 通信路の途中でこれらが変化してしまった場合には, 追従する (同期をとる) 必要有り

### 非同期検波 (non-coherent detection)

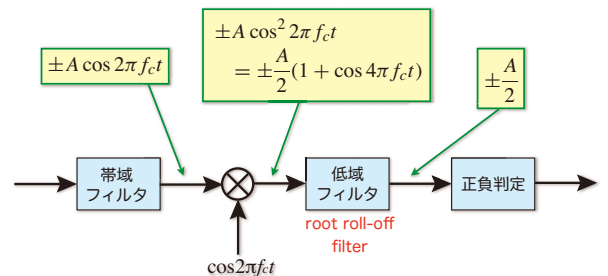
- 送信側で用いた搬送波の周波数, 位相の正確な情報を利用しない (大雑把に周波数は知っている必要有り)
- 通信路で変化した周波数や位相に同期できない場合には有効だが, 復調性能は同期検波より劣る
  - 包絡線検波, 周波数検波, 遅延検波など.

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## PSK信号の同期検波

18



PSKは同期検波しかできない

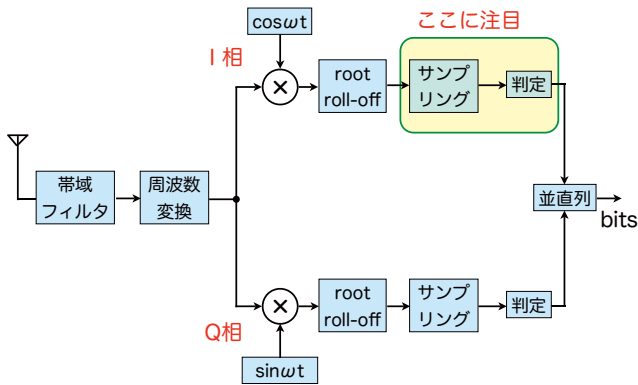
MPSKやMQAMは?

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## MPSK/MQAM復調器

19

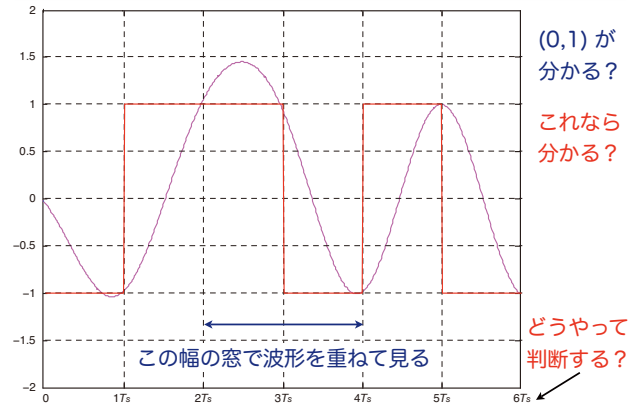


Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## 受信フィルタ出力

20



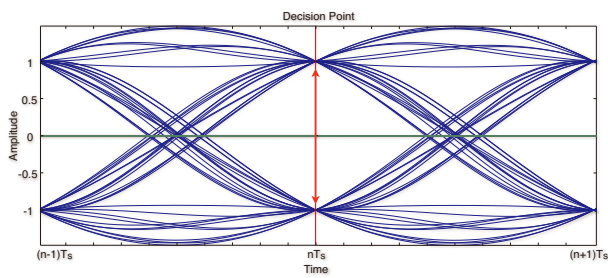
Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## アイパターン (ロールオフフィルタ使用)

21

雑音なしの理想状態



判定ポイントはアイが最も開いているところ  
ロールオフフィルタだときれいに開く

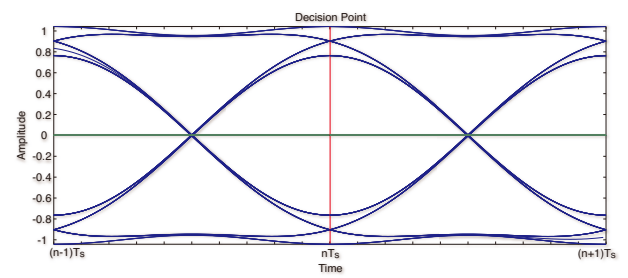
Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## ガウスフィルタ使用時のアイ

22

雑音なしの理想状態



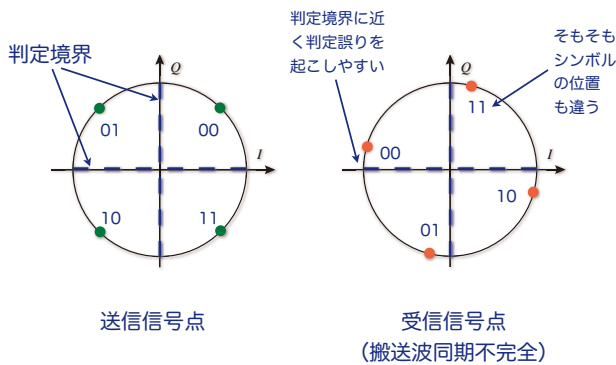
後続のシンボルと干渉を起こしてアイが広がらない

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## 搬送波の位同期が不完全の場合

23



送信号点

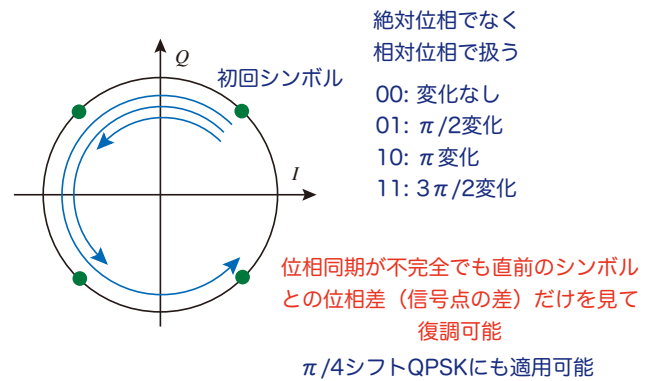
受信信号点  
(搬送波同期不完全)

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.

## 差動符号化変調

24



絶対位相でなく  
相対位相で扱う

- 00: 変化なし
- 01:  $\pi/2$ 変化
- 10:  $\pi$ 変化
- 11:  $3\pi/2$ 変化

位同期が不完全でも直前のシンボルとの位相差 (信号点の差) だけを見て復調可能

$\pi/4$ シフトQPSKにも適用可能

Takahiko Saba

Dept. of Computer Science, C.I.T.