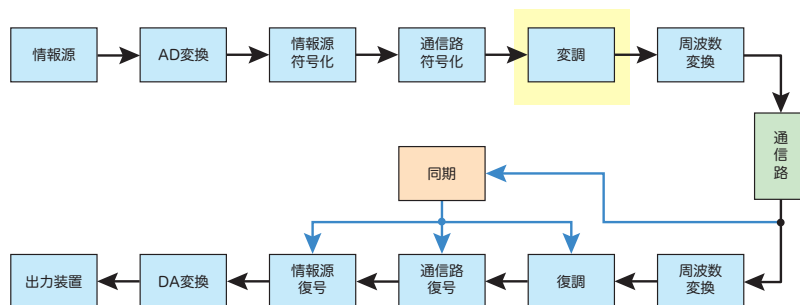


第五章

デジタル変調の基礎

デジタル通信システム



変調 (modulation)

送りたい情報信号よりも高い周波数成分を有する正弦波に情報信号を乗せて伝送する



情報信号を用いて搬送波を変化させる

元の情報信号



変化した搬送波

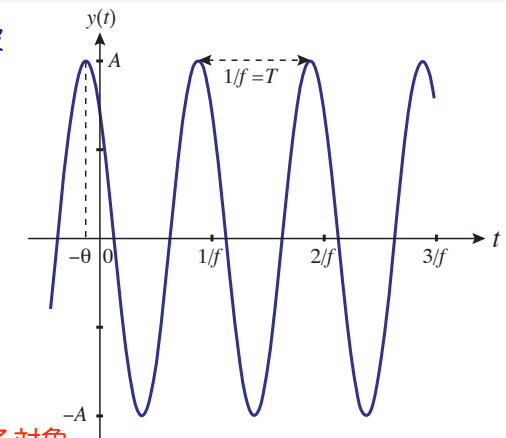


搬送波 (carrier) の一般形

周波数 f [Hz] の正弦波

$$y(t) = A \cos(2\pi f t + \theta)$$

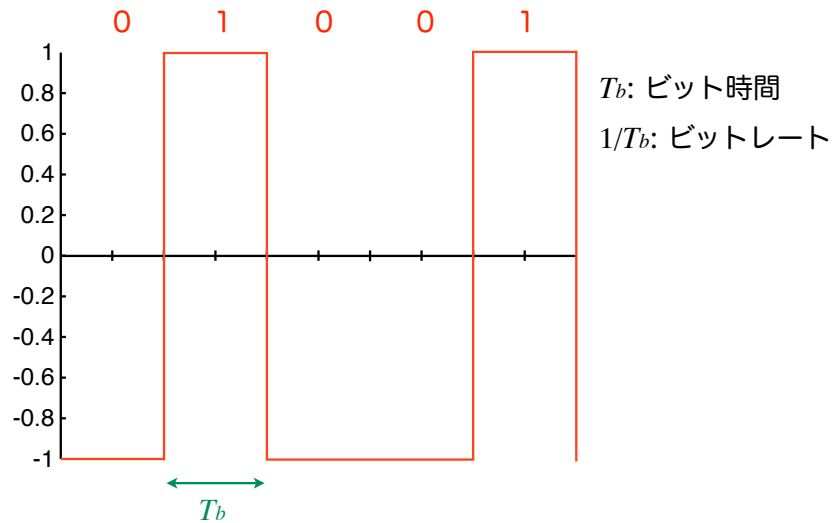
信号の三大要素



変調信号で変化を与える対象

変調信号 (ベースバンド信号)

5



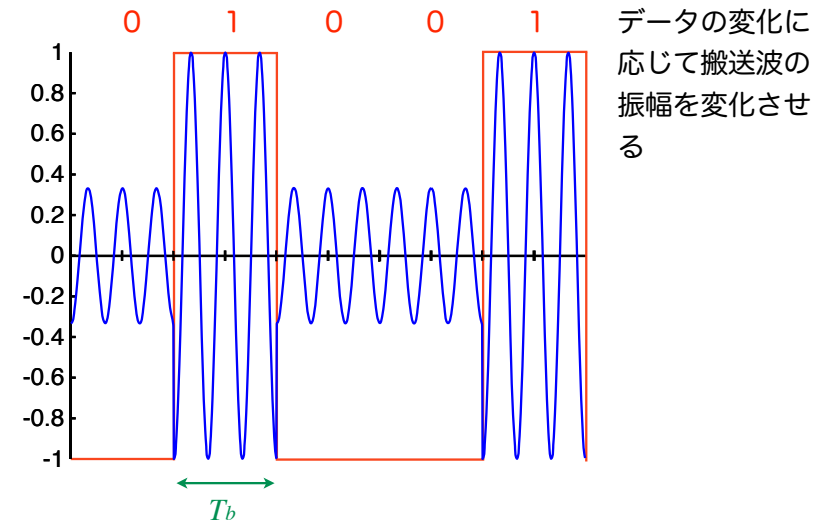
Takahiko Saba

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



ASK (Amplitude Shift Keying)

7



Takahiko Saba

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



デジタルの振幅変調

6

情報符号 "1", "0" に対して二つの振幅状態を定め、
与えられた搬送波の振幅に変化を与える方式

$$s_0(t) = A_0 \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad \text{符号 "0" のとき}$$

$$s_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad \text{符号 "1" のとき}$$

$$-\frac{T_b}{2} \leq t \leq \frac{T_b}{2}$$

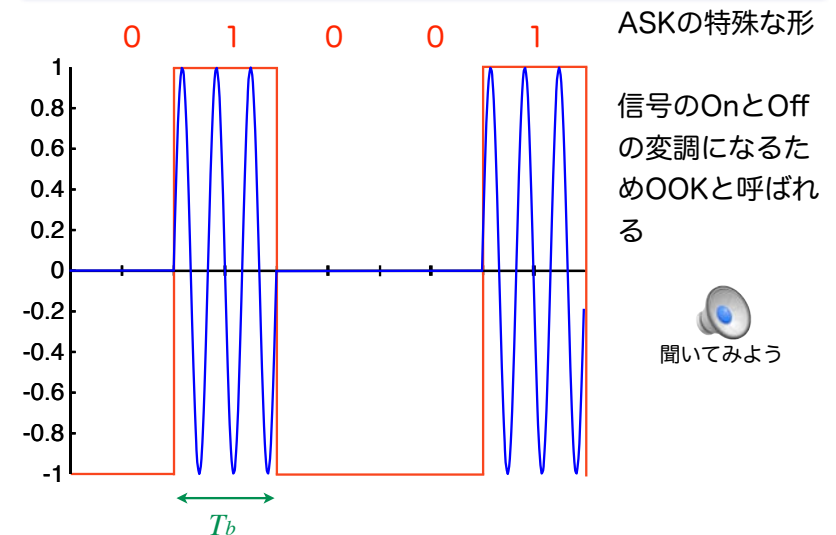
Takahiko Saba

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



OOK (On-Off Keying)

8



Takahiko Saba

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



デジタルの周波数変調

9

情報符号 "1", "0" に対して搬送波周波数 f_c を中心とする
対称な二つの周波数 f_0, f_1 を定め周波数を変化させる方式

$$s_0(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \theta) \quad \text{符号 "0" のとき}$$

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \theta) \quad \text{符号 "1" のとき}$$

$$-\frac{T_b}{2} \leq t \leq \frac{T_b}{2} \quad \begin{aligned} f_0 &= f_c + \Delta f \\ f_1 &= f_c - \Delta f \end{aligned}$$

デジタルの位相変調

11

情報符号 "1", "0" に対して二つの位相状態を定め、
与えられた搬送波の位相に変化を与える方式

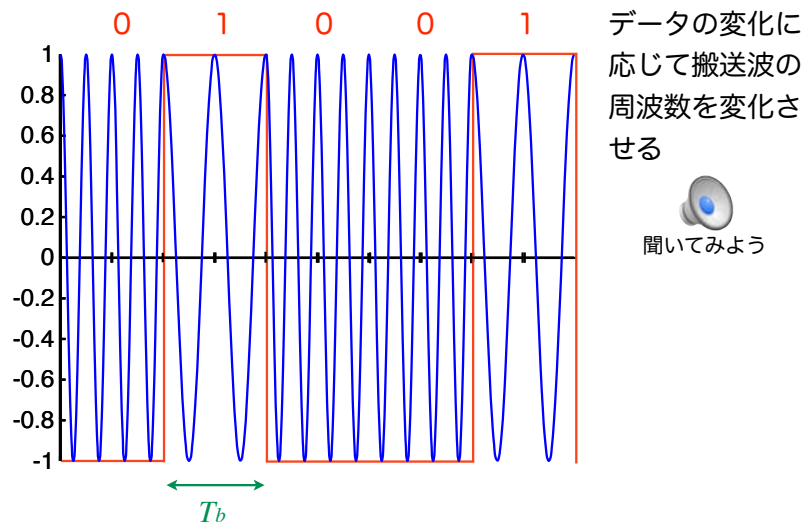
$$s_0(t) = A \cos(2\pi f_c t + \pi) \quad \text{符号 "0" のとき} \\ = -A \cos(2\pi f_c t)$$

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f_c t + 0) \quad \text{符号 "1" のとき}$$

$$-\frac{T_b}{2} \leq t \leq \frac{T_b}{2}$$

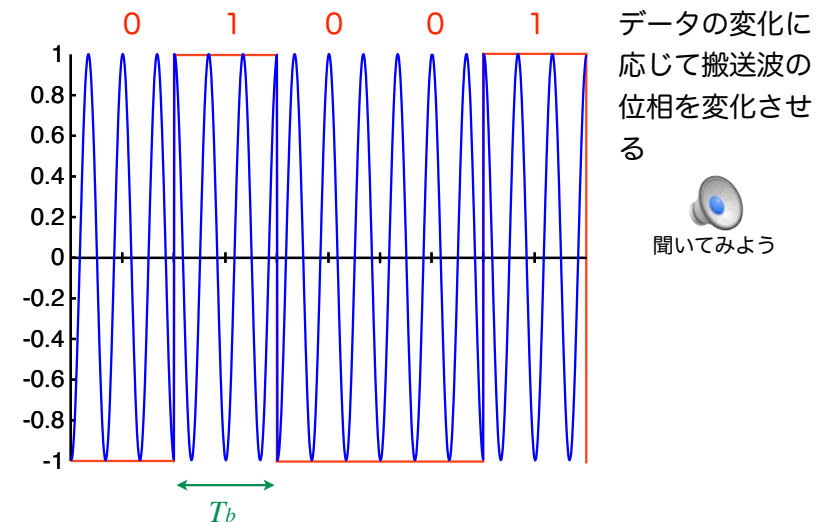
FSK (Frequency Shift Keying)

10



PSK (Phase Shift Keying)

12



多値変調方式

13

👤 1ビットのデジタル情報を、振幅／周波数／位相の異なる2種類の波形を使って伝送

- 2値 (binary) 変調方式 (バイナリASK, バイナリFSK, バイナリPSK)

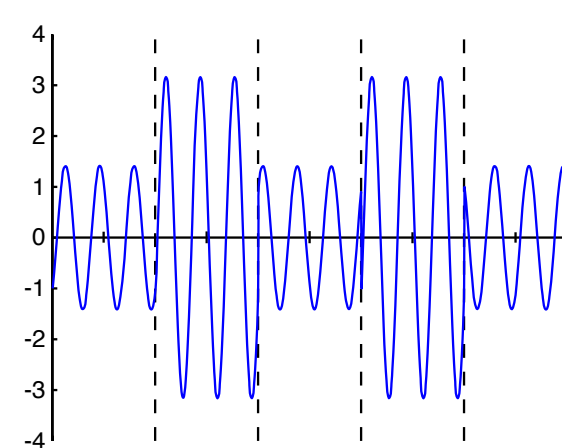
👤 複数の振幅, 周波数, 位相状態を用いれば, 一度に複数(k)ビットを伝送可能

- 多値/M値 (M-ary) 変調方式 (一般に $M = 2^k$)
- 同じ伝送帯域幅の場合は 倍の伝送速度
- 同じ伝送速度の場合は伝送帯域幅が

注) -ary : ~に関するもの, ~に属するもの
diction : 言葉遣い, 語法 → dictionary
bin- : 二, 両 → binary

APSK (振幅位相シフトキーイング)

15

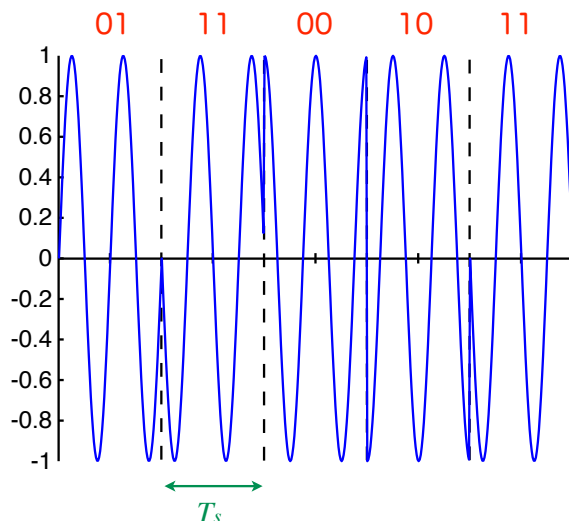


情報 k ビットに
対し 2^k 通りの位
相と振幅の状態
を割り当てる

Amplitude and Phase
Shift Keying (APSK)

QPSK (Quadri-Phase Shift Keying)

14



情報2ビットに
対し 通りの
位相状態を割り
当てる

2値変調の状態
の単位, ビット
に対して多値変
調の状態の単位
を と呼
ぶ

Bit rate vs. Baud (Symbol) rate

16

👤 bit: 情報の単位

- ビットレート [bit/sec, bps] = 1秒間に含まれるビット数

👤 symbol: 信号(変調)の状態の単位

- シンボルレート [symbol/sec] = ボーレート [baud]
= 1秒間に含まれるシンボル数
=

— 2値変調の場合: ビットレート シンボルレート

— 多値変調の場合: ビットレート シンボルレート

👤 ITU-T (国際電気通信連合の電気通信標準化部門)は,
ボーレートという用語をシンボルレートで置き換える
よう推奨

PSK信号の電力？エネルギー？

17

第三章のおさらい 周期信号
非周期信号

シンボル時間 T_s の間だけ注目

搬送波電力

$$P_c = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s^2(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} A^2 \cos^2(\omega t) dt$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \frac{A^2}{2} \{1 + \cos(2\omega t)\} dt = \frac{A^2}{2}$$

シンボル当たりのエネルギー

$$E_s = \int_0^{T_s} s^2(t) dt = \frac{A^2 T_s}{2} = P_c T_s$$

信号振幅

$$A = \sqrt{2P_c} = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}$$

Takahiko Saba

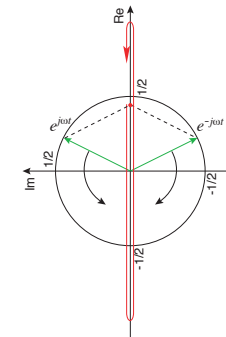
Dept. of Computer Science, C.I.T.

信号の複素表現 (3章のおさらい)

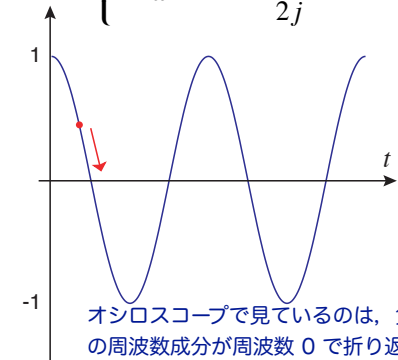
19

オイラー (Euler) の公式

$$\begin{cases} e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t \\ e^{-j\omega t} = \cos \omega t - j \sin \omega t \end{cases}$$



$$\begin{cases} \cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \\ \sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \end{cases}$$



オシロスコープで見ているのは、負の周波数成分が周波数 0 で折り返り重なって見えていると解釈する

Takahiko Saba

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

PSK信号の各種数式表現

18

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

$$= \sqrt{2P_c} \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

$$= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

$$= A \cos \phi_i \cos(2\pi f_c t) - A \sin \phi_i \sin(2\pi f_c t)$$

$$= \frac{A}{2} (e^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t} + e^{-j\phi_i} e^{-j2\pi f_c t})$$

$$= \text{Re} \left\{ \underline{Ae^{j\phi_i} e^{j2\pi f_c t}} \right\}$$

ϕ_i : i 番目のシンボルに対応した位相
 f_c : キャリア周波数
 A : キャリア振幅
 P_c : キャリアの電力
 E_s : 1シンボル当たりのエネルギー
 T_s : シンボル時間

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

複素包絡線 (complex envelope)

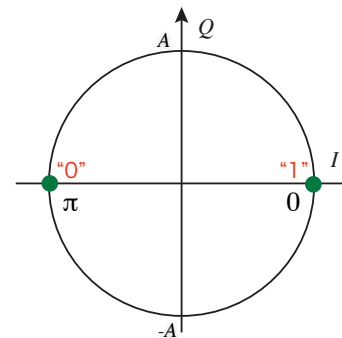
= 等価低域信号

Takahiko Saba

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

信号点配置 (constellation)

20



BPSKの信号点配置

複素包絡線の状態を I-Q 位相平面上に表したもの

例) BPSK信号

$$\text{複素包絡線} = Ae^{j\phi_i}$$

$$= A(\cos \phi_i + j \sin \phi_i)$$

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

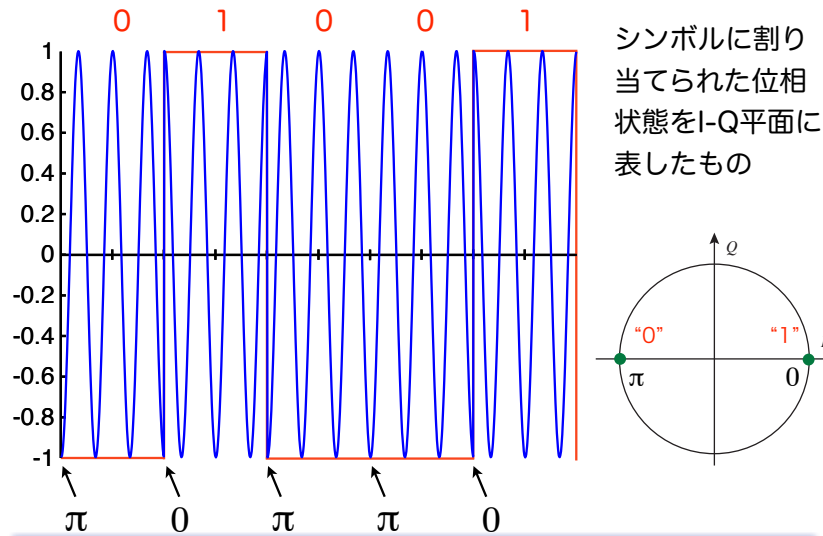
I: in-phase (同相) = cos成分 (実数成分)

Q: quadrature phase (直交位相) = sin成分 (虚数成分)

注) constellation: 星座

Takahiko Saba

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



演習

- QPSK信号の信号点配置を図示せよ。ただし、四つの位相はそれぞれ $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$ とし、搬送波の振幅は A とする。
- BASK信号 $s(t)$ を複素信号で表せ。ただし、 i 番目のシンボルの振幅は A_i ($A_i \in \{A_0, A_1\}$) とし、搬送波の周波数は f_c 、初期位相は 0 とする。また、信号点配置を図示せよ。
- BFSK信号 $s(t)$ を複素信号で表せ。ただし、 i 番目のシンボルの周波数は $f_c + f_i$ ($f_i \in \{\Delta f, -\Delta f\}$) とし、搬送波の振幅は A 、初期位相は 0 とする。また、信号点配置が図示可能なら図示せよ。