

通信概論

野中 弘二

高知工科大学

電子・光システム工学科

通信概論 日程:6月10日開始8月5日終了

6月29日小テスト1、7月29日小テスト2

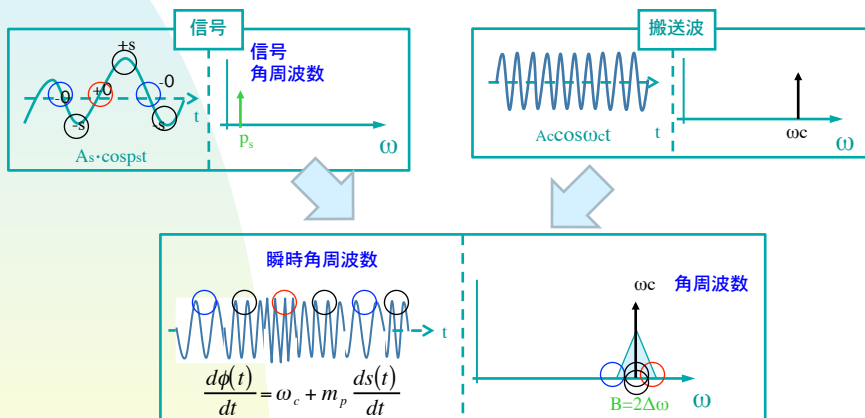
8月5日本テスト

陸上・海上無線技師の資格関連科目です!

関連科目通信処理概論:10月開始

角度変復調方式1 (位相・周波数に情報を乗せる)

PM: 位相変調 $f_{PM}(t) = A_c \cos(\omega_c t + m_p s(t) + \theta_c)$
瞬時位相角



角度変復調方式2 (位相・周波数に情報を乗せる)

FM: 周波数変調 $f_{FM}(t) = A_c \cos\left\{\omega_c t + \theta_c + k_f \int_{-\infty}^t s(t) dt\right\} = A_c \cos\{\omega_c t + m_f \sin pt\}$

信号: $A_s \cdot \cos pt$ (信号角周波数 p)

搬送波: $A_c \cdot \cos \omega_c t$ (角周波数 ω_c)

瞬間角周波数: $\omega(t) = \frac{d(\omega_c t + m_f \sin pt + \theta_c)}{dt} = \omega_c + m_f \cos pt$

角周波数: ω_c , $\omega_c - m_f p$, $\omega_c + m_f p$

帯域幅: $B = 2\Delta\omega$

信号強度振と波形の関係 p62

例: $s(t) = 1 \cdot \cos pt$ の場合

$f_{PM} = A_c \cos(\omega_c t + m_p \cos pt + \theta_c)$

$f_{FM}(t) = A_c \cos\left\{\omega_c t + \theta_c + k_f \int_{-\infty}^t s(t) dt\right\} = A_c \cos\{\omega_c t + m_f \sin pt\}$

変調指数: m_F

最大周波数遷移: $\pm \Delta\omega$

$m_f = \frac{k_f A_s}{f_s} = \frac{\Delta\omega}{\omega_s}$

(a) 信号波 $s(t)$

(b) PM波 $f_{PM}(t)$

(c) FM波 $f_{FM}(t)$

FM変調のベッセル表示

$$f_{FM} = A_c \cos(\omega_c t + m_F \sin pt + \theta_c)$$

$$f_{FM} = A_c \left\{ \cos \omega_c t \cdot \cos(m_F \sin pt) - \sin \omega_c t \cdot \sin(m_F \sin pt) \right\}$$

ベッセル関数 => $J_n(m_F)$

$$\cos(m_F \sin pt) \rightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_F) \cos npt$$

$$\sin(m_F \sin pt) \rightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_F) \sin npt$$

- FM変調は振幅が振動しながら収束するベッセル関数の級数展開で表せる

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_F) \cos((\omega_c + np)t)$$

- 信号変調周波数pの整数倍に複数のスペクトルピークが立つ

↓

- 帯域を広く取れば、信号強度、信号変調速度を自由に送れる

図 6.2 第 1 種ベッセル関数 $J_n(m_F)$

狭帯域FM変調

- FM変調はベッセル関数の級数展開で表せる

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_F) \cos((\omega_c + np)t)$$

- 狭帯域 → $J_0=1, J_1=m_F/2, J_n \Rightarrow$ 小さくて無視できる

$$= A_c \cos \omega_c t + \frac{m_F A_c}{2} \cos(\omega_c + p)t - \frac{m_F A_c}{2} \cos(\omega_c - p)t$$

- 周波数スペクトルはAM変調と相似形になる!
- 帯域 $B \approx 2p$

広帯域FM変調

- FM変調はベッセル関数の級数展開で表せる

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(m_F) \cos((\omega_c + np)t)$$

広帯域 $m_F > 1 \Rightarrow n > 2$ の項 無視できない

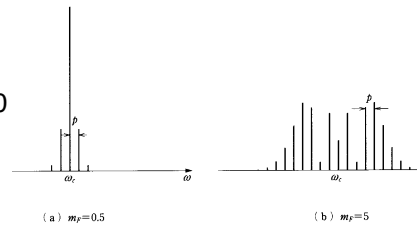
周波数スペクトルは

ω_c の両翼に信号周波数 p だけ離れた無数のスペクトル成分が強度が振動しながら混じり合って減衰していく

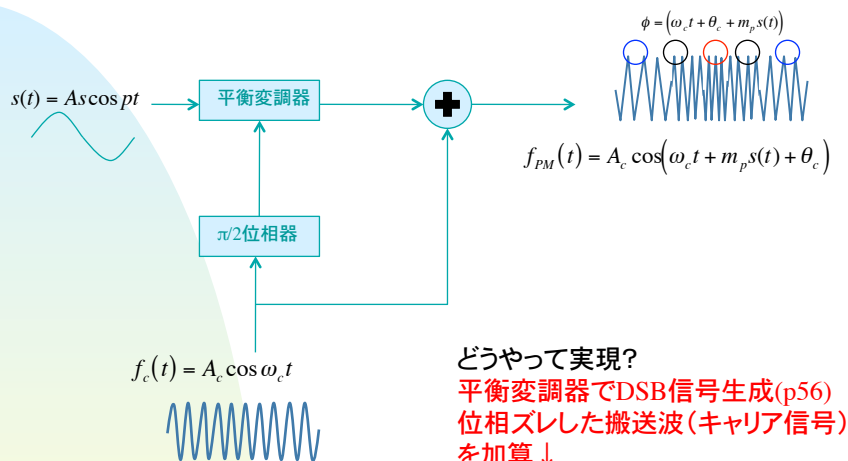
- 広帯域: **カーソンの法則**

$$B = 2(\Delta\omega + p) = 2(m_F + 1)p$$

- 狭帯域: m_F が小さい (< 1) とし $m_F \sim 0$ で $B \approx 2\Delta\omega$ と近似できる



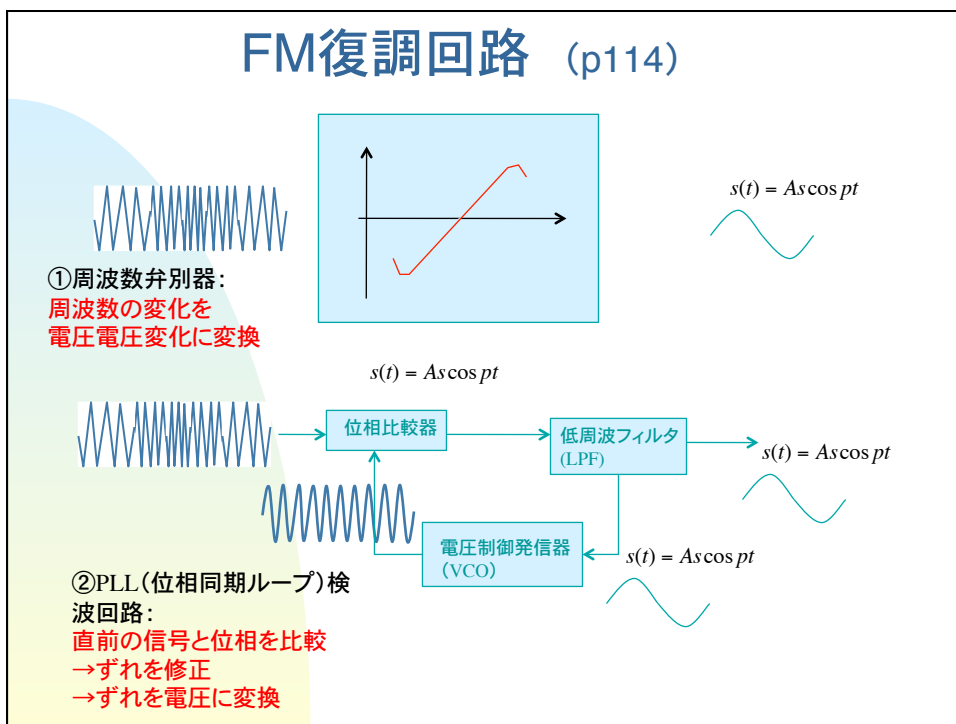
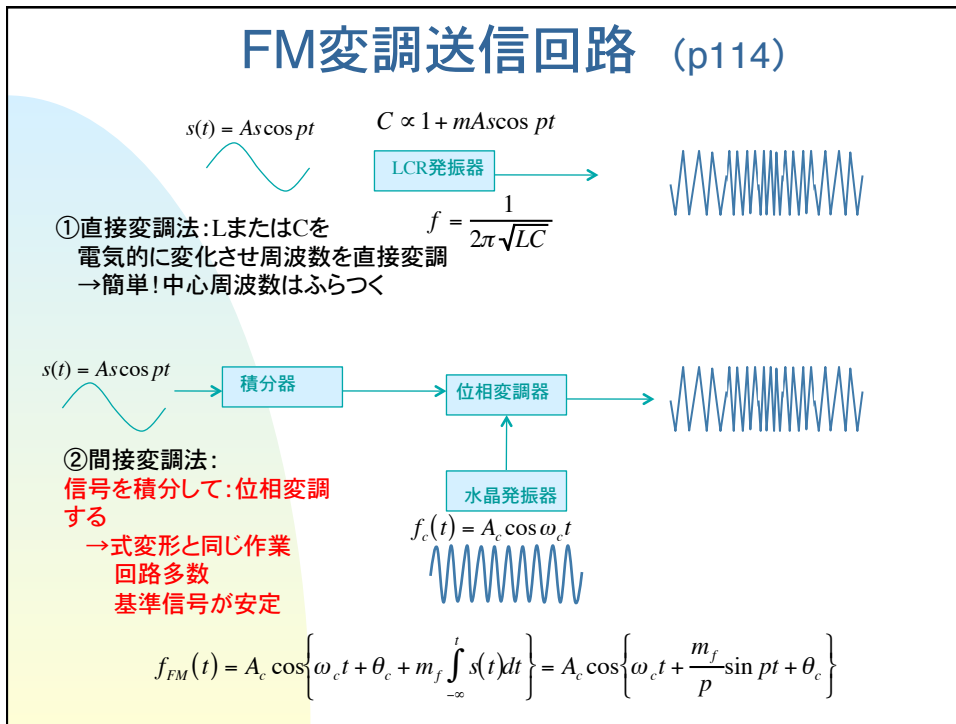
PM変調送信回路 (p67)



どうやって実現?

平衡変調器でDSB信号生成(p56)
位相ズレした搬送波(キャリア信号)
を加算↓

DSB-SC変調+キャリア周波数
でPM変調



FM:パワーと雑音の特徴

$$f_{FM}(t) = A_c \cos\left\{\omega_c t + \theta_c + k_f \int_{-\infty}^t s(t) dt\right\} = A_c \cos\{\omega_c t + m_f \sin pt\} \quad m_f = \frac{k_f A_s}{f_s} = \frac{\Delta\omega}{\omega_s}$$

- **パワー一定: 搬送波 P_c =信号 P_{FM}**

$$P_{FM} = P_c + P_s = \frac{A_c^2}{2} J_0^2(m_f) + 2 \times \frac{A_c^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} J_n^2(m_f) = \frac{A_c^2}{2} \sum_{n=0}^{\infty} J_n^2(m_f) = \frac{A_c^2}{2}$$

- **S/N調整可能**



$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out,FM} = \frac{A_c^2/2}{N_0} = \frac{3Bk_f^2 A_c^2}{8\pi^2 f_s^2} \left(\frac{A_c^2}{2N}\right) = 3m_f^2 (m_f + 1) \left(\frac{C}{N}\right)$$

- **$m_f = \Delta\omega$ 大ならS/Nを大きくできる**

復習AM受信信号: 雑音耐性(p70-71)

$$f_{AM} = A_c (1 + m \cos pt) \cos \omega_c t + noise(t)$$

- **振幅変調 (AM変調) 強度包絡線検波、白色雑音の場合**

$$v_{out} \approx A_c (1 + m \cos pt) + noise(t) \quad \text{包絡線}$$

信号電力 $\frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$	雑音電力 $N_{in} = \frac{\omega_m N}{\pi} = KB$	S/N比 $\left(\frac{S}{N}\right)_{in,AM} = \frac{(2+m^2)A_c^2}{4N_{in}}$
--	--	---

- **(DSB)同期検波検波の場合**

$$\frac{A_c}{2} \left\{ \cos(\omega_c + p)t + \cos(\omega_c - p)t \right\} + noise(t)$$

信号電力 $P = 2P_s = \frac{A_c^2}{4}$	雑音電力 $N_{in} = \frac{\omega_m N}{\pi} = KB$	S/N比 $\left(\frac{S}{N}\right)_{in,DSB} = \frac{A_c^2}{4N_{in}}$
--------------------------------------	--	---

- **(SSB)同期検波: パワー半分帯域半分**

$P_{SSB} = 1/4 P_{DSB} = \frac{A_c^2}{8}$	$\left(\frac{S}{N}\right)_{in,SSB} = \frac{\pi W^2}{4\omega_m N} = \frac{A_c^2}{4BK}$
---	---

パワー半分S/N比半分 → 同じパワーで等価

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out,AM, \text{Hourakusem}} = \frac{m^2 A_c^2}{4N_{in}}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out,AM} = \frac{m^2}{(2+m^2)} \left(\frac{S}{N}\right)_{in,AM}$$

同期検波S/N

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out,DSB} = \frac{A_c^2}{2N_{in}}$$

同期検波S/N

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out,SSB} = \frac{A_c^2}{4N_{in}}$$

AM/FM比較

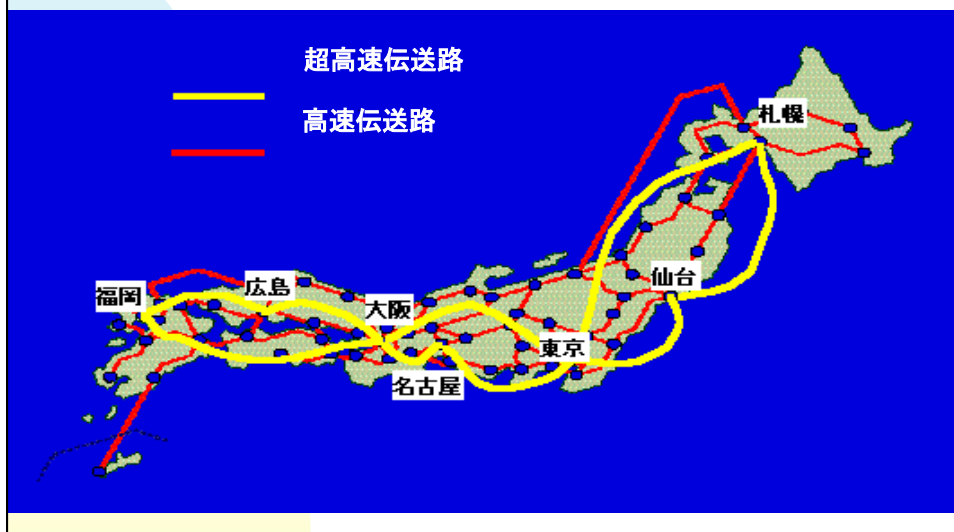
$$P_{AM} = P_c + 2P_s = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{out,AM} = \frac{A_c m^2}{4N} \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{out,AM} = \frac{m^2}{(2+m^2)} \left(\frac{S}{N} \right)_{in,AM}$$

$$P_{FM} = \frac{A_c^2}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(m_f) = \frac{A_c^2}{2} \quad \left(\frac{S}{N} \right)_{out,FM} = \frac{A_c^2}{N_0} = \frac{3Bk_f^2 A_c^2}{8\pi^2 f_s^2} \left(\frac{A_c^2}{2N} \right) = 3m_f^2 (m_f + 1) \left(\frac{C}{N} \right)$$

- AMは単純: 受信電波強度の揺らぎで誤読の可能性
 - 側帯波周波数は固定、変調度でS/N調整
 - DSB,SSBで周波数帯域や送信RFパワーを節約
- ↓
- FMはパワー変化せず、周波数で変調深度が変化
 - 変調指数 m_f を深くすると、信号帯域が広くとれる
 - 高品質、低雑音な信号再生可能

光ファイバ高速 デジタル通信網

日本全国の主要都市間は
光ファイバで結ばれている
総延長: 600万km@1997



アナログからデジタルへ

- ほとんどのユーザ信号は**アナログ**
→音声・画像・文字
- 一定の約束事の範囲で**デジタル化**
→**符号化**(アナログでの変調に対応)
- なんでデジタル?光伝送?
- ネットワークは信頼と節約のせめぎ合い

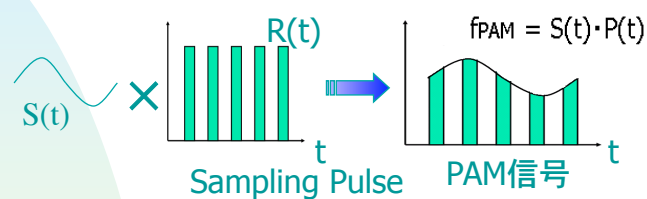
構成技術1:ユーザインターフェース

- **符号化(Coding)技術**
人-人のインターフェースはアナログ
(音・画・文書)
→いかに省力、多数処理するか?デジタルへ!
- **サンプリング**(圧縮・変調・デジタル化)
ナイキスト定理(標本化定理)
音声・画像符号化

信号の離散化→パルス符号変調 (Pulse Code Modulation: PCM)

- 標本化(サンプリング→PAM信号)
- 量子化(→量子化歪み)
- 2進符号化
- 符号化・復号化回路
- 雑音見積もり、雑音処理

■ PAM(パルス振幅変調) p120



- アナログのキャリア周波数に比べ、PAM信号の繰り返しはゆっくりでも OK.
- 情報信号の最高周波数の2倍以上の繰り返し信号のPAM信号が情報の完全な再成に必要→ナイキスト定理
- 細かいPAM信号でアナログ情報の瞬時値を抜き出す⇒標本化(Sampling)

パルス振幅変調_{p120}

(Pulse Amplitude Modulation: PAM)

- 短パルスの頭の高さで信号強度を表現

$$f_{PAM} = s(t)p(t)$$

パルスのフーリエ級数展開は

$$p(t) = \frac{1}{T} + \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega_s \tau / 2)}{(n\omega_s \tau / 2)} \cos n\omega_s t$$

P.31より

$$F_{PAM}(\omega) = \frac{1}{T} S(\omega) + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\omega_s \tau / 2)}{(n\omega_s \tau / 2)} \cdot \{S(\omega - n\omega_s) + S(\omega + n\omega_s)\}$$

図6.2より 0- ω_m だけ通過するフィルタで再生可

標本化(Sampling)_{p122}

PAMのパルス幅を $\tau \rightarrow 0$ インパルス信号

$$\tilde{F}_{PAM}(\omega) = \frac{1}{T} S(\omega)$$

波形を間隔Tのパルス列で打ち抜き
(パルス振幅変調)波形を生成→量子化へ

- ナイキスト定理 (どこまで間引けるか?)

入力波形に含まれる最高角周波数成分 $\omega_m < \omega_s/2$ とき、
 $T = 2\pi / \omega_s$ 間隔のパルス列から元の波形を再現できる。

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT) \frac{\sin\{(\omega_s t - nT)/2\}}{\{(\omega_s t - nT)/2\}}$$

サンプリング周波数 f_0
なら送信帯域 $1/2f_0$ 以下

量子化

(アナログパルス⇔デジタルパルス)

ずれ, 誤差 ⇒ 量子化歪み

$$S = \frac{V}{2^n} \text{ (量子化ステップ)}$$

Σ量子化歪み = 量子化雑音電力 (NQ)

$$NQ = \frac{s^2}{12} = \frac{V^2}{12 \times 2^{2n}}$$

量子化_{p76-78}

- パルス振幅変調値を離散値に変換 → 量子化
- 量子化ステップ (どこまで再現するか?)
 - Samplingのレベル数設定
 - 量子化雑音量を決定
 - 必要な送信データレートも決定
- PCM Bit-Rate (bit/s)
 - 標本周期(Hz) × 量子化ステップ(bit)

量子化歪み^{p77}

- **量子化レベル値と真値の誤差の総和**
 (量子化区間*i*で*y_i*値を取る確率*p_i*は一定と仮定)

$$\bar{y}_i = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} : (s = y_{i+1} - y_i)$$

$$N_Q = \sum_{i=1}^n p_i \int_{y_i}^{y_i+s} \left\{ y - \left(y_i + \frac{s}{2} \right) \right\}^2 dy = \sum_{i=1}^n p_i \frac{s^3}{12} = \frac{s^2}{12}$$
- **量子化ステップと雑音電力**

$$s = \frac{V}{2^n} \quad N_Q = \frac{V^2}{12 \times 2^{2n}}$$
- **小信号の歪みを抑える→非線形量子化**

詳しく
 みてみよう

音声の符号化

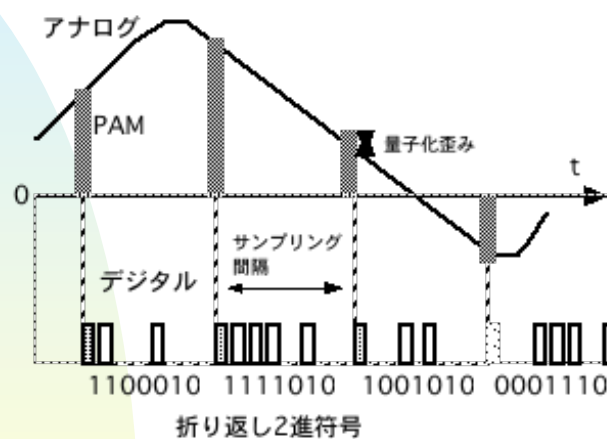
- 可聴音声周波数 0.1~10kHz(個人差有)CDでは 44.1 kHz-16bitサンプリング膨大なデータ!
- 電話音声の想定帯域0.3~3.4kHz
 $1/2f_0 = 1/6.8\text{kHz} \rightarrow$ サンプリング周波数 を8kHz
- 量子化ステップ256→8bit 規定
- 64kbit/s Full Speck (CCITT標準)

2進符号化方式

- サンプル結果をデジタル2進数で表す
例 8 bit → $2^8=256$ ステップ
- 自然2進符号 → 素直
- 交番2進符号 → 1bit誤りに強い
- 折り返し2進符号 → 正負の識別
- 小信号の歪みを抑える → 非線形量子化
- 量子化+符号化 ⇒ A-D変換器

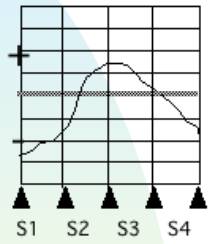
詳しく
みてみよう

PCMデジタル符号化例

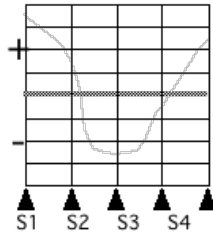


演習1.(例)の波形にならって以下のS1～S5の3bitデジタル信号列を信号波形に復号化せよ

問題4:折り返し2進符号で表される3ビット列が**入力**されてきた。
構成する波形を、下の枠内に描け。 S1 S2 S3 S4 S5
←b1,b2,b3<111 101 010 001 110



(例)



量子化振幅	折り返し2進符号
7	111
6	+ 110
5	101
4	100
3	000
2	- 001
1	010
0	011

b3, b2, b1

2. さらに(例)の波形をデジタル2進数のビット列に符号化せよ

PCM化する際の雑音

- 標本化雑音
 - 折り返し雑音・補間雑音
- 量子化雑音
 - 量子化歪み・過負荷雑音
- 伝送路雑音
 - 信号の伝送劣化歪みによる識別誤り
 - 誤り訂正符号(SDHで詳しく述べる)

結局 何でデジタル使うの？

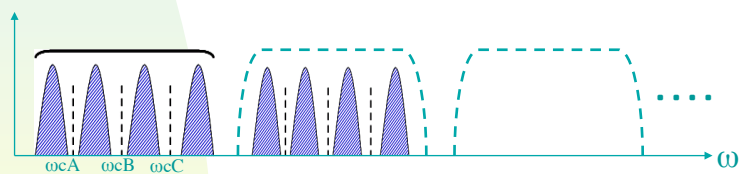
- 悪いとこ
 - ユーザのアナログをわざわざデジタル化
 - アナログ→デジタル 誤差発生
 - 同じ情報ならたくさんの伝送データ必要
- よいとこ
 - 一旦デジタルにしたら雑音に強い
 - 誤り発見・訂正可能
 - どんな情報も一括取り扱い、複製簡単
 - 様々な暗号や圧縮手法
 - 効率的時間多重・伝送可能
 - LSI技術と相性が良いので量産可→安い!

■ 復習 多重の方法(FDM)

アナログ変調信号(搬送波に情報を乗せる)

⇒FDM: 周波数多重

1. ユーザチャンネルごとにキャリア周波数をずらす
2. 複数チャンネルを群としてキャリア周波数をずらす



「群変調方式」の多段の群による多重の組み方:「FDMハイアラキー」

デジタルの多重通信方式教科書121p

- 1 もちろん時間多重TDM
- ただし網同期、Byte多重のISDN,SDH伝送方式
- 2 周波数多重FDM 基本は非同期アナログ的(最近はケーブルネット、電話回線とADSLの共有などアクセスに活用)
- 3 符号分割多重
 - ・高帯域を多数の端末(チャンネル)に送りたい
 - ・信号を盗聴されないようにしたい
 →符号分割多重方式(Code Division Multiplex: CDM)

ベースバンド伝送の デジタル多重化・フレーム同期

- なんでデジタル?
 - ・周波数利用効率は悪い(Tel 4kHz, ISDN64kbit/s)
 - ・雑音累積小・伝送品質は均一に保てる
 - ・FDMよりはTDMがLSI化が容易
 - ・扱う信号自体がデジタルが増加
- コンテナサイズをそろえて細密充填:フレーム
 - 125 μ s(1/8kHz)周期で頭出し:**フレーム同期**
 たとえば8kHz,8bit(N-ISDN 0次群インターフェース),
 24ch+同期1bit=193bit→1フレーム 24ch分
 1.544Mbit/s(B-ISDN 1次群インターフェース)を一
 気に同期