

2013年前期
無線通信システム

第4回 デジタル変調と波形整形

荒木 純道 <araki@mobile.ee.>
2013年5月8日

講義スケジュール(前半)

	日付	教科書	内容
第1回	4月10日	1、7	無線通信システムの概要 ～IEEE802.11WLANを例に～
第2回	4月17日	2、5、 他	無線通信システムのモデルとフェージング
第3回	4月24日		電波伝搬の統計的性質
第4回	5月8日	3.3、 3.4	デジタル変調と波形整形
第5回	5月22日	3.5	復調方式と誤り率特性
第6回	5月29日	3.5	符号間干渉と波形等化器
第7回	6月5日	4.3	中間試験

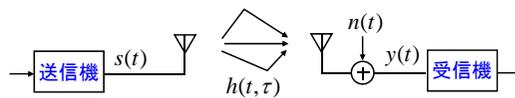
2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

2

復習

■ 無線通信システムのモデル



$$y(t) = \int h(\tau)s(t-\tau) d\tau + n(t)$$

■ 電波伝搬の統計的性質に基づいたシステム設計

Wiener Kinchin の定理: $\rho(\Delta t) = \int S(f)e^{-j2\pi f\Delta t} df$

プロファイル	相関	システム設計
ドップラプロファイル	時間相関	再送制御
角度プロファイル	空間相関	ダイバーシチ
遅延プロファイル	周波数相関	OFDM

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

3

講義内容

- 送信機の構成
- 振幅変調
- 位相変調
- 周波数変調
- 波形整形(帯域制限)
- 測定器を用いた実験

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

4

送信機

メッセージ信号 $m(t) = \sum_n a_n \delta(t - nT_s)$ バイナリ系列 $a_n = \begin{cases} 1, & \text{if symbol 1} \\ 0, & \text{if symbol 0} \end{cases}$ 多値数/ビット数 $M = 2$
 $H = \log_2 M = 1$ シンボル周期 T_s

デジタル変調 $s(t) = s_1(t) + js_0(t) = f(m(t))$ 変調マップ関数

- 振幅変調
- 位相変調
- 周波数変調

波形整形(帯域制限) $x(t) = x_1(t) + jx_0(t) = \int g(\tau)s(t-\tau)d\tau$ パルス信号

- 矩形パルス
- ナイキストパルス
- ガウスパルス

2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 5

送信機

アナログ変調 $y(t) = x_1(t) \cos(2\pi f_c t) - x_0(t) \sin(2\pi f_c t)$

同相成分(I) 直交成分(Q)

複素ベースバンド信号

$y(t) = \text{Re}[r(t) \exp(j\theta(t)) \exp(j2\pi f_c t)] = r(t) \cos(2\pi f_c t + \theta(t))$

振幅 搬送波 位相

2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 6

変調方式とパルス波形の設計

搬送波周波数 f_c	↔	カバレッジ $g_{pl} = -20 \log_{10} d - 20 \log_{10} f_c + 28$
シンボル長 T_s	↔	帯域幅 $B \propto 1/T_s$
変調多値数 M	↔	データレート $\frac{\log_2 M}{T_s}$
変調方式 $f(\cdot)$	↔	電力効率、回路規模、ビット誤り率 P_e
パルス波形 $g(t)$	↔	帯域制限/波形歪み $S_x(f) = g(f) ^2 S_s(f)$

2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 7

振幅変調 (ASK)

デジタル変調 $s(t) = s_1(t) = m(t)$

波形整形(矩形パルス) $x(t) = \int g_{\text{rect}}(\tau)s(t-\tau)d\tau = \sum_n a_n g_{\text{rect}}(t - nT_s)$

アナログ変調 $y(t) = x(t) \cos(2\pi f_c t)$

$= \begin{cases} \cos(2\pi f_c t), & \text{if } a_n = 1 \\ 0, & \text{if } a_n = 0 \end{cases}$

特徴

誤り率 = 可、電力効率 = 可、回路規模 = 優

2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 8

位相変調 (BPSK)

デジタル変調

$$s(t) = \exp(j\pi m(t))$$

$$= \cos(\pi m(t)) + j \sin(\pi m(t))$$

$$= \sum_n a_{2n} \delta(t - nT_s) \quad a_{2n} = \begin{cases} 1, & \text{if } a_n = 0 \\ -1, & \text{if } a_n = 1 \end{cases}$$

NRZ信号

波形整形 (矩形パルス)

$$x(t) = \sum_n a_{2n} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

アナログ変調

$$y(t) = x(t) \cos(2\pi f_c t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_c t), & \text{if } a_n = 0 \\ -\cos(2\pi f_c t), & \text{if } a_n = 1 \end{cases}$$

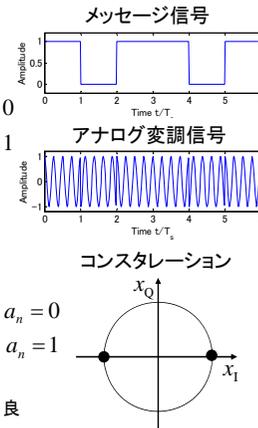
特徴

誤り率 = 優、電力効率 = 良、回路規模 = 良

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

9



位相変調 (QPSK)

メッセージ信号

$$M = 4 \rightarrow 2\text{つのバイナリ系列 } m_1(t), m_0(t)$$

デジタル変調 + 波形整形

$$s(t) = \exp(j\pi m_1(t)) + \exp(j(\pi m_0(t) + \pi/2))$$

$$= \cos(\pi m_1(t)) + j \cos(\pi m_0(t))$$

$$= \sum_n a_{2n} \delta(t - nT_s) + j \sum_n a_{2Qn} \delta(t - nT_s)$$

$$x(t) = \sum_n a_{2n} g_{\text{rect}}(t - nT_s) + j \sum_n a_{2Qn} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

アナログ変調

$$y(t) = x_1(t) \cos(2\pi f_c t) - x_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$= \sqrt{2} \cos(2\pi f_c t + \text{atan}(x_1(t), x_Q(t)))$$

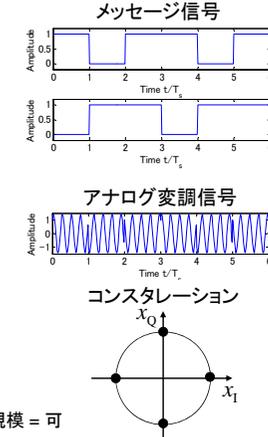
特徴

レート = 良、誤り率 = 優、電力効率 = 良、回路規模 = 可

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

10



振幅位相変調 (QAM)

メッセージ信号

$$M = 16 \rightarrow 2\text{つの4値系列 } m_1(t), m_0(t)$$

デジタル変調 + 波形整形

$$s(t) = s_1(t) + j s_Q(t)$$

$$s_1(t) = 2m_1(t) - \sqrt{M} + 1 = \sum_n a_{4n} \delta(t - nT_s)$$

$$s_Q(t) = 2m_0(t) - \sqrt{M} + 1 = \sum_n a_{4Qn} \delta(t - nT_s)$$

$$x(t) = \sum_n a_{4n} g_{\text{rect}}(t - nT_s) + j \sum_n a_{4Qn} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

アナログ変調

$$y(t) = x_1(t) \cos(2\pi f_c t) - x_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$= \sqrt{x_1^2(t) + x_Q^2(t)} \cos(2\pi f_c t + \text{atan}(x_1(t), x_Q(t)))$$

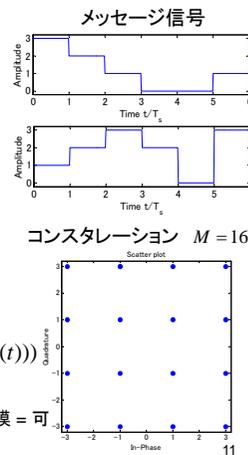
特徴

レート = 優、誤り率 = 可、電力効率 = 可、回路規模 = 可

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

11



周波数変調 (BFSK)

BPSK変調

$$\tilde{x}(t) = \sum_n a_{2n} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

デジタル変調 + 波形整形

$$s(t) = \cos(\theta(t)) + j \sin(\theta(t))$$

$$\theta(t) = \pi \Delta f \int_{-\infty}^t \tilde{x}(\tau) d\tau$$

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = \Delta f / 2 \tilde{x}(t)$$

アナログ変調

$$y(t) = \cos(\theta(t)) \cos(2\pi f_c t) - \sin(\theta(t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$= \cos(2\pi f_c t + \theta(t)) = \cos(2\pi(f_c + \Delta f / 2 \tilde{x}(t))t)$$

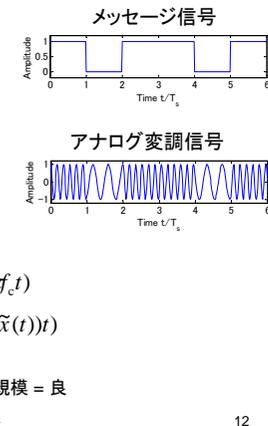
特徴

レート = 可、誤り率 = 可、電力効率 = 良、回路規模 = 良

2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

12



周波数変調 (MSK)

位相の差分表現

$$\begin{aligned} \theta(nT_s) &= \pi \Delta f \int_{-\infty}^{nT_s} \tilde{x}(\tau) d\tau \\ &= \pi \Delta f \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} \tilde{x}(\tau) d\tau + \theta((n-1)T_s) \\ &= \pi \Delta f T_s a_{2n} + \theta((n-1)T_s) \end{aligned}$$

変調指数 (BT積)

変化点での位相の連続条件

$$\pi \Delta f T a_{2n} = k \frac{\pi}{2} \rightarrow \Delta f T = \frac{k}{2}$$

$$\Delta f T = \frac{1}{2} \rightarrow \text{MSK}$$

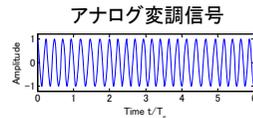
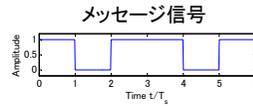
特徴

レート = 可、誤り率 = 優、電力効率 = 優、回路規模 = 優

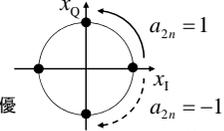
2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

13



コンスタレーション



波形整形 (帯域制限) フィルタ

波形整形フィルタ



$$x(t) = \int g(\tau) s(t - \tau) d\tau$$

$$S_x(f) = |G(f)|^2 S_s(f)$$

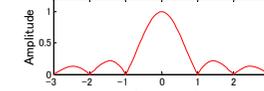
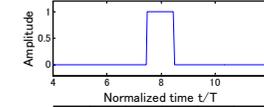
波形歪み (符号間干渉) と帯域幅のトレードオフ

2013年5月8日

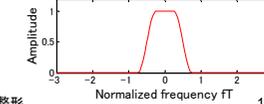
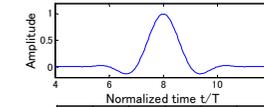
デジタル変調と波形整形

14

矩形パルス



ナイキストパルス



ナイキストフィルタ

周波数特性

$$G(f) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2\alpha} (2|f| - 1) \right) \right) & \frac{1-\alpha}{2} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2} \\ 0 & \frac{1+\alpha}{2} \leq |f| \leq 1 \end{cases}$$

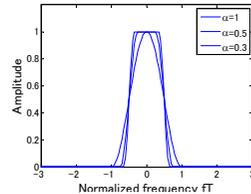
ロールオフ率

時間応答特性

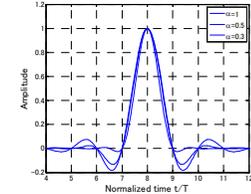
$$g(t) = \frac{\sin \left(\frac{\pi}{T_s} t \right) \cos \left(\frac{\alpha \pi}{T_s} t \right)}{\frac{\pi}{T_s} \left(1 - \left(\frac{2\alpha t}{T_s} \right)^2 \right)}$$

シンボル長の整数倍でゼロ
波形歪みゼロ

周波数特性



時間応答特性



2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

15

ガウスフィルタ

周波数特性

$$G(f) = \exp \left(- \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right)$$

$$f_0 = \frac{B}{\sqrt{2 \ln 2}} \quad \text{3dB帯域幅}$$

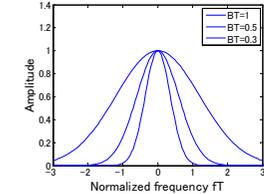
$$G(f) = \exp \left(- 2 \ln 2 \left(\frac{f}{B} \right)^2 \right)$$

時間応答特性

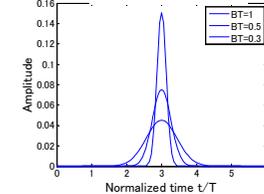
$$g(t) = \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} B \exp \left(- \frac{\pi^2}{2 \ln 2} B t^2 \right)$$

急峻な周波数応答と時間応答を両立

周波数特性



時間応答特性



2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

16

まとめ

- デジタル変調

$$s(t) = s_I(t) + js_Q(t) = f(m(t))$$
 - 振幅変調
 - 位相変調
 - 周波数変調

↓

データレート、電力効率、回路規模、ビット誤り率
- 波形整形(帯域制限)

$$x(t) = \int g(\tau)s(t-\tau)d\tau$$
 - 矩形パルス
 - ナイキストパルス
 - ガウスパルス

↓

帯域幅、ビット誤り率
- 直交アナログ変調

$$y(t) = x_I(t)\cos(2\pi f_c t) - x_Q(t)\sin(2\pi f_c t)$$

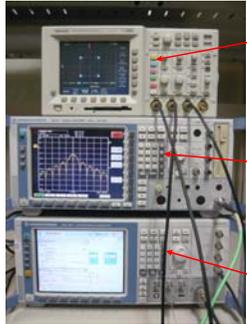
↓

搬送波周波数

2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 17

実験

実験系

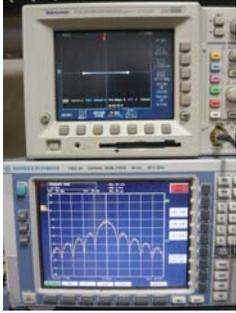


- オシロスコープ
 - TDS 3034B (テクトロニクス)
 - 時間波形表示
 - コンスタレーション表示
- スペクトルアナライザ
 - FSQ 26 (ローデ・シュワルツ)
 - スペクトル表示
- 信号発生器
 - SMJ 100A (ローデ・シュワルツ)
 - データ生成、変調、波形整形

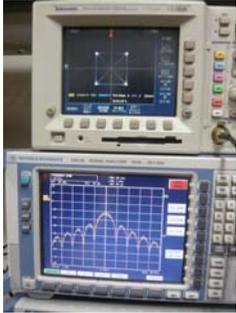
2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 18

BPSK(QPSK)+矩形パルス

BPSK



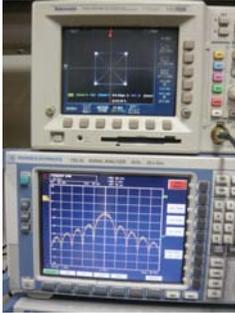
QPSK



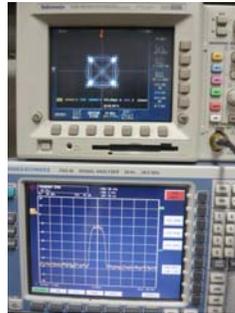
2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 19

QPSK+ナイキストフィルタ

矩形パルス



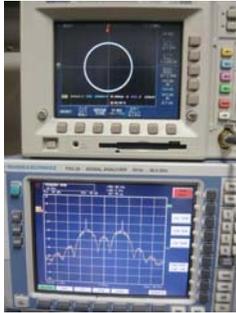
ナイキストフィルタ



2013年5月8日 デジタル変調と波形整形 20

BFSK+矩形パルス

BFSK



MSK



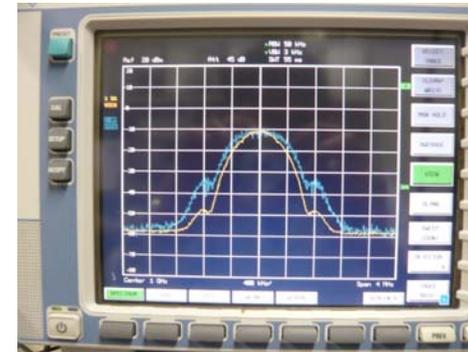
2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

21

MSK+ガウスフィルタ

青:ナイキストフィルタ、黄:ガウスフィルタ



2013年5月8日

デジタル変調と波形整形

22