

2014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.>
2014年5月14日

講義スケジュール(前半)

	日付	教科書	内容
第1回	4月 9日	1、7	無線通信システムの概要 ～IEEE802.11WLANを例に～
第2回	4月16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23日		電波伝搬の統計的性質
第4回	5月14日	3.3、3.4	デジタル変調と波形整形
第5回	5月21日	3.5	復調方式と誤り率特性
第6回	5月28日	3.5	符号間干渉と波形等化器
第7回	6月 4日	4.3	中間試験

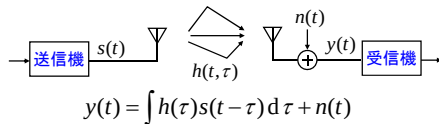
2014年5月14日

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



■ 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

2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

3

講義内容

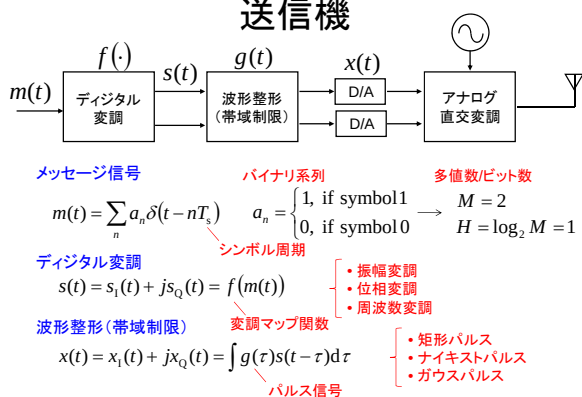
- 送信機の構成
- 振幅変調
- 位相変調
- 周波数変調
- 波形整形(帯域制限)
- 測定器を用いた実験

2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

4

送信機

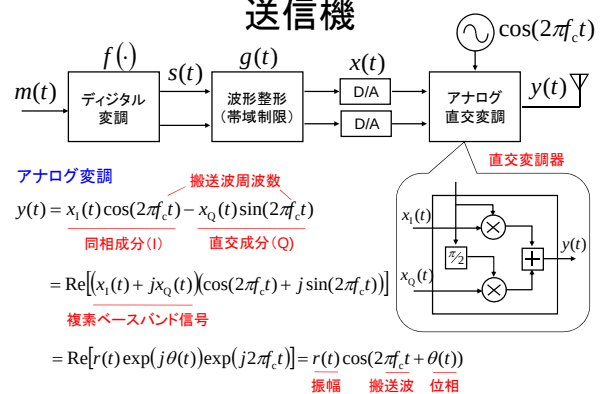


2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

5

送信機



2014年5月14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 $S_x(t) = g(f) ^2 S_s(t)$

2014年5月14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)

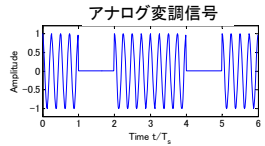
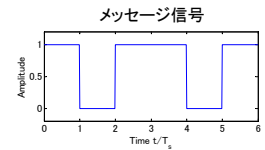
$$x(t) = \int g_{\text{rect}}(\tau) s(t - \tau) d\tau = \sum_n a_n g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

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



2014年5月14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)

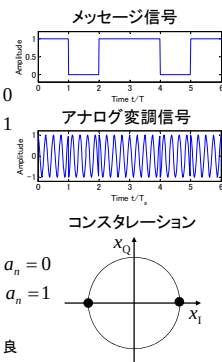
$$x(t) = \sum_n a_{2n} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

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



2014年5月14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つのバイナリ系列 $m_1(t), m_2(t)$

デジタル変調+波形整形

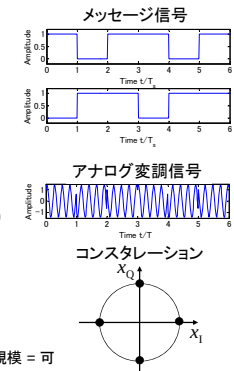
$$s(t) = \exp(j\pi m_1(t)) + \exp(j\pi m_2(t) + \pi/2) = \cos(\pi m_1(t)) + j \cos(\pi m_2(t)) = \sum_n a_{2n} \delta(t - nT_s) + j \sum_n a_{2Qn} \delta(t - nT_s) = \sum_n a_{2In} g_{\text{rect}}(t - nT_s) + j \sum_n a_{2Qn} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

アナログ変調

$$y(t) = x_I(t) \cos(2\pi f_c t) - x_Q(t) \sin(2\pi f_c t) = \sqrt{2} \cos(2\pi f_c t + \text{atan}(x_I(t), x_Q(t)))$$

特徴

レート = 良、誤り率 = 優、電力効率 = 良、回路規模 = 可



2014年5月14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つの4値系列 $m_1(t), m_2(t)$

デジタル変調+波形整形

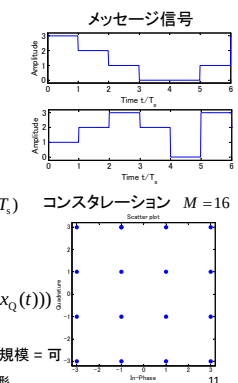
$$s(t) = s_1(t) + j s_2(t) = 2m_1(t) - \sqrt{M} + 1 + j(2m_2(t) - \sqrt{M} + 1) = \sum_n a_{4In} \delta(t - nT_s) + j \sum_n a_{4Qn} \delta(t - nT_s) = \sum_n a_{4In} g_{\text{rect}}(t - nT_s) + j \sum_n a_{4Qn} g_{\text{rect}}(t - nT_s)$$

アナログ変調

$$y(t) = x_I(t) \cos(2\pi f_c t) - x_Q(t) \sin(2\pi f_c t) = \sqrt{x_I^2(t) + x_Q^2(t)} \cos(2\pi f_c t + \text{atan}(x_I(t), x_Q(t)))$$

特徴

レート = 優、誤り率 = 可、電力効率 = 可、回路規模 = 可



2014年5月14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

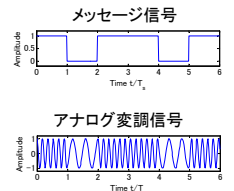
$$s(t) = \cos(\theta(t)) + j \sin(\theta(t)) \quad \theta(t) = \pi \Delta f \int_{-\infty}^t \tilde{x}(\tau) d\tau \quad \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = \Delta f \tilde{x}(t)$$

アナログ変調

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

特徴

レート = 可、誤り率 = 可、電力効率 = 良、回路規模 = 良



2014年5月14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

$$\begin{aligned}\pi \Delta f T_s a_{2n} &= k \frac{\pi}{2} \rightarrow \Delta f T = \frac{k}{2} \\ \Delta f T &= \frac{1}{2} \rightarrow \text{MSK}\end{aligned}$$

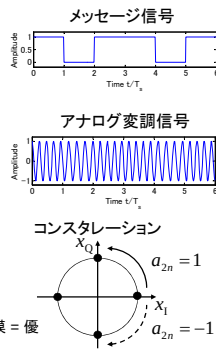
特徴

レート = 可、誤り率 = 優、電力効率 = 優、回路規模 = 優

2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

13



波形整形(帯域制限)フィルタ

波形整形フィルタ

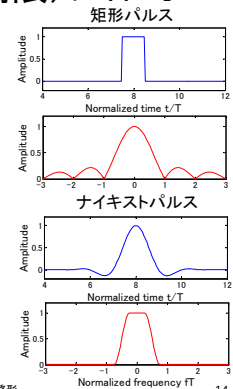
$$\begin{aligned}s(t) &\xrightarrow{\text{波形整形 (帯域制限)}} x(t) \\ S_s(f) &\xrightarrow{\text{帯域制限}} S_x(f) \\ x(t) &= \int g(\tau) s(t-\tau) d\tau \\ S_x(f) &= |G(f)|^2 S_s(f)\end{aligned}$$

波形歪み(符号間干渉)と帯域幅のトレードオフ

2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

14



ナイキストフィルタ

周波数特性

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

ロールオフ率

時間応答特性

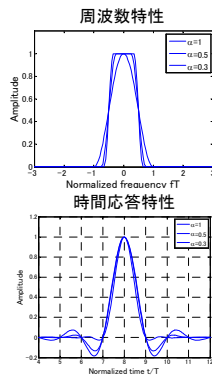
$$g(t) = \frac{\sin \left(\frac{\pi t}{T_s} \right) \cos \left(\frac{\alpha \pi t}{T_s} \right)}{\frac{\pi}{T_s} 1 - \left(\frac{2\alpha t}{T_s} \right)^2}$$

シンボル長の整数倍でゼロ
波形歪みゼロ

2014年5月14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

$$\begin{aligned}G(f) &= \exp \left(- \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right) \\ f_0 &= \frac{B}{\sqrt{2 \ln 2}} \quad \text{3dB帯域幅} \\ G(f) &= \exp \left(- 2 \ln 2 \left(\frac{f}{B} \right)^2 \right)\end{aligned}$$

時間応答特性

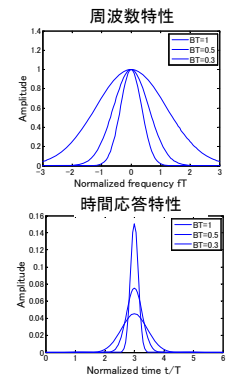
$$g(t) = \sqrt{\frac{\pi}{\ln 2}} B \exp \left(- \frac{\pi^2}{2 \ln 2} B t^2 \right)$$

急峻な周波数応答と時間応答を両立

2014年5月14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

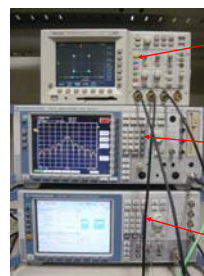
2014年5月14日

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

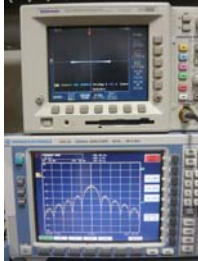
2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

18

BPSK(QPSK)+矩形パルス

BPSK



QPSK



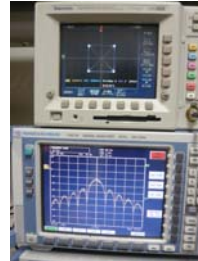
2014年5月14日

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



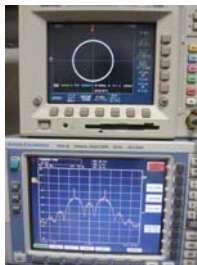
2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

20

BFSK+矩形パルス

BFSK



MSK



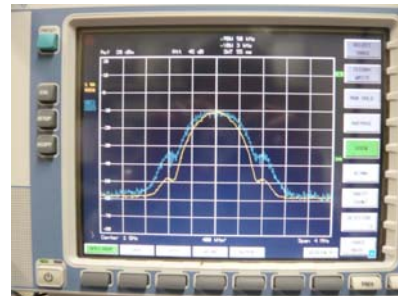
2014年5月14日

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



2014年5月14日

デジタル変調と波形整形

22