

2013年前期 無線通信システム

第5回 復調方式と誤り率特性

荒木 純道 <araki@mobile.ee.>
2013年5月22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22日

復調方式と誤り率特性

2

復習

■ 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)

$$s_{BB}(t) = \int g_s(\tau) s(t-\tau) d\tau$$

- 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

$$s_{RF}(t) = s_{BBI}(t) \cos(2\pi f_c t) - s_{BBQ}(t) \sin(2\pi f_c t)$$

搬送波周波数

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

3

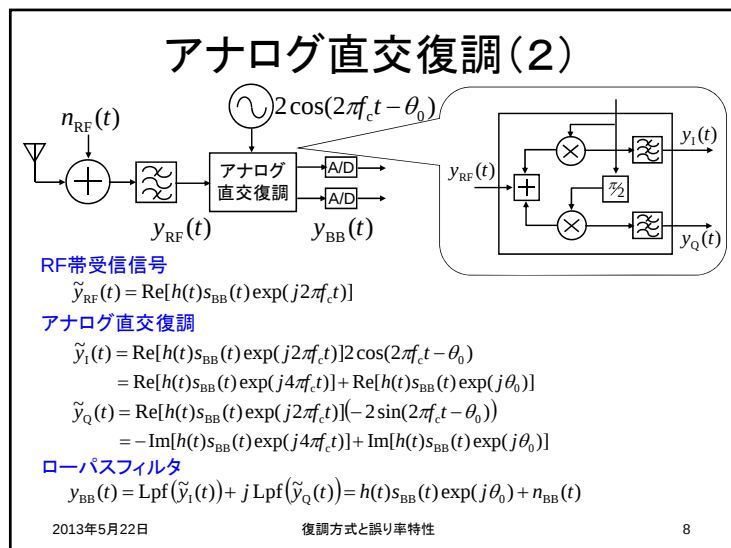
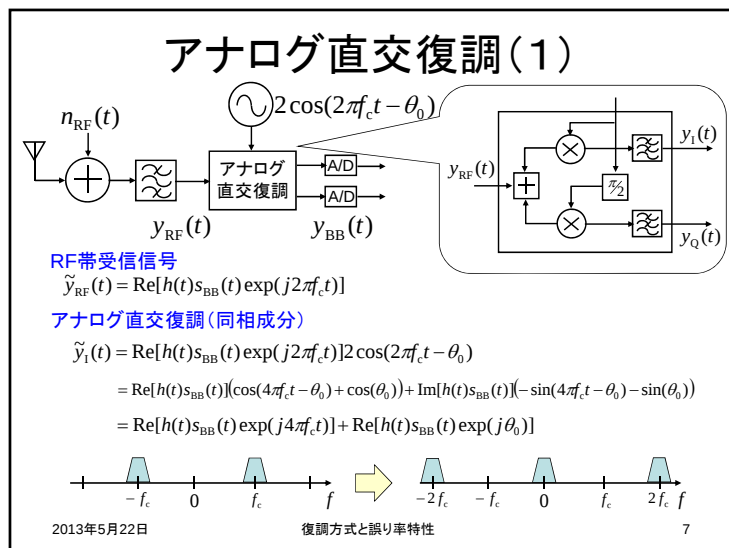
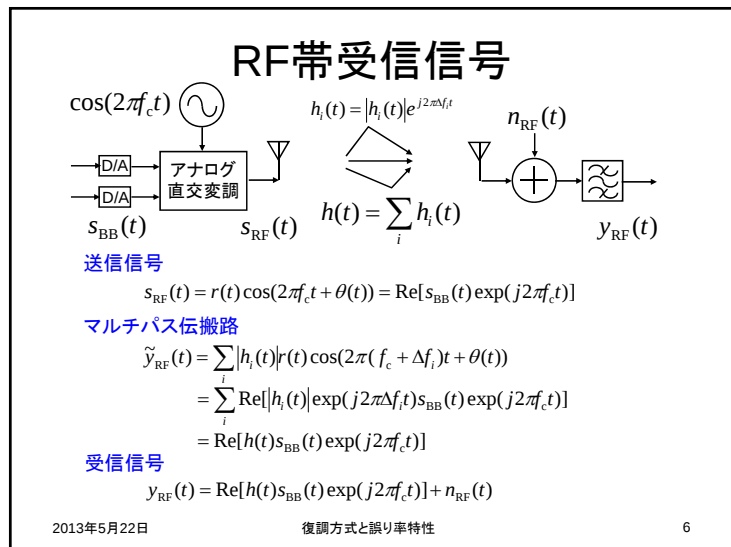
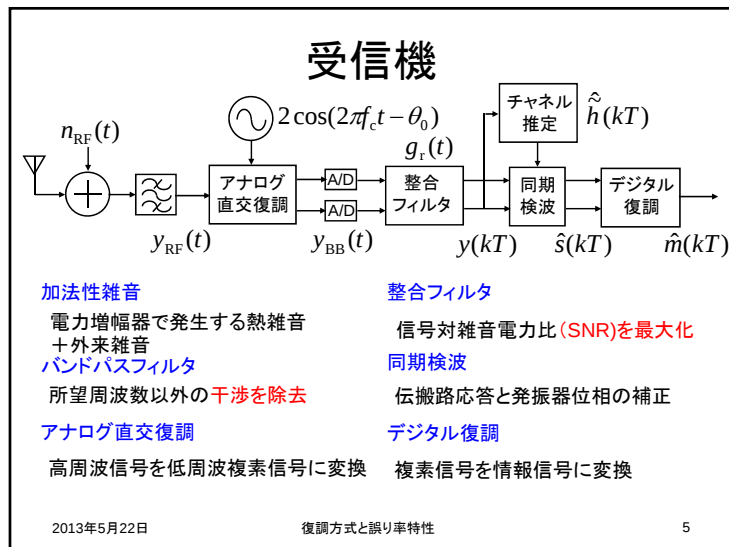
講義内容

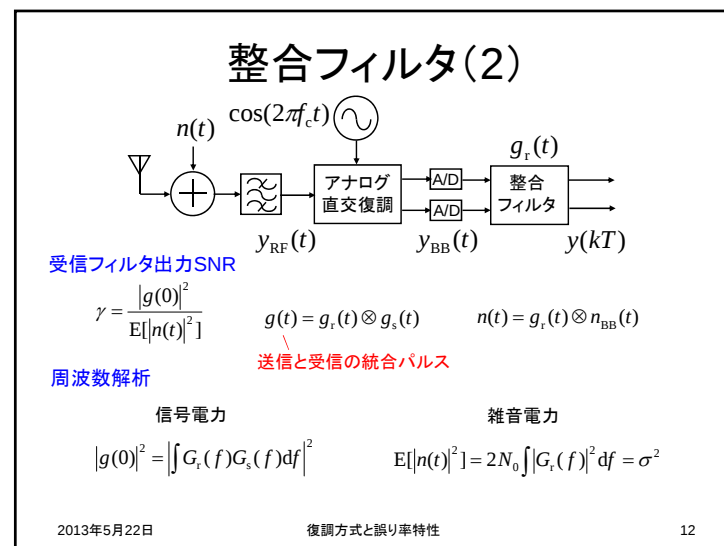
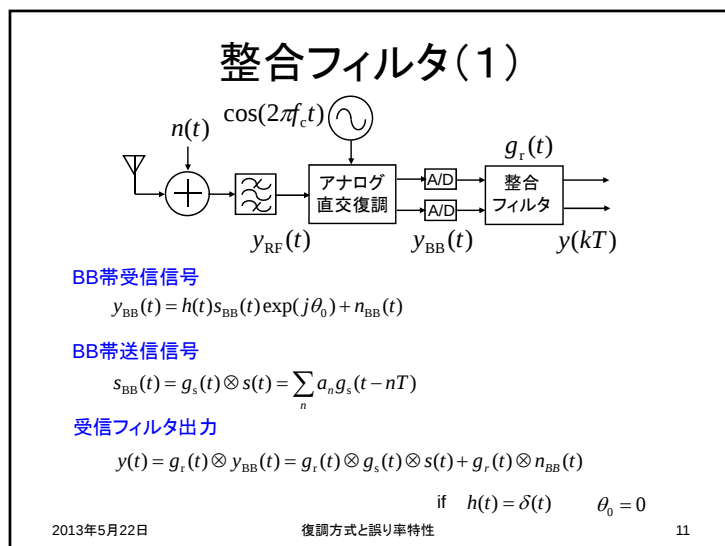
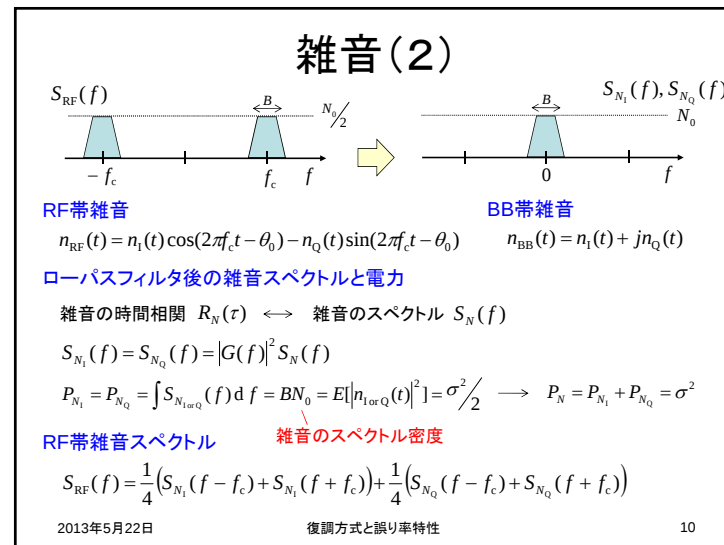
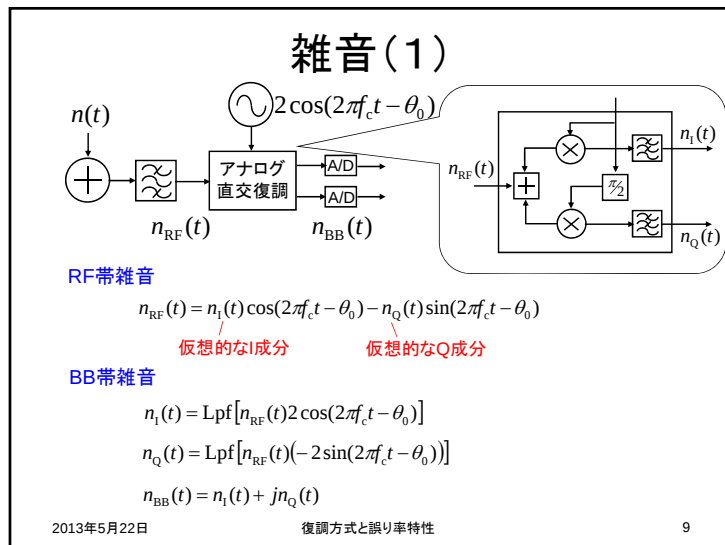
- 受信機の構成
- アナログ直交復調
- 整合フィルタ
- 同期検波
- BPSK信号の誤り率特性
- その他の変調方式の誤り率特性
- フェージングチャネルにおける誤り率特性
- デモ

2013年5月22日

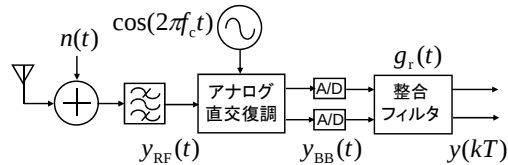
復調方式と誤り率特性

4





整合フィルタ(3)



Schwarzの不等式

$$|g(0)|^2 = \left| \int G_r(f) G_s(f) df \right|^2 \leq \int |G_r(f)|^2 df \int |G_s(f)|^2 df$$

整合フィルタ(SNR最大)

$$G_r(f) = (G_s(f))^* \quad g_r(t) = g_s(-t)$$

最大SNR

統合パルスのエネルギー

$$\gamma = \frac{|g(0)|^2}{E[n(t)]^2} \leq \frac{1}{2N_0} \int |G_s(f)|^2 df = \frac{E_s}{2N_0} = \frac{P_s T_s}{2N_0} = \frac{P_s}{2N_0 B} = \frac{P_s}{\sigma^2}$$

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

13

復調方式の種類

受信信号

$$y(t) = h(t)s(t) \exp(j\theta_0) + n(t)$$

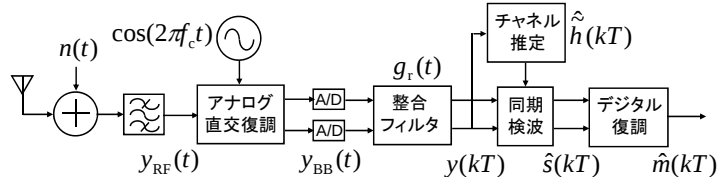
検波方式	送信方式	受信方式
包絡線	ASK	$\hat{s}(k) = \frac{ y(k) }{ h(t) }$
相関検波	FSK	$\left \int y(t) \exp(j\pi\Delta f t) dt \right \geq \left \int y(t) \exp(-j\pi\Delta f t) dt \right $
遅延検波	差動変調 $\tilde{\theta}(k) = \theta(k) - \theta(k-1)$	$\hat{s}(k) = \frac{y(k)}{y(k-1)}$
同期検波	PSK, QAM, MSK	$\hat{s}(t) = \frac{y(t)}{h(t) \exp(j\theta_0)}$

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

14

同期検波+デジタル復調



整合フィルタ出力信号

$$y(t) = g(t) \otimes h(t)s(t) \exp(j\theta_0) + g_r(t) \otimes n_{BB}(t)$$

$$y(k) = h(k)s(k) \exp(j\theta_0) + n(k)$$

同期検波

$$\hat{h}(k) = h(k) \exp(j\theta_0)$$

$$\hat{s}(k) = y(k) / \hat{h}(k) \quad \text{伝搬路応答と発振器位相の補正}$$

デジタル復調

$$\hat{m}(k) = f^{-1}(\hat{s}(k)) \quad \text{for each modulation method of ASK, PSK, FSK}$$

$$\begin{aligned} g(t) & \text{ ナイキストパルスの場合} \\ g(t) &= g_r(t) \otimes g_s(t) \\ g(0) &= \int G(f) df = 1 \\ \int |G(f)|^2 df &= 1 \end{aligned}$$

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

15

チャネル推定

整合フィルタ出力信号

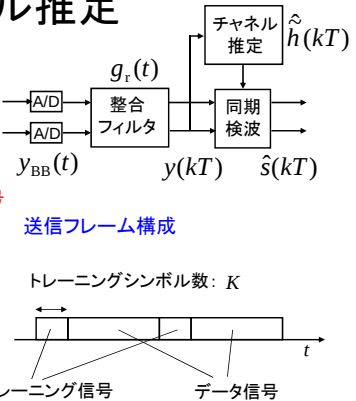
$$y(k) = \hat{h}(k)s_{TR}(k) + n(k)$$

トレーニング信号

チャネル推定

$$\hat{h}(k) = \frac{y(k)}{s_{TR}(k)}$$

$$\hat{h} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{h}(k)$$



送信フレーム構成

トレーニングシンボル数: K

トレーニング信号

データ信号

2013年5月22日

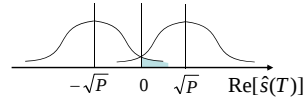
復調方式と誤り率特性

16

BPSK信号の誤り率特性

同期検波出力信号

$$\begin{aligned}\hat{s}(kT) &= y(kT)/\tilde{h} \\ &= s(kT) + \frac{n(kT)}{\tilde{h}}\end{aligned}$$



送信電力 分散 $\sigma^2/|h|^2$ の複素ガウス分布

$$E[|s(k)|^2] = P$$

BPSK信号のビット誤り率

$$P_{eb} = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma^2/|h|^2}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{(x+\sqrt{P})^2}{\sigma^2/|h|^2}\right) dx$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P|h|^2}{\sigma^2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma})$$

誤差補関数

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-z^2) dz$$

受信SNR

$$\gamma = \frac{P|h|^2}{\sigma^2}$$

2013年5月22日

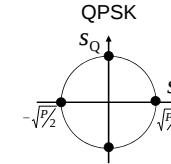
復調方式と誤り率特性

17

QPSK信号の誤り率特性

同期検波出力信号

$$\begin{aligned}\hat{s}(kT) &= y(kT)/\tilde{h} \\ &= s_I(kT) + js_Q(kT) + \frac{n(kT)}{\tilde{h}}\end{aligned}$$



送信電力

$$E[|s_I(k)|^2] = E[|s_Q(k)|^2] = P/2$$

ビット誤り率

$$P_{eb} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P|h|^2}{2\sigma^2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad \gamma = \frac{P|h|^2}{2\sigma^2} \quad \text{ビット当りの受信SNR}$$

シンボル誤り率

$$P_{es} = 1 - \frac{(1 - P_{eb})^2 + (1 - P_{eb})^2}{2} = 2P_{eb} - P_{eb}^2 \approx 2P_{eb}$$

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

18

QAM信号の誤り率特性

シンボル誤り率

$$P_{es} = 1 - (1 - P_{esI})(1 - P_{esQ}) \approx 2P_{esI} = 2P_{esQ}$$

$$P_{esI} = \left(\frac{\sqrt{M}-2}{\sqrt{M}}\right) \times 2P_{eb}^{\text{BPSK}} + \left(\frac{2}{\sqrt{M}}\right) \times P_{eb}^{\text{BPSK}}$$

中心 両端

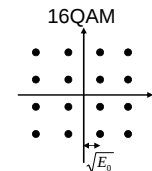
$$= \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_0|h|^2}{\sigma^2}}\right)$$

送信平均電力

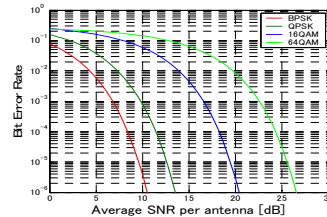
$$P = 2 \left(\frac{2E_0}{\sqrt{M}} \sum_{i=1}^{M/2} (2i-1)^2 \right) = \frac{2(M-1)E_0}{3}$$

ビット誤り率

$$P_{eb} \approx \frac{1}{\log_2 M} P_{es} \quad \text{シンボル誤りは1ビット誤りに相当}$$



ビット誤り率特性



2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

19

MSKの誤り率特性

同期検波出力信号

$$\hat{s}(kT) = s(kT) + \frac{n(kT)}{\tilde{h}}$$

MSK変調信号

$$s(kT) = \exp(j\theta(kT))$$

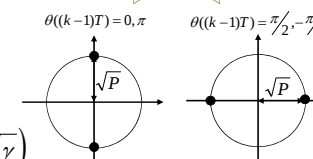
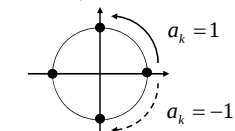
$$\theta(kT) = \pi\Delta f T a_k + \theta((k-1)T)$$

$$\theta(kT) = \frac{\pi a_k}{2} + \theta((k-1)T)$$

MSK信号のビット誤り率

$$P_{eb} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P|h|^2}{\sigma^2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma})$$

コンスタレーション



2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

20

フェージング伝搬路における誤り率

ビット誤り率特性

$$P_{\text{eb}}(\gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad \gamma = \frac{P|h|^2}{\sigma^2}$$

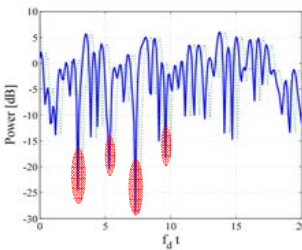
レイリーフェージングチャネル

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad \bar{\gamma} = E\left[\frac{P|h(t)|^2}{\sigma^2}\right]$$

平均誤り率特性

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{eb}}(\bar{\gamma}) &= \int P_{\text{eb}}(\gamma) f(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{1+\bar{\gamma}}}\right) \cong \frac{0.25}{\bar{\gamma}} \end{aligned}$$

フェージング変動特性



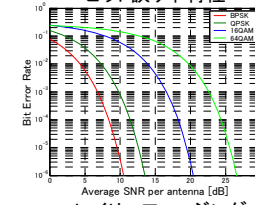
2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

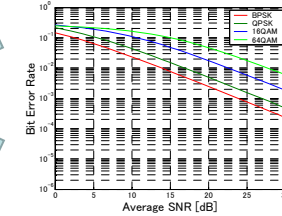
21

フェージング伝搬路における誤り率

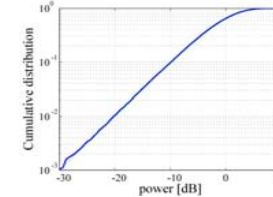
ビット誤り率特性



平均ビット誤り率特性



レイリーフェージング



2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

22

まとめ

■ 直交アナログ復調・整合フィルタ

$$\tilde{y}_{\text{RF}}(t) = \operatorname{Re}[h(t)s_{\text{BB}}(t)\exp(j2\pi f_c t)] \rightarrow y_{\text{BB}}(t) = h(t)s_{\text{BB}}(t)\exp(j\theta_0) + n_{\text{BB}}(t)$$

$$y(t) = g(t) \otimes h(t)s(t)\exp(j\theta_0) + g_r(t) \otimes n_{\text{BB}}(t)$$

■ チャネル推定・同期検波

$$\tilde{h}(k) = h(k)\exp(j\theta_0)$$

$$\tilde{h} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y(k) / s_{\text{TR}}(k) \rightarrow \hat{s}(k) = y(k) / \tilde{h}(k) = s(k) + n(k) / \tilde{h}(k)$$

ナイキスト整合フィルタ

$$g(t) = g_r(t) \otimes g_s(t) = g_s(-t) \otimes g_s(t)$$

$$g(0) = \int G(f) df = 1 \quad \int |G_r(f)|^2 df = 1$$

■ BPSK信号の誤り率特性

$$P_{\text{eb}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P|h|^2}{\sigma^2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma})$$

■ フェージング伝搬路における誤り率特性

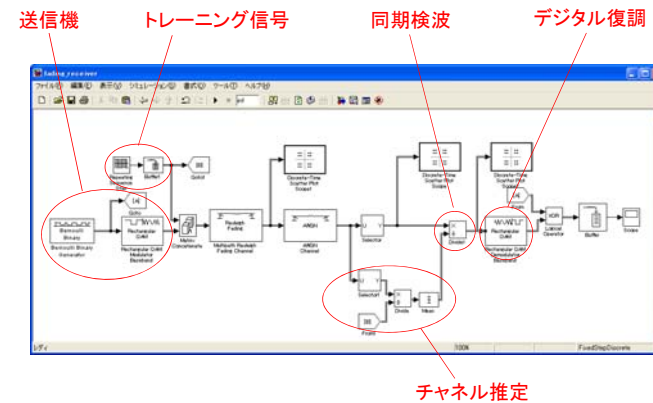
$$\bar{P}_{\text{eb}}(\bar{\gamma}) = \int P_{\text{eb}}(\gamma) f(\gamma) d\gamma = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{1+\bar{\gamma}}}\right) \quad \bar{\gamma} = E\left[\frac{P|h(t)|^2}{\sigma^2}\right]$$

2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

23

デモ



2013年5月22日

復調方式と誤り率特性

24