

2013年前期 無線通信システム

第2回 無線通信システムのモデル とフェージング

荒木 純道 <araki@mobile.ee.>

2013年4月17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 1日	3.3、3.4	デジタル変調と波形整形
第5回	5月 8日	3.5	復調方式と誤り率特性
第6回	5月22日	3.5	符号間干渉と波形等化器
第7回	5月29日	4.3	中間試験

2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

2

前回の復習

- 無線通信システムの概要
BAN, PAN, LAN, MAN, ITU, PHY, MAC
- 無線通信システム設計の概略
周波数, 帯域幅, 電力, アンテナ, 通信方式
- システム劣化要因と対策技術の概略
フェージング, 符号間干渉, 他局間干渉
- IEEE802.11a無線LAN
OFDMと適応符号化変調を用いたW-LAN

2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

3

講義内容

- 無線通信システムモデル
- アンテナ
- 距離損失
- 反射、透過、回折
- レイリーフェージング
- 対数正規シャドウイング

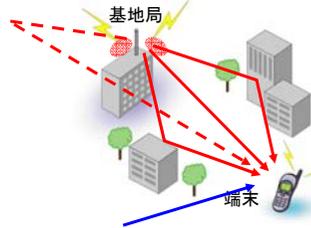
2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

4

無線通信システムの特性劣化要因

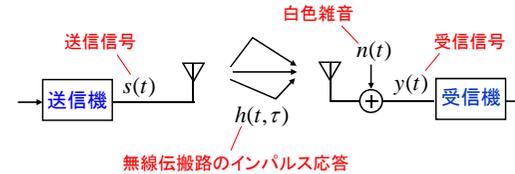
無線通信特有の特性劣化要因？



- フェージング(定存波)**
複数の電波が重なり合うことに起因
- 符号間干渉**
データレートと同程度の遅延波に起因
- 他システムからの干渉**
電波の同報性に起因 (ISMバンドなど)

無線通信システムモデル

■ 無線通信システムモデル



■ 受信信号モデル

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

$$= \sum_{l=1}^L h_l(t) s(t - \tau_l) + n(t)$$

狭帯域無線通信システムモデル

■ 送信信号

$$s(t) = \sum_n m_n g(t - nT)$$

メッセージ信号 (メッセージ信号) パルスの周期 (シンボル周期)
パルス関数 (波形整形関数)

■ 狭帯域近似

$$\tau_{\max} \ll T \rightarrow s(t - \tau_l) \cong s(t)$$

$$y(t) = \sum_{l=1}^L h_l(t) s(t - \tau_l) + n(t)$$

$$= \sum_{l=1}^L h_l(t) s(t) + n(t) = h(t) s(t) + n(t)$$

狭帯域伝搬路の応答

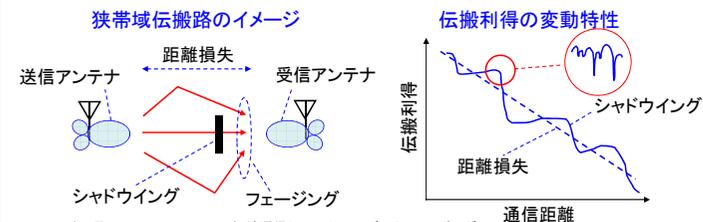
狭帯域伝搬路の利得

■ 狭帯域伝搬路の利得

$$G_{\text{prop}}(t) = |h(t)|^2$$

$$G_{\text{prop}} = G_{\text{rxant}}(\phi) G_{\text{fading}}(t) G_{\text{shadow}}(t) G_{\text{pl}}(d) G_{\text{txant}}(\phi)$$

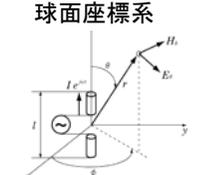
受信アンテナ利得 フェージング変動 シャドウイング変動 距離損失 送信アンテナ利得



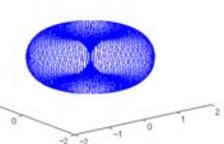
アンテナ

- 放射電界
 - 波数
 - 電界指向性関数
$$\mathbf{E} = \frac{\exp(-jk_0 d)}{d} \mathbf{D}(\theta, \phi)$$
- 指向性利得
 - グリーン関数
$$G_{\text{ant}}(\theta, \phi) = \frac{|\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2}{\frac{1}{4\pi} \int |\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2 d\Omega}$$
- 送信電力
 - 特性インピーダンス
$$P_t = \frac{1}{Z_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2 \sin\theta d\theta d\phi$$

球面座標系



ダイポールの指向性



2013年4月17日 無線通信システムのモデルとフェージング 9

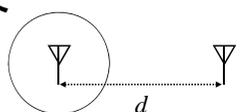
距離損失

- フリスの伝達公式

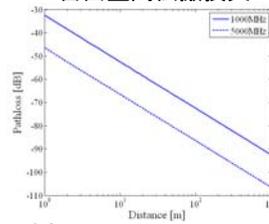
$$P_r = A_r \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t P_t$$
- 自由空間伝搬損失

$$G_{\text{pl}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

$$= -20 \log_{10} d - 20 \log_{10} f + 28$$



自由空間伝搬損失



2013年4月17日 無線通信システムのモデルとフェージング 10

2波モデル

- 2波モデルの電界

$$d_1 = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad d_2 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2}$$

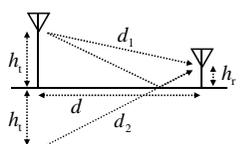
$$d \gg h_t + h_r \rightarrow d_2 - d_1 \cong \frac{2h_t h_r}{d}$$

$$E = \frac{\exp(-jk_0 d_1)}{d_1} \mathbf{D}(\theta) + R_N \frac{\exp(-jk_0 d_2)}{d_2} \mathbf{D}(\theta)$$

$$\cong \frac{\exp(-jk_0 d)}{d} \left(1 - \exp\left(-jk_0 \frac{2h_t h_r}{d}\right)\right) \mathbf{D}(\theta)$$
- 2波モデル伝搬損失

$$G_{\text{pl}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)^2$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}\right) = -40 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(h_t h_r)$$



2波モデルの減衰

$$\left|1 - \exp\left(-jk_0 \frac{2h_t h_r}{d}\right)\right|$$

$$= 2 \sin \frac{k_0 h_t h_r}{d} \cong \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

2013年4月17日 無線通信システムのモデルとフェージング 11

2波モデル

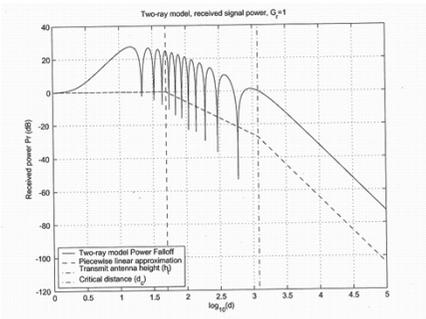


Figure 2.5: Received power versus distance for two-ray model.

2013年4月17日 無線通信システムのモデルとフェージング 12

距離損失の補正

■ 屋内伝搬損失特性

$$G_{pl} = -N \log_{10} d - 20 \log_{10} f - L_f(n) + 28$$

■ 屋内伝搬損失のパラメタ(実測)

	集合住宅(マンション)		一戸建て住宅		オフィス	
周波数[GHz]	2.45	5.2	2.45	5.2	2.45	5.2
N	28	30	28	28	30	31
L _f [dB]	10	13	5	7	14	16

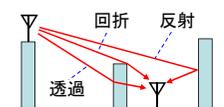
2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

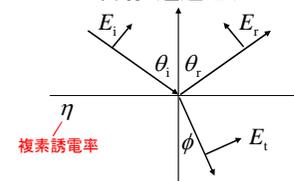
13

反射・透過・回折

移動通信の伝搬経路



反射・透過モデル



フレネルの反射係数

$$\text{TE波 } R_N = \frac{\cos \theta - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \theta}} \quad \text{TM波 } R_P = \frac{\eta \cos \theta - \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \theta}}{\eta \cos \theta + \sqrt{\eta^2 - \sin^2 \theta}}$$

移動無線通信システムでは電波の入射角などは時変

反射・透過・回折などの現象の統計的な扱い

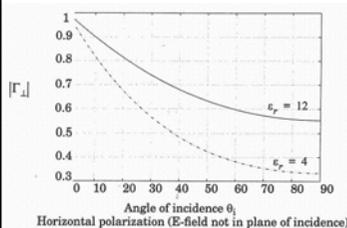
2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

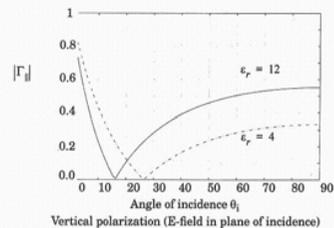
14

反射係数

TE波



TM波



2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

15

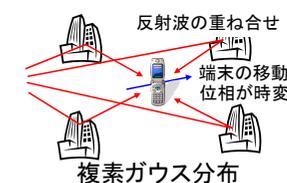
レイリーフェージング

■ マルチパス伝搬路

$$h(t) = \sum_i h_i(t) = x + jy$$

中心極限定理
独立な変数の和の分布
ガウス分布

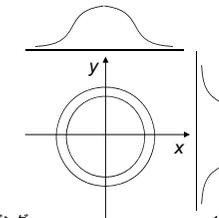
フェージングモデル



■ 複素ガウス分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$



2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

16

フェージングの確率分布

■ レイリー分布

通信では伝搬路の利得の分布が重要

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

複素ガウス分布の変数変換

$$x = r \cos \phi \quad y = r \sin \phi$$

$$f(r, \phi) = f(x, y) |\det \mathbf{J}| = \frac{r}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{--- 位相は一樣}$$

周辺化と変数変換

$$f(r) = \int_0^{2\pi} f(r, \phi) d\phi = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad \left. \vphantom{f(r)} \right\} \text{レイリー分布}$$

$$r = \sqrt{p} \quad f(p) = \frac{1}{2\sqrt{p}} f(r) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right)$$

2013年4月17日

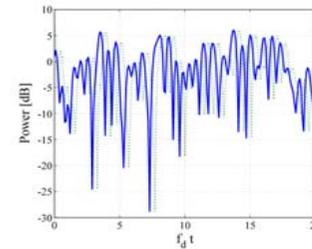
無線通信システムのモデルとフェージング

17

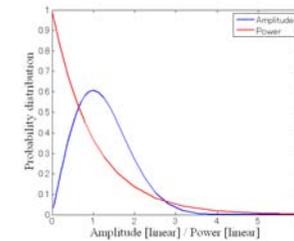
$$\begin{aligned} \text{ヤコビアン} \\ dx dy &= \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \phi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \phi} \end{vmatrix} dr d\phi \\ &= |\det \mathbf{J}| dr d\phi \end{aligned}$$

レイリー分布

フェージング変動特性



確率分布 (リニア)



2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

18

フェージングの累積確率分布

■ レイリー分布

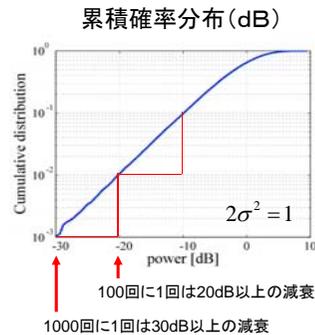
$$f(p) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right)$$

■ 累積確率分布

$$\tilde{f}(p) = \int_0^p f(p) dp = 1 - \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right)$$

■ テイラー近似

$$\begin{aligned} \tilde{f}(p) &= \tilde{f}(0) + p\tilde{f}'(0) + \frac{p^2}{2}\tilde{f}''(0) + \dots \\ &= \frac{p}{2\sigma^2} + \frac{p^2}{2(2\sigma^2)^2} + \dots \end{aligned}$$



2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

19

シャドウイング

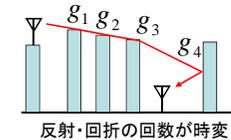
■ シャドウイング伝搬路

$$G_{\text{shadow}} = \prod_i g_i = g$$

$$\log g = \sum_i \log g_i$$

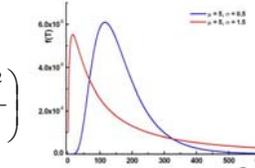
中心極限定理
独立な変数の積の分布
↓
対数がガウス(正規)分布

シャドウイングのモデル



反射・回折の回数が時変

対数正規分布



■ 対数正規分布

$$f(g) = \frac{1}{g\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\log g - g_m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

20

まとめ

- 無線通信システムモデル
送信信号と無線伝搬路のインパルス応答の畳込み

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

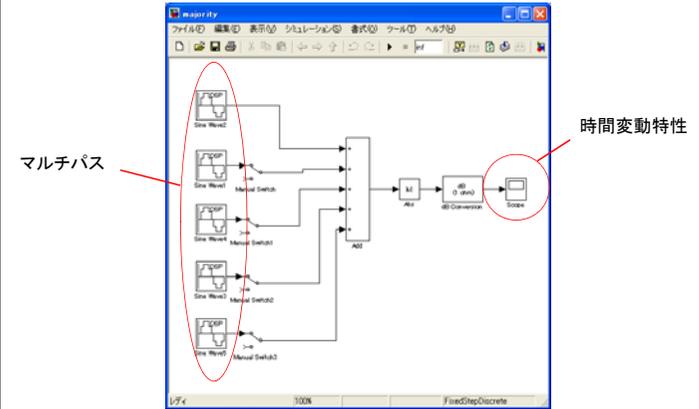
- 距離損失
無線伝搬路の利得は自由空間では距離の2乗、
2波モデルでは距離の4乗に比例して減衰
- レイリーフェージング
狭帯域なマルチパス信号の重ね合わせによる
ランダム変動

2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

21

フェージングデモ

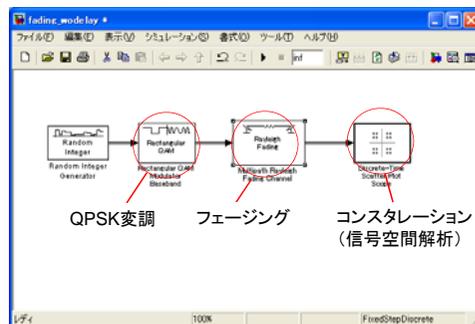


2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

22

フェージングデモ



2013年4月17日

無線通信システムのモデルとフェージング

23