

## 2014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.>  
2014年4月16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4月16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

2014年4月16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

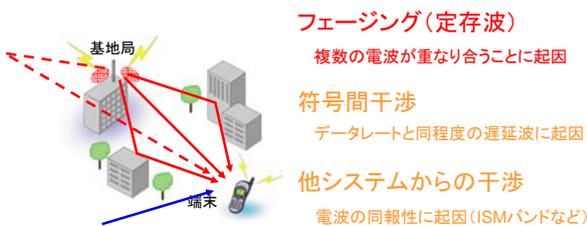
2014年4月16日

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徴劣化要因

無線通信特有の特徴劣化要因？



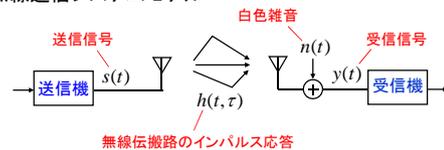
2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

5

## 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

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

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

2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

6

# 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      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

2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

7

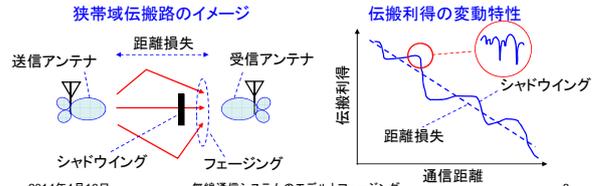
# 狭帯域伝搬路の利得

## ■ 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



無線通信システムのモデルとフェージング

8

# アンテナ

## ■ 放射電界

$$\mathbf{E} = \frac{\exp(-jk_0 d)}{d} \mathbf{D}(\theta, \phi)$$

波数      電界指向性関数

## ■ 指向性利得

$$G_{\text{ant}}(\theta, \phi) = \frac{|\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2}{\frac{1}{4\pi} \int |\mathbf{D}(\theta, \phi)|^2 d\Omega}$$

グリーン関数      ダイポールの指向性

## ■ 送信電力

$$P_t = \frac{1}{Z_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |D(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

特性インピーダンス

2014年4月16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

$$P_r = A_r \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t P_t$$

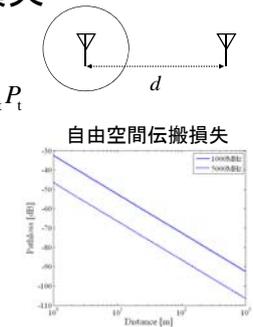
$$A_r = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

アンテナ実効面積

## ■ 自由空間伝搬損失

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

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



2014年4月16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

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

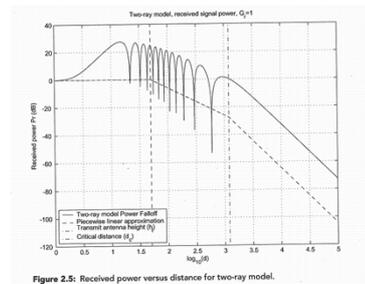
$$= 10 \log_{10} \left( \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \right) = -40 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(h_t h_r)$$

2014年4月16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



2014年4月16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 <sub>f</sub> [dB]	10	13	5	7	14	16

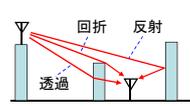
2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

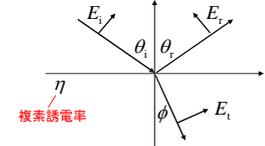
13

## 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

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

$$\text{TM波 } R_p = \frac{\eta \cos \theta - \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}}{\eta \cos \theta + \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}}$$

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

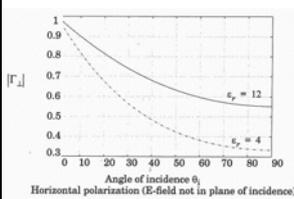
2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

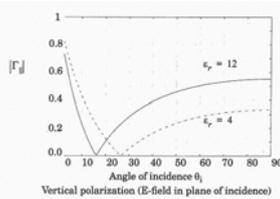
14

## 反射係数

### TE波



### TM波



2014年4月16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

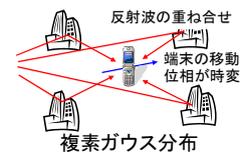
### ■ マルチパス伝搬路

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

中心極限定理  
独立な変数の和の分布

ガウス分布

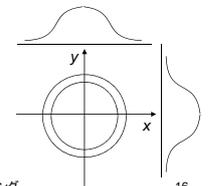
### フェージングモデル



### ■ 複素ガウス分布

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

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



2014年4月16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

$$f(r) = \int_0^{2\pi} f(r, \phi) d\phi = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$r = \sqrt{p} \quad f(p) = \frac{1}{2\sqrt{p}} f(r) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right) \quad \text{--- レイリー分布}$$

レイリー分布

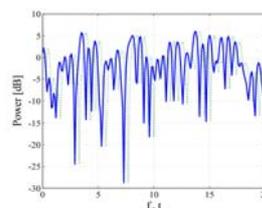
2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

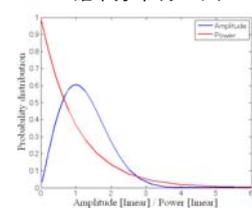
17

## レイリー分布

### フェージング変動特性



### 確率分布(リニア)



2014年4月16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

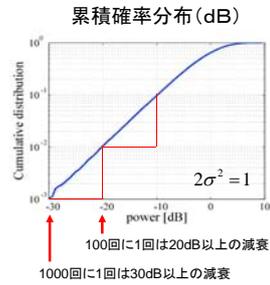
$$f(p) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{p}{2\sigma^2}\right)$$

### ■ 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

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



2014年4月16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

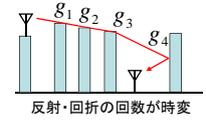
### ■ シャドウイング伝搬路

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

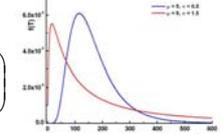
$$\log g = \sum_i \log g_i$$

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



### 対数正規分布



### ■ 対数正規分布

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

2014年4月16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

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

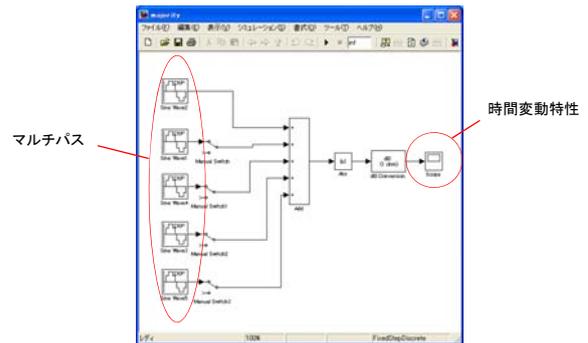
- 距離損失  
無線伝搬路の利得は自由空間では距離の2乗、  
2波モデルでは距離の4乗に比例して減衰
- レイリーフェージング  
狭帯域なマルチパス信号の重ね合わせによる  
ランダム変動

2014年4月16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

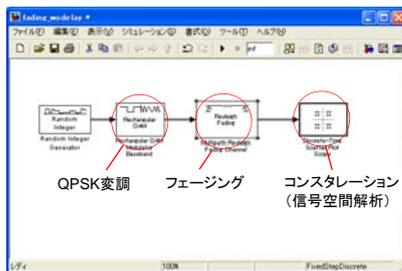


2014年4月16日

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



2014年4月16日

無線通信システムのモデルとフェージング

23