

2014年前期 無線通信システム

第3回 電波伝搬の統計的性質

荒木 純道 <araki@mobile.ee.>
2014年4月23日

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

1

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23日

電波伝搬の統計的性質

2

復習

- (狭帯域)無線システムモデル

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

- 伝搬路の利得

$$|h(t)|^2 = g_{\text{rxant}}(\phi)g_{\text{fading}}(t)g_{\text{shadow}}(t) \\ \times g_{\text{pl}}(d)g_{\text{txant}}(\phi)$$

- レイリーフェージング

$$p = |h|^2 \quad \sigma^2 = E[|h|^2]$$

※ 前回は変数が違うので注意!

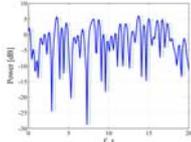
$$f(p) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{p}{\sigma^2}\right)$$

2014年4月23日

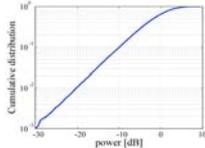
電波伝搬の統計的性質

3

フェージング変動特性



累積確率分布 (dB)



講義内容

- 相関と電力プロファイル (PSD)
- 相関を用いた無線システムの設計
- ドップラプロファイルと時間相関
- 角度プロファイルと空間相関
- 遅延プロファイルと周波数相関
- フェージングデモ

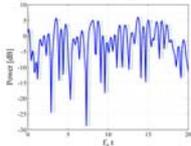
2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

4

確率分布と統計解析(相関)

再現値

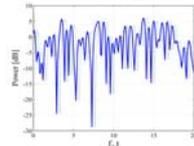


確率分布

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

$$p = |h|^2 \quad \sigma^2 = E[|h|^2]$$

観測値



統計解析

平均 $\mu = E[h(t)]$

分散 $\sigma^2 = E[|h(t)|^2]$

相関 $\rho(\Delta t) = E[h(t + \Delta t)h^*(t)]$

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

5

自己相関と電力プロファイル (PSD)

- 準備 (短時間フーリエ変換と無相関散乱)

$$h(t, \tilde{t}) = \int H(f, \tilde{t}) e^{j2\pi f t} df \quad E[H(f, \tilde{t})H^*(f, \tilde{t})] = 0, \quad i \neq j$$

- 電力プロファイル

$$S(f) = E[|H(f, \tilde{t})|^2]$$

- 自己相関 (Wiener Kinchinの定理)

$$\rho(\Delta t) = E[h(t + \Delta t, \tilde{t})h^*(t, \tilde{t})]$$

$$= E\left[\int H(f, \tilde{t}) e^{j2\pi f(t+\Delta t)} df \int H^*(f_2, \tilde{t}) e^{-j2\pi f_2 t} df_2\right]$$

$$= E\left[\int H(f, \tilde{t}) H^*(f, \tilde{t}) e^{j2\pi f \Delta t} df\right] = \int S(f) e^{j2\pi f \Delta t} df$$

電力プロファイル



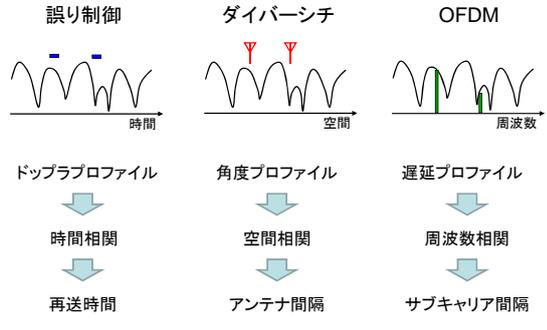
自己相関

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

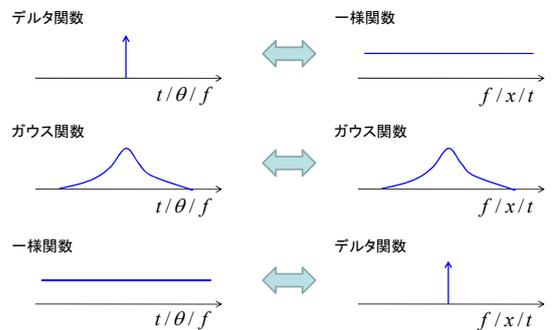
6

相関を用いた無線システム的设计



2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 7

フーリエ変換の性質



2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 8

到来角とドップラ周波数

- 環境
 - 中心周波数 f_0
 - 移動速度 v
 - 素波の到来角 ϕ
 - 伝搬路応答

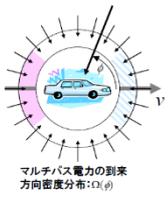
$$h(\phi, t, \tilde{t}) = |h(\phi, \tilde{t})| e^{j(2\pi f_0 \tilde{t} + kv \cos \phi)}$$

- ドップラ周波数

$$f = \frac{kv \cos \phi}{2\pi} = \frac{v}{\lambda} \cos \phi = \frac{vf_0}{c} \cos \phi = f_D \cos \phi$$

- 数値例

$v = 10 \text{ km/h}$ $f_0 = 1 \text{ GHz}$ \rightarrow $f_D = 9.3 \text{ Hz}$



2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 9

ドップラプロファイル

- 角度プロファイル

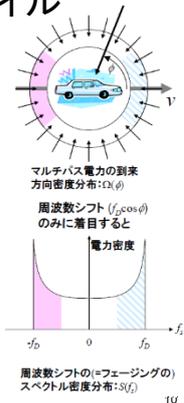
$$S(\phi) = \frac{1}{2\pi}$$

- ドップラプロファイル

$$f = f_D \cos \phi$$

$$S(f) df = \{S(\phi) + S(-\phi)\} d\phi$$

$$df = -f_D \sin \phi d\phi$$

$$S(f) = \frac{-2}{2\pi f_D \sin \phi} = \frac{1}{\pi f_D \sqrt{1 - (f/f_D)^2}}$$


2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 10

ドップラプロファイルと時間相関

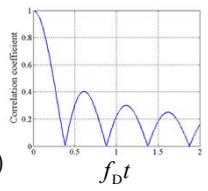
- Wiener Kinchin の定理

$$\rho(\Delta t) = \int S(f) e^{j2\pi f \Delta t} df$$

- 時間相関

$$\rho(\Delta t) = \int \frac{1}{\pi f_D \sqrt{1 - (f/f_D)^2}} e^{j2\pi f \Delta t} df$$

$$= \int_0^\pi \frac{1}{\pi f_D \sin \phi} e^{j2\pi f_D \Delta t \cos \phi} (-f_D \sin \phi) d\phi$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} e^{j2\pi f_D \Delta t \cos \phi} d\phi = J_0(2\pi f_D \Delta t)$$


2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 11

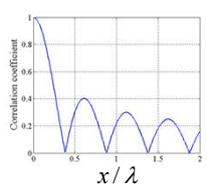
角度プロファイルと空間相関

- Wiener Kinchin の定理

$$\rho(\Delta x) = \int S(\phi) e^{j2\pi \Delta x / \lambda \cos \phi} d\phi$$

- 空間相関

$$\rho(\Delta x) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} e^{j2\pi \Delta x / \lambda \cos \phi} d\phi$$

$$= J_0\left(2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}\right)$$


2014年4月23日 電波伝搬の統計的性質 12

遅延プロファイル

■ 遅延プロファイル

$$S(\tau) = E[|H(\tau, \tilde{\tau})|^2]$$

■ 指数関数遅延プロファイル

$$S(\tau) = \frac{1}{\sigma_\tau} \exp\left(-\frac{\tau}{\sigma_\tau}\right)$$

→ 確率密度関数だとみなす

$$f(\tau) = S(\tau) \quad \int f(\tau) d\tau = 1$$

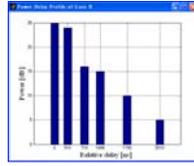
■ 平均遅延

$$\tau_m = \int_0^\infty \tau f(\tau) d\tau$$

■ 遅延スプレッド

$$\sigma_\tau = \sqrt{\int_0^\infty (\tau - \tau_m)^2 f(\tau) d\tau}$$

指数関数
遅延プロファイル



2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

13

遅延プロファイルと周波数相関

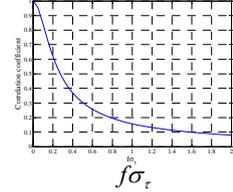
■ Wiener Kinchin の定理

$$\rho(\Delta f) = \int S(\tau) e^{j2\pi\Delta f\tau} d\tau$$

■ 周波数相関

$$\rho(\Delta f) = \int \frac{1}{\sigma_\tau} e^{-\frac{\tau}{\sigma_\tau}} e^{j2\pi\Delta f\tau} d\tau$$

$$= \frac{1}{1 + j2\pi\Delta f\sigma_\tau}$$



■ 数値例

$$\sigma_\tau = 50 \text{ ns} \quad \Delta f\sigma_\tau = 1 \quad \rightarrow \quad \Delta f = 20 \text{ MHz} \gg 300 \text{ kHz}$$

11aのサブキャリア間隔

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

14

遅延拡がり と 周波数スペクトル

■ 広帯域システムモデル

$$y(t, \tilde{t}) = \int h(\tau, \tilde{t}) s(t - \tau) d\tau$$

■ 送信信号の電力スペクトル密度

$$\rho_s(\Delta t) = E[s(t + \Delta t) s^*(t)]$$

$$S_s(f) = \int \rho_s(\Delta t) e^{-j2\pi f\Delta t} d\Delta t$$

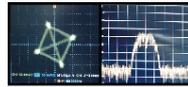
■ 伝搬路応答の短時間フーリエ変換

$$H(f, \tilde{t}) = \int h(\tau, \tilde{t}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

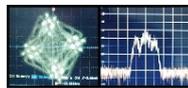
■ 受信信号の電力スペクトル密度

$$S_y(f, \tilde{t}) = |H(f, \tilde{t})|^2 S_s(f)$$

コンスタレーション
周波数スペクトル



遅延分散なし



遅延分散あり

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

15

まとめ

• 相関と電力プロファイル

$$\rho(\Delta t) = \int S(f) e^{j2\pi f\Delta t} df$$

• 時空間パラメタと無線システムの設計

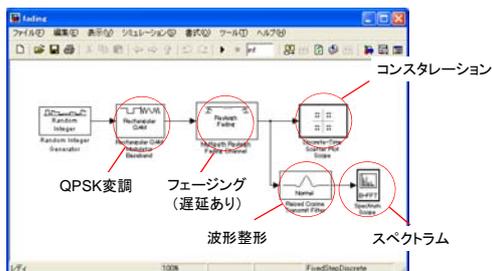
プロファイル	相関	システム設計
ドップラプロファイル	時間相関	再送制御
角度プロファイル	空間相関	ダイバーシティ
遅延プロファイル	周波数相関	OFDM

2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

16

フェージングデモ



2014年4月23日

電波伝搬の統計的性質

17