

2014年前期  
無線通信システム

第11回 直交周波数分割多重 (OFDM)  
と適応符号化変調

荒木 純道 <araki@mobile.ee.>

2014年7月2日

講義スケジュール(後半)

	日付	教科書	内容
第8回	6月11日	4.4	フェージングとダイバーシチ
第9回	6月18日	4.6	誤り訂正符号
第10回	6月25日	3.6、4.5	スペクトル拡散とRAKE受信
第11回	7月 2日	3.7	直交周波数分割多重 (OFDM)
第12回	7月 9日	6	アクセス制御
第13回	7月16日	7	IEEE802.11a WLAN
第14回	7月23日		予備日
第15回	7月30日		期末試験

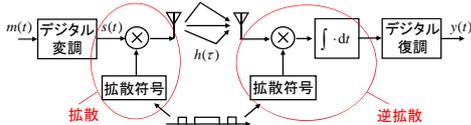
2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

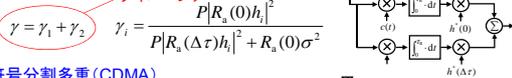
2

復習

■ スペクトル拡散通信



■ RAKE受信



■ 符号分割多重 (CDMA)

$$\gamma = \frac{P|R_s(0)h_1|^2}{P|R_s h_1|^2 + R_s(0)\sigma^2}$$

他局間干渉

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

3

講義内容

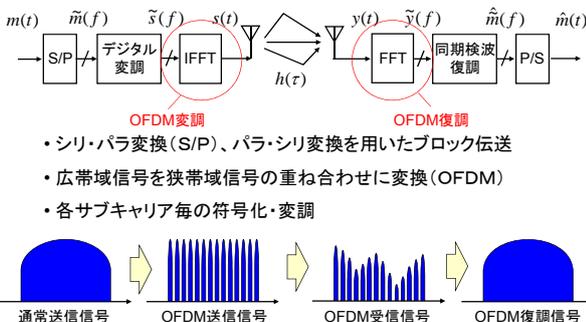
- OFDM通信システムの構成
- 直交周波数分割多重 (OFDM)
  - OFDM変調
  - 周波数領域等化 (OFDM復調)
  - ブロック伝送とサイクリックプリフィックス
  - 周波数軸符号化
  - 周波数軸適応変調
- IEEE802.11a無線LAN
  - 送受信器の構成
  - 周波数特性
- デモ

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

4

OFDM通信システムの構成



OFDM変調

- シリ・パラ変換 (S/P)、パラ・シリ変換を用いたブロック伝送
- 広帯域信号を狭帯域信号の重ね合わせに変換 (OFDM)
- 各サブキャリア毎の符号化・変調

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

5

周波数選択性フェージング

受信信号モデル

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

2波モデル

$$y(t) = h(0)s(t) + h(\Delta\tau)s(t-\Delta\tau) + n(t)$$

インパルス応答

$$h(\tau) = h_0\delta(\tau) + h_1\delta(\tau - \Delta\tau)$$

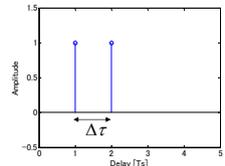
周波数応答

$$\tilde{h}(f) = h_0 + h_1 \exp(-j2\pi f\Delta\tau)$$

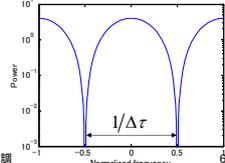
符号間干渉が発生しない条件

$$\text{帯域幅 } \Delta f \ll \frac{1}{\Delta\tau}$$

インパルスレスポンス



周波数応答



2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

## 直交周波数分割多重 (OFDM変調)

$m(t) \xrightarrow{\text{S/P}} \tilde{m}(f) \xrightarrow{\text{デジタル変調}} \tilde{s}(f) \xrightarrow{\text{IFFT}} s(t)$

**OFDM変調**  
 $s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}(n) \exp(j2\pi n \Delta f t)$   
 $0 \leq t \leq T = \frac{1}{\Delta f}$   
 ただし  $\Delta f \ll \frac{1}{\Delta \tau} \leftrightarrow T \gg \Delta \tau$

**離散表現 (IDFT)**  
 $s(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}(n) \exp(j2\pi \frac{nk}{N})$   
 $t = k\Delta t \quad \Delta t = \frac{1}{N\Delta f}$

サブキャリア数:  $N$   
 OFDMシンボル長:  $T$   
 サブキャリア間隔:  $\Delta f$   
 帯域幅:  $N\Delta f$

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

7

## OFDM変調信号の周波数スペクトル

**OFDM変調信号**  
 $s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}(n) \exp(j2\pi n \Delta f t)$

**自己相関**  
 $R_s(\tau) = E[s^*(t)s(t+\tau)]$   
 $= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) \exp(j2\pi n \Delta f \tau)$

**周波数スペクトル**  
 $S_s(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc}^2(T(f - n\Delta f))$

矩形パルスの自己相関関数  
 周波数スペクトル (Power [dB] vs Frequency)

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

8

## OFDM復調 (FDE)

**受信信号**  
 $y(t) = \int h(\tau)s(t-\tau)dt + n(t)$

**OFDM復調**  
 $\tilde{y}(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \exp(-j2\pi \frac{kn}{N})$   
 $= \tilde{h}(n)\tilde{s}(n) + \tilde{n}(n)$

**周波数領域 (ZF) 等化 (FDE)**  
 $\hat{\tilde{s}}(n) = \frac{\tilde{y}(n)}{\tilde{h}(n)}$   
 周波数軸同期検波

同期検波  
 デジタル復調

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

9

## OFDM変復調の行列表現

**OFDM変調 (ブロック伝送)**  
 $\tilde{\mathbf{s}} = [\tilde{s}_0 \ \tilde{s}_1 \ \dots \ \tilde{s}_{N-1}]^T$   
 $\mathbf{s} = \mathbf{F}^{-1} \tilde{\mathbf{s}} \quad \mathbf{F}_{nk} = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp(-j2\pi \frac{kn}{N})$

**受信信号**  
 $\mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}$   
 $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} \tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}}$   
 $\mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} = \text{diag}[\mathbf{h}]$

巡回シフト行列の性質  
 $\mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{F}^{-1} = \text{diag}[\mathbf{h}]$   
 アダマール積 対角行列

**OFDM復調**  
 $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{F} \mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{F} \mathbf{n}$   
 $= \mathbf{h} \otimes \tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}} = \text{diag}[\mathbf{h}] \tilde{\mathbf{s}} + \tilde{\mathbf{n}}$

巡回シフト行列  
 $N$ 個の並列通信路

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

10

## ブロック伝送とサイクリックプリフィックス

**ブロック伝送**  
 ガードインターバル

**サイクリックプリフィックス**  
 サイクリックプリフィックス

**受信信号のブロックの行列表現**  
 $\mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n}$

巡回シフト行列  
 OFDM信号の直交性を保ったまま時間軸上で連続なブロック伝送が可能

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

11

## 周波数軸符号化

**周波数軸符号化**  
 $P_e < \sum_{d=d_{min}}^{d_{max}} P_e(d) \quad P_e(d) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{d}{2}} \gamma_r \right)$

**ビタビ復号の誤り率**  
 誤り率特性 (BER Rate vs Average SNR per antenna [dB])

フェージングが落ち込むサブキャリアの誤り訂正  
 OFDMによる周波数ダイバーシチ効果

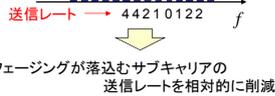
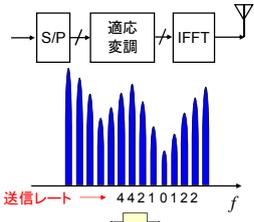
2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

12

# 周波数軸適応変調

周波数軸適応変調



フェージングが落ち込むサブキャリアの送信レートを相対的に削減

OFDMによる周波数ダイバーシチ効果

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

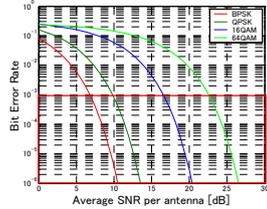
13

目的関数

$$\min_{M_i} P_e = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N \log_2 M_i P_e(M_i, \gamma_i)$$

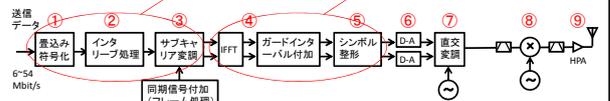
$$\text{subject to } R = \sum_{i=1}^N \log_2 M_i$$

誤り率特性

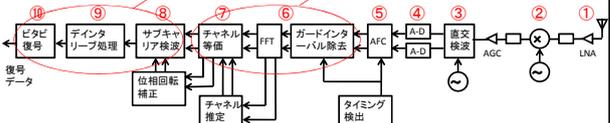


# IEEE802.11a無線LANの構成

送信機



受信機



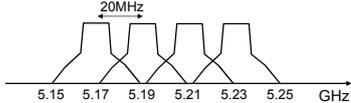
2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

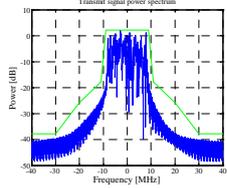
14

# IEEE802.11aの周波数特性

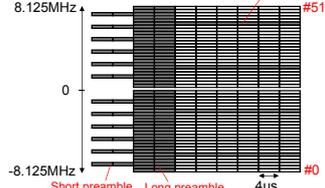
5GHz帯無線LANのチャンネル割当て



各チャンネルの周波数スペクトル



サブキャリア割当て



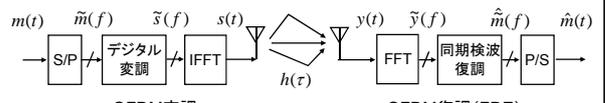
2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

15

# まとめ

■ 直交周波数分割多重 (OFDM)



OFDM変調

$$s(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}(n) \exp\left(j2\pi k \frac{n}{N}\right)$$

OFDM復調 (FDE)

$$\tilde{y}(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) \exp\left(-j2\pi k \frac{n}{N}\right)$$

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

■ 周波数軸符号化適応変調

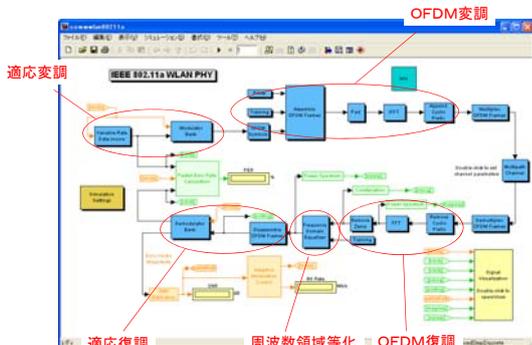
符号化: フェージングが落ち込むサブキャリアの誤り訂正  
適応変調: フェージングが落ち込むサブキャリアの送信レートを相対的に削減

2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

16

# デモ (IEEE802.11a)

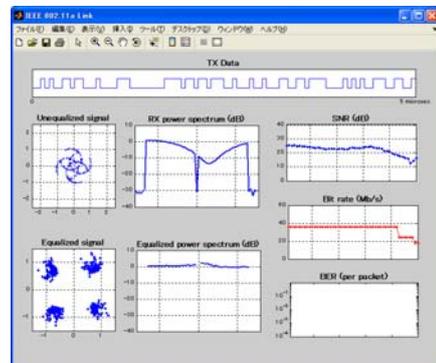


2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

17

# デモ (IEEE802.11a)



2014年7月2日

OFDM適応符号化変調

18