

# 搬送波の位相偏移を考慮した OFDM の伝送特性

2008MI221 柴山倫幸 2009SE263 鈴木大介

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

近年、無線通信を用いたネットワークへのアクセス件数が増加している。特に高速データ通信に対する要求が高まっており、有限である帯域を効率よく使用するための変調方式は必要となっている。これを解決する方法として OFDM がある。OFDM は、地上波デジタル放送、IEEE802.11a などの無線 LAN、電力線モデムなどの伝送方式に採用されている通信方式であり、携帯電話の世界でも次世代通信技術として注目されている。本研究では、去年の先行研究 [1] に加え、実世界で起こりうる周波数と位相の偏移を考慮して BER 曲線を用いた比較検証を行った。

## 2 OFDM[1]

### 2.1 OFDM とは

OFDM とは Orthogonal Frequency Division Multiplexing の略であり、日本語訳では直交周波数分割多重方式となる。OFDM は周波数選択性フェージングによるシンボルの波形歪の影響を軽減するための方法のひとつである。

### 2.2 OFDM の特徴

OFDM の特徴として信号の低速化と並列化がある。信号の低速化を行うことで周波数選択性フェージングの影響を軽減させることが可能となる。ここで信号の低速化を行うとデータの高速度伝送が実現できなくなってしまう。この問題を解決するのが信号の並列化である。信号の並列化は異なる周波数に信号を同時に並行して伝送し、全体の伝送速度が下がらないようにする。この通信方式は、マルチキャリア方式と呼ばれ、複数のキャリアを使うことで多くのデータの送信を可能にする。

OFDM を利用する利点として有限である帯域を効率良く使用することができる。マルチパス伝達による符号間干渉とフェージングに対して頑強、FFT の使用による効率的な実装などがあげられる。また欠点は、信号のダイナミックレンジが大きいこと。各キャリアの直交性を保つ必要があるため、雑音上の波形から正確に同期をとる必要があるので送信機・受信機が複雑となることがあげられる。

### 2.3 OFDM の構造

OFDM の送信機の構造を図 1 に表す。受信機は送信機の逆の構造を持つ。OFDM 送信機は変調器、S/P 変換器からなる。

OFDM はシンボルレートを低速にすることで波形歪みの影響を受けない構造となっている。伝送速度を保持するため、複数のデータを並列に送ることで高速化を実現する。実際に  $N$  個のシンボルを送信する際は  $N-1 \times 1$  の大きさの OFDM シンボルとなり、式 (1) のように表す。

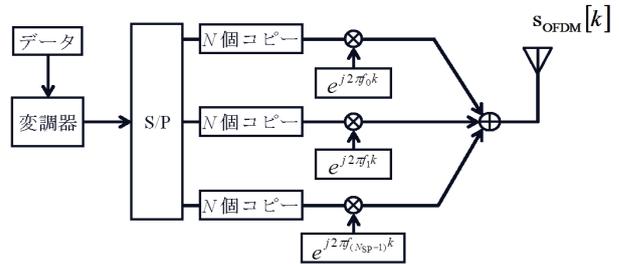


図 1 送信機の構造

$$S_{OFDM} = [s_{OFDM}[0], s_{OFDM}[1], \dots, s_{OFDM}[N-1]]^T \quad (1)$$

送信機は式 (2) のように表すことができる。  $N$  は S/P 変換をした際に、入力シンボルを分割した値である。分割したシンボルに対応したサブキャリアを掛けている。

$$S_{OFDM}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} S_n[k] e^{j2\pi n \frac{1}{N} k} \quad (2)$$

受信機の構造を図 2 に表す、受信機は復調器、P/S 変換器からなる。

受信機は式 (1) の信号を受け取り、 $N$  個に分割しそれぞれの周波数のサブキャリアを乗算して平均化を行う。受信機で乗算しているサブキャリアは送信機のサブキャリアに対して複素共役の関係になっている。受信機は式 (3) のように表すことができる。

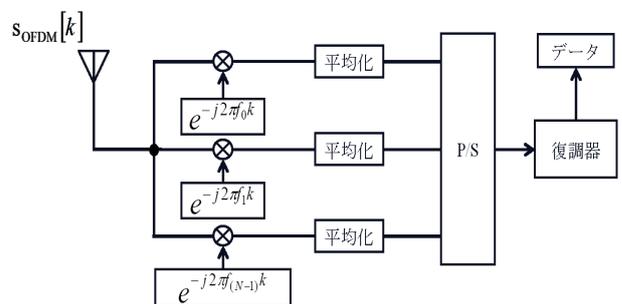


図 2 受信機の構造

$$S_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{OFDM}[k] e^{-j2\pi n \frac{1}{N} k} \quad (3)$$

$S_n$  はシンボルである。ここで式 (2)、(3) は離散フーリエ変換の原理であり、送信機が IFFT、受信機が FFT に相当する。そのため高速フーリエ変換を用いて計算することが可能である。

### 2.3.1 ガードインターバル

OFDMはシンボルレートを長くすることで周波数選択性フェージングの影響を受けなくなる。しかし、遅延によるシンボルへの干渉が問題となる。遅延による干渉をなくするためにガードインターバル(GI)を付加する。ガードインターバルの大きさまでの干渉には対処できる。シンボル $S_i$ の場合のガードインターバルの動作を図3に示す。

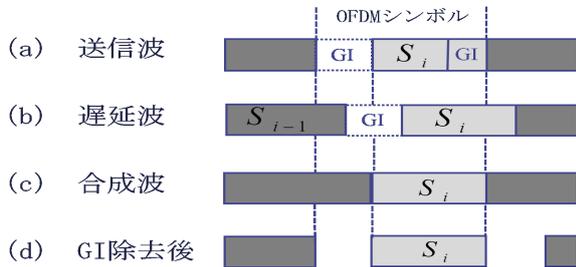


図3 ガードインターバル

送信波はシンボルの後半部分をガードインターバルとしてシンボルの先頭にコピーする(a)。干渉波が重なった送信信号からOFDMシンボルの位置を見つけ出す(b)通信路を通るに際し干渉があったとしても受信機でガードインターバルが付加されているためシンボルは本来の形のまま保つことができている(c)。その後、先頭に付いているガードインターバルを除去しシンボルを取り出す(d)。また、ガードインターバルを長くすれば、より長い遅延に対してシンボル間の干渉を避けることができるが、ガードインターバルは情報を運ぶものではないため、データの伝送速度は低下することになる。このため、あらかじめ想定する伝播環境に必要な最低限のガードインターバルの長さを決める必要がある。

### 2.3.2 位相の同期

雑音の影響で位相に影響が出るため復調の際に位相を本来の形に戻す必要がある。これを位相の同期と呼び、チャンネル推定系列を送信する際に付加し、受信機で相関を計算することで再現できる。

## 3 位相偏移

先行研究[1]までは受信機側と送信機側の位相と周波数の偏移をなしと考え、理想的な状況でシミュレーションを行っていた。実際はそのときの温度、振動などの環境により偏移が起きる。本研究は位相の偏移を考慮してシミュレーションを行う。位相の偏移の式を式(4)(5)に示し、この式を変調機の後に加えた。 $m_1$ を変調器側の復素信号の実部、 $m_2$ を虚部とし、位相 $\theta$ を位相のずれとしている。[3]

変調器で $m_1$ と $m_2$ が掛け算されたシンボルが受信機で受信される。そのシンボルが復調器でまた実部と虚部に分けられ、低域通過フィルタ(Low-passfilter)を通り、元

のシンボルに位相に $\theta$ ずれた状態で再現される。

$$x_1(t) = m_1(t) \cos \theta - m_2(t) \sin \theta \quad (4)$$

$$x_2(t) = m_2(t) \cos \theta + m_1(t) \sin \theta \quad (5)$$

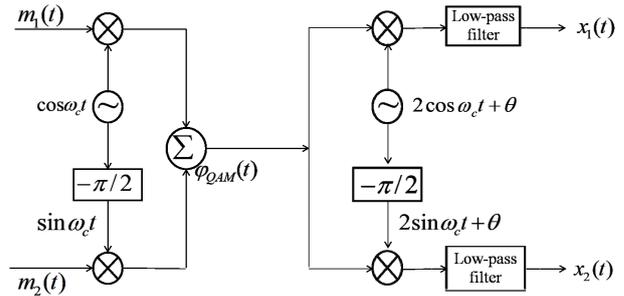


図4 位相偏移を考慮した変復調器の構造

今回は位相偏移のプログラムを変調器の直後にいれてシミュレーションした。

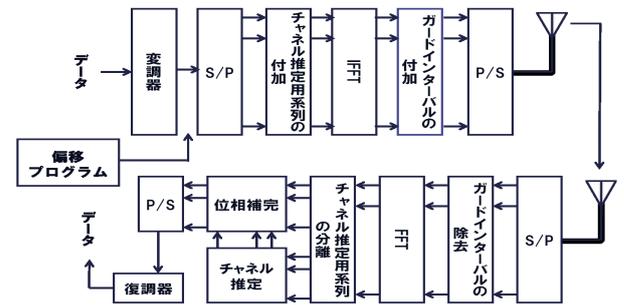


図5 変調機構成図

## 4 先行研究 [1]

本研究では先行研究に続き、MATLABを用いてPSKの変調方式でOFDMのプログラムを作成しシミュレーションを行う。シミュレーションでは変調方式や通信路の条件を変え、BER曲線から検証を行う。シミュレーションで用いるOFDMはシステムを向上させるために図1, 2にガードインターバル・位相・振幅の同期を付加した。シミュレーションではさまざまな変調方式を用いるため $E_b/N_0$ を用いる。 $E_b/N_0$ とは、ビットエネルギー対雑音電力密度比のことであり、シミュレーションでビットエラー率の評価を行う際、変調方式・シンボルレートが異なる場合に基準として用いる。これにより、変調方式が異なっても同じ尺度で評価することが可能となる。今回のシミュレーションではOFDMの条件を表1に示す。この条件を基準としシミュレーションを行った。

### 4.1 AWGN伝送路でのOFDM[2]

OFDMの様々な復変調方式を用い、AWGN伝送路を通過させた場合のBER曲線の特性を比較し検証を行った。BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK変調を用いたOFDMのシミュレーションを行った。

図6からPSK変調を用いたOFDMではAWGN伝送路と通した場合でもPSKのBER理論値と比較してもほ

表 1 OFDM の条件 1

変調方式	BPSK,QPSK,8PSK,16PSK
シンボル数	1,000,000
サブキャリア	128
ガードインターバル	16
伝送路	AWGN マルチパスフェージング
	30
電力減衰	10

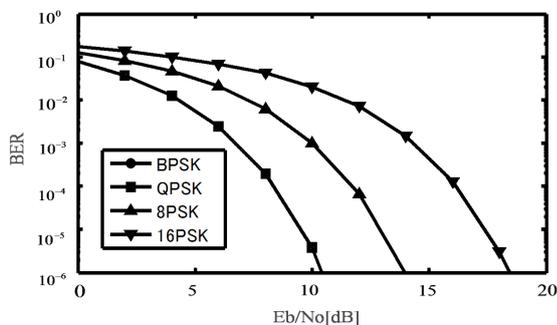


図 6 AWGN 下での OFDM

ほぼ同じと言える結果となった。また、BPSK と QPSK の BER の値は同じとなり QPSK では 1 シンボルあたり 2 ビットの情報を送るので、QPSK を利用した方の効率が良い事が分かった。BPSK と比べ 8PSK はエラー率が約 5dB 劣化し、16PSK と比べ約 8dB 劣化した。これより変調多値数が多いほどエラー率が劣化することがわかる。

#### 4.2 マルチパスフェージング伝送路での OFDM[2]

4.1 節のシミュレーションにマルチパスフェージングを更に追加しシミュレーションを行った。シミュレーションの OFDM の条件を表 1 とし、シミュレーション結果を図 7 に示す。

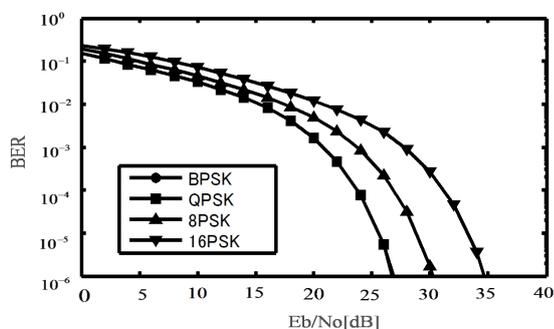


図 7 マルチパスフェージング伝送路での OFDM

図 7 から AWGN 伝送路と同じく BPSK と QPSK はほぼ同じとなり、BPSK と比べ 8PSK はエラー率が約 4dB 劣化し、16PSK は約 8dB 劣化した。PSK 変調を用いた OFDM ではマルチパスフェージング伝送路を通した場合

でも、BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK の順にビットエラー率は劣化し、変調多値数が多いほど、Eb/No の値が高くなるにつれて受ける影響が大きくなった。

## 5 シミュレーション

### 5.1 デジタル変調方式

デジタル変調方式では”0”,”1”の符号を搬送波に乗せ伝送する。この際、振幅・周波数・位相を変化させることで情報を伝送することができる。今回の研究では、PSK(Phase Shift Keying) の変調方式を用いる。また誤り訂正符号の面でビット誤り値を最小にするために、隣り合う信号配置を 1 bit の変化とする。これをグレイ符号化と呼ぶ。

#### 5.1.1 PSK

搬送波の位相を変化させることでデータを伝送する方式であり、伝送路の雑音にも強い。2 相で伝送する方法を BPSK(Binary Phase Shift Keying) と呼ぶ。BPSK では 1 シンボルで 1bit のデータを伝送することができ、0 との 2 つの位相を用いる。

### 5.2 伝送路

#### 5.2.1 AWGN

AWGN は Additive White Gaussian Noise の略であり日本語では加法性白色ガウス雑音と呼ばれる。AWGN は振幅が正規分布に従うガウス雑音のことであり、雑音のランダムな位相変動を表現するために、実軸、虚軸上のそれぞれ独立な正規分布で生じた乱数を実部・虚部に持つ複素雑音を想定する。特徴として、広い周波数にわたって雑音レベルが変化しないことがある。

#### 5.2.2 マルチパスフェージング

マルチパスフェージングとは、信号の送受信を行う際、送信された信号が山や建物などの障害物の影響で信号の位相や振幅がずれて信号の到着時間が変化することにより、信号同士が互いに影響を及ぼし合う「干渉」が起こり、周波数の変化が起こる。

## 6 シミュレーション結果

### 6.1 位相偏移を考慮した AWGN 伝送路での OFDM

4.1 節の AWGN 伝送路のシミュレーションに加え、送信側と受信側での位相の偏移を考慮したシミュレーションを BPSK,QPSK,8PSK,16PSK で行った。ずれの最大値を 0,  $\pi/64$ ,  $\pi/32$ ,  $\pi/16$  とし、各シンボルごとに位相のずれを加えた。シミュレーションの OFDM の条件を表 2 とし、QPSK の実行結果を図 8 に示す。

図 8 より  $\theta = 0$  を基準とすると、 $\theta = \pi/64$  のときエラー率がほぼ劣化せず、 $\theta = \pi/32$  のとき約 0.5dB 劣化

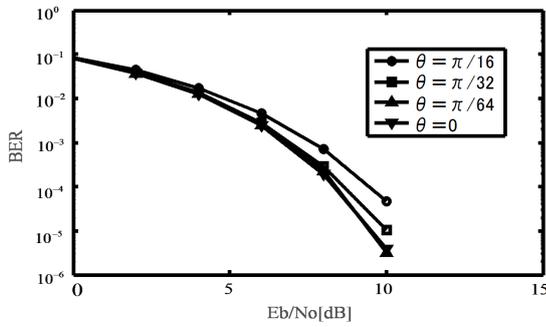


図 8 位相偏移を考慮した AWGN 伝送路での OFDM

表 2 OFDM の条件

変調方式	BPSK,QPSK,8PSK,16PSK
シンボル数	1,000,000
サブキャリア	128
ガードインターバル	16
伝送路	AWGN , マルチパスフェージング
	30
電力減衰	10
位相のずれ	0, /64, /32, /16

した.  $\theta = \pi/16$  のときはエラー率が約 2dB 劣化した. このことから  $\theta = 0$  のときと比べると位相のずれが大きくなるにつれて, エラー率も劣化することがわかる. また, シミュレーションの信頼度確かめるために位相偏移あり QPSK の  $\theta = \pi/32$  の場合で BER の最大値の差異を調べた結果,  $2.9 \times 10^{-3}$  であることが明らかになった.

表 3 AWGN 伝送路シミュレーション結果

	Eb/No(位相偏移時間変化あり)			
	BPSK	QPSK	8PSK	16PSK
=0	-	-	-	-
= $\pi/64$	同じ	同じ	0.5dB	1dB
= $\pi/32$	0.5dB	0.5dB	1.5dB	3dB
= $\pi/16$	1dB	2dB	4dB	-

## 6.2 位相偏移を考慮したマルチパスフェージング伝送路での OFDM

4.2 節のマルチパスフェージング伝送路のシミュレーションに加え, 送信側と受信側での位相の偏移を考慮したシミュレーションを BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK で行った. ずれの最大値を 0,  $\pi/64$ ,  $\pi/32$ ,  $\pi/16$  とし, 各シンボルごとに位相のずれを加えた. シミュレーションの OFDM の条件を表 2 とし, シミュレーション結果を図 9 に示す.

図 9 より  $\theta = 0$  を基準とすると,  $\theta = \pi/64$  のときエラー率がほぼ劣化せず,  $\theta = \pi/32$  のとき約 0.5dB 劣化した.  $\theta = \pi/16$  のときはエラー率が約 1.5dB 劣化した. このことから 6.1 節と同様に  $\theta = 0$  のときと比べると位

相のずれが大きくなるにつれて, エラー率も劣化することがわかる.

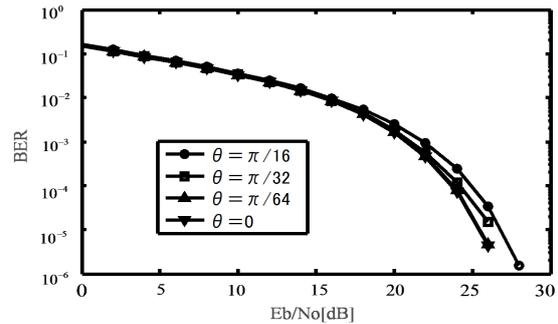


図 9 位相偏移を考慮したマルチパスフェージング伝送路での OFDM

表 4 マルチパスフェージング伝送路シミュレーション結果

	Eb/No(位相偏移時間変化あり)			
	BPSK	QPSK	8PSK	16PSK
=0	-	-	-	-
= $\pi/64$	0.5dB	同じ	0.5dB	1dB
= $\pi/32$	1dB	0.5dB	1dB	3dB
= $\pi/16$	1.5dB	1.5dB	3dB	-

## 7 まとめ

本論文では, OFDM をさまざまな変調方式に変更しビットエラー率がどのように変化するか比較検証を行い, また伝送路条件を変更しそれが与える影響についての考察を行った. この結果として AWGN 伝送路の場合でも, マルチパスフェージング伝送路を追加した場合でも変調多値数が多いほどビットエラー率が劣化した. また, 位相の偏移を考慮したシミュレーションでは, 考慮していないシミュレーションと同様に変調多値数が多いほどビットエラー率は劣化しており, 偏移が一定の場合と時々刻々と変化する場合では, 時々刻々と変化する場合の方が全ての変調多値数でビットエラー率が改善されていた. これは偏移が一定の場合は偏移の最大値を全てのシンボルの値に加えているので, 偏移が時々刻々と変化する方と比べると偏移の量が多いことが理由としてあげられる.

## 8 参考文献

- [1] 神谷幸宏, "MATLAB によるデジタル無線通信技術," コロナ社, 東京, 2008.
- [2] 丹羽良輔, 中野和也, 岡田真人, "様々な変調方式に対応する OFDM シミュレータの研究," 2011 年度南山大学卒業論文, 2012.
- [3] B.P.Lathi, Z.Ding, "Modern Digital and Analog Communication Systems," OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1998.