

# 様々な変調方式に対応する OFDM シミュレータの研究

2007MI173 丹羽 良輔

2008MI162 中野 和也

2008MI179 岡田 真人

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が必要となっている。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、IEEE 802.11a 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 [1]。本研究では、PSK および QAM 変調を用いた OFDM の評価を行った。伝送路の条件を変更し BER 曲線を用い比較検証を行った。

## 2 OFDM[2]

### 2.1 OFDM とは

OFDM は Orthogonal Frequency-Division Multiplexing の略であり、日本語では直交周波数分割多重方式と呼ばれる。また、マルチキャリア方式と呼ばれる通信方式で、サブキャリアを使うことで多くのデータを送ることができる。このサブキャリアは、それぞれの周波数がシンボルレートと等しい周波数だけ異なっている。そのためキャリア同士が重なり合ってしまうため、それぞれ干渉してしまうように考えるが、サブキャリア同士が直交しているため、お互い干渉を与えることなく、きちんと復調することが可能である。OFDM を使用する利点として、データの変調器に関しては PSK 方式や QAM 方式など様々な変調方式を導入しやすく、周波数選択性フェージングの影響を軽減することができる [1]。さらに高速フーリエ変換を用いることにより、ローパスフィルタが不要となる。また欠点は、各キャリアの直交性を保つ必要があるため、雑音状の波形から正確に同期を取る必要があるため送信機・受信機が複雑となる [3]。

### 2.2 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、IFFT、S/P 変換器からなる。

OFDM の信号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。このように低速化・並列化されたシンボルをそのまま同時に送信してしまうと、シンボルが混ざり合ってしまうので、シンボルを識別するために各シンボルにそれぞれ周波数の異なるサブキャリアを掛ける。そして、加算され送出される。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

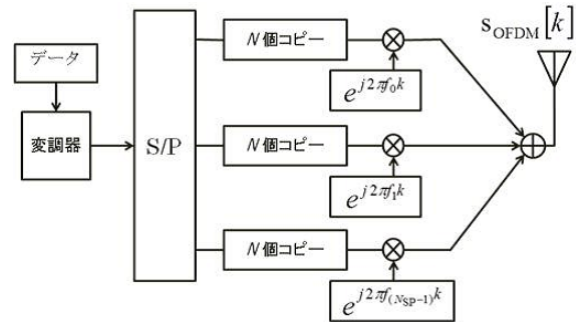


図 1 送信機の原理

となり、式 (1) のように表す [2]。

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

OFDM の送信機は式 (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。

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

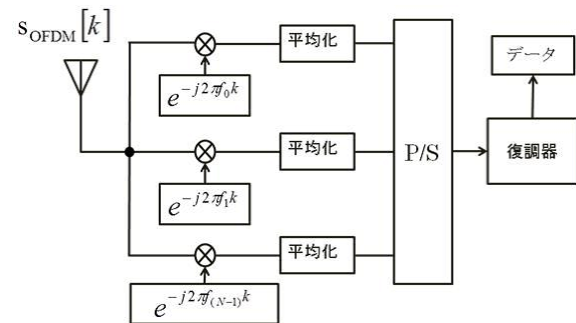


図 2 受信機の原理

OFDM の受信機の構造を図 2 に表す、受信機は復調機、FFT、S/P 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。

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

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.

### 2.2.1 ガードインターバル (GI)

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 (GI) の大きさまでの干渉には対処できる. 例として, シンボル  $S_i$  の場合のガードインターバル (Guard Interval, GI) の動作を図 3 に示す.

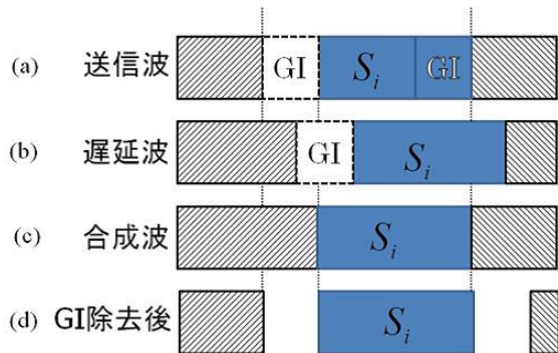


図 3 ガードインターバル (GI)

送信波はシンボルの後半部分をガードインターバル (GI) 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). すると, 通信路を通る際, 干渉があったとしても受信機でガードインターバル (GI) 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 (GI) 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 (GI) 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 (GI) 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 (GI) の長さを決める必要がある.

### 2.2.2 位相・振幅の同期

雑音の影響で位相・振幅に影響が出るため復調の際に位相・振幅を本来の形に戻す必要がある. これを位相・振幅の同期と呼び, チャネル推定系列を送信する際に付加し, 受信器で相関を計算することで実現できる.

## 3 デジタル変調方式

デジタル伝送では "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出来る. 今回の研究では, PSK (Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) の変調方式について考える. また誤り訂正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 1bit の変化とする. これをグレイ符号化と呼ぶ.

### 3.1 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 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る. BPSK では 0 と 1 の 2 つの位相を用いる.

### 3.2 QAM

搬送波の振幅と位相を変化させることでデータを伝送する方式である. 振幅と位相を使うため伝送効率はやいが, 振幅を扱うため伝送路のレベル変動に弱い.

## 4 伝送路

### 4.1 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・虚部を持つ複素雑音を想定する.

### 4.2 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.

### 4.3 周波数選択性フェージング

周波数選択性フェージングはマルチパスフェージングの一つである. 周波数選択性フェージングが周波数に与える影響は, 遅延と電力減衰に基づき元の周波数の振幅と位相を変化させる複素係数である. 遅延した信号が先行波に付加され元の波形が変化し, これを波形歪みと呼ぶ. この波形歪みは位相に対して一様分布する乱数であり, 振幅はレイリー分布に基づく. 今回の実験では振幅に対するレイリー分布を用いた方が望ましかったがレイリー分布が周波数に与える影響が分散してしまい一定に定まらず比較ができないため, 本論文ではレイリー分布を用いた場合の平均と近似している値で一定とした.

## 5 シミュレーション方法

研究では MATLAB を用いて PSK 方式, QAM 方式の変調方式で 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. 実験で用いる 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 (GI)・位相・振幅の同期を付加した. 本論文の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．今回の実験では OFDM の条件を表 1，周波数選択性フェージングの条件を表 2 に示す．この条件を基準とし実験を行った．

表 1 OFDM の条件

変調方式	PSK,QAM
シンボル数	1,000,000
サブキャリア	128
ガードインターバル (GI)	16
伝送路	AWGN 周波数選択性フェージング

表 2 周波数選択性フェージングの条件

遅延量	第一波 0，第二波 5
基準遅延	30
基準遅延における電力減衰	-10

## 6 実験

### 6.1 AWGN 伝送路を通過した OFDM の変調方式の比較

5 節の AWGN 伝送路を通過した OFDM の変調方式の比較 OFDM の復変調器を変更し，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，16QAM 変調を用いた OFDM のシミュレーションが AWGN 理論値と等しいことを比較，検証を行った [4]．この実験からプログラム自体の正当性を測り，今後の実験に利用していく．実験の条件を表 1 に，実験結果を図 4 に示す．

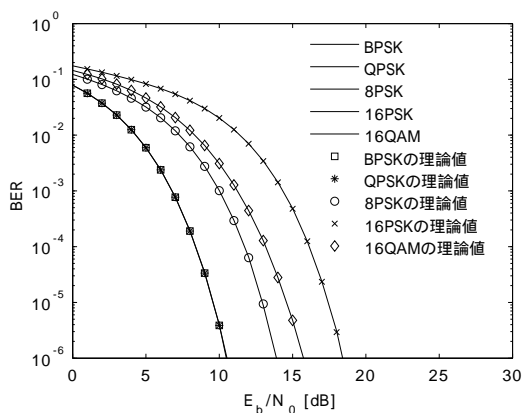


図 4 AWGN 下での OFDM

図 4 から PSK，QAM 変調を用いた OFDM では AWGN 伝送路と通した場合でも PSK，QAM の BER 理論値と比較してもほぼ同値と言える結果となった．また，

BPSK と QPSK の BER 曲線は同じとなり 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．この結果からこのシミュレータの正当性があるものと判断した．

### 6.2 周波数選択性フェージングを通過させた OFDM の変調方式の比較

5 節の実験に周波数選択性フェージングを更に追加し実験を行った．

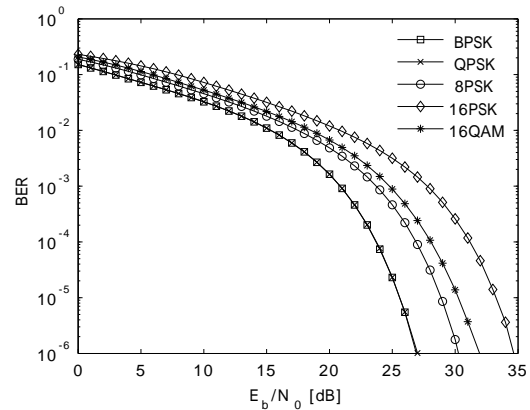


図 5 周波数選択性フェージング伝送路での OFDM

実験の OFDM の条件を表 1，周波数選択性フェージングの条件を表 2 とし，実験結果を図 5 に示す．図 5 から PSK，QAM 変調を用いた OFDM では周波数選択性フェージング伝送路を通した場合でも，BPSK，QPSK，8PSK，16QAM，16PSK の順にビットエラー率が低く，変調多値数が多いほど  $E_b/N_0$  の値が高くなるにつれて受ける影響が大きくなった．周波数選択性フェージング伝送路下でも変調多値数が同じである．また，周波数選択性フェージング伝送路を通した場合も BPSK と QPSK の BER 曲線は同じ値をとる．

### 6.3 電力減衰が与える影響の検証

BPSK 変調を用い周波数選択性フェージング伝送路の電力減衰の値を -10 から -10 刻みで -100 まで変化させ AWGN 伝送路と周波数選択性フェージング伝送路を通過させた場合のシミュレーションを行い，BER 曲線の検証を行った．実験の OFDM の条件を表 1，周波数選択性フェージング，実験結果を図 6 に示す．

図 6 から電力減衰の値が大きいかほどビットエラー率が改善されており，電力減衰の値が大きいかほどシンボルに対し影響が少ない．また， $E_b/N_0$  の値が 1dB 以下の場合，電力減衰の値によってビットエラー率は影響を受けなかった．

### 6.4 遅延が与える影響の検証

BPSK 変調を用い周波数選択性フェージング伝送路の遅延の値を 10 から 10 刻みで 100 まで変化させ AWGN 伝送路と周波数選択性フェージング伝送路を通過させた場合のシミュレーションを行い，BER 曲線の検証を行っ

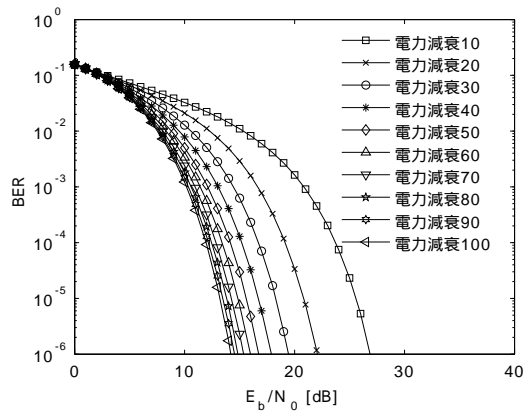


図 6 電力減衰における OFDM

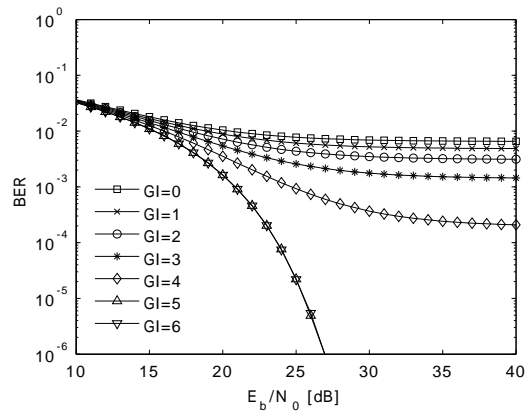


図 8 遅延量とガードインターバル (GI) が OFDM に与える影響

た．実験の OFDM の条件を表 1，周波数選択性フェーシングの条件を表 2 とし，実験結果を図 7 に示す．

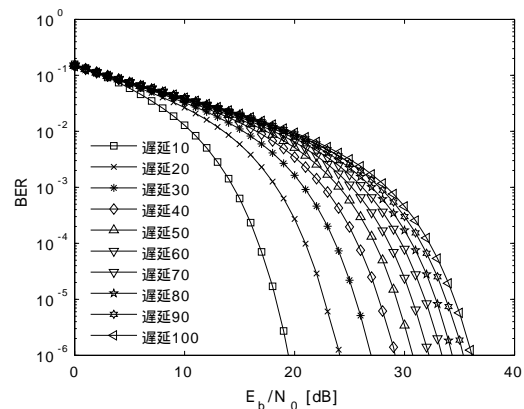


図 7 遅延が OFDM に与える影響の検証

図 7 から，遅延の値が大きくなるにつれビットエラー率が悪くなっていく． $E_b/N_0$  の値が大きくなるほど遅延が与える影響は大きくなっている．また， $E_b/N_0$  の値が 1dB 以下の場合，電力減衰の値によってビットエラー率は影響を受けなかった．

#### 6.5 遅延量とガードインターバル (GI) の検証

BPSK 変調を用い OFDM のガードインターバル (GI) の値を 0 から 1 刻みで 6 まで変化させ AWGN 伝送路と周波数選択性フェーシング伝送路を通過させた場合のシミュレーションを行い，BER 曲線の検証を行った．実験の OFDM の条件を表 1，周波数選択性フェーシングの条件を表 2 とし，実験結果を図 8 に示す．

今回の条件の周波数選択性フェーシング伝送路の遅延量の長さが 5 であり，ガードインターバル (GI) の長さが 5 以上の場合 BER 曲線は同様の値をとる．ガードインターバル (GI) の長さが十分でない場合， $E_b/N_0$  の値を大きくしても一定の値に近似する結果となり，ガード

インターバル (GI) は遅延量の長さよりも大きく設定する必要がある．

## 7 まとめ

本研究のまとめとして，AWGN 伝送路の場合でも，周波数選択性フェーシング伝送路を追加した場合でも BPSA, QPSK, 8PSK, 16QAM, 16PSK の順にビットエラー率が低くなる．また電力減衰と遅延が OFDM 与える影響についての検証を行った．これにより電力減衰の値が低くなるほどビットエラー率が改善される結果となり，遅延の値が小さいほどビットエラー率が低くなる結果となった．そして遅延量とガードインターバル (GI) が OFDM に与える影響は一番長い遅延量の長さよりも小さい場合 0 に収束せず，ガードインターバル (GI) は遅延量の長さよりも大きく設定しないと効果がでない．

## 8 今後の課題

本研究では伝送路として AWGN と周波数選択性フェーシングを用い，変調方式として PSK, QAM 変調を用いた．今後の課題として今回用いた伝送路と変調方式以外に範囲を広げ OFDM の評価を行う．

## 参考文献

- [1] 石井聡，無線通信とデジタル変復調技術，CQ 出版社，東京，2005.
- [2] 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.
- [3] 生岩量久，デジタル通信・放送の変復調技術，コロナ社，東京，2008.
- [4] Harada Hiroshi, Prasad Ramjee, Simulation and Software Radio for Mobile Communications, Artech House, 2002.