

# 様々な符号を用いた空間ダイバーシティの通信品質の研究

2007MI096 加藤 鋼平

2008MI042 平井 清良

2008MI163 中野 直史

指導教員 奥村 康行

## 1 はじめに

### 1.1 研究の背景

近年、私たちの暮らしに無線通信は欠かせないものとなり、無線通信の質が高度化している。私たちの日常生活において携帯電話・LAN ケーブル・放送など様々なものに無線通信が使われている。そして、無線通信を用いた製品が安定した受信信号を得る事が理想とされる。しかし、フェージング環境下やマルチパスの影響で安定して受信信号を得ることは難しい。このようなフェージング環境下においても安定して信号を受け取る技術の1つがダイバーシティである。

### 1.2 研究の課題と目的

本研究では、ダイバーシティ技術の中で最も一般的な方法である空間ダイバーシティに対して様々な符号化方式で通信品質の定量化用いたシミュレータを作り実装する。シミュレーションについては MATLAB を用いる。

## 2 対象とする技術 [1]

### 2.1 ダイバーシティについて

空間ダイバーシティとは、マルチパス波の干渉によって起こる受信信号の改善をするための技術の1つである。具体的方法は受信機に複数のアンテナをフェージングの状況が異なる距離まで離す。このことにより各アンテナの受信信号は各々独立となり、1つのアンテナの受信信号が落ち込むことがあっても、他のアンテナの受信信号が同時に落ち込む確立は低くなる。それらのアンテナを用い、より電波状況のよい方の受信信号を選択することや、各々の受信信号を合成し雑音を抑えることができる。

### 2.2 最大比合成

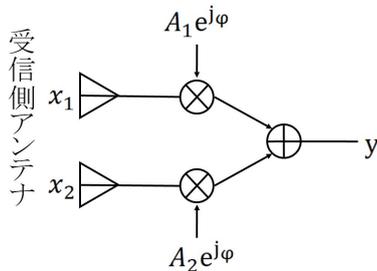


図1 最大比合成

図1は最大比合成である。元々受信レベルの高い信号経路は CN 比も高く信頼度が高い。このような構成を取ったとき、出力信号の SN 比を最大にする合成を可能とする振幅  $A_1$ 、 $A_2$  および位相  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  は、最大比合成

の理論より位相は入力に逆相に、振幅は入力に比例して決めればよい。

## 3 定式化 [1]

### 3.1 最大比合成の定式化

最大比合成の出力 SN 比を最大にする重み係数を求めたい。その方法はいくつかある。

1. チャンネル推定
2. 固有ベクトルを用いる方法

今回はチャンネル推定の方法を用いる。

図1の構成の入力および出力を定式化するために、必要な箇所に変数を設定し、図2の構成を考える。

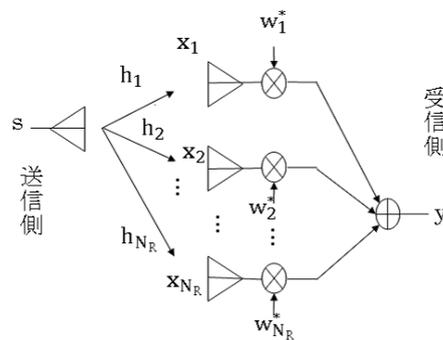


図2 定式化された最大比合成

図2は、送信アンテナから送信された信号  $s$  が、 $N_R$  本のアンテナに送信され、それぞれの通信路で振幅・位相が変化するので、その変化を複素係数  $h_i$  を掛けることで表している。次に受信された信号  $x_i$  が、さらにそれぞれの  $x$  に対し重み係数  $w_i^*$  を掛けていることを表している。ここで\*は複素共役を表す。 $y$  は出力信号なのですべての受信信号を足したものとする。

また、時刻  $k$  における出力  $y[k]$  は式 (1) のように表わされる。

$$y[k] = \mathbf{w}^H \mathbf{x}[k] \quad (1)$$

$H$  は行列の複素共役転置を表し  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_{N_R}]^T$  であり、 $\mathbf{x}[k] = [x_1[k], x_2[k], \dots, x_{N_R}[k]]^T$  である。いくつかの時刻の出力を同時に表現するため、時刻  $k = 0, \dots, (K-1)$  を用いる。その結果、式 (2) の表現となる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{X} \quad (2)$$

$y$  は  $(1 \times K)$  の出力信号ベクトルとし、また、 $X$  の大きさは列方向がアンテナの数、行方向がシンボル数の行列であり、式 (3) の構造を持つ。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x[0] & x[1] & \cdots & x[K-1] \\ x_1[0] & x_1[1] & \cdots & x_1[K-1] \\ x_2[0] & x_2[1] & \cdots & x_2[K-1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N_R}[0] & x_{N_R}[1] & \cdots & x_{N_R}[K-1] \end{bmatrix} \quad (3)$$

また  $x[k]$  は式 (4) のように表わせる。

$$x[k] = \mathbf{h}s[k] + \sqrt{P_\eta}\eta[k] \quad (4)$$

ここで  $x[k]$  は受信信号ベクトルであり、 $\mathbf{h}$  はチャネル応答ベクトルと呼ばれ、チャネル推定で求められたもので  $\mathbf{h} = [h_1 h_2 \cdots h_{N_R}]^T$  である。チャネル推定の方法は 3.2 項に記す。 $\eta$  は電力 1 のガウス雑音を要素とする大きさ  $(N_R \times 1)$  のベクトルであり、 $P_\eta$  は雑音電力である。しかし、式 (4) が表現するのは、 $k$  番目のサンプルしか表現されていない。時刻  $k = 0, \dots, (K-1)$  までもまとめて式に表現したものが式 (5) である。

$$\mathbf{X} = \mathbf{h}\mathbf{s}^T + \sqrt{P_\eta}\boldsymbol{\eta}_{mat} \quad (5)$$

ここで  $\mathbf{s}$  は  $\mathbf{s} = [s[0]s[1]\cdots s[K-1]]^T$  であり、 $\mathbf{X}$  は対応する列方向をアンテナ、行方向を時刻  $k$  とする大きさ  $(N_R \times N_K)$  のアンテナ入力信号行列となる。また、 $\boldsymbol{\eta}_{mat}$  は電力 1 のガウス雑音を要素とし、 $\mathbf{h}\mathbf{s}^T$  と大きさが同じベクトルである。

### 3.2 チャネル推定

チャネル推定とは送信器から受信機にあらかじめ既知系列を送信し、その送られてきた信号と受信機側がもつ信号との相関を計算しチャネル応答値を得ることである。そこで、チャネル応答値を得ることにより受信信号の位相と振幅を得る。まず既知系列のアンテナ受信信号の式は式 (6) である。

$$\mathbf{X}_K = \mathbf{h}\mathbf{c}_K^T + \sqrt{P_\eta}\boldsymbol{\eta}_{mat} \quad (6)$$

$\mathbf{c}_K^T$  は既知系列で  $\mathbf{c}_K = [c_K[0]c_K[1]\cdots c_K[N_K-1]]^T$  とする。 $\mathbf{X}_K$  は大きさ  $(N_R \times N_K)$  となる。受信アンテナと既知系列の相関が重み係数となるので相関を計算する。その式が (7) となる。

$$\mathbf{w} = \mathbf{X}_K \mathbf{c}_K^* = (\mathbf{h}\mathbf{c}_K^T + \sqrt{P_\eta}\boldsymbol{\eta}_{mat})\mathbf{c}_K^* = \mathbf{c}\mathbf{h} \quad (7)$$

この式で  $\mathbf{c}$  は定数なので、チャネル応答ベクトルの定数倍の最大比合成重み係数を得ることが分かる。

## 4 伝送路と符号化方式

### 4.1 伝送路の特性

実際の信号は建物や山などによって信号が反射、屈折し色々な道を通ることにより届く信号の時間が異なる。また送信側から送られて信号は、受信側に受信するまでに信号に雑音を加えられて送った側とは異なった信号が伝えられる。その他にも周波数選択性フェージングという周波数ごとにフェージングが異なる現象がある。これは符号間干渉を増加させ受信信号に軽減困難なエラーフロアを生じさせる。[2]

また、今回のシミュレーションでは伝送路の雑音として実世界のノイズとしてよい近似である AWGN (additive white Gaussian noise) を用いる。AWGN とは振幅が正規分布に従うガウス雑音のことである。

### 4.2 符号化方式

符号化方式には様々な方法がある。

1. 位相シフトキーイング  
(phase shift keying, PSK)
2. 周波数シフトキーイング  
(frequency shift keying, FSK)
3. 振幅シフトキーイング  
(amplitude shift keying, ASK)
4. 直角位相振幅シフトキーイング  
(quadrature amplitude modulation, QAM)

その中で今回は PSK と QAM について検証する。PSK は直交成分の位相を変換させてそのデータを表現することである。その方式には BPSK, QPSK 符号化方式などがある。QAM とは振幅及び位相を変換することによってデータを表現することである。

BPSK とは受信信号を出力したとき 1 個のシンボルに 2 個の値を待たせることができる。

また、QPSK, 8PSK, 16PSK の場合は BPSK はシンボルが 2 個であったのに対し、QPSK の場合 4 個、8PSK の場合 8 個、16PSK の場合 16 個と、それぞれシンボルに入る値の数が変わり、そのシンボルは角度ごとに値が振り分けられている。当然 1 つの信号にたくさんの情報を持たせるほどフェージングの影響を受ける。

16QAM とは 1 つのシンボルに 16 個の値を持たせることができる。また PSK では位相ごとに値を振り分けていたのに対して、QAM では位相と振幅をそれぞれ振り分けて値を決めている。16QAM の場合、位相を 4 個に振り分け、振幅を 4 個に振り分け 16 個の値を送ることができる。BPSK や QPSK に比べると 1 度に送れる量が多いため高速であるが、受信側から送信側に届くまでにフェージングを受けやすい。

## 5 シミュレーション

### 5.1 シミュレーション条件

シミュレーションでは最大比合成を用いる。符号化方式は BPSK 符号化方式, QPSK 符号化方式, 8PSK 符号化方式, 16PSK 符号化方式, 16QAM 符号化方式を使う。理論ではアンテナの数を増やすことによりその数だけ SN 比が合成されるので, アンテナ数が多い方ほどビット誤り率が減少する。アンテナ数を変えるシミュレーションを行い, 結果得られるビット誤り率を検証する。そのシミュレーション条件を表 1 に示す。

表 1 アンテナや信号の設定

項目	設定
シンボル数	1,200,000
テスト系列	120
伝送路	AWGN
符号化方式	BPSK,QPSK,8PSK 16PSK,16QAM
アンテナ数	1,2,4

### 5.2 シミュレーション結果

図 3 は表 1 の条件で BPSK 符号化方式を用いたシミュレーションの結果である。アンテナの本数を増やすごとにビット誤り率 (BER) が低くなっている。アンテナごとに見るとビットエネルギー対雑音電力密度比 ( $E_b/N_0$ ) が 1 の時アンテナ 1 本, 2 本, 4 本の BER はそれぞれ  $5.6731 \times 10^{-2}$ ,  $1.2522 \times 10^{-2}$ ,  $2.76583 \times 10^{-3}$  と出力される。また, アンテナ 1 本の  $E_b/N_0$  が 7dB の時 BER は  $7.6333 \times 10^{-4}$  の値をとり, アンテナ 2 本で  $E_b/N_0$  が 4dB の時 BER は  $7.5833 \times 10^{-4}$  の値をとり近い値をとる。アンテナ 4 本で  $E_b/N_0$  が 1dB の時 BER は  $7.6583 \times 10^{-4}$  の値をとりこれも近い値をとる。このことからアンテナを 1 本, 2 本, 4 本と増やすと  $E_b/N_0$  は 3dB の利得を得る。

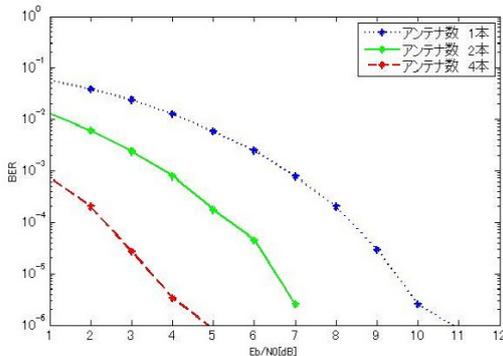


図 3 BPSK 符号化方式

図 4 は QPSK 符号化方式のシミュレーション結果である。 $E_b/N_0$  が 1dB となる時のアンテナ 1 本, 2 本, 4 本の BER はそれぞれ  $7.4722 \times 10^{-2}$ ,  $1.2863 \times 10^{-2}$ ,  $2.4167 \times 10^{-3}$  と数値が出力される。これは図 3 とほぼ同値であり, 高い通信精度を持つことが分かる。BPSK と結果があまり変わらなかった理由は, x 軸が SNR ではなくビットエネルギー対雑音電力密度比 ( $E_b/N_0$ ) であるためである。

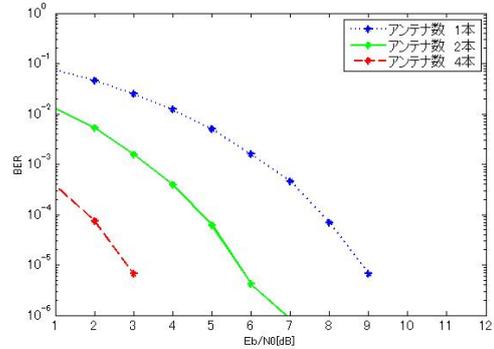


図 4 QPSK 符号化方式

図 5 は 8PSK 符号化方式のシミュレーション結果である。BPSK と比べ BER が高くなってしまった理由は, 1 つのシンボルにより多くの値を持たせることにより, 雑音が入ってしまった時の判別が少ない物より難しいためだと思われる。QPSK 符号化方式のアンテナ数 1 本の場合のシミュレーション結果と, 8PSK 符号化方式のアンテナ数 2 本の場合での結果が似ていることが分かる。また, BER がおよそ  $1.0 \times 10^{-2}$  となる  $E_b/N_0$  の値は, アンテナ数が 1 本のときは 8dB, 2 本のときは 5dB, 4 本のときは 2dB であると分かる。

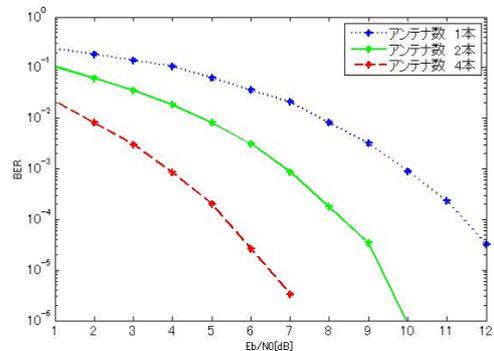


図 5 8PSK 符号化方式

図 6 は 16PSK 符号化方式のシミュレーション結果である。8PSK 符号化方式のシミュレーションよりも傾き

は小さくなっている。また、アンテナ数 1 本、 $E_b/N_0$  が 1 の場合 BER は  $4.8745 \times 10^{-2}$  と半分くらい誤りがあることになる。

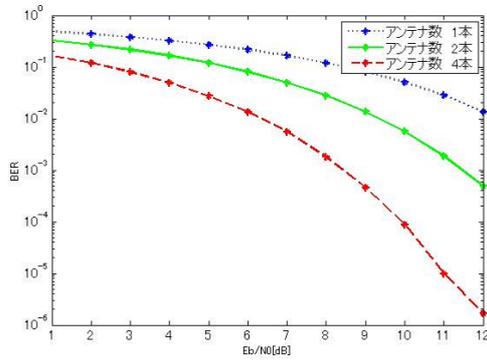


図 6 16PSK 符号化方式

図 7 は 16QAM 符号化方式の結果である。16PSK と 16QAM を比べ、ビット誤り率の違いがなぜなのかというと、位相だけを見ると、16 段階に変調するよりも 4 段階に変調すると判別が容易となり、符号誤り率が低下するからである。また、BER がおよそ  $1.0 \times 10^{-3}$  となる  $E_b/N_0$  の値は、アンテナ数が 1 本のときは 10dB、2 本のときは 7dB、4 本のときは 4dB である。

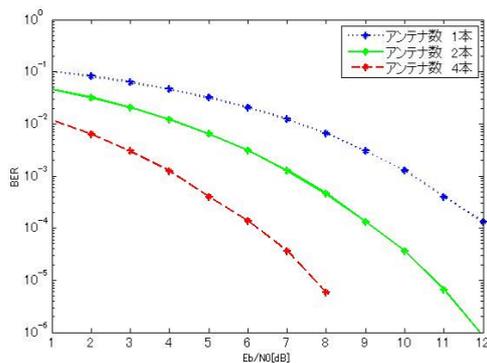


図 7 16QAM 符号化方式

### 5.3 符号化方式の変更についての考察

また、図 3～図 7 を比較すると、1 つのシンボルに多くの値を持たせるとフェージングの影響を受け BER が高くなっている。また、最大比合成を用いることにより、SN 比は均一的に向上することが分かる。この均一的に向上した利得をダイバーシティゲインと呼ぶ。今回のシミュレーションでダイバーシティゲインが 3dB であることを確かめるために、表 2 の条件でシミュレーションを行う。

### 5.4 ダイバーシティゲイン

表 2 ダイバーシティゲインの信号の設定

項目	設定
シンボル数	1,200,000
伝送路	AWGN
符号化方式	BPSK
アンテナ数	2～19

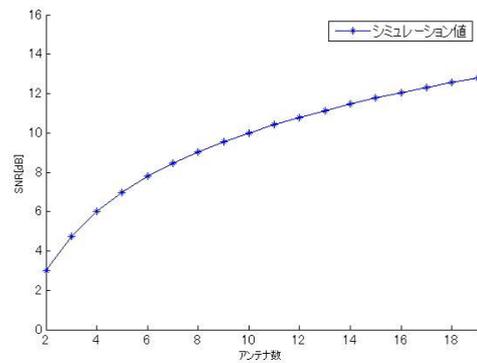


図 8 ダイバーシティゲイン

図 8 から、ダイバーシティゲインはアンテナ数を 2 倍に増やすごとに 3dB ずつ良くなっており、図 3～図 7 の結果と一致する。

## 6 まとめ

本研究では様々な符号を用いた空間ダイバーシティの研究ということで符号化方式を変えシミュレーションを行った結果、BPSK、QPSK が一番 BER が低くなるのでこの 2 つが良い符号化方式であるということが分かる。しかし、その符号化方式は 1 つのシンボルに多くの情報を入れることができないので高度な通信は難しい、よって状況に応じた符号化方式を使い分けることが重要である。空間ダイバーシティについては、アンテナ数を 2 倍に増やすと 3dB ずつ通信品質が良くなるということが分かった。そのシミュレーションは受信側のみアンテナ数を増やすというものである。空間ダイバーシティでは送信側もアンテナ数を増やす場合もあるので、送信側もアンテナ数を増やした方が通信品質はよりよくなると予測される。

### 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] 小林岳彦, ゴールドスミス ワイヤレス通信工学, 丸善株式会社, 東京, 2007.