

# An Adaptive Transmission Control Scheme with Multi-code Multiplexing in MIMO-MC-CDMA System

Hirokazu SADAMATSU\*, Hisato IWAI\* and Hideichi SASAOKA\*

(Received July 13, 2009)

MC-CDMA system and MIMO system have been attracting attention as broadband wireless transmission system. This paper deals with new adaptive transmission control of MC-CDMA in MIMO system. This paper proposes the multi-code multiplexing control to achieve the high quality and high throughput transmission. In the proposed system, the link quality estimation based on pseudo error is employed to estimate the bit error rate (BER) accurately over frequency-selective fading channel. The pseudo error method is effective to estimate the BER which depends on not only the noise but also the inter-code interference. The simulation result shows that the proposed system is useful for high quality and high throughput transmission.

**Key words** : MIMO, MC-CDMA, adaptive transmission control, multi-code Multiplexing, pseudo bit error

**キーワード** : MIMO システム, MC-CDMA, 適応伝送制御, 符号多重化, 擬似ビット誤り

## MIMO-MC-CDMA システムにおける符号多重化による適応伝送制御方式

定松 宏和, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

### 1. まえがき

周波数有効利用かつ大容量伝送を可能とする方式として MIMO(Multi-Input Multi-Output)システムが注目されている<sup>1-3)</sup>. MIMO システムは, 送受信アンテナを複数本使用することにより, 周波数帯域を広げることなく高速通信を実現することができる. MIMO システムの固有モード伝送では, フェージング環境に伴う伝搬路の状況によって固有値の大きさにばらつきが生じる. そのため, 固有値が小さいパスでは受信信号が小さくなり, 通信品質が劣化する. 特に最小固有パスにおいては劣化が大きい. そのため, 既存技術としてよく使用されている適

応変調方式が必ずしも効率的な伝送とは言い切れない. そこで本稿では最小固有パスにおいても効率的な伝送を可能とすることを目的として, この MIMO システムに MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access) 方式<sup>4,5)</sup>を組み合わせた通信方式を対象とする. MC-CDMA 方式は, CDMA 方式と OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple) 方式を融合した方式で, 情報ごとに固有の符号系列を掛け合わせるによりダイバーシチ効果が得られるという特徴を有しており, 近年, 次世代のセルラ移動通信システムの無線伝送方式として注目されている.

\* Department of Electronics, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan  
Telephone: +81-774-65-6355, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: hsasaoka@mail.doshisha.ac.jp

また、従来では適応的な伝送速度制御として適応変調が用いられるが、MC-CDMA 方式においては符号多重数を適応的に制御する適応伝送制御が実現できる。ここで、伝搬路状況に応じた適応伝送制御を行う際には、瞬時 SNR(Signal to Noise Ratio : 送信信号電力対受信信号電力比)などにより伝搬路環境を推定し、その推定した値に応じて適応伝送制御を行う<sup>6)</sup>。しかし、この手法では、周波数選択性フェージング環境下での MC-CDMA 方式の場合、拡散符号間に発生する相互干渉の影響を受け通信品質が大きく劣化することがある。このため、瞬時 SNR の推定に加えて遅延量を正確に推定する必要がある。その実現のため複雑な処理が必要となる。

一方、通信品質の劣化要因が多くある場合、擬似ビット誤りを用いた回線品質推定法の有効性が知られている<sup>7-11)</sup>。この推定法は、雑音の影響の他、干渉やその他の影響を全て考慮したもので、受信信号に対して人為的に信号を劣化させ、その劣化信号から誤りを発生させるものである。

そこで本稿では、符号多重化による適応伝送制御に擬似ビット誤りによる回線品質推定を用いる方法を提案する。これにより、遅延量を正確に検出することなく通信品質を推定し、それにより適切な多重数を選択すること、通信品質の維持およびスループット向上することが期待される。提案方式の有効性を確認するため、計算機シミュレーションにより特性を評価した。

## 2. MIMO-MC-CDMA システム

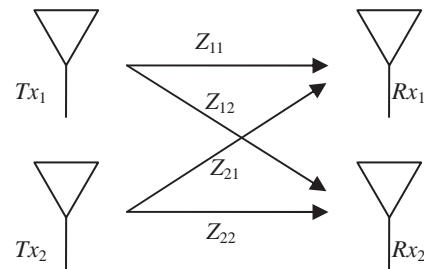
### 2.1. MIMO システム

MIMO システムとは、送信側・受信側双方に複数のアンテナを用いて、各々のアンテナから独立な信号を同一周波数で伝送するシステムである。これにより周波数利用効率を高めつつ、送信アンテナ数分に相当する伝送量の増加を得ることが可能となる。

Fig.1 に送受信アンテナ数をそれぞれ 2 本とした場合の MIMO システムを示す。しかし、同一周波数で複数の信号を送信すると、Fig.1 に示すように受

信側では複数の信号が干渉しあうため、信号の分離処理が必要となる。この信号分離処理として以下に示す 2 通りの場合に大別される。

- I. 伝搬路環境の情報を受信側のみ既知である。
- II. 伝搬路環境の情報を送信側・受信側双方で既知である。



$$\begin{bmatrix} Rx_1 \\ Rx_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tx_1 \\ Tx_2 \end{bmatrix}$$

Fig.1. MIMO system.

本稿では、II の場合である伝搬路環境の情報を送信側・受信側双方で既知とする信号分離処理手法の 1 つである固有モード伝送法を対象とする。固有モード伝送法とは、伝搬路環境の情報を送信側・受信側双方で既知としているため、あらかじめ推定した伝搬路環境を特異値分解する。その特異値分解の簡単な式を式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}^H \quad (1)$$

上式において、上付添字  $H$  は複素共役転置、 $\lambda_i$  はそれぞれのパスにおける固有値である。式(1)の  $B$  行列の共役複素転置行列を送信ウェイト、 $A$  行列の共役複素転置行列を受信ウェイトとして乗算することにより、チャネル間干渉を除去することが可能となり、受信信号は次式となる。

$$\begin{bmatrix} Rx_1 \\ Rx_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Tx_1 \\ Tx_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)から受信信号は送信信号に固有値の値が乗算されていることから、受信信号は固有値の値に依存する。

## 2.2. MC-CDMA 方式

MC-CDMA 方式は、周波数有効利用を可能とする OFDM 方式と多元接続方式を可能とする CDMA 方式を融合した方式である。ここで、OFDM 方式が狭帯域なサブキャリアでデータを伝送するのに対して、MC-CDMA ではデータに符号系列を掛け合わせ全サブキャリアに拡散する。この結果、MC-CDMA では、OFDM の全周波数帯域（広帯域）を用いることになる。MC-CDMA 方式の特徴は、送信データを全サブキャリアに拡散して伝送するため、周波数選択性フェージングによる一部のサブキャリアの劣化の影響を受け難くなる。このことは、周波数ダイバーシチ効果が得られることを意味する。

本稿では、単一局の信号に拡散符号の多重数を变化させる符号分割多重方式(CDM : Code Division Multiplexing)について検討を行う。

## 2.3. 通信品質推定法

通信品質推定法としてよく用いられるものは瞬時 SNR による方法である。この手法では、受信側での信号電力と雑音電力との比を求めることでビット誤り率などの通信品質推定が可能となる。特に固有モード伝送法による MIMO システムでは、受信信号強度が固有値の変動の影響を受けるため、その影響も含めた推定が可能となる瞬時 SNR を用いた通信品質推定法は有効である。

しかし、変調方式として MC-CDMA 方式を用いた場合、周波数選択性フェージング環境下では MC-CDMA 方式特有の符号間干渉が生じる。そのため、この符号間干渉による影響も含めた通信品質推定を行う必要がある。しかし、瞬時 SNR を用いた通信品質推定法では符号間干渉を含んだ推定をすることが非常に困難である。

そこで、本稿ではこの符号間干渉を含んだ推定法として擬似ビット誤り率を用いた通信品質推定法を提案する。擬似ビット誤りとは、受信側で人為的に信号を劣化させることにより得られるビット誤りのことであり、これは実際のビット誤りとは異なる。この手法は、

- 受信信号を劣化させたものを比較するため、送信信号が既知である必要がない、
  - 一般的に実際のビット誤り率より擬似ビット誤り率の方が高くなるため、少ないサンプル数で精度良いビット誤り率を推定することができる、
  - 擬似ビット誤りから実際のビット誤りを直接推定するため、フェージング以外の干渉信号などの劣化要因を含めた総合的なビット誤りを推定することができる、
- という特徴を持つ。

この擬似ビット誤りを発生させる手法としては、①位相回転を加える、②雑音を付加する、③信号を歪ませる、④サンプリング点をずらす、⑤判定しきい値をオフセットさせる、などの様々な方法が考えられる。

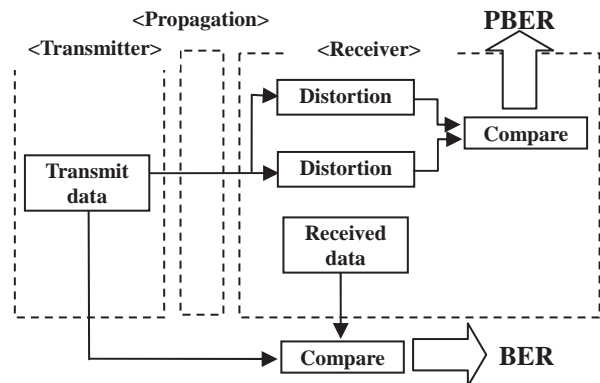


Fig.2. Measurement method of pseudo bit error rate.

本稿における擬似ビット誤りの検出法を Fig.2 に示す。本稿では擬似ビット誤り率を推定する際、送信信号は未知とする。Fig.2 において、受信した信号に対し劣化処理 (Distortion) を施す。このとき、受信した信号を同様の劣化手法で 2 パターンの処理を行う。このように劣化した信号を復調し、得られた 2 つのビット系列を比較すると、ビットの不一致が発生する。ビット不一致が擬似ビット誤りとなる。この発生した擬似ビット誤りより、擬似ビット誤り率(PBER : Pseudo Bit Error Rate)を測定することができる。

一方、受信信号を劣化させないで、復調データと送信データを比較して得られるものが、実際のビット誤りであり、これが真のビット誤り率(BER : Bit Error Rate)となる。実際の環境では、既知のビットを送信しないかぎり、この真のビット誤り率の測定は不可能である。

本稿では提案方式の性能評価の基準として用いる。しかし、あらかじめ擬似ビット誤り率と真のビット誤り率の関係を求めテーブルを作成することにより、擬似ビット誤り率から真のビット誤り率を推定することが可能となる。

### 3. 固有モード伝送法の問題点とその解決策

#### 3.1. 固有モード伝送法の問題点

固有モード伝送法では、送信側・受信側双方で伝搬路特性を既知としているため、あらかじめ特異値分解を行い、送信側で送信ウェイト、受信側で受信ウェイトを乗算することで直交化を行い、チャンネル間干渉を除去することが可能である。しかし、受信信号の振幅は固有値の値に依存しているため、固有値の値が小さくなると、振幅は小さくなり結果として通信品質が劣化してしまう。一例として Fig.3 に送受信アンテナそれぞれ2本とした場合の、第1固有値と第2固有値の固有値の平方根の分布を示す。

Fig.3 に示すように、第1固有値の値は1以上となる確率が非常に高い。そのため、通信品質によっては、多値変調を行い1データあたりのビット数を増加させることで伝送容量を増加させることが期待できる。一方、第2固有値は1以下となる確率が非常に高いため、受信信号の振幅は送信信号の振幅より小さい状態で復調する可能性が高くなる。特に、周波数選択性フェージング環境下では、サブキャリアにより固有値にばらつきが生じるため、固有値の値が小さいサブキャリアでは受信信号の振幅が非常に小さくなる可能性があり、結果として通信品質が劣化してしまう。このことから、従来の伝送制御方式である適応変調が必ずしも適切な方式とはいえない。

また、瞬時 SNR を用いた通信品質推定法を MC-CDMA 方式に適用した場合、周波数選択性フェージング下では MC-CDMA 方式特有の符号間干渉を含んだ推定が非常に困難となる。

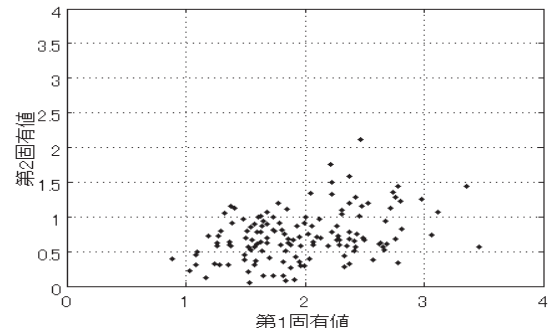


Fig.3. Distribution of square root of eigen value.

#### 3.2. 擬似ビット誤り率推定法

前節の問題点を解決する手法の一つとして、擬似ビット誤り率に基づく MC-CDMA の符号多重化による適応伝送制御がある。擬似ビット誤り率の推定法は、フェージングによる劣化の他、干渉などによる劣化など各種の劣化要因も含んだ場合に対しても正確な推定が可能である。このため、周波数選択性フェージング下での MC-CDMA 方式の特性評価に非常に有効である。

擬似ビット誤りを発生させる手法は2.3節でも説明したように様々な手法がある。本稿では、変調方式として MC-CDMA 方式を用いるため、精度良く擬似ビット誤りを発生させるためには、逆拡散後に劣化処理を加える必要がある。また、本稿では QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)変調で検討を行うため、位相成分を含んだ劣化処理が必要となる。これらのことから、擬似ビット誤りを発生させる手法として、位相回転を用いた劣化手法を取りあげる。

Fig.4 に位相回転を用いた擬似ビット誤り発生手法を示す。同図(a)は受信信号、同図(b)は擬似ビット誤りと判定される領域を示している。このビット誤り発生法では、はじめに受信信号を逆拡散処理し、その後、位相回転を加えて信号劣化させる。この位相回転は、判定軸を回転させることと同等である。同図(b)に示すように Phase shift(1)で判定軸を $-\theta$

回転させたものを復調する一方で、Phase shift(2)で判定軸を  $\theta$  回転させたものを復調する。

これらより得られたビット系列を比較し、不一致ビットを擬似ビット誤りとする。同図(b)の例では、黒点で示されたビットが擬似ビット誤りとなる。

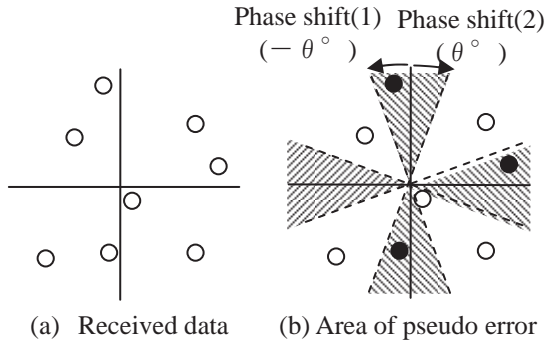


Fig.4. Generation of pseudo error.

4. 提案方式の特性評価

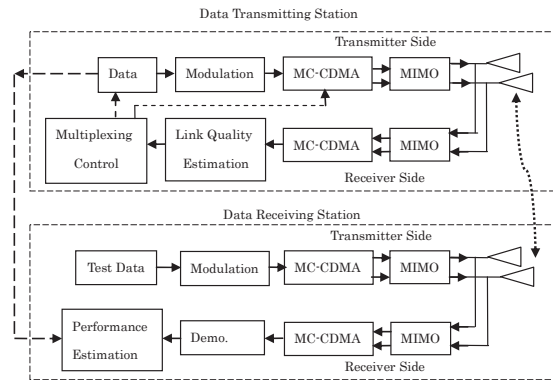
4.1. シミュレーションシステムモデル

提案方式の性能を定量的に評価するために計算機シミュレーションを行った。シミュレーションシステムの全体構成を Fig.5(a)に、マルチキャリアの MIMO の送受信部の構成を同(b)に示す。また、シミュレーション諸元を Table 1 に示す。

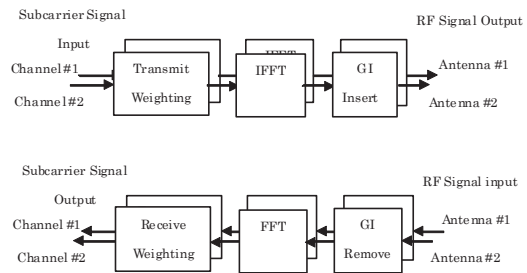
Fig.5(a)に示すようにデータ受信局では、その送信系において回線品質試験のためにデータの発生、変調, MC-CDMA 送信, MIMO 送信などの処理を行って、データ受信局に電波を送信する。データ送信局では、その受信系において MIMO 受信, MC-CDMA 受信の処理を行った後、回線品質推定を行う。この回線品質推定では、データ受信局の送信データを未知とし、擬似ビット誤り率から真のビット誤り率を推定している。この真のビット誤り率が  $10^{-3}$  以下となる多重数を算出し、符号多重化による適応伝送制御を行う。なお、多重数は 1~32 とし、条件を満たさない場合、送信 OFF を選択する。

データ送信局の送信系では、多重数に応じて送信データを生成し、変調, MC-CDMA 送信, MIMO 送信の処理を行って、データ受信局に向けて電波を送信する。ここで、送信電力は多重数によらず一定

に設定する。データ受信局の受信系では、MIMO-MC-CDMA の受信処理を行った後、特性評価を行う。特性評価には、ビット誤り率、フレーム誤り率、スループットなどを用いる。また、Fig.5 (b)に示すように、伝送チャンネルごと、サブキャリアごとの送信重みづけ、受信重みづけを行っている。



(a) Configuration of multi-carrier MIMO system



(b) Transmitter and receiver configuration

Fig.5. System configurations.

Table 1. Simulation parameters.

Modulation	QPSK
MC-CDMA	64 subcarrier, 48 symbol packet, 100 k symbol/sec transmission rate
MIMO	2x2 antenna, multi-carrier MIMO, Eigen-mode transmission,
Propagation	Quasi-static fading in packet duration, Non-coherent fading between packet, Delay time=1 sample, DUR=0,3,6,12 [dB],

## 4.2. BER 対 PBER の関係

### 4.2.1. 擬似ビット誤り発生時の位相回転量

シミュレーションにより、擬似ビット誤りの発生に適切な位相回転量の検討を AWGN(Additive White Gaussian Noise)環境下で行った。Fig.6 に位相回転量として受信側で  $\pi/18$ ,  $\pi/12$ ,  $\pi/10$ ,  $\pi/9$ ,  $\pi/6$  の位相回転を加えた場合の MC-CDMA の擬似ビット誤り率と真のビット誤り率の特性を示す。全ての位相回転量において MC-CDMA の多重数は 32 で検討を行った。

位相回転量  $\pi/6$  は、擬似ビット誤り率に大きな変化がなく推定の感度が悪くなるため、適切な制御ができないと予想される。また、位相回転量  $\pi/18$  は、真のビット誤り率が低い領域を推定するため、多くのビットを送送する必要があり、効率的に推定するためには適切ではない。そのため、本稿では、通信に必要なビット誤り率の上限を考慮し、初期検討として位相回転量を  $\pi/10$  とした。

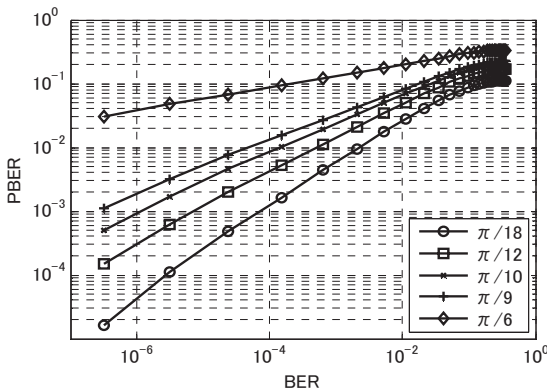


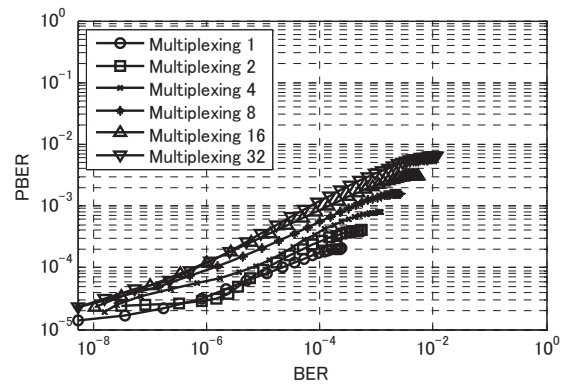
Fig.6. Average BER versus PBER over AWGN.

### 4.2.2. 位相回転量における各多重数の特性

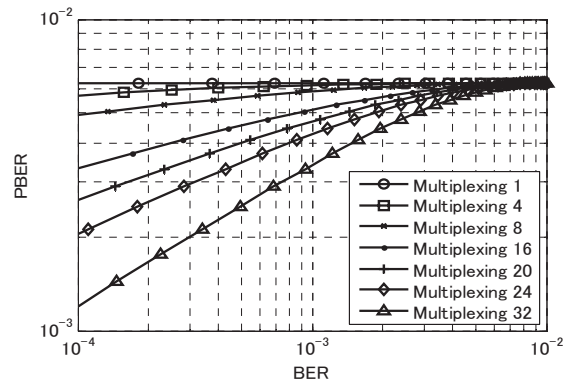
この節では、その位相回転量における各多重数の BER 対 PBER 特性を計算機シミュレーションにより検討した。

Fig.7 に AWGN の遅延 DUR(Desire to Undesired Ratio : 直接波対遅延波電力比) : 6[dB], 遅延サンプル数 : 1 サンプルにおける各多重数の BER 対 PBER 特性を示す。同図(a)は各多重数に対応した BER 対 PBER 特性、同図(b)は PBER の多重数を 32 と固定

し、BER の多重数は変数とした場合の BER 対 PBER 特性である。ここで、遅延 DUR=6[dB]とは、遅延波の電力は直接波の電力の 1/2 である。同図(a)から、擬似ビット誤り率を測定し、MC-CDMA の擬似ビット誤り率と真のビット誤り率の特性をテーブルとして参照することにより、各多重数における真のビット誤り率を推定することができる。同図(b)において、通信品質推定の多重数を 32 とし、受信側で  $PBER=4 \times 10^{-3}$  と測定された場合、 $PBER=4 \times 10^{-3}$  の位置に着目すると、 $BER=1 \times 10^{-3}$  以下となる多重数は 24 であることがわかる。



(a) Average BER versus PBER



(b) Average BER versus PBER

Fig.7. Average BER versus PBER. (DUR : 6[dB])

### 4.2.3. BER 対 PBER の DUR 依存性

Fig.8 に擬似ビット誤り率を測定するための多重数を 32 と固定し、遅延波が存在しない AWGN 環境

および遅延波が存在する AWGN 環境における BER 対 PBER の特性を示す. ここで, 遅延波が存在する AWGN 環境の遅延 DUR は代表的な値として 0[dB] および 6[dB] とした.

同図より, 多重数を固定した場合, 遅延波の存在および遅延 DUR の大きさに依存することなく, 一定の特性を維持していることがわかる. これは, 受信機において劣化処理を行った際, 遅延波の影響が AWGN における影響とほぼ同等となっているため, それぞれの特性がずれているだけであり, 一定の特性を保っていると考えられる.

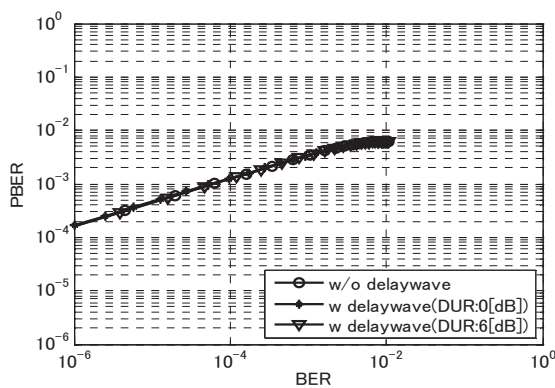


Fig. 8. Comparison of average BER versus PBER. (with and without delay)

### 4. 3. 提案方式の有効性

提案方式の有効性を評価するため, フェージング環境下での伝送特性 (フレーム誤り率, スループットなど) を計算機シミュレーションで求めた. なお, シミュレーションに当たっては, 遅延 DUR: 6[dB], 遅延サンプル数: 1 サンプルにおける BER 対 PBER 特性をテーブルとして使用した.

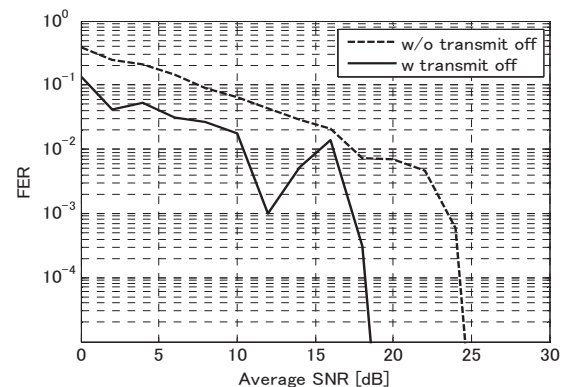
#### 4. 3. 1. フラットフェージング環境下の伝送特性

フラットフェージング環境下における伝送特性を Fig. 9 に示す. 同図(a)は FER(Frame Error Ratio: フレーム誤り率)特性, 同図(b)にスループット特性を示す. また, 点線は送信 OFF を適用しない場合, 実線は送信 OFF を適用した場合の特性である.

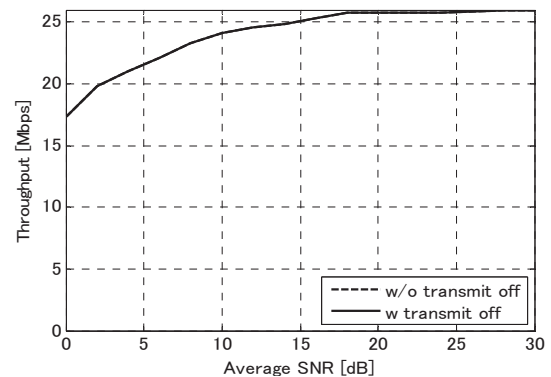
同図(a)より, 送信 OFF を適用することで FER が改善されることが分かる. 一方, 同図(b)より, 送

信 OFF を適用した場合と適用しても, スループット特性に大きな変化はない. これは, 送信 OFF 制御を適用し送信 OFF となる状況下では, フレーム誤りが発生することが多く, 送信 OFF を適用しなくてもそのパケットが廃棄されるためである.

また, 平均 SNR が大きくなるにつれスループットが増加している. これは, 第 2 固有パスのスループットの増加によるものである, なお, 第 1 固有パスの多重数は全ての平均 SNR でほぼ 32 を維持している.



(a) FER characteristic

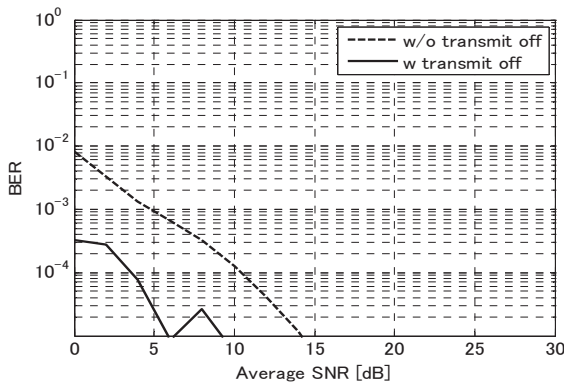


(b) Throughput characteristic

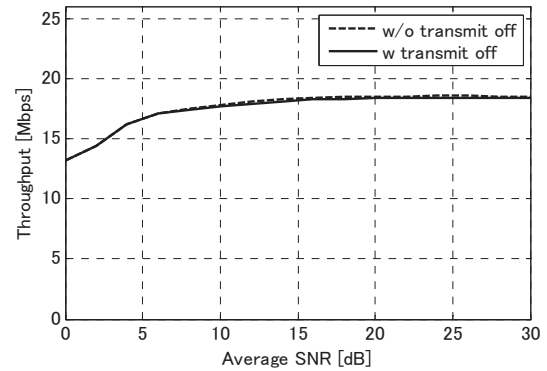
Fig. 9. Transmission characteristics in flat fading.

#### 4. 3. 2. 選択性フェージング環境下の伝送特性

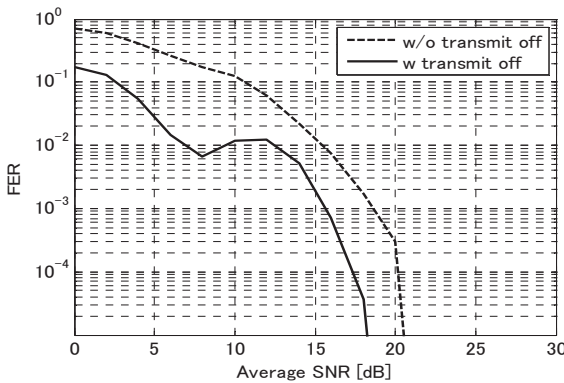
次に周波数選択性フェージング環境下における伝送特性を Fig. 10 に示す. 遅延 DUR : 6[dB], 遅延サンプル数: 1 サンプルとした. ここで, 点線は送信 OFF を適用しない場合, 実線は送信 OFF を適用した場合のシミュレーション結果である. 同図(a)



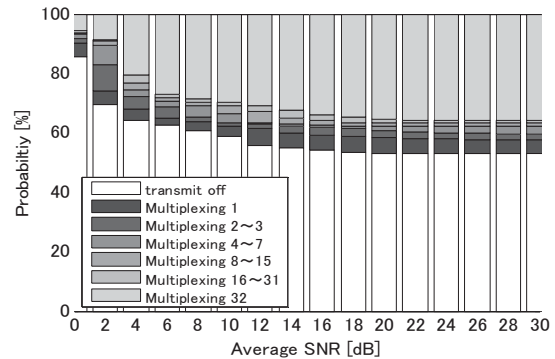
(a) BER characteristic



(c) Throughput characteristic



(b) FER characteristic



(d) Distribution of number of multicode of second eigenpath (DUR:6[dB])

Fig.10. Transmission characteristic in frequency-selective fading.

に BER(Bit Error Ratio:ビット誤り率)特性, 同図(b)に FER 特性, 同図(c)にスループット特性, 同図(d)に送信 OFF を適用した場合の第 2 固有パスにおける多重数の発生確率を示す. 同図(a)より, 送信 OFF を行うことで全ての平均 SNR においてビット誤り率を  $10^{-3}$  以下に制御できていることがわかる. また, それにより FER 特性を改善することができている (同図(b)参照).

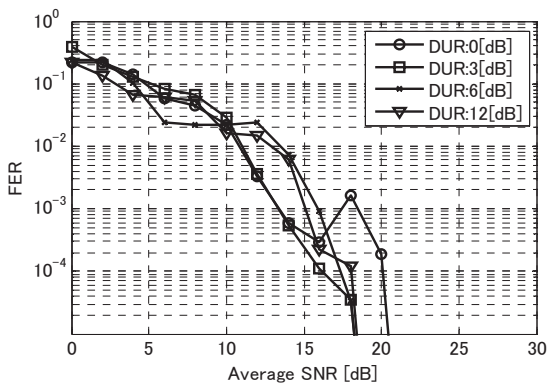
一方, 同図(d)より, スループット特性は, 送信 OFF と送信 ON の場合で変化がないことから, 送信 OFF の対象となるフレームは, フレーム誤りによりパケットが破棄されていることがわかる. また, 平均 SNR の増加に対するスループットの増加は, 第 2 固有パスのスループットの増加によるものである. その第 2 パスの多重数の発生確率を同図(d)

に示している. 同図から平均 SNR が増加すると, 多重数の発生割合が増加するとともに送信 OFF の割合が減少している. しかし, 平均 SNR:30[dB]においても第 2 固有パスにおける送信 OFF の割合は 45%程度ある. これは擬似ビット誤りの測定における多重数の設定が 32 であるため, 符号間干渉により実際の多重数に設定された場合に比べて真のビット誤り率を過大評価するためである. なお, 過大評価は, 通信品質を確実に維持する観点から有効とも言える.

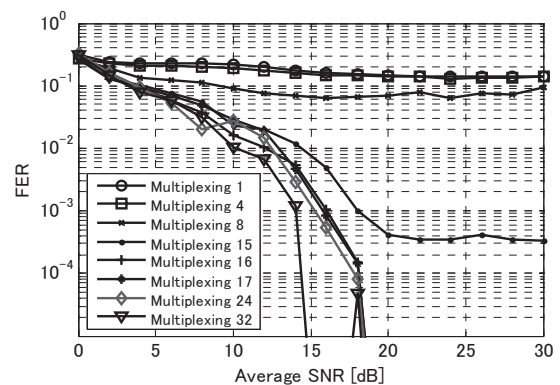
#### 4.3.3. 伝送特性の DUR 依存性

ここでは, 本稿で使用しているテーブルの遅延 DUR に対する依存性を検討する. 遅延 DUR : 0,3,6,12[dB]における伝送特性を Fig.11 に示す. 同図

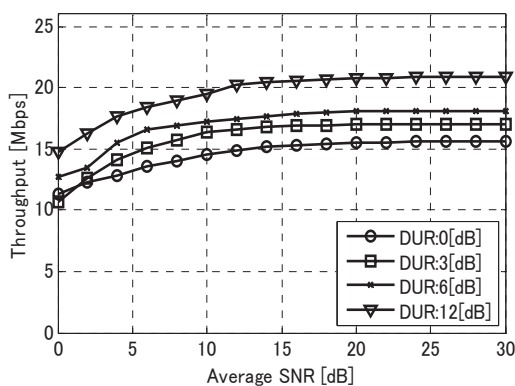




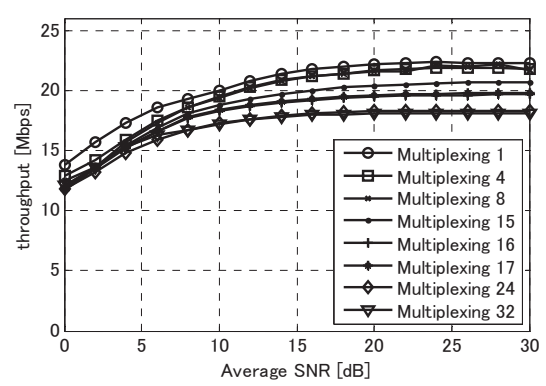
(a) FER characteristic



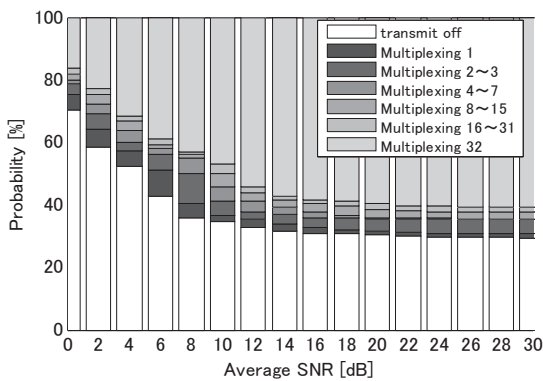
(a) FER characteristic



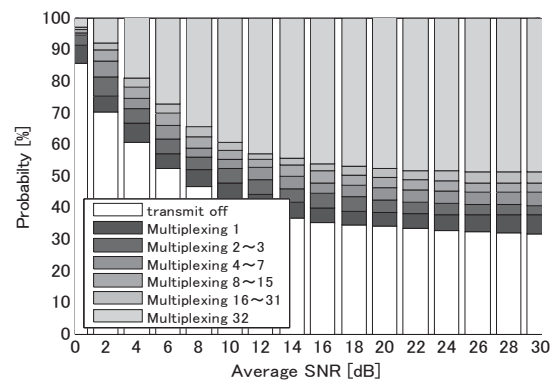
(b) Throughput characteristic



(b) Throughput characteristic



(c) Distribution of number of multicode of second eigenpath (DUR:12[dB])



(c) Distribution of number of multicode of second eigenpath (Number of codes:16)

Fig.11. Transmission characteristics in frequency-selective fading when DUR is varied.

(a)は FER 特性, 同図(b)はスループット特性, 同図(c)は, DUR: 12[dB]における第 2 固有パスの発生割合である.

同図(a)より, 遅延 DUR を変化させても FER 特性

Fig.12. Transmission characteristics in frequency-selective fading when number of multiplexing is varied.

に大きな変化はない. このことから, 符号多重化による適応伝送制御が適切であることがわかる.

一方, 同図(b)よりスループット特性は遅延 DUR が大きくなる, すなわち遅延波の影響が小さくなる

に従いスループットは向上している。これは、第2固有パスの増加によるものである。

#### 4.3.4. 通信品質推定における多重数の検討

擬似誤り率の測定のための多重数の設定を32として、符号多重化による適応伝送制御を行った場合、遅延DUR:6[dB]において第2固有パスの送信OFFが約45%の割合で発生することがわかった。この節では、Fig.12により擬似誤り率の測定のための多重数の設定の最適化に関して検討を行う。

同図(a)より多重数が16以上になると、符号多重化による適応伝送制御後のフレーム誤り率に大きな変化がない。これは、擬似誤り率の測定のための多重数の設定を16以上とすると、真の誤り率を大幅に過小評価する危険性が減少するためである。

また、同図(b)より、多重数の設定を多くすると、平均スループットは減少する。これは、多重数の設定を大きくすると、真の誤り率特性をより過大評価するため送信OFFの割合が高くなり、その結果、平均スループットは低下するためである。

以上の結果から、符号化による適応伝送制御後の通信品質が大きく変化しない範囲で、スループットが最大となるものを選択すると、擬似ビット誤りの測定のための多重数の設定は16となる。この場合の第2固有パスにおける多重数の発生確率を同図(c)に示す。擬似誤り率の測定のための多重数の設定を32とした場合、平均SNR:30[dB]における送信OFFの割合は約45%(Fig.10(d)参照)存在するのに対し、多重数の設定を16とした場合、平均SNR:30[dB]における送信OFFの割合は約30%まで低下している。このとき、送信OFFの割合は約30%程度となり、スループットは多重数32と比較し最大1.5Mbps改善することが可能である。そのため、本研究におけるMIMO-MC-CDMA方式において、位相回転を用いた擬似ビット誤り率推定法を用いた通信品質推定法では、通信品質を推定する多重数は16が最適であることがわかる。

## 5. まとめ

本稿では、MIMO-MC-CDMA方式におけるの擬似ビット誤り率に基づく符号多重化による適応伝送制御方式を提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより検討した。

シミュレーションの結果、擬似ビット誤り率を用いた提案方式を用いることで通信品質の改善が可能なことがわかった。擬似ビット誤り率の測定のための多重数の設定を最大多重数32と固定した場合、遅延DURに依存することなく符号多重数の適応制御が可能で、遅延波の影響が小さくなるに従いスループットの向上が可能であることが分かった。しかし、多重数を32と固定した場合、周波数選択性フェージング環境下では、真のビット誤り率を過大評価するため、送信OFFの割合が約45%程度発生し、平均スループットが低下することがわかった。また、通信品質の維持とスループットの向上とを両立させる多重数を検討した結果、多重数は16が良いことが分かった。

今後の課題としては、送信OFFの割合を減少させる技術の提案およびスループットのさらなる向上を考慮し適応変調も含めた検討を行う必要がある。また、情報フィードバックを行うことでさらに効率よく伝送できると考えられる。

## 参考文献

- 1) 唐沢好男, "MIMO 伝搬チャネルモデリング," 信学論(B), Vol.J86-B, No.9, pp.1706-1720 (2003).
- 2) 大鐘武雄, 西村寿彦, 小川恭孝, "MIMO チャネルにおける空間分割多重方式とその基本特性," 信学論(B), Vol.J87-B No.9, pp.1162-1173 (2004).
- 3) 志村隆一郎, 大野力, 神林友和, 笹瀬巖, "チャネル行列の相関行列の最小固有値を大きくするように送信位相制御を行うE-SDM/OFDMシステム," 信学技報, RCS2004-44, pp.115-120 (2004).
- 4) S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," IEEE Communications Magazine, Vol.35, No.12, pp.126-133 (1997).
- 5) 松本渉, 落合秀樹, "OFDM変調方式の応用," トリケップス (2001).

- 6) 吉田晴人, 前原文明, 高畑文雄, "OFDM 伝送における高速フェージング変動補償に関する一検討," 信学技報, AP2001-119, pp.47-52 (2001).
- 7) E. A. Newcombe and S. Pasupathy, "Error rate monitoring for digital communication," Proceedings of IEEE, Vol.70, No.8, pp.805-828 (1982).
- 8) I. M. Kovic, "Pseudo error rate of a PSK system with hardware imperfections, noise and cochannel interference," IEE Proceedings, Vol.136, Pt.I, No.5, pp.333-338 (1989).
- 9) 坂本剛憲, 安倍克明, "DSRC システムにおける擬似誤り検出法を用いた適応変調の性能評価," 信学総大, A-17-6 (2003).
- 10) 岩井誠人, 渡邊貴志, 高井信人, 笹岡秀一, "擬似ビット誤りに基づくビット誤り率の推定法," 信学技報, AP2006-15, pp.35-40 (2006).
- 11) 渡邊貴志, 岩井誠人, 笹岡秀一, "擬似誤りによる回線品質推定法を用いた OFDM 適応変調方式," 同志社大学理工学研究報告, 47, 149-159(2006).