

# 直交マルチコード DS-CDMA における周波数・空間ダイバーシチ効果

板垣 竹識<sup>†</sup> 佐尾 智基<sup>†</sup> 安達 文幸<sup>‡</sup>

東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05

E-mail: <sup>†</sup>{itagaki,sao}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup>adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 直接拡散符号分割多元接続(DS-CDMA)では、直交拡散符号を複数用いた直交マルチコード伝送により低速から高速にわたる様々な伝送レートを比較的容易に実現できるのが特徴である。周波数選択性フェージング環境下において、DS-CDMA は多重数が多い場合にはパス間干渉による符号の直交性の崩れによりビット誤り率(BER)特性の深刻な劣化を招いてしまう。本論文では、直交マルチコード DS-CDMA 伝送系に、マルチキャリア CDMA(MC-CDMA)で用いられている周波数領域等化技術を適用して、周波数ダイバーシチ効果を得つつ符号の直交性を再生する手法を述べている。そして、アンテナダイバーシチと組み合わせた最小平均 2 乗誤差(MMSE)にもとづく周波数等化により、周波数選択性フェージング環境下における直交マルチコード DS-CDMA の BER 特性を大幅に改善できることを、計算機シミュレーションにより明らかにしている。

**キーワード** マルチコード DS-CDMA, MMSEC, 周波数選択性フェージング

## Frequency and Space Diversity for Orthogonal Multicode DS-CDMA

Takeshi ITAGAKI<sup>†</sup> Tomoki SAO<sup>†</sup> and Fumiyuki ADACHI<sup>‡</sup>

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: <sup>†</sup>{itagaki,sao}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup>adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Direct sequence code division multiple access (DS-CDMA) provides flexible data transmissions in wide range of data rates by the use of orthogonal multicode multiplexing. In a frequency selective fading channel, when code multiplexing order becomes higher, the bit error rate (BER) performance is severely degraded since the destruction of orthogonality among spreading codes becomes severer due to increasing inter-path interference. In this paper, we propose a technique to restore the orthogonality while achieving frequency diversity effect by the application of frequency-domain equalization technique used in MC-CDMA receivers to multicode DS-CDMA systems. It is found by computer simulations that the BER performance of orthogonal multicode DS-CDMA in frequency selective fading channel can be significantly improved by the combined use of minimum mean square error combining (MMSEC) and antenna diversity reception.

**Keyword** Multicode DS-CDMA, MMSEC, Frequency selective fading

### 1. まえがき

広帯域移動無線チャネルでは、多数の遅延パスの存在により周波数選択性フェージングが発生するため、伝送特性の深刻な劣化を招いてしまう[1]。直接拡散符号分割多元接続(DS-CDMA)は、遅延時間の異なるパスを分離し、Rake 受信を行うことによりパスダイバーシチ効果が得られるので、伝送特性を改善できる[2]。直交拡散符号を用いて複数データシンボルを拡散し並列伝送する直交マルチコード DS-CDMA では、コード多重数や拡散率を可変にすることにより様々な伝送レートを実現できるのが特徴である[3]。また、DS-CDMA 移動通信の下りリンクでは多数のユーザのデータを直交多重して送信している。このような直交マルチコード DS-CDMA ではパス数の増大とともに多くの Rake フィンガ数を必要とするために受信処理が複雑になることや、パス間干渉による符号直交性の崩れの影響が支配的になってしまい伝送特性が劣化してしまうという問題がある。

このようなことから最近では、ブロードバンド移動無線マルチアクセス技術の有力候補としてマルチキャリア CDMA(MC-CDMA)[4]が注目されている。

MC-CDMA は周波数領域拡散を適用して送信するものであり、周波数領域等化を施すことで周波数ダイバーシチ効果を得つつ符号直交性を再生することができるので、周波数選択性の厳しいチャネルでは Rake 受信を用いる DS-CDMA に比較して格段に優れた伝送特性が得られることが知られている[5]。また最近では、周波数領域等化をシングルキャリア伝送に適用する研究も行なわれている[6]。また、最近周波数領域等化を DS-CDMA 伝送系に適用する試みもなされている。筆者らは、直交マルチコード DS-CDMA に周波数領域等化を適用すれば周波数選択性フェージングチャネル環境下で MC-CDMA と同等の優れた伝送特性が得られることを示している[7]。

本論文では、周波数領域等化を用いるマルチコード DS-CDMA の伝送特性について、アンテナダイバーシチ受信効果、パス数や多重数の影響をより詳細に検討すること、MC-CDMA や時間領域 Rake を用いるマルチコード DS-CDMA と特性比較を行なうことを目的としている。本論文は以下のような構成になっている。第 2 章では直交マルチコード伝送系と、MMSE に基づく周波数等化について述べ、第 3 章では周波数領域

等化効果と、理想 Rake 合成との特性比較、MC-CDMA との特性比較及び受信アンテナダイバースチとの融合効果を、計算機シミュレーションにより明らかにしている。

## 2. 周波数領域 MMSEC を用いる直交マルチコード DS-CDMA

### 2.1. 周波数領域等化

受信機では DS-CDMA 受信信号を高速フーリエ変換 (FFT) して周波数領域等化処理を行う。FFT に用いるサンプル数は拡散率  $SF$  に等しい。つまり 1 チップが FFT サンプル 1 個に対応している。ここで、受信側で FFT を適用するためには、受信信号が FFT 時間内で周期波形として扱えなければならない。ところが移動通信では一般に、伝搬路は遅延時間の異なる複数の離散パスで構成される。そこで、受信信号を周期波形として扱えるようにするため、送信側では、MC-CDMA と同じく図 1 のようにチップ系列の末尾  $N_g$  チップをコピーし、その先頭にガードインターバルとして付加する。こうすることで、最大遅延時間がガードインターバル以内であれば受信信号は FFT 時間内で周期波形とみなすことができる。チップ長を  $T_c$  とするとガードインターバル長  $T_g$  は  $T_g = N_g T_c$  で表される。元の  $SF$  チップの変調データシンボル長を  $T_s$  とすると、ガードインターバルを付加した送信シンボル長  $T$  は  $T = T_s + T_g$  となる。ここで、ガードインターバル挿入により伝送効率は  $T_s / (T_s + T_g) = SF / (SF + N_g)$  になり、また  $T_g / (T_s + T_g) = N_g / (SF + N_g)$  の電力損が生じる。

受信側では、受信チップ系列に FFT 演算を適用して得られた各周波数成分に重み係数を乗積する 1 タップ周波数等化を行い、逆フーリエ変換 (IFFT) 演算により周波数等化された時間領域 DS-CDMA 波形を得る。IFFT 演算には全ての周波数成分を合成する過程があるために、周波数選択性フェージングを利用した周波数ダイバースチ効果が得られる。前述した伝送効率低下と電力損と引き換えに、1 タップ周波数領域等化が可能となることや、多数の Rake フィンガが必要になるという欠点を回避できるなどの利点が生まれる。

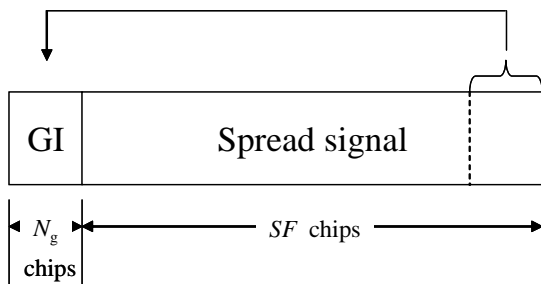


図 1 ガードインターバルを付加した DS-CDMA 信号

### 2.2. 直交マルチコード伝送系の数式表現

周波数領域等化を用いる直交マルチコード DS-CDMA 伝送系を図 2 に示す。送信側ではまず 2

値送信データ系列  $\{d_i\}$  を QPSK 変調し、 $C$  個の QPSK シンボル系列  $\{d_i = (\pm 1 \pm j) / \sqrt{2}; i = 0 \sim C-1\}$  を並列送信し、 $M$  個のアンテナで受信するものとする。本論文では以後、チップ時間単位での離散時間表現を用いることにする。

$C$  個の QPSK データシンボルを、拡散率  $SF$  の直交拡散符号 (Walsh-Hadamard 系列)  $\{c_i(k) = \pm 1; i = 0 \sim C-1, k = 0 \sim SF-1\}$  で拡散する。こうして得られた  $C$  個のチップ系列を加算 (コード多重) した後、スクランブル符号  $\{c_{scr}(k) = \pm 1; k = \dots, -1, 0, 1, \dots\}$  を乗算する。スクランブル符号は、合成されたチップ系列を擬似雑音系列に変換するために用いている。直交マルチコード DS-CDMA 信号を等価低域表現を用いて表示すると次式のようになる。

$$s(k) = \sqrt{2S} \sum_{i=0}^{C-1} d_i c_i(k) c_{scr}(k) \quad , \quad k = 0 \sim SF-1 \quad (1)$$

ここで、 $S$  はトータル送信電力である。このコード多重されたチップ系列の末尾  $N_g$  チップをコピーし、元のチップ系列の先頭にガードインターバル (GI) として挿入する。送信チップ系列は次式のように表せる。

$$\tilde{s}(k) = s(k \bmod SF) \quad , \quad k = -N_g \sim SF-1 \quad (2)$$

$L$  個の離散パスから成る周波数選択性レイリーフェージングチャネルを伝搬して  $m$  番目のアンテナで受信される信号はチップレートで標本化される。 $k$  番目のチップ標本は次式で表される。

$$r_m(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{m,l}(k) s(k - \frac{\tau_l}{T_c}) + \eta_m(k) \quad (3)$$

ここで、 $\{\eta_m(k)\}$  は相加性白色雑音系列であり、平均 0 で分散  $2N_0/T_c$  のガウス過程である ( $N_0$  は雑音電力密度)。受信機ではまず、チップ標本系列からガードインターバルを除去、その系列に  $SF$  点の FFT を適用する。こうして得られる周波数成分  $\{R_m(n)\}$  は次式で表される。

$$R_m(n) = \sum_{k=0}^{SF-1} r_m(k) \exp(-j2\pi n \frac{k}{SF}) \quad , \quad n = 0 \sim SF-1 \quad (4)$$

次に、MMSE 重み係数  $w_m(n)$  を周波数成分  $R_m(n)$  に乗積し、周波数領域等化を行う。MMSE 重み  $w_m(n)$  については後述する。受信ダイバースチと併用する場合には各周波数成分ごとにアンテナダイバースチ合成を行う。この後に次式で表される IFFT を適用して時間領域のチップ系列  $\tilde{r}(k)$  を得る。

$$\tilde{r}(k) = \frac{1}{SF} \sum_{n=0}^{SF-1} \left( \sum_{m=0}^{M-1} R_m(n) w_m(n) \right) \exp(j2\pi k \frac{n}{SF}) \quad (5)$$

得られたチップ系列  $\{\tilde{r}(k)\}$  を,  $C$  個の直交符号系列で逆拡散することで次式で表される軟判定シンボル  $\{\hat{d}_i\}$  を得る.

$$\hat{d}_i = \frac{1}{SF} \sum_{k=0}^{SF-1} \tilde{r}(k) c_i^*(k) c_{scr}^*(k) \quad , \quad i=0 \sim C-1 \quad (6)$$

最後に,  $\{\hat{d}_i\}$  を並直列変換しデータ判定して, 送信データ系列を再生する.

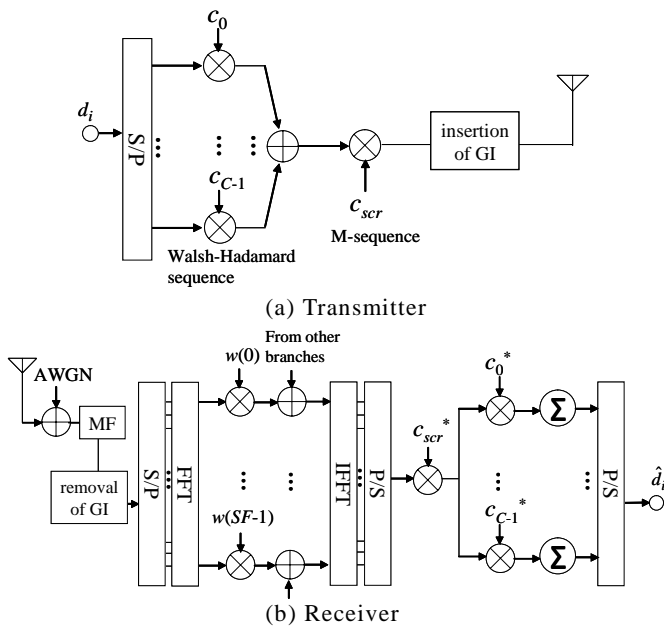


図 2 周波数領域等化を用いる DS-CDMA 伝送系

### 2.3. MMSE 重み

MC-CDMA の周波数等化技術として良く知られているものは直交再生合成 (ORC) と最小平均 2 乗誤差合成 (MMSEC) である[8]. ORC は, 拡散符号間の直交性を完全再生できるものの, 雑音強調が発生してしまう欠点がある. 符号間の直交性の再生と雑音強調はトレードオフの関係にあることが知られている. MMSEC は各周波数成分の平均 2 乗誤差を最小にするもので, 直交性の完全再生をあきらめることで雑音強調を抑えている. 本論文ではこの MMSE 重みを用いる. 受信アンテナダイバーシチと併用する場合には, ダイバーシチ合成後の各周波数成分の平均 2 乗誤差を最小にするように重みを決定する.

$m$  番目のアンテナにおける伝搬路の周波数伝達関数を  $H_m(k)$  とすると, MMSE 重みは次式で与えられる[9].

$$w_m(n) = \frac{H_m^*(n)}{\sum_{m=0}^{M-1} |H_m(n)|^2 + \left( 2 \frac{C}{SF + N_g} \frac{\bar{E}_b}{N_0} \right)^{-1}} \quad (7)$$

ここで,  $\bar{E}_b/N_0$  は 1 ビットあたりの平均受信信号エネルギー ( $ST_s/2$ ) 対雑音電力スペクトル密度比である. 式 (7) は  $n$  をサブキャリア番号に読み替えれば, MC-CDMA に用いられている MMSE 重みと等しい. 第 1 パスの複素チャネル利得と遅延時間がそれぞれ  $\xi_{m,l}$  と  $\tau_l$  で表されるような  $L$  パスチャネルの場合,  $H_m(k)$  は次式で与えられる.

$$H_m(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{m,l} \exp\left(-j2\pi \frac{\tau_l}{T_c} \frac{n}{SF}\right) \quad (8)$$

本論文では, 簡単のために 1 シンボル時間内では複素チャネル利得は変動しないと仮定している.

## 3. 計算機シミュレーション

### 3.1. シミュレーション条件

シミュレーション諸元を表 1 に示す. 周波数選択性チャネルを形成する各パスはそれぞれが独立なレイリーフェージングに従うものとし, 電力遅延プロファイルは遅延時間がガードインターバル内に様に分布する等電力プロファイルとしている. また, チャネル利得は 1 シンボル時間内では変動しないとしている.

表 1 シミュレーション諸元

変調方式	データ:QPSK 拡散:BPSK	
拡散率 $SF$	256	
マルチコード	拡散符号	Walsh-Hadamard 系列
	コード多重数 $C$	1~256
スクランブル符号	周期 4095 チップの M 系列	
ガードインターバル $T_g$	$32T_c$	
伝搬路モデル	1~32 パスレイリーフェージング*	
FFT サンプル数	256(=SF)	
周波数等化重み係数	MMSE 重み	
受信アンテナ本数 $M$	1~4	
伝搬路推定	理想推定	

### 3.2. シングルコード伝送時の BER 特性

シングルコード伝送時において, DS-CDMA に周波数領域 MMSE 等化を行なったときと理想 Rake 合成を行なったときの BER 特性を図 3 に示す. 両者の信号帯域幅を等しくした. 従って, 周波数領域 MMSE 等化を用いるときの伝送レートは, ガードインターバル挿入により理想 Rake 合成の場合の 8/9 倍となり, さらに 0.5dB の電力損が発生する. 拡散率が十分に大きい場合, パス間干渉の影響はほぼ無視できる. 伝搬路のパス数が多くなるほど周波数伝達関数の変動が大きくなり, 周波数ダイバーシチ効果がより大きくなるため,

両者ともにパス数が多くなるにつれ大きな周波数ダイバーシチ効果が得られるために BER 特性が改善し、AWGN チャネルの特性に近づく。両者の特性の差は前述の電力損に起因するものであり、周波数領域 MMSE 等化の特性は理想 Rake に比べて 0.5dB 劣化している。

### 3.3. マルチコード伝送時の BER 特性

マルチコード伝送時の平均 BER 特性を図 4 に示す。理想 Rake 合成ではコード多重数  $C$  が大きくなるにつれてパス間干渉が増大するので BER フロアが存在している。一方、周波数領域 MMSE 等化を行う場合、ガードインターバル挿入による伝送レートの低下および電力損と引き換えに、周波数ダイバーシチ効果を得つつ符号の直交性を再生できるので、BER 特性が大幅に改善していることがわかる。

### 3.4. MC-CDMA との特性比較

周波数領域 MMSE 等化を用いるマルチコード DS-CDMA とマルチコード MC-CDMA の BER 特性を図 5 に示す。拡散率、ガードインターバル長、伝送レートなどの条件は全て同じである。周波数領域等化を用いる DS-CDMA では MC-CDMA と同等の BER 特性が得られることがわかる。これは、周波数等化 DS-CDMA と MC-CDMA における拡散率が等しいので、DS-CDMA 系と MC-CDMA 系共に同じ周波数ダイバーシチ効果が得られるからである。

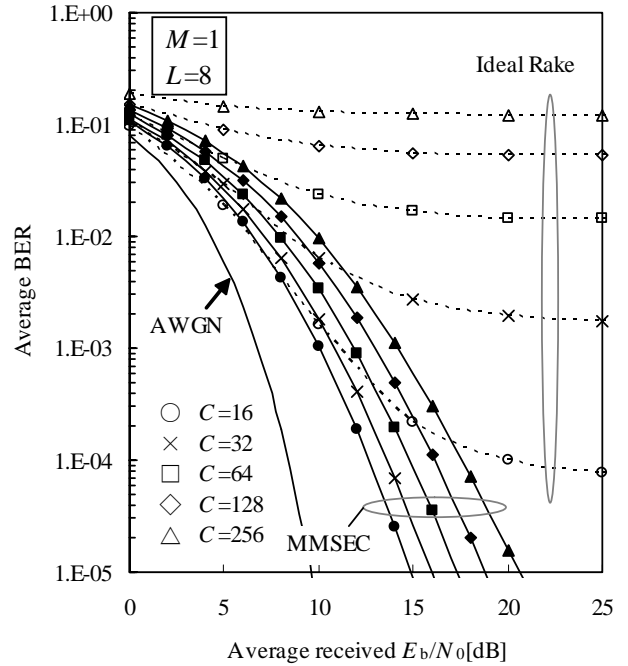


図 4 マルチコード伝送時の伝送特性

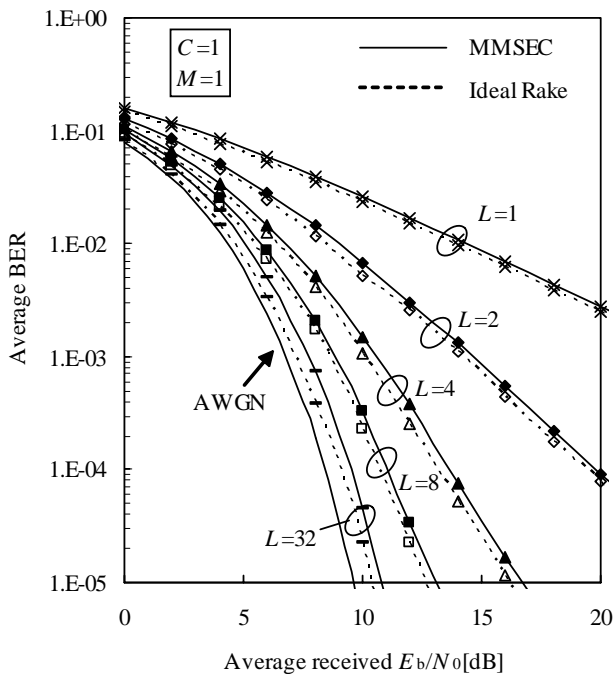


図 3 シングルコード伝送時の平均 BER 特性

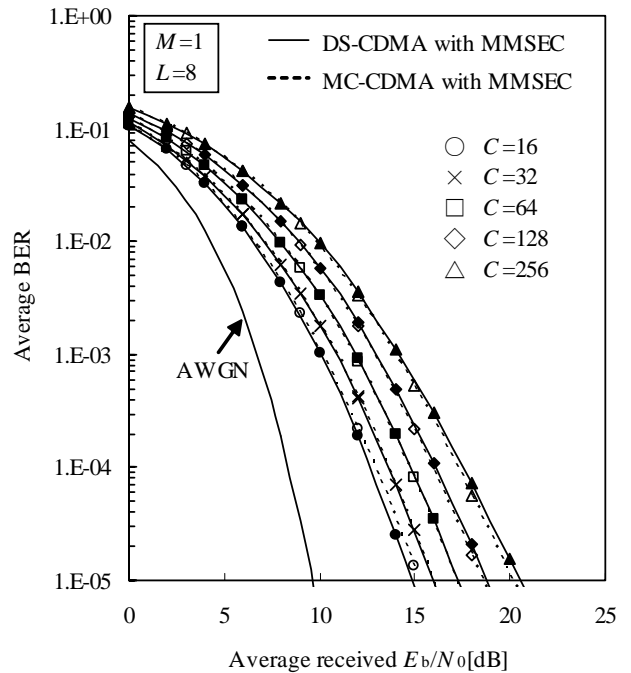


図 5 周波数領域 MMSE 等化を用いる DS-CDMA と MMSEC を用いる MC-CDMA の平均 BER 特性比較

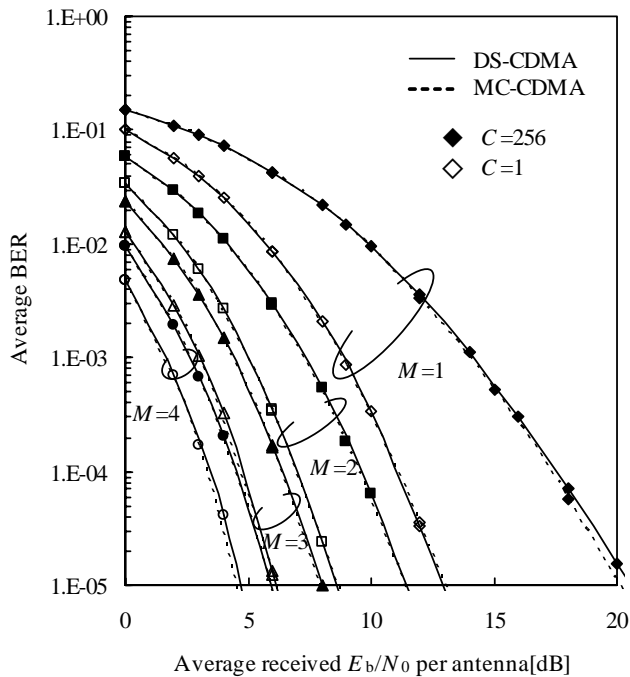


図 6 受信ダイバーシチを行った場合の MMSE 周波数等化 DS-CDMA と MC-CDMA の平均 BER 特性

### 3.5. 受信アンテナダイバーシチとの融合効果

受信アンテナダイバーシチと周波数領域 MMSE 等化を併用したときのマルチコード DS-CDMA の BER 特性を図 6 に示す。アンテナダイバーシチ受信時においても、MC-CDMA と同等の BER 特性が得られることがわかる。アンテナ数を多くするにつれ、より優れた BER 特性が得られ、 $M=4$  では最大 256 個のコード多重して並列伝送を行っても、平均受信  $E_b/N_0=5\text{dB}$  程度で  $\text{BER}=10^{-4}$  を満足できる。

## 4. 結論

周波数領域等化を用いる直交マルチコード DS-CDMA の伝送特性を計算機シミュレーションにより明らかにした。コード多重数が多い場合、ガードインターバル挿入による電力損および伝送効率低下と引き換えに、時間領域 Rake 合成を用いる場合よりも大幅に BER 特性を改善でき、MC-CDMA と同等の BER 特性を得ることができることを示した。受信アンテナダイバーシチと併用すれば、さらに特性を改善できる。

## 文 献

- [1] W. C., Jakes Jr., Ed., *Microwave mobile communications*, Wiley, New York, 1974.
- [2] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for next generation mobile communications systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 36, pp. 56-69, Sept. 1998.
- [3] Adachi, F., Ohno, K., Higashi, A. and Okumura, Y.: "Coherent multicode DS-CDMA mobile radio access," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E79-13, pp. 1316-1325, Sept. 1996.
- [4] S. Hara, and R. Prasad, "Overview of multicarrier

CDMA", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 35, pp.126-144, Dec. 1997.

- [5] T. Sao, and F. Adachi, "Comparative study of various frequency equalization techniques for downlink of a wireless OFDM-CDMA system," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E86-B, pp. 352-364, Jan. 2003.
- [6] D. Falconer, S. L. Ariyavistakul, A. Benyamin-Seeyer, and B. Eidson, "Frequency-domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 40, pp. 58-66, April 2002.
- [7] F. Adachi, T. Sao, and T. Itagaki, "Performance of multicode DS-CDMA using frequency domain equalisation in frequency selective fading channel" *Electronics Letters*, Vol. 39, no.2, p. 239-241, Jan. 2003.
- [8] A. Chouly, A. Brajal, and S. Jourdan, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA system," *Proc. IEEE Globecom'93*, pp. 1723-1728, Nov. 1993.
- [9] 佐尾, 安達, "マルチレート MC-CDMA 信号のダイバーシチ受信についての考察", *信学技報*, RCS2002-204, pp.73-78, 2002 年 11 月