

## 直交マルチコード CDMA システムの相互相関特性に関する一考察

藤原 昭博<sup>†</sup>(学生員)      和田 忠浩<sup>††</sup>(正員)  
 山里 敬也<sup>†††</sup>(正員)      片山 正昭<sup>†</sup>(正員)  
 小川 明<sup>†</sup>(正員)

A Study on Cross-Correlation Property in Orthogonal Multi-Code CDMA Systems

Akihiro FUJIWARA<sup>†</sup>, Student Member, Tadahiro WADA<sup>††</sup>, Takaya YAMAZATO<sup>†††</sup>, Masaaki KATAYAMA<sup>†</sup>, and Akira OGAWA<sup>†</sup>, Members

<sup>†</sup>名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻, 名古屋市 Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

<sup>††</sup>静岡大学工学部電気・電子工学科, 浜松市 Department of Electrical and Electronic Engineering, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, 432-8561 Japan

<sup>†††</sup>名古屋大学大学院工学研究科情報メディア教育センター, 名古屋市 Center for Information Media Studies, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

あらまし 直交マルチコード CDMA システムの送信信号は直交符号の多重によって構成される信号であるため, その干渉の振舞いが通常のシングルコード CDMA システムと大きく異なる. 本研究では, 直交マルチコード CDMA システムの多元接続干渉の影響を正確に評価する手法を述べ, そして, その相互相関特性について検討を行う. 更にビット誤り率によって, 従来のシングルコード CDMA システムとの間の特性比較を行う.

キーワード マルチコード, 相互相関, 多元接続干渉, ビット誤り率

### 1. まえがき

現在, マルチメディアに対応した次世代移動体通信システムの検討が盛んに行われている. そこでは, 音声だけでなくデータや画像などの様々なメディアの要求に応じた情報伝送の提供が必要である. これらの要求を満たす次世代方式の有力候補として, 情報信号のスペクトルを 20 MHz まで拡散する広帯域 CDMA システムが注目を集めている [1].

広帯域 CDMA システムでは, 異なる通信品質や情報伝送速度をもつ音声やデータ, 画像を同じシステムで伝送する方法として, マルチプロセッシングゲイン CDMA システムと直交マルチコード CDMA システムが提案されている [2]~[4]. 本論文では直交マルチ

コード CDMA システムについて検討を行う.

一般に, CDMA システムの特性は他の送信ユーザからの干渉によって制限される. そのため干渉の影響を評価することが必要になってくる. また, 直交マルチコード CDMA システムでは, 送信信号は直交符号の多重によって構成されるため, 干渉の振舞いが従来のシングルコード CDMA システムとは異なっている. 更に, 直交マルチコード CDMA システムの送信信号が大きなエネルギーをもっているときには, 干渉の影響が大きくなる. このように, 他局からの干渉の影響は大きな問題であり, 正確に評価する必要があるが, そのような検討は今のところ見られない.

本論文では, 干渉成分の確率密度分布がガウス分布で近似できないような少数の送信ユーザの場合において, 直交マルチコード CDMA システムの干渉波の振舞いを調べ, その伝送特性への影響を明らかにする. そして, 直交マルチコード CDMA システムにおける干渉をガウス近似とすることなく評価する.

最初に, 直交マルチコード CDMA システムの干渉の影響を求める. 次に, 直交マルチコード CDMA システムのビット誤り率 (BER) 特性を従来のシングルコード CDMA システムの BER 特性と比較する.

### 2. システムモデル

本論文では干渉成分の確率密度分布がガウス分布で近似できない場合として, 送信ユーザが 2 人の場合の直交マルチコード CDMA システムを考える. そのシステムモデルを図 1 に示す.

送信機では, まず, 送信すべき情報ビット系列がシリアル/パラレル (S/P) 変換され,  $M$  本の並列なブランチに出力される. これらのブランチの情報ビット系列は各ブランチに割り当てられる直交符号系列を掛け合わせた後, すべての信号は多重され, PN 符号で拡散される. 最後に, 搬送波が掛けられ, 送信される.  $k$  番目のユーザ (送信ユーザ  $k$ ) が送信する信号  $s_k(t)$  はベースバンドで次のように表される [5].

$$s_k(t) = \sqrt{2P_k} p_{n_k}(t) \sum_{m=0}^{M-1} b_k^m(t) a_k^m(t) \quad (1)$$

ここで,  $b_k^m(t)$  は送信ユーザ  $k$  のブランチ  $m$  におけるデータ信号,  $a_k^m(t)$  はブランチ  $m$  の直交符号,  $p_{n_k}(t)$  は送信ユーザ  $k$  に割り当てられた拡散符号,  $P_k$  は  $k$  番目のユーザの送信電力である. また, ユーザ数を 2 と仮定しているため,  $k$  は  $\{0, 1\}$  の値をとる.

次に受信側の動作について説明する. 本論文では,

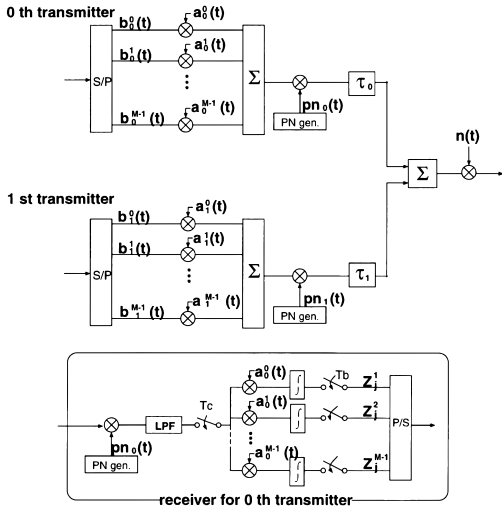


図1 直交マルチコード CDMA システムモデル  
Fig. 1 Orthogonal multi-code CDMA system model.

送信ユーザ 0 からの信号を希望波とし、受信機は送信ユーザ 0 からの信号に対応するものと仮定する。

受信機には、二つの直交マルチコード CDMA 信号に両側スペクトル密度  $N_0/2$  の加法的白色ガウス雑音  $n(t)$  が加わったものが入力される。

この受信機上での受信信号  $r(t)$  は、ベースバンドで以下の式のように表される。

$$r(t) = \sum_{k=0}^1 \sqrt{\frac{P_k}{2}} pn_k(t - \tau_k) \cos \phi_k + \sum_{m=0}^{M-1} b_k^m(t - \tau_k) a_k^m(t - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

ここで  $\tau_k$  は、送信ユーザ 0 の信号に対して送信ユーザ  $k$  の信号が有する遅延差（ただし  $0 \leq \tau_k < T$  で、 $T$  はシンボル継続時間）を表し、また  $\phi_k$  は送信ユーザ 0 からの信号に対して、送信ユーザ  $k$  からの信号が有する位相差を表す。なお、符号同期、搬送波同期が完全であると仮定すると  $\tau_0 = 0, \phi_0 = 0$  とすることができる。

送信ユーザ 0 の信号を復調する受信機のブランチ  $m$  の  $j$  番目のビットに対応する積分出力は、シンボル継続時間が  $T$  であることから、

$$Z_j^m = S_j^m + I_j^m + N_j^m \quad (3)$$

$$S_j^m = \sqrt{\frac{P_0}{2}} b_{0,j}^m T \quad (4)$$

$$I_j^m = \sqrt{\frac{P_1}{2}} \int_{jT}^{(j+1)T} pn_0(t) a_0^m(t) \cos \phi_1 \times \sum_{i=0}^{M-1} b_1^i(t - \tau_1) a_1^i(t - \tau_1) pn_1(t - \tau_1) dt \quad (5)$$

$$N_j^m = \int_{jT}^{(j+1)T} n(t) pn_0(t) a_0^m(t) dt \quad (6)$$

となる。ここで、 $S_j^m, I_j^m$  はそれぞれ希望信号成分、干渉成分である。また雑音成分  $N_j$  は、平均 0、分散

$$\sigma_N^2 = E[N_j^{m2}] = \frac{N_0 T}{4} \quad (7)$$

のガウスランダム変数である。ただし、 $E[\cdot]$  は集合平均を表す。

送信ユーザ 0 と送信ユーザ 1 の信号の相互相関値  $C_j^m$  を、

$$C_j^m = \int_{jT}^{(j+1)T} pn_0(t) a_0^m(t) \sum_{i=0}^{M-1} b_1^i(t - \tau_1) \times a_1^i(t - \tau_1) pn_1(t - \tau_1) dt \quad (8)$$

と定義することで、式 (5) は以下のように示すこともできる。

$$I_j^m = \sqrt{\frac{P_1}{2}} C_j^m \cos \phi_1 \quad (9)$$

なお、シングルコード CDMA システムにおける送信ユーザ 0 と送信ユーザ 1 の信号の相互相関値  $C_j$  は、

$$C_j = \int_{jT}^{(j+1)T} pn_0(t) b_1(t - \tau_1) pn_1(t - \tau_1) dt \quad (10)$$

である。

### 3. 他のユーザからの干渉の影響

従来のシングルコード CDMA システムでは、ランダムアクセスを考えた場合、各送信ユーザの信号の到着するタイミングがすべての送信ユーザで異なっている。直交マルチコード CDMA システムにおいても、異なるユーザから送信された各信号の到着のタイミングはそれぞれ異なっている。しかし、1 人の送信ユーザだけを見た場合、すべてのブランチで信号の到着するタイミングはすべて等しい。そのため、搬送波の位相がすべてのブランチにおいて等しくなり、シングル

コード CDMA システムよりも大きな干渉成分の値が出やすい。

またシングルコード CDMA システムでは、送信される信号は、拡散符号に  $\pm 1$  を掛けただけのものになっているのに対し、直交マルチコード CDMA システムでは、式 (1) より、拡散符号に  $\pm 1$  を掛け、更に直交符号を掛けたものを多重化しているとみなすこともできる。そのため、拡散符号に相互相関特性の良い符号を用いても、その符号に更に直交符号を掛けてしまうので、拡散符号の特性は失われてしまう可能性が大きい。

以上の二つの理由のために、シングルコード CDMA システムと直交マルチコード CDMA システムでは干渉の様子が異なり、その伝送特性への影響も異なると考えられる。

#### 4. ビット誤り率特性

特性評価の方法として、本論文ではビット誤り率特性 (BER) を用いる。

通常、希望ビットに影響を与える干渉ビットは連続した 2 ビットであり、またその情報ビットが (1, 1) の場合と (1, -1) の場合では干渉の様子が異なっている。このことを考慮して、データの組合せをすべて考え、それらを平均化することで結果を求めることとする。

干渉波をガウス近似しないときの BER は、以下の式で表される [7]。

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{(S_j^m + I_j^m)^2}{2\sigma_N^2}} \quad (11)$$

シングルコード CDMA システムの BER も同様に式 (11) で表される。

ここで、すべての送信ユーザの 1 ビット当りの受信信号エネルギーは等しいものとし、 $E_b$  と表記する。 $b_{0,j}^m = +1$  のときの BER は式 (4), (7), (9), (11) より、

$$P_b = E \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \left( 1 + \sum_{m=0}^{M-1} C_j^m \right) \right\} \right] \quad (12)$$

となる。

#### 5. 数 値 例

本章ではまずはじめに、直交マルチコード CDMA システムの相互相関値を求め、その結果から BER 特性を求める。また、シングルコード CDMA システムの BER 特性との比較も行う。なお、数値例で用いる直交マルチコード CDMA システムのブランチ数は 4 とする。

ブランチ数 4 の直交マルチコード CDMA システムを考えた場合、1 人の送信ユーザは同時に 4 ビットの情報を送信する。そのため直交マルチコード CDMA 信号が干渉となる場合、たとえそれが 1 波だとしても、希望信号に 4 ビット分に相当する信号が干渉する。そこで、シングルコード CDMA システムとの比較を公正に行うためには、シングルコード CDMA 信号による干渉波の数を 4 にする必要がある。つまり、一つの直交マルチコード CDMA 信号が直交マルチコード CDMA 信号の一つのブランチに与える干渉の影響と、ランダムアクセスされた 4 波のシングルコード CDMA 信号が一つのシングルコード CDMA 信号に与える干渉の影響を比較する。

BER は各信号の受信信号電力と各々の直交符号系列、拡散符号系列、拡散率、遅延差及びブランチ数に依存する。シングルコード CDMA システムと直交マルチコード CDMA システムの干渉の影響の違いを明らかにするために以下の仮定をする。

- 希望信号と干渉信号の 1 ビット当りの受信信号電力はすべての信号で等しい
- すべての送信ユーザにおいてブランチ数は 4 とし、直交符号系列として符号長 4 のアダマール符号を用いる
- すべての送信ユーザが拡散符号系列として符号長 128 の異なる直交ゴールド符号を用い、最終的に拡散率を 128 にする
- 希望波と干渉波のタイミングずれを、チップ継続時間  $\times 1/16$  の整数倍とし、その確率は、シンボル継続時間内で一様とする。
- 希望波と干渉波の位相差の確率を、0 から  $2\pi$  の間で一様とする。

##### 5.1 干渉波の確率分布

図 2 に、干渉成分となる送信ユーザが 1 人のときの直交マルチコード CDMA システムの相互相関値の確率密度分布を示す。この図において、横軸は式 (8) で与えられる拡散率で規格化した相互相関値であり、縦軸はその確率密度の対数表示である。

更に、シングルコード CDMA システムにおいて、干渉成分となる送信ユーザが 4 人のときの相互相関値の確率密度分布を図 3 に示す。このとき、拡散符号系列として送信ユーザごとに異なる符号長 128 の直交ゴールド符号若しくはランダム符号を用いるものとし、拡散率はすべての送信ユーザで等しく 128 とする。図 3 において、横軸は式 (10) で与えられる拡散率で

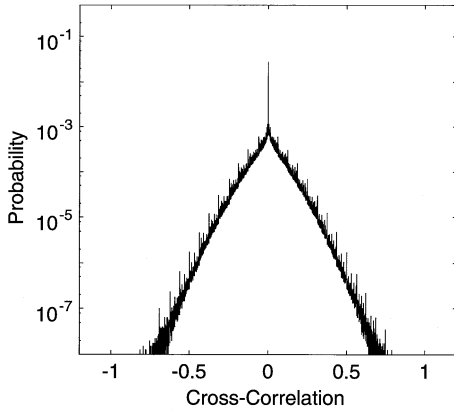


図2 直交マルチコード CDMA システムの相互相関値の確率密度分布  
Fig. 2 The probability function of the cross-correlation of orthogonal multi-code CDMA system.

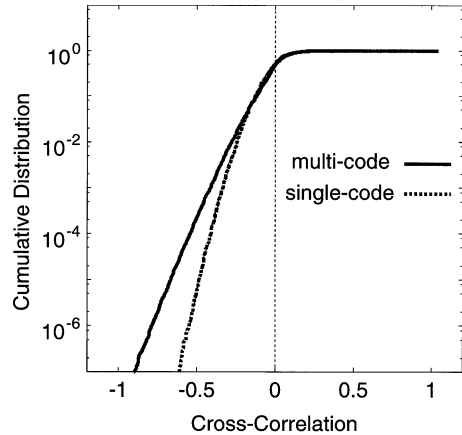


図4 相互相関値の累積分布  
Fig. 4 The cumulative distribution of the cross-correlation.

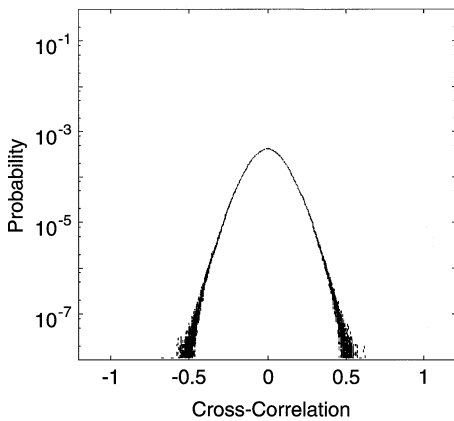


図3 シングルコード CDMA システムの相互相関値の確率密度分布  
Fig. 3 The probability function of the cross-correlation of single-code CDMA system.

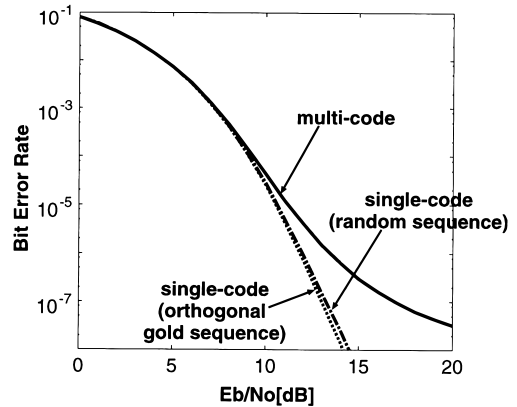


図5 ビット誤り率特性  
Fig. 5 BER performance.

規格化した相互相関値であり、縦軸はその確率密度分布の対数表示である。

図4は、図2、図3で示した相互相関値の確率密度関数の、累積分布を示している。この図において、横軸は拡散率で規格化した相互相関値で、縦軸はその累積分布の対数表示である。図4から、直交マルチコード CDMA システムの方がシングルコード CDMA システムよりも絶対値の大きな相互相関値をとる確率が高いことがわかる。そのため、直交マルチコード CDMA システムの方が BER 特性が悪いことが予想される。

## 5.2 ビット誤り率特性

図5は、式(12)と図2、図3を利用して求めた、直交マルチコード CDMA システムとシングルコード CDMA システムの BER 特性である。横軸は  $E_b/N_0$  で、縦軸は BER である。この図から、直交マルチコード CDMA システムの BER 特性はシングルコード CDMA システムの BER 特性よりも悪いことが示される。

## 6. むすび

本論文では、直交マルチコード CDMA システムにおける干渉の影響をガウス近似を用いずに評価した。また、シングルコード CDMA システムの干渉の影響との比較を行った。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金  
(基盤研究 B: 10450148) によって行われた。

文 献

- [1] 鈴木 博, “移動体通信技術の現状と動向,” 日刊工業新聞社-電子技術, vol.39, no.6, pp.2-6, June 1997.
  - [2] 小川 明, “マルチメディアを指向したワイヤレス伝送技術,” 第 8 回情報伝送信号処理ワークショップ予稿集, pp.49-54, 1995.
  - [3] 小川 明, “マルチメディア時代のワイヤレスコミュニケーション,” 電子情報通信学会東海支部専門講習会(平成 8 年)資料, pp.1.1-1.4.
  - [4] NTT DoCoMo Technical Journal, vol.4, no.3, pp.6-24, Oct. 1996.
  - [5] A. Fujiwara, T. Wada, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, “Evaluation of the interference with small number of users in orthogonal multi-code CDMA systems,” Proc. of WPMC'98, pp.422-427, Nov. 1998.
  - [6] F. Adachi, K. Ohno, A. Higashi, T. Dohi, and Y. Okumura, “Coherent multicode DS-CDMA mobile radio access,” IEICE Trans. Commum., vol.E79-B, no.9, Sept. 1996.
  - [7] 平岩浩之, 片山正昭, 山里敬也, 小川 明, “拡散率の異なる SS 信号の同時伝送における多元接続干渉の影響,” 信学技報, SST97-2, 1997.
  - [8] M.B. Pursley, “Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication — Part I: system analysis,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-25, pp.795-799, Aug. 1977.
  - [9] F. Adachi, “Effects of orthogonal spreading and rake combining on DS-CDMA forward link in mobile radio,” IEICE Trans. Commum., vol.E80-B, no.11, Nov. 1997.  
(平成 11 年 5 月 10 日受付, 10 月 4 日再受付)
-