

## 研究速報

拡張型 Walsh 符号による MC-CDMA の伝送特性改善に関する検討

市川 真己<sup>†</sup>(学生員) 王 巍<sup>†</sup>(学生員)  
岡本 英二<sup>†</sup>(正員) 岩波 保則<sup>†</sup>(正員)

Performance Improvement of MC-CDMA Using Enhanced Walsh Code

Masaki ICHIKAWA<sup>†</sup>, Wei WANG<sup>†</sup>, Student Members,  
Eiji OKAMOTO<sup>†</sup>, and Yasunori IWANAMI<sup>†</sup>, Members

<sup>†</sup>名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻, 名古屋市  
Department of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

あらまし 本論文では, マルチパス通信路においてより高速・高品質な通信を可能とするマルチキャリア CDMA 伝送手法についての検討を行う。拡張型 Walsh 符号を用い相関特性の向上を図ることで遅延波による干渉の影響を低減させ, 1 ユーザに 1 種類のみの拡散符号で多重を行う手法を用いて高速化を図る。

キーワード CDMA, MC-CDMA, 拡散符号, VSF

### 1. まえがき

近年 CDMA (Code Division Multiple Access) 方式は携帯電話に代表されるように広く用いられている。CDMA システムにおける課題としては, サービスの拡大により多量のデータ伝送を要求されていることから, ユーザ数の拡大, 高品質化などが挙げられる。このとき問題となるのは通信路におけるマルチパスフェージングの存在である。マルチパスフェージング通信路においては, 信号伝送速度を上げると遅延波の重畳により受信信号に線形ひずみを生じ, 信号電力対雑音電力比を大きくしてもパースト的な誤りが起こる。またユーザ多重に用いる拡散符号の種類も有限であり, 収容ユーザ数の拡大も容易ではない。

一般にマルチパスフェージング通信路における伝送品質の向上のためには等化が行われる。等化には時間領域と周波数領域の手法があり, 時間領域等化は精度が高いものの多くの計算量を必要とする場合が多い。これに対しサイクリックプレフィックス (CP) を用いる周波数領域等化は線形演算で行えるため, 近年よく用いられている。しかし, 長い遅延波を収容するためには長い CP が必要となり, 伝送効率の低下を招いていた。そのため CP 長の拡大には限界があった。一方, 高速通信実現のためにはシングルキャリアで変調多値数を上げることが考えられるが, 等化性能により

品質が大きく影響されるようになるため, 1 ユーザがマルチキャリア伝送を行い, 高速化を図ることも有効と考えられている。しかし通常 CDMA において並列伝送により高速化を行うと, 1 ユーザに必要な拡散系列数が増えるため, 受信機回路規模の増大などを招いていた。

そこで本論文では, VSF (Variable Spreading factor) の構造 [1] ~ [4] に着目し, Walsh 符号を拡張して高速化と高品質化を両立させる方式を提案する。具体的には 1 ユーザ 1 種類の符号を用いてチップシフトにより多重し, MC-CDMA (Multi-Carrier CDMA) 化 [5], [6] により伝送する。これにより従来の Walsh 符号を用いた CDMA よりも高品質かつ高速化も容易な伝送を, 1 ユーザ当り一つの拡散符号により実現する。

以下では, 提案システム, 用いる拡散符号の説明を行い, 計算機シミュレーションよりその特性を評価する。

### 2. 送受信機モデル

MC-CDMA を用いた多重伝送方式の送信機モデルを図 1 に, 受信機モデルを図 2 に示す [7]。なお本論文では MC/DS-CDMA と表記されるものも含め MC-CDMA と記す。ユーザ数を  $K$  とし, 各ユーザは高速化のためデータを 4 並列に伝送するものとする。ユーザ  $k$  の複素変調シンボルを

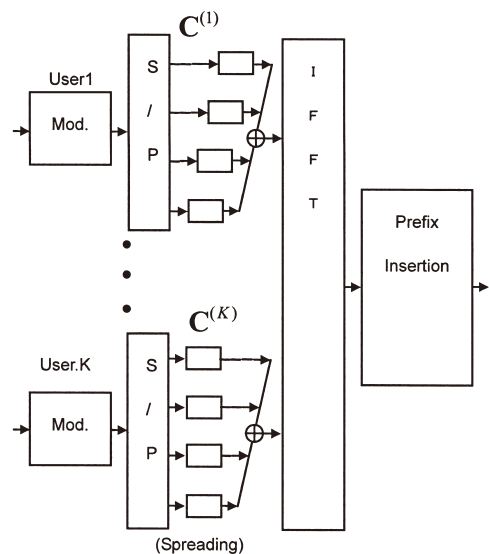


図 1 MC-CDMA を用いた多重伝送方式の送信機システムモデル

Fig. 1 Transmitter model of MC-CDMA adaptive multiple transmissions.

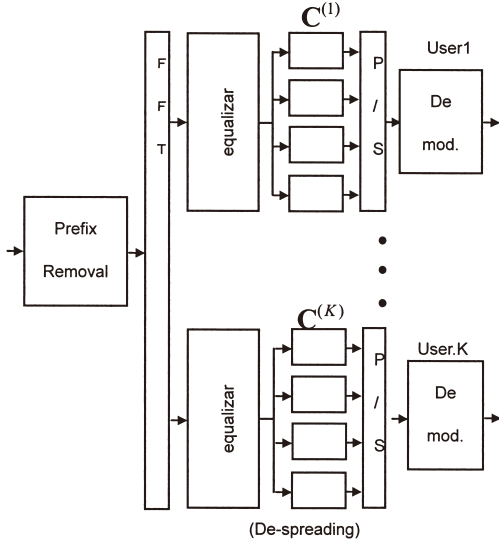


図 2 MC-CDMA を用いた多重伝送方式の受信機システムモデル

Fig.2 Receiver model of MC-CDMA adaptive multiple transmissions.

$$\mathbf{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}, x_4^{(k)}) \quad (1)$$

とすると、各シンボルは S/P (Serial to Parallel) 変換された後、拡散符号

$$\mathbf{C}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, c_3^{(k)}, c_4^{(k)}) \quad (2)$$

により拡散される。ここで  $c_i^{(k)}$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) は

$$c_i^{(k)} = (c_{i,1}^{(k)}, c_{i,2}^{(k)}, \dots, c_{i,a}^{(k)}, \dots, c_{i,N}^{(k)}) \quad (3)$$

なる系列長  $N$  の拡散符号であり、本論文では Walsh 符号系を用いるものとするため、多重数も  $N$  となり、

$K = N$  となる。そして拡散後の多重系列  $\sum_{i=1}^4 x_i^{(k)} c_{i,a}^{(k)}$

をサブバンド成分として IFFT を行い、CP (Cyclic Prefix) を付加して時刻  $n$  における送信シンボル系列

$$\mathbf{S}_n = (s_n(1), \dots, s_n(a), \dots, s_n(N)) \quad (4)$$

$$s_n(a) = (s_{n,1}(a), \dots, s_{n,l}(a), \dots, s_{n,N+G}(a)) \quad (5)$$

$(l = 1, \dots, N + G, a = 1, \dots, N)$

を得る。すなわち、

$$s'_{n,b}(a) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^4 x_i^{(k)} c_{i,a}^{(k)} e^{j \frac{2\pi(k-1)(b-1)}{N}} \quad (6)$$

$(b = 1, \dots, N)$

$$s_{n,l}(a) = \begin{cases} s'_{n,(l+N-G)}(a) & (0 < l \leq G) \\ s'_{n,(l-G)}(a) & (G < l \leq G+N) \end{cases} \quad (7)$$

である。ここで  $l, a$  はともに拡散後のチップ時間を表し、 $G$  は CP 長である。

受信側では、CP 除去後の受信信号を

$$\mathbf{R}_n = (r_n(1), \dots, r_n(a), \dots, r_n(N)) \quad (8)$$

$$r_n(a) = (r_{n,1}(a), \dots, r_{n,l}(a), \dots, r_{n,N}(a)) \quad (9)$$

$(l = 1, \dots, N)$

とすると、まず FFT によりサブバンド成分  $y_{n,k}(a)$  を得る。

$$y_{n,k}(a) = \sum_{b=0}^{N-1} r_{n,b}(a) e^{-j \frac{2\pi b(k-1)}{N}} \quad (a = 1, \dots, N) \quad (10)$$

このシンボルを次のように等化・逆拡散することで、復調シンボル  $\hat{x}_i^{(k)}$  を得る。

$$\hat{x}_i^{(k)} = \sum_{a=1}^N \frac{y_{n,k}(a) \cdot c_{i,a}^{(k)}}{\hat{h}_{n,k}} \quad (11)$$

ここで  $\hat{h}_{n,k}$  は周波数領域における時刻  $n$  に対する各サブチャネル  $k$  のインパルス応答である。

このように 1 ユーザに 4 変調を割り当てているため、通常では 1 ユーザに四つの拡散符号を用意しなければならないが、本論文では

$$c_{i,a}^{(k)} = c_{(i+1) \bmod 4, (a+N/4) \bmod N}^{(k)}, \quad i = 1 \sim 4 \quad (12)$$

なるチップシフトの関係をもつ系列を用いることで 4 変調分の拡散符号を 1 系列で実現することを考える。次章でこの符号について述べる。

### 3. 拡張型 Walsh 符号の構成

チップシフトを用いて 4 変調分の拡散符号を 1 種類の拡散符号から生成するためには必要となる条件が存在する。ここでは拡散符号の周期を 64 チップとし、各変調に与える拡散符号のチップシフト量を 1/4 周期 (16 チップ) とする。ここで 1/4 周期のチップシフトとした理由は各変調の拡散符号の相対的なチップシフト量の関係が 1/4 周期、2/4 周期、3/4 周期及び同期状態の 4 通りのみにするためである。そして、この 1/4 周期、2/4 周期、3/4 周期及び同期状態における自己相関特性が完全直交であることがこのシステムモデルに要求される条件である。

図 3 に既存の符号である Walsh 符号の相関特性を

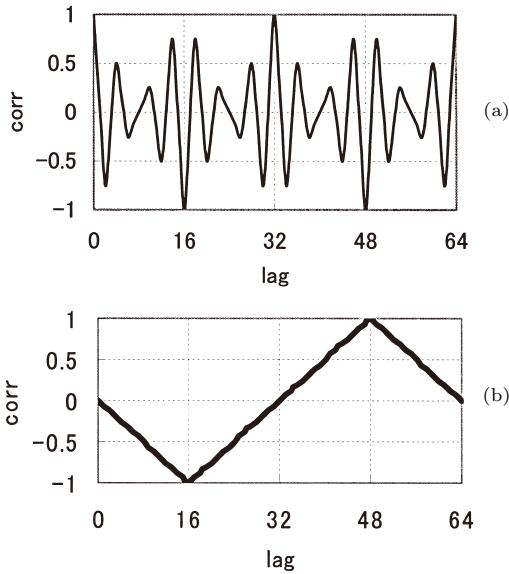


図3 Walsh 符号の相関特性, (a) 自己相関特性, (b) 相互相関特性  
 Fig. 3 Correlation characteristic of Walsh code: (a) auto-correlation, (b) cross-correlation.

示す．図3(a)は26系列目の自己相関特性を, (b)は32系列と48系列目の相互相関特性であり, 横軸がチップシフト量, 縦軸が相関値となっている．図中(a)はチップシフト量 +16, +32, +48 において, (b)は+16, +48 において相関値が0になっていないことが確認できる．したがってこの符号では本方式を適用できないこととなる．

そこで式(13)のような漸化式により生成される拡散符号を提案する．これは VSF-OFCDM (orthogonal frequency and code division multiplexing) に用いられている OVSF (orthogonal VSF) 符号の生成方法の一種であると考えられる．

$$\begin{aligned}
 H(0) &= 1 \\
 H(1) &= \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} H(1) & -H(1) & -H(1) & -H(1) \\ -H(1) & H(1) & -H(1) & -H(1) \\ -H(1) & -H(1) & H(1) & -H(1) \\ -H(1) & -H(1) & -H(1) & H(1) \end{pmatrix} \\
 &\quad \dots
 \end{aligned}$$

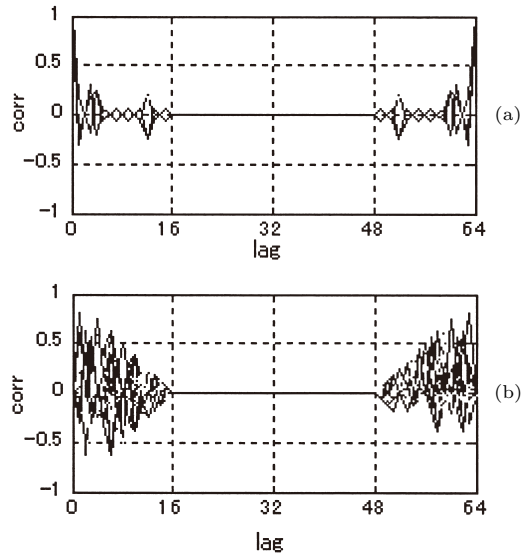


図4 提案符号の相関特性, (a) 自己相関特性, (b) 相互相関特性  
 Fig. 4 Correlation characteristic of proposed code: (a) auto-correlation, (b) cross-correlation.

表1 各種符号の最大相関値  
 Table 1 Maximum correlation value.

拡散符号	自己相関特性	相互相関特性
拡張型 Walsh 符号	0.84	0.81
Walsh 符号	1.00	1.00

$$\begin{aligned}
 &H(m) \\
 &= \begin{pmatrix} H(m-1) & -H(m-1) & -H(m-1) & -H(m-1) \\ -H(m-1) & H(m-1) & -H(m-1) & -H(m-1) \\ -H(m-1) & -H(m-1) & H(m-1) & -H(m-1) \\ -H(m-1) & -H(m-1) & -H(m-1) & H(m-1) \end{pmatrix} \tag{13}
 \end{aligned}$$

この式から生成させる行列の各行が1変調当りの拡散符号となる．なお, この式で生成される拡散符号の特徴として,  $H(1)$  の場合  $4 \times 4$  の行列となるが, 1行目の拡散符号を1チップ右にシフトすると2行目と一致することが分かる．そして, 更にシフトすれば3行目, 4行目とも一致する．この特性は行列を拡張して行った場合にも有効であり, 周期64チップとなる  $64 \times 64$  の行列を用意した場合, 1行目の拡散符号を16チップ右にシフトすると17行目の拡散符号と一致し, それ以降33行目・49行目と一致する．なお, 2行目・18行目・34行目・50行目も同じ関係をもっている．この組合せを1ユーザに割り当てることにより, 一つ

の拡散符号で4変調分の拡散符号を実現することができる。この拡散符号の相関特性を図4に示す。明らかに $+16, +32, +48$ チップ時における相関特性が0になっていることが分かる。なお式(13)により生成される系列は、付録において述べるように1/4周期ごとの離散的なチップシフトにおいての自己相関の直交性のみを保証するが、本例の $m=3$ においては図のように $+16$ から $+48$ までの自己及び相互相関値が0となるため、特に符号間での同期が外れた場合の特性向上が期待できる。

提案した符号とWalsh符号の最大相関値を比較すると表1ようになる。ここで示す数値は、チップずれ $\tau$ が発生している、すなわち $\tau \neq 0$ の相関値の最大値である。比較をすると、自己相関特性も相互相関特性も、提案した符号の方が勝っていることが分かる。そこで提案した符号の性能を計るため、次章にてシミュレーションを用いることによりBER特性の比較を行う。

#### 4. シミュレーション結果

まず、2.で示した並列伝送の有効性を確認するために同伝送速度で並列伝送を行わない場合との比較を行った。並列伝送を行わない場合のシステムモデルを図5及び図6に示す。シミュレーション条件を表2に示す。並列伝送を用いた場合はBPSKを四つ用い、非並列伝送では16QAMを用いることで同一速度の4bit/symで比較を行う。

遅延プロフィールを図7に、シミュレーション結果を図8に示す。結果から並列伝送を用いた方がいずれの $E_b/N_0$ においても良いBER特性をもつことが確認できた。これによりマルチパス通信路において高速通信を行う場合、変調多値数を上げるよりも並列伝送

を行う方が効果的であることが示された。

次に、3.で示した拡散符号の特性を既存の拡散符号と比較するため2.で示した多重伝送方式のシステムを用い、計算機シミュレーションを行った。シミュレーション条件を表3に示す。通信路は等電力3パス準静的通信路とする。拡散符号は提案した符号とWalsh符号を用い、拡散率を64とする。提案した符号はチップシフトを用いて1系列で4変調を実現する。Walsh符号を用いる場合は各ユーザに4系列を与え、ユー

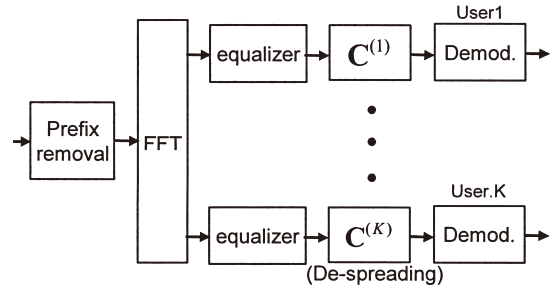


図6 既存のMC-CDMA伝送方式の受信機システムモデル

Fig. 6 Receiver model of conventional MC-CDMA transmissions.

表2 シミュレーション条件  
Table 2 Simulation conditions.

一次変調	BPSK×4(並列伝送) 16QAM(非並列伝送)
使用符号	Walsh符号
ユーザ数	64
通信路	等電力3パス準静的通信路
遅延時間	T/16, T/8
CP長	T/8
サブキャリア数	64
等化手法	周波数領域
通信路情報	既知(カンニング方式)

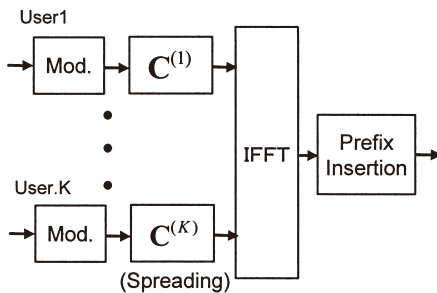


図5 既存のMC-CDMA伝送方式の送信機システムモデル

Fig. 5 Transmitter model of conventional MC-CDMA transmissions.

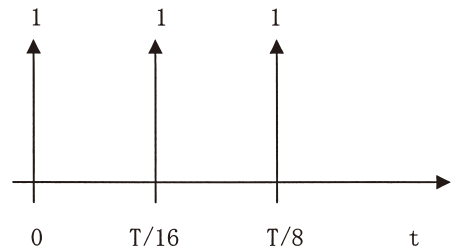


図7 遅延波がガードインターバル内に存在しているときの遅延プロフィール

Fig. 7 Delay profile where delay path is within guard interval period.

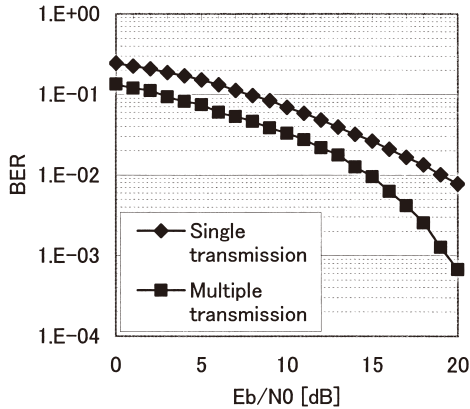


図 8 MC-CDMA 方式の誤り率特性比較

Fig. 8 BER comparison of MC-CDMA transmission schemes.

表 3 シミュレーション条件  
Table 3 Simulation conditions.

一次変調	BPSK
使用符号	拡張型 Walsh 符号 Walsh 符号
ユーザ数	64
通信路	等電力 3パス準静的通信路
遅延時間	T/16, T/8 (CP 内である場合) 3T/16, 3T/8 (CP を越える場合)
CP 長	T/8
サブキャリア数	64
等化手法	周波数領域
通信路情報	既知 (カンニング方式)

ザ 17~32, 33~48, 49~64 は 1~16 と同じ系列を用いる。

まず、CP 内に遅延波が発生した場合について考える。1シンボル長  $T$  に対し、CP の長さを  $T/8$  とし、図 7 のように第 2 波の遅延時間を  $T/16$ 、第 3 波の遅延時間を  $T/8$  とする。図 9 にシミュレーション結果を示す。一般に CP 内に発生した遅延波であれば、遅延波の影響を除去することが可能であるため、どちらの拡散符号を用いた場合でもほぼ同じ特性となる。提案符号は Walsh 符号の拡張であるため、直交性が保たれていることが確認された。

次に CP を超える遅延波の発生が存在する場合を考える。ここでは CP の長さ  $T/8$  に対し、遅延波の遅延時間をそれぞれ  $3T/16$ 、 $3T/8$  とし、CP を超えるような遅延波が発生するものとする。図 10 に遅延プロフィール、図 11 にシミュレーション結果を示す。

CP を超える遅延波が発生している場合、遅延波の

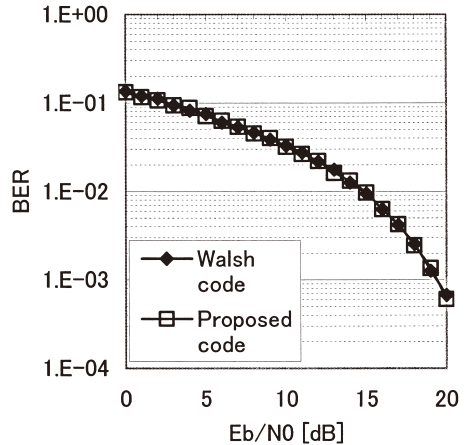


図 9 MC-CDMA 多重伝送方式の遅延波がガードインターバル内に存在しているときの誤り率特性

Fig. 9 BER characteristics of MC-CDMA transmission schemes where delay path is within guard interval period.

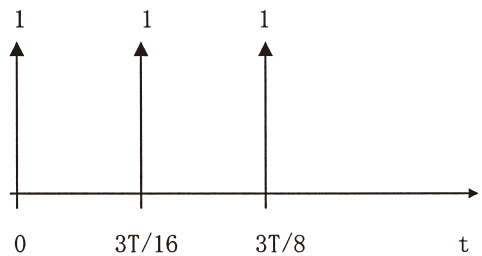


図 10 MC-CDMA 多重伝送方式の遅延波がガードインターバルを超えて存在しているときの遅延プロフィール

Fig. 10 Delay profile of MC-CDMA transmission schemes where delay path is over guard interval.

影響を完全に除去することができないためチャネル間干渉が生じシンボル誤りが発生してしまう。既存の Walsh 符号を用いた場合、BER 特性が大きく劣化し、エラーフロアが  $10^{-2}$  付近の誤り率で生じたのに対して、提案拡散符号を用いた場合は、相関特性の向上により Walsh 符号より BER 特性を改善できたといえる。特に本論文で検討した系列長 64 の場合は図 4、表 1 に示したように、自己相関特性、相互相関特性とも向上していることから、チャネル間干渉を従来よりも大きく低減できていることが分かる。しかも提案符号は 1 ユーザ当たり 1 種類のみでよいため、並列伝送を行いつつユーザ側の所要回路の増加を抑えることができるといえる。

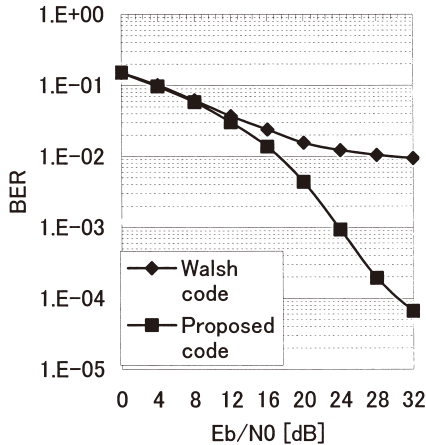


図 11 MC-CDMA 多重伝送方式の遅延波がガードインターバルを超えて存在しているときの誤り率特性  
Fig. 11 BER characteristics of MC-CDMA transmission schemes where delay path is over guard interval.

## 5. むすび

本論文では拡張型 Walsh 符号による MC-CDMA の伝送特性改善について検討した。従来の Walsh 符号に比べ良い相関特性をもった拡散符号を提案し、MC-CDMA を用いた 1 ユーザ当たり 1 種類の拡散符号による多重伝送方式に適用することにより、CP 内での遅延波であれば同等、CP を超える遅延波であれば従来以上の誤り率特性を得ることができた。BER 特性の改善量を増加させるための検討が今後の課題である。

謝辞 本研究は平成 19 年度科学研究費若手研究(B)(17760302)の補助及び財団法人日東学術振興財団の援助を受けて行われた。

## 文 献

- [1] T. Higashino, T. Nakanishi, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "A new spreading code generation method for DS-SS CDMA RoF system and its experimental investigation," Microwave Photonics, 2003. MWP 2003 Proceedings. International Topical Meeting, pp.291–294, 2003.
- [2] B. Long, P. Zhang, and J. Hu, "A generalized QS-CDMA system and the design of new spreading codes," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.47, no.4, pp.1268–1275, Nov. 1998.
- [3] H. Gharavi and S.M. Alamouti, "Multipriority video transmission for third-generation wireless communication systems," Proc. IEEE, vol.87, pp.1751–1763, Oct. 1999.
- [4] F. Adachi, M. Sawahashi, and K. Okawa, "Tree-structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-SS CDMA mobile," Electron. Lett., vol.33, no.1, pp.27–28, 1997.
- [5] S. Abeta, H. Atarashi, M. Sawahashi, and F. Adachi, "Performance of coherent multi-carrier/DS-SS CDMA and MC-CDMA for broadband packet wireless access," IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.3, pp.406–414, March 2001.
- [6] S. Abeta, H. Atarashi, and M. Sawahashi, "Forward link capacity of coherent DS-SS CDMA and MC-CDMA broadband packet wireless access in a multi-cell environment," IEEE VTC2000-Fall, pp.2213–2218, Sept. 2000.
- [7] 市川真己, 岡本英二, 岩波保則, "単一拡散符号による CDMA 適応多重伝送方式に関する研究," 第 28 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2005) 予稿集, vol.2, pp.873–876, Nov. 2005.

## 付 録

式 (13) により生成される拡散符号の自己相関特性式 (13) により生成される行列は  $4^m \times 4^m$  となるが、この各行の系列の自己相関特性を求める。

$m = 1$  のとき

$$H(1) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A-1})$$

の  $p$  行目の系列の自己相関値  $Rxx_p^m(\tau)$  は

$$\begin{aligned} Rxx_1^1(0) &= \frac{1}{4^1} \{1 \times 1 + 3 \times (-1) \times (-1)\} = 1 \\ Rxx_1^1(1) &= \frac{1}{4^1} \{1 \times (-1) + 2 \times (-1) \times (-1) \\ &\quad + (-1) \times 1\} = 0 \\ Rxx_1^1(2) &= \frac{1}{4^1} \{1 \times (-1) + (-1) \times (-1) \\ &\quad + (-1) \times 1 + (-1) \times (-1)\} = 0 \\ Rxx_1^1(3) &= \frac{1}{4^1} \{1 \times (-1) + (-1) \times 1 \\ &\quad + 2 \times (-1) \times (-1)\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

...

$$\begin{aligned} Rxx_4^1(3) &= \frac{1}{4^1} \{(-1) \times 1 + 2 \times (-1) \times (-1) \\ &\quad + 1 \times (-1)\} = 0 \end{aligned}$$

となり、まとめると、

$$Rxx_p^1(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau = 0 \\ 0, & \tau = \frac{1}{4} 4^1, \frac{2}{4} 4^1, \frac{3}{4} 4^1 \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

となる。ここで、 $\tau$  は図 3、図 4 における横軸に相当

するチップずれである .

次に ,  $m > 1$  のときの自己相関値を考える . 式 (A.1) に注目すると ,

$$H(1)_{p,q} = H(1)_{q,p} \quad (\text{A.4})$$

という特徴をもつことが分かる . ただし ,  $H(1)_{p,q}$  は  $H(1)$  の  $p$  行  $q$  列目を表す .  $H(m)$  のときには  $H(m-1)$  を一つの成分とした場合

$$H(m)_{p,q} = H(m)_{q,p} \quad (\text{A.5})$$

になることが分かる . すなわち式 (A.2) において「1」と「-1」を「 $H(m-1)$ 」と「 $-H(m-1)$ 」に書き換えることができる . よって ,  $[H(m-1)H(m-1)]_i$  を  $H(m-1)$  の  $i$  行目の内積とすると ,

$$\begin{aligned} Rxx_1^m(0) &= \frac{1}{4^m} \{ [H(m-1)H(m-1)]_1 \\ &\quad + 3[(-H(m-1))(-H(m-1))]_1 \} \\ &= 1 \end{aligned}$$

...

$$\begin{aligned} Rxx_{4^m}^m(4^{m-1}) &= \frac{1}{4^m} \{ 2[(-H(m-1))H(m-1)]_{4^m} \\ &\quad + 2[(-H(m-1))(-H(m-1))]_{4^m} \} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となり , まとめると ,

$$Rxx_p^m(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau=0 \\ 0, & \tau=\frac{1}{4}4^m, \frac{2}{4}4^m, \frac{3}{4}4^m \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

となる . これにより , 本システムモデルの所要条件である ,  $\tau$  が  $1/4$  周期 ,  $2/4$  周期 ,  $3/4$  周期及び同期状態の自己相関特性の条件を満たしているといえる . なお , 図 4 に示した  $\tau = 16 \sim 48$  において , 自己相関値と相互相関値がすべて 0 になっているという特性は周期が  $64$  ( $m = 3$ ) のときに特有のもので , 任意の  $m$  に対して成り立つとは限らない .

(平成 19 年 4 月 3 日受付 , 8 月 1 日再受付)