

# Joint Multiuser Detection and Decoding in Coded MC-CDMA System

## — A Study on Quasi-Maximum-Likelihood Decoding using Ordered Statistics Algorithm —

Naoya SHIBATA\*, Takayuki SHIMIZU\*, Hisato IWAI\* and Hideichi SASAOKA\*

(Received January 20, 2011)

In multi-carrier code division multiple access (MC-CDMA) systems, delay waves cause inter-code interference and degrade bit error rate (BER) performance as the number of multiplexing users increases. In this paper, we propose a new quasi-maximum likelihood detection which jointly performs multiuser detection and error correction decoding for coded MC-CDMA systems to mitigate the inter-code interference. The proposed method uses codewords generated by the ordered statistics decoding for the quasi-maximum likelihood detection. In the proposed method, we only consider the codewords which have relatively high reliability values, where the reliability values are calculated from received signals, so that we can significantly decrease the number of codewords considered in the quasi-maximum likelihood detection. As the result of numerical simulations, we show that the proposed method exhibits better BER performance than a conventional method.

**Key words :** MC-CDMA, multiuser detection, inter-code interference, quasi-maximum likelihood decoding, ordered statistics decoding

**キーワード :** MC-CDMA, マルチユーザ検出, コード間干渉, 準最尤復号, 順序統計量復号

### 誤り訂正符号化 MC-CDMA における マルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理方式 —順序統計量アルゴリズムを用いた準最尤復号法の検討—

芝田 直也, 清水 崇之, 岩井 誠人, 笹岡 秀一

#### 1. まえがき

移動通信における, 高速・大容量無線アクセス技術として, MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access) 方式がある. この方式は OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式と CDMA (Code Division Multiple Access) 方式の利点を活かした多重アクセス技術である<sup>1-2)</sup>.

MC-CDMA 方式においては周波数領域での拡散

符号に Walsh 符号が一般的に用いられている. その際, 遅延波の影響により, ユーザ間の直交性が崩れ, コード間干渉により BER (Bit Error Rate) 特性が劣化する問題がある. この対策として, 復調時に重み係数を用いて合成する, 直交化合成 (ORC: Orthogonality Restoring Combining) や最小平均二乗誤差合成 (MMSEC: Minimum Mean Square Error Combining) がある. これらの方式により, 多重数が

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

少ない場合にはコード間干渉を抑えることができるが、多重数が増加すると拡散符号間の直交性を保つことはできず、コード間干渉により BER 特性は一般に劣化する<sup>3,4)</sup>。

コード間干渉を低減する技術の一つとしてマルチユーザ検出法があり、BER 特性の最も優れた手法として最尤検出が挙げられる。最尤検出は、他の方式に比べて誤り率を最も小さくすることができるが、総当たりの最尤検出では  $M$  値の変調方式、多重数  $x$  の場合では  $M^x$  通りの系列から最尤の系列を選択する必要がある。このため多重数  $x$  の増加に伴い計算量が指数的に増加するという問題がある。総当たりに検出を行うのではなく、候補数を抑える方法として仮判定データの近傍探索を行うことで送信データ候補を生成し、比較計算する候補数を抑えた準最尤検出方式がある<sup>2)</sup>。準最尤検出方式で効率よく BER 特性を改善するためには効果的に近傍探索を行う必要がある。そこで符号化 MC-CDMA システムに適用する準最尤検出方式の手法としてマルチユーザ検出と誤り訂正復号を一体化して処理を行う方式がある<sup>5)</sup>。この方法では、候補は符号語のみに限定され仮判定データの近傍探索の簡略化が可能となっている。文献 5) の一体化処理方式では、送信語候補生成にテーブル参照復号法<sup>6)</sup>を用いることにより、効率的に準最尤検出を行っている。テーブル参照復号法では復号を行うために各シンδροームに対応した誤り系列のリスト(テーブル)をあらかじめメモリに保存しておき、それと受信系列を比較することで効率化を図っている。しかし、符号長が増加すると誤り系列の個数が増加し、使用するメモリ量が膨大となる問題がある。そこで本研究では、準最尤検出を行う送信語候補生成に、順序統計量復号<sup>7)</sup>の手法を用いる方式を提案する。提案方式ではテーブル参照復号法のように事前にメモリに誤り系列を記録しておく必要がないため、必要なメモリが少なくすむ。また、受信信号から求めた信頼度を用いて候補を生成することで誤り率特性の改善が期待できる。本研究では、この提案方式の有効性を計算機シミュレーションにより評価する。

## 2. 準最尤検出

準最尤検出の有力なものは仮判定データからの近傍探索である。その一例として仮判定データから 1 ビット近傍の全探索 (1 ビット変換) がある<sup>5)</sup>。

Fig. 1 に 1 ビット変換による準最尤検出法の流れを示す。また、本研究では周波数軸方向にデータを拡散し、多重化後 S/P 変換を行い IFFT する処理を MC-CDMA 変調と呼び、受信信号に FFT を行い逆拡散する処理を MC-CDMA 復調と呼ぶことにする。Fig. 2 に本研究で対象とするシステムにおける多重数  $n(n < L)$  となる MC-CDMA 変調を示し、Fig. 3 に MC-CDMA 復調を示す。Fig. 2, Fig. 3 で示す  $c_i = (c_{i,1}, \dots, c_{i,L})$  は周波数領域にデータを拡散する  $L \times L$  の Walsh 符号  $C_w = (c_1, \dots, c_L)$  の系列であり ( $L$ : 拡散率)、Fig. 3 で示す  $\beta_i$  は拡散復調に用いる重み係数である。

1 ビット変換による準最尤検出では、MMSEC による重みづけで復調したデータを仮判定データとし、仮判定データの 1 ビットを順次変化させたもののみを送信データ候補とする。2 値変調で多重数が  $x$  の場合、最尤推定では  $2^x$  通りの送信データ候補を生成するが、このような準最尤検出では候補数は  $x + 1$  個となり、演算量の増加を指数的なものから多重数  $x$  の 1 乗のオーダーに抑えることができる。しかし、多重数が増加し干渉の影響が大きいと誤り個数も増え、単純に仮判定から 1 ビット近傍の候補を選ぶだけでは BER 特性はあまり改善されない。よって、多重数の多いコード間干渉の影響を改善するためには、効果的な近傍探索の方法が求められる。

なお、本研究で適用するマルチユーザ検出は、生成した候補から送信信号レプリカを作り、受信信号とのユークリッド距離比較により行う。ユークリッド距離が最小となる候補を最尤な候補と推定することで受信性能を向上させることができる。また、対象とする MC-CDMA システムは、拡散符号の直交化された複数の系列を 1 ユーザのみが用いて多重伝送を行うものであり、厳密な意味でのマルチユーザ伝送ではない。しかし、この手法は一般的なマルチユーザ検出と同様の処理を行うため、本研究で

は多重データに対して行う検出をマルチユーザ検出と呼ぶことにする。

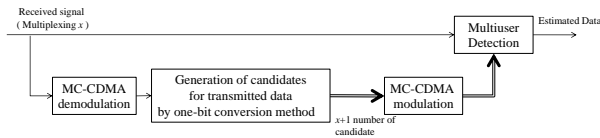


Fig. 1. Quasi-Maximum-Likelihood-Detection using 1-bit conversion method

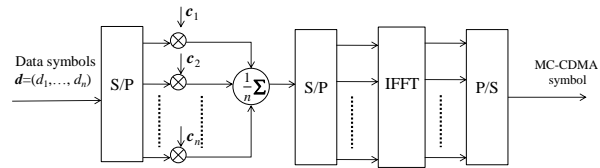


Fig. 2. MC-CDMA modulation

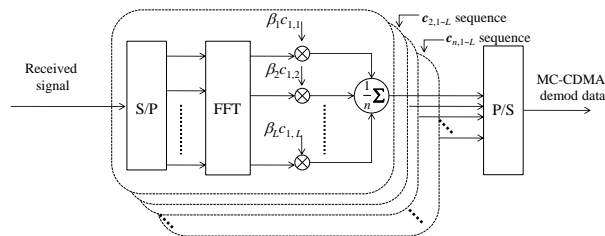


Fig. 3. MC-CDMA demodulation

### 3. マルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理

準最尤検出と誤り訂正復号は互いに独立に処理しても良いが、これらの処理を一体化して処理することで、より BER 特性を改善することができる。この方法では準最尤検出に用いる候補は符号語のみに限定され仮判定データの近傍探索の簡略化が可能となっている。そこで、ここではマルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理を対象とする。

Fig. 4 に符号化 MC-CDMA の送信機構成を示す。Fig. 5 には誤り訂正復号を個別に行う一般的な場合を示し、Fig. 6 にはマルチユーザ検出と一体化して行う場合の受信機構成をそれぞれ示す。符号化 MC-CDMA のデータ送信では、Fig. 4 に示す送信機において  $k$  ビットの送信データ  $\mathbf{d}=(d_1, \dots, d_k)$  は誤り訂正符号化され  $n$  ビット ( $n > k$ ) の  $t$  重誤り訂正符号語  $\mathbf{d}_c=(d_{c1}, \dots, d_{cn})$  となる。符号化後、一次変調されたデータシンボルは  $L \times L$  の Walsh 符号行列  $\mathbf{C}_w$  のうち  $L \times n$  の行列  $\mathbf{C}$  により拡散され多重化される。そして

IFFT 後 P/S 変換され符号化 MC-CDMA シンボルとなる。

Fig. 6 に示すマルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理では、受信機においてマルチユーザ検出を行うレプリカシンボルを作る。受信機で MC-CDMA 復調における FFT 処理の後、S/P 変換した受信信号ベクトルを  $\mathbf{y}=[y_1, \dots, y_L]^T$  とすると以下のように表わせる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_{\text{ch}} \mathbf{C} \mathbf{d}_c^T + \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}_{\text{ch}} = \text{diag}[h_{\text{ch}1}, \dots, h_{\text{ch}L}]$  は  $L \times L$  の伝送路の周波数応答を対角成分に持つ対角行列である。 $\mathbf{n}$  は加法的白色ガウス雑音ベクトルである。レプリカを生成するために、まず受信信号  $\mathbf{y}$  を復調する。これを基に送信されたと考えられる符号語の候補  $\mathbf{d}_c'$  を生成する。生成した複数のレプリカのうち受信信号との二乗ユークリッド距離  $\|\mathbf{y} - \mathbf{H}_{\text{ch}} \mathbf{C} \mathbf{d}_c'^T\|^2$  を最少とする候補  $\mathbf{d}_c'$  が送信された符号語だと推定する。以上の処理より、ユークリッド距離比較を行うマルチユーザ検出によって、誤り訂正された符号語が推定されるので、マルチユーザ検出と誤り訂正復号が一体化して処理されたことになる。このような一体化処理を行うことで、送信データの候補が符号語だけに限定される。また、ユークリッド距離比較により復号語を推定するので、硬判定復号で  $t$  重誤り訂正が可能な符号に適用した場合でも、 $t+1$  以上の誤り訂正が可能となる。

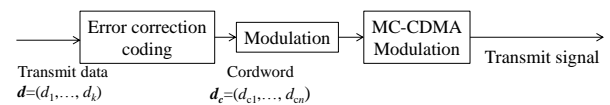


Fig. 4. Coded MC-CDMA transmitter

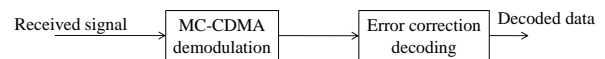


Fig. 5. Coded MC-CDMA receiver (Serial decoding process)

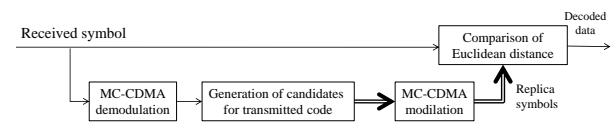


Fig. 6. Coded MC-CDMA receiver (Joint multiuser detection and decoding)

#### 4. テーブル参照による送信符号語候補の生成法

マルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理において、テーブル参照復号<sup>6)</sup>の手法を用いた送信符号語候補の生成法を示す。Fig. 7 にテーブル参照復号法を用いた送信符号語候補生成の流れを示す。テーブル参照復号法では受信機で MC-CDMA 復調した仮判定データの近傍の (ハミング距離の近い) 符号語を送信語候補として生成する。仮判定データからシンδροームを求め、シンδροームを用いてテーブルを参照することで、同じシンδροームが生じる複数の誤りパターンを得ることができる。参照した誤りパターンを硬判定データに付加することで送信符号語候補群が生成される。

この方式で用いるテーブルは、シンδροーム長  $m$  に対して  $2^m$  種類のシンδροームとそのシンδροームに対応する発生確率の高い誤りパターンとの対応表である。ここで誤りパターンとは、受信信号を MC-CDMA 復調後の硬判定系列に対し、誤りビット位置が 1、それ以外のビット位置が 0 で表わされている 2 値系列のことである。テーブル作成にあたり、シンδροームを生成する誤り系列  $\mathbf{e}_0=(e_{01}, e_{02}, \dots, e_{0n})$  の最大ハミング重みを復号半径  $d_b$  とする。テーブル作成は事前に設定したハミング重み  $d_b$  以下の誤り系列のシンδροーム計算をしておき、各シンδροームに対応させてメモリに保存しておく。なお、 $d_b$  の大きさに対応して、誤りパターンの個数が増え、送信符号語候補が増加する。

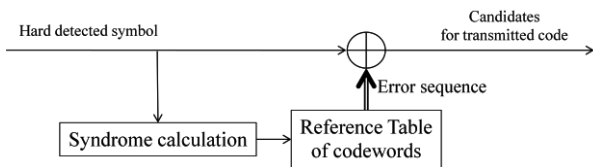


Fig. 7. Generation of candidates by table-aided decoding for the quasi-maximum likelihood detection

#### 5. 順序統計量による送信符号語候補の生成法

前述したテーブル参照復号の手法を用いた送信符号語候補の生成では受信機で誤りパターンのテーブルを保持しておく必要がある。しかし、符号長が増加すると誤り系列の個数が増加し、使用するメ

モリ量が膨大となる問題がある。そこで本研究では、テーブルの保存を必要とせず効果的に候補を生成する手法を提案する。提案方式では、順序統計量復号の手法を用いて送信符号語候補を生成し一体化処理を行う。順序統計量復号では、データの信頼度を考慮し信頼度の低いビットに対して誤り訂正を行う。よって、マルチユーザ検出に使用する符号語は推定精度の高い送信語候補となる。また、データの信頼度には逆拡散復調後の軟判定データから各ビットの LLR(Log Likelihood Ratio)を求め、LLR の絶対値を各ビットの信頼度として用いる。そこで、まず、LLR について述べる。

##### 5.1. 信頼度として用いる LLR

受信機において MC-CDMA の 1 シンボルを復調した  $i$  番目の復調データ  $r_i$  は

$$r_i = g_{ii}d_{ii} + \varepsilon_i + \tau_i \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \sum_{l \neq i}^{K-1} g_{il}d_l$$

と表される。ただし、 $g_{ii}d_i$  は希望信号成分、 $\varepsilon_i$  はコード間干渉成分、 $\tau_i$  はガウス雑音成分であり、平均 0 で分散が  $\sigma_\tau^2$  のガウス確率変数とする。ここで  $g_{il}$  は次式に示す行列  $\mathbf{G}$  の  $(i,l)$  要素である。

$$\mathbf{G} = \mathbf{C}^H \mathbf{W} \mathbf{H}_{ch} \mathbf{C} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{H}$  はエルミート転置を表し、 $\mathbf{W}$  は拡散復調に用いる重み付けである。また、コード間干渉成分  $\varepsilon_i$  は中心極限定理より、近似的に平均 0 で分散が  $\sigma_\varepsilon^2$  のガウス確率変数であるとする。本研究で想定するシステムでは  $\sigma_\varepsilon^2$  と  $\sigma_\tau^2$  はインデックス  $i$  によらず、 $\varepsilon_i$  と  $\tau_i$  は統計的に独立であるとするので、 $d_i$  の条件付きでの  $r_i$  の確率密度関数は以下のように表すことができる。

$$p(r_i | d_i) = \frac{1}{\pi(\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\tau^2)} \exp\left(-\frac{|r_i - g_{ii}d_i|^2}{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\tau^2}\right) \quad (4)$$

ここで、ML 規範に基づく硬判定データ  $\hat{d}_i$  は  $\hat{d}_i = \arg \min_{d_i} \Omega(d_i)$  で表される。このとき  $\Omega(d_i)$  は

次式とする.

$$\Omega(d_i) = |r_i - g_{ii}d_i|^2 \quad (5)$$

なお, MMSEC の線形フィルタを適用する場合  $g_{ii}$  の値はすべて等しくなるので,  $g$  と書き換える.

次に, 2番目に  $\Omega(d_i)$  を小さくするシンボルを  $\tilde{d}_i$  と表し, LLR( $\alpha_i$  と表記する)を以下のように定義する.

$$\alpha_i = \log \frac{p(r_i|d_i=\tilde{d}_i)}{p(r_i|d_i=d_i)} \quad (6)$$

また, 多値変調が BPSK の場合 LLR は, (4)式から共通項となる分母を除去したものと(5)式を用いて次のように表すことができる.

$$\alpha_i = \Omega(\tilde{d}_i) - \Omega(d_i) > 0 \quad (7)$$

ここで  $\alpha_i$  は硬判定  $\hat{d}_i$  の信頼度を示しており,  $\alpha_i$  が大きければ大きいほど, データの信頼度が高いことを意味する<sup>8)</sup>.

次に, QPSK を対象とする. QPSK における信号配置を Fig. 8 に示す. Fig. 8 に示すように逆拡散復調後の  $i$  番目の QPSK 受信データ  $r_i$  の 1 ビット目を  $r_{i,1}$ , 2 ビット目を  $r_{i,2}$  とする. また QPSK 信号配置における 1 ビット目を  $b_1$ , 2 ビット目を  $b_2$  とし,  $(b_1, b_2)$  が  $(0,0)$  を  $S_1$ ,  $(0,1)$  を  $S_2$ ,  $(1,1)$  を  $S_3$ ,  $(1,0)$  を  $S_4$  表した場合, Fig. 8 における  $r_{i,1}$  の LLR を表す  $\alpha_{(r_{i,1})}$  は

$$\begin{aligned} \alpha_{(r_{i,1})} &= \log \frac{p(r_i|b_1=0)}{p(r_i|b_1=1)} = \log \frac{p(r_i|S_1) + p(r_i|S_4)}{p(r_i|S_2) + p(r_i|S_3)} \\ &= \log \frac{\exp\left(-\frac{(r_i - g_{ii}S_1)}{\sigma_e^2 + \sigma_i^2}\right) + \exp\left(-\frac{(r_i - g_{ii}S_4)}{\sigma_e^2 + \sigma_i^2}\right)}{\exp\left(-\frac{(r_i - g_{ii}S_2)}{\sigma_e^2 + \sigma_i^2}\right) + \exp\left(-\frac{(r_i - g_{ii}S_3)}{\sigma_e^2 + \sigma_i^2}\right)} \quad (8) \end{aligned}$$

と表され, 分散を求める必要がある. コード間干渉成分の分散の値は未知であり, 求めることが出来ないため, 分散を求めずに信頼度を用いるために本研究では上式を以下のように簡略化して求めることにする.

$$\alpha_{(r_{i,1})} \cong \log \frac{\max(p(r_i|S_1), p(r_i|S_4))}{\max(p(r_i|S_2), p(r_i|S_3))} \quad (9)$$

上式では, 受信データにおいて実数部, 虚数部に対応する各ビットに対して, 実数部のみの LLR と虚

数部のみの LLR を求めることができる.

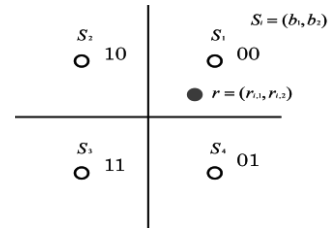


Fig. 8. QPSK constellation diagram

## 5. 2. 順序統計量復号の手順

対象とする符号化 MC-CDMA システムでは, 符号長  $n$ , 情報長  $k$  とする 2 元線形ブロック符号を用い, 検査行列を  $\mathbf{H}$  とする.

### 5. 2. 1. Order-0 の順序統計量復号

受信信号から MMSEC を用いた重みで逆拡散復調した系列  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$  の各ビット  $r_i$  から信頼度として用いる LLR を求め,  $r_i$  の信頼度を  $\alpha_{r_i}$  と表す.  $\alpha_{r_i}$  の値が降順となるよう,  $\mathbf{r}$  を置換する. それによって得られた系列を  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  とする. このとき,  $\mathbf{u}$  の各ビットの信頼度  $\alpha_{u_i}$  に対して次式が成り立つ.

$$\alpha_{u_1} > \alpha_{u_2} > \dots > \alpha_{u_n} \quad (10)$$

この置換を行う関数を  $\lambda_1$  とし,  $\mathbf{u} = \lambda_1[\mathbf{r}]$  のように表記する. また, 誤り訂正符号の検査行列  $\mathbf{H}$  の列に対して同様に置換  $\lambda_1$  を行い, 新たな検査行列  $\mathbf{H}' = \lambda_1[\mathbf{H}] = (\mathbf{h}'_1, \mathbf{h}'_2, \dots, \mathbf{h}'_n)$  を得る. ただし,  $\mathbf{h}'_i$  は  $\mathbf{H}'$  の  $i$  番目の列ベクトルを表す. また,  $\mathbf{h}'_i$  は  $u_i$  の信頼度  $\alpha_{u_i}$  に対応するので, 信頼度  $\alpha_{u_i}$  を  $\mathbf{h}'_i$  に対応する信頼度と呼ぶ.

次に検査行列  $\mathbf{H}'$  に対して, 行操作を行い, 組織符号に対応する標準形にする. このとき,  $\mathbf{H}'$  の信頼度の低い  $n-k$  列が 1 次独立ではないならば, 標準形にできないので,  $\mathbf{H}'$  の列ベクトルから対応する信頼度が低い順に 1 次独立な  $n-k$  列を選び出す. この  $n-k$  列を信頼度が降順になるように列置換したものを新しい検査行列  $\mathbf{H}''$  の後ろの  $n-k$  列とし, 検査行列  $\mathbf{H}'$  の残りの  $k$  列に対しては, 列ベクトルに対応する信頼度が降順になるよう列ベクトルを置換したもの

を新しい検査行列  $\mathbf{H}''$  の始めの  $k$  列とする. 以上の置換を行う関数を  $\lambda_2$  とすると,  $\mathbf{H}'' = \lambda_2[\mathbf{H}'] = \lambda_2[\lambda_1[\mathbf{H}]] = (\mathbf{h}''_1, \mathbf{h}''_2, \dots, \mathbf{h}''_n)$  となる. 同様に,  $\mathbf{u}$  に対しても置換  $\lambda_2$  を行い, それによって得られた新たな系列を  $\mathbf{z} = \lambda_2[\mathbf{u}] = \lambda_2[\lambda_1[\mathbf{r}]] = (z_1, z_2, \dots, z_k, z_{k+1}, \dots, z_n)$  とする. このとき,  $\mathbf{z}$  の各ビットの信頼度に対して次式が成り立つ.

$$\begin{aligned} \alpha_{z_1} > \alpha_{z_2} > \dots > \alpha_{z_k} \\ \alpha_{z_{k+1}} > \alpha_{z_{k+2}} > \dots > \alpha_{z_n} \end{aligned} \quad (11)$$

次に, 得られた  $\mathbf{H}''$  に対して行操作を行い, 組織符号に対応する標準形に検査行列  $\mathbf{H}_1$  を得る. ここで  $\mathbf{H}_1$  は

$$\mathbf{H}_1 = [\mathbf{P} \quad \mathbf{I}_{n-k}] = \begin{bmatrix} p_1 & p_1 & \dots & p_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ p_2 & p_2 & \dots & p_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_k & p_k & \dots & p_k & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる. ただし,  $\mathbf{p}$  は  $k \times k$  の行列,  $\mathbf{I}_{n-k}$  は  $(n-k) \times (n-k)$  の単位行列である.

次に  $\mathbf{z}$  の硬判定値  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  を次式で定義する.

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{for } z_i > 0 \\ 1, & \text{for } z_i \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$\mathbf{a}$  と  $\mathbf{H}_1$  の転置  $\mathbf{H}_1^T$  との積により, シンドローム  $\mathbf{s} = \mathbf{a}\mathbf{H}_1^T = (s_1, s_2, \dots, s_{n-k})$  を得る. 更に,  $\mathbf{a}$  と  $\mathbf{s}$  を用いて符号語  $\mathbf{d}'_{c0}$  を次式により得る.

$$\mathbf{d}'_{c0} = (a_1, a_2, \dots, a_k, a_1 + s_1, a_2 + s_2, \dots, a_n + s_{n-k}) \quad (14)$$

この時,  $\mathbf{H}_1$  は標準形の検査行列であるので, 符号語  $\mathbf{d}'_{c0}$  のシンドロームは  $\mathbf{s}'_0 = \mathbf{d}'_{c0}\mathbf{H}_1^T = \mathbf{0}$  となる, 最後に  $\lambda_1, \lambda_2$  の逆置換  $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}$  を用いて, 復号語  $\mathbf{d}_{c0} = \lambda_1^{-1}[\lambda_2^{-1}\mathbf{d}'_{c0}]$  を得る. このとき,  $\mathbf{d}_{c0}$  のシンドローム  $\mathbf{s}_0 = \mathbf{d}_{c0}\mathbf{H}^T = (s_{01}, s_{02}, \dots, s_{0n-k})$  は  $\mathbf{s}'_0 = \mathbf{0}$  であるので,  $\mathbf{d}'_{c0}$  に対して逆置換  $\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}$  を行ってもシンドロームは変化せず,  $\mathbf{s}_0 = \mathbf{0}$  となる, したがって,  $\mathbf{d}_{c0}$  は符号語であり, 受信系列の中で信頼度の低い  $n-k$  [bit] に対して誤り訂正を行ったものになっている. 以上の処理を順序統計量復号の Order-0 の処理と呼ぶ. <sup>9)</sup>

## 5.2.2. Order- $l$ の順序統計量復号

Order-0 の処理では信頼度の高い  $k$  [bit] の中に誤りが発生している場合, 訂正できないので, 信頼度の高い  $k$  [bit] の範囲からも誤りが発生していると仮定して訂正を行う. このような処理を順序統計量復号の Order- $l$  ( $l > 1$ ) の処理と呼ぶ. Fig. 9 に順序統計量復号を用いた送信語候補生成の流れを示す.

Order- $l$  ( $l > 1$ ) の処理では, 信頼度の高い  $k$  [bit] の範囲に仮の誤り系列  $\mathbf{e}_0 = (e_{01}, e_{02}, \dots, e_{0n})$  を付加する. 仮の誤り系列  $\mathbf{e}_0$  を長さ  $k$  の系列  $\mathbf{e}^k = (e^k_1, e^k_2, \dots, e^k_k)$  を用いて  $\mathbf{e}_0 = (\mathbf{e}^k, \mathbf{0}, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}) = (e^k_1, e^k_2, \dots, e^k_k, 0, 0, \dots, 0)$  とする. 次にシンドローム  $\mathbf{s}_l = (s_{l1}, s_{l2}, \dots, s_{ln-k})$  を  $\mathbf{s}_l = \mathbf{e}_0\mathbf{H}_l^T$  により計算する. 符号語に付加する誤り系列を  $\mathbf{e}_1 = (\mathbf{e}^k, \mathbf{s}_l) = (e^k_1, e^k_2, \dots, e^k_k, s_{l1}, s_{l2}, \dots, s_{ln-k})$  とし, 新たな符号語  $\mathbf{d}'_{cl}$  を  $\mathbf{d}'_{cl} = \mathbf{d}'_{c0} + \mathbf{e}_1$  として生成する. 誤り系列  $\mathbf{e}_1$  を加えたことで信頼度の高い  $k$  [bit] の範囲に仮定した誤りを訂正した符号語  $\mathbf{d}'_{cl}$  となる.  $\mathbf{d}'_{cl}$  を逆置換し  $\mathbf{d}_{cl} = \lambda_1^{-1}[\lambda_2^{-1}[\mathbf{d}'_{cl}]]$  を得る.  $\mathbf{e}^k$  の更新により誤り系列の更新を行っていく. ただし, 誤り系列  $\mathbf{e}^k$  の更新は Table 1 のようになる. 以後同様の復号処理を, 設定した Order 数の  $\mathbf{e}^k$  は

$$\mathbf{e}^k = (\underbrace{1, 1, \dots, 1}_i, 0, 0, \dots, 0) \quad (15)$$

となるまで誤り系列を更新し, 送信符号語候補を生成していく. このような処理を順序統計量復号の Order- $l$  ( $l > 1$ ) の処理と呼ぶ. また,  $\mathbf{e}^k$  のハミング重みが  $i$  ( $i \geq 1$ ) の時の復号処理を, Order- $l$  の復号処理の Phase- $i$  と呼ぶ<sup>9)</sup>.

Table 1. Error sequence

Phase-1	Phase-2	...	Phase- $i$
(0, ..., 0, 0, 0, 1)	(0, ..., 0, 0, 1, 1)	...	(0, ..., 0, 0, 1, 1, 1, ..., 1)
(0, ..., 0, 0, 1, 0)	(0, ..., 0, 1, 0, 1)	...	(0, ..., 0, 1, 0, 1, 1, ..., 1)
(0, ..., 1, 0, 0, 0)	(0, ..., 0, 1, 1, 0)	...	(0, ..., 0, 1, 1, 0, 1, ..., 1)
⋮	⋮	⋮	⋮
(1, 0, 0, 0, ..., 0)	(1, 1, 0, 0, ..., 0)	...	(1, 1, 1, ..., 1, 0, 0, ..., 0)

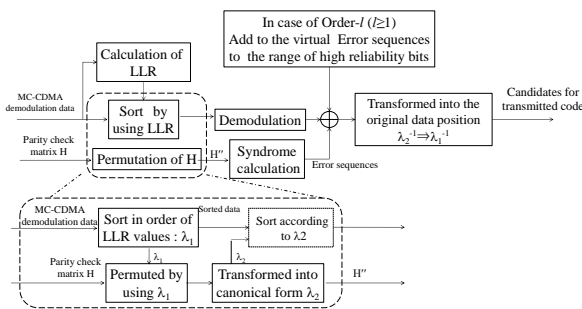


Fig. 9. Generation of candidates by the ordered statistics decoding for the quasi-maximum likelihood detection.

## 6. 計算機シミュレーション

### 6.1. シミュレーションシステム

提案方式の有効性を評価するために計算機シミュレーションを行う。符号化 MC-CDMA のシミュレーションモデルには Fig. 4 の送信機を用い, Fig. 5 の誤り訂正復号を個別に行う受信機のモデルと, Fig. 6 の誤り訂正復号とマルチユーザ検出を一体化処理する受信機のモデルを用いる。

送信機では BCH 符号化を行い PSK 変調されたデータを用いて MC-CDMA 信号を送信する。一体化処理する受信機では, 受信信号から MMSEC を用いた復調データを仮判定データとして復号を行う。この仮判定データを用いてマルチユーザ検出と誤り訂正復号を一体化処理する準最尤復号を行う。一体化処理における送信語候補の生成には, テーブル参照復号, 順序統計量復号の各手法を用いてそれぞれ行う。なお, シミュレーションにおいて, MMSEC の重み付け係数を決定する際に用いる雑音の分散は受信側で既知とする。各方式の  $E_b/N_0$  (情報復調後の 1 ビットあたりの信号対雑音電力比) 対 BER 特性を計算機シミュレーションによって求め, 評価を行った。Table 2 にシミュレーション諸元を示す。なお, 本研究ではコード間干渉の影響に対する効果の有効性を確認するため, AWGN 伝送路では, 遅延波が生じる環境を想定する。直接波と遅延波では位相がランダムに異なるものとする。シミュレーション諸元において, 符号長  $n$ , 情報長  $k$  の BCH 符号を  $BCH(n,k)$  と表す。

また, QPSK 変調を行う場合には奇数ビット  $n$  と

なる 1 符号語に冗長な 1 ビットを加えたデータで多重している。よって多重数は  $(n+1)/2$  となる MC-CDMA 信号を生成している。

Table 2. Simulation parameters

Information modulation	BPSK, QPSK
Coding	BCH(31,21), BCH(15,11)
MC-CDMA	Subcarriers : 32 Spreading factor : 32 Spread code : Walsh code
Channel	AWGN, Rayleigh fading Number of delay wave : 1 Delay time : 1sample DUR : 4 dB
MC-CDMA demodulation	MMSEC
Channel estimation	Pilot symbol

### 6.2. シミュレーション結果

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 18, Fig. 19 には符号化を行わない MC-CDMA システムにおける BER 特性を示している。Fig. 10, Fig. 11 は BPSK 変調, Fig. 10, Fig. 11 は QPSK 変調である。Fig. 10, Fig. 18 では多重数増加に伴うコード間干渉の影響を示す。Fig. 11, Fig. 19 には 1 ビット変換による準最尤検出を行ったときの BER 特性改善効果の図である。符号化 MC-CDMA に各方式を適用した BPSK 変調時の結果を Fig. 12~17 にまとめ, QPSK 変調時の結果を Fig. 20~25 にまとめる。Fig. 12, Fig. 15, Fig. 20, Fig. 23 には Fig. 5 の受信機を用いて誤り訂正復号を個別に行った場合と, 符号化を行わない MC-CDMA の  $E_b/N_0$  対 BER 特性である。Fig. 12, Fig. 20 は AWGN 環境, Fig. 15, Fig. 23 はレイリーフェージング環境での  $E_b/N_0$  対 BER 特性である。

Fig. 13, Fig. 14, Fig. 16, Fig. 17, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 24, Fig. 25 には, 誤り訂正復号を個別に行った場合と, 送信符号語候補をそれぞれテーブル参照復号法と順序統計量復号法を用いて生成した各準最尤復号方式の  $E_b/N_0$  対 BER 特性を示す。Fig. 13, Fig. 14, Fig. 21, Fig. 22 は AWGN 環境における  $E_b/N_0$  対 BER 特性であり, Fig. 16, Fig. 17, Fig. 24, Fig. 25 はレイリーフェージング環境における  $E_b/N_0$  対 BER 特性を示している。また, Table 3 と Table 4 には各準最尤検出法で生成する送信語候補数を示す。

Table 3. The number of candidates for 1-bit conversion method

1-bit conversion method		number of candidates	
		BPSK	Multiplexing + 1
		QPSK	Twice the number of Multiplexing + 1

Table 4. The number of candidates for Joint Multiuser Detection and Decoding methods

			number of candidates	
			BCH (15,11)	BCH (31,21)
Table-aided decoding	$d_D$	3	36	5
		4	120	31~40
		5	309	187~202
Ordered statistics decoding	Order	0	1	1
		1	12	22
		2	67	231
		3	232	1562

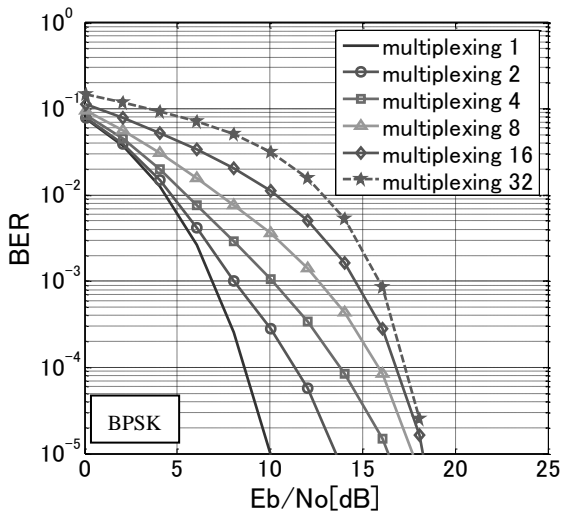


Fig. 10. The influence of inter-code interference for MC-CDMA over AWGN channel

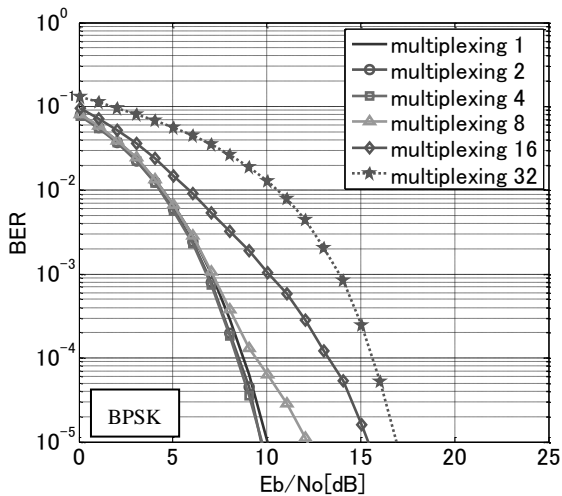


Fig. 11. Performance of BER versus  $E_b/N_0$  in quasi-maximum likelihood estimation using 1-bit conversion method over AWGN channel

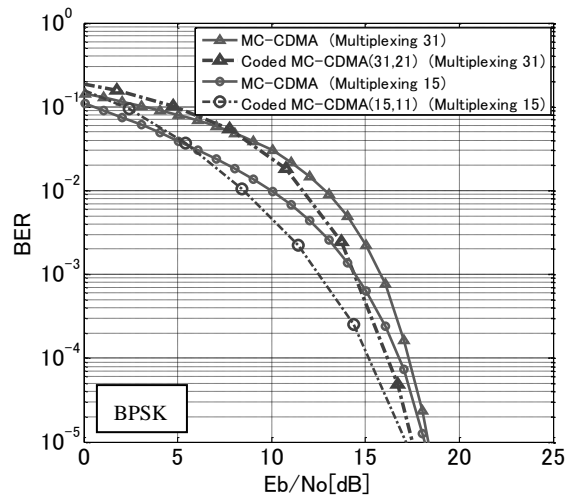


Fig. 12. BER performance of MC-CDMA and coded MC-CDMA in AWGN channel (BPSK)

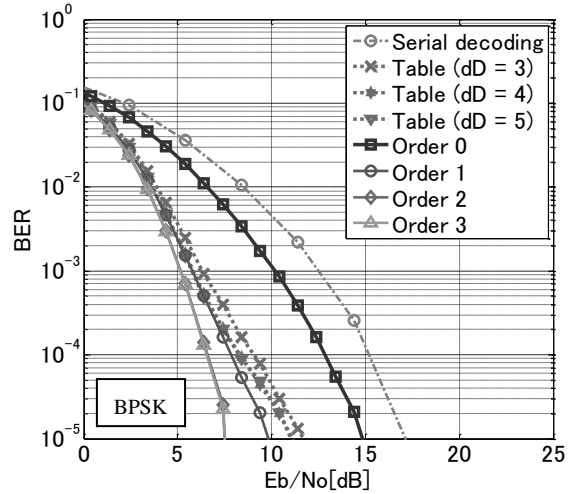


Fig. 13. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in AWGN channel (BPSK BCH( $n,k$ )=(15,11), multiplexing 15)

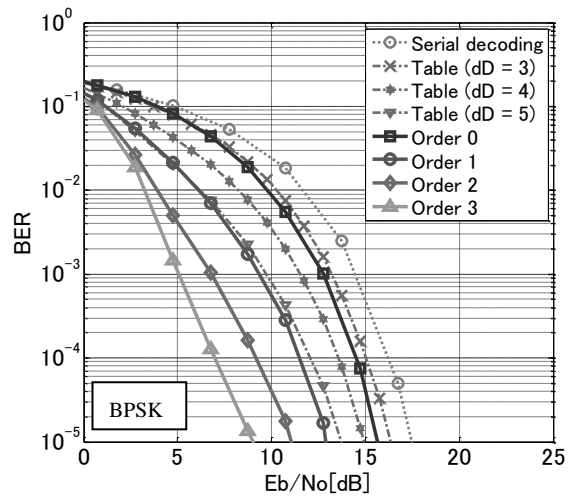


Fig. 14. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in AWGN channel (BPSK, BCH( $n,k$ )=(31,21), multiplexing=31)



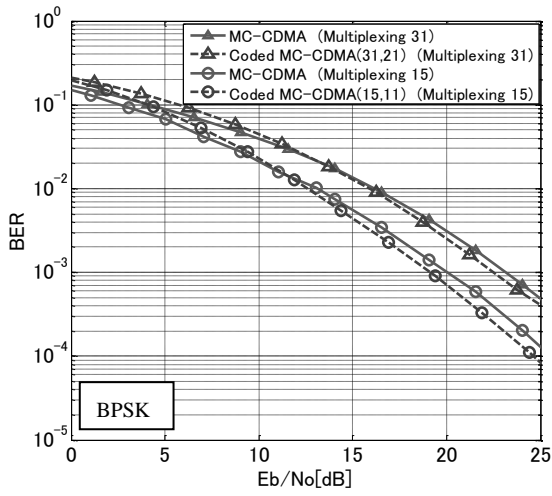


Fig. 15. BER performance of MC-CDMA and coded MC-CDMA in rayleigh fading channel (BPSK)

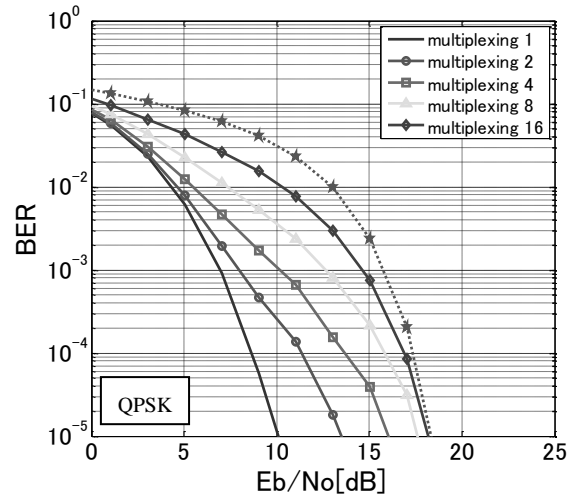


Fig. 18. The influence of inter-code interference for MC-CDMA over AWGN channel

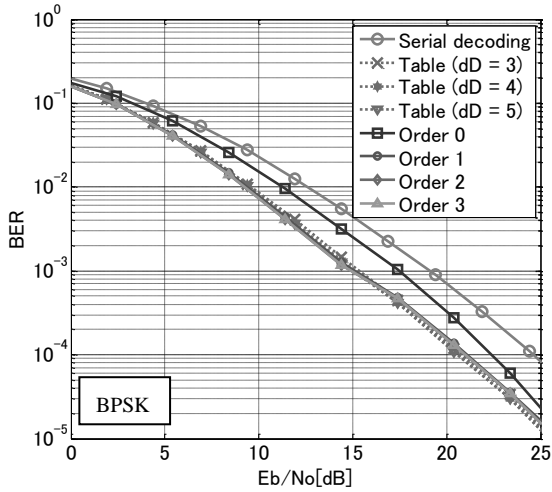


Fig. 16. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in rayleigh fading channel (BPSK BCH(n,k)=(15,11), multiplexing 15)

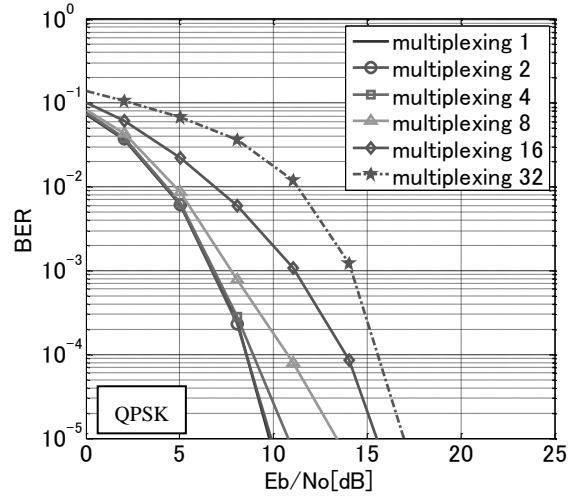


Fig. 19. Performance of BER versus  $E_b/N_0$  in quasi-maximum likelihood estimation using 1-bit conversion method over AWGN channel

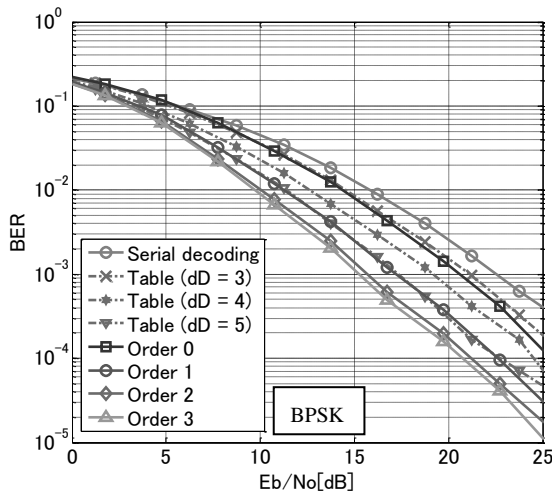


Fig. 17. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in rayleigh fading channel (BPSK, BCH(n,k)=(31,21), multiplexing=31)

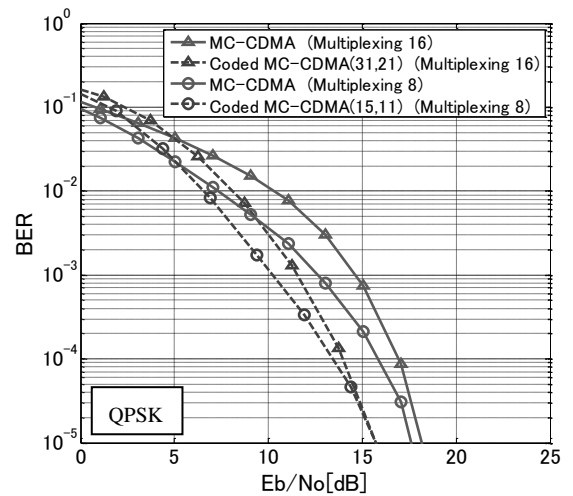


Fig. 20. BER performance of MC-CDMA and coded MC-CDMA in AWGN channel (QPSK)

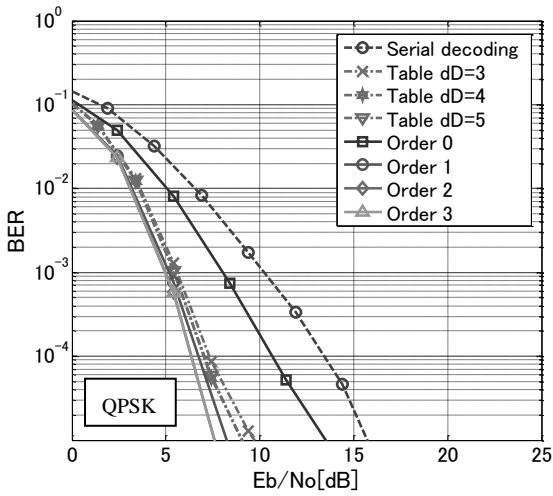


Fig. 21. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in AWGN channel (QPSK BCH( $n,k$ )=(15,11), multiplexing 8)

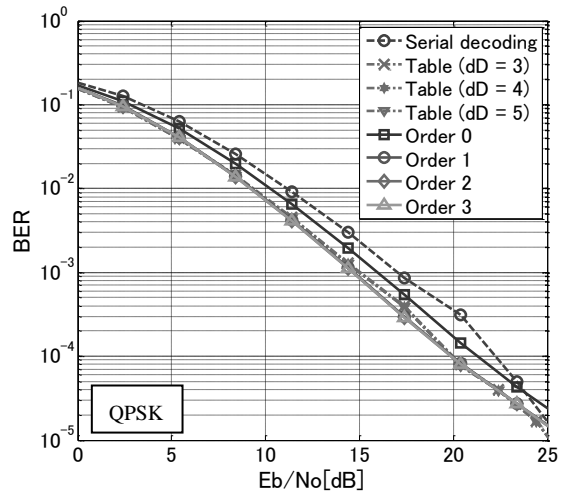


Fig. 24. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in rayleigh fading channel (QPSK BCH( $n,k$ )=(15,11), multiplexing 8)

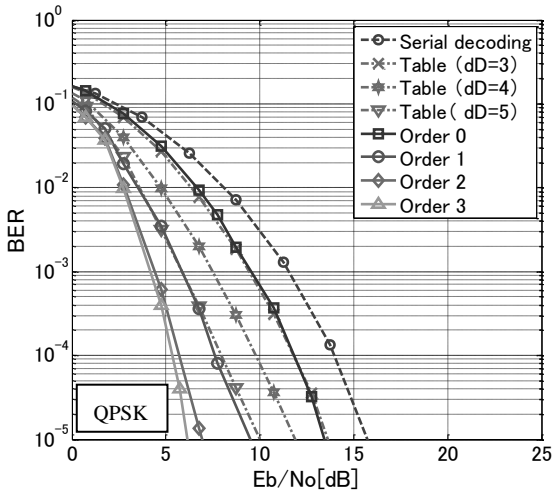


Fig. 22. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in AWGN channel (QPSK BCH( $n,k$ )=(31,21), multiplexing 16)

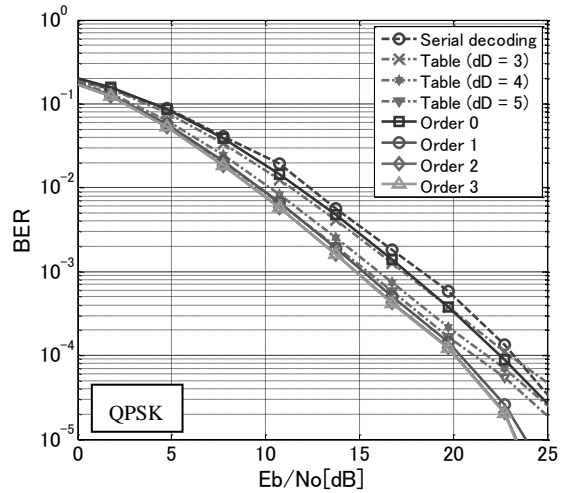


Fig. 25. BER performance of joint multiuser detection and decoding method for coded MC-CDMA in rayleigh fading channel (QPSK BCH( $n,k$ )=(31,21), multiplexing 16)

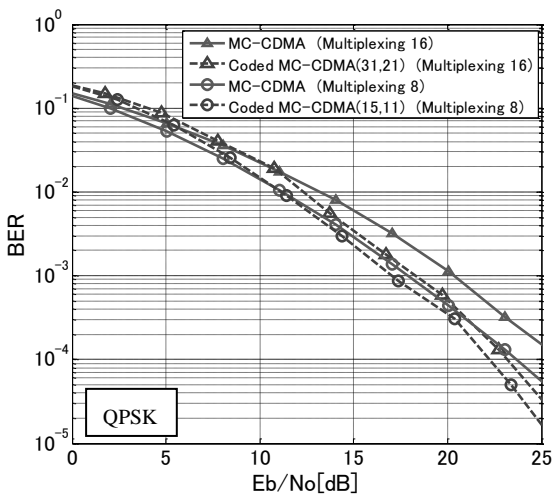


Fig. 23. BER performance of MC-CDMA and coded MC-CDMA in rayleigh fading channel. (QPSK)

Fig. 10, Fig. 11 を比較すると、1 ビット変換による準最尤検出では多重数が 8 までは、コード間干渉の影響をほぼ除去できてきているが、多重数 16 以上の場合は干渉の影響が残り、特性改善の効果は小さくなっている。Fig. 13, Fig. 14 からはマルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理を適用した方が個別に誤り訂正を行うよりも BER 特性を改善できるのが確認でき、マルチユーザ検出と誤り訂正復号の一体化処理が効果であると言える。また、提案方式は最も BER 特性を改善できており、コード間干渉による劣化を抑えるのに既存のテーブル参照復号方式よりも効果的であると言える。

レイリーフェージング環境の結果である Fig. 16 の多重数が 15 の場合には、提案方式の Order-1 以上とテーブル参照復号法の全  $d_D$  の場合と等しい BER 特性が表れている。しかし、多重数 31 の Fig. 17 の場合には提案方式の Order-1 の段階でテーブル参照復号法の  $d_D=5$  と同等の BER 特性が得られている。この同等の特性を得るための候補数を、Table 4 を用いて比較するとテーブル参照復号法の  $d_D=5$  では 187~202 個なのに対し、提案方式の Order-1 では 22 であり、提案方式の信頼度を用いた候補の生成法が効果的だといえる。また、テーブル参照復号法でより特性改善するためにはより多くの候補を保存しておく必要があり、メモリ量問題のため困難である。しかし、提案方式では Order をあげることでさらに BER 特性改善されている。

Fig. 18~Fig. 25 は QPSK 変調の場合であり、BPSK 変調の場合と同様のシミュレーションをそれぞれ行ったものであるが、符号化 MC-CDMA において同じ符号長を用いた場合、BPSK 変調のシミュレーションと比べ多重数は半減したものである。QPSK 変調の結果からも、AWGN 環境とレイリーフェージング環境において、BPSK 変調結果と同様に提案方式が最も BER 特性を改善しているといえる。よって、4.1 節で述べた QPSK 変調時における LLR 計算の簡略化を行っても、提案方式は問題ないことが確認できる。

## 7. まとめ

本研究では、BCH 符号による誤り訂正符号化を適用した MC-CDMA システムにおいて、順序統計量復号を用いて送信符号語候補を生成し、マルチユーザ検出と誤り訂正復号を一体化処理して行う準最尤復号方式を提案した。計算機シミュレーションでは 1 ビット変換による準最尤検出での BER 特性改善を調べ、テーブル参照復号法を用いた準最尤復号方式と提案方式の BER 特性比較を行い評価を行った。テーブル参照復号法を用いた準最尤復号方式は提案方式と同様にマルチユーザ検出と誤り訂正

復号を一体化処理する方式である。シミュレーションによる定量的評価の結果、提案方式が最も BER 特性を改善することが出来た。

テーブル参照復号の手法を用いた方式で、BER 特性をさらに改善するには、送信符号語候補生成に必要とするテーブル保存のメモリ容量が増大し、適用が困難となる。よって、送信語候補数が多くなる符号長が長い場合には、メモリ量問題の起こらない順序統計量復号の手法を用いた提案方式の有効性が高くなると考えられる。

## 参考文献

- 1) S.Hara and R.Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," IEEE Commun. Mag., pp.126-133, (1997-12).
- 2) 松本渉, 落合秀樹, OFDM 変調方式の応用, (トリケップス社, 2001).
- 3) A.Chouly, A.Brajaj, and S.Jourdan, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems," Proc. IEEE GLOBECOM '93, pp.1723-1728, (1999-9).
- 4) S.Hara and R.Prasad, "Design and performance of multicarrier CDMA systems in frequency-selective Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.48, pp.1723-1728, (1999-9).
- 5) 柴田豊信, 清水崇之, 岩井誠人, 笹岡秀一, "MC-CDMA 方式における準最尤推定を用いたマルチユーザ受信方式の研究," 信学技報, RCS2007-156, pp.133-138, (2008-1).
- 6) 南英城, 笹岡秀一, "ブロック符号のテーブル参照による軟判定復号法," 信学論(B), vol.J79-B, no.11, pp.728-737(1996-11).
- 7) M.P.C.Fossorier and S.Lin, "Soft-decision decoding of linear block codes based on ordered statistics," IEEE Trans. Information Theory, vol.41, no.5, pp.1379-1396, (1995-9).
- 8) 守重嘉人, 藤井雅弘, 伊丹誠, 伊藤紘二, "下り回線 MC-CDMA システムにおける尤度規範に基づく M アルゴリズムを用いた逐次検定方式と QRD-M アルゴリズムとの比較," 信学技報, WBS2005-32, pp.1-6, (2005-10).
- 9) 清水崇之, 宝来剣文, 岩井誠人, 笹岡秀一, "順序統計量に基づく軟判定復号法の計算量削減方法," 信学技報, IT2006-113, pp.167-172, (2007-3).