

## F 4 倍直交変調方式における繰り返し復調/復号に関する一検討

滝沢 賢一、佐々木 重信<sup>†</sup>、菊池 久和<sup>†</sup>、村松 正吾<sup>†</sup>

新潟大学大学院自然科学研究科

<sup>†</sup>：新潟大学工学部電気電子工学科

### 1. はじめに

繰り返し復号は Turbo 符号[1]における複数復号器間での復号に限らず、等化器と復号器[2]、復調器と復号器[3]など、さまざまな形で応用されている。そのひとつとして直交変調方式を用いた符号分割多元接続 (Code Division Multiple Access: CDMA) にたたみこみ符号を適用したシステムにおける応用例が報告されている[4]。この報告では受信側に繰り返し復号を実現し、大幅に誤り率特性を改善できること示している。

直交変調方式と同様、倍直交変調方式もまた CDMA に応用することが可能であり、並列組合せスペクトル拡散 (Parallel Combinatorial Spread Spectrum: PC/SS) 通信方式[5]では複数系列を送信することにより高速データ伝送を実現している。そこで本検討では倍直交変調に対する最大事後確率 (Maximum a posteriori: MAP) 復号器を構成し、たたみこみ符号の MAP 復号器と繰り返し復号を行うことによって性能の改善を試みた。AWGN 通信路および位同期が取れるものと仮定したレイリーフェージング通信路における計算機シミュレーションからビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) の評価を行う。

### 2. 倍直交変調とたたみこみ符号を用いた通信システム

システムの送信側モデルを図 1 に示す。送信側では、情報ビット系列  $v$  をたたみこみ符号器 (outer encoder:  $C^o$ ) で通信路符号化し、その後インタリーブを施したのち、倍直交変調 (inner encoder:  $C^i$ ) を行う。倍直交変調では  $K$  ビットを 1 シンボルとして、 $N=2^{K-1}$  個の各直交系列に正負の極性を与えた  $2^K$  通りの系列から 1 つの系列を選択する。よって倍直交変調は符号化率  $K/N$  の  $(N, K)$  組織符号とみなすことができる。



図 1. 送信側モデル

受信側では、倍直交変調に対して最尤復号を行うのがクラシカルな復調方法であるが、今回の検討ではより通信路符号化による効果を拡大するために倍直交復調の MAP 復号器を構成する。倍直交復調とたたみこみ復号の各 MAP 復号器間で繰り返し復号を行うことによって特

性の改善を図る。

### 3. 倍直交変調方式の MAP 復号アルゴリズム

繰り返し復号を行う受信側モデルを図 2 に示す。提案する倍直交復調の MAP 復号アルゴリズムは、文献[4]で示されている直交変調におけるアルゴリズムをもとに構成した。復号を行う際、完全に通信路状態を推定することが可能であると仮定すると、通信路信頼値は  $L_c = 2E_s/N_0$  で与えられる。

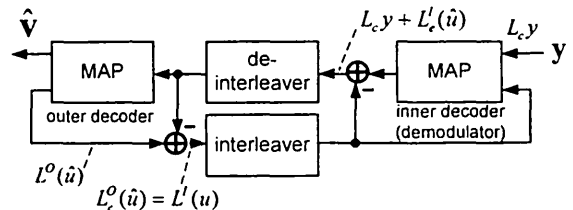


図 2. 受信側モデル

対数尤度比関数を用いると、 $K$  ビットを 1 シンボルとした倍直交変調 (inner code) に対する MAP 復号器の出力は次の式(1)で与えられる[6]。

$$L^i(u_k) = \ln \frac{\sum_{x \in C^i, u_k = +1} P(x|y)}{\sum_{x \in C^i, u_k = -1} P(x|y)}$$

$$= \ln \frac{\sum_{x \in C^i, u_k = +1} \exp\left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} L(x_i; y_i) \cdot x_i\right)}{\sum_{x \in C^i, u_k = -1} \exp\left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} L(x_i; y_i) \cdot x_i\right)} \quad (1)$$

ここで、倍直交変調 (inner code) 符号語 (送信系列) において組織部分を与える次の式(2)を定義する。

$$\text{sys}(k) = \frac{1}{2^{k-1}} N \quad k = 1, 2, \dots, K-1 \quad (2)$$

図 3 に符号語の割り当て方法を示す。図では 1 シンボルのデータが  $K=4$  ビット (符号語長  $N=2^{4-1}=8$ ) の場合について示す。(2)式より符号語の組織部分は符号語 (直交系列) の 8, 4, 2, 1 チップに対応する。割り当てる際には送信データの 1 を +1、0 を -1 として、対応する符号語を送品する。これにより、倍直交変調は組織符号とみなせる。

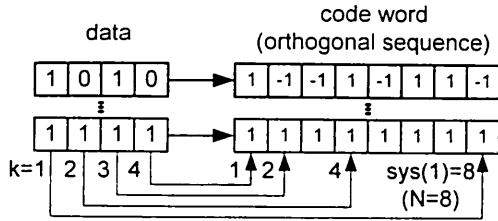


図3. 系列の割り当て方

(1)式における  $L(x_i; y_i)$  は、

$$L(x_i; y_i) = \begin{cases} L_c \cdot y_i + L^l(u_k) & ; \text{for } i = \text{sys}(k); k = 0, \dots, K-1 \\ L_c \cdot y_i; & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

で与えられる。たたみこみ復号における MAP 復号器からの出力は、フィードバックして陪直交変調の MAP 復号器において事前情報  $L^l(u_k)$  として用いられる。

たたみこみ符号 (outer code) の MAP 復号器と、陪直交変調 (inner code) の MAP 復号器における入出力関係を式(4)、(5)に示す。

$$L^l(\hat{u}_k) = L_c \cdot y_k + L^l(u_k) + L_c^l(\hat{u}_k) \quad (4)$$

$$L^o(\hat{u}_k) = L_c \cdot y_k + L^o(u_k) + L_c^o(\hat{u}_k) \quad (5)$$

また、各復号器における入力される事前情報は次のような関係にある。

$$L^l(u_k) = L_c^o(\hat{u}_k) \quad (6)$$

$$L^o(u_k) = L_c^l(\hat{u}_k) \quad (7)$$

#### 4. 計算機シミュレーション

伝送路として AWGN 通信路ならびに位相同期の取れている状態でのレイリーフェージング通信路を想定して計算機シミュレーションを行った。シミュレーション諸元を表1に示す。1シンボルあたりのビット数  $k$  は4[bit]である。たたみこみ符号器としては、再帰的組織たたみこみ (Recursive Systematic Convolutional: RSC) 符号器を用いた。非組織たたみこみ符号器と比較して低  $E_b/N_0$  において誤り率特性がよいという利点がある[1]。

表1. シミュレーション諸元

直交系列	アダマール行列 (8×8 行列) を利用
たたみこみ符号器	RSC 符号 [101,111], 符号化率 1/2
インターリーブ	ランダムインターリーブ (320 ビット)

BER 特性のシミュレーション結果を図4に示す。繰り返し復号回数を0回 (no iteration)、4回 (4 iterations) を表示している。符号化を行わない場合 (uncoded) と

比較して、BER  $10^{-3}$  を得るために必要な  $E_b/N_0$  において、AWGN 通信路では4回の繰り返し復号で3dB以上の利得が得られた。また、レイリーフェージング通信路では通信路符号化を行わない uncoded と比較して、BER  $10^{-3}$  を得るために必要な  $E_b/N_0$  において4回の繰り返し復号で6dB以上の利得が得られた。

#### 5. まとめ

陪直交変調の復調を MAP 復号器で構成し、たたみこみ符号の MAP 復号器との間で繰り返し復号を行った。その結果、AWGN 通信路およびレイリーフェージング通信路のいずれにおいても、符号化を行わない場合と比較してビット誤り率の改善が見られた。

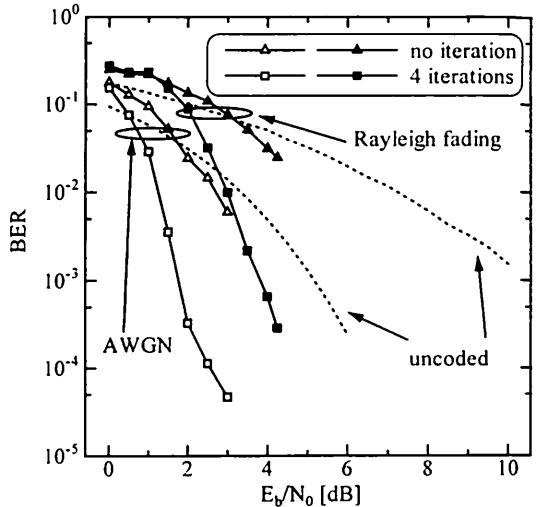


図4. ビット誤り率特性

#### (参考文献)

- [1] C. Berrou et al., "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-44, no. 10, Oct. 1996.
- [2] C. Douillard et al., "iterative correction of intersymbol interference: Turbo-equalization," *European Trans. on Telecommunications*, vol. 6, no. 5, Sep.-Oct. 1995.
- [3] S. Brink et al., "Iterative demapping for QPSK modulation," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 15, July 1998.
- [4] R. Herzog et al., "Iterative Decoding and Despreading improves CDMA-Systems using M-ary Orthogonal Modulation and FEC," *Proc. of ICC*, Montreal, Canada, pp. 909-913, June 1997.
- [5] S. Sasaki et al., "Multiple Access Performance of Parallel Combinatory Spread Spectrum Communication Systems in Nonfading and Rayleigh Fading Channels," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E78-B, no. 8, Aug 1995.
- [6] J. Hagenauer et al., "Iterative decoding of binary block and convolutional codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-42, no. 2, mar. 1996.