

短 報

# レイリーフェーディング通信路におけるブロック符号化 8相 PSK 方式の BER 特性

—— チェイス復号法第1アルゴリズムに関する一検討 ——

格 和 勝 利

川崎医療福祉大学 医療技術学部 医療情報学科

(平成5年6月16日受理)

## Bit Error Rate Performance of a Block Coded 8PSK Modulation Scheme in Rayleigh Fading Channel

—— A Study of the Chase Decoding Method First Algorithm ——

Katsutoshi KAKUWA

*Department of Medical Informatics  
Faculty of Medical Professions  
Kawasaki University of Medical Welfare  
Kurashiki, 701-01, Japan  
(Accepted Jun. 16, 1993)*

**Key words :** chase decoding method, BCH coding, 8PSK,  
rayleigh fading channel, BER

### 要 約

本報告は、ブロック符号と8相PSKを組み合わせた符号化多値変調方式に対して、多値レベルでチェイス復号(第1アルゴリズム)した場合のビット誤り率特性を、1つのBCH符号を例にとり計算機シミュレーションによって求め、最尤復号および硬判定復号した場合と比較検討を行っている。

### 緒 言

誤り訂正符号(FEC: Forward Error Collection code)と多値変調方式を組み合わせた符号化多値変調方式<sup>1),2)</sup>は、周波数利用効率を下げることなく伝送特性を改善することができる有効な通信方式であるが、移動体通信路においては、フェーディングが存在しているために受信電界

強度レベルが著しく落ち込み、伝送特性が劣化する。よってFECを判定復号する際には、復号信頼度の観点より何らかの軟判定復号をする必要がある。

しかし、一般的にFECとしてブロック符号を使用する場合、装置化が容易である反面、代数的復号を行うため軟判定復号が困難とされている。特に最尤復号(MLSE: Maximum Likeli-

hood Sequence Estimation decoding) を行う場合には、符号長のごとく短い符号を除けば、判定に要する処理量とそれによる処理時間が非常に大きく実用的ではない。従って、現実的な処理量でブロック符号を軟判定復号するアルゴリズムが必要とされている<sup>(3)</sup>。

一方チェイス復号法<sup>(4)</sup>は、チャネルの信頼度情報を使い、硬判定器を繰り返し使いながら、最も確からしい符号語に到達させ復号するものであり、現実的な復号法の一つである。しかし、2 値伝送における特性評価はいくつかなされているが、多値伝送における検討はあまりなされていない。

本報告では、BCH 符号 (Bose Chaudhuri Hocquenghen code) と 8 相位相変調 (8 相 PSK: 8 Phase Shift Keying) を組み合わせた符号化多値変調方式を構成している。さらに、本方式をレイリーフェーディング通信路に適用し、多値レベルでチェイス復号した場合の BER (Bit Error Rate) 特性解析の第一歩として、1 つの BCH 符号を例にとり、第 1 アルゴリズムで復号した場合の BER 特性を、計算機シミュレーションによって求め、硬判定復号および MLSE 復号と比較検討を行っている。

### 通信システム

図 1 に評価の対象とした通信システムをブロック図で示す。通信システムは、送信機 (Transmitter)、レイリーフェーディング通信路 (Rayleigh fading channel)、受信機

(Receiver) より構成されている。送信機では、 $k$  ビットのバイナリ入力データブロック  $b^{(i)}$  が符号語テーブル (Codebook) によって全長  $n$  ビットの符号語系列  $s^{(i)}$  に変換される。 $b^{(i)}$  を次式で定義する。

$$b^{(i)} = [b_{k-1}^{(i)}, b_k^{(i)}, \dots, b_0^{(i)}]^T; i=0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

但し、 $M=2^k$  は、符号語の総数を表す。また、 $b_j^{(i)} \in \{0, 1\}$  は次式を満たしている。

$$\sum_{j=0}^{k-1} 2^j b_j^{(i)} = i \quad (2)$$

さらに、 $s^{(i)}$  は次式で定義できる  $n$  次元複素ベクトルである。

$$s^{(i)} = [s_1^{(i)}, s_2^{(i)}, \dots, s_n^{(i)}]^T \quad (3)$$

符号語系列は、8 相 PSK 変調 (3 digit/symbol) され通信路に送出される。ここで、1 符号語送出に要する 8 相 PSK のシンボル数は、

$$m = \frac{n + \delta}{3} \quad (4)$$

となる。但し、 $\delta$  (0~2) は、処理の都合上、符号長を 3 の整数倍に調節するためのダミービットである。 $s^{(i)}$  をシンボルごとの  $m$  次元複素ベクトルで次式のように再定義する。

$$s^{(i)'} = [s_1^{(i)'}, s_2^{(i)'}, \dots, s_m^{(i)'}]^T \quad (5)$$

$s^{(i)'}$  は、レイリーフェーディング通信路を伝搬し、受信機で受信される。このとき、各シンボルは、複素振幅変動および相加性白色ガウス雑音によりひずみを受けている。

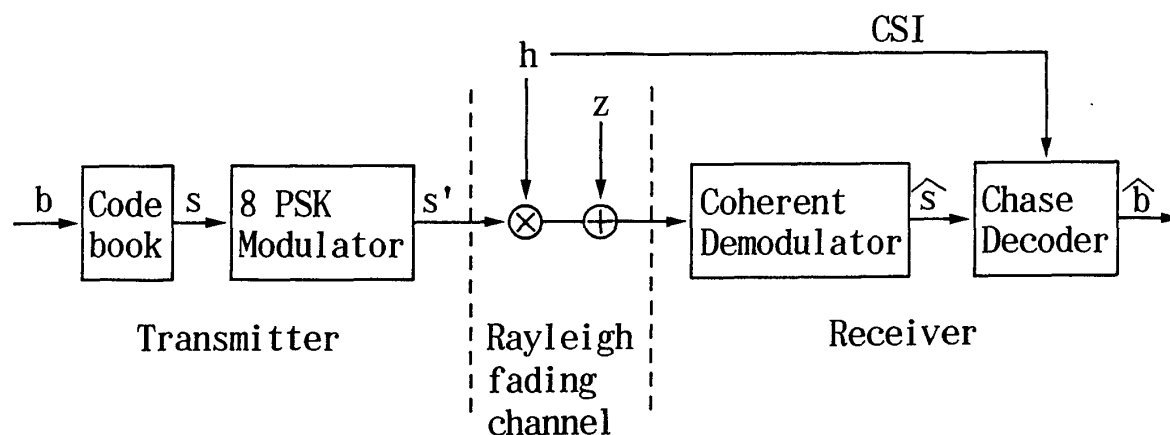


図 1 ブロック符号化 8 相 PSK 通信システム

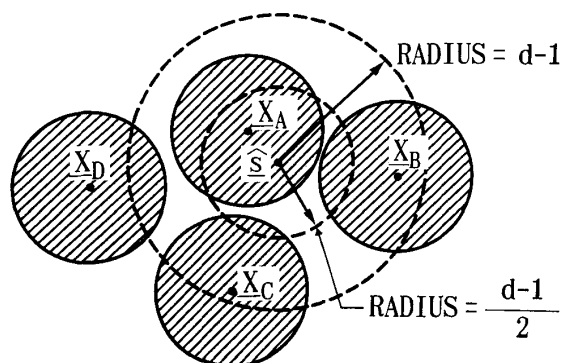


図 2 符号語空間図

$m$ 次元ベクトル  $h$  を次式で定義する.

$$h = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T \quad (6)$$

$j$  番目の受信シンボル  $r_j$  は次式で表せる.

$$r_j = h_j s_j^{(i)} + z_j \quad (7)$$

ここで,  $h$  は  $r$  が受けた複素振幅で,  $z$  は複素ガウス雑音である. また,  $h$  は通信路の信頼度情報 (CSI: Channel State Information) でもある.

受信機では同期検波がほどこされる. さらに受信波の位相角を求めると次式のように表せる.

$$\phi_j + \tan^{-1} \frac{z_{yi}}{h_j + z_{xj}} \quad (8)$$

この式で第 2 項は位相雑音である. この位相雑音は, 同期 PSK のシンボル誤りを生起するものであるが, 変調位相  $\phi$  に無関係に, 入力信号の振幅  $h_j$  と相加雑音の低周波成分  $z_j$  ( $z_{xj}, z_{yj}$ ) のみによって定まることがわかる. 次に, この位相角が 8 相 PSK のビットマップに対応され 3 digit のデジタル信号を得る. 送信シンボルを  $m$  回受信することにより, 次式に示す符号語が再構成される.

$$\hat{s}^{(i)} = [\hat{s}_1^{(i)}, \hat{s}_2^{(i)}, \dots, \hat{s}_m^{(i)}]^T \quad (9)$$

さらに, この符号語はチェイス復号器に入力され訂正を受け,  $k$  ビットのバイナリ出力データブロック  $b^{(i)}$  (式(10)) を得る.

$$\hat{b}^{(i)} = [\hat{b}_{k-1}^{(i)}, \dots, \hat{b}_1^{(i)}, \hat{b}_0^{(i)}]^T \quad (10)$$

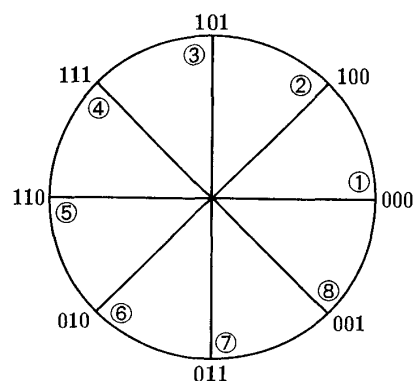


図 3 8 相 PSK ビットマップ

隣接シンボルが 1 ビットずつ相違している Gray 配置

### チェイス復号法

説明の容易さより, 符号語空間図を図 2 に示す. この図で  $X_A, X_B, X_C, X_D$  の各符号語は, 各々半径  $(d-1)/2$  の復号領域を持っている. ここで  $d$  は, 符号語間の最小ハミング距離を表し, 符号の持つ訂正能力を  $t$  ビットとしたとき,

$$d = 2t + 1 \quad (11)$$

と定義されている. すなわち,  $(d-1)/2$  は  $t$  に等しい. 硬判定復号では, 受信符号語  $\hat{s}$  を復号領域に持つ  $X_A$  が復号器より出力されるが, チェイス復号の第 1 アルゴリズムでは,  $\hat{s}$  より  $d-1$  ( $=2t$ ) を半径とする領域に含まれるテスト符号語系列を生成し, 硬判定器を繰り返し使い, これらを復号領域に持つ符号語 ( $X_A, X_B, X_C, X_D$ ) が送信符号語の候補としてバッファに蓄積される. ここで, テスト符号語系列は CSI に基づいて信頼度の低い順に  $\hat{s}$  のシンボルパターンを消去し, 新たなシンボルパターンを挿入することにより得られる. これにより, 2 値伝送では, 最大で 2 倍の誤り訂正が可能となる.

8 相 PSK で 1 符号語を 3 digit ずつ分割し伝送した場合は, 1 つの PSK シンボルの消去と挿入により, 最大でハミング距離 3 の変動となる. よって, 対象とするシンボル数を  $e$  とすると,

$$e = \left\lceil \frac{d-1}{3} \right\rceil \quad (12)$$

となる。ここで記号「 $x$ 」は、 $x$ 以上の最小の整数を表す。挿入するシンボルパターンは、図3に示す8相PSKビットマップの全要素である。

最終的送信符号語の判定は、最尤系列推定器によりバッファに蓄積された候補 $T^{(l)}$ と $r$ との間で行う。判定変数

$$d^{(l)} = \sum_{j=1}^m |T_j^{(l)} - r_j|^2 \quad (13)$$

を全ての候補について求める。そして、これらの判定変数のうち、最小値をとる $d^{(l)} = d^{(im)}$ に対応する送信符号語 $T^{(im)}$ が送信されたと判定しデータブロックが出力される。

#### シミュレーション諸元

計算機シミュレーションに使用した符号は、 $n=15$ ,  $k=5$ ,  $t=3$ ,  $M=32$ のBCH(15, 5)符号である。これを8相PSKで5シンボルに

分割し伝送しているため、周波数利用効率は1 bit/symbolであり、非符号化BPSK(Binary Phase Shift Keying)のそれに等しい。

なお、図1には記入していないが、シンボルインタリーブは十分深く、同一符号語内の隣接シンボルのフェーディング相関は、完全無相関を仮定している。さらに、受信機におけるタイミングおよび位相同期は完全にとれていると仮定し、符号間干渉は無視できるものとする。

シミュレーションは、使用する符号語が $t=3$ であるため、式(12)により $e=2$ 、すなわちCSIの最小と次に小さい受信シンボルパターンを消去し8相PSKのビットパターンを挿入してテスト符号語系列を生成する。さらに、これより送信符号語の候補 $T^{(l)}$ のセレクトに要する硬判定器の繰り返し使用回数は、 $8^2=64$ 回である。

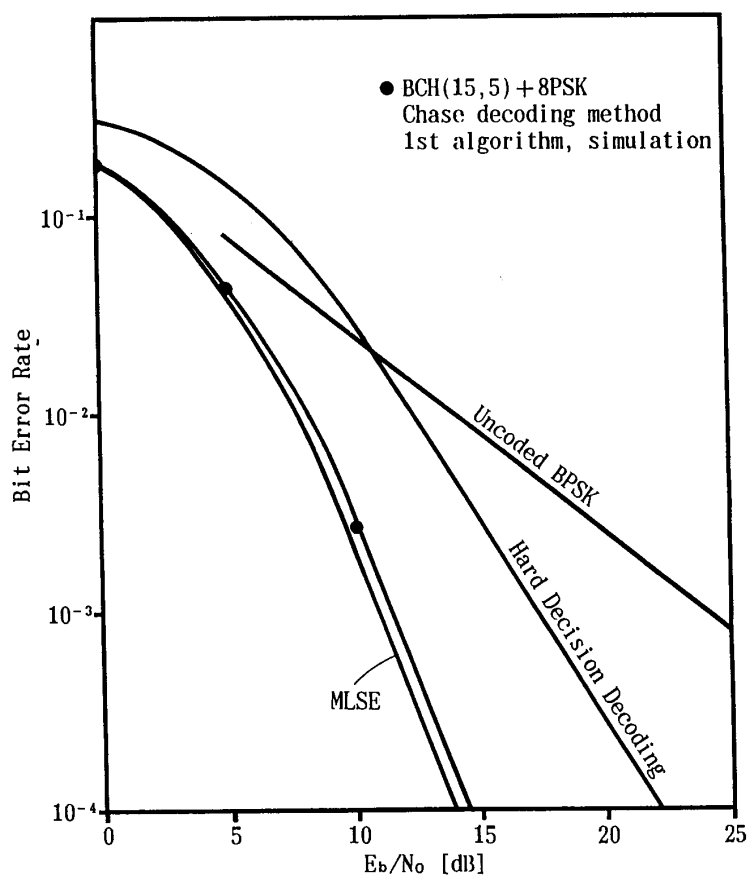


図4 BER 特性

## BER 特性

図 4 に計算機シミュレーションによって求めた、チェイス復号した場合の BER 特性を示す。縦軸は BER, 横軸は 1 ビット当たりの信号対雑音電力密度比  $E_b/N_0$  である。比較のために、非符号化 BPSK と、同じ符号を硬判定復号および MLSE 復号した場合の BER 特性が記入してある。

結果として、まず非符号化 BPSK に対して大きく BER 特性が改善されているのがわかる。さらに、 $BER=10^{-4}$ において、硬判定復号に対して 7.8 dB の利得が得られた。MLSE 復号に対しては、僅か 0.5 dB の劣化であり、注目すべき結果である。

以上より、BCH (15, 5) 符号 1 つの結果ではあるが、チェイス復号法は多値レベルの場合でも、ブロック符号の軟判定復号アルゴリズム

としては非常に有効な方法であることがうかがえる。

## む す び

本報告では、レイリーフェーディング通信路におけるブロック符号化 8 相 PSK 方式の BER 特性を BCH (15, 5) 符号を例にとり、計算機シミュレーションによって求めた。このとき、現実的な処理量で軟判定復号するアルゴリズムとして、多値レベルにおけるチェイス復号法(第 1 アルゴリズム)を採用した。その結果、チェイス復号法は有効な復号法であることがうかがえ、MLSE に対して  $BER=10^{-4}$ において 0.5 dB の劣化で済ませることができた。

今後の課題としては、チェイス復号法の第 2, 3 アルゴリズムについての検討と、符号長の長いその他の符号の場合について BER 特性を解析することなどがある。

## 文 献

- 1) 笠原正雄 (1989) 符号化変調方式〔II〕— デジタル変調方式と誤り訂正符号の統合 —. 電子情報通信学会誌, **72**, 2, 217—226.
- 2) Ungerboeck G (1987) Channel coding with multi-level/phase signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, **IT-28**, 1, 55—67.
- 3) 松本 正, 吉田 進 (1990) 移動通信における誤り制御方式. 電子情報通信学会論文誌(A), **J73-A**, 2, 232—236.
- 4) Chase D (1972) A class of algorithms for decoding block codes with channel measurement informatin. *IEEE Transaction on Information Theory*, **IT-18**, 1, 170—182.