

# 移動体通信における Reed-Solomon 符号化

## 16値スター QAM 方式の誤り率特性

小 西 憲 一・宮 垣 嘉 也

岡山理科大学工学部情報工学科

(1995年9月30日 受理)

### 1. ま え が き

陸上移動体通信においては、送受信機間の電波伝搬路は見通しが得られることはほとんどなく、地形、地物からの反射、回折、散乱によってマルチパス伝搬路となる。この場合、移動局の走行に伴って受信波の振幅と位相はランダムに変動することになる。これはマルチパスフェージングと呼ばれ、伝送品質を大きく劣化させる要因となる。フェージングに対する対抗策としては、ダイバーシチ技術と誤り訂正符号化技術が最有力である。誤り訂正符号 (FEC) はダイバーシチ受信のように複数の受信系を用いることなく大きなフェージング改善効果が得られるため、バースト誤りをランダム化するインタリービングと組み合わせられて用いられるが、伝送帯域幅が拡大することからスペクトル利用効率が低下するという欠点を有する。誤り訂正符号化と多値変調方式を一体化した符号化多値変調方式はこの問題を解決し、スペクトル利用効率を低下させることなく SN 比特性を改善できる。Ungerboeck は畳み込み符号とデジタル変調とを統合したトレリス符号化変調 (TCM) 方式<sup>(1)</sup>を提案し、誤り訂正符号とデジタル変調との一体化によってユークリッド距離の増大をはかるといふ研究の端緒を与えた。畳み込み符号と多相 PSK あるいは多値 QAM とを一体化した TCM 方式は、Viterbi 復号法という強力な最尤復号法の存在によって、主に帯域制限のある白色ガウス雑音 (AWGN) チャンネルや衛星通信などの非線形チャンネルにおける研究が展開されてきた。また最近では、符号化多値変調方式を移動体通信に適用しようという研究も活発化してきている<sup>(2)-(6)</sup>。移動体通信においては、周波数の有効利用とともに、小型化や電力制限の観点から装置化の簡易さも重要な要素であり、その意味で、複雑な信号処理が必要な TCM 方式ではなく、ブロック符号とデジタル変調を一体化したブロック符号化多値変調 (BCM) 方式の適用を検討することは価値がある<sup>(7)</sup>。

本論文では、移動体通信におけるスペクトル利用効率の一層の向上をめざして、符号化に非 2 元 BCH 符号である Reed-Solomon (RS) 符号を用い、遅延検波が可能な多値変調である 16 値スター QAM 方式に適用した、RS 符号化 16 値スター QAM 方式の誤り率特性をコンピュータシミュレーションにより与える。

## 2. 16値スター-QAM 方式<sup>(8)-(13)</sup>

16値 QAM 方式といえば固定回線で用いられている格子型信号点配置の QAM を想起するが、ここで用いる16値 QAM 方式は図1(a)に示すように、スター状に信号点を配置した16値 QAM 方式である。図1には格子型マッピング ((b)図) とスターマッピング ((a)図) の2種類の16値 QAM の信号点配置が示されている。図1からわかるように、16値スター QAM の信号点配置は基本的には二重リングの8相 PSK の信号点配置である。

通常の格子型マッピングの16値 QAM は同期検波が必要であり、移動体通信においてはフェージングによる振幅と位相の激しい変動を厳密に補償する必要がある。パイロットトーンを入れる方式、パイロットシンボルを情報系列内に挿入する方式<sup>(14)</sup>等の補償法が研究されているが、当然、それらは回路の複雑さを増し、コスト増にもなる。16値スター QAM 方式は差動振幅変調/差動位相変調をすることで、受信機ではシンプルな遅延検波が適用でき、移動体通信に適する。格子型マッピングの16値 QAM も差動符号化ができないわけではないが、かなり複雑になり、雑音にも弱くなる。

16値スター QAM の差動符号化は次のように行う。4ビット/シンボルのうち、1ビットで搬送波を差動振幅変調 (2 DASK) する。すなわち、そのビットが1なら内側のリングから外側のリングへ、あるいは、外側のリングから内側のリングへと振幅が変化し、0なら振幅変化なしとする。残り3ビットは差動 Gray マッピングで8相差動 PSK 変調 (8 DPSK) する。すなわち、例えば、000なら現シンボル位相は前シンボルと同位相、001なら現シンボル位相は前シンボルに対し $45^\circ$ 、011なら $90^\circ$ 進む、などである。検波は位相同期の不要な遅延検波で、1シンボル前の受信信号との相対振幅及び相対位相を検出することで行う。

ところで、16値スター QAM の信号点配置で、内側リングと外側リングの振幅比には誤

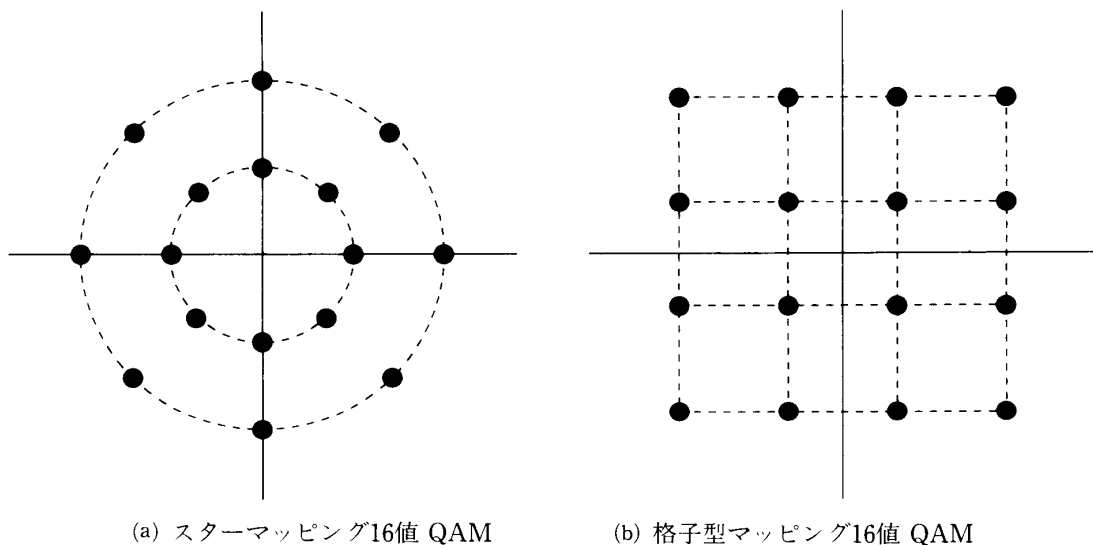


図1 16値 QAM の信号点配置図

り率最小の意味で最適値が存在し、AWGN チャネルでの同期検波の場合、1 : 1.8程度<sup>(13)</sup>と報告されている。遅延検波の場合に同様の検討をした結果、最適値として 1 : 2 程度が得られたので、本論文のシミュレーションでは振幅比を 1 : 2 として行った。

### 3. レイリーフェージングチャネルでの RS 符号化16値スター QAM システム

図2に解析の対象にした RS 符号化多値 QAM システムのブロック図を示す。2 値データは 1 シンボル =  $m$  ビットの並列データに変換された後、有限体  $GF(2^m)$  上で定義される  $RS(n, k)$  符号に符号化される。但し、 $n$  は符号長、 $k$  は情報シンボル数である。ブロック符号を RS 符号としたのは、この符号が同一の最小距離を持つ線形符号の中で検査点数が最小で、Singleton の限界式で等号を満たす最大距離分離 (MDS) 符号であること、ブロックの長さや多値数を多値 QAM に整合させることが容易であること等による。実際、本シミュレーションでは、RS の 1 シンボルサイズと QAM の多値数は等しい。すなわち、 $m = 4$  とし、長さ  $2^4 - 1 = 15$  の RS 符号を 16 値の QAM に適用している。ワード内の隣接シンボル間でフェージング相関が無相関になるように理想的な (理論的に無限大の深さの) ブロックインターリービングをした後、RS 符号の符号語で差動的に 16 値スター QAM 変調される。ここで、16 値スター QAM 信号の信号点への割当は Gray 符号による一括符号割当としている。

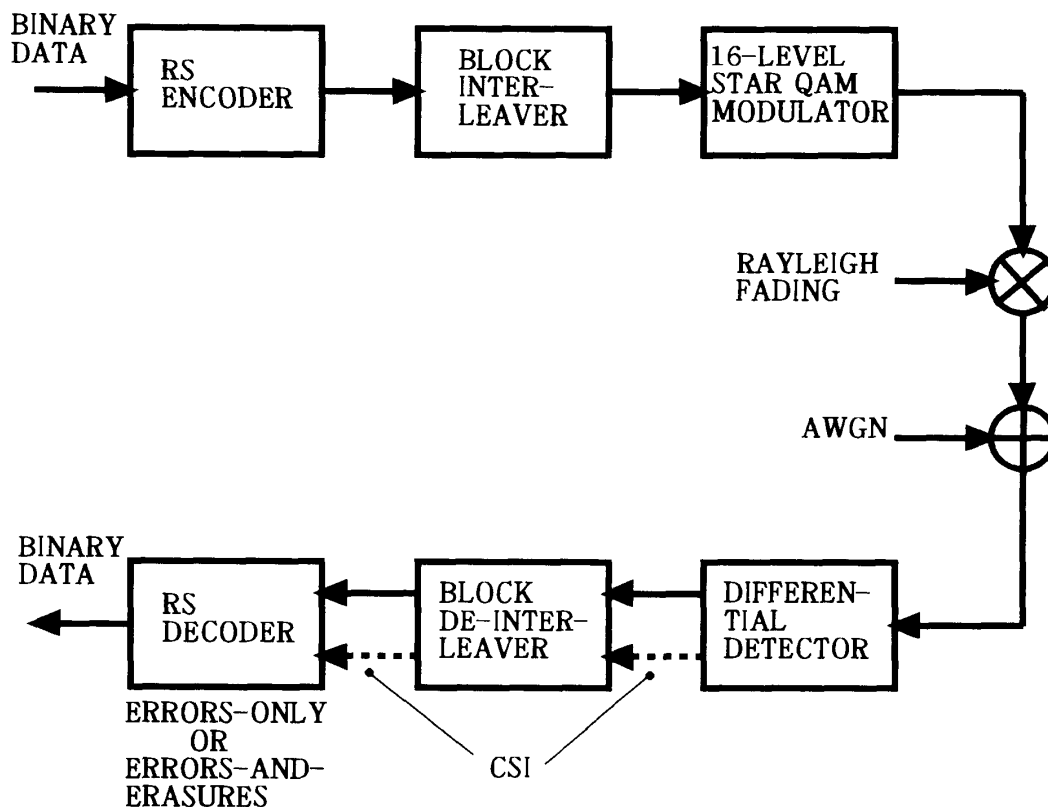


図2 レイリーフェージングチャネルでの RS 符号化16値スター QAM 方式のブロック図

フェージングは乗積的な非選択性の低速レイリーフェージングとする。遅延検波器は2 DASKの検波器と通常の8 DPSK 遅延検波器とからなる。16値スター QAM 信号の2 DASK 変調された1ビットは、引き続き2つの16値スター QAM シンボルの振幅比をあらかじめ決めたスレッシュホールドと比較して判定する。すなわち、2種類の判定スレッシュホールドを  $r_1$ ,  $r_2$  としたとき、

$$\begin{aligned} r_1 < \frac{R_n}{R_{n-1}} < r_2 &\rightarrow 0 && \text{(振幅変化なし)} \\ \frac{R_n}{R_{n-1}} < r_1 \text{ or } \frac{R_n}{R_{n-1}} > r_2 &\rightarrow 1 && \text{(振幅変化あり)} \end{aligned} \quad (1)$$

と判定する。但し、 $R_{n-1}$  と  $R_n$  は各々前シンボルと現シンボルの受信信号振幅である。判定スレッシュホールド  $r_1$  と  $r_2$  は16値スター QAM の2種類の振幅から決められる。すなわち、 $A_1$ ,  $A_2$  を各々内側リング、外側リングの送信振幅としたとき、

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{2}{1+A_2/A_1} \\ r_2 &= \frac{1+A_2/A_1}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

に選べばよい。実際には、SN 比によって誤り率最小の意味での最適な  $r_1$ ,  $r_2$  の値がわずかに変わる。本論文のシミュレーションでは、AWGN チャネルであらかじめ行ったシミュレーション結果から、 $E_b/N_0=13$  dB での最適値、 $r_1=0.68$ ,  $r_2=1.46$  に選んでいる。このように、2 DASK の検波では振幅の絶対値でなく比をとって判定するので、フェージングによる振幅のランダムな変動に対して、自動的に適応 AGC が働くのと同様である。そのため、AGC 回路が必要なく、回路の簡易化に寄与している。また、AGC のフェージング包絡線への追従の問題も避けられる。

RS 符号の復号は、硬判定復号であるが、誤り訂正のみの復号 (Errors-only Decoding) と、チャンネル情報 (CSI) を利用しての消失誤り訂正復号 (Errors-and-Erasures Decoding) とを適用する。

## 4. RS 符号の復号

### 4.1 RS 符号の Errors-only 復号

RS( $n$ ,  $k$ ) 符号の最小 Hamming 距離は  $d_{min} = n - k + 1$  であり、誤り訂正能力は、 $t = \lfloor (d_{min} - 1) / 2 \rfloor = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor$  である。但し、 $\lfloor x \rfloor$  は  $x$  を超えない最大の整数を意味する。ワード中に  $t + 1$  個以上の誤りがあるとき、ワード誤りとなる。

### 4.2 RS 符号の Errors-and-Erasures 復号

RS 符号の誤りと消失の両方を復号する効率の良い復号法、例えば、Berlekamp-Massey

アルゴリズムが知られている。Errors-and-Erasures 復号ではチャネル情報 (CSI) を利用して、誤り率劣化の原因となる信頼度の低い (深いフェージングによって受信振幅レベルが低下した) 受信シンボルを消失として復号を行う。符号の最小 Hamming 距離を  $d_{min}$ 、消失シンボル数を  $e$ 、誤り訂正数を  $t$  としたとき、

$$2t + e \leq d_{min} - 1 \tag{3}$$

の関係を満たす限り、符号語は正しく復号されることが示される。シミュレーションでは理想的にフェージング振幅が推定されたとしている。

### 5. シミュレーション結果

コンピュータシミュレーションにより得た RS 符号化16値スター QAM 方式のワード誤り率 (WER) 特性の例を図 3 及び図 4 に示す。図 3 は RS(15, 11) 符号化の場合を、図 4 は RS(15, 7) 符号化の場合を示す。スペクトル利用効率 ( $\eta = (k/n)m$ ) は、前者の場合  $\eta \doteq 3$  であり、後者では  $\eta \doteq 2$  である。各々の場合に、硬判定 Errors-only 復号と Errors-and-Erasures 復号の誤り率が示されている。図 3, 4 には参考のため、スペクトル利用効率が

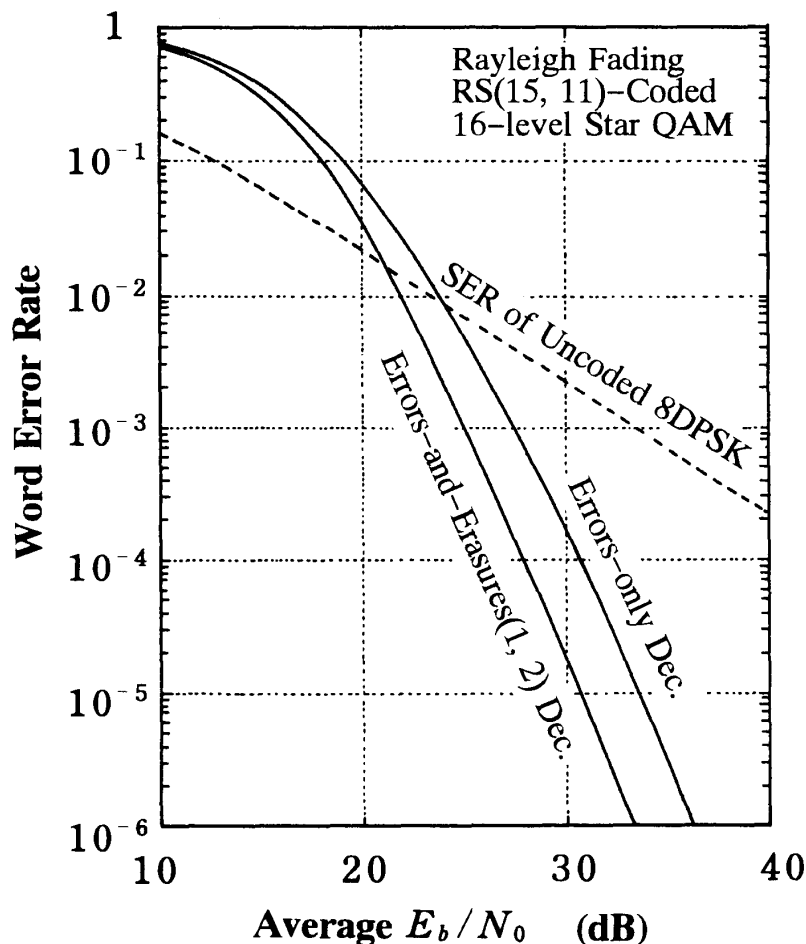


図3 レイリーフェージングチャネルでの RS (15, 11) 符号化16値スター QAM のワード誤り率

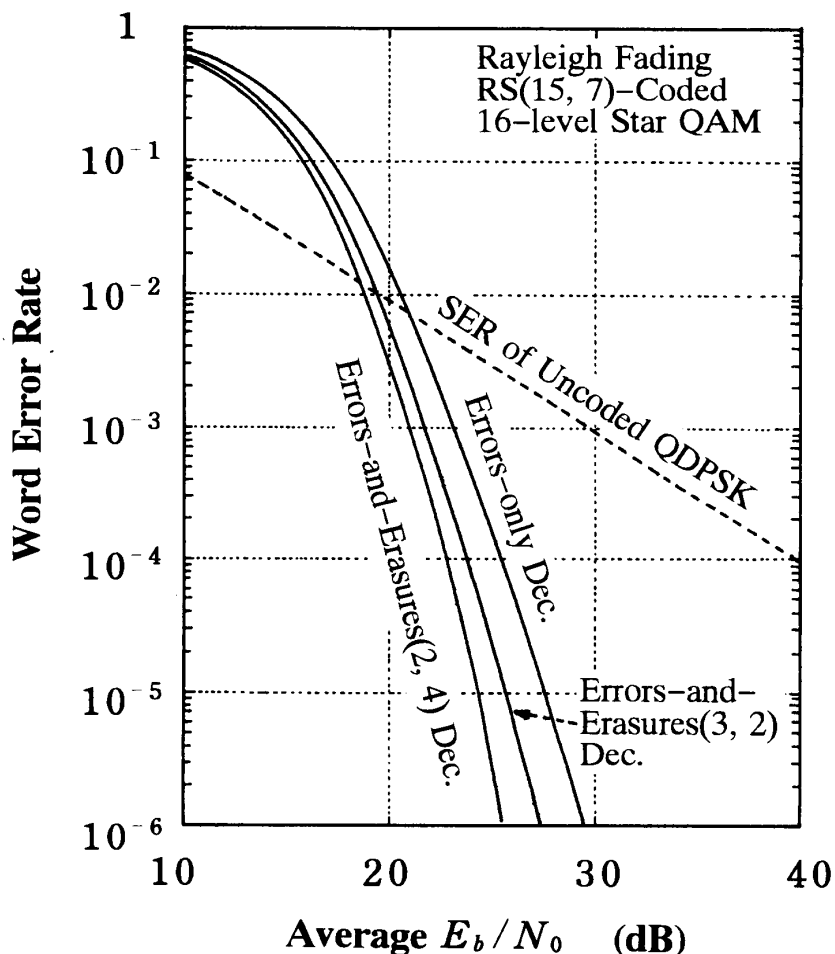


図4 レイリーフェージングチャネルでの RS (15, 7) 符号化16値スター QAM のワード誤り率

各々ほぼ等しい、無符号化 8 DPSK と無符号化 QDPSK のシンボル誤り率 (SER) を併記している。基本的にはビット誤り率 (BER) を用いて比較を行うべきであるが、平均 WER と平均 BER との間の一義的な関係は容易には見いだせないため、ここでのシミュレーション結果は平均 WER を示している。従って、無符号化方式のシンボル誤り率との厳密な比較はできないわけであるが、大ざっぱにはシンボル誤り率≒ワード誤り率とみなして目安を与えるために SER を図中に併記している。

RS 符号化16値スター QAM 方式は Errors-only 復号の場合でも、 $WER = 10^{-4}$  で無符号化方式の SER と比較して、10 dB 以上の符号化利得が得られる。そして、Errors-and-Erasures 復号をすることによって、最大 3 dB 程度の更なる利得が得られることがわかる。

表 I 及び表 II は平均  $E_b/N_0$  比一定のもとで、誤り訂正可能な誤りシンボル数と消失シンボル数の組合せパターンによって平均ワード誤り率がどの程度変わるかを示している。表 I は RS(15, 11) 符号化の場合で、平均  $E_b/N_0 = 26$  dB である。また、表 II は RS(15, 7) 符号化の場合で、平均  $E_b/N_0 = 23$  dB である。誤りシンボル数と消失シンボル数の組合せのパターンには最適値がある。

表 I 平均  $E_b/N_0=26$  dB での RS (15, 11) 符号化 16 値スター QAM の平均 WER  
 $d_{min}=5$ 

Pattern		Average $E_b/N_0=26$ dB
Errors	Erasures	Average WER
2	0	$2.32 \times 10^{-3}$
1	2	$4.45 \times 10^{-4}$
0	4	$7.66 \times 10^{-4}$

表 II 平均  $E_b/N_0=23$  dB での RS (15, 7) 符号化 16 値スター QAM の平均 WER  
 $d_{min}=9$ 

Pattern		Average $E_b/N_0=23$ dB
Errors	Erasures	Average WER
4	0	$1.24 \times 10^{-3}$
3	2	$2.68 \times 10^{-4}$
2	4	$1.07 \times 10^{-4}$
1	6	$1.39 \times 10^{-4}$
0	8	$1.16 \times 10^{-3}$

## 6. む す び

コンピュータシミュレーションにより、レイリーフェージングチャネルでの RS 符号化 16 値スター QAM 方式の誤り率特性を得た。1) 同一スペクトル利用効率の無符号化方式と比較して十分な符号化利得が得られる、2) RS(15, 11) 符号化の場合、1 誤り訂正—2 消失復号によって、また、RS(15, 7) 符号化の場合、2 誤り訂正—4 消失復号によって、 $WER = 10^{-4}$  で硬判定 Errors-only 復号の場合より約 3 dB の更なる利得が得られる、ことが明らかとなった。

## 文 献

- 1) G. Ungerboeck : Channel Coding with Multilevel/Phase Signals, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-28, No. 1, pp.55-67, Jan. 1982.
- 2) D. Divsalar and M. K. Simon : Trellis Coded Modulation for 4,800-9,600 bits/s Transmission over a Fading Mobile Satellite Channel, IEEE J. Sel. Areas Commun., SAC-5, pp.162-175, Feb. 1987.
- 3) S. Hamildreza Jamali and Tho Le-Ngoc : On the Performance of Bandwidth Efficient RS Coded MPSK Signaling over a Rayleigh Fading Channel, IEEE International Conference on Communications, 34.4, pp.1090-1094, June 1991.
- 4) J. Huang and L. L. Campbell : Trellis Coded MDPSK in Correlated and Shadowed Rician Fading Channels, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 40, No. 4, pp.786-797, Nov. 1991.
- 5) R. G. McKay, P. J. McLane and E. Biglieri : Error Bounds for Trellis-Coded MPSK on a Fading Mobile Satellite Channel, IEEE Trans. Commun., Vol. 39, No. 12, pp.1750-1761, Dec. 1991.
- 6) C. Tellambura, Q. Wang and V. K. Bhargava : Performance of Trellis Coded Modulation Schemes on Shadowed Mobile Satellite Communication Channels, IEEE Veh. Technol., Vol. 43, No. 1, pp.128-139, Feb. 1994.
- 7) 小西憲一, 宮垣嘉也 : レイリーフェージング通信路におけるブロック符号化多値変調/硬判定復号方式の誤り率特性, 信学論 (B-II), Vol. J73-B-II, No. 11, pp.683-690, 1990年11月.
- 8) R. J. Castle and J. P. McGeehan : A Multilevel Differential Modem for Narrowband Fading Channel, 42nd. IEEE Vehicular Technology Conference, pp.104-109, May 1992.
- 9) W. T. Webb, L. Hanzo and R. Steel : Bandwidth Efficient QAM Schemes for Rayleigh Fading Channels, IEE Proc.- I, Vol. 38, No. 3, pp.169-175, June 1991.
- 10) 安達文幸 : 最近の移動体通信技術, テレビジョン学会誌 Vol. 46, No. 8, pp.955-960, 1992年 8 月.
- 11) 佐和橋衛, 大野公士, 安達文幸 : 16 値スター QAM 遅延検波の誤り率特性, 信学会秋季大会論文集 B-247, 1992年 9 月.

- 12) F. Adachi and M. Sawahashi : Performance Analysis of Various Level Modulation Schemes under Rayleigh Fading, *Electronics Letters*, Vol. **28**, No. 17, pp.1579-1581, Aug. 1992.
- 13) Y. C. Chow, A. R. Nix and J. P. McGeehan : Analysis of 16-APSK Modulation in AWGN and Rayleigh Fading Channel, *Electronics Letters*, Vol. **28**, No. 17, pp.1608-1610, Aug. 1992.
- 14) S. Sampei and T. Sunaga : Rayleigh Fading Compensation for QAM in Land Mobile Radio Communications, *IEEE Trans. Veh. Technol.* Vol. **42**, No. 2, pp.137-147, May 1993.

## Error Performance of Reed-Solomon Coded 16-level Star QAM in a Land Mobile Radio Channel

Ken-ichi KONISHI and Yoshiya MIYAGAKI

*Department of Information and Computer Engineering,*

*Faculty of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*Ridai-cho 1-1, Okayama 700, Japan*

(Received September 30, 1995)

Spectral efficiency and hardware simplicity are important factors in land mobile radio systems. Error rate performance is degraded due to severe channel fading. Forward error correction (FEC), automatic repeat request (ARQ) or diversity reception techniques are occasionally employed to reduce the effect of fading. FEC with interleaving provides good error performance in a fading channel, but expands bandwidth, and consequently degrades spectral efficiency. This problem is solved without changing bandwidth efficiency by integration of an error correction coding with a bandwidth-efficient modulation scheme, namely a coded-modulation technique.

In this paper the word error probabilities of Reed-Solomon coded 16-level star QAM schemes in a land mobile radio channel are evaluated based on computer simulations. The receiver uses differential detection and two different decoding strategies, errors-only and errors-and-erasures decoding. It is estimated that large coding gain is achieved using these coded-modulation techniques. More coding gain is obtained using errors-and-erasures decoding.