

Title	移動通信における誤り制御方式
Author(s)	松本, 正; 吉田, 進
Citation	電子情報通信学会論文誌 A, J73-A(2): 232-236
Issue Date	1990-02-20
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/4674
Rights	Copyright (C)1990 IEICE. 松本 正、吉田 進, 電子情報通信学会論文誌 A, J73-A(2), 1990, 232-236. http://www.ieice.org/jpn/trans_online/
Description	

移動通信における誤り制御方式

正員 松本 正[†] 正員 吉田 進^{††}

Error Control Schemes in Mobile Radio Communication

Tadashi MATSUMOTO[†] and Susumu YOSHIDA^{††}, Members

あらまし 移動通信に適した誤り制御方式について述べている。まず、誤り制御方式の性能評価に必要なチャネルのモデル化と、そのもとでのブランチメトリックの与え方を示す。次に、そのモデルを用いて、畳込み符号とブロック符号の復号後の誤り率を評価する。また、自動再送要求(ARQ)方式のスループット特性のシミュレーション結果を示し、フェージングによるチャネルのメモリが、メモリレスチャネルと比較してスループットの増大に寄与し、またスループットを最大にする最適パケット長を大きくすることを示す。

1. まえがき

従来の自動車電話等の移動通信システムでは、通信チャネルにはアナログ PM が採用されており、誤り訂正・検出符号は、システムの制御チャネルの設計に用いられてきた⁽¹⁾。無線チャネルをデジタル化するための狭帯域デジタル変調方式の研究も以前から多数行われてきたが⁽²⁾、最近特に、デジタル移動通信の実用化の機運が高まっている。ヨーロッパでは、汎ヨーロッパデジタル移動通信システム(GSM)の1991年サービス開始を目標に、約270 kbit/sの8チャネルTDMAシステムの開始が進められている⁽³⁾。この中で、通信チャネル(通話、およびデータ)にも積極的に誤り訂正符号を適用して、伝送特性を改善するための研究が盛んになってきている。

本論文では、フェージングチャネルに適した誤り制御方式について述べる。移動通信の特徴は、電波が多重経路を経て受信される、いわゆるマルチパスフェージングを受けるために、バースト誤りが発生することである。2.では、誤り制御方式の性能評価に必要なフェージングチャネルのモデル化の例を紹介する。3.では、畳込み符号とブロック符号の復号後の誤り率について述べる。4.では、フェージングチャネルでの自動再送要求(ARQ)のスループット特性について述べる。5.では、既存のシステムにおける誤り訂正符号の実用例を、

6.では、周波数選択性フェージングが問題となる高速伝送に適した誤り制御方式をそれぞれ概観する。なお、HF回線を含むフェージング通信路の誤り制御に関しては、笠原⁽⁴⁾による解説があり参照されたい。

2. チャネルのモデル化

陸上移動通信では、移動局周辺の地形や建物の影響により、電波の到来経路が複数存在する多重波伝搬路となる。この中を受信局が走行する場合、受信波は、いわゆるマルチパスフェージングを受ける。受信波振幅(受信レベル)の変動幅は20~30 dBに及び、その分布はレイリー分布に従う。位相は一様分布し180°近く急激に変化することがある。このような中で通信を行う場合、受信レベルの落込みに伴うバースト的な雑音誤りと、位相変動に伴うランダム FM 誤りが発生する。更に、多重波伝搬に伴う先行波と遅延波の到来時間差がシンボル長と同等になる高速伝送時には周波数選択性のフェージングを受け、遅延波との間の符号間干渉や、ビット同期系が追従できないことによるバースト誤りが発生する⁽⁵⁾。

このような移動無線チャネルに適した誤り制御方式を設計し、その性能評価に必要な解析や室内実験、計算機シミュレーション等をスムーズに行うためには、チャネルのモデル化が不可欠となる。従来、比較的広く用いられてきたモデルに準静的フェージングモデルがある。このモデルでは、フェージングによって発生する受信波の位相変動を完全に追従する機能を備えた受信機を用いると仮定する。従って、誤りはフェージングによるレベル変動に対応したSNR(信号対雑音電

[†] NTT 無線システム研究所, 横須賀市

NTT Radio Communication Systems Laboratories, Yokosuka-shi, 238-03 Japan

^{††} 京都大学工学部, 京都市

Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto-shi, 606 Japan

力比)の低下によってのみ発生するとみなせる。このモデルにより、符号語を構成する各ビット間の誤りの相関が、受信波包絡線のレベル変動の相関(フェージング相関)だけから評価できることになる。

線形な変復調方式に上記の仮定を適用した場合、復調後の電圧 $y(t)$ は、 $y(t) = a(t)s(t) + n(t)$ のように表される。ここで、 $s(t)$ は送信シンボル系列で2値の場合 ± 1 、 $a(t)$ はレベル変動に相当する相乗性雑音、 $n(t)$ は加法性のガウス雑音(分散を σ^2 とする)である。受信側では、ビット識別時の電圧 $y(t)$ と同時に、受信波包絡線 $a(t)$ が得られる。包絡線検波により $a(t)$ が正確に測定できると仮定すれば(厳密にはできない) $y(t)$ を受信して、送信された情報が $+1$ であると推定すること、 -1 であると推定することに対する対数ゆり度比 $L(y, a)$ は、

$$L(y, a) = \log \left[\frac{\frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(a-y)^2}{2\sigma^2}\right\}}{\frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{(a+y)^2}{2\sigma^2}\right\}} \right] \propto y \cdot a$$

と与えられる。従って、 $y \cdot a$ をブランチメトリックとして軟判定アルゴリズムが実行できる。また、伝送路が非線形で復調後の電圧が、 $y(t) = a(t)s(t) + n(t)$ のように表されない場合でも、識別したビットの非フェージング時の誤り率が受信レベルの関数 $p_e(a)$ として与えられていれば、 $a(t)$ を測定したときの対数ゆり度比は、

$$L'(a) = \begin{cases} \log\{(1-p_e(a))/p_e(a)\}; & \text{ビットの識別結果} \\ & \text{がブランチ情報に一致する場合} \\ \log\{p_e(a)/(1-p_e(a))\}; & \text{ビットの識別結果} \\ & \text{がブランチ情報に一致しない場合} \end{cases}$$

のように求まる。Hagenauer らはこれらの方法をそれぞれ YSAS, YHAS (Y は復調後の電圧, A は受信レベル, H は硬判定, S は軟判定を意味する)と呼んでいる⁽⁶⁾。一方, Ahlin はこのモデルを更に簡単にして、フェージングのレベル変動を G 状態(しきい値以上の状態)と B 状態(しきい値以下の状態)で表現したマルコフモデルを与えている⁽⁷⁾。

3. 符号の性能評価

3.1 畳込み符号

符号の性能評価を理論的に行おうとするとき、解析を困難にする最大の理由はフェージングの相関の扱いである。フェージングを2状態マルコフモデルで表現する以外、任意のビットインタリーブサイズのもとで

畳込み符号の復号後の誤り率を理論的に導出した例はない。Mui らは、インタリーブを行わずに着目するビット系列中での受信レベルの変動がないとみなせる場合と、逆に、十分なサイズのインタリーブにより隣接するビット間でのレベル変動がランダムとみなせる場合について、畳込み符号の最良復号後のビット誤り率の上界を理論的に求めている⁽⁸⁾。そして、畳込み符号の誤り訂正能力を引き出すためにはビットインタリーブが不可欠なことを示した。一方、前述の Hagenauer らはブランチメトリックの値を2値で表現することを提案している⁽⁹⁾。すなわち、前述のフェージングのマルコフモデル表現に対応させて、G または B 状態におけるブランチメトリックを、G 状態: $L''(G) = \log\{(1-p_e(G))/p_e(G)\}$, B 状態: $L''(B) = \log\{(1-p_e(B))/p_e(B)\}$ のように与えている(このようにゆり度を与える方法を YHAH と呼んでいる)。但し、 $p_e(G)$, $p_e(B)$ はそれぞれ G 状態, B 状態における平均誤り率である。そして、YSAS, YHAS, YHAH の3種類のゆり度を用いて畳込み符号をビタビ復号する場合の復号後のビット誤り率の上界を求めている。その結果、復号後の誤り率は YSAS < YHAS < YHAH < 硬判定の順になるが、最も実用的な YHAH でも十分なサイズのインタリーブを行えば、拘束長7, 効率1/2の符号で復号後の誤り率 10^{-4} を得る所要 SNR を硬判定より約3 dB 改善できる (YSAS で約5.5 dB) ことを示した。

前述したように、最近 TDMA によるデジタル移動通信の実用化の機運が高まりつつある。そこで、TDMA チャンネルでの畳込み符号の性能を調べるために、BPSK を例にとり、YSAS と YHAS の両者のビタビ復号後のビット誤り率をインタリーブサイズをパラメータとして計算機シミュレーションにより求めた。ビットレート $f_b = 36$ kbit/s, TDMA フレームサイズ 240 ビット, 3 ch 多重とし、キャリアの位相追従、ビット同期、およびフレーム同期は理想的に動作するものと仮定した。符号は、効率1/2, 拘束長5の最適符号を用いた。図1にフェージング周波数 f_b が40 Hz の場合の、復号後のビット誤り率と情報1ビットに換算した平均電力 (E_b/N_0) の関係を示す。自フレーム内だけでインタリーブするよりも、より多くのフレームにわたってインタリーブを行った方が改善量は大きくなる。また、YSAS の方が YHAS よりも特性が良く、インタリーブサイズ=4 ブロックのとき、その差は復号後の誤り率 10^{-3} で約2 dB である。

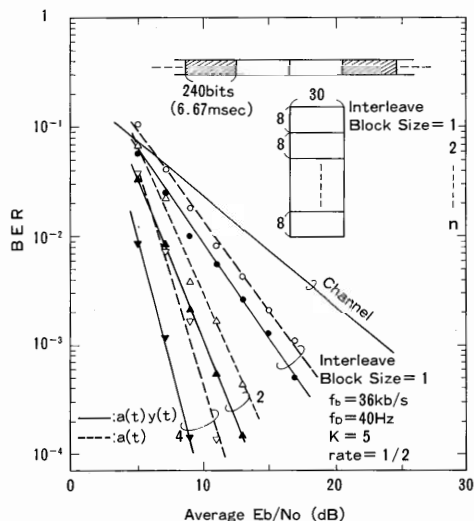


図1 畳込み符号の復号後のBER特性
Fig.1 BER performance of a convolutional code.

3.2 ブロック符号

宮垣らは、ブロック符号を硬判定する場合のワード誤り率とビットインタリーブの深さの関係を理論的に明らかにし⁽¹⁰⁾、非同期FSKに限られるが、フェージング相関が符号の復号特性に与える影響の理論的な評価に成功している。また、最大比合成ダイバーシチ受信とブロック符号(硬判定)を併用する場合、所要SNRの改善効果の大部分をダイバーシチが占めることを明らかにしている。

よく知られているように、ブロック符号を最ゆう復号するためには処理量が大きくなり実用的ではない。従って、復号の最ゆう性を犠牲にしても、現実的な処理量でブロック符号を軟判定するアルゴリズムが必要になる。チェイスアルゴリズム⁽¹¹⁾は硬判定復号器を繰り返し使って、信頼度情報を比較しながら最も確からしい符号語に到達するもので、実用的な復号法の一つと言える。フェージングチャンネルでのブロック符号の復号にチェイスアルゴリズムを適用する場合の特性を評価した例がいくつか報告されている。

前述の宮垣らは更に、チェイスアルゴリズムにより符号の誤り訂正能力が最大で硬判定の2倍になることを利用して、硬判定に対する解析を拡張し、軟判定に対するワード誤り率の理論値を任意のサイズのビットインタリーブのもとで求めている⁽¹²⁾。その結果、ビット間のフェージング相関が0.7になる程度のインタリーブにより、BCH(15, 11)のワード誤り率 10^{-4} を得る所要SNRを硬判定より5dB程度改善できることが

示されている。また、筆者の1人は、現実にはすべての場合でチェイスアルゴリズムの誤り訂正能力が硬判定の2倍にはならないことを考慮して、非同期FSKを対象に信頼度情報として受信波包絡線レベルを用いる場合のワード誤り率の理論値を求めている(但し、十分なサイズのインタリーブを仮定)⁽¹³⁾。また、Golay(23, 12)符号を用いて実験を行い、理論どおりの改善効果(ワード誤り率 10^{-4} を得る所要SNRで約5dB)を確認している。

4. ARQ方式

よく知られているように、フェージングチャンネルは代表的なメモリ付きチャンネルであり、チャンネルの容量はランダム誤りチャンネルよりも大きい。チャンネルのメモリを有効に使う方式の一つに、誤り検出符号を用いた自動再送要求(ARQ)がある。Comroeらは、フェージングによるレベルの落込みが受信フレーム内で発生したときに、そのフレームが誤るという仮定で、各種のARQのスループットを求めた⁽¹⁴⁾。これにより、各種のARQ方式の相対比較が可能となり、ハーフレート符号と組み合わせたハイブリッドARQが優れていることが示された。しかし、複数のフレーム間でのレベル変動の相関は考慮されていない。以下では、フレーム間でのレベル変動の相関を考慮したときの、ARQ方式のスループット特性を計算機シミュレーションにより求めた結果と、特性改善のための一方式について述べる。

4.1 スループット特性

準静的フェージングを仮定して、 $f_d/f_b=0.0025$ ($f_b=16$ kbit/s, 搬送波周波数1.5 GHzで走行速度28.8 km/hに相当)のもとでのstop and wait(SAW)-ARQの、パケットサイズとスループット関係を計算機シミュレーションにより求めた。(N,N-16)CRC符号を用い、すべての誤りは検出されるものと仮定した。また、ラウンドトリップディレイは64ビット相当、フィードバックチャンネルはエラーフリーと仮定した。非同期FSKに対するシミュレーション結果⁽¹⁵⁾を図2に示す。図には、メモリレスチャンネルのパケットサイズとスループットの関係の理論値を示してある。すべてのパケットサイズで、フェージングチャンネルの方がメモリレスチャンネルよりも大きなスループットが得られる。また、スループットを最大にするパケットサイズも大きくなる。

4.2 メモリ ARQ

ARQのスループットを改善する方式としてメモリARQ⁽¹⁶⁾が知られている。この方式では、再送されたフレームに再び誤りが検出されても直ちに再送要求せず、複数の再送フレーム間で各ビットの確からしさを更新しながら、過去に受信したフレームを用いてフレームを再構成し、再構成されたフレームの誤り検出を行う。この方式をフェージングチャンネルでのARQに適用するための方法(タイムダイバーシチ(TD-ARQ))が安達らによって提案されている⁽¹⁷⁾。TD-ARQでは、受信レベル $a(t)$ 、および復調後のビット識別時の電圧 $y(t)$ からフレーム内の各ビットの信頼度情報を求め、誤りを検出したときはこれらを記憶しておく。再送されたフレームが再び誤ったときは信頼度情報を用いてフレームを再構成する。安達らは、再構成の方法として選択、合成のそれぞれについて、十分に速いフェージングを仮定して平均再送回数の上限を理論的に求めている。図2には、受信レベルの大きい方の識別結果を選択するTD-SAW-ARQ方式の、スループットとパケットサイズの関係、前章と同一の条件で計算機シミュレーションにより求めた結果も示

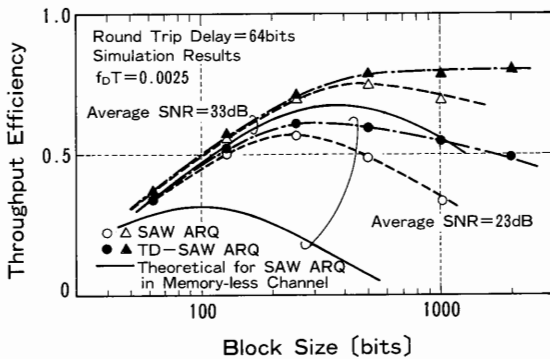


図2 パケットサイズとスループットの関係
Fig.2 Throughput efficiency versus packet size.

してある。TD-ARQにより、パケットサイズが最適値より大きくなって、スループットは劣化しにくくなる事がわかる。

5. 符号の実用例

従来のアナログシステムにおける制御信号伝送や、ポケットベル等のメッセージ伝送で採用されている誤り訂正符号を表1に示す。制御チャンネルなどの双方向チャンネルでは、ARQと組み合わせて使用する例が多い。一方、片方向チャンネルでは誤り訂正能力を大きくし、また多数回送信を併用するなどの例がある。

6. 高速伝送

高速伝送の場合、誤り訂正符号は万能ではない。約270 kbit/sのTDMA方式である汎ヨーロッパディジタル移動通信システム(GSM)では、適応等化、周波数ホッピング、誤り訂正符号を組み合わせて用いている。これは、図3に示すように遅延時間差とフェージング周波数に依存して、これらが効果的な領域が異なるこ

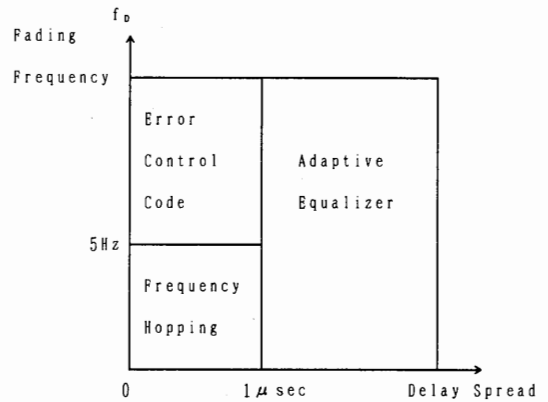


図3 高速伝送時の誤り対策例(GSMの場合)
Fig.3 Example of Error control schemes for high-speed transmission (the case of GSM system).

表1 誤り訂正符号の実用例

システム	ビットレート	実用符号
GSMシステム	約270 kbit/s	punctured 畳込み符号
テレターミナル	9600 bit/s	RS (15, 11) 符号
自動車電話制御チャンネル (NTT)	100/2400 bit/s	BCH (40, 28) 符号, Golay (23, 12) 符号
自動車電話制御チャンネル (北欧)	1200 bit/s	Kasami (26, 16) 符号
MCA, パーソナル無線	1200 bit/s	Hagelberger+CRC 符号
ポケットベル	200/400 bit/s	BCH (31, 16) 符号, 多数回送信
POCSAG*	512/1200 bit/s	BCH (32, 21) 符号
GSC**	300/600 bit/s	BCH (15, 7) 符号, Golay (23, 12) 符号

* Post Office Code Standardization Advisory Group

** Golay Sequential Code

とによる。誤り訂正符号には、拘束長 5 の畳込み符号を原符号とするパンクチャド符号を用いている。一方、遅延時間差が 0.5 シンボル長以下ならば、変調に冗長度を与えて耐多重波特性を得る DSK 方式等が有効であることが報告されている⁽¹⁸⁾。

7. む す び

以上、移動通信に適した誤り制御方式について概略を述べた。本論文では触れなかったが、情報源符号化と通信路符号化の一本化は移動通信にとって本質的な意味をもつ。なぜなら、通信媒体である電波の周波数は有限であり、システムが多くの加入者を収容するには 1 チャネル当りの帯域幅を狭帯域化する必要がある。一方、誤り訂正符号を用いることは逆の効果をもたらす。従って、音声や画像などの特定の情報源の性質に着目する場合、符号化されたデータの表す情報に応じて通信路符号化のパラメータ（誤り訂正能力や遅延時間）を変え、これを復号した後の性能を議論していく方向になりつつある。

一方、1 チャネル当りの帯域幅を変えないで特性を改善する方式である、符号化多値変調を移動通信に適用するための研究も盛んになりつつある。実用的には、復調器の同期系やフェージングに追従する AGC など、解決すべき問題点も多い。

文 献

- (1) Z. C. Fluhr and P. T. Porter: "Advanced mobile phone service: Control architecture", *Bell Syst. Tech. J.*, **58**, pp. 43-70(1979).
- (2) K. Murota and K. Hirade: "GMSK modulation for digital mobile radio telephony", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-29**, pp. 1044-1056(1981).
- (3) 吉田 進, 竹内 勉, "ヨーロッパにおける移動通信の研究開発動向について", *信学技報*, **RCS88-44**(1987).
- (4) 笠原正雄: "誤り制御とフェージング", 昭 56 連大, 24-6.
- (5) S. Yoshida, F. Ikegami and T. Takeuchi: "Causes of burst errors in multipath fading channel", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-36**, pp. 107-113(1988).
- (6) J. Hagenauer: "Viterbi decoding of convolutional codes for fading and burst channels", *Proc. of Zurich Seminar Digital Comm.*, pp. G2.1-2.7(1980).
- (7) L. Ahlin: "Coding method for the mobile radio channel", *Proc. of Nordic Seminar on Digital Land Mobile Radio Comm.*, pp. 161-170(1985).
- (8) J. W. Modestino and S. Y. Mui: "Convolutional code performance in the Rician fading channel", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-24**, pp. 592-606(1976).
- (9) J. Hagenauer and R. Lutz: "Forward error correction coding for fading compensation in mobile satellite

channels", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **SAC-5**, pp. 215-225(1987).

- (10) 宮垣嘉也, 森永規彦, 滑川敏彦: "移動体データ伝送における誤り訂正符号, インタリービング, ダイバーシチ合成復号対策効果", *信学論(B)*, **J67-B**, 6, pp. 599-605(昭 59).
- (11) D. Chase: "A class of algorithms for decoding block codes with channel measurement information", *IEEE Trans. Inf. Theory*, **IT-18**, pp. 170-182(1972).
- (12) Y. Miyagaki: "Theoretical evaluation of soft decision gain for block FEC in a land mobile radio channel", *Trans. IEICE*, **E70**, 11, pp. 1125-1132(1987).
- (13) T. Matsumoto: "Soft decision decoding of block codes using received signal envelope in digital mobile radio", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **SAC-7**, pp. 107-112(1989).
- (14) R. A. Comroe and D. J. Costello, Jr.: "ARQ schemes for data transmission in mobile radio systems", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **SAC-2**, pp. 472-481(1984).
- (15) T. Matsumoto and S. Ito: "Simulated throughput efficiency of TD-SAW ARQ system in digital mobile radio", *Electron. Lett.*, **24**, pp. 1505-1506(1988).
- (16) C. Lau and C. Leung: "Performance analysis of a memory ARQ scheme with soft decision detectors", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-34**, pp. 827-832(1986).
- (17) F. Adachi, S. Ito and K. Ohno: "Performance analysis of a Time diversity ARQ in land mobile radio", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-37**, pp. 177-183(1989).
- (18) S. Ariyavisitakul, S. Yoshida, F. Ikegami and T. Takeuchi: "A novel anti-multipath modulation technique DSK", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-35**, pp. 1252-1264(1987).

(平成元年 9 月 19 日受付)



松本 正

昭 53 慶大・理工・電気卒。昭 55 同大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)無線システム研究所入所(当時、電電公社横須賀電気通信研究所)。62 年 4 月まで大容量自動車電話方式の実用化に従事。62 年 5 月よりデジタル移動通信、移動通信用誤り制御方式の研究開発に従事。現在、NTT 無線システム研究所主任研究員。



吉田 進

昭 46 京大・工・電子卒。昭 48 同大学院修士課程了。同年京大・工・助手。以来、伝送符号、計算機ネットワークの研究を経て、最近は主として高速デジタル移動通信の研究に従事。現在、京大・工・助教授。工博。昭 53 学術奨励賞受賞。