

移動通信の基盤技術 その2

2 移動通信における誤り制御

通信システムやメディア媒体などへの誤り制御技術の浸透は、コンパクトディスク (CD) などのデジタル技術の拡大と同調して、急速に進んできている。誤り制御は、デジタル信号の高信頼性を確保する技術で、品質の高いサービスには不可欠な基本技術である。本稿では、移動通信における誤り制御方式について概観するとともに、最近の動向および実用システムにおける応用例について述べる。

まつもと 松本 正・須田 博人
ただし すだ ひろひと

まえがき

通信システムのデジタル化の流れの中で、移動通信においてもデジタル技術が確実に拡大しており、最近の大きな話題は平成5年3月のデジタル自動車・携帯電話サービスの開始である。デジタル移動通信の品質および信頼性確保のためには、無線伝送路で発生する符号誤りの克服が重要課題であり、誤り制御技術がますます重要になってきている。

この誤り制御という言葉には、伝送路で発生する符号誤りを抑える技術と、誤りの発生を抑え切れない場合でも品質や特性を維持する技術の2つの意味が込められている。誤り制御技術は1940年代後半からその研究が始まり、現在の通信や記録のシステムには不可欠な存在になっている。代表的な応用例にCD(コンパクトディスク)やDAT(デジタルオーディオテープ)がある。移動通信においても、誤り訂正符号をはじめ、誤り検出符号、自動再送制御 (ARQ) などの誤り制御が必須の技術として用いられている。

自動車・携帯電話サービスは、第1世代と呼ばれるアナログ伝送を主体とした方式から始まり、平成5年からサービスが開始された本格的なデジタル伝送を用

いる第2世代、さらに世界的な統一規格を目指す第3世代という形で発展している。アナログ伝送主体の第1世代においても、発着信などのための制御信号はデジタル伝送しており、信頼性を確保することを主目的とした誤り制御技術が開発された。

第2世代においては、制御信号伝送はもちろん音声やデータ通信サービスのための誤り制御技術が中心課題の1つとして開発された。ここでは信頼性に加えて、効率 (情報の伝送速度) も重要な設計基準となる。

第3世代においては、より高品質なサービスを目指した誤り制御技術が活発に検討されるであろう。

本稿では、移動通信における誤り制御方式について概観するとともに、最近の動向および実用システムにおける応用例について述べる。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。

『通信システムのモデル』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を紹介し、『各種誤り制御方式』では、そのモデルを用いたFEC方式とARQ方式の性能評価例を示す。また、最近の技術動向について述べる。『実

用システム』では、デジタル方式自動車電話 (PDC) システムにおける音声コーデックとデータ通信システムおよび制御チャネルを例に、実用システムにおける誤り制御技術の応用例について述べる。

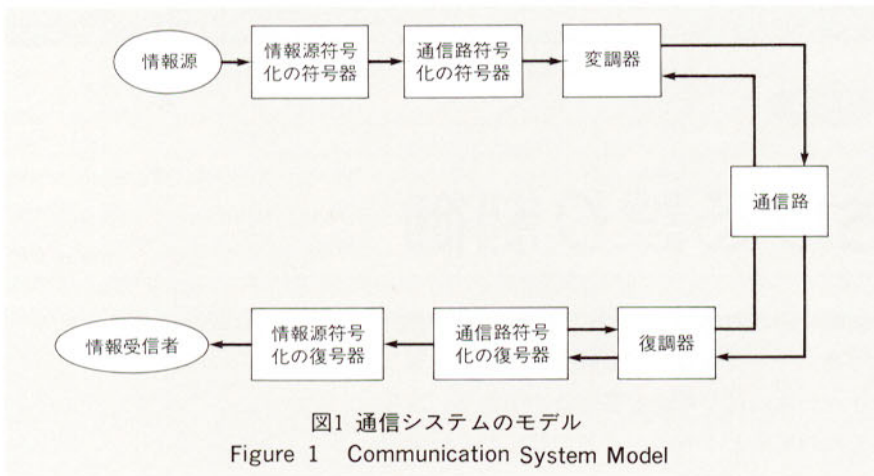
通信システムのモデル

■構成要素の機能

図1に一般的な通信システムのモデルを示す。情報源とは、情報を発生する源そのものであり、音声であったり画像やコンピュータのデータであったりする。情報源符号化では、情報源から発生する情報をサンプリングしてこれを記号系列、またはビット系列に変換する。このとき、情報は時間とともに変動する時系列であるが、その変動の仕方はランダムではなく、多くの場合相関を持っている。

そこで、その相関を利用することによって、情報を短い記号列で表現できる。情報源符号化が、伝送すべき情報をより短い記号列で表現できれば、その伝送に必要な帯域を狭くすることができる。したがって、情報源符号化に要求される特性は符号化後に要求されるビットレートをできるだけ低くすること (情報圧縮) にある。

情報源符号化の符号器出力である記号



系列は、通信路を介して情報源符号化の逆の処理を行う情報源符号化の復号器に入力され、情報受信者に理解できる情報に復元される。ところが、通信路では雑音や干渉、あるいは変復調系の不完全性の影響を受ける。このために、通信路の誤り率はゼロにはできない。そこで、伝送路符号化では、信号の送信者と受信者との間であらかじめ既知な規則に従う冗長性を情報源符号化器出力の記号系列に付加し、受信側の復号器ではその規則に基づいて送信された情報を推定する。このことによって、与えた冗長度に伴う帯域拡大分以上に所要送信電力を低減できることが知られている。この利得は符号化利得と呼ばれる。

一般に誤り制御では、誤りのある通信路を介して情報源符号器出力の記号系列を、いかに効率的に高い信頼性で伝送できるかが議論される。したがって、誤り制御システムは、通信路符号化のための符復号器と変復調器、および通信路から構成される。しかし、最近では情報源符号化と通信路符号化を一体的に設計することによって、実際の情報受信者が受信する情報のトータルの歪みを少なくするように設計する傾向が強まってきている。

さて、誤り制御方式は誤り訂正方式(Forward Error Correction: FEC)と自動再送要求方式(Automatic Repeat reQuest: ARQ)、およびそれらのハイブリッド方式に分けられる。FEC方式は、主として帰還通信路がない場合に適合する。移動通信システムでは、

ページャやデジタル音声通信がこれにあたる。FEC方式の設計目標(Design Objective)は、復号後の誤り率を低くすることにつきる。

これにより、送信電力の低減や伝送品質の向上が達成できる。一方、ARQ方式は帰還通信路が利用できる場合に用いられる。移動通信システムでは、制御信号伝送やデータ通信などがこれにあたる。ARQ方式の設計目標は、スループット(単位時間に誤りなく伝送できたビット数)を高くすることである。これにより、多くの情報を少ない伝送遅延で伝送することが可能となる。

■通信路のモデル化

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。この中を移動局が走行する場合、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²⁾。位相は一様分布する。

このような中で通信を行う場合、受信レベルの落ち込みに伴うバースト的な熱雑音誤りと、位相変動に伴うランダムFM誤りが発生する。さらに、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比較して無視できなくなると、フェージングは周波数選択的となり時変的な符号間干渉によるバースト誤りが発生する。

このような移動無線チャン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などをスムーズに行うためには、通信路のモデル化が不可欠となる。周波数非選択性フェージングに対して、従来から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に完全に追従して、基準となる絶対位相を再生する機能を備えた受信機を用いると仮定する。したがって、誤りはフェージングによるレベル変動に対応した受信SNR(信号電力対雑音電力比)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シンボル間の誤りの相関が、受信波包絡線変動の相関だけから評価できることになる。

このモデルを同期PSKなどの線形変復調系に適用すると、受信信号 $y(t)$ は、

$$y(t) = a(t)s(t) + n(t) \quad (1)$$

のように表され、受信波包絡線 $a(t)$ は実数となる。 $s(t)$ は送信された情報シンボル、 $n(t)$ は加法的ガウス雑音である。受信側では、シンボル識別タイミングにおける受信信号 $y(t)$ と同時に、受信波包絡線 $a(t)$ が得られる。例えば、BPSKを考えると、 $y(t)$ を受信して、送信信号が $s(t) = 1$ であると推定することの $s(t) = -1$ であると推定することに対する対数尤度比 $L(y, a)$ は、

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

で与えられる。したがって、 $y \times a$ 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。このブランチメトリックは、多値PSKなどにも拡張できる。

また、変復調系が非線形で受信信号が式(1)のように表されない場合でも、識別したシンボルの非フェージング時における誤り率が受信波包絡線 $a(t)$ 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尤度比 $L'(a)$ は、

$$L'(a) = \log \left[\frac{(1 - p_e(a))}{p_e(a)} \right]$$

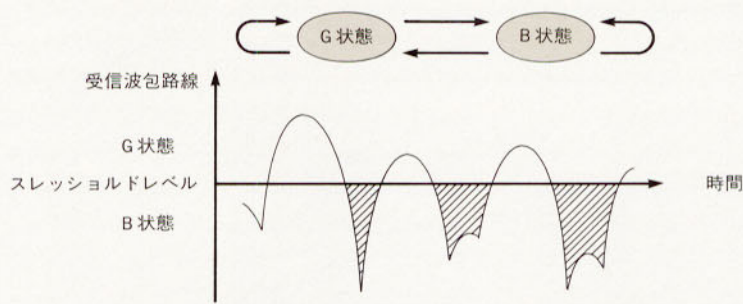


図2 フェージングチャネルのマルコフモデル
Figure 2 Markov Model for Fading Envelope Variation

〔ビットの識別結果がパス値に一致し
たとき〕

$$L'(a) = \log \left[\frac{p_e(a)}{(1-p_e(a))} \right]$$

〔ビットの識別結果がパス値に一致し
なとき〕

(3)

のように求まる。Hagenauerらは³⁾、これらの方法をそれぞれYSAS, YHAS (Yは受信信号, Aは受信波包絡線, Hは硬判定, Sは軟判定を意味する)と呼び、それぞれの特性を評価している。

また, Aulinはこのモデルをさらに簡略化して、フェージングによる受信波包絡線の変動をG状態(しきい値以上)とB状態(しきい値以下)で表現したマルコフモデル(図2)を与えている⁴⁾。また、前述のHagenauerはこのマルコフモデル下での対数尤度比L''を

$$\text{G状態: } L''(G) = \log \left[\frac{(1-p_e(G))}{p_e(G)} \right]$$

$$\text{B状態: } L''(B) = \log \left[\frac{(1-p_e(B))}{p_e(B)} \right]$$

(4)

のように与えている(このように尤度を与える方法をYHAHと呼んでいる)。ただし、 $p_e(G)$ 、 $p_e(B)$ は、それぞれG状態、B状態における平均誤り率である。

一方、準静的フェージングでは評価できないランダムFMや符号間干渉に伴う誤りを評価するためにはモデルの精密化が必要であり、受信側における信号の検波

過程と符号の復号過程を忠実に表現する方法も採用されている。また、このモデルに基づいてFEC方式の復号後の誤り率を解析的に求めた結果も報告されている⁵⁾。

各種誤り制御方式

■誤り訂正方式

誤り訂正符号はブロック符号と畳み込み符号に分類できる。ブロック符号では、情報源符号化の符号器出力記号系列をk個の記号ごとにブロックに区切り、各ブロックを他のブロックとは独立に符号化する。符号器はn個の記号からなる符号語xを出力する(n-k個の冗長記号を付加したことになる)。畳み込み符号でも、情報源符号化の符号器出力記号系列をk個の記号ごとに符号化するが、各符号の符号化は互いに独立ではなく、それ以前の情報記号にも依存する。符号器はやはりn個の記号からなる符号語xを出力するが、符号語xは過去数記号分(拘束長という)の入力の直接的影響を受ける。

ブロック符号には、BCH符号、RS符号、ファイア符号、差集合巡回符号などの符号が発見されている。それぞれに対してさらに、符号長(ブロックの長さ、ランダム誤りの下では符号長が長くなるほど強力な誤り訂正能力が得られるが、復号のための処理が複雑になる)や符号化率(=k/n)などのパラメータが選択できるため具体的な符号の種類は膨大な数になる。

ブロック符号は、主として数学的な理

論に基づいて構成されるのに対し、畳み込み符号は主として計算機を用いた検索によって発見されている。畳み込み符号についても、拘束長や符号化率が選択できるため、やはり膨大な数の符号が存在する。したがって多くの種類の中から、復号アルゴリズムの性質やパラメータの特性を考慮して、提供するサービスに適した誤り訂正符号を設計することが重要な技術となる。

符号設計における評価尺度は、符号が持つ誤り訂正能力、復号のための所要演算量、およびインタリーブ(時間的に隣接する符号器出力記号を、離れたタイミングで送信すること、通信路のバースト誤りをランダム化するのに有効)のための許容遅延時間である。誤り訂正能力を高めるためには所要演算量および所要処理時間を増加させる犠牲が必要となる。したがって、このトレードオフの関係を把握して、性能向上と所要処理量などのコスト増加の関係を定量化することで、適切な符号設計が可能となる。

移動無線環境における誤り訂正符号の性能(=復号後の誤り率)を理論的に評価しようとするとき、解析を困難にする最大の理由はフェージング相関の扱いである。前述のAulinのモデルのようにフェージングをマルコフモデルで表現する以外、受信シンボル間の誤りの相関を考慮すると、復号後の誤り率の導出は極めて困難になる。したがって、より精密なモデルの下での復号後誤り率評価はシミュレーションや実験が主になる。

図3には、代表的なブロック符号であるBCH符号を移動無線環境に適用した場合のインタリーブサイズと、復号誤り率の関係を符号長をパラメータとして示す⁶⁾。ただし、前述の準静的フェージングモデルを仮定している。インタリーブサイズ(許容遅延時間)があまり大きくとれない場合には、符号長による訂正能力の差はほとんど現われない。十分な許容遅延時間がとれる場合には、符号長に応じて訂正能力が向上している。

一方、移動無線環境における畳み込み符号の復号誤り率特性に関して、

Hagenauerは前述の3種の尤度(YSAS, YHAS, YHAH)を用いてビタビ復号する場合の復号後ビット誤り率を求めている³⁾。その結果、復号後の誤り率はYSAS<YHAS<YHAH<硬判定の順となるが、最も簡便なYHAHでも十分なサイズのインタリーピングを行えば、拘束長7、効率1/2の符号で復号後誤り率 10^{-4} を得る所要SNRを硬判定より約3dB改善できる(YSASで約5.5dB)ことを示した。

最近、帯域拡大を伴わないで誤り率特性を改善できる符号化多値変調のフェージング通信路への応用の研究が盛んになってきている。SimonとDivsalarは、フェージング通信路における符号化変調方式の復号後の誤り率を最小にするための畳み込み符号の構成法(Design Criteria)を明らかにした(ただし、十分なサイズのインタリーピングを仮定している)⁷⁾。それによれば、最適符号は、

- ① 最短エラーイベントパス上の非ゼロのシンボル数(=Effective Code Length : ECL)を最大にする
- ② 最短エラーイベントパス上の各シンボル間の2乗ユークリッド距離の積(=Product of Squared Branch Distance : PD)を最大にする

ことによって構成される。このとき、送信した符号語が最短エラーイベントパスを持つ符号語に誤って受信される確率(Pairwise Probability)は、平均受信SNR Γ に対して Γ^{-ECL} と $1/PD$ の両者に比例して減少する。

このDesign Criteriaは、加法的ガウス雑音に対する符号化変調方式の最適符号設計とは明らかに異なる。SimonとDivsalarによって1988年にこのDesign Criteriaが明らかにされると、具体的な各種の変調方式に対する最適符号が次々と明らかにされていった^{8)~11)}。表1には、これらの最適符号とそのECL、および発見者が示されている。

■自動再送要求方式

ARQ方式では、送信すべきデータを高効率の誤り検出のための符号に符号化して送信し、受信側で誤りが検出された

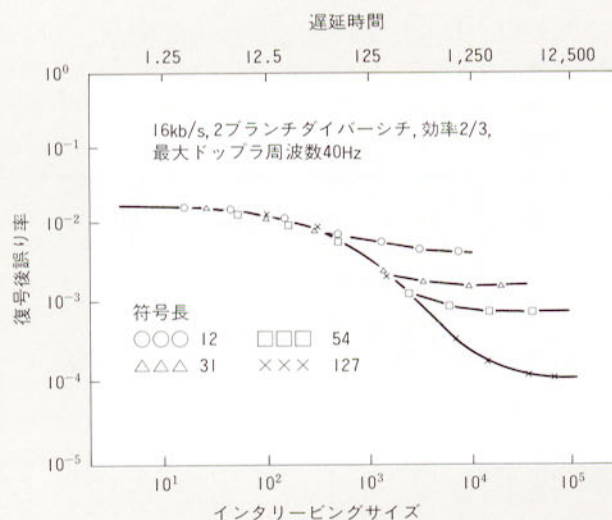


図3 遅延時間と復号後誤り率特性
Figure 3 BER performance V.S. Interleaving Delay

表1 フェージング通信路における符号化変調の最適符号
Table 1 Optimal Trellis Codes for Fading Channels

変調方式	レート	メモリ数	ECL (ターバシチ次数)	復号法	発見者 (発見年)	
4 PSK	3/4	3	4	Multi-stage Decoding	N. Seshadri and C.W. Sundberg (1993)	
		4	4			
		5	5			
		6	6			
		7	6			
8 PSK	2/3	2	2	Viterbi Decoding	C. Schlegel and D.J. Costello (1989)	
		3	3			
		4	3			
		5	4			
		6	4			
		7	5			
		8	5			
		9	5			
		10	6			
		1/2	3			3
	4			7		
	5			8		
	6			10		
	7			10		
	16PSK	3/4	3	2	Viterbi Decoding	B. Vucetic and J. Du (1990)
4			2			
5			2			
6			3			
7			3			

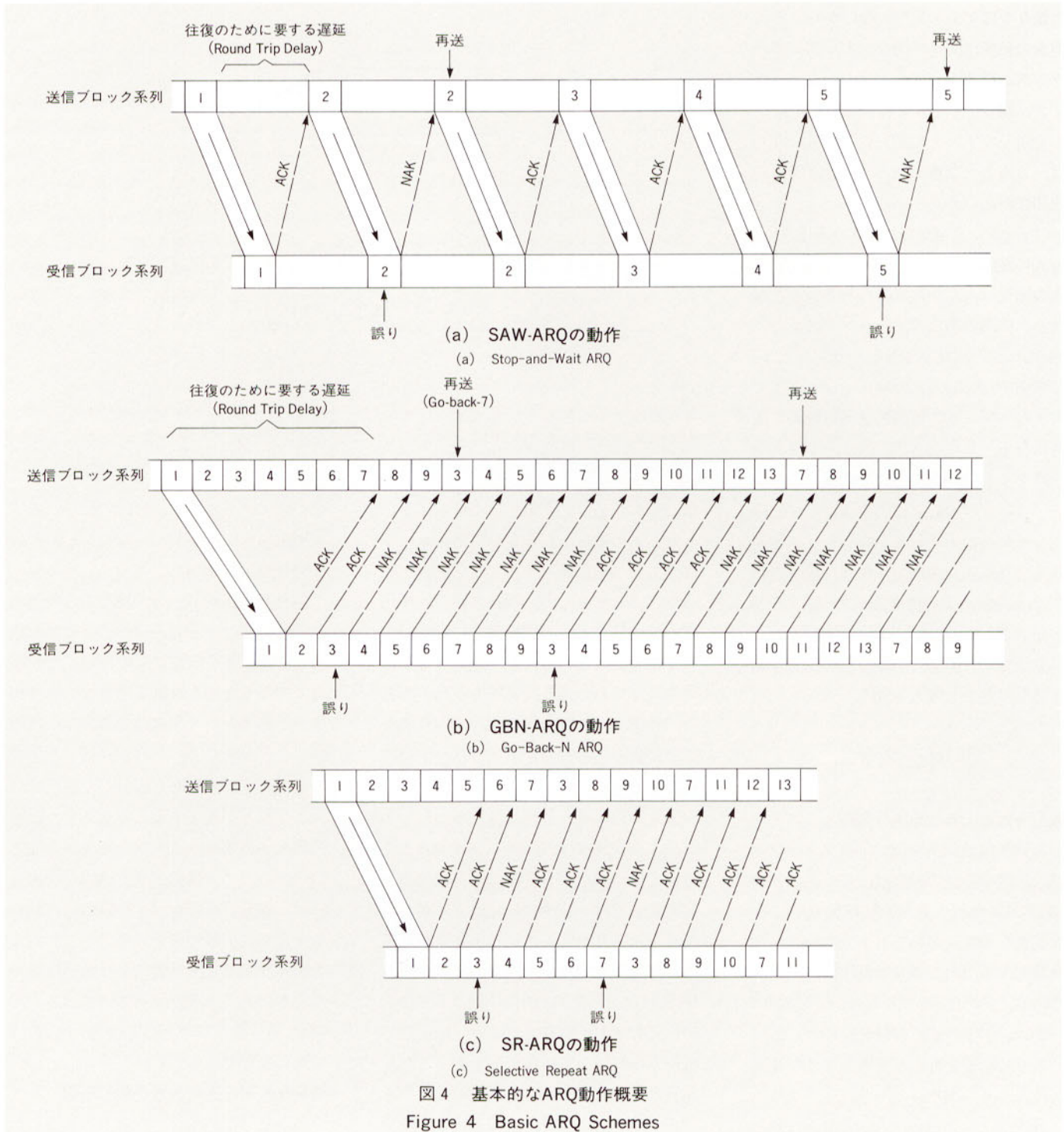
フレームだけを再送要求する。再送要求信号は、帰還通信路を介して送信側に通知される。ARQ方式には、Stop-and-Wait (SW)法、Go-Back-N (GBN)法、Selective-Repeat (SR)法の3種類の基本的方式がある。それらの動作概要を図4に示す。

SW法 [図4 (a)] は最も基本的な方式で、1ブロック送信することに待ち受け

状態に入り、受信側からの応答(ACK or NACK)を受け取ると次のブロックを送信する。NACKを受け取った場合には直前の送信ブロックを再送する。GBN法[図4 (b)] は、待ち受け状態に入りことなく、連続的に送信を続ける。ただし、NACKを受け取った場合にはNブロック過去の送信ブロックまで戻り、そこから再度連続的に送信を続ける。Nブロック単純に

戻って再送するため、再送不要なブロックまでが再送される場合が生じ、伝送効率の改善の余地がある。

SR法 [図4 (c)] はGBN法の欠点を改善した方式で、NACKとわかったブロックだけを選択的に再送する。そのためには、NACKとなったブロックをバッファメモリ上で確実に管理して、再送を遂行する複雑な制御が必要となる。



さて、『通信システムのモデル—通信路のモデル化—』で述べたとおり、フェージング通信路は典型的なバースト誤り通信路であり、誤りがほとんど発生しない状態 (=Good状態) と誤りが密集している状態 (=Bad状態) が時間的に分離している。このような『誤りの記憶』はARQ方式のスループットの向上に寄与する。すなわちこの場合、フレーム誤りはBad状態が多く発生し、Good状態ではフレーム誤りがほとんど発生しないから、再送要求の頻度は同一平均シンボル誤り率のランダム誤りチャネルよりも少ない (ランダム誤りチャネルでは、全受信フレームで同一のフレーム誤り率になる)。ARQは、このような意味から、移動無線との親和性が高い方式といえる。

フェージング通信路に対する各種ARQ方式の性能評価と、それに適するARQ方式の開発は古くから試みられている。しかし、相関のあるフェージングの下での誤り訂正符号の性能評価が困難なのと同じ理由で、ARQ方式のフェージング下でのスループットの理論的評価は極めて困難になる。したがって、フェージング通信路をより簡便なモデルで表現してスループットを理論的に導出するか、逆に精密なモデルの下でシミュレーションや実験を行うかのいずれかになる。最近の研究ではSR法の最適性を証明する論文なども発表されており¹²⁾、SR法を中心とした移動通信用ARQ方式の研究開発がますます活発に進むと考えられる。

実用システム

■音声伝送における誤り制御

移動無線通信路で発生するフェージングに起因する符号誤りは、ビット誤り率にして1%を超えることがある。このような劣悪な条件においても十分な通話品質を確保するため、誤り制御技術が不可欠である。音声伝送に用いられる誤り制御技術は、①誤り訂正符号化技術と、②残留誤りの影響を抑える音声復号法が2本の柱となる。

音声伝送に用いられる誤り訂正符号の

表2 デジタル方式におけるビットレートの配分法

Table 2 Bit Rate Assignments of Source and Channel Coding for Speech Codec

方式	PDC		USDC		GSM	
	フルレート (11.2kb/s)	ハーフレート (5.6kb/s)	フルレート (13kb/s)	ハーフレート (6.5kb/s)	フルレート (22.8kb/s)	ハーフレート (11.4kb/s)
音声符号化	VSELP (6.7kb/s)	PSI-CELP (3.45kb/s)	VSELP (8kb/s)	1993 予定	RPE-LTP (13kb/s)	1993 予定
誤り訂正符号	畳込符号+CRC (4.5kb/s)	畳込符号+CRC (2.15kb/s)	畳込符号+CRC (5 kb/s)		畳込符号+CRC (9.8kb/s)	

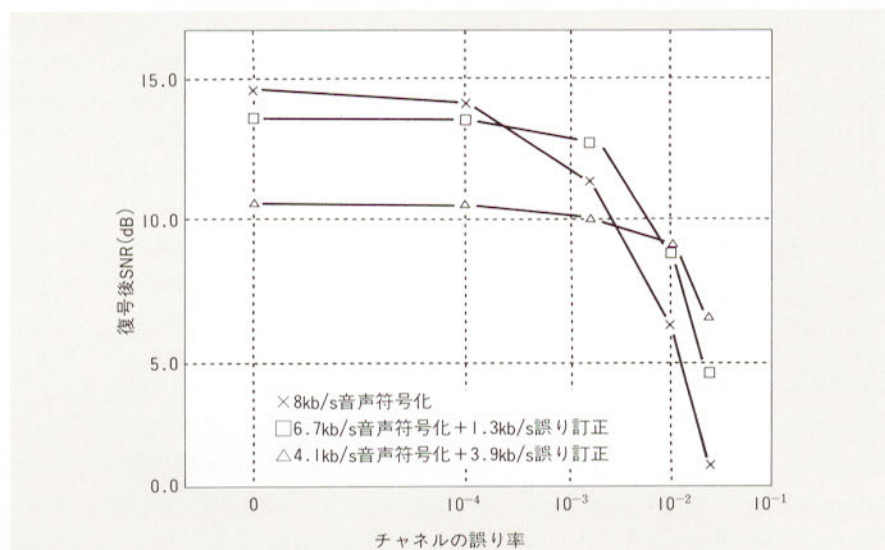


図5 ビットレート配分による特性比較
Figure 5 Speech SNR V.S. Channel BER

設計においては、①誤り訂正符号化アルゴリズムの選択と、②音声 (情報源) と誤り訂正 (通信路) へのビットレート配分がポイントとなる。現在世界で標準化されている3方式の例を表2に示す。すべての方式において、畳み込み符号が用いられている。誤り訂正能力が高いことと、効率的な軟判定復号法が適用可能なことが畳み込み符号が選定された主な理由である。

表2から、音声と誤り訂正へのビット配分は約3:2の割合で音声に多く割り当てられていることが分かる。符号化速度一定の条件では、音声符号化により多くのビットを割り当てると、量子化歪が軽減され符号誤りのない条件での品質が向上する。一方、誤り訂正符号化により多くの伝送ビットを割り当てると、伝送路での誤りが発生している条件であっても、品質の劣化を押さえた通話が可能となる。音声と誤り訂正符号への伝送ビット配分

をパラメータとして、合計の符号化速度が8kb/sという条件下での伝送音声のSNRを図5に示す¹³⁾。

誤り制御技術の一方の柱である残留誤りの影響を抑える音声復号法も重要な技術である。誤り訂正符号を用いても伝送路での誤りを完全に訂正できない場合があり、結果として伝送路での誤りが残留することが生じる。誤りが残留したままの受信ビット系列から復号した音声には、大きな歪みが発生することがあり、聴感特性が劣化する。この場合の聴感特性を改善するため、残留誤りを検出した場合には、復号音声のレベルを段階的に減衰させたり、前後の復号音声とのつながりを滑らかにする波形処理により聴感特性の劣化を抑える工夫を行っている。この処理は、符号誤り率が1%以上の劣悪な条件で特に有効である。

■制御信号伝送における誤り制御

制御信号伝送では、システム制御のた

表3 制御信号伝送における誤り制御の実例
 Table 3 Error Control Schemes for System Control

項目	自動車電話の制御信号					無線呼出し	パーソナル無線	MCA
	DoCoMo			AMPS	NMT			
	大都市方式・ 中小都市方式	大容量方式	PDC					
ビットレート	300b/s	100b/s 2,400b/s	11.2kb/s 933kb/s	10kb/s	1,200kb/s	200b/s	1,200kb/s	1,200kb/s
誤り制御	ARQ FEC (BCH符号, ゴールド符号)	ARQ FEC (BCH符号)	ARQ FEC (BCH符号)	ARQ FEC (BCH符号)	FEC (ハーゲル バーガ符号)	FEC (BCH符号)	FEC (ハーゲル バーガ符号)	FEC (ハーゲル バーガ符号)

めの情報を極めて高い信頼度(誤り率 10^{-6} 程度)で伝送する必要があるが、比較的大きな伝送遅延(数秒)が許容される。システム制御情報とは、例えば発着信号や位置登録信号、あるいはチャンネル指定信号に相当する。これらの信号は、伝送すべき情報はファイル転送やファクシミリデータと比較すると極めて少ないが、1つの通信路を複数のユーザが時分割的に使用するので、通信路のスループットが収容できるユーザ数を決めることになる。したがって、制御信号伝送用のARQ方式は、

- ① 見逃し誤り率を信頼度仕様以下にする
- ② 伝送遅延の仕様を満たす範囲でスループットを向上させる

ように設計される。これらのために、誤り検出のための符号と誤り訂正のための符号の2つの符号から構成される二重符号化が用いられ、制御シーケンスの中で意味のない情報や矛盾した情報を検出してこれを棄却する、などの工夫が行われる。また、特に②のために所定の回数でARQの再送を打ち切って、そのユーザに対しては切断処理に移行することによりチャンネルのトータルのスループットを向上させる。制御信号伝送に対する誤り制御方式の実用例を表3に示す。

■データ通信サービスにおける誤り制御

PDCシステムでは、ファクシミリ通信とMNPデータ通信(クラス4)が提供されている。

これらは、いずれも音声帯域モデムを用いるシステムであり、この帯域のトランスペアレントな通信路を前提としている。しかしPDCシステムでは、上述のよ

うに音声に対する情報圧縮によって11.2kb/sのビットレートで高品質音声伝送を実現している。

このビットレートは、ファクシミリやデータ通信用のモデム信号にとってはトランスペアレントな通信路を提供しないところが、ファクシミリやデータ通信の情報信号のビットレートは、0.3、2.4、4.8kb/sなどであり、これらは11.2kb/sよりも低い。したがって、送信側端末からのモデム信号をいったん復調して情報信号を再生し、無線区間をフェージング通信路に適した誤り制御方式を用いて伝送した後、再びモデム信号に直して相手端末へ送信すればよいことになる。この場合、無線区間の11.2kb/sと情報信号のビットレートの差を高信頼化のための誤り制御に割り当てることができる。PDCでは、これらをネットワーク機能(アダプタ)として提供している。

(1) ファクシミリ通信用誤り制御¹⁴⁾

ファクシミリ通信では、300b/sの手順信号と2,400/4,800b/s(最近では、より高速のモデムを用いる端末も出回っている)の画信号が伝送される。手順信号にはV.21モデムが、画信号にはV.27terモデムがそれぞれ用いられる。したがってファクシミリアダプタでは、ファクシミリ通信プロトコルを追跡して、これらのモデムを切り替えながら対向するファクシミリ端末を制御する(端末プロトコル制御機能)とともに、無線区間で対向するアダプタ間で情報信号の高信頼伝送のための誤り制御を行う。

ファクシミリ通信プロトコルには画信号に対する誤り回復機能がないため、通信路で誤りが生じると画素誤りやライン

欠落が生じる。これを回避するため、無線区間ではARQによる誤り制御を行う。ARQとして、フェージング通信路の『誤りの記憶』を有効に用いるWORM-ARQが開発された。このARQは、通常はSR-ARQとして動作することで高いスループットを狙うとともに、再送のために必要なバッファ(有限サイズ)が不足するとGBN-ARQとして動作する。

また、帰還通信路に誤りがあっても再送制御に混乱が起これないように工夫されるとともに、再送要求を連送することで時間ダイバーシチ効果を得ている。帰還通信路で伝送する必要のあるWORM-ARQのための制御情報は少ないので、制御情報は対向するチャンネルの送信フレーム(別のWORM-ARQが動作している)の一部を用いるpiggypacking方式となっている。

(2) MNPデータ通信用誤り制御¹⁵⁾

MNPデータ通信では通信の開始直後に端末モデム間でMNPのクラスに関するネゴシエーションが行われる。クラス4MNPのビットレートは2,400b/sである。端末モデム間で独自の誤り回復手順を持つ。したがって、MNPアダプタは無線区間をトランスペアレントに見せるように動作する。

具体的には、ネゴシエーション段階では通信に介入して、端末がクラス4で通信するようにネゴシエーションを成立させる。その後は、送信側アダプタで再生した情報信号を中継する。無線区間誤り制御には、FECとインタリーピングを併用する方式であり、誤り訂正符号にはBCH(15, 4)符号(3ビット誤り訂正)が用いられる。

無線区間をトランスペアレントに見せる方式の最大の問題は、クロックスリップにある。すなわち、端末モデムのクロックと移動通信ネットワークが用いるクロックとは非同期なため、アダプタ内モデムが再生するクロック速度は網側クロックから作られる2,400b/sと一致しない。このために、クロックスリップが発生すると、データの欠落または挿入が起こる。

MNPアダプタではこのことを防止するために、インタリーブで用いるバッファ内の情報ビット数を±1ビットの範囲で可変にし、ビット挿入や欠落をこの部分で調整する。また、バッファ内に情報ビットの有効範囲を示す制御情報を付加し、上記のBCH(15, 4)符号の外符号としてこの部分を多数回送信することで信頼度を高めている。

まとめ

移動通信における誤り制御方式について概観するとともに、最近の動向および実用システムにおける応用例について述べた。アナログシステム(第1世代)からデジタルシステム(第2世代)へと高度化が進む移動通信において、誤り制御の果たす役割も次第に大きくなりつつある。第3世代の移動通信システムといわれるFPLMTS(Future Public Land Mobile Telecommunication Systems)の中では、誤り制御はより積極的な使い方をされるものと予想される。それは、以下の2つの理由による。

第1には、加入者容量の大幅増を実現するためには周波数利用効率の飛躍的向上が必要であり、そのためには干渉の軽減が不可欠となる。通信路符号化を積極的に用いることで、耐干渉特性が改善され信号電力対干渉電力比(CIR)に対する要求値が軽減できる。これは、同一周波数の繰り返し距離を短くできることを意味する。通信路符号化の耐干渉特性は、従来から用いられてきた干渉軽減技術であるダイバーシチ受信と併用することでさらに高めることができる。

第2に、マルチメディア通信などサービスの高度化に対する要求が高まると、それに対応して無線区間の誤り制御の役割も増してくる。それに伴って、スループットの高いARQ方式や無線パケット、あるいはマルチチャネル通信など、より高度な通信路の使い方が求められるようになると思される。

そして、移動通信に限らず誤り制御の技術範囲も拡大していくと考えられる。

『通信システムのモデル』で述べたように、情報源符号化と通信路符号化を分けて考えるよりは、両者を一体的に設計し情報受信者の『感覚』を直接評価する傾向が強まってきている。このことにより、所要伝送帯域の低減と誤り訂正能力の改善を同時に実現し得る。今後の発展が期待される分野である。

文 献

- 1) C.E.Shannon: "A Mathematical Theory of Communications", Bell Syst. Tech. J., 27, pp. 379-423 (Part I), pp. 623-656 (Part II) (July 1948)
- 2) W. C. Jakes, Jr: "Microwave Mobile Communications", John Wiley & Sons (1974)
- 3) J. Hagenauer and R. Lutz: "Forward Error Correction Coding for Fading Compensation in Mobile Satellite Channels", IEEE J. Sel Areas Communications, vol. SAC-5, pp. 215-225 (1987)
- 4) L. Ahlin: "Coding Method for the Mobile Radio Channel", Proc. of Nordic Seminar on Digital Mobile Radio Communication, pp. 161-170 (1985)
- 5) T. Matsumoto and F. Adachi: "BER Analysis of Convolutional Coded QDPSK in Digital Mobile Radio", IEEE Trans. on VT., vol. VT-40, pp. 435-442 (May 1991)
- 6) H.Suda, T.Miki: "Error Correction Capabilities of BCH Codes with Interleaving in Rayleigh Fading Channel", Electronics Letters, vol. 24, pp.1044-1045 (1988)
- 7) D. Divsalar and M. K. Simon: "The Design of Trellis Coded MPSK for Fading Channel:Performance Criteria", IEEE Trans. on COM., vol. COM-36, pp. 1004-1012 (1988)
- 8) D. Divsalar and M. K. Simon: "The Design of Trellis Coded MPSK for Fading Channel: Set Partitioning for Optimum Code Design", IEEE Trans. on COM., vol. COM-36, pp. 1013-1021 (1988)
- 9) C. Schlegel and D. J. Costello, Jr: "Bandwidth Efficient Coding for Fading Channels:Code Construction and Performance Analysis", IEEE J.Sel Areas Communications, vol. SAC-7, pp. 1356-1368 (1989)
- 10) J. Du and B. Vucetic: "New M-PSK Trellis Codes for Fading Channels", IEE Electronics Letters vol.26, pp. 1267-1269 (1990)
- 11) N. Seshadri and C-E W. Sundberg: "Multilevel Trellis Coded Modulations for the Rayleigh Fading Channel", IEEE Trans. on COM., vol.COM-41, pp. 1300-1310 (1993)
- 12) D-L Lu and J-F Chang: "Performance of ARQ Protocols in Nonindependent Channel Errors",IEEE Trans. on COM., vol. COM-41, pp. 721-730 (1993)
- 13) 須田, 守谷: "8kbit/s TC-WVQ符号化の陸上移動通信への適用",信学技報, SP88-138, pp.31-37 (1989)
- 14) 伊藤, 澤井, 上林, 松本: "WORM-ARQを用いたデジタル移動通信G3ファクシミリ伝送",信学技報CS91-26, RS91-16, pp.69-74 (1991)
- 15) 伊藤, 澤井, 上林, 松本: "デジタル移動通信におけるMNPデータ伝送",1991年信学会秋季大会予稿B-224 (1991)