文字多重放送の伝送特性

正会員 山 田 宰[†]

テレビ多重文字放送の伝送特性に関して、デジタル信号を伝送するときの放送特有の問題点と、誤り訂正符号の訂正効果を中心に、我が国の文字放送の伝送パラメータ、サービス品質などについて述べる。

1. ま え が き

テレビ信号の垂直帰線期間に、文字・図形情報を多重伝送して、家庭のテレビ受像機に表示する文字多重放送は、1985年11月から放送開始して以来、現在では、NHK、各民間放送機関とも、サービスを全国規模に拡大しつつあり、受信機の普及も徐々にではあるが着実に増加している。

文字放送は研究を開始した10数年前から、文字・図形等の提示機能、符号系、伝送特性等、種々の検討が重ねられ、1985年3月の電波技術審議会の答申をもとに標準方式が定められ実用化に至った¹⁾²⁾。

特に伝送特性の問題については、ゴースト妨害、インパルス妨害等の多い地上系テレビアナログ伝送路にデジタル信号を通すことのむずかしさから、ビット

レート、波形整形、誤り訂正・検出などに関し、さまざまな検討がなされてきた³⁾。以下では、放送伝送路特有の問題点、我が国の文字放送の伝送特性の概要および文字放送サービスの伝送品質などについて解説する。

2. 文字放送信号の流れ

文字放送信号の一般的な流れを図1に示す。情報である各文字・図形は、伝送路の誤り訂正・検出符号化とは独立に効率良く符号化され、送出順に従って一定ブロック長に区切られパケット化される。この一定ブロック長の情報に対して、誤り訂正のためのパリティビットが、情報ビットをもとにして計算した演算結果として付加される。また、必要に応じて誤り検出（能力）を強化するために、この情報部にCRC（Cyclic

図1 文字信号の流れ

[†] NHK放送技術研究所

“Transmission Quality of Teletext” by Osamu Yamada (NHK Science and Technical Research Laboratories, Tokyo)

Redundancy Check) が付加される。

信号は、矩形 NRZ (Non Return Zero) パルス波形として出力されるが、各ビット間の符号間干渉を極力抑圧するため波形整形フィルタを通してテレビ垂直帰線期間に多重する。

テレビ放送信号は伝送路において、ビル反射によるゴースト妨害、自動車や工場からのインパルス妨害、あるいは、放送波中継での波形ひずみなどの妨害を受ける。これらの妨害は、従来のテレビ信号に対してはそれほど影響がない場合でも、デジタル信号である文字信号に対しては、直接、信号の劣化につながり、ビット誤り率を悪化させる原因になっている。

受信機で復調された信号は、垂直帰線期間の文字信号だけが分離され、“0”、“1”に識別された後、信号の区切りの識別信号、表示タイミング信号等の再生と符号の誤り訂正・検出がなされる。誤りがない場合には、受信機はその符号を解釈し、文字・図形としてブラウン管へ表示する。

3. 伝送パラメータ

3.1 デジタル信号の伝送

デジタル信号の波形 $g(t)$ とその周波数スペクトル $G(f)$ は、次式で示すフーリエ変換とフーリエ逆変換によって関係づけられる。 $g(t)$ は伝送路特性が $G(f)$ の伝送路に単位インパルスを与えたときの出力波形に相当する。

図 2 理想低域フィルタとそのインパルス応答

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

単位インパルス振幅 $1/f_0$ 、帯域幅 $f_0/2$ の理想低域フィルタを通過させたときの応答波形 $g_1(t)$ は、

$$g_1(t) = \frac{\sin \pi F t}{\pi F t} \quad \left(F = \frac{1}{T} \right) \quad (3)$$

となる(図2)。ただし、 $\sin 0/0=1$ とする。 $g_1(t)$ は標本化関数(あるいは sinc 関数)と呼ぶ。(3)式は $g_1(nT)=0$ (ただし、 $T=1/f_0$, $n=1, 2, 3, \dots$) であり、ナイキストの第1基準を満足しており、各パルス間の符号間干渉は生じない。

しかし、実際の伝送では理想フィルタの実現は困難であるし、時間領域での信号が $1/t$ のオーダーで無限に広がるため、カットオフ周波数(伝送特性)の少しのずれが大きな符号間干渉をひきおこすことになり、現実的ではない。このため、理想フィルタのカットオフ周波数を中心にコサイン 2 乗特性(奇関数ならよい)を重ねたフィルタを通し、なるべく信号波形が広がらないような特性とし、それほど正確な伝送特性の確保が必要ないようにしている。コサイン 2 乗特性は次式のようになる。

$$G(f) = \begin{cases} 1 & 0 \leq f < \frac{f_0 - f_x}{2} \\ \cos^2 \left(f - \left(\frac{f_0 - f_x}{2} \right) \right) \frac{f_0 - f_x}{2} & \frac{f_0 - f_x}{2} \leq f < \frac{f_0 + f_x}{2} \\ 0 & \frac{f_0 + f_x}{2} \leq f \end{cases} \quad (4)$$

$\alpha = f_x/f_0$ をロールオフ率と呼んでいる。

写真 1 群遅延により劣化した文字信号

実際の送出装置では、インパルス波形ではなく矩形波形を伝送することになるので、(4)式の $G(f)$ の特性を得るためには、(4)式を矩形波形の周波数スペクトルで割算した特性のフィルタ $G'(f)$ を通せばよい。

$$G'(f) = G(f) \frac{\pi f T}{\sin(\pi f T)} \quad (5)$$

ロールオフ率 $\alpha = 0.5, 0.75, 1.0$ 各々のフィルタ特性とインパルス応答を図 3 に示す。

3.2 ビット誤り率

伝送路が(1)で述べた理想特性であれば、受信側での“0”、“1”の識別点での符号間干渉はなく、ただ単なる熱雑音の妨害によるビット誤りのみを考慮すればよい。しかし、実際の伝送路では、ゴースト妨害、放送波中継段の群遅延特性の変化等により符号間干渉を生じ信号の識別余裕度が劣化する。写真 1 は、文字信号をクロック信号に同期させて見た時の信号劣化を生じた例であり、識別部分が目の形をしていることからアイパターンと呼んでいる。“0”、“1”信号を送出した時の定常値のレベルと、中心開口部の高さの比をアイ開口率と呼び、一般にデジタル伝送特性の品質を示す目安としている。当然、アイの幅も受信機のクロック信号のジッタの余裕度を示すもので、受信品質に関係してくる。

標準偏差 σ_n のガウス雑音における瞬時振幅値 n の確率密度は $(1/\sigma_n\sqrt{2\pi})e^{-n^2/2\sigma_n^2}dn$ なので、振幅値 A 以上を誤りとすると、誤り率 $P(\epsilon|0)$ は、

$$\begin{aligned} P(\epsilon|0) &= \frac{1}{\sigma_n\sqrt{2\pi}} \int_A^\infty e^{-n^2/2\sigma_n^2} dn \\ &= \frac{1}{\sigma_n\sqrt{2\pi}} \int_{A/\sigma_n}^\infty e^{-x^2/2} dx \\ &= Q\left(\frac{A}{\sigma_n}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

で表すことができる。信号“1”がレベル 1 であれば

図 4 ガウス雑音によるビット誤り率

$A=1/2$ となる。アイ開口率が劣化した場合のビット誤り率の上限は(6)式において、 $A'=\eta A$ として計算すればよい。なお、(6)式はこのままの形では計算できないが、数値計算で求めた数値表が用意されている。また、 Q に関する良い近似式は(7)式で与えられる⁵⁾。

$$Q(x) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \left(1 - \frac{0.7}{x^2}\right) e^{-x^2/2} \quad x > 2 \quad (7)$$

SN 比とビット誤り率の関係を図 4 に示す。

3.3 信号規格

我が国の文字放送では、テレビの伝送帯域幅が 4.2 MHz に制限されていること、なるべく高いビットレートが必要なこと、十分なアイ開口率とビット誤り率が確保できること、受信機側での安定な信号が簡単にできるようにビットレートを色副搬送波周波数とは m/n 倍の関係にあること等、詳細にわたる検討と室内・野外伝送実験の結果、ビットレート f_c とロールオフ率 α は、

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{8}{5} f_{sc} \quad (f_{sc}: \text{色副搬送波周波数}) \\ &= 5.73 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha = 0.6 \quad (9)$$

と定められた³⁾。

また、多重信号のレベルについては、オーバーシュートが妨害にならないように決めなければならない。 $\alpha = 0.6$ の時のオーバーシュート量は 18.3% になることがわかっている。さらに、受信機が包絡線検波の場合には、多重レベルが 80% 以上ではアイ開口率に差がないので、オーバーシュートの点からは、多重レベルは 80% 程度となるが、安全を見込んで 70% と定めている³⁾。

我が国および諸外国の文字放送信号パラメータの一

表 1 各国のテレテキストの諸元

	テレビ方式	テレビ帯域 (MHz)	ビットレート (Mb/s)	波形整形	データコーディング	1のレベル (%)	データライン長 (ビット)	ビット同期 (ビット)	フレームングコード (ビット)	誤り保護
イギリス方式 (UKteletext)	I/PAL	5.5	6.94	100%	2値 NRZ	66	360	16	8	制御：(8,4)ハミング 文字：パリティ
フランス方式 (Antiope)	L/SECAM	6.0	6.20	sin ² 波形	2値 NRZ	A/S=7/3	320	16	8	制御：(8,4)ハミング 文字：パリティ
北米方式 (NABTS)	M/NTSC	4.2	5.73	100	2値 NRZ	100	288	16	8	制御：(8,4)ハミング 文字：パリティ or HVパリティ
日本方式 (文字放送)	M/NTSC	4.2	5.73	60	2値 NRZ	70	296	16	8	(272, 190)符号

覧を表 1 に示す。

4. 伝送信号劣化の要因

文字放送信号を劣化させる主な要因としては、以下のものが挙げられる。

- ① 弱電界によるもの
- ② 群遅延特性劣化によるもの
- ③ ゴースト妨害によるもの
- ④ インパルス雑音など都市雑音によるもの

①は山かけでの受信では見受けられるが、図 4 からわかるように、かなり SN 比が劣化した場合でも、 10^{-3} 程度のビット誤り率は確保できるので、通常はそれほど問題とはならない。ただし、極端に SN 比が劣化した場合には、再生クロック信号はノイズによるジッタを含むことになるので、その分だけビット誤り率は図 4 より悪くなるものと考えられる。

②は放送波多段中継での問題である。3 章での検討は、伝送特性のうち位相特性は直線とみなして、振幅特性にのみ着目したものであった。しかし現実には、位相特性は必ずしも直線ではなく、信号エネルギーが低域側に片寄っている NRZ 信号では、特に低域での群遅延特性が信号波形に悪影響を及ぼすことが広く知られている。放送波中継では、周波数変換、スプリアス除去、残留側帯伝送、妨害波除去等のため多数のフィルタが入り、総合的な群遅延特性を劣化させている。なお、放送波多段中継 1 段当りの平均群遅延時間は 70 ns 程度といわれている⁶⁾。

一方、受信機の標準的な特性を仮定した各種シミュレーション結果からは、低域群遅延時間が 150 ns 以下でのアイ開口の差はそれほどでないが、これ以上の遅れになると急激にアイ開口率が低下することが報告されている⁴⁾。したがって、放送波多段中継では、2 または 3 段ごとの位相等化が必要になる。

③のゴースト妨害については、ゴーストが近接の場合は DU 比があまり大きくとれないことが多く、文字信号の劣化に直接つながるので特に注意する必要がある。ゴースト妨害の影響は、遅延時間、搬送波位相差、DU 比等によって様々に異なる。ある程度の DU 比が保たれている範囲内では、搬送波位相差が 0° のときアイ開口率が最も劣化する。直接波に対する反射波の比を R とすると、ゴースト妨害時のアイ開口率 η は、

$$\eta = \frac{1-R}{1+R} \quad (10)$$

で表せる。

ゴースト妨害は、通常のテレビ画面においても当然障害となるが、数 μs 以下の近接ゴーストでは、位相差によっては、かえって主観評価値が上るので、文字放送の場合は充分注意する必要がある。ただし、この近接ゴーストについては、受信側のアンテナの位置調整、ゴースト対策アンテナの使用、あるいは、チューナ部のシールド対策等により解決できる場合が多い。また、適応制御型のゴーストキャンセラも開発されている。

④のインパルス雑音によるビット誤りの程度は、妨害波の DU 比によって異なるが、受信機側の対策によって解決するのは現状では困難である。我が国の文字放送で採用している (272, 190) 符号*による誤り訂正方式は、特にインパルス雑音の影響に強い方式として開発されたものである⁷⁾。

上記以外にも受信機の問題として、アイ開口率を低下させる VSB-AM 伝送特有の包絡線検波時のひずみ、同期検波時の再生搬送波位相差によって生じる直交ひずみがあるが、詳細は省略する。

* 多数決論理回路で復号可能な (273, 191) 差集合巡回符号⁸⁾を 1 ビット分短縮したものの。

図 5 (272, 190) 符号の符号化回路構成

図 6 (272, 190) 符号復号回路の構成

質的には 11 ビット程度まで訂正能力を上げるようにしており、市販されている LSI にもこのアルゴリズムが組み込まれている⁹⁾。(272, 190) 符号の基本的な符号化回路と復号回路を図 5 と図 6 に示す。

文字放送の伝送信号とページデータの伝送例を図 7 と図 8 に示す。CR はクロック同期をとるための 16 ビットの 1, 0, 1, 0, ……信号であり、FC は信号の区切りを識別するための 8 ビットの一定パターン信号である。FC の妨害に対する誤り率特性が (272, 190)

5. 文字放送サービスの伝送品質

5.1 誤り訂正方式

放送波は、デジタル信号の伝送路としては最悪なものであり、しかも多数の受信者を対象とするため、誤りの影響も非常に大きい。したがって、受信機側でビット誤りを自動的に訂正する誤り訂正符号の採用が必須の条件になる。

我が国の文字放送では、外国のテレテキストには見られない強力な誤り訂正能力をもつ (272, 190) 符号を採用している。この符号は、実際に野外で収集したビット誤りパターンを用いた種々のシミュレーションの結果から、最適なものとして採用が決まったものである。

生成多項式は

$$G(x) = x^{82} + x^{77} + x^{76} + x^{71} + x^{67} + x^{66} + x^{56} + x^{52} + x^{48} + x^{40} + x^{36} + x^{34} + x^{24} + x^{22} + x^{18} + x^{10} + x^4 + 1 \quad (11)$$

で示される。

(272, 190) 符号の誤り訂正能力は、272 ビット中 8 ビットであるが、復号アルゴリズムの改良によって、9 ビット以上の誤りに対する訂正確率を増大させ、実

図 7 (272, 190) 符号の伝送パケット形式

図 8 ページデータの伝送

符号の誤り率特性に比べ劣っているため、送り側では、クロックとFCの位相を毎回同じ位相で送るようにし、受信側では、FC信号のタイミングの積分回路を利用した前方保護によってFCの受信を強化する。北米テレテキスト(NABTS)で用いられている1パケット中1ビットの誤り訂正能力をもつ水平・垂直パリティ符号と、(272, 190)符号、各々の誤り訂正能力を図9に示す。

(272, 190)符号で誤り訂正検出ができなかったパケット、あるいは、同期乱れなどによってパケット抜けを生じた場合は、16ビットCRCによって誤り検出ができる。(272, 190)符号とCRCの組合せによって、我が国の文字放送では、誤字・欠字がほとんど見られず、1ビットの誤りであっても重大な障害となるコンピュータプログラムを伝送するテレソフトウェア放送への適用も可能になっている。

5.2 サービスエリア

方式の最終決定に際して、実際に試験電波を発射し

図 11 東京地区測定地点 (36 ブロック 155 地点)

表 2 テレビ画質代表評価値に対する正受信率の地点数分布
(合計 256 地点)

		テレビ画質代表評価値 Q_v				
		2	3	4	5	計
正 受 信 率 R_r	$R_r = 100\%$		55.4	33.2	1.2	89.8
	$99\% \leq R_r < 100\%$	0.8	7.0	1.2		9.0
	$95\% \leq R_r < 99\%$		0.4			0.4
	$90\% \leq R_r < 95\%$		0.4			0.4
	$R_r < 90\%$	0.4				0.4
	計	1.2	63.2	34.4	1.2	100

東京・大阪のサービスエリア内を無作為に抽出した 256 地点で受信実験を行い，次式に示すページ誤り率の測定が NHK と民放各社によって行われた．図 10 にその結果を示す¹⁰⁾．

ページ誤り率

$$= \frac{\text{受信側でビット誤りを含んだページ数}}{\text{送出全ページ数}}$$

$$= 1 - \text{正受信率} \quad (12)$$

なお、ここでいう 1 ページとは、12 パケットで構成される最も一般的な文字画面である。図 11 は東京

地区における測定地域と地点数を、表2にはテレビ画質の総合評価値と正受信率地点数割合との関係を示す。この測定では、99%以上の正受信率が得られる地点数は98.9% (95%信頼区間96.9~99.8%) であることがわかっている。この結果から、テレビサービスエリアのほとんどの地点で文字放送の受信が可能であり、サービスエリアもほぼ同一であるとされている。

6. む す び

地上放送におけるデジタル伝送の基本的な問題点と、我が国の文字放送の伝送品質について解説的に述べた。

地上系の放送伝送路は、ゴースト等の妨害が多く、デジタル伝送路としては最悪である。アイ開口率等のデジタル伝送特性を余裕をもって設計したとしても、少々のアイ開口率の差には関係なく、どのような誤り訂正方式によってデータを保護するかによって、そのシステムの最終的な伝送品質が決定されてしまう。

欧米のテレテキストの方式は、どれも誤り訂正能力が低いことから、テレソフトウェア放送、業務用のテレテキスト等では難点があり、誤り訂正方式の再検討を強いられている¹¹⁾¹²⁾。

我が国の文字放送で採用している(272, 190)符号は、訂正能力が強力であり、復号回路も簡単なことから、文字多重放送以外のFM多重放送¹³⁾と衛星データ放送¹⁴⁾への採用が決まっており、地上ファクシミリ放送、光カード、SS (Spread Spectrum) 通信¹⁵⁾等への適用も検討されている。

(272, 190)符号は、文字放送の開発における大きな成果であり、上記のような文字放送以外への波及効果も見られるが、将来のさらに高い周波数を用いる衛星デジタル放送、劣悪な受信条件となる携帯あるいは自動車向けのデジタル放送では、ビット誤り率が 10^{-2} を越える伝送にも充分使用できる、より強力な誤り訂正符号の実用化が重要になってくると考えられ

る¹⁶⁾。

(昭和63年3月8日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 大井田ほか：“小特集、文字放送”，テレビ誌，40，1，pp. 2-45 (1986)
- 2) 沢辺ほか：“文字多重放送”，信学誌，70，1，pp. 37-58 (1987)
- 3) 上原ほか：“テレビ電波に多重するデジタル信号の伝送パラメータの決定”，NHK技術研究，36，1，pp. 28-59 (1984)
- 4) W. R. Bennett, 甘利訳：“データ伝送”，pp. 55-63，ラティス社 (1966)
- 5) B. P. Lathi, 山中訳：“ディジタル・アナログ通信方式”，pp. 168-170，ホルトサウンダース社 (1985)
- 6) 御園生，上原，長谷川：“放送波多段中継におけるVBL重畳パルス伝送特性”，テレビ学技報，2，21，IT 35-1，pp. 1-8 (1979)
- 7) 山田，柳町，磯部：“符号化伝送方式文字放送用誤り訂正方式の開発”，NHK技術研究，37，1，pp. 38-67 (1985)
- 8) E. J. Weldon, Jr.：“Difference-Set Cyclic Codes”，BSTJ，45，7，pp. 1045-1055 (1966)
- 9) 山田ほか：“(272, 190) 符号復号ICとその誤り訂正能力”，信学技報，IT 87-14，pp. 31-38 (1987)
- 10) 山田，村崎，田中：“文字放送サービスエリア確認の野外実験結果”，NHK技研月報，28，8，pp. 32-38 (1985)
- 11) 山田：“GLOBECOM'84への出席と欧米における文字・衛星放送技術の調査”，NHK技研月報，28，4，pp. 36-42 (1985)
- 12) B. C. Mortimer, M. J. Moore and M. Sablatash：“The Design of a High-Performance Error-Correcting Coding Scheme for the Canadian Broadcast Telidom System Based on Reed-Solomon Codes”，IEEE J., COM-35，11，pp. 1113-1123 (1987)
- 13) 黒田，山本，山田：“FM多重ディジタル伝送方式”，テレビ全大，9-20 (1987)
- 14) 斉藤，木村，河合：“衛星放送データチャンネルの誤り率特性とパケット伝達方式の検討”，信学技報，84，330，CS 84-190，pp. 95-101 (1985)
- 15) 浜津ほか：“SAWコンボルバのスペクトラム拡散通信への応用”，信学会スペクトル拡散通信研究会，SS 87-19，pp. 10-14 (1987)
- 16) 黒田，山田：“多数決論理素子で復号可能な符号に関する一考察”，信学技報，87，346，IT87-90 pp. 1-6 (1988)

やまだ おさむ
山田 宰 昭和42年，早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年，NHK青森放送局に勤務。46年，NHK放送技術研究所に転移し，現在に至る。以来，文字放送，FM多重放送等の研究・開発に従事。工学博士。正会員。