テレビジョン信号のデジタル伝送

日本電気株式会社 中央研究所

石 黒 辰 雄

現在、研究開発中のデジタル伝送システムの概要、予測符号化、線形変換ブロック符号化、 ΔM 、適応形符号化、フレームメモリーを用いた帯域圧縮、およびカラー信号の符号化等、各種符号化方式、および符号器復号器構成へのデジタル処理の利用、 $\Delta M/PCM$ 、 $\Delta M/DPCM$ デジタル符号変換に関する最近の研究開発状況について紹介する。

1. ま え が き

CCTV (Closed Circuit TV), CATV, テレビ電話等の画像通信が次代の通信として注目されている。従来の通信の主体であった電話に加え、テレビ信号伝送が一般の通信に広く使われるようになるとうとしている。特にテレビ電話は、将来全国的な網に発展する大規模なシステムであり、通信網を流れる主要な情報量になると予想される。このようにテレビ信号の伝送が一般に広がってくると、多数のテレビ信号を伝送できる容量を有し、しかも経済的な伝送路が必要となる。

現在、テレビ信号の伝送には、同軸あるいは電話ケーブルを利用した基底帯域伝送、FM によるマイクロ波中継、新しく開発された C-60M 超多重 FDM 伝送等、アナログ伝送が用いられている。しかし、将来の超多重伝送方式として研究開発が活発に進められているシステムのほとんどはデジタル伝送を基としており、将来デジタル伝送の比重が増してくることは確実である。

デジタル伝送の経済性は、遠距離伝送においては符号化能率が、近距離伝送においては符号器復号器のコストが第一の支配要素となる。デジタル論理 IC やメモリー素子における集積度の向上、機能当りの価格の低下はめざましく、このような部品技術の進歩は、従来、技術的経済的に非実用的と考えられていたような高度な処理をする帯域圧縮符号化方式の実用化を可能とし、また符号器復号器のコスト低減に対しても、有力な手段になる。

ここでは、現在研究開発されつつあるデジタル伝送

方式の概要についてまず紹介し、高能率符号化に関する最近の研究および符号器復号器におけるデジタル処理技術の利用について述べ、テレビ信号のデジタル伝送に関する現状を紹介する。

2. デジタル伝送路

デジタル伝送は信号の伝送周波数帯域が拡大される欠点を有するが、パルスの再生中継により雑音およびびずみに強くなる利点を有する。後者の利点は品質の悪い伝送路の活用、あるいは、アナログ伝送では利用困難な媒体の使用を可能とし、総合的には経済的なシステムが実現される場合が多い。一方、通信情報源が電話音声に加え、データ、ファクシミリ、テレビ電話、CCTV 等、多様な形態となってくるため、将来の通信網は伝送品質の維持が容易であり融通性に富むデジタル伝送、デジタル交換へ進んでいくと考えられている¹⁾。電話ケーブル 1 対に 24 チャンネル (帯域約 100kHz) の電話信号を 1.544Mb/s のパルス伝送で多重伝送する PCM-24 方式²⁾ は、PCM 化により既存の電話ケーブルで多重伝送が可能となる他に、近距離市外程度の伝送路として端局コストを含めて経済的なシステムになることが大きな利点であり、1965年に実用化されて以後、急速に普及している。より大容量の PCM 伝送路として、電話ケーブルで 96~120ch の多重伝送をするシステム、ユニット間シールド付ペアケーブルによるカラーテレビ信号の伝送可能な 100Mb/s のシステム³⁾、あるいは、FDM 伝送に用いられている標準同軸ケーブルを利用した 400~800 Mb/s の超高速 PCM 伝送方式⁴⁾等の研究開発が活発に進められている。

既存のケーブル、周波数帯の利用が飽和状態になりつ

"Digital Transmission of Television Signals" by Tatsuo Ishiguro
(Central Research Laboratories, Nippon Electric Co., Ltd., Kawasaki)

つある現在、将来の大容量伝送をまかなうシステムとして、準ミリ波、ミリ波、光等の新しい媒体の開発が必要となる。

準ミリ波伝送は 20GHz 程度の周波数で空間伝搬を使うシステムである⁵⁾。準ミリ波帯では降雨減衰等による伝搬損失が非常に大きいため、中継数が 4~6GHz のマイクロ波にくらべ 1 桁以上多くなり、雑音およびひずみの累積を避けるには PCM 伝送の適用が必然となる。マイクロ波 IC 技術による中継器の小形低電力化、信頼度の飛躍的な向上により、このようなシステムが実現可能となってきた。衛星通信の大容量化においても準ミリ波の利用の検討が行なわれている⁶⁾。

ミリ波伝送システムは 40~80GHz 帯域で導波管を通して伝送するもので、多チャンネルのテレビ電話、テレビ信号の伝送を目的としている。導波管伝送によれば安定で低損失の伝送路が得られるが、導波管の伝送ひずみが大きい。このような波形ひずみの影響を避けるためにはやはり再生中継可能な PCM 伝送が有利となる。ミリ波伝送は長距離伝送用として考えられてきたが、都市の局間を結ぶ洞道を利用した局間伝送用としての適用も検討されている⁸⁾。

光通信も将来の広帯域伝送路として期待されているもののひとつである。空間伝搬によるレーザー通信は簡易な通信装置に適しており、100Mb/s 程度の PCM 伝送ができ、カラーテレビ信号の伝送が可能な通信装置が開発されている⁹⁾。霧などによる回線断があるのが欠点であるが、数 km の伝送ができる。信頼性の高い伝送システムとしては、ガラスファイバー伝送路¹⁰⁾を用いるものが研究されている。半導体レーザーの連続発振が実現され、またガラスファイバーの伝送損失は着々と低減されている等、実用化への努力が続けられている。

上に述べたように、将来の大容量の伝送システムをめざして種々のシステムの開発が進められているが、デジタル伝送の導入が基となっているものが多く、これらのシステムの実用化によりデジタル伝送の比重が次第

に増していくことは必然といえる。表 1 に現在開発中のテレビ伝送の可能な伝送システムの概要を示す。

テレビ信号の場合、帯域圧縮技術の適用が容易となることもデジタル伝送の利点である。デジタル IC、メモリー素子の進歩により高度な帯域圧縮技術の採用が可能となれば、デジタル伝送はいっそう有効となる。

3. テレビ信号の符号化

3.1 テレビ信号の A/D 変換技術

テレビ信号を直線 PCM 符号化した場合、十分な信号対量子化雑音比 S/N_q を得るには少なくとも 7 ビット、長距離伝送規格を満たすには 8~9 ビットが必要とされる。この精度を標準化周波数 10MHz 程度で実現し得る超高速符号器として、電子ビーム符号管¹¹⁾、縦続形符号器¹²⁾が開発されたが、最近、使用部品数が縦続形にくらべ大幅に少なくなる帰還形符号器が技術的に可能になりその試作結果が数多く報告されている¹²⁾¹³⁾。図 1 は標準化周波数 10.8MHz、9 ビットの帰還形符号器の S/N_q 特性の一例¹³⁾を、写真 1 は符号器および復号器の外観を示す。帰還形は低速度の符号器に広く採用されている構成であり、テレビ信号用の超高速符号器も実用の時期に入ったといえる。

3.2 帰還ループを有する符号化法の統一的表示

テレビ信号の符号化能率を上げるための方法として、

図 1 カラーテレビ信号用 9 ビット帰還形符号器の S/N_q 特性¹³⁾

写真 1 カラーテレビ信号用帰還形符号器(左)および復号器(右)の外観

表 1 研究開発中のデジタル伝送方式の概要

方 式	伝 送 路	中継距離 (km)	符号伝送 速度 (Mb/s)	システム数 1 ルート	伝送容量 1 ルート (カラー TV ch)
PCM-100M ³⁾	ユニット間 遮蔽ベアケ- ーブル	1.5	100	24	24
同軸 PCM ⁴⁾	標準同軸ケ- ーブル	1.5	800	9	72
準ミリ波 ⁵⁾	空間伝搬	2~3	400	10	40
ミリ波 ⁷⁾	導 波 管	~20	800	26	208
レーザー ⁹⁾	空間伝搬	~3	120	1	1
C-60M	標準同軸ケ- ーブル	1.5	60MHz (アナロ グ伝送)	9	54

図 2 量子化誤差帰還モデルによる帰還ループを有する符号器の表示

プリエンファシス¹⁴⁾、量子化誤差帰還¹⁵⁾、予測符号化¹⁶⁾、direct-feedback¹⁷⁾等、種々の方法が提案され、おのおの符号化特性や設計法の検討が行なわれてきた。これらの方法はおのおの異なった手法のように見えるが、等価変換によりそれぞれ相互に誘導可能であることが示されている¹⁸⁾。たとえば符号器はすべて図 2 のようにプリエンファシス付量子化誤差帰還符号器の形で表示される⁶⁷⁾。このようなモデルを用いると種々の符号化法の特性の把握が容易になる。

予測符号化の場合 $H(z)$ は予測誤差を最小とするフィルターになっており、帰還ループ特性は $H(z)$ と一定の関係、 $F=1-H$ 、があるものであり、量子化雑音は量子化誤差そのもので、平坦なスペクトルとなる。帰還ループの伝達特性の設定に自由度を与え最適化を行なっても、DPCM の場合はわずかの効果しか得られない。標本化周波数が信号帯域にくらべ充分高い ΔM の場合には、 $F(z)$ を適当な形に設定することにより量子化雑音の帯域内成分を小さくすることができるので、評価 S/N 改善効果大きい。伝達特性が 1 次微分形の二重積分 $\Delta M^{(4)}$ は、単一積分に量子化誤差帰還を加えたものと解釈できる。

3.3 予測符号化

予測符号化は標本値 S_0 を予測するのに、前標本値 S_i ($i=1, 2, \dots$) より次式、

$$\hat{S}_0 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i S_i \quad (1)$$

で予測値 $\hat{S}_0$ を得、 S_0 と $\hat{S}_0$ との差を符号化する方式

である。DPCM は 1 標本値前の標本値 S_1 のみから予測するものであり理論的、実験的に多くの検討がなされている^{19)~22)}。DPCM は PCM にくらべ 1 サンプル当たり 2 ビット程度の節減になる。

予測に用いる標本数を増した場合の S/N_q については O'Neal¹⁹⁾、Habibi²²⁾ の検討がある。 S/N_q はライン予測を含めた 3 次の場合でほぼ飽和し、改善量は 2~4dB である。この値は 1 枚の画像について測定された統計量に合わせた予測係数を用いた場合であって、画像が異なった場合には S/N_q の改善効果は表 2 のように半減する。種々の画像を対象にした場合、ライン予測の効果は小さくなるが、ライン予測には縦方向のエッジ部の傾斜過負荷を軽減する効果があり、人物像の場合には全体としての画質改善に効果がある²³⁾。

予測符号化方式の S/N_q の理論的検討においては、符号化の評価尺度として RMS 誤差が一般に用いられている。しかし、傾斜過負荷やエッジビジネス等、局所的な画質劣化をすべて平均的電力で評価することは妥当ではない。

現実の設計においてもエッジ部の画質が不自然にならないように量子化特性を定めるので、RMS 誤差最小の設計とは若干異なってくる²⁴⁾。エッジ部の画質劣化の評価をどのような尺度で行なうかはむずかしい問題でありまだその方法は確立されていないが、符号化特性の表示はランダム雑音とエッジ部の評価の両方を表わすことが必要であろう。エッジの上に雑音パルスを加えてその検知限を測定すること²⁵⁾や、白黒パターンのエッジの位置に変動を加えてエッジビジネスを生じさせ、変動幅に対する検知限を調べること²⁶⁾等、定量的評価が試みられている。

3.4 線形変換ブロック符号化

線形変換ブロック符号化は、入力信号の標本値 S_i を n 個ずつ区切って 1 ブロックとし、 k 番目のブロックの標本値 $x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}$ に対し次式、

表 2 n 次 DPCM と線形変換ブロック符号化方式の信号対量子化雑音比

General Type	PCM	Defferential PCM				2-Dimensional Transfo-and Block Quantiza-	
Particular type	PCM	1st Order Horizontal	1st Order Vertical	3rd Order Predictor	2nd Order Predictor	Hadamard	Fourier
Figure 4(a) matched statistics	22.6	32.5	33.9	36.5	37.7	32.7	33.0
Figure 4(b) unmatched statistics	25.9	30.8	29.6	32.3	33.9	32.0	32.2
Delay	none	one point		one line		three lines	
Sensitivity to picture-to picture variation	none			large		small	small
Complexity of the technique	very simple			simple		moderate	moderate
Cost of coding	small			small		moderate	large

$$\begin{pmatrix} y_{k1} \\ y_{k2} \\ \vdots \\ y_{kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11}h_{12}\cdots h_{1n} \\ h_{21}h_{22}\cdots h_{2n} \\ \vdots \\ h_{n1}h_{n2}\cdots h_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{k1} \\ x_{k2} \\ \vdots \\ x_{kn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

で与えられる線形変換により得られる y_{ki} ($i=1, 2, \dots, n$) を符号化して伝送する方式である。 y_{ki} は、変換行列の要素 $[h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{in}]$ ($i=1 \sim n$) をおのおののタップゲインとする n 個のトランスバースルフィルタに信号 x_i を加え、その出力を n クロックごとに標準化して得られる標本値系列と等価であり、この方式は一種の周波数分割並列伝送方式といえる。信号電力の集中する成分にビット数を多く、電力の小さい成分にはビット数を少なく配分し、1 標本値当りの平均ビット数を低減することができる。

変換行列としては Hadamard 変換²⁷⁾あるいはその変形²⁸⁾、Fourier 変換²⁹⁾³⁰⁾、Kaluhnen-Loeve 変換³¹⁾等が検討されている。三者の中では Kaluhnen-Loeve 変換が最もよい S/N_q を示す²²⁾³¹⁾が、変換のための演算に複雑な係数の乗算が必要になり、ハードウェアの実現がむずかしい。Hadamard 変換は変換行列の要素 h_{ij} がすべて 1 または -1 であり、演算は加減算だけで行なえる。このような変換行列の単純化によっても、符号化の S/N_q の低下はわずかであり²²⁾³¹⁾、したがって実用的な方式として、Hadamard 変換が最も多くとり上げられている。1 標本値当り 2.5 ビットで白黒テレビを²⁸⁾、NTSC カラーテレビ信号を 4 ビットで符号化³²⁾する実験が行なわれている。

このような線形変換ブロック符号化の S/N_q 値は、定常信号を対象とし RMS 誤差を評価尺度とすれば、前述の予測符号化方式とほぼ同等になることが理論的に示されている³³⁾。同じ画像について計算機シミュレーションにより S/N_q を比較した結果の例を表 2 に示す²²⁾。わずかに、予測符号化のほうが S/N_q が良い結果になっている。

S_{pp}/N_{rms} の比較²²⁾

rms tion	1-Dimensional Transforms and Block Quantization		
Karhunen- Lcève	Hadamard	Fourier	Karhunen- Lcève
34.6	29.6	29.8	30.7
33.9	29.3	29.2	29.8
		1 line	
moderate	small	small	moderate
complicated	moderate	moderate	complicated
large	moderate	large	large

3.5 高能率符号化

信号が定常な場合、前節で述べた予測符号化あるいは線形変換ブロック符号化により、RMS 誤差最小となる量子化が行なえる。伝送能率をさらに上げるため、テレビ信号の特質を利用した圧縮方法が種々検討されている。

通常のテレビ信号の場合、DPCM の量子化レベルのおおのの発生頻度には相当の偏りがあり、伝送する符号に不等長符号を適用することにより伝送ビットレートの低減ができる。Chow は 4 種類のテレビ電話信号（背景の異なる人物像 3 種、文字ディスプレイ）について、Shannon-Fano 符号化の計算機シミュレーションを行ない、1 標本値当り平均 3.5 ビット程度で 24 レベルの DPCM (4.5 ビット相当) の符号伝送が可能であることを示した³⁴⁾。3 ビットの DPCM に Huffman 符号化を適用し平均 2.28 ビットに低減できることも報告されている²²⁾。

水平同期信号時間を画像情報の伝送に利用することも検討されている。水平同期信号は 1 水平走査時間の 15～16% を占めているので、同期信号を特定符号で表わすようにして時間圧縮し、空いた時間を画像情報の伝送に利用するようにすれば、6/7 程度の圧縮ができる。1MHz テレビ電話信号の DPCM において 6.3Mb/s を 5.25Mb/s に³⁵⁾、あるいは 7.4Mb/s を 6.3Mb/s に圧縮²⁴⁾する例がある。

局所的な最適化をはかるため複数個の量子化特性を設け、適当に設定した法則に従って符号化モードを切換えるようにした方式³⁶⁾³⁷⁾、信号のレベル変化の急な部分では標準化周期を短くし³⁸⁾、バッファメモリで伝送速度を平滑する方式、ビットレート一定で、標準化周波数を切換える方式³⁹⁾等により符号化能率の向上をはかることも数多く研究されている。

このような適応形符号化方式は、対象とする信号の性質、範囲あるいは画質の評価基準の考え方によって評価が異なってくる。いずれの方法によっても画像の形を限定するならば 1 標本値当り 1 ビット弱の圧縮が可能である。

3.6 ΔM

符号化能率は DPCM にくらべ少し劣るが、ΔM は符号器の構成が簡単であるのが特徴である。伝送路コストより端局コストが支配的になる短距離の簡易なデジタル伝送に適しており、たとえばレーザー通信装置に採用されている⁹⁾。構成の簡単さ、経済性に着目して、後で紹介するようにデジタルフィルタと組合せて、A/D 変換器として用いることも検討されている⁶⁶⁾⁶⁷⁾。

テレビ信号のように非常にゆるやかな変化が多い信号を単一積分 ΔM 符号化した場合、信号との相関の強い

図3 二重積分形、単一積分形および非対称量子化ステップ単一積分形 ΔM の S/N_q の比較⁴⁴⁾

量子化誤差波形を生じ、画面に“Contouring: 偽の輪郭”を生じる。“Contouring”の発生は ΔM の量子化ステップの正負の大きさに適度な非対称性を持たせることにより除かれ、また S/N_q も向上する⁴⁰⁾。従来よりよく用いられてきた S/N_q の理論式⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾は正負対称の量子化ステップを仮定しているので実情に適さない。非対称ステップ ΔM の量子化雑音スペクトルを与える理論式は Iwersen によって導かれており⁴³⁾、その結果は実際の動作をよく表わしている。

ΔM の S/N_q の改善法として、差信号回路に第2積分器を設ける二重積分形 ΔM がある⁴⁴⁾。量子化雑音の帯域内成分が抑圧されることによる“Contouring”の防止、 S/N_q の改善効果では前述の非対称 ΔM よりすぐれている。図3に非対称単一積分 ΔM および二重積分形 ΔM の S/N_q の計算値を従来の単一積分 ΔM の理論値と対比して示す⁴⁴⁾。量子化ステップは充分な傾斜追従性を有するよう大きく選んだ場合の S/N_q 値である。 ΔM は傾斜過負荷を生じると著しいエッジビジネスを生じるが、信号の最大傾斜を制限することによりエッジビジネスを大幅に低減することができる⁴⁵⁾。二重積分形 ΔM において生じるオーバーシュートも同時に防止できる。

ΔM の符号パターンによって量子化ステップの大きさを変える可変ステップ ΔM は、傾斜追従性あるいは S/N_q を改善する有力な方法である。Abate はガウス信号に対しては同符号が連続すると比例的に量子化ステップが大きくなる場合、有効なことを計算機シミュレーションで示した⁴⁶⁾。Bosworth は同様の可変法則でテレビ電話信号の符号化を行ない⁴⁷⁾、大久保は計算機シミュレーションで、画像の符号化の評価を行なっている⁴⁸⁾。量子化ステップを同符号の連続に対し指数関数的に増減する方法 (HIDEM は2倍および1/2とするもの) の増減比の最適化について Jayant は検討し、増加は1.5、減少は2/3のとき S/N_q が最も良いことを示した⁴⁹⁾。

3.7 フレームメモリーを用いた帯域圧縮

フレームメモリーを用いれば圧縮率の大きい帯域圧縮伝送方式が可能となり、古くから種々検討されてきたが実用的な装置とは考えられていなかった。しかし近年、テレビ電話信号の伝送のためコスト低減に対する強い要求ができたこと、およびメモリー素子の進歩により、実用的な価格でフレームメモリーが構成できるようになってきたため、再び注目されるようになってきた。テレビ電話信号では、急激な画面転換が少なく、フレーム予測の適用に有利であると考えられることもひとつの理由であろう。

最も単純な方法は、フレームメモリーに記憶した画像を繰返し再生する“コマ落し”、あるいは、走査線単位、画素単位で画面の一部の情報を補充する (replenish) 等種々の形が考えられる⁵⁰⁾。このような方法によれば、伝送情報量は繰返し使用する回数分の1になり、高い圧縮率が容易に達成される。しかし、被写体の速い動きに対しては不連続感を生じ、また画素単位の補充では画像の輪郭部の乱れを生じる。

上のように一定の規則で補充せず、画像の動きによって生じるフレーム差信号の振幅が、ある閾値を越える画素の情報だけを伝送するようにした、条件付きの補充方式 (conditional replenishment) によれば、動きに対する品質の改善あるいは圧縮率の向上ができる。この場合、情報の発生量が不均一になるためバッファメモリーが必要であり、制御回路も複雑になるが、1標本値当たり1ビット程度まで帯域圧縮可能とされている⁵¹⁾⁽⁵²⁾。

人間の目は動く画像に対しては視力が低下するという性質を利用し、動きの大きい画面は標本化周波数を下げて空間的な水平方向の解像度を下げて情報量を圧縮し、静止している画像は補充方式で情報量を減らす方法もある⁵³⁾。また動画に対しては、偶数 (または奇数) フィールド信号を前後の奇数 (または偶数) フィールド信号からの内挿で合成するようにし、垂直方向の解像度を下げる方式もある⁵⁴⁾。後者の方式によれば、走査方向の標本化周波数は変わらないので DPCM 等の任意の符号化方式の信号に適用できる利点がある。条件付き補充方式にくらべ圧縮度は小さいが、メモリー容量が1/2フレームでよいので装置の価格は低く、また DPCM 等のディジタル伝送路とタンデムに使用でき、システム構成上の融通性に富む、などの利点がある。

その他、フレーム繰返し法で帯域を半減したフレーム間の和および差を伝送するようにして動きのなめらかさを改善する方式⁵⁵⁾、あるいは、画素間予測とフレーム間予測を切換える方式⁵⁶⁾も検討されている。

3.8 カラーテレビ信号の符号化

周波数多重化されたカラーテレビ信号は、副搬送波周

波数近傍に集中したスペクトルを有するので、DPCMを直接適用することはできない。したがって、輝度信号および色信号を分離し基底帯域信号に復調した後、個々に符号化を行なっている。Limb らは 1MHz 帯域のカラーテレビ電話信号を 6.3Mb/s (Y 3.5bit/sample C_1, C_2 0.5bit (line 順次)) で DPCM 符号化する検討をしている⁵⁷⁾。各成分をおおの ΔM 符号化する場合の検討もなされている⁵⁸⁾。Golding は NTSC カラーテレビ信号を Y, I, Q 信号に分解する過程で標本化周波数を Nyquist rate 以下に下げ、楕形フィルターを用いて周波数インターリーブされた輝度信号と色信号成分の分離を行なう方式を提案している⁵⁹⁾。標本化周波数を Y 信号 6MHz, I 信号 2MHz, Q 信号 0.6MHz に下げているが、楕形フィルターを用いるため垂直方向の解像度は劣化する。

複合カラーテレビ信号を基底帯域に分解しておおのを個別に符号化する方式では、分解合成過程で色びずみを生じることが欠点になる。Hadamard 変換のような線形変換ブロック符号化方式では、色信号成分が含まれる成分に対するビット数配分を増すことだけで複合カラーテレビ信号を直接符号化できる。1 標本値当りの平均ビット数は白黒信号の場合よりも約 1 ビット多くなる³²⁾。

4. 符号器復号器におけるデジタル処理の利用

4.1 デジタル処理の符号器への応用

端局装置のコストの比重が大きくなる近距離伝送においては符号器復号器 (codec) の経済性が重要となる。また将来、数多くの codec が設置されるようになった場合安定性、信頼性、保守の容易さ等も重要な問題となる。精度、安定性、保守検査の容易さの点ではデジタル処理が有利であることは明らかであるが、コストの面でもデジタル化は有効な手段となる。

DPCM 符号器復号器をアナログループで構成した場合の系統図を図 4 (a) に示す。同図 (b) は積分器のみをデジタル化した場合、同図 (c) は符号器のループ全体をデジタル化した場合の構成を示す。このような、デジタル化の第一の利点は、積分器のデジタル化にある。量子化レベルの誤差および積分回路において生じる誤差および雑音は、復号器出力において低域成分の増幅された雑音になって現われ、微小な誤差でも画質劣化を生じる⁶⁰⁾。積分器のデジタル化により誤差は実質的に皆無にでき、D/A 変換器に対する要求精度が大幅に緩和される⁶¹⁾。可変ステップ ΔM にデジタル積分を用いる試みもなされている⁶²⁾。

第二の利点は A/D 変換器をループ外に出すことによ

(a) アナログループ構成

(b) 積分器をデジタル化

(c) デジタルループ構成

図 4 DPCM 符号器のデジタル化

る。この場合、A/D 変換器に要求される精度は若干高くなるが、変換時間は 1 標本化周期すべてが与えられるので低速動作でよくする。このことは標準テレビ信号の場合には特に有効になる⁶³⁾。適応形符号化における量子化特性の切換えや、高次の予測フィルタの実現が容易になることも、デジタルループの大きな利点である。

Hadamard 変換の演算も最初はアナログ処理が用いられた³²⁾が、係数の誤差による画質劣化を避けるため現在ではデジタル処理が用いられている⁶⁴⁾。 n 次の Hadamard 変換の演算を (2) 式の行列演算で実行すると n^2 回の加減算が必要であるが Fast Hadamard 変換の計算法を用いれば $n \log_2 n$ 回の加減算で済み、一般に採用されている。Fast Hademard 変換器の構成を単純化し加算器の数を減らす一方法として、縦続形構成がある⁶⁵⁾。

上に示したようなデジタル処理回路は MSI の普及により適度な規模で実現できる。デジタル素子の価格が最近数年の間に 1 桁近く下がった結果、符号器のコストの中の符号化処理のデジタル回路の占める割合は非常に小さくなり、コストの大部分は A/D および D/A 変換器で占められる。LSI 技術の普及が進めばデジタル回路のコストはいっそう下がることが期待される。

4.2 A/D 変換へのデジタル処理の応用

(a) Goodman の ΔM /PCM 変換器

(b) ΔM /PCM 変換器の等価構成

図 5 ΔM /PCM デジタル符号変換器の構成⁶⁶⁾

帰還形符号器の実現により テレビ信号用の変換器も実用的なものができてきたが、なお相当高価なものである。A/D 変換器のコストを下げるひとつの方法として、 ΔM 符号器で 1 ビット符号化し、デジタル処理により ΔM 符号から PCM 符号あるいは DPCM 符号を得ることが考えられている。

Goodman は図 5 (a) のように ΔM 信号をデジタル積分することにより PCM 信号を得、トランスバースルフィルタにより ΔM 量子化ステップ内のレベル内挿を行なう方法を提案した⁶⁶⁾。このデジタル処理は図 5 (b) のように LP 特性を有するトランスバースルフィルタと積分器の縦続接続と等価であり、 ΔM の復号器をデジタル系で構成したものといえる。図 6 に ΔM /PCM 変換による A/D 変換器の S/N_q を、トランスバースルフィルタのタップ数をパラメータとして示す。トランスバースルフィルタのタップ数を増し LPF の遮断特性をよくなるほど S/N_q は高くなり、 ΔM の S/N_q に近づくと、一方、ハードウェアの構成は複雑化

図 6 ΔM /PCM および ΔM /DPCM 符号変換方式の S/N_q (横軸 R は ΔM の標準化周波数と PCM または DPCM の標準化周波数の比⁶¹⁾)

図 7 ΔM /DPCM デジタル符号変換⁶⁷⁾

する。

図 5 (b) のデジタル LPF の出力は直線 DPCM 信号であり、図 7 のように量子化誤差帰還非直線 PCM 符号器で符号化すれば、非直線 DPCM 符号器が得られる⁶⁷⁾。この場合、 ΔM の標準化周波数 f_s の DPCM 信号を周波数 f_r で標準化するため折返し雑音を生じるので、デジタルフィルタの特性は f_r の整数倍の周波数において、少なくとも 2 次のゼロを有することが望ましい。このような特性を実現する関数として $\{(1-z^{-R})/(1-z^{-1})\}^n$ の形が用いられている。 R は f_s と f_r の比である。図 7 に DPCM 復号器出力における ΔM の量子化雑音に対する S/N_q を $N=3$ の場合について示す。 $N=3$ の場合 $R=8\sim 12$ で充分な S/N が得られることがわかる。

5. む す び

最近 2, 3 年の研究報告を中心に、符号化方式および符号器復号器に関する概要を述べた。符号化、帯域圧縮の問題は 20 年にわたる歴史を有するが、デジタル伝送路の実用化に近いこと、また、テレビ電話、CCTV 等、テレビ信号伝送の需要が現実化されてきたことなどを背景として、この分野の実用化をめざした多くの研究が行なわれ、有用な成果が出されている。デジタル論理素子および記憶素子の導入は、高度な符号化、帯域圧縮の信号処理を可能とし、また、経済化への有力な手段ともなっている。これらの研究の中から真に有用な方式、装置が生まれ、将来の画像通信の発展が促進されることを期待したい。

(昭和 47 年 6 月 30 日受付)

(参 考 文 献)

- 1) 横井：総合通信網と画像データ通信，昭 46 年電気四学会連大予，144
- 2) 近距離 PCM 特集号，研究実用化報告，14，9 (1968)
- 3) 田崎，藤崎：PCM-100M 方式の伝送特性，信学会通信方式研究会資料，CS 70-8 (1970. 4)
- 4) 荒谷ほか：800 Mb/s 同軸多値 PCM 伝送方式の基本検討，研究実用化報告，19，6 (1970) 1181
- 5) 高田：準ミリ波 PCM 中継方式について，信学会通信方式研究会資料，CS 70-37 (1970. 7)
- 6) 進士：国内衛星通信方式の一考察，信学会通信方式研究会資料，CS 71-132 (1972. 2)
- 7) 宮内：W-40G ミリメートル波導波管伝送方式，昭 47 年信学全大論文集，771
- 8) 野田ほか：洞道を利用したミリ波市内導波管線路，信学会通信方式研究会資料，CS 71-90 (1971. 11)
- 9) 上野ほか：包絡線変調によるレーザー通信方式，信学会通信方式研究会資料，CS 71-10 (1971. 5)
- 10) 中原ほか：光ケーブル伝送方式，信学会通信方式研究会資料，CS 71-82 (1971. 11)

- 11) J. O. Edson, et al: Broadband Codecs for an Experimental 224 Mb/s PCM Terminal, Bell Sytem Tech. J., **44**, Nov. (1965) 1887
- 12) T. Ohira, et al: Experimental Results of Ultra High Speed Feedback Coder, IEEE, ICC-71, 22E
- 13) 金子ほか: CTV 用帰還形符号器, 昭46年信学全大論文集, 1531
- 14) R. A. Bruce: Optimum Pre-Emphasis and De-emphasis Networks for Transmission of Television by PCM, IEEE Trans., **COM-12**, Sept. (1964) 91
- 15) E. G. Kimme, et al: Synthesis of Optimal Filters for a Feedback Quantization System, IEEE Trans., **CT-10**, Sept. (1963) 405
- 16) R. E. Graham: Predictive Quantizing of Television Signals, IRE Wescon Conv. Rec., Pt 4 (1958) 147
- 17) R. C. Brainard, et al: Direct-Feedback Coders, Proc. IEEE, **57**, 5 (1969) 776
- 18) 原島ほか: エンファシスと帰還をともなう量子化方式の統一的な最適設計, 信学会通信方式研究会資料, CS 70-118 (1971. 3)
- 19) J. B. O'Neal, Jr.: Predictive Quantizing Systems for the Transmission of Television Signals, Bell System Tech. J., **45**, May-June (1966) 689
- 20) 梅田ほか: 画像信号に対する非線形 Δ PCM 量子化特性, 信学会通信方式研究会資料, CS 69-56 (1969. 12)
- 21) 飯島ほか: 指数型, 対数型および双曲線型 DPCM におけるテレビ電話信号の画像品質, 昭45年信学全大論文集, S. 9-13
- 22) A. Habibi: Comparison of n th-order DPCM with Linear Transformation and Block Quantization Techniques, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 948
- 23) 青木: テレビ信号の予測符号化, 昭46年信学全大論文集, 1523
- 24) R. P. Abbott: A Differential Pulse-Code-Modulation Coders for Videotelephony using Four Bits Per Sample, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 907
- 25) 樋下ほか: 画像信号のデジタル変調における量子化雑音の主観評価実験による一検討, 昭45年信学全大論文集, S. 9-10
- 26) 石田: エッジビジネスの検知限, 信学誌, **54-A**, 11 (1971) 620
- 27) W. K. Pratt, et al: Hadamard Transform Image Coding, Proc. IEEE, **57**, 1 (1969) 58
- 28) 芝田ほか: 直交変換によるテレビジョン信号の PCM 方式, テレビ誌, **24**, 2 (1970) 99
- 29) H. C. Andrews, et al: Television Bandwidth Reduction by Encoding Spatial Frequencies, J. SMPTE, **77**, 12 (1968) 1279
- 30) G. B. Anderson, et al: Piecewise Fourier Transformation for Picture Bandwidth Compression, IEEE Trans., **COM-19**, 2 (1971) 133
- 31) A. Habibi, et al: Image Coding by Linear Transformation and Block Quantization, IEEE Trans., **COM-19**, 1 (1971) 50
- 32) 芝田ほか: カラーテレビ信号直交変換 PCM 装置の試作, 信学会通信方式研資料, CS 70-47 (1970. 7)
- 33) 似島: 線形変換符号化と予測符号化, 信学誌, **53-A**, 2 (1970) 97
- 34) M. C. Chow: Variable-Length Redundancy Removal Coders for Differentially Coded Video Telephone Signals, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 923
- 35) J. L. Hullett, et al: A Coding System for the Digital Transmission of TV Phone Signals, ATR, **5**, 2 (1971) 27
- 36) W. Kaminski, et al: An Edge-Adaptive Three-Bit Ten-Level Differential PCM Coder for Television, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 944
- 37) A. H. Frei, et al: An Adaptive Coder/Decoder for Television Signals, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 933
- 38) E. F. Brown: A Sliding-Scale Direct-Feedback PCM Coder for Television, Bell Sytem Tech. J., **48**, 5 (1969) 1537
- 39) 田中ほか: テレビ信号の一帯域圧縮方式に関する検討, 研究実用化報告, **19**, 11 (1970) 2067
- 40) 石黒ほか: 映像電話信号用定差変調器, 信学会通信方式研究会資料, CS-69-32 (1969. 7)
- 41) H. Van de Weg: Quantizing Noise of a Single Integration Delta Modulation System with an N-Digit Code, Philips Res. Rep., **8**, (1953) 367
- 42) J. B. O'Neal: Delta Modulation Quantizing Noise: Analytical and Computer Simulation Results for Gaussian and Television Input Signals, Bell System Tech. J., **45**, 1 (1966) 117
- 43) J. E. Iwersen: Calculated Quantizing Noise of Single-Integration Delta-Modulation Coders, Bell System Tech. J., **48**, 7 (1969) 2359
- 44) 飯島ほか: TV 信号用 2 重積分形 Δ M の Granular Noise のスペクトルと S/N 比, 信学会通信方式研究会資料, CS 72-13 (1972. 5)
- 45) 大島ほか: TV 信号用 Δ M におけるエッジビジネスの一改善法, 信学会通信方式研資料, CS 72-14 (1972. 5)
- 46) J. E. Abate: Linear and Adaptive Delta Modulation, Proc. IEEE, **55**, 5 (1967) 298
- 47) R. H. Bosworth, et al: A Companded One-Bit Coder for Television Transmission, Bell System Tech. J., **48**, 5 (1969) 1459
- 48) 大久保: 画像信号のデルタ変調に関するシミュレーション実験, テレビ誌, **26**, 3 (1972) 188
- 49) N. S. Jayant: Adaptive Delta Modulation with a One-Bit Memory, Bell System Tech. J., **49**, 3 (1970) 321
- 50) R. C. Brainard, et al: Subjective Effects of Frame Repetition and Picture Replenishment, Bell System Tech. J., **46**, 1 (1967) 261
- 51) F. W. Mounts: A Video Encoding System with Conditional Replenishment, Bell System Tech. J., **48**, 7 (1969) 2545
- 52) J. C. Candy, et al: Transmitting Television as Clusters of Frame to Frame Differences, Bell System Tech. J., **50**, 6 (1971) 1889
- 53) J. O. Limb, et al: Exchange of Spatial and Temporal Resolution in Television Coding, Bell System Tech. J., **50**, 1 (1971) 191
- 54) J. O. Limb, et al: A Simple Interframe Coder for Video Telephony, Bell System Tech. J., **50**, 6 (1971) 1877
- 55) 宮原ほか: テレビ信号のフレーム時分割 2 チャンネル多重伝送方式, 昭47年信学全大論文集, 1758
- 56) 阿知葉ほか: テレビ電話信号のフレーム間符号化実験装置の試作, 信学会通信方式研資料, CS 72-15 (1972. 5)
- 57) J. O. Limb, et al: Digital Coding of Color Picturephone Signals by Element-Differential Quantization, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 992
- 58) 沢田: CTV 輝度, 色度信号個別符号化方式, 信学会通信方式研資料, CS 71-119 (1971. 12)
- 59) L. S. Golding, et al: Frequency Interleaved Sampling of Color Television Signal, IEEE Trans., **COM-19**, 6 (1971) 972
- 60) 大島ほか: TV 信号用 DPCM codec における構成要素精度の画品質に及ぼす影響, 信学会通信方式研究会資料, CS 71-7 (1971. 5)
- 61) 石黒: デジタル方式によるテレビ信号の符号化, 昭46年電気四学会連大予, 237
- 62) 金子ほか: テレビ電話信号の高品質 Δ M 伝送, 信学会通信方式研究会資料, CS 72-12 (1972. 5)
- 63) P. Kaul: Differential PCM Encoding of TV Signals using a Digital Loop, IEEE ICC-70, 2-16 (1970)
- 64) 大平ほか: デジタル式 8 次アダマール変換による標準カラーテレビ信号符号化装置, 信学会通信方式研資料, CS 71-136 (1972. 3)
- 65) 宮田ほか: 縦続形アダマール変換による画像伝送帯域圧縮, 信学会通信方式研究会資料, CS 71-9 (1971. 5)
- 66) D. J. Goodman: The Application of Delta Modulation to Analog-to-Digital Encoding, Bell System Tech. J., **48**, 2 (1969) 321
- 67) T. Ishiguro, et al: A Nonlinear DPCM Codec Using Δ M/DPCM Code Conversion with a Digital Filter, IEEE ICC-71 (1971)