低ビットレートデジタル VTR の実験

高橋 孝夫†

福田 督也†

吉岡 浩†

町田 征彦†, 正会員 森尾 稔†

あらまし NTSC 信号をサブナイキストサンプリングと DPCM により 28.6 Mbps に圧縮し、VTR にデジタル記録再生した。記録再生方式はスクランブルド NRZ および積分検出を採用した。ランダムエラーは誤り訂正符号により訂正し、ドロップアウトはフレームメモリーを用いて修正した結果、家庭用としては十分な再生画質が得られている。

1. ま え が き

従来、VTR の PCM 化については、テープ消費量、回路技術の複雑さ等の点で疑問視されることが多かったが、IC 技術等の進歩により局内の他の TBC 等の設備がデジタル化されるとともに、ついに数社からデジタル VTR が発表される段階に至った。これらは主としてダビング時に画質が劣化しないという特性を狙ったものであるが、一方、画質をある程度犠牲にして、ローコストで低ビットレートのデジタル VTR も実用化される時代が来ると思われる。

低ビットレートデジタル VTR においては、まず帯域圧縮を行いテープ消費量を減らすことが必要となるが、録画再生による誤りは逆に増長することになる。したがって、効率の良い帯域圧縮および誤り訂正あるいは修正の技術の開発が急務となる。また、高密度デジタル磁気記録再生技術の進歩が必要であるのはいうまでもない。

本実験では低ビットレートデジタル VTR に対するひとつのアプローチを試みた。サブナイキストサンプリングと DPCM を用いて NTSC 信号を 28.6 Mbps に圧縮した。誤りについては、誤り訂正符号を用いるとともに訂正しきれないドロップアウト等を DPCM の持つエラーの伝搬特性を用いて探し、フレームメモリーにより修正している。テープ消費量は従来の家庭用 VTR より多くなったが、家庭用等には十分な再生画質が得られ、家庭用 VTR を用いたデジタル VTR の可能性が確認された。一方、画質の向上や隣接トラック間のクロ

ストークに対する対策等、今後の課題も多く残され、以下に報告する。

2. 実験機の概要¹⁾

実験機の構成を図 1 に、各諸元を表 1 に示す。ビデオは 7 ビットでサンプリングし、その帯域圧縮はサブナイキストサンプリングと和差分離 DPCM と称する方式を用いている。ビデオ・オーディオとも、同一の誤り訂正系を利用しているが、訂正後に残る誤りは、ビデオでは 1 フレーム前から、オーディオでは前値または平均値を用いて補間している。記録方式はスクランブルド NRZ とした。VTR は市販の家庭用 VTR を使い、ドラム径は変えずにドラムおよびテープ速度を 2 倍にして利用した。テープ・ヘッド相対速度が 14 m/s、記録ビット幅が 0.5 μm となる。ヘッドギャップ長は 0.4 μm である。トラックピッチを 30 μm 、トラック幅を 29 μm とし、市販のテープ L-500 にて 1 時間の録画再生が可能である。サーボ回路、記録回路、再生等化回路等は VTR 内に内臓したが、ビデオ信号のデジタル処理部は別に設け、VTR とはシリアルデータ、クロック、サーボ用基準信号等を受け渡ししている。

3. 帯域圧縮方式

3.1 サブナイキストサンプリング

NTSC 信号のサブナイキストサンプリングの手法としては、YC 分離を必要とせず Y 信号の水平方向解像度が劣化しない方式としてサンプリング位相を 2 ライン毎に反転させる 2H PALE 形²⁾を採用した。この時のサンプリング点の空間配置は図 2(a) のようになり、サンプリング周波数を $2f_{sc} \pm 1/4 f_H$ (f_{sc} はサブキャリア周波数、 f_H は水平走査周波数) としたのと類似してお

† ソニー株式会社

"An Experimental Low Bit Rate Digital VTR" by Takao Takahashi, Tokuya Fukuda, Hiroshi Yoshioka, Yukihiko Machida, Minoru Morio (SONY Corporation, Tokyo)

図 1 デジタル VTR の基本構成
Block diagram of digital VTR.

表 1 試作デジタル VTR の諸元
Format of experimental digital VTR.

サンプリング周波数	$2f_{sc}$ ($=7.14\text{ MHz}$)
量子化ビット数	7ビット
帯域圧縮方式	和差分 DPCM
誤り訂正方式	水平垂直パリティによる訂正
誤り修正方式	1フレーム前より修正
オーディオ信号	サンプリング 28.8 kHz 量子化数 12ビット
ビットレート	28.6 Mbps
記録ビット幅	$0.5\text{ }\mu\text{m}$
テープ・ヘッド相対速度	14 mps
ヘッドギャップ長	$0.4\text{ }\mu\text{m}$
トラック幅, ガード幅	$29\text{ }\mu\text{m}, 1\text{ }\mu\text{m}$
記録変調方式	スクランブルド NRZ

(f_{sc} はサブキャリア周波数)

(a) サンプリング点の空間配置

(b) $2H$ 補間フィルター

図 2 サブナイキストサンプリング

Sub-nyquist sampling.

(a) [Spatial sampling pattern of sub-nyquist sampling.

(b) $2H$ interpolation filter.

図 3 和差分 DPCM

Sum-difference separation DPCM.

り, サンプリング後の折り返し成分は Y 成分と C 成分との間に混入する. この折り返し成分は図 2 (b) に示す $2H$ の補間フィルターで高周波成分のみ $2H$ 前から補間することにより除去される.

3.2 和差分 DPCM

実験機では, サブナイキストサンプリングされた信号を DPCM によって 4 ビットに圧縮した. ライン内 DPCM を用いると 4 ビット伝送では過負荷, エッジビジネス等による劣化が著しいため, サブナイキストの方式と垂直方向の線形変換³⁾および DPCM を組合せた図 3 に示す和差分 DPCM を用いた. この方式では図 2 (a) の H_i と H_{i+1} のようにサンプリング点の合う 2 ライン間の線形変換としての和と差をとることにより, おのおの成分を別々に予測している. 図 3 (a) のように和分は 1 サンプル前の値で予測されるため予測精度が高

く、非線形圧縮器の出力レベル値を下げて精度を向上させることができた。差分については、C成分とYの低域における垂直方向に変化する成分を予測するために、2サンプル前から予測している。圧縮器は $-255 \sim +255$ の入力値に対して、 $0, \pm a_1 \sim \pm a_7$ ($a_1 \sim a_7$ は自然数であり画質によって決める)の15レベルを出力し、次に各々のレベルを(0001)~(1111)の4ビットに割り当てる。この方式では各成分の予測誤差の大きい部分で垂直解像度の劣化するのが欠点となっている。

3.3 画質評価

まず量子化ビット数は、家庭用または工業用程度の画質とA/Dコンバーターの低価格化を考慮して7ビットとした。次に2H PALE形サブナイキストサンプリングについては、折り返し成分がYとCの間に混入するためYの高域およびCの垂直および斜め方向解像度の劣化が避けられず、例えば文字、斜線等が二重に見えるが、これは図2(b)におけるHPFを高次にすることで改善している。和差分離DPCMについては、ライン内DPCMと比較して特にエッジビジネスによる劣化が大幅に改善され、4ビットの画質としては高品質のものが得られたが、予測精度の低い部分に対しては2H単位で劣化が生じ、さらにサブナイキスト方式と相まって強調されることが大きな画質劣化の要因となっている。また、これらの結果としてエッジや緩やかな変化のある平坦部においてフリッカーが知覚され、今後の検討課題となる。

以上、総合的に評価を行うと、改善すべき点も残されてはいるが家庭用程度としては十分な画質を得ることができ、装置が簡単であることも含めて、一般家庭用、工業用に充分受け入れられる特性を持っているものと思われる。

4. 誤り訂正・修正

4.1 誤り訂正方式

誤り訂正方式の設計に際しては、ビットレートを上げずにブランキング区間を有効利用して複雑な時間軸の変換は行わないこと、DPCMの誤り伝搬特性を考慮して誤りのないラインを誤訂正しないこと等を方針とした。その構成を図4に、符号の性能を表2に示す。2Hの垂直パリティは水平パリティの持つ誤り検出機能により、1H内の誤りブロック数を調べて、その数が多いとドロップアウトとみなして、そのラインのみ訂正しているが、さほど機能していない。実験機の訂正前のランダムエラーレートは $10^{-5} \sim 10^{-6}$ となっているので、ほぼ完全に訂正されている。訂正後のランダムエラーレートは $10^{-8} \sim 10^{-10}$ と推定される。

図4 誤り訂正系の符号構成
Structure of error correcting system.

表2 符号の性能
Ability of error correcting code.

	H 方 向	V方向
符号の種類	バースト誤り訂正符号	偶数パリティ
生成多項式	$(x^{6l} + x^l + 1)(x^{3l} + x^l + 1)$	$x^{2H} + 1$
符号長 n	$56l$	$42H$
情報長 k	$48l$	$40H$
インターリーブ長	$l=8T=32$ ビット	$2H$
訂正可能ランダム誤り	32ビット	$(2H)$
訂正可能バースト誤り	96ビット	$2H$

4.2 誤り修正方式

実験機の誤り訂正系では、ドロップアウト等の長いバースト誤りに弱いため、訂正不能のドロップアウトや誤訂正による誤りは画像の相関性を用いて修正した。誤りの検出には新たにパリティを付加することなく、DPCMの誤り伝搬特性を利用して効率を上げている。すなわち図3(a)のコーダー内にあるデコーダーループより局部復号信号の最終値を抜き出し、図4の同期区間の一部に挿入して送出する。再生側では、この伝送されてきた最終値とデータから復号した最終値とを比較し、一致しない場合は誤りが生じたと判定し、図5に示すように1フレーム前のデータを用いて色相だけ反転し、2H単位で補間する。

この方式はDPCMのデコーダーの持つ積分特性を利用してするため、誤りはほぼ完全に検出されるが、動きの激しい画像に対してはフレーム補間による劣化が目立つ。補間データは帯域圧縮方式との関連により決まるが、実験機ではサブナイキストサンプリングを行っているため、ライン間あるいはフィールド間で隣接する走査線からの補間ができずフレーム補間としたが、さらに検討を要する。なお、フレームメモリーは帯域圧縮された4ビット伝送ラインに入れられるため、1Mbits程度で構成できる。

図5 誤り修正方式
Error concealment.

一般的に帯域圧縮を行うほど、修正するサイズが大きくなり、劣化は激しくなるが、 $2H$ 程度の修正では特に問題はなく、一般家庭用、工業用を目指すには十分な訂正、修正能力を得た。

5. デジタル磁気記録再生

図6に実験機の記録再生系の系統図を示す。記録方式としてはビットレートを上げずにロータリートランスによる低域遮断の影響を避けることのできるスクランブルド NRZ 方式を採用した。スクランブルされたデータで電流スイッチを駆動し、定電流記録を行う。検出方式は、識別点での SNR が良く、クロストークについても優れている積分検出方式⁴⁾を採用した。ロータリートランスによる低域遮断特性の影響を受けて失なわれた低周波成分は、アナログ DC 再生⁴⁾により補償されている。クロック成分は再生データから抽出している。写真1に識別点(コンパレータ入力)でのアイパターンを示す。再生の SNR は識別点での信号の p-p 値を A 、雑音電力の rms 値を σ として、

$$A/\sigma \approx 21 \text{ dB}$$

程度である。ランダムエラーレートは $10^{-5} \sim 10^{-6}$ であるが、そのために必要な A/σ の比は $18 \sim 19 \text{ dB}$ であるから⁵⁾、理論値に比べて約 3 dB の劣化となっている。

6. 検出方式の比較

高密度記録のためにトラック密度を上げると隣接トラックからのクロストークが無視できなくなるが、クロス

写真1 アイパターン
Eye pattern.

トークが低域に分布することを考慮すると、検出方式として積分検出よりも低域の信号スペクトラムが小さい振幅検出、パーシャルレス ポンス PR (1, 0, -1) を採用した方がクロストークに対して有利となる可能性がある⁶⁾。そこで、トラック上の信号は白色ガウス雑音性を持つと仮定し、各検出方式の比較を行った。

いま、トラック幅 W のトラックから再生される信号の識別点でのアイの開きを一定となるよう等化した時、等化特性 $T(f)$ およびロールオフ特性 $R(f)$ を次式のようにとると各検出方式での信号スペクトラムは $T(f) \times R(f)$ と書ける。ただし f_b をビット周波数、 k をロールオフ率とする。

$$\text{積分検出: } T(f) = 1$$

$$\text{振幅検出: } T(f) = 2 \sin(\pi f / f_b) \cdot \exp(-j\pi f / f_b)$$

$$\text{PR}(1, 0, -1):$$

$$T(f) = 2 \sin(2\pi f / f_b) \cdot \exp(-2j\pi f / f_b)$$

$$R(f) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |f| \leq \frac{1-k}{2} f_b \\ \cos^2 \frac{\pi}{2k} \left(\left| \frac{f}{f_b} \right| - \frac{1-k}{2} \right) & \frac{1-k}{2} f_b \leq |f| \leq \frac{1+k}{2} f_b \\ 0 & \frac{1+k}{2} f_b \leq |f| \end{cases}$$

図6 記録再生系系統図
Block diagram of Rec/PB section.

図7 トラックずれ量対クロストーク
Tracking error vs. crosstalk.

次に、ガードバンドレスのアジマス記録で、アジマスを θ 、トラックずれ量を ε 、記録波長を λ とした時、隣接トラックからの再生出力に対しては伝達関数 $E_c(\lambda)$ がかかる。

$$E_c(\lambda) = \frac{\sin\{(2\pi\varepsilon \tan \theta)/\lambda\}}{(2\pi\varepsilon \tan \theta)/\lambda}$$

そこで、アイの開きの二乗対雑音（クロストーク）電力の比の目安として、

$$P_s = \{(W - \varepsilon)/W\}^2$$

$$P_n = \varepsilon^2 \int_0^\infty |R(f)|^2 \cdot |E_c(\lambda)|^2 \cdot |T(f)|^2 df$$

とした時、 P_s/P_n を計算することで各方式の相対的な比較が行える。 $\theta = 7^\circ, k = 0.5, \lambda = 14/f, W = 30 \mu\text{m}$ とした時の計算例を図7に示す。この時 $f_b = 28 \text{ MHz}$ としている。図7のように、この計算例では15%までのトラックずれでは積分検出が優れていることがわかるが、これは 7° のアジマスではクロストークがさほど低域に片寄らないことを意味している。そこで実験機では積分検出を採用し、さらに各トラックがオーバーラップをしないようにした。上記の結果のうち、アジマス 7° でのトラック間クロストーク量における積分検出方式の優位性はトラックずれ量に対する再生画質または誤り率という

形で実験によっても確かめられた。

7. む す び

本実験は帯域圧縮形デジタル VTR の実現性を試したものであったが、回路規模の割には良い画質および誤り特性が得られた。しかし、次のような問題点が提起されている。

- (1) 現状ではアナログ方式に比べてテープ消費量が多いが、アナログ方式ではテープ消費量は少なく、画質は向上する方向にあり、デジタル方式でも圧縮方式の改良により、より高画質化またはビットレートの低減が必要となる。
- (2) 高次の圧縮を行うと、変速再生が困難となる。
- (3) アジマスによるクロストーク低減効果はさほど期待できず、記録再生方式の改良が必要となる。

以上の問題に対して、IC 化によるより高度な圧縮技術の導入や、テープ、ヘッドを含めた記録再生技術の改良が成されれば高画質ダビング特性を持つ帯域圧縮形デジタル VTR が実用化されることが予想される。

本実験を進めるに際し適切な御助言をいただいた当社第2開発部長 木原常務、ビデオ事業本部 吉田部長、橋本課長、江口課長および関係各位に深謝致します。

(昭和55年12月25日受付)

(参 考 文 献)

- 1) 吉岡、高橋、福田、町田、森尾：28.6 Mbps NTSC 信号のデジタル磁気録画実験報告、テレビ学会録画研資、VR 42-2 (1980) 81-86
- 2) J. P. Rossi: Sub-Nyquist Sampled PCM NTSC Color TV Signal Derived from Four Times the Color Subcarrier, IEE Conference Publication, 166 (1978) 218-221
- 3) 飯沼、飯島、石黒、助、宗、西脇：NTSC-CTV 信号の直接フレーム間符号化装置、信学会通信方式研資、CS 76-44 (1976) 9-16
- 4) 中川、横山、片山：NRZ 記録における積分検出方式の検討、信学会磁気記録研資、MR 77-46 (1977) 19-26
- 5) 橋本：テレビ信号のデジタル記録、テレビ学会講習会資料、(1979) 補 15-23
- 6) 中川、横山、片山：NRZ 記録における検出方式の比較検討、信学会磁気記録研資、MR 78-13 (1978) 15-22

An Experimental Low Bit Rate Digital VTR

*by Takao Takahashi, Tokuya Fukuda, Hiroshi Yoshioka,
Yukihiko Machida, Minoru Morio*

A number of digital VTRs for professional use have recently been developed. Low bit rate VTRs are certain to be adapted to consumer and industrial use in the future because of their low cost, small size and high quality picture. This paper presents a possible approach to these VTRs.

An NTSC video signal is coded into 28.6 Mbps digital data using Sub-Nyquist Coding and a new type of DPCM. These data are then recorded on a video cassette tape by a consumer-type VTR. The packing density is 4.2×10^7 bits per square inch. The error rate is 10^{-5} to 10^{-6} . Random errors are corrected by an error-correcting code and dropouts are detected by an error propagation characteristic of DPCM and concealed by a frame memory. The quality of the reproduced picture is good.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 35, No. 7 (1981) 576~580