3. デジタル VTR に用いられる 高密度磁気記録技術

正会員 中 川 省 三†

1. ま え が き

デジタル VTR におけるデジタル記録の条件は、現用アナログ VTR 用のテープ、同材料のヘッドを用いて、テープ消費量を増すことなく、100~200 Mb/s のデジタル信号を記録することである。現用 VTR を 1 インチヘリカルとすると、この条件から 1 ビットを記録する面積を $40 \sim 20 \mu\text{m}^2$ にしなければならない。

1 ビットの記録面積を小さくすると、テープの粒状性ノイズや、再生アンプのノイズ等に対する S/N が低下するので、これらのノイズに対する S/N 低下がなるべく少なくなるように記録条件、変調方式（記録符号）等を選ばなければならない。

1 ビットの記録面積を小さくするには、ビット間隔（記録波長の $1/2$ と考えてもよい）を小さくするか記録トラック幅を小さくしなければならない。磁気記録ではビット間隔を小さくするよりも、トラック幅を小さくする方が再生信号の S/N 低下が少ないために、狭トラック化が主に行われる。

記録符号化方式や検出方式も、低密度で使用されているものと異なって、デジタル伝送で用いられているものが応用されている。

デジタル VTR の試作報告は数多くあるが、デジタル記録系の詳細についてはあまり報告されていないので、考え方を主に述べ、回路方式はほとんど省略した。また映像信号の符号化については特集*を見ていただきたい。

図1 デジタル VTR のデジタル信号記録再生系の構成

2. デジタル信号記録再生系の構成と動作

デジタル信号記録再生系全体の構成を図1に示す。記録すべきデジタル信号は変調器（記録符号器）によって記録に適した性質を持った信号に変換される。この変調器の出力は、2値信号の場合が多いが、3値信号の場合もある。記録ヘッドにこの変調器出力波形の電流を供給するのであるが、記録等化回路で主にヘッドの損失の周波数特性を補正している。

再生信号は記録再生の特性、再生ヘッドの損失の周波数特性等により高域の減衰した波形になり、また、巻線形のヘッドの微分特性を持った波形になる。図2に波形の一例を示す。次に等化回路によって、この信号は1か0かを識別するのに適した波形に等化される。等化された波形はビット位置では情報の“1”、“0”をはっきりと区別できる波形となっているので、クロック再生によってビット時刻に相当するパルスを作り、電圧比較をこのビット時刻で行えば、記録されたデジタル信号が再現される。

再現されたデジタル信号はジッターを伴っているので時間軸補正が必要となる。これには時間誤差の最大値に相当する容量のバッファメモリが用いられる。バ

† NHK 総合技術研究所

“High Density Digital Magnetic Recording Techniques in Digital VTR” by Shozo Nakagawa (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

* テレビジョンにおけるデジタル処理技術、本誌 1979 年 4 月号

図2 デジタル記録の各部波形の例

ッファメモリーの書き込み番地をリセットするには、デジタル記録信号中に同期用の符号を、例えば映像信号の走査線の始点ごとに挿入しておき、この同期符号を検出して書き込み番地をリセットする方法を用いる。バッファメモリーの内容は、外部同期から作られた読出し同期で読出すことによって、ジッターのない信号になる。

3. デジタル信号記録再生特性¹⁾

3.1 記録の深さとパルス幅

図3(a)に示すような記録電流を記録ヘッドに流すと、同図(b)に示すような磁化がテープ上に残る。このときデジタルVTRで用いられる高密度な記録では、磁化される深さは $1\mu\text{m}$ 以下であり、磁性層厚 $5\mu\text{m}$ に対してほんの表面層のみに記録されていることに注意していただきたい。記録されたテープ上を再生ヘッドが通過すると、ヘッドには磁化とはほぼ同じ形の再生磁束が誘起され、巻線にはこの磁束の時間変化率に比例した再

図3 デジタル信号の記録再生過程

図4 記録電流による再生パルスの変化

生電圧が発生する。この再生電圧のピーク値(E_0)と、電圧がピーク値の50%になるテープ上の長さに換算した幅(W_{50})がデジタル記録の基本特性である。 W_{50} はデジタル信号をどれくらいの間隔でつめて記録できるかの目安である。

図4には記録電流に対する E_0 、 W_{50} の変化の一例を示す。磁化の深さは記録電流に比例して大きくなるので、有効なテープ厚みが記録電流で決まり、記録電流に比例してパルス幅 W_{50} も大きくなる。したがって、テープに固有のパルス幅ではなく、記録したいパルス間隔に合った再生パルス幅が得られるように記録電流、すなわち磁化の深さを決めることになる。記録の方式によって最適な磁化の深さは多少異なるが、だいたいの目安はビット間隔の半分程度である。

3.2 テープ・ヘッド間スペース、ヘッドギャップ幅の影響

(1) 記録時の影響

記録電流を一定にし、記録時のテープ・ヘッド間スペースを拡げた場合の再生パルスの出力電圧と半値幅を測定したものを図5に示した。同図中の記録磁界半径(r)

図5 記録スペースの影響

図6 テープ・ヘッドの寸法関係

はヘッドからの記録磁界強度がテープの抗磁力 (H_C) に等しくなる磁力線の半径で、図6に示したものである。

スペースが大きくなると出力電圧が低下し、パルス幅はあまり小さくならない。このことから、スペースが大きくなると磁化される深さが小さくなるが、磁化反転の幅はあまり小さくならないことがわかる。

記録時のヘッドギャップ幅の影響を測定したものが図7で、ギャップ幅は記録時には悪影響が少なく、再生時にも同じヘッドを使用するなら、再生時の条件で決めれば良いと考えられる。

(2) 再生時の影響

再生過程は線形な過程であるから、正弦波記録のときのスペースロス、ギャップロスの式がそのまま成立する。

スペースが S_p のときの出力電圧 E_0 、パルス幅 W_{50} は次式のようになる²⁾。

$$E_0 = E_0(S_p=0) \frac{1}{1 + 2S_p/W_{50}(S_p=0)} \quad (2)$$

$$W_{50} = W_{50}(S_p=0) + 2S_p \quad (3)$$

ただし S_p : 再生テープ・ヘッド間スペース
 $E_0(S_p=0)$, $W_{50}(S_p=0)$: $S_p=0$ のときの E_0 , W_{50}
 パルス波形は $\arctan$ の微分波形とする。

ギャップロスによる再生パルスの変化は、スペースロスのように簡単な式にならない。ここでは周波数特性の形で表わされたギャップロスの式を示すのみにする。

図7 記録ギャップ幅の影響

$$L_{op}(f) = \frac{\sin(\pi g f / v)}{\pi g f / v} \quad (4)$$

ただし L_{op} : 再生ギャップロス
 v : テープ・ヘッド相対速度
 f : 周波数

4. デジタル信号の復調

4.1 等化

デジタル信号の伝送では等化後の波形としてビット干渉がなく、なるべく占有帯域幅の狭いパルス波形として、図8に示すような周波数スペクトラムを持った図9に示すような波形が用いられる³⁾。同図中 k_0 はローloff定数で0.5近傍の値が用いられることが多い。高密度なデジタル記録においても S/N の良い識別波形を得るために、このような波形に等化される。

また前にも述べたように再生ヘッドの巻線によって微分されるので、積分特性も等化回路の中に持たせる必要がある。

しかし、デジタル信号の記録では、必ずしも記録したのと同じ波形にしなくともデジタル信号が正しく再現できればよい。再生パルスをそのまま用いて、正または負のパルスをデジタル信号の1に対応させ、パルスなしを0に対応させても良い。この場合は記録前に1では記録電流を反転させ、0では前の電流を保持するように符号変換をしておけばよい。このような方法は変調方式として後に説明する。

$$R(f) = 1 \quad \left(0 \leq f \leq \frac{1-k_0}{2} \right)$$

$$= \cos^2 \frac{\pi}{2k_0} \left(f - \frac{1-k_0}{2} \right) \quad \left(\frac{1-k_0}{2} \leq f \leq \frac{1+k_0}{2} \right)$$

$$= 0 \quad \left(\frac{1+k_0}{2} \leq f \right)$$

図8 デジタル伝送に用いられる波形の周波数スペクトラム

図9 デジタル伝送に用いられるパルス波形

図 10 記録電流による S/N , 誤り率の変化

4.2 最適記録電流

ある一定のビット間隔で記録する場合に、記録電流を十分に小さくすれば再生パルスの半値幅はビット間隔よりも充分小さくなって、そのままでもパルス間の干渉はほとんどなくなる。しかし、そのような状態では記録深さが小さいために再生信号の S/N が悪く、また、わずかのテープの傷やゴミの付着によるテープ・ヘッド間のスペースの増大によっても記録磁界がテープに到達しなくなり、ドロップアウトが多く発生する。そこで、記録電流を大きくして再生パルスの半値幅がビット間隔よりもむしろ大きくなるようにし、パルス間干渉は再生等化回路によって補正した方が S/N 、ドロップアウト共良くなる。また、あまり記録電流が大きくなり過ぎると、パルス幅を小さくするための等化回路での高域の強調が大きくなり、 S/N が低下する。したがって等化後の S/N が最大になる記録電流がほぼ最適な記録電流となる。

図 10 には記録電流による S/N 、誤り率の変化の一例を示した⁴⁾。ドロップアウトによる誤りは記録電流が大きいほど少なくなるので、 S/N に余裕があるこの例ではビット誤り率も記録電流が大きいほど小さくなっている。しかしランダム誤りが影響しやすいブロック誤り率は S/N 最大点付近で小さくなっている。

4.3 デジタル信号の識別

等化された信号をオシロスコープの縦軸に入力し、横軸をクロックでトリガーして観測すると、図 11 に示すようなアイパターンが見られる。これはデジタル信号のパターンによって各時刻の電圧は様々な値をとるが、各ビットの時刻では 1 または 0 に相当する電圧に収斂しているために電圧波形の通らない範囲ができ、これが目

図 11 アイパターンの例

のような形に見えることからアイパターンといわれている。

デジタル信号を再現するには、このアイの中心の時刻で電圧がアイ中心の電圧より高いか、低いかを識別する。ビットの時刻を得るために、クロックが必要であり、これは再生波形から抽出される。また、アイ中心電圧を得るための回路が必要な場合もある。識別の時刻、電圧が不正確であると、ノイズ等によって誤りを起こし易くなる。

4.4 同期再生

クロック (ビット同期) は再生信号を両波整流したり、ゼロスライスしたりする等の方法によって、ビット周波数の線スペクトラムを発生させ、それを Q の高いタンク回路や PLL 等を用いて取り出す一般的な方法が用いられる。ただ機械的なヘッド走査を用いるデジタル VTR においては、クロックをジッターに追従させる必要があり、タンク回路の Q あるいは PLL の時定数をあまり大きくできない。そのために、信号中のクロック成分がある程度大きいことが記録符号に要求される。

デジタル信号はブロックに構成され、そのブロックの初めのビット位置を示すために数十ビットの同期パターンが付加される。この同期パターンは同期の誤りが起こりにくいものが選定される⁴⁾。

復調された信号はジッターを補正するために、ブロック同期によってリセットされるアドレスカウンタによって、バッファメモリに書込まれる。このときブロックの途中で長いドロップアウトがあると、クロックが中断してアドレスカウンタの位相がずれる。このために次のブロック同期までは再生信号が回復したにもかかわらず同期はずれのためにノイズ的な画像が再生される。この状態はクロックスリップといわれており、ブロック長を小さくすれば、このノイズを短くすることができる。

5. 記録密度と誤り率

デジタル記録における誤り発生原因を分類すると、表 1 のようになる。連続性ノイズは振幅分布がガウス分布であり、 S/N が 20 dB (1 デジタルレベル/rms ノイズ) であれば誤り率 10^{-7} が得られる。しかし、それよりも S/N が低下すると急に誤りが多くなり、例えば 3dB S/N が低下すると誤り率は $10^{-3.7}$ になる。一方、

表 1 デジタル記録の符号誤りの原因

符号誤りの原因	不連続性ノイズ (ドロップアウト)	<ul style="list-style-type: none"> テープの欠陥 テープ表面の傷 テープへのゴミの付着
	連続性ノイズ	<ul style="list-style-type: none"> テープ粒状性ノイズ ヘッドインピーダンスノイズ 再生増幅器ノイズ 隣接トラックからの信号の漏洩

図 12 記録密度による誤り率の変化 (概念図)

ドロップアウトによる誤りは記録密度に対して比較的ゆるやかに増加する。この様子を概念的に図 12 に示した。

連続性ノイズの S/N は、繰返し再生、ヘッドの特性のばらつき等、変動要因が多く、またスローモーション再生等を行うときトラッキングずれやテープ・ヘッドの接触の劣化も考慮すると数 dB の余裕が必要である。実用的な VTR としては、図 12 の両誤りの交点の少し左側に設計されることになる。

磁気記録では高密度化のためにビット間隔を小さくすると記録深さが小さくなり、1 ビットの信号が記録されるテープの体積はビット間隔の 2 乗に比例する。一方、トラック幅に対しては記録される体積は比例であるので、トラック幅を小さくする方が、ビット間隔を小さくするよりも S/N 低下が少なく、高密度化に有利である。

トラック方向の密度を上げようとしたとき問題となるのは、記録・再生間のトラッキングエラーと、隣接トラックからの信号の漏洩である。隣接トラックからの漏洩は低周波数で大きく、識別点の波形の低周波スペクトラムが少ない符号化方式が有利になる。

6. 記録符号化方式

高密度磁気記録の特性に適合させるように入力デジタル信号を変換するのが記録符号化である。また、その符号化に対応して再生等化、識別方法も決まってくる。記録符号化方式に必要な条件は次のようなものである。

- (1) 必要な最高周波数が低いこと。
- (2) 連続性ノイズに対する S/N が良いこと。
- (3) 隣接トラックからの信号の漏洩の影響が少ないこと。

(4) テープ・ヘッド間のスペース変動による特性変化の影響を受けにくいこと。

(5) クロック再生が再生信号のジッターに追従できること。

(6) 記録信号、識別点の信号の低周波成分が少ないこと。

前も述べたように、再生パルス幅を小さくするにはテープの磁化される深さを小さくしなければならない。したがって、必要な周波数成分が高いと S/N を良くできないし、ドロップアウトも多くなる。また高周波または短波長になるにしたがって記録・再生過程での損失も多く S/N が低下する。この信号周波数成分、 S/N は識別点での値である。

テープ・ヘッド間スペースの一時的な増大がドロップアウトであるが、スペースの増大はパルスレベルの低下のみでなく、パルス幅も変化するので、識別波形がその影響をなるべく受けにくい方式が良い。

VTR では回転トランスでヘッドとの電気的結合を行っているので、非常に低い周波数成分を通すことは困難である。したがって、記録電流にも直流成分や低周波成分がないことが好ましい。

今までにデジタル VTR 用として実験されている記録符号を表 2 にまとめて示した。また識別点での信号のアイパターンも同表に示した。以下に各方式を説明する。

(a) ミラースクエアコード⁶⁾

バイフェーズといわれる符号が低密度で使用されている。図 13 に示すように、ビットとビットの間に必ず反転があり、データが 1 の点でも反転がある。しかし、この符号では最小反転間隔がビット間隔の $1/2$ となり帯域を広く必要とする。この点を改良したのがミラーコードで、ビットとビットの間の反転を 0 が連続した所のみとしたものである。ミラースクエアコードはこのミラーコードを直流成分がないように改良したもので、1 が 2 個以上連続したときに最後の 1 による磁化反転をしたりしなかったりする。反転するかしないかは信号の直流成分がバランスするように決める。ミラーコードでは反転間隔が $1T$ 、 $1.5T$ 、 $2T$ のいずれかであり、反転が省略されたときは $2.5T$ または $3T$ となるので区別できる。

(b) 8-10 ブロックコード⁷⁾

図 13 ミラースクエアコードの波形

表 2 デジタル VTR に用いられる変調方式

方式名	記録側の変換則	特 徴	アイパターン
ミラーコード エアコード (Ampex)	ミラーコードの1が2つ以上続いたときに、最後の1による反転を直流成分のないように省略したり、しなかったりする。	<ul style="list-style-type: none"> ・直流成分なし ・2倍のクロック必要 ・反転の最大間隔が小さい 	
8-10 コード (IBA Sony Bosch)	10ビットの符号のうち1が5個、0が5個のもののみを選んで使用する。	<ul style="list-style-type: none"> ・直流成分なし ・アイパターンの位相方向が広い ・8ビットに対して10ビット必要 	
スクランブル インターリーブ NRZI (NHK)	入力記号をランダム化し、出力の2ビット遅延と入力との Mod 2 の和を出力する。	<ul style="list-style-type: none"> ・記録側に直流成分があるが、再生にはない ・高域成分が少ない ・3値の識別波形 	
3値パ ーシャル レスポ ンス (日立)	出力の2ビット遅延と入力との Mod 2 の和を作り、その信号と1ビット遅延との差を出力する。	<ul style="list-style-type: none"> ・記録・再生共直流成分なし ・記録信号が3値 ・3値の識別波形 	同 上

8ビットの信号は $2^8=256$ のレベルを表わしている。一方、10ビットの信号のうち5ビットが1である符号の組み合わせは $10C_5=252$ であり、ほぼ8ビットのレベル数に相当する。不足な4つは1が6個のもの2つ、1が4個のもの2つを割り当てる。このような変換はROMを用いたテーブルルックアップの方法で簡単に行うことができる。信号のうちの半数が1、他の半数が0であるから直流分を持たないことは明らかである。

(c) スクランブル、インターリーブ NRZI⁸⁾

まずスクランブルについて説明する。テレビ信号のようにフラットな部分の多い信号を自然2進符号化したデジタル信号は、特に上位のビットは同じ符号が長く続き直流分を多く持っている。このような信号をランダムな信号に変えて、直流通断の影響を少なくするのが、このスクランブルの目的である。スクランブルにはいくつかの方法があるが、ひとつの方法はM系列(シフトレジスタで容易に発生できる疑似ランダム符号)を Mod 2 加算(入力信号とM系列の EXOR)する。再生側では同じ系列を再度 Mod 2 加算することによって元にもどすことができる。

次にインターリーブ NRZI について説明する。図 14 がその変換器で、出力の2ビット遅延と入力の Mod 2 の和を出力する。図 15 は各部の波形を示したもので、再生された信号は1ビット遅延信号との和を作り、+1, 0, -1 の3値信号として識別される。その後 +1, -1 共1とする変換をすると、入力信号が再現される。このように再生ヘッドによる微分特性をそのまま利用しているのがこの方式の特徴であり、識別点の波形としてはやはり直流成分がなくなっている。この記録波形から識別点の波形までの特性は、デジタル伝送でいわれるパルシャルレスポンス(1, 0, -1)方式である。

図 14 NRZ 信号よりインターリーブ NRZI 信号に変換する回路

図 15 インターリーブ NRZI 記録方式の各部波形

(d) 3値パルシャルレスポンス方式⁹⁾

この方式は(c)の方式の記録電流に低周波成分が必要な点を改良したものである。図 14 の変換の後にデジタル的な微分を行い図 16 に示すような3値信号を記録する。識別波形としては(c)の方式と同じにするために、再生側に積分回路を必要とする。記録信号が3値となり、テープ上での1デジタルレベルが小さくなるので、 S/N は若干低下する。

図 16 3値パルシャルレスポンス記録波形

これら各方式の、識別点での信号スペクトラムを図 17 に示した。縦軸は表 2 に示した信号のアイ開口レベルを基準に示している。ミラースクエアコードのロールオフ定数を 0.7 としたのは、この値のときはほぼ S/N 最大になるためである。

6. ヘッド走査方式

デジタル VTR の実験は現用の VTR 機構をそのまま利用して行われているが、デジタル VTR に適したものではない。デジタル VTR でアナログの場合と違った条件は、第 1 にヘッド走査の切れ目が画面内にあってもバンディングにはならないので、ノンセグメントにする必要がないこと、第 2 に狭トラック化しなければならないので、トラッキング精度を良くする必要があることである。その他も含めて必要条件を以下に示す。

- (1) トラッキング精度を良くする (誤差 $5\mu\text{m}$ 以下が必要で、そのためにはトラック長が短い方がよい)。
- (2) 相対速度とチャンネル数の配分 (1 チャンネルでは無理と思われるので、2 またはそれ以上が必要であり、1 チャンネルの必要ビットレートが決まると、相対速度が決まる)。
- (3) 早送り時の再生 (早送り時にはヘッドは記録トラックを斜めに横切るが、1 つのトラックが再生されている時間が信号のブロックに比べて長い方が、同期が再生されないための画像の出ない期間が短くなる。このためにはトラック長はある程度長い方が良い。例えば 20 TV ライン以上が良い)。
- (4) カセット化が容易なこと (テープの巻き付け角が小さい方が良い)。
- (5) デジタル音声の記録 (ビデオのトラックの一部に入れ、その部分だけアフレコできること)。
- (6) 525/60, 625/50 テレビ方式の共用できる機構であること。

これらの条件を考慮したヘッド走査方式の検討および案を J. Baldwin (IBA)¹⁰⁾, C. Thompson (RCA)¹¹⁾, D. Dolby (Ampex)¹²⁾ らが報告している。いずれもセグメントヘリカルで、音声も映像と同じ走査ヘッドを用いて、トラックの端に記録するものになっている。テープの巻き付け角はカセット化を考慮して 180° から 270° になっている。

7. む す び

デジタル VTR に用いられている高密度デジタル記録技術について解説を行った。現用 1 インチヘリカル

図 17 各変調方式の識別点での信号スペクトラム

VTR と同じテープ消費量で、ほぼ 200 Mb/s のデジタル信号が記録できることが明らかになり、デジタル VTR に適したヘッド走査方式も提案されるようになった。

テレビ信号の符号化方式、VTR の方式が統一されてデジタル VTR が出現するのも近いと思われる。この解説がデジタル VTR を理解するうえでいくらかでも役に立てば幸いである。

(昭和 56 年 2 月 20 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 中川省三：未飽和 NRZ 記録の分解能，信学会磁気記録研究会，MR 68-22 (1968.11)
- 2) D. E. Spiliotis, J. R. Morrison: Theoretical Analysis of Saturation Magnetic Recording, IBM Journal, 10 (1966) 233
- 3) 星子幸男：データ伝送，共立出版 (1975) 29-33
- 4) 中川省三，横山克哉，片山浩誠，久保雅史：試作デジタル VTR の特性，信学会磁気記録研究会，MR 79-41 (1980.3)
- 5) 猪瀬：PCM 通信の基礎と新技術，産報 (1968)
- 6) J. C. Mallinson, J. W. Miller: Optimal codes for digital magnetic recording, The Radio and Electronic Engineers, 47, 4 (1977) 172-176
- 7) J. L. E. Baldwin: Digital television recording with low tape consumption, IBC (1978) 133-136
- 8) 中川省三，横山克哉，片山浩誠：A study on detection methods of NRZ recording, IEEE, MAG-16, 1(1980) 104-110
- 9) 三田誠一，江藤良純：パースナルレスポンス処理を用いた 3 値磁気記録方式の検討，テレビ学会技術報告，VR 38-3 (1979.12)
- 10) J. Baldwin: A Format for Digital Television Tape Recording, 15 回 SMPTE Conference (1981.2) 24-33
- 11) C. Thompson: Mechanical Tape Format Considerations for Digital Television Recording, 同上，(1981.2) 56-62
- 12) D. Dolby et al.: Formats for Digital Video Tape Recorders, 同上，(1981.2) 63-71