新しい 8-14 変調方式とその小型デジタル VTR への適用

正会員 上 原 年 博[†], 正会員 中 山 匡[†], 正会員 水 口 穂 高^{††}
正会員 柴 谷 弘 道[†], 正会員 関 口 卓 司[†], 正会員 大 場 吉 延[†]

A New 8-14 Modulation and Its Application to a Small Format Digital VTR

Toshihiro Uehara[†], Tadashi Nakayama[†], Hotaka Minaguchi^{††},
Hiromichi Shibaya[†], Takuji Sekiguchi[†] and Yoshinobu Oba[†]

Abstract We have developed an 8-14 channel coding suitable for high density recording for digital VTRs. Using this channel coding, which is a type of run length limited block code, 8-bit data is transferred to a 14-bit code, on the conditions that (1) the magnetic flux reversal length is from 2 to 7 clock intervals, and (2) the maximum absolute value of the DSV is 7. This newly-developed 8-14 channel coding has several merits, such as a narrow required frequency bandwidth, easy recording and reproduction equalizations, azimuth and overwrite recording, no error propagation to any other word, and error detection. This channel coding was applied to an NTSC composite digital VTR and a byte error rate of 7.5×10^{-6} has been obtained with a track width of $10 \mu\text{m}$ and a recorded wavelength of $0.76 \mu\text{m}$, which corresponds to a recorded density of $3.3 \mu\text{m}^2/\text{bit}$.

1. ま え が き

近年, 放送の高画質化, 高音質化を図るため放送機器のデジタル化が急速に進められ, VTR においても D-1, D-2 フォーマットがあいついで発表されている。

デジタル VTR は量子化ビット数で SN 比が決まることから高画質化可能で, デジタルダビングを繰

り返すかぎり SN 比が悪くならない利点を持っている。しかしながら, 磁気テープに記録する RF 信号帯域がアナログ VTR の数倍になることから, デジタル記録に適した高密度記録技術の開発が求められている。このための高密度デジタル記録技術のひとつとして, テープ・ヘッド系に適したデジタル変調方式の開発が重要である。

そこで, 今回我々は高密度記録可能な変調方式とし

キーワード: デジタル VTR, チャンネルコーディング, 8-14 変換符号, ブロック符号, DC フリー符号, ランレングスリミテッド符号 (LLC)

1990 年 3 月 22 日, テレビジョン学会技術報告, VIR '90-19 に発表

1991 年 8 月 29 日受付

[†] NHK 放送技術研究所 (〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-2329)

^{††} 池上通信機株式会社 (〒144 東京都大田区南蒲田 2-16-2, TEL 03-5703-7130)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories (1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157, Japan)

^{††} Ikegami Tsushinki Co. Ltd. (2-16-2, Minami-kamata, Ohta-ku, Tokyo 144, Japan)

て8-14変換符号を新たに開発し、コンポジットデジタルVTRに適用したので報告する。

本論文の2章ではテープ・ヘッド系に求められる変調方式の条件を示す。3章では8-14変換符号の選択理由、変換方法、およびその特徴を述べる。最後に、8-14変換符号をデジタルVTRに適用したときの記録再生特性について述べる。

2. テープ・ヘッド系に求められる 変調方式の条件

デジタルVTRに適した変調方式として現在までにS-NRZ(Scrambled Non-return to Zero)符号^{1)~3)}、8-9変換符号⁴⁾⁵⁾、8-10変換符号⁶⁾、8-14変換符号⁷⁾、M²(Miller Squared)符号⁸⁾など、数多くの方式が研究、実用化されてきた。

ここで、変調方式に求められる条件をまとめると以下ようになる。

(1) 最小磁化反転間隔(T_{min})が大きい

磁気記録再生系では記録波長が短くなるほど、種々の損失により出力、SN比が急激に低下するとともに、符号間干渉が大きくなり、符号検出時、振幅、位相余裕が小さくなる。

(2) 最大磁化反転間隔(T_{max})が小さい

リングヘッドを用いた再生系は微分特性を持つため、低域では周波数が低くなるにしたがって6dB/octで出力が低下し、SN比も悪くなる。また、記録波長が長くなるほどアジマス効果は小さくなり、隣接トラックからのクロストークが増える。

(3) 最大磁化反転間隔(T_{max})/最小磁化反転間隔(T_{min})が小さい

磁気記録再生系では、中域でのSN比が最も良い。したがって、 T_{max}/T_{min} を小さくして記録信号の比帯域を小さくするとともに、スペクトラムを中域に集中させることにより、記録再生イコライザの簡単化を図れるとともに、検出点において再生信号のSN比を高くできる。さらに、 T_{max}/T_{min} を小さくすることにより、セルフクロック、重ね書き特性も改善できる。

(4) DCフリー符号である

VTRは回転トランス、リングヘッドなどの微分特性を持つ素子を用いるため、直流成分を記録することも再生することもできない。これを解決するために、再生時に量子化帰還を用いてDCを再生する方法があるが、フィードバック回路を使うため、誤りが伝搬する。また、パーシャルレスポンスクラスIVを用いる方法もあるが、再生時にDC成分を必要としない利点があるものの、検出点でSN比が低下するとともに、再

生信号のノイズが2ビットの符号の識別に影響を与え、誤りが拡大する場合がある。

(5) 他のワードへ誤りが伝搬しない

VTRではリードソロモン(RS)符号を用いた誤り訂正が一般に行われている。この誤り訂正はワード単位であるため、あるワード内で発生したビット誤りが他のワードへ伝搬しないことが重要である。

(6) 検出窓幅(T_w)が広い

検出窓幅(T_w)が広いほど符号検出時の位相余裕が増える。磁気記録再生系の低域遮断、非線形歪みの影響を受けずに再生信号の検出窓幅を広くとれる符号化であることが重要である。

(7) 変換アルゴリズムが比較的簡単で、パラレル処理ができる

ハードウェアが比較的簡単に構成でき、LSIによる小型化、CMOSによる低消費電力化できることが望ましい。

3. 8-14変調方式

3.1 8-14変調方式の選択

2章で述べた(1)~(7)の条件を満足するブロック符号化による変調方式を検討した。

ブロック符号化は m ビットのデータ語を n ビットの符号語に写像するもので、符号系列中の同一ビットの連続数の最小値を d 、最大値を k とするとNRZL則では $(d, k; m, n)$ 符号と表される。また、符号系列中のビット“1”を+1、ビット“0”を-1として加え合わせた累積電荷(DSV)の絶対値の最大値は C で表される。ブロック符号化であることから以上の(5)、(7)を満足する。ここで、符号構成の自由度を増すために $m=8$ に設定した。また、(1)を考慮し $d=2$ とした。この条件下で(4)を可能とするための n の最小値を求めたところ14となった。さらに、(2)、(3)を考慮し、 k の最小値を求めたところ7となった。この条件下で低域成分を抑圧するために C の最小値を求めたところ7となった。

以上の結果、表1に示す(2, 7; 8, 14)符号で $C=7$ を満足するDCフリー符号が実現できた。

表1 8-14変換符号の諸元
Parameters of the 8-14 channel code.

T_{min}	T_{max}	T_{max}/T_{min}	T_w	DSV
$1.14 T_b$	$4.00 T_b$	3.5	$0.57 T_b$	± 7 以内*

T_b : データ語の基本ビット長

*符号語単位では ± 2 以内

図1 8-14変換に使用するコードの条件
Terms of codes used for the 8-14 channel coding.

3.2 8-14変調コードの生成方法

14ビットで構成できる 2^{14} 個のコードの中から図1に示すように、以下の(1)~(4)の条件を満足するコードを変調コードの候補とする。

- (1) 始まりの6ビット目までで同一ビットの連続数が5以下である。
- (2) 2ビット目から13ビット目までで同一ビットの連続数が2以上7以下である。
- (3) 終わりから7ビット目までで同一ビットの連続数が6以下である。
- (4) コード中の累積電荷(CDS)の絶対値が4以下である。

変調コードの候補の中から、図2に示すように、それぞれが256個の変調コードは持つ以下の(1)~(4)の条件を満足する4つの変調コードテーブルを作る。

- (1) “0”で始まり $CDS \geq 0$
- (2) “1”で始まり $CDS \geq 0$
- (3) “0”で始まり $CDS \leq 0$
- (4) “1”で始まり $CDS \leq 0$

それぞれ(2), (4)を満足する変調コードは、それぞれ(3), (1)を満足する変調コードの裏パターンである。

この4つの変調コードテーブルからの変調コードの選択手順を図3を用いて説明する。まず、次に選択する変調コードの最後のビットにおける累積電荷DSV2の絶対値が2以下になるように、すでに変換された直前の変調コードの最後のビットにおける累積電荷DSV1が-2のとき $CDS \geq 0$ である変調コードテーブル(1), (2)を選択し、DSV1が0のとき変調コードテーブル(1), (2), (3), (4)の中から $|CDS| \leq 2$ の変調コード群を選択し、DSV1が+2のとき $CDS \leq 0$ である変調コードテーブル(3), (4)を選択する。なお、すでに変換された直前の変調コードの終わりが“...11000000”である場合は、その変調コードは $CDS \leq -2$ であるため $DSV1 \leq 0$ となり、 $CDS \geq 0$ である変調コードテーブル(1), (2)を選択

図2 8-14変換コードテーブル
8-14 channel code table.

する。同様に、すでに変換された直前の変調コードの終わりが“...00111111”である場合は、その変調コードは $CDS \geq +2$ であるため $DSV1 \geq 0$ となり、 $CDS \leq 0$ である変調コードテーブル(3), (4)を選択する。次に、選択された変調コードテーブル、あるいは変調コード群から、すでに変換された直前の変調コードと次に選択する変調コードのつなぎ部分で同一ビットの連続数が2以上7以下となる変調コードを1つ選択し出力する。

以上の選択手順により、変換された符号系列中のどの部分をとっても同一ビットの連続数を2以上7以下で、しかもDSVの絶対値を7以下にでき、効率的に直流成分を除去できる。

ランダムな15,000ワードを入力し、以上の過程で生成した変調信号のDSVの生起分布を図4に、磁化反転間隔の生起分布を図5に示す。

図3 8-14変換におけるコードの選択方法
Code selection method in the 8-14 channel coding.

図 4 DSV の生起分布
Occurrence distribution of the DSV.

図 5 同一ビットの連続数の生起分布
Occurrence distribution of the consecutive identical bit numbers.

3.3 8-14 変調方式の特徴

表 2 に S-NRZ, M^2 , 8-14 変換の基本パラメータを比較して示す. 図 6 に 64 Mb/s の信号を S-NRZ, M^2 , 8-14 変換で変調したときのスペクトラムを比較して示す. 同じビットレートの信号を変調して記録する場合, 8-14 変換の最短記録波長は S-NRZ, M^2 の 8/7 倍になる. したがって, 所要帯域を変調信号の最短ビット反転周波数 ($1/T_{\min}$) で比較すると, S-NRZ, M^2 が 32 MHz であるのに対し, 8-14 変換はその 7/8 倍の 28 MHz となる. このように, 8-14 変換は最短記録波長, 所要帯域の双方について S-NRZ, M^2 よりも優れた特徴を持っている.

また, S-NRZ はスペクトラムが DC まで存在するのに対し, M^2 , 8-14 変換は DC フリーである.

$T_{\max}/T_{\min}$ は M^2 が 3, 8-14 変換が 3.5 であり, 8-14 変換は M^2 と同様スペクトラムが中域に集中するため, 記録再生等化が容易で, 重ね書きが可能となる.

表 2 S-NRZ, M^2 , 8-14 変換の基本パラメータ
Fundamental parameters of S-NRZ, M^2 and 8-14 code.

	S-NRZ	M^2	8-14 変換
符号化方式 (m, n) (d, k)	逐次符号化 (m, m) (1, ∞)	逐次符号化 ($m, 2m$) (2, 6)	ブロック符号化 (8, 14) (2, 7)
$T_{\min}$	T_b	T_b	$1.14 T_b$
$T_{\max}$	∞	$3 T_b$	$4 T_b$
$T_{\max}/T_{\min}$	∞	3	3.5
f_n	f_0	f_0	$0.875 f_0$
DC フリー	非 DC フリー	DC フリー	DC フリー
T_w	T_b	$0.5 T_b$	$0.57 T_b$
他のワードへの誤り伝搬の可能性	あり*	あり	なし
誤り検出	不可能	可能	可能

* 量子化帰還を行った場合

T_b : 被変調信号の基本ビット長

f_0 : 被変調信号のナイキスト周波数

f_n : 変調信号の最短ビット反転周波数

図 6 S-NRZ, M^2 , 8-14 変調信号のスペクトラム
Spectra of S-NRZ, M^2 and 8-14 modulated signals.

図 7 試作 VTR の信号処理系統図
Schematic diagram for the signal processing of the experimental VTR.

8-14 変換の検出窓幅は理想状態では S-NRZ にくらべ狭いが、8-14 変換は $T_{\max}/T_{\min}$ が小さく精度良く等化できること、最短記録波長が長く再生信号の SN 比を改善できること、符号間干渉を小さくできることなどを考慮すると、それほど大きなデメリットにはならない。

このように、8-14 変換は S-NRZ の低域特性、 M^2 の高域特性を改善した符号であるといえる。

さらに、 M^2 はあるワード内で発生した 1 ビットの符号の誤りが復号後最大 3 ビット伝搬し、後続するワードまで誤りが伝搬する場合があるが、8-14 変換はブロック符号であるため、あるワード内で発生した符号の誤りは、復号後そのワードを越えて伝搬することがないので、変調方式に起因するワード誤り率の増加はない。

また、8-14 変換は 14 ビットで表せる 2^{14} 個のコードのうちの 4.7% を変調コードとして使用しているので、変調コード以外のコードが再生されたときは誤りとして検出可能である。この誤り検出の特徴は、誤りを見逃すことがあっても、検出された誤りは 100% 誤りであることである。この性質を利用して消失誤り訂正を行うことにより、誤り訂正能力を高めることが可能である。

8-14 変換の変復調回路は、パラレル処理回路として LSI 化することができるため、大きさ、消費電力ともカメラ一体型 VTR への適用に制約を与えることはない。

4. 8-14 変調方式の小型 VTR への応用

4.1 試作 VTR の構成

試作 VTR の信号処理系のブロック図を図 7 に、諸

表 3 試作 VTR の諸元
Design specifications of the experimental VTR.

記録信号	NTSC 信号
映像サンプリング周波数	14.3 MHz ($4f_{sc}$)
映像量子化数	8 ビット/サンプル
音声サンプリング周波数	48 kHz
音声量子化数	16 ビット/サンプル
音声チャンネル数	4 チャンネル
記録データレート	127 Mbit/s
変調方式	新 8-14 変換符号
検出方式	積分検出
誤り訂正方式	2 重符号化 RS 符号
ドラム径	76 mm ϕ
ドラム回転数	5400 rpm
最短記録波長	0.76 μ m
ヘッド数	2 ch $\times$ 2 (180 $^\circ$ 対向)
ヘッド材質、構造	センダスト積層スバッタ
ヘッドトラック幅	10 μ m (5 μ m $\times$ 2 層)
ヘッドギャップ長	0.25 μ m
ヘッド巻線数	30 ターン
テープ材質、構造	メタル塗布型
テープ幅	1/2 インチ
テープ厚	13 μ m
抗磁力 (H_c)	1580 Oe
残留磁束密度 (B_r)	2850 gauss
角形比	0.9

元を表 3 にそれぞれ示す。コーディングパラメータ、誤り訂正符号構成、内符号：RS(95, 87), RS(93,

図 8 検出点における再生信号のスペクトラム
Spectra of the reproduced signals at the detecting point.

図 9 再生等化器の基本構成
Fundamental configuration of the playback equalizer.

85), 外符号: RS(68, 64)はD-2と同じとした。

ヘッドはセンダストをトラック幅方向に $5\mu\text{m}$ ずつ2層にスパッタすることにより、高域での渦電流損失を低減した⁹⁾。

ヘッドアンプは回転ドラムに搭載した¹⁰⁾。ヘッドのインダクタンスとヘッドアンプの入力容量による共振を高くするために、ヘッドアンプの入力側回路構成はカスコード差動型とし、入力容量を低減した。また、ヘッドのインピーダンスは周波数とともに高くなるので、ヘッドアンプを充分ドライブできるよう、初段には入力インピーダンスが高く、電流ノイズを発生しないFETを用いた。ヘッドの巻線数はヘッドアンプの雑音の影響を小さくするため30ターンとした。テープは従来にくらべ H_c , B_r , 角形比を改良したものをを用いた。

記録面密度は $3.3\mu\text{m}^2/\text{b}$ で、UNIHIカセット(NHKエンジニアリングサービスと国内メーカ10社それぞれが共同開発した1/2インチハイビジョンVTR用カセット)を用いて、約3時間の記録再生が可能である。

4.2 試作 VTR の記録再生系

$G(X)=X^8+X^4+X^3+X^2+1$ を生成多項式とするM系列信号を8-14変調した信号と、8-14変調時の最短記録波長となる28MHzの正弦波信号をそれぞれ

記録再生したときの検出点におけるスペクトラムを図8に示す。広帯域SN比は $29\text{dB}_{\text{p-p/rms}}$ (雑音帯域56MHz)が得られ、 M^2 変調時に比べ2.8dBの改善を図ることができた。

記録イコライザでは、ヘッドから出る磁界が周波数によらず一定になるように、記録電流を調整した。

再生イコライザの基本構成を図9に示す。8-14変調信号は低域成分が少ないため、回路構成が簡単で、SN比特性に優れ、位相余裕が大きくとれる積分等化方式とした。位相等化にはオールパスフィルタ、振幅等化には対称型3タップトランスバーサルフィルタを用いた。

4.3 試作 VTR のオフトラック特性

写真1にジャストトラッキング時のアイパターンを示す。このときのバイト誤り率は 7.5×10^{-6} であった。

写真1 再生信号のアイパターン
Eye pattern of the reproduced signal.

図 10 バイト誤り率のオフトラック特性
Byte error rate with off-track distance.

最初の記録, 重ね書き記録時のバイト誤り率のオフトラック特性を図10に示す. 重ね書き記録時に低域に消し残りが発生するため, 誤り率は最初の記録に比べ1/2桁程度劣化する. バイト誤り率 10^{-3} を満足するオフトラック量は, 重ね書き記録時左右 $6.3 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ であった. ここで用いた誤り訂正回路は誤りがすべてランダムであると仮定すると, バイト誤り率が 10^{-3} 以下であれば訂正後のバイト誤り率を計算上 10^{-20} 以下にできる. したがって, 本試作機では計算上トラック幅が $7 \mu\text{m}$ あれば, 重ね書きを行ってもビデオ信号を記録再生することが可能である.

5. む す び

高密度記録に適した変調方式として, NRZL 則で(2, 7; 8, 14), $|\text{DSV}|_{\text{max}}=7$ を満足する新しい8-14変調方式を開発した. この変調方式は, 最短記録波長が長く所要帯域が狭い, 記録再生等化が簡単, アジマス記録, 重ね書き記録が可能で, 他のワードへの誤り伝搬がない, 誤り検出が可能など, 多くの利点を持っている.

新しく開発した8-14変調方式を用いてコンポジットデジタルVTRを試作した. バイト誤り率は, トラック幅 $10 \mu\text{m}$, 記録波長 $0.76 \mu\text{m}$ において 7.5×10^{-6} であった. 1ビットあたりの記録面積は $3.3 \mu\text{m}^2$ である. 重ね書き記録において, 誤り率の劣化は1/2

桁程度であった.

終わりに, 本研究を進めるにあたり御指導を頂いた杉本前所長, ならびに関係各位に感謝する.

(参 考 文 献)

- 1) SMPTE 227M: "Television Digital Component Recording—19 mm Type D-1—Helical Data and Control Records, pp. 10-11
- 2) L. Thorpe, T. Yoshida, K. Tsujikawa: "HDTV Digital VTR", SMPTE J., **98**, 10, pp. 738-747 (Oct. 1989)
- 3) 梅本, 沢村, 江藤, 片山: "1.2 Gb/s デジタル VTR の記録再生系の検討", テレビ学技報, **13**, 31, pp. 1-6, VIR89-1 (June 1989)
- 4) 三田, 平野, 泉田, 長原: "1/2 インチメタルテープを使用したデジタル録画実験", テレビ誌, **39**, 2, pp. 163-169 (Feb. 1985)
- 5) 糸井, 平田, 川中, 田上, 大島, 小原, 芦部: "1/2 インチ民生用デジタル VTR 実験", テレビ学技報, **12**, 56, VR88-59, pp. 22-30 (Dec. 1988)
- 6) 新福, 福田, 杉木, 小高: "R-DAT の磁気記録技術", テレビ学技報, **10**, 16, pp. 31-35, VR78-6 (Sep. 1986)
- 7) 大津, 天野, 武内, 木原, 辻: "M II フォーマット VTR の音声のデジタル化", テレビ学技報, **10**, 7, pp. 1-8, VR76-1 (June 1986)
- 8) 五十嵐, 小沢, 高野: "DVR-10 の記録再生系について", テレビ学技報, **12**, 56, pp. 37-42, VR88-61 (Dec. 1988)
- 9) H. Shibaya: "History of Thin Alloy Film for Magnetic Recording Head Aiming at High Density and Wide Band Recording", IEEE, TJMJ, **3**, 5, pp. 399-406 (May 1988)
- 10) 上原, 坂井, 望月: "VTR ヘッドドラムへの前置増幅器内蔵による再生回路系の広帯域化", 信学技報, **85**, 328, pp. 17-23, MR85-54 (Mar. 1986)

うえはら としひろ
上原 年博 昭和56年, 慶応義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了. 同年, NHK に入局. 宮崎放送局を経て, 現在, 同放送技術研究所記録・機構研究部に勤務. デジタル VTR の高密度記録の研究に従事. 正会員.

なかやま ただし
中山 匡 昭和54年, 慶応義塾大学工学部電気工学科卒業. 同年, NHK に入局. 京都放送局を経て, 現在, 同放送技術研究所記録・機構研究部に勤務. デジタル磁気記録技術, 垂直磁気記録技術の研究に従事. 正会員.

みなぐち ほたか
水口 穂高 昭和33年, 東京工業大学理工学部電気工学課程卒業. 同年, NHK に入局. 青森放送局を経て, 放送技術研究所に勤務. 電子ファクシミリ, 電子ビーム記録, デジタル VTR など, 記録技術の研究開発に従事. 平成2年より, 池上通信機(株)R/D センターに勤務. 正会員.

しばや ひろふみ
柴谷 弘道 昭和34年, 北海道大学電気工学科卒業. 同年, NHK に入局. 昭和37年, 同放送技術研究所に転属し, 現在, 同所記録・機構研究部主任研究員. 磁気記録とくに広帯域ビデオヘッド, ハイビジョン VTR の研究・開発に従事. 工学博士. 正会員.

せきぐち たくじ
関口 卓司 昭和40年, 東京電機大学卒業. 昭和35年, NHK に入局. テレビ運行部, TOC などを経て, 49年, 同総合技術研究所記録班に勤務. 現在, 放送技術研究所記録・機構研究部副部長. テレビカメラ防振装置の開発, VTR の機構制御の研究に従事. 正会員.

おおば よしのぶ
大場 吉延 昭和38年, 東京工業大学電気工学課程卒業. 同年, NHK に入局. 同技術研究所で, 磁性薄膜, 磁気記録の研究に従事. 54年より, 放送衛星計画の策定に参加した後, 61年, 同技術本部開発技術部で記録・画像機器の開発を担当. 63年より, 同放送技術研究所記録・機構研究部長. 正会員.