多 値 信 号 記 録 の 試 み

A Study of Multi-level/phase Signal Recording
for Channel Coding on Digital VCR

中 津 悦 人 小 林 正 明

松 下 電 器 産 業 (株) 映 像 研 究 所

E. Nakatsu and M. Kobayashi

Image Technology Research Laboratory
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

To attain a high recording density and increase recording bit-rate on digital VCRs, we studied application of multi-level/phase modulation for magnetic recording channel. This paper is to report that a recording density substantially higher than the one attained by an NRZ modulation method can be realized by using a Trellis coded 16 quadrature amplitude modulation (TC-16QAM) method and improve TC-16QAM. This is experimentally proved by a high density recording of $0.83 \mu\text{m}^2/\text{bit}$ ($0.78 \text{ Gbit}/\text{inch}^2$) established by using an improved TC-16QAM.

Key words: digital VCRs, channel coding, amplitude phase shift keying, quadrature amplitude modulation, Trellis coded modulation

1. はじめに

ディジタルVTRの記録変調方式としては、一般にNRZ (Non-return to zero) 変調などの2値基底変調が用いられている。例えば、放送および業務用として実用化されているD1, D2, D3ディジタルVTRではS-NRZ (Scrambled NRZ) 変調, M² (Millar square) 変調, 8-14符号といった2値基底変調が採用されている。民生用を指向したディジタルVTRの試作機においても主として2値基底変調が用いられている。図1に民生用の試作ディジタルVTRにおける記録密度の推移を示す。黒印は2値基底変調を用いた試作機の記録密度の推移を示す。

記録密度の向上には 1) 狭トラック化, 2) テープ・ヘッド系の改良による記録信号の短波長化, 3) 記録信号の単位周波数あたりの記録レートの向上の3方向がある。2値基底変調を用いた場合には大幅な単位周波数あたりの記録レートの向上は期待できず, 狭トラック化および短波長化に頼らざるを得ない。

一方, 筆者らは以前より記録密度の向上を目的として, 記録効率の高い多値搬送波変調方式の検討を行っている⁽¹⁾⁻⁽¹³⁾。2値基底変調と比較して多値搬送波変調は, 被変調信号の帯域幅が狭く, かつ直流近傍成分が全く無くアジマス記録が有効に作用するという特長を持つ磁気記録に整合の良い記録方式である。この多値搬送波変調を導入することで, 狭トラック化と短波長化と単位周波数あたりの記録レートの3項目が調和のとれた形で, 記録密度の向上を図ることができる。筆者らの実験における多値搬送波変調での記録密度の推移を白印で図1に合わせ

て示す。
本報告では, CN比の周波数特性に基づいた計算により多値搬送波変調と2値基底変調とを高記録密度という観点で比較し, その結果に基づいて行った多値搬送波変調の一種であるトレリス符号化16値直交振幅変調 (TC-16QAM) を用いて $0.83 \mu\text{m}^2/\text{bit}$ ($0.78 \text{ Gbit}/\text{inch}^2$) に達する高密度記録再生を確認したので報告する。

図1 記録密度の推移

2. 多値変調

多値搬送波変調には、振幅変調 (ASK)、位相変調 (PSK)、直交振幅変調 (QAM) などがある。多値搬送波変調では単位周波数あたりの記録レートと必要SN比とにトレードオフの関係がある。つまり、多値数を多くすれば単位周波数あたりの記録レートを上げることができるが必要SN比も大きくなってしまふ。単位周波数あたりの記録レートを落とさずに必要SN比を低減する方法としてトレリス符号化変調がある⁽¹⁴⁾。トレリス符号化変調とは変調前に畳み込み符号化を行い復調後にビタビ復号を行うという変調方式である。図2に、各種変調方式でのSN比とビット誤り率との関係を示す。ここでNRZ, 4PSK, 8PSK, 16QAMの各々は理論値を示し、トレリス符号化16QAM (TC-16QAM) は符号化率3/4で16状態の場合、TC-32QAMは符号化率4/5で16状態の場合のシミュレーション結果を示す。また、表1には各種変調方式における単位周波数当りの記録レートとビット誤り率 10^{-4} を得るための必要SN比とを示す。ただし、帯域制限特性はロールオフ率0.2のロールオフ特性である。ここでは信号に含まれるノイズを白色ガウスノイズとしているが、実際の磁気記録再生系では周波数分布が平坦でない有色ノイズであり、磁気記録特有の歪も生じる。次章では、この歪を実測により求め、その結果に基づいて各種変調方式の比較を行う。

図2 各種変調方式におけるSN比と誤り率の関係

表1 各種変調方式における必要SN比と記録信号の単位周波数あたりの記録レート

変調方式	必要SN比(So-p/Nrms)	単位周波数あたりの記録レート
NRZ	11.4 dB	1.67 Mbps/Hz
4 PSK	11.4 dB	1.67 Mbps/Hz
8 PSK	16.7 dB	2.5 Mbps/Hz
TC - 16 QAM	14.9 dB	2.5 Mbps/Hz
16QAM	21.2 dB	3.33 Mbps/Hz
TC - 32 QAM	18.3 dB	3.33 Mbps/Hz

(ロールオフ率: 0.2)

3. 各種変調方式の比較

関数で近似した再生信号CN比の周波数分布に基づき、誤り率一定の条件のもとで、各種変調方式での記録密度を計算により求め比較する。変調方式としては、2値基底変調としてNRZ, 多値搬送波変調として4PSK, 8PSK, TC-16QAM, TC-32QAMの合計5種類とする。

図3に、再生系のモデルと、各部での信号の周波数分布の概略を示す。再生された信号は等化された後、帯域制限され、復号されるものとする。帯域制限特性は、NRZ変調の場合にはルートロールオフLPFと直流近傍を除去する理想HPFの組合せとし、多値搬送波変調の場合にはルートロールオフBPFとする。

多値搬送波変調では被変調信号の振幅と位相とにより多値情報が伝送されるため、磁気記録再生系の線形化を図る必要がある。そこで線形化の手法としてACバイアス記録を用いる⁽¹⁵⁾。2値基底変調の場合には一般的に無バイアス記録が用いられている。同一の磁気記録再生系を用いたバイアス記録と無バイアス記録の場合における信号と3次歪との特性の測定結果を図4に示す。

図3 再生系モデルと各部での信号の周波数分布

図4 バイアス記録と無バイアス記録における信号と3次歪との特性

図5 実測CN比と近似CN比曲線

バイアス記録の場合、再生信号に対して -20 dBの3次歪を許容すると、再生信号のレベルは無バイアス記録に比べ 2.5 dB低いといえる。このような特性を有するバイアス記録と無バイアス記録とを用いて、記録方式と記録密度との関係を推定する。磁気記録再生系のCN比の周波数特性としては、トラック幅 $5.7 \mu\text{m}$ のセンダストヘッドとMEテープを用いた実測結果に基づいて(1)式で近似する。ここでテープ・ヘッド間の相対速度は 5.8 m/s である。

$$\begin{aligned} 1/n(f) = & 2.3 \times 10^{-2} \cdot f^{1.84} \cdot \exp(-4.6 \times 10^{-7} \cdot f) \quad (1) \\ & \text{(2値基底変調の場合: 無バイアス記録)} \\ & 1.3 \times 10^{-2} \cdot f^{1.84} \cdot \exp(-4.6 \times 10^{-7} \cdot f) \\ & \text{(多値変調の場合: バイアス記録)} \end{aligned}$$

図5に無バイアス記録の場合の実測したCN比の値と近似したCN比特性の曲線を示す。

次に(1)式を基に、各種変調方式で得られる記録密度を推定する。ビット誤り率 10^{-4} を得るために必要なSN比(表1に示す)に対応する復号器入力点での総合雑音電力 N_t を求める。総合雑音電力 N_t は(2)式に示すように再生信号に含まれるノイズ $n(f)$ とテープヘッド系特有の非線形性に起因する信号劣化電力 N_d から成る。

$$N_t = \int_{f_2}^{f_1} n(f) df + N_d \quad (2)$$

記録再生信号の上下限周波数 f_1 , f_2 は(3)式に示す関係とした。

$$\begin{aligned} f_2 = 0.02 \times f_1 & \quad \text{(2値基底変調の場合)} \quad (3) \\ 0.04 \times (f_1 - f_2) & \quad \text{(多値変調の場合)} \end{aligned}$$

信号劣化電力 N_d は実測した再生信号波形を図3に従って周波数等化した後、平均化によりノイズ $n(f)$ を除去した波形の記録信号波形からの記録信号波形で正規化した差電力であり、次のような値を実験により得ている。

$$\begin{aligned} N_d = 10^{-13.6/10} & \quad \text{(2値基底変調の場合)} \quad (4) \\ 10^{-21.9/10} & \quad \text{(多値変調の場合)} \end{aligned}$$

表1および(1), (2), (3), (4)式より上下限周波数 f_1 , f_2 が求まる。各種変調方式において記録効率 C_0 はロールオフフィルタに応じた固有の値をとるため、テープヘッド間の相対速度を V , トラック幅を T とすると、記録密度 D は(5)式で推定される。

$$\begin{aligned} D = C_0 \times f_1 / (V \times T) & \quad \text{(2値基底変調の場合)} \quad (5) \\ C_0 \times (f_1 - f_2) / (V \times T) & \quad \text{(多値変調の場合)} \end{aligned}$$

ロールオフフィルタのロールオフ率を 0.2 とした場合の各種変調方式で達成できる記録密度の推定結果を表2に示す。この結果より、TC-16QAM, TC-32QAM, 8PSK, NRZ, 4PSKの順に高密度記録

表2 各種変調方式での記録密度

変調方式	記録密度
NRZ	$1.00 \mu\text{m}^2/\text{bit}$
4PSK	$1.02 \mu\text{m}^2/\text{bit}$
8PSK	$0.90 \mu\text{m}^2/\text{bit}$
TC-16QAM	$0.78 \mu\text{m}^2/\text{bit}$
TC-32QAM	$0.82 \mu\text{m}^2/\text{bit}$

図6 各種変調方式でのSN比過不足量

できると推定できる。また、同様の方法で、各種変調方式で記録密度 $1 \mu\text{m}^2/\text{bit}$ を達成するための SN 比過不足量を推定する。その結果を図 6 に示す。これらの結果より TC-16 QAM が最も高密度に記録できる変調方式で、NRZ と比べて SN 比にして 4.0 dB 有利であるといえる。

4. 多値変調による高密度記録再生実験

4-1. 実験システム

先に述べた変調方式の比較結果より最も高密度記録に適している TC-16 QAM を用いて高密度記録再生実験を行った。実験システムの構成を図 7 に、仕様を表 3 に示す。ランダムな 3 ビットデータを畳み込み符号器により 4 ビットデータに変換し、16 QAM 変調器により変調する。この変調信号にキャリア再生のためのパイロット信号を重畳し、さらにバイアス信号を重畳して磁気テープに記録する。記録する信号の周波数アロケーションを図 8 に示す。

磁気テープより再生された信号を復調器により 2 つのベースバンド信号 (I 信号と Q 信号) に復調し、次に述べる改良ビタビ復号器により復号する。なお、変復調やビタビ復号などの信号処理はコンピュータを用いた。

表 3 実験システムの仕様

テープ	ME テープ
ヘッド	センダストヘッド
トラック幅	$5.7 \mu\text{m}$
テープ・ヘッド間相対速度	2.9 m/s
記録ビットレート	20 Mbps
記録面密度	$0.83 \mu\text{m}^2/\text{bit}$

図 8 記録信号の周波数アロケーション

4-2. 改良ビタビ復号器

16 QAM 被変調信号を記録再生した場合、I-Q 平面上での再生復調データの信号点分布 (コンスタレーション) には図 9 に示すような磁気記録特有の現象①②が生じる。

① 符号毎の中心値点が原点方向に歪む。これは磁気記録再生過程の奇数次歪に起因している。

② 原点より遠い点ほど雑音の量が多い。これは磁気記録再生過程での時間軸変動とレベル変動とに起因する。

上述の①②の現象によって、通常のビタビ復号器を用いたのでは誤り率の劣下を招く。そこで誤り率劣下の少ない改良ビタビ復号器を開発した。改良ビタビ復号器では、①の現象に対しては、16 個の基準点位置を原点からの距離に応じた 3 種類の補正係数 K_u で振幅方向に補正する。振幅補正の一例としては図 9 に示すように、符号 0 に対応する基準点 (X_0, Y_0) は補正係数 K_0 により点 ($K_0 \cdot X_0, K_0 \cdot Y_0$) に補正される。

図 7 実験システムの構成

(a) 記録時の信号点

(b) 再生信号点の分布

図9 コンスタレーション上での磁気記録特有の現象

図10 再生復調信号の

コンスタレーション

②の現象に対しては、16個の基準点について原点からの距離に応じた3種類の重み係数 W_u をバスマトリック算出に用いるユークリッド距離に乘じることで補正する。改良ビタビ復号器で用いるユークリッド距離 R_u の算出式を(6)式に示す。

$$R_u = W_u \{ (K_u \cdot X_u - x(t))^2 + (K_u \cdot Y_u - y(t))^2 \}^{1/2} \quad (6)$$

K_u : 振幅補正係数

W_u : 重み係数

(X_u, Y_u) : 基準点位置

$(x(t), y(t))$: 時刻 t での再生信号点位置

4-3. 実験結果

再生復調信号のコンスタレーションを図10に示す。このコンスタレーションから求めたSN比(S_{0-p}/N_{rms})は16.6dBであり、改良ビタビ復号後のビット誤り率は、 3.3×10^{-5} 以下である。通常のビタビ復号後のビット誤り率は 4.0×10^{-4} であるので、改良ビタビ復号器によりビット誤り率は1/10以下に低減されている。

5. あとがき

高密度記録において、多値変調は有効な記録変調方式であることを示した。さらに、トレリス符号化16QAMを用い、ビタビ復号器を磁気記録に適したように改良することで、 $0.83 \mu m^2/bit$ ($0.78 Gbit/inch^2$)という高密度記録を実証した。

今後は、さらに高密度・高レート記録を目指すと共に実用化のための検討を進めていきたい。

参考文献

- (1) 松田, 他: 昭63信学春季全大, C-59(1988).
- (2) 下田代, 他: 1988TV全大, 8-8(1988).
- (3) 中津, 他: 1989信学春季全大, C-33(1989).
- (4) 太田, 他: 1989TV全大, 6-13(1989).
- (5) 中津, 他: 1989信学秋季全大, C-9(1989).
- (6) 小林, 他: TV学技報, Vol. 13, No. 60, pp. 1-6(1989).
- (7) M. Kobayashi et al.: 12th SITA, 6-9(1989).
- (8) M. Kobayashi et al.: Trans. IEICE, Vol. E73, No. 5, pp. 665-669(1990).
- (9) M. Kobayashi et al.: 8th VADR, pp. 116-119(1990).
- (10) 島崎, 他: 1990TV全大, 7-5(1990).
- (11) M. Kobayashi et al.: IEEE Trans. CE, Vol. 37, No. 3, pp. 283-290(1991).
- (12) 中津, 他: 1991TV年大, 7-3(1991).
- (13) 石田, 他: 1992TV年大, 4-7(1992).
- (14) G. Ungerboeck: IEEE Trans. IT, Vol. 28, No. 1, pp. 55-67(1982).
- (15) 永井, 他: 電気通信学会誌, No. 180, pp. 144-147(1938).