二層膜媒体と MR ヘッド を用いた垂直磁気記録 のための PRML 方式

PRML Systems for Perpendicular Magnetic Recording
Using a Double-layered Medium and an MR Head

大沢 寿* 岡本 好弘* 斎藤 秀俊* 村岡 裕明** 中村 慶久**

*愛媛大学 工学部 **東北大学電気通信研究所

Hisashi OSAWA*, Yoshihiro OKAMOTO*, Hidetoshi SAITO*, Hiroaki MURAOKA**
and Yoshihisa NAKAMURA**

*Faculty of Engineering, Ehime University

**RIEC, Tohoku University

Abstract- The partial response maximum-likelihood (PRML) systems for perpendicular magnetic recording using an MR head and a double-layered medium are studied. The bit error rate performance of PRML systems characterized by the polynomials with the positive coefficients and conventional PRML systems with the negative coefficients for the 16/17(0, 6/6) code is evaluated by computer simulation. Among PRML systems discussed in this study, PR(1,2,2,1)ML exhibits the best performance and improves the SNR by about 6.2dB over that of EPR4ML at a bit error rate of 10^{-4} and a normalized linear density of 2.5. At high linear density, the performance of PR(1,2,3,2,1) ML for the 16/17(0,6/6) code is superior to that of PR(1,2,3,2,1)ML for the (1,7)RLL code.

1. まえがき

最近の長手磁気記録における面密度の向上には目覚ましいものがある。それは、ヘッド、媒体及びヘッド・媒体インターフェースにおける高密度化技術の進展は勿論のこと、信号処理技術の向上に負うところも大である。中でも、パルシャルレスポンス (PR) 方式と最尤 (ML) 復号法の一つであるビタビ復号法との融合方式である PRML 方式は、今では高密度記録には不可欠な信号処理技術となっている⁽¹⁾。

一方、熱揺らぎの影響を受けにくい方式として期待されている垂直磁気記録のための PRML 方式については、これまでにいくつか検討されている^{(2)~(6)}。長手磁気記録の場合には、孤立再生波形はローレンツ形で近似できるが、垂直磁気記録の場合には単層膜媒体と二層膜媒体とで MR ヘッドによる孤立再生波形が異なる。単層膜媒体の場合には、ダイパルス状となるのに対

して、二層膜媒体の場合にはステップ状となる^{(7),(8)}。従って、これらに適した PRML 方式を検討する必要がある。ダイパルス状の孤立再生波形を持つ単層膜媒体については、方形の 1 ビット記録波形に対する再生波形が PR5 すなわち PR(-1,0,2,0,-1) 特性に近いとして、PR5ML 方式が提案されている^{(2),(3)}。

ステップ状の孤立再生波形を有する二層膜媒体の場合には、方形の 1 ビット記録波形に対する再生波形はやはり方形パルス状となり、その微分波形は長手磁気記録の場合と同様なダイパルス状となるので⁽⁸⁾、微分等化を行うことにより従来の長手磁気記録で用いられてきた PR4ML 等の PRML 方式の適用が可能となる⁽⁴⁾。多層膜媒体でも、同様に微分等化を用いて 16/17(0,6/6) 符号に対する EPR4ML 方式を適用することにより、同じ符号と PRML 方式の長手磁気記録の場合に比べて高記録密度において良好な誤り率特性が得られたという報告もある⁽⁵⁾。また、筆者らは、(1,7)RLL 符号と微分等化によらない正係数の多項式で表される PRML 方式(以下では、正係数の PRML 方式と呼ぶ)との組み合わせにより、8/9(0,4/4) 符号と微分等化による負係数を含む多項式で表される従来の PRML 方式(以下では、負係数の PRML 方式と呼ぶ)の場合に比べて良好な誤り率特性が得られることを示した⁽⁶⁾。

本論文では、二層膜媒体と MR ヘッドを用いた垂直磁気記録において、16/17(0,6/6) 符号に対する正係数の PRML 方式と負係数の PRML 方式の誤り率特性及び所要 SN 比と規格化線密度の関係を求め、それらの比較検討を行う。

2. 記録再生系

図 1 に、垂直磁気記録における PRML 方式の記録再生系ブロック図を示す。ここで、 $\{a_k\}$

図1 垂直磁気記録における PRML 方式のブロック図

はビット間隔 T_b ごとの入力データ系列で, $\{b_k\}$ はシンボル間隔 T_s ごとの (1,7)RLL 符号あるいは 16/17(0,6/6) 符号系列である。また, $\{c_k\}$ はプリコーダ出力系列で, $\{b_k\}$ との間には, (1,7)RLL 符号の場合,

$$c_k = b_k + c_{k-1} \pmod{2} \quad (1)$$

なる関係が, 16/17(0,6/6) 符号の場合,

$$c_k = b_k + c_{k-2} \pmod{2} \quad (2)$$

なる関係が成り立つものとする。孤立再生波形がステップ状であるから, その微分波形をここでは次式のようなローレンツ形波形で近似できるものと仮定する。

$$h(t) = \frac{B}{1 + (2t/T_{50})^2} \quad (3)$$

ここで, B はピーク値, T_{50} は半値幅である。 $h(t)$ を積分することにより, 高さが 1, 幅が T_s の記録波形に対する読み出し点の信号波形 $g(t)$ は次式のように求まる。

$$g(t) = \frac{A}{\pi} \cdot \left\{ \tan^{-1} \frac{2\eta_c t}{K_p T_s} - \tan^{-1} \frac{2\eta_c (t - T_s)}{K_p T_s} \right\} \quad (4)$$

ここで, A は低記録密度における $g(t)$ のピーク値, $\eta_c = T_s/T_b$ は符号化率, $K_p = T_{50}/T_b$ は規格化線密度である。なお, $g(t)$ のピーク値 $g(T_s/2)$ として, 文献(6)では K_p に拘わらず一定値 A をとるものとして定めていたが, ここでは, K_p が小のとき A となるように定めている。符号化率 η_c は, (1,7)RLL 符号のとき 2/3, 16/17(0,6/6) 符号のとき 16/17 である。

読み出し点の雑音は, 平均値が 0 で, 両側電力スペクトル密度が $N_0/2$ の白色ガウス雑音と

仮定し, 読み出し点の SN 比を次式により定義する。

$$a = A/\sqrt{N_0 f_b} \quad (5)$$

但し, $f_b = 1/T_b$ はビットレートである。等化器の伝達関数は記録ヘッドから等化器出力までが所望の $PR(u_0, u_1, u_2, \dots, u_{L-1})$ 特性となるように, $g(t)$ に対する等化器出力波形 $w(t)$ を,

$$w(t) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{L-1} u_m r(t - mT_s) \quad (6)$$

と定めるものとする。但し, $r(t)$ はロールオフ率が β のナイキスト波形で,

$$r(t) = \frac{\sin(\pi t/\eta T_b)}{\pi t/\eta T_b} \cdot \frac{\cos(\pi \beta t/\eta T_b)}{1 - (2\beta t/\eta T_b)^2} \quad (7)$$

で表される。ここで, η は符号間干渉量と等化器の帯域幅を調整するためのパラメータである(9)。等化器の伝達関数は, $w(t)$ のフーリエ変換と $g(t)$ のフーリエ変換の比をとることにより,

$$E(x) = \frac{\pi}{2A} \cdot \frac{x R(x) e^{\pi K_p x}}{\sin(\pi \eta_c x)} \cdot \sum_{m=0}^{L-1} u_m e^{-j(2m-1)\pi \eta_c x} \quad (8)$$

と求まる。但し, $x = f/f_b$ は規格化周波数, $R(x)$ は $f_b r(t)$ のフーリエ変換で,

$$R(x) = \begin{cases} \eta, & |x| < \frac{1-\beta}{2\eta} \\ \frac{\eta}{2} \left\{ 1 - \sin \frac{\eta\pi}{\beta} \left(|x| - \frac{1}{2\eta} \right) \right\}, & \frac{1-\beta}{2\eta} \leq |x| < \frac{1+\beta}{2\eta} \\ 0, & |x| \geq \frac{1+\beta}{2\eta} \end{cases} \quad (9)$$

により与えられる。負係数の PRML 方式については, $E(x)$ が微分器の伝達関数 x と従来の長手磁気記録における PR4ML, EPR4ML, E²PR4ML 等の負係数の PRML 方式の伝達関数の積に等しいことを示すことができる。従って, 垂直磁気記録における負係数の PRML 方式は, 微分等化器と長手磁気記録用の PRML 方式の組み合わせと等価である。

図1において, ビタビ復号器による $\{c_k\}$ の推定値を $\{\hat{c}_k\}$ とするとき, ビタビ復号器出力系列が (1,7)RLL 符号, 16/17(0,6/6) 符号のそれぞれについて,

$$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1} \pmod{2} \quad (10)$$

$$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-2} \pmod{2} \quad (11)$$

となるようにプリコーダの逆特性演算をビタビ復号器に含めて構成するものとする。\$\{\hat{b}_k\}\$ に対する (1,7)RLL 復号化器あるいは 16/17(0,6/6) 復号化器出力より出力データ系列 \$\{\hat{a}_k\}\$ が得られる。

3. 雑音電力スペクトル

識別点における片側雑音電力スペクトルは \$N_0|E(x)|^2\$ より求まり、

$$N(x) = \frac{\pi^2}{4a^2} \cdot \frac{x^2 R^2(x)}{\sin^2(\pi\eta_c x)} \cdot e^{2\pi K_p x} \cdot \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} u_m u_n \cos 2\pi(m-n)\eta_c x \quad (12)$$

となる。図 2(a), (b) に、16/17(0,6/6) 符号に対する正係数の PRML 方式として PR(1,2,1)ML, PR(1,2,2,1)ML, PR(1,3,3,1)ML, PR(1,2,3,2,1)ML 方式⁽⁶⁾の、負係数の PRML 方式として EPR4ML, E²PR4ML, ME²PR4ML, PR(1,1,1,-1,-1,-1)ML, PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式^{(1),(10),(11)}の雑音電力スペクトルをそれぞれ示す。図 2(a) には、(1,7)RLL 符号で最良の特性が得られた PR(1,2,3,2,1)ML 方式の場合の雑音電力スペクトルも併せて示す。但し、\$K_p = 2.5, \beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}\$ としている。ここで、\$\eta_{opt}\$ は誤り率を最小と

する最適な \$\eta\$ を表す。なお、雑音電力スペクトルにより特性比較をしやすいように、\$(e_c/e_{opt})^2\$ で規格化している⁽⁶⁾。ここで、\$e_c, e_{opt}\$ は、それぞれ \$\eta = \eta_c, \eta = \eta_{opt}\$ におけるアイパターンの正の最も外側のレベルである。但し、\$\eta = \eta_{opt}\$ のときのアイパターンは符号間干渉によりレベル \$e_{opt}\$ に幅を持つのでその中央の値をとるものとする。各 PRML 方式のアイ開口率が同程度の場合には、このような雑音電力スペクトルにより、識別点の SN 比の評価が可能である。

図に見られるように、正係数の PRML 方式のスペクトルは、負係数の PRML 方式のスペクトルに比べて全体的に小となっている。また、正係数の PRML 方式の内では、PR(1,2,2,1)ML 方式が、負係数の PRML 方式の内では、ME²PR4ML 方式のスペクトルが最小となっている。

4. PRML 方式

識別点信号波形はプリコーダ出力系列 \$\{c_k\}\$ を用いて、

$$y(t) = \sum_i (2c_i - 1)w(t - iT_s) \quad (13)$$

と表される。従って、ビタビ復号器入力系列は、\$d_k = y(kT_s)\$ で与えられる。\$\eta = \eta_c\$ のときの \$\{d_k\}\$ よりビタビ復号における最小二乗距離 \$d_{min}^2\$ を求めると、表 1 のようになる⁽¹¹⁾。表 1 には、ビタビ

(a) 正係数の PRML 方式

(b) 負係数の PRML 方式

図 2 16/17(0,6/6) 符号に対する各 PRML 方式の識別点雑音電力スペクトル (\$K_p = 2.5, \beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}\$)

表 1 16/17(0,6/6) 符号に対する
各 PRML 方式の d_{min}^2 と状態数

PRML 方式		d_{min}^2	状態数
正 係 数	PR(1,2,1)ML	4	4
	PR(1,2,2,1)ML	4	8
	PR(1,3,3,1)ML	10	8
	PR(1,2,3,2,1)ML	6	16
負 係 数	EPR4ML	4	8
	E ² PR4ML	6	16
	ME ² PR4ML	2	16
	PR(1,1,1,-1,-1,-1)ML	4	32
	PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML	6	64

復号器の状態数も併せて示す. PRML 方式が良好な性能を示すためには識別点の SN 比と d_{min}^2 が大きいことが必要である. 先に, 筆者らが提案した (1,7)RLL 符号に対する正係数の PRML 方式の場合に比べて, 16/17(0,6/6) 符号の場合は, 全般的に d_{min}^2 は小で, 状態数は大となっている.

5. 性能比較

図 3 に, 計算機シミュレーションにより求めた 16/17 (0,6/6) 符号に対する正係数と負係数の PRML 方式の誤り率特性を示す. 但し, $K_p = 2.5, \beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}$ としている. 図には, (1,7)RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1)ML 方

式の誤り率特性も破線で示す. 図に見られるように, $K_p = 2.5$ においては, 16/17(0,6/6) 符号の中で最良の特性を示す PR(1,2,2,1) 方式に比べて, 先に提案した (1,7)RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1)ML 方式の方が僅かに良好な誤り率特性を示し, 10^{-4} の誤り率のときで約 0.2dB の SN 比改善となっている. これは, 図 2(a) に見られるように, (1,7)RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1)ML 方式は, 16/17(0,6/6) 符号に対する PR(1,2,2,1)ML 方式に比べて雑音電力スペクトルは大であるが, d 制約を利用したビタビ復号法により d_{min}^2 を 18 と大きくでき⁽⁶⁾, これによる SN 比改善が大であることによる. 正係数の PRML 方式の方が負係数の PRML 方式より良好な誤り率特性を示し, 16/17(0,6/6) 符号に対する正係数の PRML 方式の内では PR(1,2,2,1)ML 方式が, 負係数の PRML 方式の内では PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式が最良の誤り率特性を示すことがわかる. ●印で表される EPR4ML 方式では, 再生波形を微分等化器に通すことにより, 最近よく使用されている長手磁気記録用の EPR4ML 方式をそのまま適用できる. これに対する他の PRML 方式の 10^{-4} の誤り率における SN 比改善度は, PR(1,2,2,1)ML, PR(1,2,3,2,1) ML, PR(1,3,3,1)ML, PR(1,2,1)ML, PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML, PR(1,1,1,-1,-1,-1)ML, ME²PR4 ML, E²PR4ML の場合でそれぞれ, 約 6.2, 6.1, 5.9, 5.3, 4.9, 3.3, 2.3, 1.0dB である.

図 3 誤り率特性 ($K_p = 2.5, \beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}$)

図 4 所要 SN 比と規格化線密度の関係 ($\beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}, \text{BER} = 10^{-4}$)

図4に、ビット誤り率 10^{-4} を達成するのに要する読み出し点の所要 SN 比と規格化線密度の関係を示す。但し、 $\beta = 0.5, \eta = \eta_{opt}$ としている。 K_p が 3 以上の高密度記録においては、16/17(0,6/6) 符号に対する PR(1,2,3,2,1) ML 方式が最良の性能を示し、(1,7) RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1) ML 方式より優ることがわかる。これは、 K_p が 2.5 以下では、d 制約による d_{min}^2 の増大が SN 比の改善に寄与する (1,7) RLL 符号が有利であるのに対して、 K_p が 3 以上の高密度記録となると、波形等化による高域雑音の増大が性能を支配するようになり、符号化率の大きい 16/17(0,6/6) 符号が有利となるためである。

6. むすび

二層膜媒体と MR ヘッドを用いた垂直磁気記録において、16/17(0,6/6) 符号に対する正係数の PRML 方式と負係数の PRML 方式の誤り率特性及び所要 SN 比と規格化線密度 K_p の関係を求め、比較検討した。

その結果、 K_p が 2.5 においては、本論文で検討した PRML 方式の内では正係数の PR(1,2,2,1) ML 方式が最良の誤り率特性を示し、先に提案した (1,7) RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1) ML 方式に近い性能が得られること、負係数の PRML 方式の内では PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) ML 方式が最良の特性を示すことが明らかとなった。また、EPR4ML 方式に比べて、PR(1,2,2,1) ML 方式と PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) ML 方式の 10^{-4} の誤り率における SN 比改善度は、それぞれ約 6.2, 4.9 dB となった。 K_p が 3 以上の高密度記録においては、16/17(0,6/6) 符号に対する PR(1,2,3,2,1) ML 方式が最良の性能を示し、(1,7) RLL 符号に対する PR(1,2,3,2,1) ML 方式より優ることも明らかとなった。

謝 辞 日頃有益なご助言を賜る本学田崎三郎教授並びに計算機シミュレーションを行うにあたってご助力頂いた新居浜工業高等専門学校の栗原義武講師、本学大学院修了生澤田佳和君、本学大学院生足利寛君に深謝致します。また、本研究は情報ストレージ研究推進機構 (SRC) 及び通信・放送機構 (TAO) の助成のもとに行ったものであることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 大沢, 岡本, 斎藤, “高密度デジタル磁気記録のための信号処理技術,” 信学論 (C-

II), **J81-C-II**, 4, pp.393-412, Apr. 1998.

- (2) H.Ide, “A Modified PRML Channel for Perpendicular Magnetic Recording,” IEEE Trans. Magn., **32**, 5, pp.3965-3967, Sept. 1996.
- (3) M.Umemoto, “PR5ML Processing for Perpendicular Magnetic Recording,” J.Magn. Soc. Jpn., **21**, S2, pp.395-398, 1997.
- (4) 山田, 村岡, 中村, “MR ヘッドを用いた垂直磁化記録再生特性の基礎検討,” 日本応用磁気学会誌, **19**, S2, pp.117-121, 1995.
- (5) B.M.Lairson, K.Ho, and S.Sun, “PRML Recording Performance of Multilayer Pt/Co Alloy Media,” J. Magn. Soc. Jpn., **21**, S2, pp.135-139, 1997.
- (6) H.Osawa, Y.Kurihara, Y.Okamoto, H.Saito, H.Muraoka, and Y.Nakamura, “PRML Systems for Perpendicular Magnetic Recording,” J.Magn. Soc. Jpn., **21**, S2, pp.399-405, 1997.
- (7) M.Futamoto, Y.Honda, Y.Hirayama, K.Itoh, H.Ide, and Y.Maruyama, “High Density Magnetic Recording on Highly Oriented CoCr-Alloy Perpendicular Rigid Disk Media,” IEEE Trans. Magn., **32**, 5, pp.3789-3794, Sept. 1996.
- (8) H.Muraoka, H.Yamada, and Y.Nakamura, “MR Head Reading Characteristics in Perpendicular Magnetic Recording,” IEEE Trans. Magn., **32**, 5, pp.3482-3484, Sept. 1996.
- (9) H.Osawa, S.Yamashita, and S.Tazaki, “Improvement on Error Rate Performance for FM Recording Code,” IEEE Trans. Magn., **27**, 6, pp.4464-4469, Nov. 1991.
- (10) 岡本, 宮下, 斎藤, 大沢, “高密度記録における PRML 方式の性能評価,” 信学技報, MR97-61, pp.1-8, Dec.1997.
- (11) 大沢, 岡本, 白川, “デジタル磁気記録における PRML 方式の誤り率の体系的導出,” 信学論 (C-II), **J79-C-II**, 7, pp.366-375, July 1996.