

単層膜媒体による垂直磁気記録のための PRML 方式

PRML Systems for Perpendicular Magnetic Recording Using a Single-Layer Medium

市原 一人・岡本 好弘・斎藤 秀俊・大沢 寿

愛媛大学工学部, 松山市文京町 3(〒 790-8577)

K. Ichihara, Y. Okamoto, H. Saito and H. Osawa

Faculty of Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577

(1998 年 10 月 15 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

PRML systems for perpendicular magnetic recording using a single-layer medium were studied. Reproduced waveforms at linear densities of 150 to 300 kBPI were acquired by recording and reading-back experiments using a perpendicular single-layer medium, and dibit responses were derived from these waveforms. Using these responses in computer simulation, the performance of PRML systems for (1,7)RLL code was estimated from the SNR required at the reading point to achieve a bit-error rate of 10^{-4} . The results show that a PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML system has a much better performance than a PR5ML system at linear densities of 250 to 300 kBPI.

Key words: PRML system, perpendicular magnetic recording, single-layer medium, (1,7)RLL code, required SNR

1. はじめに

垂直磁気記録方式は、現在の記録密度向上のペースを維持できる次世代の記録方式として期待され、二層膜、単層膜媒体などが記録媒体として検討されている^{1),2)}。

現行の長手磁気記録においては、高密度記録に適した信号処理方式の検討が盛んに行われており^{3),4)}、なかでも、パルシャルレスポンス (PR) 方式と最尤復号法 (ML) の一種であるビタビ復号法を組み合わせた PRML (Partial Response Maximum Likelihood) 方式は、高密度化に伴う SN 比の劣化を挽回する手段としてほとんどのハードディスクドライブ (HDD) に搭載されるようになってきた。垂直磁気記録においても、PRML 方式のような信号処理方式を適用し、一層の高密度記録を達成することが望まれる。二層膜媒体による垂直記録に対しては、種々の PRML 方式が検討されているが⁵⁾、単層膜媒体の場合の信号処理方式としては、PR5ML 方式の報告が見られるのみである⁶⁾。

一方、(1,7)RLL 符号は、NRZI 記録を行うことにより、最小磁化反転間隔を無符号化時に比べて大きくできるので、高密度記録において顕著となる非線形歪に対して有効である。また、ラン長制約を利用することにより、ビタビ復号器の単純化と最小ユークリッド距離の増大による誤り率特性の改善も期待できる⁷⁾。

そこで本論文では、垂直単層膜媒体に対する記録再生実験により、記録再生系のビット応答波形を求め、これを用いて計算機シミュレーションを行い、単層膜媒体による高密度記録のための PRML 方式の検討を行う。

2. 記録再生系モデル

Fig. 1 に、PRML シミュレーションシステムの構成を示す。ビット間隔 T_b の “1”, “0” の 2 値入力データ系列 $\{a_k\}$ が、(1,7)RLL 符号化器によってシンボル間隔 T_s の記録符号系列 $\{b_k\}$ に変換される。さらに、 $\{b_k\}$ を NRZI 記録するため、次式のプリコーダを介して得られる記録データ系列 $\{c_k\}$ が単層膜媒体に NRZ 記録される。

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

記録レベルが -1 から 1 までステップ状に変化するような記録波形に対する読み出し点の応答波形は、単層膜媒体の場合、Fig. 2 のようになる。但し、図中の A は孤立再生波形の

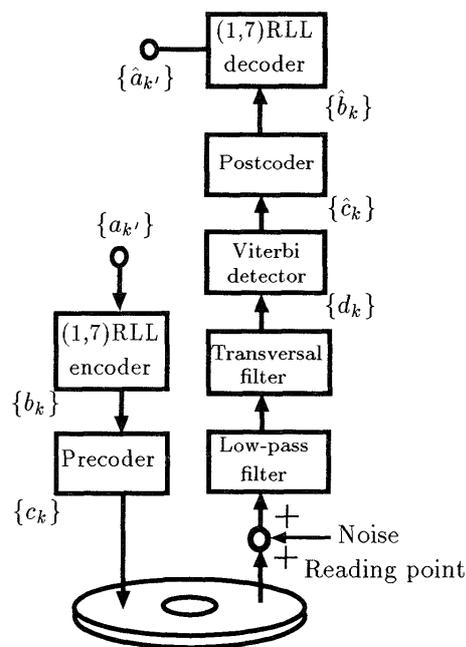


Fig. 1 Block diagram of the PRML simulation system.

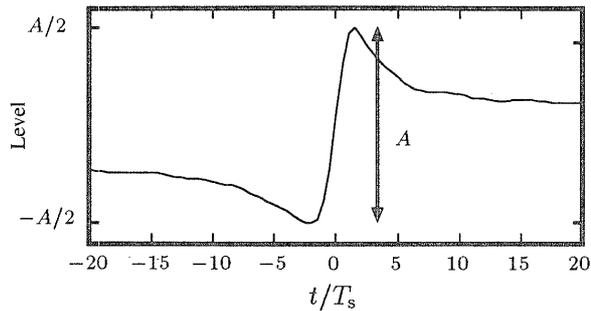


Fig. 2 Isolated reproducing waveform of a perpendicular single-layer medium at the reading point.

peak-to-peak 値を示している。ここで、読み出し点における雑音を、平均値が0、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 SN 比を次式のように定義する。

$$a = \frac{A}{\sqrt{N_0 f_b}} \quad (2)$$

但し、 $f_b = 1/T_b$ はビットレートである。

さらに、次式で表される6次パワースローパスフィルタにより高域遮断を行うものとする。

$$Q_L(x) = \frac{1}{G_r(x) + G_i(x)} \quad (3)$$

但し、

$$\left. \begin{aligned} G_r(x) &= -\left(\frac{x}{x_h}\right)^6 + 7.46\left(\frac{x}{x_h}\right)^4 - 7.46\left(\frac{x}{x_h}\right)^2 + 1 \\ G_i(x) &= 3.86\left(\frac{x}{x_h}\right)^5 - 9.14\left(\frac{x}{x_h}\right)^3 + 3.86\frac{x}{x_h} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

である。ここで、 x は f_b で規格化された規格化周波数、 x_h は f_b で規格化された規格化遮断周波数である。タップ数が N_t のトランスバーサルフィルタにより等化された等化器出力系列 $\{d_k\}$ は、ビタビ復号器に入力され、記録データ系列に対応した $\{\hat{c}_k\}$ が復号される。そして、プリコードの逆特性を持つポストコードを通り、(1,7)RLL 復号器により出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ が復号される。これを入力データ系列 $\{a_k\}$ と比較することによりビット誤り率を算出する。なお本稿では、記録再生実験により求めた記録再生系のインパルス応答を用いて、Fig. 1 に従って計算機シミュレーションにより誤り率を求め、性能評価を行う。

3. 等化特性

Table 1 に実験の諸条件を示す。記録ヘッドには MIG ヘッド、再生ヘッドには MR ヘッドを採用し、線速度 14.1m/s で記録再生を行っている。また、Table 2 にビットレートと線密度の関係を示す。Table 2 のように、ビットレート 83 ~ 167Mbps が線密度 150 ~ 300kBPI に相当する。

Fig. 3 に、線密度と再生電圧の関係を示す。図より、線密度 80kBPI 付近で再生電圧が最大となり、それ以上の記録密度では再生電圧が減少していくことがわかる。また、300kBPI 付近では、再生電圧が最大値の 1/4 の値にまで減少することがわかる。

Table 1 Parameters in write and read experiments.

Media	Perpendicular single-layer medium (CoCrPt 25 nm)
Write head	MIG head (Gap length: 0.17 μm)
Read head	MR head (Gap length: 0.28 μm)
Linear velocity	14.1 m/s
Channel coding	(1,7)RLL code

Table 2 Bit rate vs. linear density.

Bit rate [Mbps]	Linear density [kBPI]
83	150
111	200
139	250
167	300

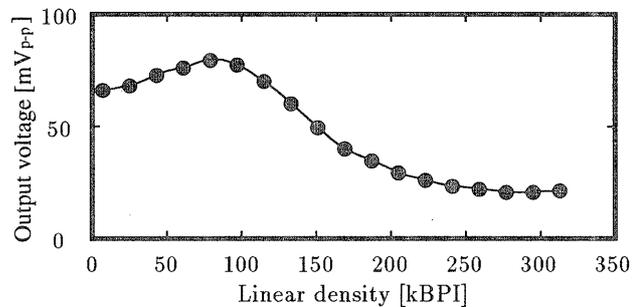


Fig. 3 Dependence of the output voltage on the linear density.

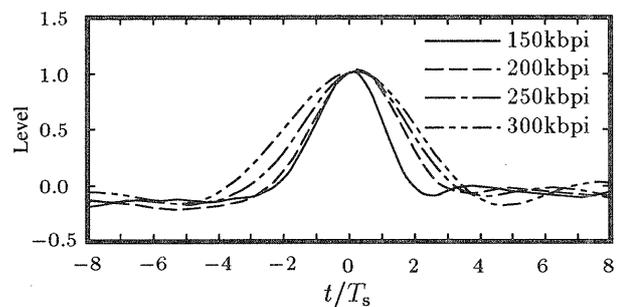


Fig. 4 Normalized dibit responses of a perpendicular single-layer medium at the reading point.

Fig. 4 に、記録データ系列 $\{c_k\}$ の代わりに 127 ビット周期の M 系列を、Table 1, 2 の条件で実際に記録再生して記録再生系のインパルス応答を求め、高さが 1、幅が T_s の記録波形との畳み込みにより得られた読み出し点におけるダイビット応答波形を示す。但し、 $t = 0$ のレベルで規格化している。図から、線密度の増加に伴い再生パルス幅が広がり、波形干渉が増大することがわかる。なお、計算機シミュレーションでは、この応答波形をローパスフィルタ入力としている。

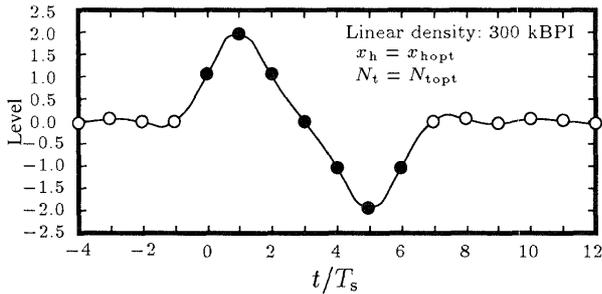


Fig. 5 Output waveform of the transversal filter (PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) system).

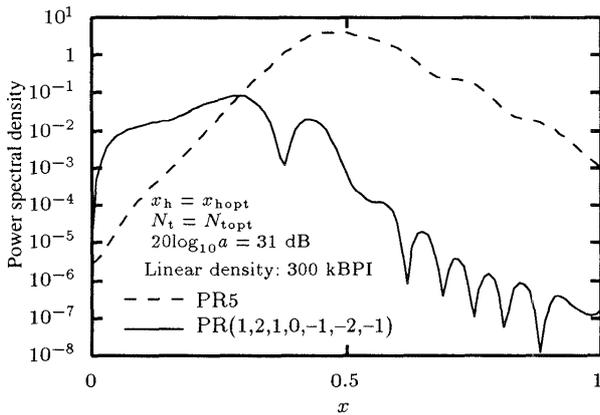


Fig. 6 Noise power spectra at the transversal filter output.

Fig. 5 に、Fig. 4 に示したダイビット 応答波形に対するトランスバーサルフィルタの出力波形を示す。但し、PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) 方式とし、線密度は 300kBPI、 N_t, x_h はそれぞれ、 $20\log_{10} a = 31\text{dB}$ のときの誤り率を最小とする最適値 x_{hopt}, N_{topt} としている。図より、時刻 $0 \sim 6T_s$ 時点におけるレベルの比がちょうど $1:2:1:0:-1:-2:-1$ となり、他のサンプル点では 0 付近の値をとっていることから、所望の PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) 方式に等化されていることがわかる。このように、トランスバーサルフィルタのタップ係数を適正に定めることにより、他の PR 方式も構成可能である。

Fig. 6 に、トランスバーサルフィルタ出力における雑音電力スペクトルを示す。但し、各条件は Fig. 5 の場合と同様である。図より、高域雑音が大となる PR5 方式に比べて、PR(1,2,1,0,-1,-2,-1) 方式は、雑音大幅に小となっていることがわかり、良好な誤り率特性が期待できる。

4. PRML 方式

一般に、PR($f_0, f_1, f_2, \dots, f_\nu$) 方式では、ビタビ復号法における状態数は 2^ν となり、 ν の値が大となるほどビタビ復号器は複雑となる。したがって、 $\nu = 6$ の PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式の場合は $2^6 = 64$ 状態となる。ところが、(1,7)RLL 符号の場合、ラン長制約により“0”のラン長が 1 ~ 7 に制限されているため、式 (1) のプリコーダを用いることにより、

Table 3 State assignment table of PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML for the (1,7)RLL code.

c_{k-5}	c_{k-4}	c_{k-3}	c_{k-2}	c_{k-1}	c_k	$S(k)$
0	0	0	0	0	0	S_0
0	0	0	0	0	1	S_1
0	0	0	0	1	1	S_2
0	0	0	1	1	0	S_3
0	0	0	1	1	1	S_4
0	0	1	1	0	0	S_5
0	0	1	1	1	0	S_6
0	0	1	1	1	1	S_7
0	1	1	0	0	0	S_8
0	1	1	0	0	1	S_9
0	1	1	1	0	0	S_{10}
0	1	1	1	1	0	S_{11}
0	1	1	1	1	1	S_{12}
1	0	0	0	0	0	S_{13}
1	0	0	0	0	1	S_{14}
1	0	0	0	1	1	S_{15}
1	0	0	1	1	0	S_{16}
1	0	0	1	1	1	S_{17}
1	1	0	0	0	0	S_{18}
1	1	0	0	0	1	S_{19}
1	1	0	0	1	1	S_{20}
1	1	1	0	0	0	S_{21}
1	1	1	0	0	1	S_{22}
1	1	1	1	0	0	S_{23}
1	1	1	1	1	0	S_{24}
1	1	1	1	1	1	S_{25}

Table 4 State transition table of PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML for the (1,7)RLL code.

$S(k-1)$	$S(k)$			
	c_k	0	1	d_k
S_0	S_0	S_1	-4	-3
S_1	—	S_2	—	-1
S_2	S_3	S_4	-1	0
S_3	S_5	—	-2	—
S_4	S_6	S_7	0	1
S_5	S_8	S_9	-2	-1
S_6	S_{10}	—	-1	—
S_7	S_{11}	S_{12}	1	2
S_8	S_{18}	S_{19}	-2	-1
S_9	—	S_{20}	—	1
S_{10}	S_{21}	S_{22}	-1	0
S_{11}	S_{23}	—	0	—
S_{12}	S_{24}	S_{25}	2	3
S_{13}	S_0	S_1	-3	-2
S_{14}	—	S_2	—	0
S_{15}	S_3	S_4	0	1
S_{16}	S_5	—	-1	—
S_{17}	S_6	S_7	1	2
S_{18}	S_{13}	S_{14}	-2	-1
S_{19}	—	S_{15}	—	1
S_{20}	S_{16}	S_{17}	1	2
S_{21}	S_{18}	S_{19}	-1	0
S_{22}	—	S_{20}	—	2
S_{23}	S_{21}	S_{22}	0	1
S_{24}	S_{23}	—	1	—
S_{25}	S_{24}	S_{25}	3	4

プリコード出力系列 $\{c_k\}$ で “010”, “101” の系列は発生しない。この制約を考慮すると, PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式の時刻 kT_s における状態 $S(k)$ は Table 3 のように割り当てることができ, 無符号化の場合に比べて, 状態数が 64 から 26 と大幅に減少することがわかる。

今, 波形等化において等化誤差を生じないと仮定したときのビタビ復号器入力系列 $\{d_k\}$ は,

$$d_k = c_k + 2c_{k-1} + c_{k-2} - c_{k-4} - 2c_{k-5} - c_{k-6} \quad (5)$$

と表される。式 (5) を用いて, さらに上記のラン長制約を考慮すると, 状態推移表は Table 4 となる。ここで, 表中の “—” は, その状態への遷移が存在しないことを意味しており, ラン長制約によりパスが制限されたことがわかる。また, これによって最小二乗ユークリッド距離 d_{\min}^2 も増大するので, 誤り率特性の改善が期待できる。

(1,7)RLL 符号に対する PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式のビタビ復号法は Table 4 を基に構成可能である。また, 他の PRML 方式についても同様にして構成できる。なお, 5. の性能評価に際しては, Kobayashi の復号法⁸⁾を用いている。

5. 性能評価

Fig. 7 に, 計算機シミュレーションにより求めた, (1,7)RLL 符号に対する各種 PRML 方式における線密度と誤り率 10^{-4} を達成するための読み出し点の所要 SN 比との関係を示す。但し, $x_h = x_{\text{hopt}}$, $N_t = N_{\text{topt}}$ とし, ○, ●, △, ▲, □, ■, ▽印は, それぞれ, PR5ML, EPR4ML, E²PR4ML, ME²PR4ML, PR(1,2,1,-1,-2,-1)ML, PR(1,1,1,-1,-1,-1)ML, PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式の場合を表している。図より, どの PRML 方式も線密度の増加とともに 10^{-4} の誤り率を達成するための所要 SN 比も増大していくことがわかる。また, 今回検討した PRML 方式の中で最も良好な特性を示す方式と従来提案されている PR5ML 方式とを比較

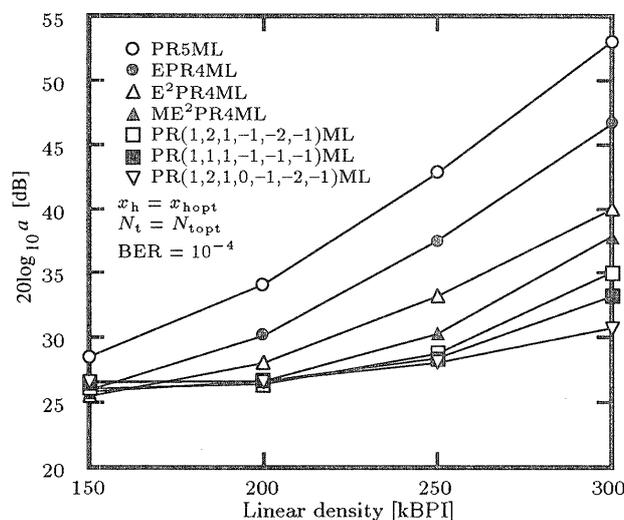


Fig. 7 Required SNR vs. linear density.

すると, 線密度 150kBPI では E²PR4ML 方式により 3.0dB, 200kBPI では PR(1,2,1,-1,-2,-1)ML 方式により 8.2dB, 250, 300kBPI では PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式によりそれぞれ 14.7, 22.3dB の SN 比改善が得られることがわかる。

6. まとめ

垂直単層膜媒体に対して記録再生実験を行うことによりビット応答波形を求め, その応答波形を用いて各種 PRML 方式の適用が可能であることを示した。更に, 計算機シミュレーションにより誤り率 10^{-4} を達成するための所要 SN 比を求め, (1,7)RLL 符号に対する各種 PRML 方式の性能評価を行った。その結果, 線密度 150kBPI では E²PR4ML 方式, 200kBPI では PR(1,2,1,-1,-2,-1)ML 方式, 250, 300kBPI では PR(1,2,1,0,-1,-2,-1)ML 方式が良好な特性を示し, 従来の PR5ML 方式と比較してそれぞれ, 3.0, 8.2, 14.7, 22.3dB の SN 比改善が得られることが明らかとなった。

謝辞 本研究で使用した垂直単層膜媒体は, 「超先端電子技術開発促進事業」の一環として, NEDO から (株) 日立製作所が委託されて実施した研究で作成されたものであることを付記するとともに, 単層膜媒体の提供と議論を賜った同社中央研究所の二本正昭氏, 梅本益雄氏, 平山義幸氏, 伊藤研也氏ならびに日頃, 有益なご助言を賜わる本学田崎三郎教授に感謝の意を表します。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, 謝意を表します。

文献

- 1) 中村慶久: 電子情報通信学会技術研究報告, MR-98-6(1998).
- 2) 平山義幸, 本多幸雄, 伊藤研也, 二本正明: 電子情報通信学会技術研究報告, MR-98-3(1998).
- 3) 大沢寿, 岡本好弘, 斎藤秀俊: 電子情報通信学会論文誌, J81-C-II(No. 4), 393(1998).
- 4) 岡本好弘, 宮下晴信, 斎藤秀俊, 大沢寿: 電子情報通信学会技術研究報告, MR97-61(1997).
- 5) H.Osawa, Y.Kurihara, Y.Okamoto, H.Saito, H.Muraoka, and Y.Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, 21(Suppl. No. S2), 399(1997).
- 6) 二本正明, 平山義幸, 本多幸雄, 伊藤研也: 日本応用磁気学会誌, 21, 6, 950(1997).
- 7) H.Osawa, M.Okada, K.Wakamiya, and Y.Okamoto: *IEICE Trans. Electron.*, E79-C, 10, 1455(1996).
- 8) H.Kobayashi: *IBM J. Res. & Dev.*, 15, 64(1971).