単層膜媒体による垂直磁気記録の誤り率特性

Error Rate Performance of Perpendicular Magnetic Recording Using a Single-Layered Medium

赤松 学 岡本好弘 斎藤秀俊 大沢 寿 本多直樹* 大内一弘*

愛媛大学工学部, 松山市文京町 3 (〒 790-8577)

* 秋田県高度技術研究所, 秋田市新屋町字砂奴寄 4-21 (〒 010-1623)

M. Akamatsu, Y. Okamoto, H. Saito, H. Osawa, N. Honda*, and K. Ouchi*

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

*AIT(Akita Research Institute of Advanced Technology), 4-21 Sanuki, Araya, Akita 010-1623

(1999 年 10 月 28 日受理, 2000 年 1 月 25 日採録)

The bit-error rate (BER) performance of 16/17(0,6/6) coded PRML systems for a single-layered perpendicular medium was studied by conducting read/write experiments using a spinstand system. The results show that the E³PR4ML system exhibits the best performance among the PRML systems evaluated in this paper, and achieves a BER of less than 10^{-6} at a high linear density such as 375 kbp.

Key words: PRML system, perpendicular magnetic recording, single-layered medium, bit-error rate performance

1. まえがき

最近の HDD の面記録密度向上には目覚ましいものがあるが、同時に長手磁気記録方式の限界についても盛んに議論されている¹⁾。そのため、長手磁気記録に代わる次世代の記録方式として単層膜媒体や二層膜媒体を用いた垂直磁気記録方式が盛んに研究されている^{2),3)}。また、長手磁気記録を用いたハードディスク装置において、高密度記録による SN 比劣化を挽回する手段として定着しつつある PRML (Partial Response Maximum Likelihood) 方式は、垂直磁気記録を行う場合にも有効であると考えられ、筆者らも垂直磁気記録のための PRML 方式について提案を行ってきた^{4),5)}。そこで、垂直単層膜媒体をスピンドルに装着して記録・再生実験を行い、16/17(0,6/6) 符号化 PRML 方式のビット誤り率 (BER) 特性を求め、比較検討を行った。

2. 記録・再生系

Fig. 1 に、PRML 方式の性能評価システムのブロック図を示す。本システムは、図のようにパーソナルコンピュータ (PC)、任意波形発生器 (AWG)、デジタルオシロスコープ (DSO) からなっている。PC では、M 系列を用いて作成した入力データ系列 $\{a_k\}$ が、16/17(0,6/6) 符号化器により記録符号化され、符号化系列 $\{b_k\}$ が得られる。更に、 $c_k = b_k + c_{k-2} \pmod{2}$ のプリコードによりプリコーディングされ、記録系列 $\{c_k\}$ が得られる。これは、GP-IB インタフェイスを介して AWG に送られ、一旦メモリ上に保持されたのち、所望の記録レートでスピンドル (SS) へ向けて出

Table 1 Specifications of heads and medium.

Write head	MIG head (track width 2.7 μm , gap length 0.17 μm)
Read head	SV head (track width 1.3 μm , gap length 0.173 μm)
Medium	Single-layered perpendicular medium (Co-Cr-Nb-Pt, 50 nm)
Relative velocity	9.42 m/s

力される。そして、SS において、装着されたディスクに NRZ 記録される。但し、SS では 2 シンボル前までの反転の有無を考慮して記録補償回路を用いて記録補償したのち記録している。一方、再生ヘッドにより読み出された再生波形は、DSO により A/D 変換後、再び GP-IB インタフェイスを介して PC に取り込まれる。その後、図のように PC において波形等化、ピタビ復号、ポストコーディング及び記録符号の復号化が行われ、出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ が得られる。但し、波形等化器はビットレートで規格化した遮断周波数 x_h の 6 次バタワースローパスフィルタ (LPF) とタップ数 N_t 、タップ間隔がシンボル間隔 T_s のトランスバーサルフィルタ (TF) により構成されている。また、ポストコードはプリコードの逆特性となるように定めている。最後に BER を、 $\{a_k\}$ と $\{\hat{a}_k\}$ の比較により求めている。なお、記録・再生実験に用いた媒体、ヘッドの諸元は Table 1 のとおりである。表に示すように、記録はトラック幅 2.7 μm 、ギャップ長 0.17 μm の MIG ヘッドにより行われ、再生にはトラック幅 1.3 μm 、ギャップ長 0.173 μm の SV ヘッドが用いられる。再生ヘッドに比べて記録ヘッドは 2 倍以上のトラック幅を持ち、トラックの中央を走査するように位置合わせしていることから、トラック両端での記録にじみによる特性の劣化はないものと考えられる。また、ヘッドと媒体の相対速度は、測定に用いた機器等の都合により 9.42 m/s としている。

3. 記録再生特性

Fig. 2 に、単層膜媒体による垂直磁気記録における孤立再生波形を示す。但し、記録電流 $I_w = 10\text{mA}$ としている。図より、Table 1 で示した記録/再生ヘッドと媒体の組合せによ

Fig. 1 Block diagram of the PRML experimental system.

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

る孤立再生波形はダイパルス状の波形となることがわかる。また、そのピークとピークの時間間隔を T_{pp} と定義すると、 $T_{pp} = 27.5$ ns となる。これが、長手磁気記録における半値幅と等しいと考えると⁶⁾、400 kbpI における規格化線密度は $K = 4.3$ にもなり、かなりの高密度記録であることがわかる。

Fig. 3 に再生電圧の記録電流依存性を示す。但し、記録周波数が 10~50MHz (53.7~269.5kfcI) の単一周波数の方形波を記録したときの再生電圧の Peak to Peak 値を示している。図より、長手磁気記録媒体の場合と異なり記録電流を大としても再生電圧が飽和しないのがわかる。また、再生電圧が最大となる記録電流は、記録周波数によって異なることもわかる。

Fig. 4 に、記録電流をパラメータとして求めた線密度と再生電圧の関係を示す。但し、 $I_w = 7 \sim 11$ mA としている。図より、記録電流が大となると比較的線密度が低い領域では再生電圧は大となり、130kfcI よりも高い領域では逆に再生電圧が小となるのがわかる。今回の測定では、 $I_w = 10$ mA の場合に低密度で十分な再生電圧が得られ、なおかつ、高密度においても再生電圧の低下が小であることから、以下の検討では記録電流を $I_w = 10$ mA にしている。また、このとき $D_{50} = 190$ kfcI である。

4. 等化特性

Fig. 5 に、線記録密度 375 kbpI における $c_k = 1$ の記録波形に対する LPF 通過後のビット応答波形を示す。但

Fig. 3 Dependence of the output voltage on the write current.

Fig. 4 Dependence of the output voltage on the linear density.

し、 $x_h = 0.4$ とし、16/17(0,6/6) 符号の記録系列とその LPF 通過後の再生波形のフーリエ変換の比より求めた伝達関数を逆フーリエ変換して得たインパルス応答を用いて作成している。また、TF のタップ係数は、LPF 出力波形に対して所望の PR 特性となるように最小自乗誤差 (MSE) 法を用いて定めている⁷⁾。Fig. 6 に、PR4 (PR(1,0,-1)), EPR4 (PR(1,1,-1,-1)), E²PR4 (PR(1,2,0,-2,-1)) 及び E³PR4 (PR(1,3,2,-2,-3,-1)) 特性となるように TF の伝達特性を定めた場合の TF 出力を示す。但し、実線が TF

Fig. 5 Dibit response of a single-layered perpendicular medium at the reading point (375 kbp).

出力波形を、○及び●印は等化目標値を表している。また、タップ数 $N_t = 11$ としている。図より、(d) の E^3PR4 方式は時刻 $t/T_s = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ において等化目標値 1, 3, 2, -2, -3, -1 に非常に近い値を取り、それ以外の時刻で等化誤差があるもののほぼ所望の PR 方式に等化できていることがわかる。また、他の PR 方式については等化目標値とよく合っていることから所望の PR 方式に等化できていることがわかる。また、Fig. 2 の孤立再生波形は上下が非対称であるにもかかわらず、等化波形はどの PR 方式でもほぼ上下対称となっている。従って、波形等化を行うことにより、孤立再生波形の上下非対称の影響が吸収されることがわかる。

5. ビット誤り率特性

Fig. 7 に、Fig. 1 の評価システムを用いて求めた $EPR4ML$ (350 kbp), E^2PR4ML (375 kbp) 及び E^3PR4ML (400 kbp) における TF のタップ数 N_t と BER の関係を示す。図より、 N_t によって達成できる BER が異なることから、BER を最小とする N_t を見出す必要があり、以下ではこの値を最適値 N_{topt} と表している。

Fig. 8 に、各種 PRML 方式のビット誤り率特性を示す。但し、□, ○, △ 及び ◇印は、それぞれ、 $PR4ML$, $EPR4ML$, E^2PR4ML 及び E^3PR4ML 方式の場合を表している。また、記録電流 $I_w = 10$ mA, 規格化遮断周波数 $x_h = 0.4$ とし、TF のタップ数 N_t は BER を最小とする最適値 $N_t = N_{topt}$ としている。また、記録補償回路により最小磁化反転間隔 $T_{min} = T_s$ の反転位置についてのみ記録補償を行っている。今回の記録・再生実験では、 10^6 ビットの入力データ系列についてビット誤り率を求めた。従って、図中の No error はビット誤り率が 10^{-6} 未満であることを表している。図より、 $PR4ML$ から E^3PR4ML 方式へと、より高次の PRML 方式で誤り率特性が改善されることがわかる。また、評価した PRML 方式のうちでは、 E^3PR4ML 方式が最も良い特性を示しており、線記録密度 375 kbp において $BER < 10^{-6}$ を達成している。

Fig. 9 に、ビタビ復号器における推定値と復号器入力

(a) PR4 system

(b) EPR4 system

(c) E^2PR4 system

(d) E^3PR4 system

Fig. 6 Output waveforms of the transversal filter (375 kbp, $x_h = 0.4$, $N_t = 11$).

Fig. 7 Dependence of the BER on the number of taps in the transversal filter.

Fig. 8 BER performance.

の差を識別点雑音とみなし、375 kbps における EPR4ML, E^2 PR4ML 及び E^3 PR4ML 方式に対する識別点雑音電力スペクトルを Table 2 に示す。また、これらを積分することにより得られる雑音電力 σ^2 , 各 PRML 方式の最小二乗ユークリッド距離 $d_{\min}^2$, 及びビタビ復号器の状態数 N_s を示す。但し、Fig. 9 の横軸はビットレート f_b で規格化している。図及び表より、 E^3 PR4ML 方式は EPR4ML 方式と比べて、雑音電力は約 2 倍となるものの、最小二乗ユークリッド距離は 3 倍となることがわかる。そこで、これらを考慮した指標として識別点 SN 比を $20 \log_{10}(d_{\min}/\sigma)$ [dB] で定義すると⁸⁾、375 kbps においては PR4ML, EPR4ML, E^2 PR4ML 及び E^3 PR4ML の各方式でそれぞれ 11.9, 17.1, 18.3, 19.1dB となり、 E^3 PR4ML 方式がもっとも高い SN 比となり、Fig. 8 における各 PRML 方式の優劣と一致している。

6. むすび

垂直単層膜媒体をスピンスタンドに装着し、実機に近い状態での高次 PRML 方式のビット誤り率特性を求め、性能比較を行った。その結果、高次の PRML 方式を採用することにより BER 特性が改善され、375 kbps において E^3 PR4ML 方式を採用した場合には、 10^{-6} 未満のビット誤り率を達成可能であることが明らかとなった。

Fig. 9 Noise power spectra at the discrimination point (375 kbps).

Table 2 Noise power σ^2 , minimum squared Euclidean distance $d_{\min}^2$, and the number of states.

PRML system	σ^2	$d_{\min}^2$	N_s
PR4ML	0.129	2	4
EPR4ML	0.078	4	8
E^2 PR4ML	0.085	6	16
E^3 PR4ML	0.147	12	32

謝辞 本研究で使用了 SV ヘッドを提供していただいた富士通 (株) の植松幸弘氏、日頃有益なご助言を賜わる松山大学の田崎三郎教授、東北大学電気通信研究所の中村慶久教授、村岡裕明助教授に深謝致します。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、謝意を表します。

参考文献

- 1) 今井拓司: 日経エレクトロニクス, no.745, 49-56, 1999.
- 2) 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**, 950-958, 1997.
- 3) 村岡裕明, 三浦健司, 杉田 恒, 中村慶久: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1065-1068, 1999.
- 4) 大沢 寿, 岡本好弘, 斎藤秀俊, 村岡裕明, 中村慶久: 日本応用磁気学会誌, **22**, S2, 33-37, 1997.
- 5) 市原一人, 岡本好弘, 斎藤秀俊, 大沢 寿: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1069-1072, 1999.
- 6) 法橋滋郎: 第 22 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 北海道, 1998, p.88 (日本応用磁気学会, 東京, 1998).
- 7) 田中公男: デジタル通信技術, pp.116-123 (東海大学出版会, 東京, 1986).
- 8) 大沢 寿, 住吉弘行, 岡本好弘, 斎藤秀俊, 村岡裕明, 中村慶久: 日本応用磁気学会誌, **23**, S2, 9-13, 1999.