垂直単層膜媒体を用いたPRMLチャネルのBER特性

BER Performance of PRML Channel Using Single-Layered Perpendicular Medium

岡本 好弘 赤松 学 金岡 利知 佐藤 光輝 斎藤 秀俊 大沢 寿 本多 直樹[†] 大内 一弘[†]
愛媛大学 工学部,[†] 秋田県高度技術研究所

Y. Okamoto, M. Akamatsu, T. Kanaoka, M. Sato, H. Saito, H. Osawa, N. Honda[†], and K. Ouchi[†]
Faculty of Engineering, Ehime University
[†]Akita Research Institute of Advanced Technology

Abstract The bit-error rate (BER) performance of perpendicular magnetic recording using a single-layered medium is studied. 16/17 (0, 6/6) code and (1, 7) RLL code are adopted as a recording code, and are respectively combined with various PRML systems to achieve higher linear recording density. The results of read/write experiments using a spinstand show that the higher-order PRML systems such as E³ PR4ML and E⁴ PR4ML systems exhibit excellent BER performance.

1. まえがき

スピNSTANDによる記録再生実験においては、20 GBPSIを越える面記録密度の達成が報告され [1]、量産ハードディスクドライブ (HDD) においても 10 GBPSIを越えるドライブが発表されるなど [2]、熱磁気緩和などの問題から限界説が囁かれる中で、依然として長手磁気記録方式を用いて記録密度の向上が予想以上のペースで続いている。一方、ここに来て再び、記録密度向上のペースを維持するための記録方式として、垂直磁気記録方式に大きな期待が寄せられてきた。

先に筆者らは、単層膜媒体、MIG (記録) ヘッド、MR (再生) ヘッドによる垂直磁気記録再生チャネルを構成し、高密度記録を達成するためによく用いられる 16/17(0,6/6) 符号化 PRML 方式と高周波記録用に期待されている (1,7) RLL 符号化 PRML 方式を適用して記録再生実験を行い、誤り率 (BER) 特性を求めて比較検討を行った [3]。

ここでは、上記の二種類の記録符号に対して、さらに高次の PRML 方式も含めて、ビット誤り率特性について検討を行う。

2. 記録・再生系の諸特性

Table 1 に、今回のスピNSTANDを用いた記録再

Table 1 Various conditions in read/write experiments using spinstand.

Write head	MIG head (TW=2.7 μ m, WGL=0.17 μ m)
Read head	SV head (RTW=1.3 μ m, SGL=0.18 μ m)
Medium	Single-layered perpendicular medium (Co-Cr-Nb-Pt, 50nm)
Relative velocity	9.42 m/s

生実験における諸条件を示す。表に示すように、記録膜厚が $\delta=50\text{nm}$ の Co-Cr-Nb-Pt 垂直単層膜媒体をスピNSTANDに装着し、ヘッド・媒体の相対速度 v が 9.42m/s になるように回転させ、トラック幅 TW=2.7 μ m、記録ギャップ長 WGL=0.17 μ m の MIG ヘッドで記録したのち、再生トラック幅 RTW=1.3 μ m、シールドギャップ長 SGL=0.18 μ m の SV ヘッドで再生する。

Fig.1 に、記録電流 I_{rec} に対する再生電圧の P-P 値 V_{pp} を示す。但し、記録波形は繰り返し周波数が 10 ~ 50 MHz (線密度で 53.7 ~ 268.5 kFCI) の方形波としている。図から、垂直単層膜媒体の場合には長手磁気記録のような飽和特性を示さず、 I_{rec} が大となると、再生電圧が減少しているのがわかる。また、記録周波数によって、再生電圧が最大となる記録電流が異なり、低い記録周波数ほど大となるのがわかる。そこで、Fig.2 に、記録電流 I_{rec} (9mA $\leq I_{rec} \leq$ 13mA) をパラメータとした記録密度特性を示す。図より、記録密度が 100kFCI を境にして長波長信号については、 I_{rec} が比較的大の場合が良好で、短波長信号では、 I_{rec} が比較的小の場合に良好に記録されるこ

Fig.1 Saturation characteristics.

Fig.3 Overwrite characteristics.

Fig.2 Roll-off characteristics.

Fig.4 Isolated reproducing waveform.

とがわかる。

また、記録電流の設定にはオーバーライト特性を考慮する必要がある。Fig.3に、Table 1の記録再生系におけるオーバーライト特性を示す。但し、図中、□印で示している 30 kFCI/70 kFCIは、線記録密度が 30 kFCIに相当する繰り返し周波数の方形波を記録したのち、70 kFCIに相当する方形波を記録した場合の特性を、また、○印で示す 70 kFCI/30 kFCIは 70 kFCIに相当する方形波で記録したのち、30 kFCIに相当する方形波を記録した場合のオーバーライト特性である。図より、記録電流を 10mA 程度以上に設定すれば、30 kFCI/70 kFCI、70 kFCI/30 kFCIとも -30dB 以下のオーバーライト特性を実現できることから、記録電流は 10mA 以上に設定する必要がある

のがわかる。

次に、Fig.4に垂直単層膜媒体における孤立再生波形を示す。但し、 $I_{rec} = 11\text{mA}$ としている。図のように、孤立再生波形はダイパルス状となる。そこで、P-P値を A_{pp} 、ピークとピークの時間間隔を T_{pp} と定義すると、 $A_{pp} = 177.3\text{mV}$ 、 $T_{pp} = 27.3\text{ns}$ ($T_{pp}v = 256.2\text{nm}$)が得られる。ここで、信号処理方式の検討における線密度を表すパラメータとして、ビット間隔 T_b で規格化した線密度 $K_{pp} = T_{pp}/T_b$ を定義する。例えば、400kBPIのとき、 $T_b = 6.74\text{ns}$ ($T_bv = 63.5\text{nm}$)から $K_{pp} = 4.05$ となる。従って、規格化線密度 K_{pp} と線記録密度 D_l (kBPI)の関係は、 $K_{pp} = 1.01 \times 10^{-5} D_l$ となる。また、読み出し点のSN比を $a = 20 \log_{10} A_{pp}/\sigma$ で定義する。但し、 σ^2 はビットレート $f_b = 1/T_b$ で

Fig.5 SNR characteristics.

“1”, “0” の繰り返しパターンを記録再生した場合のスペクトルより求めた f_b の帯域に落ち込む雑音電力である。

Fig.5に、SN比特性を示す。図より、記録周波数が高くなるにつれてSN比は低下するが、再生アンプの帯域により、40MHz(80Mbps 相当) 以上では約35dBではほぼ横ばいとなっているのがわかる。

3. PRML 方式

Fig.6に、PRML方式のブロック図を示す。ここで、 $\{a_k\}$ はビット間隔 T_b で入力される“1”, “0”の入力データ系列、 $\{b_k\}$ は、16/17(0,6/6)符号化または(1,7) RLL 符号化されたシンボル間隔 T_s の符号系列で、プリコーディングされた $\{c_k\}$ がNRZ記録される。ここで、16/17(0,6/6)符号では2ビット遅延、(1,7) RLL 符号では1ビット遅延のプリコードが用いられる。

スピンドに、Table 1に示した垂直単層膜媒体、MIGヘッド、MRヘッドを装着して記録再生チャネルを構成し、 $\{c_k\}$ を記録再生して出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ を得る。但し、記録符号化、波形等化、ピタビ復号などの信号処理については、ソフトウェアで実現している。そして、入力データ系列 $\{a_k\}$ と出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ を比較してビット誤り率(BER)を求める。

Fig.7に、記録電流と記録補償量に対するBER特性を示す。但し、線密度が375kBPIの16/17(0,6/6)符号化E²PR4ML方式の場合であり、□印は、記録補

Fig.6 Block diagram of PRML channel.

Fig.7 BER vs. write current and precompensation (16/17(0,6/6) coded E²PR4ML system).

償量 ε を 2.0ns とした場合の記録電流に対するBER特性、○印は、記録電流 I_{rec} を 11mA とした場合の記録補償量に対するBER特性をそれぞれ示している。また、波形等化はビットレート f_b で規格化した遮断周波数 $x_h = 0.4$ のローパスフィルタとタップ数 N_t のトランスバーサルフィルタで構成され、 N_t は誤り率が最小となる N_{topt} としている。図からわかるように、ビット誤り率は記録電流に依存し、 $I_{rec}=11mA$ で最小となる。また、記録補償量については2.0nsの

(a) (1,7) RLL coded PRML systems

(b) 16/17 (0,6/6) coded PRML systems

Fig.8 BER vs. linear density ($\varepsilon=2.0\text{ns}$, $I_{rec}=11\text{mA}$, $x_h=0.4$, $N_t=N_{topt}$).

場合に最小のビット誤り率が得られるのがわかる。

Fig.8 に線記録密度に対する BER 特性を示す。但し、記録電流 $I_{rec}=11\text{mA}$ 、記録補償量 $\varepsilon=2.0\text{ns}$ 、 $x_h=0.4$ 、 $N_t=N_{topt}$ としている。また、同図 (a) には、(1,7) RLL 符号化 PRML 方式、(b) には 16/17 (0,6/6) 符号化 PRML 方式の場合をそれぞれ示している。また、(a) において $\text{ME}^2\text{PR4ML}$ (PR (1,1,0, -1,-1)ML)、 $\text{ME}^3\text{PR4ML}$ (PR (1,2,1, -1, -2, -1)ML)、 $\text{ME}^4\text{PR4ML}$ (PR (1,3,3,0, -3, -3, -1)ML) 方式、(a) において $\text{E}^2\text{PR4ML}$ 、 $\text{E}^3\text{PR4ML}$ 、 $\text{E}^4\text{PR4ML}$ 方式は、それぞれ Δ 、 $\circ$ 、 $\square$ 印で表されている。また、Table 2 に、各 PRML 方式の $d_{\min}^2$ と状態数 N_s を示す。図より、表に示した $d_{\min}^2$ が有効に作用して、16/17 (0,6/6) 符号化 PRML 方式、(1,7) RLL 符号化 PRML 方式ともに高次の PRML 方式を適用することにより誤り率の

Table 2 $d_{\min}^2$ and number of states in various PRML systems.

Recoding code	PRML system	$d_{\min}^2$	N_s
(1,7)RLL	$\text{ME}^2\text{PR4}$	4	10
(1,7)RLL	$\text{ME}^3\text{PR4}$	12	16
(1,7)RLL	$\text{ME}^4\text{PR4}$	38	26
16/17(0.6/6)	$\text{E}^2\text{PR4}$	6	16
16/17(0.6/6)	$\text{E}^3\text{PR4}$	12	32
16/17(0.6/6)	$\text{E}^4\text{PR4}$	30	64

改善が得られ、16/17 (0,6/6) 符号化 PRML 方式では $\text{E}^4\text{PR4ML}$ 方式が、(1,7) RLL 符号化 PRML 方式では $\text{ME}^4\text{PR4ML}$ 方式が最も良好な特性を示すのがわかる。また、16/17 (0,6/6) 符号化 $\text{E}^3\text{PR4ML}$ 、 $\text{E}^4\text{PR4ML}$ 方式は 375kBPI で 10^{-6} 以下のビット誤り率を達成できることがわかる。

6. むすび

垂直単層膜媒体をスピンドに装着してデータの記録再生実験を行い、(1,7) RLL 符号、16/17 (0,6/6) 符号に対する各種 PRML 方式のビット誤り率特性を求め、比較検討を行った。その結果、(1,7) RLL 符号化 PRML 方式では $\text{ME}^4\text{PR4ML}$ 方式が、16/17 (0,6/6) 符号化 PRML 方式では $\text{E}^4\text{PR4ML}$ 方式が良好な特性を示した。また、16/17 (0,6/6) 符号化 $\text{E}^3\text{PR4ML}$ 、 $\text{E}^4\text{PR4ML}$ 方式は、375kBPI において、 10^{-6} 以下のビット誤り率を達成できることが明らかとなった。

謝 辞 日頃有益なご助言を賜る松山大学の田崎三郎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) 並びに文部省科学研究費補助金基盤研究 ((B)(2)) 課題番号 11450150 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] I. Okamoto, I. Kaitsu, H. Akimoto, K. Sato, E. N. Abarra, M. Shinohara, Itermag'99, AA-03, 1999.
- [2] 今井, 日経エレクトロニクス, no.749, p.19, Aug. 1999.
- [3] 岡本, 赤松, 金岡, 岸上, 斎藤, 大沢, “単層膜媒体による垂直磁気記録のための PRML 方式の誤り率特性,” 信学技報, MR99-8, June 1999.