

## PRML 方式における非線形要因のビットエラーレートへの影響

Estimation of the Bit Error Rate in a PRML Channel, Taking Account of Read/Write Nonlinearity

霜越正義・石田和人・鈴木幹夫・高野公史\*・兒玉直樹・釘屋文雄

(株)日立製作所ストレージシステム事業部, 神奈川県小田原市国府津 2880 番地 (☎256-0812)

\*(株)日立製作所中央研究所, 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280 (☎185-0014)

M. Shimokoshi, K. Ishida, M. Suzuki, H. Takano,\* N. Kodama, and F. Kugiya

Data Storage and Retrieval Systems Div., Hitachi, Ltd., 2880 Kozu, Odawara, Kanagawa 256-0812

\*Central Research Lab., Hitachi, Ltd., 1-280 Higashikoigakubo, Kokubunji, Tokyo 185-0014

In MR heads, read-nonlinearity and write-nonlinearity, which is manifested in phenomena such as nonlinear transition shift (NLTS), degrade the bit error rate (BER) performance in a PRML read channel. We discuss a simple method of estimating these nonlinearity effects for a PRML read channel, and compare the calculated and experimental results. In a PRML read channel, the BER can be easily calculated from the noise deviation after the equalization, and the nonlinearities increase the noise deviation. The calculation and experimental results show a proportional relationship between the noise deviation due to read nonlinearity and the absolute value of the amplitude asymmetry. The deviation due to NLTS can be calculated by considering the first and second adjacent transition shifts and write precompensation. The total effects of the nonlinearities are easily calculated by adding the squares of all the noise deviations.

**Key words:** Read/Write nonlinearities, PRML channel, NLTS, amplitude asymmetry, noise deviation after equalization

## 1. はじめに

磁気ディスク装置の記録密度は年率約 60% という急激な増加をしている。これは PRML 方式の採用によるところが大きい<sup>1)</sup>。PRML 方式では、孤立波パルスの線形重ね合せにより再生信号が復元できることを前提としている。実際の磁気ディスク装置においては記録、再生の両者において非線形な現象が存在しビットエラーレート (BER) に悪影響を及ぼす<sup>2), 3)</sup>。

再生系の非線形現象としては、MR ヘッドの非線形応答による効果があり、孤立波の振幅値非対称などの現象として出現する。記録系の非線形現象としては、非線形トランジションシフト (NLTS) がある。

磁気ディスク装置の設計において、上記非線形効果を考慮して BER への影響を見積るのは通常複雑な計算が必要となり、またその効果だけを取り出した実験は容易ではない。本研究では、非線形要因によるパーシャルレスポンス処理後の等化誤差量の増加に着目し、非線形要因の BER に対する影響を定量的に見積る手法を検討した。その結果、非線形要因による等化誤差量の増加を推定することにより BER の増加を簡便に見積ることができることを実験およびシミュレーションで明らかにした。

## 2. 等化誤差量の増加と BER の関係について

本報告では PR4ML の場合を取り上げる。パーシャルレスポンス処理後の等化誤差量を次式で表し、以後  $\sigma_n$  で表す。

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (X_k - X_0)^2} \quad (1)$$

ここで  $N$  は全サンプル数、 $X_k$  は  $k$  番目サンプルの振幅値、 $X_0$  は等化後の目標振幅値であり PR4ML の場合 +1, 0, -1 のいずれかになる。 $X_k$  の分布が正規分布の場合、ビタビ復号器を通した後の BER は、(2) 式で与えられる<sup>1)</sup>。

$$\text{BER} = 4 \cdot Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \quad (2)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (3)$$

Fig. 1 に (2) 式の計算結果を実線で示す。また次節で述べる実験条件で BER と  $\sigma_n$  の関係を測定した実験結果を□印として図中に示す。Fig. 1 からわかるように (2) 式と測定結果は 1 桁程度の差で対応している。この差は、R/W チャネルで発生する雑音には相関が存在し必ずしも  $X_k$  の分布が正規分布にはならないことにより生じていると考えられる。しかしながら  $X_k$  の分布が独立した正規分布に従う要因で構成されていると仮定すると次のように  $\sigma_n$  を簡単に計算することができる。非線形要因がない場合の等化誤差量を  $\sigma_0$ 、非線形要因を含む場合の等化誤差量を  $\sigma_n$  とした場合、非線形要因による影響は  $\Delta\sigma_n$  として、

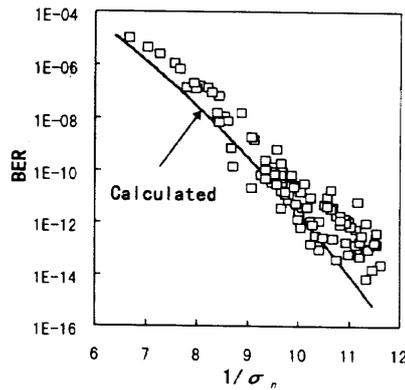
$$\sigma_n^2 = \sigma_0^2 + \Delta\sigma_n^2 \quad (4)$$

となる。また非線形要因が複数存在する場合には、それぞれが独立であると仮定すると

$$\Delta\sigma_n^2 = \sum_k \Delta\sigma_n(k)^2 \quad (5)$$

と扱うことができる。ここで  $\Delta\sigma_n(k)$  は  $k$  番目の要因による等化誤差量の増分である。なお (4) 式における  $\sigma_0$  は、再生信号の SN 比やチャネルのもつ特性などに依存する。したがって  $\sigma_0$  は PRML 処理用の IC の単品評価を行うなどして求める必要があるが、本報告では非線形要因の影響を見積ることを目的とするので既知の量として扱う。

以上のように (2) から (5) 式が成立すると仮定すると、非線形要因による等化誤差量の増分を要因ごとに求め  $\Delta\sigma_n$  を算出し  $\sigma_n$  の増分を求めることにより BER の変化を簡単に見積るこ



**Fig. 1** Bit error rate (BER) versus the inverse of noise deviation after equalization. Squares denote experimental results, while the solid line denotes the calculated result.

とができる。先にも述べたように(2)から(5)式は必ずしも成立しないが、ある程度の精度があれば、このような簡単な手法で非線形要因のBERへの影響を定量化し設計の見通しを得ることは有用である。次章以下、非線形要因による等化誤差量の増加量および上記仮定の妥当性を検討した結果について述べる。

### 3. 実験方法および計算方法

#### 3.1 実験方法

再生ヘッドにはトラック幅 $3\mu\text{m}$ のMRヘッド、記録ヘッドにはトラック幅 $3.5\mu\text{m}$ の薄膜ヘッドを用いた。媒体は $H_c$ が約 $167\text{ kA/m}$ ( $2.1\text{ kOe}$ )、 $B_r \cdot t$ が約 $1.2 \times 10^{-2}\text{ T} \cdot \mu\text{m}$ ( $120\text{ G} \cdot \mu\text{m}$ )のスパッタ媒体を用いた。R/Wチャネルは $\sigma_n$ を測定する機能をもったPRML処理用LSIを用いた<sup>4)</sup>。タップ数は7で、タップ係数はランダムパターンの等化誤差量が最小になるように決定した。記録密度は $100\sim 150\text{ kBPI}$ 、転送レートは $10\sim 16\text{ MB/s}$ で実験を行った。

再生系の非線形要因と $\sigma_n$ の関係については以下のように調べた。まずMRヘッドの永久磁石を消磁し、記録再生を繰り返した場合に波形非対称性が変化する不安定なヘッドを作製した。このヘッドを使用し、BERあるいは $\sigma_n$ 測定時の再生ヘッドの状態を把握するために、以下の手順を繰り返して測定を行った。(1)あらかじめ測定用のランダムパターンを媒体上に記録しておく。(2)別のトラックで孤立波形を記録再生し、振幅値、半値幅を測定し波形非対称性を算出する。(3)測定用ランダムパターンでBER、 $\sigma_n$ を測定する。

再生系の非線形形の大きさを表す尺度として、以下のAs、AmpおよびAs、PWの波形非対称性を表す二つのパラメータを定義した。

$$As, Amp(\%) =$$

$$\frac{\text{正側孤立波の振幅値} - \text{負側孤立波の振幅値}}{\text{正側孤立波の振幅値} + \text{負側孤立波の振幅値}} \times 100 \quad (6)$$

$$As, PW(\%) =$$

$$\frac{\text{正側孤立波の半値幅} - \text{負側孤立波の半値幅}}{\text{正側孤立波の半値幅} + \text{負側孤立波の半値幅}} \times 100 \quad (7)$$

記録起因の非線形要因と $\sigma_n$ の関係については、記録電流あ

るいは書き込み補償量(以下WPC量と略す)を変化させることによりNLTS量を変化させ、そのときのBER、 $\sigma_n$ を測定した。なお書き込み補償は第1隣接の磁化反転が存在する場合のみ行った。NLTS量については高次高調波抽出法を用いて第1隣接および第2隣接ビットによるNLTS量を測定した<sup>5)</sup>。なおNLTS量は最小ビット間隔に対する磁化遷移の移動量の比(%)で定義した。

#### 3.2 計算方法

計算シミュレーションは以下の手順で行った。MRヘッドからの出力波形は、次のような仮定を用いて計算した<sup>6)</sup>。媒体の孤立磁化遷移からのヘッド入力磁界 $h(t)$ は(8)式のようにローレンツ型とし、ヘッド入力磁界に対しては線形重ね合わせが成立すると仮定した。

$$h(t) = \pm \frac{g^2}{t^2 + g^2} \quad (8)$$

ここで $t$ は時刻、 $g$ は $h(t)$ の半値幅である。MRヘッドの再生出力 $V(t)$ は(9)式で表し、入力磁界に対して $\cos^2$ 型の変化をし、波形非対称は、MRヘッドのバイアス点 $\theta_b$ が変化することによって生じるとした。

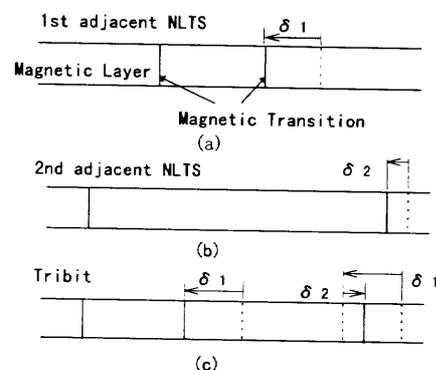
$$V(t) = V_0[\cos^2(\theta(t) - \theta_b) - \cos^2(\theta_b)] \quad (9)$$

$$\theta(t) = \sin^{-1}\left(\frac{h(t)}{h_0}\right) \quad (10)$$

ここで $V_0$ は最大出力、 $h_0$ はMR素子の飽和磁界である。

NLTSについてはFig. 2のように考え計算を行った。NLTS量は、第1隣接ビットによるものを $\delta_1$ 、第2隣接ビットによるものを $\delta_2$ として磁化遷移が移動するとした。ダイビットの場合には、Fig. 2(a)および(b)に示すようにビット間距離に応じて、 $\delta_1$ あるいは $\delta_2$ だけ磁化遷移がシフトするとした。トライビットなどの磁化遷移が3個以上連続する場合にはFig. 2(c)に示すように $\delta_1$ と $\delta_2$ が逆向きに作用するとして磁化遷移の移動量を規定した。以上の仮定をもとに、ランダムパターンのヘッド出力波形を計算したものにランダム雑音を加え再生波形とした。PR処理としては実験に使用したLSIと同様に7タップのトランスバーサルイコライザーを仮定した。

### 4. 結果および考察



**Fig. 2** Schematic drawings of nonlinear transition shifts (NLTS). (a) First adjacent NLTS ( $\delta_1$ ) for a dibit pattern. (b) Second adjacent NLTS ( $\delta_2$ ). (c) Assumed NLTS for a tribit pattern.

#### 4.1 再生起因の非線形による等化誤差量の増加

Fig. 3 に *As. Amp* と *As. PW* の関係を多数のヘッドで測定した結果を示す。 *As. Amp* と *As. PW* には強い相関がある。測定結果と計算結果はほぼ一致しており、前述したモデルで MR ヘッドの応答を近似できているといえる。また *As. Amp* と *As. PW* はほぼ 1 対 1 で対応しており、両者のうち片方の量だけで非対称性を規定できることがわかる。よって以後 *As. Amp* のみで非対称性を規定する。

Fig. 4 に *As. Amp* と  $\sigma_n$  の増分である  $\Delta\sigma_n$  との関係を示す。このときの孤立波の半値幅（正側と負側の平均値）は、約 23.8 ns でありユーザー規格化密度（半値幅/ビット間隔）は約 2.0 である。 *As. Amp* が正の範囲で変化するヘッド (Head A) と負の範囲で変化するヘッド (Head B) について実験を行った。測定および計算において、 $\Delta\sigma_n$  は *As. Amp* の絶対値にほぼ比例する結果が得られた。以上の実験および計算より  $\Delta\sigma_n$  は、

$$\Delta\sigma_n(\text{As. Amp}) = k_1 \cdot |\text{As. Amp}| \quad (11)$$

で求められ、 $k_1$  は約 0.004 であることがわかった。(2), (3), (4), および (11) 式から *As. Amp* による BER の変化をいくつかの  $\Delta\sigma_0$  に対して計算した結果を Fig. 5 に示す。また Fig. 5 には *As. Amp* と BER を測定した結果についても示す。 *As. Amp* による BER の変化を約 1 桁程度の誤差で予測できることがわかる。

#### 4.2 NLTS による等化誤差量の増加

Fig. 6 に第 1 隣接 NLTS ( $\delta_1$ ) と  $\sigma_n$  および BER の関係を測定した結果および計算結果を示す。なお第 2 隣接 NLTS ( $\delta_2$ ) の測定結果は、8.7% であった。実験では  $\delta_1$  を変化させるために WPC 量を調整した。計算で求めた  $\Delta\sigma_n$  と適当な  $\sigma_0$  を仮定し (4) 式から  $\sigma_n$  を求めた結果、さらに (2), (3) 式から BER を求めた結果を Fig. 6 中に実線で示した。計算が実験結果と良く対応していることがわかる。実験および計算結果では  $\sigma_n$  が最小となるのは、 $\delta_1$  が 0% ではなく約 12% の場合である。これは定性的には次のように説明できる。トライビットのような最小ビット間隔の磁化遷移が続くデータパターンの場合には  $\delta_1$  と  $\delta_2$  が相殺し等化誤差が小さくなる。したがってランダムパターンでは最小ビット間隔での磁化遷移の繰り返しを多く含

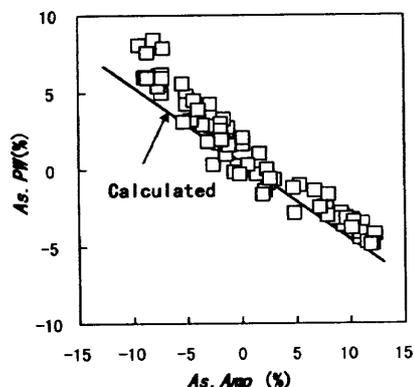


Fig. 3 Asymmetry of the pulse width (*As. PW*) versus asymmetry of the amplitude (*As. Amp*). Squares denote experimental results, while the solid line denotes the calculated result.

めため  $\Delta\sigma_n$  が小さくなると考えられる。しかしながら  $\delta_2$  が 8.7% なのに対し、 $\sigma_n$  が最小となる  $\delta_1$  が 12% と  $\delta_2$  より大きくなる点については現在のところよく解明できていない。本計算では磁化遷移のシフト量を 2 種類だけに限定したが、複雑なパターンで書き込み補償を行った場合には磁化遷移のシフト量には多くの種類が出現すると考えられる。本計算のモデルを改良するとともに今後検討していく予定である。

Fig. 7 は  $\delta_1, \delta_2$  が変化した場合の  $\Delta\sigma_n$  の変化を計算した結果である。  $\delta_2$  が大きいほど  $\Delta\sigma_n$  が最小となる  $\delta_1$  は大きくなり、 $\Delta\sigma_n$  の最小値は大きくなる。これは  $\delta_1$  について WPC で補正する場合には、 $\delta_2$  の値が大きいほど  $\delta_1$  に対する最適な WPC 量は小さくなり、 $\Delta\sigma_n$  は大きくなることを示している。計算結果より  $\delta_1$  を調整した場合（第 1 隣接ビットがあるときのみ書き込み補償する場合）、 $\delta_2$  に対する  $\Delta\sigma_n$  は、

$$\Delta\sigma_n(\delta_2) = k_2 \cdot |\delta_2| \quad (12)$$

で与えられる。ここで計算結果より  $k_2$  は約 0.004 である。

#### 4.3 再生起因、記録起因の両者による影響

Fig. 8 は、WPC 量を最適にした場合に  $\delta_2$  と  $\Delta\sigma_n$  の関係を計算によって求めた結果を示す。 *As. Amp* が 0% の場合、 $\delta_2$  に対して  $\Delta\sigma_n$  がほぼ直線的に増加することがわかる。また *As.*

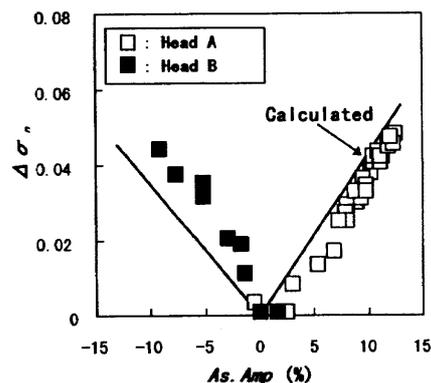


Fig. 4 Increases in the noise deviation after equalization ( $\Delta\sigma_n$ ) versus the asymmetry of the amplitude (*As. Amp*). The solid line denotes the calculated result.

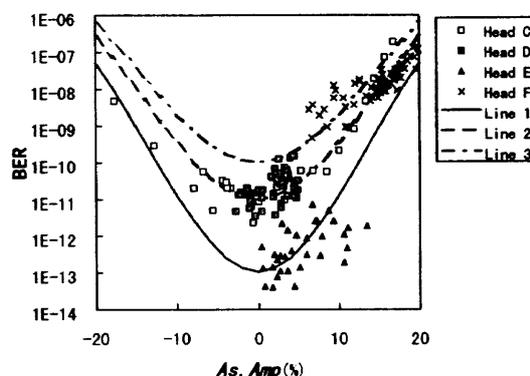


Fig. 5 Bit error rate (BER) versus asymmetry of the amplitude (*As. Amp*). Symbols denote experimental results, while the solid lines denote the calculated result for various noise deviations ( $\sigma_0$ ). Line 1, line 2, and line 3 show the results in the case of  $\sigma_0 = 0.0918$ , 0.0996, and 0.104, respectively.

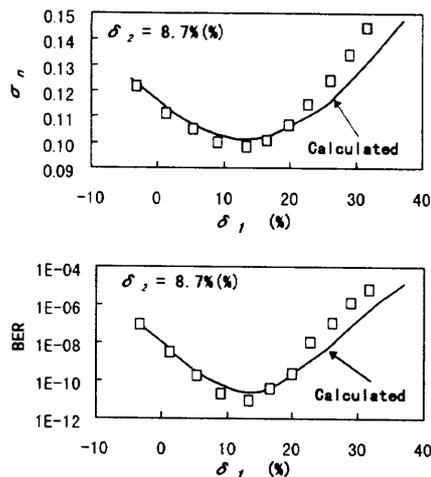


Fig. 6 Noise deviation after equalization ( $\sigma_n$ ) and bit error rate (BER) versus the first adjacent NLTS ( $\delta_1$ ). Squares denote experimental results, while the solid lines denote the calculated results.

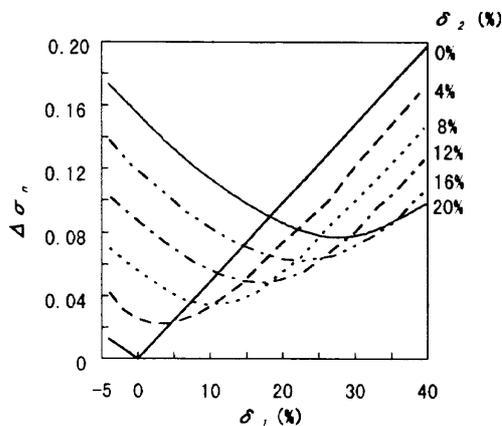


Fig. 7 Calculated results for the increase in the noise deviation after equalization ( $\Delta\sigma_n$ ) versus the first adjacent NLTS ( $\delta_1$ ) for various second adjacent NLTSs ( $\delta_2$ ).

$Amp$  が 10% の場合、 $\Delta\sigma_n$  を  $\delta_2$  と  $As \cdot Amp$  の関数と考えると  $\Delta\sigma_n$  の  $\delta_2$  依存性は、

$$\Delta\sigma_n(\delta_2, As \cdot Amp = 10\%)^2 = \Delta\sigma_n(\delta_2, As \cdot Amp = 0\%)^2 + \Delta\sigma_n(\delta_2 = 0\%, As \cdot Amp = 10\%)^2 \quad (13)$$

が成立していることがわかる。

BER への影響を調べる場合には (2)~(5) 式を使用すればよい。一例を示すと  $\sigma_0$  が 0.11 で  $As \cdot Amp$ ,  $\delta_2$  とともに 0% のときに BER は  $1 \times 10^{-9}$  であるが、 $As \cdot Amp$  が 10%,  $\delta_2$  が 5% になると BER は  $2 \times 10^{-8}$  に悪化する。

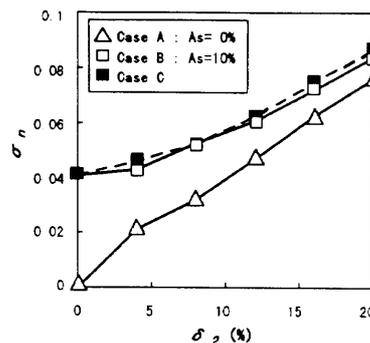


Fig. 8 Calculated results for the increase in the noise deviation after equalization ( $\Delta\sigma_n$ ) versus the second adjacent NLTS ( $\delta_2$ ). The line with triangles shows the results in the case of  $As \cdot Amp = 0\%$  (Case A). The line with open squares shows the results in the case of  $As \cdot Amp = 10\%$  (Case B). The dotted line with filled squares shows the results obtained by using Eq. (13).

### 5. まとめ

PRML 方式において、非線形効果が BER に及ぼす影響を簡便に見積る手法について検討し、以下の結果、知見を得た。

(1) MR ヘッドの非線形応答による波形非対称から生じる等化誤差量の増加 ( $\Delta\sigma_n$ ) は、振幅値の非対称性 ( $As \cdot Amp$ ) の絶対値にほぼ比例する。

(2) NLTS による等化誤差量の増加は、第 1 隣接 NLTS ( $\delta_1$ ) を書き込み補償で調整した場合には、第 2 隣接 NLTS ( $\delta_2$ ) にほぼ比例する。

(3) 上記の要因による等化誤差量の増加は、それぞれの増加分を 2 乗和することにより近似的に求めることができる。

### 文 献

- 1) R. W. Wood and D. Peterson: *IEEE Trans. Commun.*, **34**, 454 (1986).
- 2) 澤口秀樹, 西田靖孝: 信学技報, **MR95-66**, 41 (1995).
- 3) A. Taratorin: PRML: A Practical Approach, p. 22 (Guzik Technical Enterprises, San Jose, 1995).
- 4) S. Mita, Y. Ouchi, T. Takashi, N. Sato, H. Aoi, S. Minoshima, T. Hirai, H. Miyasaka, R. Shimokawa, T. Matsuura, H. Sawaguchi, S. Miyazawa, and K. Hikasa: 1996 IEEE ISSCC Digest of Technical Papers, p. 62 (1996).
- 5) Y. Tang and C. Tsang: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 5316 (1991).
- 6) N. Curland and R. Macheliski: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 309 (1994).

1997 年 10 月 27 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録