

高密度光ディスク装置における信号再生技術

Reproduced Signal Processing Technologies for High-Density Optical Disk Systems

奥村 哲也*¹
Tetsuya Okumura林 哲也*¹
Tetsuya Hayashi秋山 淳*¹
Jun Akiyama前田 茂己*²
Shigemi Maeda高橋 明*¹
Akira Takahashi

要 旨

高密度光ディスク装置の実用化にはPRML検出が必須となるが、その採用には再生信号品質の評価方法と波形等化特性の最適化をどうするかが課題となる。これを解決するため、SAMと呼ばれる評価値を応用してビットエラーレート (BER) を予測する技術、及びBERを最小化する適応等化技術を開発した。本稿では各技術についてその原理の解説と具体的手法の理論的な導出を行う。更に、本技術を用いることによって、予測したBERが実際のBERと非常によく一致することと、適応等化によりタンジェンシャルチルト (ビーム走査方向のディスク傾き) マージンが大きく改善されることを評価機による実験で確認したので、その結果も併せて報告する。

PRML detection is necessary for practical use of high-density optical disk drives. However, its adoption has two main problems: how to evaluate reproduced signal quality, and how to optimize the characteristics of equalizers. We have developed a bit error rate (BER) prediction method and an adaptive equalization method minimizing BER, using the evaluation value called SAM. In this report, we explain the principle of each technology, and theoretically derive its implementable algorithm. In addition, we report some experimental results which show that the predicted BER by our method corresponded to the actually measured BER, and that our adaptive equalization method improved the tangential tilt (i.e. the tilt in the direction of light beam scanning) margin.

まえがき

光ディスク装置における記録密度向上と動作マージン拡大を実現するための再生信号処理技術としてPRML (Partial Response Maximum Likelihood) 検出方式の実用化が進んでおり、Blu-ray Discドライブにも適用することが可能であるが、その採用にあたって課題となるのが再生信号品質の評価方法、及び波形等化特性の最適化方法である。信号品質評価はディスク性能確認、ドライブ出荷前の各種調整、ドライブ起動時の自動調整などに必須である。これまで評価値として用いられてきたジッタは、従来の二値検出方式では理論的にBERと対応していたが、復号原理の異なるPRMLでは正しく対応しない。信号品質は本来BERに基づいて評価すべきであるが、これをドライブ上で直接測定するのは時間的にも回路的にも難しいため、ジッタに代わる新たな評価値が求められていた。また、PRMLは波形等化器を用いて再生信号を所定の

PR特性に近づける過程を含むが、等化特性を固定すると、再生系の周波数特性及びSN比がディスクの特性差や傾きにより変化した場合に等化特性が最適な特性からずれてBERが悪化し各種マージンが狭くなるため、再生系の変化に追従して等化特性を最適化させる適応等化法が不可欠となる。従来の代表的な適応等化方式である最小二乗誤差法 (LMS:Least Mean Square) を用いるとPRML検出で想定する周波数特性に近づくように等化特性を決めることはできるが、BERを十分に低減する特性とはならなかった。

これらの課題に対し、我々はSAM (Sequenced Amplitude Margin)¹⁾ と呼ばれる評価値を応用してBERを予測する技術SAMER²⁾、及びBERが最小となるように波形等化特性を最適化する技術LMSAM³⁾を開発した。本論文ではこれらの技術の基本原則、実現方法、効果検証のための実験結果について、各々説明を行う。

*¹ 技術本部 デバイス技術研究所 第3研究室*² A1235プロジェクトチーム

1. PRML 検出方式と SAM

始めに前提となるPRMLとSAMについて簡単に説明しておく。PRMLとは、波形干渉を抑えずに狭い周波数帯域のままデータを記録再生するPR (Partial Response) 検出と、1ビット毎に判別するのではなく複数の再生信号列から最も確からしいビット列を復号するML (Maximum Likelihood) 復号の複合技術である。

図1にPR特性としてPR (1, 2, 1)を想定した場合の(a) 孤立ビットと(b) 複数ビット列の想定波形を示す。孤立マーク1T (Tはチャンネルビット長) は1:2:1のレベル比で再生される(すなわち隣接ビットへの波形干渉が含まれる)ことを予め想定している。任意のビット列の想定波形は孤立波形の重ね合わせにより求められる。2Tマークのレベルは3Tマークよりも小さくなっていることから想定する再生系が低域通過特性を持つことが分かるが、これは高密度光ディスク再生系の特性を近似するものである。従来の二値検出方式のように中心レベルに対して波形が上にあるか下にあるかで1か0かを判断する方法だと、短マークの再生信号のレベルを増幅するために高域強調フィルタを通す必要があるが、それが高域ノイズや符号間干渉の増大など信号品質の新たな悪化要因となっていた。これに対しPR検出は光ディスク再生系の特性を近似した想定波形に基づいて1か0かを判断するので、高域強調フィルタが不要となり、エラーレートの低い再生が可能となる。

図2はML復号の原理を説明するための模式図である。光ディスクからの再生波形を、あり得るすべてのビット列の想定波形と比較して最も近いものを選べ

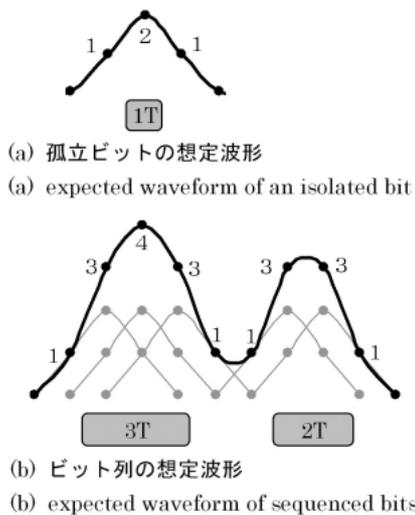


図1 PR (1, 2, 1) 検出
Fig. 1 PR (1, 2, 1) detection.

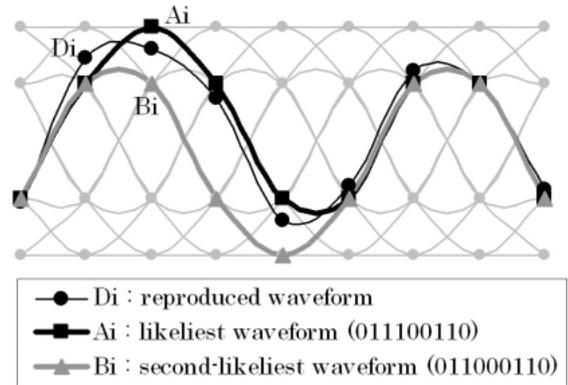


図2 ML復号
Fig. 2 ML decoding.

ば、その想定波形の元ビット列が復号ビット列となる。図2の場合、"011100110"の想定波形が再生波形と最も近いので、これを復号ビット列とする。これにより複数の再生信号列を考慮に入れて最も確からしいビット列を復号することができる。なお、最も近い想定波形を効率的に探索するアルゴリズムとしてビタビ復号と呼ばれる方式が使われる。

続いてSAMについて説明する。図2の各波形のチャンネルクロックによるA/D変換値をそれぞれDi (再生波形), Ai (最も近い想定波形), Bi (2番目に近い想定波形)とすると、SAM値は次式で定義される。

$$SAM \text{ 値} \equiv \sum_i (D_i - B_i)^2 - \sum_i (D_i - A_i)^2 \quad (1)$$

すなわちSAM値とは、再生波形に対する最も近い想定波形の誤差と、再生波形に対する2番目に近い想定波形の誤差との差である。再生波形が最も信頼性高く復号されるのは再生波形がPR想定波形と一致する(ノイズがない)場合、すなわちDi=Aiの場合であり、このときのSAM値(理想SAM値)は

$$\text{理想SAM値} = \sum_i (A_i - B_i)^2 \quad (2)$$

で表される。理想SAM値は記録ビット列に対応する所定のAiとBiで決まり、記録ビット列によって様々な値をとる。実際の再生波形はノイズを含むため理想SAM値から離れた値となる。理想SAM値に近いほどDiとAiの誤差が小さく、DiとBiの誤差が大きいことを意味するので、復号エラーを起こす確率は低くなる。逆にDiのノイズが大きすぎてAiよりもBiに近い再生波形になるとSAM値は負の値となり、このとき復号エラーが発生する。このようにSAM値は

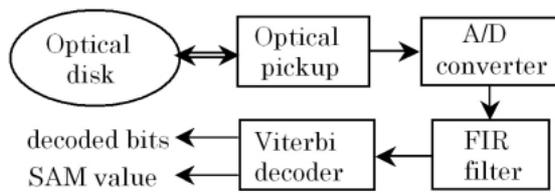


図3 PRML 検出器
Fig. 3 PRML detector.

PRML検出におけるエラー発生プロセスとの対応性が非常に高い信号品質評価値である。

図3にPRML検出器の一般的な構成の概略を示す。光ディスクからピックアップにより読み出された信号はA/D変換器を経てFIR (Finite Impulse Response) フィルタによって所定のPR特性に近づくように波形等化された後、ビタビ復号器によってML復号が行われる。ビタビ復号器からは復号ビットが出力されると同時に、個々の復号ビット列に対応するSAM値も出力される。

2. ビットエラーレート予測技術

ここではSAMを用いたBER予測技術について説明を行う。

2.1 基本原理と実現方法

再生信号から測定した個々のSAM値をみれば再生信号の部分的な信頼度を判断できるが、記録再生系の信頼性をトータルに評価するためには、再生信号全体から求めたSAM値をヒストグラム化して評価すればよい。

実際に光ディスクを再生して得られたSAMヒストグラムの一例を図4の実線に示す。縦軸は度数そのものではなく、総数で割って求めた相対度数である。既に説明したようにSAM値が0より小となったときにPRML復号エラーが発生することから、このヒストグラムのSAM<0なる部分の相対度数を求めれば、それがビットエラーの発生頻度、すなわちBERに一致する。しかしその測定には実際のBER測定と同じサンプル数が必要となる。通常のBERは1E-5以下のオーダーで測定する必要があるため、信頼性の高い評価値を得るためには少なくとも1E+7ビット以上のサンプルを測定する必要があり、測定時間や回路規模の問題で実装は困難である。また、ROMディスクのように記録ビット列が未知の場合、自らの復号結果を記録ビット列とみなすと見かけ上エラーが0となるので、求まるSAM値がすべて正の値となり、実BERの測定自体が不可能である。

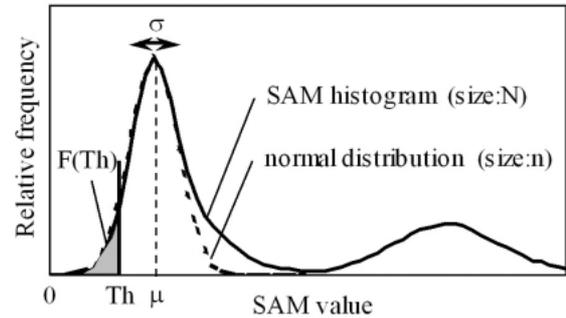


図4 実測SAMヒストグラム
Fig. 4 measured SAM histogram.

そこで、SAMER (SAM Error Rate) と名付けた評価値を提案した。SAMERは所定のしきい値 Th 以下となるSAM値の累積相対度数 $F(Th)$ として定義され、コンパレータとカウンタの簡単な回路構成で実装可能である。再生信号品質が良いほど0付近の度数が少なくなるので、 $F(Th)$ の大小によって定性的な信号品質の評価が可能である。 Th として適当な値を選べば0以下となる度数と比べて1~2桁以上多くの度数が $F(Th)$ として得られるため、非常に少ない測定サンプル数で同等の信頼性を得ることができる。

更に、図4に破線で示されるようにヒストグラムの最頻値 μ 以下の部分が正規分布に近似できることを利用すれば、 $F(Th)$ と μ とから定量的にBERを予測することが可能である。最頻値 μ 、標準偏差 σ の正規分布の累積確率 $F(Th)$ は式(3)のように既知なので、実測した $F(Th)$ と μ を代入すれば σ が求まる。SAM<0となる確率 $F(0)$ はBERに一致するので、もう一度式(3)を用いて $F(0)$ を計算すればBERを予測することができる(正確にはSAMヒストグラムの母数 N と近似正規分布の母数 n の比で補正して予測BER= $(n/N) \times F(0)$ とする必要がある)。これはSAMヒストグラムが正規分布に近似できることを前提としているため、ディフェクト等の不自然なノイズにより発生したエラーを除いたBERを予測することになる。

更に精度良くBERを予測するために、正確な実測が難しい μ を計算で求める方法を説明する。異なる2つのしきい値 $Th1$ と $Th2$ で $F(Th1)$ と $F(Th2)$ を実測し、これらを式(3)に代入すれば、2つの未知数 μ と σ についての連立方程式が得られる。これを解いて μ と σ を求めれば、以降は同様にしてBERを予測することができる。

$$F(Th) = \int_{-\infty}^m \frac{\exp\{-(x-\mu)^2/2\sigma^2\}}{\sqrt{2\pi}\sigma} dx \quad (3)$$

2・2 実験による効果の検証結果

表1の条件で実際の光ディスク装置のラジアルチルトマージンを評価した結果を図5に、デフォーカスマージンを評価した結果を図6に、それぞれ示す。

いずれの結果においても、実測BERとSAMERを用いて予測したBERがほぼ一致していることが分かる。状態変動が小さい部分で実測BERのプロットがないのは、実測BERが0であったことを示している。すなわち測定サンプル数が少ない場合、真のBERがある程度以上小さいと実測BERはすべて0となってしまう。一方、予測BERは少ない測定サンプル数でも求めることが可能であり、BERが最小となる状態を検出することができるので、チルトやサーボオフセットなどの高精度な調整への適用が期待される。

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions.

Laser wavelength	406 nm
NA of objective lens	0.85
Cover layer thickness	0.1 mm
Channel clock frequency	66 MHz
Track pitch	0.32 μm
Minimum mark length	0.160 μm
Modulation code	17PP
PRML type	PR (1,2,1) ML
FIR filter	9 Taps
Sample number	1E+6

3. 波形等化特性最適化技術

PRML 検出は FIR フィルタによって再生信号を PR 特性に近づけるように波形等化を行う過程を含む。FIR フィルタは再生信号とタップ係数の畳み込み演算を行うデジタルフィルタである。記録再生系の各種変動に伴う再生信号の周波数特性の変化に追従してタップ係数を適応的に更新すれば、常に信頼性の高い再生が実現できる。ここでは、SAMを用いることによってBERが最小となるようにタップ係数を最適化する適応等化技術LMSAM (Least Mean squared SAM error) について説明する。

3・1 基本原理と実現方法

ここでは17PP変調とd=1制約付きPR (1, 2, 1) MLを用いる場合について説明するが、他の場合についても同様の考え方で適用が可能である。

すべてのあり得るビット列を含むようなランダムビット列からノイズのない理想波形信号(振幅は±1に正規化)を生成し、理想SAM値を求めてヒストグラムにしたものを図7(a)に示す。理想SAM値は幾つかの離散的な値をとっているが、それぞれの度数が異なるのは各理想SAM値を持つ記録ビット列の種類の数とその出現頻度が異なるためである。また図7(b)は実際に光ディスクから再生した信号について求めたSAMヒストグラムである。各理想SAM値に対応するヒストグラムは種々のノイズにより広がりを持った形状となっている。SAM<0のときにビットエラーが発生することを考慮すると、大部分のエラーの発生源である最小の理想SAM値1.5に対応する記録ビット列のみに注目してそのSAMヒストグラムの分散が最小となるように等化特性を適応化すれば、BERを最小化することが可能であると考えられる。これがLMSAMの基本的な原理である。

この原理に基づいてLMSAMアルゴリズムを導出

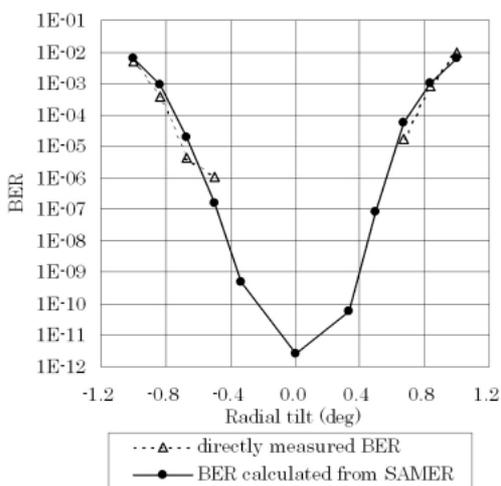


図5 ラジアルチルトマージン

Fig. 5 Radial tilt margin.

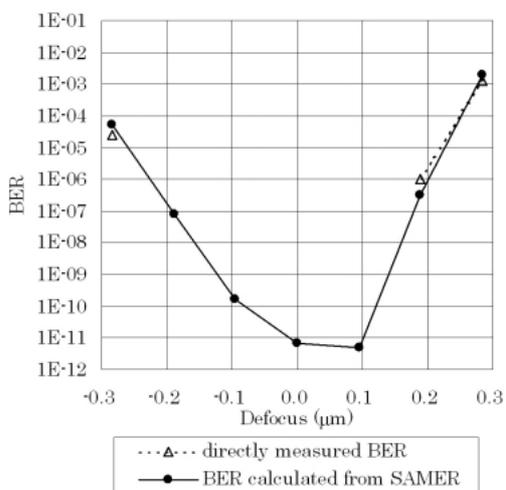


図6 デフォーカスマージン

Fig. 6 Defocus margin.

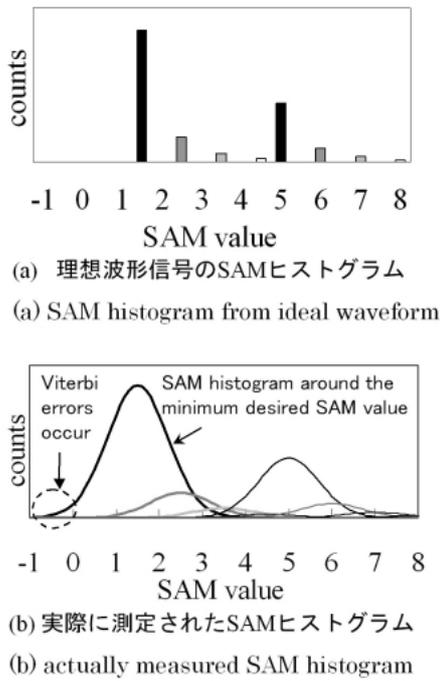


図7 SAMヒストグラム
Fig. 7 SAM histogram.

する。なお、説明簡略化のためFIRフィルタのタップ数は3とするが、より高次のフィルタへの拡張は容易である。最小の理想SAM値1.5に対応する記録ビット列は"00111", "11100", "00011", "11000"の4種類であることが分かっている。記録ビット列"00111"に対応する*n*番目の再生波形列{*u*(-2, *n*), *u*(-1, *n*), *u*(0, *n*), *u*(1, *n*), *u*(2, *n*)}が入力されたとすると、等化波形列{*y*(-1, *n*), *y*(0, *n*), *y*(1, *n*)}はタップ係数*c*(*k*, *n*)との畳み込みで

$$y(i, n) = \sum_{k=-1}^1 c(k, n) u(i-k, n) \quad (i = -1, 0, 1) \quad (4)$$

と表される。記録ビット列に対応する正解パターンは"00111", 誤りパターンは"00011"であり、各々のPR想定波形列は{-0.5,+0.5,+1},{-1,-0.5,+0.5}であることから、等化波形列*y*(*k*, *n*)のSAM値*s*(*n*)は式(1)から簡易的に求めることができる。

$$s(n) = \sum_{k=-1}^1 c(k, n) [u(-1-k, n) + 2u(-k, n) + u(1-k, n)] \quad (5)$$

一方, "00111"に対応するSAMヒストグラムの分散εは、理想SAM値1.5に対するSAM値の平均二乗誤差として

$$\epsilon = E[|s(n) - 1.5|^2] \quad (6)$$

で求められる(*E*[]は平均演算子)。式(5)を式(6)に代入して、εを*c*(*k*, *n*)で偏微分すれば

$$\begin{aligned} \partial \epsilon / \partial c(k, n) &= 2E[|s(n) - 1.5| \{u(-1-k, n) + 2u(-k, n) + u(1-k, n)\}] \quad (7) \end{aligned}$$

が得られる。最急降下法⁴⁾の考え方をうれば、式(7)で表される勾配ベクトルの逆方向に*c*(*k*, *n*)を少しずつ変化させることにより、εを最小とする最適値に近づけていくことができる。実装する場合、勾配ベクトルとして式(7)の平均の代わりに瞬時推定値を用いて、

$$\begin{aligned} c(k, n+1) &= c(k, n) \\ &\quad - \alpha [s(n) - 1.5] \{u(-1-k, n) + 2u(-k, n) + u(1-k, n)\} \quad (8) \end{aligned}$$

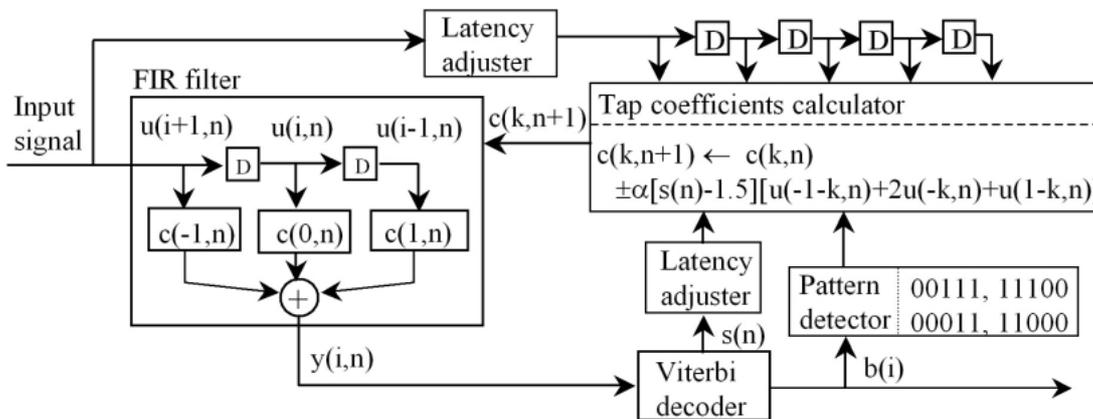


図8 LMSAMブロック図
Fig. 8 Block diagram of LMSAM.

により $c(k, n)$ を更新する。 α は応答性を制御するゲイン定数である。これがLMSAMのアルゴリズムとなる。なお、式(8)はビット列"00111"について求めたものであるが、他の場合についても同様の式が導出できる。LMSAMを実装した装置の構成例を図8に示す。

3・2 実験による効果の検証結果

実際にLMSAMを実行して測定したSAMヒストグラムを図9に示す。等化前に比べてヒストグラムの中心が理想SAM値1.5に移動し、分散も小さく、LMSAMが所望の作用を実現していることが分かる。これは、従来手法(PR想定波形を目標波形とするLMS法)と比べて良好な結果である。

更に、タンジェンシャルチルトマージンを評価した結果を図10に示す。実験条件は表1とほぼ同じであるが、高密度化に対する効果をより明確にするために最短マーク長を $0.137 \mu\text{m}$ としている。また、比較のために等化係数を固定(チルト無し状態で最適化したタップ係数をすべてのチルトについて使用)した場合と、上記と同じLMSを用いた従来手法により適応等化を行った結果も併せて示している。 $BER < 3E-4$ を基準とした場合のマージンは固定等化 $\pm 0.47^\circ$ 、従来手法 $\pm 0.65^\circ$ に対して、LMSAMでは $\pm 0.75^\circ$ 以上であり、タンジェンシャルチルトマージンの改善に大きな効果が得られることが確認できた。他にもデフォーカスなど再生系の周波数特性を変化させる要因に対しては一定の効果が確認されており、LMSAMをドライブに実装すれば、ディスク差や記録再生条件の変動などに対するマージンの増大が期待される。

むすび

PRML検出方式を用いるドライブにおける新規BER予測技術と新規適応等化技術を開発した。

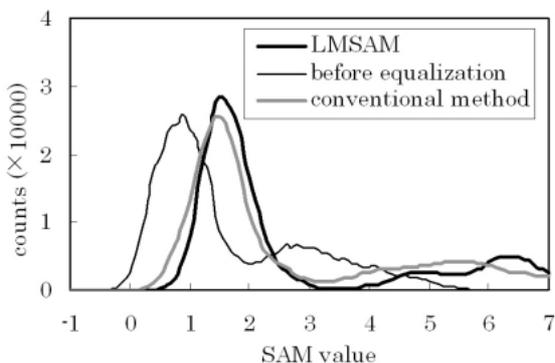


図9 LMSAMによるSAMヒストグラム
Fig. 9 SAM histogram by LMSAM.

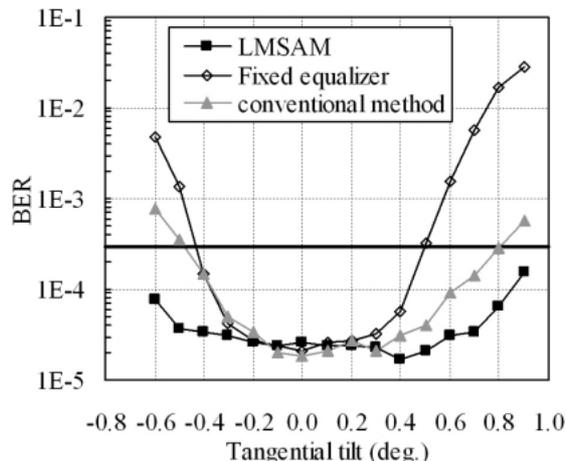


図10 タンジェンシャルチルトマージン
Fig. 10 Tangential tilt margin.

各技術について原理説明と理論的な手法導出を行った。更に高密度光ディスク記録再生装置で実験を行い、本技術により予測したBERが実際に測定したBERとほぼ一致すること、本適応等化技術により従来手法に比べてタンジェンシャルチルトマージンが大きく改善されること、をそれぞれ示す結果を報告した。

本技術を用いることにより、信頼性の高いディスク評価、ドライブ各部の高精度な調整(出荷前調整及びドライブ起動時の自動調整)、ディスク差や記録再生条件の変動などに対するマージン増大、などの実用面での大きな効果が期待される。

参考文献

- 1) T.Perkins and Z.A.Keirn, "A Window-Margin-Like Procedure for Evaluating PRML Channel Performance", IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.2, pp.1109-1114(1995).
- 2) T.Okumura et al., "Method for Evaluating Partial Response Maximum Likelihood System Performance Using Sequenced Amplitude Margin", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.41, pp.1783-1784 (2002).
- 3) T.Okumura et al., "New Adaptive Equalization Method for Partial Response Maximum Likelihood System Optimizing Error Rate Performance", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, pp.7097-7101 (2004).
- 4) ヘイキン, "適応フィルタ入門", pp.91-111, 現代工学社(1999).
(2004年9月24日受理)