

## SMR-HDD におけるパリティ検査情報による LLR 調整器を備えた繰返し復号の一検討

西川まどか<sup>†</sup> 仲村 泰明<sup>†</sup> 大沢 寿<sup>†</sup> 岡本 好弘<sup>†</sup> 金井 靖<sup>††</sup>  
村岡 裕明<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3  
<sup>††</sup>新潟工科大学 情報電子工学科 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719  
<sup>†††</sup>東北大学 電気通信研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

E-mail: <sup>†</sup>{nishikawa, nakamura, osawa, okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, <sup>††</sup>kanai@iee.niit.ac.jp,  
<sup>†††</sup>muraoka@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 先に我々は、SMR(shingled magnetic recording)を採用したハードディスク装置 (HDD : hard disk drive) において、誤り訂正に用いる LDPC(low-density parity-check)符号のパリティ検査情報を用いて APP (a posteriori probability) 復号器出力の復号信頼度である対数尤度比 LLR(log-likelihood ratio)を調整することで繰返し復号の性能改善が得られることを示した。本稿では、調整対象の LLR にしきい値を設けて復号信頼度の高い LLR を調整することで繰返し復号の効果を高められることを明らかにしている。

キーワード SMR, LDPC, LLR, パリティ検査情報, しきい値

## A study on iterative decoding with LLR modulator by parity check information in SMR-HDD

Madoka NISHIKAWA<sup>†</sup>, Yasuaki NAKAMURA<sup>†</sup>, Hisashi OSAWA<sup>†</sup>, Yoshihiro OKAMOTO<sup>†</sup>,  
Yasushi KANAI<sup>††</sup>, and Hiroaki MURAOKA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577 Japan

<sup>††</sup>Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi,  
Kashiwazaki, 945-1195 Japan

<sup>†††</sup>Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577  
Japan

<sup>†</sup>{nishikawa, nakamura, osawa, okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, <sup>††</sup>kanai@iee.niit.ac.jp,  
<sup>†††</sup>muraoka@riec.tohoku.ac.jp

**Abstract** In our previous research, we have shown that the performance improvement of iterative decoding is able to be provided by applying the log-likelihood ratio (LLR) modulator using parity check information of low-density parity-check (LDPC) code in hard disk drive (HDD) employing shingled magnetic recording (SMR). In this report, we clarify that the effect of iterative decoding is enhanced by modifying LLRs selected by a threshold.

**Keywords** SMR, LDPC, LLR, Parity check information, Threshold

## 1. まえがき

近年、ハードディスク装置(HDD: hard disk drive)の更なる高記録密度化のための記録方式として、瓦磁気記録(SMR: shingled magnetic recording)[1]が注目されている。しかし、SMRは再生ヘッド感度が再生対象トラックのみならず、隣接トラックにまで及ぶため、隣接トラック情報が復号対象トラックの再生に入り込むトラック間干渉(ITI: inter-track interference)が問題となる[2]。そのため、ITIを抑制する信号処理方式の開発が望まれる。

先に我々は、SMRにおいてLDPC(low-density parity-check)符号[3]とSP(sum-product)[4]復号を融合したLDPC符号化・復号化方式において、APP(a posteriori probability)復号器により復号信頼度として算出されるLLR(log-likelihood ratio)をLDPC符号の検査行列を用いたパリティ検査情報に基づき調整することで、繰返し復号の性能が向上することを明らかにした[5]。本稿では、調整対象のLLRにしきい値を設けて復号信頼度の高いLLRのみを調整対象とすることで繰返し復号による訂正効果を高める検討をしたので報告する。

## 2. 記録再生システム

図1に、LLR調整器を備えたLDPC符号化・繰返し復号化方式の記録再生ブロック図を示す。まず、入力系列は、128/130(0,16/8)RLL(run-length limited)符号化器およびLDPC符号器を通り、記録系列を得る。ここで、入力系列は4096バイト/セクタのセクタフォーマットに基づき、セクタ数30としている。次に、記録系列は離散ポロノイ図[6]によるグラニューラ媒体モデル上にSMRされる。ただし、グラニューラ媒体モデルの磁性粒子の平均粒径、平均粒径で規格化した粒径分散、平均非磁性粒界幅をそれぞれ5.0 nm, 20%, 1.0 nmとしている。また、面記録密度を4 Tbits/inch<sup>2</sup>と想定して、ビット長およびトラックピッチをそれぞれ、7.3 nm, 22.1 nmとしている。再生過程では、3つのリーダを有するアレイヘッド[7]により隣接する3トラックを再生する。また、再生波形にはシステム雑音として加法的白色ガウス雑音が各リーダで加わる。ここで、読出し点におけるシステム雑音のSNR(signal-to-noise ratio)を次式で定義する。

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} (A/\sigma_s) \text{ [dB]} \quad (1)$$

ただし、 $A$ は、孤立再生波形の飽和レベルであり、 $\sigma_s$ は、チャンネルビットレート $f_c$ に等しい帯域内に落ちるシステム雑音の実効値である。そして、再生波形は $f_c$ で規格化した遮断周波数 $x_h = 0.4$ のLPF(low-pass filter)および、各リーダにおけるタップ数 $N_t = 15$ を有する2D-FIR(two-dimensional finite impulse response)フィルタ[8]を通り、復号対象トラックに対して記録ヘッドか

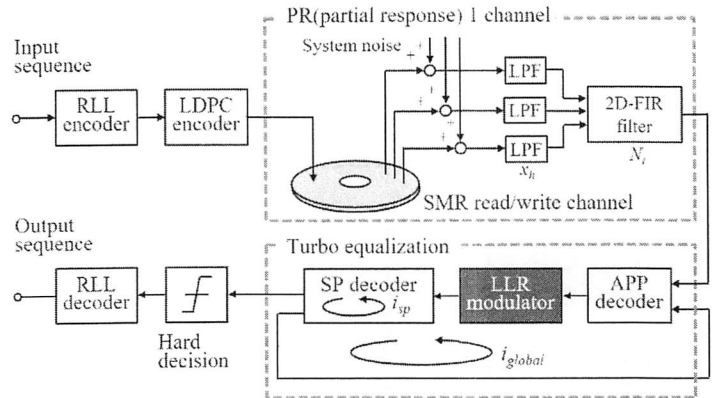


図1 LLR調整器を備えたLDPC符号化・繰返し復号化方式の記録再生ブロック図

ら2D-FIRフィルタ出力までの特性がPR1(partial response class-I)[9]特性となるように波形等化される。また、2D-FIRフィルタ出力系列はAPP復号器によって、PR1チャンネルに対し、事後確率復号[10]を行う。また、APP復号器の復号信頼度として算出されたLLRは、LLR調整器により、信頼度の高いLLRを対象として調整される。その後、SP復号器においてLDPC符号に対する復号を最大 $i_{sp}$ 回行う。更に、SP復号器で得られた外部対数尤度比系列を再びAPP復号器に戻し、最大繰返し回数 $i_{global}$ のターボ等化を行う。そして、ターボ等化後のSP復号器出力系列は硬判定器およびRLL復号器を通り、出力系列となる。なお、ビット誤り率(BER: bit error rate)は、入力系列と出力系列を比較することにより求める。

## 3. LLR調整器

図2に、LLR調整法の概念図を示す。図では簡単な例として、パリティ検査行列を符号長12、列重み3、行重み4としているが、図1では符号長32768、列重み3、行重み30としている。Gallagerの構成法[3]に基づいて検査行列を構成するが、PRチャンネルによる符号間干渉の影響を避けるため第1部分行列も、第2部分行列および第3部分行列と同様に、ランダム列置換した行列で構成する。まず、APP復号器出力として算出されるLLRを、しきい値を“0”として硬判定し、パリティ検査を行い[11]、検査において誤りと判定された行を、列方向に加算することで図のようにパリティ検査情報系列が求まる。したがって、パリティ検査情報は、“0”、“1”、“2”、“3”のいずれかの値をとる。なお、本稿では、正しく復号された可能性の高いパリティ検査情報“0”、“1”に対するLLRのうち、しきい値を超えたLLRのみを調整対象とすることで更に効果的なターボ等化を期待する。なお、調整パラメータである、重みおよびしきい値は、SNR=21.5 dB,  $i_{global} = 20$ ,  $i_{sp} = 15$ においてBERが良好な特性を示し

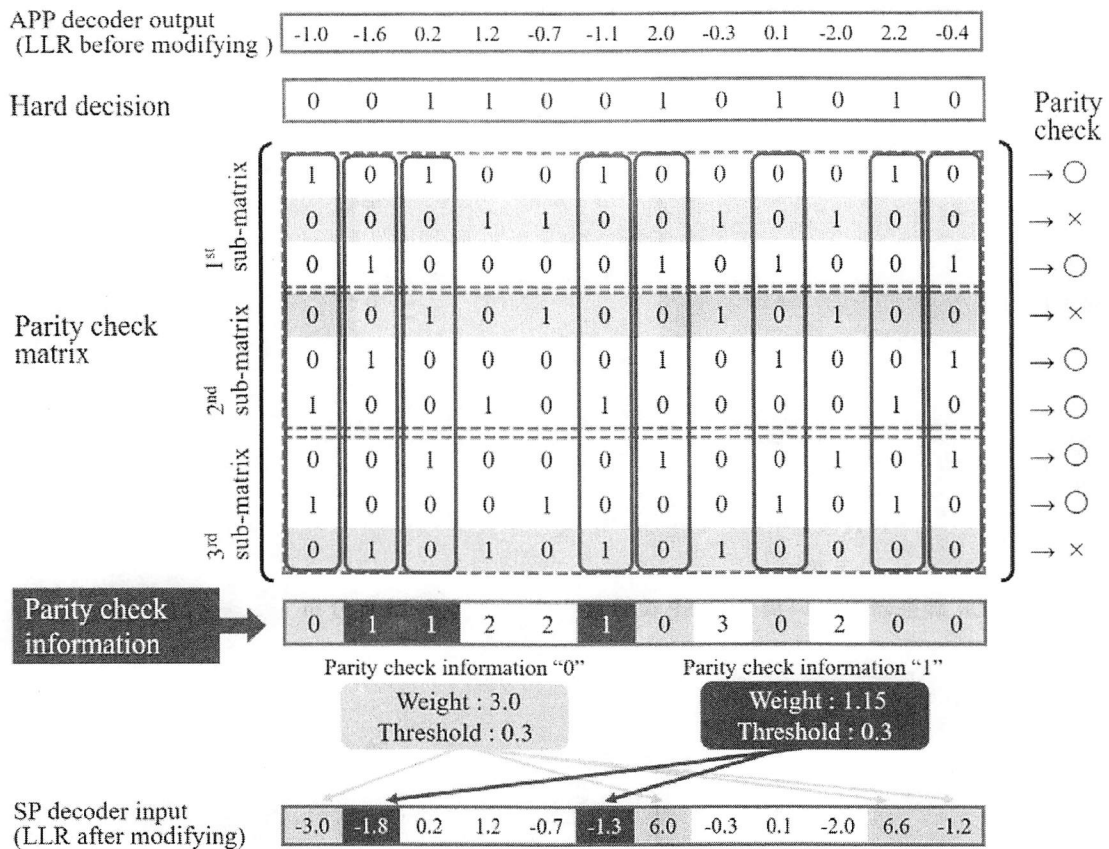


図 2 LLR 調整法の概念図

た、パリティ検査情報“0”のLLRにはしきい値を0.3として重み3.0、パリティ検査情報“1”のLLRには、しきい値を0.3として重みを1.15とする。

#### 4. 性能評価

図3に、LLR調整器のない場合のSP復号器入力におけるLLR分布を示す。ただし、SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ としており、(a)および(b)はそれぞれ、 $i_{global} = 0, 20$ の場合としている。なお、図には、セクタ数30のうちのセクタ#29にあたる1セクタ分のLLRを示している。ここで、情報長33280ビット/セクタとしている。図中の“・”印は正しい情報を持ったLLRを示しており、“×”印は誤った情報を持ったLLRを示している。また、横軸はセクタ中のチャンネルビット番号である。図3より、 $i_{global} = 0, 20$ の場合のLLRには差がほとんど見られず、誤り個数も減少していないことがわかる。このことから、セクタ#29では効果的なターボ等化が行われていないと考えられる。

図4, 5に、先に我々が提案した従来のLLR調整器[5]およびしきい値を設けたLLR調整器を用いた場合のSP復号器入力におけるLLR分布をそれぞれ示す。なお、その他の条件および図の印は図3と同様としている。図3~5より、LLR調整器により、LLRの絶対値が全体的に大となり、 $i_{global} = 20$ において、誤りの個

数も減少していることがわかる。また、しきい値を設けて復号信頼度の高いLLRを調整対象とすることで、より効果的なターボ等化ができ、誤り個数が更に減少したと考えられる。

図6に、 $i_{global}$ に対するBER特性を示す。ここで、SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ としている。なお、図中の▲および△印は、従来のLLR調整器およびしきい値を設けたLLR調整器を用いた場合をそれぞれ示しており、○印はLLR調整器のない場合を示している。図6より、どの場合においても、 $i_{global} = 10$ 付近までは $i_{global}$ を重ねるに連れてBERは減少していることがわかる。LLR調整器のない場合は、 $i_{global}$ が大となってもBER特性は飽和する。一方、LLR調整器を用いれば、そのBERの飽和傾向が解消され、従来のLLR調整器でも $i_{global} = 32$ で、本稿で提案したしきい値を設けたLLR調整器の場合では、 $i_{global} = 20$ で誤りなく復号できたことがわかる。このことから、パリティ検査情報“0”のLLRに対してしきい値を設けて復号信頼度の高いLLRを調整対象とすることで、より効果的なターボ等化につながると考えられる。

以上は、パリティ検査情報が“0”のLLRを調整対象にしたが、次に誤る可能性が低いパリティ検査情報“1”のLLRを調整対象に加えた繰返し復号を考える。図7に、パリティ検査情報“0”および“1”のLLRに

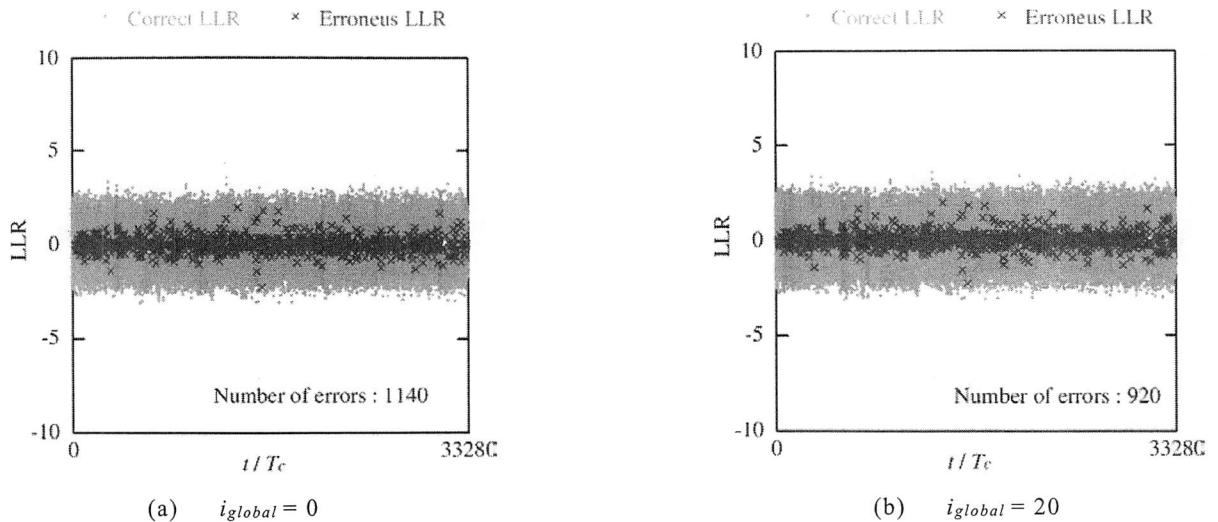


図 3 LLR 調整器のない場合の SP 復号器入力における LLR 分布 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

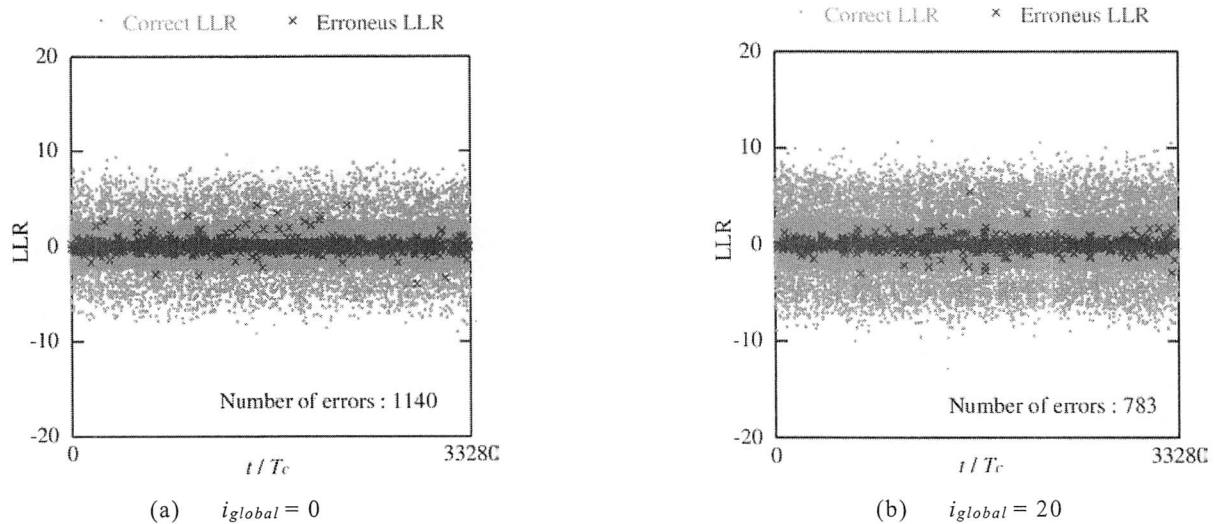


図 4 従来の LLR 調整器を用いた場合の SP 復号器入力における LLR 分布 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

対する LLR の調整器を備えてそれぞれにしきい値を設けた場合の SP 復号器入力における LLR 分布を示す。ただし、その他の条件および図の印は図 3~5 と同様としている。図 7 より、パリティ検査情報“1”の LLR も調整対象とすることで LLR の絶対値が全体的に更に大となり、 $i_{global} = 20$  において、パリティ検査情報“0”の LLR のみを調整対象にした場合よりも更に誤りが訂正されていることがわかる。

図 8 に  $i_{global}$  に対する誤り率特性を示す。ただし、SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$  としている。なお、図中の■および▲印は、パリティ検査情報“0”および“1”の LLR に対してしきい値を設けた LLR 調整器を用いた場合、パリティ検査情報“0”の LLR に対してしきい値を設けた LLR 調整器を用いた場合をそれぞれ示している。また、○印は LLR 調整器のない場合を示して

いる。図より、パリティ検査情報“1”の LLR を調整対象に加えることで、 $i_{global} = 17$  で誤りなしとなり、パリティ検査情報“0”の LLR のみを調整対象とする場合と比べて、少ないターボ等化の回数で誤りなく復号できていることがわかる。

図 9 に、 $i_{global} = 17$ ,  $i_{sp} = 15$  における SNR に対する BER 特性を示す。ただし、図中の印は図 8 と同様としている。図 9 より、パリティ検査情報“0”の LLR のみを調整する LLR 調整器を適用した場合は、LLR 調整器のない場合と比べて、誤りなしを達成する SNR は同程度であるものの、パリティ検査情報“0”および“1”の LLR を調整対象とすることで、LLR 調整器のない場合と比べて、誤りなしを達成する SNR が 0.5dB 改善することがわかる。このことから、パリティ検査情報“0”および“1”に対する LLR にしきい値を設けることで、

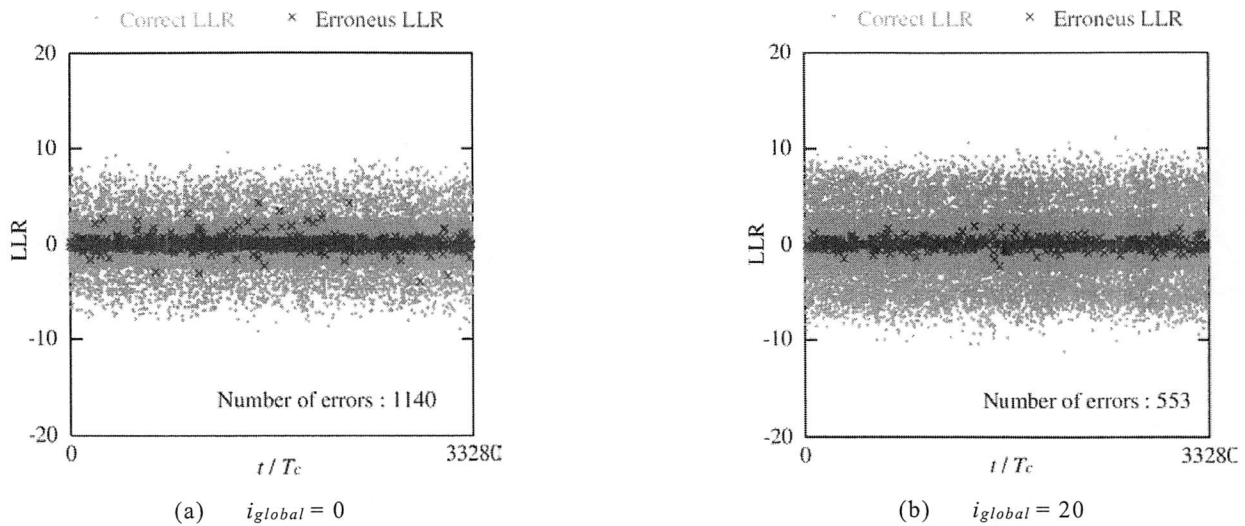


図5 パリティ検査情報“0”のLLRに提案のLLR調整器を用いた場合のSP復号器入力におけるLLR分布 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

効果的な繰返し復号を行えると考えられる。

## 5. むすび

本稿では、しきい値を設けたLLR調整器を提案してLDPC符号化・繰返し復号化方式に適用し、性能評価して検討した結果、パリティ検査情報が“0”のLLRを調整することで、先に提案したLLR調整器を用いた場合と比べて効果的なターボ等化を行えることが明らかとなった。また、パリティ検査情報“1”のLLRも調整対象とすることで、更に効果的なターボ等化が行え、LLR調整器のない場合と比べて、誤りなしとなるSNRを0.5 dB改善できることが明らかとなった。

今後は、パリティ検査情報に加え、復号系列パターンから最適なLLR調整法を検討し、更なる性能改善を図る予定である。

謝辞 本研究の一部は、情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の助成のもとに行われたものであることを付記し、謝意を表します。

## 文献

[1] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, “The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media,” *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.2, pp.917-923, Feb. 2009.

[2] H. Nobuhara, Y. Okamoto, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, and H. Muraoka, “Influence of writing and reading ITI's depending on recording patterns in shingled magnetic recording,” *Digest of Inermag 2014*, HW-9, May 2014.

[3] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *IRE Trans. Inform. Theory*, vol.IT-8, pp.21-28, Jan.1962.

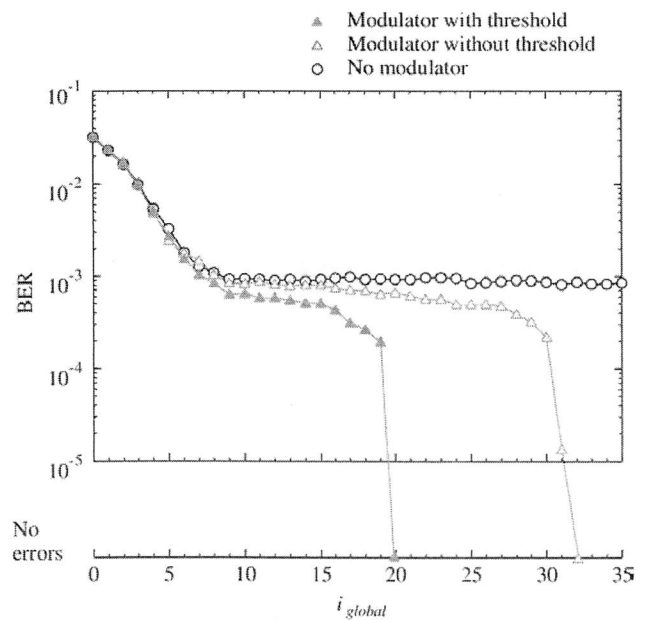


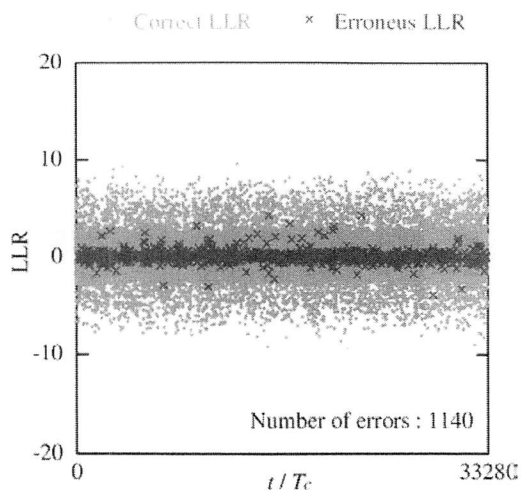
図6  $i_{global}$ に対するBER特性 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

[4] 三田誠一, 西谷卓史, 澤口秀樹, 松井一, “磁気ディスクの信号処理技術—PRML方式の基礎と実際—,” pp.60-85, 森北出版, 東京, 2010.

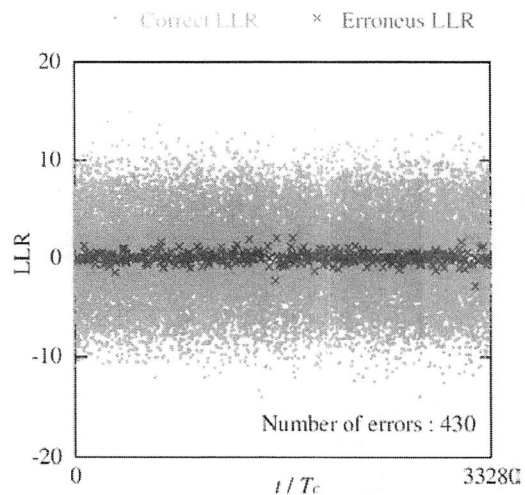
[5] 西川まどか, 仲村泰明, 大沢寿, 岡本好弘, 金井靖, 村岡裕明, “SMRにおけるパリティ検査情報を用いたLLR修正による繰返し復号の性能改善,” *信学技報*, MR2017-23, Oct. 2017.

[6] 淵田孝康, 中村博文, 森邦彦, 村島定行, “母点を一つずつ追加することにより効率良く2次元離散ポロノイ図を作成する方法,” *信学論(A)*, vol.J85-A, no.5, pp.571-583, May 2002.

[7] 仲村泰明, 西川まどか, 大沢寿, 岡本好弘, 金井靖, 村岡裕明, “SMRにおける面記録密度とリーダーサイズに対するBARの一検討,” *信学技報*, MR2017-24, Oct. 2017.



(a)  $i_{global} = 0$



(b)  $i_{global} = 20$

図7 パリティ検査情報“0”および“1”のLLRに提案のLLR調整器を用いた場合のSP復号器入力におけるLLR分布 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

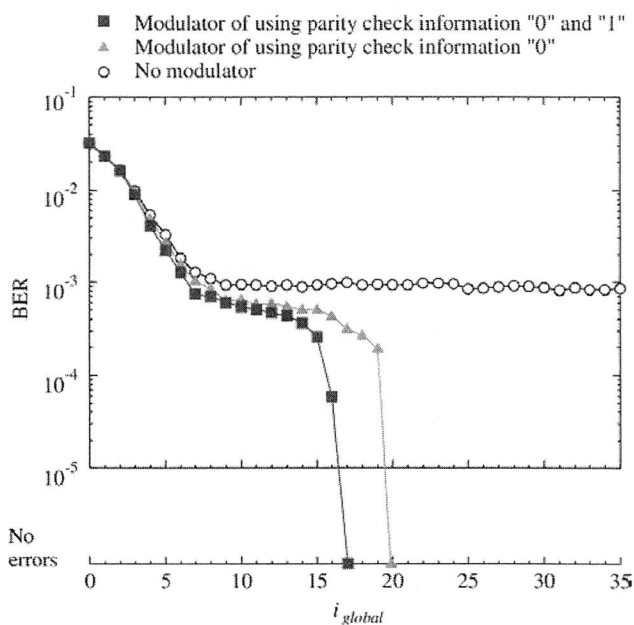


図8  $i_{global}$ に対するBER特性 (SNR = 21.5 dB,  $i_{sp} = 15$ )

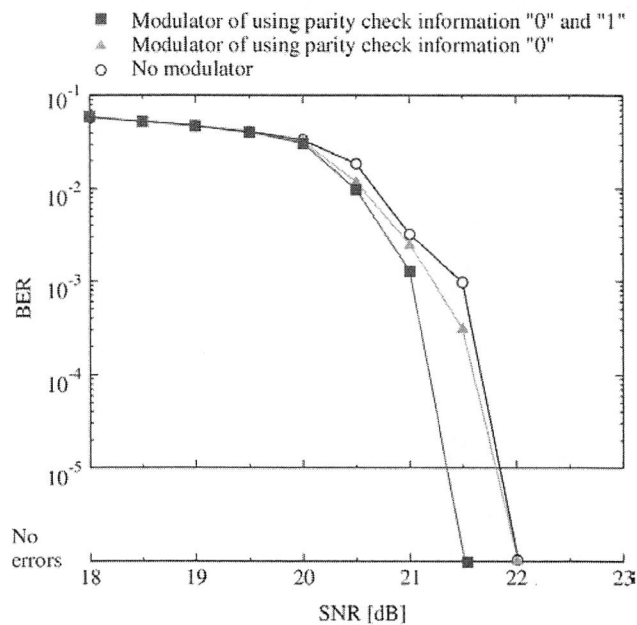


図9 SNRに対するBER特性 ( $i_{global} = 17$ ,  $i_{sp} = 15$ )

- [8] 藤本直樹, 仲村泰明, 大沢寿, 岡本好弘, 金井靖, 村岡裕明, “SMRにおけるアレイヘッド再生のための二次元等化に関する一検討,” 信学技報, MR2014-28, Dec. 2014.
- [9] E. R. Kretzmer, “Generalization of a technique for binary data communication,” IEEE Trans. Commun. Technol., vol.14, no.1, pp67-68, Feb. 1966.
- [10] 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢寿, 斎藤秀俊, 村岡裕明, 中村慶久, “垂直磁気記録のための繰り返し復号器の性能改善,” 信学技報, MR2001-35, Oct. 2001.
- [11] 和田山正, “低密度パリティ検査符号とその復号法について,” 信学技報, MR2001-83, Dec. 2001.