

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

西川まどか[†] 仲村 泰明[†] 大沢 寿[†] 岡本 好弘[†] 金井 靖^{††}
村岡 裕明^{†††}

[†]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

^{††}新潟工科大学 情報電子工学科 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719

^{†††}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: [†]{nishikawa, nakamura, osawa, okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, ^{††}kanai@iee.niit.ac.jp,
^{†††}muraoka@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 近年, HDD(hard disk drive)の高記録密度化記録のために, 強力な誤り訂正符号として LDPC(low density parity check)符号を用いた繰返し復号方式が導入されている. 本稿では, SMR(shingled magnetic recording)における LDPC 符号化・繰返し復号化方式に対して, パリティ検査結果を用いた対数尤度比 LLR(log-likelihood ratio)の修正による繰返し復号の改善について検討した. その結果, 修正しない場合には誤りが残るセクタに対しても, LLR を修正することで, 誤りのない復号が可能となることが明らかとなった.

キーワード SMR, LDPC, LLR, パリティ検査情報

Performance improvement of iterative decoding by LLR modification using parity check information in SMR system

Madoka NISHIKAWA[†], Yasuaki NAKAMURA[†], Hisashi OSAWA[†], Yoshihiro OKAMOTO[†],
Yasushi KANAI^{††}, and Hiroaki MURAOKA^{†††}

[†]Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 13 Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577 Japan

^{††}Department of Information and Electronics Engineering, Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki,
945-1195 Japan

^{†††}Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Japan
980-8577

[†]{nishikawa, nakamura, osawa, okamoto}@rec.ee.ehime-u.ac.jp, ^{††}kanai@iee.niit.ac.jp,
^{†††}muraoka@riec.tohoku.ac.jp

Abstract In recent years, an iterative decoding system using LDPC (low density parity-check) code as a powerful error correction code has been introduced to achieve high density recording for HDD (hard disk drive). In this report, we discuss the improvement of iterative decoding by modification of LLR (log-likelihood ratio) in SMR (shingled magnetic recording). The results show that the sector with errors is recovered with error-free by modifying LLRs.

Keywords SMR, LDPC, LLR, Party check information

1. まえがき

近年、ハードディスク装置(HDD : hard disk drive)の新たな記録方式として、瓦磁気記録(SMR : shingled magnetic recording)[1]が注目されている。SMRは瓦葺きのようにデータを重ね書きすることで狭トラック化を実現できる反面、トラック間干渉(ITI : inter-track interference)の影響による著しい性能劣化をもたらす[2]。そのため、SMRにおけるLDPC(low density parity check)符号[3]とSP(sum-product)[4]復号を融合したLDPC符号化・復号化方式の性能を改善することは、HDDの更なる高密度化の鍵といえる。

そこで本稿では、SMRにおいてLDPC符号化・繰返し復号化方式における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)を修正することによる、復号精度の向上について検討を行ったので報告する。

2. 問題提起

図1に、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)符号化器により、4096バイト/セクタのセクタフォーマットに基づいてLDPC符号化された記録系列を得る。なお、今回のシミュレーションにおけるセクタ数を30としている。次に、記録系列は離散ポロノイ図[5]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5.0nm, 20%, 1.0nmとしている。また、面記録密度を4 Tbits/inch²と想定して、ビット長およびトラックピッチをそれぞれ、7.3nm, 22.1nmとしている。なお、再生過程では、3つのリーダを有するアレイヘッドにより隣接する3トラックを再生する。ここで、再生波形にはシステム雑音として加法性白色ガウス雑音を加わる。ただし、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、 σ_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)を通った後、タップ数/トラック $N_t = 15$ を有する2D-FIR(two-dimensional finite impulse response)フィルタ[6]に通され、復号対象トラックに対して記録ヘッドから2D-FIRフィルタ出力までの特性がPR1[7]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チャンネルに対して最大事後確率(MAP : maximum a posteriori probability)復号

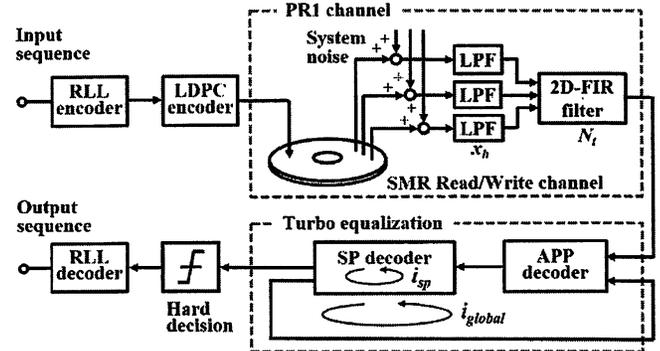


図1 LDPC符号化・繰返し復号化方式の記録再生ブロック図

[8]を行い、復号信頼度としてLLRが算出される。更に、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。次いで、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。ここで、APP復号器およびSP復号器における行演算にはMax-Log-MAPアルゴリズム[9]を用いている。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。そして、入力系列と出力系列を比較することによりBER(bit error rate)を求めて性能評価を行う。

図2にSNRに対する誤り率特性を示す。ただし、 $i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$ としている。図より、LLR修正器のない場合は、SNR = 25 dBにおいては誤りなく復号できるものの、SNR = 24.5 dBでは復号誤りを生じていることがわかる。そこで、図3にSNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$ として i_{global} に対する誤り率特性を示す。図より、 i_{global} が大となるにつれてBERは低下するが 10^{-3} あたりで飽和傾向を示している。また、図4(a)および(b)にそれぞれ、セクタ#2, 29のSP復号器入力におけるLLRの分布を示す。ただし、 $i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$ としている。また、横軸は1セクタ間隔 T_c で規格化した時刻 t を表している。ここで、図中の“●”は正しいLLRを示しており、“○”は誤ったLLRを示している。図より、セクタ#2のLLRは、全体的に絶対値が大きく、誤りも少ないことがわかる。一方、セクタ#29のLLRは、セクタ#2に比べて全体的に絶対値が小さく、誤りも多いことがわかる。これはセクタ#2についてはターボ等化により誤り訂正が進むものの、#29についてはターボ等化の効果がないことを示している。

このため、図3で示した誤り率特性の飽和傾向と考えられる。そこで、本稿では、APP復号器出力にLLR修正器を挿入して良好に繰返し復号が進むことで復号信頼度の向上を図り、誤りの飽和傾向の解消を検討する。

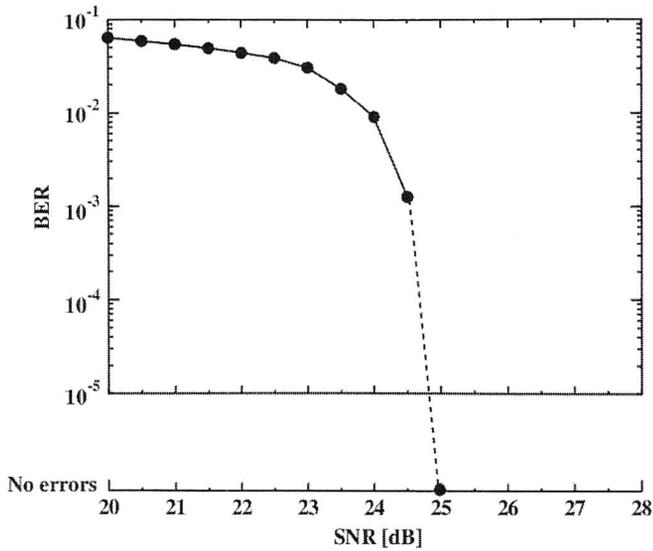


図2 SNR に対する BER 特性
($i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$)

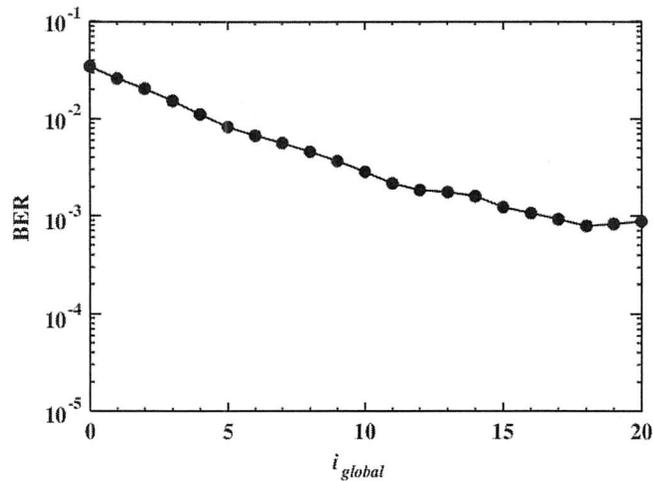
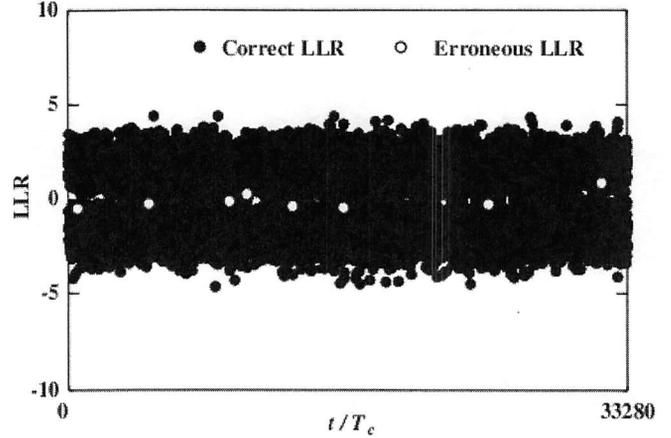


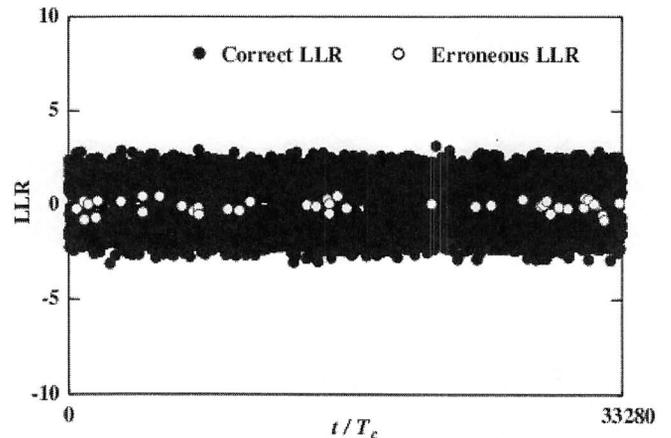
図3 i_{global} に対する BER 特性
(SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$)

3. LLR 修正器

図5に、LLR修正器を備えた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。なお、記録再生に関する諸条件は図1と同一としている。図のように、APP復号器出力系列はLLR修正器を通った後、SP復号器に入力される。LLR修正器では、まず、APP復号器出力におけるLLRをしきい値“0”として硬判定し、パリティ検査を行う[10]。ここで、パリティ検査情報系列は、検査結果を列方向に加算することで求まる。なお、本稿で用いたパリティ検査行列は、情報長33280、行重み30、列重み3としている。つまり、パリティ検査情報は、0, “1”, “2”, “3”のいずれかになる。したがって、パリティ検査情報が“0”であれば



(a) セクタ#2



(b) セクタ#29

図4 SP復号器入力におけるLLRの分布
($i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$, LLR修正器なし)

そのLLRについて、3つの部分行列すべてが誤りなしと判定したことになる。

先に我々は、復号誤りの可能性が高いLLRを修正対象とすることを検討したが大きな改善が得られなかった[11]。そこで本稿では、正しく復号された可能性が高いパリティ検査情報“0”のLLRを修正対象として良好な繰返し復号が進むよう検討する。すなわち、パリティ検査情報“0”のLLRに重みをかけることによりバイアスした復号信頼度をSP復号器に入力して繰返し復号のゲインを向上させることによる性能改善を期待する。

4. 性能評価

図6に、LLR修正器の重みに対する誤り率特性を示す。ただし、SNR = 24.5 dB, $i_{global} = 13$, $i_{sp} = 10$ としている。ここで、 $i_{global} = 13$ としたのは、BER = 10^{-4} 付

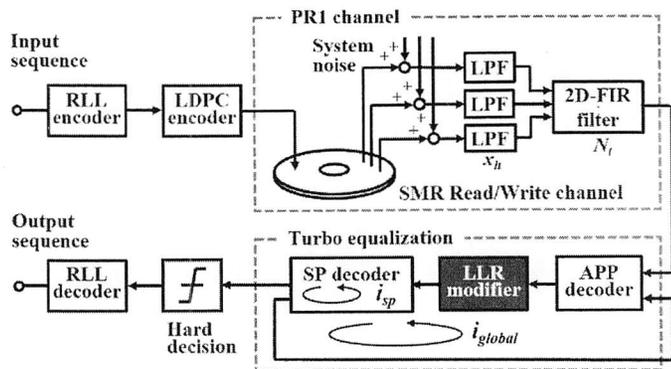


図5 LLR修正器を備えたLDPC符号化・繰返し復号化方式の記録再生ブロック図

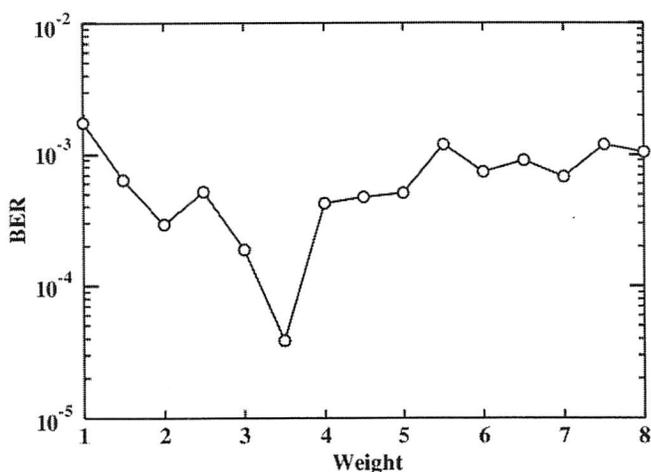
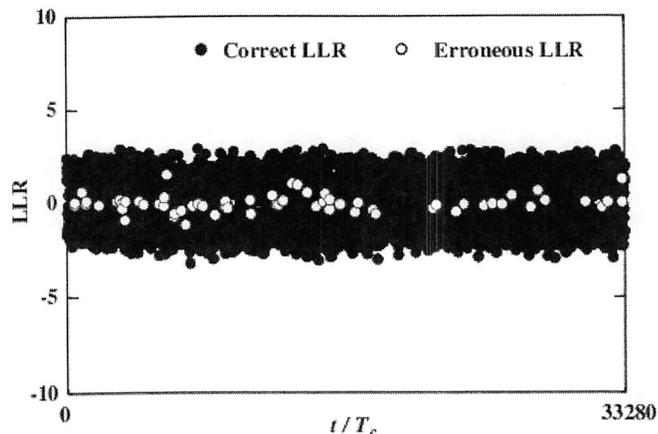


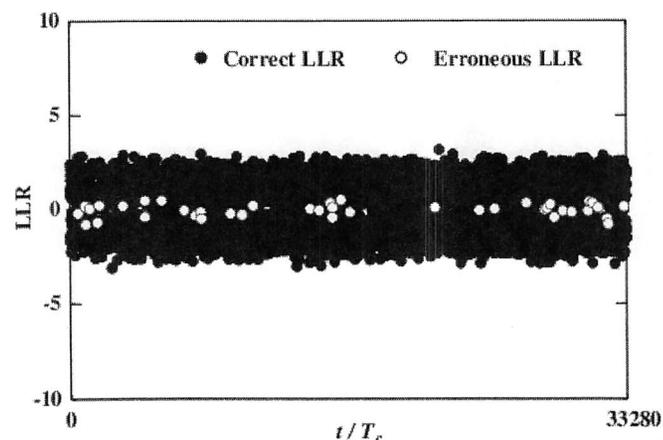
図6 LLR修正器の重みに対するBER特性 (SNR = 24.5 dB, $i_{global} = 13$, $i_{sp} = 10$)

近となる特性を目安にしたためである。図より、重みを大とするにつれてBERが小となり3.5で最小となり再び劣化する。これは、パリティ検査情報が“0”の場合もLLRは正しいとは限らず、その誤ったLLRに大きな重みをかけることでかえって性能劣化をもたらすと考えられる。そこで以後の検討では、重みを3.5としている。

図7および8に、図1、5のSP復号器入力におけるセクタ#29に対するLLRの分布を示す。ただし、SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$ としている。また、図7および8の(a), (b)はそれぞれ $i_{global} = 0$, 15の場合を示している。図7より、セクタ#29において、LLR修正器のない場合は、 i_{global} を大としても全体的にLLRの分布に変化は見られないことがわかる。一方、図8より、LLR修正器のある場合は対象LLRに重みをかけることにより、全体的にLLRの絶対値が大となり、図7のようなLLR分



(a) $i_{global} = 0$



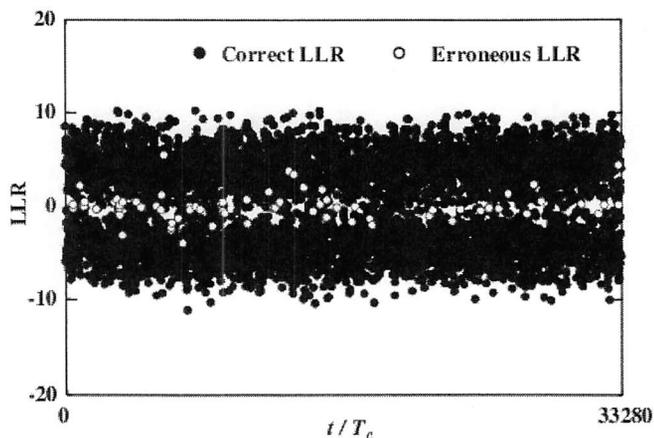
(b) $i_{global} = 15$

図7 図1のSP復号器入力におけるセクタ#29に対するLLRの分布 (SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$)

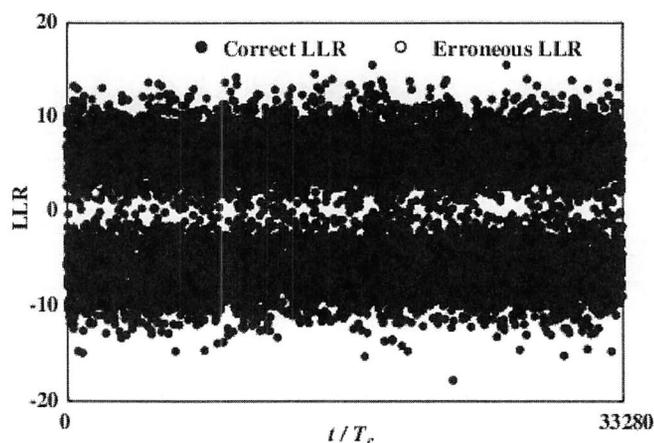
布の飽和傾向が解消できていることがわかる。

図9に、SNRに対する誤り率特性を示す。ただし、 $i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$ としている。ここで、図中の○および●印は、それぞれ、LLR修正器のある場合、ない場合である。図より、LLR修正器を挿入して繰返し復号を行うことにより、誤りなしとなるSNRが0.5 dB改善されていることがわかる。

ここで、図10に i_{global} に対するBER特性を示す。ただし、SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$ としている。図中の○および●印は、LLR修正器のある場合とない場合を示している。図より、LLR修正器がない場合は i_{global} が大となると飽和傾向を示すが、LLR修正器を用いて繰返し復号を行うことによって飽和傾向が解消され、 $i_{global} = 14$ となると、誤りなしを達成できていることがわかる。



(a) $i_{global} = 0$



(b) $i_{global} = 15$

図8 図5のSP復号器入力におけるセクタ#29
に対するLLRの分布 (SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$)

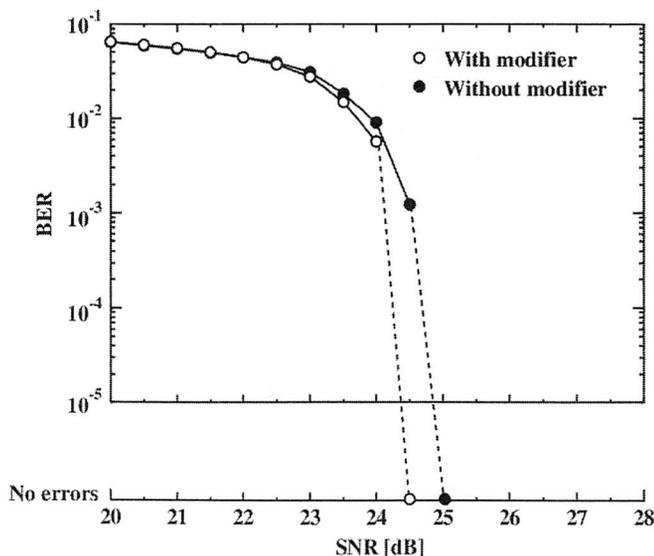


図9 SNRに対するBER特性
($i_{global} = 15$, $i_{sp} = 10$)

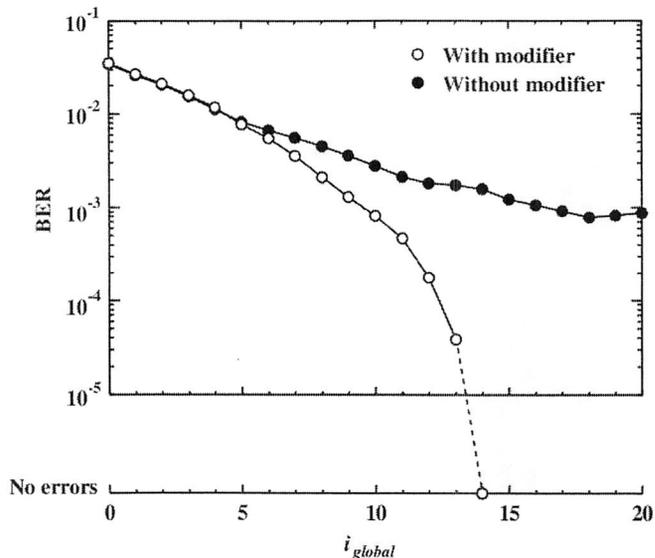


図10 i_{global} に対するBER特性
(SNR = 24.5 dB, $i_{sp} = 10$)

5. むすび

本稿では、LLR修正器を用いたLDPC符号化・繰返し復号化方式を提案し、グラニューラ媒体モデルを用いたSMRシミュレーションによって、性能改善についての検討をした。その結果、パリティ検査情報“0”にあたるLLRに対して重みをかけて繰返し復号を行うことにより、BER特性の飽和傾向を解消できることが明らかとなった。また、LLR修正器を用いることで、誤りなしとなるSNRが0.5 dB改善されることが明らかとなった。

なお、本稿では、パリティ検査情報“0”についてのみ検討したが、今後はその他のパリティ検査情報の有効活用も視野に入れて検討する予定である。また、様々な視点から重みの最適化を検討し、その重みを自動で設定するシステムを開発して、更なる性能改善を図る。

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 Intermag 2014, HW-9*, May 2014.

- [3] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IRE Trans. Inform. Theory, vol.IT-8, pp.28, no.4, pp. 490-500, Apr. 2004.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] E. R. Kretzmer, "Generalization of a technique for binary data communication," IEEE Trans. Commun. Technol., vol.14, no.1, pp67-68, Feb. 1966.
- [8] 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.
- [9] 井坂元彦, 今井秀樹, "Shannon 限界への道標: "parallel concatenated(turbo) coding", "turbo(iterative) decoding" とその周辺," 信学技報, IT98-51, Dec. 1998.
- [10] 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.
- [11] 山下純弥, 岡本好弘, 仲村泰明, 大沢寿, 村岡裕明, 中村慶久, "LDPC符号化・繰り返し復号化方式のためのLLR修正器の一検討," 2009信学ソ大, 文集2, C-7-9, p37, Sept. 2009.