

การออปติไมส์กระแสเขียนสำหรับระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

พรชัย เปลี่ยมทรัพย์¹⁾ พรชัย ทรัพย์นิธิ²⁾ และ กัณวต์ม์ เสนานานู³⁾

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการออปติไมส์กระแสเขียน (write current optimization) ด้วยกราฟคอนทัวร์ (contour graph) ที่พล็อตจากอัตราบิดผิดพลาด (bit error rate: BER) ที่ได้จากการทดลองเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสเขียน ในการออปติไมส์ต้องคำนึงถึงผลกระทบของกระแสเขียนที่จะมีผลต่อสมรรถนะของระบบ เช่น การยื่นออก (protrusion) ของหัวอ่าน – เขียน (heads) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (adjacent track interference: ATI) ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแอมพลิจูดกระแสเขียน (write current amplitude: I) และช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current duration: I_o) การเพิ่มส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current overshoot: I_o) ทำให้เกิดการเลื่อนของการเปลี่ยนสถานะ (transition shift) หรือเกิดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference: ISI) การออปติไมส์กระแสเขียนได้มีการบีบแตรัก (squeezed) เพื่อวัดประสิทธิภาพของชุดกระแสเขียนแต่ละชุดก่อนการเลือกชุดกระแสเขียนที่เหมาะสม วิธีการเลือกจะเริ่มจากเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสเขียน นำค่า BER ที่ได้มาพล็อตกราฟคอนทัวร์ เลือกส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่ทำให้บริเวณพื้นที่ของ BER สูงตรงกลาง มีขนาดใหญ่ที่สุด แล้วเลือกช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนต่ำสุดในโซนกลางจำนวน 3 ค่า จากนั้นเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียนแปดค่า จะได้ชุดกระแสเขียน (write triplet) ทั้งหมด 24 ชุด แล้วเลือกชุดกระแสเขียนที่ดีที่สุดแปดชุด วิธีที่สอง คล้ายกับวิธีแรกแต่ใช้ช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนเป็นตัวเลือกบริเวณของค่า BER กว้างสุด จากนั้นเลือกค่าส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนต่ำสุดในโซนกลางจำนวน 3 ค่า จากนั้นเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียน จำนวนแปดค่า จะได้ชุดกระแสเขียนทั้งหมด 24 ชุด แล้วเลือกชุดกระแสเขียนที่ดีที่สุดแปดชุด ผลที่ได้คือวิธีที่นำเสนอให้ค่าเฉลี่ยของ BER ดีกว่าวิธี baseline และยังพบอีกว่าการเลือกช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่ให้มีบริเวณกว้างสุดจะให้ค่าเฉลี่ยของ BER ดีกว่าการเลือกส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน แต่ในโหมดไม่มีการบีบแตรัก (unsqueezed) ผลที่ได้ตรงกันข้ามเพราะส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนมีผลต่อสมรรถนะของระบบมากกว่าช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน

คำสำคัญ: การออปติไมส์กระแสเขียน แอมพลิจูดของกระแสเขียน ส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน ช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน การบีบแตรัก บี อี อาร์

¹⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520 อีเมลล์: s1060914@kmitl.ac.th

²⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
10520 อีเมลล์: ksupornc@kmitl.ac.th

³⁾ บริษัทซีเทคเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด นครราชสีมา 30170, อีเมลล์: Kanawat.Senanan@seagate.com

Write current optimization for magnetic recording system

Pornchai Pliamsup¹⁾ Pornchai Supnithi²⁾ and Kanawat Senanan^{* 3)}

Abstract

In this paper, we propose a method of write current optimization based on the contour graph. The contour graph is plotted from bit error rate (BER) which obtaining from running the full write current combination. In optimization process, we consider the write current effect to the system performance such as protrusion level of heads and adjacent-track interference (ATI) effect from recording head following upon the write current amplitude variation and the write current duration is considered. Increasing the write current overshoot causes the transition shift or inter-symbol interference (ISI). Before selecting the write current, the optimization is squeezed measure the performance of each. In the proposed method, first, we run the full combination of the write current including write current amplitude, write current overshoot and write current duration. Then we plot the contour graph between the write current amplitude and the write current duration, and select the best write current overshoot that gives the widest BER area. Next, we select three upward edge points of the write current duration. On the contrary, we plot the contour graph between the write current amplitude and the write current overshoot, and select the best write current duration that gives the widest BER area, select three upward edge points of the write current overshoot. After that, we select eight points of the write current amplitude, and then we get 24 sets of the write current. Finally, we select eight sets of the best write triplet. We can deduce from the experimental result that, the proposed method gives better performance than the baseline method. Moreover, we observe that the fixed write current duration yields higher performance than the fixed write current overshoot. However, in the unsqueezed mode, the result is in contrast because the write current overshoot affects to the system performance more than the write current duration.

Keywords: write current optimization, write current amplitude, write current overshoot, write current duration, squeeze, BER

¹⁾ Post graduate Students, Department of Telecommunication Engineering, KMITL, Bangkok 10520, E-mail: s1060914@kmitl.ac.th

²⁾ Assoc. Prof. Dr., Department of Telecommunication Engineering, KMITL, Bangkok 10520, Email: ksupornc@kmitl.ac.th

³⁾ Seagate Technology (Thailand) Co., Ltd., Nakorn Rachasima 30170, E-mail: Kanawat.Senanan@seagate.com

* Corresponding Author

1. บทนำ

สมรรถนะของระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้งเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบและออปติไมส์ (optimize) ผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อัตราบิดผิดพลาด (Bit Error Rate: BER) เป็นตัวชี้วัดคุณภาพและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การออกแบบและการออปติไมส์ผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับหลายส่วนด้วยกัน เช่น สื่อบันทึก (media) หัวอ่าน - เขียน (heads) และช่องสัญญาณอ่าน-เขียน (read - write channel) เป็นต้น ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) บนสื่อบันทึกเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีหลายองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกัน เช่น ความหนาแน่นเชิงเส้น (linear density) ความหนาแน่นเชิงแทร็ก (track density) หัวเขียน (write head) และกระแสเขียน (write current) เป็นต้น ซึ่งในการออปติไมส์ความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะใช้ความหนาแน่นเชิงเส้น ความหนาแน่นเชิงแทร็ก และกระแสเขียน เป็นตัวปรับให้ได้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม กระแสเขียนยังมีผลต่อสมรรถนะของระบบบันทึกเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง โดยกระแสเขียนจะประกอบไปด้วย พารามิเตอร์อยู่ 3 ตัวแปร ได้แก่ แอมพลิจูดกระแสเขียน (write current amplitude) ส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current overshoot) และช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current duration) การเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนให้กับหัวเขียน ไม่เพียงแต่ทำให้สนามแม่เหล็กเขียน (write magnetic field) เพิ่มขึ้น ยังทำให้หัวบันทึกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลให้หัวบันทึกยื่นออก (protrusion) เข้าใกล้สื่อบันทึกมากขึ้น (Tongsomporn et al., 2007), (Wang et al., 2001) และยังก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กย้อนกลับใต้ trailing shield อีกด้วย (Bai et al., 2007) ส่วนการเพิ่มส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนจะทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการสวิตซ์หัว จำนวนเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) ที่เปลี่ยนหัวจะมากขึ้น (Taratorin and Klaassen 2007) และช่วยให้ข้ามผ่านแบนด์วิดท์ที่จำกัดในการขับเคลื่อน (write driver) การเชื่อมต่อ (interconnects) และหัวเขียน แต่อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเลื่อนการเปลี่ยนสถานะ

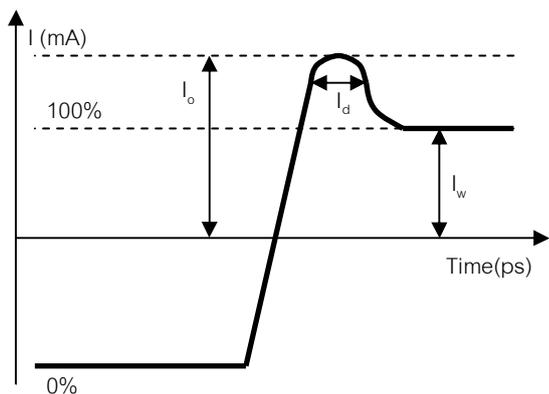
(transition shifts) และเกิดความผิดเพี้ยนของการเปลี่ยนสถานะการบันทึก (Taratorin et al., 2003), (Scholz and Batra, 2006) ดังนั้น การออปติไมส์กระแสเขียนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง (Moser et al., 2006), (Xiao et al., 2005), (Jiang et al., 2003)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบและการออปติไมส์กระแสเขียนของระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของ $-\log_{10}(\text{BER})$ โดยในส่วนของผลกระทบของกระแสเขียนในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก เราให้ความสนใจกับพารามิเตอร์ของกระแสเขียนเพียง 2 ตัวแปรเท่านั้นได้แก่ แอมพลิจูดกระแสเขียนและส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง $-\log_{10}(\text{BER})$ และแอมพลิจูดกระแสเขียน และหาความสัมพันธ์ระหว่าง $-\log_{10}(\text{BER})$ และส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน จากนั้นวิเคราะห์ถึงผลกระทบของแอมพลิจูดกระแสเขียนและส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่มีต่อระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง ในส่วนของการออปติไมส์กระแสเขียน จะเสนอวิธีในการเลือกค่าพารามิเตอร์ของกระแสเขียน โดยเลือกจากกราฟคอนทัวร์ (contour graph) และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธี baseline ซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของ $-\log_{10}(\text{BER})$

ในบทความนี้เราได้ทำการอธิบายดังต่อไปนี้ ในส่วนที่ 2 กระแสเขียนในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ซึ่งอธิบายพารามิเตอร์ของสัญญาณทั้ง 3 ตัวแปร การลบบางส่วนจากสนามแม่เหล็กย้อนกลับ (Return field-induced partial erasure: RFPE) ส่วนที่ 3 อธิบายวิธีการของการบีบแทร็ก (squeeze) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER และ SNR และผลกระทบของกระแสเขียนต่อสมรรถนะของระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ส่วนที่ 4 อธิบายการออปติไมส์กระแสเขียน ส่วนสุดท้ายเราเสนอวิธีที่ใช้ในการออปติไมส์กระแสเขียนโดยการเลือกค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแปรจากกราฟคอนทัวร์ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีของ baseline

2. กระแสเขียนในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างกระแสเขียนที่วงจรรีแอมป์ (preamplifier) (Ikekame et al., 2005) ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ป้อนให้กับหัวเขียน วงจรรีแอมป์จะทำการแปลงบิตข้อมูลให้อยู่ในรูปของกระแสเขียนและส่งผ่านไปยังขดลวดของหัวเขียน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเป็นสนามแม่เหล็กเขียนบริเวณช่องว่าง (gap) ระหว่างสื่อบันทึกกับหัวบันทึกในการบันทึกข้อมูล (Gao et al., 2009) กระแสเขียนจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปร ได้แก่ แอมพลิจูดกระแส (write current amplitude: I_w), ส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current overshoot: I_o) และช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน (write current duration: I_d) ค่าส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่นิยามดังรูปที่ 1 เป็นค่านิยามในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งจะแตกต่างกับนิยามของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนแบบทั่วไป



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างกระแสเขียนที่วงจรรีแอมป์ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

2.1 พารามิเตอร์ของกระแสเขียน

แอมพลิจูดกระแส คือกระแสที่จ่ายไปเพื่อลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กบนสื่อบันทึกหรือทำให้มีการเปลี่ยนขั้วของบิตข้อมูลตามแอมพลิจูดที่จ่ายให้กับหัวเขียน สนามแม่เหล็กเขียนที่ออกมาจากหัวเขียนต้องมีขนาดหรือความเข้มมากกว่าสภาพลบล้างความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก (demagnetization) ถ้าแอมพลิจูดกระแสต่ำกว่าจะทำให้สภาพความเป็นแม่เหล็กยังคงหลงเหลืออยู่ เป็นผลทำให้ทิศทางของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) ในสื่อบันทึกไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น และเมื่อแอมพลิจูดกระแสสูงเกินไปทำให้เกรนแม่เหล็กในสื่อบันทึกมีทิศทางที่

ควรจะเป็น ทำให้สนามแม่เหล็กเขียนที่ถูกสร้างขึ้นจากหัวเขียนนั้นไปกระทบกับแทร็กข้างเคียง เมื่อหัวอ่าน อ่านสัญญาณจะได้รับสัญญาณจากแทร็กข้างเคียงกลับมาด้วยหรือที่เรียกว่า adjacent track interference (ATI) (Gao et al., 2009)

ส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน จะมีผลต่อการเปลี่ยนขั้วและจำนวนของเกรนแม่เหล็กที่เปลี่ยนขั้ว ถ้าส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนต่ำ จะใช้เวลานานในการสวิตช์ขั้ว เกรนแม่เหล็กที่เปลี่ยนขั้วจะมีจำนวนน้อย แต่ที่ส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนสูง ทำให้การสวิตช์ขั้วเร็วขึ้น เกรนแม่เหล็กที่เปลี่ยนขั้วมีจำนวนมากขึ้น ทำให้สัญญาณอ่านกลับ (read-back signal) ดีขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ถ้าส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนสูง ทำให้เกิดการเลื่อนของการเปลี่ยนสถานะ เป็นผลทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference: ISI) (Moser et al., 2006)

ช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน จะมีผลต่อการลู่เข้าสู่แอมพลิจูดกระแสเขียน ที่ค่าช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนแคบจะทำให้การลู่เข้าสู่แอมพลิจูดกระแสเขียนได้เร็วขึ้น แต่ถ้าช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนกว้างจะทำให้การลู่เข้าสู่แอมพลิจูดกระแสเขียนได้ช้าลง แต่ในทางปฏิบัติจะไม่นำช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่มีขนาดกว้างมาใช้งานเนื่องจากจะมีผลข้างเคียงทำให้หัวอ่าน - เขียนยึดเข้าใกล้สื่อบันทึกมากขึ้น ทำให้มีผลกระทบต่อระบบโดยรวม (Jin, 2010)

2.2 การลบบางส่วนจากสนามแม่เหล็กย้อนกลับ (Return field-induced partial erasure: RFPE)

ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง จะมีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กที่อยู่ใต้ trailing shield (TS) เป็นทิศทางตรงกันข้ามของ main pole (MP) ทำให้บิตข้อมูลมีทิศทางของสนามแม่เหล็กกลับด้านจาก TS ทันททีหลังการเริ่มต้นเขียนจาก MP แม้ว่าขนาดของ TS จะใหญ่กว่า MP มากบน air-bearing surface (ABS) แต่ฟลักซ์ (flux) ย้อนกลับโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณที่จำกัดใกล้ๆ MP ตลอดช่องว่างการเขียน อย่างไรก็ตาม สนามแม่เหล็กย้อนกลับที่อยู่ใต้ TS จะมีค่าสูง โดยเฉพาะที่ความสูงในการบิน (fly height) ต่ำหรือที่แอมพลิจูดกระแส

เขียนสูง ในกรณีนี้สนามแม่เหล็กย้อนกลับอาจจะลบด่างกับบิตข้อมูลที่เขียนลงไปใหม่บางส่วน เป็นสาเหตุของ RFPE การเกิด RFPE ได้ใช้แบบจำลองของ Stoner-Wohlfarth field สามารถนิยามได้ดังสมการ

$$H_{sw} = \left[(H_x^2 + H_z^2)^{1/3} + H_y^{3/2} \right]^{3/2} \cdot \text{sign}(H_y), \quad (1)$$

โดยที่ H_x และ H_z คือส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กใน downtrack และ cross-track ตามลำดับ H_y คือส่วนประกอบสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง เมื่อกระแสเขียนเพิ่มขึ้น ไม่เพียงแต่สนามแม่เหล็กในการบันทึกจาก MP จะเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่สนามแม่เหล็กย้อนกลับก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ข้อสังเกตที่นอกเหนือจากการเพิ่มค่ากระแส นั้น Stoner-Wohlfarth field จะมีค่าสูงสุดจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดอิมิตัวของ MP ในทางกลับกันสนามแม่เหล็กย้อนกลับยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น RFPE ยังเป็นตัวชี้วัดถึงสมรรถนะของการบันทึก เช่น การเขียนทับกลับ (reverse overwrite) และอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) จะมีผลดีขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการเพิ่มค่ากระแสเขียน แต่เสี่ยงต่อการเพิ่ม RFPE อย่างมาก (Bai et al., 2007)

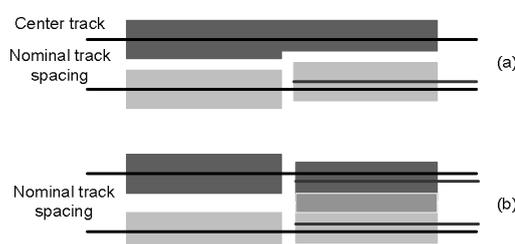
3. ผลกระทบของกระแสเขียนต่อสมรรถนะของระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

สมรรถนะของระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กจะเป็นตัวชี้วัดความจุและคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของระบบจะเกิดจากกระบวนการเขียนคือ หัวเขียนยัดเข้าใกล้สื่อบันทึกมากจนทำให้สนามแม่เหล็กที่ถูกปล่อยออกจากหัวเขียนไปกระทบกับบิตและแทร็กข้างเคียง ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลบริเวณรอบๆ บิตที่เขียนผิดเพี้ยน ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการอ่าน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความจุและสมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3.1 การบีบแทร็ก (squeezed)

การบีบแทร็ก คือการบีบขนาดของแทร็กให้เล็กลงซึ่งในกระบวนการเขียน ขนาดของแทร็กจะมีขนาดไม่เท่ากันตลอดทั้งแทร็ก โดยจะมีบางส่วนที่ซ้อนทับกันระหว่างแทร็กที่กำลังเขียนและแทร็กข้างเคียง ดังนั้นจึงต้องมีการ

นำการบีบแทร็กมาจำลองการถูกรบกวนจากแทร็กข้างเคียง โดยการบีบแทร็กแบ่งออกเป็น 2 วิธี วิธีแรกจะเรียกว่า DC – squeezed คือการเลื่อนเส้นผ่าศูนย์กลาง (center track) ของแทร็กข้างเคียง (side track) เข้าหาแทร็กที่กำลังเขียน (test track) ส่วนวิธีที่ 2 จะเรียกว่า AC – squeezed คือการเลื่อนเส้นผ่าศูนย์กลางแทร็กของแทร็กข้างเคียงและแทร็กที่กำลังเขียนเข้าหากัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 แต่ในกระบวนการเขียนจะใช้ AC – squeezed



รูปที่ 2 การบีบแทร็กแบบ DC – squeezed (a), AC – squeezed (b)

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ SNR (signal-to-noise ratio)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า BER และ SNR ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ซึ่งอัตราบิตผิดพลาดของวงจรตรวจหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold detector) จะคำนวณจากค่า SNR ของช่องสัญญาณ (channel) ถ้าให้ V_{0-p} คือแอมพลิจูดของแรงดันและ $V_{rms,n}$ คือแรงดัน RMS ของสัญญาณรบกวน (RMS noise voltage) ดังนั้นค่า SNR นิยามจาก

$$SNR = \frac{V_{0-p}}{V_{rms,n}}, \quad (2)$$

ในการประมาณค่า BER ของวงจรตรวจหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold detector) ในช่องสัญญาณการตรวจหาจุดสูงสุด (peak detection channel) สมมติให้แรงดันสัญญาณรบกวน n ในช่องสัญญาณการบันทึกมีค่าประมาณเกาส์เซียน (Gaussian) ที่มีค่าเฉลี่ย (mean) เท่ากับศูนย์และ $\sigma = V_{rms,n}$ ดังนั้นความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density) ของแรงดันสัญญาณรบกวนกำหนดได้จากการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution)

$$f(n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

เราพิจารณาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดในวงจรตรวจหาขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งจะกำหนดระดับไว้ที่ 50% ของแอมพลิจูดสัญญาณ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดความผิดพลาดเป็นบิต 1 กำหนดโดยการอินทิเกรตของฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์เซียน

$$P_{0/1} = \int_{v_0-p/2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) dn, \quad (4)$$

นิยามการอินทิเกรตของการกระจายแบบเกาส์เซียนในรูปของ error function ดังนั้นค่า BER หาได้จาก

$$P_{0/1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\operatorname{SNR}}{2\sqrt{2}}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{\operatorname{SNR}}}{2}\right), \quad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดความผิดพลาดเป็นบิต 0 จะหาได้จาก

$$P_{1/0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\operatorname{SNR}}{2\sqrt{2}}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{\operatorname{SNR}}}{2}\right), \quad (6)$$

และสามารถนิยามค่า SNR ได้ดังสมการ (7)

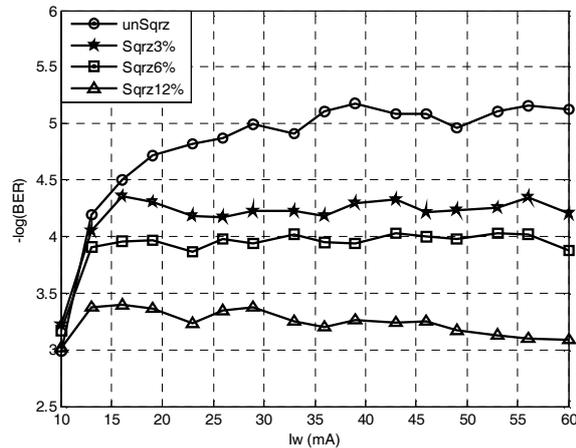
$$\operatorname{SNR} = \frac{0.31PW_{50}BW}{a^2s}, \quad (7)$$

โดยที่ PW_{50} คือความกว้างของพัลส์ (pulse width) B คือช่องว่างของการเปลี่ยนสถานะ (transition spacing) W คือความกว้างของแตรีกที่อ่าน (read track width) a คือพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนสถานะ (transition parameter) s คือความกว้างของ cross-track correlation (cross-track correlation width) และค่า 0.31 คือค่าคงที่จากการสมมุติฐานการเปลี่ยนสถานะ tanh ในจิตเตอร์ (jitter) (Bertram et al., 2000)

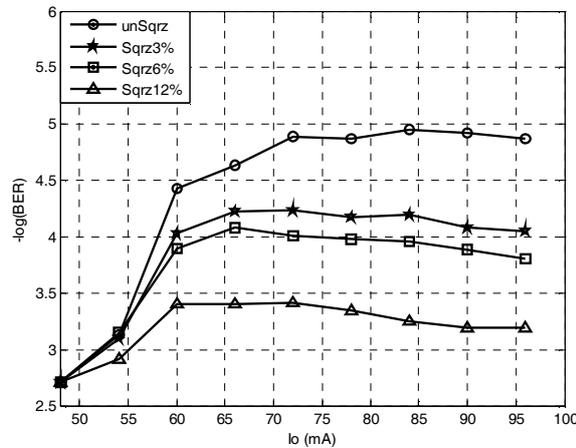
3.3 ผลกระทบของกระแสเขียนต่อสมรรถนะของระบบ

ในการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกระแสเขียนจะมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงผลกระทบของแอมพลิจูดกระแสเขียนและส่วนพุงเกินกระแสเขียน จากรูปที่ 3 แสดงถึงผลกระทบของแอมพลิจูดกระแสเขียนโดยที่กำหนดส่วนพุงเกินกระแสเขียนเท่ากับ 78 mA เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนจะทำให้ค่า $-\log_{10}(\operatorname{BER})$ จะดีขึ้นในช่วงหนึ่ง เพราะการเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนสามารถลบล้างสภาพความเป็น

แม่เหล็กบนสื่อบันทึกได้ในระดับหนึ่ง หลังจากนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเลื่อนแตรีกเข้าหากันหรือเรียกว่าการบีบแตรีกจะทำให้มีส่วนที่ทับซ้อนกัน ดังนั้น เวลาที่หัวอ่านทำการอ่านข้อมูลจะรับสัญญาณของแตรีกข้างเคียงมาด้วยเป็นผลให้ค่า $-\log_{10}(\operatorname{BER})$ แย่ลง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-\log_{10}(\operatorname{BER})$ และแอมพลิจูดกระแสเขียน



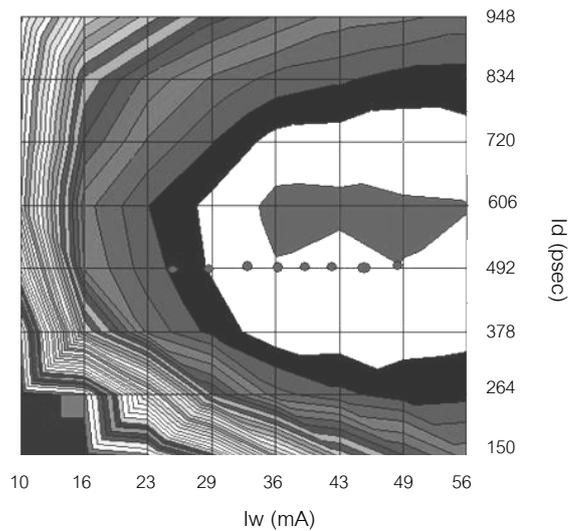
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-\log_{10}(\operatorname{BER})$ และส่วนพุงเกินกระแสเขียน

ในรูปที่ 4 แสดงถึงผลกระทบของส่วนพุงเกินกระแสเขียน โดยที่กำหนดแอมพลิจูดกระแสเขียนเท่ากับ 26 mA แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มส่วนพุงเกินกระแสเขียนทำให้ $-\log_{10}(\operatorname{BER})$ ดีขึ้นในช่วงแรก หลังจากนั้นเข้าสู่สภาวะคงตัว เพราะว่าส่วนพุงเกินกระแสเขียนทำให้เวลาในการสวิตช์ช้าลง และจำนวนเกรนแม่เหล็กที่เปลี่ยนช้ามากขึ้น แต่จะมีผลถึงแค่ช่วงหนึ่งของส่วนพุงเกินกระแสเขียน หลังจากนั้นไม่ว่าจะเพิ่มเท่าไรก็จะมีผลน้อยมาก ซึ่งจะเห็นได้จากการเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่า $-\log_{10}(\operatorname{BER})$

ดังนั้นผลกระทบของแอมพลิจูดกระแสเขียนและส่วนพุงเกินกระแสเขียนต่อสมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์พบว่า การเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนจะส่งผลดีต่อระบบในกรณีที่ไม่มีการบีบแตรีกเท่านั้น แต่ในกรณีที่มีการบีบแตรีกเมื่อเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนเกินระดับหนึ่งทำให้สมรรถนะของระบบต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแอมพลิจูดกระแสเขียนทำให้หัวบันทึกยื่นออกมา เป็นสาเหตุให้เกิด ATI ในกรณีของส่วนพุงเกินกระแสเขียนพบว่า ในกรณีที่ไม่มีการบีบแตรีกสมรรถนะของระบบจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มส่วนพุงเกินกระแสเขียนสูงขึ้น แต่ในทางกลับกัน ในกรณีการบีบแตรีกสมรรถนะของระบบจะต่ำลงตามการเพิ่มระดับเปอร์เซ็นต์ของการบีบแตรีก เพราะแม้ว่าการเพิ่มส่วนพุงเกินกระแสเขียนทำให้ใช้เวลาสั้นลงในการสวิตช์หัว แต่เป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบของ ISI (Piamsup et al., 2010)

4. การถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไข (write current optimization)

การถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไขเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งเพื่อให้ได้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมกับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก หรือให้ได้ความจุตามความต้องการ การถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไขทำได้โดยการเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียน, ส่วนพุงเกินกระแสเขียน และช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสเขียน แต่ในกระบวนการเขียนข้อมูล ขนาดของแตรีกจะไม่เท่ากันตลอด การบีบแตรีกจึงนำมาใช้ในการพิจารณาการทดสอบสมรรถนะหรือการถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไข ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้การบีบแตรีกแบบ AC – squeezed ในการถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไขได้มีการใช้กราฟคอนทัวร์ในการเลือกพารามิเตอร์ของกระแสเขียน ซึ่งกราฟคอนทัวร์นี้จะพล็อต $-\log_{10}(\text{BER})$ ที่ได้จากการรันพารามิเตอร์ของกระแสเขียน แต่เนื่องจากการเลือกพารามิเตอร์กระแสเขียนของวิธี baseline เหมาะสมกับกราฟที่มีลักษณะคอนทัวร์ของเส้นโค้งที่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 5 ดังนั้นเราจึงเสนอวิธีที่นำเสนอในการเลือกพารามิเตอร์กระแสเขียนสำหรับกราฟที่มีลักษณะคอนทัวร์ของเส้นโค้งที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 7 ซึ่งวิธีที่นำเสนอจะอธิบายในรูปที่ 6 ส่วนรูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการเลือกพารามิเตอร์ของกระแสเขียนในวิธีที่นำเสนอ

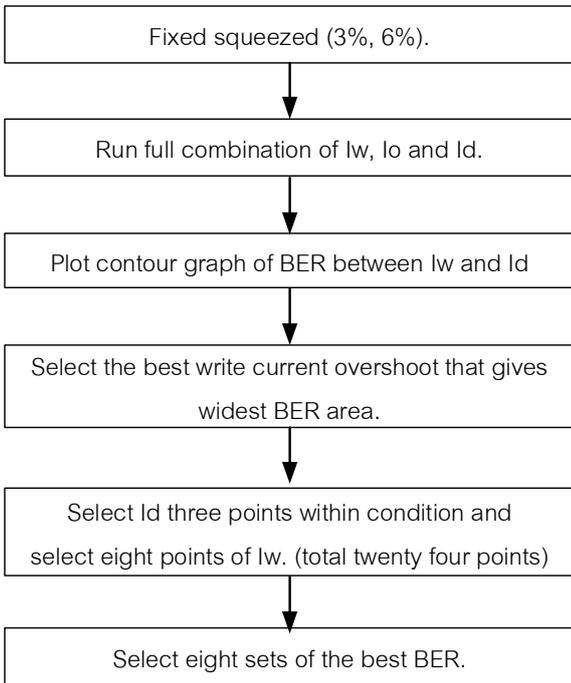


รูปที่ 5 ตัวอย่างกราฟที่มีลักษณะคอนทัวร์ของเส้นโค้งเป็นแบบเชิงเส้น

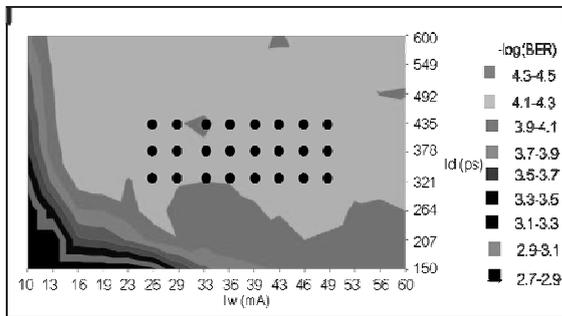
การถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไข baseline เริ่มต้นกำหนดระดับเปอร์เซ็นต์ของการบีบแตรีก จากนั้นเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสเขียนจนครบทุกค่า ถัดมาพล็อตกราฟคอนทัวร์ของ $-\log_{10}(\text{BER})$ ระหว่างแอมพลิจูดกระแสเขียนและช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสเขียน โดยที่เลือกส่วนพุงเกินกระแสเขียนที่ให้ค่า $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีเป็นบริเวณกว้างที่สุด สังเกตได้จากบริเวณพื้นที่สีแดงในรูปที่ 5 จากนั้นเลือกช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสเขียนที่ขอบล่างของค่า $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีสุด (ในรูปที่ 5 บริเวณที่ $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีสุดคือพื้นที่สีแดง) สุดท้ายเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียน 8 ค่า ดังนั้นจะได้กระแสเขียนที่ถอดรหัสแล้ว 8 ชุด

รูปที่ 6 แสดงบล็อกไดอะแกรมวิธีที่นำเสนอในการถอดรหัสแบบไม่ใช้รหัสแก้ไข ขั้นตอนแรกกำหนดระดับเปอร์เซ็นต์ของการบีบแตรีก จากนั้นรันพารามิเตอร์ของกระแสเขียนจนครบทุกค่า ถัดมาพล็อตกราฟคอนทัวร์ของ $-\log_{10}(\text{BER})$ ระหว่างแอมพลิจูดกระแสเขียนและช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสเขียน แล้วเลือกส่วนพุงเกินกระแสเขียนที่ทำให้บริเวณพื้นที่ของ $-\log_{10}(\text{BER})$ สูงตรงกลาง มีขนาดใหญ่ที่สุด (พื้นที่สีเขียวในรูปที่ 7) แล้วเลือกช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสเขียนต่ำสุดในโซนกลางจำนวน 3 ค่า จากนั้นเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียน 8 ค่า ดังนั้นจะมีชุดกระแสเขียนทั้งหมด 24 ชุด (แสดงตัวอย่าง

ในรูปแบบที่ 7) แล้วเลือกชุดกระแสเขียนที่ให้ $-\log_{10}(\text{BER})$ ที่ดีที่สุด 8 ชุด



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมวิธีที่นำเสนอในการอพติไมล์กระแสเขียน

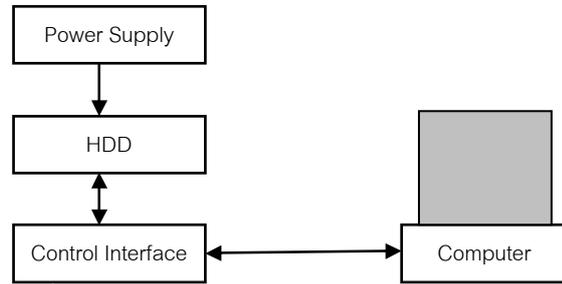


รูปที่ 7 ตัวอย่างกราฟที่มีลักษณะคอนทัวร์ของเส้นโค้งที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้นและการเลือกพารามิเตอร์กระแสเขียนของวิธีที่นำเสนอ

ส่วนอีกวิธีหนึ่งคล้ายกับวิธีแรก แต่พล็อตกราฟคอนทัวร์ของ $-\log_{10}(\text{BER})$ ระหว่างแอมพลิจูดกระแสเขียนและส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน แล้วเลือกช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนที่ทำให้บริเวณพื้นที่ของ $-\log_{10}(\text{BER})$ สูงตรงกลาง มีขนาดใหญ่ที่สุด แล้วเลือกส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนต่ำสุดในโซนกลางจำนวน 3 ค่า จากนั้นเลือกแอมพลิจูดกระแสเขียน 8 ค่า ดังนั้นจะมีชุดกระแสเขียนทั้งหมด 24 ชุด แล้วเลือกชุดกระแสเขียนที่ให้ $-\log_{10}(\text{BER})$ ที่ดีที่สุด 8 ชุด

5. ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

อุปกรณ์ในการทดลองประกอบไปด้วย พาวเวอร์ซัพพลาย, ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, ตัวควบคุมการเชื่อมต่อ (control interface) และคอมพิวเตอร์ ซึ่งรูปแบบการต่อแสดงดังรูปที่ 8 และได้เลือกไดรฟ์มีความจุ 500-1,000 GB ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (สูงสุด) มากกว่า 300 Gb/in² ความหนาแน่นเชิงแตรีก (0-skew) มากกว่า 200 kTPI ความหนาแน่นเชิงเส้น (สูงสุด) มากกว่า 1,000 kBPI และอัตราข้อมูล (สูงสุด) มากกว่า 1,000 Mb/s

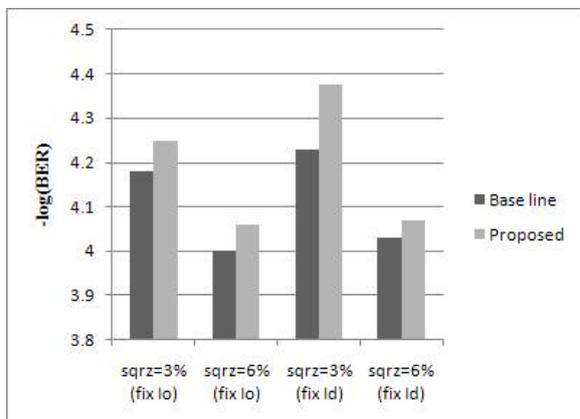


รูปที่ 8 รูปแบบการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

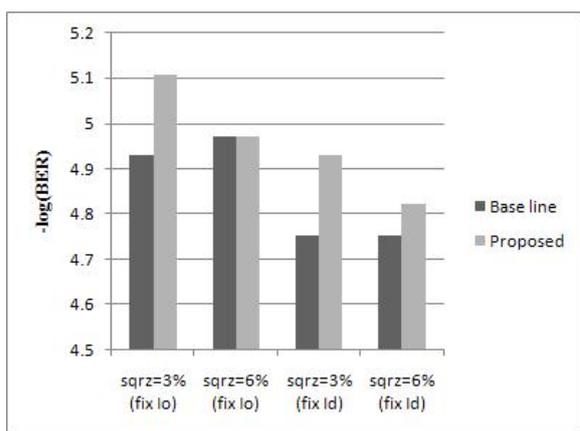
ซึ่งแบ่งเป็น 2 ตอน ในการอพติไมล์ เราเสนอวิธีการอพติไมล์กระแสเขียนโดยการเลือกจากกราฟคอนทัวร์ ซึ่งพิจารณาระดับการบีบแตรีก 2 ระดับคือที่ระดับ 3% และ 6% โดยที่แบ่งเป็น 2 วิธี วิธีที่ 1 กำหนดส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน จากนั้นเลือกช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนและแอมพลิจูดกระแสเขียน วิธีที่ 2 กำหนดช่วงเวลาของส่วนพุ่งเกินกระแสเขียน แล้วเลือกส่วนพุ่งเกินกระแสเขียนและแอมพลิจูดกระแสเขียน วิธีที่นำเสนอการเลือกพารามิเตอร์กระแสเขียนจะต่างจากวิธีของ baseline คือ เลือกค่า $-\log_{10}(\text{BER})$ ที่ดีที่สุด 8 ชุดจาก 24 ชุดที่เลือกไว้ในตอนแรกดังแสดงตัวอย่างในรูปแบบที่ 7

รูปที่ 9 เราพบว่าวิธีที่เสนอทั้งสองวิธีมีค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีกว่าวิธี baseline เนื่องจากจำนวนในการเลือกพารามิเตอร์ของกระแสเขียนเพิ่มขึ้นและสามารถเลือกค่าซ้ำได้ แต่ไม่ซ้ำทั้งหมด เมื่อพิจารณาเฉพาะวิธีที่นำเสนอเราพบว่าที่ระดับการบีบแตรีก 3% ให้ค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีกว่าที่ระดับการบีบแตรีก 6% ในทั้งสองวิธีที่นำเสนอ เนื่องจากที่ระดับการบีบแตรีก 3% มีระดับสัญญาณจากแตรีกข้างเคียงน้อยกว่าที่ระดับการบีบแตรีก 6% ดังนั้นที่ระดับการบีบแตรีก 3% หัวอ่านรับสัญญาณจากแตรีกข้างเคียงน้อยกว่าระดับการ 6% ยิ่งกว่านั้น เรา

พบว่าวิธีกำหนดช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชานให้ค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีกว่าวิธีกำหนดส่วนพุงเกินกระแสวิชาน ทั้งในการบีบแพ็คที่ระดับ 3% และ 6%



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ในโหมดการบีบแพ็ค ที่เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีที่นำเสนอและวิธี baseline



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ในโหมดไม่มีการบีบแพ็ค ที่เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีที่นำเสนอและวิธี baseline

รูปที่ 10 เราแสดงค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ในโหมดไม่มีการบีบแพ็คซึ่งหาจากพารามิเตอร์ของกระแสวิชานที่เลือกมาในระดับการบีบแพ็ค 3% และ 6% จากการสังเกตเราพบว่าวิธีที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีกว่าวิธีของ baseline และวิธีกำหนดส่วนพุงเกินกระแสวิชานมีค่าเฉลี่ย $-\log_{10}(\text{BER})$ ดีกว่าวิธีกำหนดช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชาน เพราะส่วนพุงเกินกระแสวิชานที่เลือกจากวิธีกำหนดส่วนพุงเกินกระแสวิชานมากกว่าส่วนพุงเกินกระแสวิชานที่เลือกจากวิธีกำหนดช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชาน

7. สรุป

จากผลการทดลองในการถอดรหัสแบบ LDPC ด้วย การเลือกค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแปรจากกราฟคอนทัวร์

แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอทั้ง 2 วิธีให้สมรรถนะดีกว่าวิธีของ baseline ทั้งในการบีบแพ็คและไม่มีการบีบแพ็ค จากผลการทดลองยังพบอีกว่าควรเลือกรูปแบบการถอดรหัสแบบกำหนดช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชาน เมื่อพิจารณาในโหมดไม่มีการบีบแพ็ค กลับให้ผลตรงกันข้ามคือควรเลือกรูปแบบกำหนดส่วนพุงเกินกระแสวิชาน เพราะส่วนพุงเกินกระแสวิชานมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบมากกว่าช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชาน ดังนั้นจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าในการถอดรหัสแบบ LDPC ควรเลือกใช้วิธีแบบกำหนดส่วนพุงเกินกระแสวิชานมากกว่าเลือกใช้วิธีแบบกำหนดช่วงเวลาของส่วนพุงเกินกระแสวิชาน

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้ทุนหมายเลข HDD-01-51-05M

9. เอกสารอ้างอิง

- Tongsomporn D., Siritaratiwat A., Afzulpurkar N., Bargmann B. (2007). The Effect of Head Protrusion on Recording Field for Perpendicular Recording System, The 2007 ECTI International Conference, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, 9 – 12 May. (in Thai).
- Kovintavewat Piya (2007). Signal Processing for Digital Data Storage Volume I: Basic Read-Write Channels., National Electronics and Computer Technology Center (in Thai).
- Kovintavewat Piya (2007). Signal Processing for Digital Data Storage Volume II: Receiver Design., National Electronics and Computer Technology Center (in Thai).

- Pliamsup P., Supnithi P., Senanan K. (2010). Effect of Write Current to Performance of Perpendicular Magnetic Recording System, The Proceeding of 48th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok, 3 – 5 Feb. (in Thai).
- Alexander M. T., Klaas B. K. (2007). Write Current Rise Time in Perpendicular Recording : An Experimental Study, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, No. 2, 750–755.
- Moser A., Bonhote C., Dai Q., Do H., Knigge B., Ikeda Y., Le Q., Lengsfeld B., MacDonald S., Li J., Nayak V., Payne R., Schabes M., Smith N., Takano K., Tsang C., van der Heijden P., Weresin W., Weresin W., Williams M., Xiao M. (2006). Perpendicular magnetic recording technology at 230 Gbit/in², *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 303, 271–275.
- Taratorin A., Yuan S., Nikitin V. (2003). High data rate recording: Moving to 2 Gbit/s. *Applied physics*, Vol. 93, No. 10, 6444 – 6446.
- Daniel Z. B., Peng L., Adam T., Dave T., James W., Kroum S., Francis L., Matthew M., Yuhui T., Jian-Gang Z. (2007). Return Field-Induced Partial Erasure in Perpendicular Recording Using Trailing-Edge Shielded Writers, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, No. 2, 600–604.
- Hiroshi I., Takeo Y. (2005). OVERSHOOT CURRENT PHASE/AMPLITUDE CONTROL FOR HARD DISK DRIVE WRITE CURRENT. U.S. Patent no. 6870697B2, March 22.
- Bertram H. N., Williams M. (2000). SNR and Density Limit Estimates: A Comparison of Longitudinal and Perpendicular Recording, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No. 1, 4–9
- Kai Z. G., Olle H., Yonghua C. (2009). Read and write processes, and head technology for perpendicular recording, *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 321, 495–507.
- Zhen J., Kezhao Z. (2010). MULTI-PARAMETER OPTIMIZATION OF WRITE HEAD PERFORMANCE USING ADPTIVE RESPONSE SURFACE. U.S. Patent no. 20100134911, March 06.
- Xiao M., Lengsfeld B., Takano K., Ikeda Y., Do H., Rosen H. (2005). Write current optimization for single-pole and trailing-shield heads in perpendicular recording. *Applied physics*, Vol. 97, 10N501-1 – 10N501-3.
- Run-Han W., Xiao Z. W, Walt W., Y. S. Ju (2001) Head Protrusion and Its Implications on Head-Disk Interface Reliability, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No. 4, 1842 – 1844.
- Wen J., Gautam k., Roger W., Mason W., Neil S., Yoshihiro I. (2003). Cross-track noise profile measurement for adjacent-track interference study and write-current optimization in perpendicular recording, *Applied physics*, vol. 93, No. 10, 6754 – 6756.
- Werner S., Sharat B. (2006). Effect of Write Current Waveform on Magnetization and Head-Field Dynamics of Perpendicular Recording Heads, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, No. 10, 2264 –2266.