



รายงานฉบับสมบูรณ์

การออกแบบวงจรตรวจจับด้วยเทคนิคการวนซ้ำสำหรับระบบการ
บันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กความหนาแน่นสูงยิ่ง

Detection Design with Iterative Technique for Ultra-High Density
Magnetic Recording Systems

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานฉบับสมบูรณ์

การออกแบบวงจรตรวจจับด้วยเทคนิคการวนซ้ำสำหรับระบบการ
บันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กความหนาแน่นสูงยิ่ง

Detection Design with Iterative Technique for Ultra-High Density
Magnetic Recording Systems

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การออกแบบวงจรตรวจจับด้วยเทคนิคการวนซ้ำสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กความหนาแน่นสูงยิ่ง

แหล่งเงิน : งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ.....2559..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....100,000.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ผู้ร่วมโครงการ: นายกชกร ปิตุโส

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ สมรรถนะของการเข้ารหัสมอดดูเลชัน 4/5 ได้ถูกทำการประเมินผลผ่านทางช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (two-dimensional magnetic recording, TDMR) ที่สร้างจากแบบจำลองโวลอนอยแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา และผลตอบสนองของหัวอ่านแบบสองมิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณอ่านกลับ เนื่องจากหัวอ่านที่มีความกว้างมากกว่าขนาดของแทร็กข้อมูล จึงมีผลทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (intertrack interference, ITI) ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบการบันทึกข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหักล้าง ITI ที่สามารถทำงานร่วมกันกับการเข้ารหัสมอดดูเลชันเพื่อบรรเทาผลกระทบดังกล่าวที่แทรกมากับสัญญาณอ่านกลับก่อนที่จะส่งข้อมูลไปยังขั้นตอนของการถอดรหัส นอกจากนี้แล้วเรายังศึกษาการกระจายตัวของสัญญาณอ่านกลับที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการเรียงตัวของข้อมูลจากนั้นได้จำลองการประเมินสมรรถนะของระบบผ่านโปรแกรมจำลองผล เราพบว่าวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถช่วยพัฒนาสมรรถนะของระบบได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลสูง

คำสำคัญ : การแทรกสอดระหว่างแทร็ก, การบันทึกข้อมูลแบบสองมิติ, รหัสมอดดูเลชัน

Research Title:Detection Design with Iterative Technique for Ultra-High Density
Magnetic Recording Systems.....

Researcher:..... Assist. Prof. Dr. Chanon Warisarn.....

Faculty: College of Advanced Manufacturing Innovation **Department:**.....

ABSTRACT

.....The performance of a rate-4/5 modulation code is evaluated in two-dimensional magnetic recording (TDMR) channels, where a magnetic medium is made by a discrete Voronoi model and the two-dimensional (2D) sensitivity function of the reader is adopted to generate the TDMR readback signal. Since the read-head sensitivity function covers many tracks, it causes intertrack interference (ITI) that can deteriorate the system performance. Therefore, this paper proposes the ITI subtraction scheme in conjunction with the rate-4/5 modulation code in a coded TDMR channel to mitigate the ITI effect embedded in the readback signals before performing an iterative decoding process. We also investigate the data-dependent readback amplitude distributions and evaluate the TDMR system performance via computer simulation. Results show that the proposed scheme helps improve the TDMR system performance, especially when an areal density is high.....

Keywords: Intertrack interference, Two-dimensional magnetic recording, Modulation code.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนภายใต้ทุนโครงการวิจัยเงินรายได้ รหัสทุน 2559-02-10-001 จาก
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

()

(ผศ, ดร. ชานนท์ วรรณสาร)

กรกฎาคม 2559

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | V |
| สารบัญภาพ..... | VI |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| บทที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก..... | 5 |
| บทที่ 3 วิวัฒนาการของการบันทึกเชิงแม่เหล็ก..... | 17 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 32 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... | 37 |
| บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง..... | 38 |
| ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 43 |
| ภาคผนวก-ก- (เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์)..... | 44 |
| ภาคผนวก-ข- (ประวัตินักวิจัย)..... | 49 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 การเข้ารหัสข้อมูลก่อนการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก..... | 18 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1: แบบจำลองการลบไบนารี (Binary erasure model)..... | 6 |
| 2.2 แบบจำลองเกรนไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ..... | 6 |
| 2.3: รูปแบบเกรนแม่เหล็กที่เป็นไปได้ 4 แบบ..... | 6 |
| 2.4: แบบจำลองการบันทึกของเกรนไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ..... | 7 |
| 2.5 แผนภาพโวโรนอย (Voronoi)..... | 7 |
| 2.6: แบบจำลองสี่เหลี่ยมที่ใช้แผนภาพโวโรนอย (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ..... | 8 |
| 2.7: ระดับความรุนแรงของการเลื่อนตำแหน่งจากศูนย์กลาง (a) ที่ค่าเฉลี่ยน้อยๆ (b) ที่ค่าเฉลี่ยมากๆ..... | 9 |
| 2.8: แบบจำลองการบันทึกของไวโรนอยเกรน (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ..... | 9 |
| 2.9: ผลตอบสนองของหัวอ่าน..... | 9 |
| 2.10: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรถวายจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริ..... | 11 |
| 2.11: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรถวายจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริพร้อมทั้งการเข้ารหัสของ outer code..... | 11 |
| 2.12: แสดงขนาดเกรนที่เป็นไปได้ 4 แบบและความน่าจะเป็นที่จะพบในสี่บันทึก..... | 12 |
| 2.13: ตัวอย่างของแบบจำลองวิธีการเขียนข้อมูลแบบซ้อนทับด้วยการใช้มุมของหัวเขียน (shingled magnetic recording)..... | 13 |
| 2.14: ตัวอย่างของแทร็กที่ถูกเขียนทับ (write-track pitch), ลำดับในการอ่านและการเขียนข้อมูล (reading/writing order), และแทร็กข้อมูลสุดท้ายที่ไม่มีการเขียนทับ (write-core width) ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบเขียนซ้อนทับ..... | 13 |
| 2.15: แสดงลำดับการบันทึกข้อมูล..... | 14 |
| 2.16: การเปลี่ยนสภาพเชิงแม่เหล็กของสี่บันทึก (a) อุดมคติ (b) สี่เกรน..... | 14 |
| 2.17: แสดง Sensitivity function ของหัวอ่าน..... | 15 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| | |
|---|----|
| 3.1: การวางบิตข้อมูลแบบเยื้อง (staggered pattern) ภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน (readhead sensitivity function) เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างแตรีกที่รุนแรงให้สามารถรองรับการใช้เทคนิคการชักตัวอย่างเกินจริง..... | 17 |
| 3.2: การเขียนข้อมูลลงในสื่อบันทึกข้อมูลที่มีการวางตัวแบบเยื้อง..... | 19 |
| 3.3: รูปแบบของสัญญาณอ่านกลับกรณีที่เป็นเกาะเดี่ยว (a) กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด (b) และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด (c)..... | 20 |
| 3.4: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 5/6..... | 20 |
| 3.5: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 7/9..... | 21 |
| 3.6: แสดงสมรรถนะของระบบที่มีการเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสต่างๆ..... | 21 |
| 3.7: สัญญาณอ่านกลับของ (a) บิตข้อมูลเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด เมื่อบิตข้อมูล '1' ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล '1' และ (c) กรณีที่ด้อยสุด เมื่อบิตข้อมูล '1' ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล '-1'..... | 22 |
| 3.8: วิธีการ M-RBP (a) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดของแตรีกกลางและ (b) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดใแตรีกข้างเคียง..... | 23 |
| 3.9: วิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติ..... | 23 |
| 3.10: ตัวอย่างของคำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสด้วย 5/6 2D Modulation..... | 24 |
| 3.11: แผนภาพอธิบายสัญญาณ สัญญาณรบกวน และการแทรกสอดของบริเวณต่าง ๆ ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซ้อนทับ..... | 26 |
| 3.12: ส่วนหนึ่งของผลตอบสนองพัลส์สองมิติที่ถูกคัดแยกออกมาแสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ชุดเลขสุ่มเทียมสองมิติขนาด 7×73 | 28 |
| 3.13: ตัวอย่างของความเป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองพัลส์ในมุมมองจากข้างบนและข้างล่าง | 28 |
| 3.14: ผลตอบสนองแมกนิจูดและเฟสของตัวกรองสำหรับผสมรูปคลื่น หัวอ่านที่ 1 อยู่ในบริเวณใกล้กึ่งกลางแตรีกข้อมูล หัวอ่านที่ 2 ถูกปรับให้ขยับไปทางแตรีกที่ $N+1$ เล็กน้อย อินพุตทั้งสองและเอาต์พุตมีเป้าหมายแบบเดียวกัน ดังนั้น ตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 มีผลตอบสนองหนึ่งหน่วย..... | 30 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| | |
|--|----|
| 3.15: แสดงถึงภาพของฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงแล้ว ภาพแรก คือ ภาพฟังก์ชันอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงเมื่อข้อมูลถูกเขียนซ้อนทับในทิศทางรัศมีน้อยไปมาก และภาพทางขวา คือ จากตำแหน่งรัศมีมากไปน้อย เพื่อให้ได้การผสมสัญญาณที่ดี รูปคลื่นที่ได้จากตัวปรับเท่าถูกส่งไปยังซอฟต์แวร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสด้วยรหัส LDPC..... | 31 |
| 4.1: ตัวอย่างกรานูลาร์ (Granular) ของสื่อบันทึกจากวิธีการกระจายตัวของนิวเคลียสแบบ Poisson Disk.... | 32 |
| 4.2: ตัวอย่างของ Magnetization ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการเขียน (สีแดงแทน 1 สีน้ำเงิน -1)..... | 33 |
| 4.3: ผลตอบสนองของหัวอ่าน (Sensitivity function) สีเขียวได้จากหัวอ่านจริง สีแดงได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 33 |
| 4.4: กระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจจับ Soft Output Viterbi Algorithm แบบสองมิติ (2D SOVA)..... | 34 |
| 4.5: ช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการเข้ารหัสมอดดูเลชัน การตรวจจับแบบสองมิติ และการลบล้างการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการทำงานแบบวนซ้ำ..... | 35 |
| 4.6: รูปแบบของความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึกข้อมูลที่ถูกเขียนด้วยข้อมูลหลังจากที่เข้ารหัสแล้วด้วยระยะความกว้างบิตและความกว้างแทร็กเท่ากับ 15 nm ซึ่งตรงกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.87 Tb/in ² | 35 |
| 4.7: การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาด (bit-error rate, BER) ของระบบที่มีการลบล้างผลกระทบการแทรกสอดระหว่างแทร็ก ระบบการบันทึกที่มีการเข้ารหัสมอดดูเลชัน และระบบการบันทึกข้อมูลทั่วไปที่ความหนาแน่นข้อมูลเชิงผู้ใช้ (user density, UD) เท่ากับ 2.29 และ 3.29 Tb/in ² | 36 |

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการเติบโตอย่างรวดเร็วของเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โซเชียลเน็ตเวิร์ค อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัล (Digital data storage) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสำคัญมากที่จะนำมาจัดเก็บข้อมูลตามความต้องการของผู้บริโภค ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) จัดเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยม อย่างแพร่หลาย เนื่องจากราคาต่อหน่วยความจุที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลชนิดอื่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่ใช้หลักการเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในการบันทึกข้อมูล ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) หัวเขียน (Recording head) 2) หัวอ่าน (Read head) และ 3) สื่อบันทึก (Media) โดยหัวเขียนทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่จะใช้ในการเหนี่ยวนำสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกให้มีความขั้วไป ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งและทิศทางตรงกันข้ามซึ่งสามารถใช้แทนข้อมูลดิจิทัลบิตที่เป็น “0” และบิตที่เป็น “1” ส่วนหัวอ่านจะทำหน้าที่ตรวจจับ (Sense) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกและเปลี่ยนไปเป็นแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถูกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) แปลงกลับไปเป็นข้อมูลดิจิทัลตามเดิม

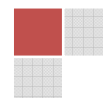
ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป้าหมายคือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ของข้อมูลให้มากขึ้น ดังนั้น ขนาดเกรนแม่เหล็ก (Magnetic grain) ของสื่อบันทึก (Media) จะถูกลดขนาดลงเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางกายภาพของสสารแม่เหล็กเมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงจนถึงจุดหนึ่ง เกรนแม่เหล็กจะสูญเสียความสามารถในการเก็บข้อมูลและไม่สามารถคงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเช่นเดิมอยู่ได้ซึ่งสถานะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “Super paramagnetic” เป็นสถานะที่ความร้อนจากภายนอกสามารถที่จะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กได้ กล่าวคือ ความร้อนสามารถทำให้ข้อมูลที่บันทึกไว้สูญหาย ในบทความ [1] ได้เสนอว่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกจำกัดสูงสุดอยู่ที่ 1 Tb/in² ก่อนที่เกรนแม่เหล็กจะเปลี่ยนคุณสมบัติไปเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาค้นคว้ารูปแบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กรูปแบบใหม่ๆ เพื่อข้ามพ้นข้อจำกัดนี้ ปัจจุบันวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กรูปแบบใหม่ได้ถูกวิจัยและนำเสนอในหลายวิธี เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (Heat assisted magnetic recording, HAMR) [2], การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการ

จัดรูปแบบบิต (Bit pattern media magnetic recording, BPM) [3] และ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-dimensional magnetic recording, TDMR) [4]

สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR) จะใช้สื่อบันทึกที่มีค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Coercivity) สูง เพื่อให้สามารถลดขนาดเกรนแม่เหล็กได้โดยที่ไม่สูญเสียคุณสมบัติในการเก็บข้อมูลอย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กที่มีลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กสูงจะต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่าเดิมในการกลับ (Switch) ทิศทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งขัดแย้งกับแนวโน้มขนาดของหัวอ่านที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงต้องมีการคิดเลเซอร์ขนาดเล็กที่หัวเขียนเพื่อให้ความร้อนแก่สื่อบันทึก ความร้อนจะทำให้ค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกลดลงชั่วขณะ ซึ่งเพียงพอที่ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กของสื่อบันทึก ทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามมีปัญหาสำหรับรูปแบบการบันทึกแบบนี้ คือการสร้างสื่อบันทึกที่มีค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง และมีเกรนแม่เหล็กขนาดเล็กสม่ำเสมอมีความยากลำบาก นอกจากนี้ตัวสื่อบันทึกต้องสามารถรักษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กแม้จะได้รับความร้อนสูง

สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต ตัวสื่อบันทึกถูกออกแบบให้เกรนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นเกาะ (Island) เรียงตัวตามรูปแบบ (Pattern) ที่กำหนดไว้ (ตรงข้ามกับสื่อบันทึกที่ใช้งานในปัจจุบันที่การเรียงตัวของเกรนแม่เหล็กเป็นลักษณะสุ่ม) แต่ละเกาะของเกรนแม่เหล็กจะถูกกั้นด้วยสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Non - magnetic) เพื่อลดรอยต่อซิกแซก (Zigzag) ระหว่างเกรนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นที่มาของสัญญาณรบกวน (Media noise) อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต คือ การเขียนผิดพลาด (Error writing) กล่าวคือ หัวเขียนจะต้องจ่ายสนามแม่เหล็กให้ตรงตำแหน่งของเกรนแม่เหล็ก มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการเขียนผิดพลาดตำแหน่ง ไปเขียนบริเวณสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก ซึ่งหมายความว่าข้อมูลที่บันทึกจะเกิดการสูญหาย นอกจากนี้ยังมีความลำบากในกระบวนการสร้างสื่อบันทึกให้แต่ละเกาะวางตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดเท่ากันทั้งแผ่นของสื่อบันทึก

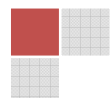
ด้วยความยากในกระบวนการสร้างหัวเขียนสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนช่วยและความยากของกระบวนการสร้างสื่อบันทึกสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต จึงได้มีการเสนอการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ โดยมีแนวคิดที่จะยังคงใช้สื่อบันทึกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันแต่ปรับปรุงกระบวนการเขียน - การอ่าน และใช้ประสิทธิภาพของการประมวลผลสัญญาณแบบ 2 มิติร่วมกับวิธีการเข้ารหัสข้อมูลขั้นสูง เพื่อช่วยในการเพิ่มความจุให้กับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ซึ่งการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติจะสามารถเก็บข้อมูลได้สูงถึง 10 Tb/in² อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญการบันทึกข้อมูลเชิง



แม่เหล็กแบบสองมิติ คือ สัญญาณอ่านกลับ (Readback signal) จะมีความผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการประมวลผลสัญญาณในระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้ความสำคัญไปที่ 1) การศึกษาตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) ซึ่งเป็นกระบวนการลำดับที่เป็นไปได้มากที่สุดจากข้อมูลที่อ่านกลับคืนมาจากสื่อบันทึก และการประยุกต์การใช้งานตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ มากกว่าหนึ่งตัว ทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตัดสินใจมากขึ้น 2) การศึกษาหลักการของวงจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการทำงานแบบวนซ้ำโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข่าวสารอะพริออริ (a priori) ระหว่างตัวตรวจหาสัญลักษณ์และรหัสวนซ้ำแอลดีพีซี (Low density parity check, LDPC) ซึ่งในปัจจุบันรหัสแอลดีพีซีถือเป็นรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดที่ดีที่สุด ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาสำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนอย่างรุนแรง เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ เป็นต้น

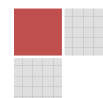
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและพัฒนาการทำงานของตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) พร้อมทั้งตัวตรวจหาแบบหลายแทร็ก (Multi-track detector) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับเพื่อทำให้การตรวจหาข้อมูลมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 2) ศึกษาหลักการและพัฒนางจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับกับรหัสแอลดีพีซี สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
- 3) ศึกษาแนวทางในการพัฒนาวิธีแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
- 4) เพื่อผลิตบุคลากรทางด้านระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความรู้ความสามารถเกี่ยวกับระบบการประมวลผลสัญญาณข้อมูล
- 5) เพื่อเป็นการบูรณาการการทำวิจัยสู่การเรียนการสอนในรายวิชา Signal Processing ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล



1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างแบบจำลองของสื่อบันทึก (Media) แบบแนวตั้งที่เป็นแบบ Discrete Voronoi Diagram ที่มีความไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) ชั้นระหว่างเกรน
2. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างแบบจำลองการเขียนข้อมูล (กระบวนการเขียน) ลงไปในสื่อบันทึกแบบแนวตั้ง
3. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างสัญญาณอ่านกลับ (กระบวนการอ่าน) ของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
4. ออกแบบและพัฒนาการทำงานของตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) พร้อมทั้งตัวตรวจหาแบบหลายแทรค (Multi-track detector) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับ
5. ออกแบบและพัฒนาวงจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับกับรหัสแอลดีพีซี สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
6. ออกแบบและพัฒนาวิธีแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับแบบหลายแทรคสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
7. นำเสนอวิธีการออกแบบและวิธีการลดผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์กับการแทรกสอดระหว่างแทรคจากแบบจำลองของสื่อบันทึกแนวตั้งที่เป็นแบบ Discrete Voronoi Diagram ที่มีความไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) ชั้นระหว่างเกรนด้วยตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ
8. ถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่พัฒนาได้ให้กับทางภาคอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ภาคการศึกษา ภาคอุตสาหกรรม และผู้สนใจทั่วไป



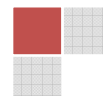
บทที่ 2

แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

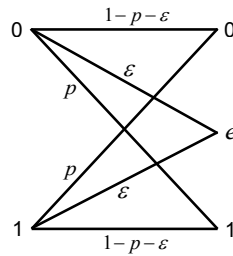
ในปี ค.ศ. 2000 Roger Wood [1] ได้นำเสนอว่าอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กหรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของข้อมูลได้สูงสุดไม่เกิน 1 Tb/in^2 อันเนื่องมาจากสาเหตุของปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก ปี ค.ศ. 2009 Y. Shiroishi [5] กล่าวว่าความจุสูงสุดของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Perpendicular magnetic recording) ในระดับห้องทดลองปัจจุบันสูงสุดอยู่ที่ 612 Gb/in^2 อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 2009 Roger Wood [4] ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการเพิ่มความจุของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีชื่อว่าการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-dimensional magnetic recording, TDMR) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) การเขียนแบบซ้อนทับ (Shingled writing) และ 2) การประมวลผลสัญญาณสองมิติ (Two-Dimensional Signal Processing) กระบวนการเขียนแบบซ้อนทับเป็นการบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ต่างจากวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน การบันทึกที่ใช้หัวเขียนที่มีขนาดใหญ่และมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ทำการเขียนให้แต่ละแทรกมีลักษณะเหลื่อมกัน ผลที่ได้คือความกว้างของแต่ละแทรกจะลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ข้อเสียของการเขียนแบบซ้อนทับ คือ สัญญาณอ่านกลับ (Readback signal) จะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงซึ่งเกิดจากการรบกวนจากสองทิศทาง คือ แนวตามแทรก (Along track) และ แนวขวางแทรก (Cross track) ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการประมวลผลสัญญาณหนึ่งมิติ ที่ใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเสนอกระบวนการประมวลผลสัญญาณแบบสองมิติ ซึ่งสามารถจัดการกับกระทบดังกล่าว อย่างไรก็ตามกระบวนการประมวลผลสัญญาณแบบสองมิติ นั้นมีความซับซ้อนกว่าหนึ่งมิติอย่างมาก ซึ่งโดยทางทฤษฎีแล้วการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลได้มากถึง 10 Tb/in^2 . ในปี ค.ศ. 2009 A.R.Krishnan [6] ได้นำเสนอแบบจำลองชนิดต่างๆของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติไว้ 3 รูปแบบ คือ

2.1 แบบจำลองการลบไบนารี (Binary erasure model)

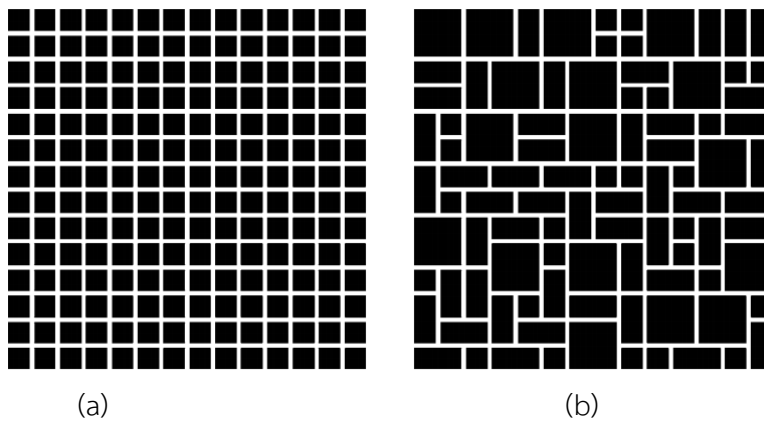
ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นแบบจำลองที่ข้อมูลอินพุตถูกทำให้ผิดพลาดโดยขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่จะถูกลบ (erasure probability) และความน่าจะเป็นที่จะส่งผิดพลาด (Transmitted error probability, p) แม้ว่า



แบบจำลองนี้มีความเหมือนจริงต่ำ แต่ก็เหมาะสำหรับระบบการเข้ารหัสแบบรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (Error correction code)



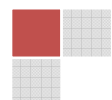
รูปที่ 2.1: แบบจำลองการลบไบนารี (Binary erasure model)

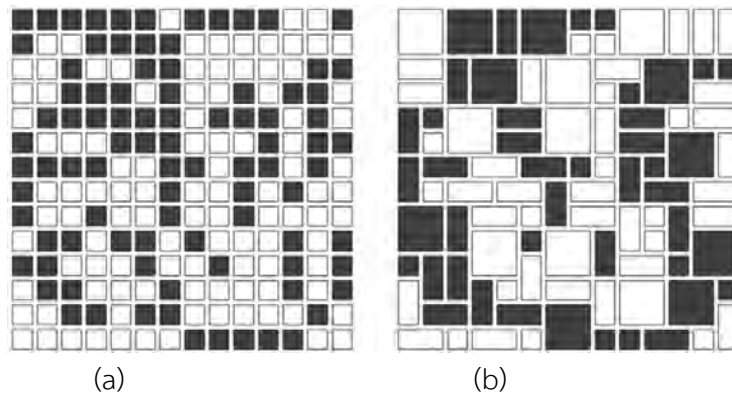


รูปที่ 2.2: แบบจำลองเกรนไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ

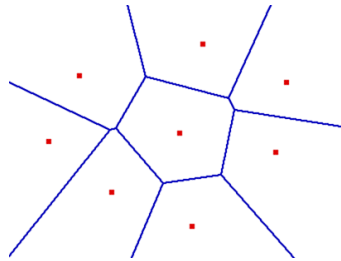


รูปที่ 2.3: รูปแบบเกรนแม่เหล็กที่เป็นไปได้ 4 แบบ





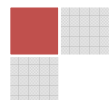
รูปที่ 2.4: แบบจำลองการบันทึกของเกรนไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ



รูปที่ 2.5: แผนภาพไวโรนอย (Voronoi)

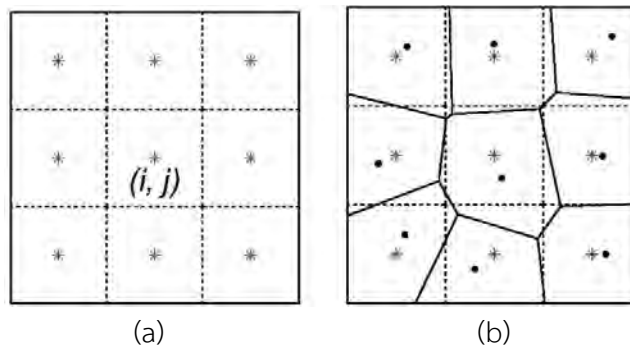
2.2 แบบจำลองเกรนไม่ต่อเนื่อง (Discrete grain model)

ในแบบจำลองนี้ลักษณะของสื่อบันทึกจะประกอบขึ้นจากเกรนแม่เหล็กที่ขนาดและรูปร่างถูกกำหนดเอาไว้ อย่างตายตัว กรณีของสื่อบันทึกอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2(a) แต่ละเกรนแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับบิตข้อมูล จากนั้นกำหนดรูปแบบเกรนแม่เหล็กที่เป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดเท่ากับ p_1 , p_2 , p_3 และ p_4 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะได้สื่อบันทึกแบบไม่อุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) สำหรับกระบวนการบันทึกจะทำโดยเขียนเรียงลำดับแต่ละบิตข้อมูล ผลคือเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของบิตข้อมูลจะถูกบันทึกซ้ำมากกว่าสองครั้งจากนั้นทำการอ่านค่ากลับโดยสมมติว่าหัวอ่านมีความละเอียดสูงและไม่เกิดการรบกวนจากบิตข้อมูลข้างเคียงผลจากการถูกเขียนทับแสดงดังรูปที่ 2.4 จากแบบจำลองนี้จะเห็นว่าข้อผิดพลาดจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบันทึก)

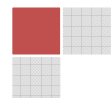


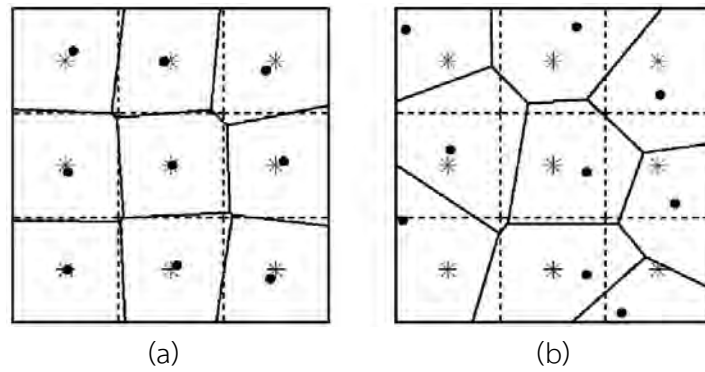
2.3 แบบจำลองโวโรนอย (Voronoi model)

ซึ่งใช้หลักการสร้างแผนภาพโวโรนอยในการจำลองรูปร่างและขนาดของเกรนแม่เหล็ก แผนภาพโวโรนอยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ จุดไซต์ (Site points) และ เส้นเชื่อมโวโรนอย (Voronoi edge) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เส้นเชื่อมโวโรนอยประกอบขึ้นจากเซตของจุดที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสองไซต์ใดๆ (Site points) สำหรับแบบจำลองโวโรนอยรูปร่างของเกรนแม่เหล็กจะมีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลองเริ่มจากกำหนดให้จุดไซต์เรียงตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะได้เกรนแม่เหล็กที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6(a) จากนั้นทำการเลื่อนตำแหน่งจุดไซต์อย่างสุ่มจากศูนย์กลางของบิตข้อมูลแล้วจึงคำนวณหาเส้นเชื่อมโวโรนอย โดยเชื่อมโวโรนอยจะแทนรอยต่อระหว่างแต่ละเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.6(b) ในแบบจำลองจะกำหนดให้การเลื่อนตำแหน่งจะต้องอยู่ภายในบิตข้อมูลนั้นๆ เท่านั้น ซึ่งระดับของการเลื่อนตำแหน่งของจุดไซต์จะส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของเกรนแม่เหล็ก รูปที่ 2.7 แสดงระดับการเลื่อนตำแหน่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 2.8 แสดงสภาพความเป็นแม่เหล็กเปรียบเทียบกันระหว่างสื่อบันทึกแบบอุดมคติและไม่อุดมคติที่ขนาด 14×14 โดยกำหนดให้สภาพความเป็นแม่เหล็ก +1 เป็นสีดำและสภาพความเป็นแม่เหล็ก -1 เป็นสีขาว สัญญาณอ่านกลับสามารถหาได้จากการประสาน (Convolution) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกและผลตอบสนองของหัวอ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

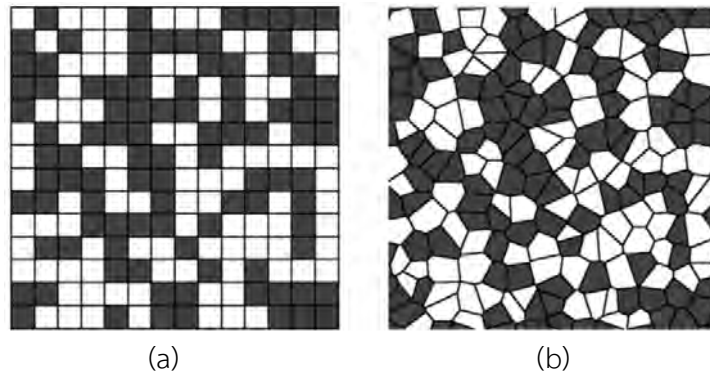


รูปที่ 2.6: แบบจำลองสื่อบันทึกโดยใช้แผนภาพโวโรนอย (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ

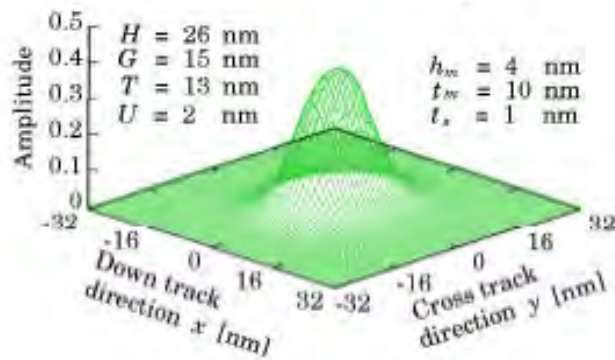




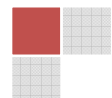
รูปที่ 2.7: ระดับความรุนแรงของการเลื่อนตำแหน่งจากศูนย์กลาง (a) ที่ค่าเฉลี่ยน้อยๆ (b) ที่ค่าเฉลี่ยมากๆ



รูปที่ 2.8: แบบจำลองการบันทึกของไวรอยเกรน (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ

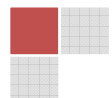


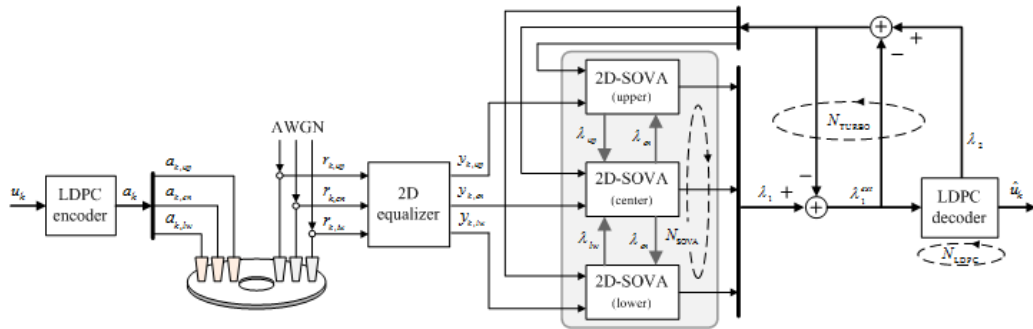
รูปที่ 2.9: ผลตอบสนองของหัวอ่าน



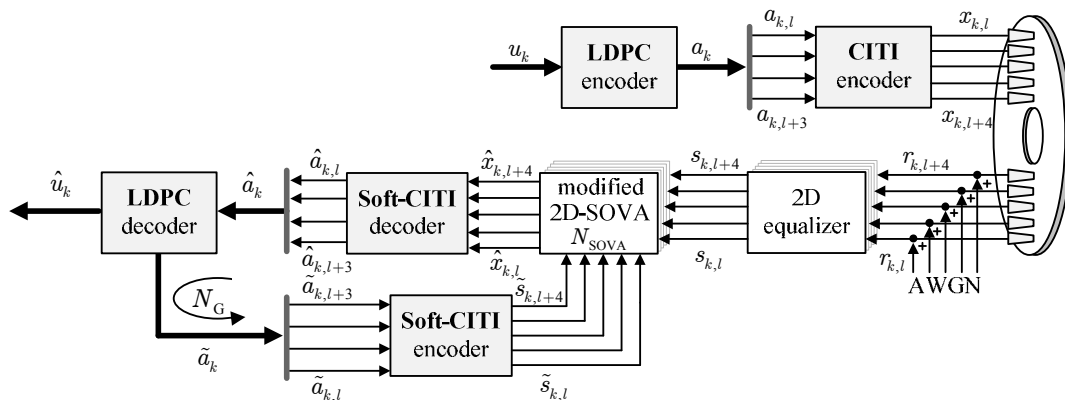
สำหรับกระบวนการประมวลผลสัญญาณสองมิติ ได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ขึ้นมา ในปี ค.ศ. 2007 Nabavi [7], [8] ได้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับเท่าและทาร์เกตที่ใช้สำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากแทรกข้างเคียง (Inter track interference, ITI) ของสื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการตรวจหาข้อมูลโดยใช้ตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่มีการปรับปรุง (Modified viterbi detector) ซึ่งเป็นการนำตัวตรวจหาวิเทอร์บีแบบทั่วไปมาปรับปรุงโดยการเพิ่มเส้นทางเมตริกสาขา (Parallel Branch metric) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนสองมิติ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่เพิ่มเส้นทางเมตริกสาขาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีแบบทั่วไป (Conventional viterbi detector) ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Lin. M. M. Myint [9] ได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนรบกวนสองมิติ โดยทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วนเมื่อคำนวณค่าเมตริกสาขา (Branch metric) ข้อมูลที่บันทึกจะถูกแบ่งและเขียนแยกกัน 3 แทรก ในรอบการวนที่หนึ่งสัญญาณอ่านกลับจะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาต์พุตวิเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA) จากนั้นข่าวสาร (ข้อมูล) อะพริออริจากตัวตรวจหาจะถูกส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสแอลดีพีซี ซึ่งตัวถอดรหัสแอลดีพีซีจะทำการถอดรหัสและป้อนกลับค่าประมาณของบิตข้อมูล (Estimated bits) และข้อมูลอะพริออริกลับมายังตัวตรวจหาวิเทอร์บีทั้งสาม เพื่อทำการวนรอบที่สอง โดยที่ค่าประมาณของบิตข้อมูลจะถูกใช้เพื่อทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วน (Partial ITI) ซึ่งทำให้การคำนวณค่าเมตริกสาขา (Branch metric) มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำงานของตัวตรวจหาที่มีการป้อนกลับค่าประมาณของบิตข้อมูลเพื่อทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วนสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่มีการปรับปรุง และดียิ่งขึ้นเมื่อจำนวนการวนรอบสูงขึ้น ปี ค.ศ. 2010 Chang [10] ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการตรวจหาแบบหลายแทรก (Multi track detector) แนวคิดพื้นฐานคือ ตัวตรวจหาจะทำงานโดยที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างกัน กล่าวคือ ก่อนที่จะทำการตรวจหาข้อมูลแทรกใดๆ จะต้องทำการตรวจหาข้อมูลแทรกข้างเคียงทั้งสองข้างของแทรคนั้นออกมาก่อนจาก นั้นจึงทำการตรวจหาข้อมูลแทรกที่ต้องการโดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลอะพริออริที่ได้จากแทรกข้างเคียงทั้งสอง เพื่อให้การตรวจหา มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาการตรวจหาแบบหลายแทรกซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริกันระหว่างตัวตรวจจับและทำงานร่วมกับรหัสแอลดีพีซีเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหาให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังรูปบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 เป็นต้น





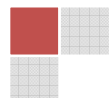
รูปที่ 2.10: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรตรวจจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลละพริออรี



รูปที่ 2.11: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรตรวจจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลละพริออรีพร้อมทั้งการเข้ารหัสของ outer code

แบบจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

- 1) แบบจำลองสื่อบันทึกหรือช่องสัญญาณ (Media or Channel modeling)
- 2) วงจรปรับเท่าสองมิติ (2D Equalizer)
- 3) วงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi Detection) และวงจรตรวจหาซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm)

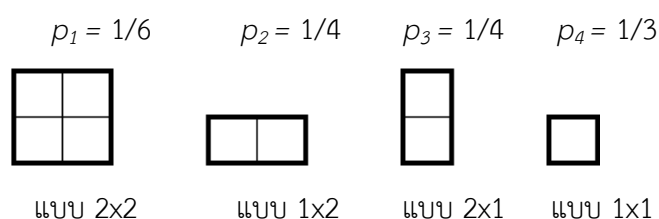


2.4 แบบจำลองของสี่บันทึกลับแบบสี่เกรน (Four grain model)

แบบจำลองของสี่บันทึกลับแบบสี่เกรนประกอบด้วยหัวข้อหลัก 3 ส่วน คือ 1) การจำลองสี่บันทึกลับ 2) กระบวนการบันทึกข้อมูล และ 3) กระบวนการอ่านข้อมูลกลับคืน

2.4.1 การจำลองสี่บันทึกลับ

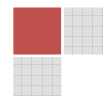
แบบจำลองของสี่บันทึกลับแบบสี่เกรนจะกำหนดให้เกรนแม่เหล็กมีขนาดและรูปร่างที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 แบบ คือ 2×2 , 1×2 , 2×1 และ 1×1 โดยที่ตัวสี่บันทึกลับจะประกอบขึ้นมาจากเกรนแม่เหล็กทั้ง 4 แบบดังกล่าว กำหนดให้แต่ละแบบมีค่าความน่าจะเป็นในการกระจายตัวเป็นแบบคงตัว (Uniform distribution) แทนด้วยสัญลักษณ์ p_1 , p_2 , p_3 และ p_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสี่บันทึกลับแบบสี่เกรนเริ่มจากการสุ่มวางเกรนแม่เหล็กแบบ 2×2 , 1×2 , 2×1 และ 1×1 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก่อนที่จะนำเอาเกรนแต่ละแบบมาจัดเรียงกันดังรูปที่ 2.4

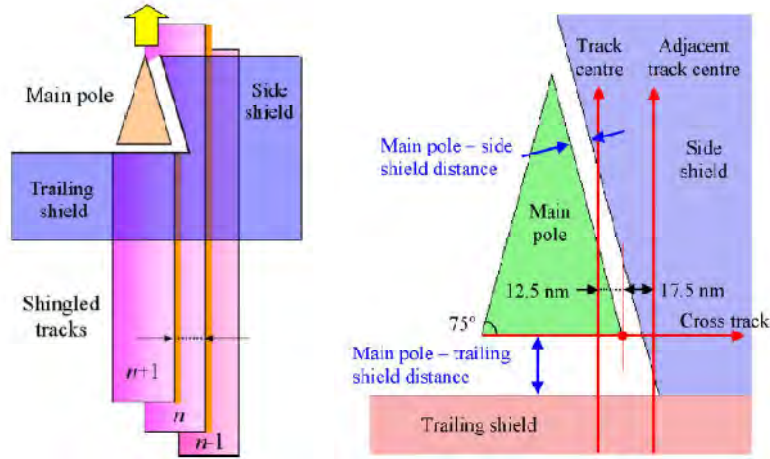


รูปที่ 2.12: แสดงขนาดเกรนที่เป็นไปได้ 4 แบบและความน่าจะเป็นที่จะพบในสี่บันทึกลับ

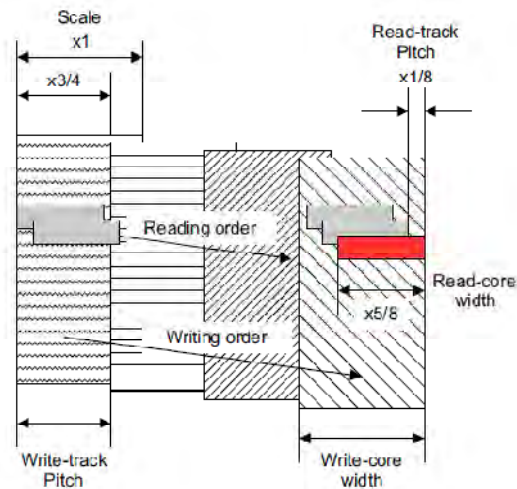
2.4.2 กระบวนการเขียนข้อมูล

โดยปกติสำหรับการบันทึกข้อมูลของสี่บันทึกลับเชิงแม่เหล็กทั่วไปแต่ละแทรกจะถูกเขียนให้แยกห่างกันโดยมีระยะป้องกัน (Guard band) ซึ่งป้องกันการรบกวนกันระหว่างแทรกแต่ในสี่บันทึกลับเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ความจุถูกเพิ่มโดยการยกเลิกระยะป้องกันและใช้รูปแบบการเขียนใหม่ที่เรียกว่า “การเขียนซ้อนทับ” (Shingled writing) ซึ่งแทรกข้อมูลจะถูกเขียนให้ซ้อนกันโดยหัวเขียนที่มีขนาดใหญ่และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงทำให้ได้จำนวนแทรกที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเขียนแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 อย่างไรก็ตามข้อเสียที่ตามมาก็คือ เนื่องจากหัวอ่านมีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของแทรกทำให้สัญญาณอ่านกลับจะถูกรบกวนอย่างรุนแรงจากแทรกข้างเคียง ทำให้จำเป็นต้องใช้การประมวลผลสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

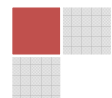




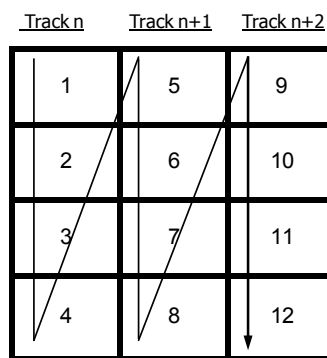
รูปที่ 2.13: ตัวอย่างของแบบจำลองวิธีการเขียนข้อมูลแบบซ้อนทับด้วยการใช้มุมของหัวเขียน (shingled magnetic recording)



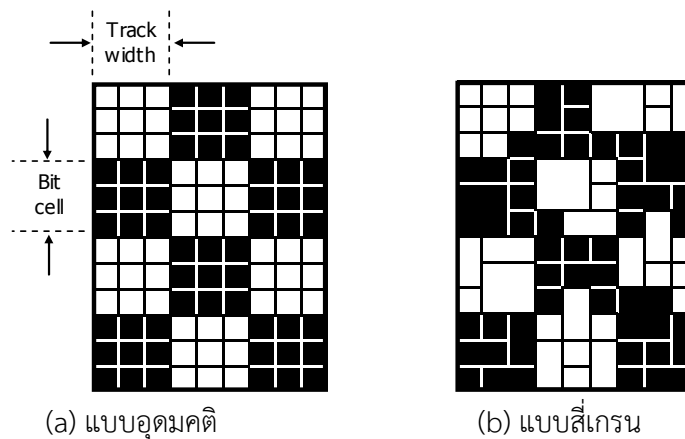
รูปที่ 2.14: ตัวอย่างของแทร็กที่ถูกเขียนทับ (write-track pitch), ลำดับในการอ่านและการเขียนข้อมูล (reading/writing order), และแทร็กข้อมูลสุดท้ายที่ไม่มีการเขียนทับ (write-core width) ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบเขียนซ้อนทับ



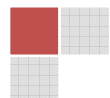
จากแบบจำลองของสื่อบันทึกแบบสี่เกรนเมื่อกำหนดให้ขนาดบิตข้อมูลที่จะทำการบันทึกเท่ากับ 3×3 เกรนต่อหนึ่งบิตข้อมูล และกำหนดให้หนึ่งเกรนมีขนาด 5.5 นาโนเมตร ดังนั้นจึงสามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ได้เท่ากับ 2.37 Tb/in^2 สำหรับในกระบวนการเขียนจะทำการบันทึกลงไปทีละบิตเซลล์เรียงต่อกันไป โดยบันทึกจากบนลงล่าง ซ้ายไปขวา แสดงดังรูปที่ 2.15 ในกรณีที่ทุกเกรนมีขนาดเท่ากันจะได้สภาพความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ของสื่อบันทึกในรูปที่ 2.16(a) ซึ่งสี่ขาแทนสภาพความเป็นแม่เหล็กขั้วบวก สี่ดำแทนสภาพความเป็นแม่เหล็กขั้วลบ ในแบบจำลองแบบสี่เกรนซึ่งบางส่วนของเกรนแม่เหล็กยื่นออกมานอกบริเวณบิตเซลล์ทำให้เกรนนั้นถูกเขียนซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้ง ซึ่งทำให้สภาพความเป็นแม่เหล็กของบิตเซลล์นั้นไม่สมบูรณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16(b) เมื่อทำการอ่านค่ากลับจะทำให้เกิดความผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (Media noise)



รูปที่ 2.15: แสดงลำดับการบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.16: การเปลี่ยนสภาพเชิงแม่เหล็กของสื่อบันทึก (a) อุดมคติ (b) สี่เกรน



2.4.3 กระบวนการอ่านค่ากลับ

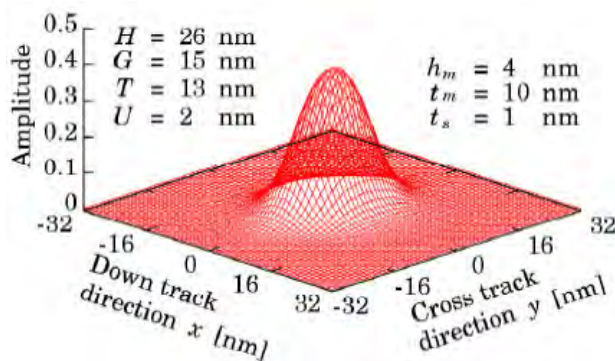
กระบวนการอ่านค่ากลับหาได้จากการประสานกันแบบสองมิติ (2D Convolution) ระหว่างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกกับหัวอ่านตามสมการที่ (1)

$$v(x, y) = \iint m(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y), \quad (1)$$

เมื่อ $v(x, y)$ แทนแรงดันของสัญญาณอ่านกลับ $m(\xi, \eta)$ แทนสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก $h(x, y)$ แทนฟังก์ชันผลตอบสนอง (Sensitivity function) ของหัวอ่านและ $n(x, y)$ แทนสัญญาณรบกวน ฟังก์ชันผลตอบสนองของหัวอ่านสามารถเขียนได้โดยสมการ (2) และแสดงดังรูปที่ 2.17

$$h(x, y) = \alpha_0 \left\{ \begin{aligned} &\tanh(\alpha_1 x + \alpha_2) - \tanh(\alpha_1 x - \alpha_2) \\ &\tanh(\alpha_3 y + \alpha_4) - \tanh(\alpha_3 y - \alpha_4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

โดยที่ $\alpha_k = |w_{k0}H + w_{k1}G + w_{k2}T + w_{k3}U + w_{k4}h_m + w_{k5}t_m + w_{k6}t_s + w_{k7}|$, $k = 0, 1, \dots, 4$ W_k แทน Weight matrix, H แทนความกว้างของซีลด์ทั้งสองข้าง, G แทนช่องว่างระหว่างซีลด์, T , U ขนาดของโพลหลัก, h_t แทน Magnetic spacing, t_m แทนความหนาของ Recording layer, t_s แทนความหนาของ intermediate layer รูปที่ 17 แสดงกราฟสามมิติ Sensitivity function ของหัวอ่านที่ค่า $H = 26$ nm, $G = 15$ nm, $T = 13$ nm, $U = 2$ nm



รูปที่ 2.17: แสดง Sensitivity function ของหัวอ่าน

2.5 ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA)

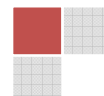
วงจรถวหาวิเทอร์บีที่ใช้หลักการตรวจหาสัญลักษณ์แบบลำดับที่ควรจะเป็นสูงที่สุด (Maximum-likelihood sequence detector) ซึ่งทำการถอดข้อมูลโดยการเลือกลำดับข้อมูลที่มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด (เมตริกสาขาที่มีค่าน้อยที่สุด) แต่ไม่รับประกันว่าการถอดข้อมูลบิตแต่ละบิตที่จะมีค่าถูกต้องที่สุด ในขณะที่ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บีใช้หลักการตรวจหาความน่าจะเป็นอะพริออริสูงสุด (Maximum a posteriori probability detector) โดยจะทำการตรวจหาเส้นทางเดินที่ดีที่สุดโดยคำนวณค่าเมตริกสาขาจากความน่าจะเป็นสูงสุดของการเปลี่ยนสถานะ โดยที่ค่าเมตริกสาขาของตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี สามารถคำนวณได้ดังที่แสดงในสมการ (3)

$$\ln(p(y_k | a_k)) = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right] - \frac{1}{2\sigma} (y_k - \hat{r}(u, q))^2 + p(a_k = \tilde{a}) \quad (3)$$

โดยที่ $\hat{r}(u, q)$ คือลำดับข้อมูลเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนสถานะ (u, q) ตามแผนภาพเทรลลิส σ คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนและเทอมสุดท้ายทางขวา คือข้อมูลความน่าจะเป็นอะพริออริของลำดับข้อมูลเอาต์พุต a_k จะเห็นว่าถ้ากำหนดให้ความน่าจะเป็นอะพริออริเท่ากับศูนย์จะทำให้สมการ (3) เท่ากับตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บีจะทำงานเหมือนกับตัวตรวจหาตรวจหาวิเทอร์บี กล่าวคือ วงจรถวหาตรวจหาวิเทอร์บีจะคำนวณค่าเมตริกสาขาโดยที่สมมติให้แต่ละลำดับข้อมูล a_k มีความน่าจะเป็นอะพริออริเท่าๆกัน อย่างไรก็ตามหากข้อมูล a_k มีโอกาสที่จะเกิดไม่เท่ากันจะทำให้ตัวตรวจหาตรวจหาวิเทอร์บีมีความถูกต้องน้อยลง นอกจากนี้ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บียังสามารถให้ค่าเอาต์พุตเป็นอัตราส่วนความน่าจะเป็น (Log Likelihood Ratio, LLR) โดยที่ LLR นิยามได้จากสมการที่ (4)

$$\lambda_p(a_k) = \ln \left[\frac{p(a_k = 1 | \mathbf{y})}{p(a_k = -1 | \mathbf{y})} \right] \quad (4)$$

เพื่อบอกความน่าเชื่อถือของการตัดสินใจของบิตนั้นๆซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับรหัสวนซ้ำแอลดีพีซี

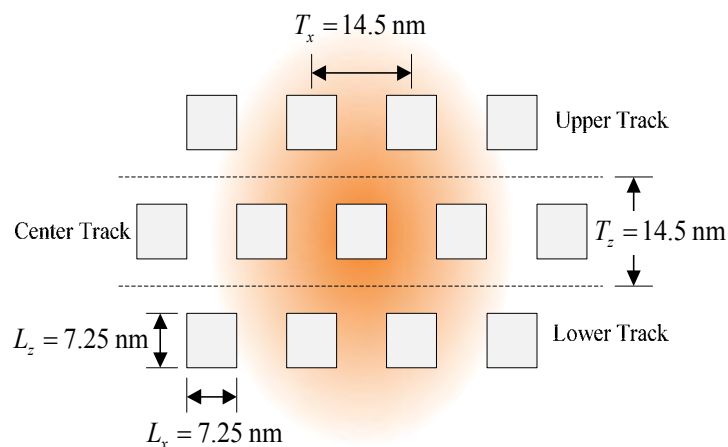


บทที่ 3

วิวัฒนาการของการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

3.1 การออกแบบระบบการบันทึกข้อมูล BPMR ด้วยหลักการการชักตัวอย่างข้อมูลเกินจริง

เพื่อหลีกเลี่ยงความต้องการการใช้หัวอ่านแบบแคบ (narrow track reader) ในการบันทึกข้อมูลแบบซ้อนทับที่มีค่าความหนาแน่นสูง เราจึงมีแนวคิดในการออกแบบวิธีการถอดรหัส (decoding schemes) สำหรับการอ่านข้อมูล 2 แทร็กในเวลาเดียวกันด้วยการใช้หัวอ่านแบบกว้างที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของแทร็กข้อมูล ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงจึงเป็นเรื่องยากที่จะเอาชนะได้ สำหรับวิธีการหลีกเลี่ยง ITI นั้น สภาวะความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลในระบบ 2 แทร็ก ควรจะเว้นระยะสลับฟันปลาหรือแบบเยื้อง (staggered pattern) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เทคนิคการถอดรหัสแบบสองมิติที่มีความเป็นไปได้สองแนว คือ 1) การถอดรหัสแบบวนซ้ำ (recursive decoding) โดยการชักตัวอย่างข้อมูลสัญญาณอ่านกลับด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่สูงกว่าปกติ (oversampling) และ 2) การตรวจหาผลตอบสนองบางส่วนที่มีค่าความเป็นไปได้มากที่สุด (Partial Response Maximum Likelihood : PRML) เนื่องจากข้อมูล 2 แทร็กถูกอ่านขึ้นมาพร้อมกัน ดังนั้น อัตราการถ่ายโอนข้อมูลจึงสูงกว่าการอ่านข้อมูลปกติแบบแทร็กเดียว



รูปที่ 3.1: การวางบิตข้อมูลแบบเยื้อง (staggered pattern) ภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน (readhead sensitivity function) เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงให้สามารถรองรับการใช้เทคนิคการชักตัวอย่างเกินจริง

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นแต่หัวอ่านก็ต้องสามารถอ่านข้อมูลที่มีความละเอียดสูงด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดย ลดความยาวของ shield gap ให้เล็กลง ลดระยะห่างระหว่างสื่อบันทึกแม่เหล็กกับหัวอ่านให้ใกล้ขึ้น [11] เป็นต้น

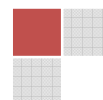
วิธีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการเขียนข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึกข้อมูลสามารถทำได้ดังนี้ [11] วิธีการแรกที่จะกู้ข้อมูลกลับคืนมาได้จากระบบ 2 แทร็ก ที่อ่านค่าได้ด้วยหัวอ่านแบบกว้างร่วมกับเทคนิค oversampling โดยรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงจุดของการซิกตัวอย่างข้อมูล (sampling points) สำหรับการอ่านค่าใน 2 แทร็ก จุดของการซิกตัวอย่างข้อมูลจะอยู่ในตำแหน่งตรงกลางด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้ เนื่องจากข้อมูลบิตทั้งสองจะถูกสร้างขึ้นภายในความยาวบิตของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้และอัตราการถ่ายโอนข้อมูลบิตจะเป็นสองเท่าของความยาวข้อมูลบิตในสภาวะแม่เหล็กใด ๆ สัญญาณอ่านกลับจากทั้งสองตัวอย่างบริเวณด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็ก M_n ในแต่ละแทร็กจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ความสัมพันธ์ได้นำเสนอด้วยสมการที่ (3.1) ที่จัดการกับข้อมูลผู้ใช้ A_n , สภาวะแม่เหล็ก M_n และสัญญาณอ่านกลับ R_n

$$\begin{aligned} M_n &= A_n \\ R_n &= M_n + M_{n-1} \\ A_n &= R_n - M_{n-1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 การเข้ารหัสข้อมูลก่อนการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก

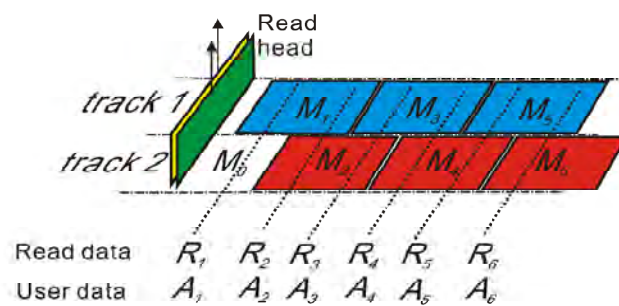
| A_n | M_{n-1} | M_n | $R_n = M_{n-1} + M_n$ |
|-------|-----------|-------|-----------------------|
| +1 | -1 | -1 | -2 |
| +1 | +1 | +1 | +2 |
| -1 | -1 | -1 | 0 |
| -1 | +1 | +1 | 0 |

จากรูปที่ 3.2 เราจะเห็นว่าถ้าหากทราบสถานะความเป็นแม่เหล็กของบิตก่อนหน้า เช่น M_n ว่าเป็นการบันทึกข้อมูลบิต “1” หรือ “-1” ลงไปแล้ว เมื่อเราอ่านข้อมูลย้อนกลับพร้อมกับซิกตัวอย่างข้อมูลที่จุดที่เหลื่อมกันของแทร็กบนและแทร็กกลางเราจะได้ระดับของสัญญาณอ่านกลับทั้งหมด 3 กรณี 1) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “2” 2) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “-1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “-2” และ 3) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบัน



บันทึกบิต “บิตที่แตกต่างกัน” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “0” ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถออกแบบเป็นการเข้ารหัสก่อน (pre-decoder) ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [11]

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอผ่านช่องสัญญาณอุดมคติ ซึ่งยังไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากความผันผวนของบิตข้อมูล เช่น ความผันผวนของขนาดของบิตข้อมูล (size fluctuation) ความผันผวนของตำแหน่งของบิตข้อมูล (position fluctuation) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งไปที่การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว การออกแบบและพัฒนาช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นเสมือนจริง การออกแบบการเข้ารหัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากสื่อบันทึกข้อมูล รวมถึงการพัฒนาตัวตรวจจับเพื่อช่องสัญญาณ 2T2H [12] ด้วย

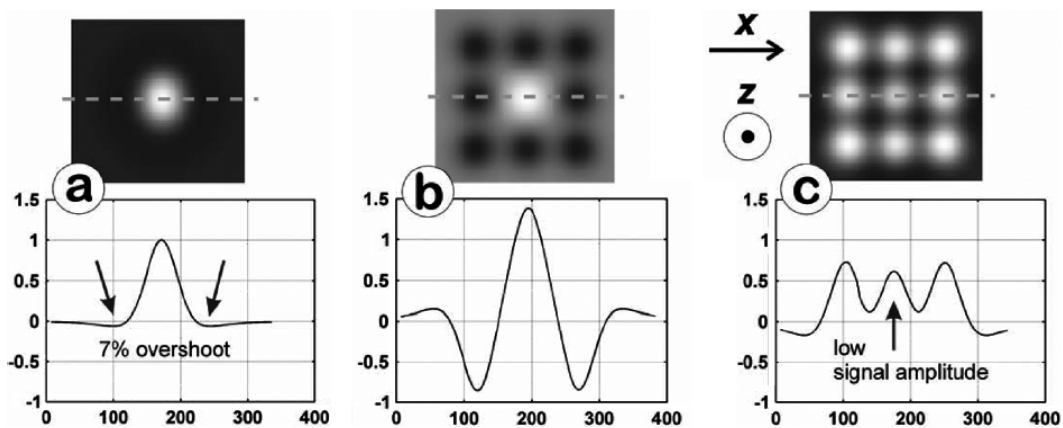


รูปที่ 3.2: การเขียนข้อมูลลงในสื่อบันทึกข้อมูลที่มีการวางตัวแบบเยื้อง [11]

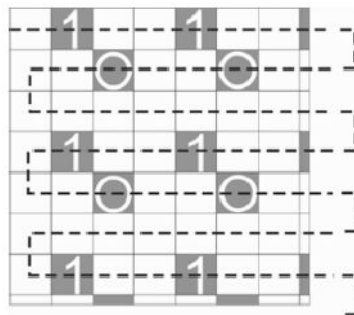
3.2 การออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติ (2D-Coding)

การเข้ารหัสแบบสองมิติที่มีการนำเสนอในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึกให้เป็นบิต มีหลักการดังนี้ [13] เริ่มจากการศึกษารูปแบบของสัญญาณอ่านกลับ (readback) พบว่าเมื่อเราบันทึกข้อมูลแบบเกาะเดี่ยว (single dot) เราจะได้สัญญาณอ่านกลับดังรูปที่ 3.3a แต่ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแล้ว ต้องมีการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) ของบิตข้างเคียงหรือแม้แต่ผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทรก (ITI) ที่เกิดจากแทรกข้างเคียงได้ ดังนั้น เราจึงพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองกรณี คือ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด นั่นคือ การบันทึกข้อมูล

บิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “0” ดังแสดงในรูปที่ 3.3b และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่ เราต้องการหลีกเลี่ยง นั่นคือ การบันทึกบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “1” ดังแสดงในรูปที่ 3.3c



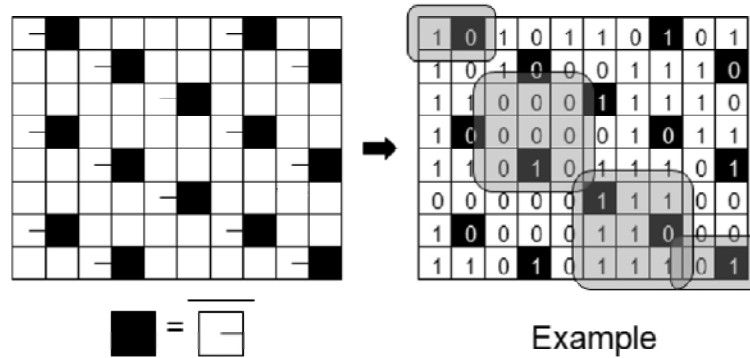
รูปที่ 3.3: รูปแบบของสัญญาณอ่านกลับกรณีที่เป็นเกาะเดี่ยว (a) กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด (b) และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด (c)



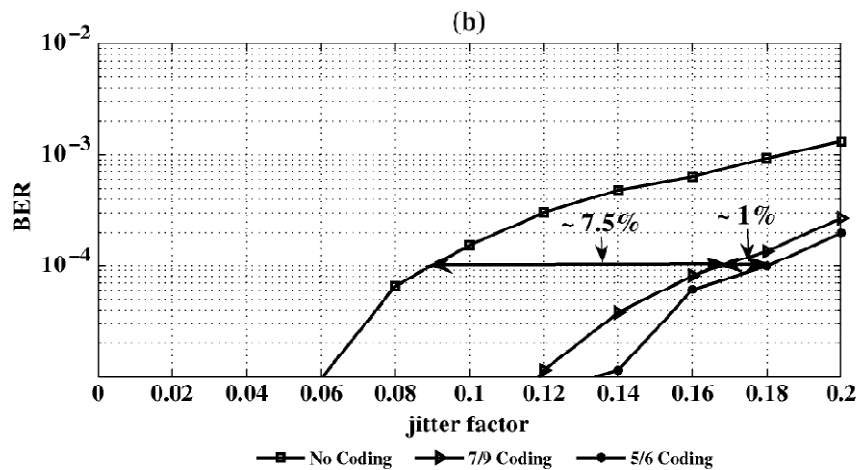
รูปที่ 3.4: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 5/6

หลักการการเข้ารหัสแบบสองมิติ คือ พยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดโดยการแทรกบิตส่วนเกินเข้าไปก่อนที่จะบันทึกข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึก ดังรูปที่ 3.4 มีการบันทึกบิต “0” และบิต “1” ลงไปยังตำแหน่งที่แน่นอน โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ 5/6 ซึ่งช่วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นแล้วยังมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มค่าอัตรารหัสให้สูงขึ้นโดยการเข้ารหัสด้วยรูปแบบใหม่ดังแสดงในรูปที่

3.5 โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ 7/9 [14] ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มอัตรารหัสให้สูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสูงขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 7/9

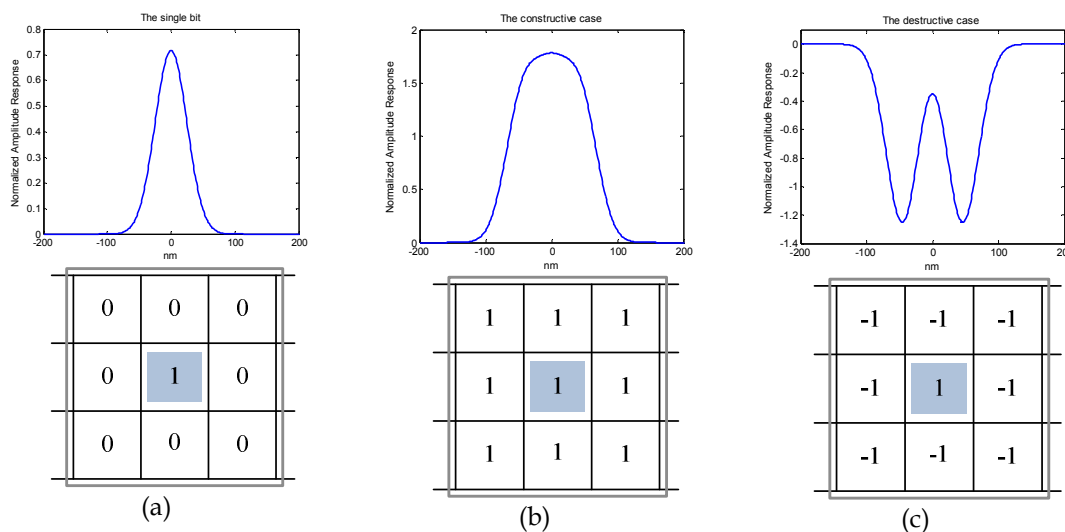


รูปที่ 3.6: แสดงสมรรถนะของระบบที่มีการเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสต่างๆ [13]

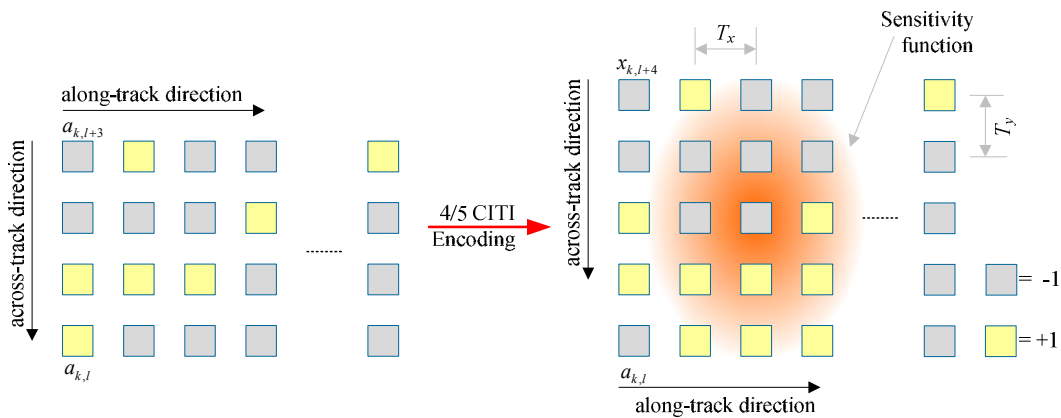
แต่เนื่องจากการออกแบบรหัสทั้ง 2 แบบที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้ ถูกออกแบบเพื่อช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ without overshoot ซึ่งเทคโนโลยีนี้ปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว ซึ่งได้เปลี่ยนเป็นช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot [15] ซึ่งการรบกวนกันของข้อมูลในบิตข้างเคียงก็จะแตกต่างกันออกไป ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีรูปแบบที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 3.7 ดังนั้นจึงมีผู้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลแบบหลายแทร็ก หรือ M-RBP (multi-track recorded-bit patterning) [16,17] ที่มีอัตรารหัสสูงสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot โดยจะทำการเลื่อนลำดับข้อมูลในแต่ละแทร็กเพื่อหารูปแบบของข้อมูลที่ดีที่สุดจากตารางค้นหา (look-up table) จากนั้นจึงบันทึกลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสื่อบันทึก วิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก

ISI และ ITI ได้มาก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสอย่างไรก็ตาม วิธี M-RBP ยังคงมีความซับซ้อนสูง

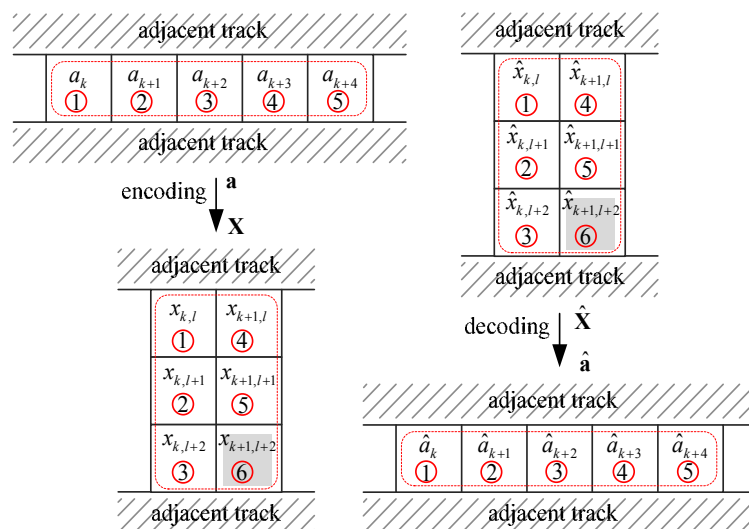
นอกจากนั้นแล้วเรายังได้ทำการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติที่มีความซับซ้อนต่ำ อัตรารหัสข้อมูลสูง และมีประสิทธิภาพในการจัดการ/หลีกเลี่ยง/ลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแตรีกสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก BPMR ซึ่งแนวคิดการเข้ารหัสแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีหลักการดังนี้ ที่ได้ทำการเข้ารหัสจากข้อมูล 4 แตรีกให้ออกเป็นคำรหัส 5 บิต/ 5 แตรีก ก่อนที่จะทำการบันทึกลงในสื่อบันทึกข้อมูล ซึ่งทำให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการแทรกสอดที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างแตรีก [18] และเรายังได้นำเสนอการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 5/6 [19,20] ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเริ่มจากลำดับข้อมูล a_k ที่ต้องการบันทึกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบสองมิติ คือเปลี่ยนจากข้อมูล 1 แตรีก เป็นข้อมูล 3 แตรีก เพื่อเรียงบางรูปแบบเช่น $[+1 \ -1 \ +1]^T$ หรือ $[-1 \ +1 \ -1]^T$ ซึ่งรูปแบบของข้อมูลในแนวแตรีกสามารถรับประกันได้ว่าผลกระทบที่เกิดจากแทรกสอดระหว่างแตรีกจะไม่เกิดขึ้น จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่ารูปแบบที่เป็นไปในที่จะนำมาสร้างเป็นรหัสข้อมูลมีทั้งหมด 32 รูปแบบ (patterns) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะถูกล้อมรอบด้วยรหัสข้อมูลเพื่อการเข้ารหัสข้อมูลต่อไป



รูปที่ 3.7: สัญญาณอ่านกลับของ (a) บิตข้อมูลเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘1’ และ (c) กรณีที่ด้อยที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘-1’

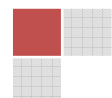


รูปที่ 3.8: วิธีการ M-RBP (a) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดในแทร็กกลางและ (b) ขั้นตอนการทำลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดในแทร็กข้างเคียง



รูปที่ 3.9: วิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติ

อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสทั้งสองวิธีไม่สามารถทำงานในระบบการวนซ้ำได้ เนื่องจากการเข้ารหัสแบบฮาร์ตมอดดูเลขชั้นอีกทั้งยังมีข้อต่อโดยตรงต่อระหว่างชุดคาร์รหัสซึ่งยังก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการเข้ารหัสแบบซอฟต์แวร์พร้อมทั้งพัฒนาให้สามารถทำงานร่วมกับระบบการทำงานแบบวนซ้ำได้



| | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| C_1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 | C_2 -1 1 -1 -1 -1 -1 | C_7 -1 -1 -1 -1 1 -1 | C_3 -1 -1 -1 -1 -1 1 |
| C_4 1 -1 -1 -1 -1 -1 | C_8 1 1 -1 -1 -1 -1 | C_9 -1 -1 -1 -1 1 1 | C_{17} 1 -1 1 -1 -1 -1 |
| C_5 1 1 -1 1 -1 -1 | C_{10} -1 -1 1 -1 1 -1 | C_{11} -1 -1 -1 1 -1 1 | C_{18} 1 -1 -1 -1 -1 1 |
| C_{12} -1 1 -1 -1 1 -1 | C_{19} 1 -1 1 -1 1 -1 | C_{20} -1 1 -1 1 -1 1 | C_{27} 1 -1 1 -1 -1 1 |
| C_6 -1 1 -1 1 1 -1 | C_{13} -1 -1 1 -1 1 1 | C_{14} -1 -1 -1 1 1 1 | C_{21} 1 1 -1 1 -1 -1 |
| C_{12} 1 1 1 -1 -1 -1 | C_{22} 1 1 1 1 -1 -1 | C_{23} -1 -1 1 1 1 1 | C_{28} -1 1 -1 1 1 1 |
| C_{16} 1 -1 1 -1 1 1 | C_{24} 1 1 -1 1 -1 1 | C_{25} 1 1 1 -1 1 -1 | C_{29} 1 1 1 1 1 -1 |
| C_{26} 1 1 1 1 -1 1 | C_{30} 1 -1 1 1 1 1 | C_{31} -1 1 1 1 1 1 | C_{32} 1 1 1 1 1 1 |

รูปที่ 3.10: ตัวอย่างของคำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสด้วย 5/6 2D Modulation Encoder [19]

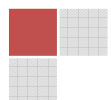
3.3 ความก้าวหน้าและวิวัฒนาการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในปัจจุบันมีขีดจำกัดของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ 1 Tb/in^2 ซึ่งอ้างอิงจากปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราแมกเนติกยิ่งยวด (super-paramagnetic) และปัญหาสามอย่างในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก [21]-[23] ในปี 2008 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกนำเสนอเพื่อผลักดันให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่

ให้ข้ามขีดจำกัดดังกล่าวโดยยังคงใช้ส่วนประกอบเดิมในการบันทึกแบบปัจจุบัน การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเกิดจากการรวมกันของเทคโนโลยีการเขียนซ้อนทับร่วมกับการอ่านกลับและตรวจจับสองมิติ โดยมีเทคนิคคือการให้ข้อมูลแต่ละแทร็กมีความสัมพันธ์กัน

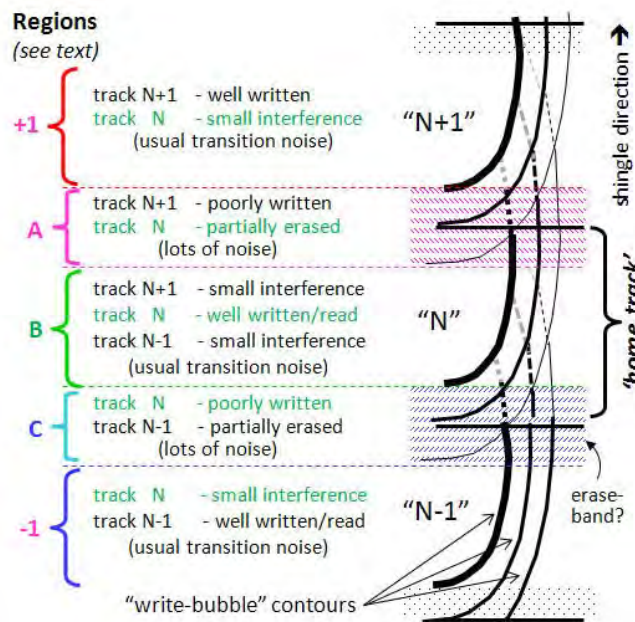
การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกถกเถียงว่าการใช้สนามหัวเขียนที่สูงและมีบริเวณกว้างจะสามารถลดเกรนแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลได้และยังทำให้การประมวลสัญญาณสองมิติมีความสามารถมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคอ่านตามแทร็กมาพร้อมกับการอ่านในแนวขวางแทร็ก ดังเดิม การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิตินำเสนอในเบื้องต้นว่าความจุของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก คือ “1 บิตต่อ 1 เกรน” แม้ว่าโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบไม่แน่นอน และเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีบทความนำเสนอความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมสูงสุด [4] บทความดังกล่าวได้จำลองการเขียนและการอ่านกลับรวมถึงการตรวจจับข้อมูลอย่างเหมาะสมที่สุด [24]-[26] ด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าที่เหมาะสมจะถูกลดลง 10%-30% อย่างไรก็ตามการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติก็ยังเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าจับตามอง ทั้งนี้เนื่องจากมีความเสี่ยงต่ำและความคุ้มค่าสูงกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ [5] ในหลายปีที่ผ่านมา เราได้เรียนรู้คุณลักษณะของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติมากมายเกี่ยวกับการเขียนแบบซ้อนทับและยังเข้าใจถึงกระบวนการอ่านแบบสองมิติและการปรับแก้/ตรวจจับที่จะสามารถนำจุดเด่นไปใช้ในการหักล้างจุดด้อยของความซับซ้อนของแผ่นบันทึกข้อมูลได้

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติถูกเน้นไปที่การอ่านจะต้องสำเร็จที่กึ่งกลางแทร็กแต่ละแทร็กที่เขียนแบบซ้อนทับ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งหัวอ่านเดี่ยวและหลายหัวอ่าน แทร็กข้อมูลอาจจะอยู่ชิดกันมากขึ้น ดังนั้นการแทรกสอดระหว่างแทร็กจะสูง ภาครับจะต้องประกอบด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตหลายส่วน ดังนั้นข้อสรุปในปัจจุบันคือการเน้นงานวิจัยไปที่การวิเคราะห์ข้อมูลอ่านกลับและการกำจัดการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่สูงขึ้นอย่างมาก แนวคิดการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเน้นไปที่การอ่านแทร็กกลางของแต่ละแทร็กที่เขียนซ้อนทับกันหลายๆ แทร็ก การกระทำดังกล่าวจะสำเร็จด้วยการอ่านหลาย ๆ ครั้งร่วมกับการใช้หน่วยความจำขนาดใหญ่ หรืออาจจะใช้หัวอ่านหลาย ๆ หัว ขนาดของแทร็กจะมีค่าเข้าใกล้ความกว้างของการอ่านมากขึ้น จึงอาจทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่มากขึ้นด้วย ในส่วนภาครับจำเป็นต้องใช้มัลติเพิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุตร่วมกับเป้าหมายทาร์เกต (Target) สองมิติและภาครับสองมิติตามลำดับ ภาครับอาจจะใช้ความรู้ทางสถิติของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลร่วมด้วย ในขณะที่แนวคิดถูกค้นคว้าลึกลงไป ข้อมูลเชิงลึกจะได้มาจากช่องสัญญาณเขียนอ่านเพื่อสนับสนุนการกู้ข้อมูลที่ผิดพลาด สิ่งที่น่าประหลาดใจคือผลสรุปในการวิจัยด้านนี้คืออุปกรณ์มีข้อดีที่เกิดจากการเฉลี่ยสัญญาณหลายๆ แทร็ก นอกจากนี้ยังลดสัญญาณรบกวน ซึ่งดีกว่าการอ่านจากการแทรกสอดระหว่างแทร็ก



3.4 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบซ้อนทับ (shingled-write magnetic recording)

การเขียนซ้อนทับเป็นการบันทึกข้อมูลที่ไม่สมมาตร เนื่องจากข้อมูลฝั่งหนึ่งจะถูกเขียนทับในด้านข้าง ๆ ของแทร็ก ในความเป็นจริงมีโครงสร้างและพฤติกรรมมากมายที่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อทำให้การเขียนอ่านมีความเหมาะสม รูปที่ 3.11 แสดงถึงบริเวณต่างๆ ของสัญญาณและสัญญาณรบกวน การเขียนข้อมูล 3 แทร็กระบุได้โดยการกำหนดแทร็กที่ $N-1$, N , $N+1$ ตามลำดับ โดยแทร็ก N คือ แทร็กกึ่งกลางหรือ home track ที่เราต้องการอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวเขียนมีขนาดกว้าง การเขียนจึงเกิดการซ้อนทับและการลบล้างเกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างแทร็กจะเป็นไปตามขนาดความเข้มของหัวเขียน จะสามารถแบ่งวิเคราะห์ได้เป็น 5 ส่วน แบ่งเป็นส่วนที่ $+1$, A, B, C, และ -1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11: แผนภาพอธิบายสัญญาณ สัญญาณรบกวน และการแทรกสอดของบริเวณต่าง ๆ ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซ้อนทับ [27]

บริเวณ B สัญญาณจากแทร็กกึ่งกลางจะดีที่สุด สัญญาณรบกวนจะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณขอบและมีสัญญาณรบกวนระหว่างแทร็กน้อย ความเข้มสัญญาณจะลดลงตามระยะ $N+1$ ถึง $N-1$ เนื่องจากผลของความโค้งของสนามหัวเขียน ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้การเลื่อนของสัญญาณรบกวนเด่นชัดมากขึ้น

บริเวณ A เป็นบริเวณที่สัญญาณของแทร็กกึ่งกลางเบาบาง เนื่องจากถูกเขียนทับบางส่วนจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของหัวเขียน ในทางปฏิบัติแม่เหล็กที่ยาวมีแนวโน้มที่จะเกิดสนามแม่เหล็กกลับล้างทำให้ลด

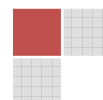
สัญญาณความยาวคลื่นสูง สัญญาณความยาวคลื่นสูงจะถูกกลับทิศทางในบริเวณแตรีก N เนื่องจากสนามรั่วไหลของหัวเขียนจากแตรีก N+1 ทำให้เกิดการเขียนทับ สัญญาณรบกวนในบริเวณนี้จึงสูงและมีส่วนจินตภาพเกิดขึ้นซึ่งก็คือสัญญาณรบกวนรอยต่อและสัญญาณรบกวนลบข้าง บริเวณ C เป็นบริเวณที่แยกไม่ออกกว่าเป็นบริเวณ A หรือไม่ ยกเว้นในเชิงการเลื่อนเช่นเดียวกับบริเวณ A

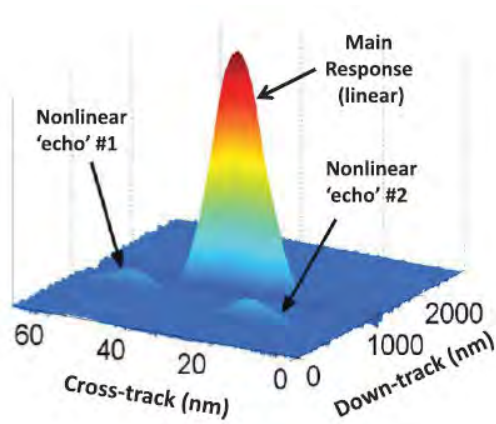
การเขียนข้อมูลจะเริ่มเขียนในแนวแตรีกที่ N-1 ก่อน ตามด้วยแตรีกที่ N และ N+1 ตามลำดับ เมื่อแต่ละแตรีกถูกเขียน แตรีกก่อนหน้าจะถูกเขียนทับและลบข้างออกไปบางส่วน เหลือเพียงบางส่วนที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้ รูปที่ 3.11 แสดงถึงโครงสร้างข้อมูล 3 แตรีกที่ถูกบันทึกลงแผ่นบันทึกข้อมูลและคอนทอร์สนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในบริเวณ -1 แสดงถึงข้อมูลของแตรีก N-1 ที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้อยู่ ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมานี้ถูกค้นพบในงานของ Salo [28] และ Galbraith [29]

3.5 การจำแนกระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

การวิเคราะห์สัญญาณในปัจจุบันจะวิเคราะห์ในทิศทางตามแตรีกด้วยสัญญาณความถี่ที่เหมาะสมและอ่านกลับในย่านความถี่ดังกล่าวแบบหนึ่งมิติเพื่อดูผลตอบสนองของระบบ เนื่องจากในระบบการบันทึกแม่เหล็กจะถูกสมมติให้เป็นระบบเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงในระบบจริงมีความไม่เป็นเชิงเส้นแฝงอยู่ รูปแบบตัวเลขสุ่มเทียมจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการบันทึกข้อมูล [30] ด้วยคุณสมบัติพิเศษของตัวเลขสุ่มเทียม การทำดีคอนโวลูชันสัญญาณอ่านกลับจะได้ผลตอบสนองของระบบที่มีระลอกคลื่นสั้นสะท้อน [31] เทคนิคดังกล่าวนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งระบบเชิงเส้นแล้วและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ถูกนำเสนอใน [32]

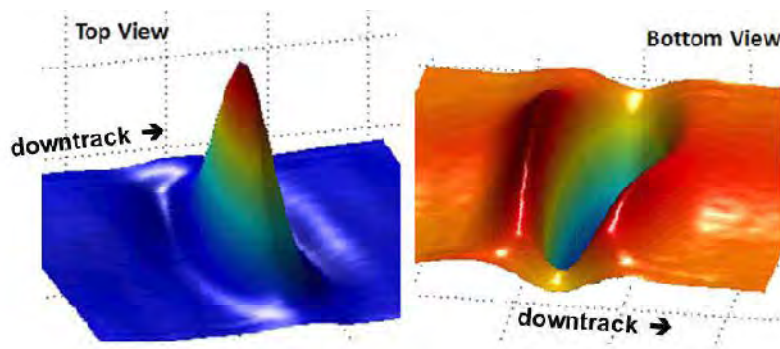
รูปที่ 3.12 แสดงถึงผลตอบสนองพัลส์สองมิติของชุดเลขสุ่มเทียม P ขนาด 7×73 เป็นสัญญาณกระตุ้นของระบบหลังจากบันทึกข้อมูล P ผ่านช่องสัญญาณแผ่นบันทึกข้อมูล อ่านกลับด้วยหัวอ่านกว้าง 30 nm และมีระยะห่างระหว่างแตรีก 38 nm เมื่อนำเมตริกซ์ของสัญญาณอ่านกลับมาหาค่าอัตโนมัติสัมพันธ์กับเมตริกซ์ P จะได้ผลตอบสนองพัลส์ดังรูปที่ 3.12 เกิดเป็นผลตอบสนองหลักที่จุดกำเนิดและคลื่นระลอกสองที่คลื่นระลอกแรกเกิดจาก Volterra kernel อันดับสองสอดคล้องกับผลคูณบิดข้างเคียง $P_{yx}P_{y(x+1)}$ ซึ่งคู่อันดับ Volterra kernel บ่งบอกถึงการกลับทิศทางของอินพุตไม่ส่งผลต่อการกลับทิศทางของเอาท์พุต ปรากฏการณ์นี้คือความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ [33],[34]





รูปที่ 3.12: ส่วนหนึ่งของผลตอบสนองพัลส์สองมิติที่ถูกคัดแยกออกมาแสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ชุดเลขสุ่มเทียมสองมิติขนาด 7×73 [27]

คลื่นระลอกที่สองในบริเวณขวาเกิดจาก Volterra kernel อันดับสาม สอดคล้องกับผลคูณรูปตัว L ตามแนวขวางแพริกและตามแพริก $P_{(y-1) \times P_y \times P_{y(x-1)}}$ ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เกิดจากสนามดีแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีผลต่อการเขียนข้อมูล รูปที่ 3.13 แสดงภาพขยายของผลตอบสนองพัลส์ พบว่าเกิด undershoot ซึ่งเกิดจากประจุแม่เหล็กในชั้น soft underlayer ของแผ่นบันทึกข้อมูลและสนามดีแมกนีไทเซชันของหัวอ่าน



รูปที่ 3.13: ตัวอย่างของความเป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองพัลส์ในมุมมองจากข้างบนและข้างล่าง [27]

3.6 การอ่านกลับสองมิติและการตรวจจับ

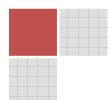
แนวคิดสำหรับการอ่านข้อมูล คือ อ่านให้สำเร็จในบริเวณกึ่งกลางของหลาย ๆ แพริกข้อมูล อย่างไรก็ตาม การที่ตำแหน่งของหัวอ่านเลื่อนในแนวขวางแพริกทำให้เกิดผลกระทบอย่างมาก โดยเฉพาะในการเขียนซ้อนทับ

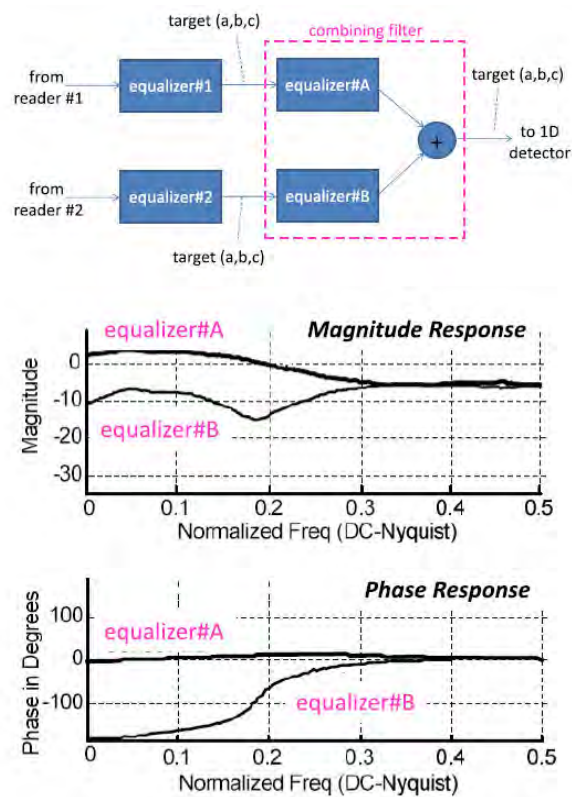
เนื่องจากความไม่สมมาตรของแตรีกข้อมูลนั่นเอง เพื่อให้เข้าใจการเกิดผลกระทบดังกล่าวในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ จึงต้องศึกษาคุณลักษณะการอ่านเมื่อรัศมีทำการหรือมุมของหัวอ่าน ระยะห่างระหว่างแตรีก และการปรับตำแหน่งในทางขวางแตรีก ผลการทดลองดังกล่าวจะสามารถนำมาทำนายความจุของข้อมูลที่เป็นไปได้ได้

อนุกรมของรูปคลื่นถูกบันทึกจากการทดลองด้วยแผ่นบันทึกข้อมูลขนาด 2.5 นิ้ว บนเครื่อง spin-stand หัวเขียนและหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ทั่วไปได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง การบันทึกรูปคลื่นได้ทำ 5 ครั้งที่รัศมีของแผ่นบันทึกข้อมูลต่างกัน ความเร็วของแผ่นบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 5400 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวบันทึกกับแผ่นบันทึกเท่ากับ 1 nm ช่องสัญญาณเขียนอ่านได้ใช้แบบเดียวกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยวิธีการ maximum transition run ในแต่ละรัศมีทำการ ความหนาแน่นเชิงเส้นและความหนาแน่นแตรีกจะใช้ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ที่ยังมีขอบ 9 nm จากตำแหน่งที่เรียกว่าระยะระหว่างแตรีกล้มเหลว ระยะดังกล่าวนี้ถูกกำหนดโดยเป็นค่าระยะห่างระหว่างแตรีกที่ทำให้มีอัตราการผิดพลาดของเซคเตอร์ 50% เมื่อเขียนด้วยกำลังสูงสุด

ในแต่ละการทดสอบจะมีแตรีกข้อมูล 6 แตรีก การเขียนทับจะอยู่ในทิศทางเขียนเข้าหารัศมีกึ่งกลางแผ่นบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตาม สำหรับตำแหน่งกึ่งกลางจะใช้การเขียนทับทั้งสองทิศทาง รูปคลื่นถูกบันทึกที่ทุก ๆ 5 nm ตลอดแนวขวางแตรีก รอบแตรีกกลาง และทุก ๆ 2.5 nm ของแตรีกกลาง ในแต่ละขั้นตอนจะถูกอ่านรูปคลื่นสองครั้งเพื่อแยกสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ออกมา แต่ละรูปคลื่นจะประกอบด้วย 95-160 ส่วน จากข้อมูล 4 kB เลือกตัวอย่างที่ความถี่ 2.5 พันล้านตัวอย่างต่อวินาที ในแต่ละรัศมีการบันทึก การเขียนจะทำ 5 ครั้ง แต่ละครั้งจะเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแตรีกลดลง 4 nm ดังนั้น จำนวนของข้อมูลทั้งหมดจะมี รัศมี 6 ค่า ระยะห่างระหว่างแตรีก 5 ค่า ตำแหน่งในการอ่านประมาณ 40 ค่า การบันทึกค่า 2 ครั้ง รวม 2400 ข้อมูล

กระบวนการรวมรูปคลื่นสองรูปเป็นหนึ่งรูปได้แสดงในรูปที่ 3.14 จุดมุ่งหมายของการรวมรูปคลื่นคือทำให้ได้อัตราการผิดพลาดที่น้อยลงกว่าการอ่านรูปคลื่นเดียว ขั้นตอนแรกคือการปรับเท่าเพื่อหาผลตอบสนองบางส่วนโดยใช้กล่องตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 สำหรับการผสมรูปคลื่น ตัวกรอง finite impulse response (FIR) และการบวกแต่ละจุดได้ถูกใช้ ตัวกรอง FIR อินพุตสองค่าและเอาต์พุตหนึ่งค่าถูกบังคับให้ใช้เป้าหมายอาร์เกตตัวเดียวกัน

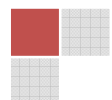




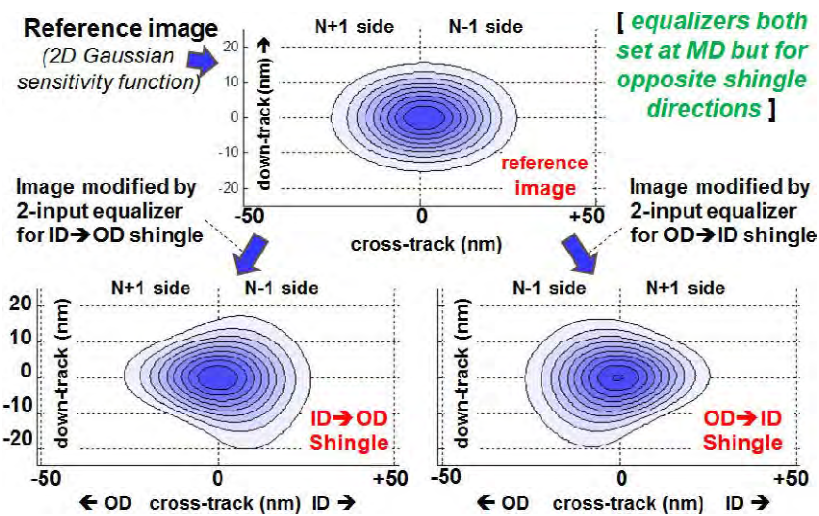
รูปที่ 3.14: ผลตอบสนองแอมพลิจูดและเฟสของตัวกรองสำหรับผสมรูปคลื่น หัวอ่านที่ 1 อยู่ในบริเวณใกล้กึ่งกลาง แทร็กข้อมูล หัวอ่านที่ 2 ถูกปรับให้ขยับไปทางแทร็กที่ $N+1$ เล็กน้อย อินพุตทั้งสองและเอาต์พุตมีเป้าหมายแบบเดียวกัน ดังนั้น ตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 มีผลตอบสนองหนึ่งหน่วย

รูปที่ 3.14 แสดงถึงผลตอบสนองแอมพลิจูดและผลตอบสนองเฟสของตัวกรอง FIR ทั้งสองตัว สัญญาณสองสัญญาณถูกปรับเท่าด้วยตัวปรับเท่าที่มีเป้าหมายเดียวกัน ที่ความถี่สูง ๆ ผลกระทบหลัก ๆ จากการรวมสัญญาณคือการรวมสองสัญญาณโดยตรงเฟสกันและมีแอมพลิจูดเท่ากัน ดังนั้นสัญญาณจะถูกปรับเท่าด้วยสัญญาณรบกวนอเล็กทรอนิกส์อย่างรุนแรง ที่ความถี่ต่ำ ๆ สัญญาณจากตัวปรับเท่า #2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเป็น $1/3$ ของตัวปรับเท่า #1 ทำให้โดนหักล้าง ทำให้ลดการเกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กได้ จะเห็นว่านี่คือข้อดีของการรวมสัญญาณสองสัญญาณเมื่อรูปคลื่นหนึ่งอยู่ในตำแหน่ง 15%-30% ของระยะห่างระหว่างแทร็ก

วิธีการอื่นสำหรับการผสมรูปคลื่นคือการคิดถึงการรวมกันของการถ่วงน้ำหนักของรูปภาพสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เริ่มจากรูป Gaussian สองมิติเป็นรูปร่างอิงค่าประมาณของฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน (read head sensitivity function) การคอนโวลูชันรูปร่างอิงกับรูปฟังก์ชันตัวกรองสองมิติจะทำให้ได้ภาพใหม่ที่บ่งบอกถึงการที่ฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่านจะถูกปรับปรุงอย่างไรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 3.15



ภาพอธิบายวิธีการผสมรูปคลื่นของตัวปรับเท่าโดยการปรับแต่งฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน ฟังก์ชัน Gaussian สองมิติถูกใช้เป็นฟังก์ชันอ้างอิง สองภาพด้านล่างแสดงถึงฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับแต่งแล้วตามทิศทางการเขียนซ้อนทับ จะเห็นว่าบริเวณแทร็ก N+1 และ N-1 จะมีรูปร่างของฟังก์ชันแตกต่างกัน โดยมีปลายแหลมไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการเขียนซ้อนทับ



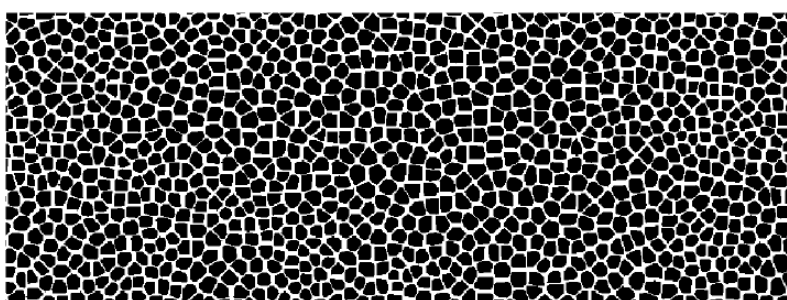
รูปที่ 3.15: แสดงถึงภาพของฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงแล้ว ภาพแรก คือ ภาพฟังก์ชันอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงเมื่อข้อมูลถูกเขียนซ้อนทับในทิศทางรัศมีน้อยไปมาก และภาพทางขวา คือ จากตำแหน่งรัศมีมากไปน้อย เพื่อให้ได้การผสมสัญญาณที่ดี รูปคลื่นที่ได้จากตัวปรับเท่าถูกส่งไปยังซอฟต์แวร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสด้วยรหัส LDPC [27]

บทที่ 4

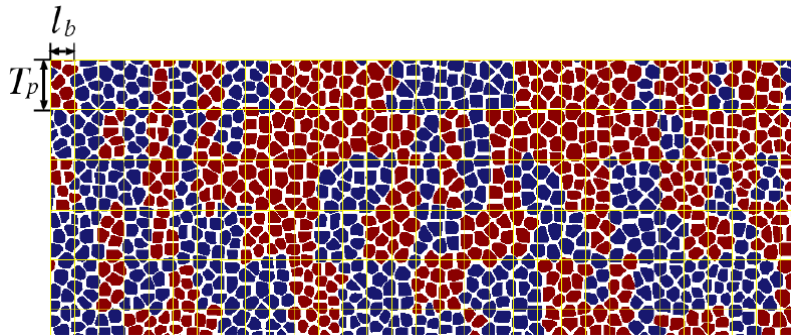
ผลการทดลอง

4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจุบันนี้ ได้มีการนำเสนอแบบจำลองของช่องสัญญาณในการอ่าน-เขียน (Read-Write Channel, R/W) หลากหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบ 4-grain model และแบบที่สร้างขึ้นจากพื้นฐานของแบบจำลอง Voronoi ต่อเนื่อง (Continuous Voronoi Model) แบบจำลอง Voronoi ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Voronoi Model) รวมทั้งแบบจำลองเกรนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Grain Model) [35]-[37] ในแบบจำลองทั่วไป [35], [36] เซลล์ของไวโรนอย (Voronoi Cell) จะถูกสร้างโดยการวางนิวเคลียสของแต่ละเกรนลงไปยังจุดศูนย์กลางของแต่ละเซลล์ ดังนั้น ถ้าค่าเบี่ยงเบนของการวางนิวเคลียสดังกล่าวไม่น้อยเกินไป ความเสมือนจริงของทั้งรูปร่างและตำแหน่งของเกรนที่ได้รับก็จะใช้เป็นตัวแทนของสื่อบันทึกที่ใช้งานจริงไม่เพียงพอ หรือในอีกแง่หนึ่ง ถ้าเกิดว่าค่าเบี่ยงเบนของการวางนิวเคลียสดังกล่าวมากจนเกินไป การกระจายของขนาดเกรน ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะสร้างแบบจำลองให้มีขนาดเกรนเสมือนของจริง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของนิวเคลียสแบบ Poisson Disk [37] และวิธี Lloyd's Relaxation [38] วิธีนี้จะสามารถสร้างแบบจำลองของเกรนได้ใกล้เคียงกับเกรนที่เกิดขึ้นจริงกับสื่อบันทึก พร้อมกับมีการสร้างขอบเขตของเกรนที่ไม่เป็นแม่เหล็ก โดยการประยุกต์วิธี Convex Hull [39] ในกระบวนการสร้างเซลล์ของ Voronoi ด้วยการวนรอบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

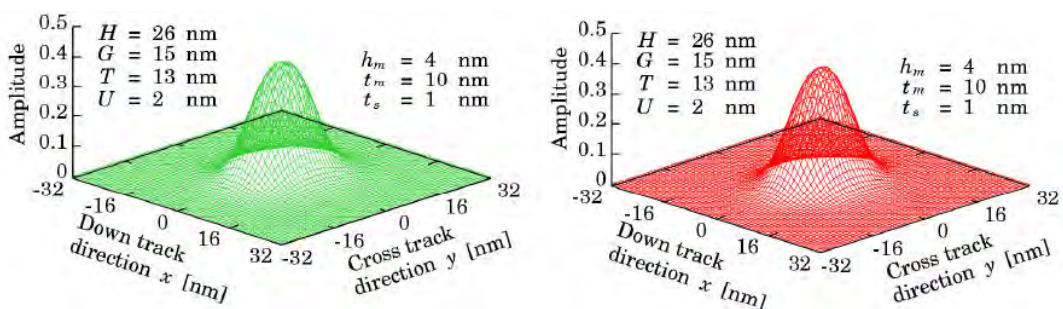


รูปที่ 4.1: ตัวอย่างกรานูลาร์ (Granular) ของสื่อบันทึกจากวิธีการกระจายตัวของนิวเคลียสแบบ Poisson Disk

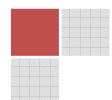


รูปที่ 4.2: ตัวอย่างของ Magnetization ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการเขียน (สีแดงแทน 1 สีน้ำเงิน -1)

หลังจากที่เราได้กรานูลาร์จากการจำลองแล้ว กระบวนการหลังจากนั้นก็คือกระบวนการเขียนข้อมูลลงไป ในกรานูลาร์ ซึ่งเราจะเรียกว่า magnetization โดยมีความเป็นแม่เหล็กแค่สองสถานะนั่นคือ 1 กับ -1 ซึ่ง กระบวนการเขียนที่ผู้วิจัยได้ศึกษาจะกำหนดเอาจุดศูนย์กลางของแต่ละเกรนเป็นหลัก โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าจุดศูนย์กลางของเกรนใดๆ ที่วางอยู่ในขอบเขตของบิตเซลล์ที่เรากำลังจะเขียน เกรนนั้นก็จะมีสภาพความเป็นแม่เหล็กเช่นเดียวกับบิตที่จะเขียนลงไปยังบิตเซลล์นั้นๆ ซึ่งวิธีดังกล่าวถือว่าเป็นวิธีเบื้องต้น ผู้วิจัยคิดว่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะทำวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเขียนสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติด้วย จากนั้น เป็นกระบวนการอ่านข้อมูล สิ่งสำคัญของกระบวนการอ่านก็คือ การศึกษาผลตอบสนองของหัวอ่าน หรือ ที่เรียกว่า Sensitivity function ซึ่งจากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาจากการที่ได้ไปอยู่ที่ Ehime University JAPAN ทำให้สามารถสร้างผลตอบสนองของหัวอ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลตอบสนองดังกล่าวเมื่อนำไป Convolution แบบสองมิติกับ Magnetization ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) ก่อนที่จะนำสัญญาณดังกล่าวไปทำการประมวลผลในลำดับต่อไป

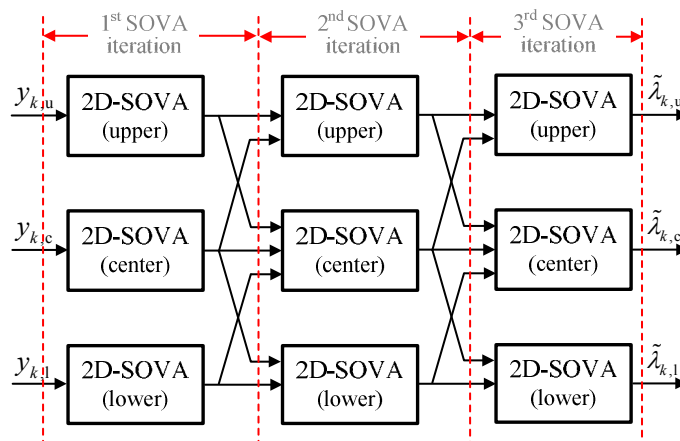


รูปที่ 4.3: ผลตอบสนองของหัวอ่าน (Sensitivity function) สีเขียวได้จากหัวอ่านจริง สีแดงได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [26]



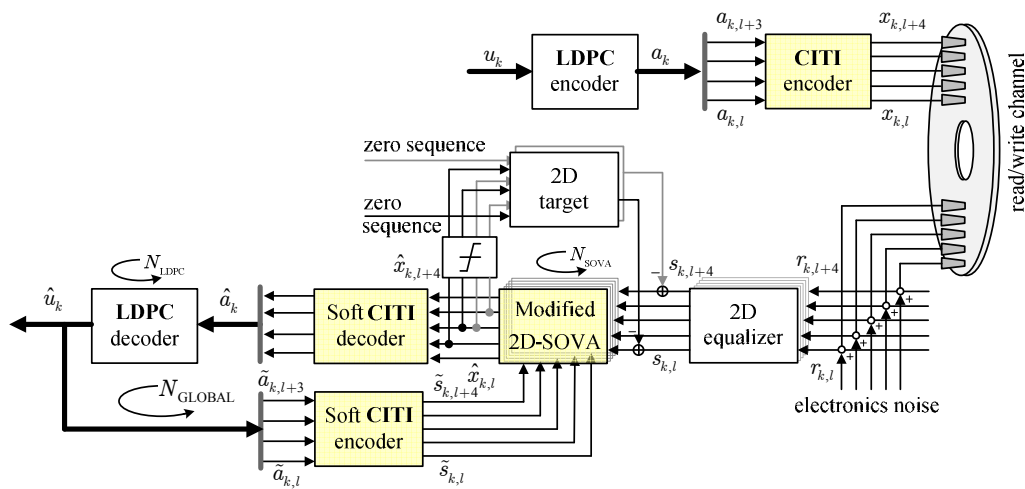
4.2 การพัฒนาตัวตรวจจับแบบสองมิติร่วมกับรหัสสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติ

เพื่อให้ระบบการประมวลผลสัญญาณสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญ นั่นก็คือตัวตรวจจับแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับการเข้ารหัสสมอดดูเลขชั้นได้ รวมถึงความสามารถในการจัดการกับปัญหาการแทรกสอดระหว่างแทร็คซึ่งเป็นปัญหาหลักในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ในปี 2014 เราได้นำเสนอวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจจับแบบสองมิติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจจับให้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4

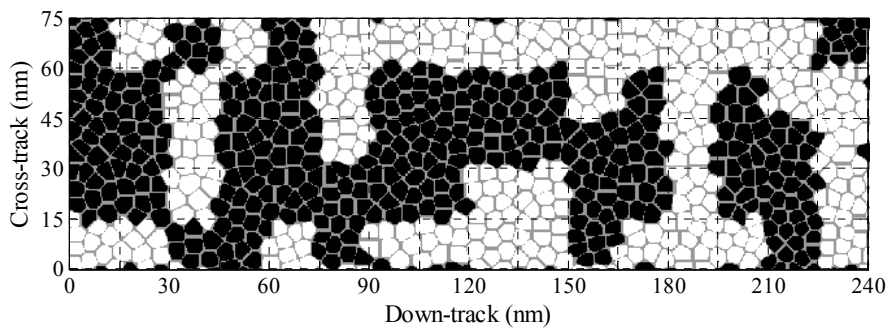


รูปที่ 4.4: กระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจจับ Soft Output Viterbi Algorithm แบบสองมิติ (2D SOVA)

อย่างไรก็ตาม เรายังมีแนวความคิดที่จะพัฒนาตัวตรวจจับแบบสองมิติให้สามารถทำงานร่วมกับการเข้ารหัสสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งที่มนักวิจัยได้นำเสนอในปี 2015 [40] รวมถึงการพัฒนาวิธีการลบล้างการแทรกสอดระหว่างแทร็คด้วย รูปที่ 4.5 แสดงช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการเข้ารหัสสมอดดูเลขชั้น การตรวจจับแบบสองมิติ และการลบล้างการแทรกสอดระหว่างแทร็คด้วยการทำงานแบบวนซ้ำ โดยเราได้จำลองการบันทึกข้อมูลที่มีความจุเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.87 Tb/in^2 ด้วยแบบจำลองของสื่อบันทึกข้อมูลแบบจำลอง Voronoi ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.6

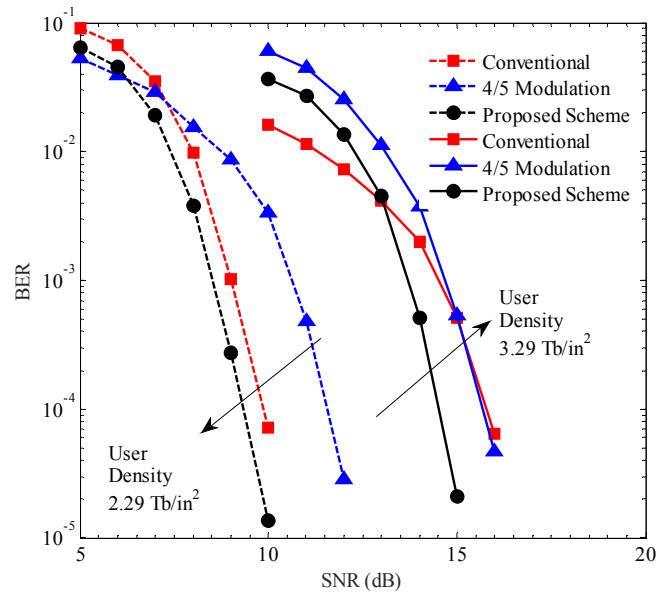


รูปที่ 4.5: ช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการเข้ารหัสสมอดดูเลชัน การตรวจจับแบบสองมิติ และการลบล้างการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการทำงานแบบวนซ้ำ

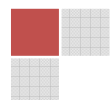


รูปที่ 4.6: รูปแบบของความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึกข้อมูลที่ถูกเขียนด้วยข้อมูลหลังจากที่เข้ารหัสแล้วด้วยระยะความกว้างบิตและความกว้างแทร็กเท่ากับ 15 nm ซึ่งตรงกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.87 Tb/in²

ผลการทดลองเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่เราากำลังทำการพัฒนาให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบการบันทึกแบบทั่วไป [41] ที่ไม่มีการเข้ารหัสสมอดดูเลชันแบบสองมิติ ยิ่งกว่านั้นวิธีที่เรากำลังนำเสนอจะให้ประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบการบันทึกที่เราเคยนำเสนอก่อนหน้านี้อีกด้วย [41] ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากระบบที่นำเสนอก่อนหน้านี้ไม่มีการลบล้างผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็กนั่นเอง



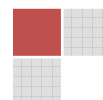
รูปที่ 4.7: การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาด (bit-error rate, BER) ของระบบที่มีการลดล้างผลกระทบการแทรกสอดระหว่างแตรีก ระบบการบันทึกที่มีการเข้ารหัสมอดดูเลชัน และระบบการบันทึกข้อมูลทั่วไปที่ความหนาแน่นข้อมูลเชิงผู้ใช้ (user density, UD) เท่ากับ 2.29 และ 3.29 Tb/in^2



บทที่ 5

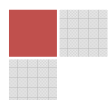
สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการทดลองการใช้การเข้ารหัสข้อมูลรวมกับการหักล้างผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างบิต อีกทั้งยังได้ศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กอีกด้วย เช่น ผลกระทบของการแทรกสอด ผลกระทบของการไม่เท่ากันของเกาะข้อมูล ผลกระทบของความไม่เป็นเอกภาพของเกาะข้อมูล เป็นต้น ผลจากการวิจัยพบว่าวิธีที่เราได้นำเสนอสามารถกับผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นแล้วผลงานที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ยังได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI อีกด้วย

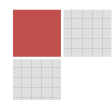


เอกสารอ้างอิง

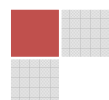
- [1] Wood R., “ The Feasibility of Magnetic Recording at 1 Terabit per Square Inch,” IEEE Trans. Magn., vol. 36, no.1, pp. 36–42, Jan. 2000.
- [2] R. Rottmeyer et al., “ Heat-assisted magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 2417–2421, Oct. 2006.
- [3] B.Terris, T.Thomson, and G.Hu., “ Patterned media for future magnetic data storage,” Microsyst. Technology., vol. 13, no. 2, pp. 189–196, Nov. 2006
- [4] Wood R., Williams M., Kavcic A., and Miles J., “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
- [5] Y. Shiroishi et al., “ Future Options for HDD Storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3816–3822, Oct. 2009
- [6] A. R. Krishnan, R. R. Redhakrishnan, B. Vasic A. Kavcic, W. Ryan and F Erden “2-D Magnetic Recording: Read Channel Modeling and Detection,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3830–3836, Oct.2009
- [7] S. Navabi., “Signal processing for bit-patterned media channels with inter-track interference,” Ph.D thesis, University of California, San Diego, 2010.
- [8] S. Navabi, B.V.K.V Kumar, J. G. Zhu., “Modifying Viterbi Algorithm to Mitigate Intertrack Interference in Bit-Patterned Media,” IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2274–2276, Oct. 2007.



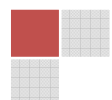
- [9] L. M. M. Lyint, P. Supnithi, P. Tantaswadi, “An Inter – Track Interference Mitigation Technique Using Partial ITI Estimate in Patterned Media Storage,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3691–3694, Oct. 2009.
- [10] Chang W. and Cruz J. R., “Inter-Track Interference Mitigation for Bit-Patterned Magnetic Recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp. 3899-3908, Nov. 2010.
- [11] H. Muraoka and S. J. Greaves, "Two-track reading with a wide-track reader for shingled track recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, Nov. 2015
- [12] W. Busyatras, C. Warisarn, L. M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, “A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording,” *IEICE Trans. ELECTRON.*, vol. E98-C, no. 8, pp. 892–898, August. 2015.
- [13] J. P. J. Groenland and L. Abelman, “Two dimensional Coding for Probe Recording on Magnetic Patterned Media,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2307–2309, Jun. 2007.
- [14] S. Nabavi, B. V. K. Vijaya Kumar, and J. A. Bain, “Mitigating the effects of track mis-registration in bit-patterned media,” in Proc. of International Conference on Communication (ICC) 2008., Beijing, China, pp.2061 - 2065.
- [15] P.W. Nutter, I. T. Ntokas, and B.K. Middleton, “An Investigation of the Effects of Media Characteristics on Read Channel Performance for Patterned Media Storage,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, pp. 4327-4334, Nov. 2005.
- [16] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, “A Recorded-Bit Patterning Scheme with Accumulated Weight Decision for Bit Patterned Media Recording” in Electronic Trans. IEICE 2013.



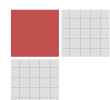
- [17] A. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple A Simple Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand, May. 15-17 2013.
- [18] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System" in *Journal of Applied Physics*, ISI-Impact 2.30.
- [19] C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in *Electronic Trans. IEICE 2013*, Published, ISI-Impact 0.34.
- [20] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" *IEEE Trans. Magn.*, ISI-Impact 1.83.
- [21] S. H. Charap, P. L. Lu, and Y. He, "Thermal stability of recorded information at high densities", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No.1, Jan 1997, pp.978-983.
- [22] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 1, Jan 2000, pp. 36-42.
- [23] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 9, 2007, pp. R149-R177.
- [24] K. S. Chan et al., "TDMR platform simulations and experiments," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, Oct. 2009, pp. 3837-3843.
- [25] E. Hwang, R. Negi, B. V. K. V. Kumar, and R. Wood, "Investigation of two-dimensional magnetic recording (TDMR) with position and timing uncertainty at 4 Tb/in²," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 12, Dec. 2011, pp. 4775-4780.



- [26] M. Yamashita et al., "Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, Oct. 2011, pp. 3558-3561.
- [27] R. Wood, R. Galbraith, and J. Coker, "2-D Magnetic Recording: Progress and Evolution," *IEEE Trans. Magn.* vol. 51, no.4, pp. 3100607, Apr. 2015.
- [28] M. Salo et al., "The structure of shingled magnetic recording tracks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 3, Mar. 2014, Art. ID 3100406.
- [29] R. Galbraith, W. Hanson, B. Lengsfeld, T. Oenning, J. Park, and M. Salo, "Noise characterization in high-areal density perpendicular and shingled magnetic recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 3, Mar. 2014, Art. ID 3200707.
- [30] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays," *IEEE Proceeding*, Vol. 64, No. 12, Dec. 1976, pp. 1715-1729.
- [31] D. Palmer, P. Ziperovich, R. Wood, and T. D. Howell, "Identification of nonlinear write effects using pseudorandom sequences," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, Sep. 1987, pp. 2377-2379.
- [32] R. Hermann, "Volterra modeling of digital magnetic saturation recording channels," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No.5, Sep. 1990, pp. 2125-2127.
- [33] J. Coker, Opportunities and Challenges in Two Dimensional Magnetic Recording (IEEE Magnetics Society Distinguished Lecture Series). Washington, DC, USA: Phillips Hall, 2014.

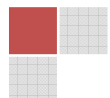


- [34] X. Tang, P. Fan, and J. Linder, "Multiple binary ZCZ sequence sets with good cross-correlation property based on complementary sequence sets," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 56, No. 8, Aug. 2010, pp. 4038-4045.
- [35] A. R. Krishnan, R. Radhakrishnan, B. Vasic, A. Kavcic, W. Ryan and F. Erden, "2-D magnetic recording: Read channel modeling and detection," *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.10, pp.3830-3836, Oct. 2009.
- [36] K. S. Chan, J. J. Miles, E. Hwang, B. V. K. V. Kumar, J. Zhu, W. Lin and R. Negi, "TDMR platform simulations and experiments," *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.10, pp.3837-3843, Oct. 2009.
- [37] E. Hwang, R. Negi and B. V. K. V. Kumar, "Signal processing for near 10Tbit/in² density in two-dimensional magnetic recording (TDMR)," *IEEE Trans. Magn.*, vol.46, no.6, pp.1813-1816, June 2010.
- [38] A. Lagae, Wang tiles in computer graphics, California: Morgan & Claypool, 2009.
- [39] A. C. Bebbington, "A method of bivariate trimming for robust estimation of the correlation coefficient," *Appl. Statist.*, vol.27, no.3, pp.221-226, 1978.
- [40] C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An iterative inter-track interference mitigation method for two-dimensional magnetic recording systems," *J. Appl. Phys.* 115, 17B732 (2014).
- [41] C. Warisarn and P. Kovintaviwat, "Soft-Output Decoding Approach of 2D Modulation Codes in Bit-Patterned Media Recording Systems," *IEICE Trans. Electron.* vol.E98-C, no. 12, pp. 1187-1192, Dec. 2015

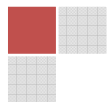


ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] K. Pituso, C. Warisarn, Damrongsak Tongsoomporn, and P. Kovintavewat, "An ITI Subtraction Scheme of a Rate-4/5 Modulation Code for Two Dimensional Magnetic Recording," IEEE Magnetic Letter, ISI-Impact factor 1.978, to be published.
- [2] W. Tipcharoen, C. Warisarn, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," Japanese Journal of Applied Physics 55, 07MB01 (2016), ISI-Impact factor 1.122.
- [3] W. Tipcharoen, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Effects of Island Shape and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording," in Proceeding IEEE AIM 2016 Bromio Italy.



ภาคผนวก -ก-





Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording

Warunee Tipcharoen¹, Chanon Warisarn^{1*}, Arkom Kaewrawang², and Piya Kovintavewat^{3*}

¹College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Magnetic Materials and Data Storage Research Laboratory, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

³Data Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

*E-mail: chanon.wa@kmitl.ac.th; piya@npru.ac.th

Received November 29, 2015; accepted April 15, 2016; published online June 16, 2016

This work presents the effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording systems at an areal density (AD) beyond 2 Tbps via a micromagnetic modeling. At high ADs, the hotspot and the write field gradient may not be correctly focused on the target island because the bit islands are closely positioned to one another. This may lead to the overwriting/erasing of the previously written islands, which can severely affect the recording performance. Therefore, this work studies the 3-by-3 data patterns that easily cause an error when the hotspot and write head positions are fluctuated by various island pitches. Simulation results indicate that the data pattern that leads to the highest/lowest error occurrence frequency is the one with the first, second and fourth islands having the opposite/same magnetization direction to/as the write field, regardless of the magnetization direction of the third island. This result can, for example, be utilized to design a two-dimensional modulation code to prevent such destructive data patterns, thus helping enhance the overall system performance.
© 2016 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

The next generation of magnetic recording technology has been expected to capable of storing digital data at multi-terabit per square inch (Tbps).^{1,2} Heated-dot magnetic recording (HDMR) is one of the promising technologies to achieve an ultra-high recording density,³ because it can prevent the transition noise caused by zig-zag grain boundary, and can improve the writability by temporarily reducing the coercivity of magnetic media.⁴⁻⁶

HDMR is a new technology that combines many techniques employed in heat assisted magnetic recording (HAMR),⁷ bit-patterned media recording (BPMR),⁸ shingled magnetic recording (SMR),⁹ and two-dimensional magnetic recording (TDMR).¹⁰ However, there are still many parameters that limit an achievable storage capacity,^{5,11} such as hotspot position fluctuation, the recorded-bit data patterns,¹²⁻¹⁵ and so on. Recently, BPMR with a lollipop near field transducer is investigated at about 1 Tbps. In practice, the optical spot on the patterned media is better concentrated than that on the continuous media. Additionally, the produced hotspot size has been lower below 100 nm and it can be reduced by adjusting curved edges at the bottom of the peg.³

Practically, the inappropriate thermal distribution and write head field gradient that cover the neighboring recorded bits in both the along- and across-track directions can cause a written-in error during the writing process.^{3,11,16} Therefore, the effect of hotspot position fluctuation needs to be investigated, and the durability of recorded-bit patterns against this effect must be understood before writing the data onto a magnetic medium. In this work, the position jitters of hotspot and write head field have been examined by the realistic micromagnetic modeling based on a finite difference (FD) method.¹⁷

2. Micromagnetic modeling and writing process

This paper considers an island size of $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ and an island pitch of 17, 15, and 13 nm, which correspond to the areal densities (ADs) of 2.2, 2.8, and 3.8 Tbps, respectively.

Because the bit islands become smaller, the thermal stability must be compensated by utilizing a high anisotropy material such as $\text{Ll}_0\text{-FePt}$.¹⁸ Nevertheless, this work considers the material $\text{Ll}_0\text{-FePt}$ with a magnetocrystalline anisotropy constant (K_u) of 4.6 MJ/m^3 and a saturation magnetization constant (M_s) of 1125 kA/m ,¹⁹ which can be obtained by a magnetron sputtering method. Note that these values allow the minimum stable grain size of about 2.8 nm at a thermal stability of 60.¹⁹ In addition, an intradot exchange coupling is set to be 12 pJ/m .^{20,21}

The micromagnetic modeling procedure and how to evaluate thermal effect on bit-patterned media via the Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation^{21,22} can be summarized as follows.

a) To generate a bit-patterned medium, we consider the island size and pitch as mentioned above, which are used to specify the geometric volumes of spaces or regions. Each island region has a different easy axis that declines in range of $0\text{--}20^\circ$ with Gaussian distribution.

b) To create the magnetization state for all possible data patterns as listed in the Table I, which is used to define the initial magnetization of a medium before the fifth island is being written. Note that this paper assumes that the first-fourth islands are the previously recorded bits (i.e., there are 16 possible data patterns), and the fifth-ninth islands are initially assumed to be the bit “-1”.

c) To produce the write head field contour, the triangular write pole is utilized with trailing and side shields, whose dimension is 93.5 nm wide (along-track) and 50.5 nm long (across-track) as shown in Fig. 1. The write field gradient in the along-track direction is 500 Oe/nm , whereas that in the across-track direction is 483 Oe/nm .^{23,24} After the magnetic field amplitude was carefully investigated, we found that its maximum value should be greater than or at least equal to 20 kOe so as to obtain the error percentage (will be defined in Sect. 3) below 10%.

d) To gradually reduce media coercivity, the heat from a laser should be applied, where a thermal profile is Gaussian in both directions according to²⁵

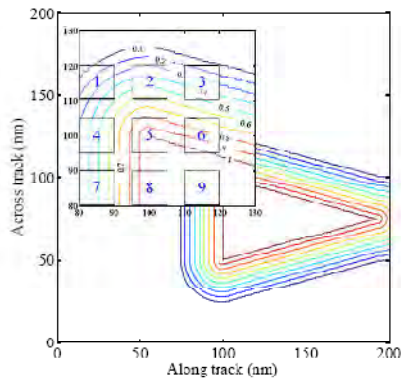
Table 1. Illustration of all possible patterns of four previously recorded bits.

| Track | Pattern 1 | Pattern 2 | Pattern 3 | Pattern 4 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Previous track | -1 | -1 | -1 | 1 |
| Current track | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Next track | -1 | -1 | -1 | -1 |

| Track | Pattern 5 | Pattern 6 | Pattern 7 | Pattern 8 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Previous track | 1 | -1 | 1 | -1 |
| Current track | 1 | -1 | -1 | -1 |
| Next track | -1 | -1 | -1 | -1 |

| Track | Pattern 9 | Pattern 10 | Pattern 11 | Pattern 12 |
|----------------|-----------|------------|------------|------------|
| Previous track | 1 | 1 | -1 | -1 |
| Current track | -1 | -1 | 1 | -1 |
| Next track | -1 | -1 | -1 | -1 |

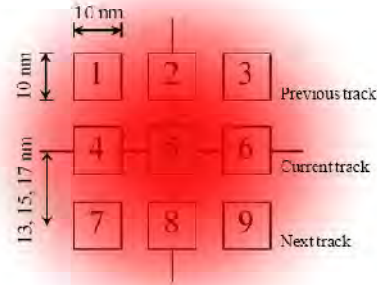
| Track | Pattern 13 | Pattern 14 | Pattern 15 | Pattern 16 |
|----------------|------------|------------|------------|------------|
| Previous track | -1 | 1 | -1 | 1 |
| Current track | 1 | -1 | -1 | -1 |
| Next track | -1 | -1 | -1 | -1 |

**Fig. 1.** (Color online) Write head field contour modeled with the maximum amplitude of 20kOe,²³ where the corner is used to magnetize the fifth island.

$$T = T_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2} \ln 2\right), \quad (1)$$

where T is the temperature (K), T_0 is the maximum temperature (K), r is the distance (m), and r_0 is the full width at half maximum of the thermal profile (m). Finally, a thermal spot size of 70 nm is considered in this work, as demonstrated in Fig. 2 (not scaled).²⁶

Because the Li_0FePt material is employed as a recording layer of a bit-patterned medium and its Curie temperature, T_C , is 750 K,^{20,27} then the highest recording temperature should

**Fig. 2.** (Color online) The island layout with $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ volume heated by the Gaussian thermal profile (FWHM = 70 nm).

be lower than this limit. In addition, Chen et al.²⁸ have tested and measured an erasure temperature of $\text{Li}_0\text{-FePt}$ HAMR media for a laser heating method. They found that the old data can be completely erased at the temperature of 650 K with the laser power of 72 mW. Thus, 550 K is set to be the maximum temperature (at a nucleus) for the writing process, where a room temperature is 295 K.

Because we cannot compute the thermal effect directly from the LLG equation, the Brillouin function is then taken into account for M_s calculation under the thermal effect according to (in CGS unit)^{29,30}

$$M_s(T) = M_s(0) \left[\frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J} \beta\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{\beta}{2J}\right) \right], \quad (2)$$

where $M_s(0)$ is the M_s at room temperature, J is a total angular momentum assumed to be 0.85, and β is defined as

$$\beta = 3 \left(1 - \frac{T}{T_C} \right). \quad (3)$$

and T_C is set to be 750 K.

After $M_s(T)$ is achieved, $K_u(T)$ can then be obtained from

$$\frac{K_u(T)}{K_u(0)} = \left[\frac{M_s(T)}{M_s(0)} \right]^n, \quad (4)$$

where $K_u(0)$ is the K_u at room temperature, and n is about 2 according to the parameters of $\text{Fe}_{55}\text{Pt}_{45}$.¹⁵⁾

Figure 3 demonstrates the dependence of M_s and K_u on the temperature T , where both M_s and K_u decrease as T increases. This means that the magnetic property of a magnetic material declines and it appears to be paramagnetic at T_C . In addition, the summation of magnetic moment vectors is approximately zero when the magnetic field disappears. As a result, we have modeled the writing process by using the thermal profile and the bit-patterned medium, where the K_u and M_s of magnetic islands are calculated with different values corresponding to the thermal profile expansion.

Furthermore, the heat and magnetic field pulses are assumed to be constant every moment, where they are applied until the energy of a torque term in the LLG equation is lower than 0.01 A/m.³¹ Consequently, the calculation should be

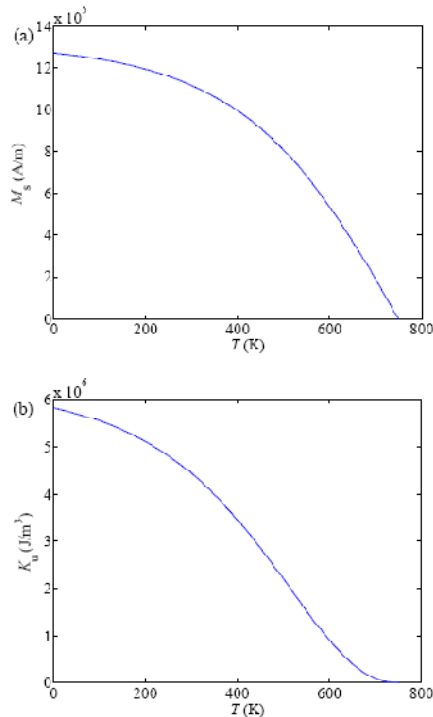


Fig. 3. (Color online) Dependence of (a) M_s and (b) K_u on the temperature T plotted via the Brillouin function.²⁹

considered complete. It should be pointed out that the torque criterion is employed for determining a writing duration, and a switching time will not be considered in this work.

To study the effect of hotspot and head field contour position fluctuations, their deviations are modeled as a Gaussian random variable. Additionally, the thermal profile covers all 9 islands in both along- and across-track directions as illustrated in Fig. 2. Then, the magnetic field of the triangular head corner is applied to write the data on the center bit (i.e., the fifth island) to be the bit “+1”, as demonstrated in Fig. 1. It is very important to note that the micromagnetic modeling is performed using the OOMMF package³¹ based on the LLG equation, which has been solved by the FD method, where the FD mesh used in the calculation is $0.5 \times 0.5 \times 10 \text{ nm}^3$.

3. Results and discussion

To identify results after the writing process, the principles of a magnetization reversal after the writing process should be described first. The magnitude of magnetic moment vectors across all spins in an individual island and magnetic domain are considered to be a criterion for a magnetization reversal. Such a measured magnitude from an individual bit should be above 50% of M_s , where it is decided to be a complete magnetization switching. The magnetic domain is also realized, which must be consistent with another one to be double checked. Other cases will be decided to be an

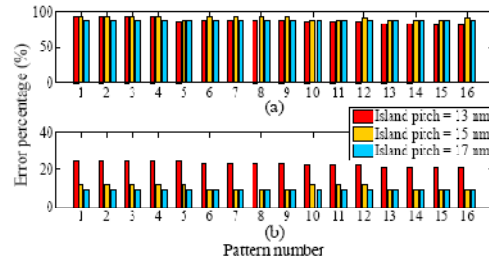


Fig. 4. (Color online) Error percentage as a function of data patterns at three different ADs: (a) the hotspot and the main pole are moved together within all nine islands’ area, and (b) both of the hotspot and the write head positions are moved over the target island’s area (the fifth island).

incomplete magnetization reversal. We use this result to specify two different states, i.e., bit “+1” and “−1”.

The writing performance can be evaluated based on the above definition. Moreover, an error is defined as the error occurred from the writing process under heat, which can be classified into two conditions. Firstly, the error occurs when some previously recorded data are magnetized into different states by the write head that is currently writing a bit on the target island (i.e., the fifth island). Secondly, the error happens when the bit cannot be recorded onto the target island because of a drastic inaccuracy of hotspot and write pole positions. For example, for each data pattern (see Table I), we rewrite the bit on the target island for 100 rounds. After recording the target bit, we evaluate the error according to the criteria mentioned above. Then, for each round, if any or both of the two conditions have occurred, it will be counted as one error. Therefore, for each data pattern, the sum of all errors will be multiplied by 100% to obtain “an error percentage”.

3.1 Worst case of position fluctuations

The center of the hotspot position is fluctuated with respect to a main pole, which can move to any location within nine islands. For each data pattern based on the previously recorded bits, we apply the magnetic field to write the bit “+1” on the fifth island, and then investigate the written-in error that might have occurred within the surrounding bits (caused by the thermal expansion).

Figure 4(a) shows the error percentage as a function of data patterns at three different ADs. Clearly, they have an error percentage close to one another and the maximum one is close to 90%. The main cause of this error comes from the target island that could not be recorded. Furthermore, it seems that the thermal and head field gradients may lead to overwriting in some previously written tracks and bits (mostly in the second and fourth islands) because of severe position fluctuation and large thermal spot size.

Additionally, we found that when the magnetization directions of the second and fourth islands are opposite to the direction of the write field, it will definitely cause the written-in error. The error percentage can be decreased when the second or fourth island has the same magnetization direction with the write field (i.e., same as the magnetization direction of the fifth island). Moreover, when the second and

fourth islands have the same magnetization direction with the write field, it will yield the lowest error percentage.

3.2 Position deviation improvement

To approach the “error free” in the HDMR writing process and to make the simulation model more realistic, the fluctuations of hotspot and head positions are adjusted to be within the target island’s area. Figure 4(b) demonstrates that the error percentage greatly drops and decreases below 10% for the island pitches of 15 and 17 nm, while the error percentage drops to around 21–24% for the island pitch of 13 nm. Although the position fluctuation has been improved, the cause of error is still similar to that described in Sect. 3.1. To obtain a lower error percentage, the deviation of hotspot and head positions should be smaller than the island area. In this case, the second and fourth islands are often overwritten, which is resulted from a very high write field gradient even if an island pitch is increased. In addition, we also found that the cause of error from the first and third islands may be neglected because the thermal distribution and the write field gradient that cover these bits are insufficient.

Decreasing the hotspot size is also one of the choices to prevent the written-in error, which depends on the optical design. Because the shingled writing technology is used, the hotspot and head position can move in any direction while the target island is being written. Thus, optimizing the thermal profile and the write field gradient should also be taken into consideration.

Consequently, given the optimal writing temperature and write head field gradient, the written-in error in HDMR systems can be alleviated by avoiding some data patterns to be written onto a medium. This can be achieved by applying a two-dimensional modulation code on the input data before recording as proposed in Ref. 32.

4. Conclusions

The written-in error occurred during the writing process of HDMR has been studied using a realistic micromagnetic simulation at the AD beyond 2 Tbps. Simulation results show that the error percentage is increased with a decrease of island pitch (i.e., AD is increased). Then, to reduce this error, the position deviation has been improved by allowing the hotspot position to move within the target island’s area. The other ways to decrease the error during the writing process include using a smaller hotspot size, writing the media at lower temperature, and utilizing the two-dimensional modulation code to prevent the data pattern that easily cause a written-in error.

Acknowledgments

This work was supported in part by College of Data Storage Innovation KMITL, Thailand Research Fund (TRF), and in part by Research and Development Institute, Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand.

- 1) F. Wang and X.-H. Xu, *Chin. Phys. B* **23**, 036802 (2014).
- 2) D. Weller, G. Parker, O. Mosendz, E. Champion, B. Stipe, X. Wang, T. Klemmer, G. Ju, and A. Ajan, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 3100108 (2014).
- 3) A. Ghoreyshi and R. H. Victora, *J. Appl. Phys.* **115**, 17B719 (2014).
- 4) R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, U. Nowak, A. Lyberatos, and H. J. Richter, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 102402 (2012).
- 5) R. Wood, *J. Magn. Magn. Mater.* **321**, 555 (2009).
- 6) Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, and H. Tanaka, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 3816 (2009).
- 7) R. E. Rottmayer, S. Batra, D. Buechel, W. A. Challener, J. Hohlfeld, Y. Kubota, L. Li, B. Lu, C. Mihalcea, K. Mountfield, K. Pelhos, C. Peng, T. Rausch, M. A. Seigler, D. Weller, and X. M. Yang, *IEEE Trans. Magn.* **42**, 2417 (2006).
- 8) H. J. Richter, A. Y. Dobin, R. T. Lynch, D. Weller, R. M. Brockie, O. Heinonen, K. Z. Gao, J. Xue, R. J. M. v. d. Veerdonk, P. Asselin, and M. F. Erden, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 222512 (2006).
- 9) F. Lim, B. Wilson, and R. Wood, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 1548 (2010).
- 10) K. S. Chan, J. J. Miles, E. Hwang, B. V. K. Vijayakumar, J.-G. Zhu, W.-C. Lin, and R. Negi, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 3837 (2009).
- 11) M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, J. Ganping, Y. T. Hsia, and M. F. Erden, *Proc. IEEE* **96**, 1810 (2008).
- 12) Y. Wang, R. H. Victora, and B. V. K. Vijaya Kumar, *IEEE Trans. Magn.* **51**, 3001505 (2015).
- 13) R. Wood, Y. Sonobe, Z. Jin, and B. Wilson, *J. Magn. Magn. Mater.* **235**, 1 (2001).
- 14) D. Niarchos, *Sens. Actuators A* **109**, 166 (2003).
- 15) S. N. Piramanayagam, *J. Appl. Phys.* **102**, 011301 (2007).
- 16) H. Ye, V. Sng, C. Du, J. Zhang, and G. Guo, *IEEE Trans. Magn.* **38**, 2180 (2002).
- 17) J. E. Millat and M. J. Donahue, in *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*, ed. H. Kronmuller and S. Parkin (Wiley, New York, 2007) p. 742.
- 18) J.-U. Thiele, S. Maat, and E. E. Fullerton, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 2859 (2003).
- 19) J.-U. Thiele, K. R. Coffey, M. F. Toney, J. A. Hedstrom, and A. J. Kellogg, *J. Appl. Phys.* **91**, 6595 (2002).
- 20) J. Zhang, Y. Liu, F. Wang, J. Zhang, R. Zhang, Z. Wang, and X. Xu, *J. Appl. Phys.* **111**, 073910 (2012).
- 21) W. Tipcharoen, A. Kaewrawang, and A. Siritariwat, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2015**, 504628 (2015).
- 22) T. Schrefl, J. Fidler, D. Suess, W. Scholz, and V. Tsiantos, in *Handbook of Advanced Magnetic Materials: Micromagnetic Simulation of Dynamic and Thermal Effects*, ed. Y. Liu, D. J. Sellmyer, and D. Shindo (Springer, Heidelberg, 2006) p. 129.
- 23) M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, K. Miura, S. J. Greaves, H. Aoi, Y. Kanai, and H. Muraoka, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 4586 (2012).
- 24) M. Yamashita, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, K. Miura, S. Greaves, H. Aoi, Y. Kanai, and H. Muraoka, *J. Appl. Phys.* **111**, 07B727 (2012).
- 25) B. X. Xu, Z. J. Liu, R. Ji, Y. T. Toh, J. F. Hu, J. M. Li, J. Zhang, K. D. Ye, and C. W. Chia, *J. Appl. Phys.* **111**, 07B701 (2012).
- 26) B. X. Xu, Z. Cen, J. H. Goh, J. Li, K. Ye, J. Zhang, H. Yang, Y. T. Toh, and C. Quan, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 2559 (2013).
- 27) S. Okamoto, N. Kikuchi, O. Kitakami, T. Miyazaki, Y. Shimada, and K. Fukamichi, *Phys. Rev. B* **66**, 024413 (2002).
- 28) Y. J. Chen, H. Z. Yang, S. H. Leong, K. M. Cher, J. F. Hu, P. Sethi, and W. S. Lew, *J. Appl. Phys.* **117**, 17D117 (2015).
- 29) F. Akagi, M. Mukoh, M. Mochizuki, J. Ushiyama, T. Matsumoto, and H. Miyamoto, *J. Magn. Magn. Mater.* **324**, 309 (2012).
- 30) F. Akagi, T. Matsumoto, and K. Nakamura, *J. Appl. Phys.* **101**, 09H501 (2007).
- 31) M. J. Donahue and D. G. Porter, OOMMF User’s Guide, Version 1.0, Interagency Report NISTIR 6376 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999).
- 32) A. Arrayangkool and C. Warisarn, *J. Appl. Phys.* **117**, 17A904 (2015).

ภาคผนวก -ข-



ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล: ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

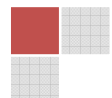
ประวัติการศึกษา

| ปีที่จบการศึกษา | ระดับปริญญา | ตัวอักษรย่อปริญญา | สาขาวิชา | สถาบันการศึกษา | ประเทศ |
|-----------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------|
| 2548 | ปริญญาตรี | B. Eng. (1 st Hon) | Electronic Engineering Technology | KMITNB | ไทย |
| 554 | ปริญญาเอก | Ph.D. | Electrical Engineering | KMITL | ไทย |

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**International Journal Publications**

1. W. Tipcharoen, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Effects of Island Shape and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
2. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsomporn, "A Spin Stand Study of Head-to-Media Spacing Sensitivity for Shingled Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
3. K. Pituso, C. Warisarn, D. Tongsomporn, and P. Kovintavewat, "An ITI Subtraction Scheme of a Rate-4/5 Modulation Code for Two Dimensional Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
4. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsomporn, "An experiment study of head-to-media spacing sensitivity in ultra-high density magnetic recording systems," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.
5. V. Pomsanam, C. Warisarn, A. Siritaratiwat, C. Surawanitkun, "Structural size effect with altered temperature on MgO-based magnetic tunnel junction device during current flow," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.

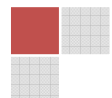
6. W. Tipcharoen, C. Warisarn¹, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," JJAP ISI-Impact 1.27, accepted.
7. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding Approach of 2D Modulation Codes in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Electronic Trans. IEICE 2015, Published, ISI-Impact 0.34.
8. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative TMR Mitigation Method Based on Readback Signal for Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn., Published, ISI-Impact 1.83.
9. Lin M. M. Myint, and C. Warisarn, "Equalizer Design for Bit-Patterned Media Recording System Based on ISI and ITI Estimations by Cross Correlation Functions" in AMM Journal, Published. Q3 SJR.
10. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording", in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
11. C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
12. A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Two-Dimensional Coding Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.
13. P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" IEEE Trans. Magn., ISI-Impact 1.83.
14. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System" in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.
15. C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative Inter-Track Interference Mitigation Technique for Two-Dimensional Magnetic Recording Systems" in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.



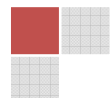
16. S. Chandrasekaran, P. Supnithi, C. Warisarn, and D. Bai, "Spinning Disk Test Study on Erase Band and Write Width for Shingled Magnetic Recording" in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.
17. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Recorded-Bit Patterning Scheme with Accumulated Weight Decision for Bit Patterned Media Recording" in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
18. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Iterative Timing Recovery with the Split-Preamble Strategy for Coded Partial Response Channels." IEICE Trans. Elec., vol. E94-C, no. 3, Mar. 2011. pp. 368-374, Impact 0.53.

International conference publications

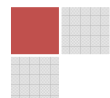
1. K. Buehing, V. Brusyatras, C. Warisarn, S. Koonkarnkhai, and P. Kovintavewat, "A Performance Improvement of a Rate-5/6 2D Modulation Code in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
2. W. Teeraruangchaisri, C. Kanjanakunchorn, C. Warisarn, and C. Jettanasen, "Soft Information Adjustment Scheme of a Rate-4/5 2D Modulation Code in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
3. W. Ruksavong, W. Busyatras, C. Warisarn, L. Myint, and P. Kovintavewat, "Estimate Track Mis-registration Levels using an Energy Ratio Finding Technique in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
4. W. Tipcharoen, C. Warisarn1, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," in Proceeding MORIS 2015 Penang Malaysia.
5. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding of 2D Modulation Codes for Bit-Patterned Media Recording," in Proceeding Intermag-CON 2015, Beijing, China.
6. S. Chandrasekaran, P. Supnithi, and C. Warisarn, "Spinning Disk Test Study in Determining the Optimum Writers and Shingled Track Pitch for Shingled Magnetic Recording," in Proceeding Intermag-CON 2015, Beijing, China.
7. C. Kanjanakunchorn and C. Warisarn, "Soft-Output Decoding Approach of a Rate-4/5 CITI Code in Magnetic Recording Systems," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.



8. W. Busyatras, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple TMR Mitigation Approach for Bit Patterned Media Recording Based on Readback Signals," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
9. C. Boonlom, A. Arrayangkool, C. Warisarn, "A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMR Channel with SRBP Method," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
10. Lin Min Min Myint, Chanon Warisarn, Wiparat Busyatras, and Piya Kovintavewat, "Single-Track Equalization Method with TMR Correction System based on Cross Correlation Functions for Patterned Media Recording System" in Proceeding ICAPMA 2015, Pattaya, Thailand.
11. P. Ketwong, A. Arrayangkool, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple Crossover-based Coding Technique for ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording," in Proc. ITC-CSCC 2014, Siem Reap, Cambodia, Dec. 9-12, 2014
12. Lin M. M. Myint and C. Warisarn, "Estimate ITI information using Cross Correlation Functions in Equalizer Designing Process for BPM Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
13. N. Bumrungrat, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Magnetized Grain Modeling Method Based on the Image of Real Magnetic Grains for Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
14. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A 2D-Interference Mitigation with a Multitrack Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
15. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple A Simple Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand, May. 15-17 2013.
16. S. Koonkarnkhai, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Iterative Decoding for Bit-Patterned Media Recording Channels with Insertion/Deletion Errors," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.
17. P. Kovintavewat, C. Warisarn, and C. Tantibundhit, "Performance of Interpolated Timing Recovery in Perpendicular Magnetic Recording Channel," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.



18. T. Losuwan, C. Warisarn, L. M. Myint, and P. Supnithi, "A Study of Iterative Detection Method for Four-Grain Based Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. of APMRC 2012, Singapore, Oct 31- Nov 2, 2012
19. Losuwan T., Warisarn C., and Kovintavewat P. "A Study of 2D detection for Two-Dimensional Magnetic Recording" in Proc. of ITC-CSCC 2012, Sapporo, Japan, Jul. 15-18 2012.
20. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" ECTI-CIT Trans., Nov. 2012.
21. Warisarn C., Supnithi P. "A Novel IIR Equalizer Design for Perpendicular Recording Systems with Media Jitter Noise." KKU Res. J., 17(3), Jun. 2012. pp. 339-348.
22. M. Lin, P. Supnithi, C. Warisarn, and N. Puttarak, "Off-track detection in magnetic recording based on the readback signals," in Proc. INTERMAG 2012, Vancouver, Canada, May 7 - 11, 2012.
23. Warisarn, P. Kovintavewat, and P. Supnithi, "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System," in Proc. of ISPACS 2011, Chiangmai, Thailand, Dec 7 - 9, 2011.
24. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System" in Proc. of ISPACS 2011, Chaingmai, Thailand, Dec. 2011.
25. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery in Perpendicular Magnetic Recording." in Proc. of PMRC 2010, Sendai, Japan, Oct. 2010.
26. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery for Coded Partial Response Channels." in Proc. of ICT2010, Bangkok, Thailand, Aug. 2010.
27. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Iterative Timing Recovery with the Split-Preamble Strategy for Magnetic Recording Channels." IEEE MMM-Intermag Conference (INTERMAG2010), Washington DC, USA, Jan. 2010. pp. GH-09.





T143715