



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การตรวจจับแบบวนซ้ำสองมิติและการเข้ารหัสแบบสองมิติ
สำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

**Iterative 2D Detection and 2D Coding Scheme for
Two-Dimensional Magnetic Recording (TDMR) Channels**

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วริสาร

กรกฎาคม 2560

สัญญาเลขที่ TRG5880011

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การตรวจจับแบบวนซ้ำสองมิติและการเข้ารหัสแบบสองมิติ
สำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
Iterative 2D Detection and 2D Coding Scheme for
Two-Dimensional Magnetic Recording (TDMR) Channels

ผู้วิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วริสาร
สังกัด วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและต้นสังกัด

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว.และต้นสังกัด ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ขอขอบคุณ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการจัดเก็บข้อมูลในยุคปัจจุบัน ทั้งในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะหรือแม้แต่ระบบคลาวด์ (Cloud System) ที่ใช้เก็บข้อมูลขนาดใหญ่ยังต้องอาศัยฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในการจัดเก็บข้อมูล ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอันดับหนึ่งของโลกตลอดระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา สร้างมูลค่าหลายพันล้านให้ประเทศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีข้อจำกัดบางประการที่เราไม่สามารถเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้สูงขึ้นไปได้ เพื่อเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กต่อตารางนิ้วให้มากขึ้นนั้น หลักๆ แล้วจะมี 2 วิธีที่จะสามารถเพิ่มความหนาแน่นได้ นั่นก็คือการเพิ่มความหนาแน่นของบิต (KBPI) และการเพิ่มความหนาแน่นของแทร็ก (KTPI) ซึ่งก็จะมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มความหนาแน่นดังกล่าว เช่น การออกแบบหัวเขียนและหัวอ่าน การพัฒนาในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูล รวมถึงการพัฒนาวิธีการในการเขียนและอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึก สิ่งที่เป็นอีกประการหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญ นั่นก็คือการประมวลผลสัญญาณข้อมูลหลังจากการอ่านข้อมูลจากสื่อบันทึกข้อมูลกลับคืนมา

ดังนั้นโครงการนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเข้ารหัสข้อมูลรวมถึงการตรวจจับข้อมูลแบบสองมิติทั้งที่เป็นแบบฮาร์ดและที่เป็นแบบซอฟต์แวร์ (hard and soft encoding) ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังได้นำเสนอรูปแบบข้อมูลที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบันทึกข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการเข้ารหัสต่อไป นอกจากนั้นแล้ววิธีที่เราได้นำเสนอยังสามารถตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI ได้อีกด้วย

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานที่ได้จากการวิจัยในโครงการนี้จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติ ภาควิชาการที่เกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและผู้ที่เกี่ยวข้อง หากรายงานเล่มฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วรสาร
(ผู้รับทุนโครงการทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่)

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีบทของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก.....	5
บทที่ 3 การตรวจจับแบบวนซ้ำและการเข้ารหัสแบบสองมิติ.....	22
บทที่ 4 บทสรุป.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	45

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กำลังก้าวเข้าสู่ข้อจำกัดของการเพิ่มความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ของเทคโนโลยีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เป็นไปได้ว่าการอ่านและการเขียนข้อมูลแบบซ้อนทับ (single tracks) บนสื่อบันทึกข้อมูลในปัจจุบันจะสามารถเพิ่มความจุของข้อมูลเชิงพื้นที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงให้ความสำคัญไปที่เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กอีกหนึ่งประเภทที่เราเรียกว่า “การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (two dimensional magnetic recording, TDMR)” เป็นหลัก ที่ซึ่งสื่อบันทึกข้อมูลที่ใช้อยู่กับเทคโนโลยีปัจจุบันจะถูกนำมาเขียนและอ่านในรูปแบบสองมิติเพื่อเพิ่มความจุของข้อมูลให้ได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมากจึงส่งผลให้ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติต้องเผชิญกับปัญหาของการแทรกสอดสองมิติ (two-dimensional interference) ที่ไม่เพียงแต่ต้องเผชิญกับผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference, ISI) แต่ระบบยังต้องเผชิญกับผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter-track interference, ITI) ด้วยเช่นกัน ถ้าผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าวไม่ได้รับการแก้ไขหรือป้องกันก็จะมีผลอย่างมากต่อระบบการประมวลผลสัญญาณโดยรวม

ดังนั้นเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้ก็คือการออกแบบและพัฒนาตัวตรวจจับสองมิติวนซ้ำและวิธีการเข้ารหัสมอดูเลชันสองมิติ นอกจากนั้นแล้วยังมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาตัวตรวจจับและการเข้ารหัสให้สามารถทำงานร่วมกันได้ในระบบของการวนซ้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบสามารถจัดการกับผลกระทบที่เกิดจากทั้ง ISI และ ITI ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ เมื่อโครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์เราคาดหวังว่าเราจะสามารถสร้างนวัตกรรมในการการประมวลผลสัญญาณที่ทำงานร่วมกันระหว่างตัวตรวจจับสองมิติกับรหัสมอดูเลชันที่เราได้พัฒนาขึ้นสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติต่อไป

ABSTRACT

The hard disk drive (HDD) industry is approaching the limit of the data storage density possible by reading and writing single tracks on conventional magnetic disks. The proposed research project considers an alternate approach called “two dimensional magnetic recording (TDMR)”, where in bits are read and written in two dimensions on conventional magnetic disks.

Due to a high recording density, the readback signal of TDMR systems is inevitably corrupted by the two-dimensional (2D) interference consisting of inter-symbol interference (ISI) and inter-track interference (ITI). If precautions are not taken, the 2D interference can significantly degrade the overall system performance.

Therefore, our research goal is to design and develop the iterative 2D detection, 2D modulation coding schemes, and also focuses on how to combine the iterative 2D detection and the 2D modulation code to combat both the severe ISI and ITI in TDMR channels. When completed, this effort is expected to produce innovative, the combination methods of developed 2D detector and 2D modulation coding suitable for TDMR systems.

บทที่ 1

บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) เป็นผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญต่อภาคการส่งออกของประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในปี พ.ศ. 2554 ได้มีประมาณการว่าประเทศไทยสามารถส่งออกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และส่วนประกอบได้มากถึง 500,000 ล้านบาท และก่อให้เกิดการจ้างงานในอุตสาหกรรมมากถึง 150,000 อัตรา [1] ดังนั้นเพื่อเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้กับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในประเทศ ซึ่งประกอบไปด้วยบริษัทผู้ผลิตชั้นนำของโลก 2 ราย คือ บริษัท ซีเคเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิทัล (ประเทศไทย) จำกัด กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ร่วมกับผู้เกี่ยวข้องทั้งจากภาคเอกชนและสถาบันการศึกษาได้ดำเนินการจัดตั้งคณะกรรมการพัฒนาวิสาหกิจฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นภายใต้การดำเนินการของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการสนับสนุนและส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมดังกล่าวในประเทศไทยให้มีความเข้มแข็ง โดยทางเนคเทคจึงได้จัดเตรียมแผนการส่งเสริมด้านต่าง ๆ ไว้หลายโครงการ ได้แก่ โครงการพัฒนาหลักสูตรและบุคลากรทางด้านเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, โครงการร่วมลงทุนในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, และโครงการจัดตั้งสถาบันวิจัยและพัฒนาทางด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นต้น ปัจจุบันนี้ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศที่ส่งออกอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อันดับหนึ่งของโลก ดังนั้นงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะช่วยทำให้บริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เห็นว่าประเทศไทยมีบุคลากรที่มีความสามารถทางด้านเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และรัฐบาลสนับสนุนอุตสาหกรรมทางด้านนี้ เพื่อเป็นแรงจูงใจให้บริษัทเหล่านี้ย้ายฐานการผลิตและศูนย์ออกแบบผลิตภัณฑ์เข้ามาในประเทศไทย (ปัจจุบันส่วนมากอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา) ซึ่งช่วยทำให้เกิดการลงทุนในประเทศมากขึ้นและมีการจ้างงานเพิ่มขึ้นตามลำดับ

การบันทึกข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลเป็นที่นิยมใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้อมูลมัลติมีเดีย (multimedia) ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลแบบดิจิทัล ตัวอย่างเช่น ไฟล์รูปภาพ ไฟล์ภาพยนตร์ และไฟล์เพลง ซึ่งถือว่าเป็นไฟล์ที่มีขนาดใหญ่และใช้พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลที่สูง โดยข้อมูลดิจิทัลเหล่านี้จะถูกจัดเก็บลงอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บข้อมูล เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, ซีดี (CD: compact disc), ดีวีดี (DVD: digital versatile disc), หรือโซลิดสเตตไดรฟ์ (SSD: solid state drive) เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาให้อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลให้มีความจุสูงขึ้น เพื่อรองรับการจัดเก็บข้อมูลในอนาคต ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถือว่าเป็นตัวเลือกหนึ่งในการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีความจุข้อมูลสูงมาก และเมื่อเทียบกับราคาต่อ

หน่วยกิกะไบต์ (Giga byte) ถือว่ามีราคาถูกลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การจัดเก็บข้อมูลแบบอื่นๆ นอกจากนี้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังเป็นอุปกรณ์การบันทึกแบบถาวร (permanent recording) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการกู้ข้อมูล เมื่ออุปกรณ์ส่วนใดส่วนหนึ่งเกิดชำรุด ดังนั้นในปัจจุบันนี้ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ได้มีไว้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ยังมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์ กล้องวิดีโอ แบบดิจิทัล กล้องวงจรปิด และเครื่องเล่นเพลง เป็นต้น

สำหรับการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เริ่มต้นจากเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวนอน (LMR: longitudinal magnetic recording) ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กขนานกับสื่อบันทึก และเมื่อเทคโนโลยี LMR ถึงขีดจำกัดในการเพิ่มความจุข้อมูล เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR: perpendicular magnetic recording) จึงได้เข้ามาแทนที่ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสื่อบันทึก โดยเทคโนโลยี PMR ยังใช้อยู่ในปัจจุบันและมีความจุเชิงพื้นที่สูงสุดประมาณ 1 Tb/in^2 [2] ซึ่งกำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดในการเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ นั่นคือการเพิ่มความจุเชิงพื้นที่สำหรับเทคโนโลยี PMR จำเป็นต้องลดขนาดของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) ในสื่อบันทึกหรือลดจำนวนเกรนต่อการบันทึกข้อมูลหนึ่งบิต แต่เนื่องจากการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กจะทำให้เกิดความไม่เสถียรของความเป็นแม่เหล็ก ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าข้อจำกัดทางด้านซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic limit) [2,3] ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการบันทึกแบบใหม่เข้ามาแทนที่เทคโนโลยี PMR [2] เช่น เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบการใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR: heat assisted magnetic recording) [4], เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ 2 มิติ (TDMR: two dimensional magnetic recording) [3], เทคโนโลยีการบันทึกแบบ BPMP (bit-patterned media recording) [5], ละล่าสุดคือเทคโนโลยีที่รวมเอา BPMP และ HAMR เข้ามาทำงานร่วมกันซึ่งเรียกว่าเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบจุด (HDMR: Heated-dot Magnetic Recording) [6] ซึ่งเชื่อว่าจะสามารถเพิ่มความจุได้สูงถึง 10 Tb/in^2 อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีเทคโนโลยี TDMR และเทคโนโลยี BPMP ในบางส่วนด้วย ซึ่งสามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้สูงถึง $4\text{-}10 \text{ Tb/in}^2$ [2,5]

สำหรับเทคโนโลยี BPMP สื่อบันทึกจะถูกจัดระเบียบให้มีลักษณะเป็นไอแลนด์ (island) สำหรับบันทึกข้อมูลแต่ละบิต (หนึ่งไอแลนด์คือหนึ่งกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก) ซึ่งแต่ละไอแลนด์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดน้อยกว่า 15 นาโนเมตร [5] โดยสื่อบันทึกจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (นั่นคือ ไอแลนด์สำหรับบันทึกข้อมูล) และส่วนที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) คือบริเวณรอบๆ ของไอแลนด์ เนื่องจากระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูลมีระยะที่ใกล้เคียงกันอย่างมาก (ระดับนาโนเมตร) ดังนั้น สัญญาณอ่านกลับ (readback signal) ในกระบวนการอ่านข้อมูลนอกจากจะเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference, ISI) แล้ว ยัง

ก่อให้เกิดเกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter-track interference, ITI) [5] อีกด้วย ซึ่งเหตุการณ์ทั้งสองที่กล่าวมานั้นได้ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบ BPMPR เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปการจัดการและลดผลกระทบที่เกิดจาก ISI/ITI ด้วยการเข้ารหัสข้อมูลแบบสองมิติด้วยรหัสมอดดูเลชัน การออกแบบและพัฒนาตัวตรวจหา (detector) ที่ทำงานสอดคล้องกับรหัสที่ได้ทำการออกแบบในระบบ BPMPR รวมถึงการประมาณค่าและบรรเทาผลกระทบการอ่านนอกแทร็กในระบบการบันทึกข้อมูล BPMPR ด้วย

สำหรับเทคโนโลยี TDMR เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สูงเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนเทคโนโลยีของสื่อบันทึกข้อมูลใหม่ยังคงใช้สื่อบันทึกข้อมูลของ PMR ไม่มีการเปลี่ยนเทคโนโลยีของหัวเขียนแต่ใช้เทคนิคการเขียนซ้อนทับ (shingled-writing) [7] เพื่อเขียนแทร็กข้อมูลให้เล็กลง ไม่มีการเปลี่ยนเทคนิคการอ่านข้อมูลใหม่ แต่เทคโนโลยีนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การประมวลผลสัญญาณแบบ 2 มิติเป็นหลัก เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ได้จากกระบวนการอ่านจะมีความรุนแรงเป็นอย่างมาก ดังนั้นอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณจำเป็นต้องทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น การเข้ารหัสข้อมูลต้องทำงานสอดคล้องกับตัวตรวจจับ ตัวตรวจจับแต่ละแทร็กข้อมูลต้องทำงานสอดคล้องกัน การออกแบบอีควอไลเซอร์ต้องถูกออกแบบร่วมกันในหลายๆ แทร็กข้อมูล เป็นต้น

ดังนั้นเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้ก็คือการออกแบบและพัฒนาตัวตรวจจับสองมิติวนซ้ำและวิธีการเข้ารหัสมอดดูเลชันสองมิติ นอกจากนั้นแล้วยังมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาตัวตรวจจับและการเข้ารหัสให้สามารถทำงานร่วมกันได้ในระบบของการวนซ้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบสามารถจัดการกับผลกระทบที่เกิดจากทั้ง ISI และ ITI ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กทั้งแบบสองมิติและแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียได้ เมื่อโครงการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์เราคาดหวังว่าเราจะสามารถสร้างนวัตกรรมในการประมวลผลสัญญาณที่ทำงานร่วมกันระหว่างตัวตรวจจับสองมิติกับรหัสมอดดูเลชันที่เราได้พัฒนาขึ้นสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กความหนาแน่นข้อมูลสูงต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (TDMR) และแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMPR) รวมถึงศึกษาวิธีการเขียน/อ่านข้อมูลของระบบการบันทึกข้อมูลทั้งสองระบบ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติและแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

3. เพื่อศึกษาวิธีการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบ 2 มิติ (2D modulation code) ที่ใช้สำหรับการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างบิตและการแทรกสอดระหว่างแทร็กในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติและแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

4. เพื่อศึกษาวิธีการลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กได้

5. เพื่อพัฒนาการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบสองมิติแบบใหม่ที่สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็กในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติและแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย พร้อมทั้งพัฒนาตัวตรวจจับที่ทำงานสอดคล้องกับคำรหัสที่ได้ทำการออกแบบ

6. เพื่อศึกษาการประมาณค่าการอ่านนอกแทร็ก (track mis-registration, TMR) ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียรวมถึงการศึกษาวิธีการบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณจากสัญญาณอ่านกลับ

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR) และแบบสองมิติ (TDMR) ให้มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น รวมถึงศึกษาวิธีการเขียน/อ่านข้อมูลของระบบการบันทึกข้อมูลทั้งสองระบบ

2. ศึกษาและออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลที่ใช้สำหรับการลดผลกระทบการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่ได้มีการนำเสนอแล้วทั้งที่ใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติเพื่อนำมาศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะกับเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจ

3. ออกแบบและพัฒนาการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบสองมิติแบบใหม่สำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติที่มีสมรรถนะดีกว่าวงจรภาครับที่ได้มีการนำเสนอในปัจจุบัน

4. พัฒนาวิธีการลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กได้ทั้งในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติ

5. พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าการอ่านนอกแทร็ก (track mis-registration, TMR) ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียรวมถึงพัฒนาวิธีการบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณจากสัญญาณอ่านกลับ

6. เพื่อสร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถทางด้านการประมวลผลสัญญาณต่อภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

7. เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่พัฒนาได้ให้กับทางภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ภาคการศึกษา และผู้สนใจทั่วไป

บทที่ 2

ทฤษฎีบทของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

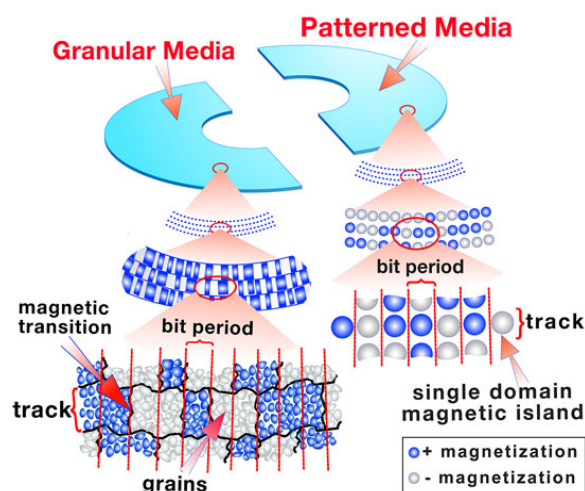
การเพิ่มความจุเชิงพื้นที่สำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีการบันทึกข้อมูลด้วยความหนาแน่นเชิงพื้นที่แบบสูงยิ่ง เช่น ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR) [5,8] และ ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ (TDMR) [3] จำเป็นต้องเผชิญกับปัญหาในหลายเรื่อง อาทิเช่น สัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) ทั้งความผันผวนของตำแหน่งและขนาดของเกาะข้อมูล การอ่านข้อมูลนอกแทร็ก (track miss-registration, TMR) ผลการทบทที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญญาณ (ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) [5] ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถจัดการได้ด้วยระบบการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะได้นำเสนออัลกอริทึมและวิธีการในการประมวลผลสัญญาณพร้อมทั้งเทคนิคต่างๆ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกข้อมูล เช่น เทคนิคการลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก เทคนิคการประมาณค่าและการบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการอ่านข้อมูลนอกแทร็ก และวิธีการลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญญาณและการแทรกสอดระหว่างแทร็ก เป็นต้น

โดยทั่วไปการถอดรหัสแบบวนซ้ำ (iterative decoding) นิยมใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กเพราะแต่ละรอบของการวนซ้ำจะสามารถทำให้อัตราข้อผิดพลาดบิตลดลง ซึ่งประกอบด้วยวงจรตรวจหาวิเทอร์บีแบบซอฟต์ (SOVA: soft-output Viterbi algorithm) [9] และวงจรถอดรหัสตรวจสอบสถานะคู่หรือคี่แบบความหนาแน่นต่ำ (LDPC: low-density parity check) [10] โดยที่ทั้งสองวงจรจะทำการแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบซอฟต์ (soft information) ในแต่ละรอบของการวนซ้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดข้อผิดพลาดจากการแทรกสอดระหว่างสัญญาณและการแทรกสอดระหว่างแทร็กอย่างรุนแรง ส่งผลให้ข่าวสารแบบซอฟต์จากวงจร SOVA ที่มีข้อผิดพลาดจากการแทรกสอดที่รุนแรงถูกส่งเข้าไปยังวงจรถอดรหัส LDPC ซึ่งจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากที่ด้านขาออกของวงจร LDPC ดังนั้นข้อมูลที่ส่งจากวงจรถอดรหัส LDPC กลับไปยังวงจรตรวจหา SOVA ในแต่ละรอบของการวนซ้ำ ก็จะมีข้อมูลผิดพลาดแฝงอยู่เสมอ ดังนั้นถ้าไม่มีการแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้ก่อนส่งข่าวสารแบบซอฟต์ไปยังวงจรตรวจหา LDPC ก็จะทำให้กระบวนการถอดรหัสแบบวนซ้ำจะไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญญาณและการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงนี้ได้เลย ดังนั้นงานวิจัยนี้เราจึงได้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบและพัฒนากลยุทธ์การเข้ารหัสแบบซอฟต์เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบวนซ้ำได้

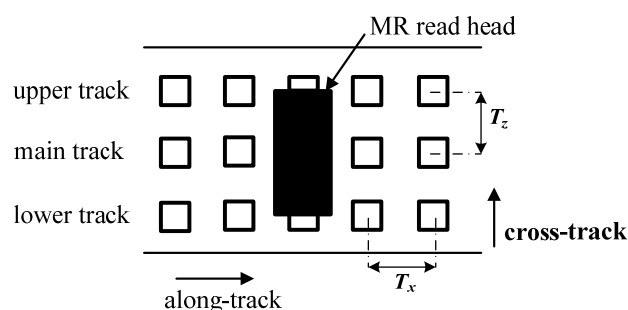
2.1 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

2.1.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ

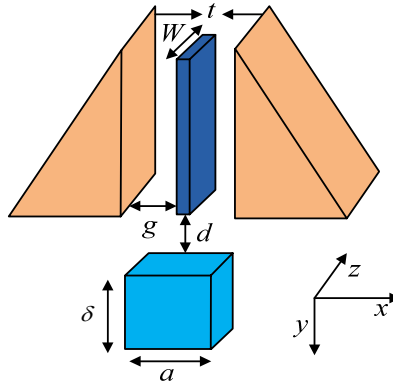
เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ BPMPR เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพราะระบบ PMR ไม่สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้เนื่องจากปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยระบบ BPMPR สามารถเพิ่มความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ได้สูงถึง 4 Tb/in^2 หรือมากกว่า เมื่อใช้ร่วมกับเทคโนโลยีความร้อนเข้าช่วย [2] รูปที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างสื่อบันทึกของระบบ BPMPR และระบบ PMR โดยระบบ BPMPR จะมีรูปแบบของสื่อบันทึกที่มีความแน่นอน ซึ่งมีลักษณะเป็นเกาะข้อมูลหรือไอแลนด์เชิงแม่เหล็ก (magnetic island) โดยแต่ละไอแลนด์จะใช้เกรนแม่เหล็ก 1 เกรนและมีขนาดที่น้อยกว่า 20 นาโนเมตร โดยจะถูกวางบนวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic material) อย่างเป็นระเบียบ [5, 8] สำหรับหัวเขียนและหัวอ่านจะใช้แบบเดียวกันกับระบบการบันทึกแบบทั่วไป



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบสื่อบันทึก PMR กับสื่อบันทึกแบบ BPMPR [11,12]



รูปที่ 2.2 การอ่านของหัวอ่านแบบ MR บนสื่อบันทึกของระบบ BPMPR [12]



รูปที่ 2.3 เรขาคณิตของหัวอ่านแบบ MR และไอแลนด์ [11]

ข้อดีของระบบ BPMP คือช่วยเพิ่มความจุเชิงพื้นที่และปราศจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะ (transition noise) และการเลื่อนบิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear bit shift) [5] อย่างไรก็ตามระบบ BPMP ยังมีปัญหาที่เกี่ยวกับระบบการประมวลผลสัญญาณ คือ ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก และการอ่านนอกแทร็กข้อมูล (track mis-registration, TMR) [5, 11-16] และปัญหาที่สำคัญคือการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดบิตในกระบวนการตรวจหา รวมทั้งรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดแบบทั่วไปก็ไม่สามารถจัดการกับข้อผิดพลาดที่เกิดจากการการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) นี้ได้ดีพอ

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการอ่านของหัวอ่านแบบ MR (magnetoresistive) บนสื่อบันทึกของระบบ BPMP โดยที่ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางไอแลนด์หนึ่งถึงกึ่งกลางไอแลนด์หนึ่งที่ติดกันในทิศทางตามแทร็ก (along-track) มีระยะเท่ากับ T_x เรียกว่าระยะบิต (bit period) และระยะห่างระหว่างกึ่งกลางไอแลนด์ที่ติดกันในทิศทางข้ามแทร็ก (cross-track) มีระยะเท่ากับ T_z เรียกว่าระยะแทร็ก (track pitch) ในทางปฏิบัติระบบ BPMP มีการแทรกสอดอยู่ด้วยกัน 2 ทิศทาง คือ การแทรกสอดระหว่างสัญญาณ (ISI) ซึ่งเกิดจากบิตข้างเคียงในทิศทางตามแทร็ก และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) เป็นผลกระทบจากบิตข้างเคียงในทิศทางข้ามแทร็ก โดยการแทรกสอดทั้งสองอย่างนี้เรียกรวมกันว่าการแทรกสอดแบบ 2 มิติ (2D interference) ซึ่งส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อระบบการบันทึกข้อมูล BPMP

โดยทั่วไปแบบจำลองของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จากหัวอ่านมีความละเอียดค่อนข้างสูงและสร้างได้ยาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำแบบจำลองสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Nabavi [5,11] จึงได้ทำการประมาณค่าสัญญาณพัลส์สองมิติแบบเกาส์เซียน โดยพิจารณาจากเรขาคณิตของหัวอ่านแบบ MR และไอแลนด์แสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อ t คือ ความหนาของหัวอ่าน, W คือ ความกว้างของหัวอ่าน, g คือ ระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับชิลด์ (shield) และ d คือระยะบินของหัวอ่าน (fly height) สำหรับพารามิเตอร์ของไอแลนด์ a คือความกว้างของไอแลนด์เมื่อไอแลนด์มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม

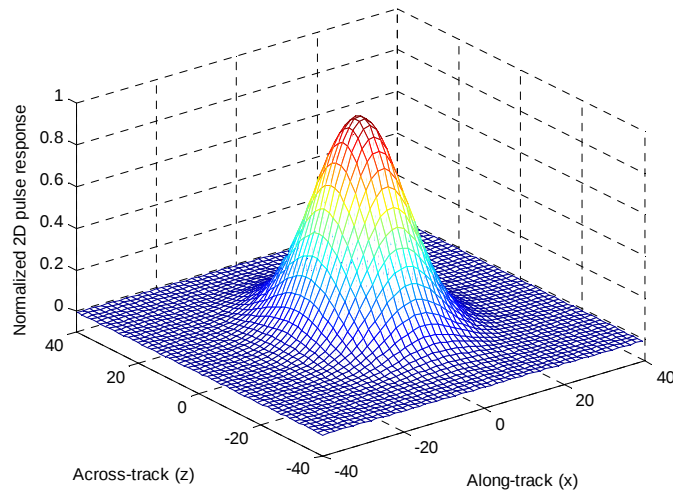
จัตุรัส (squared island), และ δ คือ ความสูงของไอแลนด์ โดยที่สมการที่ได้จากการประมาณค่าผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติแบบเกาส์เซียนที่ได้จากพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2.1 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$H(z, x) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{w_x^2} + \frac{z^2}{w_z^2} \right) \right\} \quad 2.1$$

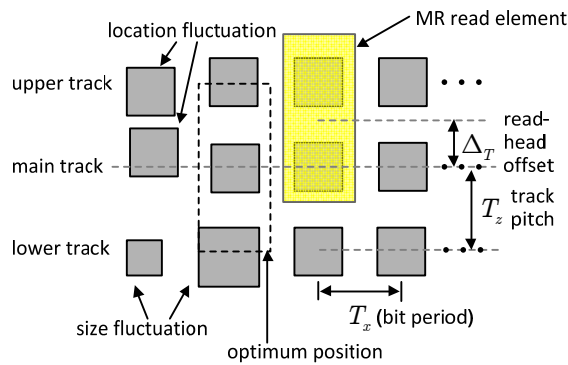
เมื่อ A คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1, $w_x = \text{PW50}_{\text{along}}/2.3548$, $w_z = \text{PW50}_{\text{cross}}/2.3548$, $\text{PW50}_{\text{along}}$ คือค่า PW50 ของสัญญาณพัลส์ในทิศทางตามแตร็ก, $\text{PW50}_{\text{cross}}$ คือค่า PW50 ของสัญญาณพัลส์ในทิศทางข้ามแตร็ก, และ 2.3548 คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า PW50 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน [11] รูปที่ 2.4 แสดงผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จากการประมาณค่าแบบเกาส์เซียนในสมการที่ 2.1 โดยที่ผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จะสอดคล้องกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหัวอ่าน MR และสื่อบันทึกของระบบการบันทึก BPMR

Parameter	Symbol	Default value (nm)
Square island	a	11
Thickness	δ	10
Fly height	d	10
Thickness of the MR head	t	4
Width of the MR head	W	16
Gap to gap width	g	16
Along-track PW50	w_x	19.8
Cross-track PW50	w_z	24.8



รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สองมิติที่ประมาณค่าแบบเกาส์เซียน

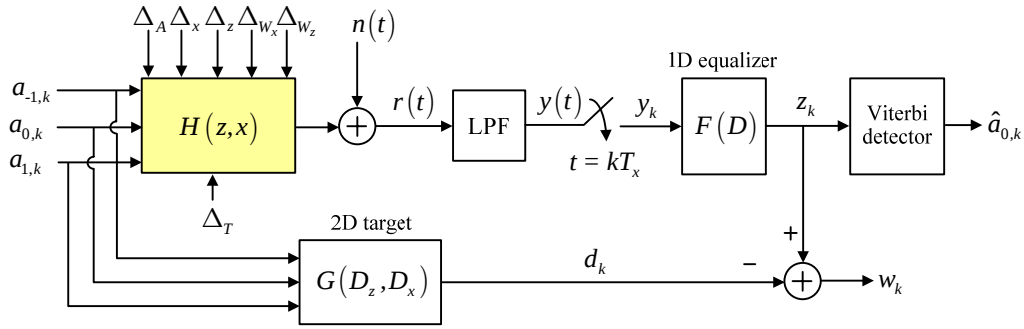


รูปที่ 2.5 รูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย

รูปที่ 2.5 แสดงปัญหาจากสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกของระบบ BPMP โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด (amplitude fluctuation) ซึ่งเกิดขึ้นจากขนาดของแต่ละไอแลนด์ที่ไม่เป็นเอกรูป (non-uniform) และความผันผวนของตำแหน่ง (location fluctuation) ซึ่งเกิดจากไอแลนด์ที่วางอยู่บนวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กมีการวางตัวที่ไม่เป็นระเบียบ สำหรับผลกระทบจาก TMR เกิดจากหัวอ่านเคลื่อนที่ออกจากแทร็กหลัก (main track) ไปในทิศทางข้ามแทร็กแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อ Δ_T คือระยะแทร็กออฟเซต (track offset) โดยกำหนดจาก [5,11]

$$\text{TMR} = \frac{\Delta_T}{T_z} \times 100\% \quad 2.2$$

ซึ่งสมการการประมาณค่าผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ $H(z,x)$ ในสมการ 2.1 ที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและผลกระทบจาก TMR สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [5,12]



รูปที่ 2.6 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึก BPMPR กับผลกระทบจากสื่อบันทึกและ TMR

$$H(z - \Delta_T, x) = (A + \Delta_A) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + \Delta_x}{c(w_x + \Delta_{w_x})} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_z}{c(w_z + \Delta_{w_z})} \right)^2 \right] \right\} \quad 2.3$$

เมื่อ Δ_A คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด, Δ_x คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวตามแตรีก, Δ_z คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวข้ามแตรีก, c คือค่าคงตัวมีค่าเท่ากับ $1/2.3548$, Δ_{w_x} คือ ความผันผวนของ PW50 ในทิศทางตามแตรีก, และ Δ_{w_z} คือ ความผันผวนของ PW50 ในทิศทางข้ามแตรีก โดยสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก $x\%$ หมายถึงตำแหน่งและขนาดของไอแลนด์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มจากค่าปกติไปเป็นปริมาณ $x\%$ โดยมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 เมื่อ σ คือ ร้อยละของระยะ Tx โดยที่ Δ_A , Δ_{w_x} และ Δ_{w_z} เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของความผันผวนแอมพลิจูด Δ_x และ Δ_z เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของความผันผวนตำแหน่ง โดยทั่วไปคุณภาพของสัญญาณอ่านกลับและสมรรถนะของระบบ BPMPR จะขึ้นอยู่กับผลกระทบต่างๆ เหล่านี้

รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR ที่มีผลกระทบจากสื่อบันทึกและ TMR เมื่อกำหนดให้ $a_{m,k} \in \{-1, 1\}$ คือ ลำดับข้อมูลอินพุต และกำหนดให้ $m = 0$ คือ ลำดับข้อมูลอินพุตของแตรีกกลาง และ $m = -1$ และ 1 คือลำดับข้อมูลอินพุตของแตรีกบนและแตรีกล่างตามลำดับ ถูกส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณ BPMPR ที่มีผลตอบสนองช่องสัญญาณแบบสองมิติ $H(z, x)$ ตามสมการที่ 2.3 ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ $r(t)$ ที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและ TMR สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$r(t) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{m,k} H(-mT_z - \Delta_T, x - kT_x) + n(t) \quad 2.4$$

เมื่อ $H(z, x)$ คือ ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ, Δ_T คือ ระยะออฟเซตของหัวอ่าน, $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (additive white Gaussian noise, AWGN) ที่มีความหนาแน่น

สเปกตรัมกำลัง (power spectrum density, PSD) แบบสองด้านเท่ากับ $N_0/2$ สมการที่ 2.4 ถือว่าเป็นแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR ที่ต่อเนื่องทางเวลา

ณ วงจรภาครับ สัญญาณอ่านกลับที่ด้านขาออกของหัวอ่าน $r(t)$ จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter, LFP) แบบบัตเตอร์เวิร์ธอันดับที่ 7 (7th order Butterworth) ทำให้ได้สัญญาณ $y(t)$ และถูกทำการซักรตัวอย่าง (sampling) สัญญาณ ณ เวลา $t = kT_x$ ทำให้ได้ลำดับข้อมูล $\{y_k\}$ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังวงจรอีควอไลเซอร์เพื่อปรับคุณสมบัติของสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ตที่ต้องการ และลำดับข้อมูล $\{z_k\}$ จะถูกส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) [17] เพื่อหาลำดับข้อมูล $a_{0,k}$ ที่เป็นไปได้มากที่สุด

นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายต่อการทำแบบจำลองและการวิเคราะห์ระบบ จะนิยมใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งสร้างได้จากการซักรตัวอย่าง ณ เวลาที่ระยะของบิต (T_x) ของสัญญาณอ่านกลับ ทำให้ได้สัญญาณอ่านกลับที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาดังนี้

$$r_k = r(t)|_{t=kT_x} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N a_{m,n} H(-m, k-n) + n_k \quad 2.5$$

เมื่อ n_k คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกและ $H(m,n)$ คือ สัญญาณพัลส์แบบสองมิติที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ได้จากการซักรตัวอย่างสัญญาณพัลส์ $H(z,x)$ ในสมการที่ 2.3 ณ เวลาที่เป็นจำนวนเท่ากับระยะบิต (T_x) และระยะแทร็ก (T_z) นั่นคือ $H(m,n) = H(mT_z, nT_x)$ สำหรับค่า $-M \leq m \leq M$ และ $-N \leq n \leq N$ เมื่อ $2M+1$ คือจำนวนแทร็กและ $2N + 1$ คือความยาวของช่องสัญญาณในทิศทางตามแทร็ก โดยทั่วไปช่องสัญญาณ BPMPR แบบไม่ต่อเนื่องจะแทนด้วยเมทริกซ์ $\mathbf{H}$ ที่มีค่าเท่ากับ

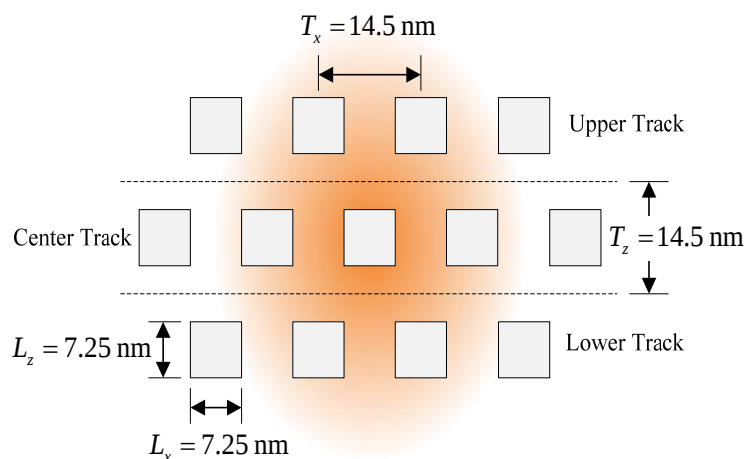
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{-1,-1} & h_{-1,0} & h_{-1,1} \\ h_{0,-1} & h_{0,0} & h_{0,1} \\ h_{1,-1} & h_{1,0} & h_{1,1} \end{bmatrix} \quad 2.6$$

เมื่อ $h_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ BPMPR สองมิติแบบไม่ต่อเนื่อง

2.1.2 การออกแบบระบบการบันทึกข้อมูล BPMPR ด้วยหลักการการซักรตัวอย่างข้อมูลเกินจริง

เพื่อหลีกเลี่ยงความต้องการการใช้หัวอ่านแบบแคบ (narrow track reader) ในการบันทึกข้อมูลแบบซ้อนทับที่มีค่าความหนาแน่นสูง เราจึงมีแนวคิดในการออกแบบวิธีการถอดรหัส (decoding schemes) สำหรับการอ่านข้อมูล 2 แทร็กในเวลาเดียวกันด้วยการใช้หัวอ่านแบบกว้างที่มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของแทร็กข้อมูล ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงจึงเป็นเรื่องยาก

ที่จะเอาชนะได้ สำหรับวิธีการหลีกเลี่ยง ITI นั้น สภาวะความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลในระบบ 2 แทร็ก ควรจะเว้นระยะสลับฟันปลาหรือแบบเยื้อง (staggered pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เทคนิคการถอดรหัสแบบสองมิติที่มีความเป็นไปได้สองแบบ คือ 1) การถอดรหัสแบบวนซ้ำ (recursive decoding) โดยการชักตัวอย่างข้อมูลสัญญาณอ่านกลับด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่สูงกว่าปกติ (oversampling) และ 2) การตรวจหาผลตอบสนองบางส่วนที่มีค่าความเป็นไปได้มากที่สุด (Partial Response Maximum Likelihood, PRML) เนื่องจากข้อมูล 2 แทร็กถูกอ่านขึ้นมาพร้อมกัน ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนข้อมูลจึงสูงกว่าการอ่านข้อมูลปกติแบบแทร็กเดียว อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นแต่หัวอ่านก็ต้องสามารถอ่านข้อมูลที่มีความละเอียดสูงด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดย ลดความยาวของ shield gap ให้เล็กลง ลดระยะห่างระหว่างสื่อบันทึกแม่เหล็กกับหัวอ่านให้ใกล้ขึ้น [18] เป็นต้น



รูปที่ 2.7 การวางบิตข้อมูลแบบเยื้อง (staggered pattern) ภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน (readhead sensitivity function) เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงให้สามารถรองรับการใช้เทคนิคการชักตัวอย่างเกินจริง

วิธีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการเขียนข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึกข้อมูลสามารถทำได้ดังนี้ [22] วิธีการแรกที่จะกู้ข้อมูลกลับคืนมาได้จากระบบ 2 แทร็ก ที่อ่านค่าได้ด้วยหัวอ่านแบบกว้างร่วมกับเทคนิค oversampling โดยรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงจุดของการชักตัวอย่างข้อมูล (sampling points) สำหรับการอ่านค่าใน 2 แทร็ก จุดของการชักตัวอย่างข้อมูลจะอยู่ในตำแหน่งตรงกลางด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้ เนื่องจากข้อมูลบิตทั้งสองจะถูกสร้างขึ้นภายในความยาวบิตของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้และอัตราการถ่ายโอนข้อมูลบิตจะเป็นสองเท่าของความยาวข้อมูลบิตในสภาวะแม่เหล็กใดๆ สัญญาณอ่านกลับจากทั้งสองตัวอย่างบริเวณด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็ก M_n

ในแต่ละแทร็กจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ความสัมพันธ์ได้นำเสนอด้วยสมการที่ 2.7 ที่จัดการกับข้อมูลผู้ใช้ A_n , สภาวะแม่เหล็ก M_n และสัญญาณอ่านกลับ R_n

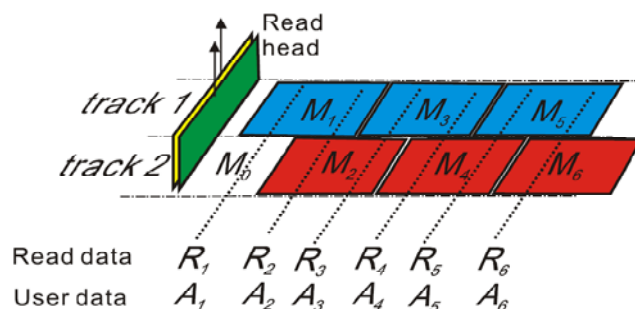
$$\begin{aligned} M_n &= A_n \\ R_n &= M_n + M_{n-1} \\ A_n &= R_n - M_{n-1} \end{aligned} \quad 2.7$$

จากรูปที่ 2.8 เราจะเห็นว่าถ้าหากทราบสถานะความเป็นแม่เหล็กของบิตก่อนหน้า เช่น M_n ว่าเป็นการบันทึกข้อมูลบิต “1” หรือ “-1” ลงไปแล้ว เมื่อเราอ่านข้อมูลย้อนกลับพร้อมกับชักตัวอย่างข้อมูลที่จุดที่เหลื่อมกันของแทร็กบนและแทร็กล่างเราจะได้ระดับของสัญญาณอ่านกลับทั้งหมด 3 กรณี 1) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “2” 2) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “-1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “-2” และ 3) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “บิตที่แตกต่างกัน” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “0” ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถออกแบบเป็นการเข้ารหัสก่อน (pre-decoder) ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [18]

ตารางที่ 2.2 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

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอผ่านช่องสัญญาณอุดมคติ ซึ่งยังไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากความผันผวนของบิตข้อมูล เช่น ความผันผวนของขนาดของบิตข้อมูล (size fluctuation) ความผันผวนของตำแหน่งของบิตข้อมูล (position fluctuation) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งไปที่การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว การออกแบบและพัฒนาช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นเสมือนจริง การออกแบบการเข้ารหัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากสื่อบันทึกข้อมูล รวมถึงการพัฒนาตัวตรวจจับเพื่อช่องสัญญาณ 2T2H [19] ด้วย



รูปที่ 2.8 การเขียนข้อมูลลงในสื่อบันทึกข้อมูลที่มีการวางตัวแบบเอียง [18]

2.2 ความก้าวหน้าและวิวัฒนาการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในปัจจุบันมีขีดจำกัดของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 1 Tb/in^2 ซึ่งอ้างอิงจากปรากฏการณ์แม่เหล็กพารายิ่งยวด (super-paramagnetic) และปัญหาสามอย่างในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก [20]-[22] ในปี 2008 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกนำเสนอเพื่อผลักดันให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้ข้ามขีดจำกัดดังกล่าวโดยยังคงใช้ส่วนประกอบเดิมในการบันทึกแบบปัจจุบัน การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเกิดจากการรวมกันของเทคโนโลยีการเขียนซ้อนทับร่วมกับการอ่านกลับและตรวจจับสองมิติ โดยมีเทคนิคคือการให้ข้อมูลแต่ละแพทริกมีความสัมพันธ์กัน

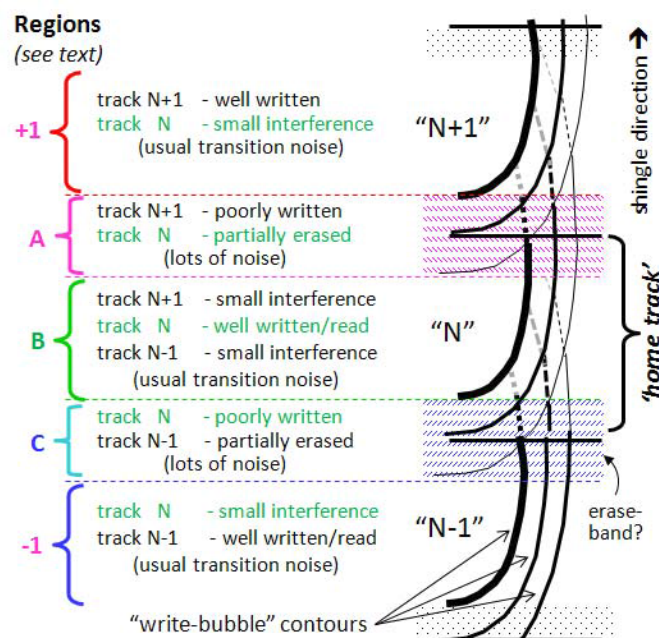
การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกถกเถียงว่าการใช้สนามหัวเขียนที่สูงและมีบริเวณกว้างจะสามารถลดเกรนแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลได้และยังทำให้การประมวลสัญญาณสองมิติมีความสามารถมากขึ้นด้วยการใช้เทคนิคอ่านตามแพทริกมาช่วยกับการอ่านในแนวขวางแพทริก ดังเดิม การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิตินำเสนอในเบื้องต้นว่าความจุของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก คือ “1 บิตต่อ 1 เกรน” แม้ว่าโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบไม่แน่นอน และเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีบทความนำเสนอความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมสูงสุด [3] บทความดังกล่าวได้จำลองการเขียนและการอ่านกลับรวมถึงการตรวจจับข้อมูลอย่างเหมาะสมที่สุด [23]-[25] ด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าที่เหมาะสมจะถูกลดลง 10%-30% อย่างไรก็ตามการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติก็ยังเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าจับตามอง ทั้งนี้เนื่องจากมีความเสี่ยงต่ำและความคุ้มค่าสูงกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ [2] ในหลายปีที่ผ่านมา เราได้เรียนรู้คุณลักษณะของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติมากมายเกี่ยวกับการเขียนแบบซ้อนทับและยังเข้าใจถึงกระบวนการอ่านแบบสองมิติและการปรับแก้/ตรวจจับที่จะสามารถนำจุดเด่นไปใช้ในการหักล้างจุดด้อยของความซับซ้อนของแผ่นบันทึกข้อมูลได้

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติถูกเน้นไปที่การอ่านจะต้องสำเร็จที่กึ่งกลางแพทริกแต่ละแพทริกที่เขียนแบบซ้อนทับ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งหัวอ่านเดี่ยวและหลายหัวอ่าน แพทริกข้อมูลอาจจะอยู่ชิดกันมากขึ้น ดังนั้นการแทรกสอดระหว่างแพทริกจะสูง ภาครับจะต้องประกอบด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตหลายส่วน ดังนั้นข้อสรุปในปัจจุบันคือการเน้นงานวิจัยไปที่การวิเคราะห์ข้อมูลอ่านกลับและการกำจัดการแทรกสอดระหว่างแพทริกที่สูงขึ้นอย่างมาก แนวคิดการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเน้นไปที่การอ่านแพทริกกลางของแต่ละแพทริกที่เขียนซ้อนทับกันหลายๆ แพทริก การกระทำดังกล่าวจะ

สำเร็จด้วยการอ่านหลาย ๆ ครั้งร่วมกับการใช้หน่วยความจำขนาดใหญ่ หรืออาจจะใช้หัวอ่านหลาย ๆ หัว ขนาดของแตรีกจะมีค่าเข้าใกล้ความกว้างของการอ่านมากขึ้น จึงอาจทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแตรีกที่มากขึ้นด้วย ในส่วนภาครับจำเป็นต้องใช้มัลติเฟลอินพุท-มัลติเฟลเอาท์พุทร่วมกับเป้าหมายทาร์เกต (Target) สองมิติและภาครับสองมิติตามลำดับ ภาครับอาจจะใช้ความรู้ทางสถิติของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลร่วมด้วย ในขณะที่แนวคิดถูกค้นคว้าลึกลงไป ข้อมูลเชิงลึกจะได้มาจากห้องสัญญาณเขียนอ่านเพื่อสนับสนุนการกู้ข้อมูลที่ผิดพลาด สิ่งที่น่าประหลาดใจคือผลสรุปในการวิจัยด้านนี้คืออุปกรณ์มีข้อดีที่เกิดจากการเฉลี่ยสัญญาณหลายๆ แตรีก นอกจากนี้ยังลดสัญญาณรบกวน ซึ่งดีกว่าการอ่านจากการแทรกสอดระหว่างแตรีก

2.2.1 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบซ้อนทับ (shingled-write magnetic recording)

การเขียนซ้อนทับเป็นการบันทึกข้อมูลที่ไม่สมมาตร เนื่องจากข้อมูลฝั่งหนึ่งจะถูกเขียนทับในด้านข้าง ๆ ของแตรีก ในความเป็นจริงมีโครงสร้างและพฤติกรรมมากมายที่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อทำให้การเขียนอ่านมีความเหมาะสม รูปที่ 2.9 แสดงถึงบริเวณต่างๆ ของสัญญาณและสัญญาณรบกวน การเขียนข้อมูล 3 แตรีกระบุได้โดยการกำหนดแตรีกที่ $N-1$, N , $N+1$ ตามลำดับ โดยแตรีก N คือ แตรีกกึ่งกลางหรือ home track ที่เราต้องการอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวเขียนมีขนาดกว้าง การเขียนจึงเกิดการซ้อนทับและการลบล้างเกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างแตรีกจะเป็นไปตามขนาดความเข้มของหัวเขียนจะสามารถแบ่งวิเคราะห์ได้เป็น 5 ส่วน แบ่งเป็นส่วนที่ $+1$, A , B , C , และ -1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพอธิบายสัญญาณ สัญญาณรบกวน และการแทรกสอดของบริเวณต่างๆ ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซ้อนทับ [26]

บริเวณ B สัญญาณจากแตรกึ่งกลางจะดีที่สุด สัญญาณรบกวนจะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณขอบ และมีสัญญาณรบกวนระหว่างแตรกน้อย ความเข้มสัญญาณจะลดลงตามระยะ $N+1$ ถึง $N-1$ เนื่องมาจากผลของความโค้งของสนามหัวเขียน ในขณะที่เดียวกันก็จะทำให้การเลื่อนของสัญญาณรบกวนเด่นชัดมากขึ้น

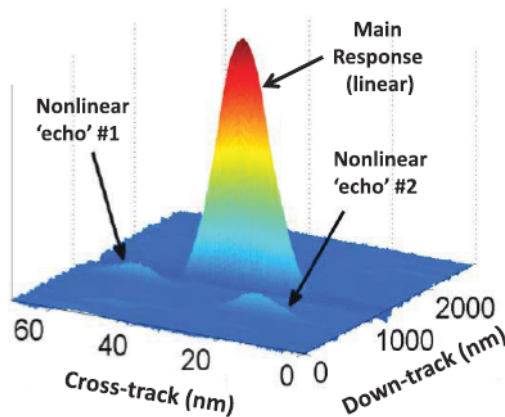
บริเวณ A เป็นบริเวณที่สัญญาณของแตรกึ่งกลางเบาบาง เนื่องจากถูกเขียนทับบางส่วนจากสนามแม่เหล็กหัวเขียน ในทางปฏิบัติแม่เหล็กที่ยาวมีแนวโน้มที่จะเกิดสนามแม่เหล็กกลับ ทำให้ลดสัญญาณความยาวคลื่นสูง สัญญาณความยาวคลื่นสูงจะถูกกลับทิศทางในบริเวณแตรก N เนื่องจากสนามหัวเขียนจากแตรก $N+1$ ทำให้เกิดการเขียนทับ สัญญาณรบกวนในบริเวณนี้จึงสูงและมีสวนจินตภาพเกิดขึ้นซึ่งก็คือสัญญาณรบกวนรอยต่อและสัญญาณรบกวนกลับ บริเวณ C เป็นบริเวณที่แยกไม่ออกว่าเป็นบริเวณ A หรือไม่ ยกเว้นในเชิงการเลื่อนเช่นเดียวกับบริเวณ A

การเขียนข้อมูลจะเริ่มเขียนในแนวแตรกที่ $N-1$ ก่อน ตามด้วยแตรกที่ N และ $N+1$ ตามลำดับ เมื่อแต่ละแตรกถูกเขียน แตรกก่อนหน้าจะถูกเขียนทับและลบออกไปบางส่วน เหลือเพียงบางส่วนที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้ รูปที่ 2.9 แสดงถึงโครงสร้างข้อมูล 3 แตรกที่ถูกบันทึกลงแผ่นบันทึกข้อมูลและคอนทัวร์สนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในบริเวณ -1 แสดงถึงข้อมูลของแตรก $N-1$ ที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้อยู่ ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมานี้ถูกค้นพบในงานของ Salo [27] และ Galbraith [28]

2.2.2 การจำแนกระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

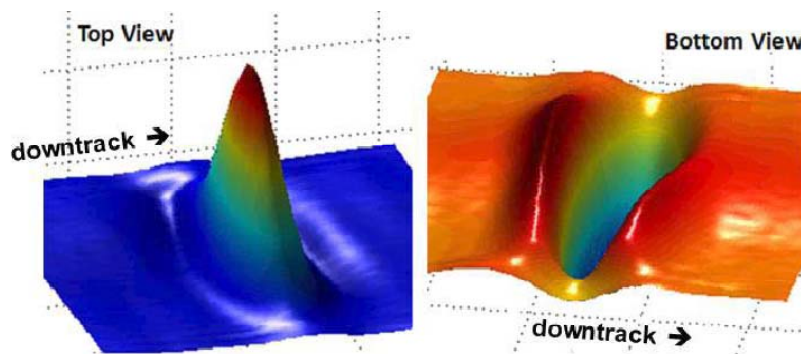
การวิเคราะห์สัญญาณในปัจจุบันจะวิเคราะห์ในทิศทางตามแตรกด้วยสัญญาณความถี่ที่เหมาะสมและอ่านกลับในย่านความถี่ดังกล่าวแบบหนึ่งมิติเพื่อดูผลตอบสนองของระบบ เนื่องจากในระบบการบันทึกแม่เหล็กจะถูกสมมติให้เป็นระบบเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงในระบบจริงมีความไม่เป็นเชิงเส้นแฝงอยู่ รูปแบบตัวเลขสุ่มเทียมจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการบันทึกข้อมูล [29] ด้วยคุณสมบัติพิเศษของตัวเลขสุ่มเทียม การทำดีคอนโวลูชันสัญญาณอ่านกลับจะได้ผลตอบสนองของระบบที่มีระลอกคลื่นสั้นสะท้อน [30] เทคนิคดังกล่าวนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งระบบเชิงเส้นแล้วและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ถูกนำเสนอใน [31]

รูปที่ 2.10 แสดงถึงผลตอบสนองพัลส์สองมิติของชุดเลขสุ่มเทียม P ขนาด 7×73 เป็นสัญญาณกระตุ้นของระบบหลังจากบันทึกข้อมูล P ผ่านช่องสัญญาณแผ่นบันทึกข้อมูล อ่านกลับด้วยหัวอ่านกว้าง 30 nm และมีระยะห่างระหว่างแตรก 38 nm เมื่อนำเมตริกซ์ของสัญญาณอ่านกลับมาหาค่าอัตราสัมพันธ์กับเมตริกซ์ P จะได้ผลตอบสนองพัลส์ดังรูปที่ 2.10 เกิดเป็นผลตอบสนองหลักที่จุดกำเนิดและคลื่นระลอกสองที่คลื่นระลอกแรกเกิดจาก Volterra kernel อันดับสองสอดคล้องกับผลคูณบิดข้างเคียง $P_{yx}P_{y(x+1)}$ ซึ่งคู่อันดับ Volterra kernel บ่งบอกถึงการกลับทิศทางของอินพุตไม่ส่งผลต่อการกลับทิศทางของเอาต์พุต ปรากฏการณ์นี้คือความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ [32],[33]



รูปที่ 2.10 ส่วนหนึ่งของผลตอบสนองพัลส์สองมิติที่ถูกคัดแยกออกมาแสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ชุดเลขสุ่มเทียมสองมิติขนาด 7×73 [26]

คลื่นระลอกที่สองในบริเวณขวาเกิดจาก Volterra kernel อันดับสาม สอดคล้องกับผลคุณรูปตัว L ตามแนวขวางแตรีกและตามแตรีก $P_{(y-1)x} P_{yx} P_{y(x-1)}$ ความเป็นเชิงเส้นนี้เกิดจากสนามดีแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีผลต่อการเขียนข้อมูล รูปที่ 2.11 แสดงภาพขยายของผลตอบสนองพัลส์พบว่าเกิด undershoot ซึ่งเกิดจากประจุแม่เหล็กในชั้น soft underlayer ของแผ่นบันทึกข้อมูลและสนามติดลบบริเวณขอบของหัวอ่าน



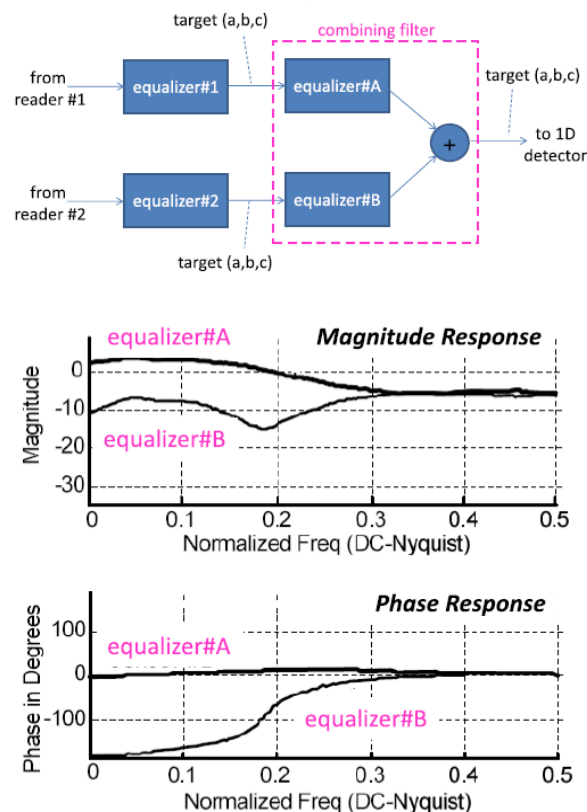
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของความเป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองพัลส์ในมุมมองจากข้างบนและข้างล่าง [26]

2.2.3 การอ่านกลับสองมิติและการตรวจจับ

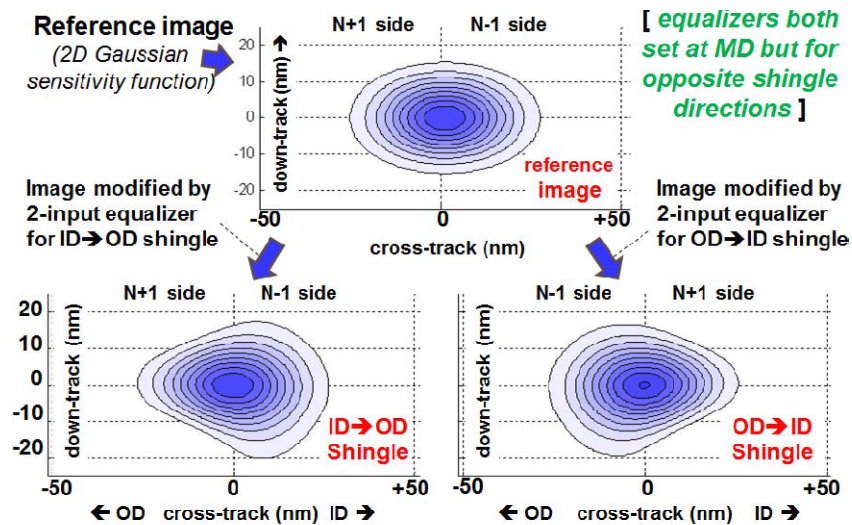
แนวคิดสำหรับการอ่านข้อมูล คือ อ่านให้สำเร็จในบริเวณกึ่งกลางของหลาย ๆ แตรีกข้อมูล อย่างไรก็ตามการที่ตำแหน่งของหัวอ่านเลื่อนในแนวขวางแตรีกทำให้เกิดผลกระทบอย่างมาก โดยเฉพาะในการเขียนซ้อนทับ เนื่องจากความไม่สมมาตรของแตรีกข้อมูลนั่นเอง เพื่อให้เข้าใจการเกิดผลกระทบดังกล่าวในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ จึงต้องศึกษาคุณลักษณะการอ่านเมื่อไรต์มีทำการหรือมุมของหัวอ่าน ระยะห่างระหว่างแตรีก และการปรับตำแหน่งในทางขวางแตรีก ผลการทดลองดังกล่าวจะสามารถนำมาทำนายความจุของข้อมูลที่เป็นไปได้ได้

อนุกรมของรูปคลื่นถูกบันทึกจากการทดลองด้วยแผ่นบันทึกข้อมูลขนาด 2.5 นิ้ว บนเครื่อง spin-stand หัวเขียนและหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ทั่วไปได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง การบันทึกรูปคลื่นได้ทำ 5 ครั้งที่มีรัศมีของแผ่นบันทึกข้อมูลต่างกัน ความเร็วของแผ่นบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 5400 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวบันทึกกับแผ่นบันทึกเท่ากับ 1 nm ช่องสัญญาณเขียนอ่านได้ใช้แบบเดียวกับ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยวิธีการ maximum transition run ในแต่ละรัศมีทำการ ความหนาแน่นเชิงเส้นและความหนาแน่นแตรีกจะใช้ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ที่ยังมีขอบ 9 nm จากตำแหน่งที่ เรียกว่าระยะระหว่างแตรีกล้มเหลว ระยะดังกล่าวนี้ถูกกำหนดโดยเป็นค่าระยะห่างระหว่างแตรีกที่ทำให้ มีอัตราการผิดพลาดของเซกเตอร์ 50% เมื่อเขียนด้วยกำลังสูงสุด

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



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองแมกนิจูดและเฟสของตัวกรองสำหรับผสมรูปคลื่น หัวอ่านที่ 1 อยู่ในบริเวณใกล้ กึ่งกลางแตรีกข้อมูล หัวอ่านที่ 2 ถูกปรับให้ขยับไปทางแตรีกที่ N+1 เล็กน้อย อินพุตทั้งสองและเอาต์พุต มีเป้าหมายแบบเดียวกัน ดังนั้น ตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 มีผลตอบสนองหนึ่งหน่วย



รูปที่ 2.13 แสดงถึงภาพของฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงแล้ว ภาพแรก คือ ภาพฟังก์ชันอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงเมื่อข้อมูลถูกเขียนซ้อนทับในทิศทางรัศมีน้อยไปมาก และภาพทางขวา คือ จากตำแหน่งรัศมีมากไปน้อย เพื่อให้ได้การผสมสัญญาณที่ดี รูปคลื่นที่ได้จากตัวปรับเท่าถูกส่งไปยังซอฟต์แวร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสด้วยรหัส LDPC [26]

กระบวนการรวมรูปคลื่นสองรูปเป็นหนึ่งรูปได้แสดงในรูปที่ 2.13 จุดมุ่งหมายของการรวมรูปคลื่นคือทำให้ได้อัตราการผิดพลาดที่น้อยลงกว่าการอ่านรูปคลื่นเดียว ขั้นตอนแรกคือการปรับเท่าเพื่อหาผลตอบสนองบางส่วนโดยใช้กล่องตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 สำหรับการผสมรูปคลื่น ตัวกรอง finite impulse response (FIR) และการบวกแต่ละจุดได้ถูกใช้ ตัวกรอง FIR อินพุตสองค่าและเอาต์พุตหนึ่งค่าถูกบังคับให้ใช้เป้าหมายทาร์เกตตัวเดียวกัน

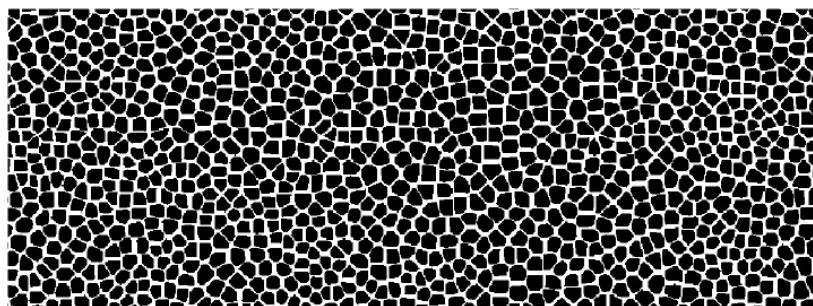
รูปที่ 2.13 แสดงถึงผลตอบสนองแมกนิจูดและผลตอบสนองเฟสของตัวกรอง FIR ทั้งสองตัว สัญญาณสองสัญญาณถูกปรับเท่าด้วยตัวปรับเท่าที่มีเป้าหมายเดียวกัน ที่ความถี่สูง ๆ ผลกระทบหลัก ๆ จากการรวมสัญญาณ คือ การรวมสองสัญญาณโดยตรงเฟสกันและมีแมกนิจูดเท่ากัน ดังนั้นสัญญาณจะถูกปรับด้วยสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์อย่างรุนแรง ที่ความถี่ต่ำ ๆ สัญญาณจากตัวปรับเท่า #2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเป็น 1/3 ของตัวปรับเท่า #1 ทำให้โดนหักล้าง ทำให้ลดการเกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กได้ จะเห็นว่านี่คือข้อดีของการรวมสัญญาณสองสัญญาณเมื่อรูปคลื่นหนึ่งอยู่ในตำแหน่ง 15%-30% ของระยะห่างระหว่างแทร็ก

วิธีการอื่นสำหรับการผสมรูปคลื่นคือการคิดถึงการรวมกันของการถ่วงน้ำหนักของรูปภาพสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เริ่มจากรูป Gaussian สองมิติเป็นรูปอ้างอิงค่าประมาณของฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน (read head sensitivity function) การคอนโวลูชันรูปอ้างอิงกับรูปฟังก์ชันตัวกรองสองมิติจะทำให้ได้ภาพใหม่ที่บ่งบอกถึงการที่ฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่านจะถูกปรับปรุงอย่างไรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 2.13 ภาพอธิบายวิธีการผสมรูปคลื่นของตัวปรับเท่าโดยการปรับแต่งฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน ฟังก์ชัน Gaussian สองมิติถูกใช้เป็นฟังก์ชันอ้างอิง สองภาพ

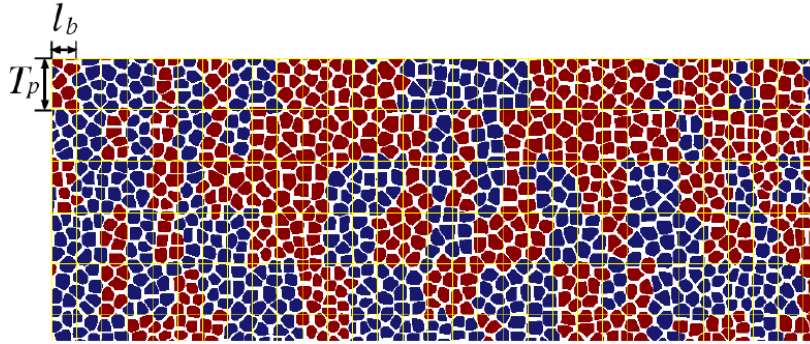
ด้านล่างแสดงถึงฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับแต่งแล้วตามทิศทางการเขียนซ้อนทับ จะเห็นว่าบริเวณแทรก $N+1$ และ $N-1$ จะมีรูปร่างของฟังก์ชันแตกต่างกัน โดยมีปลายแหลมไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการเขียนซ้อนทับ

2.2.4 การพัฒนาแบบจำลองการอ่าน/เขียนของช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

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) [34]-[36] ในแบบจำลองทั่วไป [34], [35] เซลล์ของโวโรนอย (Voronoi Cell) จะถูกสร้างโดยการวางนิวเคลียสของแต่ละเกรนลงไปยังจุดศูนย์กลางของแต่ละเซลล์ ดังนั้น ถ้าค่าเบี่ยงเบนของการวางนิวเคลียสดังกล่าวน้อยเกินไป ความเหมือนจริงของทั้งรูปร่างและตำแหน่งของเกรนที่ได้รับก็จะใช้เป็นตัวแทนของสื่อบันทึกที่ใช้งานจริงไม่เพียงพอ หรือในอีกแง่หนึ่ง ถ้าเกิดว่าค่าเบี่ยงเบนของการวางนิวเคลียสดังกล่าวมากจนเกินไป การกระจายของขนาดเกรน ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะสร้างแบบจำลองให้มีขนาดเกรนเหมือนของจริง อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของนิวเคลียสแบบ Poisson Disk [36] และวิธี Lloyd's Relaxation [37] วิธีนี้จะสามารถสร้างแบบจำลองของเกรนได้ใกล้เคียงกับเกรนที่เกิดขึ้นจริงกับสื่อบันทึก พร้อมกับมีการสร้างขอบเขตของเกรนที่ไม่เป็นแม่เหล็ก โดยการประยุกต์วิธี Convex Hull [38] ในกระบวนการสร้างเซลล์ของ Voronoi ด้วยการวนรอบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

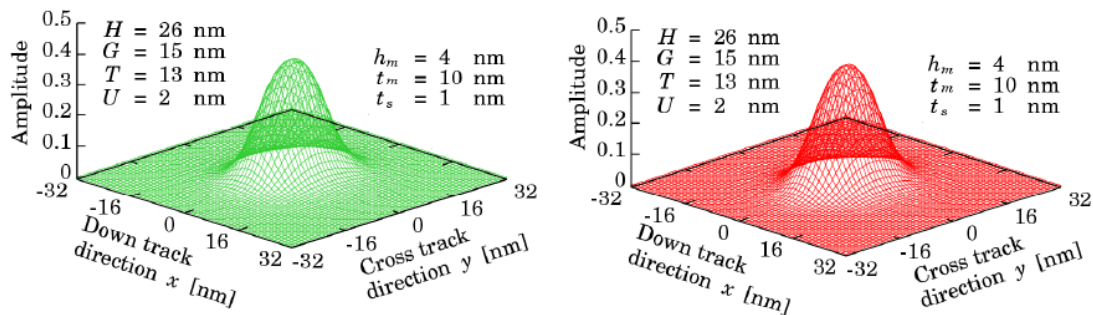


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างกรานูลาร์ (Granular) ของสื่อบันทึกจากวิธีการกระจายตัวของนิวเคลียสแบบ Poisson Disk



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างของ Magnetization ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการเขียน (สีแดงแทน 1 สีน้ำเงิน -1)

หลังจากที่เราได้ทราบจากการจำลองแล้ว กระบวนการหลังจากนั้นก็คือกระบวนการเขียน ข้อมูลลงไปบนจานดิสก์ ซึ่งเราจะเรียกว่า magnetization โดยมีความเป็นแม่เหล็กแค่สองสถานะนั่นคือ 1 กับ -1 ซึ่งกระบวนการเขียนที่ผู้วิจัยได้ศึกษาจะกำหนดเอาจุดศูนย์กลางของแต่ละเกรนเป็นหลัก โดยมีเงื่อนไขว่า ถ้าจุดศูนย์กลางของเกรนใดๆ ที่วางอยู่ในขอบเขตของบิตเซลล์ที่เรากำลังจะเขียน เกรนนั้นก็จะมีสภาพความเป็นแม่เหล็กเช่นเดียวกับบิตที่จะเขียนลงไปยังบิตเซลล์นั้นๆ ซึ่งวิธีดังกล่าวถือว่าเป็นวิธีเบื้องต้น ผู้วิจัยคิดว่าเป็นไปได้ที่จะทำวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเขียนสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติด้วย จากนั้น เป็นกระบวนการอ่านข้อมูล สิ่งสำคัญของกระบวนการอ่านก็คือ การศึกษาผลตอบสนองของหัวอ่าน หรือ ที่เรียกว่า Sensitivity function ดังรูปที่ 2.16 ผลตอบสนองดังกล่าวเมื่อนำไป Convolution แบบสองมิติกับ Magnetization ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) ก่อนที่จะนำสัญญาณดังกล่าวไปทำการประมวลผลในลำดับต่อไป



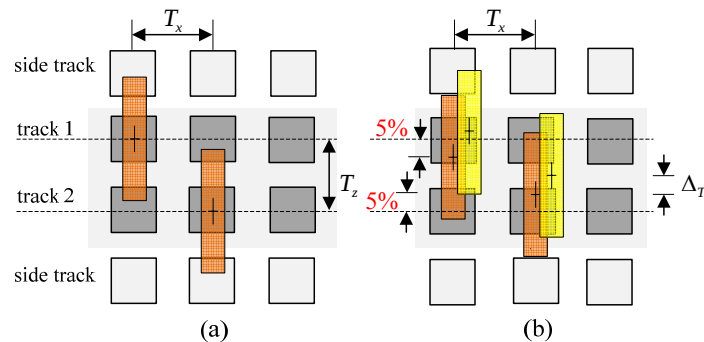
รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของหัวอ่าน (Sensitivity function) สีเขียวได้จากหัวอ่านจริง สีแดงได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [25]

บทที่ 3

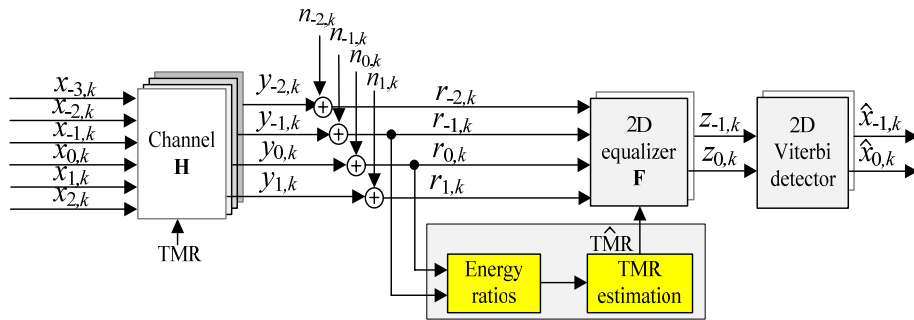
การตรวจจับแบบวนซ้ำและการเข้ารหัสแบบสองมิติ

3.1 การพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อลดผลกระทบการอ่านนอกแทร็ก

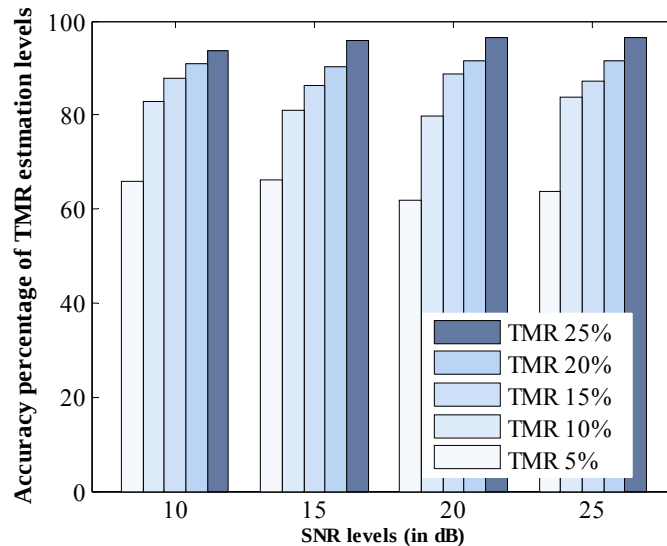
การอ่านนอกแทร็ก (Track mis-registration, TMR) เป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงยิ่ง ในทางปฏิบัติแล้วจะอาศัยระบบ Servo เป็นตัวควบคุมการอ่านข้อมูลให้ตรงแทร็กที่เราต้องการอ่าน อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวต้องอาศัยข้อมูลส่วนเกินเพื่อเป็นตัวระบุตำแหน่งของหัวอ่าน ทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่สำหรับจัดเก็บข้อมูลไป ในงานวิจัย [19, 39] เราได้นำเสนอการประมาณค่าและการลดผลกระทบที่เกิดจากการอ่านนอกแทร็กด้วยสัญญาณอ่านกลับซึ่งสามารถทำงานและให้ประสิทธิภาพในเชิงอัตราบิดผิดพลาดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราต้องการพัฒนาอัลกอริทึมในการประมาณค่า TMR ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นพร้อมทั้งมีความซับซ้อนต่ำ โดยเราต้องการพัฒนาในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบ PBMR ที่มีหลายแทร็กและหลายหัวอ่าน (two-track two-head, 2T2H) [40] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 รูปด้านซ้ายเป็นการอ่านข้อมูลด้วยวิธีทั่วไป ส่วนรูปทางด้านขวามือเป็นวิธีที่เรากำลังพัฒนา



รูปที่ 3.1 แสดงภาพจำลองของระบบหลายแทร็กและหลายหัวอ่านของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิดแพตเทิร์นมีเดียที่มีค่า TMR เท่ากับ Δ_T โดยในที่นี้เราเสนอให้มีการเลื่อนหัวอ่านของหัวบนและล่างเข้ามายังแทร็กกลางข้างละ 5% ของความกว้างแทร็กเพื่อใช้ประโยชน์ในการประมาณค่า TMR ที่เกิดขึ้นในระบบ



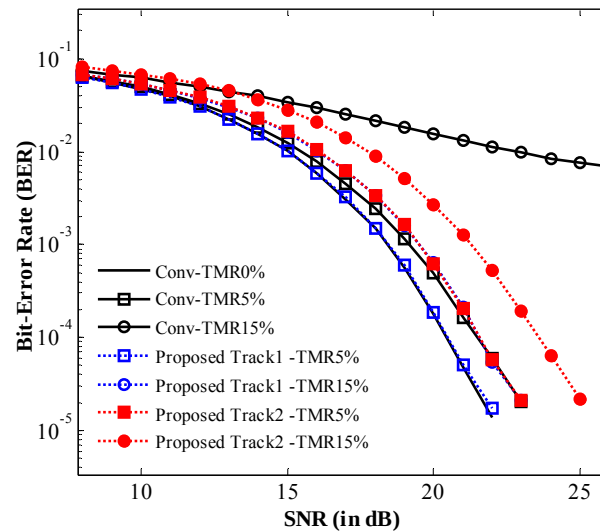
รูปที่ 3.2 ซองสัญญาณของระบบหลายแตรีกและหลายหัวอ่านของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่ประกอบด้วยอัลกอริทึมในการประมาณค่า TMR อัลกอริทึมในการหาอัตราส่วนของพลังงานพร้อมทั้งการเลือกใช้อีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละ TMR ที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกข้อมูล



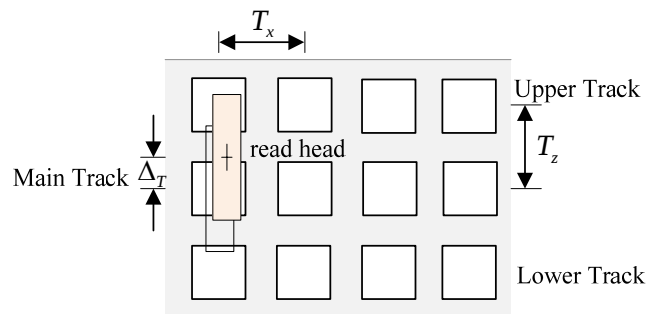
รูปที่ 3.3 ความแม่นยำในการประมาณค่า TMR ในระดับต่าง ๆ ของระบบหลายแตรีกและหลายหัวอ่านของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

จากนั้นจึงทำการออกแบบอีควอไลเซอร์เพื่อจัดการกับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเราจะทำการออกแบบอีควอไลเซอร์ด้วยหลักการ minimum mean square error (MMSE) [41] ด้วยการใช้อีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับระดับของ TMR แต่ละระดับ ทำให้เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการบันทึกข้อมูลได้เพิ่มมากขึ้น รูปที่ 3.3 แสดงผลการประมาณค่า TMR ในเบื้องต้น ซึ่งพบว่าวิธีที่เรา กำลังพัฒนาสามารถประมาณค่า TMR ที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำที่ค่า TMR สูงๆ อย่างไรก็ตามที่ค่า TMR ต่ำๆ เรายังจำเป็นต้องพัฒนาอัลกอริทึมให้สามารถประมาณค่าให้แม่นยำเพิ่มมากขึ้นอีกต่อไป รูปที่ 3.4 ผลการ

จำลองระบบเบื้องต้นพบว่าวิธีที่เรา กำลังพัฒนาให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า TMR สูง ซึ่งสอดคล้องกับการประมาณค่า TMR ยิ่งกว่านั้นเรายังได้พัฒนาตัวตรวจจับแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับระบบหลายแทร็กและหลายหัวอ่านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในรูปของอัตราบิตผิดพลาดของระบบที่เรา กำลังพัฒนาเปรียบเทียบกับระบบการบันทึกข้อมูลแบบทั่วไป

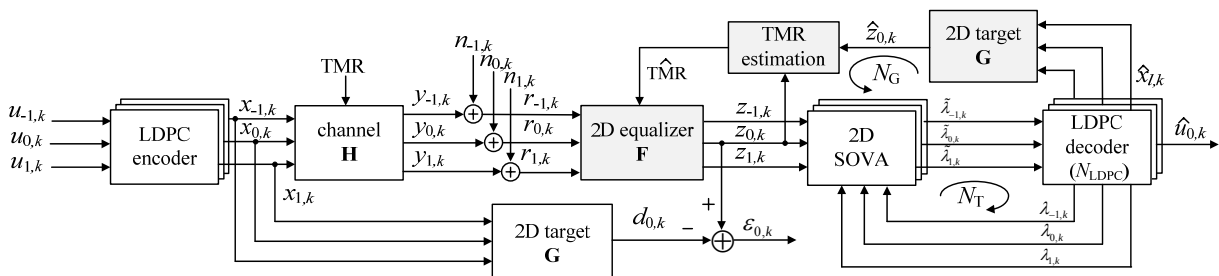


รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการวางของหัวอ่านในระบบการบันทึกข้อมูลพร้อมทั้งแสดงการอ่านนอกแทร็กของหัวอ่าน

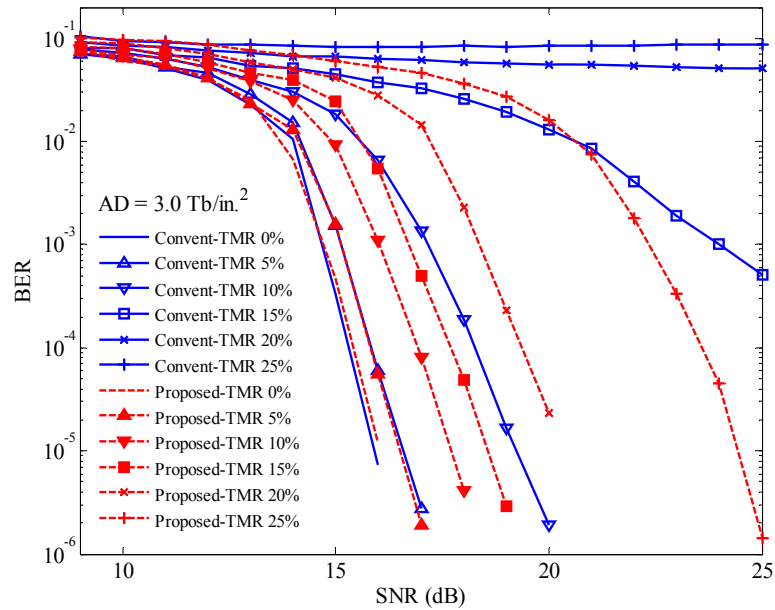
ในงานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าการอ่านนอกแทร็กสำหรับระบบวนซ้ำหนึ่งหัวอ่านดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการแก้ไขผลกระทบของการอ่านนอกแทร็กด้วย รูปที่ 3.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบวนซ้ำเพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากการอ่านนอกแทร็กด้วยหัวอ่านหนึ่งหัว โดยเริ่มต้นจากบิตผู้ใช้ (user bits) ทั้ง 3 แทร็ก ส่งเข้าไปยังวงจรเข้ารหัส LDPC ก่อนจะส่งไปยังช่องสัญญาณ

BPMR ที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนสลับกันที่ สัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ และผลกระทบที่เกิดจากการอ่านนอกเทร็ก จากนั้นสัญญาณอ่านกลับที่ได้ทั้ง 3 แทร็กจะถูกปรับเท่าด้วยตัวปรับเท่าสองมิติ (2D equalizer) ก่อนที่ข้อมูลทั้ง 3 แทร็ก จะถูกส่งไปยังวงจรตรวจจับ SOVA สองมิติเพื่อสร้างข้อมูลแบบซอฟต์ (soft-information) จากนั้นสร้างข้อมูลแบบซอฟต์จะถูกถอดรหัสข้อมูลด้วยวงจรถอดรหัส LDPC ข้อมูลการประมาณค่าของบิตบันทึกจะถูกส่งกลับไปยังทาร์เกตสองมิติเพื่อสร้างลำดับข้อมูลก่อนส่งไปยังตัวประมาณค่าการอ่านนอกเทร็กเพื่อประมาณค่าระดับของการอ่านนอกเทร็ก ค่าประมาณที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกตัวปรับเท่าที่เหมาะสมกับระดับของการอ่านนอกเทร็ก ดังนั้นจึงส่งผลให้สมรรถนะโดยรวมของระบบดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8

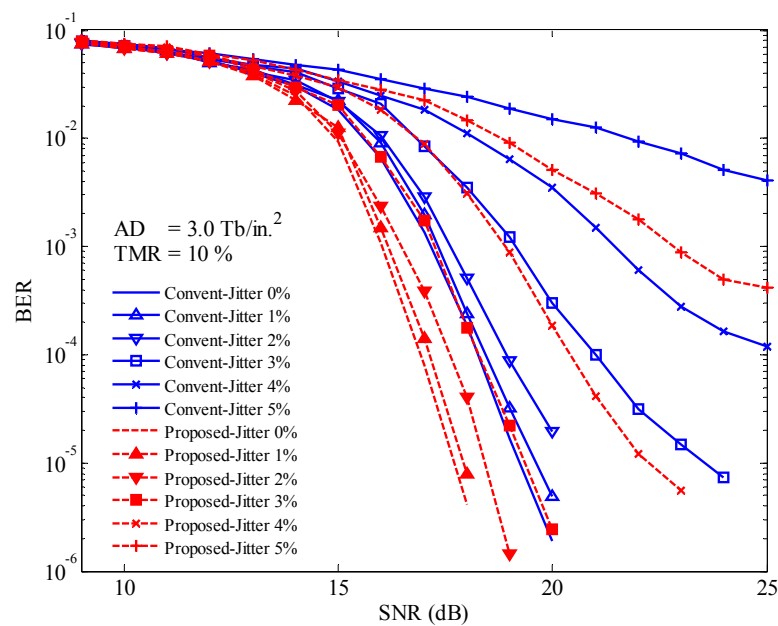
รูปที่ 3.7 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปกับระบบที่เราได้พัฒนาขึ้นที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3.0 Tb/in^2 ในระดับความรุนแรงของการอ่านนอกเทร็ก 0-25% เราจะเห็นว่าระบบที่เราได้นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบทั่วไปในทุกๆ ระดับการอ่านนอกเทร็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับของการอ่านนอกเทร็กมีค่าสูง เช่น 15-25% เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วเรายังพิจารณาผลกระทบที่เกิดการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูล (position jitter) ต่อระบบที่เราได้นำเสนอด้วย ในที่นี้กำหนดให้ระดับการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูลมีค่าตั้งแต่ 0-5% และค่าการอ่านนอกเทร็กถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10% ในทุกๆ กรณีของการเกิดการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูล ในรูปที่ 3.8 เราจะเห็นได้ชัดว่าวิธีที่เรานำเสนอสามารถจัดการกับผลกระทบของการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูลได้เป็นอย่างดีเหนือกว่าระบบทั่วไปในทุกๆ ระดับของการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูล



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบวนซ้ำเพื่อแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากการอ่านนอกเทร็กด้วยหัวอ่านหนึ่งหัว



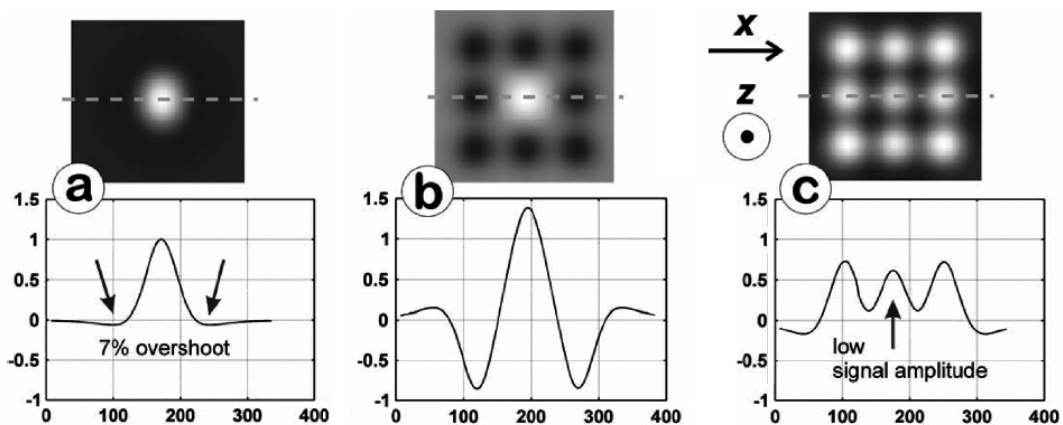
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปกับระบบที่เราได้นำเสนอที่ระดับความรุนแรงของการอ่านนอกแตร็กที่แตกต่างกัน



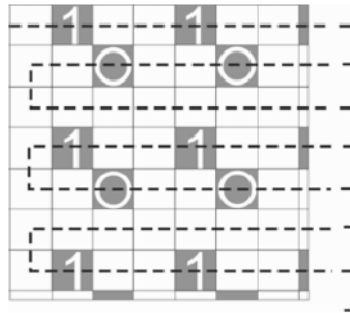
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปกับระบบที่เราได้นำเสนอที่ระดับความรุนแรงของการเกิดการเลื่อนตำแหน่งเกาะข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับการเกิดการอ่านนอกแตร็กถูกกำหนดให้เท่ากับ 10%

3.2 การออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติ (2D-Coding)

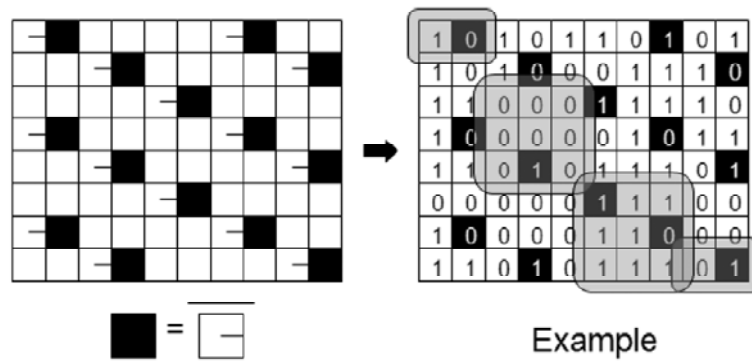
การเข้ารหัสแบบสองมิติที่มีการนำเสนอในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึกให้เป็นบิต มีหลักการดังนี้ [42] เริ่มจากการศึกษารูปแบบของสัญญาณอ่านกลับ (readback) พบว่าเมื่อเรานับบันทึกข้อมูลแบบเกะเดี่ยว (single dot) เราจะได้สัญญาณอ่านกลับดังรูปที่ 3.9(a) แต่ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแล้ว ต้องมีการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญญาณ (ISI) ของบิตข้างเคียงหรือแม้แต่ผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทรก (ITI) ที่เกิดจากแทร็กข้างเคียงได้ ดังนั้นเราจึงพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่ก่อให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองกรณี คือ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด นั่นคือ การบันทึกข้อมูลบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “0” ดังแสดงในรูปที่ 3.9(b) และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่เราต้องการหลีกเลี่ยง นั่นคือ การบันทึกบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “1” ดังแสดงในรูปที่ 3.9(c)



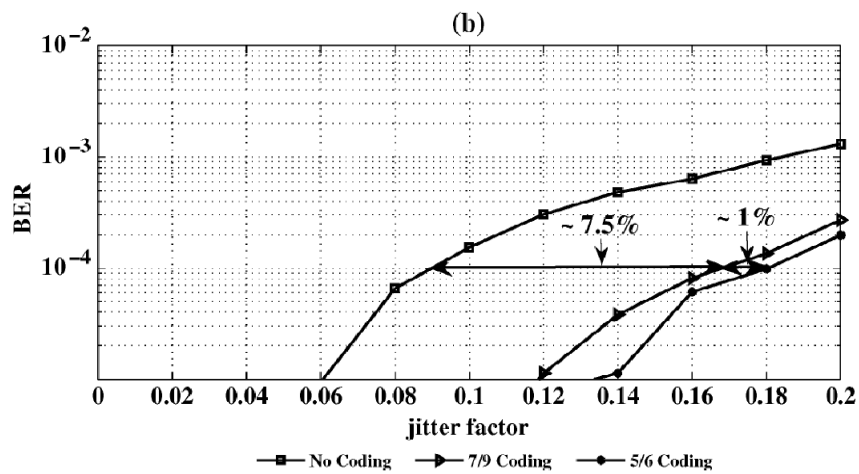
รูปที่ 3.9 รูปแบบของสัญญาณอ่านกลับกรณีที่เป็นเกะเดี่ยว (a) กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด (b) และกรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด (c)



รูปที่ 3.10 การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 5/6



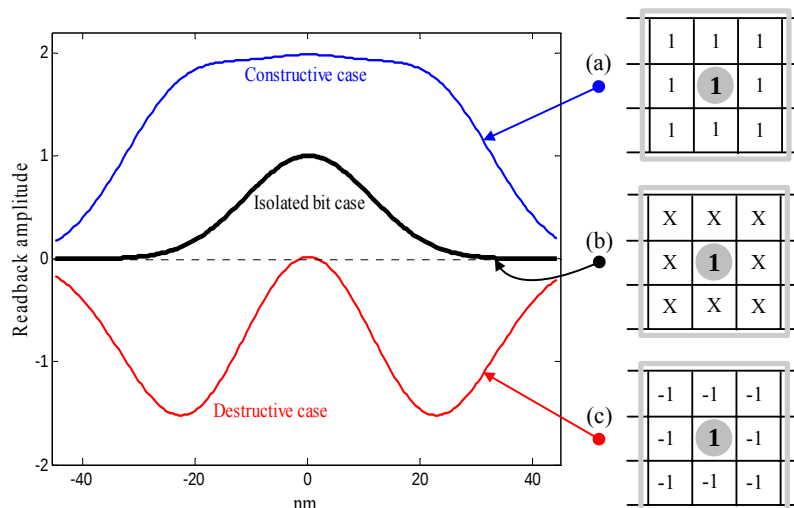
รูปที่ 3.11 การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 7/9



รูปที่ 3.12 แสดงสมรรถนะของระบบที่มีการเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสต่างๆ [42]

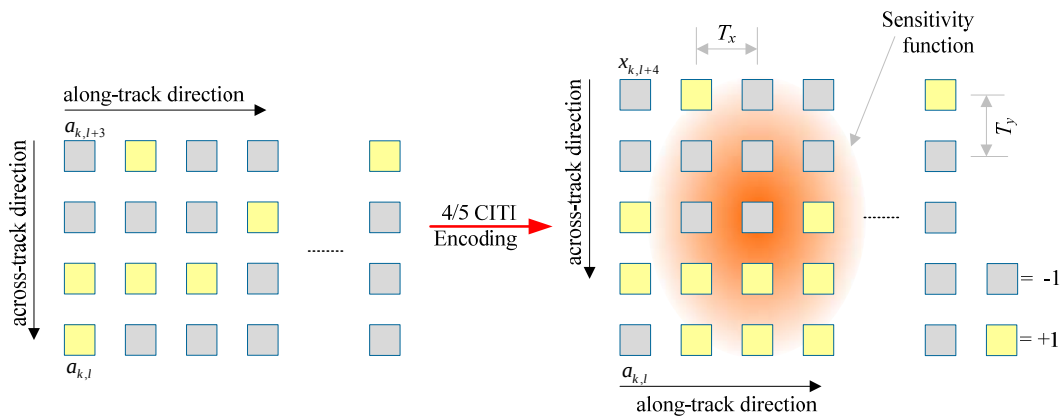
หลักการการเข้ารหัสแบบสองมิติ คือ พยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดโดยการแทรกบิตส่วนเกินเข้าไปก่อนที่จะบันทึกข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึก ดังรูปที่ 3.10 มีการบันทึกบิต “0” และบิต “1” ลงไปยังตำแหน่งที่แน่นอน โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ $5/6$ ซึ่งช่วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นแล้วยังมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มค่าอัตรารหัสให้สูงขึ้นโดยการเข้ารหัสด้วยรูปแบบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ $7/9$ [11] ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มอัตรารหัสให้สูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสูงขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.12

แต่เนื่องจากการออกแบบรหัสทั้ง 2 แบบที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้ ถูกออกแบบเพื่อช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ without overshoot ซึ่งเทคโนโลยีนี้ปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว ซึ่งได้เปลี่ยนเป็นช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot [43] ซึ่งการรบกวนกันของข้อมูลในบิตข้างเคียงก็จะแตกต่างกันออกไป ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีรูปแบบที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 3.13 ดังนั้นจึงมีผู้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลแบบหลายแทร็ก หรือ M-RBP (multi-track recorded-bit patterning) [44,45] ที่มีอัตรารหัสสูงสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot โดยจะทำการเลื่อนลำดับข้อมูลในแต่ละแทร็กเพื่อหารูปแบบของข้อมูลที่ดีที่สุดจากตารางค้นหา (look-up table) จากนั้นจึงบันทึกลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสื่อบันทึก วิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก ISI และ ITI ได้มาก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสอย่างใดก็ตาม วิธี M-RBP ยังคงมีความซับซ้อนสูง

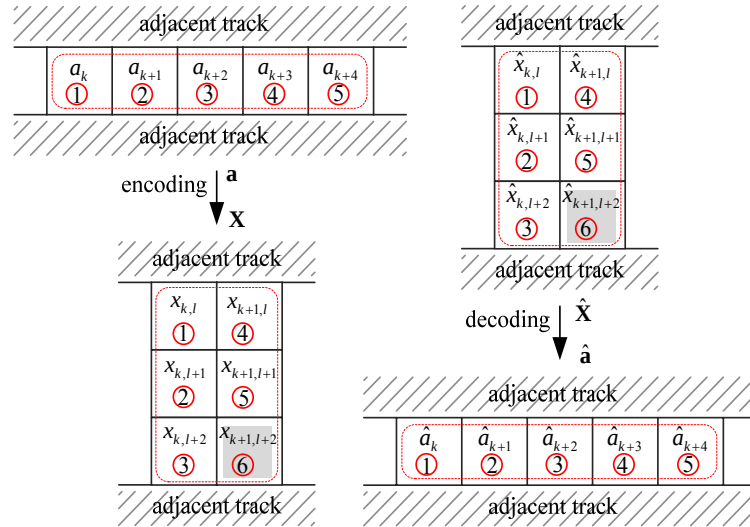


รูปที่ 3.13 สัญญาณอ่านกลับของ (a) บิตข้อมูลเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘1’ และ (c) กรณีที่ด้อยที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘-1’

นอกจากนั้นแล้วเรายังได้ทำการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติที่มีความซับซ้อนต่ำ อัตรารหัสข้อมูลสูง และมีประสิทธิภาพในการจัดการ/หลีกเลี่ยง/ลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็กสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก BPMPR ซึ่งแนวคิดการเข้ารหัสแสดงในรูปที่ 3.14 โดยมีหลักการดังนี้ ที่ได้ทำการเข้ารหัสจากข้อมูล 4 แทร็กให้ออกเป็นคำรหัส 5 บิต/ 5 แทร็ก ก่อนที่จะทำการบันทึกลงในสื่อบันทึกข้อมูล ซึ่งทำให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการแทรกสอดที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างแทร็ก [46] และเรายังได้นำเสนอการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 5/6 [47,48] ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยเริ่มจากลำดับข้อมูล a_k ที่ต้องการบันทึกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบสองมิติ คือเปลี่ยนจากข้อมูล 1 แทร็ก เป็นข้อมูล 3 แทร็ก เพื่อเลี่ยงบางรูปแบบเช่น $[+1 -1 +1]^T$ หรือ $[-1 +1 -1]^T$ ซึ่งรูปแบบของข้อมูลในแนวแทร็กสามารถรับประกันได้ว่าผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กจะไม่เกิดขึ้น จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่ารูปแบบที่เป็นไปในที่จะนำมาสร้างเป็นรหัสข้อมูลมีทั้งหมด 32 รูปแบบ (patterns) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างเป็นตารางเพื่อการเข้ารหัสข้อมูลต่อไป



รูปที่ 3.14 วิธีการ M-RBP (a) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดของแทร็กกลางและ (b) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดในแทร็กข้างเคียง



รูปที่ 3.15 วิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลขฐานแบบสองมิติ

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_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_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_{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_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_{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_{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_{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 3.16 ตัวอย่างของคำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสด้วย 5/6 2D Modulation Encoder [47]

อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสทั้งสองวิธีไม่สามารถทำงานในระบบการวนซ้ำได้ เนื่องจากการเข้ารหัสแบบฮาร์ตมอดดูเลขฐานอีกทั้งยังมีข้อด้อยตรงรอยต่อระหว่างชุดคำรหัสซึ่งยังก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการเข้ารหัสแบบซอฟต์แวร์พร้อมทั้งพัฒนาให้สามารถทำงานร่วมกับระบบการทำงานแบบวนซ้ำได้ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ระบบการบันทึกข้อมูลที่เรารู้ได้

นำเสนอนี้เป็นการประยุกต์วงจรบูลีนลอจิก (Boolean logic circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นวงจรการเข้าและถอดรหัสมอดดูเลขฐาน 4/5 สองมิติ ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

ตารางที่ 3.1 คำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 4/5

4 input data bits				5 data bits (codewords)				
$a_{k,l} \rightarrow a_{k,l+3}$				$x_{k,l} \rightarrow x_{k,l+4}$				
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	1	1	1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

เรากำหนดให้บิตอินพุตเป็น $[a_1, a_2, a_3, a_4]$ และบิตเอาต์พุตมีจำนวนทั้งหมด 5 บิต คือ $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ ซึ่งเราจะเรียกว่าคำรหัสหรือ codeword ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นเราสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ อีกทั้งยังสร้างเป็นวงจรการเข้ารหัสและถอดรหัสด้วยวงจรบูลีนลอจิกดังแสดงในรูปที่ 3.18

$$\begin{aligned}
x_1 &= a_1 a_2 + a_1 \overline{a_2}, \\
x_2 &= a_2 a_3 + a_2 a_4 + a_1 a_2 a_3 + a_1 a_3 a_4 + a_1 a_2 \overline{a_3}, \\
x_3 &= a_2 a_3 + a_2 a_4 + a_1 a_2 a_3 + a_1 a_2 \overline{a_3} + a_1 a_3 a_4, \\
x_4 &= a_2 a_3 + a_3 a_4 + a_1 a_3 + a_1 a_2 a_4, \\
x_5 &= a_2 a_3 a_4 + a_2 \overline{a_3} a_4 + a_2 a_3 \overline{a_4} + a_2 a_3 a_4.
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= x_1 x_2 + x_1 \overline{x_2}, \\
a_2 &= x_2 x_3 + x_2 x_4 + x_1 x_3 x_4 + x_1 x_2 x_5 + x_3 x_4 x_5, \\
a_3 &= x_1 x_4 + x_2 x_4 + x_4 \overline{x_5} + x_2 x_3 x_4 + x_1 x_2 x_3 x_4 x_5, \\
a_4 &= x_2 x_3 x_5 + x_2 x_4 x_5 + x_1 x_3 x_5 + x_1 x_2 x_5 \\
&\quad + x_1 x_4 x_5 + x_2 x_3 \overline{x_4} + x_2 x_4 x_5 + x_3 x_4 x_5 \\
&\quad + x_1 x_2 x_4 x_5 + x_1 x_2 x_3 x_4 x_5,
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

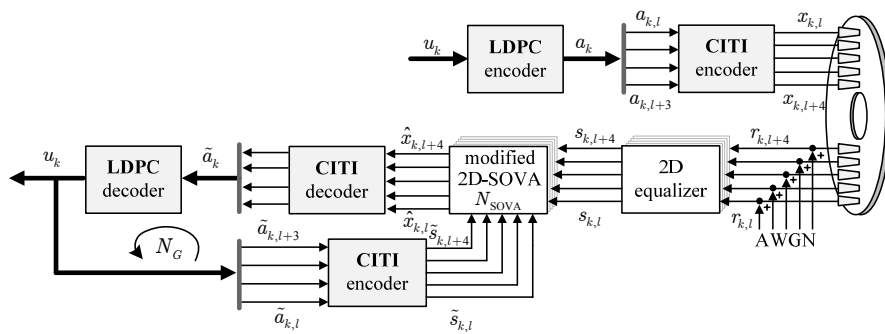
เพื่อง่ายต่อการคำนวณในที่นี้เราได้นำเสนอตัวเข้าและถอดรหัสที่ทำงานภายใต้อัลกอริทึมการตัดสินใจแบบซอฟต์ *min-max* [3] ซึ่งประกอบด้วยลอจิกเกต NOT, AND และ OR เพื่อสร้างค่าซอฟต์ U_{out} ดังนี้

$$U_{\text{out}}^{\text{NOT}}(a) = -U_{\text{in}}(a), \tag{3.3}$$

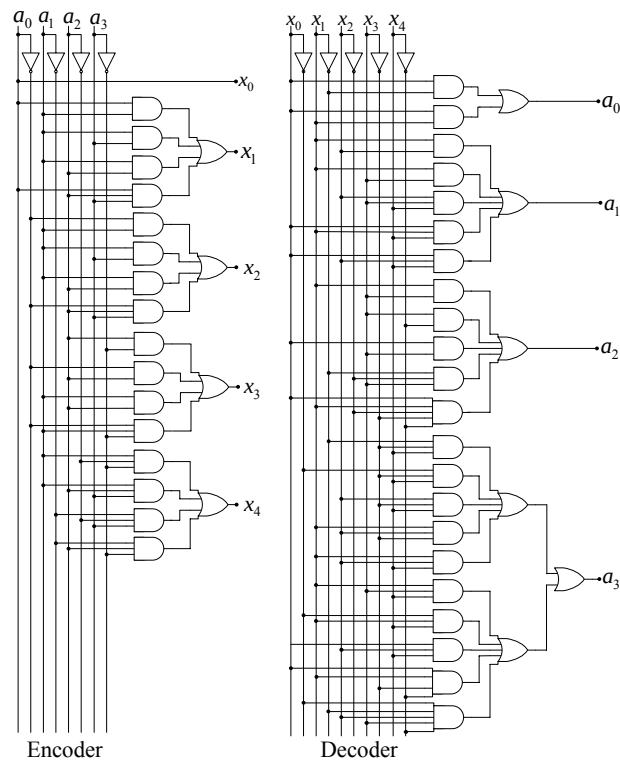
$$U_{\text{out}}^{\text{AND}}(a_1, a_2) = \max[U_{\text{in}}(a_1), U_{\text{in}}(a_2)], \tag{3.4}$$

$$U_{\text{out}}^{\text{OR}}(a_1, a_2) = \min[U_{\text{in}}(a_1), U_{\text{in}}(a_2)], \tag{3.5}$$

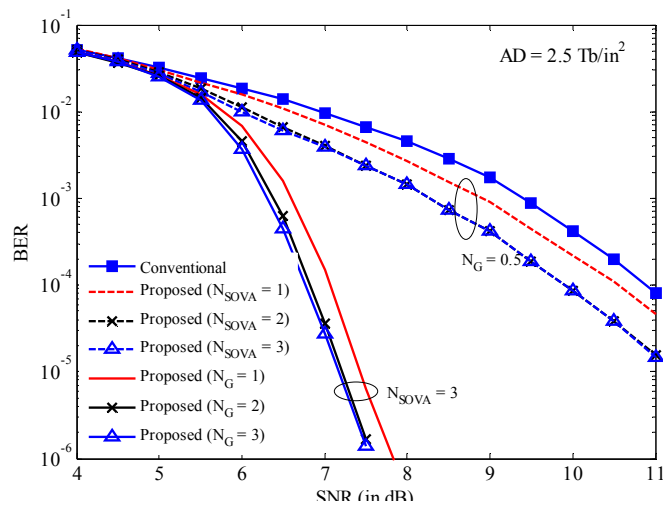
ในที่นี้ U_{in} คือ ค่าซอฟต์อินพุต ฟังก์ชัน $\min(\mathbf{s})$ และ $\max(\mathbf{s})$ จะคืนค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของ $\mathbf{s}$ ออกมาตามลำดับ



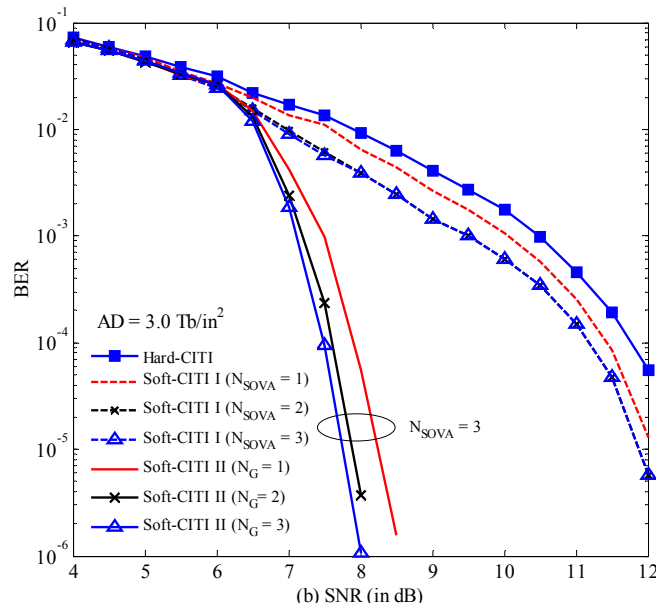
รูปที่ 3.17 บล็อกไดอะแกรมของระบบวนซ้ำทำงานร่วมกับการเข้ารหัสแบบซอฟต์ของถอดรหัสมอดดูเลชัน 4/5 สองมิติ [49]



รูปที่ 3.18 วงจรเข้ารหัสและถอดรหัสสมอดดูเลขชั้น 4/5 สองมิติแบบซอฟต์แวร์ด้วยวงจรบูลีนลอจิก



รูปที่ 3.19 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปและระบบที่เราได้นำเสนอที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.5 Tb/in^2

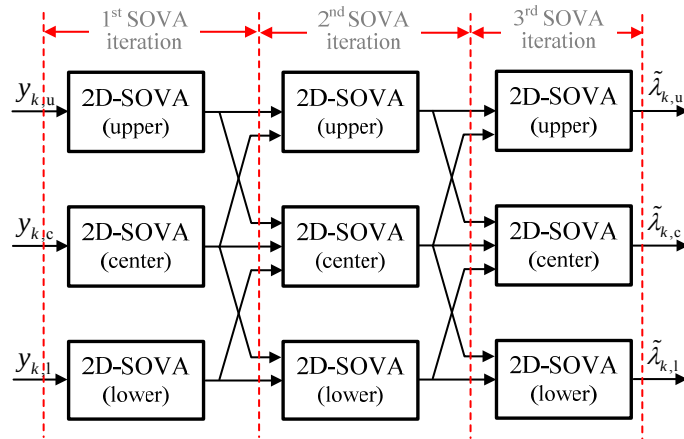


รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปและระบบที่เราได้นำเสนอที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3.0 Tb/in^2

จากรูปที่ 3.19 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทั่วไปและระบบที่เราได้นำเสนอที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.5 Tb/in^2 เราจะพบว่าวิธีที่เราได้นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าวิธีการบันทึกข้อมูลแบบทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนรอบของการวนซ้ำเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเรายังพบว่าเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของข้อมูลเพิ่มสูงขึ้น เช่น ที่ 3.0 Tb/in^2 วิธีที่เราได้นำเสนอยังมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีทั่วไปมากยิ่งขึ้นดังจะเห็นจากรูปที่ 3.20

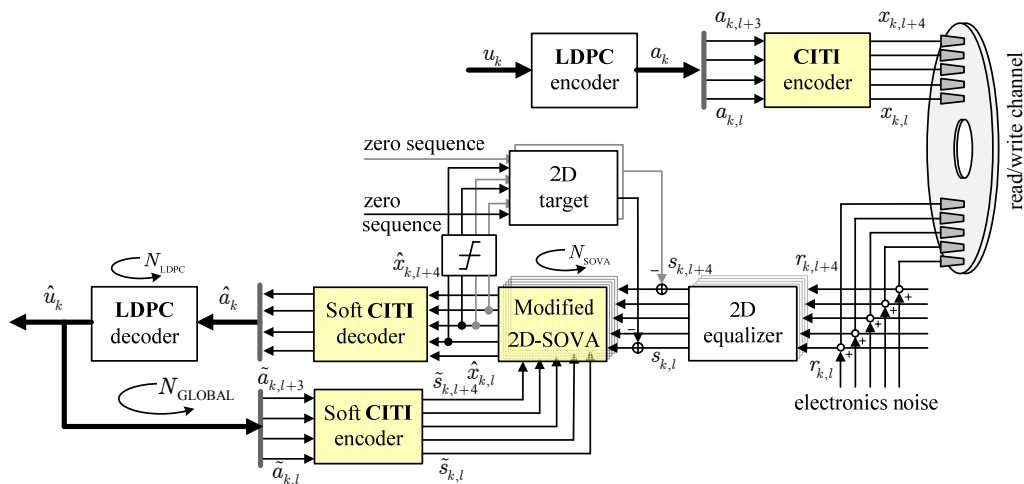
3.3 การพัฒนาตัวตรวจจับแบบสองมิติร่วมกับรหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติ

เพื่อให้ระบบการประมวลผลสัญญาณสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญนั้นก็คือตัวตรวจจับแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับการเข้ารหัสมอดดูเลชันได้ รวมถึงความสามารถในการจัดการกับปัญหาการแทรกสอดระหว่างแทร็กซึ่งเป็นปัญหาหลักในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ในปี 2014 เราได้นำเสนอวิธีการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจจับแบบสองมิติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจจับให้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.21

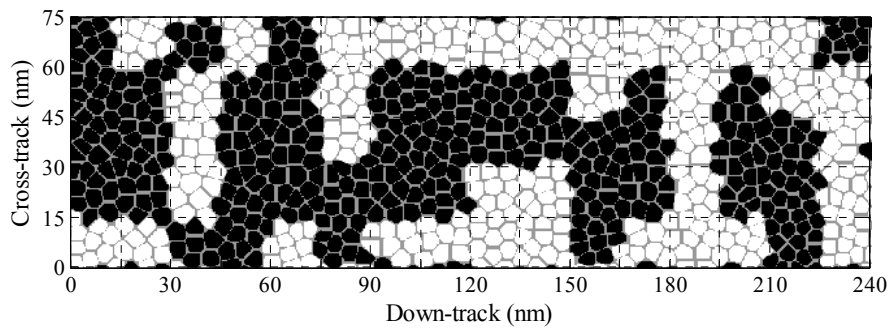


รูปที่ 3.21 กระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ของตัวตรวจจับ Soft Output Viterbi Algorithm แบบสองมิติ (2D SOVA)

อย่างไรก็ตามเราได้พัฒนาตัวตรวจจับแบบสองมิติให้สามารถทำงานร่วมกับการเข้ารหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งที่นักวิจัยได้นำเสนอในปี 2015 [50] รวมถึงการพัฒนาวิธีการลบการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วย รูปที่ 3.22 แสดงช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการเข้ารหัสมอดดูเลชัน การตรวจจับแบบสองมิติ และการลบการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการทำงานแบบวนซ้ำ โดยเราได้จำลองการบันทึกข้อมูลที่มีความจุเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.87 Tb/in^2 ด้วยแบบจำลองของสื่อบันทึกข้อมูลแบบจำลอง Voronoi ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.23 [51-52]

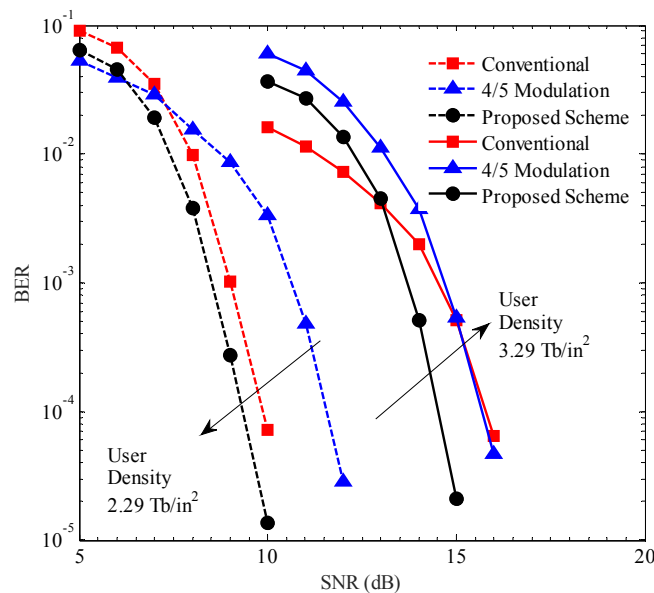


รูปที่ 3.22 ช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างการเข้ารหัสมอดดูเลชัน การตรวจจับแบบสองมิติ และการลบการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการทำงานแบบวนซ้ำ



รูปที่ 3.23 รูปแบบของความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึกข้อมูลที่ถูกเขียนด้วยข้อมูลหลังจากที่เข้ารหัสแล้วด้วยระยะความกว้างบิตและความกว้างแทร็กเท่ากับ 15 nm ซึ่งตรงกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.87 Tb/in^2

ผลการทดลองเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่เรากำลังทำการพัฒนาให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบการบันทึกแบบทั่วไป [49, 51-52] ที่ไม่มีการเข้ารหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติ ยิ่งกว่านั้นวิธีที่เราแนะนำยังให้ประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบการบันทึกที่เราเคยนำเสนอก่อนหน้านี้อีกด้วย [49, 51-52] ดังแสดงในรูปที่ 3.24 เนื่องจากระบบที่นำเสนอก่อนหน้านี้ไม่มีการลบล้างผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็กนั่นเอง



รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัตราบิตผิดพลาด (bit-error rate, BER) ของระบบที่มีการลบล้างผลกระทบการแทรกสอดระหว่างแทร็ก ระบบการบันทึกที่มีการเข้ารหัสมอดดูเลชัน และระบบการบันทึกข้อมูลทั่วไปที่ความหนาแน่นข้อมูลเชิงผู้ใช้ (user density, UD) เท่ากับ 2.29 และ 3.29 Tb/in^2

บทที่ 4

บทสรุป

โครงการวิจัยนี้เราได้สร้างแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR) และแบบสองมิติ (TDMR) ที่มีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้นรวมถึงออกแบบวิธีการเขียน/อ่านข้อมูลของระบบการบันทึกข้อมูลทั้งสองระบบได้อย่างสมจริง จากนั้นจึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลที่ใช้สำหรับการลดผลกระทบการแทรกสอดระหว่างสัญญาณและการแทรกสอดระหว่างแทร็กของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติที่มีสมรรถนะดีกว่าวงจรถ่ายที่ได้นำเสนอในปัจจุบัน พร้อมทั้งได้พัฒนาวิธีการลบล้างผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กด้วยการออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติที่สามารถทำงานร่วมกับตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กได้ทั้งในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติ ในลำดับสุดท้ายเรายังได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าการอ่านนอกแทร็ก (track mis-registration, TMR) ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียรวมถึงพัฒนาวิธีการบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วยหลักการประมวลผลสัญญาณจากสัญญาณอ่านกลับอีกด้วย

โครงการวิจัยนี้นอกจากจะเป็นการสร้างนักศึกษาที่มีองค์ความรู้ทางด้านการประมวลผลสัญญาณในอุตสาหกรรมฮาร์ดไดรฟ์แล้วเรายังสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพปรากฏอยู่ในฐานข้อมูล ISI จำนวนทั้งสิ้น 4 เรื่อง โดยงานวิจัยดังกล่าวสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาระบบการประมวลผลสัญญาณในเทคโนโลยีฮาร์ดไดรฟ์ให้มีศักยภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, มองไปข้างหน้ากับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, เข้าถึงได้จาก[http://www.nstda.or.th/nac2012/download/Session%20Summary_26_306\(B\)HDD.doc](http://www.nstda.or.th/nac2012/download/Session%20Summary_26_306(B)HDD.doc) สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2555.
- [2] Y. Shiroishi, K. Fukuda, et al., "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816–3822, Oct 2009.
- [3] R. Wood, et al., "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.
- [4] M. H. Kryder, et. al., "Heat assisted magnetic recording," *Proc. IEEE*, vol. 96, 1810, 2008.
- [5] S. Nabavi, Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference, Ph.D thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.
- [6] A. Ghoreyshi, and R. H. Victora, "Heat assisted magnetic recording with patterned FePt recording media using a lollipop near field transducer," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, 17B719, 2014.
- [7] H. Kiyono, O. Nakada, T. Mori, and T. Oike, "Shingle magnetic recording assessment with spinstand measurement" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, pp. 321-326, 2012.
- [8] P. W. Nutter, Y. Shi, B. D. Belle, and J. J. Miles, "Understanding sources of errors in bit-patterned media to improve read channel performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 3797-3800, 2008.
- [9] J. Hagenauer and P. Hoeher, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications," in *Proc. of Globecom'89*, pp. 1680-1686, Nov 1989.
- [10] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-08, pp. 21 – 288, Jan. 1962.
- [11] 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.

- [12] S. Koonkarnkhai, P. Keeratiwintakorn, and P. Kovintavewat "Target and Equalizer Design for High-Density Bit-Patterned Media Recording," *ECTI Transactions on Computer and Information Technology* , vol. 6, no. 2, pp. 175 – 182, November 2012.
- [13] Y. Ng, et al., "Picket-shift codes for bit-patterned media recording with insertion/deletion errors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2268–2271, Jun 2010.
- [14] S. Karalulak, From channel modeling to signal processing for bit-patterned media recording, Ph.D thesis, University of California, San Diego, USA, 2010.
- [15] M. Keskinöz, "Two-dimensional equalization/detection for patterned media storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 4, pp. 533–539, Apr 2008.
- [16] W. Chang and J. R. Cruz, "Inter-track interference mitigation for bit-patterned magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp. 3899–3908, Nov 2010.
- [17] G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimate of digital sequences in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. IT-18, no. 3, pp. 363-378, May 1972.
- [18] 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
- [19] 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.
- [20] S. H. Charap, P. L. Lu, and Y. He, "Thermal stability of recorded information at high densities", *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 33, No.1, Jan 1997, pp.978-983.
- [21] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch," *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 36, No. 1, Jan 2000, pp. 36-42.
- [22] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 9, 2007, pp. R149-R177.
- [23] K. S. Chan et al., "TDMR platform simulations and experiments," *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 45, No. 10, Oct. 2009, pp. 3837-3843.
- [24] 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 Magnetism*, Vol. 47, No. 12, Dec. 2011, pp. 4775-4780.

- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] M. Salo et al., "The structure of shingled magnetic recording tracks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 3, Mar. 2014, Art. ID 3100406.
- [28] 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.
- [29] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays," *IEEE Proceeding*, Vol. 64, No. 12, Dec. 1976, pp. 1715-1729.
- [30] D. Palmer, P. Zipserovich, 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.
- [31] R. Hermann, "Volterra modeling of digital magnetic saturation recording channels," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No.5, Sep. 1990, pp. 2125-2127.
- [32] J. Coker, Opportunities and Challenges in Two Dimensional Magnetic Recording (IEEE Magnetics Society Distinguished Lecture Series). Washington, DC, USA: Phillips Hall, 2014.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] A. Lagae, Wang tiles in computer graphics, California: Morgan & Claypool, 2009.
- [38] 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.
- [39] W. Busyatras, C. Warisarn, L. 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.*, vol. 51, no. 11, pp. 3002104, Nov. 2015.
- [40] B. Fan et. al., "Multihead multitrack detection in shingled magnetic recording with ITI estimation," *IEEE ICC 2015 SAC - Data Storage and Cloud Computing*, pp. 425-430, 2015.
- [41] Jaekyun Moon and Weining Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 31, No. 2, pp. 1083-1088, March 1995.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.

- [48] 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.
- [49] 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
- [50] C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An interative inter-track interference mitigation method for two-dimensional magnetic recording systems," *J. Appl. Phys.* 115, 17B732 (2014).
- [51] 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 1.892 Published.
- [52] K. Pituso, C. Warisarn, and D. Tongsomporn, "A Soft-5/6 Modulation Code with Iterative ITI Subtraction Scheme in Multi-Reader TDMR Systems," *IEEE Trans. Magn.* ISI-Impact 1.72 Published.

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. 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.
2. 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.
3. 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, Published.
4. W. Tipcharoen, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Effects of Island Volume and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.892, Published.

An Iterative TMR Mitigation Method Based on Readback Signal for Bit-Patterned Media Recording

Wiparat Busyatrass¹, Chanon Warisarn¹, Lin M. M. Myint², Pornchai Supnithi³, and Piya Kovintavewat⁴

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

²School of Information Technology, Shinawatra University, Pathumthani 12160, Thailand

³Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

⁴Data Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

Off-track condition or track misregistration (TMR) is one of the most significant problems in the extremely high-density bit-patterned media recording (BPMR) system, since a track pitch becomes narrower. Typically, the TMR can be detected and handled by a servo system; however, it requires some special data to be inserted in the tracks so as to estimate the amount of head offset. Nonetheless, this paper proposes an iterative TMR mitigation method for BPMR systems based on the readback signals. First, we design several pairs of the 2-D asymmetric target and its corresponding 2-D equalizer that match the BPMR channel for each TMR level. Then, we exploit the three adjacent data tracks obtained from the low-density parity-check decoders to estimate the TMR level. Last, a pair of the 2-D asymmetric target and its corresponding 2-D equalizer that is best fit to the estimated TMR level will be used to alleviate the TMR effect in the readback signal for the next global iteration. Simulation results indicate that the proposed system can effectively estimate the TMR level and performs better than the conventional system without a TMR mitigation method, especially when the TMR level is high and/or the position jitter is large.

Index Terms—2-D equalization, bit-patterned media recording (BPMR), intertrack interference, track misregistration (TMR).

I. INTRODUCTION

TRACK misregistration (TMR) is one of the major problems in the extremely high-density bit-patterned media recording (BPMR) system [1], [2] because a track pitch or a spacing between the adjacent tracks becomes narrower. This can easily cause the read head to position away from the center of the main track, as illustrated in Fig. 1. For example, this could happen when the disk rotation speed is suddenly increased for high transfer rate and access time, while the read head moves to read the data on the main track [3]. In general, the TMR can cause a devastating impact on the data recovery process, because it will enhance the interference from the adjacent tracks, i.e., intertrack interference, thus degrading the quality of the readback signal. Moreover, the TMR effect may lead to the mismatch between the readback signal and the design of the target and its corresponding equalizer, which in turn causes the detector to perform unreliably.

Although the servo system can be used to handle the TMR effect [3], [4], it requires some special data to be inserted in the tracks so as to estimate the amount of head offset. However, it is normally difficult to approximate the behavior of the read-head movement when the TMR occurs beyond its limitation [3], [5]. Alternatively, Myint and Supnithi [6] introduced the TMR detection method from the readback signals, based on the observation of the 2-D equalizer coefficients, and then adjusted the 2-D target and the 2-D equalizer to be asymmetric so as to handle the TMR-affected readback signal. Nevertheless, we found that this method can only perform

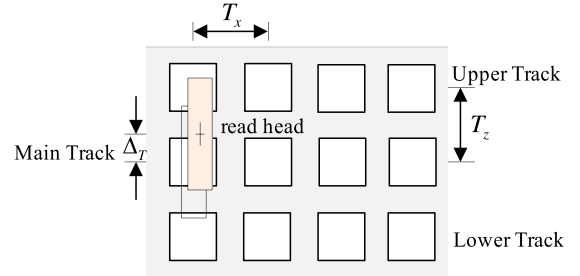


Fig. 1. TMR or a head offset, Δ_T , in BPMR systems.

well when the TMR is not high (e.g., $\leq 10\%$) and an areal density (AD) is moderate (e.g., $\leq 2 \text{ Tb/in}^2$).

To solve the TMR problem, we propose an iterative TMR mitigation method to alleviate the TMR effect based on the readback signals. We first design several pairs of the 2-D asymmetric target and its corresponding 2-D equalizer that match the BPMR channel for each TMR level. Next, we utilize the three adjacent data tracks obtained from the output of the low-density parity-check (LDPC) decoders to estimate the TMR level. Hence, a pair of the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer that is best fit to the estimated TMR level will be employed to cope with the TMR-affected readback signal during the next global iteration.

The rest of this paper is organized as follows. Section II describes the BPMR channel model, and Section III explains the proposed TMR mitigation method. Simulation results are given in Section IV. Finally, the conclusion is drawn in Section V.

II. BPMR CHANNEL MODEL

Consider a discrete-time BPMR channel model [7], [8] in Fig. 2. An input data sequence $u_{l,k} \in \{0, 1\}$ of length 3640 b with a bit period T_x is encoded by a rate-8/9 LDPC code [9] to obtain a sequence $x_{l,k} \in \{\pm 1\}$ of length

Manuscript received March 19, 2015; revised May 5, 2015; accepted June 5, 2015. Date of publication June 15, 2015; date of current version October 22, 2015. Corresponding author: C. Warisarn (e-mail: kwchanon@kmitl.ac.th).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TMAG.2015.2445381

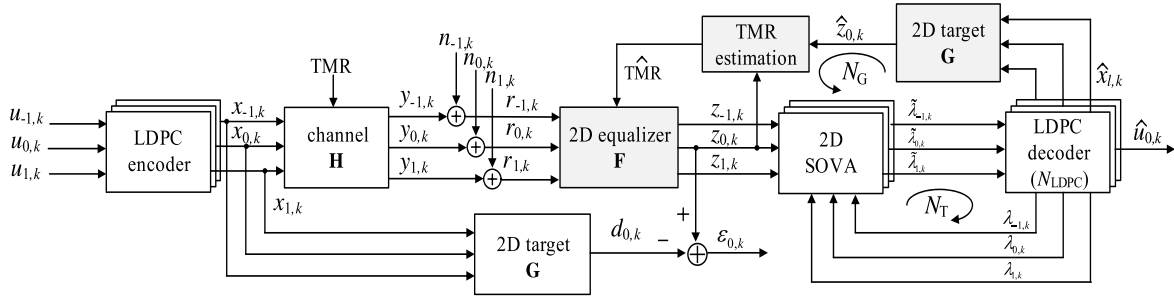


Fig. 2. BPMPR channel model with the proposed TMR mitigation method.

4095 b, where the parity-check matrix has 3 ones in each column and 27 ones in each row. The readback signal of the k th data bit of the l th track can be expressed as

$$r_{l,k} = \sum_n \sum_m h_{m,n} x_{l-m,k-n} + n_{l,k} \quad (1)$$

where the values of $x_{l,k}$ are the recorded bits, $l \in \{0, -1, +1\}$ represents the main, upper, and lower track, respectively, the values of $h_{m,n}$ are the 2-D channel coefficients, m and n represent the time indices of the bit island in the across-track and the along-track directions, respectively, and $n_{l,k}$ is an additive white Gaussian noise with zero mean and variance σ^2 .

In practice, $h_{m,n}$ can be obtained by sampling the isolated island pulse response at the integer multiples of the bit period T_x and the track pitch T_z according to [10]

$$h_{m,n} = P(mT_z + \Delta_T, nT_x) \quad (2)$$

where $P(z, x)$ is the 2-D Gaussian pulse response given by

$$P(z, x) = A \exp \left\{ \frac{-1}{2c^2} \left[\left(\frac{z + \Delta_z}{PW_z} \right)^2 + \left(\frac{x + \Delta_x}{PW_x} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

$\{m, n\} \in (-L, \dots, 0, \dots, L)$, $2L + 1$ is the length of $P(z, x)$, L is an integer, z and x are the time indices in the across-track and the along-track directions, respectively, $A = 1$ is supposed to be the peak amplitude of $P(z, x)$, $c = 1/2.3548$ is a constant to account for the relationship between PW_{50} and the standard deviation of the Gaussian pulse [1], PW_{50} is the pulse width at half of its peak value, Δ_x is the along-track location fluctuation (or position jitter [11]), Δ_z is the across-track location fluctuation, PW_x is the PW_{50} of the along-track pulse, and PW_z is the PW_{50} of the across-track pulse. Here, we assume that Δ_x and Δ_z are modeled as a truncated Gaussian probability distribution function with zero mean and variance σ_j^2 , where σ_j is specified as the percentage of T_x . In addition, the read-head offset or the TMR, Δ_T , is assumed to be positive for the upward offset, as shown in Fig. 1, and the TMR level is defined as

$$\text{TMR}(\%) = \frac{\Delta_T}{T_z} \times 100. \quad (4)$$

At the receiver, the readback data sequences $\{r_{l,k}\}$ are equalized by a 2-D equalizer to obtain the sequences $\{z_{l,k}\}$, and are sent to three 2-D soft-output Viterbi algorithm (2-D-SOVA) detectors to produce the three-track soft information $\hat{\lambda}_{l,k}$ before passing them to the LDPC decoders to output the

three-track log-likelihood ratio (LLR), $\lambda_{l,k}$, of the input bits associated with the main and the two adjacent tracks. Note that the LDPC decoder is implemented based on the message-passing algorithm [9] with N_{LDPC} internal iterations. Then, the LLR sequences are fed back to each corresponding 2-D-SOVA detector for the next turbo iteration, N_T .

At each global iteration, N_G , the three-track LLR sequences are mapped to $\hat{x}_{l,k} \in \{\pm 1\}$, and are sent to the 2-D asymmetric targets to produce all possible target outputs $\{\hat{z}_{0,k}\}$. Thus, the TMR estimation block computes the mean-squared error (MSE) between each sequence $\hat{z}_{0,k}$ and the equalizer output $z_{0,k}$ from the previous global iteration, and then outputs the estimated TMR, $\hat{\text{TMR}}$, corresponding to the 2-D target used to generate the sequence $\hat{z}_{0,k}$ that provides a minimum MSE (MMSE). Therefore, a new set of the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer will be used for the next global iteration. In particular, the original readback data sequences $\{r_{l,k}\}$ will be reequalized by the new 2-D equalizer before sending them to the 2-D-SOVA detectors implemented based on the new 2-D target. Note that only one 2-D equalizer is used to equalize three input sequences and then output three equalized sequences in the iteration process, whereas all 2-D-SOVA detectors employ the same 2-D target. In addition, this paper focuses only on detecting the data on the main track, similar to [6].

III. PROPOSED METHOD

A. Equalizer and Target Design

We design a pair of 2-D target and its corresponding 2-D equalizer for the TMR levels of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%, based on an MMSE approach [10]–[12], and employ them in the simulation. In practice, the target and its corresponding equalizer can be obtained by minimizing

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = E\{(z_{l,k} - d_{l,k})^2\} \quad (5)$$

where $E\{\cdot\}$ is the expectation operator and $\varepsilon_{l,k}$ is an error, which is the difference between the equalizer output $z_{l,k}$ and the desired sequence $d_{l,k}$. Because we consider only the data on the main track, (5) can then be computed by

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_{l,k}^2\} &= E\{(z_{0,k} - d_{0,k})^2\} \\ &= E\{[(r_{l,k} \otimes f_{l,k}) - (x_{l,k} \otimes g_{l,k})]^2\} \end{aligned} \quad (6)$$

where the values of $f_{l,k}$ are the equalizer coefficients, the values of $g_{l,k}$ are the target coefficients, and $\otimes$ is the

2-D convolution operator. After expanding the right-hand side in (6), we obtain

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = f_{l,k} \otimes R_{l,k}^r \otimes f_{l,k} - 2f_{l,k} \otimes R_{l,k}^{rx} \otimes g_{l,k} + g_{l,k} \otimes R_{l,k}^x \otimes g_{l,k} \quad (7)$$

where $R_{l,k}^r = E\{r_{i,j}r_{i-l,j-k}\}$ and $R_{l,k}^x = E\{x_{i,j}x_{i-l,j-k}\}$ are the autocorrelations of the readback signals and the recorded bits from all three tracks, respectively, and $R_{l,k}^{rx} = E\{r_{i,j}x_{i-l,j-k}\}$ is the cross correlation between the readback signals and the recorded bits.

To compute the solution of MSE in (7), it is convenient to rewrite it in a matrix form [12]. Let $\mathbf{F}$ be a $3 \times (2N+1)$ equalizer matrix according to

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{-1} \\ \mathbf{f}_0 \\ \mathbf{f}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{-1,-N} & \dots & f_{-1,0} & \dots & f_{-1,N} \\ f_{0,-N} & \dots & f_{0,0} & \dots & f_{0,N} \\ f_{1,-N} & \dots & f_{1,0} & \dots & f_{1,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

and let $\mathbf{G}$ be a 3×3 target matrix of the form

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{-1} \\ \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

In general, the matrices $\mathbf{F}$ and $\mathbf{G}$ can be rearranged into the column vectors as $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_{-1} \mathbf{f}_0 \mathbf{f}_1]^T$ and $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_{-1} \mathbf{g}_0 \mathbf{g}_1]^T$, respectively, where the component vectors are defined in (8) and (9), and $[\cdot]^T$ is the matrix transpose operator. Using these matrices, the MSE in (7) can be rewritten as

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = \mathbf{f}^T \mathbf{R}_r \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{R}_x \mathbf{g} \quad (10)$$

where $\mathbf{R}_r = [\mathbf{r}_k \mathbf{r}_k^T]$ is a $3(2N+1) \times 3(2N+1)$ autocorrelation matrix of $R_{l,k}^r$, $\mathbf{R}_{rx} = [\mathbf{r}_k \mathbf{x}_k^T]$ is a $3(2N+1) \times 9$ cross-correlation matrix of $R_{l,k}^{rx}$, $\mathbf{R}_x = [\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T]$ is a 9×9 autocorrelation matrix of $R_{l,k}^x$, $\mathbf{r}_k = [r_{1,k+N} \ r_{1,k+N-1} \ \dots \ r_{0,0} \ \dots \ r_{-1,k-N+1} \ r_{-1,k-N}]^T$ is a column vector of the readback signal, and $\mathbf{x}_k = [x_{1,k+1} \ x_{1,k} \ \dots \ x_{0,0} \ \dots \ x_{-1,k} \ x_{-1,k-1}]^T$ is a column vector of the recorded bits.

For a given 2-D target $\mathbf{g}$ of each TMR level, the 2-D equalizer $\mathbf{f}$ can be obtained by [12]

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g}. \quad (11)$$

Note that this paper assumes that the 2-D target coefficients at each TMR level are obtained by sampling the 2-D Gaussian pulse in (3) at the integer multiples of T_x and T_z . An example of the coefficients of the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer is illustrated in Table I, where only three equalizer taps, i.e., $\{f_{-1,i}, f_{0,i}, f_{1,i}\}$, where $i \in \{-1, 0, 1\}$, are shown.

B. TMR Estimation

The estimated TMR ($\hat{\text{TMR}}$) is computed by the TMR estimation block. In particular, the LLR output of the LDPC decoders at the last turbo iteration ($N_T = 3$) will be mapped to the estimated recorded sequence $\hat{x}_{l,k}$, before convolving with each predesigned 2-D target to obtain six data sequences, $\{\hat{z}_{0,k}\}$. Then, we calculate the MSE between each sequence $\hat{z}_{0,k}$ and the equalizer output $z_{0,k}$ according to

TABLE I
EXAMPLE OF THE COEFFICIENTS OF THE 2-D TARGET AND ITS
CORRESPONDING 2-D EQUALIZER FOR SOME TMR LEVELS

TMR	2D target coefficients			2D equalizer coefficients		
0%	0.0692	0.3255	0.0692	-0.0107	0.0203	-0.0059
	0.1785	0.8398	0.1785	0.0197	0.8056	0.0100
	0.0692	0.3255	0.0692	0.0065	-0.0119	0.0211
5%	0.0759	0.3571	0.0759	-0.0044	0.0172	-0.0085
	0.1781	0.8381	0.1781	0.0107	0.8035	0.0139
	0.0628	0.2955	0.0628	-0.0039	0.0166	-0.0029
10%	0.0829	0.3902	0.0829	-0.0075	0.0185	-0.0066
	0.1770	0.8238	0.1770	0.0124	0.7868	0.0137
	0.0567	0.2671	0.0567	-0.0069	0.0194	-0.0062
15%	0.0902	0.4245	0.0902	-0.0097	0.0169	-0.0086
	0.1751	0.8241	0.1751	0.0153	0.7939	0.0103
	0.0511	0.2404	0.0511	-0.0055	0.0154	-0.0066
20%	0.0977	0.4598	0.0977	-0.0041	0.0155	-0.0107
	0.1725	0.8120	0.1725	0.0121	0.7808	0.0191
	0.0458	0.2154	0.0458	-0.0048	0.0164	-0.0114

$\text{MSE} = 1/S \sum_{k=1}^S (z_{0,k} - \hat{z}_{0,k})^2$, where S is the length of the equalizer output. Eventually, the 2-D target used to generate $\hat{z}_{0,k}$ that yields a minimum MSE and its corresponding 2-D equalizer will be employed to process the original readback sequences $\{r_{l,k}\}$ during the next global iteration.

IV. SIMULATION RESULTS

We evaluate the performance between 1) the conventional system (i.e., the system in Fig. 2, but without TMR mitigation) and 2) the proposed method in Fig. 2, at the AD of 3 Tb/in² (i.e., $T_x = T_z = 14.5$ nm), where the 2-D Gaussian pulse response with the along-track PW_{50} of 19.4 nm and the across-track PW_{50} of 24.8 nm is considered, similar to [10]. We also define the signal-to-noise ratio as $\text{SNR} = 10 \log_{10}(V_p/(R\sigma^2))$, where $V_p = 1$ is assumed to be the peak value of the readback signal, and R is a code rate. Each bit error rate (BER) point is computed using as many 3640 b data sectors as needed to collect 500 erroneous bits. In simulation, the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer designed for 0% TMR level will be used at the first global iteration (i.e., $N_G = 1$), and we employ $N_{\text{LDPC}} = 3$, $N_T = 3$, and $N_G = 2$.

We first investigate the accuracy of our TMR estimation method. To do so, we send 5000 data sectors (each with random TMR ranged from 0% to 25%) into the system in Fig. 2, and check how many times the TMR estimation block can output a correct TMR. Simulation results indicate that, for the TMR levels of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%, our method yields the accuracies of 100%, 100%, 99%, 92%, 85%, and 83%, respectively. Clearly, the proposed method can correctly estimate the TMR level almost 100% when the TMR is $< 10\%$, which is better than the method in [6].

Next, we compare the BER performance of different systems for various TMR levels at the AD of 3 Tb/in² in Fig. 3. The curve labeled Convent-TMR $x\%$ and Proposed-TMR $x\%$ represent the conventional system and the proposed system with the TMR effect of $x\%$, respectively. It is clear that the proposed system performs similar to the conventional system when no TMR effect is present in the system. However, at $\text{BER} = 10^{-4}$, the proposed system can provide the perfor-

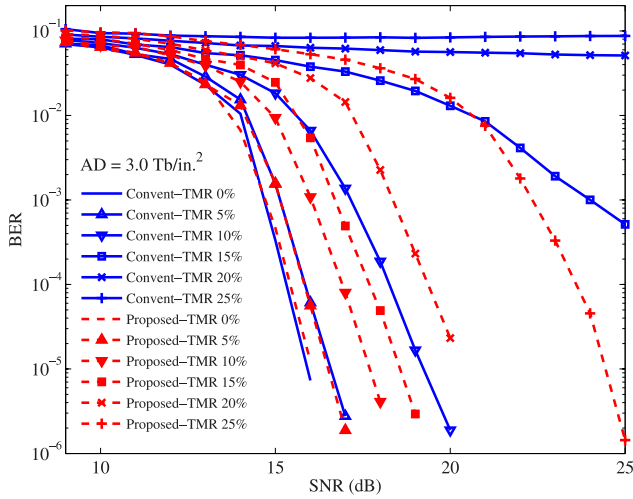


Fig. 3. Performance comparison for various TMR levels at AD of 3 Tb/in².

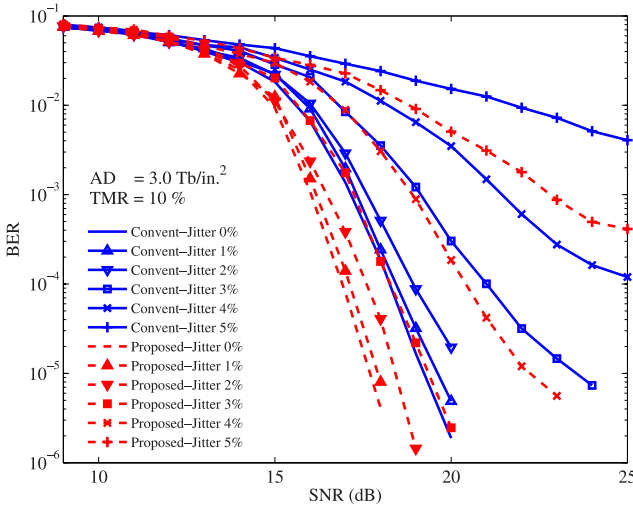


Fig. 4. BER performance of different schemes for several position jitter amounts at the TMR level of 10% and the AD of 3 Tb/in².

mance gain of >1.5 dB over the conventional system, when the TMR effect is $>5\%$.

We also verify that the proposed TMR mitigation scheme can perform well in the presence of media noise, e.g., position jitter, as shown in Fig. 4, where we fix a TMR level at 10% and vary the position jitter amount, σ_j/T_x , from 0% to 5%. The curve labeled Convent-Jitter $x\%$ and Proposed-Jitter $x\%$ represent the conventional system and the proposed system with the position jitter amount of $x\%$, respectively. Again, the proposed system outperforms the conventional system for all position jitter amounts, especially when the position jitter is large. For instance, at $\text{BER} = 10^{-4}$, it yields the performance improvement of >4.5 dB over the conventional system when the position jitter amount is fixed at 4%.

The reason that the proposed system performs well is because our TMR mitigation method can effectively estimate the TMR embedded in the readback signal. Using this information to select and use a new set of the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer that matches the actual TMR to reprocess the readback signal will offer some

performance improvement. Therefore, it is worth employing the proposed TMR mitigation method in the extremely high-density BPMR system, in particular, when the TMR effect is dominant. However, it should be noted that the performance gain obtained from the proposed method needs to be balanced against the increased complexity.

V. CONCLUSION

In this paper, we proposed the iterative TMR mitigation method for the BPMR system based on the readback signals. In particular, the three adjacent data tracks (i.e., the main and the two adjacent tracks) from the output of the LDPC decoders are used to estimate the TMR level. Then, the system performance can be improved using a new pair of the 2-D target and its corresponding 2-D equalizer, that is, the best fit to the estimated TMR level for the next global iteration. As shown in simulation, the proposed system is superior to the conventional system (without using a TMR mitigation method) in the presence of TMR both in the case of with and without media noise, in particular, when the TMR level is high and/or the position jitter is large.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Thailand Research Fund and the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund and in part by Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand, under Grant GB-58-3.

REFERENCES

- [1] P. W. Nutter, I. T. Ntokas, B. K. Middleton, and D. T. Wilton, "Effect of island distribution on error rate performance in patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp. 3214–3216, Oct. 2005.
- [2] Z. Jin, H. N. Bertram, B. Wilson, and R. Wood, "Simulation of the off-track capability of a one terabit per square inch recording system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 1429–1435, Mar. 2002.
- [3] Y.-B. Chang, D.-K. Park, N.-C. Park, and Y.-P. Park, "Prediction of track misregistration due to disk flutter in hard disk drive," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 1441–1446, Mar. 2002.
- [4] L. N. He et al., "Estimation of track misregistration by using dual-stripe magnetoresistive heads," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4, pp. 2348–2355, Jul. 1998.
- [5] R. Ehrlich and D. Curran, "Major HDD TMR sources and projected scaling with TPI," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 2, pp. 885–891, Mar. 1999.
- [6] L. M. M. Myint and P. Supnithi, "Off-track detection based on the readback signals in magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4590–4593, Nov. 2012.
- [7] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, and J.-G. Zhu, "Modifying Viterbi algorithm to mitigate intertrack interference in bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2274–2276, Jun. 2007.
- [8] W. Busyatras, A. Arrayangkool, C. Warisarn, L. M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "Estimating track mis-registration based on readback signal in bit-patterned media recording systems," in *Proc. ITC-CSCC*, Phuket, Thailand, Jul. 2014, pp. 881–884.
- [9] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, Jan. 1962.
- [10] S. Nabavi, "Signal processing for bit-patterned media channels with inter-track interference," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, USA, Dec. 2008.
- [11] Y. Ng, K. Cai, B. V. K. V. Kumar, T. C. Chong, S. Zhang, and B. J. Chen, "Channel modeling and equalizer design for staggered islands bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 6, pp. 1976–1983, Jun. 2012.
- [12] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detectors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 2, pp. 1083–1088, Mar. 1995.

PAPER

Soft-Output Decoding Approach of 2D Modulation Codes in Bit-Patterned Media Recording Systems

Chanon WARISARN^{†a)} and Piya KOVINTAVEWAT^{††b)}, Members

SUMMARY The two-dimensional (2D) interference is one of the major impairments in bit-patterned media recording (BPMR) systems due to small bit and track pitches, especially at high recording densities. To alleviate this problem, we introduced a rate-4/5 constructive inter-track interference (CITI) coding scheme to prevent the destructive data patterns to be written onto a magnetic medium for an uncoded BPMR system, i.e., without error-correction codes. Because the CITI code produces only the hard decision, it cannot be employed in a coded BPMR system that uses a low-density parity-check (LDPC) code. To utilize it in an iterative decoding scheme, we propose a soft CITI coding scheme based on the log-likelihood ratio algebra implementation in Boolean logic mappings in order that the soft CITI coding scheme together with a modified 2D soft-output Viterbi algorithm (SOVA) detector and a LDPC decoder will jointly perform iterative decoding. Simulation results show that the proposed scheme provides a significant performance improvement, in particular when an areal density (AD) is high and/or the position jitter is large. Specifically, at a bit-error rate of 10^{-4} and no position jitter, the proposed system can provide approximately 1.8 and 3.5 dB gain over the conventional coded system without using the CITI code at the ADs of 2.5 and 3.0 Tera-bit per square inch (Tb/in²), respectively.

Key words: bit-patterned media recording, log-likelihood ratio, modulation code, two-dimensional interference

1. Introduction

To fulfill an increasing demand for digital data storage, a recording density of future storage systems needs to be enhanced. As a conventional perpendicular magnetic recording technology has physical and engineering limitations, it cannot support an ultra-high storage capacity. Bit-patterned media recording (BPMR) is one of the solutions for future recording technologies, whose areal density (AD) can exceed 1 Tera-bit per square inch (Tb/in²) [1]–[4]. In BPMR, each data bit is recorded on a single domain magnetic island surrounded by non-magnetic material. To achieve high AD, the data bit islands in both the along-track and across-track directions must be moved closer, leading to an increase of two-dimensional (2D) interference. Moreover, the BPMR challenges also include media noise arising from island position jitter and island size fluctuations in both the along-track and across-track directions [5], track mis-registration

(TMR) resulting from the misalignment between the center of the read head and that of the main track [6], and written-in errors caused by mis-synchronization of the write clock to the predefined island locations [5].

Practically, the 2D interference, consisting of inter-symbol interference (ISI) and inter-track interference (ITI), is one of the major impairments in BPMR systems [3], which can significantly deteriorate the system performance if precautions are not taken. Thus, there exist many works presented in the literature to alleviate the 2D interference, including [7]–[9] (and references therein). Additionally, we found in [8], [9] that the ITI effect experienced in the detected bit can be either destructive or constructive, depending on the readback waveform of the detected bit and its surrounding bits. Specifically, given signal amplitude of an isolated bit, the destructive/constructive ITI will decrease/amplify its signal amplitude. Consequently, when the readback signal of the detected bit encounters the destructive ITI (DITI), it could easily cause an error at the data recovery process. Therefore, we introduced a constructive ITI (CITI) modulation code in [8] to prevent the data patterns that lead to the DITI being recorded onto a magnetic medium. The forbidden data patterns will not be allowed for recording, which will guarantee that the BPMR readback signal will not be corrupted by the severe ITI, thus facilitating the data detection process.

In practice, most communication systems employ iterative error-correction codes (ECCs) because they allow reliable operation at low signal-to-noise ratio (SNR) due to their large coding gains [10], [11]. However, since the CITI modulation code operates on a hard decision basis, it cannot be utilized in the iterative decoding scheme that requires the soft information to be exchanged with a channel detector and a low-density parity-check (LDPC) decoder [12].

Therefore, to employ the CITI modulation code [8] in the coded BPMR system, we propose the soft CITI coding scheme based on the log-likelihood ratio (LLR) algebra implementation in Boolean logic mappings [13], [14]. Hence, the soft CITI coding scheme together with a modified 2D soft-output Viterbi algorithm (2D-SOVA) detector [15]–[17] and a LDPC decoder will jointly perform iterative decoding. It will be shown later that the proposed system can enhance the system performance considerably if compared to the system without using the CITI code in iterative decoding, especially when the AD is high and/or the position jitter is large.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2

Manuscript received May 28, 2015.

Manuscript revised August 13, 2015.

[†]The author is with College of Data Storage Innovation (D*STAR), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

^{††}The author is with Data Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

a) E-mail: kwchanon@kmitl.ac.th

b) E-mail: piya@npru.ac.th

DOI: 10.1587/transele.E98.C.1187

explains the coded BPMR channel model, and Sect. 3 briefly describes the proposed scheme. Simulation results are given in Sect. 4. Finally, Sect. 5 concludes this paper.

2. Channel Description

Consider the coded BPMR system with the rate-4/5 CITI coding scheme in Fig. 1. A message sequence $u_k \in \{0, 1\}$ of length 3680 bits is encoded by a regular (3, 27) LDPC code [12] to obtain a sequence $a_k \in \{\pm 1\}$ of length 4140 bits, where the parity-check matrix has 3 ones in each column and 27 ones in each row. Then, the sequence a_k is split into four data tracks $\{a_{k,l}\}$, which will be further encoded by the CITI encoder [8] to obtain five data tracks $\{x_{k,l}\}$ before recording them onto a medium.

The readback signal from the k -th data bit on the l -th track can be written as

$$r_{k,l} = \sum_n \sum_m h_{m,n} x_{k-m,l-n} + n_{k,l}, \quad (1)$$

where $x_{k,l}$'s are the recorded bits, and $n_{k,l}$'s are additive-white Gaussian noise (AWGN) with zero-mean and variance σ_n^2 . Practically, $h_{m,n}$'s are the coefficients of the 2D channel response, which are obtained by sampling the isolated island pulse response modeled as the 2D Gaussian pulse response at integer multiples of the bit period T_x and the track pitch T_z according to [3], [4]

$$h_{m,n} = A \exp \left\{ -\frac{1}{2b^2} \left[\left(\frac{mT_x + \Delta_x}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{nT_z + \Delta_z}{PW_z} \right)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

where m and n are the time indices of the bit island in the along-track and across-track directions, $A = 1$ is supposed to be the peak amplitude of the pulse response, $b = 1/2.3548$ is a constant to account for the relationship between PW_{50} and the standard deviation of the Gaussian pulse [3], PW_{50} is the pulse width at half of its peak value, Δ_x is the along-track location fluctuation (or position jitter [3]), Δ_z is the across-track location fluctuation, PW_x is the PW_{50} of the along-track pulse, and PW_z is the PW_{50} of the across-track pulse.

Here, we assume that Δ_x and Δ_z are modeled as a truncated Gaussian probability distribution function with zero mean and variance σ_j^2 , where σ_j is specified as the percentage of T_x . In addition, $\{m, n\} \in (-L, \dots, 0, \dots, L)$, where $2L + 1$ is the pulse length, and L is an integer. Although L should be large enough to assure that the tail amplitude of the Gaussian pulse is small, this paper uses $L = 1$ for simplicity.

At the receiver, the five data tracks $\{r_{k,l}\}$ are detected by an array of five read heads simultaneously (or one read head to detect these tracks one by one with an aid of buffer memory). Then, the sequence $\{r_{k,l}\}$ is equalized by a 2D equalizer followed by a modified turbo equalizer [17], [18], which iteratively exchanges the soft information among a modified 2D-SOVA detector, a soft CITI decoder/encoder, and an LDPC decoder (implemented based on a message passing algorithm [12] with 3 internal iterations). Specifically, after the first global iteration ($N_G = 1$), the LDPC decoder will feed back the log-likelihood ratio (LLR) of a_k (i.e., λ_k^a) to the soft CITI encoder to produce the LLR of $\{x_{k,l}\}$ (i.e., $\lambda_{k,l}^x$) for the modified 2D-SOVA detector as the prior information. This process performs as many global iterations as needed before the LDPC decoder outputs an estimated message sequence $\hat{u}_k$.

3. Proposed Scheme

Consider the read head reads the data at the l -th track, and the interference in the cross-track direction is limited to the two adjacent tracks ($l-1$) and ($l+1$) as illustrated in Fig. 2. In [8], [9], we found that the DITI occurs when the k -th bit of the adjacent tracks differs from that of the l -th center track, i.e., $[x_{k,l-1}, x_{k,l}, x_{k,l+1}]$ is either $[-1, 1, -1]$ or $[1, -1, 1]$. It is very important to note that these patterns may be changed depending on the considered AD. Nevertheless, we found that the ADs of 2.5 and 3.0 Tb/in² have the same DITI patterns as stated before. Hence, the rate-4/5 CITI code [8] maps every 4-by-1 data array $[a_{k,l}, a_{k,l+1}, a_{k,l+2}, a_{k,l+3}]$ to a 5-by-1 codeword $[x_{k,l}, x_{k,l+1}, x_{k,l+2}, x_{k,l+3}, x_{k,l+4}]$ as given in Table 1, such that $[x_{k,j}, x_{k,j+1}, x_{k,j+2}]$ is neither $[-1, 1, -1]$ nor $[1, -1, 1]$ for $j \in \{l, l+1, l+2\}$. Additionally, the CITI encoding and decoding processes are performed based on

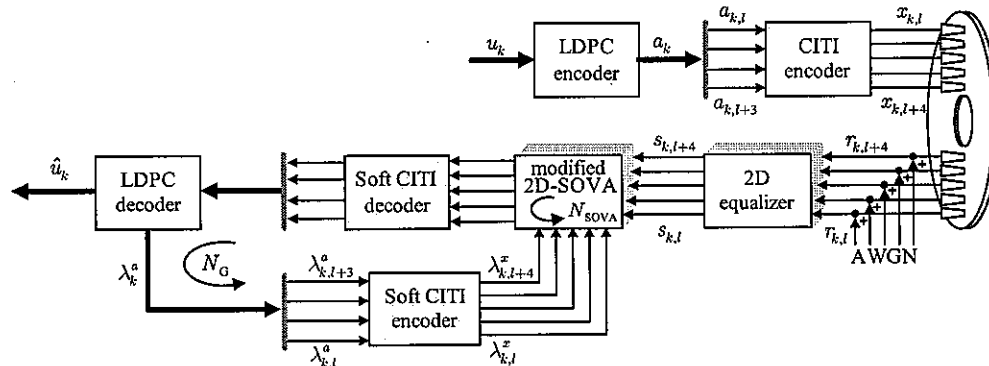


Fig. 1 A coded BPMR channel model with the proposed soft-CITI coding scheme.

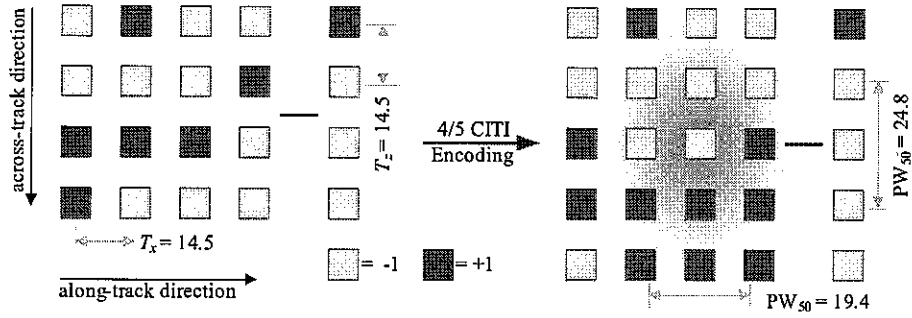


Fig. 2 An example illustration of the proposed rate-4/5 2D CITI modulation encoding scheme and configuration of the regular array islands for 3.0 Tb/in² under the isolated island's pulse response.

Table 1 A look-up table for the rate-4/5 2D modulation CITI encoding scheme.

4-bit input data, $a_{k,l}$				5-bit codeword, $x_{k,l}$				
$a_{k,l} \rightarrow a_{k,l+3}$				$x_{k,l} \rightarrow x_{k,l+4}$				
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1
1	1	1	-1	1	1	1	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

the look-up table [8], designed to avoid the data patterns that easily cause the DITI. The results are satisfactory for the uncoded BPMR system; however, since the CITI coding scheme operates on a hard decision basis, it cannot directly be utilized in conjunction with the LDPC code.

Therefore, to employ the CITI code in an iterative decoding scheme, we propose a soft CITI coding scheme that can be performed, based on Boolean logic circuits as shown in Fig. 3. To explain how it works, we denote each set of 4-by-1 input data array as $[a_0, a_1, a_2, a_3]$ and its corresponding 5-by-1 codeword as $[x_0, x_1, x_2, x_3, x_4]$. Hence, from Fig. 3, the outputs of the CITI encoder can be expressed as

$$\begin{aligned}
 x_0 &= a_0, \\
 x_1 &= a_0 a_1 + a_1 a_3 + a_1 a_2 + a_0 a_2 a_3, \\
 x_2 &= \bar{a}_0 a_1 + a_1 a_3 + a_1 a_2 + \bar{a}_0 a_2 a_3, \\
 x_3 &= a_2 \bar{a}_3 + \bar{a}_0 a_2 + a_1 a_2 + \bar{a}_0 a_1 \bar{a}_3, \\
 x_4 &= a_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3 + a_1 a_2 a_3 + \bar{a}_1 \bar{a}_2 a_3 + \bar{a}_1 a_2 \bar{a}_3,
 \end{aligned} \tag{3}$$

where $\bar{a}$ is a complement of a . Similarly, the outputs of the CITI decoder can also be written as

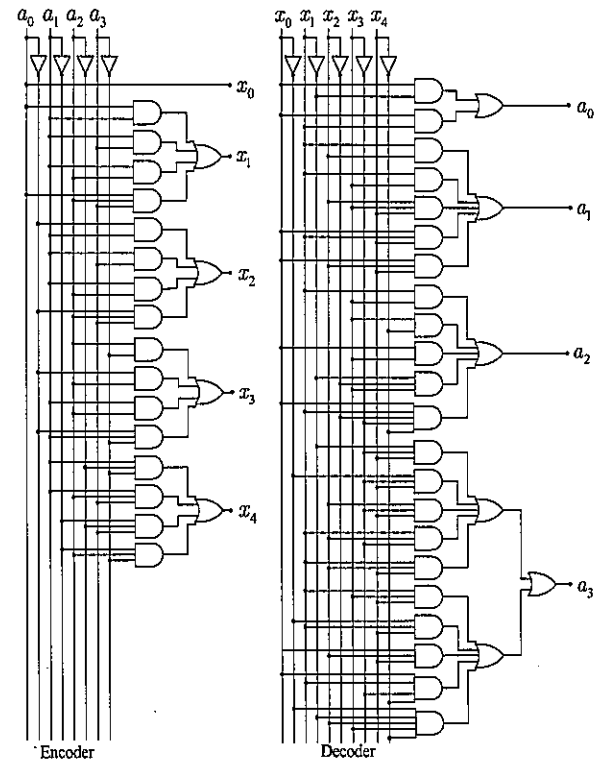


Fig. 3 The rate-4/5 CITI encoder and decoder based on Boolean logic mappings.

$$\begin{aligned}
 a_0 &= x_0 \bar{x}_1 + x_0 x_1, \\
 a_1 &= x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3 x_4 + x_0 x_1 x_4 \\
 &\quad + x_0 x_2 x_4, \\
 a_2 &= x_1 x_3 + x_3 \bar{x}_4 + x_0 x_3 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \\
 &\quad + x_0 x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4, \\
 a_3 &= \bar{x}_1 \bar{x}_3 x_4 + \bar{x}_0 \bar{x}_3 x_4 + x_2 \bar{x}_3 x_4 + x_1 x_2 \bar{x}_3 \\
 &\quad + x_1 x_2 x_4 + x_1 x_3 x_4 + \bar{x}_0 x_1 x_4 + x_0 x_2 x_4 \\
 &\quad + x_0 x_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 + \bar{x}_0 \bar{x}_1 x_2 x_3 \bar{x}_4.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Next, let us define the LLR of the bit z_k as

$$\text{LLR}(z_k) = \lambda_k^z = \ln \left(\frac{\Pr[z_k = 0]}{\Pr[z_k = 1]} \right), \tag{5}$$

where $\ln(\cdot)$ is a natural logarithm function, and $\Pr[z_k]$ is a probability of z_k [12]. To perform the soft CITI encoding/decoding process, we replace each data sample in (3) and (4) by its corresponding LLR. Then, we apply the technique based on the *min-max* in Boolean logic circuit soft-decision algorithm [13], [14], comprising NOT, AND, and OR gates, to produce the LLR output according to

$$\begin{aligned} \text{LLR}(\lambda_1 \lambda_2) &= \text{LLR}(\lambda_1 \text{ AND } \lambda_2) \\ &\approx \max(\lambda_1, \lambda_2), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{LLR}(\lambda_1 + \lambda_2) &= \text{LLR}(\lambda_1 \text{ OR } \lambda_2) \\ &\approx \min(\lambda_1, \lambda_2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{LLR}(\bar{\lambda}_1) &= \text{LLR}(\text{NOT } \lambda_1), \\ &\approx -\lambda_1, \end{aligned} \quad (8)$$

where λ_1 and λ_2 are the LLR inputs, and $\min(x)$ and $\max(x)$ functions return the smallest and largest value in a vector x , respectively. For example, the LLR of a_0 in (4) can be computed by $\lambda_0^a = \min(\max(\lambda_0^x, -\lambda_1^x), \max(\lambda_0^y, \lambda_1^y))$.

4. Simulation Results

This paper makes a comparison among 1) the conventional uncoded system (i.e., without ECCs) as used in [8], where a rate-4/5 CITI code, five 2D equalizers, and five 2D Viterbi detectors are employed; 2) the conventional coded system without CITI code, where a coded sequence a_k is written onto a single track with random data on adjacent tracks, and one 2D equalizer and one 2D-SOVA detector are used; and 3) the proposed system given in Fig. 1, where five modified 2D-SOVA detectors iterate soft information among them for N_{SOVA} iterations [17] and the iterative decoding is performed for N_G global iterations.

We consider the BPMR system in Fig. 1 at the AD of 2.5 Tb/in² ($T_x = T_z = 16$ nm) and 3.0 Tb/in² ($T_x = T_z = 14.5$ nm), where the along-track PW_{50} is 19.4 nm, and the across-track PW_{50} is 24.8 nm, similar to [3], [8]. Then, we define SNR as

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{R\sigma^2} \right), \quad (9)$$

in decibel (dB), where '1' is assumed to be the peak amplitude of the readback signal, and R is an overall code rate of the system. For example, the 2D 3-by-3 symmetric target for the AD of 2.5 Tb/in² is given by

$$\text{2D Target} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.20 & 0.02 \\ 0.10 & 1.00 & 0.10 \\ 0.02 & 0.20 & 0.02 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

and its corresponding 2D 3-by-7 equalizer are designed based on a minimum mean-squared error approach [3], [8] at the SNR required to achieve the bit-error rate (BER) of 10^{-4} . Notice that the 2D SOVA detector for this 3-by-3 symmetric target utilizes the trellis which has 36 states with 6 parallel branches between any two connected states [3], [8]. Each BER point is computed using as many 3680-bit data sectors

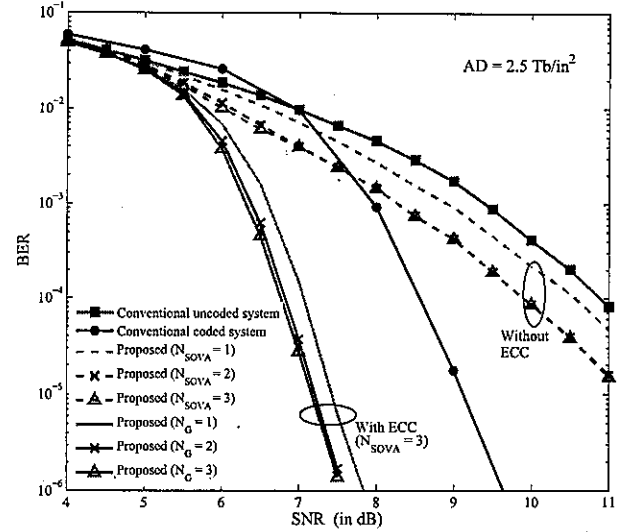


Fig. 4 BER performance of different systems without position jitter at the AD of 2.5 Tb/in².

as needed to collect at least 500 erroneous bits, which can provide the sufficient statistics of the result. For instance, at $\text{BER} = 10^{-4}$, our simulation transmits the message sequence $\{u_k\}$ of at least 5 million bits into the recorded system.

Figure 4 compares the BER performance of different systems at the AD of 2.5 Tb/in² without position jitter, i.e., $\sigma_j/T_x = 0\%$, where $N_G = 1$ denotes the system performance at the output of the LDPC decoder on the first pass. Clearly, without ECCs, the proposed system with $N_{\text{SOVA}} = 3$ still provides a performance gain of about 1 dB at $\text{BER} = 10^{-4}$ over the conventional uncoded system. Additionally, a big performance gap can be obtained when utilizing the CITI code in iterative decoding. Specifically, at $\text{BER} = 10^{-4}$, the proposed system with $N_G = 3$ and $N_{\text{SOVA}} = 3$ is superior to the conventional uncoded and coded systems for about 4 dB and 1.8 dB, respectively.

Similarly, we also evaluate the performance of different systems without position jitter at a higher AD, e.g., 3.0 Tb/in², as illustrated in Fig. 5. In this case, we found that the proposed system performs even better than the other systems. In particular, the proposed system with $N_G = 3$ and $N_{\text{SOVA}} = 3$ yields a performance gain of about 4.3 dB and 3.5 dB over the conventional uncoded and coded systems, respectively. This is because the CITI code prevents the destructive data patterns to be written onto a medium (i.e., the forbidden data patterns will never be recorded), thus reducing the ITI effect [8], [9]. Consequently, using the CITI code in iterative decoding will provide significant performance improvement.

Moreover, to verify that the proposed soft CITI coding scheme can be performed well when it encounters with some media noise (e.g., position jitter), we plot the SNR required to achieve $\text{BER} = 10^{-4}$ as a function of position jitter amounts, as shown in Fig. 6, where the position jit-

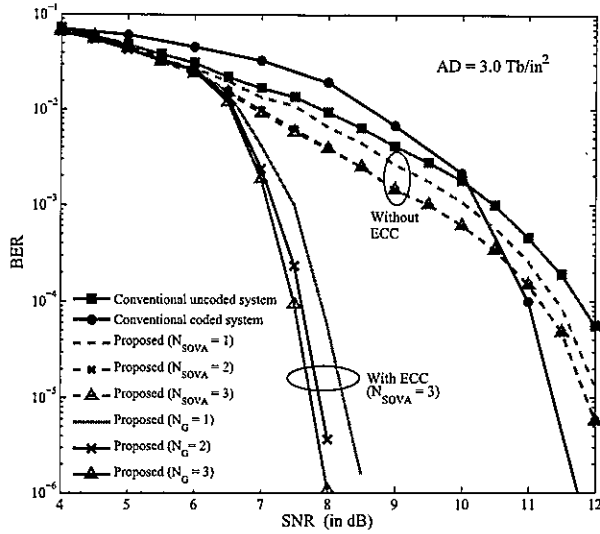


Fig. 5 BER performance of different systems without position jitter at the AD of 3.0 Tb/in².

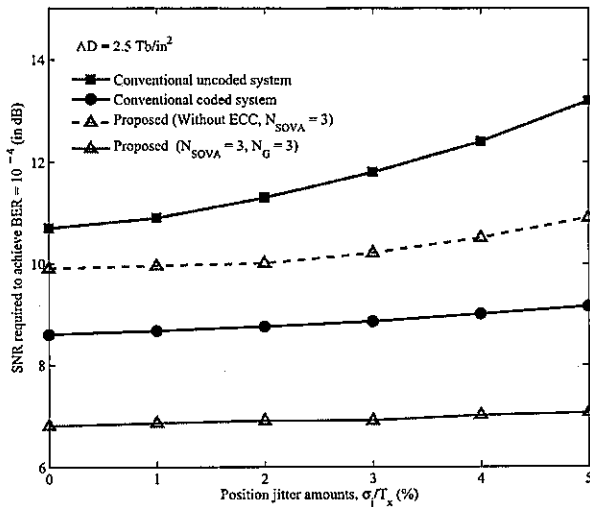


Fig. 6 The SNR required to achieve BER = 10⁻⁴ with several position jitter amounts at the AD of 2.5 Tb/in².

ter amounts σ_j/T_x are varied from 0% to 5%. Again, the proposed system outperforms the other systems, especially when the position jitter is large. Accordingly, it can be implied that the proposed system is worth employing in the coded BPMR system.

5. Conclusion

In this paper, an approach for the soft-decision decoding of the rate-4/5 CITI code has been proposed for BPMR systems, which is based on the LLR algebra implementation in Boolean logic mapping and uses the *min-max* in Boolean logic circuit soft-decision algorithm. Then, we propose to combine the soft CITI code with a modified 2D-SOVA detector and a LDPC decoder so as to jointly perform iterative

decoding in the coded BPMR system. Apparently, simulation results show that the system with our proposed soft CITI coding scheme yields a good performance and performs better than the conventional coded system without using the CITI code, especially when an areal density is high and/or the position jitter is large. These significant results additionally facilitate the fact that the ECCs with a rate-4/5 CITI code concatenation are desirable for the BPMR system.

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, KMITL, Thailand. The authors would like to thank Assoc. Prof. Dr. Pornchai Supnithi for his valuable suggestion.

References

- [1] B.D. Terris and T. Thomson, "Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.38, no.12, pp.R199-R222, June 2005.
- [2] T.R. Albrecht, O. Hellwing, R. Ruiz, M.E. Schabes, B.D. Terris, and X.Z. Wu, "Bit-patterned magnetic recording: Nanoscale magnetic islands for data storage," *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*, J.P. Liu, E. Fullerton, O. Gutfleisch, D.J. Sellmyer, eds., pp. 237-274, Springer, 2009.
- [3] S. Nabavi, Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng. Comput. Sci., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2008.
- [4] S. Nabavi, B.V.K.V. Kumar, J.A. Bain, C. Hogg, and S.A. Majetich, "Application of image processing to characterize patterning noise in self-assembled nano-masks for bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.45, no.10, pp.3523-3526, Oct. 2009.
- [5] H.J. Richter, A.Y. Dobin, O. Heinonen, K.Z. Gao, R.J.M.V.D. Veerdonk, R.T. Lynch, J. Xue, D. Weller, P. Asselin, M.F. Erden, and R.M. Brockie, "Recording on bit-patterned media at densities of 1 Tb/in² and beyond," *IEEE Trans. Magn.*, vol.42, no.10, pp.2255-2260, Oct. 2006.
- [6] W. Busyatras, C. Warisarn, L.M.M. Myint, and P. Kovintawewat, "A TMR mitigation method based on readback signal in bit-patterned media recording," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E98-C, no.8, pp.892-898, Aug. 2015.
- [7] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintawewat, "A recorded-bit patterning scheme with accumulated weight decision for bit-patterned media recording," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E96-C, no.12, pp.1490-1496, Dec. 2013.
- [8] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintawewat, "A constructive inter-track interference coding scheme for bit-patterned media recording system," *J. Appl. Phys.*, vol.115, no.17, 17B703, 2014.
- [9] P. Kovintawewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A rate-8/9 2-D modulation code for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.50, no.11, 3101204, Nov. 2014.
- [10] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes," *Proc. ICC '93*, vol.2, pp.1064-1070, May 1993.
- [11] S.B. Wicker, Error control systems for digital communication and storage, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [12] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.IT-8, pp.21-28, Jan. 1962.
- [13] N. Djuric and M. Despotovic, "Soft-output decoding approach of maximum transition run codes," *Proc. EUROCON '05*, pp.490-493, Nov. 2005.

- [14] N. Djuric and M. Despotovic, "Soft-output decoding in multiple-head MTR encoded magnetic recording systems," *Proc. ICC '06*, pp.1255-1258, June 2006.
- [15] J. Hagenauer and P. Hoeher, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications," *Proc. Globecom '89*, vol.3, pp.1680-1686, Nov. 1989.
- [16] T. Losuwan, C. Warisarn, L.M. Myint, and P. Supnithi, "A study of iterative detection method for four-grain based two-dimensional magnetic recording," *Proc. APMRC 2012*, FT-7, Sept. 2012.
- [17] 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.*, vol.115, no.17, 17B732, 2014.
- [18] A. Glavieux, C. Laot, and J. Labat, "Turbo equalization over a frequency selective channel," *Proc. Int. Symp. Turbo Codes*, pp.96-102, Sept. 1997.



Chanon Warisarn received the B.Eng. (Hon.) in Electronics Engineering Technology from King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Thailand in 2006, the Ph.D. degree in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand in 2011. He currently works at the College of Data Storage Innovation (D*STAR), KMITL. His current research interests are in the areas of communications and signal processing for data storage systems.



Piya Kovintavewat received the B.Eng. summa cum laude from Thammasat University, Thailand (1994), the M.S. degree from Chalmers University of Technology, Sweden (1998), and the Ph.D. degree from Georgia Institute of Technology, USA (2004), all in Electrical Engineering. He currently works at Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University (NPRU), Thailand. His research interests include coding and signal processing as applied to digital data storage systems. Prior to working at NPRU, he worked as an engineer at Thai Telephone and Telecommunication company (1994-1997), and as a research assistant at National Electronics and Computer Technology Center (1999), both in Thailand. He also had work experiences at Channel Department, Seagate Technology Research Center, Pennsylvania, USA.

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

This content has been downloaded from IOPscience. Please scroll down to see the full text.

2016 Jpn. J. Appl. Phys. 55 07MB01

(<http://iopscience.iop.org/1347-4065/55/7S3/07MB01>)

View [the table of contents for this issue](#), or go to the [journal homepage](#) for more

Download details:

IP Address: 161.246.22.23

This content was downloaded on 31/07/2016 at 08:49

Please note that [terms and conditions apply](#).



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 Tbpsi 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 (Tbpsi).^{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 Tbpsi. 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 $10 \times 10 \times 10$ nm³ 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 Tbpsi, respectively.

Because the bit islands become smaller, the thermal stability must be compensated by utilizing a high anisotropy material such as L1₀-FePt.¹⁸ Nevertheless, this work considers the material L1₀-FePt with a magnetocrystalline anisotropy constant (K_u) of 4.6 MJ/m³ 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 0–20° 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

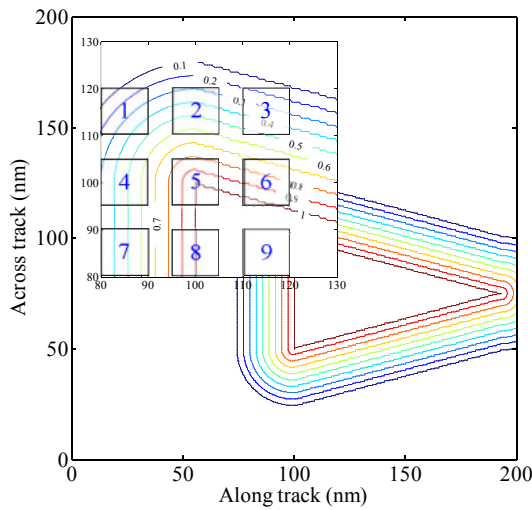
Table I. Illustration of all possible patterns of four previously recorded bits.

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

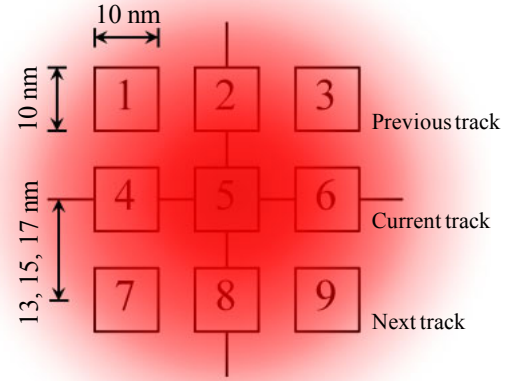
Track	Pattern 13	Pattern 14	Pattern 15	Pattern 16
Previous track	-1	1	-1	1
Current track	1	-1	-1	-1
Next track	-1	-1	-1	-1

**Fig. 1.** (Color online) Write head field contour modeled with the maximum amplitude of 20 kOe,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 $\text{L1}_0\text{-FePt}$ 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 $10 \times 10 \times 10 \text{ nm}^3$ bit 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 $\text{L1}_0\text{-FePt}$ 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, 650 K is set to be the maximum temperature (at a nucleus) for the writing process, where a room temperature is 293 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 $\text{Fe}_{55}\text{Pt}_{45}$.¹⁹⁾

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

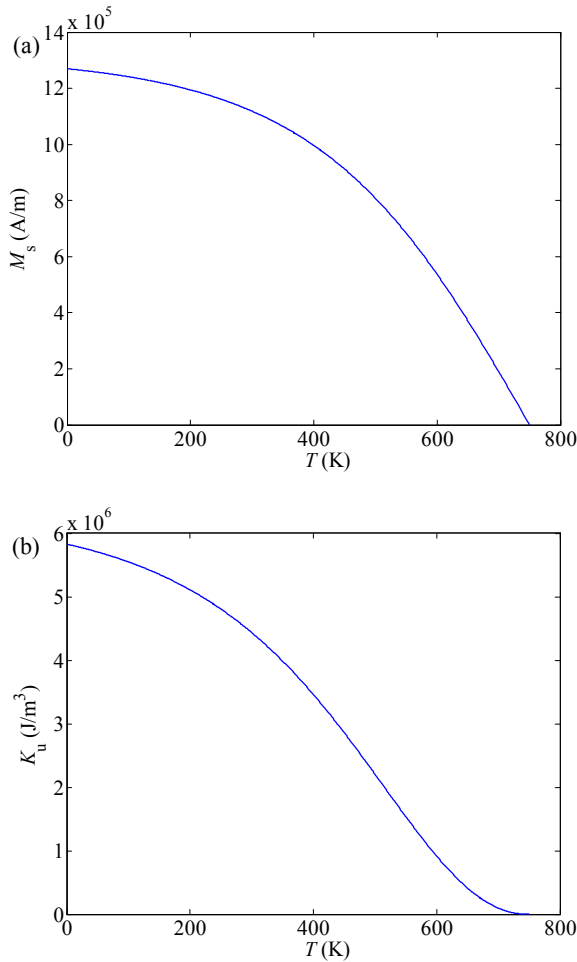


Fig. 3. (Color online) Dependence of (a) M_s and (b) K_u on the temperature T plotted via the Brillouin function.²⁹⁾

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

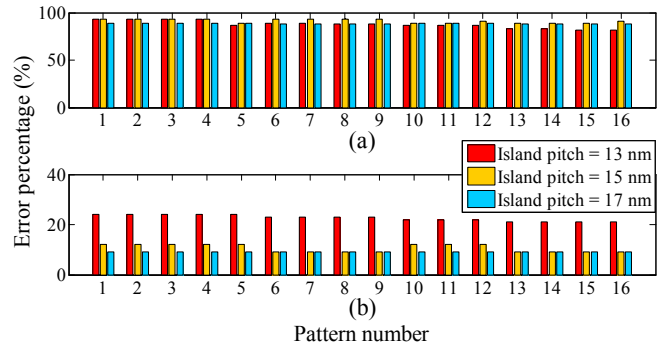


Fig. 4. (Color online) Error percentage as a function of data patterns at three different ADs; (a) the hotspot and the main pole are moved together within all nine islands’ area, and (b) both of the hotspot and the write head positions are moved over the target island’s area (the fifth island).

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 Tbpsi. 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. Ghoreysy 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. Miltat 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. Kellock, *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. Siritaratwat, *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. Warisam, *J. Appl. Phys.* **117**, 17A904 (2015).

Effects of Island Volume and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording

Warunee Tipcharoen¹, Chanon Warisarn¹, and Piya Kovintavewat²

¹College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Data Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

Received 29 May 2016, revised 8 Jul 2016, accepted 15 Jul 2016, published 28 Jul 2016, current version 6 Oct 2016.

Abstract—Heated-dot magnetic recording (HDMR), which employs the laser to heat a bit-patterned medium before recording data, is a promising technology to achieve an ultra-high recording density. Generally, many parameters can cause an error during the writing process in an HDMR system; however, this letter investigates only the effect of bit island volume, bit island position fluctuation, and hotspot position fluctuation. Specifically, three bit island volumes are considered, i.e., 1100, 860, and 620 nm³. In addition, we also study the 3-by-3 data patterns that easily cause an error when the hotspot and write head positions have fluctuated. To achieve an error-free writing process, the heating temperature is studied using the Brillouin function for thermal calculations. Implementation of treating the hotspot and evaluating the thermal effect is explicitly described. Simulation results indicate that the smaller the position variation, the lower the error percentage. Moreover, we found that the error percentage is decreased as the heating temperature is increased. Finally, it is apparent that the smaller the island volume, the lower the error percentage.

Index Terms—Information storage, bit-patterned media, heat-assisted magnetic recording, write errors.

I. INTRODUCTION

To achieve an extremely high areal density (AD) in magnetic recording systems, we need to overcome two hindrance parameters encountered in a conventional magnetic recording system, namely a superparamagnetic limit and magnetic transition noise. A bit-patterned medium (BPM) is one promising technology for solving these two problems; however, the thermal stability of BPM could still be a concern. This results from the use of high magnetocrystalline anisotropy (K_u) material such as L1₀-FePt, which is generally adopted as a magnetic medium. Practically, a high K_u medium also requires a high magnetic field strength to record the data onto a medium. Nonetheless, a current write field value cannot exceed the limit of about 24–25 kOe [Fang 2014]. Thus, a medium coercivity must be reduced before recording data. This can be done by utilizing a heat-assisted magnetic recording (HAMR) technology, where the laser is employed to heat a medium at near the Curie temperature before writing the data. In practice, the thermal spot size is a challenge of the HAMR technology [Kyder 2008] because it normally determines the AD (i.e., the smaller the spot size, the higher the AD).

Recently, a new technology known as heated-dot magnetic recording (HDMR) [Ghoreyshi 2014, Tipcharoen 2016] is employed to enable the AD up to 10 Terabit per square inch (Tbpsi). The HDMR technology combines the techniques used in HAMR with BPM and, possibly, two-dimensional magnetic recording (TDMR) [Lin 2013]. Practically, the heat is applied on the island while the data bit is being written. In general, the inappropriate thermal distribution and write head field gradient that cover the neighboring recorded bits in both down- and cross-track directions can cause a written-in error during the writing process. Additionally, this written-in error can result from

bit island position jitter, main pole position fluctuation, heat spot position, and so on [Lin 2013, Asbahi 2014, Vogler 2016]. Therefore, the durability of recorded-bit patterns against these effects should be understood before recording the data onto a medium.

In this letter, we investigate the effects of heat spot and bit island position fluctuations in the HDMR system. We also analyze the effect of island volumes at various heating temperatures. The thermal effect on BPM is evaluated via the Brillouin function [Thiele 2002, Akagi 2012], which is the relationship between a magnetic material and temperature. Then, the micromagnetic simulation is utilized based on the Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) equation [Donahue 1999, Zhang 2012].

The rest of this letter is organized as follows. Section II describes a micromagnetic modeling. Simulation results and discussion are given in Section III. Finally, Section IV concludes.

II. MICROMAGNETIC MODELING

We consider micromagnetic modeling based on the LLG equation. Three cylinder bit island volumes are considered, i.e., 1100, 860, and 620 nm³, which will be referred to as large, moderate, and small volume, respectively, and the thickness of all cases is set to 10 nm.

The island pitch of both down- and cross-track directions is 15 nm, corresponding to the AD of 2.86 Tbpsi. The high anisotropy material L1₀-FePt is used as a magnetic medium with K_u of 4.6 MJ/m³, the saturation magnetization, M_s , of 1125 kA/m [Thiele 2002], the exchange coupling intra-island of 12 pJ/m [Wang 2011, Zhang 2012], and the Curie temperature, T_c , of 770 K [Thiele 2002].

The thermal evaluation via micromagnetic simulation in this work can be summarized as follows.

1) The bit-patterned layout specifications are created according to the three island volumes, where each island has different easy axis declined between 0° and 20° [Tipcharoen 2016].

Corresponding author: C. Warisarn (chanon.wa@kmitl.ac.th). Advances in Magnetics Conference, Bormio, Italy, 14–16 March 2016.
Digital Object Identifier 10.1109/LMAG.2016.2594167

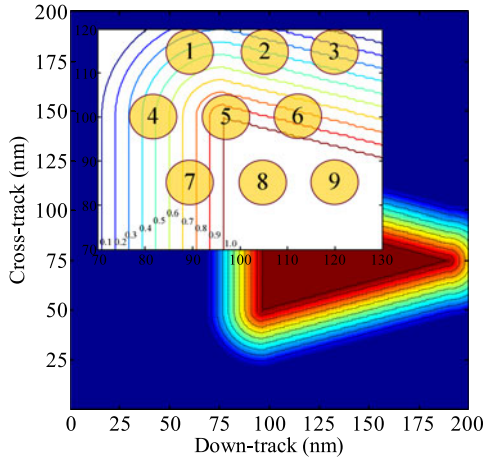


Fig. 1. Write head field contour with the maximum amplitude of 20 kOe [Yamashita 2012], where the corner is used to magnetize the target bit island (i.e., the 5th bit island).

Table 1. All possible data patterns associated with the four previously recorded bits.

Track	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3	Pattern 4
Written-track	-1 -1 -1	-1 -1 1	1 -1 -1	1 -1 1
Current-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1
Next-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1
Track	Pattern 5	Pattern 6	Pattern 7	Pattern 8
Written-track	-1 1 -1	-1 1 1	1 1 -1	1 1 1
Current-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1
Next-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1
Track	Pattern 9	Pattern 10	Pattern 11	Pattern 12
Written-track	-1 -1 -1	-1 -1 1	1 -1 -1	1 -1 1
Current-track	1 -1 -1	1 -1 -1	1 -1 -1	1 -1 -1
Next-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1
Track	Pattern 13	Pattern 14	Pattern 15	Pattern 16
Written-track	-1 1 -1	-1 1 1	1 1 -1	1 1 1
Current-track	1 -1 -1	1 -1 -1	1 -1 -1	1 -1 -1
Next-track	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1	-1 -1 -1

2) We consider a 3-by-3 data array as shown in Fig. 1, where we assume that all 9 bits have the initial magnetization of “-1” or pointed down in the $-z$ direction. Then, we define the 5th bit island as the target bit where the data will be written, the 1st–4th bit islands are the previously recorded bits, and the 6th–9th bit islands are the next written bits. Thus, there are 16 possible data patterns that will be studied in this work, as given in Table 1.

3) The triangular write pole, whose cross- and down-track dimensions are 50.5 nm and 93.5 nm, respectively [Yamashita 2012], is used to write the data onto a medium. In addition, the gradient fields in cross- and down-track directions are 483 and 500 Oe/nm, respectively, where the highest field magnitude is set to be 20 kOe. Then, we assume that the magnetic field of the triangular head corner is applied in the $+z$ direction to magnetize the bit “+1” onto the target bit (i.e., the 5th bit island), as illustrated in Fig. 1.

4) The temperature effect on the coercivity of the heat-assisted medium is calculated via the Brillouin function, which reveals the

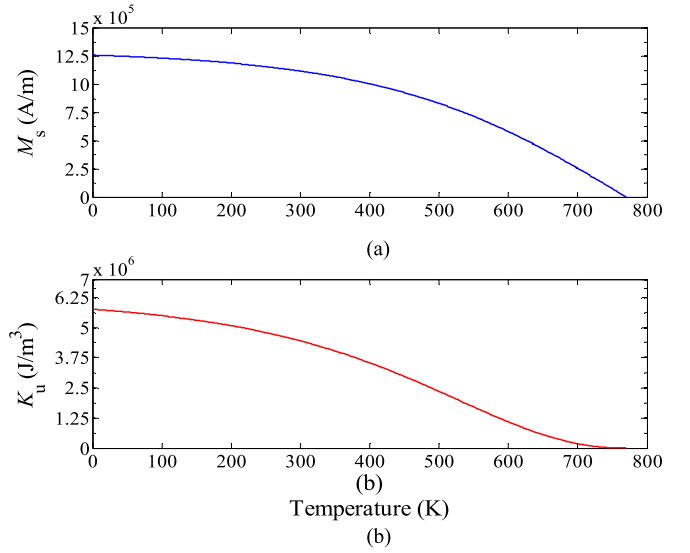


Fig. 2. (a) M_s and (b) K_u of the L1₀-Fe₅₅Pt₄₅ material depending on temperature, where the K_u and M_s at room temperature are 4.6 MJ/m³ and 1125 kA/m, respectively [Thiele 2002, Akagi 2012].

relationship among K_u , M_s , and temperature. Here, the thermal profile is assumed to be a Gaussian shape given by $T = T_0 \exp(0.69318 \times (-r^2/r_0^2))$ where T_0 is the maximum temperature (K), r is the distance (m), and r_0 is the full width of the thermal profile at half its maximum (approximately 35 nm) [Xu 2012]. While the bit islands are being heated, the K_u and M_s of each area will be different according to the Brillouin function [Thiele 2002, Akagi 2012], i.e.,

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

where β is the relationship between T and T_c , defined as

$$\beta = 3 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \quad (2)$$

and

$$\frac{K_u(T)}{K_u(0)} = \left[\frac{M_s(T)}{M_s(0)} \right]^n \quad (3)$$

where $M_s(0) = 1.125$ MA/m and $J = 0.85$ are the M_s at room temperature (293 K) and an angular momentum, respectively. Note that the n factor of the magnetic thin film of L1₀-FePt series normally is approximately 2 [Thiele 2002]. In general, the dependence of K_u and M_s on the temperature can be obtained from (3) as illustrated in Fig. 2. Clearly, both of them will be zero when the temperature reaches 770 K (i.e., at T_c), which implies that this material cannot be utilized to record the data. Therefore, the heating temperature used in the actual drive should be lower than T_c . For example, the large thermal spot size will have the temperature distribution covering a wide area, which in turn affects all surrounding bit islands. This may cause the neighboring islands to be overwritten if the heat and magnetic field are high enough. Therefore, this is definitely one of the writing error sources.

Additionally, we consider the case where the heat and magnetic field pulses are constant like a rectangular pulse. The energy of the torque term in the LLG equation is used as a criterion to determine when the calculation is finished. In our simulation, the calculation will

be finished when the energy is less than 0.01 A/m. Hence, this work will not refer to a switching time.

III. RESULTS AND DISCUSSION

We investigate the error that results from a magnetization reversal in either the target or the previous recorded islands during the writing process. Specifically, the magnetization across all spins in each island should lay in the saturated direction. This means that the magnetization of the target island must have the same direction as that of the applied field, whereas the magnetization of the four previously recorded islands must also have the same magnetization direction as given in Table 1.

After the writing process, the magnetic domains of the 1st–5th islands are observed. Specifically, the error occurs when the target island cannot be written and/or at least one island of the four previously recorded islands is overwritten. In simulation, we rewrite the same bit on the target island 1000 times, where the four previously recorded bits are randomly chosen at each time. Then, we count the number of errors and average them to obtain the error percentage.

We consider only the error that occurs from the following three cases: 1) Case A, where the bit island position fluctuates with a fixed write pole at the center of the ideal target island; 2) Case B, where the main pole position fluctuates within the target island area with the perfect staggered bit island arrangement, and 3) Case C, where both the bit island and main pole positions fluctuate. The results can be explained as follows.

A. Bit Island Position Fluctuation

The imperfection of the bit island arrangement is one of the media noise sources that can affect the performance of reading/writing processes [Nutter 2008]. In this case, the main pole is fixed above the center of the ideal target island as shown in Fig. 1, and only the bit island position fluctuates within ± 2 nm from the center of its ideal island position according to Gaussian distribution.

Fig. 3(a) shows the error percentage based on three different island volumes in the presence of island position jitters. The error decreases as the heating temperature increases. In addition, all island volumes provide a similar error percentage at low temperature (e.g., at 650 K) but they have different results at higher temperature. Specifically, a small-volume island yields the lowest error percentage when compared to other island volumes, and it is possible to have an error-free writing process when the heating temperature is at least 670 K.

B. Main Pole Position Fluctuation

In this case, the bit island arrangement is assumed to be perfect without position jitter. Only the center of the main pole fluctuates within the target island area according to Gaussian distribution. Note that in this letter the center of the heat spot is moved together with the main pole.

The error percentage of various island volumes in the presence of main pole position fluctuation is displayed in Fig. 3(b). Clearly, the error percentage is maximum at 650 K for all cases because the temperature is not high enough to record the data onto a medium. Notice that the error in Case B is more severe than that in Case A

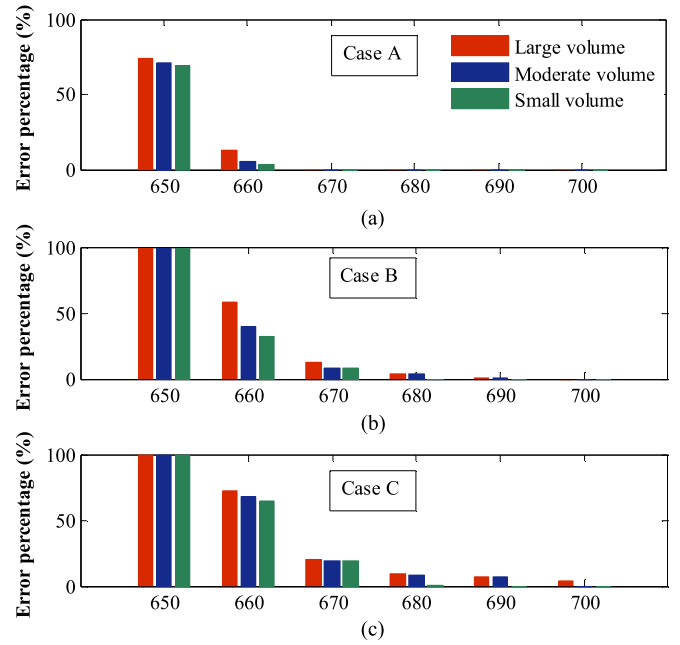


Fig. 3. Error percentage of (a) Case A, (b) Case B, and (c) Case C. It should be noted that the results are considered under the condition that the main pole can only move within the target island area, and each bit island cannot be overlapped one another. Heating temperature (K).

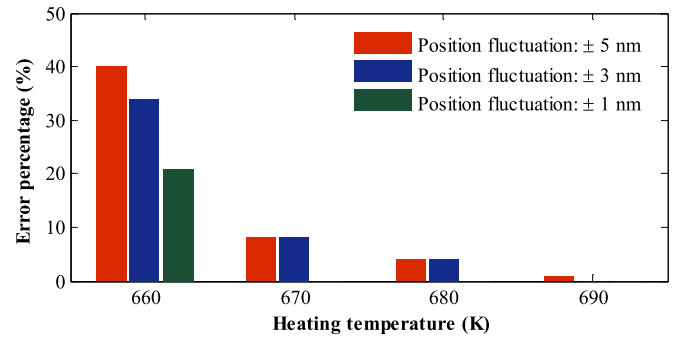


Fig. 4. Error percentage of the moderate-volume island with various main pole position variations.

because the position variation of the main pole is larger than that of the bit island. Again, the smaller the island volume, the lower the error percentage. Also, the error decreases as the heating temperature increases, and the error-free writing process can be achieved when the temperature is above 700 K. We also studied the effect of different island shapes (i.e., square, circular, and hexagonal), but with same volume, main pole position variation, and data density. We found that the error during the writing process does not depend on the island shape.

Next, we investigated the effect of the main pole position variation as shown in Fig. 4, where the moderate-volume island is chosen as for an example. It is evident that the higher the position variation (i.e., ± 5 nm), the larger the error percentage. In addition, we found in this study that when the main pole position variation is confined within ± 1 nm, the error percentage will decrease rapidly when the heating temperature exceeds 660 K, whereas the data cannot be recorded on the island when the heating temperature is below 650 K.

C. Main Pole Position Fluctuation With Imperfect Bit Island Arrangement

In this case, both of the bit island and main pole positions fluctuate within ± 2 nm and ± 5 nm, respectively, according to Gaussian distribution. As demonstrated in Fig. 3(c), the error percentage in this case (Case C) is definitely higher than both Case A and Case B, regardless of the heating temperature. Similarly, the error percentage decreases as the heating temperature increases. We also found that when the heating temperature is changed from 670 K to 680 K, the error percentage of the large- and moderate-volume islands can be reduced by about 50%, whereas that of the small-volume island is decreased by about 90% and its error percentage becomes zero at 690 K. Additionally, it is apparent that the error percentage of the large- and moderate-volume islands can be below 10% when the heating temperature is at least 680 K and the error-free writing process can be achieved at 710 K.

It should be pointed out that all results show that the error in this work comes from the fact that the target island cannot be written. With the $L1_0$ -FePt material as a magnetic medium, all data patterns in Table 1 yield similar error percentage. However, we found that if another material with a lower K_u is used, different data patterns will lead to different error percentages. In any case, we found that the error percentage can be decreased when the heating temperature is increased. Although a higher temperature can yield a lower error, caution is needed because the high temperature may destroy overcoat and lubricant layers. Practically, a recording layer is mostly made from ferromagnetic materials and its behavior will become like paramagnetic materials at T_c .

IV. CONCLUSION

In this letter, we investigate the effect of island volumes and heat spot position fluctuations based on the micromagnetic simulation of HDNR at an areal density of 2.86 Tbps. The thermal calculation is handled by the Brillouin function and the magnetization motion is solved by the LLG equation. We also explain how to treat the heat spot and evaluate the thermal effect in the LLG equation. All possible 16 3-by-3 data patterns associated with the four previously recorded islands are considered, but these bits have no effect on the writing process. Simulation indicates that the main cause of errors in the writing process comes from the fact that the target bit cannot be written successfully. Moreover, the smaller the island volume, the lower the error percentage, and the error percentage decreases as the heating temperature increases. Specifically, an error-free writing process for Case A and Case C can be obtained when the heating temperature approximately exceeds 670 K and 710 K, respectively, whereas that for Case B can be obtained when the position variation of the main pole is less than ± 1 nm with the heating temperature above 670 K.

We also analyzed the effect of different island shapes (i.e., square, circular, and hexagonal), and found that the island shape has no effect on error during the writing process.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- Akagi F, Mukoh M, Mochizuki M, Ushiyama J, Matsumoto T, Miyamoto H (2012), "Thermally assisted magnetic recording with bit-patterned media to achieve areal recording density beyond 5 Tb/in²," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, pp. 309–313, doi: [10.1016/j.jmmm.2010.11.082](#).
- Asbahi M, Lim K T P, Wang F, Lin M Y, Chan K S, Wu B, Ng V, Yang J K W (2014), "Determination of position jitter and dot-size fluctuations in patterned arrays fabricated by the directed self-assembly of gold nanoparticles," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, 3200405, doi: [10.1109/TMAG.2013.2280018](#).
- Donahue M J, Porter D G (1999), "OOMMF User's Guide, Version 1.0," Interagency Report NISTIR 6376, Nat. Inst. Standards Technology, Gaithersburg, MD, USA.
- Ghoreyshi A, Victora R H (2014), "Heat assisted magnetic recording with patterned FePt recording media using a lollipop near field transducer," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, 17B719, doi: [10.1063/1.4864243](#).
- Kryder M H, Gage E C, McDaniel T W, Challener W A, Rottmayer R E, Ju G, Hsia Y-T, Erden M F (2008), "Heat assisted magnetic recording," *Proc. IEEE*, vol. 96, pp. 1810–1835, doi: [10.1109/JPROC.2008.2004315](#).
- Lin M Y, Elidrisi M R, Chan K S, Eason K, Chua M, Asbahi M, Yang J K W, Thiyagarajah N, Ng V (2013), "Channel characterization and performance evaluation of bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, pp. 723–729, doi: [10.1109/TMAG.2012.2226708](#).
- Nutter P W, Shi Y, Belle B D, Miles J J (2008), "Understanding sources of errors in bit-patterned media to improve read channel performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, pp. 3797–3800, doi: [10.1109/TMAG.2008.2002516](#).
- Thiele J-U, Coffey K R, Toney M F, Hedstrom F A, Kellock A J (2002), "Temperature dependent magnetic properties of highly chemically ordered Fe_{55-x}Ni_xPt₄₅ L1₀ films," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, pp. 6595–6600, doi: [10.1063/1.1470254](#).
- Tipcharoen W, Warisarn C, Kaewrawang A, Kovintavewat P (2016), "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, 07MB01, doi: [10.7567/JJAP.55.07MB01](#).
- Vogler C, Abert C, Bruckner F, Suess D, Praetorius D (2016), "Heat-assisted magnetic recording of bit-patterned media beyond 10 Tb/in²," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, 102406, doi: [10.1063/1.4943629](#).
- Wang F, Xu X-H, Liang Y, Zhang J, Zhang J (2011), "Perpendicular L1₀-FePt/Fe and L1₀-FePt/Ru/Fe graded media obtained by post-annealing," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 126, pp. 843–846, doi: [10.1016/j.matchemphys.2010.12.031](#).
- Wang F, Xu X-H (2014), "Writability issues in high-anisotropy perpendicular magnetic recording media," *Chin. Phys. B*, vol. 23, 036802, doi: [10.1088/1674-1056/23/3/036802](#).
- Xu B X, Liu Z J, Ji R, Toh Y T, Hu J F, Li J M, Zhang J, Ye K D, Chia C W (2012), "Thermal issues and their effects on heat-assisted magnetic recording system," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, 07B701, doi: [10.1063/1.3671421](#).
- Yamashita M, Okamoto Y, Nakamura Y, Osawa H, Miura K, Greaves S J, Aoi H, Kanai Y, Muraoka H (2012), "Modeling of writing process for two-dimensional magnetic recording and performance evaluation of two-dimensional neural network equalizer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, pp. 4586–4589, doi: [10.1109/TMAG.2012.2194988](#).
- Zhang J, Liu Y, Fang W, Zhang J, Zhang R, Wang Z, Xu X (2012), "Design and micro-magnetic simulation of the L1₀-FePt/Fe multilayer graded film," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, 073910, doi: [10.1063/1.3702876](#).