

รายงานฉบับสมบูรณ์

วิธีการแก้ไขการอ่านนอกเทร็คข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีการบันทึก

ข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น

Track Misregistration Correction Methods for Bit-Patterned
Magnetic Recording Technology

รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วริสาร

สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2562

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): วิธีการแก้ไขการอ่านนอกแตร็กข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น

แหล่งเงิน : งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ.....2562..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....125,000.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1..... ปี ตั้งแต่.....1 สิงหาคม 2561.....ถึง.....31 กรกฎาคม 2562.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ : รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ผู้ร่วมโครงการ: นายทินวัฒน์ ชุมพวิเศษ

บทคัดย่อ

การลดขนาดความกว้างของแตร็กข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กส่งผลให้เราได้มาซึ่งความหนาแน่นของข้อมูลต่อพื้นที่ (areal density, AD) ที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแตร็กก็เพิ่มขึ้นตามด้วยเช่นกัน ซึ่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วผลกระทบนี้สามารถบรรเทาด้วยการใช้การเข้ารหัสข้อมูล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เราจะได้นำเสนอการเข้ารหัสข้อมูลอัตรารหัส 5/6 มอดคูละชันซึ่งถูกออกแบบร่วมกับเทคนิคการอ่านข้อมูลหลายแตร็กด้วยหัวอ่านเดี่ยว (single-reader/two-track reading, SRTR) เพื่อจัดการกับปัญหานี้ซึ่งเราพิจารณาในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นแบบเกาะข้อมูลวางเยื้อง (staggered bit-patterned media recording, BPMR) จากนั้นเราประเมินประสิทธิภาพของระบบที่ได้นำเสนอด้วยค่าอัตราบิตผิดพลาด (bit-error rate, BER) โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนของสื่อบันทึกข้อมูล เช่น ความผันผวนของตำแหน่งและขนาดของเกาะข้อมูล ผลการจำลองระบบชี้ให้เห็นว่าที่ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลผู้ใช้ (user density) เท่ากัน วิธีที่เราได้นำเสนอนั้นให้ประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสข้อมูลประมาณ 1 dB ที่อัตราบิตผิดพลาดเท่ากับ 10^{-5} และมีประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบแบบดั้งเดิมเป็นอย่างมาก

คำสำคัญ : การแทรกสอดระหว่างแตร็ก, การบันทึกข้อมูลบิตแพตเทิร์นมีเดีย, การอ่านแบบหลายแตร็กด้วยหัวอ่านเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Methods of Encoding and Decoding the Two-Dimensional Modulation Code for Ultra-High Density Magnetic Recording.....

Researcher: Assoc. Prof. Dr. Chanon Warisarn.....

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

ABSTRACT

A reduction in the track width of magnetic recording systems results in a welcome increase in areal density (AD), but also in the unfortunate appearance of extreme inter-track interference (ITI) that can severely deteriorate system performance. The effect of severe ITI may be mitigated through the use of coding schemes. In this paper, therefore, we present a rate-5/6 two-dimensional (2D) modulation code that is designed based on a proposed single-reader/two-track reading (SRTR) technique to cope with this serious problem in staggered bit-patterned media recording (BPMR) systems. We then evaluate the bit-error rate (BER) performance of the proposed system in the presence of media noises, e.g., position and size fluctuations. Our simulation results indicate that, at the same user density, the proposed system is better than an uncoded system by about 1.0 dB at the BER of 10^{-5} and is also superior to a conventional recording system.....

Keywords: Intertrack interference, Bit-patterned media recording, Single-reader/two-track reading.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนภายใต้ทุนโครงการวิจัยเงินรายได้ สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003 จากวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก.....	6
บทที่ 3 การออกแบบรูปแบบการเข้ารหัสมอดูเลชัน.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	31
บทที่ 5 บทสรุป.....	40
ภาคผนวก-ก- (เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์).....	42
ภาคผนวก-ข- (ประวัตินักวิจัย).....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศที่ส่งออกอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อันดับหนึ่งของโลกในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะช่วยทำให้บริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เห็นว่าการประเทศไทยมีบุคลากรที่มีความสามารถทางด้านเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และรัฐบาลสนับสนุนอุตสาหกรรมทางด้านนี้ เพื่อเป็นแรงจูงใจให้บริษัทเหล่านี้ย้ายฐานการผลิตและศูนย์การออกแบบผลิตภัณฑ์เข้ามาในประเทศไทย (ปัจจุบันส่วนมากอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา) ซึ่งช่วยทำให้เกิดการลงทุนในประเทศและมีการจ้างงานเพิ่มขึ้นตามลำดับ

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 และเมื่อเทียบราคาต่อหน่วยกิกะไบต์ (Giga byte) ถือว่ามีราคาถูกมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การจัดเก็บข้อมูลประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังเป็นอุปกรณ์การบันทึกแบบถาวร (permanent recording) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการกู้ข้อมูล เมื่ออุปกรณ์ส่วนใดส่วนหนึ่งเกิดชำรุด ดังนั้นในปัจจุบันนี้ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่ได้มีไว้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ยังมีมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรทัศน์ กล้องวิดีโอแบบดิจิทัล กล้องวงจรปิด และเครื่องเล่นเพลง เป็นต้น

สำหรับการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เริ่มต้นจากเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวอน (longitudinal magnetic recording, LMR) ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กขนานกับสื่อบันทึก และเมื่อเทคโนโลยี LMR ถึงขีดจำกัดในการเพิ่มความจุข้อมูล เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording, PMR) จึงได้เข้ามาแทนที่ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสื่อบันทึก โดยเทคโนโลยี PMR ยังใช้อยู่ในปัจจุบันและมีความจุเชิงพื้นที่สูงสุดประมาณ 1 Tb/in^2 [1-2] ซึ่ง

รศ. ดร. ชานนท์ วรสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดในการเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ นั่นคือการเพิ่มความจุเชิงพื้นที่สำหรับเทคโนโลยี PMR จำเป็นต้องลดขนาดของเกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) ในสื่อบันทึกหรือลดจำนวนเกรนต่อการบันทึกข้อมูลหนึ่งบิต แต่เนื่องจากการลดขนาดของเกรนแม่เหล็กจะทำให้เกิดความไม่เสถียรของความเป็นแม่เหล็ก อนุกรมหมึห้อง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าข้อจำกัดทางด้านซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic limit) [1-5] ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการบันทึกแบบใหม่เข้ามาแทนที่เทคโนโลยี PMR [3] เช่น เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบการใช้ความร้อนเข้าช่วย (heat assisted magnetic recording, HAMR) [6] เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ 2 มิติ (two dimensional magnetic recording, TDMR) [7] และเทคโนโลยีการบันทึกแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (bit-patterned media recording, BPMP) [1-2] อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยี BPMP ซึ่งสามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้สูงถึง 4 Tb/in² [1] และเมื่อนำเทคโนโลยี BPMP มาใช้ร่วมกับการใช้พลังงานเข้าช่วย (energy assisted) ก็สามารถทำให้เพิ่มความจุได้สูงถึง 10 Tb/in² [1]

สำหรับเทคโนโลยี BPMP สื่อบันทึกจะถูกจัดระเบียบให้มีลักษณะเป็นไอแลนด์ (island) สำหรับบันทึกข้อมูลแต่ละบิต (หนึ่งไอแลนด์คือหนึ่งกลุ่มของเกรนแม่เหล็ก) ซึ่งแต่ละไอแลนด์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดน้อยกว่า 15 นาโนเมตร [2] โดยสื่อบันทึกจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (นั่นคือ ไอแลนด์สำหรับบันทึกข้อมูล) และส่วนที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) คือ บริเวณรอบๆ ของไอแลนด์ เนื่องจากระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูลมีระยะที่ใกล้เคียงกันอย่างมาก (ระดับนาโนเมตร) ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) ในกระบวนการอ่านข้อมูลนอกจากจะเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference, ISI) แล้ว ยังก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter-track interference, ITI) [2] อีกด้วย ซึ่งเหตุการณ์ทั้งสองที่กล่าวมานั้นได้ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบ BPMP เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปการจัดการและลดผลกระทบที่เกิดจาก ISI/ITI ด้วยการเข้ารหัสข้อมูลแบบสองมิติด้วยรหัสสมอดดูเลชันพร้อมทั้งการพัฒนาการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบซอฟต์แวร์ (soft-information encoding and decoding schemes) ที่ทำงานสอดคล้องกับรหัสที่ได้ทำการออกแบบในระบบ BPMP

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคการเข้ารหัสข้อมูลแบบสองมิติด้วยรหัสสมอดดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลแบบซอฟต์แวร์สำหรับเทคโนโลยี BPMP ซึ่งจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบประมวลผลสัญญาณที่ใช้ในเทคโนโลยี BPMP ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต โดยหากโครงการนี้ได้รับการสนับสนุนแล้ว นอกจากจะเป็นการสร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถทางด้านการประมวลผลสัญญาณข้อมูลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้วยังจะช่วยให้ได้มาซึ่งอัลกอริทึมการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลแบบสอง

มิติด้วยรหัสมอดดูเลชันสำหรับเทคโนโลยี BPMPR แบบใหม่ที่มีสมรรถนะสูงอีกด้วย อีกทั้งยังเป็นการเอื้อประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ซึ่งมีกำลังการผลิตจำนวนมากในแต่ละวันเป็นมูลค่าหลายร้อยล้านบาทและทำให้อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของประเทศไทยมีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างชาติมากยิ่งขึ้น

โดยทั่วไปการถอดรหัสแบบวนซ้ำ (iterative decoding) ได้ถูกนำมาใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ทั้งนี้เพราะแต่ละรอบของการวนซ้ำจะสามารถทำให้อัตราผิดพลาด (bit error rate, BER) ของข้อมูลลดลงอย่างมาก ซึ่งประกอบด้วยวงจรตรวจหาวิเทอร์บีแบบซอฟต์ (soft-output Viterbi algorithm, SOVA) [8] และวงจรเข้ารหัสภายนอก (outer code) เช่น วงจรถอดรหัสตรวจสอบพาริตีความหนาแน่นต่ำ (low-density parity check, LDPC) [9] โดยที่ทั้งสองวงจรจะทำการแลกเปลี่ยนข่าวสารแบบซอฟต์ (soft information) ในแต่ละรอบของการวนซ้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดข้อผิดพลาดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter-track interference) อย่างรุนแรง ส่งผลให้ข่าวสารแบบซอฟต์จากวงจร SOVA ที่มีข้อผิดพลาดจากการแทรกสอดที่รุนแรงถูกส่งเข้าไปยังวงจรถอดรหัส LDPC ซึ่งจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากที่ด้านเอาต์พุตของวงจร LDPC นั้นหมายความว่าข้อมูลที่ส่งจากวงจรถอดรหัส LDPC กลับไปยังวงจรตรวจหา SOVA ในแต่ละรอบของการวนซ้ำจะยังคงมีข้อมูลผิดพลาดแฝงอยู่เสมอ ดังนั้นถ้าไม่มีการแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้ก่อนส่งข่าวสารแบบซอฟต์ไปยังวงจรตรวจหา LDPC ก็จะทำให้พบว่าการวนซ้ำจะไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงนี้ได้เลย

งานวิจัยนี้จะได้คิดค้นวิธีการเข้ารหัสภายใน (inner code) ด้วยวิธีการเข้ารหัสมอดดูเลชันสองมิติแบบซอฟต์เพื่อหลีกเลี่ยง/บรรเทา/ลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก อีกทั้งยังสามารถทำงานได้อย่างสอดคล้องกับวงจรถอดรหัส LDPC และวงจรตรวจหา SOVA โดยเน้นการเข้ารหัสที่มีอัตราสูง (high code rate) และการเข้ารหัสจะทำงานบนพื้นฐานของ Look up table ส่วนการถอดรหัสจะใช้วิธีประยุกต์หลักการของ Euclidean distance [10] พร้อมทั้งประยุกต์หลักการของ Maximum a-priori Algorithm (MAP) [11] เพื่อให้การถอดรหัสสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและทำงานได้สอดคล้องกับรหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติที่เราได้ทำการออกแบบ ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบการบันทึกข้อมูล BPMPR เพิ่มสูงมากขึ้นตามไปด้วย

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter-symbol interference, ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter-track interference, ITI) ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพนเทิร์นมีเดีย
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการเข้ารหัสมอดดูเลชันแบบ 2 มิติ (2D modulation code) ทั้งแบบที่เป็นฮาร์ดและซอฟต์ (hard and soft encoding) ที่ใช้สำหรับการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก ISI และ ITI ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพนเทิร์นมีเดีย
3. เพื่อสร้างบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านการประมวลผลสัญญาณข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กเพื่อรองรับเทคโนโลยีใหม่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพนเทิร์นมีเดีย (BPMR) ให้มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น รวมถึงศึกษาวิธีการเขียน/อ่านข้อมูลของระบบการบันทึกข้อมูลด้วย
2. ศึกษาและออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลที่ใช้สำหรับการลดผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่ได้มีการนำเสนอแล้ว ทั้งที่ใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพนเทิร์นมีเดียและแบบสองมิติเพื่อนำมาศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะกับเทคนิคใหม่ที่จะได้นำเสนอ
3. ออกแบบและพัฒนาการเข้ารหัสมอดดูเลชันสองมิติแบบใหม่ด้วยการเข้าและถอดรหัสแบบซอฟต์สำหรับเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพนเทิร์นมีเดียที่ให้สมรรถนะเหนือกว่าวงจรรับแบบฮาร์ดที่ได้มีการนำเสนอในปัจจุบัน
4. สร้างผลงานวิจัยที่มีคุณภาพเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาให้กับทางภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ภาคการศึกษา และผู้สนใจทั่วไป พร้อมทั้งสร้างบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถทางด้านการประมวลผลสัญญาณต่อภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และภาคอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

References

- [1] Y. Shiroishi, K. Fukuda, et al., “Future options for HDD storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3816–3822, Oct 2009.
- [2] S. Nabavi, Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference, Ph.D thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.
- [3] R. Wood, “The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch,” IEEE Transactions on magnetics 36 (1), 36-42, 2000.
- [4] W. Fang, and X. Xiao-Hong, “Writability issues in high-anisotropy perpendicular magnetic recording media,” Chin. Phys. B, vol. 23, 036802, 2014.
- [5] R. Wood, “Future hard disk drive systems,” J. Magn. Magn. Mater., vol. 321, pp. 555-561, 2009.
- [6] R. Rottmeyer et al., “Heat-assisted magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp.2417–2421, Oct. 2006.
- [7] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, “The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 2, pp. 917–923, Feb. 2009.
- [8] 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.
- [9] R. Gallager, “Low-density parity-check codes,” IRE Trans. Inf. Theory, vol. IT-8, pp. 21 – 288, Jan. 1962.
- [10] E. Deza and M. Marie, Encyclopedia of Distances, page 94, Springer, 2009.
- [11] N. Djuric, M. Despotovic, “Soft-output decoding approach of maximum transition run codes,” in Proc. EUROCON 2005, Belgrade, 22–24, Nov., 490–493.

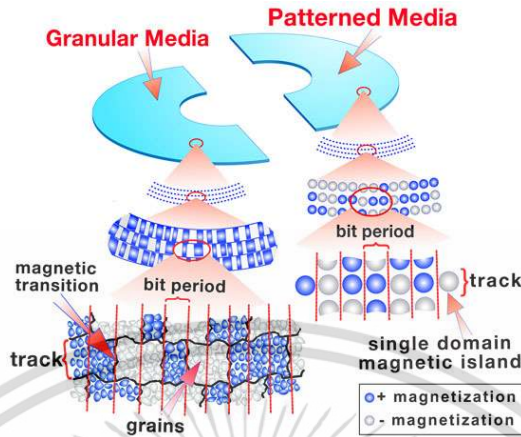
บทที่ 2

แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อ

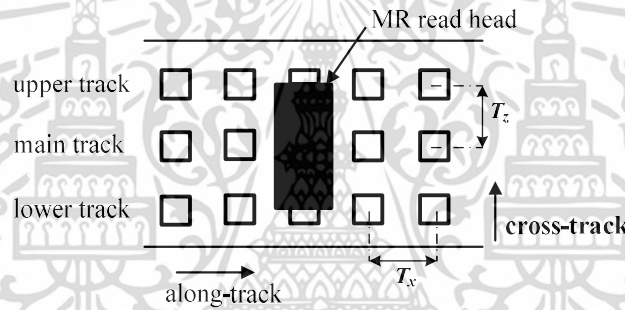
มูลเชิงแม่เหล็ก

2.1 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR Channel Model)

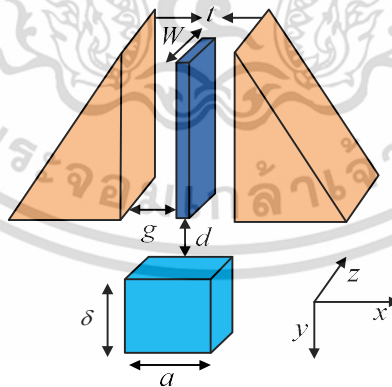
เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ BPMR เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพราะระบบ PMR ไม่สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้เนื่องจากปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก โดยระบบ BPMR สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้ถึง 4 Tb/in^2 หรือมากกว่า เมื่อใช้ร่วมกับเทคโนโลยีความร้อนเข้าช่วย [1] รูปที่ 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างสื่อบันทึกของระบบ BPMR และระบบ PMR โดยระบบ BPMR จะมีรูปแบบของสื่อบันทึกที่มีความแน่นอน ซึ่งมีลักษณะเป็นเกาะข้อมูลหรือไอแลนด์เชิงแม่เหล็ก (magnetic island) โดยแต่ละไอแลนด์จะใช้เกรนแม่เหล็ก 1 เกรนและมีขนาดที่น้อยกว่า 20 นาโนเมตร โดยจะถูกวางอย่างเป็นระเบียบบนวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic material) [2,3] สำหรับหัวเขียนและหัวอ่านจะใช้แบบเดียวกันกับระบบการบันทึกแบบทั่วไป ข้อดีของระบบ BPMR คือช่วยเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ ปราศจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะ (transition noise) และการเลื่อนบิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear bit shift) [4] อย่างไรก็ตามระบบ BPMR ยังมีปัญหาที่เกี่ยวกับระบบการประมวลผลสัญญาณ คือ ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก การอ่านนอกแทร็กข้อมูล (track mis-registration, TMR) [3-4,5-7] และปัญหาที่สำคัญคือการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดบิตในกระบวนการตรวจหา รวมทั้งรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดแบบทั่วไปก็ไม่สามารถจัดการกับข้อผิดพลาดที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กนี้ได้ดีพอ



รูปที่ 2.1: เปรียบเทียบสื่อบันทึก PMR กับสื่อบันทึกแบบ BPMR [4]



รูปที่ 2.2: การอ่านของหัวอ่านแบบ MR บนสื่อบันทึกของระบบ BPMR

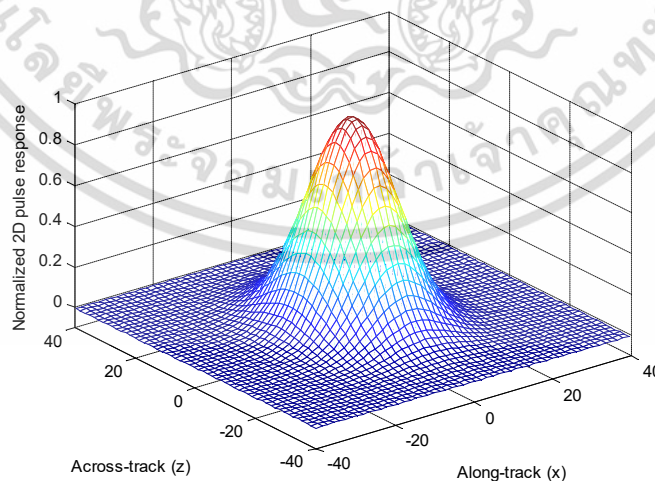


รูปที่ 2.3: เรขาคณิตของหัวอ่านแบบ MR และไอแลนด์

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการอ่านของหัวอ่านแบบ MR (magnetoresistive) บนสื่อบันทึกของระบบ BPMPR โดยที่ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางไอแลนด์หนึ่งถึงกึ่งกลางไอแลนด์หนึ่งที่ตั้งกันในทิศทางตามแทร็ก (along-track) มีระยะเท่ากับ T_x เรียกว่าระยะบิต (bit period) และระยะห่างระหว่างกึ่งกลางไอแลนด์ที่ตั้งกันในทิศทางขวางแทร็ก (cross-track) มีระยะเท่ากับ T_z เรียกว่าระยะแทร็ก (track pitch) ในทางปฏิบัติระบบ BPMPR มีการแทรกสอดอยู่ด้วยกัน 2 ทิศทาง คือ การแทรกสอดระหว่างสัญญาณ (ISI) ซึ่งเกิดจากบิตข้างเคียงในทิศทางตามแทร็ก และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) เป็นผลกระทบจากบิตข้างเคียงในทิศทางขวางแทร็ก โดยการแทรกสอดทั้งสองอย่างนี้เรียกรวมกันว่าการแทรกสอดแบบ 2 มิติ (2D interference) ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบการบันทึกข้อมูล BPMPR

โดยทั่วไปแบบจำลองของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จากหัวอ่านมีจะความละเอียดค่อนข้างสูงและสร้างได้ยาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำแบบจำลองสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Nabavi [4] จึงได้ทำการประมาณค่าสัญญาณพัลส์สองมิติแบบเกาส์เซียน โดยพิจารณาจากเรขาคณิตของหัวอ่านแบบ MR และไอแลนด์แสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อ t คือ ความหนาของหัวอ่าน, W คือ ความกว้างของหัวอ่าน, g คือ ระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับชิลด์ (shield) และ d คือระยะบินของหัวอ่าน (fly height) สำหรับพารามิเตอร์ของไอแลนด์ a คือความกว้างของไอแลนด์เมื่อไอแลนด์มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (squared island), และ v คือ ความสูงของไอแลนด์ โดยที่สมการที่ได้จากการประมาณค่าผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สองมิติแบบเกาส์เซียนที่ได้จากพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2.1 สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

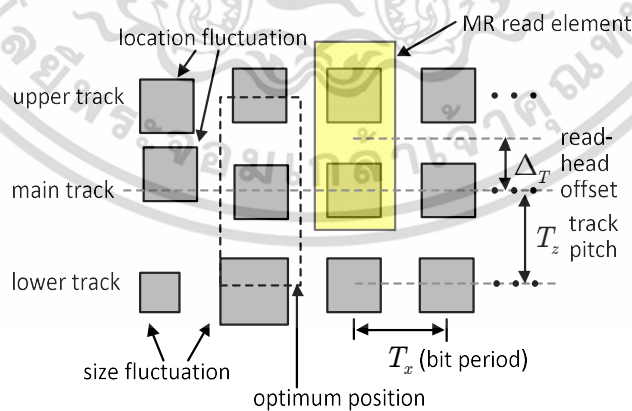


รูปที่ 2.4: ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สองมิติที่ประมาณค่าแบบเกาส์เซียน

ตารางที่ 2.1: พารามิเตอร์ของหัวอ่าน MR และสื่อบันทึกของระบบการบันทึก BPMR

Parameters	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

เมื่อ A คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1, $w_x = PW50_{\text{along}}/2.3548$, $w_z = PW50_{\text{cross}}/2.3548$, $PW50_{\text{along}}$ คือค่า PW50 ของสัญญาณพัลส์ในทิศทางตามแทร็ก, $PW50_{\text{cross}}$ คือ ค่า PW50 ของสัญญาณพัลส์ในทิศทางขวางแทร็ก, และ 2.3548 คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า PW50 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน [4] รูปที่ 2.4 แสดงผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จากการประมาณค่าแบบเกาส์เซียนในสมการที่ (1) โดยที่ผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติที่ได้จะสอดคล้องกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5: รูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย

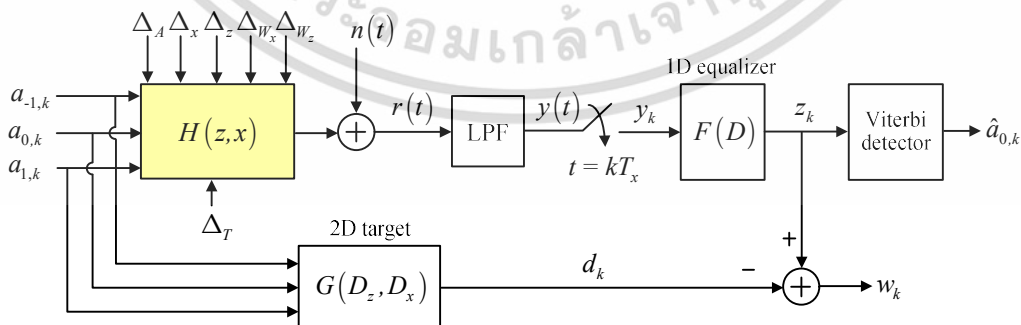
รูปที่ 2.5 แสดงปัญหาจากสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกของระบบ BPMR โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด (amplitude fluctuation) ซึ่งเกิดขึ้นจากขนาดของแต่ละไอแลนด์ที่ไม่เป็นเอกรูป (non-uniform) และความผันผวนของตำแหน่ง (location fluctuation) ซึ่งเกิดจากไอแลนด์ที่วางอยู่บนวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กมีการวางตัวที่ไม่เป็นระเบียบ สำหรับผลกระทบจาก TMR เกิดจากหัวอ่านเคลื่อนที่ออกจากแทร็กหลัก (main track) ไปในทิศทางขวางแทร็กแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อ Δ_T คือระยะแทร็กออฟเซต (track offset) โดยกำหนดจากสมการที่ (2.2) [4]

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

ซึ่งสมการการประมาณค่าผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ $H(z,x)$ ในสมการ (2.1) ที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและผลกระทบจาก TMR สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [4,8]

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

เมื่อ Δ_A คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด, Δ_X คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวตามแทร็ก, Δ_Z คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวขวางแทร็ก, c คือค่าคงตัวมีค่าเท่ากับ $1/2.3548$, Δ_{w_x} คือ ความผันผวนของ PW50 ในทิศทางตามแทร็ก, และ Δ_{w_z} คือ ความผันผวนของ PW50 ในทิศทางขวางแทร็ก โดยสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก $x\%$ หมายถึงตำแหน่งและขนาดของไอแลนด์มีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มจากค่าปกติไปเป็นปริมาณ $x\%$ โดยมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 เมื่อ σ คือ ร้อยละของระยะ T_x โดยที่ Δ_A , Δ_{w_x} และ Δ_{w_z} เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของความผันผวนแอมพลิจูด Δ_X และ Δ_Z เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของความผันผวนตำแหน่ง โดยทั่วไปคุณภาพของสัญญาณอ่านกลับและสมรรถนะของระบบ BPMR จะขึ้นอยู่กับผลกระทบต่างๆ เหล่านี้



รูปที่ 2.6: แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึก BPMR กับผลกระทบจากสื่อบันทึกและ TMR

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

$$r(t) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{m,k} H(-mT_z - \Delta_T, x - kT_x) + n(t) \quad (4)$$

เมื่อ $H(z,x)$ คือ ผลตอบสนองช่องสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ, Δ_T คือ ระยะออฟเซตของหัวอ่าน, $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง (power spectrum density, PSD) แบบสองด้านเท่ากับ $N_0/2$ สมการที่ (2.4) ถือว่าเป็นแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR ที่ต่อเนื่องทางเวลา

ณ วงจรภาครับ สัญญาณอ่านกลับที่ด้านขาออกของหัวอ่าน $r(t)$ จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter, LFP) แบบบัตเตอร์เวิร์ธอันดับที่ 7 (7th order Butterworth) ทำให้ได้สัญญาณ $y(t)$ และถูกทำการซิกตัวอย่าง (sampling) สัญญาณ ณ เวลา $t = kT_x$ ทำให้ได้ลำดับข้อมูล $\{y_k\}$ ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังวงจรอีควอไลเซอร์เพื่อปรับคุณสมบัติของสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ตที่ต้องการ และลำดับข้อมูล $\{z_k\}$ จะถูกส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) [9] เพื่อหาลำดับข้อมูล $a_{0,k}$ ที่เป็นไปได้มากที่สุด

นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายต่อการทำแบบจำลองและการวิเคราะห์ระบบ จะนิยมใช้แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งสร้างได้จากการซิกตัวอย่าง ณ เวลาที่ระยะของบิต (T_x) ของสัญญาณอ่านกลับ ทำให้ได้สัญญาณอ่านกลับที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาดังนี้

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

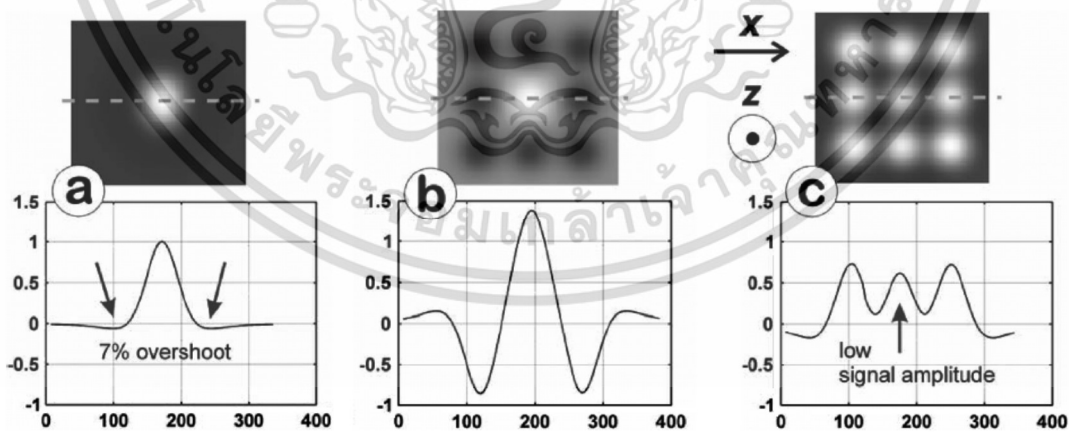
เมื่อ n_k คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวกและ $H(m,n)$ คือ สัญญาณพัลส์แบบสองมิติที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ได้จากการซิกตัวอย่างสัญญาณพัลส์ $H(z,x)$ ในสมการที่ (3) ณ เวลาที่เป็นจำนวนเท่ากับระยะบิต (T_x) และระยะแตร็ก (T_z) นั่นคือ $H(m,n) = H(mT_z, nT_x)$ สำหรับค่า $-M \leq m \leq M$ และ $-N \leq n \leq N$ เมื่อ $2M+1$ คือจำนวนแตร็กและ $2N+1$ คือความยาวของช่องสัญญาณในทิศทางตามแตร็ก โดยทั่วไปช่องสัญญาณ BPMR แบบไม่ต่อเนื่องจะแทนด้วยเมทริกซ์ H ที่มีค่าเท่ากับ

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

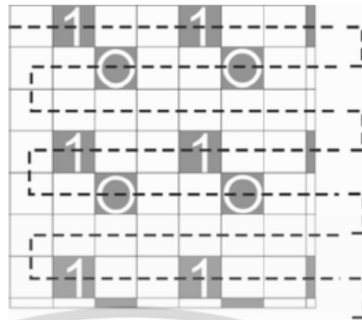
เมื่อ $h_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ BPMPR สองมิติแบบไม่ต่อเนื่อง

2.2 การออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติ (2D-Coding)

การเข้ารหัสแบบสองมิติที่มีการนำเสนอในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย มีหลักการดังนี้ [10-11] เริ่มจากการศึกษารูปแบบของสัญญาณอ่านกลับ (readback) พบว่าเมื่อเราบันทึกข้อมูลแบบเกาะเดี่ยว (single dot) เราจะได้สัญญาณอ่านกลับดังรูปที่ 2.7 (ก) แต่ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแล้ว ต้องมีการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) ของบิตข้างเคียงหรือแม้แต่ผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ที่เกิดจากแทร็กรอบข้างได้ ดังนั้น เราจึงพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองกรณี คือ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด นั่นคือ การบันทึกข้อมูลบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “0” ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่เราต้องการหลีกเลี่ยง นั่นคือ การบันทึกบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “1” ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ค)

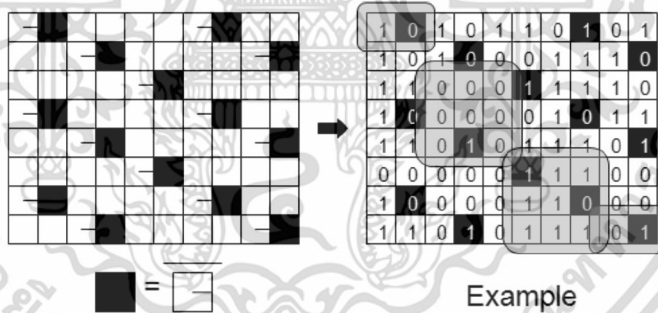


รูปที่ 2.7: รูปแบบของสัญญาณอ่านกลับกรณีที่เป็นเกาะเดี่ยว (ก) กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด (ข) และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด (ค)



รูปที่ 2.8: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 5/6 [10]

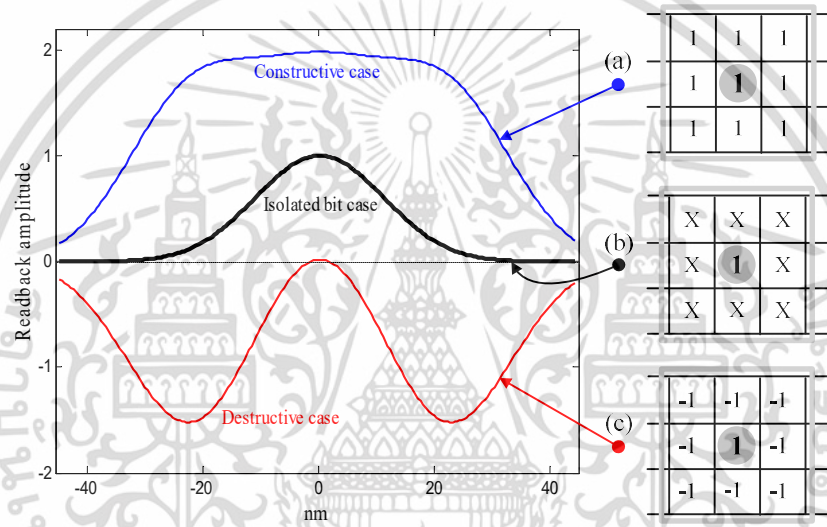
หลักการการเข้ารหัสแบบสองมิติ คือพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดโดยการแทรกบิตส่วนเกินเข้าไปก่อนที่จะบันทึกข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึก ดังรูปที่ 2.8 มีการบันทึกบิต “0” และบิต “1” ลงไปยังตำแหน่งที่แน่นอน โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ 5/6 ซึ่งช่วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มค่าอัตรารหัสให้สูงขึ้นโดยการเข้ารหัสด้วยรูปแบบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ 7/9 [11] ซึ่งไม่เพียงแค่ช่วยเพิ่มอัตรารหัสให้สูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสูงขึ้นอีกด้วย



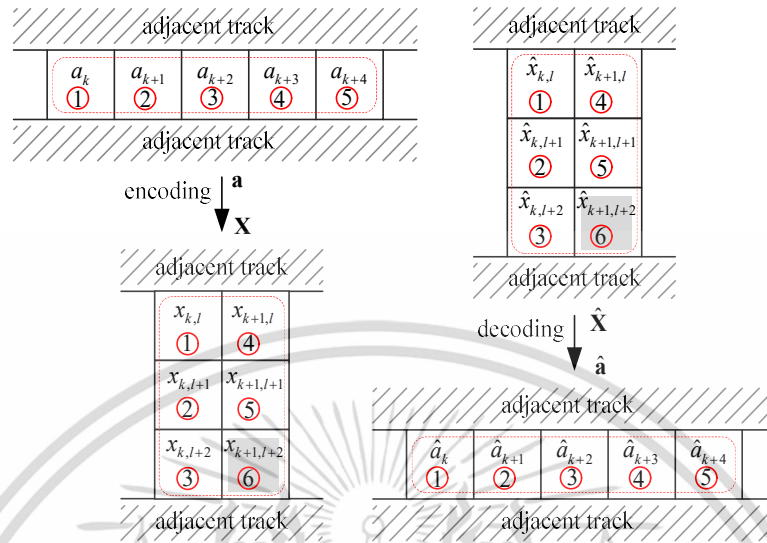
รูปที่ 2.9: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 7/9 [11]

แต่เนื่องจากการออกแบบรหัสทั้ง 2 แบบที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้ ถูกออกแบบเพื่อช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ without overshoot ซึ่งเทคโนโลยีนี้ปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว จึงได้เปลี่ยนเป็นช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot [12] การรบกวนซึ่งกันและกันของข้อมูลในบิตข้างเคียงก็จะแตกต่างกันออกไป ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีรูปแบบที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลชันแบบสองมิติที่มีความซับซ้อนต่ำ อัตรารหัสข้อมูลสูง และมีประสิทธิภาพในการจัดการ/หลีกเลี่ยง/ลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแตร็กสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

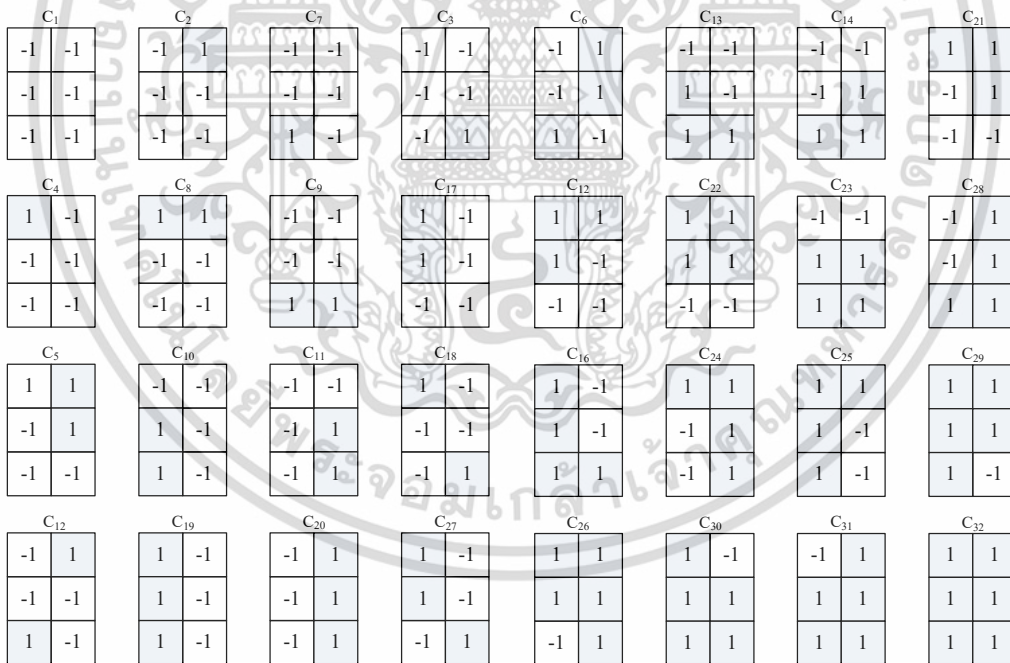
BPMR ซึ่งแนวความคิดการเข้ารหัสแสดงในรูปที่ 2.11 โดยมีหลักการดังนี้ ลำดับข้อมูล a_k ที่ต้องการบันทึกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบสองมิติ คือเปลี่ยนจากข้อมูล 1 แทริก เป็นข้อมูล 3 แทริก เพื่อเลือกรูปแบบข้อมูลต้องห้าม (forbidden pattern) เช่น $[+1 -1 +1]^T$ หรือ $[-1 +1 -1]^T$ ซึ่งรูปแบบของข้อมูลในแนวแทริกสามารถรับประกันได้ว่าผลกระทบที่เกิดจากแทรกสอดระหว่างแทริกจะไม่เกิดขึ้น จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่ารูปแบบที่เป็นไปในที่จะนำมาสร้างเป็นรหัสข้อมูลมีทั้งหมด 32 รูปแบบ (patterns) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างเป็นตารางเพื่อการเข้ารหัสข้อมูลต่อไป



รูปที่ 2.10: สัญญาณอ่านกลับของ (a) บิตข้อมูลเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘1’ และ (c) กรณีที่ด้อยที่สุด เมื่อบิตข้อมูล ‘1’ ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล ‘-1’

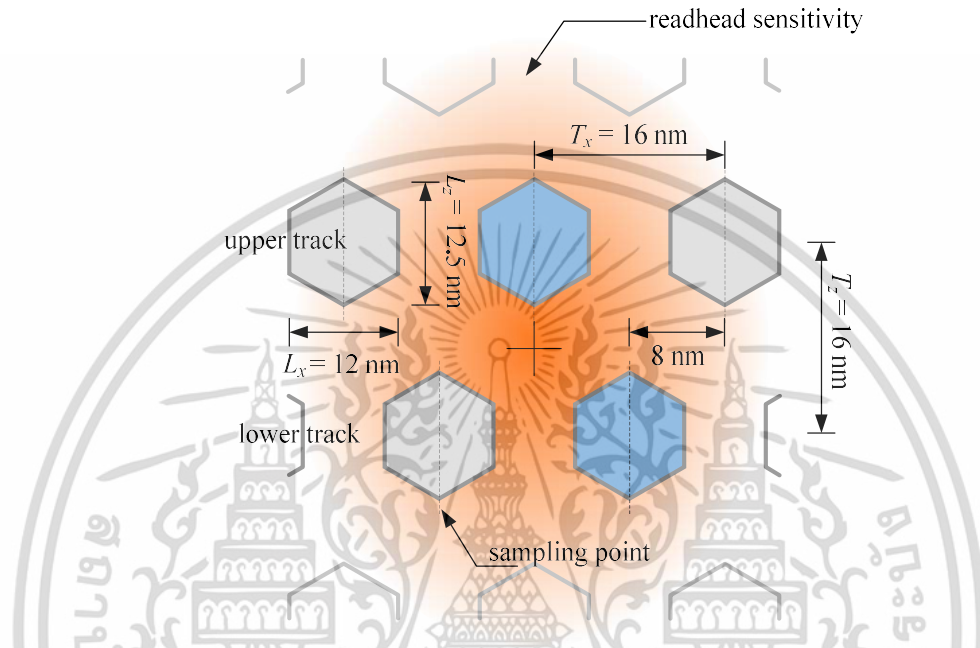


รูปที่ 2.11: วิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติด้วยอัตรารหัส 5/6



รูปที่ 2.12: ตัวอย่างคำรหัสที่ได้จากการออกแบซึ่งเป็นรูปแบบข้อมูลที่ปราศจากรูปแบบต้องห้ามดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรง

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาไอแลนด์รูปทรงหกเหลี่ยมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละไอแลนด์เท่ากับ 16 นาโนเมตร จึงได้เป็นความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างบิตแพทเทิร์นมีเดียกริดแบบเยื้องที่ 2.5 Tb/in² ถูกปกคลุมด้วยผลตอบสนองความไวของหัวอ่าน [13]

2.5 เทระบิตต่อตารางนิ้ว ในรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างบิตแพทเทิร์นมีเดียกริดแบบเยื้องที่ซึ่งถูกปกคลุมด้วยผลตอบสนองความไวของหัวอ่าน (Read-head sensitivity response) [13] โดยในการจำลองกำหนดให้พิกเซลมีขนาด 0.01×0.01 ตารางนาโนเมตร โดยไอแลนด์ทรงหกเหลี่ยมเกิดจากพิกเซลประกอบกันจนได้ตามขนาดที่ต้องการ การจำลองเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของตำแหน่งของไอแลนด์กำหนดโดย

$$P_{\text{fluctuation}} = \frac{T_{\text{fluctuation}}}{T_x} \times 100 \quad (2.1)$$

โดย $T_{\text{fluctuation}}$ คือ ระยะความผันผวนที่มากที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของไอแลนด์อุดมคติ กับ จุดศูนย์กลางของไอแลนด์จริง โดยระยะดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ และ T_x คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละไอแลนด์ ส่วนการจำลองเปอร์เซ็นต์ความผันผวนของขนาดของไอแลนด์กำหนดได้โดย

$$S_{\text{fluctuation}} = \frac{L_{\text{fluctuation}}}{L_x} \times 100 \quad (2.2)$$

โดย $L_{\text{fluctuation}}$ คือ ความกว้างที่เป็นไปได้ของไอแลนด์จริง เทียบกับ ความกว้างของไอแลนด์อุดมคติ มีการกระจายตัวแบบปกติ L_x คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของไอแลนด์

ในงานวิจัยนี้สัญญาณอ่านกลับได้มาจากการคอนโวลูชันแบบ 2 มิติระหว่างสภาพความเป็นแม่เหล็ก กับ ผลตอบสนองความไวของหัวอ่านที่ครอบคลุมแตรีกข้อมูลที่ต้องการอ่านรวมทั้งแตรีกข้างเคียงด้วย โดยตำแหน่งจุดศูนย์กลางของผลตอบสนองความไวของหัวอ่านจะอยู่ระหว่างกึ่งกลางของแตรีกข้อมูล 2 แตรีกดังรูปที่ 2.13 จากนั้นสัญญาณอ่านกลับที่ได้ยังถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวน ซึ่งจำลองมาจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (AWGN: Additive-white Gaussian noise) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 สุดท้ายสัญญาณอ่านกลับที่ได้นั้นจะถูกซัดตัวอย่างข้อมูลแบบเก็นจริง โดยตำแหน่งของการซัดตัวอย่างข้อมูลนั้นจะเป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแต่ละไอแลนด์ของทั้ง 2 แตรีกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2.13



References

- [1] R. Rottmeyer et al., “Heat-assisted magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp.2417–2421, Oct. 2006.
- [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] S. Karalulak, From channel modeling to signal processing for bit-patterned media recording, Ph.D thesis, University of California, San Diego, USA, 2010.
- [4] S. Nabavi, Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference, Ph.D thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.
- [5] M. Keskinoz, “Two-dimensional equalization/detection for patterned media storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 4, pp. 533–539, Apr 2008.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] L. M. M. Lyint, P. Supnithi, P. Tantaswadi, “An Inter – Track Interference Mitigation Technique Using Partial ITI Estimate in Patterned Media Storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3691–3694, Oct. 2009.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] X. Shao, L. Alink, J.P.J. Groenland, L. Abelman, and C. H. Slump, “A Simple Two-Dimensional Coding Scheme for Bit Patterned Media,” IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, pp. 2559-2562, Oct. 2011.

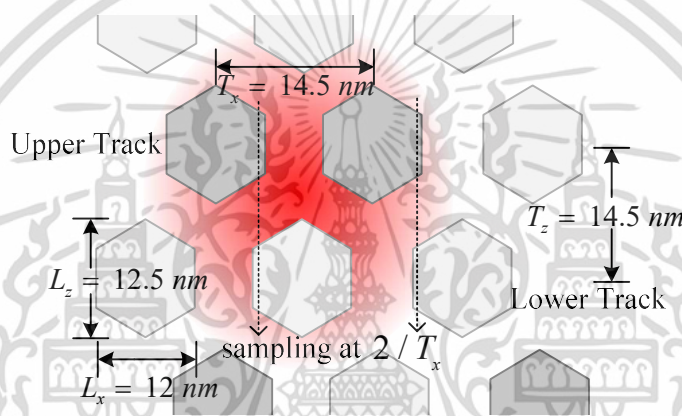
- [12] P.W. Nutter, I. T. Ntokas, and B.K. Middleton, "An Investigation of the Effects of Media Characteristics on Read Channel Performance for Patterned Media Storage," IEEE Trans. Magn., vol. 41, pp. 4327-4334, Nov. 2005
- [13] M. Yamashita et al., "Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, pp. 3558-3561, Oct. 2011.



บทที่ 3

การออกแบบรูปแบบการเข้ารหัสมอดูเลชัน

3.1 การออกแบบสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอนอล



รูปที่ 3.1 สื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอนอล ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 3.0 Tb/in²

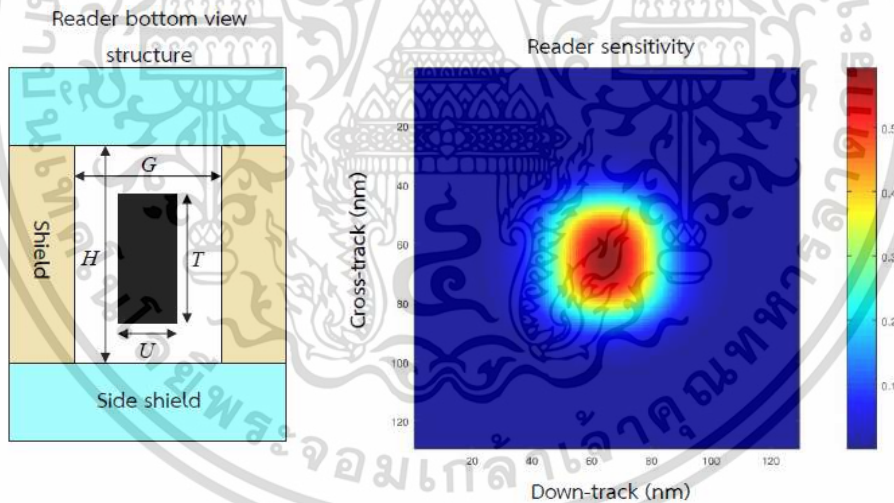
รูปแบบของการทดลองนั้น จะทำการออกแบบสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอนอลและแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้เทคนิคการซึกตัวอย่างเกินจริง (Oversampling) กับเทคนิคควรจะเป็นสูงสุดของผลตอบสนองบางส่วน (PRML) ร่วมกัน โดยเทคนิคการอ่านหลายแพร์ก (multi-track reading technique: MRT) คือรูปแบบการอ่านหลายแพร์กด้วยหัวอ่านเดี่ยว ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 และได้ออกแบบรูปแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันที่มีอัตราหัส 5/6 สำหรับสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอนอลโดยเฉพาะอีกด้วย เพื่อต่อสู้กับความรุนแรงของการแทรกสอดแบบ 2 มิติ ในที่นี้เทคนิคการอ่านหลายแพร์ก (MRT) จะใช้แค่หนึ่งหัวอ่านเพื่ออ่านข้อมูลสองแพร์กพร้อมกัน รูปแบบของการเข้ารหัสของการทดลองนี้จะทำการจัดเรียงลำดับบิตข้อมูลอย่างเหมาะสม เข้าไปยัง 2 แพร์กลำดับข้อมูลที่บันทึกซึ่งเป็นพื้นฐานของรูปแบบข้อมูลที่ใช้เป็นคาร์หัสในตารางสำหรับการเข้ารหัสหลังจากบิตที่จะถูกบันทึกบนการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตโอแลนด์แบบเยื้อง

โดยการจำลองหัวอ่านสามารถทำได้ด้วยฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งได้จากการจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สองมิติ (2D finite elements method) [32]

$$\psi(x, y) = \alpha_0 \{ \tanh(\alpha_1 x + \alpha_2) - \tanh(\alpha_1 x - \alpha_2) \} \{ \tanh(\alpha_3 y + \alpha_4) - \tanh(\alpha_3 y - \alpha_4) \} \quad (3.1)$$

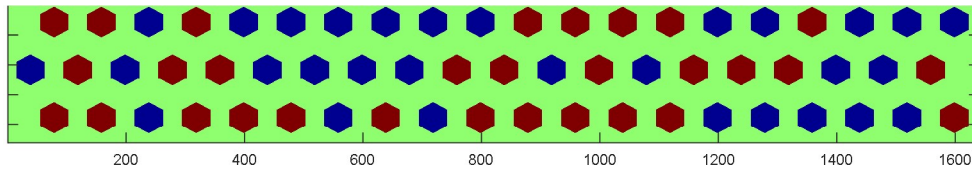
$$\alpha_k = \left\langle (H, G, T, U, h_m, t_m, t_s)', w_k \right\rangle \quad (3.2)$$

เมื่อ $\psi(x, y)$ คือฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน α_k เป็นฟังก์ชันรูปร่างของหัวอ่านเกิดจากผลรวมเชิงเส้นของ H คือระยะห่างระหว่างซิลด์ด้านข้าง G คือช่องว่างของซิลด์ T คือความกว้างของหัวอ่าน U คือความหนาของหัวอ่าน h_m คือระยะห่างทางแม่เหล็ก t_m คือความหนาของชั้นบันทึกข้อมูลของแผ่นบันทึกข้อมูล t_s คือความหนาของชั้นชั้นกลางของแผ่นบันทึกข้อมูลและ w_k คือฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แสดงถึงฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่านที่ถูกจำลองจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 โดยใช้ตัวแปรต่างๆ

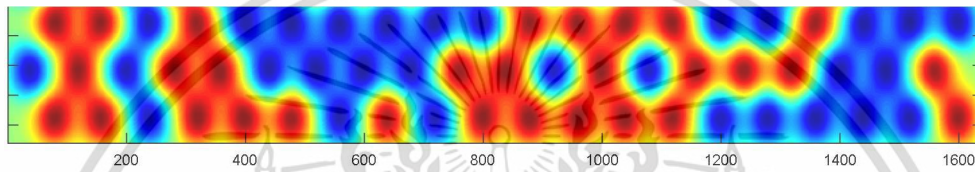


รูปที่ 3.2 การจำลองฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน (Reader sensitivity)

จากฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่านนั้น เมื่อนำเอาหัวอ่านดังกล่าวไปอ่านแผ่นบันทึกข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 3.3 จะได้สัญญาณอ่านกลับดังรูปที่ 3.4 ซึ่งแสดงในรูปแบบสัญญาณอ่านกลับแบบสองมิติ ทำได้โดยการอ่านในตำแหน่งต่างๆ ในแนวขวางแทร็กแล้วนำมาพล็อตรวมกันเป็นแผนภาพ หากต้องการสัญญาณอ่านกลับหนึ่งมิติจะสามารถทำได้โดยการเลือกสัญญาณในตำแหน่งขวางแทร็กที่ต้องการเพียงเท่านั้นก็ได้

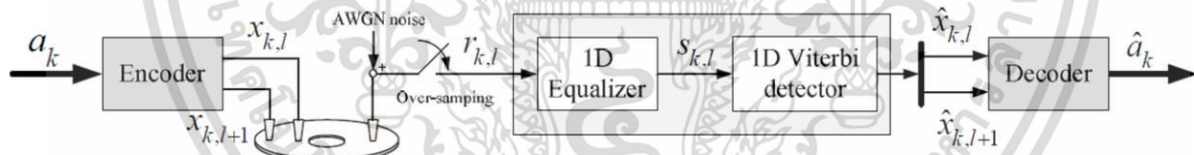


รูปที่ 3.3 รูปการจำลองแผ่นบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 สัญญาณอ่านกลับสองมิติเมื่อใช้หัวอ่านในรูปที่ 3.2 อ่านบนแผ่นบันทึกข้อมูลในรูปที่ 3.3

3.2 การออกแบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอล



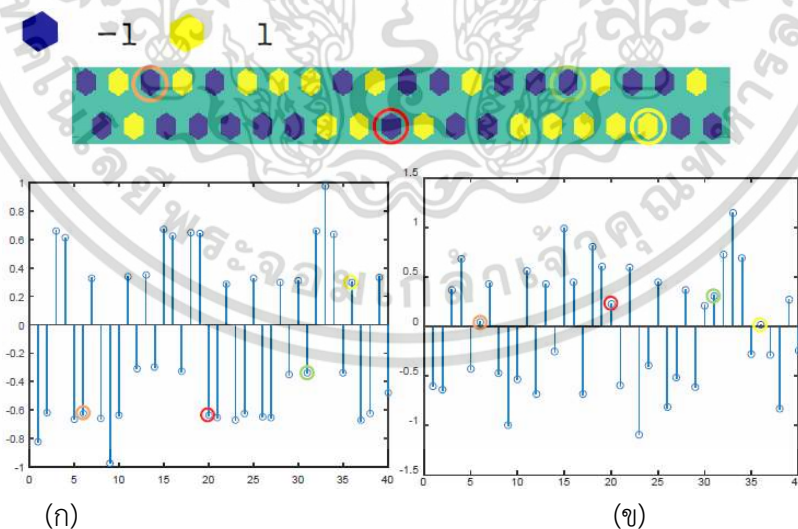
รูปที่ 3.5 แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลที่ใช้เทคนิค MRT

แบบจำลองช่องสัญญาณของสำหรับสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลแบบเอียงโดยรูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสที่พิจารณาในการทดลองนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ในการทดลองนี้ได้พิจารณาการวางบิตไอนแลนด์แบบเอียงที่เป็นรูปหกเหลี่ยมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 nm และคาบของบิต (bit period) T_x 16.0 nm และ 14.5 nm ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ 2.5 และ 3.0 Tb/in² โดยทำการสุ่มข้อมูลอินพุตแบบไบนารี $a_k \in \{\pm 1\}$ เป็นการเข้ารหัสโดยวิธีการเข้ารหัสที่ได้นำเสนอเพื่อให้ได้ข้อมูล 2 แทร็ก $\{x_{k,l}, x_{k,l+1}\}$ ก่อนที่จะบันทึกข้อมูลลงบนสื่อบันทึก ส่วนที่ภาครับ สัญญาณอ่านกลับมาจากตัวดำเนินการคอนโวลูชันสองมิติ (2D

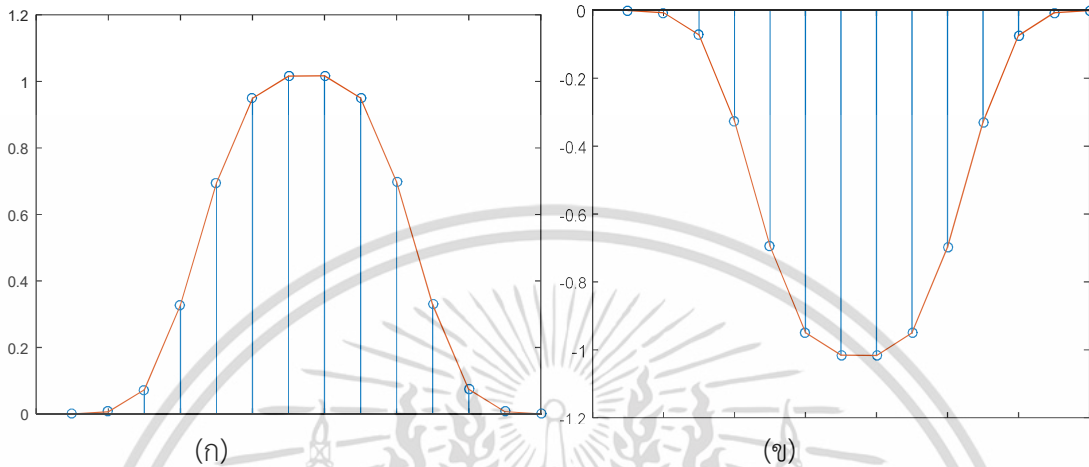
convolution) ระหว่างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกและฟังก์ชันผลตอบสนองของหัวอ่าน ดังนั้นผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคควรจะเป็นสูงสุดของผลตอบสนองบางส่วน (PRML) และเทคนิคการซัดตัวอย่างเกินจริง (Oversampling) ร่วมกัน สำหรับตรวจสอบข้อมูลหลังจากอ่านข้อมูลจากสื่อบันทึก โดยอัตราการซัดตัวอย่างเกินจริงจะอยู่ที่คาบเวลาประมาณสมบรูณ์แบบ (perfect timing) $0.5T_x$ หลังจากนั้น ลำดับข้อมูลของสัญญาณอ่านกลับจะถูกอีควอไลด้วยอีควอไลเซอร์หนึ่งมิติเพื่อให้ได้ลำดับข้อมูลที่ผ่านการอีควอไล $s_{k,l}$ และจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรตรวจหาวิเทอร์บีหนึ่งมิติ (VD) ไปยังลำดับข้อมูลที่ถูบบันทึกไว้ $\hat{x}_{k,l}$ โดยลำดับข้อมูลนี้จะถูกแยกออกเป็น 2 แพ็คเกจก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสมอดูเลชัน เพื่อหาลำดับข้อมูลอินพุต \hat{a}_k ที่ควรจะเป็นมากที่สุด

3.3 การออกแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสมอดูเลชันอัตรารหัส 5/6

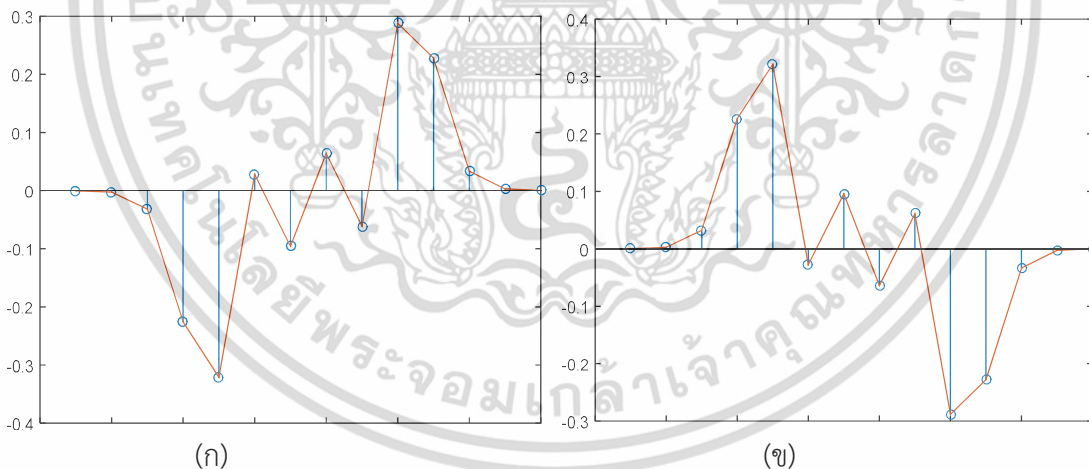
การออกแบบการเข้ารหัสและการถอดรหัสสื่อนั้นได้ศึกษาและทำการตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่จะมีรูปแบบของการเกิดข้อผิดพลาดที่ทำให้เกิดค่าแอมพลิจูดที่ผิดพลาด ซึ่งในการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่จะปรากฏเมื่อบิตมีลักษณะตรงข้ามกันกับบิตข้างๆ เช่น $[x_{k,l}, x_{k,l+1}, x_{k+1,l}]$, ซึ่งมันอาจจะเป็นไปได้ ดังนี้ $[1, -1, 1]$ หรือ $[-1, 1, -1]$ ดังนั้นรูปที่ 3.6 รูปแบบเหล่านี้จึงถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบที่ต้องห้ามซึ่งจะไม่ได้รับอนุญาตให้บันทึกลงในสื่อบันทึก โดยใช้เงื่อนไขเพื่อกำหนดและค้นหารูปแบบของข้อมูลที่มีความเป็นไปได้และเหมาะสม ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกรูปแบบข้อมูลที่ดีที่สุด 32 รูปแบบ จากรูปแบบข้อมูลทั้งหมด 64 รูปแบบซึ่งจะได้เป็นคำรหัส (codewords)



รูปที่ 3.6 รูปแบบของการเกิดข้อผิดพลาดที่ทำให้เกิดค่าแอมพลิจูดที่ผิดพลาด (ก) ค่าแอมพลิจูดก่อนได้รับสัญญาณรบกวน (ข) ค่าแอมพลิจูดที่ถูกลดทอนจากสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.7 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับของบิตที่มีสถานะเดียวกันอยู่เกาะกลุ่มกัน (ก) บิตที่มีสถานะเป็น 1 ทั้งหมด (ข) บิตที่มีสถานะเป็น -1 ทั้งหมด



รูปที่ 3.8 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับของบิตที่มีสถานะตรงข้ามกันอยู่ (ก) บิตที่มีสถานะเป็น 1 กับ -1 สลับกัน (ข) บิตที่มีสถานะเป็น -1 กับ 1 สลับกัน

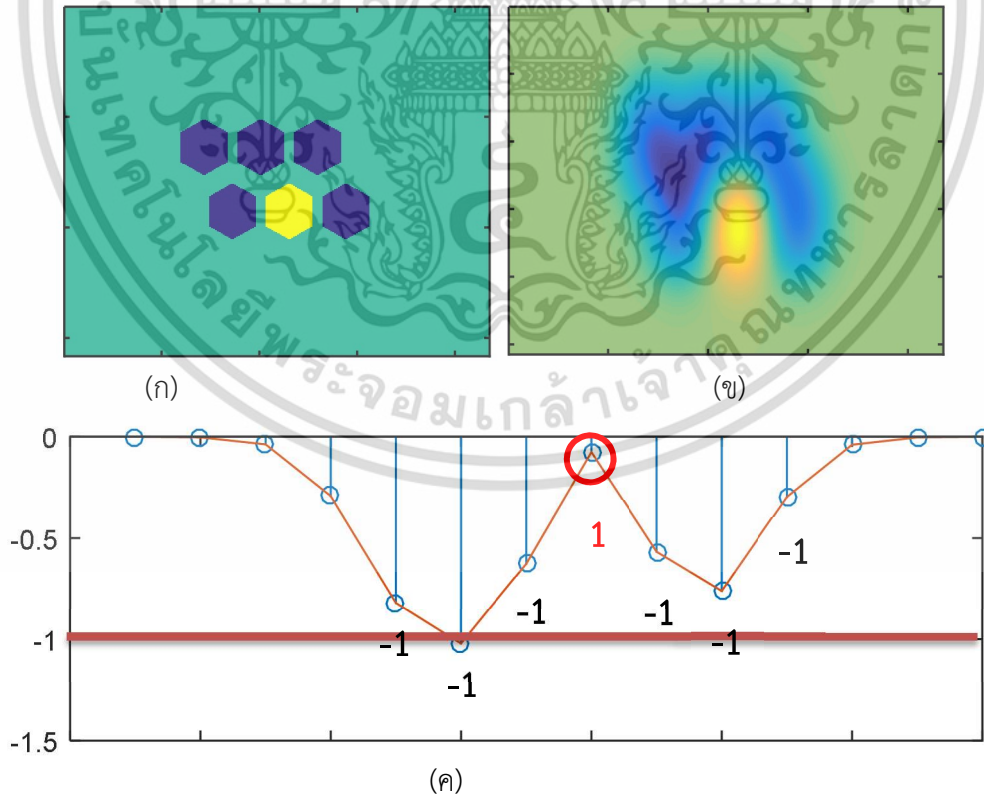
การเลือกรูปแบบข้อมูลที่ดีที่สุด 32 รูปแบบ จากรูปแบบข้อมูลทั้งหมด 64 รูปแบบที่จะได้เป็นคำรหัส (codewords) นั้นจะมีหลักการเลือก คือให้บิตที่มีสถานะเดียวกันอยู่เกาะกลุ่มกันให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ เนื่องจาก

รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

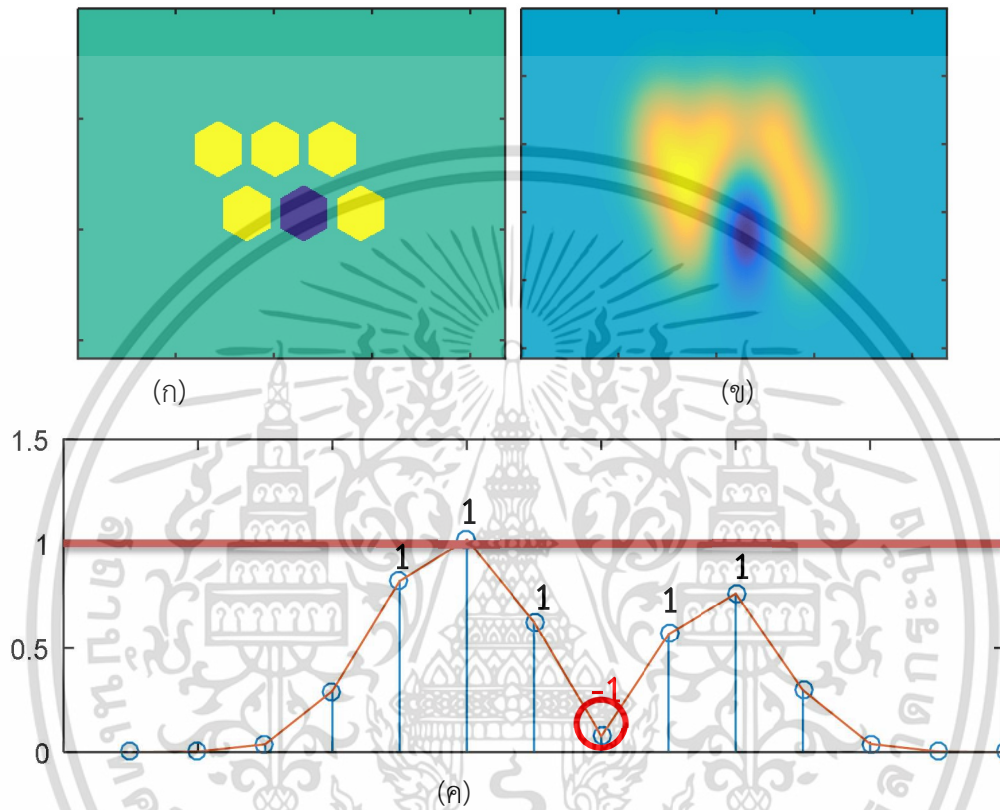
บิตที่มีสถานะเดียวกันจะทำให้เกิดการส่งเสริมของค่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณอ่านกลับจะมีค่าแอมพลิจูดที่สูงมากดังรูปที่ 3.7 และจะทำการหลีกเลี่ยงบิตที่มีสถานะตรงข้ามกันเกาะกลุ่มกัน เช่น $[1 -1 1]$ และ $[-1 1 -1]$ เนื่องจากบิตที่มีสถานะตรงข้ามกันจะทำให้เกิดการลดทอนของค่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณอ่านกลับ จะมีค่าแอมพลิจูดที่ถูกลดทอนจนไปถึงได้ค่าแอมพลิจูดที่ไม่ตรงกับบิตข้อมูลที่ส่งไปดังรูปที่ 3.8

ในที่นี้จะทำการยกตัวอย่างคำรหัส (codewords) ที่อยู่ในรูปแบบข้อมูลที่ดีที่สุด 32 รูปแบบ จากรูปแบบข้อมูลทั้งหมด 64 รูปแบบที่ได้นำเสนอไปนั้น คือรูปที่มีบิตข้อมูลคือ $[1 1 1 -1 1 1]$ และ $[-1 -1 -1 1 -1 -1]$ โดยจะทำการแสดงตัวอย่างตั้งแต่ขั้นตอนการจำลองสี่บิตที่บิตข้อมูลทีกล่าวข้างต้น ขั้นตอนต่อมาคือสัญญาณอ่านกลับสองมิติเมื่อใช้หัวอ่านในรูปที่ 3.2 อ่านบนแผ่นบันทึกข้อมูลทีบันทึกบิตข้อมูลทีกล่าวข้างต้น และขั้นตอนสุดท้ายคือสัญญาณอ่านกลับจะมีค่าแอมพลิจูดของบิตข้อมูลทีกล่าวข้างต้น ซึ่งพบว่าบิตในตำแหน่งที่ 4 จะถูกลดทอนจากบิตข้างๆ ทีมีสถานะตรงข้ามกันทำให้เกิดการให้ค่าแอมพลิจูดของบิตข้อมูลนั้นผิดพลาด หากต้องการอ่านบิตข้อมูลในตำแหน่งนั้นเพียงตำแหน่งเดียว แต่ในทางกลับกันการออกแบบคำรหัส (codewords) ทีนำเสนอ นั้นจะทำการดูจากสัญญาณอ่านกลับของค่าแอมพลิจูดของบิตข้อมูลเป็นภาพรวมทั้งหมดจึงทำให้เป็นคำรหัสที่อยู่ในรูปแบบข้อมูลที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ รูปที่ 3.10



รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

รูปที่ 3.9 การจำลองสี่บิตที่บันทึกบิตข้อมูล [-1 -1 -1 1 -1 -1] (ก) สัญญาณอ่านกลับสองมิติเมื่อใช้หัวอ่านอ่านบนแผ่นบันทึกข้อมูล (ข) สัญญาณอ่านกลับของค่าแอมพลิจูดของบิตข้อมูลนั้นๆ (ค)



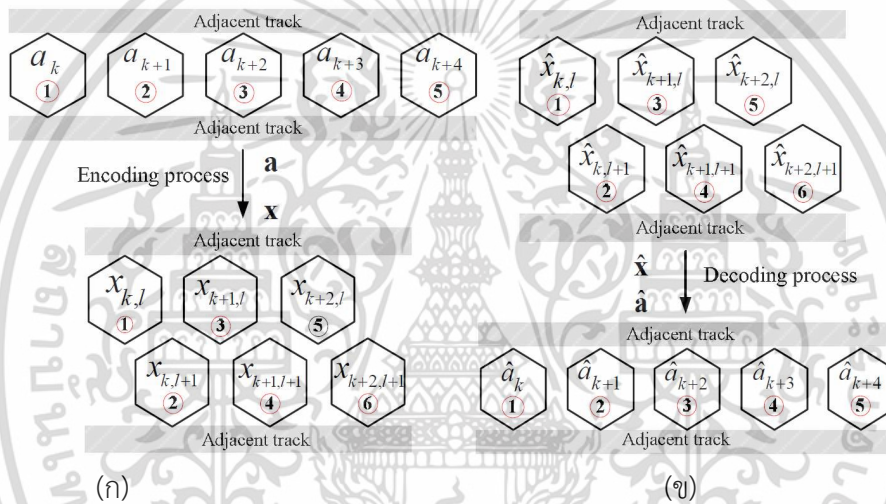
รูปที่ 3.10 การจำลองสี่บิตที่บันทึกบิตข้อมูล [1 1 1 -1 1 1] (ก) สัญญาณอ่านกลับสองมิติเมื่อใช้หัวอ่านอ่านบนแผ่นบันทึกข้อมูล (ข) สัญญาณอ่านกลับของค่าแอมพลิจูดของบิตข้อมูลนั้นๆ (ค)

วิธีการเข้ารหัสมอดูเลชันอัตราหัส 5/6 แบบใหม่นั้น บิตข้อมูล 5 บิต ในเมทริกซ์ที่มีขนาด 1x5 บิต เช่น $[a_{k,l}, a_{k+1}, a_{k+2}, a_{k+3}, a_{k+4}]$ จะถูกเปลี่ยนเป็นคำรหัส 6 บิต ในเมทริกซ์ \mathbf{x} ที่มีขนาด 2x3 บิต (หรือคือ คำรหัส) ซึ่งประกอบข้อมูลจำนวน 2 บิตแรกของข้อมูลอินพุตจะถูกเก็บไว้ในคอลัมน์แรก $[x_{k,l}, x_{k,l+1}]$ ส่วนคอลัมน์ที่สอง $[x_{k+1,l}, x_{k+1,l+1}]$ จะถูกใช้เก็บบิตอินพุต 2 บิตไว้ตรงกลาง และคอลัมน์สุดท้าย $[x_{k+2,l}, x_{k+2,l+1}]$ จะถูกใช้เก็บบิตอินพุตลำดับสุดท้ายและบิตส่วนเกิน (redundant bit) ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.11 (ก) ซึ่งวิธีนี้เป็นแนวทางพื้นฐานของรูปแบบการเข้ารหัส

รศ. ดร. ชานนท์ วรรีสาร์ | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

ส่วนการถอดรหัสบิตที่ถูกบันทึกตามรูปแบบของคำรหัส 6 บิต \hat{x} จะถูกจัดรูปแบบใหม่ได้เป็นบิตข้อมูล โดยประมาณ 5 บิต \hat{a} ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) โดยใช้หลักการหาระยะทางยูคลิด (Euclidean distance) ในการถอดรหัสด้วย

$$d(\hat{x}_k, \tilde{x}_k) = \sqrt{\sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^2 (\hat{x}_{k+m,l+n} - \tilde{x}_{k+m,l+n})^2} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.11 รูปแบบการเข้ารหัส (ก) และการถอดรหัส (ข) ซึ่งเข้ารหัสบิตอินพุต 1x5 เป็น 6 บิตคำรหัสในเมทริกซ์ที่มีขนาด 2x3 บิต และถอดรหัสบิตที่ถูกบันทึก 6 บิต เป็น 1x5 บิตอินพุต ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตารางค้นหาสำหรับสื่อบันทึกแบบเฮกซ์โกนอล (look-up table)

5-bit input data, a_k^5					\tilde{x}_k	5-bit input data, a_k^5					\tilde{x}_k
a_k	a_{k+1}	a_{k+2}	a_{k+3}	a_{k+4}	codeword	a_k	a_{k+1}	a_{k+2}	a_{k+3}	a_{k+4}	codeword
-1	-1	-1	-1	-1	C_1	1	-1	-1	-1	-1	C_{29}
-1	-1	-1	-1	1	C_9	1	-1	-1	-1	1	C_6
-1	-1	-1	1	-1	C_{10}	1	-1	-1	1	-1	C_{28}
-1	-1	-1	1	1	C_{18}	1	-1	-1	1	1	C_{27}
-1	-1	1	-1	-1	C_2	1	-1	1	-1	-1	C_{26}
-1	-1	1	-1	1	C_3	1	-1	1	-1	1	C_{16}
-1	-1	1	1	-1	C_{11}	1	-1	1	1	-1	C_{24}
-1	-1	1	1	1	C_{19}	1	-1	1	1	1	C_{14}
-1	1	-1	-1	-1	C_4	1	1	-1	-1	-1	C_{22}
-1	1	-1	-1	1	C_{12}	1	1	-1	-1	1	C_{30}
-1	1	-1	1	-1	C_{25}	1	1	-1	1	-1	C_{31}
-1	1	-1	1	1	C_{20}	1	1	-1	1	1	C_7
-1	1	1	-1	-1	C_{17}	1	1	1	-1	-1	C_{15}
-1	1	1	-1	1	C_{13}	1	1	1	-1	1	C_{23}
-1	1	1	1	-1	C_5	1	1	1	1	-1	C_8
-1	1	1	1	1	C_{21}	1	1	1	1	1	C_{32}

c_1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	c_9 -1 -1 -1 -1 -1 1	c_{10} -1 -1 -1 -1 1 1	c_{18} -1 -1 1 -1 1 1
c_2 -1 -1 -1 -1 1 -1	c_3 -1 1 1 -1 -1 1	c_{11} -1 1 -1 -1 1 -1	c_{19} -1 1 1 -1 1 -1
c_4 -1 -1 -1 1 1 -1	c_{12} -1 -1 -1 1 -1 1	c_{25} -1 -1 1 -1 -1 1	c_{20} -1 -1 1 1 1 1
c_{17} -1 -1 1 -1 -1 -1	c_{13} -1 1 1 1 -1 -1	c_5 -1 1 -1 1 1 1	c_{21} -1 1 1 1 1 1
c_{29} 1 -1 -1 -1 -1 -1	c_6 1 -1 -1 -1 -1 1	c_{28} -1 1 -1 1 1 -1	c_{27} -1 1 1 -1 1 1
c_{26} -1 1 -1 -1 -1 -1	c_{16} 1 1 -1 1 1 1	c_{24} 1 1 1 1 1 -1	c_{14} 1 1 1 -1 1 1
c_{22} 1 -1 -1 1 -1 -1	c_{30} 1 -1 -1 1 -1 1	c_{31} 1 1 1 1 -1 1	c_7 1 -1 1 1 1 1
c_{15} 1 1 -1 1 -1 -1	c_{23} 1 1 1 1 -1 -1	c_8 1 1 -1 1 1 -1	c_{32} 1 1 1 1 1 1

รูปที่ 3.12 คำรหัส (codeword) ที่ได้จากการออกแบบ

References

- [1] M. Yamashita et al., “Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, pp. 3558–3561, Oct. 2011.



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการจำลองที่ได้จากการออกแบบรูปแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันทั้งในสื่อบันทึกแบบกิริตมูมฉากและสื่อบันทึกแบบเยื้องรวมไปถึงการอธิบายถึงคุณลักษณะของแต่ละพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบทดลองวัดประสิทธิภาพของระบบต่างๆ ซึ่งผลการจำลองของงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2.5 และ 3.0 Tb/in² โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างบิต T_x และระยะห่างระหว่างแทร็ก T_z เท่ากับ 16 และ 14.5 nm ตามลำดับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้สมการที่ 2.7 ที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้านั้น รวมทั้งในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะแสดงถึงค่า T_x และ T_z ในค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (AD) นั้นๆ และเพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบต่างๆ ที่เท่าเทียมกันนั้น จะใช้ค่าความหนาแน่นใช้งาน (UD: user density) ที่เท่ากันเพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบ ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความหนาแน่นใช้งาน (UD) เท่ากันที่ 2.5 Tb/in² โดยค่า UD สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{User density (UD)} = AD \times R \quad (4.1)$$

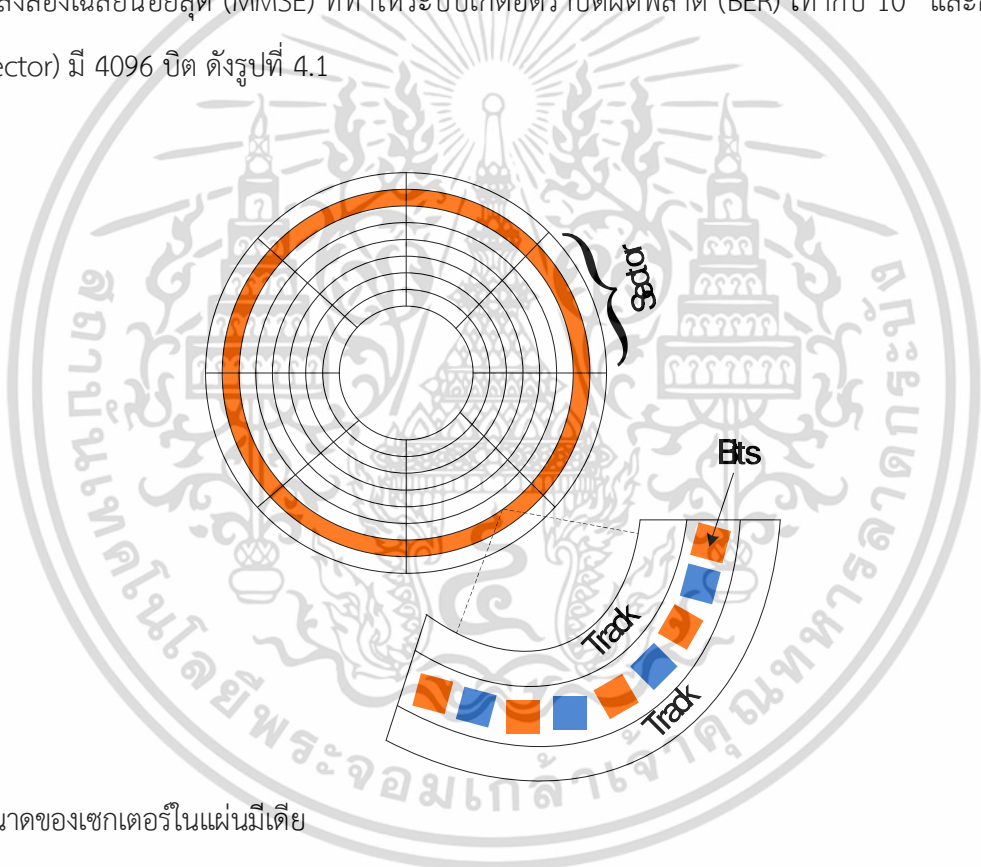
เมื่อ $R = 5/6$ คืออัตราหัส (code rate) ของรหัสมอดูเลชันที่นำเสนอในงานวิจัย ซึ่งอัตราหัสจะมีค่าเท่ากับ 0.833 ทั้งนี้การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของค่าอัตราข้อผิดพลาดของบิต (BER: bit-error rate) ต่อค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal to noise ratio) ซึ่งในทางปฏิบัติค่า SNR ในสัญญาณอ่านกลับจะสัมพันธ์กับจำนวนเกรนต่อบิตเซลล์ (bit cell) ซึ่งค่า SNR ที่ได้จะมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB: deciBel) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{SNR} = 10 \log_{10}(1 / R\sigma^2) \quad (4.2)$$

เมื่อค่า σ คือส่วนเบี่ยงมาตรฐานของสัญญาณรบกวน R คืออัตราหัส (code rate) และ 1 คือค่าของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ ในงานวิจัยนี้จะให้มีค่าเป็น 1

4.1 สมรรถนะของการเข้ารหัสมอดูเลชันในสื่อบันทึกแบบกริดมุมฉาก

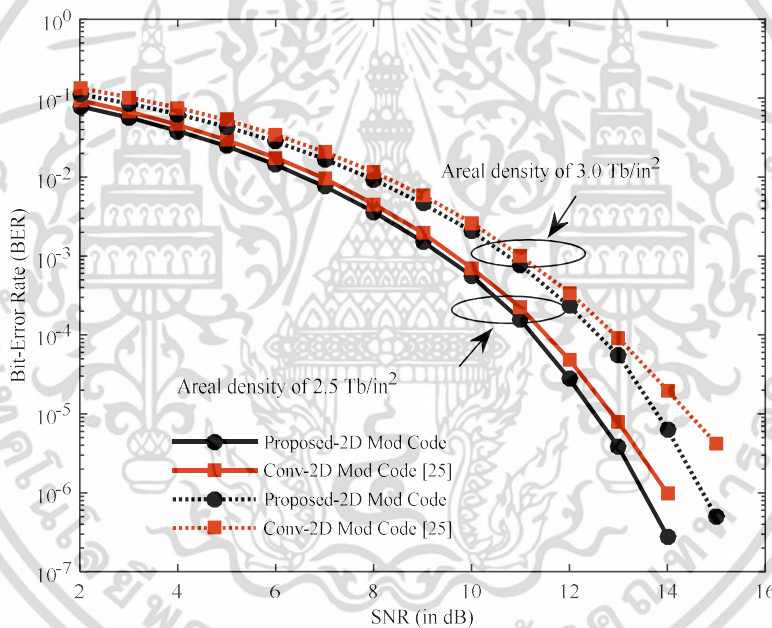
สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปที่ 4.2 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่า SNR ของการออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันสำหรับหัวอ่านบันทึกแม่เหล็กหลายหัวลงในสื่อบันทึกแบบที่เป็นกริดมุมฉาก ซึ่งค่า SNR หาได้จากสมการที่ (4.2) มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) และจะใช้ทาร์เก็ต (Target) แบบสองมิติที่มีขนาดของทาร์เก็ตแบบ 3x3 และอีควอไลเซอร์แบบสองมิติขนาด 3x7 ซึ่งถูกออกแบบโดยวิธีการหาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE) ที่ทำให้ระบบเกิดอัตราบิตผิดพลาด (BER) เท่ากับ 10^{-4} และกำหนดให้ 1 เซกเตอร์ (sector) มี 4096 บิต ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขนาดของเซกเตอร์ในแผ่นมีเดีย

รูปที่ 4.2 แสดงอัตราบิตผิดพลาดของระบบ โดยให้ระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบทั่วไป [1] จะนิยามว่า “Conv-2D Mod Code” กับระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอจะนิยามว่า “Proposed-2D Mod Code” โดยพิจารณา ณ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เท่ากัน (AD) 2.5 และ 3.0 Tb/in² ตามลำดับพบว่าระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้การออกแบบการ

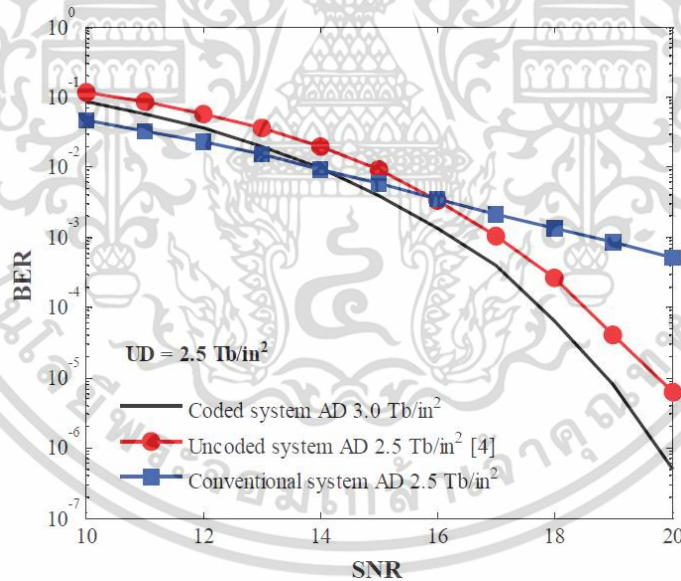
เข้ารหัสมอดูเลชันแบบทั่วไป [1] โดยที่ระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะดีกว่าระบบที่เข้ารหัสแบบทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 0.4 dB ที่ BER=1×10⁻⁵ และมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2.5 Tb/in² (T_x = T_z = 16 nm) และอยู่ที่ประมาณ 0.8 dB เมื่อมีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูงขึ้น (ที่ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 3.0Tb/in² T_x = T_z = 14.5 nm) แสดงว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากรหัสที่ออกแบบมาสามารถลดความรุนแรงของการแทรกสอดระหว่างแพ็คเกจ (ITI) ได้มากกว่าและวิธีการระบุตำแหน่งข้อมูลของคำรหัส (codeword) ทั้งในการเข้าและถอดรหัสร่วมกัน จะยิ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเข้ารหัสและการถอดรหัสให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากกระบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสจากรูปแบบการเข้ารหัสแบบทั่วไปที่ไม่ได้ระบุตำแหน่งข้อมูลอีกด้วย [1]



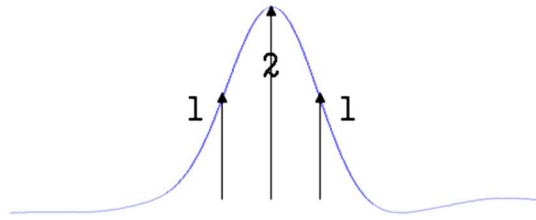
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้การเข้ารหัสมอดูเลชันสำหรับหัวอ่านบันทึกแม่เหล็กหลายหัวลงในสื่อบันทึกแบบกริดมอดูเลชันในระบบต่างๆ ที่ UD = 2.5 Tb/in²

4.2 สมรรถนะการเข้ารหัสมอดูเลชันที่มีสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอล

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปที่ 4.3 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่า SNR ของการออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันโดยใช้เทคนิครูปแบบการอ่านหลายแพ็คเกจด้วยหนึ่งหัวอ่านที่มีสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลซึ่งค่า SNR หาได้จากสมการที่ (4.2) มีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibel: dB) เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณเกาเซียนสีขาว และจะใช้ทาร์เก็ต (Target) แบบหนึ่งมิติที่เป็นทาร์เก็ตแบบ [1 2 1] ดังรูปที่ 4.4 และอีควอไลเซอร์แบบหนึ่งมิติขนาด 1×11 ซึ่งถูกออกแบบโดยเทคนิคควรจะเป็นสูงสุดของผลตอบสนองบางส่วน (PRML) และกำหนดขนาดของบิตไอแลนด์แบบเยื้องที่เป็นรูปหกเหลี่ยมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 nm และคาบของบิต (bit period) $T_x = 16.0$ nm และ 14.5 nm ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ 2.5 และ 3.0 Tb/in² ตามลำดับ

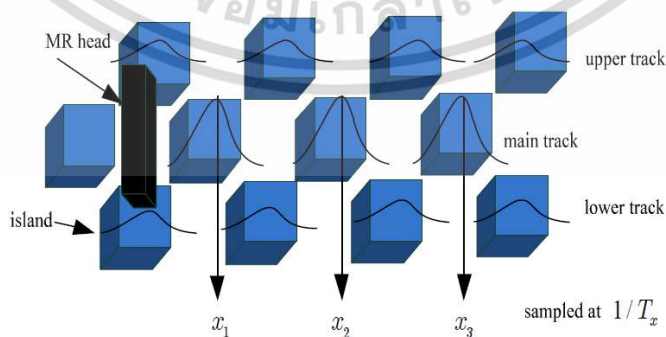


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้การเข้ารหัสมอดูเลชันโดยใช้เทคนิครูปแบบการอ่านหลายแพ็คเกจด้วยหนึ่งหัวอ่านที่มีสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลระบบต่างๆ ที่ UD = 2.5 Tb/in²



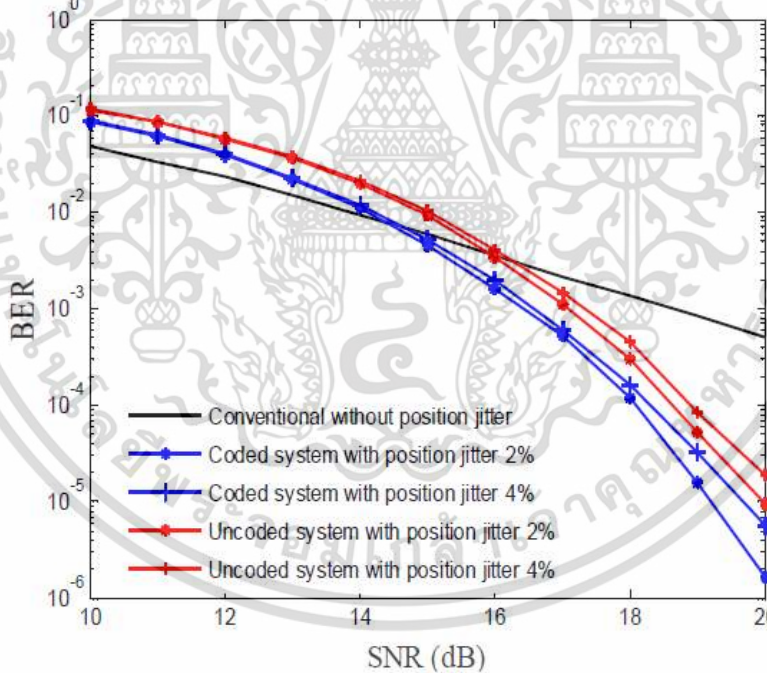
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองบางส่วนและทาร์เก็ตแบบ PR2 [2]

โดยให้ระบบที่ใช้การอ่านแบบทั่วไปจะนิยามว่า “Conventional system” ระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอจะนิยามว่า “Coded system” และระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสมอดูเลชันจะนิยามว่า “Uncoded system” โดยพิจารณา ณ ความหนาแน่นใช้งานที่เท่าๆกัน (UD) 2.5 Tb/in² เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่เท่าเทียมกันพบว่าระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอในอัตรารหัส 5/6 ให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสมอดูเลชัน [3] เนื่องจากรหัสที่ออกแบบมาสามารถลดความรุนแรงของการแทรกสอดแบบสองมิติได้ดีกว่า และวิธีการระบุตำแหน่งข้อมูลของคำรหัส (codeword) ทั้งในการเข้ารหัสและถอดรหัสร่วมกันนั้นจะยิ่งทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสมอดูเลชัน ถึงแม้ว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสมอดูเลชันได้ใช้เทคนิคการจะเป็นสูงสุดของผลตอบสนองบางส่วน (PRML) และเทคนิคการซัดตัวอย่างเกินจริง (Oversampling) ร่วมกัน สำหรับตรวจสอบข้อมูลหลังจากอ่านข้อมูลจากสื่อบันทึกแล้วและยังได้ออกแบบสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลเพื่อช่วยบรรเทาการแทรกสอดแบบสองมิติแต่ก็ยังให้ประสิทธิภาพไม่มาพอมือเทียบกับระบบที่ได้นำเสนอแต่ก็มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ใช้การอ่านแบบทั่วไป และหากนำระบบที่นำเสนอมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้การอ่านแบบทั่วไปจะยิ่งให้สมรรถนะของระบบที่ดียิ่งขึ้นไปอีก ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ระบบที่ใช้การอ่านแบบทั่วไป [4]

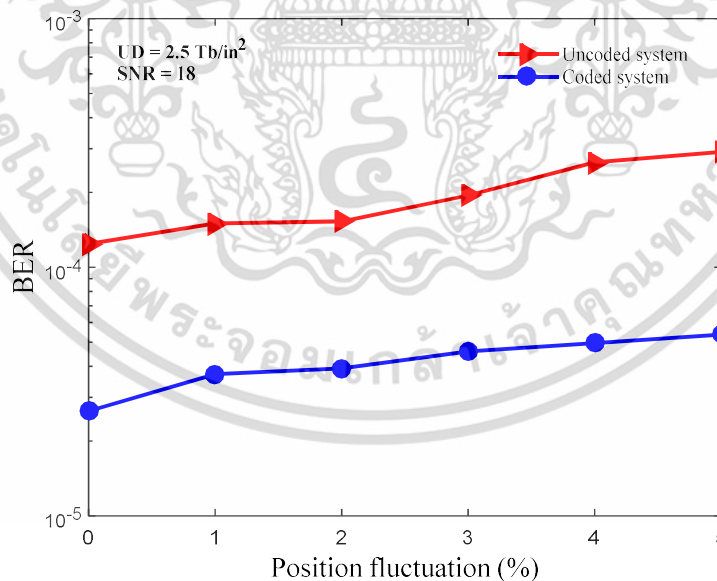
ส่วนการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบรูปที่ 4.6 นั้นจะเป็นการแสดงของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่า SNR เมื่อระบบได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจากความผันผวนของตำแหน่งที่ 2% และ 4% ทั้งในระบบที่ไม่ได้ใช้วิธีการเข้ารหัสข้อมูลเช่น “Uncoded system with position jitter” กับระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลแบบที่นำเสนอ “Coded system with position jitter” ส่วนระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบทั่วไป “Conventional without position jitter” จะไม่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก พบว่าระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบที่นำเสนอทั้งแบบที่เข้ารหัสข้อมูลและไม่ได้เข้ารหัสข้อมูลนั้น ถึงแม้ว่าจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจากความผันผวนของตำแหน่งที่ 2% และ 4% ก็ยังคงให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบทั่วไป และจะให้สมรรถนะที่ดียิ่งขึ้นหากระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบที่นำเสนอได้ถูกเข้ารหัสข้อมูลด้วยรูปแบบที่ได้นำเสนออีกด้วย



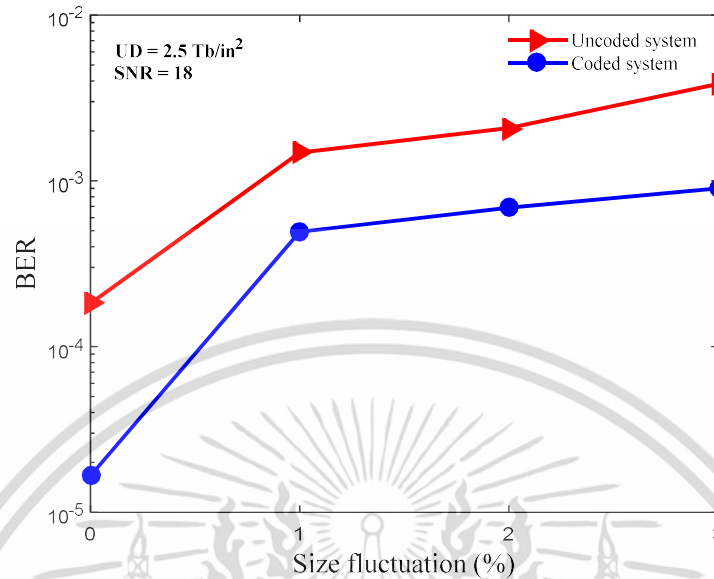
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบแบบต่างๆ ซึ่งได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจากความผันผวนของตำแหน่งที่ 2% และ 4% ณ UD = 2.5 Tb/in²

นอกจากนี้เพื่อเป็นการเพิ่มความมั่นใจและแสดงประสิทธิภาพให้กับระบบที่ได้นำเสนอ จะทำการเปรียบเทียบจากผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสี่บิตที่จากความผันผวนของตำแหน่งและขนาด การแสดงสมรรถนะของระบบจะอยู่ในรูปแบบของค่า SNR กับค่า ($P_{\text{fluctuation}}$) และ ($S_{\text{fluctuation}}$) สำหรับความผันผวนของตำแหน่งและขนาดตามลำดับ (มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ %) ของระบบที่ไม่ได้ใช้วิธีการเข้ารหัสมอดูเลชัน “Uncoded system” กับระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอ “Coded system” ที่ความหนาแน่นใช้งาน (UD) 2.5 Tb/in² ทั้งสองระบบเพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่เท่าเทียมกัน ซึ่งการหาค่าความผันผวนของตำแหน่งและขนาด

จากรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่ความหนาแน่นใช้งาน (UD) 2.5 Tb/in² และที่ค่า SNR 18 dB นั้น ระบบที่ใช้การออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบที่นำเสนอ “Coded system” นั้นยังคงให้สมรรถนะประสิทธิภาพของระบบได้ดีกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้วิธีการเข้ารหัสมอดูเลชัน “Uncoded system” แม้จะถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนสี่บิตที่จากความผันผวนของตำแหน่งที่ลำดับของเปอร์เซ็นต์ 0% จนกระทั่ง 5% และความผันผวนของขนาดที่ลำดับของเปอร์เซ็นต์ 0% จนกระทั่ง 3% ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลกระทบจากความผันผวนของตำแหน่ง



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลกระทบจากความผันผวนของขนาด

4.3 สรุป

ระบบที่ได้รับการออกแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันในแบบที่นำเสนอไปทั้งสองระบบนั้น จะมีสมรรถนะและประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้วิธีการเข้ารหัสมอดูเลชันและดียิ่งกว่าระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบทั่วไป เนื่องจากระบบที่ได้รับการออกแบบการเข้ารหัสจะถูกกำหนดให้ไม่ทำการบันทึกรูปแบบข้อมูลที่เกิดการลดทอน (DITI) เกิดขึ้น เช่น $[1 \ -1 \ 1]$ และ $[-1 \ 1 \ -1]$ ออกซึ่งการหลีกเลี่ยงรูปแบบข้อมูลเหล่านี้ก่อนการบันทึกลงมีเดีย จะช่วยทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น และวิธีการระบุตำแหน่งข้อมูลของคำรหัส ทั้งในการเข้ารหัสและถอดรหัสส่วนกันนั้นจะยิ่งทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสมอดูเลชันนอกจากนั้นการเข้ารหัสมอดูเลชันในแบบที่นำเสนอจะช่วยจัดการกับรูปแบบที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบสองมิติ สามารถเพิ่มความจุของข้อมูลในค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงๆ และยังลดอัตราการเกิดข้อผิดพลาดของบิตข้อมูลในระบบได้อีกด้วย

References

- [1] C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-mitigating 5/6 modulation code for bit-patterned media recording," IEICE Trans. Electron., vol. E98-C, no. 6, pp. 528-533, Jun. 2015.
- [2] K.D. Fisher et al., "PRML detection boosts hard-disk drive capacity," IEEE Spectrum., vol. 33, issue. 11, pp. 70-76, Nov. 1996.
- [3] C. Buajong and C. Warisarn, "Multitrack reading scheme with single reader in BPMP systems," in Proc. of iEECON 2017, pp. 457-460, Pattaya, Thailand, 8-10 Mar. 2017.
- [4] สันติ กุลการชาย ชานนท์ วริสาร และปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์, "การประมวลผลสัญญาณ สำหรับ การจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม 4: วงจรภาครับขั้นสูงสำหรับ BPMP และ TDMP," เพชร เกษมพรินต์ติ้ง, 2560



บทที่ 5

บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษารูปแบบการเข้ารหัสสมอดูเลชันลงในสื่อบันทึกแบบแบบกริดมูมฉากและสื่อบันทึกแบบเฮกซะโกนอลสำหรับระบบบิตแพทเทิร์นมีเดียและพัฒนาการเข้ารหัสเพื่อใช้ในการป้องกันและหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากความบกพร่องของการเข้ารหัสอย่างละเอียด รวมทั้งเน้นศึกษาการเข้ารหัสบิตข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงและป้องกันผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดสองมิติ เนื่องจากระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่รองรับความจุของข้อมูล ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูงๆ จะเกิดปัญหาเรื่องการแทรกสอดระหว่างสัญญาณ และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก อย่างไรก็ตามหลีกเลี่ยงได้ โดยทั่วไปผลกระทบจากการแทรกสอดแบบสองมิติสามารถเป็นไปได้ทั้งแบบส่งเสริม และแบบลดทอน ซึ่งการแทรกสอดแบบสองมิติแบบลดทอนเป็นแบบที่ควรหลีกเลี่ยง โดยการออกแบบการนำเทคนิคควรจะเป็นสูงสุดของผลตอบสนองบางส่วน เทคนิคการชักตัวอย่างเกินจริง ร่วมกันสำหรับตรวจสอบข้อมูลหลังจากอ่านข้อมูลจากสื่อบันทึก รวมถึงเทคนิควิธีการหาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด ที่ใช้ในการออกแบบทาร์เก็ตต่างๆรวมทั้งวงจรตรวจหาต่างๆอีกด้วย

ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การจัดเรียงข้อมูลก่อนการบันทึกลงในสื่อบันทึกจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดสองมิติที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กและยังช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกได้อีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูงๆ จะช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบให้สูงขึ้นได้เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ารูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสที่ทางผู้วิจัยได้นำเสนอนั้น จะให้สมรรถนะที่ดีและสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้ รวมถึงการออกแบบรูปแบบการเข้ารหัสด้วยวิธีที่ง่ายแต่ทำให้สมรรถนะของระบบออกมาค่อนข้างดี แต่ถึงกระนั้นถ้าหากสามารถพัฒนารูปแบบการเข้ารหัสและการถอดรหัสสมอดูเลชันให้ดียิ่งขึ้น ศึกษาวิธีการถอดรหัสสมอดูเลชันที่สามารถถอดได้ละเอียดมีความแม่นยำสูง รวมทั้งพัฒนาอีควอไลเซอร์ที่สามารถปรับเท่าสัญญาณให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้นและพัฒนางจรตรวจหาวิเทอร์บีเพื่อหาลำดับของข้อมูลที่เป็นไปได้สูงสุดให้ละเอียดมากขึ้น หรือไม่ก็นำเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยแก้ปัญหาทางด้านต่างๆ ของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นมาใช้ร่วมกัน ก็อาจจะช่วยแก้ปัญหาในด้านต่างๆ ของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

รศ. ดร. ชานนท์ วรรณสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบบิตแพ็คเกจที่รูปแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสที่ทางผู้วิจัยได้นำเสนอไม่สามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้ ซึ่งอาจส่งผลให้สมรรถนะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพ็คเกจที่นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีได้มากยิ่งขึ้น



รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รศ. ดร. ชานนท์ วรวิสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Digital Communications and Networks(DCN)



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/dcan



A Simple 2D Modulation Code in Single-Reader Two-Track Reading (SRTR) BPMR Systems

Wiparat Busyatras^a, Chanon Warisarn^{*b}, Santi Koonkarnkhai^c
and Piya Kovintavewat^c

^aFaculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

^bCollege of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

^cData Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

Abstract

A reduction in the track width of magnetic recording systems results in a welcome increase in areal density (AD), but also in the unfortunate appearance of extreme inter-track interference (ITI) that can severely deteriorate system performance. The effect of severe ITI may be mitigated through the use of coding schemes. In this paper, therefore, we present a rate-5/6 two-dimensional (2D) modulation code that is designed based on a proposed single-reader/two-track reading (SRTR) technique to cope with this serious problem in staggered bit-patterned magnetic recording (BPMR) systems. We then evaluate the bit-error rate (BER) performance of the proposed system in the presence of media noises, e.g., position and size fluctuations. Our simulation results indicate that, at the same user density (UD), the proposed system is better than an uncoded system by about 1.0 dB at the BER of 10^{-5} and is also superior to a conventional recording system.

© 2019 Published by Elsevier Ltd.

KEYWORDS: Bit-Patterned Media Recording, 2D Interference, 2D Modulation Code, Single-Reader/Two-Track Reading

1. Introduction

To increase an areal density (AD) of magnetic recording technology, bit-patterned magnetic recording (BPMR) is one of the promising candidates for the next generation of hard disk drive (HDD) technologies, which is expected to extend AD by up to 4 terabit per square inch (Tb/in²) [1]. However, when the track pitch and bit length in BPMR systems are much reduced to obtain higher AD, the reader's sensitivity response still has a wider width than the written track

width; the two-dimensional (2D) interference consisting of the inter-symbol interference (ISI) and inter-track interference (ITI) [2] will also unavoidably increase. Moreover, severe ITI can degrade overall system performance significantly. Therefore, ITI cancellation or precaution techniques such as ITI cancellers [3],[4], multi-head/multi-track schemes [5], and 2D modulation codes [6], [7], [8] were considered to prevent and combat this situation.

In the previous work [9], H. Muraoka and S. J. Greaves proposed two-track reading with a wide-track reader that performs together with a staggered recorded magnetization. The results are satisfactory for their proposed channel; however, we have not yet considered them with a staggered array BPMR channel. Therefore, C. Buajong and C. Warisarn [10] introduced a multitrack reading scheme with a single reader in a staggered BPMR system as shown in Fig. 1. An over-sampling technique and

*Chanon Warisarn (Corresponding author) Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post publication (e-mail: chanon.wa@kmitl.ac.th).

¹Wiparat Busyatras (e-mail: wiparat_b@rmutt.ac.th).

²Chanon Warisarn (e-mail: chanon.wa@kmitl.ac.th).

³Santi Koonkarnkhai (e-mail: santi@npru.ac.th).

⁴Piya Kovintavewat (e-mail: piya@npru.ac.th).

รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

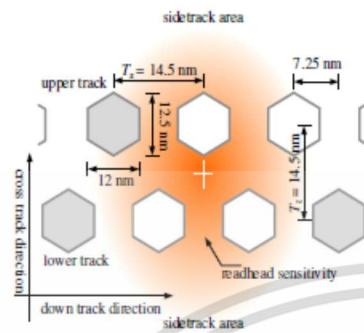


Fig. 1: Configuration of the proposed single-reader/two-track reading (SRTR) technique at the AD of 3.0 Tbit^{-2} under the readhead sensitivity response that was positioned between the desired upper and lower tracks.

partial-response maximum-likelihood (PRML) detection were used together with a two-track reading scheme in a staggered BPMR system. The simulation results indicate that the effect of severe ITI can be mitigated using a multitrack reading scheme with a wide-track reader.

The several 2D encoding/decoding schemes were recently proposed [11], [12], [13] in dealing with the severe 2D interference effect. For instance, Kurihara et al. [12] introduced a constructive ITI-coded partial-response (PR) maximum likelihood system based on a two-track model for perpendicular magnetic recording (PMR). Specially, the constructive ITI code has designed based on the equalized level such that the opposite polar level can never occur simultaneously after class-1 PR equalization. Moreover, a recorded-bit patterning (RBP) schemes were also presented to combat the 2D interference in both of regular [6] and staggered [14] BPMR channel but they had high complexity and required large buffer memory. Therefore, the easier encoding schemes such as the ITI-mitigating 5/6 2D modulation code in BPMR system [15] was proposed in removing the fatal ITI data patterns i.e., $[-1 +1 -1]$ and $[+1 -1 +1]$ in across track direction, which converts an input data sequence into a 3-track recorded sequence based on a look-up table before recording them onto the 3 tracks of the magnetic medium, simultaneously, which yields a good performance.

To improve the BER performance of the multitrack reading scheme in the staggered BPMR system, therefore, we propose a rate-5/6 2D modulation code that can guarantee the BPMR readback signal will not be corrupted by severe interference, thus easing the data detection process. Our encoding process easily operates based on a look-up table while the Euclidean distance [16] concept is applied in the decoding process

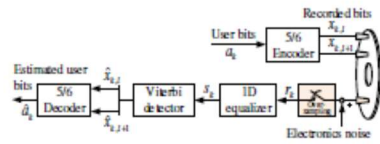


Fig. 2: Block diagram of the SRTR technique combined with the proposed rate-5/6 2D modulation code in a staggered BPMR system.

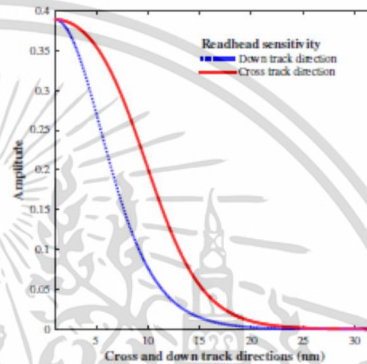


Fig. 3: Readhead sensitivity function [4].

to make sure that the received data can be decoded accordingly. The results show that our proposed system has greater ability over an uncoded system under the SRTR technique and is superior to a conventional recording system at the same user density (UD). Moreover, we also evaluate the BER performance of the proposed system in the presence of media noises, e.g., position and size fluctuations. The simulation results indicate that, at the same UD, our proposed system still provides better performance for all position and size fluctuation levels. Furthermore, it seems that the effect from size fluctuation has a greater effect on the proposed system than position fluctuation.

The rest of this paper is organized as follows: Section 2 briefly describes the staggered BPMR channel model, Section 3 explains the proposed encoding and decoding schemes, simulation results are given in Section 4, and finally, Section 5 concludes this paper.

2. Channel Model

The staggered BPMR system with the proposed encoder and decoder, which is considered in this paper, is illustrated in Fig. 2. We consider a hexagonal island with a diameter of 12 nm and a bit period of 16.0 and 14.5 nm, which correspond to the ADs of 2.5 and 3.0

Tb/in², respectively. The bit islands were arranged as a staggered array and covered with a readhead sensitivity response [17] as shown in Fig. 1. Here, the cross and down track readhead sensitivity function are fixed to be 64 nm as similarly used in [4] as illustrated in Fig. 3. In this paper, we define the pixel size to be 0.01×0.01 nm². Then, the hexagonal bit islands of the medium are constructed using many small pixels until they reach their size limit [10], [18]. A binary input sequence $a_k \in \{\pm 1\}$ with bit period T_x is encoded by the proposed 2D modulation code to obtain the two data tracks $x_{k,j}, x_{k,j+1}$, where $x_{k,j} \in \{\pm 1\}$, before recording them onto a medium. In addition, the writing process is assumed to be precise, where the recording field of the write head covers only within a bit pixel area. Therefore, its magnetization will always be the same as that of the recorded bit. Here, the sidetracks are also covered with a readhead sensitivity function, which implies that the readback signal is not only interfered with from two desired data tracks but also corrupted from their sidetracks. It is very important to note that the encoded data sequences will be written one by one into the medium using only one single writer with the help of buffer memory.

At the receiver, the readback signal is simply obtained from the 2D convolution between the magnetization and the readhead sensitivity response of the reader whose track width covers more than two whole neighboring tracks. The center of the readhead sensitivity function is positioned at the intermediate point between the parallel tracks as illustrated in Fig. 1. In this work, we first consider the readback signal as a function of x (in nm) and y (in nm) coordinates, $r(x, y)$ which can be produced from the following equation,

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

where, $m(x, y)$ is magnetization of bit island in the media plane and $h(x, y)$ is the readhead sensitivity response of the reader. The continuous readback signal $r(t)$ can also be constructed from the readback signal of x and y coordinates as $r(t) = r(x, i)$, where i is the middle point of the obtained readback signal of x and y coordinates in an across-track direction. Then, the readback signal is further corrupted by electronics noise that is modeled as an additive-white Gaussian noise (AWGN) with zero-mean and variance σ^2 . To obtain the sample amplitudes, the readback signal is perfectly over-sampled at the sampling period, $0.5T_x$, which is located at the centers of the recorded magnetization. Next, the readback data sequence, r_k is equalized by a 1D equalizer [19] to obtain the data sequence, s_k , and is fed to the 1D Viterbi detector to produce estimated data sequences. Finally, this sequence will be rearranged to become two data sequences, i.e., $x_{k,j}$ and $x_{k,j+1}$ before being passed on to the proposed decoder to produce the estimated user bits. It is very important to note that the partial response channel (1,

Table 1: A look-up table of the proposed coding scheme for SRTR in staggered BPMPR systems.

All possible 5-bit input data, a					x
a_k	a_{k+1}	a_{k+2}	a_{k+3}	a_{k+4}	codewords
-1	-1	-1	-1	-1	C ₁
-1	-1	-1	-1	1	C ₉
-1	-1	-1	1	-1	C ₁₀
-1	-1	-1	1	1	C ₁₈
-1	-1	1	-1	-1	C ₂
-1	-1	1	-1	1	C ₃
-1	-1	1	1	-1	C ₁₁
-1	-1	1	1	1	C ₁₉
-1	1	-1	-1	-1	C ₄
-1	1	-1	-1	1	C ₁₂
-1	1	-1	1	-1	C ₂₅
-1	1	-1	1	1	C ₂₀
-1	1	1	-1	-1	C ₁₇
-1	1	1	-1	1	C ₁₃
-1	1	1	1	-1	C ₅
-1	1	1	1	1	C ₂₁
1	-1	-1	-1	-1	C ₂₉
1	-1	-1	-1	1	C ₆
1	-1	-1	1	-1	C ₂₈
1	-1	-1	1	1	C ₂₇
1	-1	1	-1	-1	C ₂₆
1	-1	1	-1	1	C ₁₆
1	-1	1	1	-1	C ₂₄
1	-1	1	1	1	C ₁₄
1	1	-1	-1	-1	C ₂₂
1	1	-1	-1	1	C ₃₀
1	1	-1	1	-1	C ₃₁
1	1	-1	1	1	C ₇
1	1	1	-1	-1	C ₁₅
1	1	1	-1	1	C ₂₃
1	1	1	1	-1	C ₈
1	1	1	1	1	C ₃₂

2, 1) or PR2 is used to design the 1D equalizer and the equalizer's length is given to be 11 taps [10] that was designed based on minimum mean square error (MMSE) criterion [19].

3. Proposed Technique

We first analyzed the peak amplitude of all possible $2^6 = 64$ data patterns in a matrix form of 2×3 bits that were arranged as a staggered array BPMPR, where the peak amplitudes of each data pattern were obtained from 2D convolution between their magnetizations without sidetrack data and readhead sensitivity response, as shown in Fig. 1. Since we found that the desired bit peak amplitude will always reverse in the opposite direction when the data bits of each pattern contains many 1's and -1's which easily causes an error during the data recovery process. We name these data patterns as the destructive data patterns. To avoid this unwanted situation, therefore, this condition will be defined as a criterion for designing a

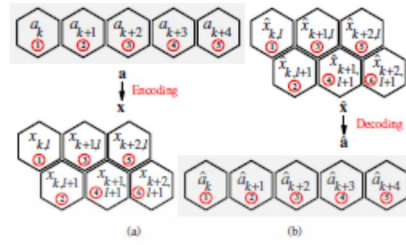


Fig. 4. The proposed (a) encoding and (b) decoding schemes, which encodes the 1x5 user bits to be the 2x3 coded bits and decodes the 2x3 estimated recorded bits to be the 1x5 estimated user bits, respectively.

codeword, which can efficiently avoid such destructive data patterns. We name these data patterns as destructive data patterns. To avoid this unwanted situation, therefore, this condition will be defined as a criterion for designing a codeword, which can efficiently avoid such destructive data patterns. In this work, we select all 32 data patterns that provide the highest peak amplitude according to their bit's status. Then, those data patterns are defined as all 32 code patterns for single-reader two-track reading BPMR systems. The details of the encoding and decoding processes can be explained as follows.

3.1. Encoding Scheme

Since we consider 6 data bits to be as codeword, there will be $2^6 = 64$ possible data patterns composed of: 2 bits in the first column $[x_{k,j}, x_{k,j+1}]$, 2 bits in the second column $[x_{k+1,j}, x_{k+1,j+1}]$, and lastly, 2 bits in the third column $[x_{k+2,j}, x_{k+2,j+1}]$ as shown in Fig. 4(a). We have selected the best 32 data patterns that provide the biggest group from the same data bit i.e., the 1's data bit should be grouped together with 1's, while the -1's data bit should be also grouped together with -1's.

The best 32 data patterns are then assigned to be the 32 code patterns and they become the proposed codewords as shown in Fig. 5. Then, we match the 5 input bits, $\mathbf{a} = [a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, a_{k+3}, a_{k+4}]$ with a 6-bit codeword, $\mathbf{x} = [x_{k,j}, x_{k,j+1}, x_{k+1,j}, x_{k+1,j+1}, x_{k+2,j}, x_{k+2,j+1}]^T$, $[\bullet]^T$ is transpose operator, as illustrated in Table 1. Moreover, to create more accuracy in the decoding process, we have partially defined a mapping condition to create a codeword so that the first two input bits match the first column of the codeword, the second two input bits match the second column of the codeword, while the remaining one input bit corresponds with the upper track in the third column of the codeword. Unfortunately, there are 14 patterns of input bits that cannot match with remained 14 codewords by using the above condition; however, we use the random mapping to map the remained 14 patterns of input bits with the remained 14 codewords. These

Fig. 5. The list of 32 codewords that yield good readback signals, which all of them are the unique codeword according to all input data bits as shown in Table 1.

remained 14 codewords still are one of the best 32 selected codewords so they can output the appropriate readback signal. It is very important to note that the specified constrains at the boundaries between each codeword was not considered in this proposed encoding scheme.

3.2. Decoding Scheme

The estimated recorded data sequences, $\hat{x}_{k,j}$ and $\hat{x}_{k+1,j}$ are decoded by the rate-5/6 2D modulation decoder, which employs the same look-up table as Table 1, to determine the estimated user bits, \hat{a}_k as shown in Fig. 4(b). Here, a pair of 3 symbols from the estimated recorded data sequences, $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_{k,j}, \hat{x}_{k,j+1}, \hat{x}_{k+1,j}, \hat{x}_{k+1,j+1}, \hat{x}_{k+2,j}, \hat{x}_{k+2,j+1}]^T$, will be rearranged to become the estimated user bit vector, $\hat{\mathbf{a}} = [\hat{a}_k, \hat{a}_{k+1}, \hat{a}_{k+2}, \hat{a}_{k+3}, \hat{a}_{k+4}]$. Due to severe interference and electronics noise, however, the decoding process may operate incorrectly for some received patterns that are inconsistent with the codewords in Table 1, i.e., $\mathbf{x} \neq \hat{\mathbf{x}}$. To solve this problem, therefore, we apply the Euclidean

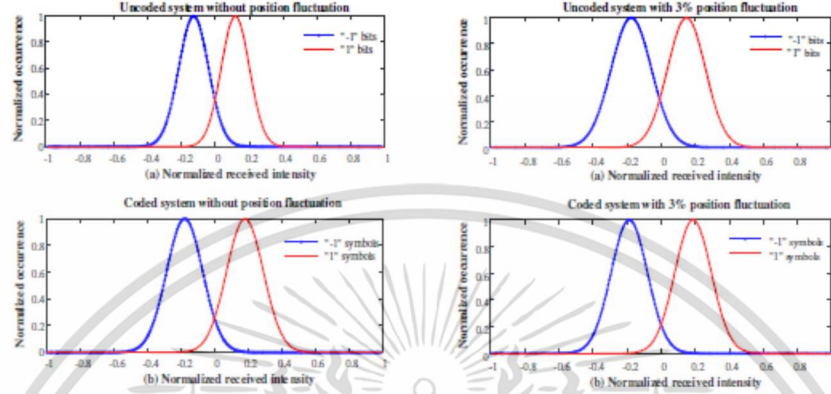


Fig. 6: Histogram of the normalized received intensities of the (a) uncoded and (b) coded systems without position fluctuation.

Fig. 7: Histogram of the normalized received intensities of the (a) uncoded and (b) coded systems with 3% position fluctuation.

distance [16] concept in the decoder to measure the similarity between \hat{x} and x . Here, the decoder computes the Euclidean distance of the estimated recorded data sequences \hat{x} for each codeword x , according to

$$d(\hat{x}, x) = \sqrt{\sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^1 (\hat{x}_{k+m, l+n} - x_{k+m, l+n})^2} \quad (2)$$

Thus, the estimated user bit vector, \hat{a} , corresponding to the codeword x that yields the minimum Euclidean distance in (2) will be defined as the output of the decoder.

4. Results and Discussion

We compare the BER performance between 1) the proposed SRTR system performs together with the proposed 5/6 2D modulation code, 2) the proposed SRTR system [10], here the sidetracks of both systems contain random data, and 3) a conventional reading system which uses one reader, reads the data form one track i.e., an input sequence a_k is written onto a single track with random data on sidetracks. For a fair comparison, the staggered BPMR system performance should be compared using the UD. In this paper, the UD is then defined as $UD = AD \times R$, where R is a code rate, i.e., $R = 0.833$. It reveals that when we consider the system performance at the same UD e.g., $UD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$, the coded system will be affected with the higher 2D interference in both higher ISI and ITI effect because it must be considered under the higher AD e.g., $AD = 3.0 \text{ Tb/in}^2$. However, both uncoded systems can be considered at lower $AD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$ which implies that the uncoded system encounters

lower 2D interference when was compared with the coded system. The signal-to-noise ratio (SNR) is defined as $SNR = 10 \log_{10}(1/\sigma^2)$ in decibel (dB), where σ is a standard deviation of AWGN.

In this paper, the percentage of the position fluctuation, Δ_p can be defined as $\Delta_p = (\Delta_d/T_c) \times 100$, where Δ_d is the maximum possible distance of the center of a bit island from the center of the ideal target island according to Gaussian distribution, and T_c is the length of the bit period. The percentage of the island size fluctuation, Δ_s is defined from the shrinking or expanding of islands, which can be defined as $\Delta_s = (\Delta_w/L_c) \times 100$, where Δ_w is the maximum possible width of island size compared with the ideal island size that has a Gaussian distribution, and L_c is the diameter of the bit islands [18].

We first study the histograms of the normalized received intensities at the input of receiver to evaluate the performance of the uncoded and proposed coded systems using single-reader/two-track reading scheme under the effect of 2D interference. Fig. 6 shows the histograms of the raw signal and signal that obtained from the proposed code without position fluctuation. Here, the effect of 2D interference is revealed by the overlapping area between the '-1' and '1' bits as shown in Fig. 6(a) for the raw signal. It seems that the overlapping area is significantly reduced when using the proposed code as shown in Fig. 6(b). Furthermore, we also analyze the overlapping area when the system encounters with 3% position fluctuation as illustrated in Fig. 7. It is clear that the signal that produced with the proposed code outperforms the raw signal of the uncoded system.

In addition, we also consider the comparison of the BER performances in the different systems as shown

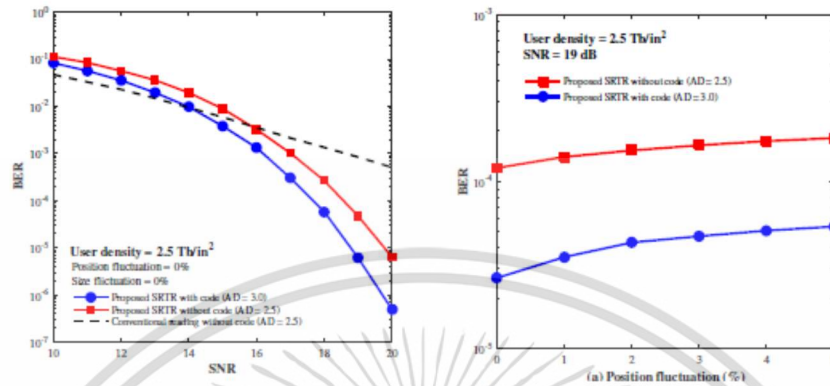


Fig. 8: The comparison of BER performance in different systems at the UD of 2.5 Tb/in².

In Fig. 8, it is clear that the proposed SRTR system that performs together with the proposed 5/6 2D modulation code at the UD of 2.5 Tb/in² (i.e., corresponds to the AD of 3.0 Tb/in²) is better than the uncoded SRTR system by about 1.0 dB at the BER = 10⁻⁵ and is superior to a conventional reading system. Moreover, we also consider the position and size fluctuations at the UD of 2.5 Tb/in². The SNR is fixed at 19 dB for all position and size fluctuation levels. Evidently, our proposed system can yield the best BER performance over the uncoded SRTR system as shown in Fig. 8. Although, the BER performance of the proposed system has gotten slightly closer to the uncoded SRTR system at the higher position and size fluctuation as illustrated in Fig. 9(a) and Fig. 9(b), respectively. However, our proposed system still provides better performance for all position and size fluctuation levels. Moreover, it seems that the effect from size fluctuation has a greater effect to the proposed system than position fluctuation.

5. Conclusion

To extend the areal density capability of bit-patterned magnetic recording systems, we propose using a rate-5/6 2D modulation code that performs together with a single-reader/two-track reading (SRTR) technique. Here, the over-sampling technique is used to obtain the data sample, which provides the data rate twice as rapidly as with conventional reading. The encoding and decoding schemes operate based on a look-up table, which matches each of the 1×5 user bits to a 6-bit codeword in a matrix form of 2×3 data bits. Above all, the merit of the proposed 2D modulation codes is that they avoid a destructive data pattern that easily causes an error during the data recovery process before being recorded onto a magnetic medium. The

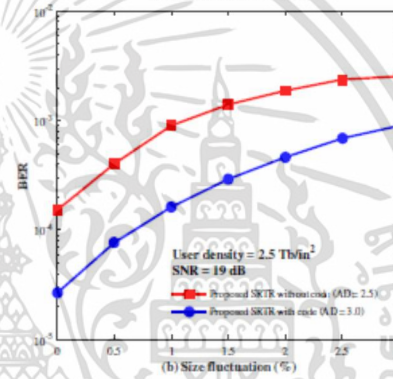


Fig. 9: The comparison of BER performance versus the (a) position and (b) size fluctuations between the proposed SRTR with and without code systems at the UD of 2.5 Tb/in².

simulation results indicate that the proposed system provides a large performance gain when compared to one without a coding system, and it is also superior to a conventional reading system at the same user density. Furthermore, our proposed system yields better performance gains than other systems when they encounter with position and size fluctuations.

Acknowledgment

This work was partially supported by the Thailand Research Fund under the grant number RSA6080051, College of Advanced Manufacturing Innovation (AMI), and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand.

References

- [1] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, H. Tanaka, H. Mutoh, N. Yoshikawa, Future options for hdd storage, *IEEE Transactions on Magnetics* 45 (10) (2009) 3816–3822.
- [2] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, Two-dimensional generalized partial response equalizer for bit-patterned media, in: 2007 IEEE International Conference on Communications, 2007, pp. 6249–6254.
- [3] K. Ozaki, Y. Okamoto, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, ITI canceler for reading shingle-recorded tracks, *Physics Procedia* 16 (2011) 83–87, special Issue on the 9th Perpendicular Magnetic Recording Conference.
- [4] Y. Okamoto, K. Ozaki, M. Yamashita, Y. Nakamura, H. Osawa, H. Muraoka, Performance evaluation of ITI canceler using granular medium model, *IEEE Transactions on Magnetics* 47 (10) (2011) 3570–3573.
- [5] B. Fan, H. K. Thapar, P. H. Siegel, Multitread multitrack detection with reduced-state sequence estimation, *IEEE Transactions on Magnetics* 51 (11) (2015) 1–4.
- [6] A. Arrayangkool, C. Warisarn, P. Kovintavevat, A recorded-bit patterning scheme with accumulated weight decision for bit-patterned media recording, *IEICE Transactions on Electronics E96-C* (12) (2013) 1490–1496.
- [7] P. Kovintavevat, A. Arrayangkool, C. Warisarn, A rate-8/9 2-D modulation code for bit-patterned media recording, *IEEE Transactions on Magnetics* 50 (11) (2014) 1–4.
- [8] K. Pituso, C. Warisarn, D. Tongsonporn, P. Kovintavevat, An intertrack interference subtraction scheme for a rate-4/5 modulation code for two-dimensional magnetic recording, *IEEE Magnetics Letters* 7 (2016) 1–5.
- [9] H. Muraoka, S. J. Greaves, Two-track reading with a wide-track reader for shingled track recording, *IEEE Transactions on Magnetics* 51 (11) (2015) 1–4.
- [10] C. Buajong, C. Warisarn, Multitrack reading scheme with single reader in BPMR systems, in: 2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON), 2017, pp. 457–460.
- [11] M. Z. Ahmed, P. J. Davey, Y. Kurihara, Constructive inter-track interference (CTI) codes for perpendicular magnetic recording, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 287 (2005) 432–436.
- [12] Y. Kurihara, Y. Takeda, Y. Takaishi, Y. Koizumi, H. Osawa, M. Ahmed, Y. Okamoto, Constructive ITI-coded PRML system based on a two-track model for perpendicular magnetic recording, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (22) (2008) 3140–3143.
- [13] X. Shao, L. Alink, J. P. J. Groenland, L. Abelmann, C. H. Stump, A simple two-dimensional coding scheme for bit-patterned media, *IEEE Transactions on Magnetics* 47 (10) (2011) 2559–2562.
- [14] A. Arrayangkool, C. Warisarn, A two-dimensional coding design for staggered islands bit-patterned media recording, *Journal of Applied Physics* 117 (17) (2015) 17A904.
- [15] C. Warisarn, A. Arrayangkool, P. Kovintavevat, An ITI-mitigation 5/6 modulation code for bit-patterned media recording, *IEICE Transactions on Electronics E98-C* (6) (2015) 528–533.
- [16] E. Deza, M. Marie, *Encyclopedia of distances*, Springer (March 2009).
- [17] M. Yamashita, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Miura, H. Muraoka, Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording, *IEEE Transactions on Magnetics* 47 (10) (2011) 3558–3561.
- [18] C. Buajong, C. Warisarn, A simple inter-track interference subtraction technique in bit-patterned media recording (BPMR) systems, *IEICE Transactions on Electronics E101-C* (5) (2018) 404–408.
- [19] J. Moen, W. Zeng, Equalization for maximum likelihood detectors, *IEEE Transactions on Magnetics* 31 (2) (1995) 1083–1088.



รศ. ดร. ชานนท์ วรสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล: รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ประวัติการศึกษา

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

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

International Journal Publications

1. W. Tipcharoen, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Effects of Island Shape and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
2. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsoomporn, "A Spin Stand Study of Head-to-Media Spacing Sensitivity for Shingled Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
3. K. Pituso, C. Warisarn, D. Tongsoomporn, and P. Kovintavewat, "An ITI Subtraction Scheme of a Rate-4/5 Modulation Code for Two Dimensional Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
4. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsoomporn, "An experiment study of head-to-media spacing sensitivity in ultra-high density magnetic recording systems," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.

รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. V. Pomsanam, C. Warisarn, A. Siritaratiwat, C. Surawanitkun, "Structural size effect with altered temperature on MgO-based magnetic tunnel junction device during current flow," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.
6. W. Tipcharoen, C. Warisarn¹, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," JJAP ISI-Impact 1.27, accepted.
7. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding Approach of 2D Modulation Codes in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Electronic Trans. IEICE 2015, Published, ISI-Impact 0.34.
8. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative TMR Mitigation Method Based on Readback Signal for Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn., Published, ISI-Impact 1.83.
9. Lin M. M. Myint, and C. Warisarn, "Equalizer Design for Bit-Patterned Media Recording System Based on ISI and ITI Estimations by Cross Correlation Functions" in AMM Journal, Published. Q3 SJR.
10. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording", in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
11. C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
12. A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Two-Dimensional Coding Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.
13. P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" IEEE Trans. Magn., ISI-Impact 1.83.
14. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System" in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.

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

International conference publications

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

6. S. Chandrasekaran, P. Supnithi, and C. Warisarn, "Spinning Disk Test Study in Determining the Optimum Writers and Shingled Track Pitch for Shingled Magnetic Recording," in Proceeding InterMag-CON 2015, Beijing, China.
7. C. Kanjanakunchorn and C. Warisarn, "Soft-Output Decoding Approach of a Rate-4/5 CITI Code in Magnetic Recording Systems," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
8. W. Busyatras, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple TMR Mitigation Approach for Bit Patterned Media Recording Based on Readback Signals," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
9. C. Boonlom, A. Arrayangkool, C. Warisarn, "A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMP Channel with SRBP Method," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
10. Lin Min Min Myint, Chanon Warisarn, Wiparat Busyatras, and Piya Kovintavewat, "Single-Track Equalization Method with TMR Correction System based on Cross Correlation Functions for Patterned Media Recording System" in Proceeding ICAPMA 2015, Pattaya, Thailand.
11. P. Ketwong, A. Arrayangkool, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple Crossover-based Coding Technique for ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording," in Proc. ITC-CSCC 2014, Siem Reap, Cambodia, Dec. 9-12, 2014
12. Lin M. M. Myint and C. Warisarn, "Estimate ITI information using Cross Correlation Functions in Equalizer Designing Process for BPM Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
13. N. Bumrungrat, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Magnetized Grain Modeling Method Based on the Image of Real Magnetic Grains for Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
14. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A 2D-Interference Mitigation with a Multitrack Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
15. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple A Simple Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand, May. 15-17 2013.

16. S. Koonkarnkhai, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Iterative Decoding for Bit-Patterned Media Recording Channels with Insertion/Deletion Errors," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.
17. P. Kovintavewat, C. Warisarn, and C. Tantibundhit, "Performance of Interpolated Timing Recovery in Perpendicular Magnetic Recording Channel," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.
18. T. Losuwan, C. Warisarn, L. M. Myint, and P. Supnithi, "A Study of Iterative Detection Method for Four-Grain Based Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. of APMRC 2012, Singapore, Oct 31- Nov 2, 2012
19. Losuwan T., Warisarn C., and Kovintavewat P. "A Study of 2D detection for Two-Dimensional Magnetic Recording" in Proc. of ITC-CSCC 2012, Sapporo, Japan, Jul. 15-18 2012.
20. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" ECTI-CIT Trans., Nov. 2012.
21. Warisarn C., Supnithi P. "A Novel IIR Equalizer Design for Perpendicular Recording Systems with Media Jitter Noise." KKU Res. J., 17(3), Jun. 2012. pp. 339-348.
22. M. Lin, P. Supnithi, C. Warisarn, and N. Puttarak, "Off-track detection in magnetic recording based on the readback signals," in Proc. INTERMAG 2012, Vancouver, Canada, May 7 - 11, 2012.
23. Warisarn, P. Kovintavewat, and P. Supnithi, "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System," in Proc. of ISPACS 2011, Chiangmai, Thailand, Dec 7 - 9, 2011.
24. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System" in Proc. of ISPACS 2011, Chaingmai, Thailand, Dec. 2011.
25. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery in Perpendicular Magnetic Recording." in Proc. of PMRC 2010, Sendai, Japan, Oct. 2010.

26. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. “Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery for Coded Partial Response Channels.” in Proc. of ICT2010, Bangkok, Thailand, Aug. 2010.

27. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. “Iterative Timing Recovery with the Split-Preamble Strategy for Magnetic Recording Channels.” IEEE MMM-Intermag Conference (INTERMAG2010), Washington DC, USA, Jan. 2010. pp. GH-09.



รศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | สัญญาเลขที่: 2562-02-62-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้