



รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาและพัฒนาการประมาณค่าการอ่านนอกแทร็กบนพื้นฐานสัญญาณ
อ่านกลับในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

A Study and Development in Estimating
the Track Mis-Registration Based on Readback Signal
in Bit Patterned Recording Systems

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

๕๕๒๑๑

๒๕๕๘

12๗๐๗๑๙๓

เลขทะเบียน 138162

เลขหมู่

วันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รับเดือนปี 18.0.0.๗ 2558

ทุกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาและพัฒนาการประมาณค่าการอ่านนอกแทริกบนพื้นฐานสัญญาณอ่านกลับ
ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

แหล่งเงิน : งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 85,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

..... หัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชานนท์ วิจารณ์ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

..... ผู้ร่วมโครงการ: นางสาววิภารัตน์ บุชยาตรี

บทคัดย่อ

..... การอ่านข้อมูลนอกแทริกเป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบความหนาแน่นสูงยิ่ง เช่น ระบบการบันทึกข้อมูลแบบจัดรูปแบบบิต (bit-patterned media recording, BPMPR). ซึ่งการอ่านข้อมูลนอกแทริกเกิดจากการที่หัวอ่านไม่สามารถอ่านข้อมูลตรงกลางแทริกของแทริกที่ต้องการอ่านข้อมูลได้ ดังนั้นจึงก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบการบันทึกข้อมูลได้

..... ถึงแม้ว่าการอ่านข้อมูลนอกแทริกจะสามารถจัดการได้ด้วยระบบเซอร์โว (Servo) แต่ก็ต้องเสียพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้เป็นข้อมูลการตรวจจับ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ในโครงการวิจัยนี้เราได้เสนอวิธีการใหม่ในการบรรเทาผลกระทบของการอ่านข้อมูลนอกแทริก โดยอาศัยข้อมูลจากสัญญาณอ่านกลับเท่านั้น ก่อนที่กระบวนการในการออกแบบทาร์เก็ตและอิควอไลเซอร์ที่เหมาะสมจะถูกออกแบบตามที่ได้การอ่านกลับนอกแทริกที่ประมาณได้

..... ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าวิธีการที่เราได้นำเสนอสามารถประมาณค่าการอ่านนอกแทริกได้เป็นอย่างดี และสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้งานแบบทั่วไปที่ไม่มี การประมาณค่าการอ่านข้อมูลนอกแทริก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบการบันทึกข้อมูลมีความหนาแน่นสูงและในสถานะการณ์ที่ระบบต้องเผชิญกับการอ่านข้อมูลนอกแทริกที่รุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น, วิธีการประมาณค่า, อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน, การอ่านข้อมูลนอกแตรีก, การปรับเท่าแบบสองมิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: A Study and Development in Estimating the Track Mis-Registration Based on Readback Signal in Bit Patterned Recording Systems.....

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

Faculty: College of Data Storage Innovation Department:.....

ABSTRACT

.....Track mis-registration (TMR) is one of the major problems in high-density magnetic recording systems such as bit-patterned media recording (BPMR). In general, TMR results from the misalignment between the center of the read head and that of the main track, which can deteriorate the system performance.....

.....Although TMR can be handled by a servo system, this paper proposes a novel method to alleviate the TMR effect based on the readback signal. Specifically, the readback signal is directly used to estimate a TMR level and is then further processed by the suitable target and equalizer designed for such a TMR level.....

.....Simulation results indicate that the proposed method can sufficiently estimate the TMR level and then helps improve the system performance if compared to the conventional receiver that does not employ a TMR mitigation method, especially when an areal density is high and/or a TMR level is large.....

Keywords: Bit-patterned media recording, estimation method, signal-to-noise ratio, track mis-registration, two-dimensional equalization.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนภายใต้ทุนโครงการวิจัยเงินรายได้ รหัสทุน 2558-02-10-001 จาก
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(.....)

(ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร)

กรกฎาคม 2558



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	VI
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย.....	4
บทที่ 3 วิธีการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูล.....	14
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	22
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	27
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	28
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	30
ภาคผนวก-ก- (เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์).....	31
ภาคผนวก-ข- (ประวัตินักวิจัย).....	40

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของสื่อบันทึกข้อมูลของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย.....	5
2.2 โครงสร้างของหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็ก.....	6
2.3 ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของกลุ่มแม่เหล็กขนาด $a = 1$ นาโนเมตร, $\xi = 10$ นาโนเมตร และ $d = 10$ นาโนเมตร	7
3.1 แสดงการเกิด TMR ของระบบ BPMP 13.....	5
3.2 แผนภาพแสดงการประมาณค่าของ TMR (%) และระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย.....	16
3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ SNR กับค่าเฉลี่ยของค่าแอมพลิจูดสองสุด ของสัญญาณอ่านกลับจำนวน 100 ตัวอย่างข้อมูล.....	17
3.4: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ TMR (%) กับค่าเฉลี่ยพลังงานของสัญญาณอ่านกลับในแต่ละระดับ SNR	19
4.1: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของ SNR และเปอร์เซ็นต์ของการประมาณค่า TMR ของวิธีที่นำเสนอที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว.....	23
4.2: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบสมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR	24
4.3: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบไม่สมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR.....	24
4.4: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบสมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR.....	25
4.5: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบไม่สมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR	25

บทที่ 1

บทนำ

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

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป้าหมายคือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ของข้อมูลให้มากขึ้น ดังนั้น ขนาดเกรนแม่เหล็ก (Magnetic grain) ของสื่อบันทึก (Media) จะถูกลดขนาดลงเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางกายภาพของสสารแม่เหล็กเมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงจนถึงจุดหนึ่ง เกรนแม่เหล็กจะสูญเสียความสามารถในการเก็บข้อมูลและไม่สามารถคงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเช่นเดิมอยู่ได้ซึ่งสถานะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “Super paramagnetic” เป็นสถานะที่ความร้อนจากภายนอกสามารถที่จะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กได้ กล่าวคือ ความร้อนสามารถทำให้ข้อมูลที่บันทึกไว้สูญหาย ในบทความ [1] ได้เสนอว่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกจำกัดสูงสุดอยู่ที่ 1 Tb/in^2 ก่อนที่เกรนแม่เหล็กจะเปลี่ยนคุณสมบัติไปเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาค้นคว้ารูปแบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กรูปแบบใหม่ๆ เพื่อข้ามพ้นข้อจำกัดนี้ ปัจจุบันวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กรูปแบบใหม่ได้ถูกวิจัยและนำเสนอในหลายวิธี เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าช่วย (Heat assisted magnetic recording, HAMR) [2], การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต (Bit pattern media magnetic recording, BPMR) [3] เป็นต้น

การอ่านนอกแตรีก (TMR) เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง อาทิเช่นระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR) ซึ่งปัญหาการอ่านนอกแตรีกจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในขณะที่หัวอ่านเคลื่อนที่เพื่ออ่านข้อมูลจากแผ่นสื่อบันทึกที่มีการหมุนตลอดเวลาหัวอ่านต้องอ่านข้อมูลให้ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางแตรีกแต่ในทางปฏิบัติมีความเป็นไปได้ที่หัวอ่านจะอ่านข้อมูลไม่ตรงตำแหน่งศูนย์กลางแตรีกทำให้เกิดปัญหาของการอ่านนอกแตรีกเกิดขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วผลกระทบดังกล่าวสามารถควบคุมและแก้ไขได้โดยระบบเซอร์โว

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เราได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าการอ่านนอกแตรีกที่เกิดขึ้นและใช้การประมาณค่าการอ่านนอกแตรีกนี้เป็นแนวทางในการออกแบบอีควอไลเซอร์เพื่อช่วยในการลดผลกระทบจากการเกิด TMR ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียด้วยวิธีการประมาณค่าของอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) จากความสัมพันธ์ระหว่าง SNR ในแต่ละระดับกับค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ ก่อนจะทำการประมาณค่า TMR จากความสัมพันธ์ระหว่าง TMR ในแต่ละระดับกับค่าพลังงานของสัญญาณอ่านกลับในแต่ละระดับของ SNR ที่ประมาณค่าได้จากขั้นตอนแรก หลังจากที่เรทำการประมาณค่า TMR ที่เกิดขึ้นได้แล้วนั้นเราจะเลือกใช้อีควอไลซ์เซอร์ที่เหมาะสมกับระดับ TMR ที่ประมาณค่าได้จากวิธีการข้างต้นโดยที่เราได้ทำการออกแบบอีควอไลซ์เซอร์ไว้รอเพื่อเลือกใช้กับระดับ TMR ที่เกิดขึ้นซึ่งการออกแบบอีควอไลซ์เซอร์ถูกออกแบบโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของอีควอไลเซอร์ด้วยทาร์เก็ตแบบ GPR ซึ่งเป็นทาร์เก็ตเฉพาะ (fixed target) สำหรับเมตริกซ์ช่องสัญญาณ (channel matrix) ขนาดของระบบการบันทึกแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (BPMR) ที่เหมาะสมกับ TMR ในแต่ละระดับ (5%,10%,15%,20% และ 25%)จากนั้นเราทำการประมาณค่าบิตบันทึกด้วยวงจรตรวจหาวิเทอร์บีเพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างการออกแบบอีควอไลซ์เซอร์ด้วยวิธีแบบปกติและอีควอไลซ์เซอร์ที่ถูกออกแบบจากสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจาก TMR

จากผลการทดลองการประมาณค่า TMR ในเบื้องต้นจากการทดสอบข้อมูล 100 ตัวอย่างที่ระดับ SNR 20 ถึง 25 dB สามารถให้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของในแต่ละระดับ (5,10,15,20 และ 25%) ได้ค่าประมาณที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80% ถึง 99% ซึ่งผลของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประมาณค่า TMR ได้ อย่างมีนัยสำคัญในระดับ TMR ที่สูงและเมื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วยการเลือกใช้อีควอไลซ์เซอร์ที่ ออกแบบสำหรับ TMR ที่เกิดขึ้นแต่ละระดับและประมาณค่าบิตบ้นที่กด้วยวงจรถรจหาหวิเทอร์บิพบวที่ระดับ TMR 20% ถึง 25% สามารถให้ค่าประสิทธิภาพของระบบได้ดีกว่าอีควอไลซ์เซอร์ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีปกติ ประมาณ 0.5 ถึง 1 เดซิเบล (dB) ที่ค่าอัตราบิตผิดพลาด 10^{-4}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

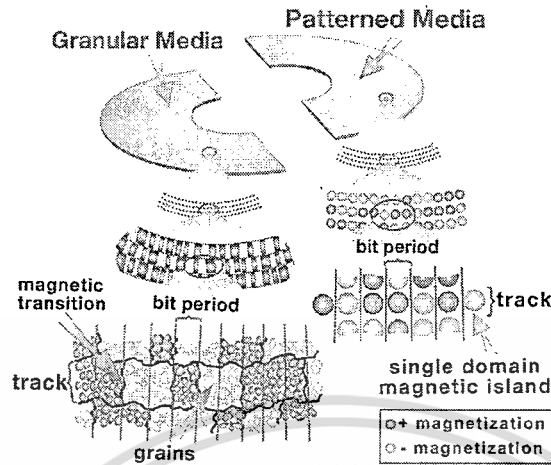
แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูล เชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียบันทึก (Bit-patterned media recording: BPMR), แบบจำลองช่องสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง และกล่าวถึงกระบวนการอ่านและเขียนข้อมูล เพื่อให้เข้าใจในภาพรวมของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กมากยิ่งขึ้น

2.1 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (bit-patterned media recording: BPMR)

ในปัจจุบันการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก (magnetic recording) มีความต้องการในการเพิ่มปริมาณความจุให้มากขึ้นและหลีกเลี่ยงผลกระทบของข้อจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก [4] ที่เป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) ผู้พัฒนาจึงได้พยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มความจุสำหรับการจัดเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ให้เพิ่มความจุได้มากกว่า 1 เทราบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in^2) เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย หรือการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบของสื่อบันทึก (bit-patterned media recording: BPMR) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีจุดประสงค์ในการเพิ่มความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 โครงสร้างของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียมีการจัดสรรพื้นที่สำหรับเก็บบิตข้อมูล (bit area) ที่มีรูปแบบเป็นเกาะแม่เหล็ก (magnetic island) ที่มีรูปทรง, ขนาดและตำแหน่งที่ค่อนข้างแน่นอนโดยมีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nanometer) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



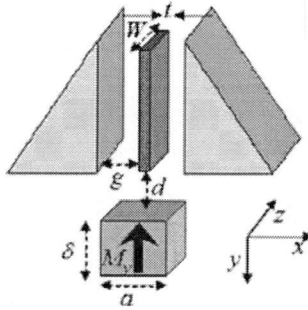
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสื่อบันทึกข้อมูลของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย [5]

ในกระบวนการอ่านข้อมูล หัวอ่านจะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งหัวอ่านจะให้แรงดันไฟฟ้า คือ $V = -N \frac{d\phi}{dt}$ โดยที่ N คือ จำนวนขดลวด และ ϕ คือ ฟลักซ์สัญญาณ

ในแบบจำลองผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติที่ใช้หัวอ่านแบบ MR (magneto-resistive) แรงดันไฟฟ้าอ่านกลับจะเป็นสัดส่วนกับฟลักซ์สัญญาณ ณ บริเวณพื้นผิวของ ABS (air-bearing surface) จึงสามารถเขียนสมการที่ 2.1 ได้ดังนี้ [6]

$$V_{MR}(x, y) = C\phi(x, z) \quad (2.1)$$

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อ V_{MR} คือ แรงดันไฟฟ้าอ่านกลับ, C คือ ค่าคงที่, ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก และ a คือ ความยาวของเกาะแม่เหล็ก, δ คือ ความสูงของเกาะแม่เหล็ก, d คือ ระยะการบินของหัวอ่าน, g คือ ความกว้างของช่องว่างระหว่างฉนวนและชั้นส่วนของหัวอ่าน MR, t คือ ความหนาของชั้นส่วนหัวอ่าน MR และ W คือ ความกว้างของชั้นส่วนหัวอ่าน MR



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็ก [6]

หลักการตอบสนองฟลักซ์แม่เหล็กสามารถถูกเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathcal{O}(x, y) = \mu_0 \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_d^{d+\delta} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{H_y(x', y', z')}{i} M_y(x'-x, y', z'-z) dx' dy' dz' \quad (2.2)$$

เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมผ่านได้ของช่องว่างอิสระ (free space), i คือ กระแสในขดลวดจินตภาพ, H_y คือ สนามแม่เหล็กหัวอ่านที่เกิดจากขดลวดจินตภาพ, $M_y(x, y, z)$ คือ สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก (media magnetization), y คือ ทิศทางในแนวตั้งฉากกับสื่อบันทึก ดังนั้นสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบแนวตั้ง การปรีพันธ์ของผลตอบสนองสามารถแสดงได้ในรูปศักย์สนามแม่เหล็ก (ψ) คือ

$$\mathcal{O}(x, y) = \frac{\mu_0}{i} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_d^{d+\delta} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\partial \psi(x', y', z')}{\partial y'} M_y(x'-x, y', z'-z) dx' dy' dz' \quad (2.3)$$

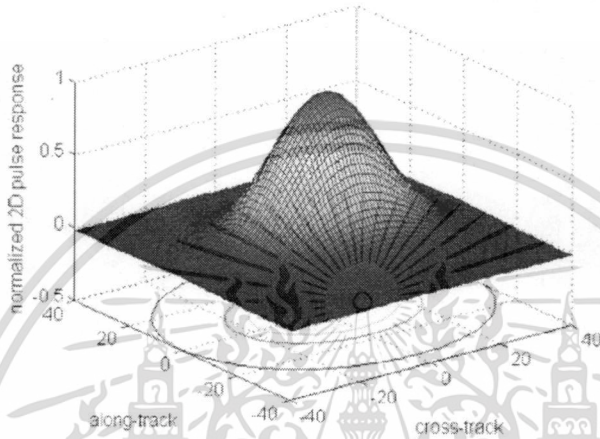
$$\text{หรือ } \mathcal{O}(x, y) = \frac{\mu_0}{i} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_d^{d+\delta} \int_{-\alpha}^{\alpha} \psi(x', y', z') \left[\frac{\partial M_y(x', y', z')}{\partial y'} \right] dx' dy' dz' \quad (2.4)$$

โดยเพื่อความง่ายจึงกำหนดให้หัวอ่านเลื่อนที่แบบไม่มีการสั่นทำให้ระยะการบินในแนวตั้งหรือแนวแกน y นั้นคงที่ เมื่อทราบว่าสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบแนวตั้ง มีค่าเท่ากับค่าคงตัว M เฉพาะบริเวณที่เป็นกลุ่มแม่เหล็ก ดังนั้นสมการที่ 2.4 เขียนได้ดังนี้

$$V(x, z) = C \int_{x-\alpha/2}^{x+\alpha/2} \int_{- \alpha/2}^{+ \alpha/2} M(x'-x, y', z'-z) \{ \psi(x', d, z') - \psi(x', d+2\delta, z') \} dx' dz' \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $M(x, y, z) = \begin{cases} M(\text{media magnetization}), & x, z \in \text{island} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ และ C คือ ค่าคงที่ จากสมการสามารถซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้หาค่าสัญญาณอ่านกลับในระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กนั่นเอง โดยที่ ψ หาค่าได้จากการสร้างผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติสำหรับรูปทรงของหัวอ่านและกลุ่มแม่เหล็กได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของกลุ่มแม่เหล็กขนาด $a=11$ นาโนเมตร, $\delta=10$ นาโนเมตร และ $d=10$ นาโนเมตร [6]

แบบจำลองผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียสามารถประมาณค่าสัญญาณพัลส์ให้เป็นเกาส์เซียนแบบสองมิติ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P(x, z) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{W_x^2} + \frac{z^2}{W_z^2} \right] \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อ $P(x, z)$ คือ ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ, A คือ แอมพลิจูด (amplitude) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1, x คือ ระยะห่างในแนวตามแทร็ก (along track), z คือ ระยะห่างในแนวขวางแทร็ก (across track), W_x คือ ค่า $PW50_x$ (ความกว้างของพัลส์ที่แอมพลิจูด 50%) ของสัญญาณพัลส์ในแนวตามแทร็ก, W_z คือ $PW50_z$ ของสัญญาณพัลส์ในแนวขวางแทร็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_x = \frac{\text{along-track}PW50}{2.3548} \quad (2.7)$$

$$W_z = \frac{\text{across-track}PW50}{2.3548} \quad (2.8)$$

สัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) เกิดขึ้นได้จากความไม่แน่นอนของสภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึก หรือเกิดจากการผันผวนของเกาะแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบช่องสัญญาณมากที่สุดและมีผลให้สมรรถนะของระบบลดลง โดยระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียสามารถจะเกิดสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกได้จาก 5 สาเหตุ [6] ดังต่อไปนี้ ความผันผวนของตำแหน่ง (position fluctuation) ความผันผวนของขนาด (size fluctuation) ความผันผวนของความหนา (thickness fluctuation) ความผันผวนของรูปร่าง (shape fluctuation) และการแมกนีไทเซชัน (magnetization) อย่างไรก็ตามในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียจะพบสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกที่เป็นความผันผวนของตำแหน่ง และความผันผวนของขนาดมากที่สุด [6]

สัญญาณรบกวนสื่อบันทึกในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่เกิดจากความผันผวนของตำแหน่ง สามารถเขียนได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P(x, z) = (A + \Delta_a) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + \Delta_x}{c(W_x + \Delta_{W_x})} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_z}{c(W_z + \Delta_{W_z})} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

เมื่อ $P(x, z)$ เป็นผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ A คือแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1, x คือ ระยะห่างในแนวตามแตรีก, z คือ ระยะห่างในแนวขวางแตรีก, Δ_x คือ ความผันผวนของตำแหน่งตามแนวแตรีก, Δ_z คือ ความผันผวนของตำแหน่งตามแนวขวางแตรีก, W_x คือ ค่า PW_{50} หรือความกว้างพัลส์ที่แอมพลิจูดครึ่งหนึ่งในแนวตามแตรีก, W_z คือ ค่า PW_{50} หรือความกว้างพัลส์ที่แอมพลิจูดครึ่งหนึ่งในแนวขวางแตรีก, Δ_a คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด, Δ_{W_x} คือ ความผันผวนของ PW_{50} ในแนวตามแตรีก และ Δ_{W_z} คือ ความผันผวนของ PW_{50} ในแนวขวางแตรีก และค่าคงที่ $c = 1/2.3548$ คือ ค่าคงที่จากความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถจำลองช่องสัญญาณอ่านกลับสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น มีเดียได้ โดยสัญญาณอ่านกลับจากบิตข้อมูลหลักที่เราสนใจ เป็นหาผลรวมของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบเชิงเส้นของกลุ่มแม่เหล็กในแนวตามแตรีก และสองจากแตรีกข้างเคียง ที่มีความสัมพันธ์กับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้จากหัวอ่าน ระยะในแนวตามแตรีกและในแนวขวางแตรีก ดังนั้นการรวมสัญญาณแตรีกหลักจึงมีผลกระทบจากสัญญาณการแทรกสอดระหว่างแตรีก เราสามารถนำเสนอแบบจำลองสัญญาณอ่านกลับของช่องสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time) จากการแปลงสมการที่ 2.5 ให้เป็นแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$r_{l,k} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N h_{m,n} x_{l-m,k-n} + n_{l,k} = x_{l,k} \otimes h_{l,k} + n_{l,k} \quad (2.10)$$

โดยเรากำหนดค่าอินพุตในช่องสัญญาณ $x_{l,k}$ มีจำนวนบิตข้อมูล M บิต และจำนวนแตรีก N แตรีก เมื่อ $h_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ, m และ n คือ ดัชนีของจำนวนบิตกลุ่มแม่เหล็กในแนวตามแตรีก และในแนวขวางแตรีกตามลำดับ, $n_{l,k}$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก โดยสามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio: SNR) ซึ่งถูกนิยามโดย $SNR = 20 \log_{10}(1/\sigma)$ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibel: dB) เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาว นอกจากนี้สมการที่ 2.10 ยังสามารถเขียนแบบคอนโวลูชันสองมิติ (2D convolution : \otimes) ได้อีกด้วย

เราสามารถประมาณค่าของช่องสัญญาณอ่านกลับที่มีผลตอบสนองแบบเมทริกซ์ขนาด 3×3 ได้ดังสมการนี้

$$H = \begin{bmatrix} h_{j-1,k-1} & h_{j,k-1} & h_{j+1,k-1} \\ h_{j-1,k} & h_{j,k} & h_{j+1,k} \\ h_{j-1,k+1} & h_{j,k+1} & h_{j+1,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & a & \alpha \\ \beta & b & \beta \\ \alpha & a & \alpha \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยที่

$$h_{m,n} = P(-mT_x, -nT_z) \quad m, n \in (-L, 0, L) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ซึ่ง $P(x,z)$ คือ ผลตอบสนองแบบเกาส์เซียนสองมิติ (2D Gaussian pulse response), $2L+1$ คือ ความยาวช่องสัญญาณสองมิติ, T_x และ T_z คือ ความกว้างบิตและความกว้างแทรกตามลำดับ โดยปรกติการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียจะมี T_x เท่ากับ T_z และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลได้จากสมการ

$$AD = \frac{10^6}{1550(T_x T_z)} \text{ Tb/in}^2 \quad (2.13)$$

โดยที่ AD คือ ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลมีหน่วยเป็นเทราบิตต่อตารางนิ้ว โดยที่ 1 ตารางเมตร เท่ากับ 1550 ตารางนิ้ว และ T_x และ T_z มีหน่วยเป็นนาโนเมตร เมื่อ $T_x = T_z = 18 \text{ nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลเป็น 2.0 Tb/in^2 และได้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0213 & 0.2321 & 0.0213 \\ 0.0919 & 1.0000 & 0.0919 \\ 0.0213 & 0.2321 & 0.0213 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมื่อ $T_x = T_z = 16 \text{ nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลเป็น 2.5 Tb/in^2 และได้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0478 & 0.3154 & 0.0478 \\ 0.1517 & 1.0000 & 0.1517 \\ 0.0478 & 0.3154 & 0.0478 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ $T_x = T_z = 14.5 \text{ nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลเป็น 3.0 Tb/in^2 และได้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \\ 0.2125 & 1.0000 & 0.2125 \\ 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นเราสามารถสร้างสัญญาณรบกวนจากความผันผวนของตำแหน่ง (position jitter: Δ_x, Δ_z) ได้โดยฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวน σ_j^2 ที่ซึ่ง σ_j เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของความยาวบิต T_x ในสมการผลตอบแทนแบบเกาส์เซียนสองมิติ $P(x, z)$

รูปต่อไปนี้จะแสดงการนำเสนอสัญญาณอ่านกลับแบบไม่ต่อเนื่องของแต่ละบิตข้อมูลในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีผลตอบแทนขนาด $3 \times N$ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} r_{0,k-1} & \cdots & r_{j-1,k-1} & r_{j,k-1} & r_{j+1,k-1} & \cdots & r_{j-N,k-1} \\ r_{0,k} & \cdots & r_{j-1,k} & r_{j,k} & r_{j+1,k} & \cdots & r_{j-N,k} \\ r_{0,k+1} & \cdots & r_{j-1,k+1} & r_{j,k+1} & r_{j+1,k+1} & \cdots & r_{j-N,k+1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

โดยใช้สมการที่ 2.10 เราสามารถคำนวณหาค่าสัญญาณอ่านกลับของแต่ละตำแหน่งเกาะข้อมูลที่สนใจ $r_{j,k}$ โดยรวมเอาสัญญาณจากบิตรอบข้างทั้งในแนวตามแตรีกและขวางแตรีกจำนวน 8 บิต อันเนื่องมาจากการแทรกสอดสองมิติ (2D interference) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} r_{j,k} = & \left[h_{j-1,k} x_{j-1,k} + h_{j,k} x_{j,k} + h_{j+1,k} x_{j+1,k} \right] \\ & + \left[h_{j-1,k-1} x_{j-1,k-1} + h_{j,k-1} x_{j,k-1} + h_{j+1,k-1} x_{j+1,k-1} \right] \\ & + \left[h_{j-1,k+1} x_{j-1,k+1} + h_{j,k+1} x_{j,k+1} + h_{j+1,k+1} x_{j+1,k+1} \right] + n_{j,k} \end{aligned} \quad (2.18)$$

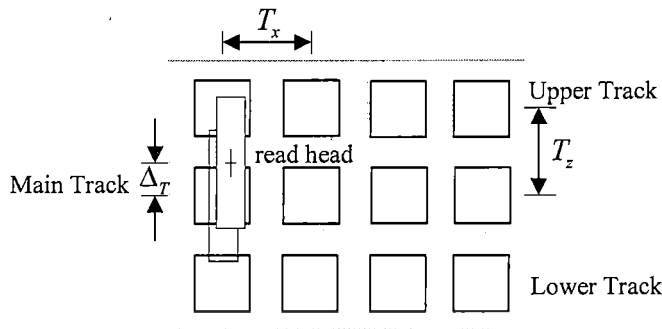
จากสมการที่ 2.14-2.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลสูงขึ้น สัญญาณของบิตรอบข้างจะมีความรุนแรงขึ้นอันเนื่องมาจากการแทรกสอดสองมิติที่รุนแรงขึ้นนั่นเอง

บทที่ 3

การอ่านนอกแตร็กและการประมาณค่า

การอ่านนอกแตร็กหรือการอ่านไม่ตรงตำแหน่งศูนย์กลางแตร็ก (TMR) หมายถึง กรณีที่ตำแหน่งศูนย์กลางของหัวอ่าน (center of head) ทำการอ่านข้อมูลไม่ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางของแตร็ก (center of track) ทำให้สัญญาณที่อ่านได้นั้นผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณจริงที่ควรจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อค่อนข้างมากต่อระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงอย่างเช่นใน BPMPR ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงอย่างชัดเจน [7] โดยสาเหตุของการอ่านผิดตำแหน่งของหัวอ่านเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การเพิ่มความเร็วในการหมุนของแผ่นสื่อบันทึก การเพิ่มขึ้นของการสั่นสะเทือนของแผ่นสื่อบันทึกซึ่งปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนของแผ่นสื่อบันทึกนั้นเกิดจากไหลวนของอากาศเนื่องจากการหมุนของแผ่นสื่อบันทึก [8] นอกจากนั้นแล้วในขณะที่หัวอ่านเคลื่อนที่เพื่ออ่านข้อมูลจากแผ่นสื่อบันทึกที่มีการหมุนด้วยความเร็วสูงตลอดเวลาซึ่งเป็นการยากที่หัวอ่านจะสามารถอ่านข้อมูลให้ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางแตร็กได้โดยในทางปฏิบัติมีความเป็นไปได้ที่หัวอ่านจะอ่านข้อมูลไม่ตรงตำแหน่งศูนย์กลางแตร็กทำให้เกิดปัญหาของการอ่านนอกแตร็กเกิดขึ้น เป็นต้น ในระบบ BPMPR หากมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้มากขึ้นโดยการลดขนาดของไอซ์แลนด์หรือมีการลดระยะห่างระหว่างแตร็กลง ผลกระทบของการแตร็กสอดระหว่างแตร็กที่เกิดจากการเกิด TMR ก็จะมีผลกระทบที่รุนแรงขึ้นเช่นเดียวกันโดยทั่วไปการแก้ปัญหาผลกระทบจากเกิด TMR สามารถทำได้โดยควบคุมและแก้ไขด้วยระบบเซอร์โว [9] ซึ่งจะมีการแฝงการตรวจสอบของระบบเซอร์โวในแต่ละเช็กเตอร์เพื่อช่วยในการควบคุมและชดเชยผลกระทบที่เกิดจาก TMR สำหรับงานวิจัยอื่นๆได้นำเสนอวิธีการตรวจหา TMR จากสัญญาณอ่านกลับโดยสังเกตจากการเกิดผลกระทบที่ไม่เท่ากันของการแตร็กสอดจากแตร็กข้างเคียงที่ส่งผลกระทบต่อแตร็กกลางซึ่งกรณีที่เกิด TMR จะส่งผลให้การแตร็กสอดของแตร็ก ข้างมีลักษณะแบบไม่สมมาตรและสามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TMR ได้โดยการใช้ไอคิวไลซ์แบบ 2 มิติ และวงจรถองหาแบบ 2 มิติ [10], [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1: แสดงการเกิด TMR ของระบบ BPMPR

นอกจากนั้นแล้ว Lin พร้อมคณะ [11] ได้นำเสนอวิธีการตรวจหา TMR โดยใช้การตรวจหาความรุนแรงของ TMR จากความไม่สมมาตรของสัมประสิทธิ์ของอ็ควอไลเซอร์แบบ 2 มิติที่ออกแบบจากสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TMR แผงอยู่ในช่องสัญญาณการแทรกสอด 2 มิติสำหรับระบบการบันทึกแบบบิดแพตเทิร์นมีเดีย พร้อมทั้งได้นำเสนอการสร้างทาร์เก็ต 2 มิติแบบไม่สมมาตรเพื่อความเหมาะสมกับช่องสัญญาณของระบบที่ได้รับผลกระทบจาก TMR อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์การอ่านนอกเทร็กจากค่าสัมประสิทธิ์ของอ็ควอไลเซอร์แบบ 2 มิตินั้นยังคงมีความซับซ้อนในขั้นตอนของการตรวจหา TMR เนื่องจากต้องมีการออกแบบหาสัมประสิทธิ์อ็ควอไลเซอร์และสัมประสิทธิ์ทาร์เก็ตที่เหมาะสมกับระดับความรุนแรงของ TMR ใหม่ทุกครั้ง

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าการอ่านนอกเทร็กบนพื้นฐานสัญญาณอ่านกลับและเลือกใช้อ็ควอไลซ์เซอร์ที่เหมาะสมกับสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจาก TMR ในระบบ BPMPR เพื่อลดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบที่เกิดจาก TMR เพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนของการออกแบบอ็ควอไลซ์เซอร์ใหม่ทุกครั้งที่มีการตรวจหา TMR ที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งลำดับแรกเราทำการประมาณค่าของอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) จากความสัมพันธ์ระหว่าง SNR ในแต่ละระดับกับค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ (peak amplitude of read back signal) จากนั้นเมื่อเราทราบระดับของ SNR ที่เกิดขึ้นแล้วเราจะประมาณค่า TMR จากความสัมพันธ์ระหว่าง TMR ในแต่ละระดับกับค่าพลังงานของสัญญาณอ่านกลับ (energy of read back) เพื่อลดความซับซ้อนในการตรวจหา TMR ซึ่งเราได้มีการประมาณค่า TMR จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว และเมื่อเราทราบค่าประมาณของ TMR จากนั้นเราทำการเลือกอ็ควอไลซ์เซอร์ที่เหมาะสมกับ TMR จากอ็ควอไลซ์เซอร์ที่ถูกออกแบบไว้สำหรับแต่ละ TMR (5%, 10%, 15%, 20% และ 25%) ที่เกิดขึ้นจากนั้นทำการประมาณค่าบิตบันทึกด้วยวงจรตรวจหาวิเทอร์บีเพื่อวัดประสิทธิภาพของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMP

ในงานวิจัยนี้เราจะพิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา 2 มิติ (2D channel model) ของระบบระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย 2 มิติ (2D BPMP) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเราจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณอ่านกลับบนแทร็กกลาง (main track) เท่านั้นซึ่งสัญญาณอ่านกลับสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} r_{l,k} &= \sum_n \sum_m h_{m,n} x_{l-m,k-n} + n_{l,k} \\ &= x_{l,k} \otimes h_{l,k} + n_{l,k} \end{aligned} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) $r_{l,k}$ คือ สัญญาณอ่านกลับในตำแหน่งที่ k (k^{th}) และอยู่บนแทร็กที่ l (l^{th}), เมื่อ $x_{l,k}$ คือ บิตบันทึกที่อยู่บนไอแลนด์, $h_{m,n}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองช่องสัญญาณแบบ 2 มิติ เมื่อ m และ n แทนค่าที่บ่งบอกตำแหน่งของไอแลนด์บิตในทิศทางตามแทร็กและทิศทางขวางแทร็ก, \otimes คือการคอนโวลูชันแบบ 2 มิติ (2D convolution) และ $n_{l,k}$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนแบบขาว (AWGN) และสำหรับในระบบ 2D BPMP ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองช่องสัญญาณ $h_{m,n}$ สามารถสร้างขึ้นได้ด้วยการชักตัวอย่างข้อมูลจากผลตอบสนองสัญญาณพัลส์ของไอแลนด์เชิงเดี่ยวได้ดังสมการต่อไปนี้

$$h_{m,n} = P(mT_x, nT_z + \Delta_T) \quad m, n \in (-L, 0, L), \quad (3.2)$$

เมื่อ $P(mT_x, nT_z + \Delta_T)$ คือผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบ 2 มิติ [11], T_x และ T_z คือคาบเวลาของบิตและระยะแทร็กตามลำดับ, Δ_T คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางหัวอ่านกับตำแหน่งศูนย์กลางแทร็กของไอแลนด์หรือออฟเซต (offset) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสามารถหาผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบ 2 มิติ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P(z, x) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2} \left[\left(\frac{x}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_T}{PW_z} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ c คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $c=1/2.3548$, A คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1, $PW50_x$ คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ครึ่งหนึ่งในแนวตามแตรีกและ $PW50_z$ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ครึ่งหนึ่งในแนวขวางแตรีก, Δ_T คือระยะของการเกิด TMR [9] จากรูปที่ 1 แสดงการเกิดจาก TMR ของระบบ BPMPR ซึ่งระบบเมื่อเกิด TMR หัวอ่านได้เลื่อนออกไปในแนวแตรีกบน (upper track) ทำให้ตำแหน่งศูนย์กลางหัวอ่านทำการอ่านข้อมูลไม่ตรงกับตำแหน่งศูนย์กลางแตรีกซึ่งระยะห่างระหว่างตำแหน่งศูนย์กลางของหัวอ่านกับตำแหน่งศูนย์กลางของแตรีกคือระยะที่เกิด TMR หรือออฟเซต (offset) Δ_T นั่นเอง และในความเป็นจริงการเกิดออฟเซตสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแนวแตรีกบน (upper track) และแนวแตรีกล่าง (lower track) แต่สำหรับในงานวิจัยนี้เราได้พิจารณาเฉพาะการเกิด TMR ในแนวแตรีกบนเท่านั้นและกรณีที่ไม่เกิด TMR ค่าของออฟเซตจะมีค่าเท่ากับ 0 และระดับของ TMR(%) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{TMR}(\%) = \frac{\Delta_T}{T_z} \times 100, \quad (3.4)$$

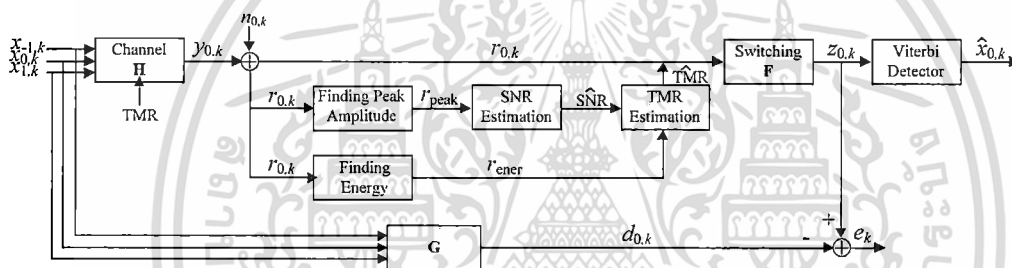
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพการประมาณค่าของ TMR (%) ของช่องสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลาแบบ 2 มิติของระบบ BPMPR จะเห็นได้ว่าเมื่อบิตบันทึก $x_{-1,k}$, $x_{0,k}$, และ $x_{1,k}$ (ตำแหน่งบิตบันทึกที่อยู่บนแตรีกบนแตรีกกลางและ แตรีกล่าง ตามลำดับ) ผ่านช่องสัญญาณจะได้เอาท์พุทซึ่งเป็นสัญญาณอ่านกลับ $y_{0,k}$ (แตรีกกลาง) ที่ได้รับผลกระทบจาก TMR จากนั้นเมื่อ $y_{0,k}$ ได้รับกระทบจากสัญญาณรบกวน AWGN จะได้สัญญาณอ่านกลับ $r_{0,k}$ จากนั้นเราทำการหาค่าแอมพลิจูดสูงสุดของช่องสัญญาณอ่านกลับ, r_{peak} เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการประมาณค่า SNR พร้อมกันนั้นสัญญาณอ่านกลับ $r_{0,k}$ ก็จะถูกนำไปหาค่าพลังงาน r_{encl} เพื่อไปใช้ในขั้นตอนการประมาณค่า TMR ซึ่งขั้นตอนการประมาณค่า TMR จะอาศัยความสัมพันธ์ของระดับ SNR ที่ประมาณค่าได้ (SNR) กับข้อมูล r_{encl} เพื่อให้ได้ค่าประมาณของ TMR (TMR) จากนั้นเมื่อเราทราบค่าประมาณของ TMR แล้วเราจะทำการเลือกใช้อีควอลไลซ์เซอร์ที่เหมาะสมกับ TMR ที่เราประมาณได้โดยที่อีควอลไลซ์เซอร์จะถูกออกแบบไว้รอเพื่อที่จะถูกเลือกใช้กับ TMR ที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับ(5%,10%,15%,20% และ 25%)จากนั้นสัญญาณอ่านกลับถูกปรับโดยอีควอลไลซ์เซอร์ที่เหมาะสมกับ TMR ที่เกิดขึ้นเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจาก TMR ซึ่งอีควอลไลซ์เซอร์ถูกออกแบบโดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ด้วยทาร์เก็ตแบบ GPR ซึ่งเป็นทาร์เก็ตเฉพาะ (fixed target) จากนั้นจะได้สัญญาณอ่านกลับ $z_{0,k}$ และสัญญาณดังกล่าวจะผ่านวงจรตรวจหาวิเทอร์บีและได้ค่าประมาณของบิตบันทึก $\hat{x}_{0,k}$ ในงานวิจัยนี้เรากำหนดให้ SNR มีค่าเท่ากับ $20 \log(V_p / \sigma)$, $V_p = 1$ คือค่าสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับและ σ คือส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบี่ยงเบนมาตรฐานของ AWGN [6] และเราทดสอบด้วยข้อมูลแต่ละเซกเตอร์มีจำนวน 4,096 บิต ซึ่งเราสามารถหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการประมาณค่า TMR ได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy (%)) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Accuracy (\%)} = 100 - \frac{|\hat{\text{TMR}} - \text{TMR}|}{\text{TMR}} \times 100, \quad (3.5)$$

เมื่อ Accuracy (%) คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง, $\hat{\text{TMR}}$ คือค่าของตัวอย่างของข้อมูล TMR ที่ได้จากการประมาณค่า, TMR คือ ค่าของข้อมูล TMR ที่เกิดขึ้นจริง



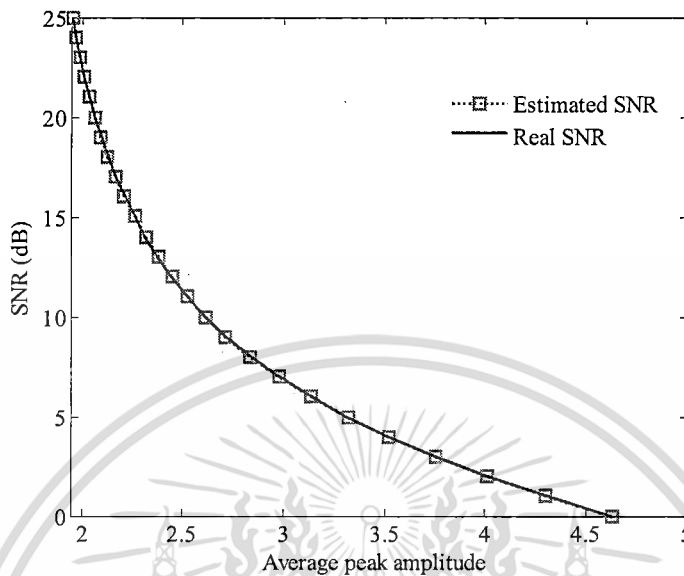
รูปที่ 3.2: แผนภาพแสดงการประมาณค่าของ TMR (%) และระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย

3.2 วิธีการนำเสนอสำหรับการประมาณค่า TMR

3.2.1 การประมาณ SNR:

ในส่วนของการวิเคราะห์การประมาณค่า SNR จากแผนภาพในรูปที่ 3.2 เราสามารถประมาณค่า SNR ได้ดังนี้ เราอาศัยข้อมูลสัญญาณอ่านกลับทั้งหมด 100 สัญญาณในแต่ละระดับ SNR ตั้งแต่ที่ 0 ถึง 25 เดซิเบลพร้อมทั้งกำหนดให้ระดับ TMR เกิดขึ้นในระบบเป็นแบบสุ่มตั้งแต่ระดับ 0% ถึง 25% ก่อนจะนำค่าแอมพลิจูดสูงสุดของแต่ละสัญญาณอ่านกลับมาทำการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับ SNR แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองและใช้กราฟความสัมพันธ์นี้ประมาณค่า SNR โดยการ Fitting curve ด้วยสมการของ Polynomials ดีกรีกำลัง 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ SNR กับค่าเฉลี่ยของค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับจำนวน 100 ตัวอย่างข้อมูล

เมื่อเราได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง SNR ในแต่ละระดับกับกับค่าเฉลี่ยของค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับและทำการ Fitting curve ด้วยสมการของ Polynomials ดีกรีกำลัง 5 แล้วนั้นเราสามารถทำการประมาณค่า SNR ที่เกิดขึ้นกับระบบในแต่ละระดับได้ดังสมการดังนี้

$$\hat{SNR} = a_0 + a_1y + a_2y^2 + \dots + a_Ny^N, \quad (3.6)$$

เมื่อกำหนดให้ \hat{SNR} คือค่าประมาณของ SNR, a_i คือสัมประสิทธิ์ของสมการ Polynomials ตัวที่ i , เมื่อ $i \in \{0, 1, \dots, N\}$, N คือระดับดีกรีของสมการ Polynomials (ในการหา \hat{SNR} เราทดสอบที่ดีกรี 5), y คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ (r_{peak}) ที่ได้จากการอ่านข้อมูลในแต่ละครั้งจากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อเราทราบค่าของ r_{peak} เราสามารถแทนค่า r_{peak} ลงในสมการที่ (3.6) เพื่อทำการประมาณค่า SNR

3.2.2 การประมาณค่า TMR:

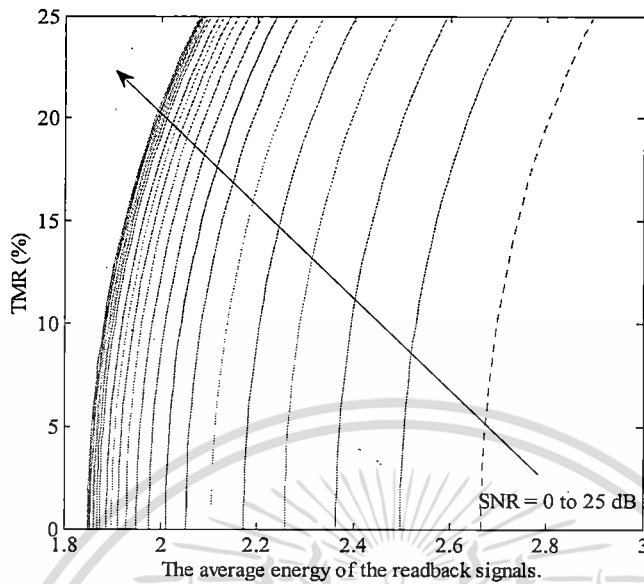
รายละเอียดของการประมาณค่า TMR จากแผนภาพในรูปที่ 2 เราสามารถประมาณค่า TMR ได้ดังนี้ เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่า SNR ที่ 0 dB ก่อนจะนำสัญญาณอ่านกลับ, $r_{0,k}$ มาคำนวณหาค่าพลังงานด้วยวิธีการอัตโนมัติ (auto-correlation) ในทุกๆค่าระดับ TMR ที่ 0% , 5% , 10% , 15% , 20% และ 25% ตามลำดับ ซึ่งเราจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับ TMR(%) กับค่าพลังงานของสัญญาณอ่านกลับที่ SNR เท่ากับ 0 dB ดังแสดงในรูปที่ 4 (เส้นประ) จากนั้นทำการ Fitting curve ด้วยสมการของ Polynomials ดีกรีกำลัง 5 เพื่อใช้เป็นสมการการประมาณค่า TMR ในระดับ SNR เท่ากับ 0 dB ต่อไป ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนขั้นต้นแต่เปลี่ยนระดับ SNR เป็น 1 ถึง 25 dB พร้อมกับการทำ Fitting curve ของเส้นกราฟเพื่อให้ได้สมการการประมาณค่า TMR ในแต่ละระดับ SNR ครบทั้งหมด 26 สมการหรือ 26 เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นเมื่อเราทราบค่า SNR จากขั้นตอนการประมาณค่า SNR แล้วเราก็สามารถนำสมการการประมาณค่า TMR ที่ระดับ SNR นั้นๆมาคำนวณหาค่าประมาณของ TMR ที่เกิดขึ้นกับระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

$$TMR = b_0 + b_1u + b_2u^2 + \dots + b_Fu^F, \quad (3.7)$$

เมื่อกำหนดให้ TMR คือค่าประมาณของ TMR, b_i คือสัมประสิทธิ์ของสมการ Polynomials ตัวที่ i , เมื่อ $i \in \{0, 1, \dots, F\}$, F คือ ระดับดีกรีของสมการ Polynomials (ในการหา TMR เราทดสอบที่ ดีกรี 5), u คือค่าพลังงานของสัญญาณอ่านกลับ (r_{ener}) ที่ได้จากการอ่านข้อมูลในแต่ละครั้ง r_{ener} คือ ค่าพลังงานของสัญญาณอ่านกลับที่เราต้องการหาค่า TMR ที่แฝงอยู่ซึ่งค่าพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$r_{ener} = \sum_{k=1}^n r_{0,k}^2, \quad (3.8)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อเราทราบค่าของ r_{ener} เราสามารถแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (3.7) เพื่อทำการหาค่า TMR ได้



รูปที่ 3.4: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับ TMR (%) กับค่าเฉลี่ยพลังงานของสัญญาณอ่านกลับ
ในแต่ละระดับ SNR

3.3 การออกแบบอีควอไลเซอร์

การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ของอีควอไลเซอร์ใช้วิธีข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยสุด (MMSE) อันดับแรกเรากำหนดข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_{l,k}^2\} &= E\{(z_{l,k} - d_{l,k})^2\} \\ &= E\{[(r_{l,k} \otimes f_{l,k}) - (x_{l,k} \otimes g_{l,k})]^2\}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

ที่ตำแหน่ง $E\{\cdot\}$ คือ ค่าคาดหวัง (expectation) และ $\varepsilon_{l,k}$ คือค่าสัญญาณผิดพลาด และสำหรับรูปที่ 2 สัญญาณผิดพลาด e_k คือความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของอีควอไลเซอร์ $z_{0,k}$ กับสัญญาณที่ต้องการ $d_{0,k}$ ดังนั้นจากสมการที่ 3.9 สามารถคำนวณได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$E\{e_k^2\} = E\{(z_{0,k} - d_{0,k})^2\}, \quad (3.10)$$

เมื่อ ลำดับ $z_{0,k}$ และ $d_{0,k}$ คือลำดับข้อมูลจากแตรีกกลางที่ $l=0$ ในสมการที่ 3.9 และหลังจากแปลงค่าของสมการที่ 3.9 ทางด้านขวามือจะสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = f_{l,k} \otimes R_{l,k}^r \otimes f_{l,k} - 2f_{l,k} \otimes R_{l,k}^{r,x} \otimes g_{l,k} + g_{l,k} \otimes R_{l,k}^x \otimes g_{l,k}, \quad (3.11)$$

เมื่อ $R_{l,k}^r = E\{r_{i,j}r_{i-l,j-k}\}$ และ $R_{l,k}^x = E\{x_{i,j}x_{i-l,j-k}\}$ คือ เมตริกซ์อัตโนมัติสัมพันธ์ (auto-correlations) ของสัญญาณอ่านกลับและเมตริกซ์อัตโนมัติสัมพันธ์ (auto-correlations) ของบิตบันทึกจากทั้งสามแตรีกตามลำดับ, $R_{l,k}^{r,x} = E\{r_{i,j}x_{i-l,j-k}\}$ คือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ข้าม (cross-correlation) ระหว่างสัญญาณอ่านกลับและบิตบันทึก และวิธีการคำนวณค่าของข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) คำนวณได้ดังสมการที่ 3.11 และกำหนดให้ \mathbf{F} เมตริกซ์มีขนาดเท่ากับ $3 \times (2N+1)$ และ \mathbf{G} เมตริกซ์มีขนาดเท่ากับ 3×3 ดังสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{-1} \\ \mathbf{f}_0 \\ \mathbf{f}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{-1,-N} & \dots & f_{-1,0} & f_{-1,N} \\ f_{0,-N} & \dots & f_{0,0} & f_{0,N} \\ f_{1,-N} & \dots & f_{1,0} & f_{1,N} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{-1} \\ \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

จากนั้นเมตริกซ์ที่ถูกปรับปรุงขึ้นมาใหม่กลายเป็นเวกเตอร์คอลัมน์ในรูปของ $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_{-1} \ \mathbf{f}_0 \ \mathbf{f}_1]^T$ และ $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_{-1} \ \mathbf{g}_0 \ \mathbf{g}_1]^T$ และส่วนประกอบของเวกเตอร์ได้กำหนดไว้ดังสมการที่ 3.12 และเมื่อใช้เวกเตอร์เหล่านี้ในวิธีการคำนวณค่าของข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ในสมการที่ 3.11 สามารถนิยามสมการได้ใหม่ดังต่อไปนี้

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = \mathbf{f}^T \mathbf{R}_r \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{R}_x \mathbf{g}, \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\mathbf{R}_r = [\mathbf{r}_k \mathbf{r}_k^T]$ คือเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ของ $R'_{r,k}$ ที่มีขนาด $3(2N+1) \times 3(2N+1)$, $\mathbf{R}_{rx} = [\mathbf{r}_k \mathbf{x}_k^T]$ คือเมตริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามของ $R'_{r,k}$ ที่มีขนาด $3(2N+1) \times 9$ และ $\mathbf{R}_x = [\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T]$ คือเมตริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ของ $R'_{r,k}$ ที่มีขนาด 9×9 และในที่นี้สำหรับค่าของเวกเตอร์บิตบันทึก \mathbf{x}_k และเวกเตอร์สัญญาณอ่านกลับ \mathbf{r}_k หาได้จาก $\mathbf{x}_k = [x_{1,k+1} \ x_{1,k} \ \dots \ x_{0,0} \ \dots \ x_{-1,k} \ x_{-1,k-1}]^T$ และ $\mathbf{r}_k = [r_{1,k+N} \ r_{1,k+N-1} \ \dots \ r_{0,0} \ \dots \ r_{-1,k-N+1} \ r_{-1,k-N}]^T$ จาก [10],[12], ที่สามารถให้ผลของค่าข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยสุด ซึ่งการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอีควอลไลเซอร์ในเวกเตอร์คอลัมน์ \mathbf{f} ซึ่งกำหนดให้ทาร์เก็ตเป็นแบบทาร์เก็ตเฉพาะ \mathbf{g} สามารถคำนวณได้ดังจากสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g}, \quad (3.15)$$

จากสมการของการออกแบบอีควอลไลเซอร์เราทำการออกแบบอีควอลไลเซอร์จากสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจาก TMR ในแต่ละระดับ (5%,10%,15%,20% และ 25%) เพื่อปรับใช้กับค่าการประมาณ TMR ที่ประมาณได้จากข้างต้น ตัวอย่างเช่น เมื่อเราประมาณค่าของ TMR ได้ที่ 15% เราจะเลือกใช้อีควอลไลเซอร์ที่ถูกออกแบบด้วยสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจาก TMR ที่ 15% เป็นต้น เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจาก TMR หลังจากทีออกแบบอีควอลไลเซอร์แล้วสัญญาณอ่านกลับจะถูกอีควอลไลซ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมากที่สุดตามทาร์เก็ตที่กำหนดสุดท้ายวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) จะประมวลผลสัญญาณจากค่าที่ได้จากการอีควอลไลซ์ซึ่งก็คือค่าของ $z_{0,k}$ และจะให้ค่าเอาต์พุตที่เป็นการประมาณค่าบิตข้อมูลซึ่งก็คือค่าของ $\hat{x}_{0,k}$ ดังนั้นวงจรตรวจหาวิเทอร์บีจะเป็นวงจรที่ออกแบบสำหรับทาร์เก็ตแบบ GPR 2 มิติ \mathbf{G} โดย 3 บิตนั้นได้จากแทรีกทั้ง 3 ที่อยู่ติดกัน(แทรีกบน,แทรีกกลาง,แทรีกล่าง) ซึ่งถูกอ่านค่าโดยหัวอ่านดังนั้นการอ้างอิงแต่ละสัญลักษณ์ของทั้งสามบิตนี้ให้ค่าของการจัดกลุ่มได้ทั้งหมด 8 กลุ่ม (combinations) และในส่วนของทาร์เก็ตมีสถานะปัจจุบันและสถานะของ 2 สัญลักษณ์ก่อนหน้าจึงสามารถกำหนดสถานะ (state) ได้ทั้งหมด $8^2 = 64$ สถานะ ดังนั้นเทรลลิส (trellis) ของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีจะมีทั้งหมด 64 สถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

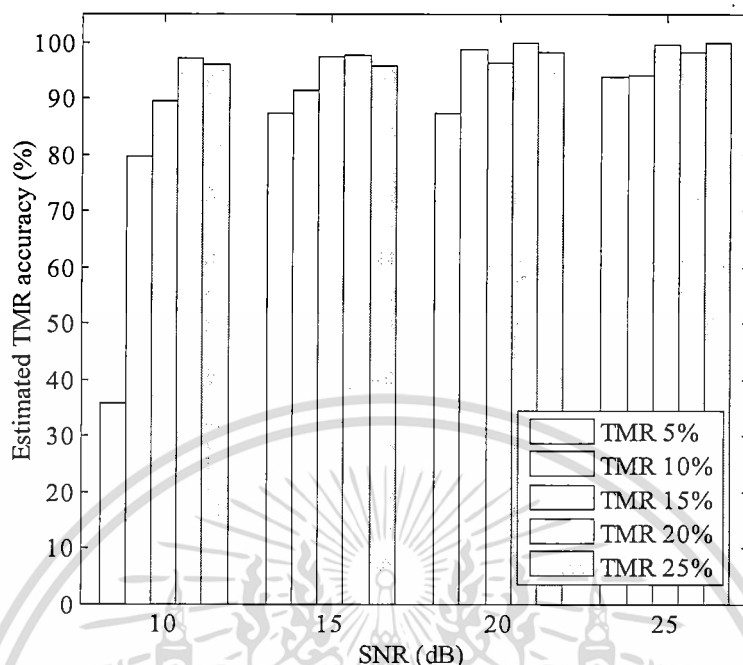
ผลการทดลอง

เราศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการทั้งสองวิธีที่นำเสนอ (ทั้งระบบแบบสมมาตร และแบบไม่สมมาตร) ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 และ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้ว ที่มีค่าคาบเวลาและระยะแทร็กเท่ากับ 18 นาโนเมตร (nm) และ 14.5 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้เราได้พิจารณาผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบ 2 มิติ ที่ค่า PW50 ในแนวตามแทร็ก (along-track PW50) เท่ากับ 19.4 nm. และ ค่า PW50 ในแนวขวางแทร็ก (across-track PW50) เท่ากับ 24.8 nm เช่นเดียวกับใน [12] แต่ละตำแหน่งของบิตผิดพลาด (BER) คำนวณจาก ข้อมูลหลายเซ็กเตอร์ โดยข้อมูลเป็นแบบ 4K เซ็กเตอร์ เพื่อต้องการบิตผิดพลาดอย่างน้อย 500 บิต นอกจากนี้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่า TMR คำนวณได้โดยสมการ

$$\text{accuracy (\%)} = 100 - \frac{|\hat{\text{TMR}} - \text{TMR}|}{\text{TMR}} \times 100, \quad (4.1)$$

ในที่นี้ $\hat{\text{TMR}}$ หมายถึง TMR ที่ได้จากการประมาณค่าของวิธีการที่นำเสนอ และ TMR หมายถึงค่า TMR ที่เกิดขึ้นจริงในสัญญาณอ่านกลับ

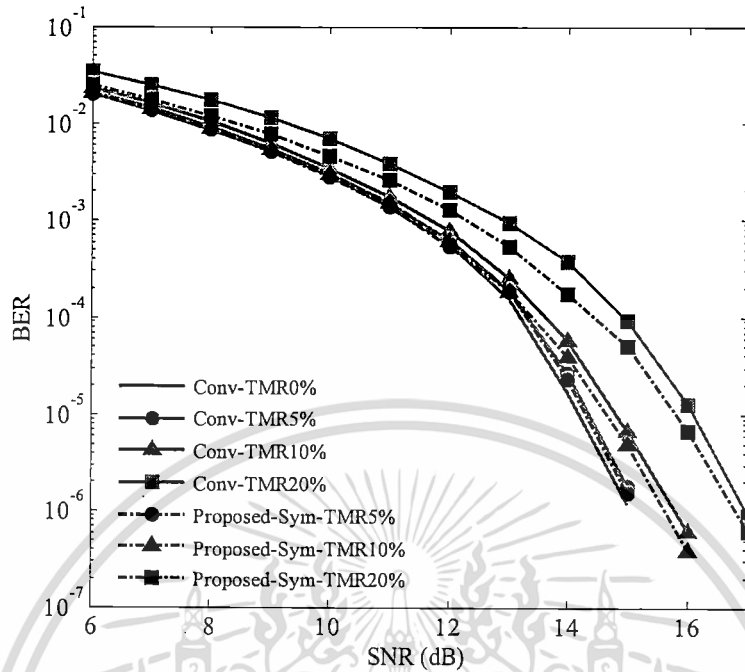
รูปที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องการประมาณค่า TMR ของวิธีการที่นำเสนอในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว เป็นที่ชัดเจนสำหรับวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ค่าการประมาณระดับ TMR ที่ดีโดยเฉพาะที่ TMR ระดับสูง และ SNR ระดับสูง อย่างเช่นจากผลการจำลองสามารถให้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่า TMR สูงถึง 95% เมื่อ SNR มากกว่า 15 dB และ TMR มากกว่า 15% ดังนั้น ค่าของ TMR ที่ประมาณได้บ่งบอกถึงวิธีการที่นำเสนอสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า TMR ที่มีอยู่ในสัญญาณอ่านกลับได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ SNR และ TMR มีระดับที่สูง อย่างไรก็ตาม เราพบว่าค่าความถูกต้องของการประมาณค่า TMR จะต่ำกว่า 40% เมื่อ TMR และ SNR มีค่าต่ำๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุเนื่องจากช่วงของผลกระทบของระดับ TMR ระหว่าง 0% ถึง 5% นั้นใกล้เคียงกันมากและได้รับผลกระทบจาก AWGN ที่สูงเมื่อระดับ SNR ต่ำลง



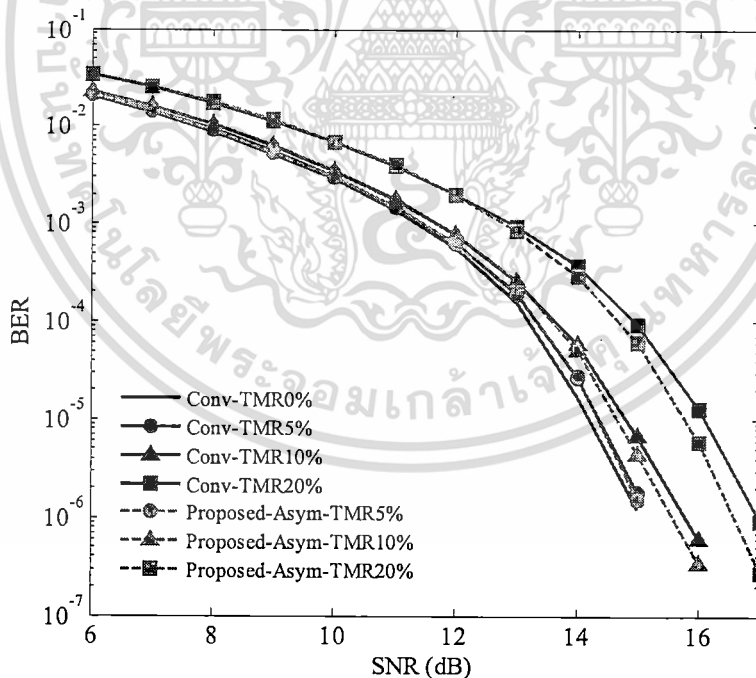
รูปที่ 4.1: แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของ SNR และเปอร์เซ็นต์ของการประมาณค่า TMR ของวิธีที่นำเสนอที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว

เราทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของบิตผิดพลาดของระบบที่นำเสนอกับระบบปกติที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2 และ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้วที่ได้รับผลกระทบจาก TMR ในระดับต่างๆ เส้นกราฟที่มีข้อความ “Conv-TMR0%” หมายถึง ระบบปกติที่ไม่มีผลกระทบจาก TMR ซึ่งจะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและเส้นที่มีข้อความ “Conv-TMR5%”, “Conv-TMR10%”, “Conv-TMR20%” หมายถึง ระบบทั่วไปที่ได้รับผลกระทบจากระดับ TMR ที่ 5%, 10% และ 20% ตามลำดับ นอกจากนี้ เส้นที่มีข้อความ “Proposed-Sym-TMR5%” “Proposed-Sym-TMR10%” และ “Proposed-Sym-TMR20%” หมายถึง วิธีการที่นำเสนอด้วยทาร์เก็ตแบบสมมาตรที่ระดับ TMR ที่ 5% 10% และ 20% ตามลำดับ และสุดท้ายเส้นที่มีข้อความ “Proposed-Asym-TMR5%” “Proposed-Asym-TMR10%” และ “Proposed-Asym-TMR20%” หมายถึง วิธีที่นำเสนอด้วยทาร์เก็ตแบบไม่สมมาตรที่ระดับ TMR ที่ 5% 10% และ 20% ตามลำดับ

ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว ผลของวิธีที่นำเสนอ (ระบบสมมาตรและไม่สมมาตร) จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าระบบปกติเล็กน้อยสำหรับ TMR ทุกๆระดับซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

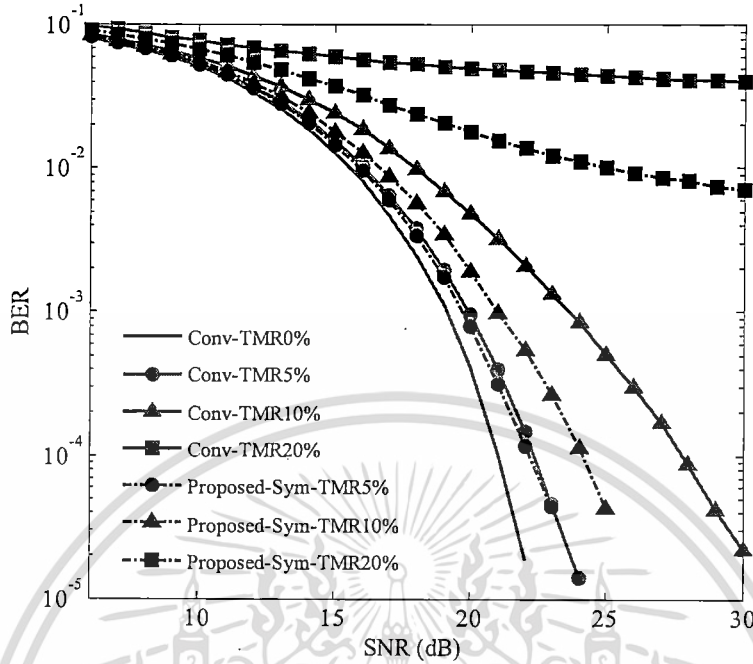


รูปที่ 4.2: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบสมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR

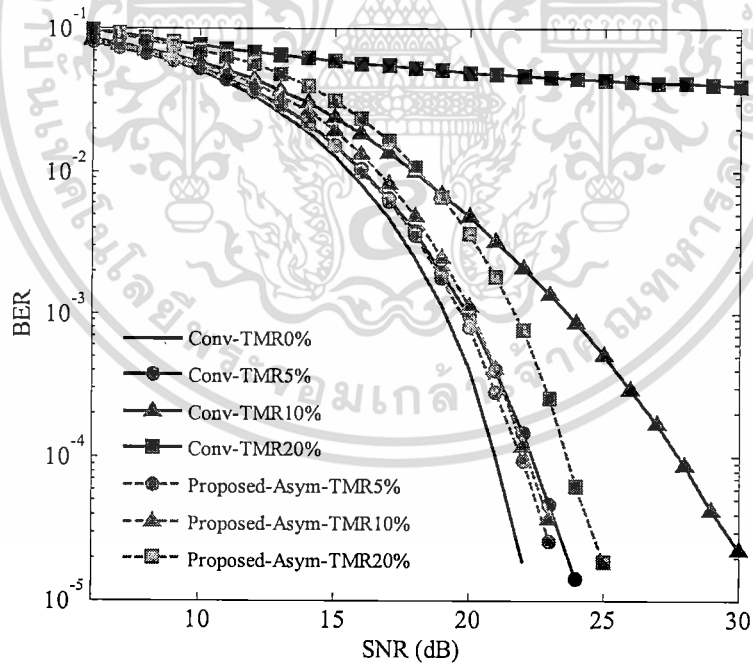


รูปที่ 4.3: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบไม่สมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 2 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบสมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR



รูปที่ 4.5: แสดงประสิทธิภาพของ BER ระหว่างระบบทั่วไปและระบบไม่สมมาตรที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ 3 เทราบิตต่อตารางนิ้ว สำหรับแต่ละ TMR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถได้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบทั่วไปเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ $AD = 3.0 \text{ Tb/in}^2$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ AD เพิ่มขึ้นไม่เพียงแต่ผลกระทบของ ITI ที่เพิ่มขึ้นแต่ TMR จะสามารถเกิดขึ้นง่ายในระบบเช่นกัน ถึงแม้ว่าหัวอ่านจะเคลื่อนที่จากแตรีกกลางเพียงเล็กน้อยและวิธีการที่นำเสนอยังสามารถจัดการผลกระทบของ TMR ที่รุนแรงได้ เราพบว่าประสิทธิภาพของระบบแบบสมมาตรดีกว่าระบบปกติเล็กน้อยที่ TMR 5% และให้ค่าเกณฑ์ประสิทธิภาพประมาณ 4 dB ที่ $BER = 10^{-4}$ ที่ระดับ TMR 10% อย่างไรก็ตามทั้งระบบทั่วไปและระบบสมมาตรไม่สามารถให้ค่าประสิทธิภาพที่น่าพอใจสำหรับ TMR ในระดับที่สูงซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.4 ในทางตรงกันข้ามระบบแบบไม่สมมาตรจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบทั่วไปโดยเฉพาะที่ TMR สูงขึ้นและสามารถให้ค่าประสิทธิภาพมากกว่าระบบทั่วไปประมาณ 0.5 ถึง 6 dB ที่ $BER = 10^{-4}$ สำหรับระดับ TMR ที่ 5% และ 10% ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 ดังนั้น เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะกล่าวถึงวิธีการประมาณค่า TMR ที่นำเสนอซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีเมื่อได้รับผลกระทบจากการรบกวนของสื่อบันทึก (media noise) หรือจากตำแหน่งของบิตที่ผิดพลาดไป (position jitter noise)

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอดีกว่าประสิทธิภาพของภาครับแบบทั่วไปเนื่องจากว่ากระบวนการตรวจสอบใช้ประโยชน์จากทาร์เก็ตแบบสองมิติและอีควอไลเซอร์ที่สอดคล้องกันกับทาร์เก็ตนั้นเหมาะสมกับช่องสัญญาณของการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มี TMR อย่างไรก็ตาม วิธีการที่นำเสนอนี้ต้องการหน่วยความจำเพิ่มเพื่อจัดเก็บทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละ TMR

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบของ TMR สำหรับระบบ BPMR ที่มีความหนาแน่นสูง วิธีการที่นำเสนอเริ่มที่การประมาณค่า SNR บนพื้นฐานของการหาค่าเฉลี่ยของพีคสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ จากนั้นการประมาณค่าระดับ TMR สามารถคำนวณได้จาก การประมาณค่าของ SNR และค่าเฉลี่ยของพลังงานของสัญญาณอ่านกลับ เมื่อทราบระดับ TMR เราสามารถเลือกทาร์เก็ต และ อีควอลไลเซอร์ที่สอดคล้องกับทาร์เก็ตที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณที่มี TMR ในกระบวนการตรวจสอบข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพที่ดี ผลการจำลองเป็นตัวชี้วัดถึงระบบที่นำเสนอว่าสามารถประมาณค่าระดับของผลกระทบที่เกิดจาก TMR และ ประสิทธิภาพของระบบดีกว่าระบบเดิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ SNR และ TMR มีระดับที่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wood R., "The Feasibility of Magnetic Recording at 1 Terabit per Square Inch," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no.1, pp. 36–42, Jan. 2000.
- [2] R. Rottmeyer et al., "Heat-assisted magnetic recording," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 2417–2421, Oct. 2006.
- [3] B.Terris, T.Thomson, and G.Hu., "Patterned media for future magnetic data storage," Microsyst. Technology., vol. 13, no. 2, pp. 189–196, Nov. 2006
- [4] A. Moser, "Magnetic recording: Advancing into the future," J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 35, no. 19, pp. R157–R167, 2002.
- [5] R. New, "The Future of Magnetic Recording Technology", Hitachi Global Storage Technologies, April 11, 2008.
- [6] S. Navabi, B. V. K. Vijaya Kumar, and J. A. Bain, "Two-Dimensional Pulse Response and Media Noise Modeling for Bit Patterned Media", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 3789-3792, November, 2008.
- [7] P. W. Nutter, I. T. Ntokas, B. K. Middleton, and D. T. Wilton, "Effect of island distribution on error rate performance in patterned media," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 10, pp. 3214–3216, Oct. 2005.
- [8] Y. Chang, D. Park, N. Park, and Y. Park, "Prediction of track misregistration due to disk flutter in hard disk drive," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 1441–1446, Mar. 2002.
- [9] B. G. Roh, S.U. Lee, J. Moon, and Y. Chen, "Single-head/single-track detection interfering tracks," IEEE Trans. Magn., vol. 38, no. 4, pp. 1830–1838, Jul. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] M. Keskinöz, "Two-dimensional equalization/detection for patterned media storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 4, pp. 533–539, Apr. 2008.
- [11] M. M. M. Lin and P. Supnithi,, "Off-Track Detection Based on the Readback Signals in Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4590–4593, Nov. 2012.
- [12] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, and J. A. Bain, "Two-dimensional pulse response and media noise modeling for bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 3789–3792, Nov. 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] 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.
- [2] W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative TMR Mitigation Method Based on Readback Signal for Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn., Accepted, ISI-Impact 1.83.
- [3] 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 2014, Accepted, ISI-Impact 0.34.
- [4] 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.
- [5] W. Busyatras, A. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat "Estimating Track Mis-Registration Based on Readback Signal" in Bit-Patterned Media Recording Systems" in Proceeding ITC-CSCC 2014, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Subject [IEICE] Request for proofreading
2014ECP5100(8EC-2)
Sender trans-c@ieice.org <trans-c@ieice.org>
Recipient kwchanon@kmitl.ac.th <kwchanon@kmitl.ac.th>,
kwchanon@gmail.com <kwchanon@gmail.com>
Copy trans-c@ieice.org <trans-c@ieice.org>
Date 16.06.2015 16:38



KMITL Webmail
<http://webmail.kmitl.ac.th>

Request for Proofreading]

June 16, 2015.

Manuscript ID: 2014ECP5100

Paper/Letter: Paper

Title: A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording

Name: Wiparat Busyatras, Chanon Warisam, Lin Min Min Myint, Piya Kovintavewat

Volume and Number: Vol.E98-C,No.8,pp.-,Aug. 2015.

Due date for checking a galley proof: June 22, 2015.

Password: kbsMfq

https://review.ieice.org/proof/proof_download_e.aspx?lid=2014ECP5100&code=kbsMfq

Dear Dr. CHANON WARISARN,

The galley proof of manuscript which you submitted to the IEICE Transactions has been prepared. Please download and check it from the above mentioned URL until the due date shown above.

In case you find any corrections, please indicate them by hand and upload the scanned revision or send the corrected Galley Proof by fax. If you prefer to make corrections electronically, please use the PDF edit function to show corrections and upload the file.

Note that you can only correct TYPOGRAPHICAL ERRORS that occurred during the editing process. If you have received any comments from the editorial committee in the Notification of Acceptance, you could modify them this time.

Sincerely yours,

The IEICE publishing office

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER

A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording

Wiparat BUSYATRAS[†], Nonmember, Chanon WARISARN^{†a)}, Member, Lin MIN MIN MYINT^{††}, Nonmember, and Piya KOVINTAVEWAT^{†††b)}, Member

SUMMARY Track mis-registration (TMR) is one of the major problems in high-density magnetic recording systems such as bit-patterned media recording (BPMR). In general, TMR results from the misalignment between the center of the read head and that of the main track, which can deteriorate the system performance. Although TMR can be handled by a servo system, this paper proposes a novel method to alleviate the TMR effect, based on the readback signal. Specifically, the readback signal is directly used to estimate a TMR level and is then further processed by the suitable target and equalizer designed for such a TMR level. Simulation results indicate that the proposed method can sufficiently estimate the TMR level and then helps improve the system performance if compared to the conventional receiver that does not employ a TMR mitigation method, especially when an areal density is high and/or a TMR level is large.

key words: bit-patterned media recording, estimation method, signal-to-noise ratio, track mis-registration, two-dimensional equalization

1. Introduction

Bit-patterned media recording (BPMR) is one of the promising recording technologies for the next generation's hard disk drives, which can achieve an areal density (AD) up to 4 Tera-bits per square inch (Tb/in²) [1]. In BPMR, a data bit is stored in a single domain magnetic island, surrounded by non-magnetic material. To increase storage capacity, the spacing between the data bit islands in both the along- and the across-track directions must be decreased, thus leading to the increase of two-dimensional (2D) interference. In general, the 2D interference consisting of inter-symbol interference (ISI) and inter-track interference (ITI) [2] can considerably degrade the system performance if precautions are not taken.

In addition to the 2D interference, BPMR also encounters other challenging issues, including write synchronization error, media noise, and track mis-registration (TMR), which can further deteriorate the system performance. Therefore, a good read-channel design should provide robustness and reliability to tackle these issues. How-

ever, this paper focuses on how to mitigate the TMR effect, because it can significantly lead to performance degradation, especially in high-density BPMR systems.

Practically, TMR (or a head offset) is occurred when the center of the read head is not aligned with that of the main track [3], [4] as illustrated in Fig. 1. For example, the TMR could happen when the disk rotation speed is suddenly increased for high transfer rate and access time, while the read head moves to read data on the main track [5]. Generally, the TMR can yield a devastating impact on the data recovery process because it causes an unequal effect of the adjacent tracks on the main track, thus lowering the quality of the readback signal. Moreover, the TMR effect results in the mismatch between the readback signal and the design of the target and its corresponding equalizer, which in turn causes the detector to perform unreliably.

In general, the TMR can be controlled by a servo system [4], [5]. Specifically, a servo burst field has the information that can be used to estimate the amount of head offset, but it is difficult to estimate the behavior of the read head when the TMR occurred beyond the limit [5]. Alternatively, Myint and Supnithi [6] detected the presence of TMR from the readback signal based on the observation of 2D target-shaping equalizer coefficients, and then adjusted the 2D target and equalizer to be asymmetric so as to taken care of the TMR-affected readback signal. Nevertheless, we found that the method in [6] cannot accurately estimate the TMR level, and both the 2D target and equalizer are not efficiently matched with the BPMR channel with TMR, thus leading to the performance degradation at the data detection process.

To solve this problem, this paper proposes a novel

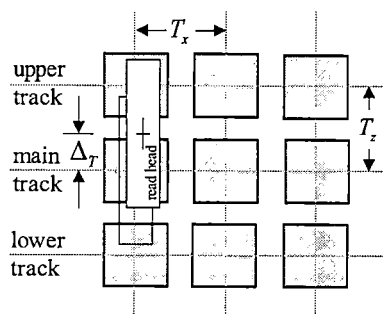


Fig. 1 The illustration of island structure configuration in a BPMR system with track mis-registration (TMR), Δr .

Manuscript received November 25, 2014.

Manuscript revised April 1, 2015.

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

^{††}The author is with School of Information Technology, Shinawatra University, Pathumthani 12160, Thailand.

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

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

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

DOI: 10.1587/transele.E98.C.1

method to mitigate the TMR effect based on the readback signal. To do so, we study the statistical relationship among the readback signal, a signal-to-noise ratio (SNR), and TMR amount for various cases. Next, we formulate the mathematical equations so as to estimate the SNR and the TMR level based on the readback signal. Specifically, the SNR is estimated from the average peak readback amplitude, whereas the TMR level is computed from the estimated SNR and the energy of the readback signal. Then, the estimated TMR level will be utilized to choose the target and its corresponding equalizer from a look-up table that are suitable for the channel with TMR so as to facilitate the data detection process. Note that each pair of the target and its equalizer is designed for each TMR level and is stored in the look-up table.

The rest of this paper is organized as follows. Section 2 briefly describes a BPMR channel model, and Sect. 3 explains the proposed method. Simulation results are given in Sect. 4. Finally, Sect. 5 concludes this paper.

2. BPMR Channel Model

This work focuses on a discrete-time BPMR channel model with multi-track processing [7], as depicted in Fig. 2. A binary input data sequence $x_{l,k} \in \{\pm 1\}$ with bit period T_x , where $l = 0$ is the main track, $l = -1$ is the upper track, and $l = 1$ is the lower track, is sent to the BPMR channel corrupted by TMR and electronics noise modeled as an additive white Gaussian noise (AWGN). Then, the readback signal of the k th data bit on the l th track can be expressed as

$$\begin{aligned} r_{l,k} &= x_{l,k} \otimes h_{l,k} + w_{l,k} \\ &= \sum_m \sum_n h_{m,n} x_{l-m,k-n} + w_{l,k}, \end{aligned} \quad (1)$$

where $x_{l,k}$'s are the recorded bits, $h_{m,n}$'s are the 2D channel coefficients, m and n represent the time indices of the bit island in the across- and the along-track directions, and $w_{l,k}$ is an AWGN with zero mean and variance σ^2 .

Practically, the BPMR channel coefficients $h_{m,n}$ can be generated by sampling a 2D Gaussian pulse response at the integer multiples of the bit period T_x and the track pitch T_z according to

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

where $P(z, x)$ is the 2D Gaussian pulse response, z and x are the time indices in the across- and the along-track directions, $\{m, n\} \in (-L, \dots, 0, \dots, L)$, $2L + 1$ is the length of $P(z, x)$, L is an integer, and Δ_T is the head offset or the distance between the center of the read head and that of the main track as depicted in Fig. 1. Generally, L should be large enough to ensure that the tail amplitude of $P(z, x)$ is small, where this paper considers $L = 1$ for simplicity.

In this paper, the TMR level is defined as

$$\text{TMR (\%)} = \frac{\Delta_T}{T_z} \times 100, \quad (3)$$

where the sign of Δ_T is assumed to be positive for the upward offset as shown in Fig. 1. Furthermore, we consider the 2D Gaussian pulse response of the form [2]

$$P(z, x) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2} \left[\left(\frac{x}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_T}{PW_z} \right)^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

where $A = 1$ is assumed to be the peak amplitude of the pulse response, PW_x is the PW_{50} of the along-track pulse, PW_z is the PW_{50} of the across-track pulse, PW_{50} is the pulse width at half its maximum, and $c = 1/2.3548$ is a constant to account for the relationship between PW_{50} and the standard deviation of a Gaussian pulse.

In a conventional receiver that does not employ a TMR mitigation method, the readback signal $r_{l,k}$ for $l \in \{0, \pm 1\}$ is fed to a 2D equalizer followed by a 2D Viterbi detector to determine the most likely input sequence on the main track, i.e., $\hat{x}_{0,k}$. Note that this paper does not take media noise into account and considers only the system that recovers the recorded data on the main track, as similar to [6]. Hence, three adjacent readback signals $\{r_{-1,k}, r_{0,k}, r_{1,k}\}$ at the input of a 2D equalizer, \mathbf{F} , are required to generate a single output $\{z_{0,k}\}$, whereas three input data sequences $\{x_{-1,k}, x_{0,k}, x_{1,k}\}$ are sent to a 2D target, \mathbf{G} , to output the desired data sequence $\{d_{0,k}\}$.

3. Proposed Method

We propose a novel method to subside the TMR effect in a BPMR channel, based on the readback signal. Specifically, we first estimate a TMR level with an aid of the estimated SNR and the average energy of the readback signal. Hence, the target and its corresponding equalizer suitable for the channel with TMR are selected according to the estimated TMR level so as to ease the data recovery process. The details of the proposed method can be explained as follows.

3.1 SNR Estimation

In this paper, the SNR is defined as [8]

$$\text{SNR} = 20 \log_{10}(V_p/\sigma), \quad (5)$$

in decibel (dB), where V_p is the peak amplitude of the readback signal, which is assumed to be 1, and σ is a standard deviation of AWGN. This SNR will be estimated before predicting the amount of the TMR. Here, we propose to estimate the SNR from the peak amplitude of the readback signal. To do so, we collect a large number of samples (e.g., 1000 samples) of the readback signals at each SNR ranged from 0 to 25 dB, where each readback signal is affected by a uniformly distributed random TMR level ranged from 0% to 25%. Then, for each SNR, the average value of the peak amplitude of all readback signals, r_{peak} , is computed, regardless of TMR levels.

Figure 3 illustrates the relationship between the SNR and the average peak amplitude of the readback signals at the AD of 2.0 Tb/in², where we found that the SNR can be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

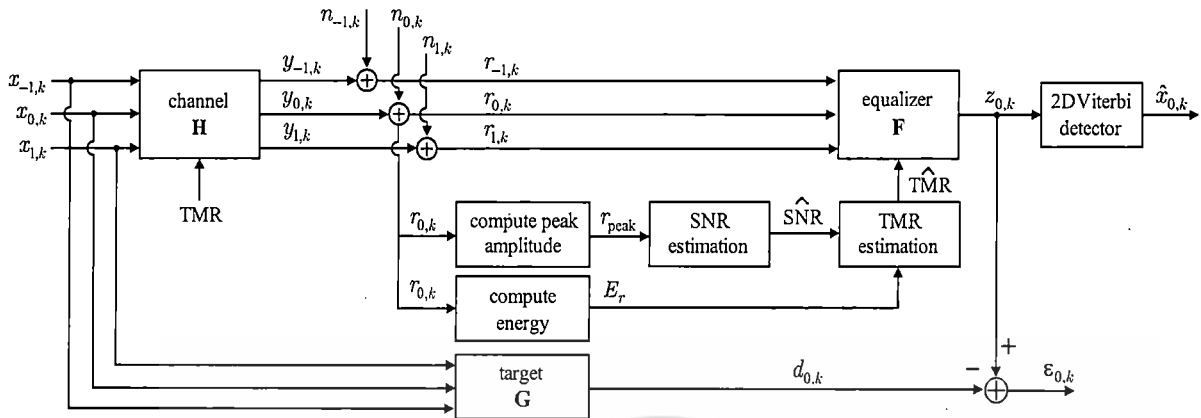


Fig. 2 A BPMR channel model with the proposed TMR mitigation method.

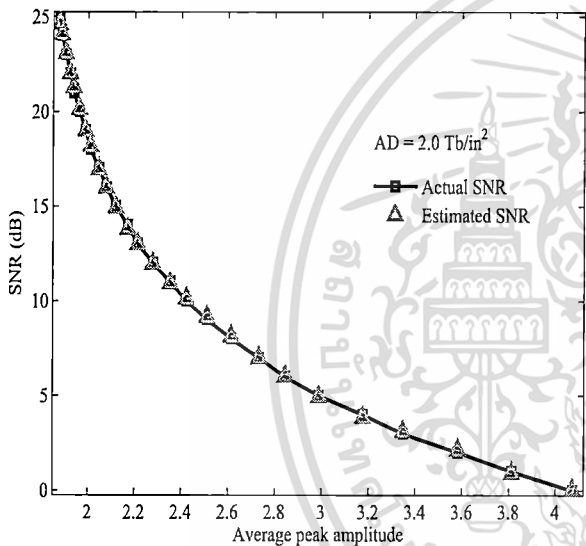


Fig. 3 The relationship between the SNR and the average peak amplitude of the readback signals at AD = 2.0 Tb/in².

possibly approximated. To achieve this, we apply a least-squares (LS) fitting technique to fit all data points to an M -degree polynomial equation according to

$$\hat{\text{SNR}} = a_0 + a_1 r_{\text{peak}} + a_2 r_{\text{peak}}^2 + \dots + a_M r_{\text{peak}}^M, \quad (6)$$

where $\hat{\text{SNR}}$ is the estimated SNR, a_i is the i th coefficient of the polynomial equation in (6), and $i \in \{0, 1, \dots, M\}$. Based on extensive heuristic search, we found that $M = 5$ is sufficient for our channel model at the AD up to 3.0 Tb/in² because a higher order does not provide any benefit on the accuracy of SNR estimation. As depicted in Fig. 3, it is apparent that the estimated SNR effectively coincides with the actual SNR.

3.2 TMR Estimation

For each SNR, we also propose to employ the energy of the readback signal to estimate the TMR level. To do so, we

compute the average energy of the readback signal, E_r , for each SNR and TMR level according to

$$E_r = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S r_{0,k}^2, \quad (7)$$

where S is the length of the readback signal samples (i.e., $S = 32768$ bits for a 4K-data sector [9]). Next, the estimated TMR level is obtained based on a polynomial LS fitting technique, i.e.,

$$\hat{\text{TMR}} = b_0 + b_1 E_r + b_2 E_r^2 + \dots + b_Q E_r^Q, \quad (8)$$

where $\hat{\text{TMR}}$ is the estimated TMR, b_i and Q are the i th coefficient and a degree of the polynomial equation in (8), respectively, and $i \in \{0, 1, \dots, Q\}$. Similarly, we perform an extensive simulation search to find a suitable Q , where $Q = 5$ provides the best fit between the actual and the estimated TMR levels.

Figure 4 shows the estimated TMR level as a function of the average energy of the readback signal at the AD of 2.0 Tb/in² for various SNRs. Clearly, the TMR level can be effectively estimated from (8) based on $\hat{\text{SNR}}$ and E_r .

3.3 Equalizer and Target Design

The target and its corresponding equalizer used in this work are designed for each TMR level based on minimizing a mean-squared error (MSE) [10] according to

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = E\{(z_{l,k} - d_{l,k})^2\}, \quad (9)$$

where $E\{\cdot\}$ is an expectation operator, and $\varepsilon_{l,k}$ is an error signal between the equalizer output $z_{l,k}$ and the desired output $d_{l,k}$. By expanding the right-hand side in (9), we obtain

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_{l,k}^2\} &= E\{[(r_{l,k} \otimes f_{l,k}) - (x_{l,k} \otimes g_{l,k})]^2\} \\ &= f_{l,k} \otimes R_{l,k}^r \otimes f_{l,k} - 2f_{l,k} \otimes R_{l,k}^{rx} \otimes g_{l,k} \\ &\quad + g_{l,k} \otimes R_{l,k}^x \otimes g_{l,k}, \end{aligned} \quad (10)$$

where \otimes is the 2D convolution operator, $R_{l,k}^r = E\{r_{i,j} r_{i-l,j-k}^r\}$ and $R_{l,k}^x = E\{x_{i,j} x_{i-l,j-k}^x\}$ are the auto-correlations of the readback signals and the recorded bits from all three tracks, respectively, and $R_{l,k}^{rx} = E\{r_{i,j} x_{i-l,j-k}^x\}$ is the cross-correlation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

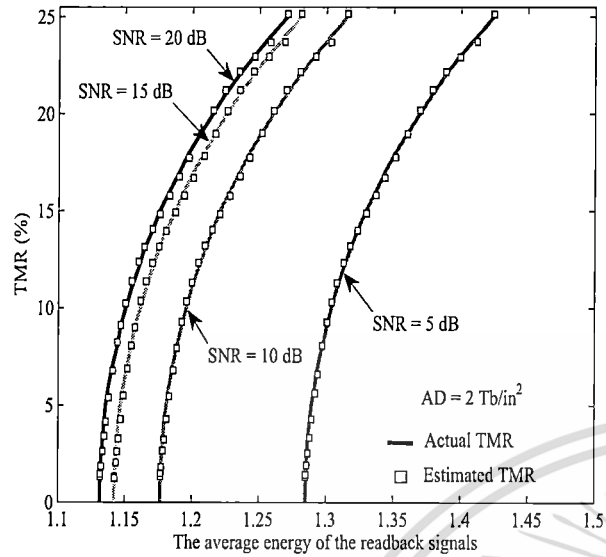


Fig. 4 The relationship between the TMR level and the average energy of the readback signals at AD = 2.0 Tb/in².

between the readback signals and the recorded bits.

To find the solution of (10), it is convenient to represent the matrices in the vector forms [10]. To do so, we let \mathbf{F} be a $3 \times (2N + 1)$ equalizer matrix of the form

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{-1} \\ \mathbf{f}_0 \\ \mathbf{f}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{-1,-N} & f_{-1,0} & f_{-1,N} \\ f_{0,-N} & f_{0,0} & f_{0,N} \\ f_{1,-N} & f_{1,0} & f_{1,N} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

where $f_{l,k}$'s are the equalizer coefficients, $l \in \{0, \pm 1\}$ is the track location, $k \in \{-N, \dots, 0, \dots, N\}$, and $2N + 1$ is the equalizer length. Similarly, let \mathbf{G} be a 3×3 target matrix of the form

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{-1} \\ \mathbf{g}_0 \\ \mathbf{g}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

where $g_{l,k}$'s are the target coefficients, $l \in \{0, \pm 1\}$ is the track location, and $k \in \{-1, 0, 1\}$.

In general, the matrices \mathbf{F} and \mathbf{G} can be rearranged into the column vectors as $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_{-1} \ \mathbf{f}_0 \ \mathbf{f}_1]^T$ and $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_{-1} \ \mathbf{g}_0 \ \mathbf{g}_1]^T$, respectively, where the component vectors are defined in (11) and (12), and $[\cdot]^T$ is a transpose operator. Using these matrices, the MSE in (10) can be rewritten as

$$E\{\varepsilon_{l,k}^2\} = \mathbf{f}^T \mathbf{R}_r \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{R}_x \mathbf{g}, \quad (13)$$

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

Because we focus only on detecting the data on the main track (i.e., $l = 0$), the MSE in (9) can then be computed by

$$E\{\varepsilon_{0,k}^2\} = E\{(z_{0,k} - d_{0,k})^2\}. \quad (14)$$

Hence, in this case, the readback signal vector and the recorded bit vector will be given by $\mathbf{r}_k = [r_{1,k+N} \ r_{1,k+N-1} \ \dots \ r_{0,0} \ \dots \ r_{-1,k-N+1} \ r_{-1,k-N}]^T$ and $\mathbf{x}_k = [x_{1,k+1} \ x_{1,k} \ \dots \ x_{0,0} \ \dots \ x_{-1,k} \ x_{-1,k-1}]^T$, respectively.

During the minimization process of the MSE in (13), we impose a constraint of $\mathbf{e}^T \mathbf{g} = 1$ to avoid reaching trivial solutions of $\mathbf{f} = \mathbf{g} = \mathbf{0}$, where $\mathbf{e} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ is a column vector with 9 entries. Accordingly, \mathbf{f} and \mathbf{g} are chosen such that

$$E\{\varepsilon_{0,k}^2\} = \mathbf{f}^T \mathbf{R}_r \mathbf{f} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g} + \mathbf{g}^T \mathbf{R}_x \mathbf{g} - 2\lambda^T (\mathbf{e}^T \mathbf{g} - 1) \quad (15)$$

is minimized, where λ is a Lagrange multiplier [10], [11]. Then, the minimization process gives

$$\lambda = \frac{1}{\mathbf{e}^T (\mathbf{R}_x - \mathbf{R}_{rx}^T \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{rx})^{-1} \mathbf{e}} \quad (16)$$

$$\mathbf{g} = \lambda (\mathbf{R}_x - \mathbf{R}_{rx}^T \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{rx})^{-1} \mathbf{e} \quad (17)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{rx} \mathbf{g}. \quad (18)$$

Note that if the target \mathbf{g} is given, one can still employ (18) to obtain the equalizer \mathbf{f} that minimizes the MSE in (15).

3.4 TMR Mitigation Methods

In this work, we propose two methods to mitigate the TMR effect based on the structure of the 2D target (i.e., symmetric or asymmetric). Then, the performance of the proposed methods will be compared with that of a conventional receiver, which employs fixed 2D target and equalizer designed for 0% TMR level. Without TMR and media noise, the channel response in (2) will normally be symmetric, and we found that the 2D target \mathbf{G} obtained from this design is also *symmetric* because the target coefficients \mathbf{g}_{-1} and \mathbf{g}_1 in (12) are almost equal.

For the first proposed method (denoted as the *symmetric* system), the symmetric 2D target as used in the conventional receiver is employed, but the equalizer is selected according to the estimated TMR level. To do so, we need to design the equalizers suitable for each TMR level based on (18), where the target is fixed, and store them in the look-up table. On the other hand, the second proposed method (denoted as the *asymmetric* system) utilizes the 2D target and its corresponding equalizer specially designed for each TMR level according to (16) – (18), where we refer to this 2D target as the *asymmetric* target because the target coefficients \mathbf{g}_{-1} and \mathbf{g}_1 in (12) are not equal. Thus, each pair of the target and equalizer associated with a given TMR level will be kept in the look-up table. Table 1 shows an example of the coefficients of the asymmetric 2D targets for some TMR levels at the ADs of 2.0 and 3.0 Tb/in², which are used in this paper.

It should be pointed that the 2D Viterbi detector is designed for the asymmetric 2D target [11] as illustrated in Table 1. The three bits from the three adjacent tracks (upper, main, and lower tracks) are sensed by the read head so that

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 The coefficients of the asymmetric 2D targets for some TMR levels at the ADs of 2.0 and 3.0 Tb/in².

TMR (%)	2D target coefficients, G					
	2.0 Tb/in ²			3.0 Tb/in ²		
0%	0.0201	0.2187	0.0201	0.0692	0.3255	0.0692
	0.0866	0.9422	0.0866	0.1785	0.8398	0.1785
	0.0201	0.2187	0.0201	0.0692	0.3255	0.0692
5%	0.0232	0.2526	0.0232	0.0759	0.3571	0.0759
	0.0864	0.9402	0.0864	0.1781	0.8381	0.1781
	0.0173	0.1886	0.0173	0.0628	0.2955	0.0628
10%	0.0267	0.2904	0.0267	0.0829	0.3902	0.0829
	0.0859	0.9343	0.0859	0.1770	0.8238	0.1770
	0.0149	0.1619	0.0149	0.0567	0.2671	0.0567
20%	0.0348	0.3784	0.0348	0.0977	0.4598	0.0977
	0.0836	0.9090	0.0836	0.1725	0.8120	0.1725
	0.0108	0.1176	0.0108	0.0458	0.2154	0.0458

each symbol represents these three bits resulting 8 combinations in total. The asymmetric 2D target has the current and 2 previous symbols (i.e., 2 memory taps) giving $8^2 = 64$ states. Therefore, its trellis has 64 states and 8 outgoing branches from each state.

4. Simulation Results

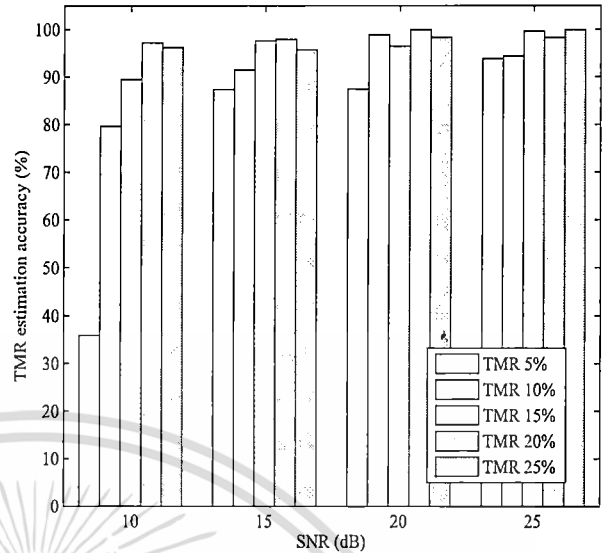
We study the performance of the proposed methods (both the symmetric and the asymmetric systems) in the BPMP system shown in Fig. 2 at the ADs of 2.0 and 3.0 Tb/in², where both the bit period and the track pitch are $T_x = T_z = 18$ and 14.5 nm, respectively. Additionally, this paper considers the 2D Gaussian pulse response with the along-track PW_{50} of 19.4 nm and the across-track PW_{50} of 24.8 nm, similar to [8]. Each bit-error rate (BER) point is computed using as many 4K-data sectors as required to collect a minimum number of 500 error bits. Furthermore, the accuracy of TMR estimation is measured by

$$\text{Accuracy}(\%) = 100 - \frac{|\hat{\text{TMR}} - \text{TMR}|}{\text{TMR}} \times 100, \quad (19)$$

where $\hat{\text{TMR}}$ is the estimated TMR obtained from the proposed method, and TMR is the actual TMR embedded in the readback signal.

Figure 5 demonstrates the TMR estimation accuracy (in percentage) of the proposed method in BPMP system at the AD of 2.0 Tb/in². Clearly, the proposed method can provide a good estimation of TMR level, especially when TMR is large and SNR is high. For example, it is possible to achieve 95% accuracy of TMR estimation when SNR is greater than 15 dB and TMR is larger than 15%. Therefore, it can be implied that the proposed method can be effectively used to estimate the actual TMR embedded in the readback signal, especially when SNR and TMR are high. Moreover, we found that the estimation accuracy is less than 40% when TMR and SNR are small. This might be because the effect of TMR ranged from 0% to 5% is very similar and AWGN is dominated because of low SNR.

We also compare the BER performance of the proposed systems with the conventional system for various ADs and

**Fig. 5** The relationship between the SNR levels and the percentage of the estimation accuracy of the proposed method at AD = 2.0 Tb/in².

various TMR effect levels. The curve labeled “Conv-TMR 0%” represents the conventional system without TMR effect, which yields the best performance, and the curves labeled “Conv-TMR 5%”, “Conv-TMR 10%”, and “Conv-TMR 20%” represent the conventional system with TMR effect at 5%, 10%, and 20%, respectively. Moreover, the curve labeled “Proposed-Sym-TMR X%” represents the proposed method with a symmetric target at the TMR level of X%, whereas the curve labeled “Proposed-Asym-TMR X%” denotes the proposed method with an asymmetric target at the TMR level of X%.

At AD = 2.0 Tb/in², the results show that the proposed methods (symmetric and asymmetric systems) yield slightly better performance than the conventional system for all TMR levels, as illustrated in Fig. 6 and Fig. 7. However, we can obtain a higher performance gap when the AD is increased, e.g., at AD = 3.0 Tb/in². Specifically, when AD increases, not only the ITI effect is more severe, but also the TMR can easily occur in the system even though the read head slightly moves away from the main track. Fortunately, the proposed method can handle the severe TMR effect. We can see that the symmetric system performs slightly better than the conventional system at 5% TMR level and offers the performance gain about 4 dB at BER = 10⁻⁴ and 10% of the TMR level; however, both the conventional and the symmetric systems cannot provide satisfactory performance for high TMR levels, as demonstrated in Fig. 8. On the other hand, the asymmetric system is superior to the conventional system, especially when TMR is high. Specifically, it can provide a performance gain over the conventional system about 0.5 and 6 dB at BER = 10⁻⁴ for the TMR level of 5% and 10%, respectively, as shown in Fig. 9. Therefore, it is of importance to notice that the proposed TMR estimation method can be also well performed when it encounters with some media noise, e.g., position jitter (not shown here).

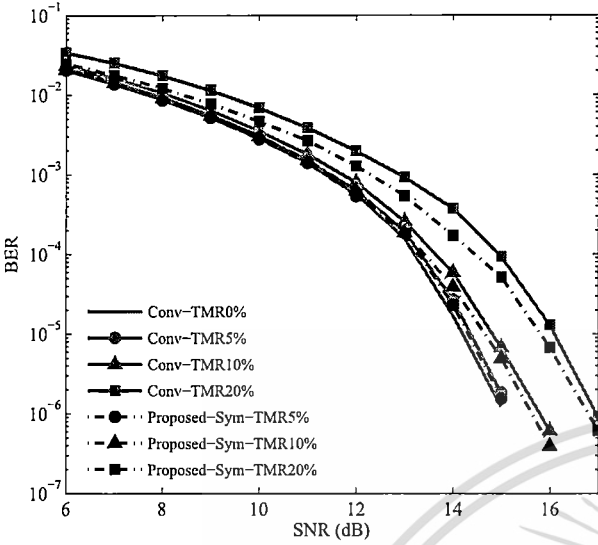


Fig. 6 BER performance between the conventional and the symmetric systems at $AD = 2.0 \text{ Tb/in}^2$ for various TMR levels.

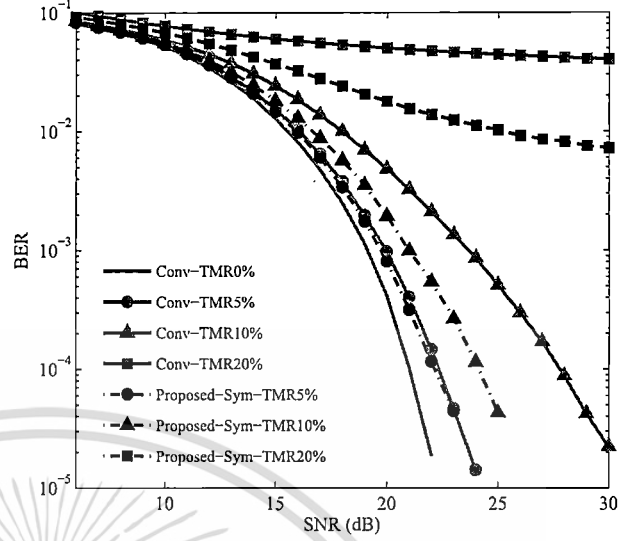


Fig. 8 BER performance between the conventional and the symmetric systems at $AD = 3.0 \text{ Tb/in}^2$ for various TMR levels.

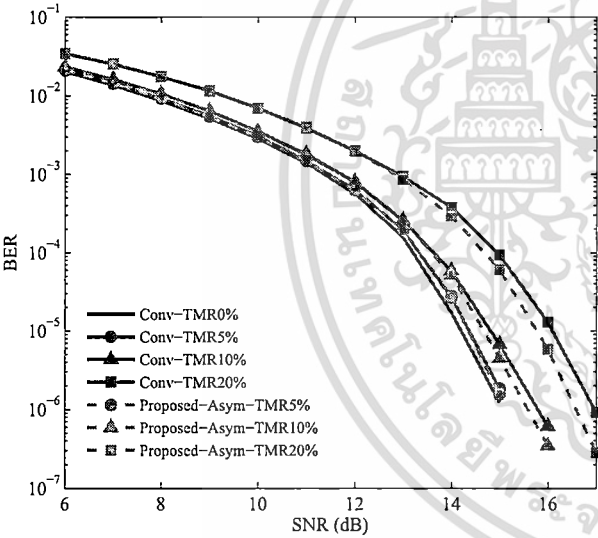


Fig. 7 BER performance between the conventional and the asymmetric systems at $AD = 2.0 \text{ Tb/in}^2$ for various TMR levels.

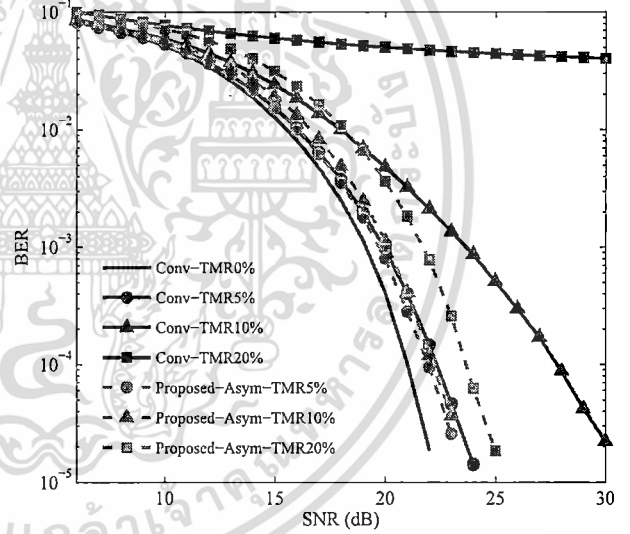


Fig. 9 BER performance between the conventional and the asymmetric systems at $AD = 3.0 \text{ Tb/in}^2$ for various TMR levels.

Consequently, it can be implied that the proposed methods perform better than the conventional receiver because the detection process utilizes the 2D target and its corresponding equalizer that match with the BPMP channel with TMR. Nevertheless, the proposed methods require some extra memory to store the 2D target and the equalizer that are suitable for each TMR level.

5. Conclusion

This paper proposes the TMR mitigation method for a high-density BPMP system. It starts with estimating the SNR based on the average peak amplitude of the readback signals. Then, the estimated TMR level can be calculated based

on the estimated SNR and the average energy of the readback signals. Once the TMR level is known, we can choose the target and its corresponding equalizer that match with the BPMP channel with TMR in the data detection process so as to obtain a good system performance. Simulation results indicate that the proposed system can effectively estimate the TMR level, and it performs better than the conventional system, especially when the SNR and TMR are large.

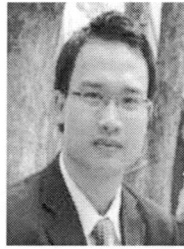
Acknowledgements

This work was supported by College of Data Storage Innovation (D*STAR) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, KMITL, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] 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.
- [2] S. Nabavi, "Signal processing for bit-patterned media channels with inter-track interference," Ph.D thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Dec. 2008.
- [3] S. Koonkamkhai, P. Keeratiwintakom, N. Chirdchoo, and P. Kovintavewat, "Two-dimensional cross-track asymmetric target design for high-density bit-patterned media recording," *Proc. ISPACS 2011*, pp.1–4, Dec. 7–9, 2011.
- [4] L.N. He, Z.G. Wang, B. Liu, D.J. Mapps, P. Robinson, W.W. Clegg, D.T. Wilton, and Y. Nakamura, "Estimation of track misregistration by using dualstripe magnetoresistive heads," *IEEE Trans. Magn.*, vol.34, no.4, pp.2348–2355, July 1998.
- [5] Y.-B. Chang, D.-K. Park, N.-C. Park, and Y.-P. Park, "Prediction of track misregistration due to disk flutter in hard disk drive," *IEEE Trans. Magn.*, vol.38, no.2, pp.1441–1446, March 2002.
- [6] L.M.M. Myint and P. Supnithi, "Off-track detection based on the readback signals in magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.48, no.11, pp.4590–4593, Nov. 2012.
- [7] S. Nabavi, B.V.K.V. Kumar, and J.-G. Zhu, "Modifying Viterbi algorithm to mitigate inter-track interference in bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol.43, no.6, pp.2274–2276, June 2007.
- [8] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A recorded-bit patterning scheme with accumulated weight decision for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.E96-C, no.12, pp.1490–1496, Dec. 2013.
- [9] HGST a Western Digital company, "Advanced format technology brief," HGST, Inc., pp.1–4, March 2014.
- [10] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detectors," *IEEE Trans. Magn.*, vol.31, no.2, pp.1083–1088, March 1995.
- [11] S. Karakulak, P.H. Siegel, J.K. Wolf, and H.N. Bertram, "Joint-track equalization and detection for bit patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol.46, no.9, pp.3639–3647, Nov. 2010.



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



Lin Min Min Myint received the B.Eng. magna cum laude from Assumption University, Thailand (2000), the M.S. degree from Asia Institute of Technology, Thailand (2003), and the Ph.D. degree from Shinawatra University, Thailand (2011). He is currently at Shinawatra University. His research interests are in the area of coding and signal processing for data storage systems.



Piya Kovintavewat received the B.Eng. summa cum laude from Thammasat University, Thailand (1994), the M.Sc. degree from Chalmers University of Technology, Sweden (1998), and the Ph.D. degree from Georgia Institute of Technology, USA (2004), all in Electrical Engineering. He is currently at Nakhon Pathom Rajabhat University. His research interests include coding and signal processing as applied to digital data storage systems. Prior to working at NPRU, he worked as an engineer at Thai Telephone and Telecommunication company (1994-1997), and as a research assistant at National Electronics and Computer Technology Center (1999), both in Thailand. He also had work experiences with Seagate Technology, Pennsylvania, USA (summers 2001, 2002, and 2004).



Wiparat Busyatras received the B.Sc. from Burapha University (BUU), Thailand in 2006, the M.Sc. degree in computer science from National Institute of Development Administration (NIDA), Bangkok, Thailand in 2012. She is currently studying the Ph.D. degree in information and system engineering at the College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand. Her current research interests are in the areas of prediction technique and signal processing for data storage systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก -ข-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล: ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

ประวัติการศึกษา

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

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

International Journal Publications

1. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding of 2D Modulation Codes for Bit-Patterned Media Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Submitted, ISI-Impact 1.83.
2. S. Chandrasekaran, P. Supnithi, and C. Warisarn, "Spinning Disk Test Study in Determining the Optimum Writers and Shingled Track Pitch for Shingled Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Submitted, ISI-Impact 1.83.
3. 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.*, Submitted, ISI-Impact 1.83.
4. 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*, Accepted. Q4 SJR.
5. 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*, Accepted, ISI-Impact 0.34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in *Electronic Trans. IEICE* 2013, Accepted, ISI-Impact 0.34.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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. 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.

2. 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.
3. 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
4. W. Busyatras, A. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat "Estimating Track Mis-Registration Based on Readback Signal" in Bit-Patterned Media Recording Systems" in Proceeding ITC-CSCC 2014, Thailand.
5. N. Rungtalay and C. Warisarn, "An Alternative Solution for Hard Disk Drive Classification Process Improvement," in Bit-Patterned Media Recording Systems" in Proceeding ITC-CSCC 2014, Thailand.
6. A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Study of 2D Coding Schemes for ISI and ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording Channels," in Bit-Patterned Media Recording Systems" in Proceeding ITC-CSCC 2014, Thailand.
7. 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
8. 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
9. 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

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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
14. 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.
15. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" ECTI-CIT Trans., Nov. 2012.
16. Warisarn C., Supnithi P. "A Novel IIR Equalizer Design for Perpendicular Recording Systems with Media Jitter Noise." KRU Res. J., 17(3), Jun. 2012. pp. 339-348.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.