

การจำลองผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TMR ใน
ระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

MODELING THE EFFECT OF THERMAL RESPONSE OF TMR HEAD IN
PERPENDICULAR MAGNETIC RECORDING SYSTEM

สุวัฒนา ธรรมคำ
SUWATANA THAMAKAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล
วิทยาลัยวิศวกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-DS-M-001-03

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ใน
ระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

MODELING THE EFFECT OF THERMAL RESPONSE OF TGMR HEAD IN
PERPENDICULAR MAGNETIC RECORDING SYSTEM



T117059

สุวัฒนา ธรรมคำ

SUWATANA THAMAKAM

สาขาหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-DS-M-001-03

**MODELING THE EFFECT OF THERMAL RESPONSE OF TGMR
HEAD IN PERPENDICULAR MAGNETIC RECORDING SYSTEM**

SUWATANA THAMAKAM

**A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN DATA STORAGE TECHNOLOGY
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
20010
KMITL-2010-DS-M-001-03**

COPYRIGHT 2010

COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

Thesis Title MODELING THE EFFECT OF THERMAL RESPONSE OF TGMR HEAD IN PERPENDICULAR MAGNETIC RECORDING SYSTEM

นักศึกษา นายสุวัฒนา ธรรมคำ

รหัสประจำตัว 51068901

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-DS-M-001-03

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน	
ผศ.ดร.จิรนุช เสี่ยมศักดิ์	
ดร.กสิน วิเชียรชม	
ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	
รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 16 ตุลาคม 2553 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ ธนชยานนท์)

คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

วันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ 2553

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 09 เดือน ม.ค พ.ศ 53
ลงชื่อ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง
นักศึกษา	นายสุวัฒนา ธรรมคำ
รหัสประจำตัว	51068901
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอแบบจำลองผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์ (MgOx barrier) และสมการคณิตศาสตร์ของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบดังกล่าวจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกข้อมูลซึ่งเป็นผลทำให้ทั้งพื้นผิวของสื่อบันทึกและหัวอ่านร้อนขึ้นทำให้คุณสมบัติความต้านทานของหัวอ่านเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลทำให้สัญญาณอ่านกลับเกิดการผิดเพี้ยนไป และทำให้เส้นเชื่อมฐาน (Baseline) ของสัญญาณอ่านกลับเลื่อน (Shift) อีกทั้งยังทำให้เกิดแมกนีโตสตรักชัน (Magnetostriction) ตอบสนองแบบสองขั้ว ซึ่งทำให้ผลตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่แตกต่างจากหัวอ่าน MR แบบเดิมในอดีตที่เกิดจากความขรุขระเชิงความร้อน ซึ่งจะส่งผลทำให้สัญญาณอ่านกลับผิดเพี้ยนไปจากเดิมและทำให้เกิดการถอดรหัสข้อมูลในเซกเตอร์นั้นผิดพลาดได้ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสมการคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอมีความสอดคล้องกับสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ที่เกิดขึ้นจริงในงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบอัลกอริทึมใหม่เพื่อใช้ในการตรวจหาและแก้ไขข้อผิดพลาดดังกล่าวในระบบช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

Thesis	Modeling the effect of thermal response of TGMR head in perpendicular magnetic recording system
Student	Mr. Suwatana Thamakam
Student ID.	51068901
Degree	Master of Engineering
Program	Data Storage of Technology
Year	2010
Thesis Advisor	Associate Professor Pornchai Supnithi, Ph. D. Assistant Professor Piya Kovintavewat, Ph. D.

Abstract

This thesis proposes a mathematical model for the thermal response induced by the head/disk interaction in the TGMR head with an MgO barrier. The head/disk interaction under such conditions will result in a thermal response, which causes both the surface of the head and the disk to be heated. The resistive properties of the TGMR sensors change and distort the readback signal which causes a baseline shift, thus causing problems during data recovery. Because of the TGMR head, the thermal response exhibits a bi-polar magnetostriction on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This magnetostriction causes the thermal response to appear differently from the classical thermal response caused by thermal asperity, and it can distort the readback signal to the extent of causing a possible sector read failure. Results show that the proposed mathematical model coincides with the actual thermal response present in today's hard disk drives. This model enables the development of new algorithms for detecting and correcting thermal response, which will in turn improve the performance of the current HDDs.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล และการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เลขที่ HDD-01-51-06M ภายใต้ชื่อโครงการ I/U CRC (Industry/University Cooperate Research Center in College of data storage innovation)

ขอขอบคุณ บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ทำงานและข้อมูลในการทำวิจัย ตลอดจนผู้ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และ รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุวัฒนา ธรรมคำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับงานวิจัย.....	5
2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive).....	5
2.1.1 เทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	5
2.1.2 การบันทึกข้อมูลและการอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	5
2.2 โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	6
2.2.1 การบันทึกระบบแม่เหล็ก.....	6
2.2.2 โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	7
2.3 แบบจำลองสัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal).....	9
2.4 ความขรุขระเชิงความร้อน (Thermal Asperity).....	15
2.5 อัลกอริทึมในการจัดการกับ TA (BGMS: Background Media Scan Algorithm).....	19
2.6 โครงสร้างของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์.....	19
2.7 การตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน (Thermal Response).....	21
2.8 แมกนีโตสตรักชันที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ (Magnetostriction).....	24
2.8.1 ผลกระทบของแมกนีโตสตรักชันต่อแอนไอโซโทรปี.....	24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก.....	27
3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก.....	27
3.1.1 แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง.....	27
3.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ.....	28
3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่นำเสนอ.....	29
3.2.1 การตรวจหาสัญญาณ TR (Thermal Response Detection).....	30
3.2.2 การแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TR (Thermal Response Correction).....	31
3.3 การออกแบบอ็ควอลไลเซอร์ (Target and Equalizer Designed).....	31
3.3.1 เงื่อนไข $h_0 = 1$ (Monic Constraint).....	32
3.3.2 เงื่อนไขบังคับทาร์เก็ตเฉพาะ.....	34
3.4 วงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector).....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	38
4.1 การออกแบบการทดลอง.....	38
4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.2 ผลการทดลอง.....	40
4.2.1 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับ สื่อบันทึก.....	40
4.2.2 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโซนบนสื่อบันทึก.....	42
4.2.3 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	42
4.2.4 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของหัวแม่เหล็กในการเขียนข้อมูล.....	43
4.3 สมการคณิตศาสตร์ของการตอบสนองเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMR.....	43
4.4 การลดผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบทาร์เก็ต PR แบบต่างๆ.....	15
4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	39
4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR จากข้อมูลทั้งหมด 200 แซมเปิลในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่น (50 แซมเปิล/รุ่น).....	48

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การบันทึกข้อมูลและการอ่านข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	6
2.2 ลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน.....	7
2.3 ลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง.....	7
2.4 ลักษณะของสัญญาณที่เขียนลงบนสื่อบันทึก.....	8
2.5 แทร็กและเซกเตอร์ของสื่อบันทึกข้อมูล.....	8
2.6 การจัดเก็บข้อมูลในแต่ละเซกเตอร์.....	8
2.7 สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกแบบแนวนอน.....	11
2.8 สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง.....	11
2.9 ผลตอบสนองไคบิตของระบบการบันทึกแบบแนวนอน.....	12
2.10 ผลตอบสนองไคบิตของระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง.....	13
2.11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ไคบิตของระบบการบันทึกแบบแนวนอน.....	13
2.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ไคบิตของระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง.....	14
2.13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของทาร์เก็ตแบบ PR สำหรับช่องสัญญาณการบันทึก แบบแนวนอน.....	14
2.14 ผลตอบสนองความถี่ของทาร์เก็ตแบบ PR สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง.....	15
2.15 สัญญาณ TA ที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก.....	16
2.16 ผลกระทบจาก TA ในสัญญาณอ่านกลับที่ความรุนแรงแบบต่างๆ.....	17
2.17 สมรรถนะของระบบที่ผลกระทบจาก TA ที่ความรุนแรงแบบต่างๆ.....	17
2.18 การทำงานของอัลกอริทึม BGMS (Background Media Scan Algorithm).....	18
2.19 โครงสร้างของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่เทียบกับหัวอ่าน GMR.....	20
2.20 องค์ประกอบของหัวอ่าน TGMR ใช้เลเซอร์แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์.....	20
2.21 การเรียงตัวของอะตอมในผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นจุดเรียกว่าจุดที่แลททิซ.....	22
2.22 การตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน.....	22
2.23 เส้นทางแผ่ความร้อนรอบๆ ส่วนประกอบของการอ่านของหัวอ่าน TGMR.....	23
2.24 ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction Phenomenon).....	24
2.25 แมกนีโตสตริกชันหรือการยืดขยายและแรงกดดันมีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี.....	25
3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง.....	28
3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ.....	28
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณการลดผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน ของหัวอ่าน TGMR ในช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กสำหรับการออกแบบทาร์เก็ตและ อีควอไลเซอร์.....	32
3.5 แบบจำลองช่องสัญญาณพื้นฐานของเทคนิค PRML.....	34
3.6 การทำงานของเทอร์ลิส.....	35
3.7 แผนภาพเทอร์ลิสของช่องสัญญาณ PR4.....	36
4.1 การออกแบบการทดลอง.....	39
4.2 การทดลองลดความดันรอบ ๆ หัวอ่าน TGMR.....	40
4.3 ผลของสัญญาณอ่านกลับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก.....	41
4.4 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง โชนบนสื่อบันทึก.....	41
4.5 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	41
4.6 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงหัวแม่เหล็ก.....	42
4.7 แบบจำลองของการตอบสนองเชิงความร้อนในหัวอ่าน TGMR แบบใหม่.....	44
4.8 สัญญาณอ่านกลับจริงที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR และการประมาณค่าด้วยวิธีปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง.....	45
4.9 การประมาณค่าสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนในสมการที่ 4.1 ด้วยการปรับค่า T_r ที่แตกต่างกัน.....	45
4.10 ฮิสโทแกรมของสัญญาณอ่านกลับแสดงช่วงที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่นที่กำลังผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม.....	47
4.11 ฮิสโทแกรมของสัญญาณอ่านกลับแสดงช่วงเวลาการเกิดแมกนีโตสตรัคชันของหัวอ่าน TGMR ในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่นที่กำลังผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์.....	47
4.12 คุณลักษณะสัญญาณการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในปัจจุบัน.....	48
4.13 คุณลักษณะสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน.....	48
4.14 แบบจำลองการลดผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง.....	49
4.15 ประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TR ในรูปแบบ BER กับ SNR (dB).....	49
4.16 ประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TR ในรูปแบบ BER กับแอมพลิจูด.....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการอ่านข้อมูลหัวอ่านแบบ MR (Magneto-resistive) จะรับรู้การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนสถานะของสภาพความเป็นแม่เหล็กตามลักษณะของข้อมูลที่เขียนลงไปบนสื่อบันทึกทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า สัญญาณอ่านกลับ (Read-back Signal) ซึ่งในกรณีที่พื้นผิวของสื่อบันทึกมีความขรุขระ (Asperity) เมื่อ สไลเดอร์เคลื่อนที่มากกระทบกับบริเวณที่มีความขรุขระจะทำให้พื้นผิวของตัวสไลเดอร์และที่ปลายของส่วนที่ขรุขระถูกทำให้ร้อนขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินชั่วคราว (Transient Voltage) ที่เรียกว่าความขรุขระเชิงความร้อน (TA: Thermal Asperity) เข้าไปในสัญญาณอ่านกลับที่หัวอ่านซึ่ง TA ถือว่าเป็นปัญหาสำคัญต่อกระบวนการตรวจหาข้อมูล (Detection) เพราะว่า TA จะส่งผลทำให้การอ่านข้อมูลในเซกเตอร์เกิดความล้มเหลว (Sector Read Failure) ได้ในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูง แต่จากการที่ได้ศึกษา TA ที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ปรากฏว่าปัจจุบันปัญหานี้ได้รับการป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพด้วยอัลกอริทึมใหม่ของบริษัทซีเกทที่เรียกว่า BGMS (Background Media Scan) [4] ซึ่งได้ทำการจดสิทธิบัตรไว้เรียบร้อยแล้ว อัลกอริทึมนี้จะช่วยตรวจสอบสื่อบันทึกในขณะที่ผู้ใช้ (User) ไม่ใช้งานฮาร์ดดิสก์หรือเปิดคอมพิวเตอร์ทิ้งไว้วันาน ๆ โดยไม่ได้ทำอะไร (Idle) เมื่อตรวจสอบและพบบริเวณที่วิกฤตหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาก็จะทำการย้ายข้อมูลไปไว้ที่อื่นแล้วทำการทำเครื่องหมายห้ามใช้งานตำแหน่งนั้นเป็นการถาวร

แต่ก็ยังมีปรากฏการณ์การตอบสนองเชิงความร้อน (TR: Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่อีกประเภทหนึ่ง ที่เกิดจากการที่หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึกข้อมูลในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล ซึ่งเป็นผลทำให้พื้นผิวของสื่อบันทึกและสไลเดอร์ร้อนขึ้นอย่างกระทันหัน ความร้อนนี้จะทำให้คุณสมบัติความต้านทานของหัวอ่านเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลทำให้สัญญาณอ่านกลับที่ได้เกิดการผิดเพี้ยนไปจากเดิม ผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนหรือความร้อนชั่วคราวที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านนี้มีผลกระทบโดยตรงทั้งต่อประสิทธิภาพของการบันทึกข้อมูลและความน่าเชื่อถือ หากไม่ได้รับการระมัดระวังและป้องกันไว้ก่อนชุดของสัญญาณอ่านกลับที่ผิดพลาดนี้สามารถเกินความสามารถของวงจรเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาดได้ (Error Correction Code (ECC) encoder) เป็นผลทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลกลับคืนมาได้

ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ถือได้ว่าเป็นปัญหาที่รุนแรงต่อระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งเป็นอย่างยิ่ง

เนื่องจากสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว ซึ่งใช้แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์ (MgOx barrier) จะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกับในอดีตที่อธิบายโดย Stupp et al. [8] ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР แบบใหม่ในปัจจุบันจะนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบอัลกอริทึมใหม่เพื่อใช้ในการตรวจหาและแก้ไขข้อผิดพลาดดังกล่าวในระบบช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังที่จะศึกษาพื้นฐานการทำงานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, ศึกษาคุณลักษณะของ TA ที่เกิดขึ้นกับหัวอ่านแบบเดิมที่เป็น MR (Magneto-resistive) และเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับและแก้ไข TA แบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР แบบใหม่ที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำเลเยอร์แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่าน โดยให้แอมพลิจูดของสัญญาณที่สูงขึ้นและยังช่วยขจัดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การตอบสนองเชิงความร้อน (Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMР แบบใหม่มีลักษณะที่แตกต่างไปจากหัวอ่านแบบ MR แบบเดิมในอดีต ดังนั้นการศึกษาถึงคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР แบบใหม่จะเป็นประโยชน์มากในการพัฒนา อัลกอริทึมเพื่อตรวจจับและแก้ไขผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โดยทั่วไปแล้วการทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกันระหว่างสไลเดอร์กับความขรุขระเชิงความร้อน (Thermal Asperity) บนพื้นผิวของสื่อบันทึกจะไม่เกิดขึ้นที่ส่วนประกอบ (Element) ของการอ่านโดยตรง แรกเริ่มของการสัมผัสกันจะเกิดขึ้นที่สไลเดอร์ ขณะที่ความขรุขระเชิงความร้อนบนสื่อบันทึกกำลังหมุนไปยังสไลเดอร์การทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกันระหว่างความขรุขระบนสื่อบันทึกกับสไลเดอร์จะเกิดขึ้น เป็นผลทำให้ส่วนปลายของความขรุขระบนสื่อบันทึกและสไลเดอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างกะทันหัน ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ถืออาศัยแนวคิดดังกล่าวมาใช้ด้วยเช่นกันแต่ได้ทำการปรับปรุงให้เข้ากับหัวอ่าน TGMР แบบใหม่ที่เกิดการสัมผัสกับพื้นผิวของสื่อบันทึกที่ไม่มี ความขรุขระเชิงความร้อน อยู่บนพื้นผิวสื่อบันทึก ซึ่งกระบวนการในการแผ่ความร้อนสามารถ

อธิบายตามแนวคิดของ Mallary's realization [9] ส่วนการศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณอ่านกลับที่เกิดจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่จะใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง (2nd-Order Polynomial)

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบจำลองผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่และสมการคณิตศาสตร์ของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบที่มีการตรวจจับและแก้ไขปัญหากับระบบที่ไม่มีการป้องกันปัญหาดังกล่าว โดยเริ่มทำการศึกษาดังแต่พื้นฐานการทำงานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, ศึกษาคุณลักษณะของ TA ที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน MR แบบเดิมในอดีตและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งรวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับและแก้ไข TA แบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยการจำลองคุณลักษณะการตอบสนองเชิงความร้อนของสัญญาณอ่านกลับและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กนั้น จะใช้โปรแกรม MATLAB

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับพื้นฐานการทำงานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ความขรุขระเชิงความร้อน อัลกอริทึม BGMS โครงสร้างและกระบวนการแผ่ความร้อนของหัวอ่าน TGMR รวมถึงแนวคิดเกี่ยวกับแมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบเสมือนจริง (Realistic Channel Model), แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ (Ideal Channel Model), และแบบจำลองช่องสัญญาณที่นำเสนอ รวมถึงเทคนิคในการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงจากการตอบสนองเชิงความร้อนที่กล่าวไว้

ข้างต้น รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบที่มีการตรวจจับและแก้ไขปัญหากับระบบที่ไม่มีการป้องกันปัญหาดังกล่าว

บทที่ 5 เป็นบทสรุปของการวิจัยและแนวทางในการนำงานวิจัยไปพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับพื้นฐานการทำงานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ความขรุขระเชิงความร้อน อัลกอริทึม BGMS โครงสร้างและกระบวนการแผ่ความร้อนของหัวอ่าน TGMР รวมถึงแนวคิดเกี่ยวกับแมกนีโตสตรักชัน (Magnetostriction) ที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMР แบบใหม่ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (Hard Disk Drive)

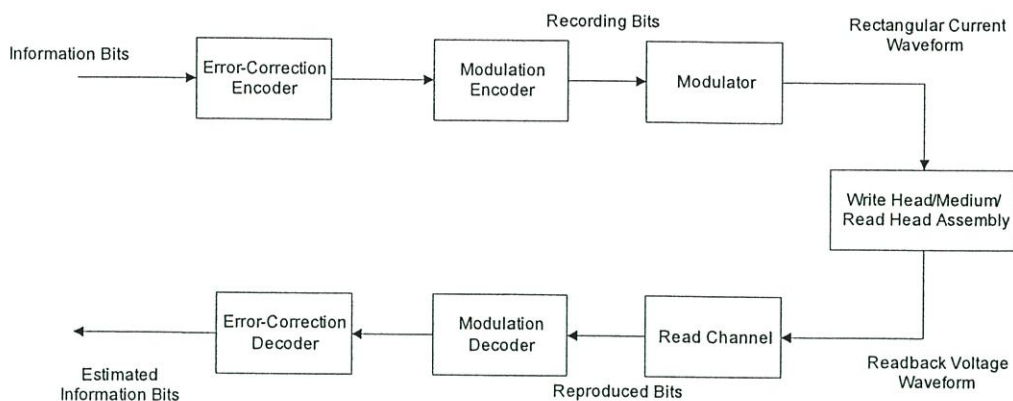
การบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก โดยในปัจจุบัน เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็ก ได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของเทคโนโลยีการบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โครงสร้างของการจัดเก็บข้อมูล

2.1.1 เทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในปี ค.ศ. 1888 วิศวกรชื่อ Oberlin Smith ได้คิดค้นเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก และได้ถูกนำมาแสดงเป็นครั้งแรกโดยวิศวกรชื่อ Valdemar Poulsen ในปี ค.ศ. 1898 ในรูปของ “Telegra-phonе” และได้มีการวางจำหน่ายฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตัวแรกของโลกในปี ค.ศ. 1956 โดยบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) โดยใช้ชื่อว่า “IBM 305 RAMAC” สามารถบันทึกข้อมูลได้ 5 เมกะไบต์ (MB: Megabyte) โดยใช้จานบันทึกข้อมูลทั้งหมด 50 แผ่น แต่ละแผ่นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 นิ้ว โดยมีความจุพื้นที่เท่ากับ 2 Kbits/in^2 (Kilobits per Square Inch) และราคาต่อหนึ่งเมกะไบต์เท่ากับ \$10,000 US (ดอลลาร์สหรัฐ) โดยที่ปัจจุบันสามารถบันทึกข้อมูลได้ถึง 1 เทราไบต์ (TB: Terabyte) และความจุต่อพื้นที่มีค่าเท่ากับ 420 Gbits/in^2 (Gigabits per Square Inch) สำหรับราคาต่อหนึ่งเมกะไบต์นั้นเท่ากับ \$0.0002 US สำหรับในปัจจุบันเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้กำลังพัฒนาเทคโนโลยีที่เรียกว่า “Patterned Media” ซึ่งสามารถทำให้จัดเก็บข้อมูลได้สูงสุดถึง 2.5 Tbits/in^2 [3]

2.1.2 การบันทึกข้อมูลและการอ่านของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

จากภาพที่ 2.1 เมื่อข้อมูลบิตที่ต้องการบันทึกถูกเข้าด้วยรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (ECC: Error Correction Code) ตัวอย่างเช่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือรหัส RS (Reed Solomon Code) หรือรหัส LDPC (Low Density Parity Check) เป็นต้นและหลังจากนั้นถูกเข้ารหัสอีกครั้งกับรหัสมอดูเลชัน (Modulation Code) ตัวอย่างรหัสที่ใช้ในปัจจุบันคือรหัส RLL (Run Length Limited) ทำให้ได้



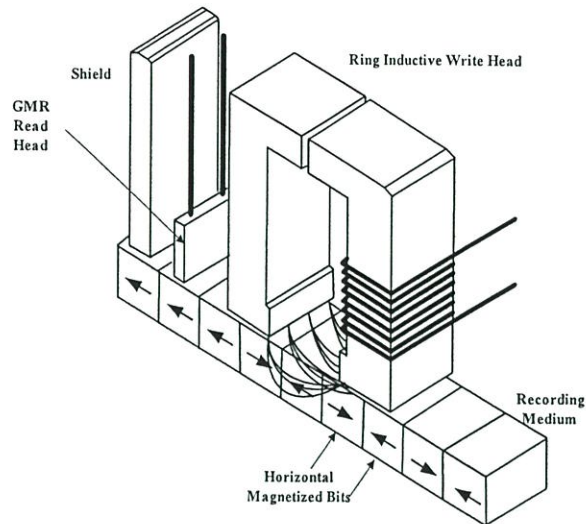
ภาพที่ 2.1 การบันทึกข้อมูลและการอ่านข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [2]

บิตข้อมูลที่น่าไปบันทึกลงบนสื่อบันทึก โดยหัวเขียนทำการเขียนข้อมูลที่ต้องการบันทึกลงบนสื่อบันทึกข้อมูล (Media) ที่ภาครีบบหัวอ่านทำหน้าที่ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กและข้อมูลถูกทำการส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณการอ่าน (Read Channel) เพื่อทำการปรับระดับสัญญาณและตรวจหาลำดับบิตที่น่าจะเป็นมากที่สุดก่อนส่งไปวงจรดีมอดูเลชัน (Demodulation) และสุดท้ายถูกถอดรหัสกับรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดทำให้ได้บิตข้อมูลที่ต้องการ

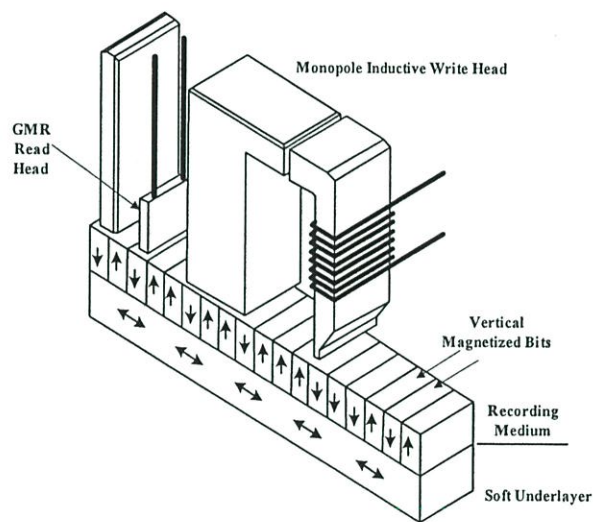
2.2 โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.2.1 การบันทึกระบบแม่เหล็ก

สำหรับการบันทึกเชิงแม่เหล็กสำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital) โดยที่การจัดเก็บข้อมูลอาศัยหลักการของแม่เหล็กที่มีทิศอยู่สองทิศและใช้การเปลี่ยนแปลงของทิศของสนามแม่เหล็กใดทิศหนึ่งของแม่เหล็กสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นบิต “1” และบิต “0” จากภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแวนอน และในภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนสำหรับการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กนั้นจะทำการเขียนข้อมูลด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งในกระบวนการเขียนข้อมูลจะอยู่ในรูปของ NRZI ดังแสดงในภาพที่ 2.4 คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลทำให้เปลี่ยนสถานะของการเขียนข้อมูล และอ่านข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันชั่วขณะเช่นกัน



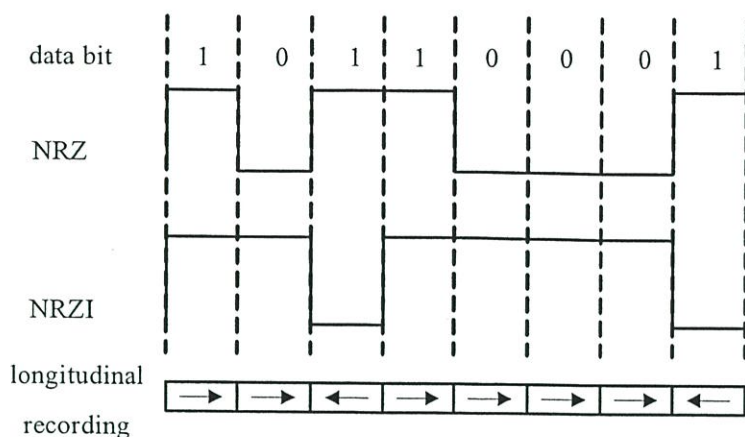
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน [1]



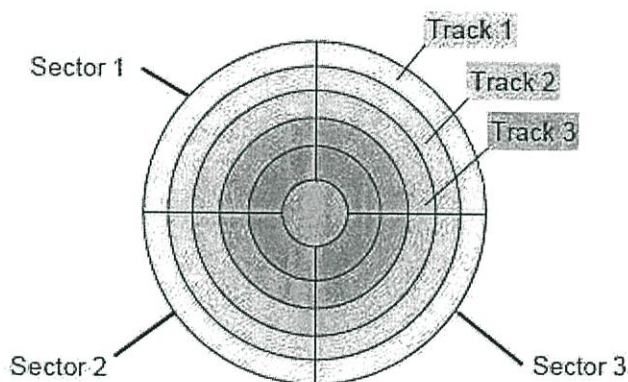
ภาพที่ 2.3 ลักษณะของหัวอ่านและหัวเขียนของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง [1]

2.2.2 โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

สำหรับ โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ข้อมูลถูกเก็บเป็นเซกเตอร์โดยแต่ละเซกเตอร์มีการเก็บข้อมูลจำนวน 512 ไบต์ หรือ 4096 บิต ซึ่งในปัจจุบันขนาดเซกเตอร์สามารถขยายได้ถึง 4k ไบต์ หรือ 32k บิต จากภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะของแทร็กและเซกเตอร์บนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และภาพที่ 2.6 แสดงการจัดเก็บข้อมูลในแต่ละเซกเตอร์



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของสัญญาณที่เขียนลงบนสื่อบันทึก [1]



ภาพที่ 2.5 แทร็กและเซกเตอร์ของสื่อบันทึกข้อมูล [1]

Preamble	Address Mark	ID CHS	Preamble	Address	Data 512 bytes	ECC
----------	--------------	--------	----------	---------	----------------	-----

ภาพที่ 2.6 การจัดเก็บข้อมูลในแต่ละเซกเตอร์ [1]

โดยที่แต่ละเซกเตอร์มีการเก็บที่อยู่หรือเรียกว่า ID CHS ตัวอย่างเช่น ID CHS = 200/2/450 มีความหมายว่าเป็นเซกเตอร์ที่ 450 อยู่ในแทร็กที่ 200 ของหัวอ่านที่ 2 เป็นต้น และพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟหรือความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal Density)

$$A_d = L_d T_d \quad (2.1)$$

เมื่อ A_d คือ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่มีหน่วยเป็นบิตต่อตารางนิ้ว (BPI: Bit per Square Inch), L_d คือ ความหนาแน่นเชิงเส้นมีหน่วยเป็นบิตต่อนิ้ว (Bit per Inch), T_d คือ ความหนาแน่นเชิงแทร็กต่อ

ตารางนิ้ว (TPI: Track per Square Inch) ความหนาแน่นเชิงพื้นที่หรือความสามารถในการจัดเก็บข้อมูล ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มค่า L_d และ T_d ในสมการที่ (2.1) การเพิ่ม L_d และ T_d ทำให้พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลต่อบิตน้อยลง ซึ่งเป็นเรื่องยากในการสร้างสื่อบันทึก, หัวอ่านและเขียน, ช่องสัญญาณการอ่านและอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานได้อย่างเป็นที่น่าเชื่อถือ

2.3 แบบจำลองสัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal)

เมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่ง ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็กบนสื่อบันทึก หัวอ่านให้สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ หรือที่เรียกว่า “ผลการตอบสนองของการเปลี่ยนสถานะ (Transition Response)” $g(t)$ หรือ $-g(t)$ ตามทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็ก สำหรับระบบการบันทึกแวนอน สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ (Transition Pulse) หรือสัญญาณพัลส์ Lorentzian สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$g(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2t}{PW_{50}}\right)^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ PW_{50} คือ ความกว้างของพัลส์ $g(t)$ ณ ตำแหน่งที่สัญญาณมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด สำหรับการบันทึกแบบแนวตั้งสัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$g(t) = \operatorname{erf}\left(\frac{2t\sqrt{\ln 2}}{PW_{50}}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ $\operatorname{erf}(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันข้อผิดพลาด (Error Function) ที่นิยามโดย $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, และ PW_{50} คือ ความกว้างของพัลส์ $g'(t)$ หรือ อนุพันธ์ของ $g(t)$ วัด ณ ตำแหน่งที่สัญญาณพัลส์มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด สำหรับการบันทึกข้อมูลของระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ความหนาแน่นของการบันทึกแบบนอร์มอลไลซ์ (ND: Normalized Recording Density) นิยามโดย

$$ND = \frac{PW_{50}}{T} \quad (2.4)$$

เมื่อ ND คือ ความหนาแน่นของข้อมูล, และ T คือ คาบเวลาของข้อมูลหนึ่งบิตหรือบิตเซลล์ (Bit Cell) ในทางปฏิบัติค่า ND บ่งบอกว่าบริเวณ PW_{50} สามารถที่จัดเก็บข้อมูลได้กี่บิต เมื่อกำหนดให้ T เป็นค่าคงที่และค่า PW_{50} หรือ ND เพิ่ม แสดงว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถจุข้อมูลได้มากขึ้นในภาพที่ 2.7 แสดงผลตอบสนองของพัลส์เปลี่ยนสถานะสำหรับการบันทึกแวนอนที่ได้จากสมการที่ (2.2)

และภาพที่ 2.8 แสดงผลตอบสนองของพัลส์เปลี่ยนสถานะสำหรับการบันทึกแนวตั้งที่ได้จากสมการที่ (2.3) ณ ระดับของค่า ND ต่างๆ จากภาพที่ 2.7 พบว่าสัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของทั้งสองระบบครอบคลุมช่วงหลายบิตเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ND เพิ่มขึ้น หรือ ISI รุนแรงมากขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโอกาสที่สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะที่อยู่ใกล้กันทับซ้อนกันมีโอกาสเป็นไปได้สูงกว่า โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง ND และ PW_{50} ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการที่ (2.4)

สำหรับสัญญาณพัลส์ไคบิต (Dibit Pulse) หรือ ผลตอบสนองไคบิต (Dibit Response) เกิดขึ้นเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่มีตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงสถานะติดต่อกันสองครั้งทำให้ได้สัญญาณพัลส์สุทริซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$m(t) = g(t) - g(t - T) \quad (2.5)$$

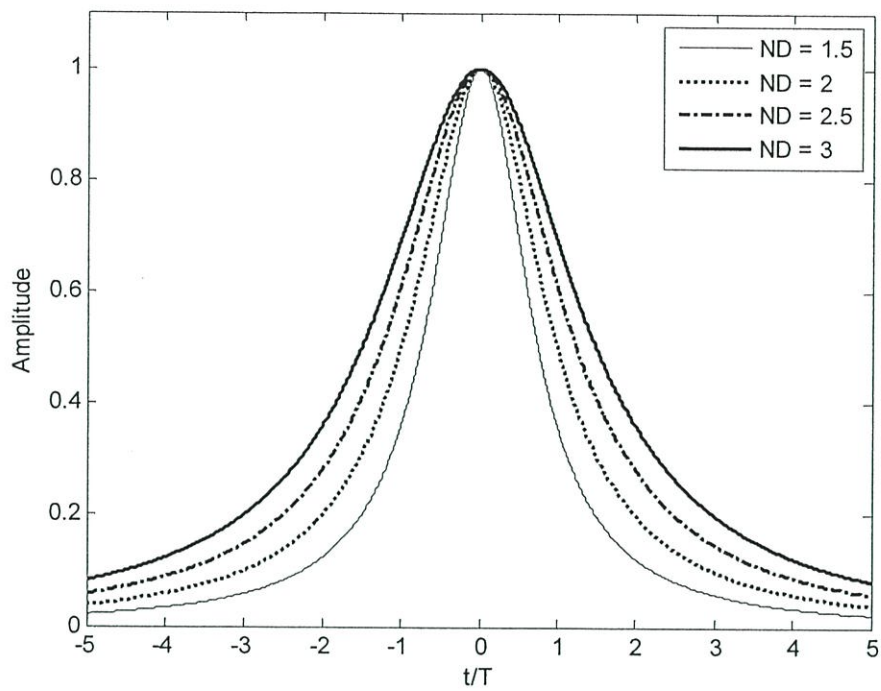
เมื่อ $m(t)$ คือ ผลตอบสนองไคบิต สำหรับผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ของผลตอบสนองไคบิต สามารถหาได้โดยการแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา (Continuous-time Fourier Transform) ของสัญญาณ $m(t)$ (ผลตอบสนองไคบิต) สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวอนได้นิยามว่า

$$M(\Omega) = \exp\{-\pi |\Omega| ND\} (1 - \exp\{-j2\pi\Omega\}) \quad (2.6)$$

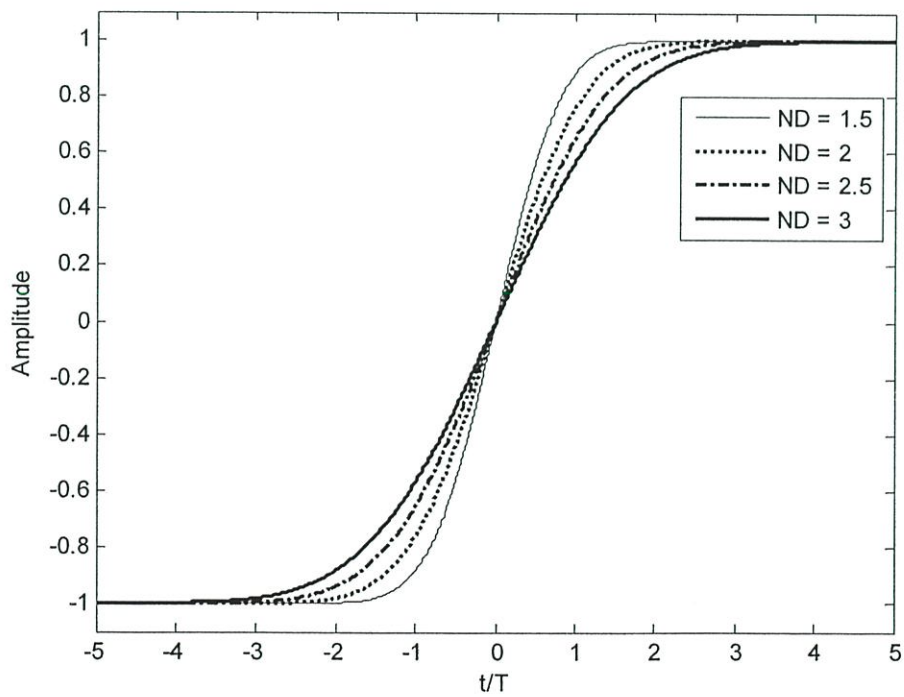
เมื่อ $\exp\{.\}$ คือ ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Exponential Function), และ $j = \sqrt{-1}$ คือ หน่วยจินตภาพ (Imaginary Unit) ในขณะที่ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ $m(t)$ สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งได้นิยามว่า

$$M(\Omega) = \frac{T}{j\pi\Omega} \exp\left\{-\frac{\pi^2\Omega^2 ND^2}{\ln(16)}\right\} (1 - \exp\{-j2\pi\Omega\}) \quad (2.7)$$

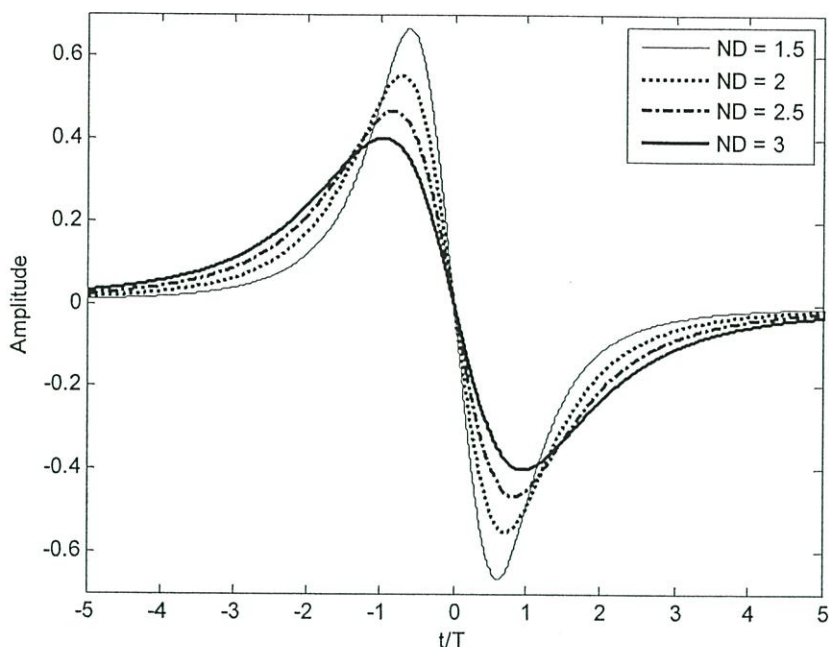
เมื่อ $\Omega = fT$ คือ ความถี่แบบนอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency), f คือ ความถี่ที่มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz), $|x|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ (Absolute Value) ของ x , $\ln(.)$ คือ ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวอน (Longitudinal Recording) ทาร์เก็ตแบบตอบสนองบางส่วน หรือที่เรียกว่า “ทาร์เก็ตแบบ PR (Partial Response)” เป็นที่ยอมรับสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวอนมีรูปสมการเป็น



ภาพที่ 2.7 สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกแบบแวนอน [1]



ภาพที่ 2.8 สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง [1]



ภาพที่ 2.9 ผลตอบสนองโดบิตของระบบการบันทึกแบบแนวนอน [1]

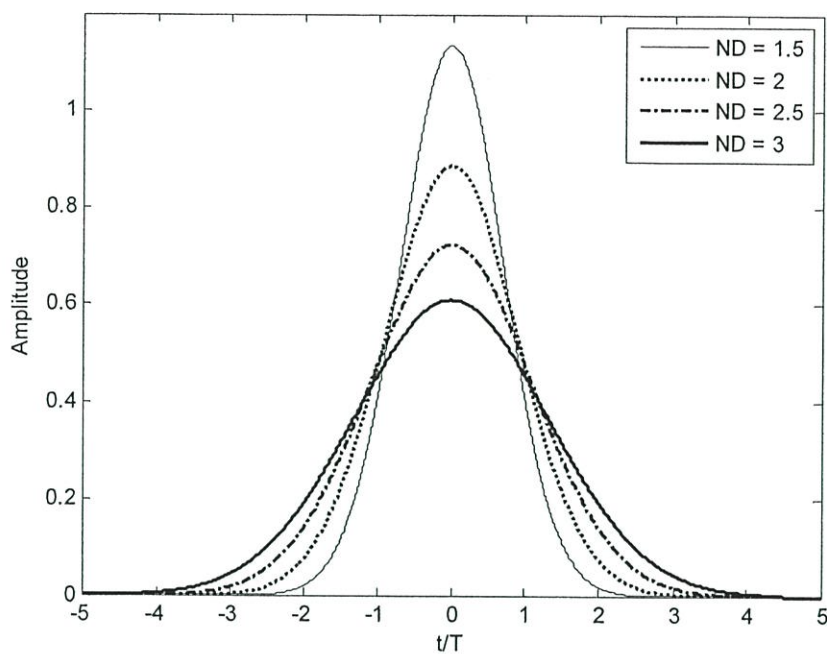
$$H(D) = (1-D)(1+D)^n \quad (2.8)$$

เมื่อ $H(D)$ คือ ทาร์เก็ตของช่องสัญญาณ, D คือ ตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย (Delay Operator) และ n คือ จำนวนเต็มบวก สำหรับทาร์เก็ตแบบ PR ของช่องสัญญาณการบันทึกแนวตั้ง นั้นเขียนอยู่ในรูปของสมการ

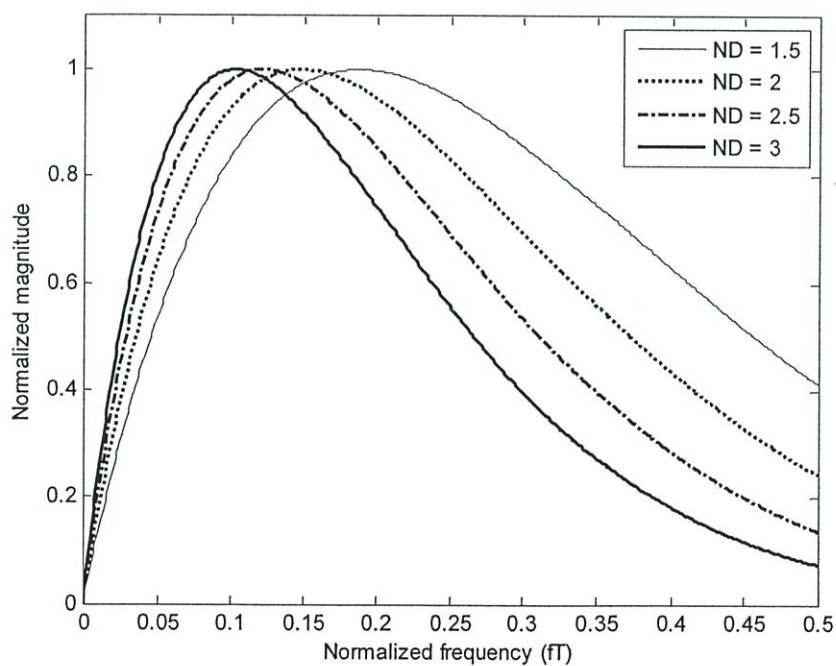
$$H(D) = (1+D)^n \quad (2.9)$$

สำหรับระบบการบันทึกแบบแนวตั้งจะมีองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสตรง จึงทำให้ไม่มีพจน์ $(1-D)$ โดยชนิดของทาร์เก็ตแบบ PR ของช่องสัญญาณการบันทึกแนวนอนและแนวตั้งเป็นไปตามตารางที่ 2.1

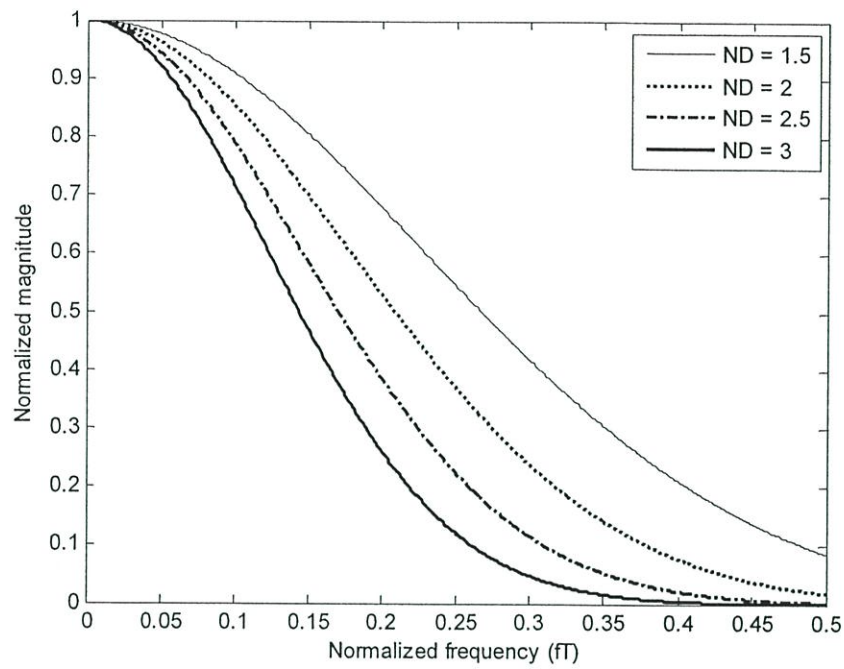
ในภาพที่ 2.13 เป็นผลตอบสนองเชิงความถี่ของทาร์เก็ตแบบต่างๆของช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวนอนและในภาพที่ 2.14 เป็นผลตอบสนองเชิงความถี่ของทาร์เก็ตแบบต่างๆของช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง



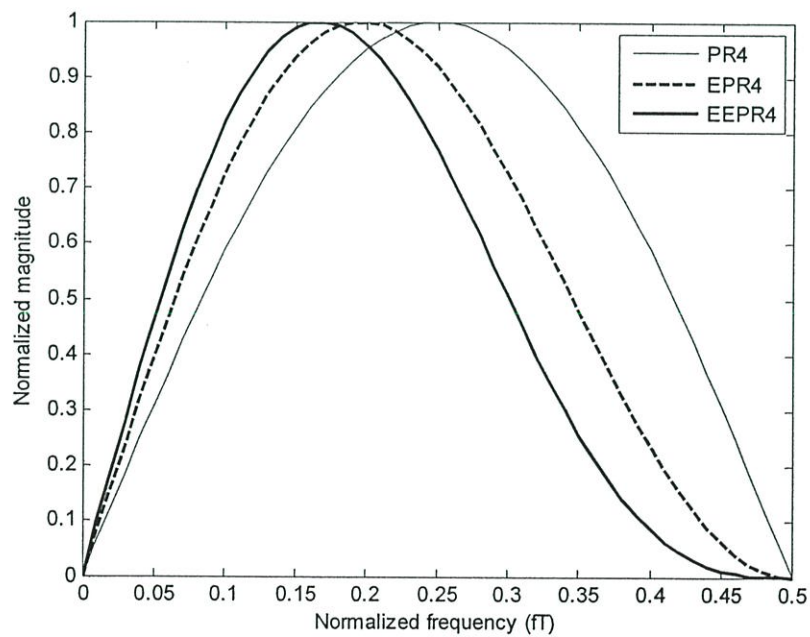
ภาพที่ 2.10 ผลตอบสนองไคบิตของระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง [1]



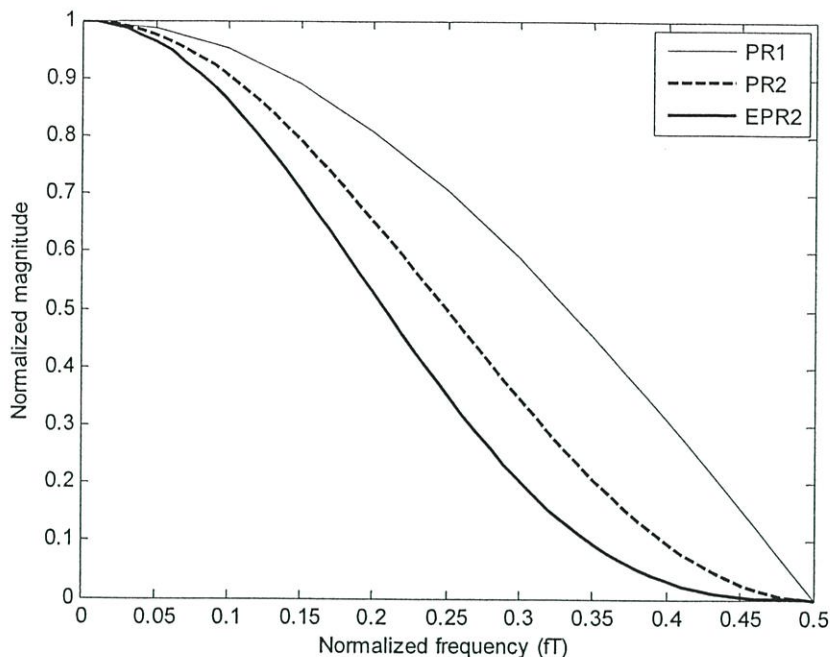
ภาพที่ 2.11 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ไคบิตของระบบบันทึกแบบแนวอน [1]



ภาพที่ 2.12 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์โคมบิตของระบบบันทึกแบบแนวตั้ง [1]



ภาพที่ 2.13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของทาร์เก็ตแบบ PR สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวนอน [1]



ภาพที่ 2.14 ผลตอบสนองความถี่ทาร์เก็ตแบบ PR สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง [1]

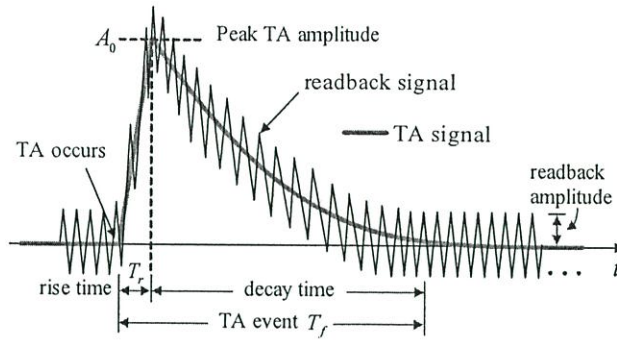
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบทาร์เก็ต PR แบบต่างๆ [2]

ทาร์เก็ตแบบ PR	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
การบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง	PR1 [1 1] $H(D) = 1+D$	PR2 [1 2 1] $H(D) = (1+2D+D^2)$	EPR2 [1 3 3 1] $H(D) = (1+3D+3D^2+D^3)$
การบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน	PR4 [1 0 -1] $H(D) = 1-D^2$	EPR4 [1 1 -1 -1] $H(D) = (1+D-D^2-D^3)$	EEPR4 [1 2 0 -2 -1] $H(D) = (1+2D-2D^3-D^4)$

นอกจากนี้ยังมีทาร์เก็ตอีกชนิดหนึ่งคือ ทาร์เก็ตแบบ GPR (Generalized Partial Response Target) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตเป็นเลขจำนวนจริง โดยทาร์เก็ตแบบ GPR สามารถออกแบบได้ในหัวข้อที่ 2.3 สำหรับสมรรถนะโดยรวมของทาร์เก็ตแบบ GPR ดีกว่าทาร์เก็ตแบบ PR เมื่อใช้ทาร์เก็ตประสิทธิผล (Effective Target) คือ ใช้จำนวนแท็ปของทาร์เก็ตเท่ากัน

2.4 ความขรุขระเชิงความร้อน (Thermal Asperity)

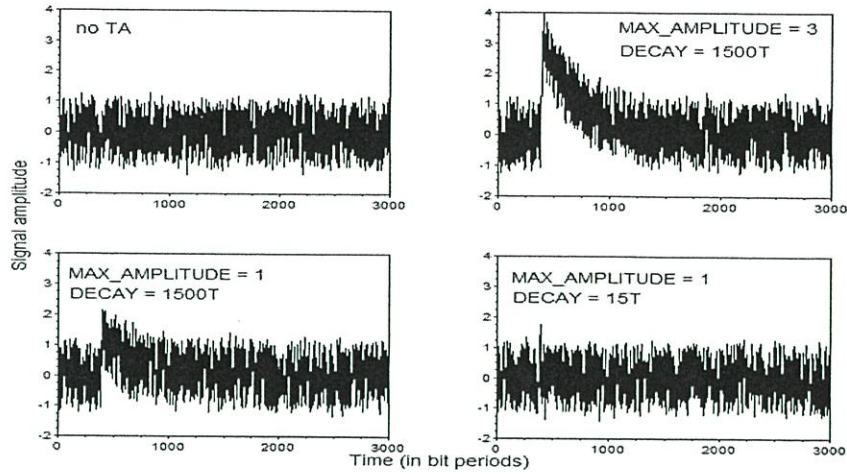
ในกระบวนการอ่านข้อมูล หัวอ่านแบบ MR (Magneto-resistive) จะรับรู้การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนสถานะของสภาพความเป็นแม่เหล็กตามลักษณะของ



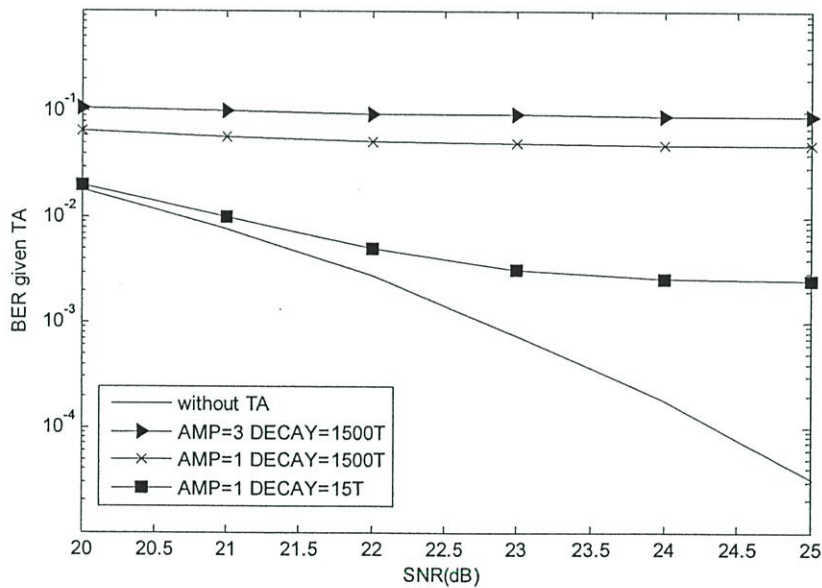
ภาพที่ 2.15 สัญญาณ TA ที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก [1]

ข้อมูลที่เขียนลงไปบนสื่อบันทึกทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า สัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) ซึ่งในกรณีที่พื้นผิวของสื่อบันทึกมีความขรุขระ (Asperity) เมื่อ สไลเดอร์เคลื่อนที่มากกระทบกับบริเวณที่มีความขรุขระจะทำให้พื้นผิวของตัวสไลเดอร์และที่ปลายของส่วนที่ขรุขระถูกทำให้ร้อนขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าส่วนเกินชั่วคราว (Transient Voltage) ที่เรียกว่าความขรุขระเชิงความร้อน (TA: Thermal Asperity) เข้าไปในสัญญาณอ่านกลับที่หัวอ่าน ซึ่ง TA ถือว่าเป็นปัญหาสำคัญต่อกระบวนการการตรวจหาข้อมูล (Detection) เพราะว่า TA จะส่งผลทำให้ระบบไทม์มิงรีคัพเวอร์ (Timing Recovery) สูญเสียการเข้าจังหวะ (Loss of Synchronization) รวมถึงทำให้การอ่านข้อมูลเซกเตอร์เกิดความผิดพลาด (Sector Read Failure) ได้ ในระบบบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอัลกอริทึมในการตรวจจับและลดผลกระทบจาก TA ซึ่งแบบจำลองของสัญญาณ TA นั้นประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดต่างๆ ดังนี้

START-TIME คือ พารามิเตอร์ที่กำหนดผลกระทบจาก TA ว่าเกิด ณ ตำแหน่งไหน, RISE-TIME คือ ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (Rise Time) มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดระยะเวลาที่ทำให้สัญญาณ TA เพิ่มระดับจาก 0 ไปยังค่าสูงสุดของสัญญาณ TA นั่นคือ MAX-AMPLITUDE, DECAY-CONSTANT คือ ช่วงลดระดับมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยพารามิเตอร์นี้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาของการลดระดับของสัญญาณ TA ให้มีลดลงเหลือประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของสัญญาณ TA, MAX-AMPLITUDE แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ตั้งแต่มีการเกิดของสัญญาณ TA ไปจนถึงตำแหน่งสิ้นสุดของช่วงเวลาเพิ่มระดับ ในภาพที่ 2.15 แสดงแบบจำลองของสัญญาณ TA ที่ได้จากสมการที่ (2.10) โดยที่ช่วงเวลาเพิ่มระดับมีระยะเวลาประมาณ $60-150\text{ns}$ ช่วงเวลาลดระดับมีระยะเวลาประมาณ $1-5\mu\text{s}$ และแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ประมาณ 2 - 3 เท่าของสัญญาณสัญญาณ TA นั้นได้ถูกจำลองเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ไว้ใน [10] และได้บรรยายลักษณะของสัญญาณไว้ใน [8] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้มากในการทำแบบจำลอง



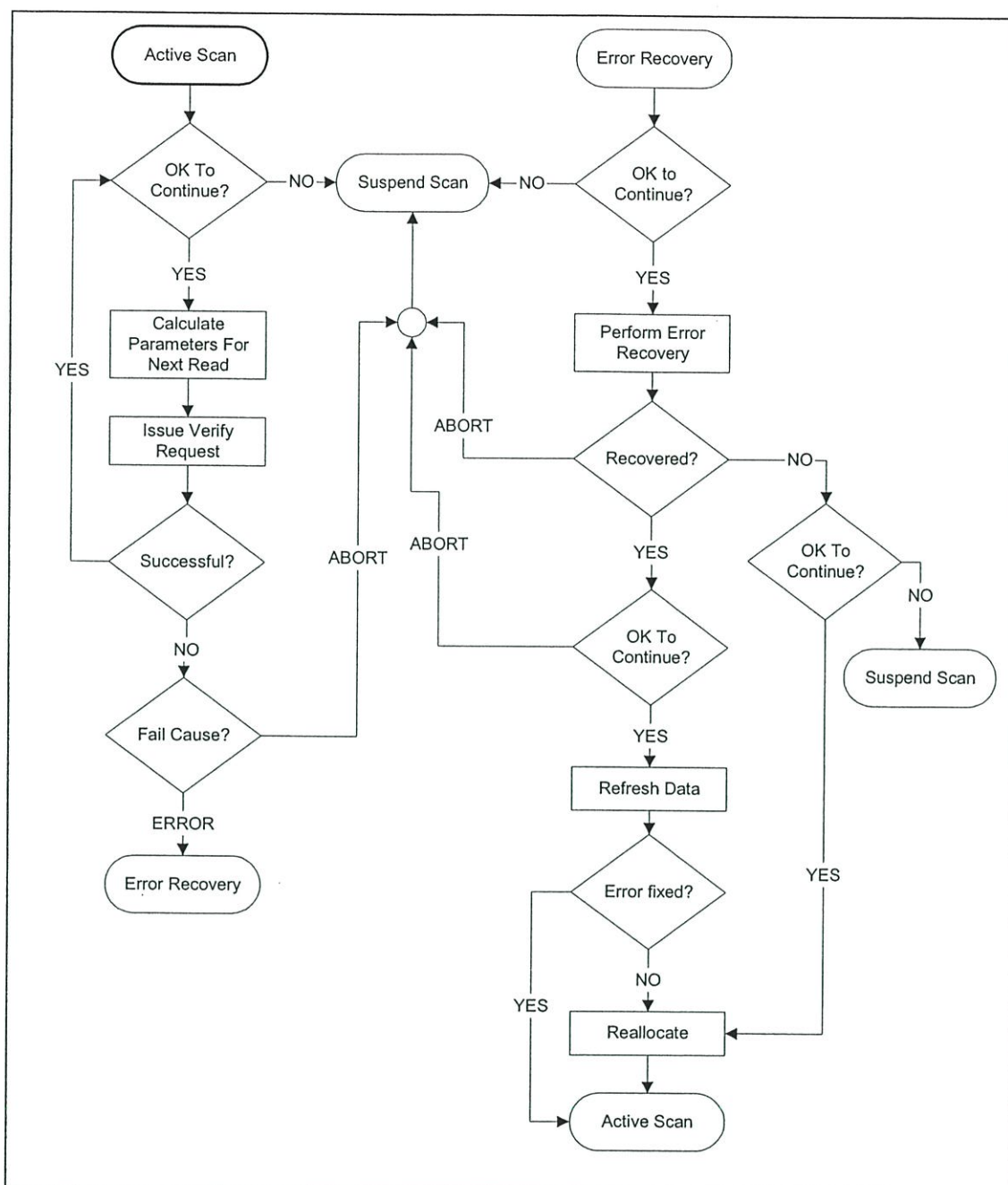
ภาพที่ 2.16 ผลกระทบจาก TA ในสัญญาณอ่านกลับที่ความรุนแรงแบบต่างๆ [17]



ภาพที่ 2.17 สมรรถนะของระบบที่ผลกระทบจาก TA ที่ความรุนแรงแบบต่างๆ

$$u(t) = \begin{cases} A_0 t / T_r, & 0 \leq t \leq T_r \\ A_0 \exp(-(t - T_r) / T_d), & T_r < t \leq T_f \end{cases} \quad (2.10)$$

เมื่อ A_0 คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA, T_r คือ ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (Rise Time), T_d คือ ค่าคงที่ของช่วงลดระดับ (Decay Constant), T_f คือ ระยะเวลาของสัญญาณ TA มีค่าเท่ากับ $T_f = T_r + 4T_d$ จากภาพที่ 2.16 แสดงความรุนแรงของสัญญาณ TA แบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในสัญญาณอ่านกลับและภาพที่ 2.17 แสดงสมรรถนะของระบบเมื่อมีผลกระทบจาก TA แบบต่างๆ โดยเป็น



ภาพที่ 2.18 การทำงานของอัลกอริทึม BGMS (Background Media Scan Algorithm) [4]

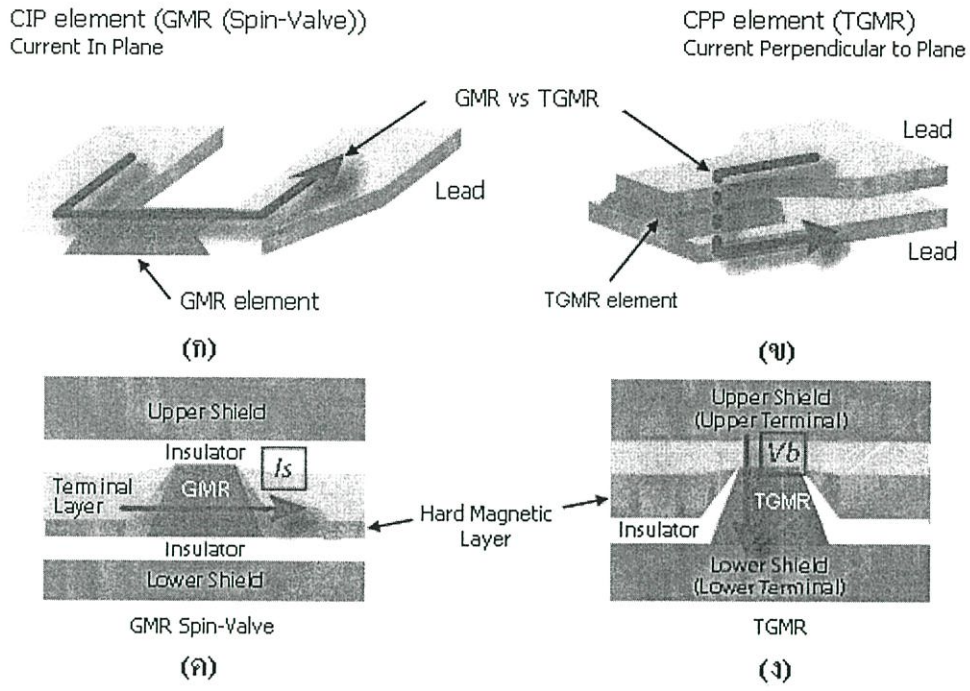
ระบบการบันทึกแบบแนวตั้งที่มีค่า $ND = 2$ และทาร์เก็ต $EPR2$ นั่นคือ $H(D) = 1+3D+3D^2+D^3$ และใช้ไอคิวไลเซอร์ 9 แท็บ ที่ออกแบบโดยเจอนโซบักบับเฉพาะทาร์เก็ตในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อข้อมูลแต่ละเซกเตอร์เท่ากับ 4096 บิต และพิจารณากรณีที่ด้อยที่สุดคือมีผลกระทบจาก TA ทุกเซกเตอร์ พบว่าในกรณีที่มีการเกิด TA รุนแรงนั้นไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ด้วยรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด และในกรณีที่ไม่มีผลกระทบจาก TA อาจทำให้ข้อมูลผิดพลาดเป็นจำนวนมากในหนึ่งเซกเตอร์

2.5 อัลกอริทึมในการจัดการ TA (BGMS: Background Media Scan Algorithm)

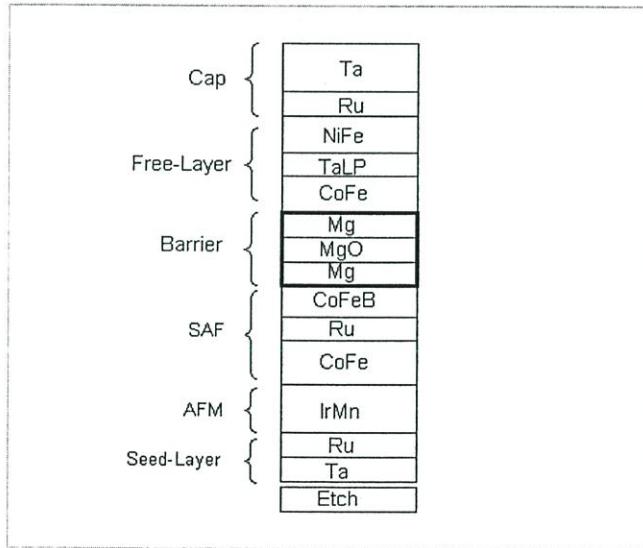
ปัจจุบันนี้ TA หรือ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นใหม่บนสื่อบันทึกข้อมูล (Grown TA) ถูกจัดการอย่างมีประสิทธิภาพด้วยอัลกอริทึมของบริษัทซีเทคเรียกว่า “BGMS algorithm” ซึ่งจดสิทธิบัตรไว้แล้ว (Patent No: US 7,490,261 B2) “BGMS algorithm” ถือได้ว่าช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับฮาร์ดดิสก์เป็นอย่างมาก ซึ่งลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมนี้คือในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ใคร่ฟออยู่ในสถานะที่ไม่ถูกใช้งาน (Idle) หรือไม่มีการอ่านเขียนข้อมูลอัลกอริทึม BGMS ก็จะทำงานโดยทำการสแกนข้อมูลในทุก ๆ LBA บนสื่อบันทึกข้อมูล ถ้าเจอบริเวณวิกฤติที่มีแนวโน้มว่าจะเกิดปัญหาหรืออ่านข้อมูลแล้วเกิดข้อผิดพลาดขึ้น (Error) ก็จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการกู้ข้อมูลกลับมา หลังจากกู้ข้อมูลกลับมาได้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว บริเวณที่เกิดข้อผิดพลาดจะถูกห้ามใช้งานโดยการทำเครื่องหมายไว้รอบๆ ข้อมูลบริเวณที่มีปัญหา และข้อมูลในตำแหน่งนี้จะถูกย้ายไปอยู่ที่ตำแหน่งอื่นทันที ซึ่งถือว่าอัลกอริทึม BGMS นี้ช่วยแก้ปัญหาเรื่องของ TA ที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นใหม่บนสื่อบันทึกข้อมูลในภายหลัง (Grown TA) และจุดบกพร่องที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นใหม่ในภายหลัง (Grown Defect) บนสื่อบันทึกข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทำงานของอัลกอริทึม BGMS อธิบายดังภาพที่ 2.18

2.6 โครงสร้างของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์

หัวอ่าน TGMR มีข้อดีมากกว่าหัวอ่าน GMR แบบเดิมหลายประการ เช่น ช่วยเพิ่มอัตราความต้านทานแม่เหล็ก (MR Ratio) [11] และช่วยลดค่า RA (Areal Resistance) [11] ช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนของหัวอ่าน ซึ่งข้อดีเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของหัวอ่านในแง่ของการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ให้สูงขึ้น หัวอ่านแบบ TGMR ถูกออกแบบให้มีการประยุกต์ใช้กระแสแบบ CPP (Current Perpendicular to Plane) ดังภาพ 2.19 (ข) ซึ่งต่างจาก หัวอ่านแบบ GMR ซึ่งมีใช้กระแสแบบ CIP (Current in Plane) ดังภาพ 2.19 (ก) การป้อนกระแสแบบ CPP มีข้อดีหลายอย่างที่จะช่วยสนับสนุนการบันทึกข้อมูลให้ได้ความหนาแน่นสูงขึ้น การไหลของกระแสแบบแนวตั้งเข้าไปในเพลน (Plane) ทำให้ลักษณะกายภาพขององค์ประกอบของหัวอ่านเล็กลงกว่าเทคโนโลยี CIP แบบเก่าทำให้มีศักยภาพในการบันทึกข้อมูลความหนาแน่นสูง และจากภาพ 2.19 (ง) การไหลของกระแสจากบนลงล่างภายในองค์ประกอบของ CPP จึงสามารถเอาอินซูลเตอร์แกป (Insulator Gap) ออกได้ซึ่งจะทำให้หัวอ่านมีความไวต่อฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้นจึงสามารถใช้ในกรณีที่ต้องการ BPI สูงๆ นอกจากนี้ การป้อนกระแสแบบ CPP จึงทำให้สามารถวางชิลด์ (Shield) ให้สัมผัสโดย



ภาพที่ 2.19 โครงสร้างของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่เทียบกับหัวอ่าน GMR [5]



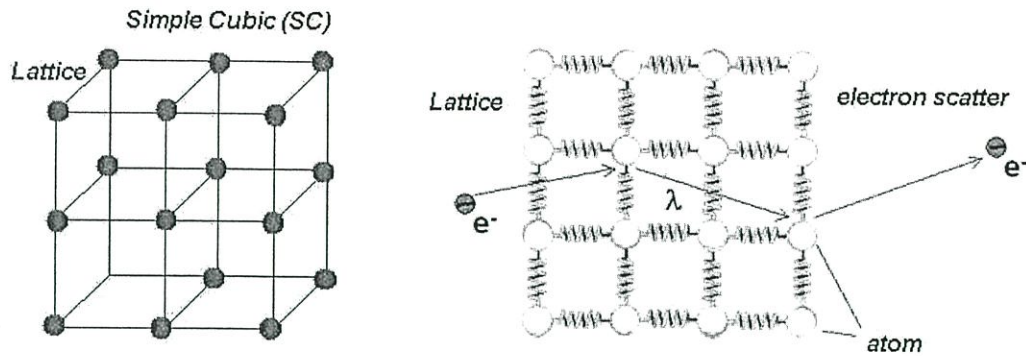
ภาพที่ 2.20 องค์ประกอบของหัวอ่าน TGMR ใช้เลเยอร์แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์ [6]

ตรงกับส่วนประกอบของ TGMR ซึ่งจะช่วยป้องกันการรบกวนของฟลักซ์แม่เหล็กจากแท่งข้างเคียงได้ จึงสามารถใช้ในกรณีที่ต้องการ TPI สูงๆ

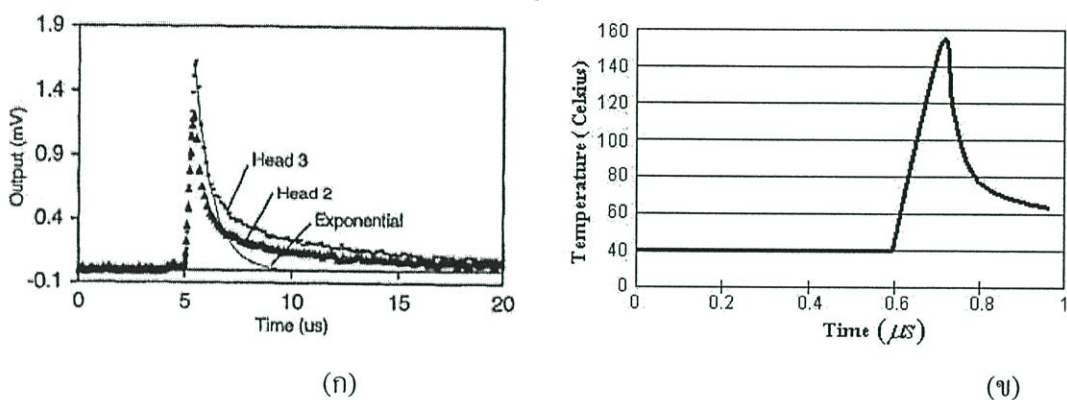
นอกจากนี้หัวอ่านแบบ TMR มีการใช้เลเยอร์แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์ (MgOx barrier) ดังภาพที่ 2.20 ซึ่งแอสแต็ค (Stack) ของ TMR ในปัจจุบันประกอบไปด้วย Seed layer, AFM layer, Pine layer, Barrier layer, Free layer และ Cap layer ซึ่งแอสแต็คของหัวอ่าน TMR แตกต่างจากแบบเดิมตรงที่ชั้นของ Cu layer ถูกแทรกด้วย Oxide layer ภายใน Barrier layer ซึ่งเลเยอร์เหล่านี้สร้างขึ้นด้วยวิธี DC Sputtering [11] ส่วน MgO barrier ถูกสร้างโดยกระบวนการ NOX (Natural Oxidation) ซึ่งการใช้เลเยอร์แมกนีเซียมออกไซด์แบริเออร์ (MgOx barrier) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหัวอ่านโดยให้แอมพลิจูดของสัญญาณที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหัวอ่านแบบเดิม อีกทั้งยังลดค่า RA (Resistance Area) ซึ่งจะช่วยขจัดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวนของหัวอ่าน ในขณะที่ยังรักษาอัตราความต้านทานแม่เหล็ก (MR Ratio) ที่สูงไว้ได้ ซึ่งนิยามของ MR ratio คือ dR/R เมื่อ R คือความต้านทานต่ำสุดของหัวอ่าน TMR และ dR คือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานสังเกตโดยการเปลี่ยนสภาพแม่เหล็กของ Free layer การที่ MR ratio สูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการอ่านข้อมูล จากการที่หัวอ่าน TMR มีลักษณะทางกายภาพที่เล็กลง และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กสูง การบันทึกข้อมูลที่ความหนาแน่นสูงจึงสามารถทำได้

2.7 การตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน (Thermal Response)

เมื่อใดก็ตามที่หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึกข้อมูลจะทำให้ทั้งพื้นผิวของส่วนประกอบของการอ่าน (Read Element) และสื่อบันทึกข้อมูลที่ถูกบีบอัดมีอุณหภูมิสูงขึ้น [8] ดังแสดงในภาพที่ 2.22 (ข) ซึ่งผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดนี้จะทำให้คุณสมบัติทางกลของหัวอ่านและการจัดเรียงของอะตอม หรือ ไอออนในผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นจุดที่เรียกว่าจุดแลตทิซ (Lattice Point) เกิดการกระจัดกระจาย (Lattice Scattering) มากขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนเกิดการกระจัดกระจายมากขึ้น (Electron Scatter Higher) ดังแสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติความต้านทานภายในหัวอ่านเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด จาก $E = I \times R$ เมื่อกระแสไบแอส (Bias Current) ที่หัวอ่านขณะสัมผัสกับสื่อบันทึกคงที่ เมื่อความต้านทานที่หัวอ่านสูงขึ้นจึงเป็นผลทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับ E เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะอ่านข้อมูล ซึ่งคุณลักษณะของการตอบสนองทางด้านแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับแสดงในภาพที่ 2.22 (ก) ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้นของหัวอ่านได้แก่ คุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำหัวอ่านกับสื่อบันทึก, ความรุนแรง

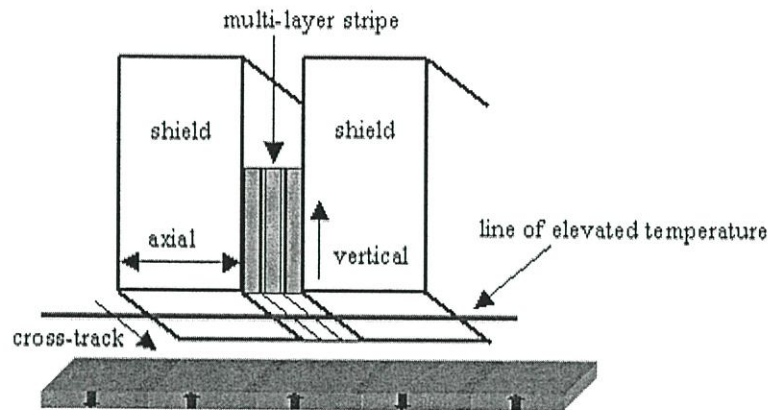


ภาพที่ 2.21 การเรียงตัวของอะตอมในผลึกซึ่งมีลักษณะเป็นจุดเรียกว่าจุดที่แลตทิซ (Lattice) [19]



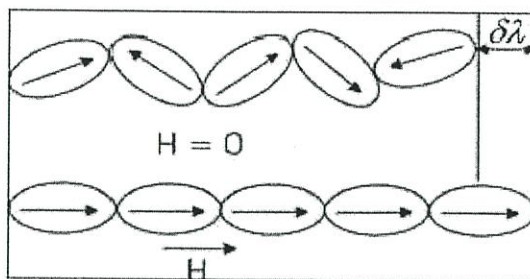
ภาพที่ 2.22 การตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน (ก) คือคุณลักษณะการตอบสนองทางด้านแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับ [8] (ข) คือการตอบสนองต่ออุณหภูมิของหัวอ่าน MR เมื่อทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึกข้อมูล [18]

ของการสัมผัส, ความเร็วรอบในการหมุนของฮาร์ดดิสก์, ความแข็งของวัสดุที่ใช้ทำหัวอ่านกับสื่อบันทึก และ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [18] ในปัจจุบันการออกแบบระยะห่างของหัวอ่านกับสื่อบันทึก (Head Disk Clearance) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกออกแบบให้ลดลงอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอ่านเขียนข้อมูล ล่าสุดถูกออกแบบให้ระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกต่ำกว่า 10 nm นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกอาจถูกทำให้ลดลงได้ด้วยการลดความดันภายในฮาร์ดดิสก์ อีกทั้งในขณะที่หัวอ่านกำลังอ่านข้อมูลอยู่นั้น โพลทิป (Pole Tip) ของหัวอ่านจะมีการยื่นออก (Protrusion) ทำให้ช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกแคบลง การลดลงของระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกจะเพิ่มความไวต่อการสั่นสะเทือนของพื้นผิวแอร์เบริง (ABS: Air



ภาพที่ 2.23 เส้นทางแผ่ความร้อนรอบๆ ส่วนประกอบของการอ่านของหัวอ่าน TGMR [9]

Bearing Surface) จึงเป็นผลทำให้ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีความไวต่อการสั่นสะเทือน (Vibration) หรือ การกระแทก (Shock) ทั้งที่ขณะทดสอบที่ฝ่ายการผลิตเองและในสภาพที่ใช้งานจริง [12, 13] ซึ่งจะทำให้หัวอ่านทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสื่อบันทึก (Head Disk Interaction) และทุกครั้งที่เกิดปรากฏการณ์นี้จะทำให้หัวอ่านเกิดการตอบสนองเชิงความร้อน (Thermal Response) ซึ่งการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านนี้มีผลกระทบโดยตรงทั้งต่อประสิทธิภาพของการบันทึกข้อมูลและความน่าเชื่อถือ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากผลการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน ถือได้ว่าเป็นปัญหาที่รุนแรงต่อระบบบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้งเป็นอย่างยิ่ง สำหรับกระบวนการในการแผ่ความร้อนสามารถอธิบายตามแนวคิดของ Mallery's realization [9] ที่กล่าวไว้ว่าเมื่อสื่อบันทึกเคลื่อนที่ผ่านสไลเดอร์ จะทำให้พื้นผิวของส่วนประกอบของการอ่านร้อน และความร้อนจะแผ่ไปยังส่วนอื่น ๆ ตามเส้นทางการแผ่ความร้อนในภาพที่ 2.23 ซึ่งเราพบว่าเส้นทางของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะแผ่ความร้อนเป็นรูปทรงกระบอกสองมิติเคลื่อนที่ไปยังหัวอ่าน ในทางปฏิบัติความร้อนจะเริ่มแผ่กระจายในทิศทางข้ามแทร็ก (Cross Track) และแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งในตอนแรกจะไม่มีความร้อนแผ่กระจายในแนวแกน (Axial) ข้ามสตริป (Stripe) เหตุการณ์นี้จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นแบบเชิงเส้น ต่อมาเมื่อความร้อน แผ่มาถึงขอบของสตริป (Stripe Edge) ความร้อนที่ผ่านสตริปไปจะช้ากว่าตอนผ่านซิลด์เนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำของวัสดุที่ทำสตริป ซึ่งเป็นผลทำให้ความร้อนค่อยๆ ลดต่ำลง ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่หัวอ่านกับสื่อบันทึกทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกันจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างฉับพลันและค่อยๆ ลดต่ำลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล



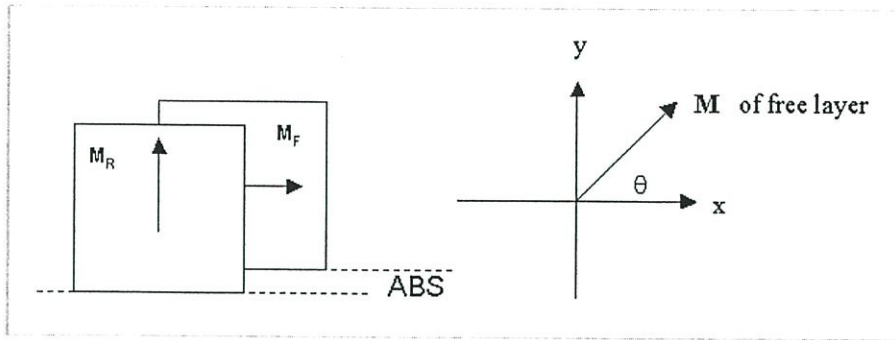
ภาพที่ 2.24 ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction Phenomenon) [14]

2.8 แมกนีโตสตริกชันที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ (Magnetostriction)

ในทางปฏิบัติแล้วสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMR ในปัจจุบันที่ใช้เลเยอร์แมกนีเซียมออกไซด์ (MgOx barrier) จะเกิดแมกนีโตสตริกชันตอบสนองแบบสองขั้วซึ่งเกิดขึ้นในฟรีเลเยอร์ (Free Layer) โดยปกติแล้วแมกนีโตสตริกชันเป็นคุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงการแมกนีไทเซชัน (Magnetization) ปรากฏการณ์นี้ถูกพิสูจน์เป็นครั้งแรกในปี 1842 โดย James Joule เมื่อสังเกตเห็นตัวอย่างของนิเกิลที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อถูกแมกนีไทซ์ (Magnetize) ดังภาพที่ 2.24 ได้สรุปสาระสำคัญของปรากฏการณ์นี้ กระบวนการและ โครงสร้างของแมกนีโตสตริกชันค่อนข้างจะซับซ้อนลงไปถึงระดับอะตอม ภายในโครงสร้างของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสามารถแบ่งได้เป็นหลายโดเมนซึ่งในแต่ละโดเมนจะมีขอบเขตของขั้วแม่เหล็กที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำหรือแมกนีไทซ์ (H) ขอบเขตระหว่างโดเมนจะเคลื่อนและโดเมนจะเริ่มหมุนเป็นผลทำให้รูปร่างทางกายภาพของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลง

2.8.1 ผลกระทบของแมกนีโตสตริกชันต่อแอนไอโซโทรปี

ในส่วนของผลกระทบของแมกนีโตสตริกชันต่อแอนไอโซโทรปี (Magnetostriction Induced Anisotropy) นั้น เนื่องจากแมกนีโตสตริกชันหรือการยืดขยาย (Tensile) และแรงกดดัน (Stress) ที่เกิดขึ้นที่ส่วนประกอบของหัวอ่าน (Read Element) ซึ่งเกิดขึ้นที่ฟรีเลเยอร์ (Free Layer) ของหัวอ่าน TGMR จากการที่หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึก การหมุน (Rotate) ของฟรีเลเยอร์นั้นจะขึ้นกับการยืดขยายและแรงกดดันของส่วนประกอบของหัวอ่าน สำหรับแรงกดดันที่หัวอ่านซึ่งมีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี H_x^* จะเป็นแบบแกนเดียว (Uni-axial) อย่างใดอย่างหนึ่งในทิศทางแบบแนวนอน (Longitudinal Direction) ($H_x^* > 0$) หรือในทิศทางแบบแนวตั้ง ($H_x^* < 0$) ซึ่ง H_x^* สามารถหมุน M_F ถ้าการกำหนดทิศทางเริ่มต้นของมันไม่ได้อยู่ในทิศทางแบบแนวนอนถ้าไม่เช่น



ภาพที่ 2.25 แมกนีโตสตริกชันหรือการยืดขยายและแรงกดคั่นมีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี [19]

นั้น H_k^* เพียงแค่สามารถเปลี่ยนความไวต่อความรู้สึก (Susceptibility) ของฟรีเลเยอร์ต่อสนามแม่เหล็กภายนอกเท่านั้น จากภาพที่ 2.25 M_R คือแมกนีไทเซชันที่เลเยอร์อ้างอิง (Reference Layer Magnetization), M_F คือแมกนีไทเซชันที่ฟรีเลเยอร์ (Free Layer Magnetization), และ ABS คือพื้นผิวของแอร์เบริง (Air Bearing Surface) แรงกดคั่นที่มีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี (Stress Induced Anisotropy) สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$H_k^* = \frac{3\lambda_s(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{M_s} \quad 2.11$$

เมื่อ H_k^* คือแรงกดคั่นที่มีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี, M_s คือแมกนีไทเซชันของฟรีเลเยอร์, และ λ_s คือพารามิเตอร์แมกนีโตสตริกชันของฟรีเลเยอร์ สนามแม่เหล็กที่มีผลเนื่องจากแรงกดคั่นที่มีอิทธิพลต่อแอนไอโซโทรปี (H_k^*) คือ

$$\mathbf{H} = H_k^* \mathbf{i}(\mathbf{i} \cdot \mathbf{m}) = H_k^* \cos(\theta) \mathbf{i} \quad 2.12$$

เมื่อ $m = M / M_s$ โดยโมเมนต์ของแรงกดคั่นที่มีอิทธิพลต่อสนามแม่เหล็กที่มีผลบน M ก็คือ

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{M} \times \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ M_s \cos(\theta) & M_s \sin(\theta) & 0 \\ H_k^* \cos(\theta) & 0 & 0 \end{pmatrix} = -\mathbf{k} \frac{1}{2} H_k^* M_s \sin(2\theta) \quad 2.13$$

ดังนั้น โมเมนต์จะมีค่าเป็นศูนย์ถ้า $\theta = 0$ หรือ 90° และ โมเมนต์จะมีค่าสัมบูรณ์สูงสุดก็ต่อเมื่อ $\theta = 45^\circ$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจาก TA มีหลายแบบที่ได้เสนอไว้ได้แก่ Klaassen K. B. and Van Peppen J. C. L. [15] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาการเกิดของสัญญาณ TA โดยการเปรียบเทียบสัญญาณอ่านกลับและค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ เนื่องจากถ้าสัญญาณอ่านกลับไม่มีสัญญาณ TA แล้ว ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับหรือเส้นเชื่อมฐานมีค่าเท่ากับค่าศูนย์ ในขณะที่การลดผลกระทบของ TA ทำได้โดยนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านเข้าวงจรกรองผ่านสูง

Mathew G. and Tjhia I. [10] ได้เสนอวิธีการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจาก TA ไว้ว่า เส้นเชื่อมฐาน (Baseline) ของสัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) ที่ปกติมีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้ามีผลกระทบจาก TA ทำให้เส้นเชื่อมฐานไม่เท่ากับค่าศูนย์และได้เสนอวิธีการสร้างเส้นเชื่อมฐานกลับคืนมาใหม่โดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ และมีการตรวจหาการเกิดของ TA จากค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับร่วมกับพื้นฐานของการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Based Approach) และจะทำการแก้ไขโดยการนำค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับมาหักล้างออกจากสัญญาณอ่านกลับนั่นเอง

Dorfman V. and Wolf J. K. [16] ได้เสนออัลกอริทึมสำหรับลดผลกระทบจาก TA โดยการใช้วงจรกรอง (1-D) เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วยในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวนอน (Longitudinal Recording Channel) ที่มีทาร์เก็ตเป็น EPR4 สมรรถนะของระบบดีขึ้นมาก โดยที่ยังมีปัญหากับความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามวงจรกรอง (1-D) ไม่เหมาะสมกับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง (Perpendicular Recording Channel) เพราะช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งมีองค์ประกอบของความถี่ต่ำหรือแรงดันไฟตรง (D.C. Component) อยู่เป็นจำนวนมาก

Erden M. F. and Kurtas E. M. [17] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง โดยการใช้วงจรกรองผ่านต่ำและวงจรกรองผ่านสูงเข้าช่วยในการตรวจหาและการประมาณค่าสัญญาณ TA และทำการลดผลกระทบ TA ก่อนเข้าวงจรชั้กตัวอย่าง

บทที่ 3

แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

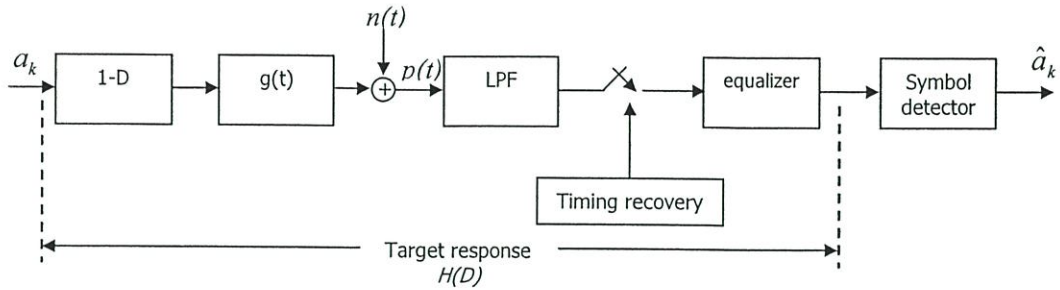
ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก ซึ่งโดยทั่วไปช่องสัญญาณของระบบการบันทึกแม่เหล็กสามารถจำลองได้เป็น 2 แบบ คือแบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง (Realistic Channel Model), และแบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ (Ideal Channel Model), โดยที่แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริงจะมีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกับระบบจริงเนื่องจากประกอบไปด้วยทุกส่วนประกอบที่สำคัญที่มีอยู่ใน “สถาปัตยกรรมช่องสัญญาณอ่าน (Read-channel Architecture)” ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในขณะที่แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติมักจะนิยมใช้ในการศึกษา และวิเคราะห์พื้นฐานการทำงานของระบบการประมวลผลสัญญาณของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการทำความเข้าใจ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริงในการทดลอง สำหรับเทคนิคในการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน (Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ จะใช้วิธีการตรวจหาและแก้ไขผลกระทบดังกล่าวด้วยวิธีการเดียวกับ Mathew et al [10] ซึ่งแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

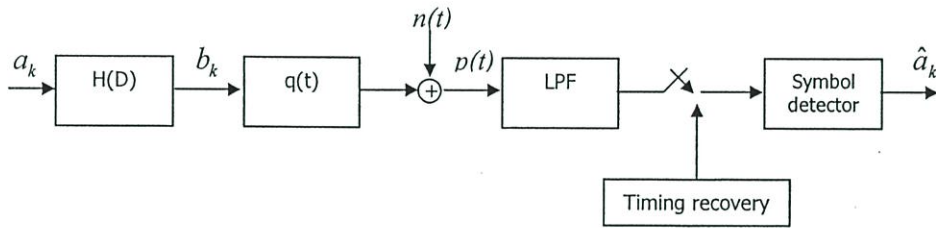
โดยทั่วไปช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง และแบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ สำหรับแบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริงมีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกับระบบการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง เนื่องจากประกอบไปด้วยทุกส่วนประกอบที่สำคัญที่มีอยู่ใน สถาปัตยกรรมช่องสัญญาณการอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในขณะที่แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติมักนิยมใช้ในการศึกษา และการวิเคราะห์พื้นฐานการทำงานของระบบการประมวลผลสัญญาณของ เนื่องจากเป็นระบบไม่ซับซ้อนและสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย

3.1.1 แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง

ในภาพที่ 3.1 สามารถแสดงให้เห็นในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ กล่าวคือ ลำดับข้อมูลอินพุตแบบไบนารี $a_k \in \{0,1\}$ ที่มีคาบเวลาเท่ากับ T ถูกส่งผ่านไปยังวงจรหาอนุพันธ์อุดมคติ (Ideal Differential) คือ 1-D เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลา T หน่วย ทำให้ได้ลำดับข้อมูลเปลี่ยนสถานะ $b_k \in \{-1,0,1\}$ เมื่อ -1 หมายถึงการเปลี่ยนสถานะแบบบวก (Positive Transition) หรือ แบบลบ (Negative Transition) และ $b_k = 0$ คือไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ลำดับข้อมูลเปลี่ยนสถานะ b_k ถูกส่งไป



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง [2]



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ [2]

ส่งไปกล้ำสัญญาณ (Modulate) กับสัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ $g(t)$ และถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน $n(t)$ ทำให้ได้สัญญาณอ่านกลับ (Readback Signal) คือ $p(t)$ สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$p(t) = \sum_k b_k g(t - kT) + n(t) \quad (3.1)$$

หลังจากนั้นถูกรองด้วยวงจรกรองต่ำผ่าน (LPF: Low Pass Filter) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกแถบความถี่ (Out off Band Noise) จากนั้นถูกทำการซัดตัวอย่าง (Sampling) ณ เวลาที่ถูกควบคุมโดยระบบไทมมิงรีคฟเวอรี (Timing Recovery) ลำดับข้อมูลเอาต์พุตของวงจรซัดตัวอย่างถูกส่งผ่านไปยังอีควอไลเซอร์ (Equalizer) และวงจรตรวจหาสัญลักษณ์ (Symbol Detector) ตามลำดับ เพื่อหาลำดับข้อมูลอินพุตที่เป็นไปได้มากที่สุด (Most Likely Input Sequence) นั่นคือหาค่าประมาณ a_k แทนด้วย \hat{a}_k

3.1.2 แบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ

สมมุติให้ระบบมีกระบวนการอีควอไลเซอร์แบบสมบูรณ์ (Perfect Equalization) แบบจำลองในภาพที่ 3.2 สามารถลดรูปได้เป็นแบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ โดยที่ลำดับข้อมูลอินพุตแบบไบนารี a_k ที่มีคาบเวลาเท่ากับ T ถูกกล้ำสัญญาณกับสัญญาณพัลส์ในควิตส์อุดมคติ (Ideal Nyquist Pulse) มีค่าเท่ากับ $q(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T}$ และถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน $n(t)$ ที่เป็นสัญญาณรบกวนสีขาวแบบบวก (AWGN) สัญญาณที่ภาครับคือ $p(t)$ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p(t) = \sum_k b_k q(t - kT) + n(t) \quad (3.2)$$

สำหรับภาครับสัญญาณอ่านกลับถูกส่งผ่านไปยังวงจรกรองต่ำผ่านอุดมคติเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนนอกแถบความถี่ หลังจากนั้นจะถูกทำการซักร้อย่างที่ถูกรักษาด้วยไทม์มิงรีคัฟเวอรี (Timing recovery) และข้อมูลเอาต์พุตหลังวงจรซักร้อย่างถูกส่งไปยังวงจรตรวจหาสัญลักษณ์ เพื่อทำการหาลำดับข้อมูล a_k ที่เป็นไปได้มากที่สุด

3.2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่นำเสนอ

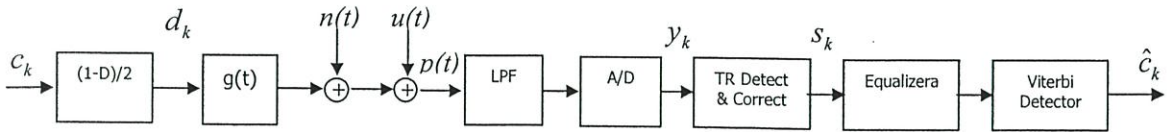
เนื่องจากสมการคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการตอบสนองเชิงความร้อน (Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMР แบบใหม่ที่ได้จากการทดลอง (สมการที่ 4.1) จะมีคุณลักษณะที่แตกต่างจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านแบบ MR แบบเดิม [17] ที่ใช้ในอดีต (สมการที่ 2.10) ดังนั้นในส่วนของการทดลอง จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ระหว่างระบบที่มีการเตรียมการเพื่อตรวจสอบและแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก TR กับระบบที่ไม่มีการเตรียมการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TR ที่นำเสนอ จะใช้วิธีการตรวจหาและแก้ไข TR แบบเดียวกับเทคนิคที่ใช้ใน [10] โดยจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแง่ของ อัตราบิตที่ผิดพลาด (BER)

ในภาพที่ 3.3 แสดงช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง โดยที่ลำดับข้อมูล $c_k \in \{\pm 1\}$ ที่มีช่วงเวลาของบิต (Bit Period) เท่ากับ T ถูกป้อนเข้าวงจรกรอง $(1-D)/2$ ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล $d_k \in \{\pm 1, 0\}$ เมื่อ $+1$ คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบบวก (Positive Transition bit), -1 คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบลบ (Negative Transition Bit), และ 0 คือไม่มีการเปลี่ยนสถานะ จากนั้นลำดับข้อมูล d_k ถูกส่งผ่านไปยังช่องสัญญาณที่กำหนดด้วยผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะ $g(t)$ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อน $p(t)$ สามารถเขียนได้เป็น

$$p(t) = \sum_k d_k g(t - kT) + n(t) + u(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองข้าง $N_0/2$, และ $u(t)$ คือ สัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน ตามสมการที่ (4.1) โดยที่ผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะของช่องสัญญาณแบบแนวตั้งนิยามโดย

$$g(t) = \operatorname{erf}\left(\frac{2t\sqrt{\ln 2}}{PW_{50}}\right) \quad (3.4)$$



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณการลดผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGM ในช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง [2]

เมื่อ PW_{50} คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์วัด ณ จุดครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของ $g'(t)$, ส่วน $\ln(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันลอการิทึมธรรมชาติ, และ $\text{erf}(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันข้อผิดพลาด (Error Function) ที่มีค่าเท่ากับ $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$ เมื่อวงจรถูกปรับได้รับสัญญาณอ่านกลับ $p(t)$ ถูกส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: Low Pass Filter) และถูกซัดตัวอย่างสัญญาณที่มีการเข้าจังหวะอย่างสมบูรณ์ (Perfect Synchronization) ด้วยอัตราการซัดตัวอย่าง 500 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) เพื่อให้ได้เป็นลำดับข้อมูล y_k จากนั้นจึงส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาและแก้ไขการตอบสนองเชิงความร้อน (TR), วงจรอีควอลไลเซอร์ เพื่อปรับคุณสมบัติของสัญญาณให้เป็นไปตามคุณสมบัติของทาร์เก็ต (Target), และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi Detector) เพื่อหาลำดับข้อมูล c_k ที่เป็นไปได้มากที่สุด ซึ่งผลการทดลองจะพิจารณากรณีที่สัญญาณอ่านกลับแต่ละเซกเตอร์ (Sector) มีสัญญาณ TR เกิดขึ้นหนึ่งครั้ง โดยที่หนึ่งเซกเตอร์มีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 4096 บิต ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่แย่ที่สุด (Worst Case) ระบบมีความหนาแน่นการบันทึกข้อมูล $ND = PW50/T = 2.5$, อีควอลไลเซอร์ที่ใช้มีจำนวน 11 แท็ป (Tap) และใช้ทาร์เก็ตแบบ GPR (Generalized Partial Response Target) [10] 4 แท็ป คือ $1 + 1.351D + 0.958D^2 + 0.325D^3$ ซึ่งถูกออกแบบโดยเทคนิคข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE: Minimum Mean-squared Error) ณ ระดับอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: Signal to Noise Ratio) ที่ทำให้อัตราบิตที่ผิดพลาด (BER: Bit Error Rate) เท่ากับ 10^{-4} เมื่อไม่มีผลกระทบของ TR นอกจากนี้ในการตรวจหาการเกิดของ TR จะทำการหาค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ โดยใช้ $L = 51$, $m_1 = 0.5$ และ $m_2 = 1.1$ [10]

3.2.1 การตรวจหาสัญญาณ TR (Thermal Response Detection)

โดยปกติสัญญาณอ่านกลับของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มีเส้นเชื่อมฐานมีค่าเท่ากับศูนย์ [10] แต่เมื่อมีผลกระทบจาก TR จะส่งผลทำให้เส้นเชื่อมฐานมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นในกระบวนการตรวจหา TR ทำโดยการหาเส้นเชื่อมฐานของสัญญาณอ่านกลับโดยการหาค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ ของสัญญาณอ่านกลับ $\{y_k\}$ โดยที่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [10]

$$q_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-\alpha}^{k+\alpha} y_i \quad (3.5)$$

เมื่อ L คือ ความกว้างของหน้าต่างการหาค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก, α คือ $(L-1)/2$, y_i คือ แซมเปิลของสัญญาณอ่านกลับลำดับที่ i ในกระบวนการตรวจหา TR สามารถทำได้โดยนำค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับมาใช้ในการตรวจหาการเกิดผลกระทบจาก TR เมื่อ $q_k \geq m_1$ และเพื่อป้องกันความผิดพลาดของการตรวจหา โดยการเพิ่มเงื่อนไขในการตรวจหาเมื่อ $y_k \geq m_2$ เป็นจำนวนหลายแซมเปิลติดๆ กัน เมื่อ m_1 และ m_2 เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Value)

3.2.2 การแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TR (Thermal Response Correction)

การชดเชยผลกระทบของการตอบสนองความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่นี้จะทำการนำสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ย $\{q_k\}$ ไปลบออกจากสัญญาณอ่านกลับตามสมการที่ (3.6) เมื่อมีการตรวจสอบพบการเกิดของ TR ก็จะหยุดทำการตรวจสอบ และจะทำลบสัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยออกจากสัญญาณอ่านกลับเป็นระยะเวลาเท่ากับการเกิดของ TR เมื่อทำลบเสร็จก็จะทำการตรวจสอบต่อหลังจากนั้นสัญญาณ s_k ก็จะถูกป้อนเข้าอ็ควอลไลเซอร์เมื่อสัญญาณออกจากอ็ควอลไลเซอร์ ก็จะถูกป้อนเข้าวงจรตรวจหาวีเทอร์บี

$$\begin{aligned} s_k &= y_k - q_k \text{ เมื่อมีการเกิด TR} \\ &= y_k \text{ เมื่อไม่เกิด TR} \end{aligned} \quad (3.6)$$

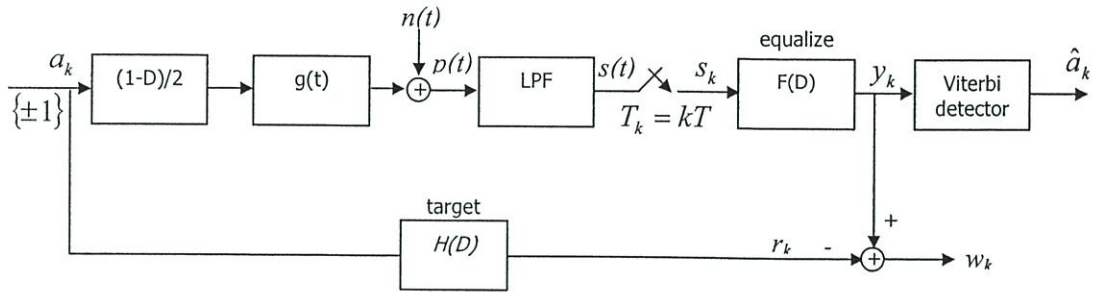
3.3 การออกแบบอ็ควอลไลเซอร์ (Target and Equalizer Designed)

สำหรับการออกแบบอ็ควอลไลเซอร์และทาร์เก็ต นั้นมีส่วนสำคัญอย่างมากโดยหน้าที่ของอ็ควอลไลเซอร์ทำหน้าที่ปรับสัญญาณให้มีคุณสมบัติเหมือนทาร์เก็ตมากที่สุดและส่งไปยังวงจรตรวจหาวีเทอร์บีเพื่อหาบิตที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอธิบายการออกแบบทาร์เก็ตและอ็ควอลไลเซอร์ 2 แบบด้วยกันนั้นคือ เงื่อนไขบังคับ $h_0 = 1$ และ เงื่อนไขบังคับทาร์เก็ตเฉพาะจากภาพที่ 3.4 เมื่อ w_k คือลำดับความผิดพลาดของอ็ควอลไลเซอร์ เมื่อ $w_k = y_k - r_k$ โดยที่ $y_k = s_k * f_k$ และ $r_k = a_k * h_k$ เมื่อ $F(D) = \sum_{k=-K}^K f_k D^k$ และ $H(D) = \sum_{k=0}^L h_k D^k$ เมื่อ $E[w_k^2] = E[(y_k - r_k)^2]$

$$= E[(s_k * f_k - a_k * h_k)^2] \quad (3.7)$$

เมื่อ f_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของวงจรรอง, h_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของทาร์เก็ต สมการที่ (3.7) สามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ (Matrix Form) ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E[w^2] &= E[(S^T F - A^T H)^2] \\ &= E[(S^T F - A^T H)^T (S^T F - A^T H)] \\ &= E[(F^T S - H^T A)(S^T F - A^T H)] \\ &= E[(F^T S S^T F - F^T S A^T H - H^T A S^T F + H^T A A^T H)] \quad (3.8) \end{aligned}$$



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กสำหรับการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอลไลเซอร์ [2]

โดยที่ \mathbf{F} คือ เวกเตอร์ของวงจกรองที่มีค่าเท่ากับ $[f_{-K} \dots f_0 \dots f_K]^T$ เมื่อความยาวของวงจกรองเท่ากับ $2K+1$ และ \mathbf{H} คือ เวกเตอร์ของทาร์เก็ตที่มีขนาดเท่ากับ $[h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{L-1}]^T$ เมื่อความยาวของทาร์เก็ตเท่ากับ

$$\mathbf{R}(i, j) = E \left[\sum_{k=0}^{S-1} s_{k+K-i} s_{k+K-j} \right], \quad \text{เมื่อ } -K \leq i, j \leq K \quad (3.9)$$

$$\mathbf{U}(i, j) = E \left[\sum_{k=0}^{S-1} a_{k-i} a_{k-j} \right], \quad \text{เมื่อ } 0 \leq i, j \leq L-1 \quad (3.10)$$

$$\mathbf{P}(i, j) = E \left[\sum_{k=0}^{S-1} s_{k+K-i} a_{k-j} \right], \quad \text{เมื่อ } -K \leq i \leq K, 0 \leq j \leq L-1 \quad (3.11)$$

เมื่อ S คือความยาวของลำดับข้อมูล 4096 บิต, $E[\cdot]$ คือ ตัวดำเนินการค่าความคาดหวัง (Expectation Operator) เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.9), (3.10) และ (3.11) ลงในสมการที่ (3.8) ทำให้ได้

$$E[w^2] = (\mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{F} - 2\mathbf{F}^T \mathbf{P} \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \mathbf{U} \mathbf{H}) \quad (3.12)$$

โดยที่ \mathbf{R} คือ อัตสหสัมพันธ์ (Auto-Correlation Matrix) ของลำดับข้อมูล s_k ที่มีขนาด $N \times N$, \mathbf{P} คือ สหสัมพันธ์ (Cross-Correlation Matrix) ระหว่างลำดับข้อมูล s_k และ a_k ที่มีขนาด $N \times L$, \mathbf{U} คือ อัตสหสัมพันธ์ของลำดับข้อมูล a_k ขนาด $L \times L$ และเพื่อป้องกันไม่ให้ $\mathbf{F} = 0$ และ $\mathbf{H} = 0$ จึงต้องเพิ่มเงื่อนไขบังคับเข้าไปในกระบวนการเพื่อทำให้ค่า $E[w^2]$ มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ \mathbf{R} , \mathbf{U} , และ \mathbf{P} สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ได้ดังนี้

3.3.1 เงื่อนไข $h_0 = 1$ (Monic Constraint)

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแท็ป (Tap) ตัวแรกของทาร์เก็ตให้มีค่าเท่ากับหนึ่งนั่นคือ $h_0 = 1$ ถ้ากำหนดให้เวกเตอร์แนวตั้ง \mathbf{I} ขนาด $L \times 1$ ที่มีสมาชิกตัวแรกมีค่าเท่ากับหนึ่งส่วนสมาชิกตัวอื่นมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $\mathbf{I} = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$ ดังนั้นเงื่อนไขบังคับแบบโมนิกนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ $\mathbf{I}^T \mathbf{H} = 1$ ในการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอลไลเซอร์วิธีนี้อาศัยหลักการคือ การ

ทำให้ค่า MSE (Mean Square Error) ในสมการที่ (3.7) ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยพยายามรักษาค่า $\mathbf{I}^T \mathbf{H}$ ให้มีค่าเท่ากับหนึ่งอยู่ตลอดเวลา โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E[w^2] = \mathbf{F}^T \mathbf{R} \mathbf{F} - 2\mathbf{F}^T \mathbf{P} \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \mathbf{U} \mathbf{H} - 2\lambda(\mathbf{I}^T \mathbf{H} - 1) \quad (3.13)$$

โดยการทำให้สมการที่ (3.12) มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ตัว λ คือตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange Multiplier) การที่ทำให้สมการที่ (3.13) มีค่าน้อยที่สุดสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ (Differentiation) เทียบกับ \mathbf{F} , \mathbf{H} , และ λ ตามลำดับและกำหนดให้สมการที่หาอนุพันธ์ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ก่อนการแก้สมการอนุพันธ์ของสมการ (3.13) เทียบ \mathbf{F} ทำให้ได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[w^2]}{\partial \mathbf{F}} &= (2\mathbf{R}\mathbf{F} - 2\mathbf{P}\mathbf{H}) \\ 2\mathbf{R}\mathbf{F} - 2\mathbf{P}\mathbf{H} &= 0 \\ \mathbf{F} &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{H} \end{aligned} \quad (3.14)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (3.13) เทียบ \mathbf{H} ได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[w^2]}{\partial \mathbf{H}} &= -2\mathbf{P}^T \mathbf{F} + 2\mathbf{U}\mathbf{H} - 2\lambda \mathbf{I} \\ -2\mathbf{P}^T \mathbf{F} + 2\mathbf{U}\mathbf{H} - 2\lambda \mathbf{I} &= 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

แทนค่า \mathbf{F} ลงในสมการที่ (3.15) ทำให้ได้

$$\begin{aligned} -\mathbf{P}^T (\mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{H}) + \mathbf{U}\mathbf{H} &= \lambda \mathbf{I} \\ \mathbf{H} &= \lambda (\mathbf{U} - \mathbf{P}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (3.16)$$

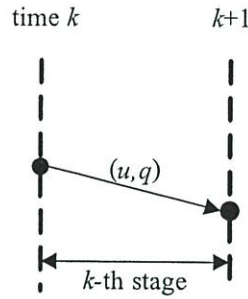
หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2-18) เทียบ λ ทำให้ได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[w^2]}{\partial \lambda} &= -2\mathbf{I}^T \mathbf{H} + 2 \\ -\mathbf{I}^T \mathbf{H} + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

แทนค่า \mathbf{H} ลงในสมการที่ (3.17) ได้

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^T \lambda (\mathbf{U} - \mathbf{P}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{I} &= 1 \\ \lambda &= \frac{1}{\mathbf{I}^T (\mathbf{U} - \mathbf{P}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{I}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์จากสมการที่ (3.16), (3.17), (3.18) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 การทำงานของเทรลลิส [2]

เมื่อเพิ่มค่า ND หรือมีความจุข้อมูลสูงความรุนแรงของ ISI เพิ่มขึ้นตามไปด้วย วงจรตรวจหาวิเทอร์บีสามารถจัดการกับ ISI ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในทางปฏิบัติแล้วถ้า ISI ยิ่งมากความซับซ้อนของวิเทอร์บีมากตามไปด้วย หลักการทำงานของวิเทอร์บีอยู่บนพื้นฐานของแผนภาพเทรลลิส (Trellis Diagram)

ในช่องสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Channel) เมื่อช่องสัญญาณ $H(D)$ โดยที่ a_k คือข้อมูลอินพุตของชุดอักษร A เมื่อ $H(D)$ สามารถเขียนได้

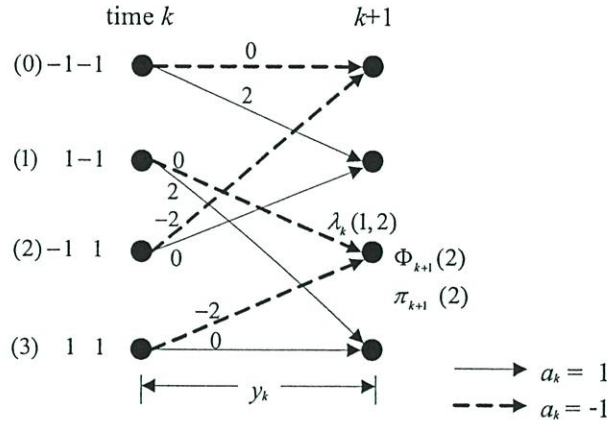
$$H(D) = \sum_{k=0}^{\nu} h_k D^k \quad (3.20)$$

เมื่อ h_k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของทาร์เก็ต, ν คือ หน่วยความจำของช่องสัญญาณ โดยที่สัญญาณ y_k สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$y_k = a_k * h_k + n_k \quad (3.21)$$

เมื่อ $*$ คือ ตัวดำเนินการคอนโวลูชัน (Convolution Operator), n_k คือ สัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 หรือสามารถเขียนแทนด้วย $\sim N(0, \sigma^2)$ โดยที่ความยาวของลำดับข้อมูล a_k ในช่องสัญญาณการสื่อสารฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้นเท่ากับ 4096 บิตต่อหนึ่งเซกเตอร์ (Bit/Sector) และ \hat{a}_k คือค่าประมาณของลำดับข้อมูลอินพุต a_k ที่ได้จากการถอดรหัสข้อมูลจากวงจรตรวจหาวิเทอร์บี

สำหรับหลักการทำงานของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีจากภาพที่ 3.6 นิยามความหมายของแต่ละตัวแปรดังนี้ $\Psi_k = [a_k, a_{k-1}, \dots, a_{k-\nu+1}]$ คือสถานะที่เวลาที่ k หรือค่าที่อยู่ในรีจิสเตอร์ (Register) แบบเลื่อนทั้งหมดที่เวลาที่ k , $Q = |A|^\nu$ คือจำนวนสถานะที่เป็นไปได้มากที่สุด, $|A|$ คือจำนวนค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของข้อมูลอินพุตและ ν คือหน่วยความจำของช่องสัญญาณระยะ k (k -th Stage) คือกลุ่มสาขาที่เป็นไปได้ทั้งหมด ณ เวลาที่ k และ (u, q) คือ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ u ไปเป็นสถานะ q



ภาพที่ 3.7 แผนภาพเทรลลิสของช่องสัญญาณ PR4, $H(D)=1-D^2$ [2]

จากภาพที่ 3.7 เมื่อพิจารณาแผนภาพเทรลลิสการทำงานของช่องสัญญาณ PR4 โดยมีค่า $H(D) = 1 - D^2$ เมื่ออินพุต $a_k \in \{-1, 1\}$ มีจำนวนสถานะทั้งหมด $Q = 2^2 = 4$ สถานะที่แสดงด้วยสัญลักษณ์ (0), (1), (2) และ (3) สิ่งที่ต้องคำนวณทุกช่วงเวลาคือเมตริกสาขา (Branch Metric) ณ เวลา k ของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ u ไปยังสถานะ q , $\lambda_k(u, q)$, ค่าเมตริกเส้นทาง (Path Metric) ณ เวลา $k+1$, $\Phi_{k+1}(q)$ และตัวนำหน้า (Predecessor) สำหรับสถานะ q ณ เวลา $k+1$, $\pi_{k+1}(q)$ ซึ่งเก็บค่าสถานะเริ่มต้นที่เป็นผลทำให้เกิดเส้นทางเปลี่ยนสถานะที่ดีที่สุด (Best Transition)

วงจรตรวจหาที่ทำให้ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดของลำดับข้อมูลทั้งลำดับมีค่าน้อยที่สุดคือ “วงจรตรวจหาลำดับที่ควรจะเป็นมากที่สุด (MLSD: Maximum Likelihood Sequence Detector)” ซึ่งสามารถสร้างได้โดยการใช้อัลกอริทึมวิเทอร์บี จากแบบจำลองช่องสัญญาณในภาพที่ 3.5 วงจรตรวจหาวิเทอร์บีทำการเลือกลำดับข้อมูลอินพุต $\{a_k\}$ ที่ทำให้ความน่าจะเป็นของลำดับข้อมูล $\{y_k\}$ เมื่อกำหนดข้อมูล $\{a_k\}$ มาให้ นั่นคือ

$$p(y|a) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^{L+v}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{L+v-1} |y_k - r_k|^2\right\} \quad (3.22)$$

สำหรับสมการที่ (3.22) ได้มาจากความจริงที่ว่าสัญญาณรบกวน $\sim N(0, \sigma^2)$ และเมื่อกำหนดลำดับข้อมูลอินพุต a_k มาให้ แสดงว่าระบบทราบว่าลำดับข้อมูลเอาต์พุต r_k คืออะไร ดังนั้นข้อมูล y_k มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบเกาส์ (Gaussian Probability Density Function) เหมือนกับ n_k ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่า r_k และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 เมื่อใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการที่ (3.22) ทำให้ได้

$$\ln\{p(y|a)\} = \ln\left\{\frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma^2})^{L+v}}\right\} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=0}^{L+v-1} |y_k - r_k|^2 \quad (3.23)$$

จากสมการพบว่าทำให้สมการที่ (3.23) มีค่าน้อยที่สุดนั้น มีผลเทียบเท่ากับการทำให้ $\sum_{k=0}^{L+v-1} |y_k - r_k|^2$ มีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากในพจน์ของ $\ln\{1/(\sqrt{2\pi\sigma^2})^{L+v}\}$ เปรียบเสมือนกับค่าคงที่ เพราะฉะนั้นการทำให้สมการที่ (3.23) ให้มีค่าน้อยที่สุดขึ้นอยู่กับ

$$\sum_{k=0}^{L+v-1} |y_k - r_k|^2 \quad (3.24)$$

ดังนั้นถ้าสมการที่ (3.24) สามารถยืนยันได้ว่าสมการที่ (3.23) มีค่าน้อยที่สุดด้วย ดังนั้นวงจรตรวจหาวิเทอร์บีเลือกลำดับข้อมูลอินพุตที่ทำให้สมการที่ (3.22) มีค่าน้อยที่สุด สืบเนื่องจากสมการที่ (3.24) พบว่าพจน์ $|y_k - r_k|^2$ คือค่าระยะทางกำลังสองเฉลี่ย (MSE: Mean Square Distance) เมตริกในสมการที่ (3.24) สามารถทำให้มีค่าน้อยที่สุดได้ โดยการค้นหาเส้นทาง (path) ที่มีเมตริกน้อยที่สุดตามแผนภาพเทอร์ลิส เมื่อเมตริกเส้นทางมีค่าเท่ากับผลรวมของเมตริกสาขา โดยที่เมตริกสาขาของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ u ไปยังสถานะ q ถูกนิยามโดย

$$\lambda_k(u, q) = |y_k - \hat{r}_k(u, q)|^2 \quad (3.25)$$

เมื่อ $\hat{r}_k(u, q)$ คือ ข้อมูลเอาต์พุตของสัญญาณที่สอดคล้องกับ (u, q) และเมตริกเส้นทางสามารถหาได้จาก

$$\Phi_{k+1}(q) = \sum_{i=0}^k \lambda_i \quad (3.26)$$

จากภาพที่ 3.7 แสดงแผนภาพเทอร์ลิสของช่องสัญญาณ EPR4 เมื่อ $H(D) = 1 - D^2$ เมื่อพิจารณา ระยะที่ k (k -th Stage) มีเส้นทางการเปลี่ยนสถานะ 2 เส้นทาง ที่มาถึงสถานะ (2) ณ เวลาที่ $k+1$ นั้น คือ (1,2) หมายถึงจากสถานะที่ (1) มายังสถานะที่ (2) สามารถเขียนได้ว่า $\lambda_k(1,2)$ และ (3,2) นั้นคือ จากสถานะที่ (3) มายังสถานะที่ (2) สามารถเขียนได้ $\lambda_k(3,2)$

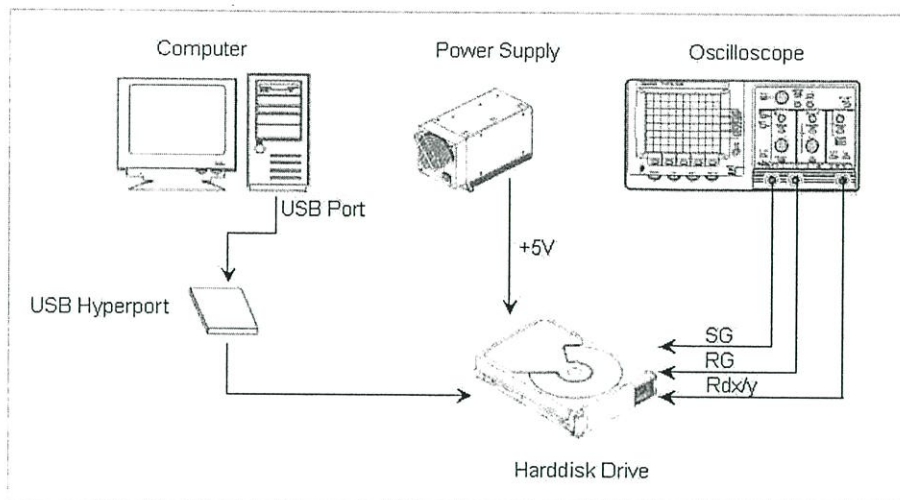
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวิจัย ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล โดยแสดงคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความร้อน (TR: Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMR ที่เกิดจากหัวอ่านทำปฏิกิริยากับสื่อบันทึกในระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก ตำแหน่งของโซน อุณหภูมิ ขั้วแม่เหล็กที่อยู่บนสื่อบันทึก ตลอดจนสมการคณิตศาสตร์ของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR และเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบที่มีการตรวจจับและแก้ไขปัญหาที่ระบบที่ไม่มีการป้องกันปัญหาดังกล่าว

4.1 การออกแบบการทดลอง

การที่ความจุของฮาร์ดดิสก์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน นั้นหมายความว่าความหนาแน่นของบิตข้อมูลเชิงพื้นที่ (Areal Density) ของฮาร์ดดิสก์ย่อมสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นั่นเป็นเหตุผลทำให้ระยะการบิน (Flying Clearance) ระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกต้องลดต่ำลงน้อยกว่า 10 nm เพื่อให้การอ่านเขียนข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกอาจถูกทำให้ลดลงได้ด้วยการลดความดันภายในฮาร์ดดิสก์ อีกทั้งในขณะที่หัวอ่านกำลังอ่านข้อมูลอยู่นั้น โพลทิป (Pole Tip) ของหัวอ่านจะยื่นออก (Protrusion) ทำให้ช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกแคบลง การลดลงของระยะการบิน จะเพิ่มความไวต่อการสั่นสะเทือนของพื้นผิวแอร์เบริง (ABS: Air Bearing Surface) จึงเป็นผลทำให้ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีความไวต่อการสั่นสะเทือน (Vibration) หรือ การกระแทกอย่างกะทันหัน (Shock) ซึ่งเพิ่มโอกาสที่จะทำให้หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับพื้นผิวของสื่อบันทึก (Head Disk Interaction) ได้ง่ายขึ้นทั้งที่ขณะทดสอบที่ฝ่ายการผลิตเองและในสภาพที่ใช้งานจริง ดังนั้นในขั้นตอนของการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 4.1 เพื่อเป็นการจำลองปรากฏการณ์ที่หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึก ดังนั้นระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับพื้นผิวของสื่อบันทึกจะถูกควบคุมด้วยการปรับการยึดของโพลทิป โดยตรงผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งจะส่งคำสั่งผ่านทางยูเอสบีไฮเปอร์พอร์ต (USB Hyperport) ไปยังฮาร์ดดิสก์ การทดลองนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ และทำการวัดสัญญาณอ่านกลับของฮาร์ดดิสก์ ผ่านจุดวัดสัญญาณ Rdx/y ที่อยู่บนแผ่นวงจร (PCB) โดยใช้ Differential Probe ต่อเข้าออสซิลโลสโคป ในขณะที่จุดวัดสัญญาณ Servo Gate และ Read Gate ที่อยู่บนแผ่นวงจรของฮาร์ดดิสก์มีความสำคัญมากในการบ่งบอกถึงตำแหน่งที่แน่นอนของสัญญาณบนจอออสซิลโลสโคป



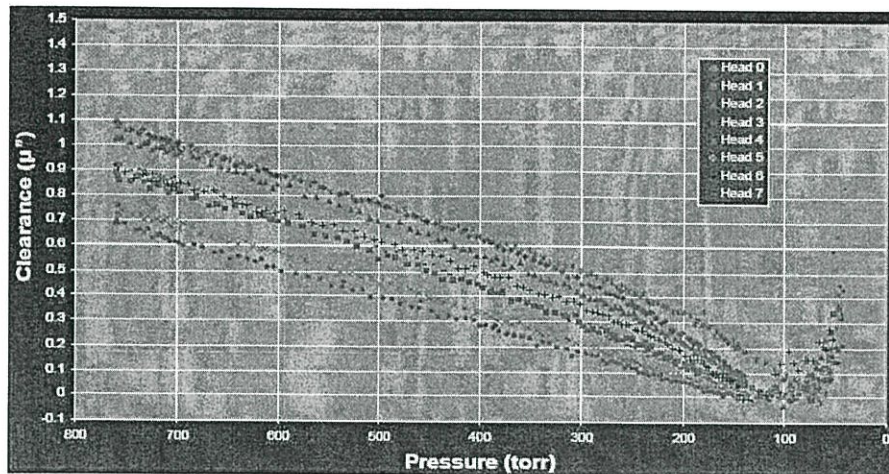
ภาพที่ 4.1 การออกแบบการทดลอง [6]

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง [7]

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	
รุ่นของฮาร์ดดิสก์	Bxx, Pxx, Gxx, Mxx
ระบบบันทึกข้อมูล	แนวตั้ง (Perpendicular)
จำนวนชุดหัวอ่าน	2-8 หัวอ่านต่อไคร์ฟ
ความเร็วรอบ	7200 รอบต่อนาที (RPM)
ชนิดของอินเตอร์เฟส	ซีเรียล-เอทีเอ (S-ATA)
ความจุฮาร์ดดิสก์ต่อแผ่น	320Gb – 1TB (1-4 แผ่น)
ความหนาแน่นเชิงพื้นที่	219 – 228 Gb/in ²
ประสิทธิภาพของการฟอร์แมต	77.8%
ความหนาแน่นของแทร็ก (0-skew)	191.0 kTPI
ความหนาแน่นเชิงเส้นต่อไคร์ฟ	1250 – 1300 kBPI
อัตราข้อมูลสูงสุด	1460 – 1520 เมกกะบิต/วินาที

4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยดังนั้นขั้นตอนในการทำวิจัย และ ทดลองทั้งหมด จึงได้จัดทำที่ห้องปฏิบัติการของบริษัทซีเคทเทคโนโลยีประเทศไทย ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.1 ซึ่งอินเตอร์เฟสที่ใช้เป็นแบบ SATA ความจุของฮาร์ดดิสก์อยู่ที่ 1500 Gb ความหนาแน่นของแทร็กข้อมูลคือ 191 KTPI ความหนาแน่นเชิงเส้นสูงสุดคือ 1293 KTPI ความต้านทานของหัวอ่านอยู่ที่ 300 Ω โดยประมาณ และความเร็วรอบของฮาร์ดดิสก์คือ 7200 rpm



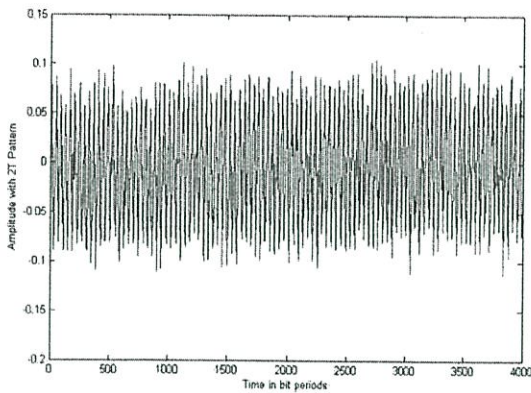
ภาพที่ 4.2 การทดลองลดความดันรอบ ๆ หัวอ่าน TGMR [6]

4.2 ผลการทดลอง

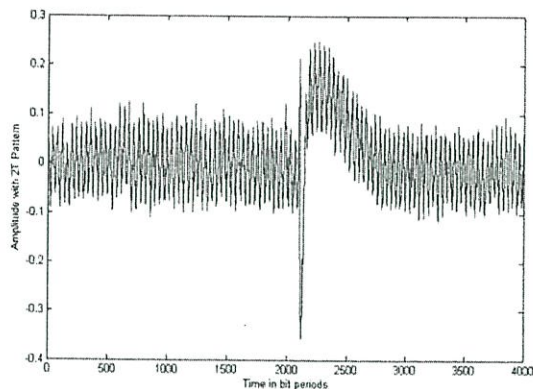
เพื่อพิสูจน์ว่าความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกจริง เราจึงได้ทำการทดลอง โดยบังคับให้ความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านลดลงเรื่อย ๆ จาก 800-0 ทอร์ โดยทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างพื้นผิวของสื่อบันทึกกับหัวอ่านไปด้วยขณะปรับลดความดัน ซึ่งผลลัพธ์ของการทดลองแสดงดังภาพ 4.2 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก มีความสัมพันธ์กับความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านจริง ซึ่งยิ่งค่าความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ลดลงมากเท่าใด ยังมีผลทำให้ค่าระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก ลดลงมากเท่านั้น นอกจากนี้เมื่อความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านลดลงจนถึง 100 ทอร์ ผลปรากฏว่าเกิดปรากฏการณ์หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึก (Head Disk Interaction) ในทุก ๆ ชุดของหัวอ่านที่ใช้ในการทดลอง จากผลลัพธ์ที่ได้เราจึงสามารถที่จะบังคับให้หัวอ่านทำปฏิกิริยากับสื่อบันทึกได้โดยการลดค่าความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านลง และทุกครั้งที่เกิดปรากฏการณ์หัวอ่านทำปฏิกิริยากับสื่อบันทึก จะทำให้เกิดการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ขึ้น ซึ่งในหัวข้อถัดไปเราจะทำการศึกษาคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านในสภาพแวดล้อมต่างๆ กันไปดังนี้

4.2.1 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก

ในการทดลองนี้เราจะทำการปรับลดค่าระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก ลงเรื่อย ๆ และเพื่อลดความซับซ้อนจากเทคนิคการลดความดันที่อยู่รอบ ๆ หัวอ่านลงเพื่อให้ค่าระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึกลดลงนั้น เราจะใช้เทคนิคการปรับการยึดของโพลทิป ผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่ใช้งานจริงของบริษัทซีเกท ผลการทดลองปรากฏว่าหัวอ่านจะทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึก (Head Disk Interaction) ก็ต่อเมื่อค่าการยึดของโพลทิปของหัวอ่านแบบ TGMR มีค่าสูงสุดจนทำให้สไลเดอร์กระทบ (Slap) ลงบนพื้นผิวของสื่อบันทึกเท่านั้น ซึ่ง

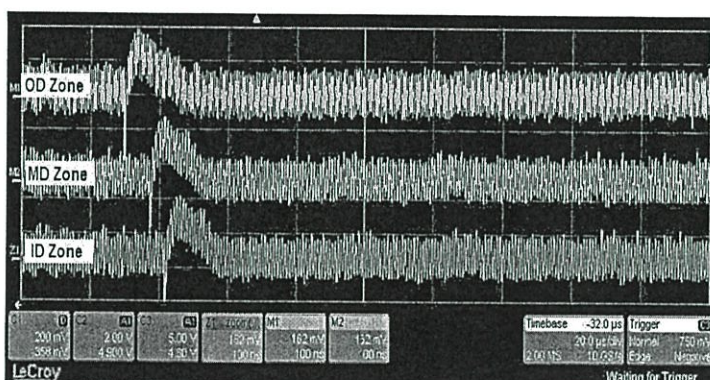


(ก)

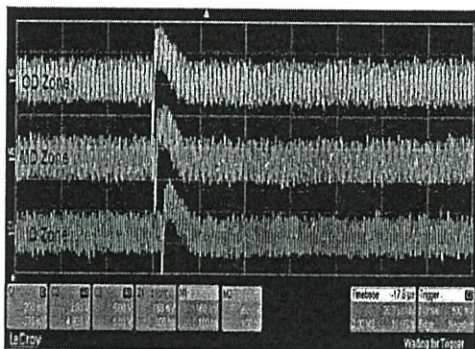


(ข)

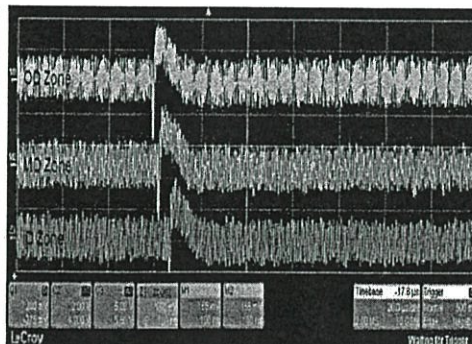
ภาพที่ 4.3 ผลของสัญญาณอ่านกลับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก (ก) คือสัญญาณอ่านกลับปกติ (ข) คือสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน [6]



ภาพที่ 4.4 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง โชนบนสื่อบันทึก [6]

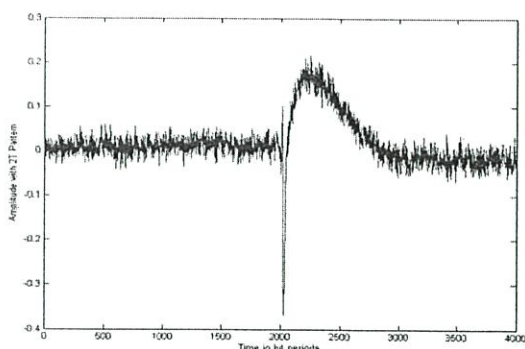


(ก)

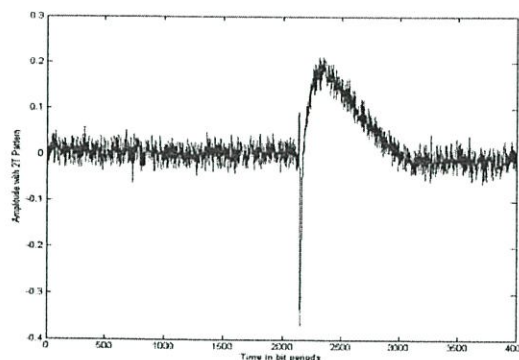


(ข)

ภาพที่ 4.5 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ก) คือสัญญาณอ่านกลับที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ข) คือสัญญาณอ่านกลับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [6]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.6 สัญญาณอ่านกลับในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็ก (ก) สัญญาณอ่านกลับขั้วแม่เหล็กด้านบวก (ข) สัญญาณอ่านกลับขั้วแม่เหล็กด้านลบ [6]

ผลลัพธ์ของปรากฏการณ์นี้จะทำให้สัญญาณอ่านกลับผิดเพี้ยนไปจากเดิมซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองเชิงความร้อนที่ทำให้สัญญาณอ่านกลับผิดเพี้ยนไปนั้นเป็นฟังก์ชันของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวอ่านกับสื่อบันทึก ดังแสดงในภาพที่ 4.3

4.2.2 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งโชนบนสื่อบันทึก

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงการปรับเปลี่ยนตำแหน่งโชนการอ่านข้อมูลของหัวอ่านแบบTGMR จากตำแหน่งโชนนอกสุดของแผ่นสื่อบันทึก (Outer Diameter) ไปยังตำแหน่งกลางโชนของแผ่นสื่อบันทึก (Middle Diameter) และ ตำแหน่งโชนในสุดของแผ่นสื่อบันทึก (Inner Diameter) และสังเกตการเปลี่ยนของสัญญาณอ่านกลับ ผลลัพธ์ปรากฏว่าถึงแม้ตำแหน่งของโชนบนแผ่นสื่อบันทึกจะมีการเปลี่ยนแปลงไปแต่รูปร่างของสัญญาณอ่านกลับทั้งในแง่ของแอมพลิจูดของสัญญาณและ ช่วงเวลา (Time Duration) ที่ได้รับผลกระทบจากผลตอบสนองเชิงความร้อน ของหัวอ่าน TGMR จะมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งที่ตำแหน่ง OD, MD และ ID โชน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านไม่ขึ้นกับตำแหน่งโชนบนแผ่นสื่อบันทึกข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.4

4.2.3 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอกฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ว่าจะมีอิทธิพลต่อรูปร่างของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่หรือไม่ ทั้งในแง่ของแอมพลิจูดสูงสุด (Peak Amplitude) ของสัญญาณอ่านกลับรวมไปถึงช่วงเวลา (Time Duration) ที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ เนื่องจากในสถานะการใช้งานจริงของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในแต่ละพื้นที่นั้นจะมีอุณหภูมิภายนอกไม่เท่ากัน โดยประเทศในแถบยุโรปและ

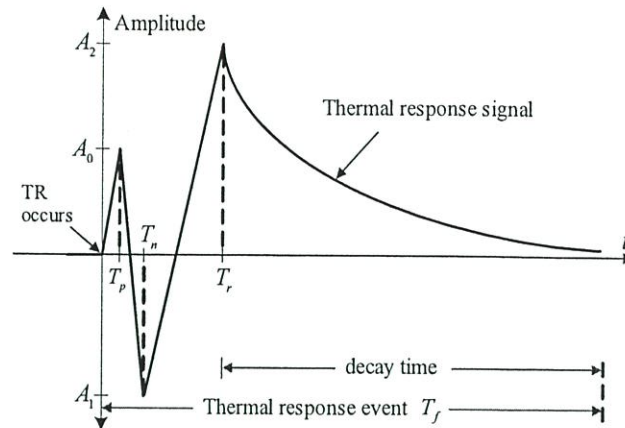
อเมริกาจะมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ส่วนประเทศในแถบเอเชียจะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังนั้นการทดลองนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงอุณหภูมิภายนอกฮาร์ดดิสก์ใดที่ว่ามีอิทธิพลต่อรูปร่างของ TR หรือไม่ ซึ่งในการทดลองนี้เราจะค่อยๆปรับเพิ่มอุณหภูมิของฮาร์ดดิสก์จาก 0-55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิใช้งานจริงที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจากผลการทดลองนี้เราพบว่าถึงแม้อุณหภูมิภายนอกของฮาร์ดดิสก์จะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเพียงใดก็ตามแต่รูปร่างของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนทั้งในแง่ของแอมพลิจูดของสัญญาณและ ช่วงเวลา ที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР จะมียูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งที่ตำแหน่ง OD, MD และ ID ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านไม่ขึ้นกับอุณหภูมิดังภาพที่ 4.5

4.2.4 การทดลองในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วแม่เหล็กในการเขียนข้อมูล

ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของขั้วแม่เหล็กที่เขียนลงไปบนสื่อบันทึกว่ามีผลกระทบต่อสัญญาณอ่านกลับในแง่ของรูปร่างสัญญาณอ่านกลับ ทั้งในแง่ของแอมพลิจูดของสัญญาณและ ช่วงเวลา ที่ได้รับผลกระทบจากผลตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР ซึ่งในการทดลองนี้เราจะเขียนสัญญาณ DC erase ทั้งขั้วบวกและลบสลับกันลงบนสื่อบันทึก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แม้ขั้วแม่เหล็กที่เขียนลงไปบนสื่อบันทึกจะเปลี่ยนแปลงไปแต่รูปร่างของสัญญาณอ่านกลับ ทั้งในแง่ของแอมพลิจูดของสัญญาณและ ช่วงเวลา ที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านจะมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพที่ 4.6

4.3 สมการคณิตศาสตร์ของการตอบสนองเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวอ่าน TGMР

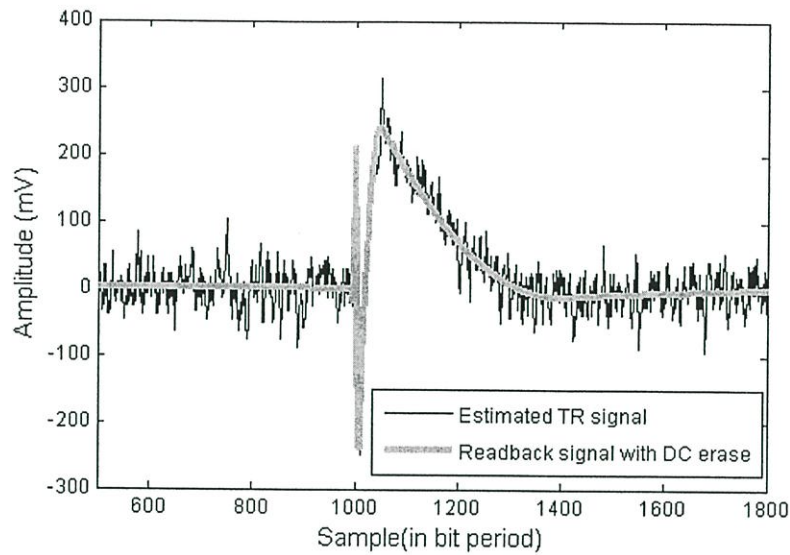
โดยทั่วไปแล้วการทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกันระหว่างสไลเดอร์กับพื้นผิวของสื่อบันทึกจะไม่เกิดขึ้นที่ส่วนประกอบของการอ่านโดยตรง แรกเริ่มของการสัมผัสกันจะเกิดขึ้นที่สไลเดอร์ขณะที่สื่อบันทึกกำลังหมุนไปยังเทรลลิงเอจ (Trailing Edge) ของสไลเดอร์การทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกันระหว่างสื่อบันทึกกับสไลเดอร์จะเกิดขึ้น เป็นผลทำให้สื่อบันทึกมีอุณหภูมิสูงขึ้น การที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างฉับพลันจะทำให้พื้นผิวสไลเดอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างฉับพลันด้วยเช่นกัน ตามสื่อบันทึกที่ผ่านสไลเดอร์ไปความร้อนบริเวณที่สัมผัสจะแผ่ไปยังส่วนประกอบของการอ่าน (Read Element) กระบวนการการแผ่ความร้อนสามารถอธิบายตามแนวคิดของ Mallary's realization [9] เมื่อสื่อบันทึกผ่านสไลเดอร์ไปไม่เพียงแต่พื้นผิวของส่วนประกอบของการอ่านเท่านั้นที่ร้อนขึ้นแต่ความร้อนจะแผ่ไปยังส่วนอื่นตามเส้นทางการแผ่ความร้อนในภาพที่ 2.21 ในบทที่ 2 ซึ่งจากภาพเราพบว่าเส้นทางของอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่เคลื่อนที่ไปยังหัวอ่านนั้นจะแผ่ความร้อนเป็นรูปทรงกระบอกแบบสองมิติ ในทางปฏิบัติความร้อนจะเริ่มแผ่กระจายในทิศทางข้ามแทร็ก (Cross Track) และทิศทางแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งตอนแรกจะไม่มีความร้อนแผ่กระจายในแนวแกน (Axial) ข้ามสตริป (Stripe) ปรากฏการณ์นี้จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นแบบเชิงเส้น ต่อมาเมื่อความร้อนแผ่มาถึง



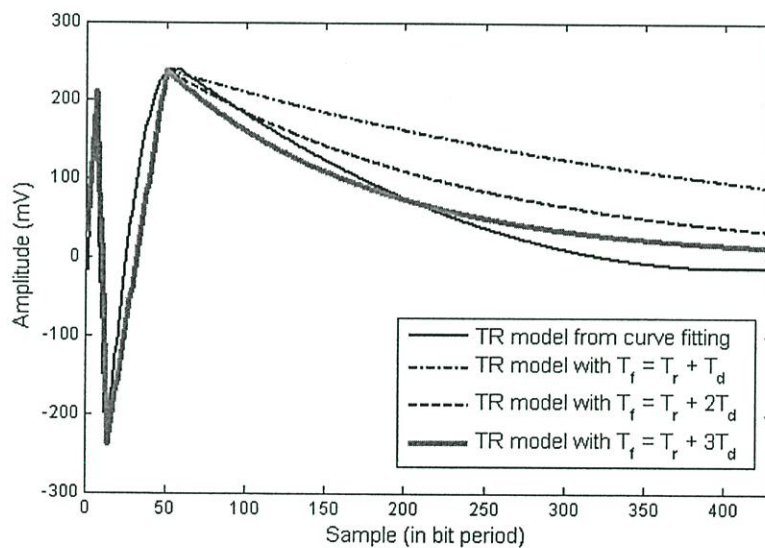
ภาพที่ 4.7 แบบจำลองของการตอบสนองเชิงความร้อนในหัวอ่าน TMR แบบใหม่ [7]

$$u(t) = \begin{cases} \frac{A_0}{T_p} t & 0 \leq t \leq T_p \\ \frac{A_1 - A_0}{T_n - T_p} (t - T_p) + A_0 & T_p < t \leq T_n \\ \frac{A_2 - A_1}{T_r - T_n} (t - T_n) + A_1 & T_n < t \leq T_r \\ A_2 e^{-(t-T_r)/T_d} & T_r < t \leq T_f \end{cases} \quad (4.1)$$

ขอบของสตริป (Stripe Edge) ความร้อนที่ผ่านสตริปไปจะช้าลงกว่าตอนที่ผ่านซิลด์เนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำของวัสดุที่ใช้ทำสตริป ซึ่งเป็นผลทำให้ความร้อนลดต่ำลง ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่หัวอ่านกับสื่อบันทึกทำปฏิกิริยากันในลักษณะนี้ จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างฉับพลันและค่อยๆ ลดต่ำลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล จากการทดลองจริงกับฮาร์ดดิสก์หลายรุ่นในโรงงานอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์เราจึงได้เสนอแบบจำลองของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TMR แบบใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ซึ่งเราได้แบ่งสัญญาณออกเป็นสี่ช่วง ประกอบด้วย ช่วงเวลาแมกนีโตสตรีกชันด้านบวกแบบเชิงเส้น (T_p) ช่วงเวลาแมกนีโตสตรีกชันด้านลบแบบเชิงเส้น (T_n) ช่วงการตอบสนองเชิงความร้อนขาขึ้นแบบเชิงเส้น (T_r) และ ช่วงการตอบสนองเชิงความร้อนขาลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ตามสมการที่ 4.1 เมื่อ A_0 และ A_1 คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณด้านบวกและลบของแมกนีโตสตรีกชันตามลำดับ A_2 คือแอมพลิจูดสูงสุดของการตอบสนองเชิงความร้อน T_p และ T_n คือช่วงเวลาแมกนีโตสตรีกชันด้านบวกและลบ T_r คือช่วงเวลาการตอบสนองเชิงความร้อนขาขึ้น T_d คือ ค่าคงที่การลดระดับ (decay constant) และ $T_f = T_r + 3T_d$ ซึ่งให้รูปร่างของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณจริงมากที่สุดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ผลของการทดลองให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างชัดเจนเกี่ยวกับสัญญาณ



ภาพที่ 4.8 สัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TMR และการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง [7]



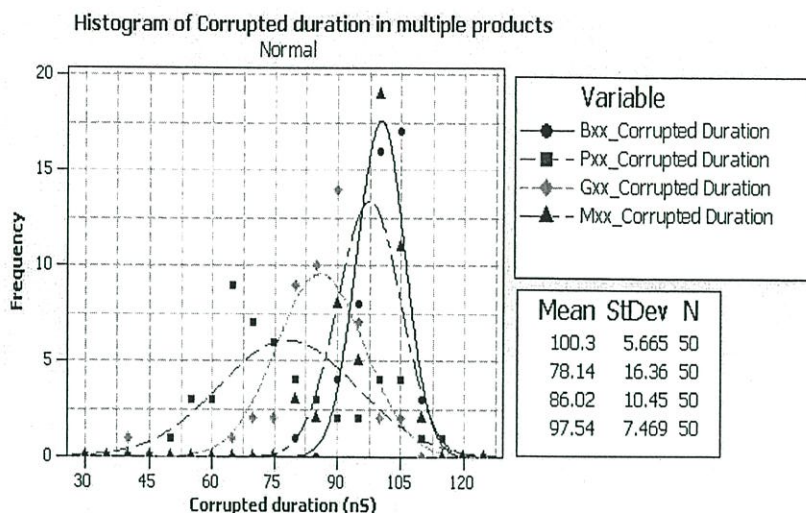
ภาพที่ 4.9 การประมาณค่าสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนในสมการที่ 4.1 ด้วยการปรับค่า T_r ที่แตกต่างกัน [7]

อ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนซึ่งจะทำให้เส้นเชื่อมฐาน (Baseline) ของสัญญาณเลื่อน (Shift) และยังเกิดแมกนิโตสตริกชัน ตอบสนองแบบสองขั้ว ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และเพื่อที่จะพิสูจน์แบบจำลองสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน เราได้ประมาณค่าสัญญาณทั้งสี่ช่วงในภาพที่ 4.8 โดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง (2^{nd} Order polynomial) ตามสมการที่ 4.2

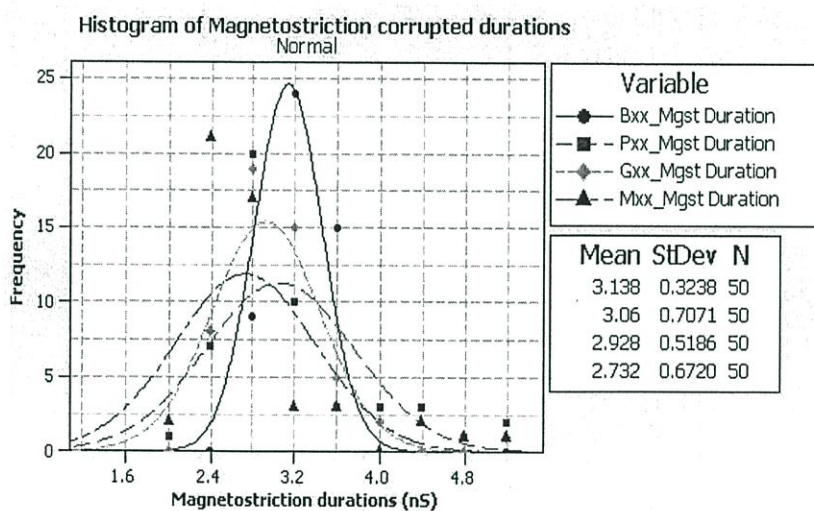
$$y(t) = p_1 t^2 + p_2 t + p_3 \quad (4.2)$$

เมื่อ $y(t)$ คือค่าประมาณของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน p_1 , p_2 และ p_3 คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่เป็นเลขจำนวนจริง ในภาพที่ 4.8 ยังแสดงค่าประมาณของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน ที่ได้จากสมการที่ 4.2 อีกด้วย จากนั้นเราได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองของสัญญาณอ่านกลับในสมการที่ 4.1 กับสมการที่ 4.2 ด้วยค่า T_f ที่ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.9 ผลลัพธ์เผยให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ 4.1 สอดคล้องกับค่าประมาณของสัญญาณอ่านกลับในภาพที่ 4.8 เมื่อแบบจำลองจากสมการที่ 4.1 ใช้ค่า $T_f = T_r + 3T_d$ ซึ่งจะให้ค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอ่านกลับจริงในภาพที่ 4.8 มากที่สุด นอกจากนี้เรายังทำการพิสูจน์แบบจำลองจากสมการที่ 4.1 ที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ่านกลับจริงโดยทำการสุ่มสัญญาณ 200 แชนเปิลจากฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด 4 รุ่นที่กำลังผลิตอยู่ในปัจจุบัน โดยทำการสุ่มสัญญาณรุ่นละ 50 แชนเปิล อันดับแรกทำการหาช่วงเวลาที่ย่านอ่านกลับได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นจริง โดยการพล็อตฮิสโทแกรมช่วงเวลาที่สัญญาณอ่านกลับได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อน (เริ่มจากสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบไปจนถึง T_f) ดังภาพที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ย่านอ่านกลับได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง 40.7-114.2 ns (5 Giga Samples/Second) หรือประมาณ 203-571 บิต ต่อมาเราได้ทำการหาช่วงเวลาของการเกิดแมกนีโตสตรักชัน (Magnetostriction Duration) โดยเริ่มตั้งแต่สัญญาณอ่านกลับเริ่มได้รับผลกระทบไปจนถึง T_n ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาของการเกิดแมกนีโตสตรักชันอยู่ในช่วงเวลาระหว่าง 1.8-5.2 ns (5 Giga Samples/Second) หรือประมาณ 10-26 บิต นอกจากนี้เรายังได้ทำการวิเคราะห์และทำการวัดพารามิเตอร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้สอดคล้องกับสัญญาณจริงในฮาร์ดดิสก์แต่ละรุ่นดังแสดงในตารางที่ 4.2

ผลของการทดลองที่ได้เราพบว่าค่าแอมพลิจูดสูงสุดเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับปกติ ที่ไม่มีผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนจะอยู่ที่ประมาณ 55 mV (จาก 0 ถึงค่าแอมพลิจูดสูงสุด) นั้นแสดงว่าเมื่อใช้ สมการที่ 4.1 สร้างสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนเพื่อใช้กับแบบจำลองช่องสัญญาณในการจำลองช่วงที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์แต่ละค่าในสมการที่ 4.1 จะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบ ดังนี้คือ A_0 จะรุนแรงเป็น 0.36-5.22 เท่าของสัญญาณอ่านกลับปกติ A_1 จะรุนแรงเป็น 0.51-6.7 เท่าของสัญญาณอ่านกลับปกติ และ A_2 จะรุนแรงเป็น 2.2-6.33 เท่าของสัญญาณอ่านกลับปกติ จากผลการทดลองทั้งหมดเผยให้เห็นว่าสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR

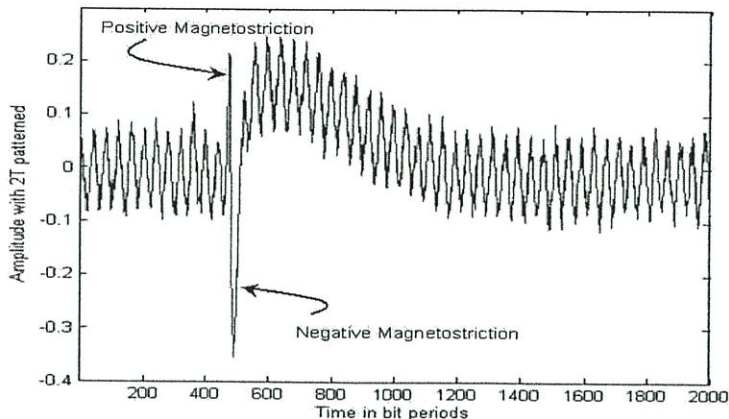


ภาพที่ 4.10 ฮิสโทแกรมของสัญญาณอ่านกลับแสดงช่วงที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองความร้อนของหัวอ่าน TGMR ในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่นที่กำลังผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม [7]

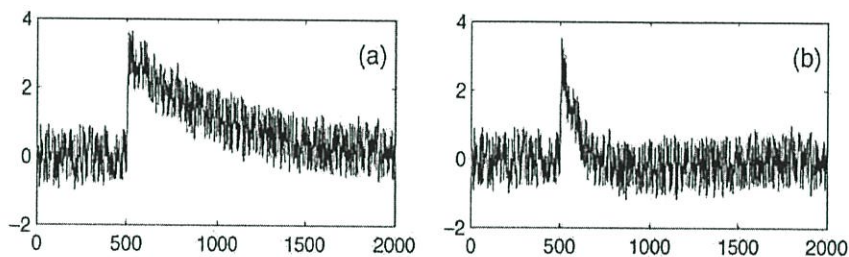


ภาพที่ 4.11 ฮิสโทแกรมของสัญญาณอ่านกลับแสดงช่วงเวลาการเกิดแมกนีโตสตริกชันของหัวอ่าน TGMR ในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่นที่กำลังผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ [7]

ที่ใช้ MgOx barrier สามารถทำให้สัญญาณอ่านกลับผิดเพี้ยนไปจากเดิมและทำให้เส้นเชื่อมฐาน ถูกเลื่อนไป นอกจากนี้เรายังพบว่าในทุก ๆ การทดลอง สัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ยังเกิดแมกนีโตสตริกชัน ตอบสนองแบบสองขั้ว ซึ่งรายละเอียดของปรากฏการณ์นี้ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ทำให้คุณลักษณะการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แตกต่างจากคุณลักษณะการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน MR แบบเดิมในอดีตซึ่งได้อธิบายโดย Stupp et al [8] ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13



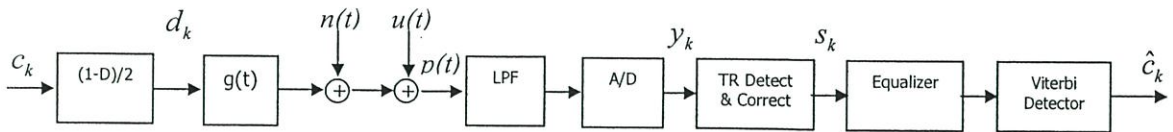
ภาพที่ 4.12 คุณลักษณะสัญญาณการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР ในปัจจุบัน [7]



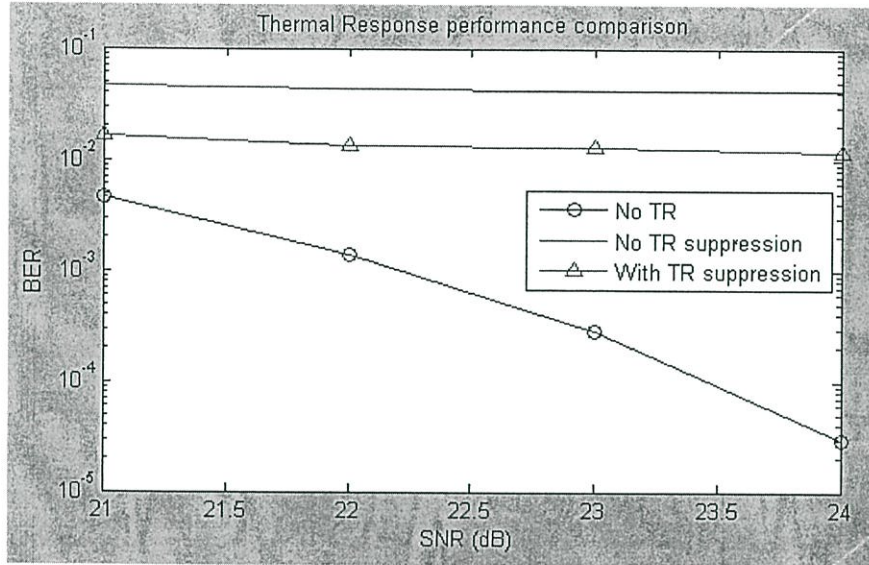
ภาพที่ 4.13 คุณลักษณะสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของ Thermal Asperity ในอดีต [17]

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMР จากข้อมูลทั้งหมด 200 แชมเปิลในฮาร์ดดิสก์ 4 รุ่น (50 แชมเปิล/รุ่น) [7]

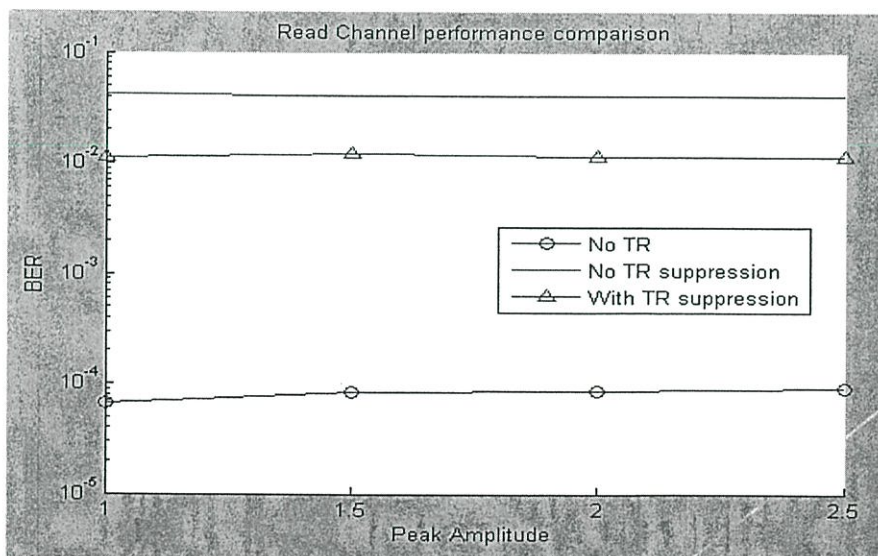
พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด (Minimum)	ค่าสูงสุด (Maximum)
ช่วงเวลาของแมกนีโตสตริกชัน (T_n)	1.8 ns	5.2 ns
แอมพลิจูดสูงสุดด้านบวกของแมกนีโตสตริกชัน (A_0)	20 mV	287 mV
แอมพลิจูดสูงสุดด้านลบของแมกนีโตสตริกชัน (A_1)	-28 mV	-368 mV
ช่วงการตอบสนองเชิงความร้อนขาขึ้น	3.2 ns	16 ns
ช่วงการตอบสนองเชิงความร้อนขาลง	27.5 ns	100.8 ns
แอมพลิจูดสูงสุดของการตอบสนองเชิงความร้อน (A_2)	120 mV	348 mV
ช่วงของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบทั้งหมด	40.7 ns	114.2 ns



ภาพที่ 4.14 แบบจำลองการลดผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGM ในช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง [2]



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TR ในรูปแบบ BER กับ SNR (dB) [7]



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TR ในรูปแบบ BER กับแอมพลิจูด [7]

4.4 การลดผลกระทบของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR

เนื่องจากสมการคณิตศาสตร์ของการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR ที่ได้จากการทดลอง (สมการที่ 4.1) มีคุณลักษณะที่แตกต่างจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านแบบ MR แบบเดิม [17] ที่ใช้ในอดีต (สมการที่ 2.10) ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งในภาพที่ 4.14 ระหว่างระบบที่มีการเตรียมการตรวจสอบและ แก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TR กับระบบที่ไม่มีการเตรียมการแก้ไขปัญหานี้ โดยเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TR ที่นำเสนอ จะใช้วิธีการตรวจหาและแก้ไข TR แบบเดียวกับเทคนิคที่ใช้ใน [10] โดยจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแง่ของ อัตราบิตที่ผิดพลาด (BER) ซึ่งการทำงานของภาพที่ 4.14 ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3

ซึ่งจากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเตรียมการในการตรวจสอบและแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TR (with TR Suppression) กับระบบที่ไม่มีการเตรียมการแก้ไขปัญหานี้ (without TR Suppression) ผลปรากฏว่าระบบที่มีการตรวจสอบและแก้ไขด้วยเทคนิคการหาค่าเฉลี่ย มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ไม่มีการแก้ไข ทั้งในแง่ของ SNR (dB) และ แอมพลิจูดสูงสุดของ TR

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการบันทึกข้อมูลที่สูงขึ้น หัวอ่าน TGMR จึงได้เข้ามาแทนที่หัวอ่านชนิดเดิมที่เป็นแบบ GMR และเนื่องจากความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal Density) ของฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ระยะการบินของหัวอ่าน TGMR ที่บินอยู่เหนือสื่อบันทึกระหว่างการอ่านเขียนข้อมูล ต้องลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปัจจุบันนี้ถูกลดต่ำลงน้อยกว่า 10 nm ดังนั้นปรากฏการณ์ที่หัวอ่านทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกับสื่อบันทึก (Head Disk Interaction) ในสภาพการใช้งานจริงของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยขึ้น และสามารถทำให้สัญญาณอ่านกลับผิดเพี้ยนไปจากเดิมรวมถึงทำให้เกิดการอ่านข้อมูลในเซ็กเตอร์นั้นผิดพลาดได้ เราเรียกสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์นี้ว่าการตอบสนองเชิงความร้อน (TR: Thermal Response) ของหัวอ่าน TGMR ซึ่งผลกระทบดังกล่าวนี้จะแตกต่างจากการตอบสนองเชิงความร้อนที่เกิดจาก TA (Thermal Asperity) ตรงที่ TA เกิดจากความขรุขระที่อยู่บนพื้นผิวของสื่อบันทึกเกิดการสัมผัสกับสไลเดอร์ ในขณะที่การตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR เกิดจากการที่หัวอ่านกับสื่อบันทึกทำปฏิกิริยาหรือสัมผัสกัน โดยที่พื้นผิวของสื่อบันทึกไม่มีความขรุขระอยู่ ในทางปฏิบัติแล้วการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่จะทำให้เส้นเชื่อมฐาน (Baseline) ของสัญญาณอ่านกลับเลื่อน (Shift) และยังเกิดแมกนีโตสตรักชัน (Magnetostriction) ตอบสนองแบบสองขั้ว จึงทำให้คุณลักษณะของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่ดูแตกต่างจากหัวอ่าน MR แบบเดิมในอดีต

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ แบบจำลองผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่าน TGMR แบบใหม่และสมการคณิตศาสตร์ของสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบที่มีการตรวจจับและแก้ไขปัญหาที่ระบบที่ไม่มีการป้องกันปัญหาดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าระบบที่มีการตรวจจับและแก้ไขปัญหาดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในแง่ของอัตราบิตที่ผิดพลาด (Bit Error Rate) นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอมีความสอดคล้องกับสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับผลกระทบจากการตอบสนองเชิงความร้อนของหัวอ่านที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอนี้ จะนำไปสู่การพัฒนาและออกแบบอัลกอริทึมใหม่เพื่อใช้ในการตรวจหาและแก้ไขข้อผิดพลาดดังกล่าวในระบบช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์. การประมวลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ธนาพรศ. พ.ศ.2550
- [2] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์. การประมวลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ธนาพรศ. พ.ศ.2550
- [3] R. Sbiaa, S. N. Piramanayagam, "Patterned Media Towards Nano-bit Magnetic Recording: Fabrication and Challenges," *Patents on Nanotechnology.*, vol. 1, no. 1, pp. 29-40, 2007.
- [4] M. Caertner, X. Li, D. A. Anderson, "Background Media Scan for recovery of data errors," U.S Patent no. 7490261B2, Feb 2009.
- [5] Fujitsu Computer Products of America, "CPP Read-Head Technology Enables Smaller Form Factor Storage," January 2009. [Online].Available : http://www.fujitsu.com/downloads/COMP/fcpa/hdd/ccp-basedstorage_wp.pdf
- [6] S. Thamakam, P. Kovintavewat, S. Nuanprasert, P. Supnithi, "Characterization of Thermal Response Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head," DSTCON2009, Bangkok, Thailand, May 2009.
- [7] S. Thamakam, P. Kovintavewat, K. Power, P. Supnithi, "A New Thermal Response Model Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head," DSTCON2010, Bangkok, Thailand, Jul 2010.
- [8] S. E. Stupp, M. A. Baldwinson, P. McEwen, T. M. Crawford, C. T. Rogers, "Thermal asperity trends," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 2, pp. 752-757, Mar 1999.
- [9] M. Mallary, Quantum, Shrewsbury, MA, private communication, 1995.
- [10] G. Mathew and I. Tjhia, "Thermal asperity suppression in perpendicular recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp 2878-2880, Oct 2005.
- [11] T. Zhao, K. Zhang, H. Wang, Y. Chen, M. Li, "Low resistance tunneling magnetoresistive sensor with natural oxidized double MgO barrier," U.S Patent no. 0111332A1, May 2007
- [12] A. N. Murthy, B. Feliss, D. Gillis, F. E. Talke, "Experimental and numerical investigation of shock response in 3.5 and 2.5 in. form factor hard disk drives," *Microsyst Design* 2006, pp. 1110-1116, June 2006.

- [13] E. M. Jayson, J. Murphy, P. W. Smith, Frank E. Talke, "Effects of air bearing stiffness on a hard disk drive subject to shock and vibration," *J. of Tribology*, vol. 125, pp. 343–345, April 2003.
- [14] S. Chikazumi, "Physics of Magnetism", John Wiley & Sons, 1964.
- [15] K. B. Klaassen, J.C.L. van Peppen, "Electronic Abatement of Thermal Interference in (G)MR Head Output Signals," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 2611–2161, Sep 1997.
- [16] V. Dorfman, J. K. Wolf, "A Method for Reducing the Effects of Thermal Asperities," *IEEE Journal.*, vol. 19, no. 4, pp. 662–667, April 2001.
- [17] M. F. Erden and E. M. Kurtas, "Thermal asperity detection and cancellation in perpendicular magnetic recording systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 3, pp. 1732–1737, May 2004.
- [18] F.E. Kennedy, L. Chen and D.B. Bogy, "Thermal Behavior Of Magnetoresistive Heads: An Analysis Of The Thermal Asperity Problem," *Proc. Symp. On Nanotribology and Nanotechnology for 1Tbit/in²*, A. Polycarpou, ed., ASME, pp. 73-80, 2001
- [19] L. Wang, M. S. Patwari. "Magneto-striction." [Slide]. USA : Seagate. Jun 2009.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

- [1] S. Thamakam, P. Kovintavewat, S. Nuanprasert, P. Supnithi, “Characterization of Thermal Response Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head”, in Proc. of DST-CON 2009, DSTCON 2009, Bangkok, Thailand, May 13 – 15, 2009.
- [2] S. Thamakam, P. Kovintavewat, K. Powers, P. Supnithi, “A New Thermal Response Model Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head”, in Proc. of DST-CON 2010, DSTCON 2010, Bangkok, Thailand, May 26 – 28, 2010.

Characterization of Thermal Response Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head

Suwatana Thamakam¹, Piya Kovintavewat², Somchai Nuanprasert³, and Pornchai Supnithi⁴

¹ College of Data Storage Technology and Applications, I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D*STAR), KMITL

² Data Storage Technology Research Unit, Nakhon Pathom Rajabhat University, Thailand

³ Asia Drive Launch Product Engineer, Seagate Technology (Korat), Thailand

⁴ Faculty of Engineering, I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D*STAR), KMITL, Thailand

¹ Suwatana.thamakam@Seagate.com, ² piya@npru.ac.th, ³ Somchai.Nuanprasert@Seagate.com, ⁴ ksapakorn@kmitl.ac.th

Abstract—Recent developments in the tunneling giant magneto-resistive (TGMR) head technology incorporating an MgO barrier, is currently the most promising candidate for replacing a GMR head. The TGMR head whose junction utilizes an MgO barrier yields a higher performance with a lower areal resistance (RA) value. However, as the areal density increases, the actual flying clearance of the head above the media surface during read/write operations is reduced to less than 10 nm. The head/disk interaction under such conditions results in a thermal response, which causes a shift in the baseline of the readback signal and exhibits bi-polar magnetostriction on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This magnetostriction causes the thermal response to look different from the classical thermal response that could distort the readback signal to the extent of causing a sector read failure. In this paper, we investigate and characterize the thermal response induced by the head/disk interaction in the TGMR head with an MgO barrier that is currently used in perpendicular magnetic recording systems.

Keywords— MgO Barrier; Perpendicular recording; TGMR head; Thermal response.

I. INTRODUCTION

Tunneling giant magneto-resistive (TGMR) sensors have many advantages over the GMR sensors when implemented as a read element in a hard disk drive (HDD). These advantages include increasing an MR ratio [1], and reducing a RA (i.e., RA = resistance \times area) value [1] and head noise. These advantages allow for an increase in data storage capacity.

The head-disk clearance in disk drives is being reduced continuously by current designs, in an effort to gain write/read performance. Recently, drives are being built with head-disk clearance close to 10 nm. Furthermore, head-disk clearance can become even less with decreased ambient air pressure. The reduction in head-disk clearance causes an increased sensitivity in the air bearing surface (ABS) altitude, resulting in variations in head flying characteristics. Therefore, head-disk interaction in real disk drive environments frequently occurs. As the amount of pole-tip protrusion increases, the gap between the head and the disk surface narrows. Thus, HDDs become more susceptible to shock and vibration during manufacturing and normal operation [2, 3]. The reduction in an effective fly height could cause the media surface and the

read head to be interacted and heated easily. This heat will cause the resistive properties of the read head to change, resulting in a thermal response (or, equivalently, thermal transient) in the readback signal. This thermal response affects the performances of both recording and disk drive reliability. If precautions are not carefully taken, the string of errors in the detected data caused by the thermal response could easily exceed the correction capability of error correction code (ECCs), resulting in unrecoverable data. Therefore, the thermal response is a crucial problem in perpendicular recording systems.

With the current TGMR read head (using an MgO barrier), the thermal response no longer looks like the classical thermal response proposed by Stupp *et al.* [4]. Thus, the characteristic of the thermal response introduced by the current TGMR head is of importance, as studied in this paper.

II. CURRENT TGMR HEADS WITH MGO BARRIER

Currently, the TGMR head has been replaced the GMR one because the TGMR head has a higher MR ratio. The TGMR design implements the Current Perpendicular to Plane (CPP) architecture in the read head. The CPP is the most significant deviation from the Current In Plane (CIP) architecture implemented in the GMR head, as shown in Fig. 1.

The CPP architecture has many design advantages that allow for high data recording density. By flowing the current perpendicularly to the plane, the read element can be made physically smaller than that with CIP technology. As the read elements become smaller, the potential data recording density increases. From Fig. 1 (d), the top to bottom current flow within the CPP element allows for the removal of the insulator gap. Not having an insulator gap makes the read element more sensitive and can be used in higher Bit per Inch (BPI) designs. Furthermore, CPP architecture allows the shield to be placed in direct contact with the TGMR element. The shield will act as the upper and the lower terminals to the device. This layout prevents cross-talk with adjacent tracks, thus allowing an increased Track per Inch (TPI) density. In addition, to prevent shorting around the sensor, insulators are aligned under hard magnetic layers.

Furthermore, the TGMR heads are often made with barrier layers consisting of magnesium-oxide (MgO). This increases the performance of the tunneling magneto-resistive sensor by

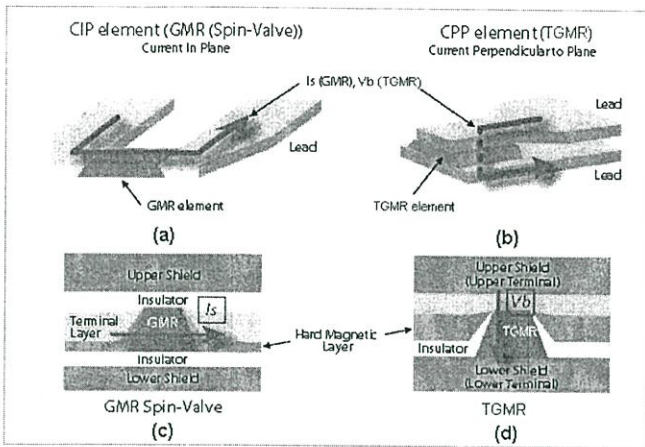


Fig.1. The difference between GMR and TGMR head designs [5].

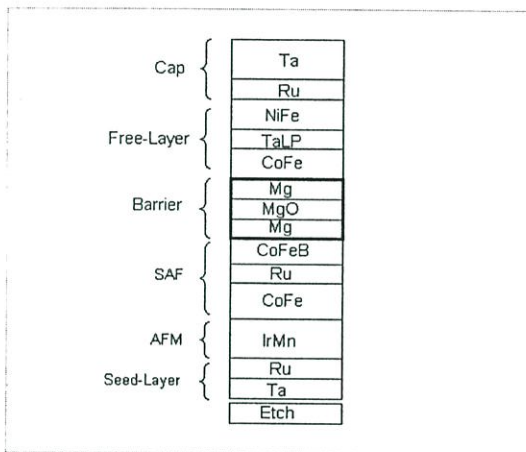


Fig. 2. Configuration of the TGMR head with an MgO barrier [1].

allowing increased amplitude when compared to conventional spin valve devices. The inclusion of MgO within the barrier layer also reduces the RA (resistance \times area) value, thus reducing head noise, while maintaining a high MR ratio. Practically, the MR ratio is defined as dR/R where R is the minimum resistance of the TGMR sensor and dR is the change in resistance observed by changing the magnetic state of the free layer. A higher MR ratio improves the readout speed. Because of the smaller physical size and higher sensitivity of the TGMR head, high recording densities can be achieved. A high performance TGMR sensor is fabricated by incorporating a tunnel barrier consisting of a Mg/MgO/Mg configuration, as shown in Fig. 2.

The current TGMR stack technology is comprised of a seed layer (Ta/Ru) in a bottom spin valve configuration, an AFM layer (IrMn), a pinned/synthetic antiferromagnetic (SAF) layer (CoFe/Ru/CoFeB), a barrier layer (Mg/MgO/Mg), a free layer (CoFe/NiFe), and a cap layer. All layers are sequentially formed on a bottom shield in the read head [1]. The TGMR stack technology differs from the GMR stack technology in the fact that the Cu layers have been replaced by oxide layers within the barrier layer. The lower Mg layer of 4 – 14 angstroms

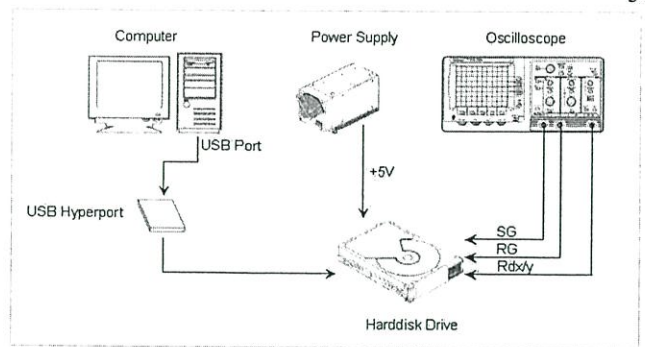


Fig. 3. Experimental setup.

thick along with the upper Mg layer of 2 – 8 angstroms thick are deposited by a DC sputtering method [1]. The sandwiched MgO layer is formed by a process of natural oxidation (NOX). The natural oxidation of an MgO layer is the preferred method of formation because it can provide more uniformity than the conventional sputtering methods. The natural oxidation process involves pressurizing oxygen from 0.1 mTorr to 1 Torr (1 torr = 1 mm of Hg) and allowing exposure for 15 – 300 seconds. In practice, the NOX time and pressure may be varied to optimize the MR ratio.

III. EXPERIMENT AND DISCUSSION

This paper characterizes the behavior of the thermal response induced by head/disk interaction in the current TGMR head as a function of head/disk spacing, zone position, temperature, and writing polarity. To achieve this, we performed an experiment in the laboratory. We use the TGMR head with an MgO barrier whose structure is shown in Fig. 2 because it has a high MR ratio and a low RA value. Additionally, we also set parameters for this experiment as follows:

The interface is SATA, a drive capacity is 1500 GB, a track density is 191 KTPI average, a maximum linear density is 1293 KBPI, and the resistance of the head is approximately 300 Ω . The rotational speed of the disk is 7200 RPM. The magnetic spacing between the read gap of the head and the medium surface is controlled by adjusting the pole-tip protrusion directly from a computer. This computer will send a command via an USB Hyperport to a HDD as shown in Fig. 3. The voltage of the drive was +5 volts. We measure the readback signal from the RDx/y test points on the printed circuit board (PCB) of the HDD with a differential probe connected to an oscilloscope. The Servo Gate (SG) and Read Gate (RG) test points on the PCB are very important to indicate the exact reading location within the disk drive. The Servo Gate and Read Gate signals are monitored on the oscilloscope.

By design, the flying clearance of the drive under test is close to 10 nm. With this low clearance along with the decreased clearance due to reduction in ambient air pressure, head/disk interaction frequently happens in a normal disk drive environment. To prove that ambient pressure affects

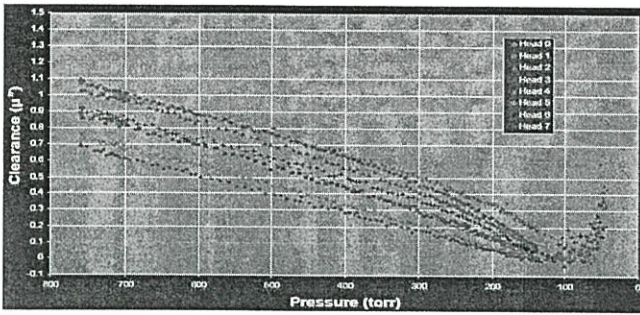


Fig. 4. The flying clearance of different TGMR heads as a function of ambient air pressures.

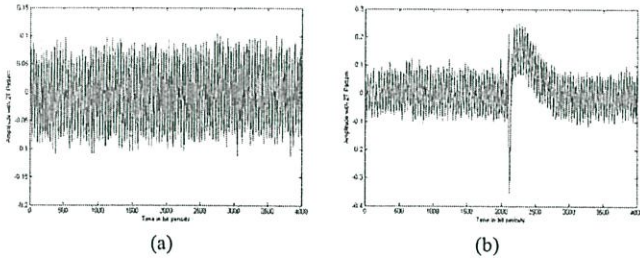


Fig. 5. The effect of the head/disk spacing, where (a) the normal readback signal, and (b) the corrupted readback signal caused by the thermal response.

head/disk clearance, we perform an experiment in the laboratory. The ambient air pressure is gradually decreased from 800 to 0 torr, while measuring the clearance of the head/disk. The results of this experiment are shown in Fig. 4. It is clear that head/disk clearance is related to the ambient air pressure. Specifically, a lower ambient air pressure results in a lower head/disk clearance. Furthermore, when the ambient air pressure approximately reaches 100 torr for all the heads tested, a strange head/disk interaction phenomenon is observed.

As a result, we can force the head/disk interaction to occur in a real HDD by decreasing ambient air pressure. Keep in mind that when the head/disk interaction happens, the thermal response will suddenly occur in the readback signal. In the following subsections, we investigate how head/disk spacing, zone position, temperature, and writing polarity affects the behavior of the thermal response resulting from the head/disk interaction.

A. Evaluation of Head/Disk Spacing

In this experiment, the spacing between the read gap of the head and the medium surface is controlled by adjusting the pole-tip protrusion from a computer. We observed the head/disk interaction phenomenon only when the pole-tip protrusion of the TGMR head slaps the disk surface. The result of the slap can be seen by a corruption the readback signal caused by thermal response. This implies that the thermal response causes corruption in the RDx/y signal and is a function of head/disk spacing, as depicted in Fig. 5.

B. Evaluation of Zone Position

To study this, we adjust the read position of the TGMR head

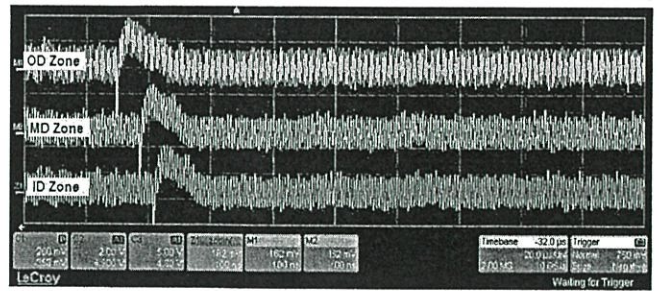


Fig. 6. The effect of zone positions upon the shape of the readback signal.

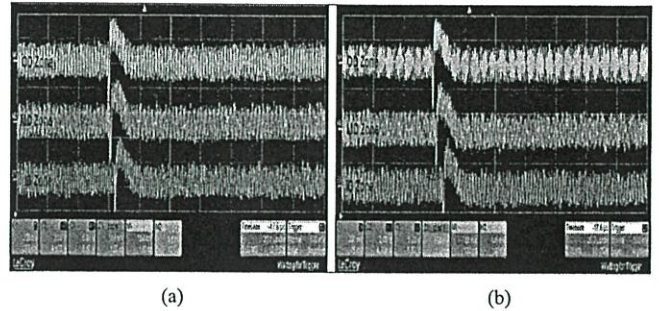


Fig. 7. The effect of the temperature upon the shape of the readback signal, where (a) the readback signal corrupted by the thermal response at cool temperature (e.g., 0°C), and (b) the readback signal corrupted by the thermal response at hot temperature (e.g., 55°C).

from an OD (outer diameter) zone to MD (middle diameter) zone and ID (inner diameter) zone, and look at the readback signal. We observed that although the zone position is changed, the shape of the readback signal corrupted by the thermal response remains the same throughout the OD, MD and ID zone positions. This implies that the corrupted readback signal in terms of its amplitude and its time duration is independent of the zone position as illustrated in Fig. 6.

C. Evaluation of Temperature

This experiment investigates how temperature affects the shape of the readback signal corrupted by a thermal response due to head/disk interaction in terms of its amplitude and its time duration. This can be done by gradually adjusting the ambient temperature from 0°C to 55°C. We found that even though the temperature is varied, the shape of the corrupted readback signal is still the same for all zone positions. This implies that the corrupted readback signal is also independent of temperature as shown in Fig. 7.

D. Evaluation of Writing Polarity

In this experiment, we study how the polarity of signals written on the medium surface affects to the polarity of the readback signal corrupted by the thermal response. To achieve this, we write the positive and the negative DC erase pattern on the medium. We observed although the polarity of signals written on the medium surface is changed to positive or negative, the corrupted readback signal still has the same polarity as depicted in Fig. 8. This implies that the polarity

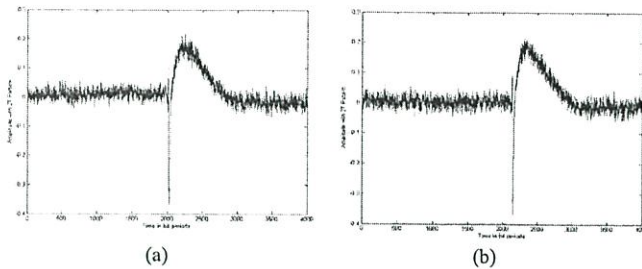


Fig. 8. The effect of the writing polarity, where (a) the corrupted readback signal with a positive DC erase pattern, and (b) the corrupted readback signal with a negative DC erase pattern.

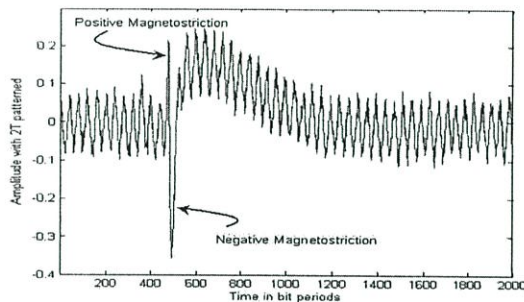


Fig. 9. Thermal response caused by the current TGMR head design with an MgO barrier.

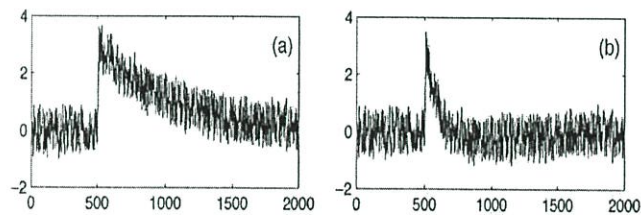


Fig. 10. The readback signal caused by the classical thermal response, where the corrupted readback signal (a) before and (b) after high-pass filtering [4].

of the corrupted readback signal is again independent to the polarity of signals written on the medium surface.

E. Note on Thermal Response Caused by TGMR Heads

The four experiments described above reveal that the thermal response resulting from the current TGMR head design with an MgO barrier can distort the readback signal and causes a baseline shift of approximately 160 – 400 bits. Furthermore, we also observed that the thermal response occurred in all experiments exhibits a bi-polar response on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This is primarily driven by magnetostriction [6] as depicted in Fig. 9. The magnetostriction causes the thermal response to look different from the classical thermal response described by Stupp *et al.* [4], as shown in Fig. 10.

Typically, magnetostriction is a property of ferromagnetic materials that change physically in response to changing its magnetization. This effect was first identified in 1842 by

James Joule [7] when observing a sample of nickel that changed in length when it was magnetized. This effect can cause losses because of frictional heating in susceptible ferromagnetic cores. Because the mechanism of magnetostriction is at an atomic level and is relatively complex, this paper will skip its details. For details about magnetostriction, readers can find in [6].

IV. CONCLUSION

With the increases of areal recording density in hard disk drives, the current TGMR head design is currently the most promising candidate. Specifically, the head physically becomes smaller, and the junction with an MgO barrier exhibits higher TGMR performance with a lower RA value. However, as the actual flying height is reduced, negative head/disk interaction in real disk drive environments frequently occurs and can distort the readback signal to the extent of causing possible sector read failures. The head/disk interaction phenomenon seen on the readback signal is known as a “thermal response.”

Practically, the thermal response causes a shift in the baseline of the readback signal and exhibits bi-polar magnetostriction on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This magnetostriction causes the thermal response to look different from the classical thermal response introduced by the MR sensors. Based on our experiments, we found that the thermal response caused by the current TGMR head is independent of head/disk spacing, zone position, temperature, and writing polarity. This can, in turn, enable the development of new algorithms for detecting and correcting this thermal response, which will improve the performance of the current hard disk drives.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by National Electronics and Computer Technology centre (NECTEC) and I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D*STAR) under grant HDD-01-51-06M.

REFERENCES

- [1] Tong Zhao, Kunliang Zhang, *et al.*, “Low resistance tunneling magnetoresistive sensor with natural oxidized double MgO barrier,” Patent number US 2007/0111332A1.
- [2] Aravind N. Murthy, Bert Feliss, *et al.*, “Experimental and numerical investigation of shock response in 3.5 and 2.5 in. form factor hard disk drives,” *Microsyst Design* 2006, pp. 1110-1116, June. 2006.
- [3] Eric M. Jayson, J. Murphy, P. W. Smith, Frank E. Talke, “Effects of air bearing stiffness on a hard disk drive subject to shock and vibration,” *Journal of Tribology*, vol. 125, pp. 343–345, April 2003.
- [4] M. F. Erden and E. M. Kurtas, “Thermal asperity detection and cancellation in perpendicular magnetic recording systems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 3, pp. 1732–1737, May 2004.
- [5] Fujitsu Computer Products of America, “CPP Read-Head Technology Enables Smaller Form Factor Storage,” retrieved on January 31, 2009, from http://www.fujitsu.com/downloads/COMP/fcpa/hdd/ccp-based-storage_wp.pdf
- [6] Magnetostriction and Magnetostrictive Materials, University of California, Los Angeles, retrieved on January 31, 2009, from [http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/magnetostrictive/magnetostriction/Magnetostriction and Magnetostrictive Materials.htm](http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/magnetostrictive/magnetostriction/Magnetostriction%20and%20Magnetostrictive%20Materials.htm).
- [7] James P. Joule, *Philosophical Magazine*, vol. XXV, 1844, p. 76, 225.

A New Thermal Response Model Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head

S. Thamakam, K. Powers, P. Kovintavewat, and P. Supnithi

Abstract— The tunneling giant magneto-resistive (TGMR) head technology incorporating an MgO barrier is currently the most promising candidate for replacing a GMR head. As the areal density increases, the actual flying clearance of the head above the media surface during read/write operations is reduced to less than 10 nm. The head/disk interaction under such conditions results in a thermal response, which causes a shift in the baseline of the readback signal and also exhibits bi-polar magnetostriction on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This magnetostriction causes the thermal response to look different from the classical thermal response that could distort the readback signal to the extent of causing a sector read failure. This paper proposes a mathematical model for the thermal response induced by the head/disk interaction in the TGMR head with an MgO barrier. Results show that the proposed mathematical model coincides with the actual thermal response occurred in today's hard disk drives.

Index Terms— MgO barrier; Perpendicular recording; TGMR head; Thermal response, Corrupted duration

I. INTRODUCTION

TUNNELING giant magneto-resistive (TGMR) sensors have many advantages over the classical GMR sensors when implemented as a read element in a hard disk drive (HDD). These advantages include increasing magneto-resistive ratio (MR ratio) [1], and reducing areal resistance (RA) value [1] and head noise. These advantages allow for an increase in storage capacity.

Current designs continuously reduce the head-disk clearance in today's disk in an effort to gain write/read performance. Recent drives are built with the head-disk clearance close to 10 nm [2] as shown in Fig. 1. In addition, the head-disk clearance can become even less with decreased

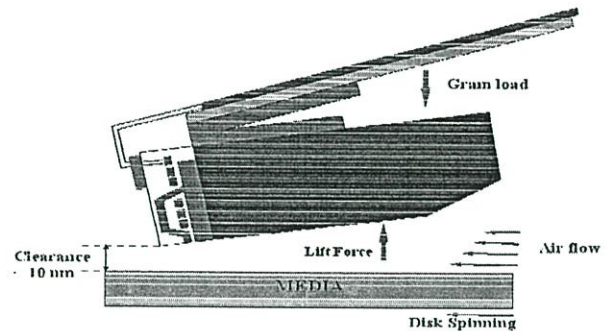


Fig.1. A schematic of the mechanical model of the media-slider contact

ambient air pressure. The reduction in the head-disk clearance causes an increased sensitivity in the air bearing surface (ABS) altitude, resulting in variations in head flying characteristics. Therefore, in real disk drive environments, the head-disk interaction often occurs. As the amount of pole-tip protrusion increases, the gap between the head and the disk surface narrows. Consequently, HDDs become more susceptible to shock and vibration during manufacturing and normal operation [3, 4]. The reduction in an effective fly height could cause the media surface and the read head to interact and become heated easily. This heat will cause the resistive properties of the read head to change, resulting in a *thermal response* (TR) (or, equivalently, *thermal transient*) in the readback signal. This thermal response affects the performances of both recording and disk drive reliability. If precautions are not carefully taken, the string of errors in the detected data caused by the thermal response could easily exceed the correction capability of error-control code (ECCs), resulting in unrecoverable data. Hence, the thermal response is a crucial problem in perpendicular recording systems.

With the current TGMR read head (using an MgO barrier), the thermal response no longer looks like the classical thermal response proposed by Stupp *et al.* [5]. Thus, the characteristic of the thermal response introduced by the current TGMR head is of importance, as studied in [6]. This paper proposes a mathematical model for the thermal response induced by the head/disk interaction in the TGMR head with an MgO barrier.

This paper organizes as follows. After describing the mechanism of the TGMR read head and proposing the TR signal model in a mathematical equation in Section II, Section III explains the experiment setup in the laboratory to verify the proposed TR model. Section IV briefly describes a free-

Manuscript received February 28, 2010.

S. Thamakam is with College of Data Storage Technology and Applications, I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D*STAR), KMITL, Thailand. (Corresponding author to provide phone: 087-999-1440; fax: 044-704-4730; e-mail: suwatana.thamakam@seagate.com).

K. Powers is with Component Engineering, Seagate Technology, CO, USA. (e-mail: Kevin.powers@seagate.com).

P. Kovintavewat is with Data Storage Technology Research Unit, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand. (e-mail: piya@npru.ac.th).

P. Supnithi is with Faculty of Engineering, I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D*STAR), KMITL, Thailand. (e-mail: ksupornc@kmitl.ac.th).

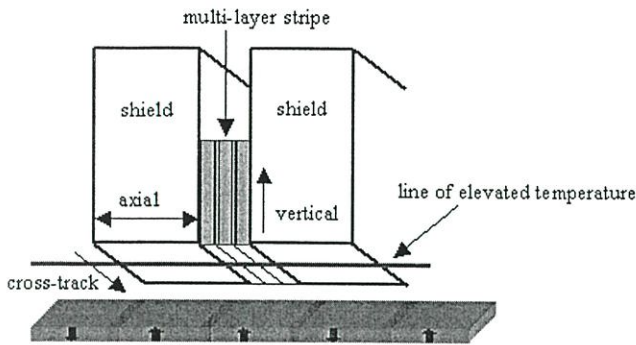


Fig. 2. A schematic of the line around the read element that is heated during head/disk interaction.

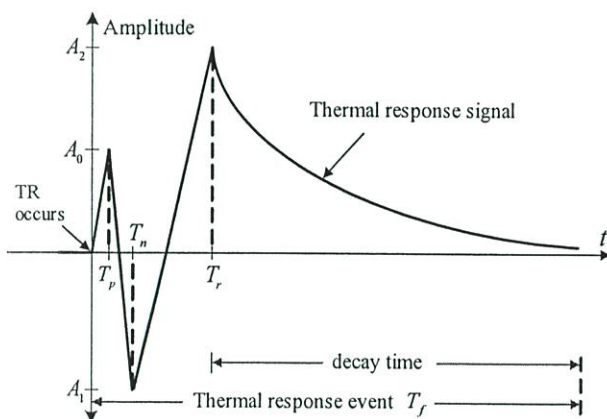


Fig. 3. The thermal response model induced by head/disk interaction.

layer magnetostriction mechanism. Eventually, Section V concludes this paper.

II. TGMR HEADS WITH THERMAL RESPONSE MODEL

In general, the contact between the slider and the medium surface does not begin at the read element. Instead, the initial contact occurs along the slider rail. As the medium moves towards the trailing edge of the slider, an interaction between the medium and the slider will occur, resulting in the medium heating to a high temperature. This abrupt change to high temperature will cause the slider surface to have high temperature as well as the medium which passes by. Then, the heat will diffuse through the read element.

The mechanism of thermal diffusion can be explained according to Mallery's realization [7]. As the medium passes by, not only the surface of the read element is heated, but the line around the read element is also heated as shown in Fig. 2. From the geometric viewpoint, we find that the line of elevated temperature of the heat move towards the head will have cylindrical in two dimensions. Practically, the heat will start flowing in cross-track and vertical directions. However, there is no heat diffusion in the axial direction (across the stripe) at the beginning of the TR process because there is no

Table 1. Parameters for the experiment to verify the proposed TR model.

Parameters	
Product Name	Bxx, Pxx, Gxx, Mxx
Recording system	Perpendicular
Heads	2-8 heads
Rotation	Speed 7200 RPM
Interface	S-ATA
Capacity (GB/Disc)	320Gb (1D) – 1TB (4D)
Areal Density (max in drive)	219 (1D) – 228 (4D) Gb/in
Avg Format Efficiency (%)	77.8
Track Density (0-skew)	191.0 kTPI
Linear Density (max in drive)	1250 (1D) – 1300 (4D) kBPI
Data Rate (max in drive)	1460 (1D) – 1520 (4D) Mb/s

thermal gradient in that direction. This situation will cause the temperature to linearly increase. Next, when the heat diffusion arrives at the stripe edges, the heat passing through the stripe will be slower than that through the shield because of low thermal conductivity of the materials around the stripe in cross-track and vertical directions. This results in a gradient temperature across the stripe. Given such a geometry, this is a preferred thermal relaxation mechanism for the stripe. Once the head and medium interact, the average temperature in the stripe will reach the highest temperature and then exhibit an exponential decay.

Based on the thermal diffusion mechanism when there is head/medium interaction, we propose the TR model as shown in Fig. 3. This simplified TR model can describe the TR event in *four regions*, namely, a linear positive magnetostriction rise-time, a linear negative magnetostriction fall-time, a linear TR rise-time, and an exponential TR decay-time. In other words, this TR signal can be mathematically expressed as

$$u(t) = \begin{cases} A_0 \frac{t}{T_p}, & 0 \leq t \leq T_p \\ A_0 + (A_1 - A_0) \frac{t - T_p}{T_n - T_p}, & T_p \leq t \leq T_n \\ A_1 + (A_2 - A_1) \frac{t - T_n}{T_r - T_n}, & T_n \leq t \leq T_r \\ A_2 \exp\left(\frac{t - T_r}{T_d}\right) & T_r \leq t \leq T_f \end{cases}, \quad (1)$$

where A_0 and A_1 are the positive and negative peak of magnetostriction, respectively, A_2 is the peak amplitude of TR signal, T_p and T_n are the positive and negative time of magnetostriction, T_r is a rise time, T_d is a decay constant, and $T_f = T_r + 3T_d$ because it matches the actual TR signal occurred in real disk drives as explained in Section III.

III. SPIN-STAND EXPERIMENT

In this section, we characterize the behavior of the TR signal induced by head/disk interaction in the current TGMR head when head/disk spacing is zero during contact. To achieve this,

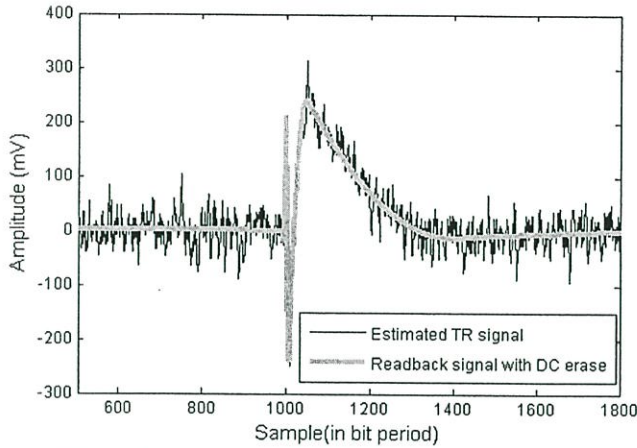


Fig. 4. The readback signal with TR based on a DC Erase pattern (black line) and the estimated TR signal based on a 2nd-order polynomial curve fitting technique (gray line).

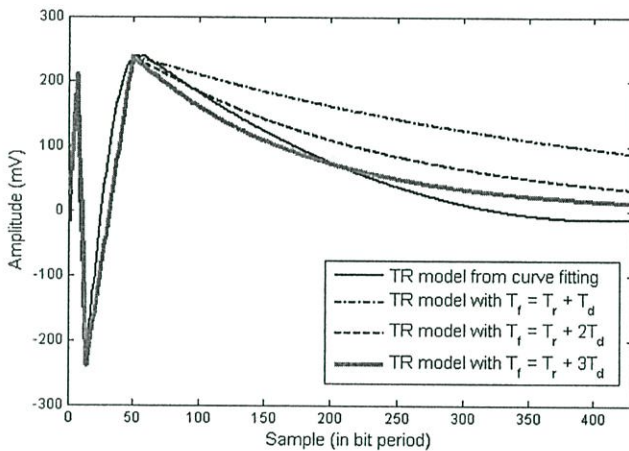


Fig. 5. The estimated TR signal from (1) with different T_f 's.

we perform an experiment in the laboratory by setting several parameters as listed in Table 1.

To obtain a large and severe TR signal during read process, the head/disk spacing is set to zero (all heads are set at the same level), and the pole-tip protrusion is also set to a maximum value. We use Seagate's internal software to send a command via serial port to a HDD to do this task. Then, we measure the readback signal from the RDx/y test points on the printed circuit board (PCB) of the HDD with a differential probe connected to an oscilloscope. Clearly, the measured TR signal shows a shift in the baseline of the readback signal and also exhibits bi-polar magnetostriction on opposing DC (positive and negative) backgrounds as shown in Fig. 4.

To verify the TR model in (1), we first estimate the TR signal for four regions in Fig. 4 based on a 2nd-order polynomial curve fitting technique according to

$$y(t) = p_1 t^2 + p_2 t + p_3, \quad (2)$$

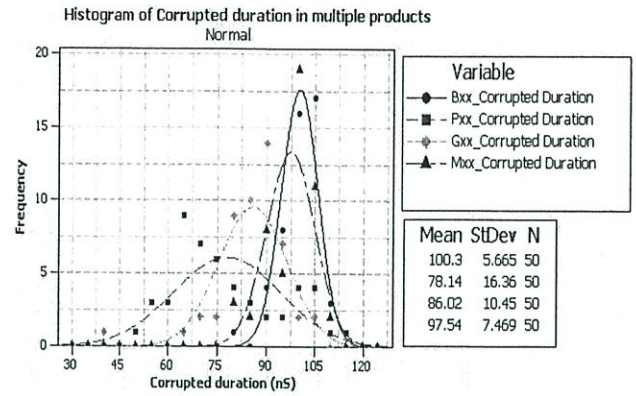


Fig.6. Histogram plot of the corrupted duration of the TR signal in various products.

where $y(t)$ is the estimated TR signal, and p_1 , p_2 , and p_3 are polynomial coefficients. Fig. 4 also depicts the estimated TR signal obtained from (2). Then, we compare the TR model in (1) with that in (2) for different T_f values as shown in Fig. 5. The result reveals that the TR model in (1) matches the estimated TR signal in Fig. 4, where the TR model in (1) with $T_f = T_r + 3T_d$ give the best estimate of the TR signal in Fig. 4.

We also verify the proposed TR model in (1) by comparing it with 200 samples of the actual TR signal obtained from four current Seagate products (50 samples/product). First, we find the time duration that the actual TR signal occurs in real disk drives. To do so, we collect the TR signal from 200 samples and plot the histogram of the corrupted duration (starting from when the TR occurs until T_j) caused by the TR signal as illustrated in Fig. 6. Based on different products, it implies that the corrupted duration of the actual TR signal ranges from 40.7 ns to 114.2 ns (with 5 Giga samples/second). In other words, the corrupted duration of the TR signal is about 203 – 571 bit periods.

Next, we find the time duration of the actual TR signal during magnetostriction mechanism, i.e. a magnetostriction duration T_n . Again, based on 200 samples, we plot the histogram of the magnetostriction duration (starting from when the TR occurs until T_n) as displayed in Fig. 7. It can be implied that the magnetostriction duration of the TR signal ranges from 1.8 ns to 5.2 ns (with 5 Giga samples/second). In other words, the corrupted duration of the TR signal is about 10 – 26 bit periods.

Furthermore, we also measure and analyze other parameters that matches the actual TR signal in various products as given in Table 2. Based on our experiment, we found that the average peak amplitude of the normal readback signal is about 55 mV (zero-to-peak voltage). As a consequence, when using (1) to generate the TR signal in the simulated channel model, the possible range of values of each parameter in (1) are, depending on how severe the TR signal as follows: A_0 is about 0.36 to 5.22 times, A_1 is about 0.51 to 6.7 times, and A_2 is about 2.2 to 6.33 times the peak of the normal readback signal.

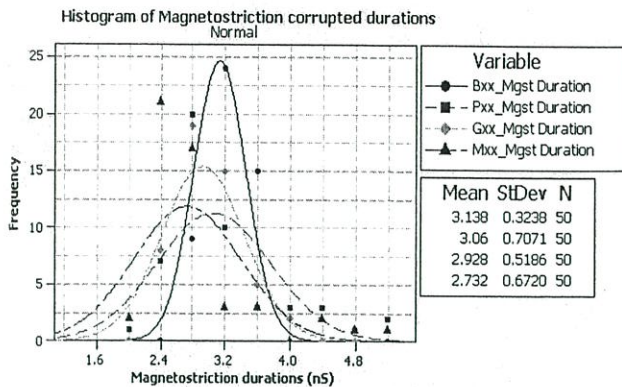


Fig. 7. Histogram plot of the magneto-striiction duration in various products..

Table 2. Typical parameters of the TR model based on 200 sample in various products, where the sampling rate is 5Giga sample/second.

Parameter	Minimum	Maximum
Magneto-striiction duration (T_n)	1.8 ns	5.2 ns
Positive magneto-striiction amplitude (A_0)	20 mV	287 mV
Negative magneto-striiction amplitude (A_1)	-28 mV	-368 mV
TR rise-time duration	3.2 ns	16 ns
TR decay-time duration	27.5 ns	100.8 ns
TR peak amplitude (A_2)	120 mV	348 mV
Total TR corrupted duration	40.7 ns	114.2 ns

IV. FREE LAYER MAGNETO-STRICTION

Practically, the thermal response occurred in the current TGMR read heads (using an MgO barrier) exhibits bi-polar magneto-striiction on opposing DC backgrounds, which was induced from the free layer [8]. It is typically a property of ferromagnetic materials that change physically in response to changing its magnetization. James Joule first identified this effect in 1842 [9] when observing a sample of nickel that changed in length when it was magnetized. Fig. 8 briefly explains the phenomenon of magneto-striiction.

The mechanism of magneto-striiction at an atomic level is relatively complex. Internally, the structure of a ferromagnetic material can be divided into several domains, each of which is a region of uniform magnetic polarization. When an external magnetic field is applied or changing magnetization (H) is applied, the boundaries between the domains will be shifted and the domains will start rotating. As a result, the physical shape of the material ($\delta\lambda$) will also be changed.

V. CONCLUSION

To achieve ultra high recording densities, the TGMR head design is used in place of the GMR head. As the flying height is reduced, head/disk interaction in real disk drive environments frequently occurs, which can distort the readback signal to the extent of causing possible sector read failures. The head/disk interaction phenomenon seen on the readback signal is referred to as the *thermal response* (TR). It is important to note that the TR differs from the TA in a sense that the TA phenomenon

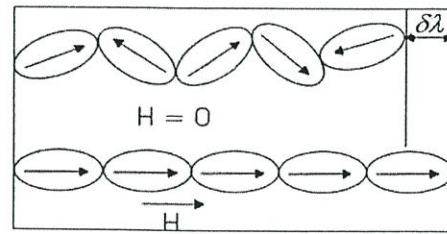


Fig. 8. Magneto-striiction phenomenon [9].

induced from media asperity on the disk comes into contact with the slider, whereas the TR phenomenon induced from head/disk interaction (no media asperity).

Practically, the TR causes a shift in the baseline of the readback signal and exhibits bi-polar magneto-striiction on opposing DC (positive and negative) backgrounds. This magneto-striiction causes the TR to look different from the classical thermal response introduced by the MR sensors. This paper proposes the TR model. Experimental results based on 200 samples in HDDs indicate that the proposed TR model coincides with the actual TR occurred in real HDDs. This TR model can enable the development of new algorithms for detecting and correcting this TR, which will in turn improve the performance of the current HDDs.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by I/U CRC in Data Storage Technology and Applications (D^{STAR}), KMITL, and National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), NSTDA, under grant HDD-01-51-06M.

REFERENCES

- [1] T. Zhao, K. Zhang, H. Wang, Y. Chen, M. Li, "Low resistance tunneling magnetoresistive sensor with natural oxidized double MgO barrier," U.S Patent no. 0111332A1, May 2007
- [2] R. Wang, U. V. Nayak, "Head-Disk Interface Considerations at 10-nm Flying Height," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 5, pp. 2132–2134, Sept 2002.
- [3] A. N. Murthy, B. Feliss, D. Gillis, F. E. Talke, "Experimental and numerical investigation of shock response in 3.5 and 2.5 in. form factor hard disk drives," *Microsyst Design 2006*, pp. 1110–1116, June 2006.
- [4] E. M. Jayson, J. Murphy, P. W. Smith, Frank E. Talke, "Effects of air bearing stiffness on a hard disk drive subject to shock and vibration," *J. of Tribology*, vol. 125, pp. 343–345, April 2003.
- [5] S. E. Stupp, M. A. Baldwinson, P. McEwen, T. M. Crawford, C. T. Rogers, "Thermal asperity trends," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 2, pp. 752–757, Mar 1999.
- [6] S. Thamakam, P. Kovintavewat, S. Nuanprasert, P. Supnithi, "Characterization of Thermal Response Induced by Head/Disk Interaction in Current TGMR Head," in *Proc. of DST-CON 2009*, DST-CON 2009, Bangkok, Thailand, May 13 – 15, 2009.
- [7] M. Mallary, Quantum, Shrewsbury, MA, private communication, 1995.
- [8] Z. Gao, B. W. Karr, S. Xue, E. L. Granstrom, K. T. Tran, Y. X. Li, "Magnetic sensing device including a sense enhancing layer," U.S Patent no. 0139827A1, June 2007.
- [9] S. Chikazumi, "Physics of Magnetism", John Wiley & Sons, 1964.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสุวัฒน์ ธรรมคำ
วัน เดือน ปีเกิด	29 มีนาคม 2526
ภูมิลำเนา	จังหวัดสกลนคร
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2548	ปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พ.ศ. 2553	ปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2549-50	ตำแหน่งวิศวกร บริษัทเวสเทิร์นดิจिटอลประเทศไทย -Failure Analysis Engineer.
พ.ศ.2551-ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกร บริษัทซีเกทเทคโนโลยีประเทศไทย -Asia Drive Launch Product Engineer.