

# การลดความซับซ้อนของอัลกอริทึมการตรวจหาและแก้ไข ความขรุขระเชิงความร้อนในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง

## Complexity Reduction of a TA Detection and Correction Algorithm in Perpendicular Recording Channels

สันติ กุลการชาย (Santi Koonkarnkhai)<sup>1\*</sup>  
ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์ (Piya Kovintavewat)<sup>2</sup>  
พงษ์ศักดิ์ กীরติวินทกร (Phongsak Keeratiwintakorn)<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการลดความซับซ้อนของอัลกอริทึมการตรวจหาและแก้ไขความขรุขระเชิงความร้อน (TA: thermal asperity) ในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง โดยจะลดซับซ้อนในรูปแบบของการลดจำนวนตัวดำเนินการบวกและการคูณที่ใช้ในการประมาณค่าสัญญาณ TA ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve fitting technique) เพื่อลดผลกระทบของ TA ที่มีอยู่ในสัญญาณอ่านกลับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอมีความซับซ้อนน้อยลงและยังคงให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเทคนิคแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบของอัตราข้อผิดพลาดของบิต (BER: bit-error rate) นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ด้วย

### Abstract

This paper proposes a method to reduce the complexity of thermal asperity (TA) detection and correction algorithms in perpendicular recording channels. We consider the complexity reduction in terms of reducing the number of operations (i.e., additions and multiplications) that are required to estimate the TA signal based on a curve fitting technique to suppress the TA effect in the readback signal. Results indicate that the proposed method with low complexity can still provide bit-error rate (BER) performance similar to the conventional one (with full complexity) and is also robust to changes in the peak TA amplitude.

**คำสำคัญ:** การปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม, การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง, ความร้อนเชิงขรุขระ

**Keywords:** Curve fitting, perpendicular magnetic recording, thermal asperity.

<sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* Corresponding author, e-mail: s5010182144@kmutnb.ac.th

## บทนำ

ในกระบวนการอ่านข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ หัวอ่านแบบ MR (magneto-resistive) จะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสนามแม่เหล็กของบิตข้อมูลที่ถูกเขียนเข้าไปในสื่อบันทึก ซึ่งเป็นผลทำให้ได้เป็นสัญญาณพัลส์การเปลี่ยนสถานะ (transition pulse) ที่ด้านขาออกของหัวอ่าน ดังนั้นเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่เข้ามาชนกับความขรุขระ (asperity) บนพื้นผิวของสื่อบันทึกที่เกิดจากอนุภาคหรือสิ่งแปลกปลอมเข้าไปฝังบนผิวของสื่อบันทึก ก็จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (transient voltage) มาผสมกับสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) ซึ่งส่งผลทำให้เส้นเชื่อมฐาน (baseline) ของสัญญาณอ่านกลับมีค่าเปลี่ยนไปตามลักษณะของสัญญาณ TA โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เพิ่มขึ้นมานี้จะเรียกกันทั่วไปว่า “สัญญาณ TA” (Stupp et al., 1999)

โดยทั่วไปสัญญาณ TA เป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ, แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 2 - 3 เท่าของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ, ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (rise time) ประมาณ 60 - 150 นาโนวินาที, และช่วงเวลาลดระดับ (decay time) ประมาณ 1 - 5 ไมโครวินาทีที่มีลักษณะการลดระดับแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential decay) (Stupp et al., 1999) ในทางปฏิบัติสัญญาณ TA จะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดเป็นจำนวนมากในระบบซึ่งเกินขีดความสามารถของรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (ECC: error-correction code) ที่จะจัดการได้ ดังนั้นเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในปัจจุบันบทความวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA มีจำนวนมาก เนื่องจากสัญญาณอ่านกลับที่ไม่มีผลกระทบของสัญญาณ TA จะมีค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ (หรือเส้นเชื่อมฐาน) มีค่าเท่ากับค่าศูนย์ ดังนั้น (Klaassen and Peppen, 1997) ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาการเกิดของสัญญาณ

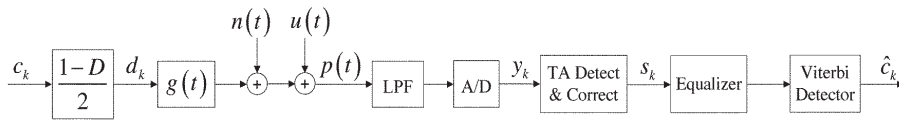
TA โดยใช้เทคนิคการหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold-based approach) ซึ่งจะเปรียบเทียบสัญญาณอ่านกลับและค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ จากนั้นก็จะทำการลดผลกระทบของ TA โดยการนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรองผ่านสูง ในขณะที่ (Dorfman and Wolf, 2001) ได้เสนอเทคนิคการลดผลกระทบของ TA โดยการนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรอง (1 - D) เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย (unit delay operator) ซึ่งเมื่อนำเทคนิคนี้ไปทดลองกับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวนอนที่มีทาร์เก็ต (target) เป็นแบบ EPR4 พบว่าประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นมาก แต่ก็ยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับสหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งต่อมาได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมดของเทคนิคนี้โดยอาศัยวงจรทำนายสัญญาณรบกวน (noise predictor) ใน (Dorfman and Wolf, 2002) อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอใน (Dorfman and Wolf, 2001) และ (Dorfman and Wolf, 2002) ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งเนื่องจากช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งมีองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (d.c. component) มาก

สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง (Erden and Kurtas, 2004) ได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบของสัญญาณ TA โดยอาศัยวงจรกรองผ่านต่ำและวงจรกรองผ่านสูง ในขณะที่ (Mathew and Tjhia, 2005) ได้เสนอวิธีการตรวจหาและแก้ไข TA แบบง่ายที่ไม่ซับซ้อนโดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับเพื่อนำมาใช้ในการตรวจหาค่าแห่งการเกิด TA จากนั้นการแก้ไข TA ทำได้โดยการนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาลบออกจากสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง อย่างไรก็ตามสัญญาณ TA ที่สร้างขึ้นมาโดยวิธีนี้ยังไม่ดีเท่าที่ควร เพราะฉะนั้น (Kovintavewat and Koonkarnkhai, 2009) ได้เสนอเทคนิคการประมาณค่าสัญญาณ TA โดยใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve fitting technique) เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ TA ขึ้นมาใหม่ ซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคแบบที่ใช้กันทั่วไปมาก นอกจากนี้

ยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ด้วย

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่นำเสนอใน (Kovintavewat and Koonkarnkhai, 2009) เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ บทความนี้

จะเริ่มต้นจากการอธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง จากนั้นก็จะอธิบายแบบจำลองของสัญญาณ TA, นำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA, เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ, และสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความนี้



รูปที่ 1. แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่มีผลกระทบจากความขรุขระเชิงความรบกวน

### แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแนวตั้ง

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง โดยที่ลำดับข้อมูล  $C_k \in \{\pm 1\}$  ที่มีคาบเวลาของบิต (bit period) เท่ากับ  $T$

จะถูกป้อนเข้าวงจรกรอง  $(1 - D)/2$  ทำให้ได้ลำดับข้อมูล  $d_k \in \{\pm 1, 0\}$  เมื่อ  $+1$  คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบบวก (positive transition bit),  $-1$  คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบลบ (negative transition bit), และ  $0$  คือไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ  $p(t)$  สามารถเขียนได้เป็น

$$p(t) = \sum_k d_k g(t - kT) + n(t) + u(t) \quad (1)$$

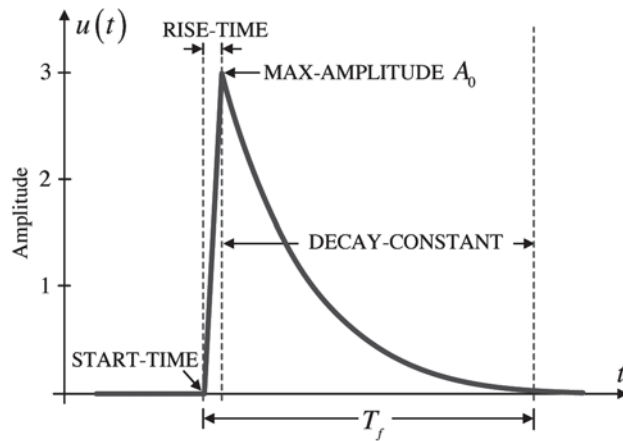
โดยที่  $g(t) = \text{erf}(t\sqrt{\ln 16 / PW_{50}})$  คือผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะของช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง,  $PW_{50}$  คือความกว้างของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม จุดครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของ  $g'(t)$ ,  $\ln(\cdot)$  คือฟังก์ชันลอการิทึมฐานธรรมชาติ,  $\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x e^{-t^2} dt$  คือฟังก์ชันข้อผิดพลาด (error function),  $n(t)$  คือสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองข้าง  $N_0/2$ , และ  $u(t)$  คือสัญญาณ TA

เมื่อวงจรภาครับได้รับสัญญาณอ่านกลับก็จะส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: lowpass filter) และทำการซิกตัวอย่างสัญญาณด้วยอัตราสุ่ม 500 เมกะบิตต่อวินาที (Mathew and Tjhia, 2005) โดยสมมติ

ว่ามีการเข้าจังหวะอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้ได้เป็นลำดับข้อมูล  $y_k$  จากนั้นก็จะส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาและแก้ไข TA, วงจรอีควอลไลเซอร์ (equalizer), และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) เพื่อหาลำดับข้อมูล  $c_k$  ที่เป็นไปได้มากที่สุด

### แบบจำลองสัญญาณ TA

ในส่วนนี้จะอธิบายแบบจำลองสัญญาณ TA ที่นิยมใช้กันทั่วไปซึ่งได้มาจาก (Stupp et al., 1999) เพราะว่าแบบจำลองนี้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของสัญญาณ TA



รูปที่ 2. แบบจำลองสัญญาณ TA

ซึ่งถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ

- START-TIME คือพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดตำแหน่งการเกิดผลกระทบของสัญญาณ TA ในระบบว่าจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดของสัญญาณอ่านกลับ
- RISE-TIME คือพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดช่วงเวลาเพิ่มระดับของสัญญาณ TA ตั้งแต่ค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดของสัญญาณ TA ซึ่งกำหนดโดยพารามิเตอร์ MAX-AMPLITUDE
- MAX-AMPLITUDE คือพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าสูงสุดของสัญญาณ TA

- DECAY-CONSTANT คือพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าคงที่ของช่วงเวลาลดระดับซึ่งมีการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential) โดยจะเป็นตัวกำหนดการลดลงจากจุดสูงสุดของสัญญาณ TA จนถึงจุดที่ต้องการ

จากข้อกำหนดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสัญญาณ TA ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้แทนสัญญาณ TA ที่เกิดขึ้นในระบบได้ดังนี้ (Mathew and Tjhia, 2005)

$$u(t) = \begin{cases} A_0 t / T_r, & 0 \leq t \leq T_r \\ A_0 \exp(-(t - T_r) / T_d), & T_r < t \leq T_f \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ  $A_0$  คือแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA,  $T_r$  คือช่วงเวลาเพิ่มระดับ,  $T_d$  คือค่าคงที่การลดระดับ, และ  $T_f$  คือช่วงเวลาของสัญญาณ TA ซึ่งในที่นี้กำหนดให้  $T_f = T_r + 4T_d$  โดยที่ช่วงเวลาลดระดับมีค่าเท่ากับ  $4T_d$  ก็เพียงพอที่จะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณ TA ลดลงเหลือเพียง 1.8% ของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA

### เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบทั่วไป

ในบทความนี้เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบที่ใช้กันทั่วไป (หรือเรียกว่าวิธี “F1”) จะหมายถึงเทคนิคที่นำเสนอใน (Kovintavewat and Koonkarnkhai, 2009) ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่นำเสนอใน (Mathew and Tjhia, 2005)

โดยการตรวจหาการเกิดของ TA จะอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อ TA เกิดขึ้นในระบบจะทำให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ (หรือเส้นเชื่อมฐาน) มีค่าไม่เท่ากับค่าศูนย์ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้หาได้จาก (Mathew and Tjhia, 2005)

$$q_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-\beta}^{k+\beta} y_i \quad (3)$$

เมื่อ  $L$  คือความกว้างของหน้าต่างที่ใช้หาค่าเฉลี่ย (เป็นเลขจำนวนเต็มคี่) และ  $\beta = (L - 1)/2$  โดยจะมีการตรวจพบการเกิดขึ้นของ TA ในระบบก็ต่อเมื่อ  $q_k \geq m_1$  และถ้าแซมเปิลข้อมูลของสัญญาณอ่านกลับมีค่ามากกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน  $m_2$  (นั่นคือ  $y_k > m_2$ ) เป็นจำนวนหลายแซมเปิลติดกัน (Mathew and Tjhia, 2005) หมายถึงเหตุทั้งสองเงื่อนไขได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความมั่นใจว่าการตรวจพบการเกิดสัญญาณ TA จริง แทนที่จะเป็นสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด (false alarm)

จากนั้นการแก้ไขผลกระทบของ TA จะใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมในการประมาณค่าสัญญาณ TA (Kovintavewat and Koonkamkhai, 2009) โดยอาศัยลักษณะของสัญญาณ TA ตามรูปที่ 2 นั่นคือสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับจะมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น (linear) และสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับจะมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

### การประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ

เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของสัญญาณ TA ก็จะทำการเก็บแซมเปิลข้อมูลของค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ตั้งแต่ตำแหน่งที่ตรวจพบ TA จนถึงค่าสูงสุดของ  $q_k$  เพื่อใช้ในการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ โดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้น ซึ่งมีรูปสมการคือ

$$\hat{u}_r(t) = at + b \quad (4)$$

เมื่อ  $\hat{u}_r(t)$  คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ และ  $a, b$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นที่เป็นเลขจำนวนจริง ซึ่งหาได้จากการแก้สมการ

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m t_i^2 & \sum_{i=1}^m t_i \\ \sum_{i=1}^m t_i & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m t_i q_i \\ \sum_{i=1}^m q_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ  $q_i = q(iT)$  คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับลำดับที่  $i$ ,  $t_i$  คือเวลาที่สอดคล้องกับ  $q_i$  และ  $m$  คือจำนวนแซมเปิลที่ใช้ในการประมาณค่า TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ

### การประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ

การประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับจะใช้ข้อมูล  $q_k$  ตั้งแต่แซมเปิลที่  $q_j$  ไปจนถึงแซมเปิลที่  $q_j + 4T_d$  เมื่อ  $j$  คือตำแหน่งค่าสูงสุดของ  $q_k$  โดยที่การประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับนี้จะใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่มีรูปสมการคือ

$$\hat{u}_d(t) = Ae^{Bt} \quad (6)$$

เมื่อ  $\hat{u}_d(t)$  คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ และ  $A, B$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลที่เป็นเลขจำนวนจริง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์  $A$  หาได้จาก  $A = \exp(z)$  เมื่อ

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) \sum_{i=1}^n (q_i \ln q_i) - \sum_{i=1}^n (t_i q_i) \sum_{i=1}^n (t_i q_i \ln q_i)}{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) - (\sum_{i=1}^n t_i^2 q_i)^2} \quad (7)$$

และค่าสัมประสิทธิ์  $B$  หาได้จาก

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i q_i \ln q_i) - \sum_{i=1}^n (t_i q_i) \sum_{i=1}^n (q_i \ln q_i)}{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) - (\sum_{i=1}^n t_i^2 q_i)^2} \quad (8)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนแซมเปิลของ  $\{q_k\}$  ที่ใช้ในการประมาณค่าของสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ โดยที่การประมาณค่าของสัญญาณ TA ในช่วงลดระดับจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อ  $\hat{u}_d(t) < 0.01$

หลังจากที่ได้ค่าประมาณในแต่ละส่วนแล้ว ก็จะนำค่าประมาณของช่วงเพิ่มระดับและช่วงลดระดับทั้ง 2 ส่วนนี้มารวมกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณของสัญญาณ TA,  $\hat{u}(t)$  ตามสมการต่อไปนี้

$$\hat{u}(t) = \begin{cases} \hat{u}_p(t), & T_y \leq t \leq \hat{T}_p \\ \hat{u}_d(t), & \hat{T}_p < t \leq \hat{T}_f \end{cases} \quad (9)$$

เมื่อ  $T_y$  คือเวลาที่ตรวจพบสัญญาณ TA,  $\hat{T}_p$  คือเวลาเมื่อแซมเปิล  $\{q_k\}$  มีค่าสูงสุดและ  $\hat{T}_f$  คือค่าประมาณช่วงเวลาของสัญญาณ TA

### การลดความซับซ้อนสำหรับการประมาณค่าสัญญาณ TA

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนสำหรับการประมาณค่าสัญญาณ TA เฉพาะในช่วงเวลาลดระดับเท่านั้น (สันติ, 2008) เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อการศึกษาตำแหน่งการเกิดของสัญญาณ TA และให้ง่ายต่อการพิจารณาความซับซ้อนของแต่ละวิธีในรูปแบบของตัวดำเนินการบวกและการคูณ โดยวิธีการลดความซับซ้อนของการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับที่นำเสนอมีดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1 ในการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับจะหาค่าเฉลี่ยเฉพาะบางค่า ซึ่งจะเรียกวิธีการนี้ว่า “R1” สำหรับวิธีนี้จะใช้การหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับตามสมการที่ (3) แต่เมื่อมีการตรวจพบ

การเกิดของ TA ก็จะทำการลดความซับซ้อนโดยการหาค่าเฉลี่ยเฉพาะตำแหน่งที่  $\{q_{ir}\}$  โดยที่  $r > 1$  และเป็นจำนวนเต็มบวก หรือเป็นการหาค่าเฉลี่ยทุกๆ  $r$  แซมเปิล โดยจะใช้แซมเปิลข้อมูล  $\{q_{ir}\}$  ในการหาค่าสัมประสิทธิ์  $A$  และ  $B$  ที่ใช้สำหรับการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ

วิธีที่ 2 เนื่องจากปกติการหาค่าสัมประสิทธิ์  $A$  และ  $B$  ตามสมการที่ (7) และ (8) จะต้องใช้แซมเปิลข้อมูล  $\{q_k\}$  เท่ากับ  $4T_d$  แซมเปิลในการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ  $\{q_k\}$  สำหรับวิธีการลดความซับซ้อนของการประมาณค่าสัญญาณ TA วิธีนี้จะใช้ความยาวของข้อมูล  $\{q_k\}$  น้อยกว่า  $4T_d$  แซมเปิล ซึ่งจะใช้แซมเปิลข้อมูล  $\{q_k\}$  เป็นจำนวนร้อยละ  $x$  ของ  $4T_d$  โดยจะเรียกประสิทธิภาพของวิธีนี้ว่า “R2”

วิธีที่ 3 คือการหาค่าเฉลี่ยทุกๆ  $r$  แซมเปิล เมื่อ  $r > 1$  และการใช้ความยาวของข้อมูล  $\{q_k\}$  น้อยกว่า  $4T_d$  แซมเปิล ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (7) และ (8) นั่นคือการใช้เทคนิคการลดความซับซ้อนในการประมาณค่าสัญญาณ TA ด้วยวิธี R1 และ R2 ร่วมกัน ซึ่งจะเรียกวิธีการนี้ว่า “R3”

เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของ TA กระบวนการตรวจหา TA จะหยุดลงเป็นระยะเท่ากับ  $T_f$  เพื่อทำการประมาณค่าสัญญาณ TA และลดผลกระทบของ TA โดยหลังจากที่ได้ค่าประมาณของสัญญาณ TA นั่นคือ  $\hat{u}_k = \hat{u}(kT)$  จากการประมาณค่าสัญญาณ TA ที่ได้จากการลดความซับซ้อนทั้ง 3 วิธีแล้วก็จะนำผลออกจากสัญญาณอ่านกลับ  $\{y_k\}$  โดยที่

$$\begin{aligned} s_k &= y_k - \hat{u}_k, & \text{เมื่อมีการเกิด TA} \\ &= y_k, & \text{เมื่อไม่มี TA} \end{aligned} \quad (10)$$

จากนั้นก็ส่งลำดับข้อมูล  $\{s_k\}$  ที่ได้ไปยังวงจรรีจิวเออร์และวงจรถอดหาวีเทอร์บี ตามลำดับ

ในส่วนตัวไปนี้จะแสดงรายละเอียดที่ใช้ในการเปรียบเทียบความซับซ้อนในการประมาณค่าสัญญาณ TA ของแต่ละวิธี โดยจะพิจารณาความซับซ้อนจากจำนวนตัวดำเนินการบวกและตัวดำเนินการคูณที่ใช้ในการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความซับซ้อนในรูปแบบตัวดำเนินการบวกและการคูณ เมื่อ  $r$  คือจำนวนเต็มที่ใช้หาค่า  $\{q_r\}$  ทุกๆ  $r$  แซมเปิล โดยที่  $r > 1$  สำหรับ R1,  $x$  คือร้อยละของจำนวนแซมเปิล  $\{q_k\}$  ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณค่าสัญญาณ TA ที่ใช้สำหรับ R2 และ  $T_d$  คือจำนวนแซมเปิลทั้งหมดของการประมาณค่าในช่วงเวลาครดระดับ

**ผลการทดลอง**

ในบทความนี้จะพิจารณากรณีที่มีสัญญาณอ่านกลับแต่ละเซกเตอร์ (sector) มีสัญญาณ TA เกิดขึ้นหนึ่งครั้ง (หนึ่งเซกเตอร์มีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 4096 บิต) โดยที่การเกิด TA ในแต่ละเซกเตอร์จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของบิตที่ 1000T, และมี  $A_0 = 2, T_f = 30T, T_d = 250$  และจะทำให้ได้จำนวนแซมเปิลทั้งหมดของสัญญาณ TA คือ  $T_f = 1030T$  สัญญาณ TA ถือว่าเป็นในกรณีที่แย่ที่สุด (worst case) ซึ่งถ้าไม่มีการลดผลกระทบของ TA ในสัญญาณอ่านกลับก็จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากในข้อมูลแต่ละเซกเตอร์ได้ (Mathew and Tjhia, 2005)

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบความซับซ้อนของการประมาณค่าสัญญาณ TA ในการประมาณค่าช่วงลครดระดับ

วิธี	จำนวนตัวดำเนินการบวก	จำนวนตัวดำเนินการคูณ
F1	$(L+14)\hat{T}_d + 4$	$19\hat{T}_d + 10$
R1	$(L+14)(\hat{T}_d / r) + 4$	$19\hat{T}_d / r + 10$
R2	$(L+14)(x\hat{T}_d) / 100 + 4$	$(19x\hat{T}_d) / 100 + 10$
R3	$(L+14)(x\hat{T}_d) / 100r + 4$	$(19x\hat{T}_d) / 100r + 10$

สำหรับการจำลองระบบ (simulation) จะพิจารณา ระบบที่ความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล  $ND = PW_{50} / T = 2.5$ , อีควไลเซอร์ที่ใช้มีจำนวน 11 แท็ป (tap) และใช้ทาร์เก็ตแบบ GPR (generalized partial response target) แบบ 4 แท็ปคือ  $1 + 1.351D + 0.958D^2 + 0.325D^3$  ซึ่งถูกออกแบบโดยเทคนิคข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE: minimum mean-squared error) (Moon and Zeng, 1995) ณ SNR ที่ทำให้เกิด BER =  $10^{-4}$  เมื่อไม่มีผลกระทบของ TA นอกจากนี้ในการตรวจหาการเกิดของ TA จะทำการหาค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  โดยใช้  $L = 51, m_1 = 0.5$  และ  $m_2 = 1.1$  (Mathew and Tjhia, 2005) และในบทความนี้จะนิยามค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR : signal-to-noise ratio) ดังนี้

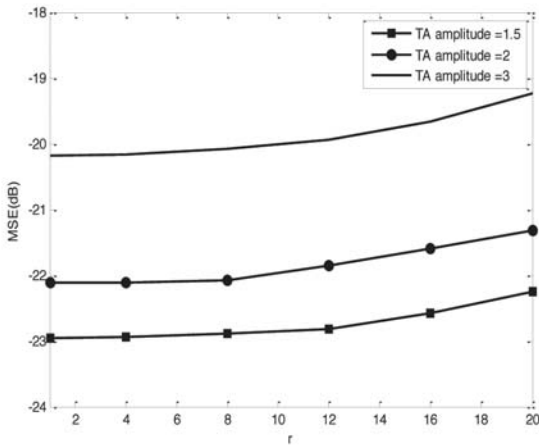
$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{E_i}{N_0} \right) \tag{11}$$

มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB: decibel) เมื่อ  $E_i$  คือพลังงานของผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (อนุพันธ์ของ  $g(t)$  หารด้วยค่าสอง)

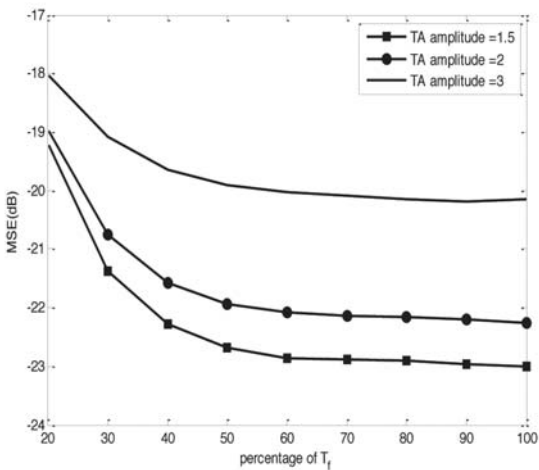
รูปที่ 3 และรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) ระหว่างสัญญาณ TA ที่ได้จากการประมาณค่าสัญญาณ TA ด้วยวิธีการลดความซับซ้อนวิธี R1 และ R2 กับสัญญาณ TA ที่สร้างจากสมการที่ (2) โดยที่ค่า MSE หาได้จาก

$$MSE = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{4T_d} \sum_{k=i}^{T_f} \{u_d(kT) - \hat{u}_d(kT)\}^2 \right) \tag{11}$$

มีหน่วยเป็น dB โดยที่  $u_d(kT)$  คือสัญญาณ TA ในช่วงลครดระดับที่ได้จากสมการที่ (2) และ  $\hat{u}_d(kT)$  คือสัญญาณ TA ในช่วงลครดระดับที่ได้จากการประมาณค่าสัญญาณ TA



รูปที่ 3. ข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ระหว่างสัญญาณ TA และการประมาณค่าของสัญญาณ TA ที่มีการปรับค่า  $r$  ณ SNR = 27 dB

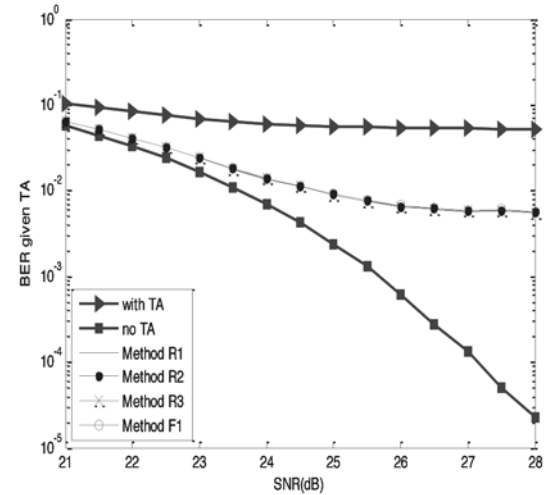


รูปที่ 4. ข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ระหว่างสัญญาณ TA และค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่มีการปรับค่า  $x$  ณ SNR = 27 dB

เมื่อใช้เงื่อนไขการลดความซับซ้อนของการประมาณค่าในช่วงลดระดับแบบต่างๆ

สำหรับการเปรียบเทียบค่า MSE จะใช้ค่า SNR ที่ทำให้ BER =  $10^{-4}$  นั่นคือ SNR = 27 dB และแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA คือ  $A_0 = 1.5, 2$  และ 3 รูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบค่า MSE ที่ได้จากการลดผลกระทบด้วยวิธี R1 ซึ่งจะพบว่า  $r = 8$

จะให้ค่า MSE ที่ใกล้เคียงกับ  $r = 1$  ในทุกๆ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA และในทำนองเดียวกันรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่า MSE ที่ได้จากการลดความซับซ้อนด้วยวิธี R2 ซึ่งจะพบว่า  $x$  มีค่าเท่ากับร้อยละ 80 ของ  $4T_{\gamma}$  จะให้ค่า MSE ที่ใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยทั้งหมด (เท่ากับ  $4T_{\gamma}$ )



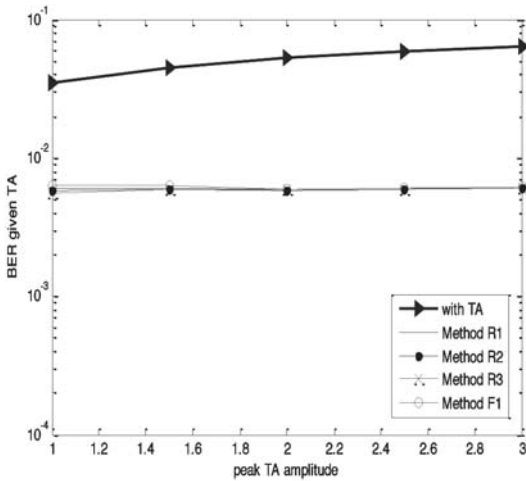
รูปที่ 5. ประสิทธิภาพของเทคนิคลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับ SNR

ในส่วนต่อไปนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ โดยที่สำหรับวิธี R1 จะใช้  $r = 8$  วิธี R2 ใช้  $x$  ร้อยละ 80 เมื่อจำนวนแซมเปิลทั้งหมดของช่วงลดระดับเท่ากับ  $1000T$  จะทำให้ได้จำนวนแซมเปิลที่นำไปใช้ในการประมาณค่าสัญญาณ TA ด้วย R2 เท่ากับ  $800T$  และวิธี R3 จะใช้แบบ R1 และ R2 ร่วมกัน ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณค่าสัญญาณ TA

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดความซับซ้อนของวิธีต่างๆ ในรูปแบบของ BER กับ SNR พบว่าประสิทธิภาพของวิธี R1, R2 และ R3 ใกล้เคียงกับวิธี F1 โดยประสิทธิภาพของระบบที่ไม่มีผลกระทบจาก TA จะเรียกว่า “with TA” ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบที่ไม่มีผลกระทบจาก TA จะเรียกว่า “no TA” ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าไม่มีการลดผลกระทบของ TA ประสิทธิภาพ



ของระบบจะแม่นยำมาก นอกจากนี้รูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในรูปแบบของ BER กับแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ตั้งแต่ 1 ถึง 3 เท่าของสัญญาณอ่านกลับ ณ SNR ที่ทำให้ BER = 10<sup>-4</sup> เมื่อไม่มีการเกิด TA นั่นคือ SNR = 27 dB จากรูปที่ 6 จะพบว่า วิธี R1, R2 และ R3 จะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA (ไม่ว่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA จะมีค่าเท่าใดก็ตามในช่วง 1 ถึง 3 เท่าของสัญญาณอ่านกลับก็จะยังให้ค่า BER เท่าเดิม) และยังคงให้ BER ที่ใกล้เคียงกับวิธี F1 อีกด้วย



รูปที่ 6. ประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ที่ SNR = 27 dB

ตารางที่ 2. จำนวนตัวดำเนินการบวกและจำนวนตัวดำเนินการคูณสำหรับแต่ละวิธีการลดความซับซ้อน

วิธี	จำนวนตัวดำเนินการบวก	จำนวนตัวดำเนินการคูณ
F1	65,004	19,010
R1	8,129	2,385
R2	52,004	15,210
R3	6,504	1,910

นอกจากนี้ตารางที่ 2 แสดงจำนวนตัวดำเนินการบวกและการคูณที่ใช้ทั้งหมดในการประมาณค่าสัญญาณในช่วงเวลาคระดับ โดยที่  $T_d = 1000$  แซมเปิล  $r = 8$  และ  $x = 80$  จากตารางที่ 2 จะพบว่าวิธี R3 ใช้ตัวดำเนินการบวกและการคูณน้อยที่สุด ตามด้วยวิธี R1, R2 และ F1 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปผลได้ว่าวิธี R3 เป็นวิธีการลดผลกระทบของ TA ที่ควรนำมาใช้จริงในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับวิธี F1 แต่มีความซับซ้อนน้อยกว่ามาก

### สรุปผลการทดลอง

สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA จะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดเป็นจำนวนมากในกระบวนการตรวจหาข้อมูล (detection process) ดังนั้นเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่อยู่บนพื้นฐานของการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม 3 วิธี นั่นคือ วิธี R1 เป็นการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับทุกๆ  $r$  แซมเปิล, วิธี R2 เป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับเป็นจำนวน  $x$  ร้อยละของ  $4T_d$  แซมเปิล และวิธี R3 เป็นการนำวิธี R1 และ R2 มาใช้งานร่วมกัน

จากการทดลองพบว่า  $r = 8$  และ  $x$  เท่ากับร้อยละ 80 ของ  $4T_d$  จะให้ค่า MSE ที่ใกล้เคียงกับ F1 โดยที่แต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพในรูปแบบอัตราข้อผิดพลาดของบิต (BER) ใกล้เคียงกับเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบที่ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ด้วย โดยวิธี R3 จะใช้จำนวนตัวดำเนินการบวกและการคูณที่ใช้ในการประมาณค่าสัญญาณ TA น้อยที่สุด รองลงมาคือ R1, R2, และ F1 ตามลำดับ เพราะฉะนั้นวิธีการลดความซับซ้อนแบบ R3 จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้จริงในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/UCRC in HDD component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NECTEC: National Electronics and Computer Technology Center) หมายเลขทุน CPN-R&D 01-23-52 EF

## เอกสารอ้างอิง

- สันติ กุลการชาย, 2008. การพัฒนาอัลกอริทึมในการตรวจหาและแก้ไขความขรุขระเชิงความร้อนสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Dorfman, V. and Wolf, J.K., 2001. A method for reducing the effect of thermal asperities. **IEEE Journal Selected Areas Communication** 19: 662-667.
- Dorfman, V. and Wolf, J.K., 2002. Viterbi detection for partial response channels with colored noise. **IEEE Transaction on Magnetics** 38: 2316-2318.
- Erden, M. F. and Kurtas, E. M., 2004. Thermal asperity detection and cancellation in perpendicular recording systems. **IEEE Transaction on Magnetics** 40(3): 1732-1737.
- Klaassen, K. B. and van Peppen, J. C. L., 1997. Electronic abatement of thermal interference in (G)MR head output signals. **IEEE Transaction on Magnetics** 33: 2611-2616.
- Kovintavewat, P. and Koonkarnkhai, S., 2009. Thermal Asperity Suppression Based on Least Squares Fitting in Perpendicular Magnetic Recording Systems. **Journal of Applied Physics** 105(7).
- Mathew, G. and Tjhia, I., 2005. Thermal asperity suppression in perpendicular recording channels. **IEEE Transaction on Magnetics** 41(10): 2878-2880.
- Moon, J. and Zeng, W., 1995. Equalization for maximum likelihood detector **IEEE Transaction on Magnetics** 31: 1083-1088.
- Stupp, S. E., Baldwinson, M. A., McEwen, P., Crawford, T.M. and Roger, C.T., 1999. Thermal asperity trends. **IEEE Transaction on Magnetics** 35(2): 752-757.