

การระงับความขรุขระเชิงความร้อนแบบที่ถูกปรับปรุงในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง

Improved Thermal Asperity Suppression in Perpendicular Recording Channels

สันติ กุลการชาย¹ และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

518 ถนนพินุลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 E-mail: s5010182144@kmutnb.ac.th

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 85 ถนนมาลัยแมน อ.เมือง นครปฐม 73000 E-mail: piya@npru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาและแก้ไขความขรุขระเชิงความร้อน (TA: thermal asperity) แบบที่ถูกปรับปรุงสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคแบบที่ใช้กันทั่วไป โดยวิธีการตรวจหาการเกิด TA จะอยู่บนพื้นฐานของการหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold-based approach) และวิธีการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TA ทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) แล้วใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve fitting) เพื่อหาค่าประมาณของสัญญาณ TA จากนั้นจึงนำสัญญาณค่าประมาณของ TA ที่ได้มาลบออกจากสัญญาณอ่านกลับ ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีอัตราข้อผิดพลาดบิต (BER: bit error rate) ต่ำกว่าเทคนิคแบบที่ใช้กันทั่วไปและมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดสูงสุดของ TA

คำสำคัญ: ความขรุขระเชิงความร้อน, การบันทึกแบบแนวตั้ง, การปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม

Abstract

This paper proposes an improved thermal asperity (TA) detection and correction technique for perpendicular recording channels, which performs better than the conventional one. The TA detection method is a threshold-based approach, while the TA correction method is performed by averaging the readback signal and applying a curve-fitting technique to estimate the TA signal. Then, the corrected readback signal is obtained by subtracting the TA-affected readback signal by the reconstructed TA signal. Results indicate that the proposed technique yields lower bit-error rate than the conventional one and is also robust to changes in the peak TA amplitude.

Keywords: Thermal asperity, perpendicular recording, curve-fitting.

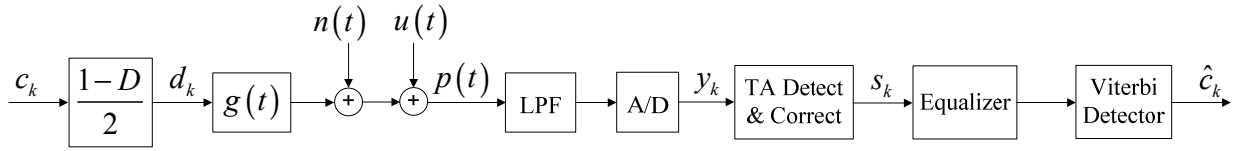
1. บทนำ

ในกระบวนการอ่านข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่หัวอ่านแบบ MR (magnetoresistive) จะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง

ของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสนามแม่เหล็กของบิตข้อมูลที่ถูกเขียนเข้าไปในสื่อบันทึก ซึ่งเป็นผลทำให้ได้เป็นสัญญาณพัลส์การเปลี่ยนสถานะ (transition pulse) ที่ด้านขาออกของหัวอ่าน ดังนั้นเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาชนกับความขรุขระบนพื้นผิวของสื่อบันทึกก็จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (transient voltage signal) เพิ่มเข้าไปในสัญญาณอ่านกลับซึ่งทำให้เส้นเชื่อมฐาน (baseline) ของสัญญาณอ่านกลับมีค่าเปลี่ยนไป โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เพิ่มขึ้นมานี้จะเรียกกันทั่วไปว่า “สัญญาณ TA”

สัญญาณ TA [1] เป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ, แอมพลิจูดสูงสุดประมาณ 2 – 3 เท่าของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่านกลับ, ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (rise time) ประมาณ 60 – 150 นาโนวินาที, และช่วงเวลาลดระดับ (decay time) ประมาณ 1 – 5 ไมโครวินาที ซึ่งมักจะมีลักษณะการลดระดับแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential decay) [1 – 3] โดยทั่วไปสัญญาณ TA จะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดเป็นจำนวนมากในระบบซึ่งเกินขีดความสามารถของรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (ECC: error correction code) ที่จะจัดการได้ ดังนั้นเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

บทความวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA นี้มากมายในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น Klaasen *et al.* [2] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาการเกิดของสัญญาณ TA โดยการเปรียบเทียบสัญญาณอ่านกลับและค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ เพราะว่าถ้าสัญญาณอ่านกลับไม่มีสัญญาณ TA แล้ว ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับหรือเส้นเชื่อมฐานจะมีค่าเท่ากับค่าศูนย์ ในขณะที่การลดผลกระทบของ TA ทำได้โดยนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรองผ่านสูง ในขณะที่ Dorfman *et al.* [3] ได้เสนอเทคนิคการลดผลกระทบของ TA โดยการนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรอง (1 – D) เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย ซึ่งเมื่อนำเทคนิคนี้ไปทดลองกับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวอนที่มีมาร์กเกิด (target) เป็น EPR4 ปรากฏว่าประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นมาก แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับสหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งต่อมาได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมดของเทคนิคนี้ใน [4] อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอใน [3] และ [4] ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง



รูปที่ 1 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

เนื่องจากช่องสัญญาณแบบแนวตั้งมีองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำอยู่มาก ดังนั้น Mathew *et al.* [5] ได้เสนอวิธีการตรวจหาและแก้ไข TA แบบง่ายที่ไม่ซับซ้อนโดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับเพื่อนำมาใช้ในการตรวจหาตำแหน่งการเกิด TA จากนั้นการแก้ไข TA ทำได้โดยการนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาลบออกจากสัญญาณอ่านกลับ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่นำเสนอใน [5] โดยอาศัยคุณลักษณะของสัญญาณ TA ที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการลดความซับซ้อนของเทคนิคที่นำเสนอด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานจริง

2. แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

รูปที่ 1 แสดงช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง โดยที่ลำดับข้อมูล $c_k \in \{\pm 1\}$ ที่มีคาบเวลาของบิต (bit period) เท่ากับ T จะถูกป้อนเข้าวงจรกรอง $(1-D)/2$ ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล $d_k \in \{\pm 1, 0\}$ เมื่อ +1 คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบบวก (positive transition bit), -1 คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบลบ (negative transition bit), และ 0 คือไม่มีมีการเปลี่ยนสถานะ 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), $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สี่ขาแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองข้าง $N_0/2$, และ $u(t)$ คือสัญญาณ TA ซึ่งนิยามโดย [5]

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

เมื่อ A_0 คือแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA, T_r คือช่วงเวลาเพิ่มระดับ, T_d คือค่าคงที่การลดระดับ (decay constant), และ T_f คือช่วงเวลาของสัญญาณ TA ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ $T_f = T_r + 4T_d$ [5]

เมื่อวงจรการรับได้รับสัญญาณอ่านกลับ ก็จะส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF) และทำการซีกตัวอย่างสัญญาณด้วยอัตราสุ่ม 500 เมกะบิตต่อวินาที [5] โดยสมมติว่ามีกรเข้าจังหวะอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้เป็นลำดับข้อมูล y_k จากนั้นจึงส่งลำดับข้อมูล y_k ไปยังวงจรตรวจหาและแก้ไข TA, วงจรอีควอไลเซอร์, และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) เพื่อหาลำดับข้อมูล c_k ที่เป็นไปได้มากที่สุด

3. เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบที่ใช้กันทั่วไป

ในบทความนี้เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบที่ใช้กันทั่วไปจะหมายถึงเทคนิคที่นำเสนอใน [5] ซึ่งใช้สัญลักษณ์ว่า “F0” โดยการตรวจหาการเกิดของ TA จะอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อ TA เกิดขึ้นในระบบก็จะทำให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ (หรือเส้นเชื่อมฐาน) มีค่าไม่เท่ากับค่าศูนย์ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้หาได้จาก [5]

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

เมื่อ L คือความกว้างของช่องหน้าต่างที่ใช้หาค่าเฉลี่ย (เป็นเลขจำนวนเต็มคี่) และ $\beta = (L-1)/2$ ดังนั้นถ้า $q_k \geq m_1$ แสดงว่ามีสัญญาณ TA เกิดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตรวจหา TA จึงได้เพิ่มเงื่อนไขการตรวจหา TA เข้าไปอีกหนึ่งข้อ นั่นคือถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับมีค่ามากกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน m_2 (นั่นคือ $y_k > m_2$) เป็นจำนวนหลายแอมพลิจูดติดกัน ก็แสดงว่ามีสัญญาณ TA เกิดขึ้น จากนั้นการแก้ไขผลกระทบของ TA ทำได้ง่าย โดยการนำสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA มาลบด้วยค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง

4. เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบใหม่

เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบใหม่ที่นำเสนอในบทความนี้จะใช้วิธีการตรวจหา TA แบบเดียวกันกับที่ใช้ใน [5] แต่สำหรับวิธีการแก้ไขผลกระทบของ TA จะทำดังนี้ เมื่อตรวจพบว่ามีสัญญาณ TA เกิดขึ้นในสัญญาณอ่านกลับ ก็จะทำการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA โดยอาศัยค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ $\{q_k\}$ และเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม จากนั้นก็นำสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA มาลบด้วยค่าประมาณของสัญญาณ TA ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA ลดลง

ในบทความนี้จะพิจารณาเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง (2nd-order polynomial) ที่มีรูปสมการคือ

$$\hat{u}(t) = at^2 + bt + c \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{u}(t)$ คือค่าประมาณของสัญญาณ TA, t คือเวลา, และ a, b, c คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่เป็นเลขจำนวนจริงซึ่งหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n t_i^0 & \sum_{i=1}^n t_i^1 & \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i^1 & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n q_i t_i^0 \\ \sum_{i=1}^n q_i t_i^1 \\ \sum_{i=1}^n q_i t_i^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ $q_i = q(iT)$ คือค่าเฉลี่ยลำดับที่ i ของสัญญาณอ่านกลับ, $t_i = iT$ คือเวลาที่สอดคล้องกับค่า q_i , และ n คือจำนวนข้อมูล

ที่ใช้ในการประมาณค่าของสัญญาณ TA โดยการประมาณค่าสัญญาณ TA จะสิ้นสุดเมื่อ $\hat{u}(t) < 0$ นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอกับเทคนิคใน [5] จะสมมติว่าเราทราบช่วงเวลาของสัญญาณ TA (นั่นคือทราบ T_f) และในที่นี้จะพิจารณาวิธีการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA สามวิธีดังนี้

วิธีที่ 1 ซึ่งจะเรียกว่า “F1” เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของ TA ก็จะทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับต่อไปเป็นจำนวนเท่ากับ T_f แคมป์เปิด จากนั้นก็นำข้อมูลค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ ทั้งหมดที่ได้เข้าสู่กระบวนการการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมเพื่อหาค่าประมาณของสัญญาณ TA นั่นคือ $\hat{u}(t)$ ตามสมการ (4)

วิธีที่ 2 ซึ่งจะเรียกว่า “F2” เนื่องจากวิธี F1 จะต้องใช้ค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ ตลอดช่วงเวลาของสัญญาณ TA ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (5) อย่างไรก็ตามเราสามารถลดความซับซ้อน (ในรูปของจำนวนตัวดำเนินการของการคูณและการบวก) ของวิธี F1 ได้โดยการใช้ข้อมูล $\{q_k\}$ เพียงบางส่วน ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม กล่าวคือเมื่อมีการตรวจพบการเกิดของ TA ก็จะทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับต่อไปเป็นจำนวนเท่ากับ x แคมป์เปิดที่เป็นร้อยละของ T_f (เช่นถ้า $T_f = 1000$ ดังนั้น $x = 60\%$ ของ T_f จะหมายถึง $x = 600$ แคมป์เปิด) ในการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA ทั้งหมด

วิธีที่ 3 ซึ่งจะเรียกว่า “F3” จะเป็นการลดความซับซ้อนของวิธี F2 ลงไปอีก โดยแทนที่จะทำการหาค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ ทุกๆ แคมป์เปิดที่อยู่ติดกัน เราจะทำหาค่าเฉลี่ยทุกๆ r แคมป์เปิด ตัวอย่างเช่นถ้า $r = 5$ ก็จะทำหาค่าเฉลี่ยตัวที่ $q_{i(r)}$ เมื่อ i เป็นเลขจำนวนเต็มบวก จากนั้นก็ใช้เฉพาะข้อมูล $\{q_{ir}\}$ ในการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA ทั้งหมด เพราะฉะนั้นถ้าพิจารณาความซับซ้อนของกระบวนการทั้งสามวิธีพบว่าวิธี F3 มีความซับซ้อนน้อยที่สุด รองลงมาคือ F2 และ F1 ตามลำดับ

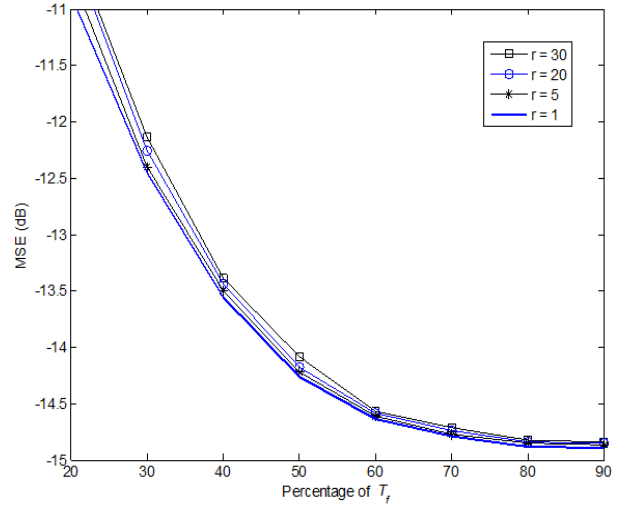
เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของ TA กระบวนการตรวจหา TA จะหยุดลงเป็นระยะเท่ากับ T_f เพื่อทำการลดผลกระทบของ TA โดยหลังจากที่ได้ค่าประมาณของ TA นั่นคือ $\hat{u}_k = \hat{u}(kT)$ จากกระบวนการทั้ง 3 วิธีแล้ว ก็จะนำผลบอกรอกจากสัญญาณอ่านกลับ $\{y_k\}$ โดยที่

$$\begin{aligned} s_k &= y_k - \hat{u}_k, & \text{เมื่อมีการเกิด TA} \\ &= y_k, & \text{เมื่อไม่มี TA} \end{aligned} \quad (6)$$

จากนั้นก็ส่งลำดับข้อมูล $\{s_k\}$ ที่ได้ไปยังวงจรรีจิวโวลูชันและวงจรตรวจหาวิเทอร์บีตามลำดับ

5. ผลการทดลอง

ในบทความนี้จะพิจารณากรณีที่สัญญาณอ่านกลับแต่ละเซกเตอร์ (sector) มีสัญญาณ TA เกิดขึ้นหนึ่งครั้ง โดยที่สัญญาณ TA ในแต่ละเซกเตอร์ (หนึ่งเซกเตอร์มีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 4096 บิต) จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของบิตที่ $1000T$, และมี $A_0 = 2$, $T_r = 30T$, และ $T_f = 1030T$ ในกรณีนี้จัดว่าเป็นกรณีที่แย่ที่สุด (worst case) ซึ่งถ้าไม่มีการลดผลกระทบของ TA ในสัญญาณอ่านกลับ ก็จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากในข้อมูลแต่ละเซกเตอร์ได้ [5] และในบทความนี้



รูปที่ 2 ข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ระหว่างสัญญาณ TA และค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่ SNR = 27 dB

จะนิยามอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) ว่า $\text{SNR} = 10 \log_{10} (E_r / N_0)$ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB: decibel) เมื่อ E_r คือพลังงานของผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ (อนุพันธ์ของ $g(t)$ หาดด้วยค่าสอง)

รูปที่ 2 เปรียบเทียบข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) ระหว่างสัญญาณ TA ที่สร้างจากสมการ (2) กับค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่หาจากเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมตามสมการ (4) ที่ SNR = 27 dB เมื่อค่า MSE หาได้จาก

$$\text{MSE} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T_f} \sum_{k=1}^{T_f} \{u(kT) - \hat{u}(kT)\}^2 \right) \quad (7)$$

มีหน่วยเป็นเดซิเบล โดยที่เส้นแกน x แสดงจำนวนข้อมูลแคมป์เปิดของ $\{q_k\}$ (เป็นร้อยละของ T_f) ที่ใช้ในเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมตามสมการ (4) โดยผลลัพธ์ที่ได้คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่ยังคงมีจำนวนแคมป์เปิดเท่ากับสัญญาณ TA นอกจากนี้เส้นกราฟแต่ละเส้นหมายถึงการหาค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ ทุกๆ r แคมป์เปิด นั่นคือหาค่าเฉลี่ย $\{q_{ir}\}$ โดยที่ $r = 1, 5, 20$, และ 30 ดังนั้นรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลแคมป์เปิดของ $\{q_k\}$ เพียงร้อยละ 60 ของ T_f (นั่นคือ 600 แคมป์เปิด) ก็เพียงพอที่จะทำให้ได้ค่าประมาณของสัญญาณ TA เทียบเท่ากับการใช้ข้อมูลแคมป์เปิดของ $\{q_k\}$ ทั้งหมด นอกจากนี้รูปที่ 2 ยังบอกให้ทราบว่าหาค่าเฉลี่ย $\{q_{ir}\}$ โดยที่ $r = 5$ ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการหาค่าเฉลี่ย $\{q_{ir}\}$ โดยที่ $r = 1$

ในส่วนตัวไปนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ โดยในการทำการจำลองระบบ (simulation) จะพิจารณาระบบที่ความหนาแน่นการบันทึกรหัสข้อมูล ND = $\text{PW}_{50}/T = 2.5$, อีควอลไลเซอร์ที่ใช้มีจำนวน 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) [6] ณ SNR ที่ทำให้เกิด BER = 10^{-4} เมื่อไม่มีผลกระทบของ TA

นอกจากนี้ในการตรวจหาการเกิดของ TA จะทำการหาค่าเฉลี่ย $\{q_k\}$ โดยใช้ $L = 51$, $m_1 = 0.5$, และ $m_2 = 1.1$ [5] สำหรับวิธี F2 จะใช้ $x = 600$ และวิธี F3 จะใช้ $r = 5$ ในการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA ตามที่อธิบายในหัวข้อที่ 4

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับ SNR จะเห็นว่าวิธีการลดผลกระทบของ TA ทั้งสามวิธี นั่นคือ F1, F2, และ F3 มีประสิทธิภาพดีกว่า (มี BER น้อยกว่า) เทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบที่ใช้กันทั่วไป [5] และทั้งสามวิธีมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่หาได้จากแต่ละวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้รูปที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA (จาก 1 ถึง 2.5) ที่ SNR = 27 dB ซึ่งจะพบว่าเทคนิคที่นำเสนอทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพสูงกว่าเทคนิคแบบที่ใช้กันทั่วไป [5] สำหรับทุกแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ดังนั้นจากรูปที่ 3 และ 4 สรุปได้ว่าวิธี F3 ถือว่าเป็นเทคนิคการลดผลกระทบของ TA ที่ดีที่สุดเพราะว่ามีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธี F1 และ F2

6. สรุป

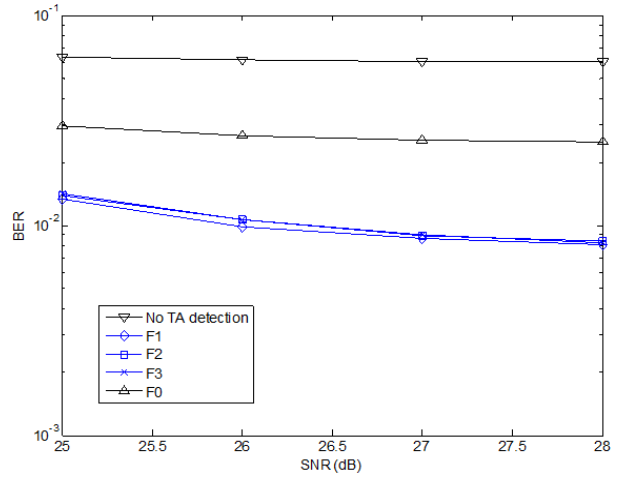
ความขรุขระเชิงความร้อนหรือ TA ที่เกิดขึ้นในสัญญาณอ่านกลับมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงมาก (ปกติควรมี BER $\approx 10^{-6}$ ที่ด้านขาออกของวงจรตรวจหาหัวเทอร์บิ) ดังนั้นเทคนิคการลดผลกระทบของ TA จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการลดผลกระทบของ TA ทั้งสามแบบคือ F1, F2, และ F3 โดยอาศัยเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเทคนิคที่นำเสนอทั้งสามแบบมีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบที่ใช้กันทั่วไป [5] โดยเทคนิคแบบ F3 ถือว่าเป็นเทคนิคการลดผลกระทบของ TA ที่ดีที่สุดเนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยกว่าเทคนิคแบบ F1 และ F2

7. กิตติกรรมประกาศ

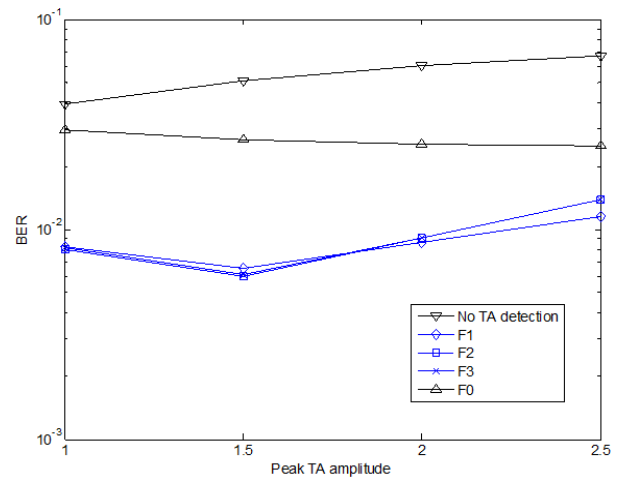
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ภายใต้ทุนหมายเลข HDDB50 - 003

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. E. Stupp, M. A. Baldwinson, P. McEwen, T. M. Crawford, and C. T. Roger, "Thermal asperity trends," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 2, pp. 752-757, Mar. 1999.
- [2] K. B. Klaassen and J. C. L. van Peppen, "Electronic abatement of thermal interference in (G)MR head output signals," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, pp. 2611-2616, Sept. 1997.
- [3] V. Dorfman and J. K. Wolf, "A method for reducing the effects of thermal asperities," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 662-667, Apr. 2001.



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพของเทคนิคลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับ SNR



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพของเทคนิคลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปของ BER กับค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ที่ SNR = 27 dB

- [4] —, "Viterbi detection for partial response channels with colored noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, pp. 2316-2318, Sept. 2002.
- [5] G. Mathew and I. Tjhia, "Thermal asperity suppression in perpendicular recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp. 2878-2880, Oct. 2005.
- [6] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, pp. 1083-1088, Mar 1995.



สันติ กุลการชาย ปัจจุบันศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับ การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูล



ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ ปัจจุบันเป็นอาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูล รหัสแก้ไขข้อผิดพลาด การเข้ารหัสและถอดรหัส แบบวนซ้ำ และระบบอาร์เอฟไอดี