

# การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมสำหรับการระบุ ความขรุขระเชิงความร้อนในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง

สันติ กุลการขาย<sup>1</sup> และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

**ABSTRACT** – Thermal asperity (TA) causes a major problem in magnetic recording systems. Without the TA detection and correction algorithm, the system performance (even with perfect synchronization) can be unacceptable, depending on how severe the TA effect is. This paper presents two simple techniques based on a curve-fitting method to suppress the TA effect in perpendicular recording channels, and compares their performance with the conventional technique. Results show that the two simple techniques perform better than the conventional one in terms of bit-error rate, and are robust to changes in the peak TA amplitude.

**KEY WORDS** – Thermal asperity, perpendicular recording, curve-fitting method

บทคัดย่อ – ความขรุขระเชิงความร้อน (TA: thermal asperity) ก่อให้เกิดปัญหาในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ประสิทธิภาพของระบบจะแย่มาก ถ้าไม่มีการใช้อัลกอริทึมในการตรวจหาและแก้ไข TA บทความนี้แสดงเทคนิคแบบง่ายสองแบบ ที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมสำหรับลดผลกระทบของ TA ในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคทั้งสองกับเทคนิคที่ใช้กันทั่วไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคแบบง่ายทั้งสองเทคนิคมี ประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในรูปของอัตราข้อผิดพลาดของบิตและมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด สูงสุดของสัญญาณ TA

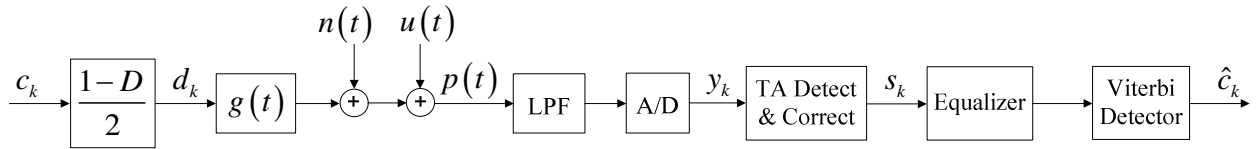
คำสำคัญ – ความขรุขระเชิงความร้อน, การบันทึกแบบแนวตั้ง, เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม

## 1. บทนำ

ในกระบวนการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ หัวอ่านแบบ MR (magnetoresistive) จะทำหน้าที่ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของ สนามแม่เหล็กของบิตข้อมูลทีเขียนลงไปบนสื่อบันทึก ซึ่งเป็นผล ทำให้ได้เป็นสัญญาณพัลส์การเปลี่ยนสถานะ (transition pulse) ที่ด้านขาออกของหัวอ่าน ดังนั้นเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาชนกับความ ขรุขระ (เช่น ผุ่นละออง เส้นผม หรือผงแป้ง เป็นต้น) บนพื้นผิวของ สื่อบันทึก ก็จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (transient voltage signal) เพิ่มเข้าไปในสัญญาณอ่านกลับ (read-back signal) ซึ่งเป็นผลทำให้เส้นเชื่อมฐาน (baseline) ของสัญญาณอ่านกลับ

มีค่าเปลี่ยนไป โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เพิ่มขึ้นมานี้ จะเรียกกันทั่วไปว่า “สัญญาณ TA (TA signal)”

ในทางปฏิบัติเมื่อมี TA เกิดขึ้นในระบบก็จะทำให้สัญญาณ อ่านกลับมีเส้นเชื่อมฐานเปลี่ยนไปจากเดิม (กล่าวคือเส้นเชื่อมฐาน ของสัญญาณอ่านกลับปกติจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่เส้นเชื่อมฐาน ของสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์) โดยทั่วไปสัญญาณ TA เป็นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำที่มีแอมพลิจูด สูงสุดประมาณ 2 – 3 เท่าของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอ่าน กลับปกติ, ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (rise time) ประมาณ 60 – 150 นาโน วินาที โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น, และช่วงเวลาลด ระดับ (decay time) ประมาณ 1 – 5 ไมโครวินาที ซึ่งมักจะมีลักษณะ



รูปที่ 1. แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง

การลดระดับลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential decay) [1] โดยทั่วไปสัญญาณ TA จะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดเป็นจำนวนมากในระบบ ซึ่งเกินขีดความสามารถของรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (ECC: error correction code) ที่จะจัดการได้ ดังนั้นเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (perpendicular recording) ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ในปัจจุบันบทความวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA มีจำนวนมาก เช่น Klaassen และ van Peppen [2] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาการเกิดของสัญญาณ TA โดยการเปรียบเทียบสัญญาณอ่านกลับและค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ เนื่องจากถ้าสัญญาณอ่านกลับไม่มีสัญญาณ TA แล้ว ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับหรือเส้นเชื่อมฐานจะมีค่าเท่ากับค่าศูนย์ ในขณะที่การลดผลกระทบของ TA ทำได้โดยนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรองผ่านสูง ในขณะที่ Dorfman *et al.* [3] ได้เสนอเทคนิคการลดผลกระทบของ TA โดยการนำสัญญาณอ่านกลับไปผ่านวงจรกรอง  $(1-D)$  เมื่อ  $D$  คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย ซึ่งเมื่อนำเทคนิคนี้ไปทดลองกับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวอน (longitudinal recording) ที่มีทาร์เก็ต (target) เป็น EPR4 ปรากฏว่าประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นมาก แต่ก็ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการปรับปรุ้ประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมดของเทคนิคนี้ใน [4] อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอใน [3] และ [4] ไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง เพราะว่าการช่องสัญญาณแบบแนวตั้งมีองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำอยู่เป็นจำนวนมาก

นอกจากนี้ Erden *et al.* [5] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้งโดยการใช้วงจรกรองผ่านต่ำและวงจรกรองผ่านสูงเข้าช่วย สุดท้าย Mathew *et al.* [6] ได้นำเสนอเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบง่ายที่ไม่ซับซ้อนโดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับเพื่อนำมาใช้ในการตรวจหาตำแหน่งการเกิด TA จากนั้นการแก้ไข TA ทำได้โดยการนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาลบออกจากสัญญาณอ่านกลับ อย่างไรก็ตามบทความนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการลด

ผลกระทบของ TA ที่ใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม (curve-fitting) แบบพหุนาม (polynomial) [7] และแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล [8] ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่นำเสนอใน [6] พร้อมทั้งแสดงวิธีการลดความซับซ้อนของเทคนิคที่ได้นำเสนอด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2 อธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง และหัวข้อที่ 3 อธิบายแบบจำลองของสัญญาณ TA สำหรับหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่ใช้กันทั่วไป และหัวข้อที่ 5 แสดงเทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบที่ใช้กันทั่วไป หัวข้อที่ 6 แสดงผลการทดลอง และสุดท้ายหัวข้อที่ 7 สรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความนี้

## 2. แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง

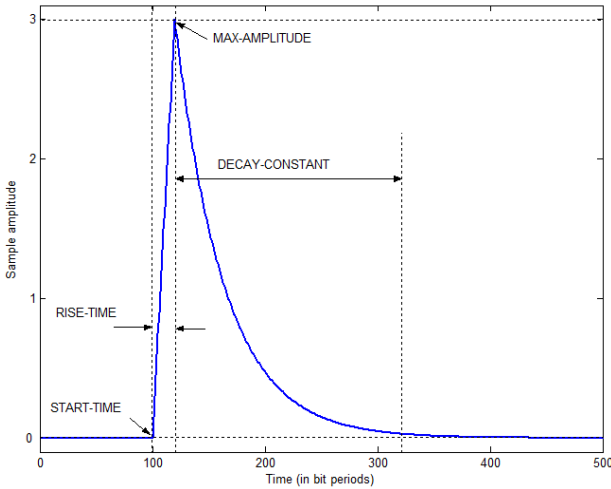
รูปที่ 1 แสดงช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง โดยที่ลำดับข้อมูล  $c_k \in \{\pm 1\}$  ที่มีคาบเวลาของบิต (bit period) เท่ากับ  $T$  จะถูกป้อนเข้าวงจรกรอง  $(1-D)/2$  ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล  $d_k \in \{\pm 1, 0\}$  เมื่อ  $+1$  คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบบวก (positive transition bit),  $-1$  คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบลบ (negative transition bit), และ  $0$  คือไม่มีการเปลี่ยนสถานะ จากนั้นลำดับข้อมูล  $d_k$  จะถูกส่งผ่านไปยังช่องสัญญาณที่กำหนดด้วยผลตอบสนองของการเปลี่ยนสถานะ  $g(t)$  ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA,  $p(t)$ , สามารถเขียนได้เป็น

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

โดยที่  $n(t)$  คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองข้าง  $N_0/2$ ,  $u(t)$  คือสัญญาณ TA, และผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะของช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง [9] นิยามโดย

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

เมื่อ  $PW_{50}$  คือความกว้างของสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม จุดครึ่งหนึ่งของ



รูปที่ 2. แสดงลักษณะของสัญญาณ TA

ความสูงสูงสุดของ  $g'(t)$ ,  $\ln(\cdot)$  คือฟังก์ชันลอการิทึมธรรมชาติ และ  $\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x e^{-z^2} dz$  คือฟังก์ชันข้อผิดพลาด

เมื่อวงจรถ่ายรับได้รับสัญญาณอ่านกลับ  $p(t)$  ก็จะส่งต่อไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: low pass filter) และถูกซัดตัวอย่างสัญญาณที่มีการเข้าจังหวะอย่างสมบูรณ์ (perfect synchronization) ด้วยอัตราสุ่ม 500 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) [6] เพื่อให้ได้เป็นลำดับข้อมูล  $y_k$  จากนั้นจึงส่งต่อไปยังวงจรตรวจหาและแก้ไข TA, วงจรอีควอไลเซอร์ เพื่อปรับลักษณะของสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ตที่ต้องการ, และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) เพื่อหาลำดับข้อมูล  $c_k$  ที่เป็นไปได้มากที่สุด

### 3. แบบจำลองของสัญญาณ TA

ในส่วนนี้จะอธิบายการสร้างสัญญาณ TA เพื่อใช้ในการจำลองระบบ โดยแบบจำลองสัญญาณ TA ที่นิยมใช้ได้มาจาก Stupp *et al.* [1] ตามที่แสดงในรูปที่ 2 เพราะว่าแบบจำลองนี้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดีมาก [5] จากรูปที่ 2 พบว่าแบบจำลองสัญญาณ TA จะถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ

- START-TIME: พารามิเตอร์นี้เป็นตัวกำหนดว่าผลกระทบของ TA จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด
- RISE-TIME: พารามิเตอร์นี้กำหนดเวลาที่ใช้ในการทำให้สัญญาณ TA เพิ่มระดับจากค่า 0 ไปยังค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA ซึ่งถูกกำหนดโดย MAX-AMPLITUDE
- MAX-AMPLITUDE: พารามิเตอร์กำหนดค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ
- DECAY-CONSTANT: เนื่องจากผลกระทบของ TA ได้ถูก

สมมติว่ามีการลดระดับลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังนั้นพารามิเตอร์นี้เป็นตัวกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำให้สัญญาณ TA ลดระดับลงจากแอมพลิจูดสูงสุดจนถึงค่า 0.01 (น้อยกว่า 1% ของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA)

จากข้อกำหนดของแบบจำลองสัญญาณ TA ตามที่กล่าวมานี้ ทำให้สามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้แทนสัญญาณ TA  $u(t)$  ได้คือ [6]

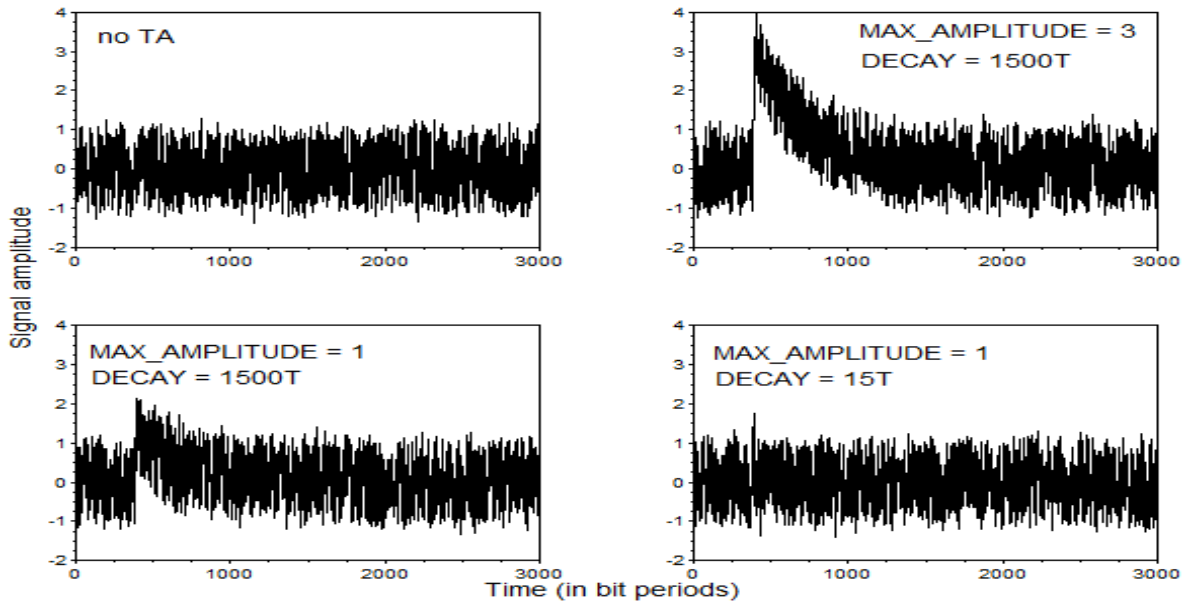
$$u(t) = \begin{cases} A_0 \left( \frac{t}{T_r} \right), & 0 \leq t \leq T_r \\ A_0 \exp\left( -\frac{t-T_r}{T_d} \right), & T_r < t \leq T_f \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ  $A_0 = \text{MAX-AMPLITUDE}$  คือแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA,  $T_r = \text{RISE-TIME}$  คือช่วงเวลาเพิ่มระดับ,  $T_d = \text{DECAY-CONSTANT}$  คือค่าคงตัวของการลดระดับ, และในที่นี้กำหนดให้  $T_f = T_r + 4T_d$  คือระยะเวลาของการเกิดของสัญญาณ TA [6] โดยที่ช่วงเวลาลดระดับ  $4T_d$  ก็เพียงพอแล้ว เนื่องจากจะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณ TA ลดลงเหลือเพียง 1.8% ของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA

แบบจำลองสัญญาณ TA นี้ทำให้สามารถจำลองสัญญาณ TA แบบต่างๆ ได้ตามเงื่อนไขของการทดสอบอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ตัวอย่างเช่น รูปที่ 3 แสดงสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA หลายๆ แบบที่ด้านขาเข้าของวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF) เมื่อ START-TIME = 400T และ RISE-TIME = 10T จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาชนกับความขรุขระบนพื้นผิวของสื่อบันทึก สัญญาณแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้เส้นเชื่อมฐานของสัญญาณอ่านกลับเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก จากนั้นหัวอ่านและบริเวณที่มีความขรุขระนั้นก็ค่อยๆ เย็นตัวลง ซึ่งเป็นผลทำให้เส้นเชื่อมฐานของสัญญาณอ่านกลับลงมาอยู่ ณ ระดับเดิม โดยทั่วไปสัญญาณ TA ที่มีค่า  $A_0$  และ  $T_r$  มากก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบแยกลงมากด้วย

### 4. เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่ใช้กันทั่วไป

ในบทความนี้เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA ที่ใช้กันทั่วไปหมายถึงเทคนิคที่นำเสนอใน [6] ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ว่า “F0” เทคนิคนี้ถือว่าเป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ TA โดยวิธีการตรวจหาการเกิด TA จะอยู่บนพื้นฐานของการหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold-



รูปที่ 3. แสดงตัวอย่างสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA แบบต่างๆ คำนวณค่าของวงจรกรองผ่านต่ำ

based approach) ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อ TA เกิดขึ้นในระบบ ก็จะทำให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ (หรือเส้นเชื่อมฐาน) มีค่าไม่เท่ากับค่าศูนย์ ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้หาได้จาก [6]

$$q_k = \frac{1}{L} \sum_{i=k-\alpha}^{k+\alpha} y_i \quad (4)$$

เมื่อ  $y_i$  คือแซมเปิลลำดับที่  $i$  ของสัญญาณอ่านกลับ,  $\alpha$  คือเลขจำนวนเต็มบวก, และ  $L = 2\alpha + 1$  คือความกว้างของช่องหน้าต่างสำหรับการหาค่าเฉลี่ย

ดังนั้นถ้า  $q_k \geq m_1$  แสดงว่ามีสัญญาณ TA เกิดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตรวจหา TA จึงได้เพิ่มเงื่อนไขการตรวจหา TA เข้าไปอีกหนึ่งข้อ นั่นคือถ้าแซมเปิลข้อมูลของสัญญาณอ่านกลับ  $\{y_k\}$  มีค่ามากกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน  $m_2$  เป็นจำนวนหลายแซมเปิลติดกันก็แสดงว่ามีสัญญาณ TA เกิดขึ้น จากนั้นการแก้ไขผลกระทบของ TA ทำได้ง่ายโดยการนำสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA รวมอยู่ด้วย มาลบออกจากค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง

## 5. เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบใหม่

เทคนิคการตรวจหาและแก้ไข TA แบบใหม่ [7, 8] ที่แสดงในบทความนี้จะใช้วิธีการตรวจหา TA แบบเดียวกันกับเทคนิคที่ใช้ใน [6] แต่สำหรับวิธีการแก้ไขผลกระทบของ TA จะทำดังนี้ เมื่อตรวจ

พบว่าสัญญาณ TA เกิดขึ้นในสัญญาณอ่านกลับ ก็จะทำการเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ  $\{q_k\}$  เพื่อใช้ในการประมาณค่าของสัญญาณ TA โดยในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการนำเอาค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  และวิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมมาใช้ในการประมาณค่าของสัญญาณ TA เพื่อให้ได้ค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่เหมือนกับสัญญาณ TA จริงที่สร้างจากสมการ (3) ให้มากที่สุด

เพราะฉะนั้นการประมาณค่าของสัญญาณ TA จะแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงเพิ่มระดับ และช่วงลดระดับ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าทั้งสองช่วงนี้มารวมกัน เพื่อให้ได้เป็นค่าประมาณของสัญญาณ TA แล้วจึงนำไปลบออกจากสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA อยู่ เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง

### 5.1 วิธีการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ

เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของสัญญาณ TA ก็จะทำการเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  เพื่อทำการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาเพิ่มระดับ (rise-time) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นการประมาณค่าในช่วงนี้จะใช้ข้อมูล  $\{q_k\}$  แซมเปิลแรก ณ ตำแหน่งที่มีการตรวจพบ TA จนถึงค่าสูงสุดของ  $\{q_k\}$  ที่เก็บข้อมูลได้ จากนั้นจึงใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบเชิงเส้นซึ่งมีรูปสมการคือ

$$\hat{u}_r(t) = at + b \quad (5)$$

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

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m t_i^2 & \sum_{i=1}^m t_i \\ \sum_{i=1}^m t_i & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m t_i q_i \\ \sum_{i=1}^m q_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

## 5.2 วิธีการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ

สำหรับการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ (decay time) จะใช้ข้อมูล  $\{q_k\}$  ตั้งแต่ค่าสูงสุดของ  $\{q_k\}$  จนถึงแซมเปิลสุดท้าย ณ ตำแหน่งที่ข้อมูล  $\{q_k\}$  มีค่าตามที่ต้องการ เมื่อได้ข้อมูลครบแล้วก็จะใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง (2nd-order polynomial) และแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับการประมาณค่าสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ โดยวิธีการแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

วิธีที่ 1 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ว่า “F1” คือวิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง ที่มีรูปสมการคือ

$$\hat{u}_{d,poly}(t) = at^2 + bt + c \quad (7)$$

เมื่อ  $\hat{u}_{d,poly}(t)$  คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ, และ  $a, b, c$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามที่เป็นเลขจำนวนจริง ซึ่งหาได้จาก [7]

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n t_i^0 & \sum_{i=1}^n t_i^1 & \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t_i^1 & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n q_i t_i^0 \\ \sum_{i=1}^n q_i t_i^1 \\ \sum_{i=1}^n q_i t_i^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

โดยที่  $n$  คือจำนวนแซมเปิลที่ใช้ในการประมาณค่า TA ในช่วงเวลาลดระดับ และการประมาณค่าของสัญญาณ TA จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อ  $\hat{u}_{d,poly}(t) < 0.01$

วิธีที่ 2 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ว่า “F2” คือวิธีการปรับเส้นโค้งที่

เหมาะสมแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ที่มีรูปสมการคือ

$$\hat{u}_{d,exp}(t) = Ae^{Bt} \quad (9)$$

เมื่อ  $\hat{u}_{d,exp}(t)$  คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ในช่วงเวลาลดระดับ, และ  $A, B$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลที่เป็นเลขจำนวนจริง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์หาได้จาก  $A = \exp(z)$  เมื่อ [8]

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) \sum_{i=1}^n (q_i \ln q_i) - \sum_{i=1}^n (t_i q_i) \sum_{i=1}^n (t_i q_i \ln q_i)}{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) - \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 q_i \right)^2} \quad (10)$$

และค่าสัมประสิทธิ์  $B$  หาได้จาก

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i q_i \ln q_i) - \sum_{i=1}^n (t_i q_i) \sum_{i=1}^n (q_i \ln q_i)}{\sum_{i=1}^n (q_i) \sum_{i=1}^n (t_i^2 q_i) - \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 q_i \right)^2} \quad (11)$$

โดยที่  $n$  คือจำนวนแซมเปิลที่ใช้ในการประมาณค่า TA ในช่วงเวลาลดระดับ และการประมาณค่าของสัญญาณ TA จะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อ  $\hat{u}_{d,exp}(t) < 0.01$

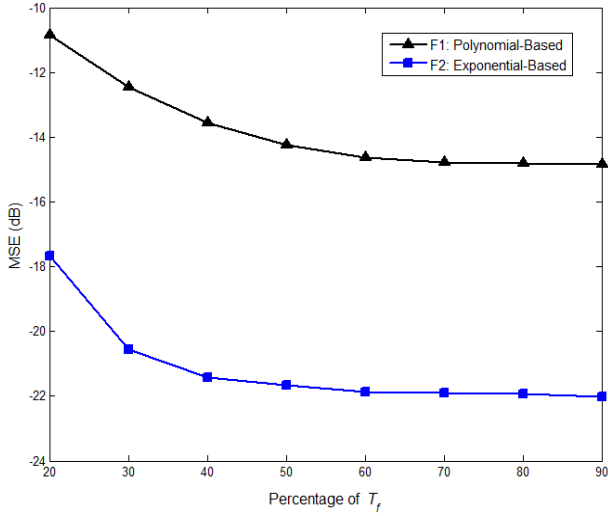
หลังจากที่ได้ค่าประมาณในแต่ละส่วนแล้ว ก็จะนำค่าประมาณทั้ง 2 ส่วนนี้มารวมกันเป็นค่าประมาณของสัญญาณ TA,  $\hat{u}(t)$ , ตามสมการต่อไปนี้

$$\hat{u}(t) = \begin{cases} \hat{u}_r(t), & T_y \leq t \leq \hat{T}_r \\ \hat{u}_d(t), & \hat{T}_r < t \leq \hat{T}_f \end{cases} \quad (12)$$

เมื่อ  $T_y$  คือเวลาที่ตรวจจับสัญญาณ TA ได้,  $\hat{T}_r$  คือเวลาเมื่อแซมเปิล  $q_k$  มีค่าสูงสุด, และ  $\hat{T}_f$  คือค่าประมาณช่วงเวลาของสัญญาณ TA ซึ่งมีค่าเท่ากับเวลาที่ทำให้ขนาดของสัญญาณ  $\hat{u}(t)$  มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าศูนย์เป็นครั้งแรก

## 5.3 วิธีการลดผลกระทบของ TA

เมื่อมีการตรวจพบการเกิดของ TA กระบวนการตรวจหา TA จะหยุดลงเป็นระยะเวลาเท่ากับ  $T_f$  แซมเปิล และกระบวนการลดผลกระทบของ TA จะเริ่มทำงานเป็นระยะเวลาเท่ากับ  $T_r$  แซมเปิล โดยหลังจากที่ได้ค่าประมาณของ TA นั่นคือ  $\hat{u}_k = \hat{u}(kT)$  จาก



รูปที่ 4. แสดงข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ระหว่างสัญญาณ TA จริงกับค่าประมาณของสัญญาณ TA

กระบวนการทั้ง 2 วิธีแล้ว ก็จะนำมาหักลบออกจากสัญญาณอ่านกลับ  $\{y_k\}$  โดยที่

$$\begin{aligned} s_k &= y_k - \hat{u}_k, & \text{เมื่อมีการเกิด TA} \\ &= y_k, & \text{เมื่อไม่มี TA} \end{aligned} \quad (13)$$

จากนั้นก็ส่งลำดับข้อมูล  $\{s_k\}$  ที่ได้ทำการลดผลกระทบของ TA ในสัญญาณอ่านกลับแล้ว ไปยังวงจรรีจิวไอเซชันและวงจรถรวงหาวิเทอร์บีตามลำดับ

## 6. ผลการทดลอง

บทความนี้จะพิจารณากรณีที่สัญญาณอ่านกลับแต่ละเซกเตอร์ (sector) มีสัญญาณ TA เกิดขึ้นหนึ่งครั้ง โดยที่สัญญาณ TA ในแต่ละเซกเตอร์ (หนึ่งเซกเตอร์มีจำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 4096 บิต) จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งของบิตที่  $1000T$  และมีแอมพลิจูดสูงสุด  $A_0 = 2$ , ช่วงเวลาเพิ่มระดับ  $T_r = 2$  นาโนวินาที (หรือ  $T_r = 30T$ ), และช่วงเวลาลดระดับ  $T_d = 0.5$  ไมโครวินาที (หรือ  $T_d = 250T$ ) นั่นคือระยะเวลาของสัญญาณ TA ทั้งหมดคือ  $T_f = 1030T$  ซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่แย่ที่สุด (worst case) โดยถ้าไม่มีการลดผลกระทบของ TA ในสัญญาณอ่านกลับแล้ว ก็จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากในข้อมูลแต่ละเซกเตอร์ได้ [6] และในบทความนี้จะนิยามค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) ว่า

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left( \frac{E_i}{N_0} \right) \quad (14)$$

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

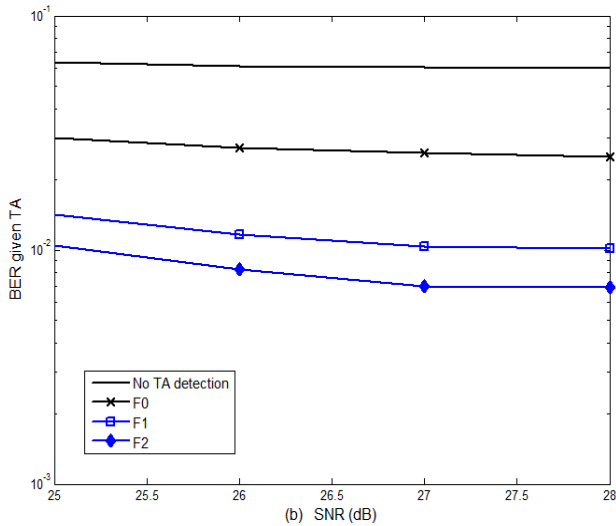
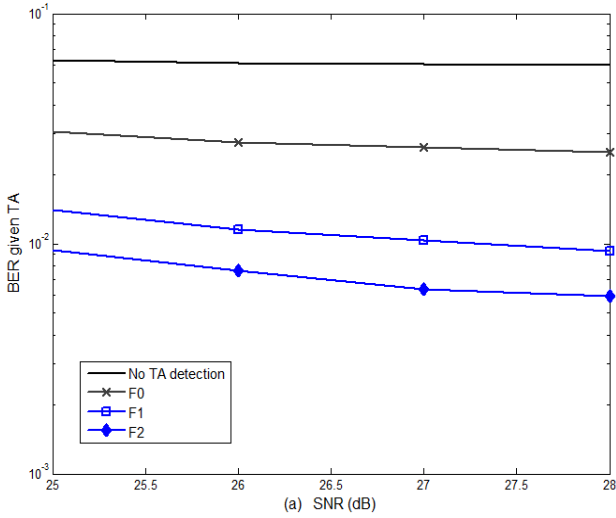
รูปที่ 4 เปรียบเทียบข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) ระหว่างสัญญาณ TA ที่สร้างจากสมการ (3) กับค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่หาจากวิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมตามสมการ (5), (7), (9) และ (12) เมื่อค่า MSE หาได้จาก

$$\text{MSE} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T_f} \sum_{k=1}^{T_f} \{u(kT) - \hat{u}(kT)\}^2 \right) \quad (15)$$

มีหน่วยเป็นเดซิเบล โดยที่เส้นแกน x แสดงจำนวนข้อมูลแซมเปิลของ  $\{q_k\}$  (เป็นร้อยละของ  $T_f$ ) ที่ใช้ในวิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสม โดยผลลัพธ์ที่ได้คือค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่ยังคงมีจำนวนแซมเปิลเท่ากับสัญญาณ TA

จากรูปที่ 4 ทำให้ทราบว่า การใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลหรือ F2 จะทำให้ได้ค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่เหมือนสัญญาณ TA จริงมากกว่าการใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสองหรือ F1 เนื่องจาก F2 ให้ค่า MSE น้อยกว่า F1 นอกจากนี้รูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่า TA ทั้ง 2 วิธีไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ทั้งหมด (นั่นคือ 100% ของ  $T_f$ ) ในการประมาณค่า TA เพื่อเป็นการลดความซับซ้อน (ในรูปของจำนวนตัวดำเนินการการบวกและการคูณ) สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสมการที่ (8), (10), และ (11) ตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 4 การใช้อัตราส่วน  $\{q_k\}$  จำนวนเพียง 60% ของ  $T_f$  ก็ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูล  $\{q_k\}$  จำนวนเพียง 90% ของ  $T_f$

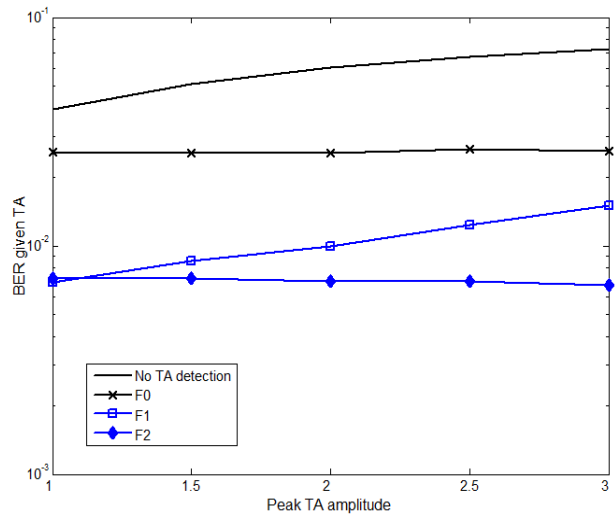
ในส่วนต่อไปนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอกับเทคนิคที่ใช้กันทั่วไป [6] โดยในการจำลองระบบ (simulation) จะพิจารณาระบบที่ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูล  $\text{ND} = \text{PW}_{50}/T = 2.5$ , อีควอไลเซชันที่ใช้มีจำนวน 11 แท็ป (tap) และใช้ทาร์เก็ตแบบ GPR (generalized partial response target) [10, 11] แบบ 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)



รูปที่ 5. แสดงประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ เมื่อใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ในการประมาณค่าสัญญาณ TA เป็นจำนวน (a) 1030 แซมเปิล และ (b) 618 แซมเปิล

ที่ทำให้อัตราข้อผิดพลาดของบิต (BER: bit-error rate) เท่ากับ  $10^{-4}$  เมื่อไม่มีผลกระทบของ TA นอกจากนี้ในการตรวจหาการเกิดของ TA จะทำการหาค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  โดยใช้พารามิเตอร์  $L = 51$ ,  $m_1 = 0.5$  และ  $m_2 = 1.1$  [6]

รูปที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปแบบของ BER กับ SNR เมื่อใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ในการประมาณค่าสัญญาณ TA เป็นจำนวน  $T_f$  (หรือ 1030 แซมเปิล) และเป็นจำนวนร้อยละ 60 ของ  $T_f$  (หรือ 618 แซมเปิล) ตามลำดับ จากรูปที่ 5 พบว่าวิธี F1 และ F2 มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี F0 เพราะทำให้ค่า BER น้อยกว่าอย่างไรก็ตามวิธี F2 มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี F1 เนื่องจากวิธี F2 ให้ค่าประมาณของ



รูปที่ 6. แสดงประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบต่างๆ ในรูปแบบของ BER กับแอมพลิจูดสูงสุดของ TA เมื่อใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ในการประมาณค่าสัญญาณ TA เป็นจำนวนร้อยละ 60 ของ  $T_f$  (หรือ 618 แซมเปิล) ที่  $SNR = 27$  dB

สัญญาณ TA ดีกว่าวิธี F1 นอกจากนี้การใช้จำนวนข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ในการประมาณค่า TA เพียงร้อยละ 60 ของ  $T_f$  (รูปที่ 5b) ก็เพียงพอต่อการใช้งาน เพราะว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้จำนวนข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ทั้งหมดในการประมาณค่า TA (รูปที่ 5a) ดังนั้นการใช้จำนวนข้อมูลค่าเฉลี่ย  $\{q_k\}$  ในการประมาณค่า TA น้อยลง ก็หมายความว่าความซับซ้อนของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA ที่นำเสนอก็จะน้อยลงด้วย

รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการประมาณค่า TA แบบต่างๆ ในรูปแบบของ BER กับแอมพลิจูดสูงสุดของ TA (จาก 1 ถึง 3) ณ  $SNR = 27$  dB เมื่อระบบที่ไม่มีผลกระทบของ TA มี  $BER = 10^{-4}$  จากรูปที่ 6 พบว่าทั้งวิธี F1 และ F2 มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี F0 นอกจากนี้วิธี F2 มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดสูงสุดของ TA มากกว่าวิธี F1 ดังนั้นวิธี 2 ถือว่าเป็นเทคนิคการลดผลกระทบของ TA ที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี F0 และ F1 เพราะว่าการใช้วิธี F2 ในการลดผลกระทบของ TA จะมี BER ต่ำ และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดสูงสุดของ TA ได้ดี

## 7. บทสรุป

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเกิดของความขรุขระเชิงความถี่หรือ TA จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบแยกลงอย่างมาก

บทความนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคการลดผลกระทบของ TA สองเทคนิคที่ใช้วิธีการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมแบบสมการพหุนามดีกรีสอง (หรือ F1) และแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล (หรือ F2) โดยที่วิธีการตรวจหาการเกิด TA จะอยู่บนพื้นฐานของการหาขีดเริ่มเปลี่ยน และวิธีการแก้ไขผลกระทบที่เกิดจาก TA ทำให้ได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับ แล้วใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมเพื่อหาค่าประมาณของสัญญาณ TA จากนั้นจึงนำค่าประมาณของสัญญาณ TA ที่ได้มาลบออกจากสัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA ก็จะได้สัญญาณอ่านกลับที่มีผลกระทบของ TA น้อยลง

จากการทดลองพบว่าวิธี F2 ดีกว่า F1 และทั้งสองวิธีนี้ก็ดีกว่าเทคนิคการลดผลกระทบของ TA แบบที่ใช้กันทั่วไป (หรือ F0) ทั้งในรูปของอัตราข้อผิดพลาดของบิตที่ต่ำกว่า และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดสูงสุดของ TA มากกว่า นอกจากนี้บทความนี้ยังได้เสนอแนวทางในการลดความซับซ้อนของเทคนิคการปรับเส้นโค้งที่เหมาะสมโดยการลดจำนวนข้อมูลค่าเฉลี่ยของสัญญาณอ่านกลับที่ใช้ในการหาค่าประมาณของสัญญาณ TA ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการประมาณค่าของสัญญาณ TA โดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยทั้งหมด

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน (IUCRC in Data Storage Technology and Application Research Center หรือ D\*STAR) และศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC: National Electronics and Computer Technology Center) หมายเลขทุน HDDDB50-003

## 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, March 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, September 1997.
- [3] V. Dorfman and J. K. Wolf, "A method for reducing the effects of thermal asperities," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 662-667, April 2001.
- [4] —, "Viterbi detection for partial response channels with colored noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, pp. 2316-2318, September 2002.
- [5] M. F. Erden and E. M. Kurtas, "Thermal asperity detection and cancellation in perpendicular recording systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40 no. 3, pp. 1732-1737, May 2004.
- [6] G. Mathew and I. Tjhia, "Thermal asperity suppression in perpendicular recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp 2878-2880, October 2005.
- [7] สันติ กุลการชาย และปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์, "การระงับความขรุขระเชิงความร้อนแบบที่ถูกปรับปรุงในช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง," *งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON-31)*, นครนายก, 29 – 31 ตุลาคม 2551.
- [8] P. Kovintavewat and S. Koonkarnkhai, "Thermal Asperity Suppression Based on Least Squares Fitting in Perpendicular Magnetic Recording Systems," *53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2008)*, Austin, Texas, USA, November 10-14, 2008.
- [9] T. A. Roscamp, E. D. Boerner and G. J. Parker, "Three-dimensional modeling of perpendicular recording with soft underlayer," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, May 2002.
- [10] P. Kovintavewat, I. Ozgunes, E. Kurtas, J. R. Barry, and S. W. McLaughlin, "Generalized partial response targets for perpendicular recording with jitter noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 5, pp. 2340-2342, September 2002.
- [11] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, pp. 1083-1088, March 1995.