

การออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR กับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง Design of an IIR Equalizer with Media Jitter Noise for Perpenddicular Recording Channels

ณัฐนันท์ ภัทรสวัสดิ์¹* ปิยะ โควินทวิวัฒน์² และ อภินันท์ ธนชยานนท์³

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปอีควอไลเซอร์แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FIR: Finite Impulse Response) ที่มีจำนวนแท็ปมากเป็นสิ่งจำเป็นที่จะนำมาใช้งานในช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง อย่างไรก็ตามการใช้งานอีควอไลเซอร์ที่มีจำนวนแท็ปมากจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบโทรมมิ่งรีคอร์ด เพราะทำให้เกิดการหน่วงเวลาในลูปโทรมมิ่งมาก เป็นที่ทราบกันว่าวงจรกรองเชิงเส้นแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (IIR: Infinite Impulse Response) ที่มีจำนวนแท็ปน้อยสามารถทำงานได้ดีเทียบเท่ากับวงจรกรองเชิงเส้นแบบ FIR ที่มีจำนวนแท็ปมาก จากนี้สัญญาณรบกวนที่พบมากในช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งคือสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก ดังนั้นบทความนี้จึงได้เสนอวิธีการนำข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมาใช้ในการออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอไลเซอร์แบบ IIR และทาร์เก็ตแบบผลตอบสนองบางส่วน (PR: Partial Response) ที่อยู่บนพื้นฐานของข้อผิดพลาดกำลังสอง

เจ็ลี่ยน้อยสุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งที่มีสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมาก อีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าอีควอไลเซอร์แบบ FIR และแบบ IIR ที่ถูกออกแบบโดยไม่ใช้ข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

คำสำคัญ: การออกแบบอีควอไลเซอร์และทาร์เก็ตวงจรกรองเชิงเส้นแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด วงจรกรองเชิงเส้นแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด สัญญาณรบกวนสื่อบันทึก การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

Abstract

In general, a finite impulse response (FIR) equalizer with a large number of taps is required to operate in perpendicular recording channels.

- ¹ นักศึกษา วิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
- ³ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- * ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-1251-2197 E-mail: utadajung@gmail.com

However, using the equalizer with a large number of taps can degrade the performance of timing recovery system because it will increase a delay in the timing loop. It is well-known that an infinite impulse response (IIR) equalizer with a small number of taps can performs comparably to an FIR equalizer with a large number of taps. In addition, media jitter noise is a major noise source in perpendicular recording channels. Therefore, this paper presents a method that exploits media jitter noise to jointly design an IIR equalizer and a PR target based on a minimum mean-squared error (MMSE) approach. Results indicate that for perpendicular recording channels with severe media jitter noise, the proposed IIR equalizer performs better than the FIR and IIR equalizers that ignore media jitter noise.

Keywords: Equalizer and Target Design, Finite Impulse Response (FIR), Infinite Impulse Response (IIR), Media Jitter Noise, Perpendicular Recording Channels

1. บทนำ

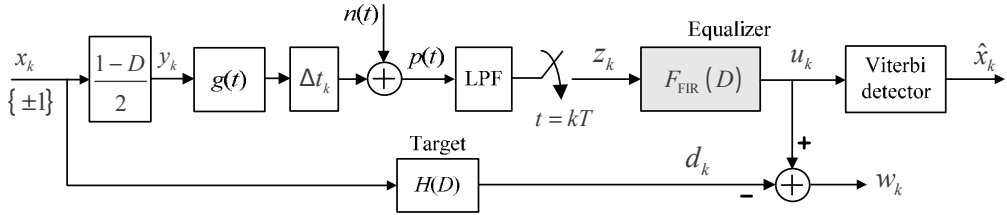
ระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (Perpendicular Recording System) ของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุข้อมูลสูงจะเผชิญกับปัญหาเรื่องการแทรกสอดเชิงสัญลักษณ์ (ISI: Inter Symbol Interference) และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (Media Jitter Noise) มาก โดยทั่วไปเทคนิคที่ใช้ในการตรวจหาข้อมูล (Data Detection) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือ เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากที่สุด (PRML: Partial-response Maximum-likelihood) [1] ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างอีควอลไลเซอร์แบบ PR [2] และวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi Detector) [3]

ในทางปฏิบัติอีควอลไลเซอร์แบบ FIR นิยมนำมาใช้

ในเทคนิค PRML โดยทำหน้าที่ในการปรับรูปร่างของสัญญาณที่ได้รับให้เป็นไปตามที่ระบบต้องการ และยังช่วยลดผลกระทบของการแทรกสอดเชิงสัญลักษณ์ โดยทั่วไปอีควอลไลเซอร์แบบ FIR ที่ใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งจะมีจำนวนแทปมาก อย่างไรก็ตามจำนวนแทปที่ใช้ในอีควอลไลเซอร์จะถูกจำกัดด้วยปริมาณหน่วงเวลา (Delay) ที่สามารถเป็นไปได้ในลูปไทมมิ่ง (Timing Loop) ของระบบไทมมิ่งรีคัฟเวอรี (Timing Recovery) [2] เนื่องจากปริมาณหน่วงเวลาที่มากจะทำให้ระบบไทมมิ่งรีคัฟเวอรีทำงานได้ไม่ดีซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของระบบต้อยลงมาก อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันว่าอีควอลไลเซอร์แบบ IIR ที่มีจำนวนแทปน้อยสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับอีควอลไลเซอร์แบบ FIR ที่มีจำนวนแทปมาก [4]

ในการอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ข้อมูลที่เขียนลงไปบนสื่อบันทึกอยู่ในรูปแบบ NRZI (Non Return-to-zero Interleaved) นั่นคือบิต 1 ใช้แทนตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะ บิต 0 ใช้แทนตำแหน่งที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ เมื่อหัวอ่าน (Read Head) เคลื่อนผ่านตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะของสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ (Transition Pulse) โดยสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกเกิดขึ้นเมื่อมีการเลื่อนตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะโดยมีลักษณะการแจกแจงแบบสุ่ม [5] ซึ่งจะส่งผลทำให้สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะที่ได้จากหัวอ่านเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น ซึ่งจะทำให้ยากต่อการตรวจหาข้อมูลที่วางจรรยาบรรณ

ในทางปฏิบัติบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ต (Target) สำหรับช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งมีหลายบทความ เช่น Moon และ Zeng [6] ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอลไลเซอร์แบบ FIR และทาร์เก็ตที่อยู่บนพื้นฐานของข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE) ในขณะที่ Yang และ Mathew [7] นำเสนอเทคนิคการออกแบบอีควอลไลเซอร์แบบ FIR สำหรับระบบที่เผชิญกับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก และสุดท้าย



รูปที่ 1 แบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง

Cai et al. [8] ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอไลเซอร์แบบ FIR และทาร์เก็ตสำหรับระบบการบันทึกเชิงแสง อย่างไรก็ตามบทความนี้เสนอวิธีการออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอไลเซอร์แบบ IIR และทาร์เก็ตให้เหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง โดยอาศัยข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและทฤษฎีอนุกรมเทย์เลอร์ [6] มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่นำเสนอนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าอีควอไลเซอร์แบบเดิมที่ใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อช่องสัญญาณมีสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมาก หัวข้อที่ 2 จะอธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกแบบแนวตั้ง หัวข้อที่ 3 แสดงการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ FIR และทาร์เก็ต หัวข้อที่ 4 อธิบายเทคนิคการนำข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมาใช้ในการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR หัวข้อที่ 5 แสดงผลการทดลอง และสุดท้ายหัวข้อที่ 6 สรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความนี้

2. แบบจำลองช่องสัญญาณ

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง เมื่อลำดับข้อมูลอินพุตแบบไบนารี $x_k \in \{\pm 1\}$ ที่มีคาบเวลาของบิตเท่ากับ T ถูกส่งผ่านไปยังวงจรกรองหาค่าเฉลี่ย (LPF) $(1-D)/2$ เมื่อ D คือตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย (Unit Delay Operator) ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล $y_k \in \{\pm 1, 0\}$ เมื่อ $+1$ คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบบวก (Positive Transition Bit), -1 คือบิตเปลี่ยนสถานะแบบลบ (Negative Transition Bit) และ 0 หมายถึงไม่มีการ

เปลี่ยนสถานะ จากนั้นลำดับข้อมูล y_k จะถูกแปลงสัญญาณด้วยสัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ $g(t) = \text{erf}(t\sqrt{\ln 16 / PW_{50}})$ [9] เมื่อ $\text{erf}(\cdot)$ คือฟังก์ชันข้อผิดพลาด (Error Function) $\ln(\cdot)$ คือฟังก์ชันลอการิทึมฐานธรรมชาติ และ PW_{50} คือความกว้างของสัญญาณพัลส์วัด ณ จุดครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของ $g'(t)$ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ $p(t)$ ที่ได้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์คือ

$$p(t) = \sum_k y_k g(t - kT + \Delta t_k) + n(t) \quad (1)$$

เมื่อ Δt_k คือสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกซึ่งถูกจำลองให้มีลักษณะเป็นการเลื่อนตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะแบบสุ่มที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นเป็นแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าศูนย์ค่าความแปรปรวนเท่ากับ $|y_k| \sigma_j^2$ และถูกจำกัดให้มีค่าไม่เกิน $T/2$ โดยที่ σ_j จะถูกกำหนดเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของบิตเซลล์ T และ $|y_k|$ คือค่าสัมบูรณ์ของ y_k และ $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองข้าง $N_0/2$

ในทางฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ค่า $ND = PW_{50}/T$ คือค่าความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล [2] จากนั้นสัญญาณอ่านกลับ $p(t)$ จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: Low-pass Filter) บิตเทอร์เวิร์ตอันดับที่ 7 และถูกทำการซัดตัวอย่างที่เวลา $t = kT$ โดยสมมุติว่าการเข้าจังหวะแบบสมบูรณ์ (Perfect Synchronization) ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล z_k จากนั้นลำดับข้อมูล z_k ก็จะถูกส่งไปยังอีควอไลเซอร์และวงจรตรวจหาวิเทอร์บีเพื่อหาลำดับข้อมูล x_k ที่เป็นไปได้มากที่สุด

3. การออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ FIR

รูปที่ 1 แสดงการออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอไลเซอร์แบบ FIR และทาร์เก็ต โดยทั่วไปอีควอไลเซอร์แบบ FIR ที่ใช้ในชิปช่องสัญญาณอ่าน (Read-channel Chip) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ในโดเมน D ได้คือ

$$F_{\text{FIR}}(D) = \sum_{k=-K}^K f_k D^k \quad (2)$$

เมื่อ K คือเลขจำนวนเต็ม, $2K+1$ คือจำนวนแท็ปทั้งหมดของอีควอไลเซอร์ $F_{\text{FIR}}(D)$, และ f_k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ที่เป็นเลขจำนวนจริงนอกจากนี้ ทาร์เก็ตที่ใช้ก็จะอยู่ในรูปของ

$$H(D) = \sum_{k=0}^V h_k D^k \quad (3)$$

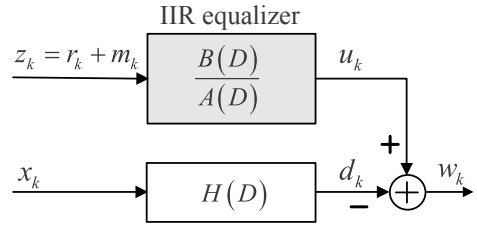
เมื่อ h_k คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ที่เป็นเลขจำนวนจริง และ v คือหน่วยความจำของช่องสัญญาณ

วัตถุประสงค์ของการออกแบบอีควอไลเซอร์ และทาร์เก็ตคือ ต้องการให้ข้อมูลเอาต์พุตของอีควอไลเซอร์มีลักษณะเหมือนกับข้อมูลเอาต์พุตของทาร์เก็ตให้มากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (MMSE) [6]

4. การออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR

เป็นที่ทราบกันว่าอีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่มีจำนวนแท็ปน้อยสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับอีควอไลเซอร์แบบ FIR ที่มีจำนวนแท็ปมาก [4] ซึ่งการใช้อีควอไลเซอร์ที่มีจำนวนแท็ปน้อยในระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบใหม่มีรีทัฟเวอริตีขึ้น [10]

เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่นำเสนอใน สมการที่ (1) จำเป็นต้องจัดรูปใหม่โดยใช้ทฤษฎีอนุกรมเทย์เลอร์ [7] ซึ่งจะได้เป็น



รูปที่ 2 แผนภาพการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR

$$p(t) \approx \sum_k y_k g(t - kT) + \sum_k y_k \Delta t_k g'(t - kT) + n(t) \quad (4)$$

โดยเมื่อนำสัญญาณ $p(t)$ นี้ไปผ่านวงจรกรองผ่านต่ำและทำการซีกตัวอย่าง ก็จะได้ผลลัพธ์เป็นลำดับข้อมูล

$$z_k = r_k + m_k \quad (5)$$

เมื่อ r_k คือข้อมูลอินพุตของอีควอไลเซอร์ที่ไม่มีองค์ประกอบของสัญญาณรบกวนสลับกัน (พจน์ที่หนึ่งและพจน์ที่สามในสมการที่ (4)) และ m_k คือข้อมูลอินพุตของอีควอไลเซอร์ที่มีองค์ประกอบของสัญญาณรบกวนสลับกัน (พจน์ที่สองในสมการที่ (4))

อีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่ทำการออกแบบมีรูปสมการคือ

$$\frac{B(D)}{A(D)} = \frac{\sum_{k=-N}^N b_k D^k}{\sum_{k=0}^M a_k D^k} \quad (6)$$

เมื่อ N และ M คือเลขจำนวนเต็มบวก, b_k และ a_k คือค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ k ของพหุนามตัวเศษและของพหุนามตัวส่วน ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR โดยที่ x_k คือลำดับข้อมูลอินพุต และ d_k คือข้อมูลเอาต์พุตของทาร์เก็ต $H(D)$ ถ้ากำหนดทาร์เก็ต $H(D)$ มาให้ ก็จะสามารถหาลำดับข้อมูล $d_k = x_k * h_k$ ได้ ดังนั้นจากรูปที่ 2 จะได้ว่า

$$u_k * a_k = z_k * b_k \quad (7)$$

$$= (r_k + m_k) * b_k \quad (8)$$

เมื่อ $z_k = r_k + m_k$ และ u_k คือข้อมูลเอาต์พุตของอีควอลไลเซอร์ จากรูปที่ 2 จะได้ว่าข้อผิดพลาดที่เกิดจากการออกแบบอีควอลไลเซอร์และทาร์เก็ตคือลำดับข้อมูล $w_k = u_k - d_k$ หรือ $u_k = d_k + w_k$ ดังนั้นแทนค่า u_k ลงในสมการที่ (8) จะได้เป็น

$$(d_k + w_k) * a_k = r_k * b_k + m_k * b_k \quad (9)$$

$$w_k * a_k = r_k * b_k + m_k * b_k - d_k * a_k \quad (10)$$

ถ้าให้ $e_k = w_k * a_k$ เป็นลำดับข้อผิดพลาดที่ถูกรอง (Filtered Error Sequence) ดังนั้นสมการที่ (10) เขียนใหม่ได้เป็น

$$e_k = r_k * b_k + m_k * b_k - d_k * a_k \quad (11)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้คือ

$$e_k = \mathbf{r}^T \mathbf{b} + \mathbf{m}^T \mathbf{b} - \mathbf{d}^T \mathbf{a} \quad (12)$$

โดยที่

$$\mathbf{r} = [r_{k+N}, \dots, r_k, \dots, r_{k-N}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{m} = [m_{k+N}, \dots, m_k, \dots, m_{k-N}]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{b} = [b_{-N}, \dots, b_0, \dots, b_N]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{d} = [d_{k-1}, d_{k-2}, \dots, d_{k-M}]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_M]^T \quad (17)$$

เมื่อ $\mathbf{r}$, $\mathbf{m}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{d}$, และ $\mathbf{a}$ คือเวกเตอร์แนวดิ่งที่มีจำนวนสมาชิก $(2N+1)$, $(2N+1)$, $(2N+1)$, M , และ M ตัว ตามลำดับ

การออกแบบร่วมกันระหว่างอีควอลไลเซอร์แบบ IIR และทาร์เก็ตทำได้โดยอาศัยเทคนิคข้อผิดพลาด

กำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด นั่นคืออีควอลไลเซอร์แบบ IIR ที่ได้จะทำให้

$$E\{e_k^2\} = E\{(\mathbf{r}^T \mathbf{b} + \mathbf{m}^T \mathbf{b} - \mathbf{d}^T \mathbf{a})^2\} \quad (18)$$

มีค่าน้อยสุด เมื่อ $E\{\cdot\}$ คือตัวดำเนินการคาดหวัง (Expectation Operator) โดยขั้นตอนการทำให้สมการที่ (18) มีค่าน้อยสุด จะมีการใช้เงื่อนไขบังคับ (Constraint) $a_0 = 1$ เพื่อป้องกันไม่ให้ได้ผลลัพธ์เป็น $\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{0}$ ดังนั้นสมการที่ (18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$E\{e_k^2\} = \mathbf{b}^T \mathbf{R}_1 \mathbf{b} + \mathbf{b}^T \mathbf{R}_2 \mathbf{b} + \mathbf{a}^T \mathbf{D} \mathbf{a} + 2\mathbf{b}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{b} - 2\mathbf{b}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{a} - 2\mathbf{b}^T \mathbf{P}_3 \mathbf{a} - 2\lambda(\mathbf{I}^T \mathbf{a} - 1) \quad (19)$$

เมื่อ $\mathbf{R}_1$ คือเมทริกซ์อัตราสหสัมพันธ์ขนาด $(M+1) \times (M+1)$ ของลำดับข้อมูล r_k , $\mathbf{R}_2$ คือเมทริกซ์อัตราสหสัมพันธ์ขนาด $(M+1) \times (M+1)$ ของลำดับข้อมูล m_k , $\mathbf{D}$ คือเมทริกซ์อัตราสหสัมพันธ์ลำดับขนาด $(N+1) \times (N+1)$ ของลำดับข้อมูล d_k , $\mathbf{P}_1$ คือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามลำดับขนาด $(M+1) \times (N+1)$ ระหว่างลำดับข้อมูล r_k และ m_k , $\mathbf{P}_2$ คือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามขนาด $(M+1) \times (N+1)$ ระหว่างลำดับข้อมูล r_k และ d_k , $\mathbf{P}_3$ คือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามขนาด $(M+1) \times (N+1)$ ระหว่างลำดับข้อมูล m_k และ d_k , λ คือตัวคูณลากรางจ์ ซึ่งเป็นค่าคงตัวที่ทำให้สมการที่ (19) มีค่าน้อยสุด และ $\mathbf{I} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ คือเวกเตอร์แนวดิ่งที่มีสมาชิกจำนวน $(M+1)$ ตัว โดยสมาชิกตัวแรกมีค่าเท่ากับหนึ่ง และสมาชิกตัวอื่นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์

ค่าสัมประสิทธิ์ของอีควอลไลเซอร์แบบ IIR สามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (19) เทียบกับตัวแปร $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, และ λ ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\partial E\{e_k^2\}}{\partial \mathbf{b}} = 2\mathbf{R}_1 \mathbf{b} + 2\mathbf{R}_2 \mathbf{b} + 4\mathbf{P}_1 \mathbf{b} - 2\mathbf{P}_2 \mathbf{a} - 2\mathbf{P}_3 \mathbf{a} \quad (20)$$

$$\frac{\partial E\{e_k^2\}}{\partial \mathbf{a}} = 2\mathbf{D} \mathbf{a} - 2\mathbf{b} \mathbf{P}_2^T - 2\mathbf{b} \mathbf{P}_3^T - 2\lambda \mathbf{I} \quad (21)$$

$$\frac{\partial E\{e_k^2\}}{\partial \lambda} = -2\mathbf{I}^T \mathbf{a} + 2 \quad (22)$$

จากนั้นกำหนดให้ผลลัพธ์ทั้งหมดในสมการที่ (20), (21) และ (22) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้เป็น

$$\mathbf{b} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{a} \quad (23)$$

$$\mathbf{a} = \lambda (\mathbf{D} - \mathbf{P}_2^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} - \mathbf{P}_3^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{I} \quad (24)$$

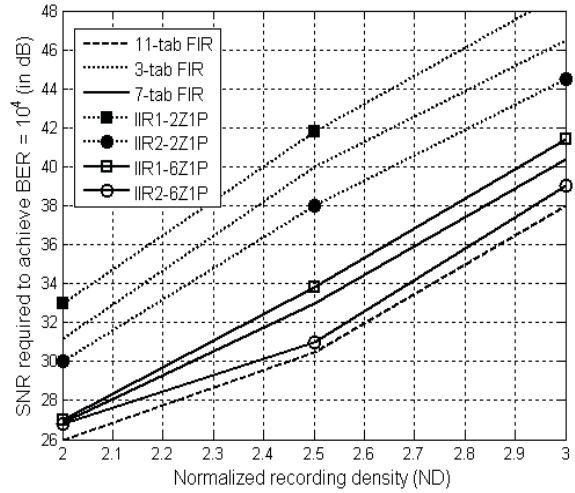
$$\lambda = \frac{1}{\mathbf{I}^T (\mathbf{D} - \mathbf{P}_2^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} - \mathbf{P}_3^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{I}} \quad (25)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อกำหนดทาร์เก็ต $H(D)$ ของระบบ มาให้ ค่าสัมประสิทธิ์ของอีควอลไลเซอร์แบบ IIR นั้นคือ ค่า $\mathbf{a}$ และ $\mathbf{b}$ สามารถหาได้จากสมการที่ (23), (24) และ (25)

5. ผลการทดลอง

บทความนี้ทำการวิเคราะห์ช่องสัญญาณการ บันทึกรหัสข้อมูลแบบแนวตั้งที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่มตามรูปที่ 1 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองระบบ (Simulation) โดยอัตราส่วน กำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: Signal-to-noise Ratio) นิยามโดยมีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB: Decibel) เมื่อกำลังงานของสัญญาณรบกวนคือ $\sigma_n^2 = N_0 / (2T)$ นอกจากนี้แต่ละจุดของอัตรา ข้อผิดพลาดบิต (BER: bit-error Rate) จะคำนวณโดยใช้ ข้อมูลหลายๆ เซกเตอร์ (1 เซกเตอร์มีจำนวน 4096 บิต) จนกระทั่งได้ข้อผิดพลาดมากกว่าหรือเท่ากับ 500 บิต

ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ อีควอลไลเซอร์แบบ FIR แบบ IIR ที่ถูกออกแบบโดย ไม่ใช้ข้อมูลสัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่ม (หรือ IIR1-xZyP) และแบบ IIR ที่ถูกออกแบบโดยใช้ข้อมูล สัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่ม (หรือ IIR2-xZyP) เมื่อ $x = 2N$ ซีโร (Zero หรือ $x + 1$ แทป) และ $y = M$ โพล (Pole)

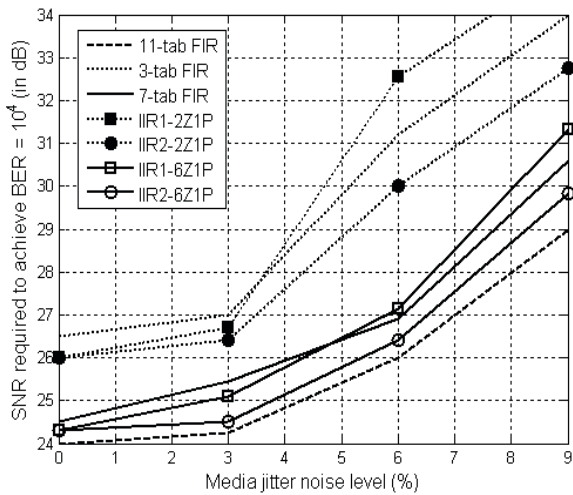


รูปที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบ ณ ND ต่างๆ

รูปที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์ แบบต่างๆ โดยแสดงค่า SNR ที่ต้องการที่ทำให้ได้ $\text{BER} = 10^{-4}$ ณ ค่า ND ต่างๆ สำหรับระบบที่มี สัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่ม $\sigma_j^2 = 6\%$ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนแทปของอีควอลไลเซอร์มีค่าเท่ากัน อีควอลไลเซอร์ แบบ IIR2 มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอีควอลไลเซอร์แบบ FIR และแบบ IIR1 สำหรับทุกค่า ND โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อจำนวนแทปมีค่าน้อย (เช่น 3 แทป)

นอกจากนี้รูปที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของอีควอลไลเซอร์แบบต่างๆ โดยแสดงค่า SNR ที่ ต้องการที่ทำให้ได้ $\text{BER} = 10^{-4}$ ณ ระดับความรุนแรง ของสัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่มต่างๆ ที่ $\text{ND} = 2$ ซึ่งจะ พบว่าเมื่อจำนวนแทปของอีควอลไลเซอร์มีค่าเท่ากัน อีควอลไลเซอร์แบบ IIR2 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า อีควอลไลเซอร์แบบ IIR1 และแบบ FIR สำหรับทุกระบบ ความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสีขาวแบบสุ่ม

ในทางปฏิบัติอีควอลไลเซอร์แบบ IIR จะมีผลตอบ สอนองเชิงเฟส (Phase Response) แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่อีควอลไลเซอร์แบบ FIR จะมีผลตอบสนองเชิง เฟสแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ผลตอบสนองเชิงเฟสของอีควอลไลเซอร์ไม่มีผลกระทบ ต่อประสิทธิภาพของระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบ ณ ระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกต่างๆ

[2] ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองว่า ระบบที่ใช้อีควอไลเซอร์แบบ IIR จะยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบที่ใช้อีควอไลเซอร์แบบ FIR

นอกจากนี้โดยทั่วไปวงจรกรองแบบ IIR จะเผชิญกับปัญหาเรื่องความเสถียรภาพของระบบ อย่างไรก็ตามจากการทดลองหลายๆ ครั้งพบว่า อีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอมีความเสถียรภาพทุกครั้ง สำหรับระบบการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ณ ระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกต่างๆ [4]

6. สรุป

เมื่อช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งมีความจุข้อมูลสูงขึ้น ก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมากขึ้น บทความนี้นำเสนอวิธีการนำเอาข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกมาช่วยในการออกแบบอีควอไลเซอร์แบบ IIR เพื่อให้ได้อีควอไลเซอร์ที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก ซึ่งจะส่งผลทำให้ระบบรวมมีประสิทธิภาพดีขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอีควอไลเซอร์แบบ IIR ที่ถูกออกแบบโดยใช้ข้อมูลสัญญาณรบกวน

สื่อบันทึกจะมีประสิทธิภาพดีกว่าอีควอไลเซอร์แบบ FIR และแบบ IIR ที่ถูกออกแบบโดยไม่ใช้ข้อมูลสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก เมื่อทำงานในระบบที่มีระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกสูง และอีควอไลเซอร์มีจำนวนแทปน้อย (เช่น 3 ถึง 5 แทป)

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากวิทยาลัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งานสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ภายใต้ทุนหมายเลข HDD-01-51-0135M

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. D. Cideciyan, Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for digital magnetic recording," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 10, pp. 38 – 56, Jan 1992.
- [2] J. W. M. Bergmans, *Digital baseband transmission and recording*. Boston/London/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-18, pp. 363 – 367, May 1972.
- [4] P. Kovintavewat, C. Warisarn, and P. Supnithi, "An MMSE Infinite Impulse Response Equalizer for Perpendicular Recording Channels with Jitter Noise," in *Proc. of ITC-CSCC 2008*, Shimonoseki City, Japan, pp. 929 – 932, Jul 6 – 9, 2008.
- [5] J. Moon, "Discrete-time modeling of transition noise dominant channels and study of detection performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, pp.



- 4573 – 4578, Nov 1991.
- [6] J. Moon and W. Zeng, “Equalization for maximum likelihood detector,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, pp. 1083 – 1088, Mar 1995.
- [7] H. Yang and G. Mathew “Joint Design of Optimum Partial Response Target and Equalizer for Recording Channels with Jitter Noise,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 1, Jan 2006.
- [8] K. Cai, J. W. M. Bergmans, Y. N. Foo, and Z. Qin, “Modeling and Combating Media Noise for High-Density Optical Recording” (unpublished).
- [9] T. A. Roscamp, E. D. Boerner, and G. J. Parker, “Three-dimensional modeling of perpendicular recording with soft underlayer,” *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 10, May 2002.
- [10] P. Kovintavewat and J. R. Barry, *Iterative Timing Recovery: A Per-Survivor Approach*. VDM Verlag Publisher, Germany, November 2009.