

การตรวจหาแบบสามแทร็กด้วยเพอร์เซปตรอนหลายชั้นสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก A Three-Track Detection Using Multi-Layer Perceptron for Magnetic Recording Systems

สันติ กุลการชาย^{1*} และปิยะ โควินท์วิวัฒน์¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม santi@npru.ac.th*, piya@npru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรตรวจหาแบบใหม่สำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์น (bit-patterned magnetic recording: BPMP) ที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (multilayer perceptron: MLP) สำหรับตรวจหาข้อมูลจากระบบที่ใช้ 3 หัวอ่านและ 3 แตร็ก (3-head 3-track: 3H3T) โดยออกแบบให้ MLP ทำหน้าที่แทนวงจรตรวจหาที่ใช้เทคนิค PRML นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์สมรรถนะของวงจรที่นำเสนอภายใต้ผลกระทบจาก TMR (track mis-registration) และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) พบว่าวงจรตรวจหาที่นำเสนอมีสมรรถนะเหนือกว่าวงจรตรวจหาแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อความหนาแน่นข้อมูลสูง หรือเมื่อเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง

คำสำคัญ: เพอร์เซปตรอนหลายชั้น วงจรตรวจหา การบันทึกเชิงแม่เหล็ก

Abstract

This paper presents the design of a novel detector for bit-patterned magnetic recording (BPMP) systems using a multilayer perceptron (MLP) for a 3-head 3-track BPMP system. The proposed MLP-based detector is utilized to replace a conventional detector operating based on a partial-response maximum-likelihood technique. The performance of the proposed detector is also evaluated under the effects of track mis-registration and media noise. Simulation results show that the proposed method significantly outperforms the conventional PRML-based detector, especially at high areal densities or in high-noise environment.

Keywords: Multi-layer perceptron, Detector, Magnetic recording

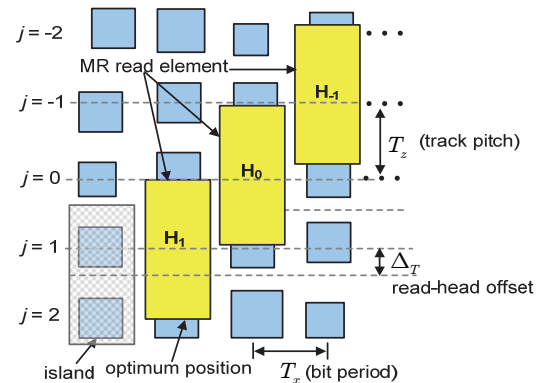
1. บทนำ

ในปัจจุบัน ข้อมูลข่าวสารส่วนใหญ่ถูกจัดเก็บในรูปแบบดิจิทัล ส่งผลให้อุปกรณ์สำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง โดยเทคโนโลยีหลักที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลัก ได้แก่

1) เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็ก (magnetic recording technology) ซึ่งถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive: HDD) และเทปแม่เหล็ก (magnetic tape)

2) เทคโนโลยีหน่วยความจำแฟลช NAND (NAND flash memory Technology) ซึ่งเป็นพื้นฐานของอุปกรณ์ประเภทโซลิดสเตตไดรฟ์ (solid state drive: SSD) และแฟลชไดรฟ์ (flash drives)

เทคโนโลยีทั้งสองประเภทนี้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความเร็ว ความจุ อายุการใช้งาน และ



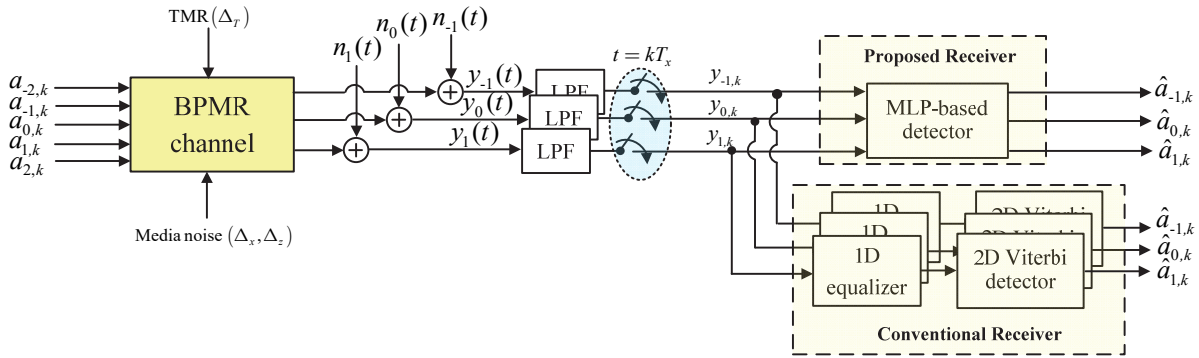
รูปที่ 1 การจัดเรียงของไอแลนด์และหัวอ่านในระบบ 3H3T BPMP

ต้นทุนของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบราคาต่อหน่วยความจุเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กมีราคาที่ถูกกว่าเทคโนโลยีหน่วยความจำแฟลช NAND ดังนั้นในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

ปัจจุบัน HDD ใช้เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density: AD) ได้ประมาณ 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in²) อย่างไรก็ตามการเพิ่ม AD ให้สูงกว่านี้ต้องเผชิญกับข้อจำกัดทางกายภาพที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic effect)” [1] ซึ่งทำให้ข้อมูลที่บันทึกไว้อาจไม่เสถียรเนื่องจากความไม่แน่นอนของทิศทางการบันทึกในขนาดที่เล็กมาก

เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบใหม่ เช่น การบันทึกแบบบิตแพทเทิร์น (bit-patterned magnetic recording: BPMP), การบันทึกด้วยความร้อนช่วย (heat-assisted magnetic recording: HAMR) และการบันทึกแบบสองมิติ (two-dimensional magnetic recording: TDMR) โดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยี BPMP ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้ถึง 4 Tb/in² [1]

รูปที่ 1 แสดงการจัดเรียงไอแลนด์ของระบบ BPMP ที่ใช้ 3 หัวอ่านเพื่ออ่านข้อมูล 3 แตร็ก (3-head 3-track: 3H3T) ซึ่งข้อมูลจะถูกบันทึกลงบน “เกาะข้อมูล” ที่เรียกว่า ไอแลนด์ (island) โดยไอแลนด์เหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กและถูกฝังอยู่ในวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (non-magnetic material) เพื่อป้องกันการรบกวนจากบริเวณรอบข้าง โดย AD ของระบบ BPMP ถูกกำหนดโดยระยะห่างระหว่างไอแลนด์ในสองทิศทางคือ ทิศทางตามแนวแทร็ก (along track) ซึ่งเรียกว่าคาบบิต (bit period: T_x) และทิศทางข้ามแทร็ก (across track) ซึ่งเรียกว่าระยะแทร็ก (track pitch: T_z) โดยทั่วไปไอแลนด์จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดในระดับนาโนเมตร [2] และมีขนาดเล็กกว่าหัวอ่านที่ใช้ในการตรวจจับสนามอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สนามแม่เหล็กจากไอแลนด์ใกล้เคียงสามารถแทรกเข้ามาที่หัวอ่านได้ปรากฏการณ์ดังกล่าว



รูปที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณ 3H3T BPMPR ที่ใช้ MLP เป็นวงจรตรวจหา

เรียกว่า การแทรกสอดแบบสองมิติ (2D interference) ซึ่งประกอบด้วย การแทรกสอดระหว่างแทร็ก (intertrack interference: ITI) เกิดในทิศทางข้ามแทร็ก และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference: ISI) เกิดในทิศทางตามแทร็ก เมื่อค่า AD เพิ่มขึ้น ความรุนแรงของการแทรกสอดทั้งสองประเภทนี้จะรุนแรงขึ้นตามไปด้วย [2] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้มีงานวิจัยส่วนมากได้ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณขั้นสูง (advanced signal processing) ภายในวงจรภาครับ รวมถึงการออกแบบการจัดเรียงไอแลนด์อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ระบบ BPMPR ยังมีข้อจำกัดเพิ่มเติมจากผลกระทบของความไม่สม่ำเสมอของตำแหน่งและรูปร่างของไอแลนด์ ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนของสื่อบันทึก (media noise) การเคลื่อนที่ของหัวอ่านในทิศทางข้ามแทร็ก (track mis-registration: TMR) ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งผลกระทบต่างๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดจำนวนมากที่วงจรภาครับของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทั่วไปแล้ววงจรภาครับจะใช้วงจรตรวจหาที่ทำงานบนหลักการของผลตอบสองที่ควรจะเป็นมากที่สุด (partial-response maximum-likelihood: PRML) [3] ซึ่งจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรอีควอลไลเซอร์ (equalizer) และวงจรตรวจหาวิเทอบี (Viterbi detector) [2]-[4] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks: ANN) ในการแก้ไขปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนมาก

เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น Koonkarnkhai et. al. [5] ได้ใช้เพอร์เซปตรอนหลายชั้น (multilayer perceptron: MLP) ในการทำนายความรุนแรงของผลกระทบจากเสียงของหัวอ่านในระบบ BPMPR สำหรับ Nguyen และ Lee [6] ได้นำโครงข่าย LSTM (long short-term memory) มาใช้ในการจัดการกับผลกระทบจากการแทรกสอดแบบสองมิติในระบบ BPMPR สุดท้าย Jeong และ Lee [7] ได้นำอัลกอริทึม K-means มาใช้ในการประมาณระดับความรุนแรงของ TMR เพื่อเลือกการเกิดและอีควอลไลเซอร์ที่เหมาะสมกับสถานะของ TMR ในแต่ละสถานการณ์

บทความนี้ได้มุ่งเน้นในการออกแบบวงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP สำหรับการระบบ 3 หัวอ่าน 3 แทร็ก ในระบบ BPMPR ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบวงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP เช่น จำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) จำนวนโนด (node) และฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกอีกด้วย

2. แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณ 3 หัวอ่าน 3 แทร็ก BPMPR เมื่อกำหนดให้ $a_{j,k} \in \{\pm 1\}$ คือลำดับบิตข้อมูลไบนารีที่จะบันทึกลงบนสื่อบันทึก เมื่อ $j \in \{\pm 1, \pm 2, 0\}$ คือลำดับของแทร็กข้อมูล โดยที่ผลตอบสองสัญญาณพัลส์สองมิติของระบบ BPMPR สามารถเขียนได้เป็น [2]

$$H(z, x) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + \Delta_x}{cW_x} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_z + \Delta_T}{cW_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

เมื่อ $A = 1$ คือค่าแอมพลิจูด, $c = 1 / 2.3458$ คือค่าคงตัวที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน, W_x และ W_z คือค่า PW_{50} ของพัลส์ในทิศทางตามแทร็กและข้ามแทร็กตามลำดับ Δ_x และ Δ_z คือความผันผวน (fluctuation) ของตำแหน่งไอแลนด์ในทิศทางตามแทร็กและข้ามแทร็กตามลำดับ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) สำหรับหัวอ่านที่ $i \in \{1, 2, 3\}$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

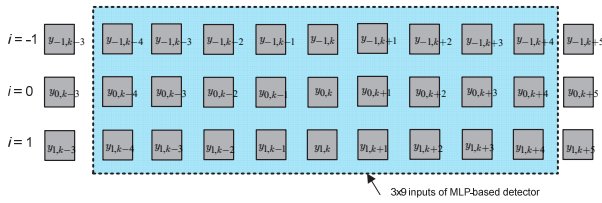
$$y_i(t) = \sum_m \sum_n a_{m+i,n} H((m+i)T_x, t - nT_x) + n_i(t) \quad (2)$$

เมื่อ $n_i(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (additive white Gaussian noise) ของหัวอ่านที่ i ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองด้าน (double sided power spectral density) เท่ากับ $N_0 / 2$

สำหรับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความผันผวนของตำแหน่งไอแลนด์เท่านั้น) จะถูกจำลองเป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเกาส์ (Gaussian probability distribution function) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ_x^2 เมื่อโดยที่ σ_x ระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ของ T_x ในขณะที่ผลกระทบจาก TMR สามารถนิยามได้จาก

$$TMR = \frac{\Delta_T}{T_z} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ Δ_T คือระยะที่หัวอ่านเคลื่อนที่ออกจากกึ่งกลางแทร็ก



รูปที่ 3 รูปแบบชุดข้อมูลอินพุตของ MLP สำหรับการตรวจหาลำดับข้อมูลอินพุต $\{a_{-1,k}, a_{0,k}, a_{1,k}\}$

ที่วงจรกรับแบบทั่วไปสัญญาณอ่านกลับ จะถูกกรองด้วยวงจรกรองต่ำผ่าน (lowpass filter: LPF) แบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 7 (7th order Butterworth) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนนอกแถบความถี่ใช้งาน หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังวงจรซมตัวอย่าง (sampler) ณ เวลาที่ $t = kT_x$ ทำให้ได้ $\{y_{i,k}\}$ หลังจากนั้นลำดับข้อมูล $\{y_{i,k}\}$ จะถูกส่งเข้าไปยังอีควอไลเซอร์ที่ออกแบบด้วยหลักการข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (minimum mean square error: MMSE) [4] เพื่อปรับคุณสมบัติทางความถี่ของสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ต (target) หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าไปยังวงจรตรวจหาวิเทอริบีเพื่อประมาณค่าควรจะเป็นมากที่สุดของลำดับข้อมูลอินพุต $\{a_{i,k}\}$

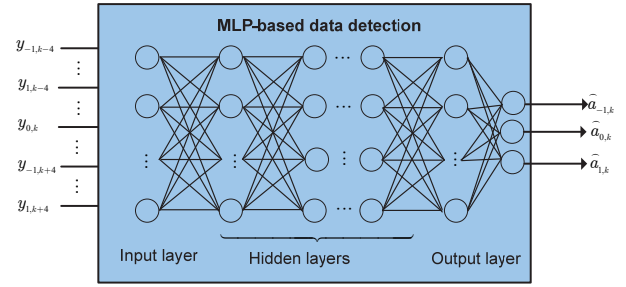
3. การออกแบบวงจรตรวจหาโดยใช้เพอร์เซปตรอนหลายชั้น

โดยทั่วไปวงจรตรวจหาในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กจะใช้เทคนิค PRML ซึ่งเป็นการผสานการทำงานระหว่างอีควอไลเซอร์กับตัวตรวจหาแบบ Viterbi อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (MLP) แทนวงจรตรวจหาแบบเดิม โดยอาศัยคุณสมบัติของ MLP ที่สามารถจัดการกับปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานนี้ MLP ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจหาโดยเฉพาะ โดยจากการทำแบบจำลองพบว่า โครงสร้างแบบจำลองวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP ที่เหมาะสมมีดังนี้ ชั้นอินพุต (input layer) ประกอบด้วย 27 โหนด (node) โดยรูปแบบของชุดข้อมูลอินพุตของ MLP เป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 3 ชั้นซ่อน (hidden layer) จำนวน 5 ชั้น ซึ่งมีจำนวนโหนดเท่ากับ 128, 64, 32, 16 และ 8 ตามลำดับ (จำนวนชั้นที่มากกว่า 5 ไม่ได้ทำให้สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาเพิ่มขึ้น) และชั้นเอาต์พุต (output layer) ประกอบด้วย 3 โหนด ใช้ในการประมาณลำดับข้อมูลอินพุตจากทั้ง 3 แทร็ก $\{a_{-1,k}, a_{0,k}, a_{1,k}\}$ ตามที่แสดงในรูปที่ 4 สำหรับแต่ละชั้นซ่อนจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent: tanh) ซึ่งสามารถนิยามด้วยสมการดังนี้

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4)$$

เมื่อ x คืออินพุตของฟังก์ชันกระตุ้น

ในกระบวนการเรียนรู้จะใช้ Adam (adaptive moment estimation) [8] เป็นออปติไมเซอร์ (optimizer) ในการปรับค่าน้ำหนัก (weight) และ



รูปที่ 4 โครงสร้างของวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP ในการตรวจหาลำดับข้อมูล 3 แทร็ก

ค่าเอนเอียง (bias) ในแต่ละโหนด โดยมีการเรียนรู้จำนวน 50 ยุค (epoch) และอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.001 ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ประกอบด้วยสัญญาณอ่านกลับจำนวน 5,000 เซกเตอร์ (sector) เมื่อ 1 เซกเตอร์เท่ากับ 4,098 บิต ณ อัตรากำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio: SNR) ที่ทำให้เกิดอัตราข้อผิดพลาดบิต (bit-error rate, BER) เท่ากับ 1×10^{-4} เมื่อไม่มีผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสลับบิต หากใช้ค่า SNR ที่สูงเกินไปในกระบวนการเรียนรู้ อาจจะทำให้เกิดโอเวอร์ฟิตติง (overfitting) กับโมเดล MLP ที่ได้ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ

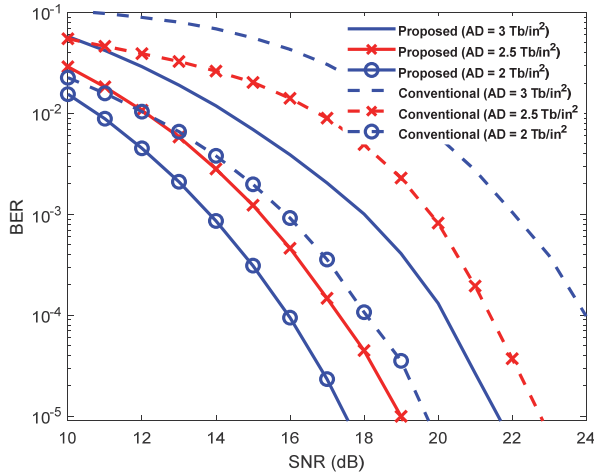
4. ผลของการทำแบบจำลอง

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR เมื่อหัวอ่านแบบ MR (magneto-resistive) มีความหนาขนาด 4 nm (นาโนเมตร) กว้าง 16 nm สลับบันทึกแม่เหล็กเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 11 nm หนา 10 nm ระยะบิน (fly height) 10 nm และระยะช่องว่างถึงช่องว่าง (gap-to-gap) กว้างเท่ากับ 16 nm สำหรับที่ $AD = 2 \text{ Tb/in}^2$ ค่า $T_x = T_z = 18 \text{ nm}$ $AD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$ ค่า $T_x = T_z = 16 \text{ nm}$ และ $AD = 3 \text{ Tb/in}^2$ ค่า $T_x = T_z = 14.5 \text{ nm}$ [2] สุดท้ายค่า SNR กำหนดจาก

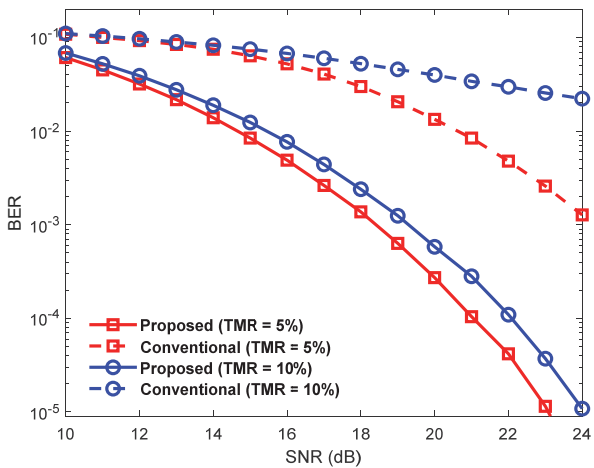
$$\text{SNR} = 10 \log_{10} (A^2 / \sigma^2) \quad (5)$$

เมื่อ $A^2 = 1$ คือพลังงานของสัญญาณอ่านกลับ และ σ^2 คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน

รูปที่ 5 แสดงสมรรถนะของระบบแบบต่าง ๆ ในรูปแบบของ BER ที่ค่า $AD = 2, 2.5$, และ 3 Tb/in^2 เมื่อนิยามให้ “Proposed” คือระบบที่ใช้ MLP เป็นวงจรตรวจหา และ “Conventional” คือระบบที่ใช้เทคนิค PRML โดยอีควอไลเซอร์ 1 มิติ 7 แทป (tap) และวงจรตรวจหาวิเทอริบี 2 มิติ ที่ใช้ทาร์เก็ตแบบอสมมาตร [9] โดยที่ทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ออกแบบโดยใช้หลักการ MMSE โดยสัญญาณอ่านกลับที่ใช้ในการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ปราศจากผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสลับบิต จากผลของการทำแบบจำลองพบว่าระบบ “Proposed” ให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบ “Conventional” เมื่อเปรียบเทียบที่ $\text{BER} = 10^{-4}$ พบว่า “Proposed” จะให้สมรรถนะที่ดีกว่า “Conventional” ประมาณ 2 dB, 3.8 dB, และ 4 dB สำหรับที่ $AD = 2, 2.5$, และ 3 Tb/in^2 ตามลำดับ โดยจะพบว่ายิ่ง AD สูง ๆ สมรรถนะของระบบ “Proposed” จะให้อัตราขยายที่สูงขึ้น



รูปที่ 5 สมรรถนะของระบบต่างๆ ที่ $AD = 2, 2.5, 3 \text{ Tb/in}^2$ เมื่อไม่มีผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสีอื่นที่ก

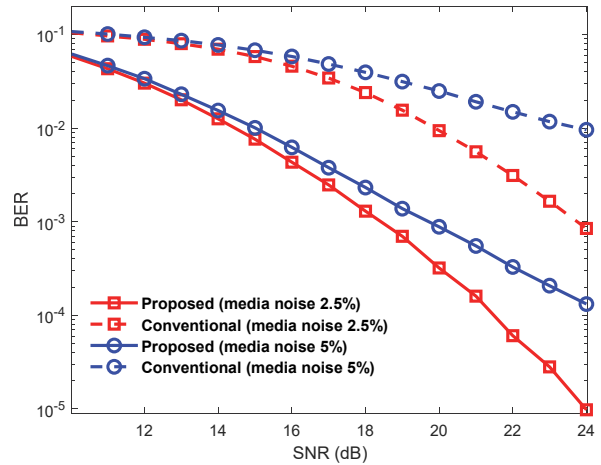


รูปที่ 6 สมรรถนะของระบบต่างๆ เมื่อมีผลกระทบจาก TMR ที่ 5% และ 10% ที่ $AD = 3 \text{ Tb/in}^2$

รูปที่ 6 แสดงสมรรถนะของระบบที่ความหนาแน่นบันทึกข้อมูลเท่ากับ 3 Tb/in^2 ภายใต้ผลกระทบของ TMR ที่ระดับ 5% และ 10% ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบ “Proposed” มีความสามารถในการทนทานต่อผลกระทบจาก TMR ได้ดีกว่าระบบ “Conventional” อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อระดับ TMR เพิ่มขึ้น สมรรถนะของระบบ “Conventional” จะลดลงอย่างมาก

ในทำนองเดียวกันรูปที่ 7 แสดงสมรรถนะของระบบภายใต้ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนของสีอื่นที่ระดับ 2.5% และ 5% ที่ $AD = 3 \text{ Tb/in}^2$ ซึ่งพบว่า ระบบ “Proposed” ยังคงรักษาสมรรถนะได้เหนือกว่าระบบ “Conventional” อย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบ “Conventional” จะได้รับผลกระทบเชิงลบอย่างชัดเจนเมื่อระดับสัญญาณรบกวนเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงความซับซ้อนของวงจรตรวจหาในรูปแบบของตัวดำเนินการบวก/ลบ ตัวดำเนินการคูณ/หาร และตัวดำเนินการเปรียบเทียบ/ฟังก์ชัน (ตารางค้นหา) สำหรับการตรวจหาข้อมูล 3 บิต $\{a_{-1,k}, a_{0,k}, a_{1,k}\}$ ซึ่งพบว่าระบบ “Proposed” มีความซับซ้อนสูงกว่าระบบ “Conventional” ประมาณ 10 เท่า อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะที่ได้รับในรูปแบบของ BER แล้ว ถือว่ามีความคุ้มค่าเนื่องจาก



รูปที่ 7 สมรรถนะของระบบต่างๆ เมื่อมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสีอื่นที่ 2.5% และ 5% ที่ $AD = 3 \text{ Tb/in}^2$

ตารางที่ 1 ความซับซ้อนของระบบต่าง ๆ สำหรับการตรวจหาข้อมูล 3 บิต

ระบบ	บวก/ลบ	คูณ/หาร	เปรียบเทียบ/ฟังก์ชัน
Proposed	15,107	14,608	248
Conventional	1,749	1,554	1,536

True Class	-1 -1 -1	-1 -1 1	-1 1 -1	-1 1 1	1 -1 -1	1 -1 1	1 1 -1	1 1 1
-1 -1 -1	500841				1			
-1 -1 1	2	500543						
-1 1 -1	7	5	499391	9	6	53	6	1
-1 1 1				498978				
1 -1 -1					500372			
1 -1 1	2	5	28	6	9	500350	1	3
1 1 -1							499240	1
1 1 1				1				500139
Predicted Class	-1 -1 -1	-1 -1 1	-1 1 -1	-1 1 1	1 -1 -1	1 -1 1	1 1 -1	1 1 1

รูปที่ 8 เมทริกซ์ความสับสนของวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP

ระบบ “Proposed” ให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบ “Conventional” แล้ว ยังทนทานกับผลกระทบจาก TMR และสัญญาณสีอื่นที่กอีกด้วย

รูปที่ 8 แสดงเมทริกซ์ความสับสน (confusion matrix) ของวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP สำหรับประมาณค่าลำดับข้อมูลจากทั้ง 3 แทริกในระบบ BPMP ที่ $SNR = 20 \text{ dB}$ ผลการจำลองชี้ให้เห็นว่าความผิดพลาดในการทำนายเกิดขึ้นสูงสุดเมื่ออินพุตมีลักษณะเป็น $\{-1, +1, -1\}$ หรือ $\{+1, -1, +1\}$ ซึ่งบ่งชี้ถึงผลกระทบรุนแรงจาก ITI โดยเฉพาะในกรณีที่ปิดกลางมีค่าตรงข้ามกับบิตด้านบนและด้านล่าง ส่งผลให้สัญญาณอ่านกลับของแตรีกกลางอ่อนลงและทำให้วงจรตรวจหาเกิดความสับสนในการประมาณค่า นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อลำดับอินพุตเป็น $\{-1, +1, -1\}$ จะตรวจหาผิดเป็น $\{+1, -1, +1\}$ และในทางตรงกันข้าม ดังนั้นงานวิจัยใน

อนาคตควรมุ่งเน้นไปที่การออกแบบรูปแบบการบันทึกข้อมูลให้สามารถหลีกเลี่ยงลำดับบิตที่มีลักษณะเป็น $\{-1, +1, -1\}$ หรือ $\{+1, -1, +1\}$ ซึ่งเป็นลำดับที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจหาอย่างชัดเจน เนื่องจากบิตกลางมีค่าตรงข้ามกับบิตด้านบนและด้านล่าง ส่งผลให้สัญญาณของแตรีกกลางถูกลดทอนจนวงจรตรวจหาไม่สามารถแยกแยะข้อมูลได้อย่างแม่นยำ การออกแบบในลักษณะนี้อาจรวมถึงเทคนิคการเข้ารหัสข้อมูลล่วงหน้า (precoding) หรือการจำกัดรูปแบบของบิตที่สามารถบันทึกได้ (constrained coding) [10], [11] เพื่อหลีกเลี่ยงลำดับที่ก่อให้เกิด ITI รุนแรง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแม่นยำของระบบตรวจหาและลดอัตราความผิดพลาดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความซับซ้อนให้กับวงจรภาครับมากนัก

5. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรตรวจหาแบบใหม่สำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์น (BPMR) ที่ใช้ MLP ทำหน้าที่แทนวงจรตรวจหาที่ใช้เทคนิค PRML โดยได้กำหนดโครงสร้างของ MLP อย่างเหมาะสม ทั้งในด้านจำนวนเลเยอร์ จำนวนโนด และฟังก์ชันกระตุ้น พร้อมทั้งฝึกโมเดลด้วยข้อมูลที่สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงของระบบ 3 แตรีก 3 หัวอ่าน (3H3T)

จากผลการจำลอง พบว่าวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP สามารถให้สมรรถนะที่เหนือกว่าวงจรแบบดั้งเดิมในทุกสภาวะ โดยเฉพาะเมื่อระบบต้องเผชิญกับความหนาแน่นของข้อมูลที่สูง หรือได้รับผลกระทบจากการเยื้องหัวอ่าน (TMR) และสัญญาณรบกวนของสื่อบันทึก นอกจากนี้ การวิเคราะห์เมตริกซ์ความสับสนยังช่วยให้เข้าใจลักษณะของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ลำดับบิตกลางตรงข้ามกับบิตรอบข้าง ซึ่งทำให้เกิด ITI อย่างรุนแรง

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบตรวจหาในอนาคต ควรพิจารณาแนวทางในการออกแบบรูปแบบการบันทึกหรือเทคนิคการเข้ารหัสที่สามารถหลีกเลี่ยงลำดับบิตที่ก่อให้เกิดความสับสนดังกล่าว อันจะช่วยลดอัตราข้อผิดพลาด และเพิ่มความแม่นยำในการอ่านข้อมูลโดยไม่ต้องเพิ่มความซับซ้อนของวงจรตรวจหา

เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Shiroishi, et. al. "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816 – 3822, Oct. 2009.

[2] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 2, pp. 1083 – 1088, Mar. 1995.

[3] S. Nabavi, "Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comp. Sci., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.

[4] S. Koonkarnkhai, P. Keeratiwintakorn, and P. Kovintavewat "Target and equalizer design for high-density bit-patterned media recording," *ECTI Trans. Comput. Inf. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 175 – 182, Nov. 2012.

[5] S. Koonkarnkhai, K. Kankunthod and P. Kovintavewat, "An MLP-based skew angle mitigation method for bit-patterned magnetic recording," *IEICE Electronics Express*, vol. 21, no. 13, pp. 1 - 6.

[6] T. A. Nguyen and J. Lee, "Using long short-term memory to estimate the 2-D interference of bit-patterned media recording systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 60, no. 9, pp. 1-5, Sept. 2024.

[7] S. Jeong and J. Lee, "Track mis-registration estimator based on K-means algorithm for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 59, no. 3, pp. 1-5, March 2023.

[8] D. P. Kingma and J. Ba. Adam: a method for stochastic optimization, arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.

[9] S. Koonkarnkhai, P. Keeratiwintakorn, N. Chirdchoo and P. Kovintavewat, "Two-dimensional cross-track asymmetric target design for high-density bit-patterned media recording," in *Proc. of The International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS)*, Chiang Mai, Thailand, 2011, pp. 1-4.

[10] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A rate-8/9 2-D modulation code for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014.

[11] T. A. Nguyen and J. Lee, "Error-correcting 5/6 modulation code for staggered bit-patterned media recording systems," *IEEE Magn. Lett.*, vol. 10, pp. 1-5, 2019.