

การใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรในช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพทเทิร์นมีเดียแบบ Staggered Employing an Asymmetric 2-D Target in Staggered Bit-Patterned Media Recording Channel

สันติ กุลการชาย¹ และ ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์²

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

¹santi@webmail.npru.ac.th, ²piya@npru.ac.th

บทคัดย่อ

การบันทึกแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMR: bit-patterned media recording) ถือเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยทั่วไปผลกระทบหลักของระบบ BPMR ประกอบด้วยการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI: intertrack interference), สัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก (media noise) และแทร็กมิสเรจิสเทรชัน (TMR: track mis-registration) บทความนี้ศึกษาการใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรเพื่อลดผลกระทบจาก ITI, TMR และสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกในระบบ BPMR ที่มีรูปแบบของไอแลนด์เป็นแบบ staggered จากผลการทดลองพบว่าการใช้ทาร์เก็ตสองมิติให้สมรรถนะที่ดีกว่าทาร์เก็ตแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรยังคงทนทานต่อสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและ TMR ด้วย

คำสำคัญ: การบันทึกเชิงแม่เหล็ก, การออกแบบทาร์เก็ตและอีควอลไลเซอร์

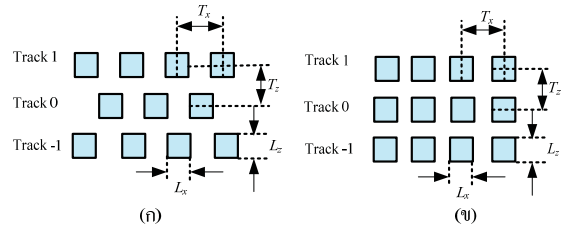
Abstract

Bit-patterned media recording (BPMR) is a new technology to increase the storage capability of the hard disk drives (HDDs). Generally, the major effects of the BPMR system include intertrack interference (ITI), media noise, and track mis-registration (TMR). This paper investigates the use of an asymmetric 2-D target so as to mitigate the effect of ITI, TMR, and media noise in a staggered BPMR channel. Simulation results show that the 2-D target provides a better performance than the other targets. In addition, we found that the asymmetric 2-D target is also robust to media noise and TMR.

Keywords: magnetic recording, target and equalizer design

1. บทนำ

การบันทึกแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMR: bit-patterned media recording) ถือเป็นเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR: perpendicular magnetic recording) ที่ใช้อยู่ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในปัจจุบัน ซึ่งกำลังเข้าใกล้ปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (super-paramagnetic)

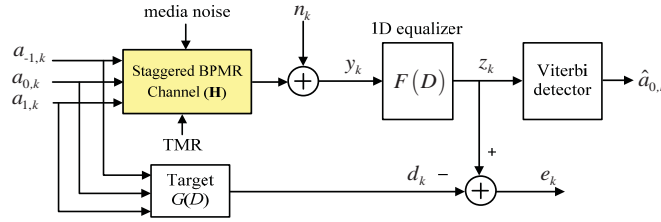


รูปที่ 1 สื่อบันทึก (ก) แบบ staggered และ (ข) แบบกริดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ที่ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ (AD: areal density) ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้มากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in²) [1] ในขณะที่ระบบการบันทึกแบบ BPMR สามารถเพิ่ม AD ได้สูงถึง 4 Tbit/in² [2] และเมื่อใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการบันทึกแบบพลังงานเข้าช่วยก็ยังสามารถเพิ่ม AD ได้สูงถึง 10 Tbit/in² อย่างไรก็ตามผลกระทบในระบบ BPMR ที่ส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบลดลงประกอบด้วย การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: intersymbol interference) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI: intertrack interference) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ AD มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัญญาณรบกวนสื่อบันทึกก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งเกิดจากไอแลนด์แต่ละไอแลนด์มีรูปร่างไม่เหมือนกันหรือและไม่อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด นอกจากนี้ถ้าหัวอ่านเคลื่อนที่ออกไปจากแทร็กหลัก (main track) ไปในทิศทางข้ามแทร็ก (across track) ก็ทำให้เกิดผลกระทบที่เรียกว่า TMR ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณที่อ่านได้ไม่มีคุณภาพ

โดยทั่วไปสื่อบันทึกที่ใช้ในระบบ BPMR แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือสื่อบันทึกแบบกริดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular grid) และสื่อบันทึกแบบ staggered ตามที่แสดงในรูปที่ 1 โดย ความจุเชิงพื้นที่เท่ากันพบว่าสื่อบันทึกแบบ staggered มีผลกระทบจาก ITI ต่ำกว่าสื่อบันทึกแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก [3] เมื่อ T_x คือคาบของบิต (bit period), T_z คือระยะแทร็ก (track pitch), L_x คือความกว้างของไอแลนด์ในทิศทางตามแทร็ก และ L_z คือความกว้างของไอแลนด์ในทิศทางข้ามแทร็ก ดังนั้นบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่สื่อบันทึกแบบ staggered และจะกล่าวถึงระบบ BPMR แบบ staggered แทนระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบ staggered

ในทางปฏิบัติการแก้ปัญหาผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ BPMR แบบ staggered มีจำนวนมาก เช่น Ng *et al.* [3] ได้ออกแบบช่องสัญญาณสำหรับระบบ BPMR แบบ staggered และออกแบบทาร์เก็ต



รูปที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR

หนึ่งมิติที่มีการนำสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกไปใช้ในการออกแบบพบว่าการนำสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกมาใช้ในการ ออกแบบทำให้ระบบทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกมากขึ้น นอกจากนี้ Koonkamkhai *et al.* [4] ได้นำเสนอการออกแบบทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรสำหรับช่องสัญญาณ BPMPR ที่มีสื่อบันทึกเป็นแบบกริดสี่เหลี่ยมมุมฉาก จากผลการทดลองพบว่าทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรใน [4] ให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบบอื่นๆ เมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและ TMR ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้ทาร์เก็ตสองมิติที่นำเสนอใน [4] กับช่องสัญญาณ BPMPR ที่มีสื่อบันทึกเป็นแบบ staggered

2. แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR แบบ staggered เมื่อลำดับข้อมูลอินพุต $a_{j,k} \in \{1, -1\}$ เมื่อ $j = 0$ คือลำดับข้อมูลแทร็กกลาง, $j = 1$ คือลำดับข้อมูลแทร็กบน, และ $j = -1$ คือลำดับข้อมูลแทร็กล่าง ถูกส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณ BPMPR แบบ staggered โดยที่ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบสองมิติที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกแสดงในสมการ (1) เมื่อ a, b, c, d และ e คือค่าคงตัว, T_{50x} และ T_{50z} คือช่วงการเปลี่ยนสถานะของผลตอบสนองจากแอมพลิจูด -50% ไปถึงแอมพลิจูด $+50\%$ ในทิศทางตามแทร็กและทิศทางข้ามแทร็กตามลำดับ, $TMR = (\Delta_{TMR} / T_z) \times 100$ คือผลกระทบจาก TMR มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์, Λ_x และ Λ_z คือความผันผวนของขนาดของไอแลนด์ (size fluctuation) ในทิศทางตามแทร็กและทิศทางข้ามแทร็กตามลำดับ, และ Δ_x และ Δ_z คือความผันผวนของตำแหน่งของไอแลนด์ในทิศทางตามแทร็กและทิศทางข้ามแทร็กตามลำดับ นอกจากนี้บทความนี้พิจารณาช่องสัญญาณที่มีความจุเชิงพื้นที่ (AD) เท่ากับ 4 Tbi/in^2 ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหัวอ่านและสื่อบันทึกแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ (readback signal)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของหัวอ่านและสื่อบันทึก [3]

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น
Along-track island width L_x	6.35 nm
Across-track island width L_z	6.35 nm
Bit period T_x	12.7 nm
Track pitch T_z	12.7 nm
GMR head element thickness	3 nm
GMR head element width	15 nm
T_{50x}	6.4
T_{50z}	10.3
a	0.02
b	0.77
c	7.37
d	0.87
e	6.72

เขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ตามสมการ (2) เมื่อ h คือค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ BPMPR แบบสองมิติในสมการ (1) ซึ่งจะถูกชักคั่วอย่างเวลา T_x และ T_z , และ n_k คือ รบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (AWGN: additive white Gaussian noise) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

สัญญาณสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจะถูกสุ่มด้วย $\Delta_x, \Delta_z, \Lambda_x$ และ Λ_z ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวน $\sigma_{\Delta_x}^2, \sigma_{\Delta_z}^2, \sigma_{\Lambda_x}^2$ และ $\sigma_{\Lambda_z}^2$ ตามลำดับและเมื่อกล่าวถึงเปอร์เซ็นต์ ($x\%$) ของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจะหมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวแปรเป็นเปอร์เซ็นต์ของ T_x, T_z, L_x และ L_z ตามลำดับ

ณ วงจรการรับ สัญญาณอ่านกลับ y_k ถูกส่งเข้าไปยังวงจรอิกวอไลเซอร์เพื่อทำหน้าที่ในการปรับสัญญาณให้เป็นไปตามทาร์เก็ต $G(D)$ ที่

$$H\left(z + \Delta_{TMR}, x\right) = a \cdot \exp\left(-b \left(\frac{x + \Delta_x}{T_{50x}}\right)^2\right) \cdot (\Lambda_x + c) \cdot \exp\left(-d \left(\frac{z + \Delta_z}{T_{50z}}\right)^2\right) \cdot (\Lambda_z + e) \quad (1)$$

$$y_k = \sum_{n=-1}^1 a_{0,k-n} h(0, n) + \sum_{n=0}^1 a_{1,k-n} h\left(1, n - \frac{1}{2}\right) + \sum_{n=0}^1 a_{-1,k-n} h\left(-1, n - \frac{1}{2}\right) \quad (2)$$

ต้องการทำให้ได้ลำดับข้อมูล z_k หลังจากนั้น z_k จะถูกส่งไปยังวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) [5] เพื่อทำการหาลำดับข้อมูลลินพุต $a_{0,k}$ ที่ควรจะเป็นมากที่สุด

3. การออกแบบทาร์เก็ตและอ็ควอลไซเซอร์

บทความนี้จะเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบเมื่อใช้ทาร์เก็ตหนึ่งมิติ, ทาร์เก็ตสองมิติแบบที่มีมุมเท่ากับศูนย์, ทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร, และทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตร ซึ่งในหัวข้อนี้จะอธิบายการออกแบบอ็ควอลไซเซอร์และทาร์เก็ตแบบต่างๆ บนหลักการของข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยสุด (MMSE: minimum mean-squared error) [6] ดังนี้

3.1 การออกแบบทาร์เก็ตหนึ่งมิติ

จากรูปที่ 2 เมื่อ e_k คือผลต่างระหว่างเอาต์พุตของวงจรอ็ควอลไซเซอร์และเอาต์พุตของทาร์เก็ต ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$e_k = z_k - d_k = (y_k * f_k) - (a_{j,k} \otimes g_{j,k}) \quad (3)$$

เมื่อ $*$ คือตัวดำเนินการคอนโวลูชันหนึ่งมิติ (1-D convolution operator), \otimes คือตัวดำเนินการคอนโวลูชันสองมิติ, และ $g_{j,k}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ต โดยทาร์เก็ตสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้คือ

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{-1,0} & g_{-1,1} & g_{-1,2} \\ g_{0,0} & g_{0,1} & g_{0,2} \\ g_{1,0} & g_{1,1} & g_{1,2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

สำหรับทาร์เก็ตหนึ่งมิติจะพิจารณาเฉพาะ $g_{0,k}$ เท่านั้น ถ้ากำหนดให้ $\mathbf{f} = [f_{-K} \dots 0 \dots f_K]^T$ คือเวกเตอร์แนวตั้งของอ็ควอลไซเซอร์ และ $\mathbf{g} = [g_{0,0} \ g_{0,1} \ g_{0,2}]^T$ คือเวกเตอร์แนวตั้งของทาร์เก็ต เมื่อ $K = 2N + 1$ คือจำนวนแท็ป (tap) ของอ็ควอลไซเซอร์, L คือจำนวนแท็ปของทาร์เก็ต ($L = 3$ สำหรับทาร์เก็ตหนึ่งมิติ), และ $[\]^T$ คือตัวดำเนินการเมทริกซ์ทรานสโพส ดังนั้นข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE: mean-squared error) เขียนได้ดังนี้

$$E[e_k^2] = E[(z_k - d_k)^2] \quad (5)$$

$$= E[(\mathbf{f}^T \mathbf{y}_k - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k)(\mathbf{f}^T \mathbf{y}_k - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k)^T] \quad (6)$$

เมื่อ $E[\]$ คือตัวดำเนินการความคาดหมาย (expectation operator) โดยกระบวนการทำให้ค่า MSE น้อยสุดจะใช้เงื่อนไขบังคับแบบโมนิกเพื่อหลีกเลี่ยงผลลัพธ์ที่จะได้ $\mathbf{f} = \mathbf{0}$ และ $\mathbf{g} = \mathbf{0}$ โดยสมการ (6) จัดรูปได้เป็น

$$E[e_k^2] = \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{T} \mathbf{g} - 2\lambda (\mathbf{I}^T \mathbf{g} - 1) \quad (7)$$

เมื่อ λ คือตัวคูณลากรางจ์ (Lagrange multiplier), $\mathbf{I} = [0 \ 1 \ 0]^T$, $\mathbf{R} = E[\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T]$ คือค่าอัตโนมัติสหสัมพันธ์ (auto-correlation) ของ \mathbf{y}_k ที่มีขนาดเท่ากับ $N \times N$, และ $\mathbf{A} = E[\mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^T]$ คือค่าอัตโนมัติสหสัมพันธ์ของ \mathbf{a}_k

ที่มีขนาดเท่ากับ $L \times L$, และ $\mathbf{T} = E[\mathbf{y}_k \mathbf{a}_k^T]$ คือสหสัมพันธ์ข้าม (cross-correlation) ระหว่าง \mathbf{y}_k และ \mathbf{a}_k ที่มีขนาดเท่ากับ $N \times L$, เมื่อ $\mathbf{a}_k = [a_{0,k} \ a_{0,k-1} \ a_{0,k-2}]^T$ และ $\mathbf{y}_k = [y_{k+K} \dots y_k \dots y_{k-K}]^T$ จากนั้นทำการหาอนุพันธ์ของสมการ (7) เทียบกับ λ , \mathbf{f} และ \mathbf{g} และให้ผลลัพธ์ของแต่ละสมการเท่ากับค่าศูนย์ก็จะได้

$$\lambda = \frac{1}{\mathbf{I}^T (\mathbf{A} - \mathbf{T}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T}) \mathbf{I}} \quad (8)$$

$$\mathbf{g} = \lambda (\mathbf{A} - \mathbf{T}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{g} \quad (10)$$

3.2 การออกแบบทาร์เก็ตสองมิติแบบที่มีมุมเท่ากับศูนย์

การออกแบบทาร์เก็ตสองมิติแบบที่มีมุมเท่ากับศูนย์จะกำหนดให้ $g_{-1,0}$ $g_{-1,2}$ $g_{1,0}$ และ $g_{1,2}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยทั่วไปแล้วการออกแบบของทาร์เก็ตนี้จะมีวิธีการที่เหมือนกับที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.1 โดยเปลี่ยนเฉพาะเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $\mathbf{a}_k = [a_{0,k} \ a_{-1,k-1} \ a_{0,k-1} \ a_{1,k-1} \ a_{0,k-2}]^T$,

$\mathbf{g} = [g_{0,0} \ g_{-1,1} \ g_{0,1} \ g_{1,1} \ g_{0,2}]^T$, และ $\mathbf{I} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ โดยให้ $L = 5$

3.3 ทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร

จากสมการ (4) ในการออกแบบจะบังคับให้ $g_{-1,0} = g_{1,0}$ $g_{-1,1} = g_{1,1}$ และ $g_{-1,2} = g_{1,2}$ และใช้วิธีการออกแบบตามในหัวข้อที่ 3.1 โดยทำการเปลี่ยนค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $\mathbf{a}_k = [(a_{-1,k} + a_{1,k}) \ a_{0,k} \ (a_{-1,k-1} + a_{1,k-1}) \ a_{0,k-1} \ (a_{-1,k-2} + a_{1,k-2}) \ a_{0,k-2}]^T$, $\mathbf{g} = [g_{-1,0} \ g_{0,0} \ g_{-1,1} \ g_{0,1} \ g_{-1,2} \ g_{0,2}]^T$, และ $\mathbf{I} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$

3.4 ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตร

การออกแบบทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตร ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตแต่ละตัวจะเป็นอิสระจากกันโดยไม่มีเงื่อนไขมาบังคับ ดังนั้นการออกแบบจะใช้วิธีการออกแบบตามในหัวข้อที่ 3.1 โดยแทนค่าเวกเตอร์ต่างๆ ดังนี้ $\mathbf{a}_k = [a_{-1,k} \ a_{0,k} \ a_{1,k} \ a_{-1,k-1} \ a_{0,k-1} \ a_{1,k-1} \ a_{-1,k-2} \ a_{0,k-2} \ a_{1,k-2}]^T$, $\mathbf{g} = [g_{-1,0} \ g_{0,0} \ g_{1,0} \ g_{-1,1} \ g_{0,1} \ g_{1,1} \ g_{-1,2} \ g_{0,2} \ g_{1,2}]^T$, และ $\mathbf{I} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$

4. ผลของการทำแบบจำลอง

พิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณในรูปที่ 2 เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) คือ $\text{SNR} = 20 \log_{10}(1/\sigma)$ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB: decibel) โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของทาร์เก็ตแต่ละแบบจะใช้อ็ควอลไซเซอร์จำนวน 15 แท็ป การออกแบบทาร์เก็ตและอ็ควอลไซเซอร์จะออกแบบ ณ SNR ที่ทำให้เกิดอัตราข้อผิดพลาดบิต BER $\approx 10^{-4}$ และออกแบบเมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสี่อันดับกิกและ TMR

สำหรับการจำลองระบบจะใช้ข้อมูลจำนวน 10000 เซ็กเตอร์ในการคำนวณข้อมูลแต่ละ SNR (1 เซ็กเตอร์เท่ากับ 4096 บิต) และใช้ความจุเชิงพื้นที่เท่ากับ 4 Tbit/in^2 ดังนั้นเมทริกซ์ของผลตอบสองช่องสัญญาณ BPMR ที่ได้จากการชักตัวอย่างสมการ (1) มีค่าเท่ากับ [3]

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.123 & 0.123 \\ 0.043 & 0.994 & 0.043 \\ 0.123 & 0.123 \end{bmatrix} \quad (11)$$

จากรูปที่ 3 แสดงผลของการเปรียบเทียบสมรรถนะในรูปแบบของอัตราข้อผิดพลาดของบิตกับ SNR ของแต่ละระบบเมื่อไม่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสลับบิตและ TMR โดยที่ "1D target" คือระบบที่ใช้ทาร์เก็ตหนึ่งมิติ, "Zero-corner 2D target" คือระบบที่ใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบที่มีมุมเท่ากับศูนย์, "Symmetric 2D target" คือระบบที่ใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร, และ "Asymmetric 2D target" คือระบบที่ใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตร จากผลการทดลองพบว่าการใช้ทาร์เก็ตสองมิติจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าทาร์เก็ตแบบหนึ่งมิติ โดยทาร์เก็ตสองมิติทั้ง 3 แบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน เพราะระบบ BPMR แบบ staggered มีความรุนแรงของ ITI ต่ำกว่าแบบกริดมุมฉาก

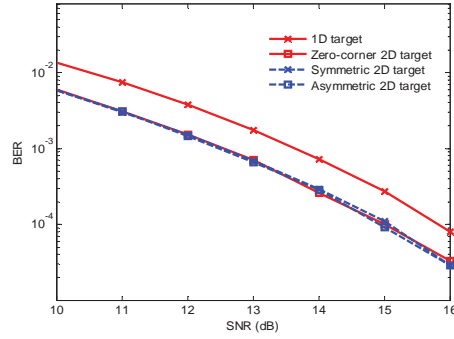
รูปที่ 4 แสดงสมรรถนะของระบบในรูปแบบของความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสลับบิตต่างๆ กับ SNR ที่ทำให้ได้ $\text{BER} \approx 10^{-4}$ จากผลการทดลองพบว่าทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรทนทานต่อสัญญาณรบกวนสลับบิตมากกว่าทาร์เก็ตแบบอื่น ตามด้วยทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร ทาร์เก็ตสองมิติที่มีมุมเท่ากับศูนย์ และทาร์เก็ตหนึ่งมิติ ตามลำดับ สมรรถนะของระบบเมื่อมีผลกระทบจาก TMR ถูกแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าสมรรถนะของทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตแต่ละตัวไม่มีเงื่อนไขบังคับ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตสามารถเปลี่ยนไปตามความรุนแรง TMR ของช่องสัญญาณได้

5. สรุป

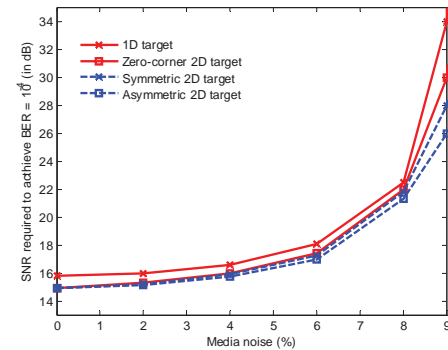
BPMR เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้อย่างมาก บทความนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ทาร์เก็ตสองมิติกับระบบ BPMR แบบ staggered ซึ่งจากการทดลองพบว่าทาร์เก็ตสองมิติมีสมรรถนะที่ดีกว่าทาร์เก็ตหนึ่งมิติ และทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรทนทานต่อสัญญาณรบกวนสลับบิตและ TMR อย่างไรก็ตามวงจรตรวจหาข้อผิดพลาดเมื่อใช้กับทาร์เก็ตแบบต่างๆ จะมีความซับซ้อนไม่เท่ากัน โดยวงจรตรวจหาข้อผิดพลาดที่ใช้กับทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตรจะมีความซับซ้อนสูงสุด ตามด้วยทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร ทาร์เก็ตสองมิติแบบที่มีมุมเท่ากับศูนย์ และทาร์เก็ตหนึ่งมิติ ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

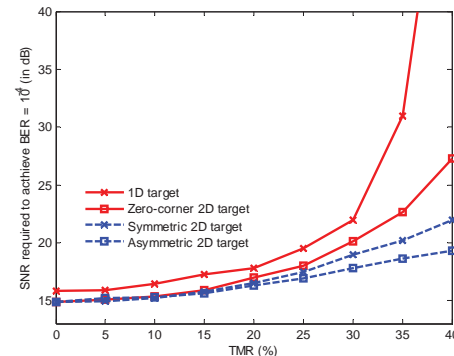
งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม หมายเลขทุน GB-58-03



รูปที่ 3 สมรรถนะของทาร์เก็ตแบบต่างๆ ในรูปแบบของอัตราข้อผิดพลาดของบิตกับ SNR



รูปที่ 4 สมรรถนะของทาร์เก็ตแบบต่างๆ ณ ความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสลับบิตต่างๆ



รูปที่ 5 สมรรถนะของทาร์เก็ตแบบต่างๆ ณ ความรุนแรงของ TMR ต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nabavi, "Signal processing for bit-patterned media channel with intertrack interference," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comp. Sci., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2008.
- [2] Y. Shiroishi, et al., "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816-3822, Oct. 2009.
- [3] Y. Ng, et al., "Channel modeling and equalizer design for staggered islands bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 6, pp. 1976 - 1983, Jun. 2012.
- [4] S. Koonkarnkhai, P. Keeratwintakorn, and P. Kovintavewat, "Target and equalizer design for high-density bit-patterned media recording," *ECTI Trans. CIT.*, vol.6, no. 2, pp. 175 - 182, Nov. 2012 .
- [5] G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-18, no. 3, pp. 363-378, May 1972.
- [6] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 2, pp. 1083-1088, Mar. 1995.