

อิทธิพลของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกต่อการเข้ารหัสมอดูเลชันแบบสองมิติ สำหรับระบบ BPMP ที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้อง

Influence of Media Noise to 2D Modulation Code for Staggered BPMP Systems

กนกเรขา บัวหึง^{1*} วิภารัตน์ บุษยาตรี¹ ชานนท์ วริสาร¹
สันติ กุลการชาย² และปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์²

¹วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*58609013@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (AD: areal density) ของระบบการบันทึกแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMP: bit-patterned media recording) สามารถทำได้โดยการลดระยะบิต (bit period) และระยะแทร็ก (track pitch) การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่จะส่งผลให้การแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI: inter-track interference) มีความรุนแรงขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง ITI สามารถจัดการได้ด้วยรหัสมอดูเลชัน (modulation code) และนอกจากนี้ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) ก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในระบบ BPMP ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของการเข้ารหัสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 5/6 เมื่อระบบ BPMP มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก โดยใช้ระบบ BPMP ที่มีสื่อบันทึกแบบเยื้อง (staggered media) จากผลของการทำแบบจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการเข้ารหัสมอดูเลชันที่นำเสนอให้ผลที่ดีกว่าแบบปกติ และระบบที่เข้ารหัสมอดูเลชันยังทนทานต่อความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

คำสำคัญ: การบันทึกแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย การเข้ารหัสมอดูเลชันแบบ 2 มิติ สัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

Abstract

To increase the areal density (AD) in bit-patterned media recording (BPMP) system, the track pitch and bit period must be reduced. Unfortunately, it provides an unpleasant appearance of inter-track interference (ITI) that very much affect to BPMP system. In addition, the media noise is also unavoidable effect in BPMP system. However, these effects may be mitigated by using the modulation code. In this paper; therefore, we study the effect of media noise to rate-5/6 two-dimensional (2D) modulation code in staggered island BPMP system. Simulation results indicate that the proposed coding scheme provides the better performance gain than the conventional system. Moreover, the proposed system can also endure to the influence of media noise.

Keywords: bit-patterned media recording, 2d modulation code, media noise

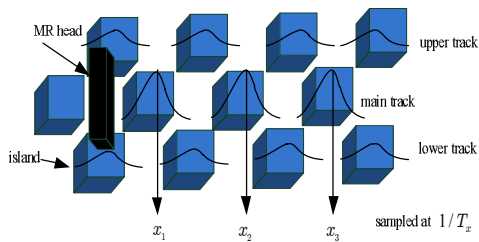
1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้ใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (PMR: perpendicular magnetic recording) ซึ่งมีค่า AD สูงสุดประมาณ 1Tb/in^2 (เทระบิตต่อตารางนิ้ว) และเทคโนโลยี PMR กำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนตริก (superparamagnetic limit) [1, 2] จึงทำให้ไม่สามารถเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ได้ ดังนั้นเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMR: bit-patterned media recording) จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่จะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยี PMR จากทั้งหมด 4 เทคโนโลยี [3] คือ เทคโนโลยีบิตแพทเทิร์นมีเดีย (BPMR), เทคโนโลยีการบันทึกแบบสองมิติ (TDMR: two-dimensional magnetic recording), เทคโนโลยีการบันทึกแบบความร้อนเข้าช่วย (HAMR: heat-assisted magnetic recording) และเทคโนโลยีการบันทึกแบบแม่เหล็กเข้าช่วย (MAMR: microwave-assisted magnetic recording)

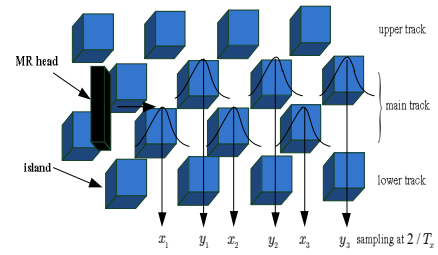
เทคโนโลยี BPMR เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ได้จริงและกำลังได้รับความสนใจจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและนักวิจัยจำนวนมาก [5, 6] เพราะสามารถเพิ่มค่า AD ได้สูงสุดถึง 4Tb/in^2 และเมื่อนำเทคโนโลยี BPMR มาใช้ร่วมกับเทคโนโลยี HAMR จะสามารถค่า AD ได้สูงถึง 10Tb/in^2 [4] ซึ่งจะเรียกเทคโนโลยีนี้ว่าการบันทึกแบบจุด (HDMR: heated dot magnetic recording) สำหรับการบันทึกในระบบ BPMR จะทำการบันทึกข้อมูลหนึ่งบิตลงบนไอแลนด์ (island) หรือเกาะข้อมูล โดยหนึ่งไอแลนด์จะใช้เกรน (grain) แม่เหล็กอย่างน้อยหนึ่งเกรนขึ้นไป ซึ่งแต่ละเกรนจะถูกแยกด้วยวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) โดยที่ผลกระทบหลักๆ ในระบบ BPMR [2, 7] คือการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI: inter-track interference) สัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) แทร็กมิสเรจิสเทรชัน (TMR: track mis-registration) และข้อผิดพลาดจากการเข้าจังหวะการเขียนเป็นต้น สำหรับความรุนแรงของ ITI จะขึ้นอยู่กับค่า AD กล่าวคือถ้าค่า AD เพิ่มขึ้น ITI ก็จะรุนแรงขึ้นตามไปด้วย และผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกเกิดขึ้นจากความผันผวนของตำแหน่งของแต่ละไอแลนด์ (location fluctuation) และความผันผวนของขนาดแต่ละไอแลนด์ (size fluctuation) เป็นหลัก ระบบ BPMR สามารถแบ่งรูปแบบของสื่อบันทึกเป็นสองประเภทคือสื่อบันทึกแบบกริดมุมฉากและสื่อบันทึกแบบเยื้อง (staggered media) เป็นที่ทราบกันดีว่าที่ความจุเชิงพื้นที่เท่ากันระบบที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้องที่แสดงในภาพที่ 1 (ข) สามารถลดผลกระทบจาก ITI ได้ดีกว่าระบบที่ใช้สื่อบันทึกแบบกริดมุมฉากที่แสดงในภาพที่ 1 (อ) ดังนั้นในบทความนี้มุ่งเน้นไปที่ระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้องเป็นหลัก

สำหรับการลดผลกระทบจาก Nabavi [2, 8] ได้ทำการออกแบบทาร์เก็ตแบบ 1 มิติ และอีควอไลเซอร์แบบ 2 มิติ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจาก ITI ได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้ได้กับวงจรตรวจหาแบบ 1 มิติ ซึ่งเป็นวงจรตรวจหาที่มีความซับซ้อนต่ำ อย่างไรก็ตามระบบนี้ต้องใช้หัวอ่านจำนวน 3 หัวอ่าน (multi-read head) ซึ่งยังสร้างและนำมาใช้งานจริงได้ยาก หรืออาจจะใช้หัวอ่านเดี่ยวแต่อ่านข้อมูลสามแทร็กแล้วนำมาเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ (buffer) ซึ่งก็จะส่งผลให้บัฟเฟอร์ที่ใช้ต้องมีหน่วยความจำค่อนข้างสูง เพราะปัจจุบันการจัดเก็บข้อมูลหนึ่งเซกเตอร์ (sector) จะใช้ข้อมูลจำนวน 4 KB (กิโลไบต์) ซึ่งหลักการนี้ถือมีประโยชน์อย่างมากเนื่องจากหัวอ่านในแต่ละหัวอ่านสามารถนำมาแลกเปลี่ยนเพื่อลดผลกระทบจาก ITI และส่งผลให้ระบบมวลผลสัญญาณที่ภาครับตีสมรรถนะที่ดีขึ้น [9] สำหรับ Arrayangkool และคณะ [10] ได้นำเสนอเทคนิคการลดผลกระทบจาก ITI โดยการจัดรูปแบบบิตก่อนบันทึกสำหรับระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบกริดมุมฉาก นอกจากนี้ Koonkarnkhai และคณะ [11] ได้ทำการออกแบบทาร์เก็ตแบบต่างๆ กับอีควอไลเซอร์หนึ่งมิติแบบ $T/2$ สำหรับระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบกริดมุมฉาก สำหรับ [12] ได้นำเสนอการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้น 5/6 เพื่อลดผลกระทบจาก ITI โดยใช้เทคนิคการอ่านหลายแทร็ก (MRT: multi-track reading technique) สำหรับระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้อง แต่อย่างไรก็ตามใน [12] ไม่ได้กล่าวถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นที่มีอัตรารหัส 5/6 เมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกที่มีต่อระบบ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้อง เมื่อระบบมีการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นเพื่อหลีกเลี่ยงรูปแบบข้อมูลบางรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลกระทบจาก ITI ที่รุนแรง โดยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายถึงแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR ที่ใช้สื่อบันทึกแบบเยื้อง สำหรับการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นจะอธิบายในหัวข้อที่ 3 และในหัวข้อที่ 4 จะเป็นการแสดงผลของการทำแบบจำลอง และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นบทสรุปของบทความนี้

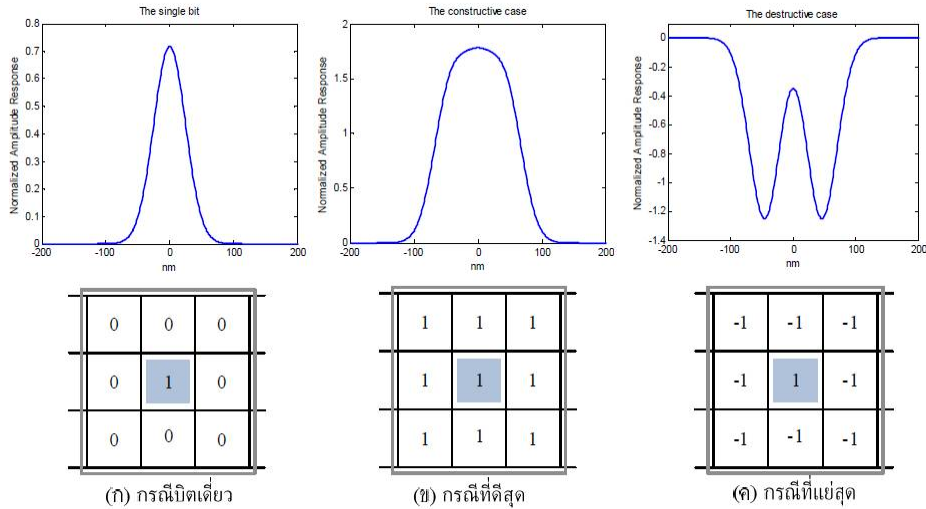


(ก) การอ่านข้อมูลแบบทั่วไป



(ข) การอ่านข้อมูลแบบสองแทร็ก

ภาพที่ 1 เทคนิคการอ่านข้อมูลของระบบ BPMR



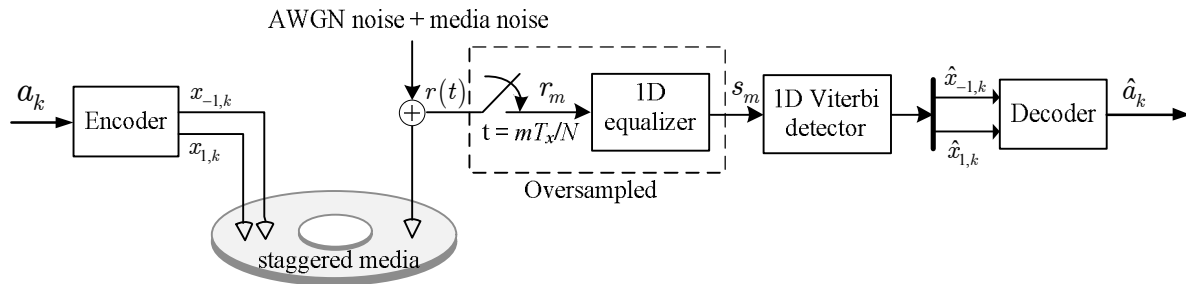
ภาพที่ 2 สัญญาณอ่านกลับในแต่ละกรณี (ก) กรณีบิตเดี่ยว, (ข) กรณีที่ดีที่สุด และ (ค) กรณีที่แย่มาก

2. แบบจำลองช่องสัญญาณ

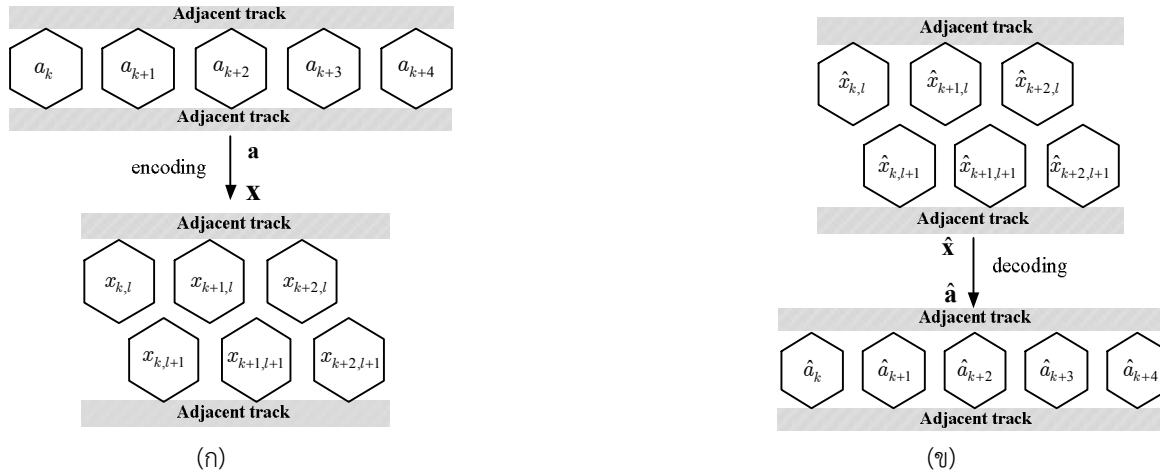
โดยทั่วไปผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติสามารถเป็นไปได้ทั้งแบบส่งเสริม (constructive) และแบบลดทอน (destructive) แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งทั้งสองกรณีสามารถตรวจสอบได้โดยการสังเกตจากรูปแบบสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) เทียบกับบิตข้อมูลเดี่ยวที่ถูกบันทึก ในกรณีที่เกิดการแทรกสอดสองมิติแบบส่งเสริมนั้นค่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณอ่านกลับของบิตกลาง (center bit) จะมีระดับที่เพิ่มสูงขึ้น (มากกว่าในกรณีที่บิตข้อมูลเดี่ยว) เช่น ในกรณีที่บิตข้อมูล “1” ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล “1” ซึ่งกรณีนี้ถือได้ว่าเป็นกรณีที่ดีที่สุด (best case) ในขณะเดียวกันถ้าบิตข้อมูล “1” ถูกล้อมรอบด้วยบิต “-1” จะพบว่าค่าแอมพลิจูดของบิตกลางจะลดต่ำลง โดยจะเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอนซึ่งเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยง

ดังนั้นในอนาคตจะใช้รหัสสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 5/6 ร่วมกันด้วยเทคนิคการอ่านหลายแทร็ก (MRT: multi-track reading technique) [13] ที่แสดงในภาพที่ 1 (ข) เพื่อลดผลกระทบจาก ITI ในที่นี้เทคนิค MRT โดยจะใช้หัวอ่านจำนวนหนึ่งหัวเพื่ออ่านข้อมูลสองแทร็กพร้อมกัน

พิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR ในภาพที่ 3 เริ่มต้นจากลำดับข้อมูลอินพุต $a_k \in \{\pm 1\}$ ถูกส่งเข้าไปยังวงจรเข้ารหัสสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 5/6 และจะทำการแยกลำดับข้อมูลบิตคู่ $\{x_{-1,k}\}$ และบิตคี่ $\{x_{1,k}\}$ เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลลงบนสื่อบันทึกแทร็กบนและแทร็กล่างตามลำดับ ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับ $r(t)$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ภาพที่ 3 แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR ที่นำเสนอ



ภาพที่ 4 (ก) การเข้ารหัสสมอดูละชั้น ณ อัตรารหัส 5/6 และ (ข) การถอดรหัสสมอดูละชั้น ณ อัตรารหัส 5/6

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_{-1,k} H\left(-\frac{T_z}{2}, t - kT_x\right) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_{1,k} H\left(\frac{T_z}{2}, t - kT_x\right) + n(t) \quad (1)$$

เมื่อ $H(z, x)$ คือผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์สองมิติของช่องสัญญาณ BPMPR [2], $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่มีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังเท่ากับ $N_0/2$

ที่ภาครับ (receiver) สัญญาณอ่านกลับ $r(t)$ จะถูกทำการซีกตัวอย่าง ณ อัตรา $t = mT_x/N$ ซึ่งจะเรียกระบบนี้ว่า “oversampled” ทำให้ได้ลำดับข้อมูล r_m และลำดับข้อมูล r_m จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรวจรอีควอไลเซอร์แบบ T/N [11] เมื่อ $N = 2$ จะทำให้ได้ลำดับข้อมูล s_m และถูกส่งเข้าไปยังวงจรวจรตรวจหาวิเทอร์บีแบบหนึ่งมิติ เพื่อตรวจหาลำดับข้อมูล $x_{l,k}$ ที่ควรจะเป็นมากที่สุด [14]

3. การเข้ารหัสและการถอดรหัสสมอดูละชั้น

จากภาพที่ 2 พบว่าเมื่อบิตที่บันทึกลงบนสื่อบันทึกแบบเยื้องมีลักษณะตรงกันข้ามกับบิตข้างเคียงจะก่อให้เกิดการลดทอนของแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับรูปแบบการบันทึกดังกล่าวนี้จึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรเกิดขึ้นในการบันทึกข้อมูล เพราะจะก่อให้เกิดการลดทอนของสัญญาณจาก ITI และทำให้สัญญาณอ่านกลับที่ได้ถูกลดทอนตามไปด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เงื่อนไขนี้เพื่อออกแบบรูปแบบข้อมูลที่ใช้ในการบันทึกและไม่ก่อให้เกิดการลดทอนของสัญญาณอ่านกลับ (รูปแบบก่อให้เกิด ITI น้อยที่สุด) โดยใช้ตารางค้นหา (lookup table) ในตารางที่ 1 โดยจะทำการเข้ารหัสข้อมูล 5 บิต ซึ่งมีทั้งหมด 32 รูปแบบ โดย

ตารางที่ 1 การเข้าคู่คำรหัสสมอดูละชั้นที่มีอัตรารหัส 5/6

5-bit input data, a_k^5					\tilde{x}_k	5-bit input data, a_k^5					\tilde{x}_k
a_k	a_{k+1}	a_{k+2}	a_{k+3}	a_{k+4}	codeword	a_k	a_{k+1}	a_{k+2}	a_{k+3}	a_{k+4}	codeword
-1	-1	-1	-1	-1	\mathbf{X}_1	1	-1	-1	-1	-1	\mathbf{X}_{29}
-1	-1	-1	-1	1	\mathbf{X}_9	1	-1	-1	-1	1	\mathbf{X}_6
-1	-1	-1	1	-1	\mathbf{X}_{10}	1	-1	-1	1	-1	\mathbf{X}_{28}
-1	-1	-1	1	1	\mathbf{X}_{18}	1	-1	-1	1	1	\mathbf{X}_{27}
-1	-1	1	-1	-1	\mathbf{X}_2	1	-1	1	-1	-1	\mathbf{X}_{26}
-1	-1	1	-1	1	\mathbf{X}_3	1	-1	1	-1	1	\mathbf{X}_{16}
-1	-1	1	1	-1	\mathbf{X}_{11}	1	-1	1	1	-1	\mathbf{X}_{24}
-1	-1	1	1	1	\mathbf{X}_{19}	1	-1	1	1	1	\mathbf{X}_{14}
-1	1	-1	-1	-1	\mathbf{X}_4	1	1	-1	-1	-1	\mathbf{X}_{22}
-1	1	-1	-1	1	\mathbf{X}_{12}	1	1	-1	-1	1	\mathbf{X}_{30}
-1	1	-1	1	-1	\mathbf{X}_{25}	1	1	-1	1	-1	\mathbf{X}_{31}
-1	1	-1	1	1	\mathbf{X}_{20}	1	1	-1	1	1	\mathbf{X}_7
-1	1	1	-1	-1	\mathbf{X}_{17}	1	1	1	-1	-1	\mathbf{X}_{15}
-1	1	1	-1	1	\mathbf{X}_{13}	1	1	1	-1	1	\mathbf{X}_{23}
-1	1	1	1	-1	\mathbf{X}_5	1	1	1	1	-1	\mathbf{X}_8
-1	1	1	1	1	\mathbf{X}_{21}	1	1	1	1	1	\mathbf{X}_{32}

การเข้าคู่ (mapping) ให้ได้เป็นคำรหัส (codeword) จำนวน 6 บิต ที่มีจำนวนทั้งสิ้น 32 รูปแบบ เพื่อหลีกเลี่ยงรูปแบบบางรูปแบบที่ก่อให้เกิด ITI ที่รุนแรง โดยที่หลักการเข้ารหัสและถอดรหัสสมอดูละชั้นแสดงในภาพที่ 4

สำหรับกระบวนการเข้ารหัสมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ จากภาพที่ 4 (ก) กำหนดให้ลำดับข้อมูลอินพุตจำนวน 5 บิต คือ $[a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, a_{k+3}, a_{k+4}]$ เป็นคำรหัส 6 บิต จะถูกเข้าคู่ตามตารางค้นหาที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ให้เป็น \mathbf{x} ที่มีขนาด 2×3 ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 18 เป็นคำรหัสทั้ง 32 รูปแบบ ที่ใช้สำหรับการบันทึกข้อมูล การจัดเรียงบิตข้อมูลทั้งหมดหลังการเข้ารหัสแสดงในภาพที่ 5

สำหรับการถอดรหัสแสดงในภาพที่ 4 (ข) เอาต์พุตของของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีจะถูกจัดเรียงใหม่ให้ได้เป็น $\hat{\mathbf{x}}$ ที่มีขนาด 2×3 จากนั้นจะทำการหาระยะทางยูคลิด (Euclidean distance) ก่อนนำไปถอดรหัสด้วยตารางค้นหา เพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากลำดับข้อมูลรูปแบบที่ได้จากวงจรตรวจหาวิเทอร์บีอาจจะไม่อยู่ในตารางค้นหาที่แสดงในตารางที่ 1 โดยระยะทางยูคลิดสามารถหาได้จาก [10]

$$d(\mathbf{x}_{j,k}, \hat{\mathbf{x}}_j) = \sqrt{\sum_{i=0}^5 (\mathbf{x}_{i,k} - \hat{\mathbf{x}}_i)^2} \quad (2)$$

เมื่อ \hat{x}_k คือคำรหัสที่ได้จากเอาต์พุตของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีและ $x_{j,k}$ คือคำรหัสลำดับที่ j จากตารางค้นหาในตารางที่ 1 ในการถอดรหัสจะเลือกคำรหัสลำดับที่ j ที่ทำให้ค่า $d(\mathbf{x}_{j,k}, \hat{\mathbf{x}}_j)$ มีค่าต่ำที่สุด

X_1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	X_2 -1 -1 -1 -1 1 -1	X_3 -1 1 1 -1 -1 1	X_4 -1 -1 -1 1 -1 -1	X_5 -1 1 -1 1 1 1	X_6 1 -1 -1 -1 -1 1	X_7 1 -1 1 1 1 1	X_8 1 1 -1 1 1 -1
X_9 -1 -1 -1 -1 -1 1	X_{10} -1 -1 -1 -1 1 1	X_{11} -1 1 -1 -1 1 -1	X_{12} -1 -1 -1 1 -1 1	X_{13} -1 1 1 1 1 -1	X_{14} 1 1 1 -1 1 1	X_{15} 1 1 -1 1 -1 -1	X_{16} 1 1 -1 1 1 1
X_{17} -1 -1 1 -1 -1 -1	X_{18} -1 -1 1 -1 1 1	X_{19} -1 1 1 -1 1 -1	X_{20} -1 -1 1 1 1 1	X_{21} -1 1 1 1 1 1	X_{22} 1 -1 -1 1 -1 -1	X_{23} 1 1 1 1 -1 -1	X_{24} 1 1 1 1 1 -1
X_{25} -1 -1 1 -1 -1 1	X_{26} -1 1 -1 -1 -1 -1	X_{27} -1 1 1 -1 1 1	X_{28} -1 1 -1 1 1 -1	X_{29} 1 -1 -1 -1 -1 -1	X_{30} 1 -1 -1 1 -1 1	X_{31} 1 1 1 1 -1 1	X_{32} 1 1 1 1 1 1

ภาพที่ 5 คาร์รหัสของรหัสสมอดูเลขชั้น ณ อัตรารหัส 5/6

4. ผลการจำลอง

จากภาพที่ 3 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR จะกำหนดให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR: signal-to-noise ratio) คือ [11]

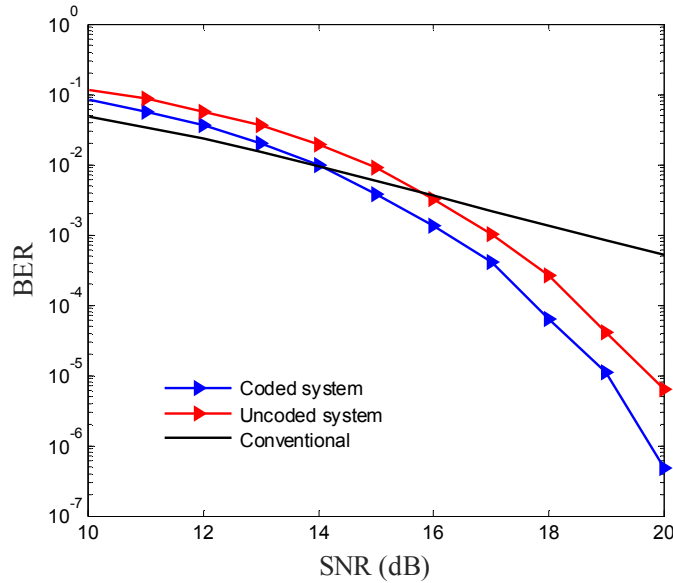
$$\text{SNR} = 10 \log_{10} (1/R\sigma^2) \quad (3)$$

หน่วยเป็นเดซิเบล (dB : deciBel) เมื่อ $R = 5/6$ คืออัตรารหัส (code rate) ของรหัสสมอดูเลขชั้นที่นำเสนอ และในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบต่างๆ จะใช้ความหนาแน่นใช้งาน (UD: user density) เท่ากันคือ 2.5 Tb/in^2 โดยค่า UD สามารถคำนวณได้จาก $UD = AD \times R$ และจะนิยามสมรรถนะของระบบต่างๆ ดังนี้ ระบบที่ใช้การอ่านข้อมูลแบบทั่วไป (ตามที่แสดงในภาพที่ 1 (ก)) จะนิยามว่า “Conventional system”, ระบบที่ใช้เทคนิคการอ่านแบบสองแตร็กตามที่แสดงในภาพที่ 1 (ข) แต่ไม่มีการเข้ารหัส [13] จะนิยามว่า “Uncoded system”, และระบบที่ใช้การเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นที่นำเสนอจะเรียกว่า “Coded system”

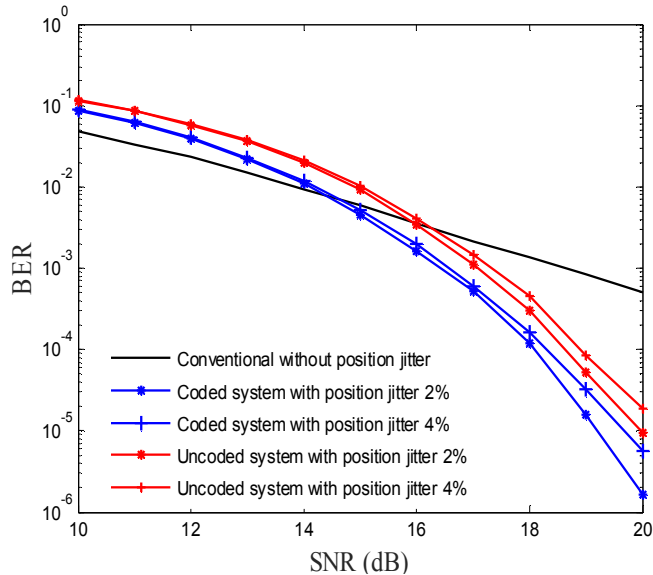
ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่า SNR เมื่อระบบปราศจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก พบว่าระบบที่มีการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นที่นำเสนอให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสและระบบที่ใช้เทคนิคการอ่านแบบทั่วไป เมื่อพิจารณา ณ ความหนาแน่นใช้งานเท่ากัน โดยที่ระบบที่นำเสนอมีสสมรรถนะดีกว่าระบบที่ไม่ได้เข้ารหัสอยู่ประมาณ 0.5 dB ที่ $\text{BER} = 1 \times 10^{-4}$ ทั้งนี้เนื่องจากรหัสที่ออกแบบมาสามารถลดความรุนแรงของ ITI ได้

ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่า SNR เมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก พบว่าระบบที่มีการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นที่นำเสนอยังคงให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสเมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในรูปแบบของค่า BER กับค่าความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกค่าต่างๆ ณ ค่า $\text{SNR} = 18 \text{ dB}$ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระบบมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกที่ระบบที่ใช้การเข้ารหัสสมอดูเลขชั้นที่นำเสนอจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ไม่มีการเข้ารหัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความรุนแรงของสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกเพิ่มขึ้นระบบที่นำเสนอยังคงทนทานต่อสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกดีกว่าระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสสมอดูเลขชั้น



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบแบบต่างๆ ณ $UD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$



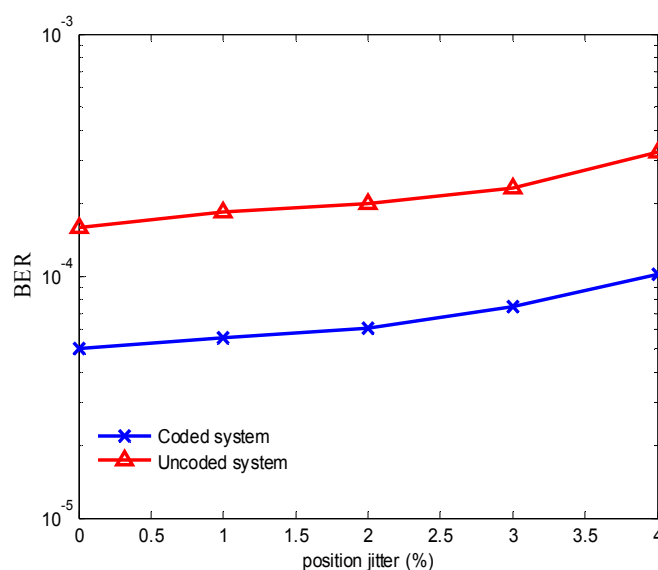
ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบแบบต่างๆ เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวนสีอ่อนบิติก ณ $UD = 2.5 \text{ Tb/in}^2$

5. บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบสัญญาณรบกวนสีอ่อนบิติกที่มีต่อระบบ BPMPR ที่เข้ารหัสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 5/6 โดยใช้เทคนิคการอ่านข้อมูลแบบหลายแทร็ก (MTR) ซึ่งจะใช้เพียงหัวอ่านหนึ่งหัวอ่านในการอ่านข้อมูลสองแทร็กพร้อมกัน จากผลการทำแบบจำลองพบว่า การเข้ารหัสมอดูเลชันสามารถลดผลกระทบจาก ITI ได้ เนื่องจากการเข้ารหัสมอดูเลชันจะทำให้การเข้าสู่ลำดับข้อมูลที่มี ITI รุนแรงให้มี ITI ที่รุนแรงน้อยลง (โดยตัดรูปแบบข้อมูลที่จะก่อให้เกิด ITI รุนแรงทิ้ง) นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่เข้ารหัสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 5/6 ยังทนทานต่อสัญญาณรบกวนสีอ่อนบิติกมากกว่าระบบที่ใช้การอ่านแบบทั่วไป และระบบที่ไม่มีการเข้ารหัส

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบแบบต่างๆ ในรูปแบบของ BER กับความรุนแรงของสัญญาณรบกวนที่ก่อกวน SNR = 18 dB และ UD = 2.5 Tb/in²

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 9, pp. R149 – R177, Apr. 2007.
- [2] S. Nabavi and B. V. K. V. Kumar, "Two-dimensional generalized partial response equalizer for bit-patterned media," in *Proc. Of ICC*, pp. 6249-6254, Jun. 2007.
- [3] Y. Shiroishi, K. Fukuda, et al., "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816 – 3822, Oct. 2009.
- [4] W. Tipcharoen, C. Warisarn, D. Tongsomporn, D. Karns, and P. Kovintavewat, "Investigation of writing error in staggered heated-dot magnetic recording systems," *AIP Advances*, no. 7, pp. 056511-1 – 056511-5, May 2017.
- [5] Seagate clears the air on HAMR vs BPM, Available at: <http://storageeffect.media.seagate.com/2010/10/storage-effect/seagate-clears-the-air-on-hamr-vs-bpm/> Accessed: Apr. 20, 2014.
- [6] HGST Reaches 10-Nanometer Patterned-Bit Milestone, Nanotechnology Process Will Double Today's Disk Drive Data Density, Available at: <http://www.hgst.com/press-room/press-releases/hgst-reaches-10-nanometer-patterned-bit-milestone-nanotechnology> Accessed: Apr. 20, 2014.
- [7] J. Hu, T. M. Duman, E. M. Kurtas, and M. F. Erden, "Bit-patterned media with written-in error: modeling, detection, and theoretical limits," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 8, Aug 2007.
- [8] S. Nabavi, *Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference*, Ph.D thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.
- [9] B. Fan, H. K. Thapar, and P. H. Siegel, "Multihead multitrack detection in shingled magnetic recording with ITI estimation," in *Proc. of ICC 2015*, Jun. 8-15, 2015, London, UK.

- [10] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A recorded-bit patterning scheme with accumulated weight decision for bit-patterned media recording," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E96-C, no. 12, pp. 1490-1496, Dec. 2013.
- [11] S. Koonkarnkhai, P. Kovintavewat, and P. Keeratiwintakorn, "Study of fractionally-spaced equalizers for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 51, no. 11, Nov. 2015, p.3001604.
- [12] K. Buahing, W. Busyatras, C. Warisarn, S. Koonkarnkhai and P. Kovintavewat, "2D modulation code together with multi-track recording technique in staggered BPMP systems," in *Proc. The 32nd ITC-CSCC 2017*, Busan, Korea, Jul. 2-5, 2017.
- [13] C. Buajong and C. Warisarn, "Multitrack reading scheme with single reader in BPMP systems," in *Proc. of IEECON 2017*, pp. 457-460, Pattaya, Thailand, Mar. 8-10, 2017.
- [14] G. D. Forney, "Maximum-likelihood sequence estimate of digital sequences in the presence of intersymbol interference," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. IT-18, no. 3, pp. 363 – 378, May 1972.