

การลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติด้วยการเข้ารหัสแบบหมุนวน

TWO DIMENSIONAL (2D) INTERFERENCE REDUCTION
WITH ROTATION BASED CODING SCHEME



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบและข้อมูล

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-DS-M-001-06

การลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติด้วยการเข้ารหัสแบบหมุนวน

TWO DIMENSIONAL (2D) INTERFERENCE REDUCTION
WITH ROTATION BASED CODING SCHEME



T147126



ชิตวร บุญล้อม
CHITAWORN BOONLORM

b. 12821994
i.

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 147126
วันเดือนปี 3 0.8. 2560

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบและข้อมูล
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-DS-M-001-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TWO DIMENSIONAL (2D) INTERFERENCE REDUCTION
WITH ROTATION BASED CODING SCHEME



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF INFORMATION AND SYSTEM ENGINEERING
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-DS-M-001-06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015



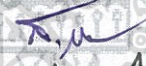



COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

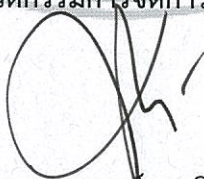
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติด้วยการเข้ารหัสแบบหมุนวน
Thesis Title TWO DIMENSIONAL (2D) INTERFERENCE REDUCTION WITH ROTATION BASED CODING SCHEME
นักศึกษา นายชิตวร บุญล้อม
รหัสประจำตัว 56609005
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบและข้อมูล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อรรถสิทธิ์ อารยางกูร
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-DS-M-001-06

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ	
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพร ทองศรี	
ดร.อรรถสิทธิ์ อารยางกูร	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วริสาร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 ธันวาคม 2558 เวลา 11.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง)
คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

วันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติด้วยการเข้ารหัสแบบหมุนวน
ชื่อนักศึกษา	นายชิตวร บุญล้อม
รหัสประจำตัว	56609005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบและข้อมูล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.อรรถสิทธิ์ อารยางกูร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วรรณสาร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการศึกษาปัจจัยและวิธีการที่สำคัญที่ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น เพื่อให้ข้อมูลจากกระบวนการอ่านกลับมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าขนาดของเกาะข้อมูล บิตแอสเปคเรโซ (Bit-Aspect Ratio: BAR) ในการบันทึกข้อมูลที่มีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลเยื้อง (Staggered island bit pattern media recording: S-BPMR) มีผลต่อแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับ และช่วยลดอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) ลงได้ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเสนอการพัฒนาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึก ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับได้โดยพิจารณาจากการคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulated weight calculation) ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอจะให้ค่าสมรรถนะในด้านอัตราบิตผิดพลาดใกล้เคียงกับวิธีการที่มีอยู่เดิมอย่าง S-RBP แต่วิธีการที่นำเสนอใช้เวลาในการประมวลผลและมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าถึง 155 เท่า

Thesis	Two dimensional (2D) interference reduction with rotation based coding scheme
Student	Mr.Chitaworn Boonlorm
Student ID.	56609005
Degree	Master of Engineering
Program	Information and System Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Dr.Autthasith Arrayangkool
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Dr.Chanon Warisarn

ABSTRACT

This thesis presents factors affecting the quality of read back signals and how to improve the amplitude of the read back signal in order to improve correctness of read back data. We found that the bit-island size and the bit aspect ratio (BAR) are the essential factors to improve the signal strength and bit error rate (BER) performance in staggered island bit pattern media recording system (S-BPMR). Moreover, this thesis proposes new methodology to rearrange the data patterns before recording by rotation technique. The statistical results show that the proposed methodology can improve the overall read back signal amplitude by the accumulated weight calculation technique. As a result, the BER performance of the proposed method is approximately equal to that of S-RBP. However, the proposed methodology takes less processing time than S-RBP by about 155 times.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาความตั้งใจและความทุ่มเทจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อรรถสิทธิ์ อารยางกูร และ ผศ.ดร.ชานนท์ วริสาร ที่ให้ความเมตตาช่วยเหลือให้ความรู้และคำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนหลักการที่ถูกต้องทางด้านวิชาการที่มาจากประสบการณ์ของทั้งสองท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลทุกท่านที่เมตตาให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าให้ได้มีโอกาสเข้ามาศึกษาในวิทยาลัยแห่งนี้ และได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าอย่างไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อย ขอขอบคุณ รศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ อาจารย์และ น้องๆ ใน SP-DSRU ตลอดจน น้องๆ ทุกท่านในวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และมิตรภาพที่ข้าพเจ้ามีอาจลืมเลือน ขอขอบคุณสถานีวิทย์โทรทัศนกองทัพบก ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและเวลาในการศึกษาของข้าพเจ้า ตลอดจน ผู้บังคับบัญชา เพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่สนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณพระราชพุทธิมณี (ม.ล.ควิปด ปิโยโรจโน) ผู้ช่วยเจ้าอาวาส วัดบวรนิเวศวิหาร ที่เมตตา คอยชี้แนะแนวทางดำเนินชีวิตแก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมารดาผู้เป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ที่เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาจนเติบโต ให้ความรัก ความอบอุ่น ความเอาใจใส่ และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับมารดาของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นที่เคารพรักยิ่ง ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชิตวร บุญล้อม

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานในการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 การบันทึกข้อมูลแบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย	5
2.2 การบันทึกข้อมูลแบบบิตแพทเทิร์นมีเดียแบบจัดบิตข้อมูลเยื้อง	12
2.3 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก	17
2.4 สรุปทฤษฎีและหลักการ.....	20
บทที่ 3 การแทรกสอดสองมิติและแนวทางการลดผลกระทบ.....	21
3.1 การแทรกสอดสองมิติ	21
3.2 แนวทางในการแก้ไขปัญหาการแทรกสอดสองมิติ	24
3.2.1 การออกแบบอีควอไลเซอร์แบบสองมิติ	24
3.2.2 การออกแบบวงจรตรวจหาแบบสองมิติ.....	29
3.2.3 การออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลแบบทั่วไป	32
3.3 วิธีการจัดรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึก	37
3.3.1 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก	37
3.3.2 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกหลายแทร็ก	41
3.3.3 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดบิตข้อมูล แบบเยื้อง	45
3.4 สรุปปัญหาและแนวทางแก้ไข	49

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 การออกแบบรหัสสองมิติสำหรับบิตแพตเทิร์นมีเดียแบบเยื้อง.....	50
4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ	51
4.1.1 การเพิ่มขนาดของบิตข้อมูล.....	51
4.1.2 การเพิ่มอัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลกับระยะห่างระหว่าง แทร็กข้อมูล	52
4.2 การเข้ารหัสรูปแบบข้อมูลสองมิติที่นำเสนอ	54
4.3 ผลการจำลองระบบ	66
4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	68
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
เอกสารอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก ก.....	76
ประวัติผู้เขียน	85



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 รูปแบบข้อมูลแบบลดทอน	19
ตารางที่ 3.1 รูปแบบข้อมูลแบบลดทอน	40
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าน้ำหนัก	44
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างค่าน้ำหนักของวิธีการ S-RBP โดยผลตอบสนองของหัวอ่านในสื่อบันทึกบิต แพตเทิร์นมีเดีย ที่มีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลเยื้อง.....	49
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับในสื่อบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดีย และเทียบความต่างของค่าน้ำหนักของวิธีการที่นำเสนอ.....	59
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบ accumulated weight และคาบเวลาที่ใช้	67
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบความซับซ้อนและหน่วยความจำเพิ่มการใช้	69



สารบัญรูป

หน้าที่

รูปที่ 2.1	โครงสร้างของสื่อบันทึกข้อมูลของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.3	ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของกลุ่มแม่เหล็ก	8
รูปที่ 2.4	ช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองสองมิติ แบบบิตแพทเทิร์นมีเดีย	12
รูปที่ 2.5	บิตข้อมูล ที่ก่อให้เกิด ISI และ ITI เมื่อ $N = 2$	14
รูปที่ 2.6	อัตราส่วนของบิตและความกว้างของแตรีกที่มีความแตกต่างกันที่ 4 Tb/in^2	15
รูปที่ 2.7	แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพทเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม RBP	17
รูปที่ 2.8	วิธีการ RBP	19
รูปที่ 3.1	การแทรกสอด 2 มิติ	21
รูปที่ 3.2	รูปแบบสัญญาณอ่านกลับที่มีโอเวอร์ชูตที่ไม่มี SUL	22
รูปที่ 3.3	รูปแบบสัญญาณอ่านกลับที่ไม่มีโอเวอร์ชูตที่มี SUL	23
รูปที่ 3.4	รูปแบบสัญญาณอ่านกลับแบบจำลองสื่อบันทึกแบบไม่ต่อเนื่อง	24
รูปที่ 3.5	แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์สองมิติ	24
รูปที่ 3.6	แบบจำลองช่องสัญญาณแบบสมมูล	29
รูปที่ 3.7	คำอธิบายแผนภาพเทรลลิส	30
รูปที่ 3.8	แผนภาพเทรลลิสของช่องสัญญาณ PR4 $H(D) = 1 - D^2$	30
รูปที่ 3.9	การเปลี่ยนแปลงสถานะในหนึ่งเส้นทางสาขาของแผนภาพเทรลลิส	31
รูปที่ 3.10	แบบแผนการเข้ารหัสสองมิติที่มีอัตรารหัส 7/9	32
รูปที่ 3.11	แบบแผนการเข้ารหัสสองมิติของ Shao	33
รูปที่ 3.12	คำรหัสของการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัส 4:6	35
รูปที่ 3.13	การศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติ	36
รูปที่ 3.14	แบบจำลองของช่องสัญญาณบิตแพทเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม RBP	37
รูปที่ 3.15	หน้าต่างขนาด 3x3 ของวิธีการ RBP	41
รูปที่ 3.16	แบบจำลองของช่องสัญญาณบิตแพทเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม M-RBP	42
รูปที่ 3.17	หน้าต่างขนาด 3x3 ของวิธีการ M-RBP	43
รูปที่ 3.18	แบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพทเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้องพร้อมอัลกอริทึม S-RBP	46
รูปที่ 3.19	ขอบเขตผลการตอบสนองของหัวอ่านในสื่อบันทึกบิตแพทเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง	47

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4.1	แบบจำลองช่องสัญญาณของวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก ในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง	50
รูปที่ 4.2	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากอัตราบิดผิดพลาด(BER) ของระบบ SRBP เมื่อมีการเพิ่มขนาดของบิตข้อมูล	51
รูปที่ 4.3	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากอัตราบิดผิดพลาด(BER) ของระบบ SRBP เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของระยะห่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแท่ง(BAR)	53
รูปที่ 4.4	การศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติ	54
รูปที่ 4.5	รูปแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง	54
รูปที่ 4.6	หลักการทำงานของวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลด้วยวิธีหมุนวนรูปแบบข้อมูล ก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง	56
รูปที่ 4.7	วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลด้วยวิธีหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนการบันทึก.....	57
รูปที่ 4.8	การหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 1	61
รูปที่ 4.9	การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 1	62
รูปที่ 4.10	การหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2.....	63
รูปที่ 4.11	การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2	64
รูปที่ 4.12	การหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 3.....	65
รูปที่ 4.13	การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 3	65
รูปที่ 4.14	ช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบระบบ	66
รูปที่ 4.15	ผล BER ของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2.....	67
รูปที่ 4.16	ผล BER ของการหมุนวนข้อมูลทั้ง 3 วิธีเมื่อเทียบกับวิธีการ S-RBP.....	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่มีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดของสื่อสังคมออนไลน์ และดิจิทัลมีเดีย ทำให้มีความต้องการพื้นที่จัดเก็บข้อมูลทางดิจิทัลที่สูงขึ้นในปัจจุบัน เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลในสื่อแม่เหล็ก ก็ถูกทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น(Areal density: AD) เพื่อรองรับความต้องการดังกล่าว แต่เมื่อการเพิ่มความหนาแน่นของการจัดเก็บข้อมูลมาถึงข้อจำกัดของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก นั่นคือปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก (super paramagnetic limitation) [1] ทำให้การบันทึกข้อมูลสื่อบันทึกแม่เหล็ก จำเป็นต้องมีการพัฒนารูปแบบของสื่อบันทึกเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้เพิ่มความหนาแน่นของสื่อบันทึกได้ ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึก หรือระบบการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (bit-patterned magnetic recording : BPMP)ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยี ที่คาดว่าจะถูกนำมาใช้สื่อบันทึกข้อมูลยุคต่อไป โดยเทคโนโลยีนี้มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลได้สูงสุดถึง 4 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in^2)หากเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลที่สูงขึ้น จะทำให้ระยะห่างของเกาะข้อมูล (bit island) ยิ่งใกล้กันมากยิ่งขึ้นทั้งในแนวตามแตรีกและแนวขวางแตรีก ส่งผลให้เกิดปัญหาการแทรกสอดสองมิติ (2Dimensioninterference) ซึ่งประกอบด้วย การแทรกสอดระหว่างแตรีก (inter-track interference: ITI) และการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์(inter-symbol interference: ISI) [2-10] โดยการแทรกสอดทั้ง 2 นี้ ส่งผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการลดลงของประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการบันทึกข้อมูล

ผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติโดยทั่วไปเป็นไปได้ทั้งแบบส่งเสริม (constructive case) และแบบลดทอน(destructive case) ซึ่งทั้งสองแบบนี้ สามารถทราบได้จากการตรวจสอบรูปแบบคลื่นสัญญาณอ่านกลับ (read back signal amplitude) โดยเทียบกับบิตข้อมูลที่ทำการบันทึก ในกรณีที่เกิดการแทรกสอดสองมิติที่เป็นแบบส่งเสริม รูปแบบคลื่นสัญญาณอ่านกลับของบิตกลาง (center bit) จะมีแอมพลิจูด (amplitude) ที่สูงกว่ากรณีที่มีการบันทึกเพียงบิตเดียว เช่นกรณีข้อมูลของบิตกลางที่บันทึกคือ “1” ถูกล้อมรอบโดยข้อมูลบิต “1” ซึ่งถือเป็นกรณีที่ดีที่สุดในทางกลับกันเมื่อข้อมูลบิต “1” ล้อมรอบด้วยข้อมูล “-1” จะเป็นกรณีที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอนที่ควรหลีกเลี่ยง

ในการวิจัยก่อนหน้านี มีการนำเสนอวิธีเข้ารหัสสองมิติ[2] ที่มีอัตราหัส 7/9 โดยรหัสสองมิตินี้ ออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดแบบลดทอนด้วยวิธีการแทรกบิตเกินลงไปในตำแหน่งที่ระบุไว้ก่อน ในอาเรย์ 3x3 แต่วิธีนี้จะต้องใช้บิตเกิน (redundant bit) อีกทั้งไม่สามารถแก้ไข

ข้อผิดพลาดได้ จากนั้น Shao และ คณะ [3] ได้นำเสนอวิธีการเข้ารหัสสองมิติแบบใหม่ ซึ่งใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึก ที่สัญญาณอ่านกลับมีโอเวอร์ชูด (Overshoot) ที่มีอัตรารหัส 5/6 ซึ่งเป็นการใช้บิตเกินที่น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเข้ารหัสสองมิติที่นำเสนอก่อนหน้านี้

จากนั้น Autthasith และคณะ[4] ได้มีการนำเสนอระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบของสื่อบันทึกที่สัญญาณอ่านกลับปราศจากโอเวอร์ชูด พร้อมทั้งนำเสนอการเข้ารหัสสองมิติด้วยเช่นกัน อาทิเช่น วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก (recorded-bit patterning :RBP) [4]โดยนำเสนอรูปแบบการเข้ารหัสอัตราสูงร่วมกับแบบจำลองช่องสัญญาณแบบ 3 แทร็ก เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน โดยมีการ์ดแบนด์ (guard band) กั้นระหว่างแทร็กทั้งสาม จากนั้นได้มีการนำเสนอการจัดรูปแบบของบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในแบบหลายแทร็ก(a multi tracks recorded-bit patterning: M-RBP) [5]เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเข้ารหัส ร่วมกับแบบจำลองช่องสัญญาณหลายแทร็กแบบไม่มีการ์ดแบนด์กั้นระหว่างแทร็ก ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่การบันทึกข้อมูลได้อีกทางหนึ่ง โดยใช้วิธีการหมุน(rotate) หรือ การเลื่อนรูปแบบข้อมูล (circular shift) เพื่อหารูปแบบของชุดข้อมูลที่ดีที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอนโดยอาศัยตารางข้อมูล (look up table) ก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดลงไป และมีการนำเสนอการเข้ารหัสรูปแบบใหม่ [9,10] ที่มีอัตรารหัส 4/5,5/6,8/9 และ 6/9 ที่มีความซับซ้อนต่ำทำให้ประสิทธิภาพในด้านอัตราบิตผิดพลาด(bit error rate: BER) ดีขึ้น

จากนั้น Vijaya Kumar และคณะ[11] ได้นำเสนอการวิเคราะห์รูปแบบสื่อบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบของสื่อบันทึก ร่วมกับการออกแบบอีควอไลเซอร์ด้วยผลตอบสนองบางส่วนให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ (target) โดยใช้วิธีหาค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด(MMSE) ด้วยวิธีการเงื่อนไขบังคับแบบโมนิก (monic constraint) และคำนึงถึงการแทรกสอดระหว่างแทร็ก(ITI) และสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก รวมถึงการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของอาเรย์แบบปกติกับแบบเอียงกับโดยพิจารณาด้านอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบิตกับระยะห่างระหว่างแทร็ก (bit aspect ratio: BAR) ที่ $BAR=1$ และ $BAR=2$ ด้วยความแตกต่างกันของสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกและการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ซึ่งพบว่าแบบเอียงมีอัตราบิตผิดพลาดที่ดีกว่าและทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกได้ดีกว่าอาเรย์แบบปกติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบและลักษณะของการเกิดการแทรกสอดสองมิติ ที่เกิดขึ้นในการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลสูง
2. ศึกษาและค้นหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการออกแบบการเข้ารหัสสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

3. ศึกษาและพัฒนาโครงสร้างและวิธีการเข้ารหัส เพื่อลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติอย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ระบบโดยรวมมีสมรรถนะที่ดีขึ้น เช่นในส่วนของอัตรารหัส (code rate) ด้านอัตราบิตผิดพลาด(BER) และความซับซ้อน (Complexity)

4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพ เปรียบเทียบและสรุปผล รูปแบบการศึกษาทั้งหมด เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้สนใจพัฒนาการเข้ารหัสในการบันทึกข้อมูลในอนาคต

1.3 สมมุติฐานในการวิจัย

จากการศึกษาหลักการทำงานของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก พบว่าในการบันทึกข้อมูลนั้น เมื่อมีการอ่านกลับของบิตข้อมูลที่เราต้องการนั้น สัญญาณอ่านกลับจะถูกรบกวนจากสื่อบันทึกเอง หรือในรูปแบบการแทรกสอดโดยบิตข้างๆ ทั้งในแนวตามแตร็กและแนวขวางแตร็ก ส่งผลให้ขนาดของสัญญาณอ่านกลับของบิตที่เราต้องการนั้นเป็นได้ทั้งแบบส่งเสริมหรือลดทอนได้ทั้งสองกรณี หากเป็นการแทรกสอดที่ทำให้ขนาดของสัญญาณถูกลดทอน จะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายในการตรวจหาลำดับข้อมูลของวงจรตรวจหาที่ภาครับ ดังนั้นสมมุติฐานของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาการจัดรูปแบบของสื่อบันทึกในรูปแบบเอียง และรูปแบบของข้อมูลที่จะก่อให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอน เพื่อลดผลกระทบของเหตุการณ์ดังกล่าวโดยการเข้ารหัสข้อมูลและหลีกเลี่ยงรูปแบบข้อมูลนั้น ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบเอียง ซึ่งเมื่อสามารถหลีกเลี่ยงรูปแบบที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอนได้ ก็ให้เกิดรูปแบบข้อมูลที่ส่งเสริมที่มากขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกและสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (Additive white Gaussian noise: AWGN) ได้ดี ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมดีขึ้น

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีของช่องสัญญาณอ่านเขียนของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูง ในเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบ แบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (Bit-Pattern media recording: BPMR) ทั้งแบบรูปแบบอาร์เรย์ปกติ (regular array) และแบบเอียง (Staggered Bit-Pattern media recording: SBPMR) และทำการทดสอบลักษณะการแทรกสอดสองมิติของรูปแบบของชุดข้อมูลในแบบต่างๆ ทำให้สามารถกำหนดรูปแบบชุดข้อมูลที่ต้องหลีกเลี่ยงในการบันทึก ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอน และสามารถนำไปเป็นเงื่อนไขในการเข้ารหัสสองมิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือศึกษาผลของขนาดของเกาะข้อมูล และอัตราส่วนระยะห่างของบิตข้อมูล กับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (BAR) ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบเยื้อง เมื่อทำงานร่วมกับการเข้ารหัสโดยการจัดรูปแบบของบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบเยื้อง (staggered recorded-bit patterning :SRBP) ซึ่งเป็นออกแบบการเข้ารหัสสองมิติด้วยวิธีการต่างๆ ที่สามารถหลีกเลี่ยงการบันทึกข้อมูลที่มีรูปแบบอันก่อให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณแบบลดทอน ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบเยื้อง จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในรูปแบบอาเรย์ตามเงื่อนไขต่างๆ โดยจำลองในโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงผลในรูปแบบ อัตราบิดผิวดลาด เพื่อเปรียบเทียบกันตามรูปแบบการบันทึกข้อมูล และตามเงื่อนไขที่กำหนด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1

อธิบายถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งมั่นและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย, สมมุติฐานในงานวิจัย, ทฤษฎีและแนวคิดในการวิจัย

บทที่ 2

อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการ ได้แก่ หลักการทำงานพื้นฐานและแบบจำลองของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นในอาเรย์แบบปกติและอาเรย์แบบเยื้อง, และแบบจำลองช่องสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง

บทที่ 3

อธิบายการแทรกสอดแบบสองมิติในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก พร้อมทั้งอธิบายผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดดังกล่าว, การทำงานของวงจรปรับเท่า(equalization) , หลักการตรวจหาข้อมูล (detection) และวิธีการเข้ารหัสสองมิติที่มีอยู่เดิม(conventional 2D coding), การเข้ารหัสโดยการจัดรูปแบบของบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบเยื้อง (staggered recorded-bit patterning :SRBP)

บทที่ 4

อธิบายถึงวิธีการศึกษาผลของขนาดของเกาะข้อมูลและอัตราส่วนระยะห่างของบิตข้อมูล กับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (Bit aspect Ratio: BAR) ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบเยื้อง ผลการทดลอง รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง โดยนำมาเปรียบเทียบระหว่างแบบปกติในเงื่อนไขที่กำหนดเพิ่มเติม และอธิบายถึงวิธีการเข้ารหัสข้อมูลในรูปแบบหมวนวนข้อมูลที่น่าเสนอ และเปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับ (Signal strength) โดยการเทียบค่าน้ำหนักสัญญาณอ่านกลับเฉลี่ยสะสม และพิจารณาด้านความเร็วในการทำงาน

บทที่ 5

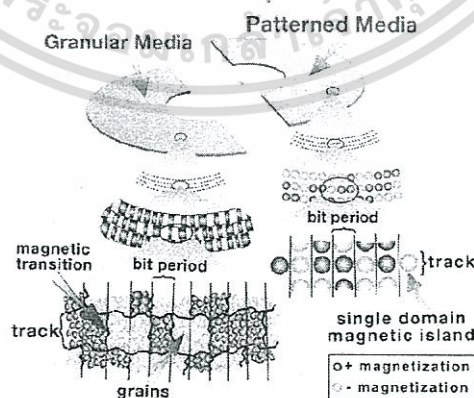
สรุปและข้อเสนอแนะ

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (Bit-Patterned media recording: BPMP) แบบจำลองช่องสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง และกล่าวถึงกระบวนการอ่านและเขียนข้อมูล เพื่อให้เกิดความเข้าใจในภาพรวมของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

2.1 การบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย (bit-patterned media recording:BPMP)

ในปัจจุบันการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก (magnetic recording) มีความต้องการพื้นที่จัดเก็บให้มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของข้อจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก [1] ที่เป็นข้อจำกัดของการเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) ผู้พัฒนาจึงได้พยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลสำหรับการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ให้มีความจุมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in^2) เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย หรือการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบของสื่อบันทึก (bit-patterned media recording : BPMP) เป็นเทคโนโลยีที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โครงสร้างของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียมีการจัดพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูล (bit area) มีรูปแบบเป็นเกาะแม่เหล็ก (magnetic island) โดยมีการวางตำแหน่ง ขนาด และรูปทรงที่ค่อนข้างแน่นอนโดยมีหน่วยเป็นนาโนเมตร (Nano meter) [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสื่อบันทึกข้อมูลของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย[12]

ในกระบวนการอ่านข้อมูล หัวอ่านจะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณพัลส์ในขดลวด ที่หัวอ่านตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคือ

$$V = -N \frac{d\phi}{dt}$$
 โดยที่ N คือจำนวนขดลวดและ ϕ คือฟลักซ์แม่เหล็ก

ในแบบจำลองผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติที่ใช้หัวอ่านแบบ MR (Magnetoresistance) แรงดันไฟฟ้าอ่านกลับจะเป็นสัดส่วนกับฟลักซ์แม่เหล็ก ณ บริเวณพื้นผิวของ ABS (air bearing surface) จึงสามารถเขียนสมการที่ 2.1 ได้ดังนี้ [13]

$$V_{MR}(x, y) = C\phi(x, z) \tag{2.1}$$

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อ V_{MR} คือแรงดันไฟฟ้าอ่านกลับ, C คือค่าคงที่, ϕ คือฟลักซ์แม่เหล็ก, a คือความยาวของเกาะแม่เหล็ก, δ คือความสูงของเกาะแม่เหล็ก, d คือระยะบินของหัวอ่าน, g คือความกว้างของช่องว่างระหว่างฉนวนและชั้นส่วนของหัวอ่าน MR, t คือความหนาของชั้นส่วนหัวอ่าน MR และ W คือความกว้างของชั้นส่วนหัวอ่าน MR



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหัวอ่านแบบ MR และเกาะแม่เหล็ก [13]

การตอบสนองฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi_{(x,y)} = \mu_0 \int_{-a}^a \int_d^{d+\delta} \int_{-a}^a \frac{H_y(x', y', z')}{i} M_y(x' - x, y', z' - z) dx' dy' dz' \tag{2.2}$$

- เมื่อ μ_0 คือ สภาพซึมผ่านได้ของช่องว่างอิสระ (free space)
- i คือ กระแสในขดลวดจินตภาพ
- H_y คือ สนามแม่เหล็กหัวอ่านที่เกิดจากขดลวดจินตภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$M_y(x,y,z)$ คือ สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก (media magnetization)

y คือ ทิศทางในแนวตั้งฉากกับสื่อบันทึก

ดังนั้นสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบแนวตั้ง การปริพันธ์ของผลตอบสนองสามารถแสดงได้ในรูปศักย์แม่เหล็ก (ψ) คือ

$$\phi_{(x,y)} = \frac{\mu_0}{i} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_d^{d+\delta} \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\partial \psi(x', y', z')}{\partial y'} M_y(x'-x, y', z'-z) dx' dy' dz' \quad (2.3)$$

หรือ

$$\phi_{(x,y)} = \frac{\mu_0}{i} \int_{-\alpha}^{\alpha} \int_d^{d+\delta} \int_{-\alpha}^{\alpha} \psi(x', y', z') \left[\frac{\partial M_y(x'-x, y', z')}{\partial y'} \right] dx' dy' dz' \quad (2.4)$$

เพื่อให้ง่ายขึ้นจึงกำหนดให้หัวอ่านเคลื่อนที่แบบไม่มีการสั่น ทำให้ระยะการบินในแนวตั้งหรือแกน y นั้นคงที่

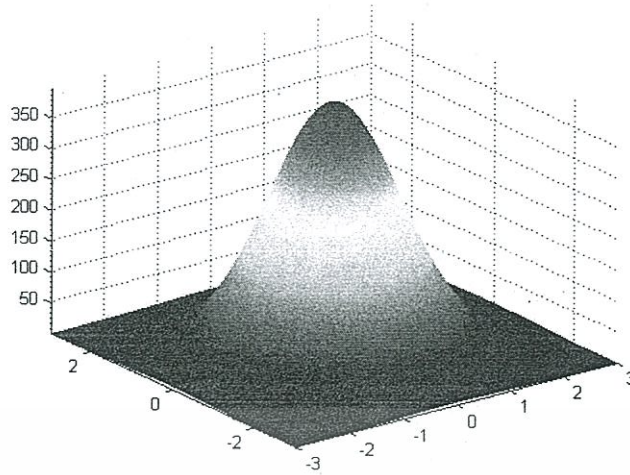
เมื่อทราบว่าสภาพความเป็นแม่เหล็กแบบแนวตั้ง มีค่าเท่ากับค่าคงตัว M เฉพาะบริเวณที่เป็นกลุ่มแม่เหล็ก ดังนั้นสมการที่ 2.4 เขียนได้ดังนี้

$$V(x, z) = C \int_{x-\alpha/2}^{x+\alpha/2} \int_{z-\alpha/2}^{z+\alpha/2} M(x'-x, y', z'-z) \{ \psi(x', d, z') - \psi(x', d+2\delta, z') \} dx' dz' \quad (2.5)$$

$$M = (x, y, z) = \begin{cases} M(\text{media-magnetization}), & x, z \in \text{island} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \text{และ}$$

C คือค่าคงที่ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้หาค่าสัญญาณอ่านกลับในระบบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กได้

ψ หาค่าได้จากการสร้างผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติสำหรับรูปทรงของหัวอ่านและกลุ่มแม่เหล็กได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของกลุ่มแม่เหล็ก

แบบจำลองผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียสามารถประมาณค่าสัญญาณพัลส์ให้เป็นเกาส์เซียนแบบสองมิติ เขียนสมการได้ดังนี้

$$P(x, z) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x^2}{W_x^2} + \frac{z^2}{W_z^2} \right] \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อ $P(x, z)$ คือ ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ

A คือ แอมพลิจูด (Amplitude) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1

x คือ ระยะห่างในแนวตามแทร็ก (along track)

z คือ ระยะห่างในแนวขวางแทร็ก (across track)

W_x คือ ค่า PW_{50_x} (ความกว้างของสัญญาณพัลส์แอมพลิจูด 50%) ในแนวตามแทร็ก

W_z คือ ค่า PW_{50_z} (ความกว้างของพัลส์ที่แอมพลิจูด 50%) ในแนวขวางแทร็ก

$$W_x = \frac{\text{along-track } PW_{50}}{2.3548} \quad (2.7)$$

$$W_z = \frac{\text{across-track } PW_{50}}{2.3548} \quad (2.8)$$

สัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก (media noise) เกิดขึ้นได้จากความไม่แน่นอนของสภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึก หรือเกิดจากความผันผวนของเกาะแม่เหล็ก ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อระบบช่องสัญญาณมากที่สุด มีผลให้สมรรถนะของระบบลดลง สาเหตุ 5 ประการที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกในระบบการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียมีดังนี้[13]ความผันผวนของตำแหน่ง (position fluctuation), ความผันผวนของขนาด (size fluctuation), ความผันผวนของความหนา (thickness fluctuation), ความผันผวนของรูปร่าง (shape fluctuation) และแมกเนไทเซชัน (magnetization) ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียจะพบสัญญาณรบกวนที่เป็นความผันผวนของตำแหน่งและความผันผวนของขนาดมากที่สุด[13]

สัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก แบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่เกิดจากความผันผวนทางตำแหน่ง สามารถเขียนได้ตามสมการนี้

$$P(x, z) = (A + \Delta_a) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + \Delta_x}{c(W_x + \Delta_{w_x})} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_z}{c(W_z + \Delta_{w_z})} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$P(x, z)$ เป็นผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ

A คือ แอมพลิจูด (Amplitude) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1

x คือ ระยะห่างในแนวตามแทร็ก (along track)

z คือ ระยะห่างในแนวขวางแทร็ก (across track)

Δ_x คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวตามแทร็ก

Δ_z คือ ความผันผวนของตำแหน่งในแนวขวางแทร็ก

W_x คือ ค่า PW_{50} (ความกว้างของพัลส์แอมพลิจูด 50%) ในแนวตามแทร็ก

W_z คือ ค่า PW_{50} (ความกว้างของพัลส์ที่แอมพลิจูด 50%) ในแนวขวางแทร็ก

Δ_a คือ ความผันผวนของแอมพลิจูด

Δ_{w_x} คือ คือความผันผวนของ PW_{50} ในแนวตามแทร็ก

Δ_{w_z} คือ คือความผันผวนของ PW_{50} ในแนวขวางแทร็ก

c คือ ค่าคงที่ $c = 1/2.3548$ ที่มาจากความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} และค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน [13]

เราสามารถจำลองช่องสัญญาณอ่านกลับสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก แบบบิตแพตเทิร์นมีเดียได้ โดยอาศัยสัญญาณอ่านกลับจากข้อมูลบิตที่เราสนใจ เป็นการหาผลรวมของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบเชิงเส้นของกลุ่มแม่เหล็กในแนวตามแทร็ก และจากแทร็กข้างเคียงสองแทร็ก ที่อยู่ในระยะของหัวอ่านที่อยู่แนวตามแทร็กและขวางแทร็กที่มีความสัมพันธ์กันกับแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่าน ดังนั้นสัญญาณอ่านกลับที่ได้รับจากหัวอ่านจากแทร็กหลักจึงมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดระหว่างแทร็ก เราสามารถจำลองสัญญาณอ่านกลับของช่องสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) โดยการแปลงสมการที่ 2.5 ให้เป็นแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$r_{l,k} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N h_{m,n} x_{l-m,k-n} + n_{l,k} = x_{l,k} \otimes h_{l,k} + n_{l,k} \quad (2.10)$$

โดย $x_{l,k}$ คือช่องสัญญาณอินพุต ที่มีข้อมูลเท่ากับจำนวน M บิต และมีจำนวนแทร็กเท่ากับจำนวน N แทร็ก และ $h_{m,n}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ, m คือดัชนีของบิตข้อมูลแม่เหล็กในแนวตามแทร็ก n คือดัชนีของบิตข้อมูลแม่เหล็กในแนวขวางแทร็ก, $n_{l,k}$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก โดยสามารถคำนวณหาได้จาก อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) ซึ่งถูกนิยามโดย $SNR = 20 \log_{10}(1/\sigma)$ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibel: dB) เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาว นอกจากนี้สมการที่ 2.10 ยังสามารถเขียนแบบคอนโวลูชันสองมิติ (2D convolution: \otimes) ได้

เราสามารถประมาณค่าของช่องสัญญาณอ่านกลับที่มีผลตอบสนองแบบเมทริกซ์ขนาด 3×3 ได้ดังสมการที่ 2.11

$$H = \begin{bmatrix} h_{j-1,k-1} & h_{j,k-1} & h_{j+1,k-1} \\ h_{j-1,k} & h_{j,k} & h_{j+1,k} \\ h_{j-1,k+1} & h_{j,k+1} & h_{j+1,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & a & \alpha \\ \beta & b & \beta \\ \alpha & a & \alpha \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

โดยที่

$$h_{m,n} = P(-mT_x, -nT_z) \quad m, n \in (-L, 0, L) \quad (2.12)$$

$P(x, z)$ คือ ผลตอบสนองแบบเกาส์เซียนสองมิติ (2D Gaussian pulse response), $2L+1$ คือ ความยาวของสัญญาณสองมิติ, T_x คือความกว้างของบิต, T_z คือความกว้างของแทร็ก

เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลได้จากค่า T_x จะเท่ากับ T_z ซึ่งสามารถโดยสมการที่ 2.13

$$AD = \frac{10^6}{1550(T_x T_z)} \text{ Tb/in}^2 \quad (2.13)$$

โดยที่ AD คือความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลมีหน่วยเป็นเทระบิตต่อตารางนิ้ว ซึ่ง 1 ตารางเมตรเท่ากับ 1150 ตารางนิ้ว และ T_x และ T_z มีหน่วยเป็นนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $T_x = T_z = 18\text{nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นสำหรับการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 2.0 Tb/in^2 และได้ผลตอบสนองของช่องสัญญาณอ่านกลับดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0213 & 0.2321 & 0.0213 \\ 0.0919 & 1.0000 & 0.0919 \\ 0.0213 & 0.2321 & 0.0213 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมื่อ $T_x = T_z = 16\text{nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นสำหรับการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 2.5 Tb/in^2 และได้ผลตอบสนองของช่องสัญญาณอ่านกลับดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0478 & 0.3154 & 0.0478 \\ 0.1517 & 1.0000 & 0.1517 \\ 0.0478 & 0.3154 & 0.0478 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ $T_x = T_z = 14.5\text{nm}$ เราจะได้ความหนาแน่นสำหรับการบันทึกข้อมูลเท่ากับ 3.0 Tb/in^2 และได้ผลตอบสนองของช่องสัญญาณอ่านกลับดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \\ 0.2125 & 1.0000 & 0.2125 \\ 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

นอกจากนี้เราสามารถสร้างสัญญาณรบกวนจากความผันผวนของตำแหน่ง (Position jitter: Δ_x, Δ_z) ได้โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวน σ_j^2 ซึ่ง σ_j เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของความยาวของบิตข้อมูล T_x ในสมการผลตอบสนองแบบเกาส์เซียนสองมิติ $P(x, z)$

นี่เป็นการแสดงสัญญาณอ่านกลับแบบไม่ต่อเนื่องของแต่ละบิตข้อมูล ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีผลตอบสนองขนาด $3 \times N$

$$\begin{bmatrix} r_{0,k-1} & \cdots & r_{j-1,k-1} & r_{j,k-1} & r_{j+1,k-1} & \cdots & r_{j-N,k-1} \\ r_{0,k} & \cdots & r_{j-1,k} & r_{j,k} & r_{j+1,k} & \cdots & r_{j-N,k} \\ r_{0,k+1} & \cdots & r_{j-1,k+1} & r_{j,k+1} & r_{j+1,k+1} & \cdots & r_{j-N,k+1} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

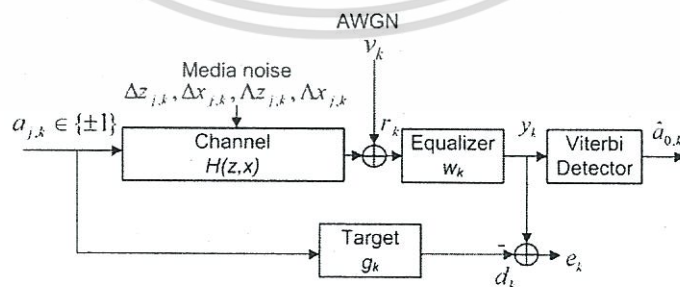
เมื่อใช้สมการที่ 2.10 เราสามารถคำนวณหาค่าสัญญาณอ่านกลับของแต่ละตำแหน่งเกาะข้อมูลที่ต้องการ ($r_{j,k}$) และสัญญาณจากบิตรอบข้างทั้งในแนวตามแตรีกและขวางแตรีกจำนวน 8 บิต ที่เกิดจากการแทรกสอดสองมิติ (2D interference) จะได้สมการดังนี้

$$r_{j,k} = \left[h_{j-1,k}x_{j-1,k} + h_{j,k}x_{j,k} + h_{j-1,k}x_{j+1,k} \right] + \left[h_{j-1,k-1}x_{j-1,k-1} + h_{j,k-1}x_{j,k-1} + h_{j+1,k-1}x_{j+1,k-1} \right] + \left[h_{j-1,k+1}x_{j-1,k+1} + h_{j,k+1}x_{j,k+1} + h_{j+1,k+1}x_{j+1,k+1} \right] + n_{j,k} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.14 ถึง 2.16 แสดงให้เห็นว่าที่ความหนาแน่นของการบันทึกสูงขึ้น จะทำให้สัญญาณจากบิตรอบข้างของบิตที่ต้องการอ่านข้อมูลมีความแรงขึ้นด้วย เป็นผลมาจากการแทรกสอดสองมิติที่มีความรุนแรงขึ้นตามไปด้วย

2.2 การบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียแบบจัดบิตข้อมูลแบบเยื้อง (staggered bit-patterned media recording: S-BPMR)[31]

ในการบันทึกแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย บิตข้อมูลสามารถเรียงได้ทั้งแบบปกติและแบบเยื้อง ขึ้นอยู่กับการเตรียมสื่อบันทึก [3] การศึกษาเบื้องต้นพบว่าการบันทึกข้อมูลในรูปแบบเกาะข้อมูลแบบเยื้อง จะมีอัตราข้อผิดพลาดบิต(bit error rate: BER) ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เกาะข้อมูลแบบปกติ ทั้งนี้เพื่อที่จะลดผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติ จึงมีการนำช่องสัญญาณและอีควอไลเซอร์ สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดบิตข้อมูลแบบเยื้อง [11]และมีการพิจารณา อัตราส่วนของลักษณะบิตที่มีความแตกต่างกัน (bit aspect ratio :BAR) เพื่อลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติอีกด้วยรูปแบบช่องสัญญาณสำหรับการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดบิตข้อมูลเยื้องแสดงในรูปที่ 2.4 [11]



รูปที่ 2.4 ช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองสองมิติ สำหรับการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพทเทอ์มีเดีย

โดยพิจารณาสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกและ AWGN[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังของรูปแบบช่องสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.4 $a_{j,k}$ เป็นอินพุตของช่องสัญญาณ, $k_{j,h}$ คือตำแหน่งของบิตข้อมูล, $j_{j,h}$ คือตำแหน่งของแทร็ก ซึ่งมีการแยกกันอย่างอิสระ มีการกระจายลำดับข้อมูลไบนารีที่เหมือนกัน เมื่อ $a_{j,k} \in \{-1, +1\}$ บิตข้อมูลจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก, การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ที่ $H(z, x)$ หมายถึงผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์ของไอแลนด์ เมื่อ z หมายถึงทิศทางในแนวขวางแทร็กและ x หมายถึงทิศทางในแนวตามแทร็กสัญญาณอ่านกลับถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ v_k สัญญาณรบกวนสีขาวแบบบวก (AWGN) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และ σ_v^2 แทนค่าความแปรปรวน

สำหรับการพิจารณาในระบบการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์แบบเฉียง โดยที่ไม่มีสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก มีเพียงการแทรกสอดทางสัญลักษณ์ (ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) และ AWGN จะสามารถเขียนในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$r_k = \sum_{n=-N}^N a_{0,k} h(0, n) + \sum_{m=1}^{\lfloor N/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m}^{N-m} (a_{2m,k-n} + a_{-2m,k-n}) h(2m, n) + \sum_{n=0}^{\lfloor (N-1)/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m+1}^{N-m} (a_{2m+1,k-n} + a_{-2m-1,k-n}) \times h\left(2m+1, n - \frac{1}{2}\right) + v_k \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$h(\alpha, \beta) = H(\alpha T_z, \beta T_x) \quad (2.20)$$

โดยที่ r_k คือ สัญญาณอ่านกลับ

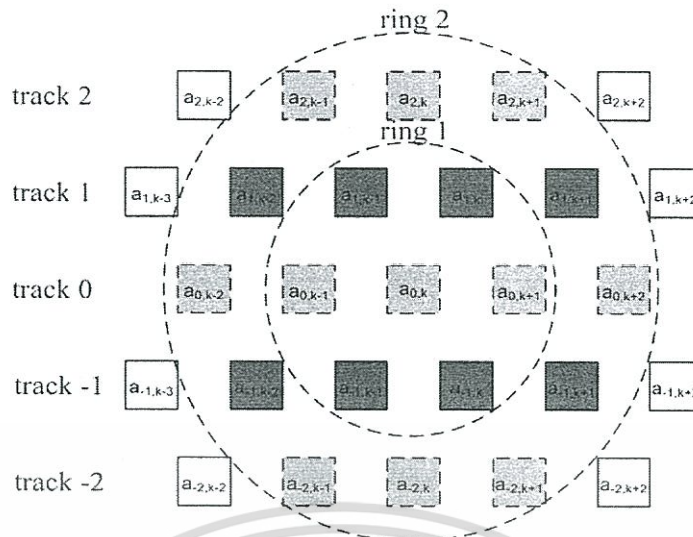
h คือ ผลตอบสนองของบิตข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง 2 มิติ ของช่องสัญญาณ H

T_x คือ คาบเวลาของบิตข้อมูลในแนวตามแทร็ก

T_z คือ คาบเวลาของบิตข้อมูลในแนวขวางแทร็ก

สำหรับอาร์เรย์เฉียงของระบบการบันทึกข้อมูลรูปแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียบิตข้อมูลในแทร็กที่อยู่ใกล้เคียงได้รับการแทนที่ด้วยคาบเวลาครึ่งหนึ่งของบิตในแนวตามแทร็กของแทร็กหลัก

ดังนั้นสัญลักษณ์ α, β จะไม่ใช่จำนวนเต็ม ในที่นี้ N หมายถึงจำนวนของวงรอบบิตข้อมูลที่มีผลในการอ่านกลับที่เอื้อต่อการเกิด สัญญาณแทรกสอดในแทร็กเดียวกัน (ISI) และสัญญาณแทรกสอดระหว่างแทร็ก (ITI) ในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นในกรณีนี้ $N=2$



รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงบิตข้อมูล ที่ก่อให้เกิด ISI และ ITI เมื่อ $N = 2$. $a_{0,k}$ คือบิตที่มีการอ่านข้อมูล บิตข้อมูลสี่ฟ้าที่มีเส้นประ จะเรียกว่า "บิตข้อมูลคู่" (เทียบจากแตรีก $\{-2, 0, 2\}$) และ บิต ข้อมูลสี่แดงกับเส้นทึบจะเรียกว่า "บิตข้อมูลคี่" (เทียบจากแตรีก $\{-1, 1\}$) ส่วน บิตสีขาวจะ ถือว่าไกลเกินไปที่จะทำให้เกิด ISI และ ITI[11]

สัญญาณอ่านกลับสำหรับอาร์เรย์แบบเยื้องในระบบการบันทึกข้อมูลรูปแบบบิตแพตเทิร์น มีเดีย โดยใช้การคอนโวลูชันแบบ 2 มิติ ร่วมกับการชักตัวอย่างที่มากขึ้น จากสมการที่ 2.19 โดย สัญญาณอ่านกลับที่ไม่มี AWGN สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r_i = \sum_m \sum_n b_{-m,i-n} h\left(\frac{n}{2}\right) \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$b_{i,j} = \begin{cases} a_{j,k} & \text{if } j \text{ even and } i = 2k; \\ & \text{or } j \text{ odd and } i = 2k + 1; \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2.22)$$

กรณีการเพิ่มสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกในสัญญาณอ่านกลับที่ตำแหน่ง $\tilde{\Delta}x$ และ $\tilde{\Delta}z$ เป็น ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาะข้อมูลที่ทำนอมอไลซ์แล้ว(normalized)ในทิศทางตามแตรีก และขวางแตรีกตามลำดับ $\tilde{\Delta}x$ และ $\tilde{\Delta}z$ เป็นความผันผวนทางขนาดของเกาะข้อมูลที่ทำนอมอไลซ์แล้ว (normalized) ในทิศทางตามแตรีกและขวางแตรีกตามลำดับ T_x ในทิศทางตามแตรีก, T_z ในทิศทาง ขวางแตรีก, L_x เป็นความยาวเกาะข้อมูลในแนวตามแตรีกและ L_z เป็นความยาวเกาะข้อมูลในแนวขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทรกตามลำดับสัญญาณอ่านกลับในระบบการบันทึกข้อมูลรูปแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียสำหรับอาร์เรย์
 เยื้องจะเขียนได้ดังนี้

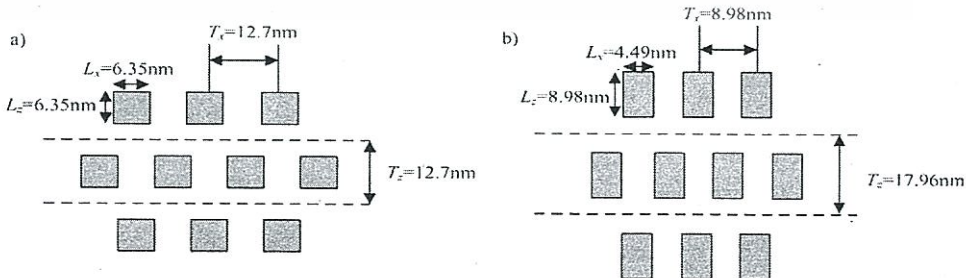
$$\begin{aligned}
 r_k = & \sum_{n=-N}^N a_{0,k-n} h(\tilde{\Delta}z_{0,k-n}, n + \tilde{\Delta}x_{0,k-n}, \tilde{\Lambda}_{0,k-n}) \\
 & + \sum_{m=1}^{[N/2]} \sum_{n=-N+m}^{N-m} a_{2m,k-n} h(-2m + \tilde{\Delta}z_{2m,k-n}, n + \tilde{\Delta}x_{2m,k-n}, \tilde{\Lambda}_{2m,k-n}) \\
 & + \sum_{m=1}^{[N/2]} \sum_{n=-N+m}^{N-m} a_{-2m,k-n} h(2m + \tilde{\Delta}z_{-2m,k-n}, n + \tilde{\Delta}x_{-2m,k-n}, \tilde{\Lambda}_{-2m,k-n}) \\
 & + \sum_{m=0}^{[(N-1)/2]} \sum_{n=-N+m+1}^{N-m} a_{2m+1,k-n} h\left(- (2m+1) + \tilde{\Delta}z_{2m+1,k-n}, n - \frac{1}{2} + \tilde{\Delta}x_{2m+1,k-n}, \tilde{\Lambda}_{2m+1,k-n}\right) \\
 & + \sum_{m=0}^{[(N-1)/2]} \sum_{n=-N+m+1}^{N-m} a_{-2m-1,k-n} h\left(2m+1 + \tilde{\Delta}z_{-2m-1,k-n}, n - \frac{1}{2} + \tilde{\Delta}x_{-2m-1,k-n}, \tilde{\Lambda}_{-2m-1,k-n}\right) + v_k
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

ที่

$$h(\alpha + \tilde{\Delta}z_{j,k}, \beta + \tilde{\Delta}x_{j,k}, \tilde{\Lambda}_{j,k}) = H(\alpha T_z + \tilde{\Delta}z_{j,k} T_z, \beta T_x + \tilde{\Delta}x_{j,k} T_x, \tilde{\Lambda}_{j,k} L_z, \tilde{\Lambda}_{j,k} L_x) \tag{2.24}$$

ผลตอบสนองเกาะข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง 2 มิติ ในช่องสัญญาณโดยมีสัญญาณรบกวนจากสื่อ
 บันทึกด้วยในบทความนี้จำลอง $\tilde{\Delta}z, \tilde{\Delta}x, \tilde{\Lambda}z$ และ $\tilde{\Lambda}x$ เป็นอิสระ ตัวแปรสุ่มแบบเกาเซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็น
 ศูนย์ ด้วยค่าความแปรปรวนของ $\sigma_{\tilde{\Delta}z}^2, \sigma_{\tilde{\Delta}x}^2, \sigma_{\tilde{\Lambda}z}^2$ และ $\sigma_{\tilde{\Lambda}x}^2$ ตามลำดับ นอกจากนี้ $\tilde{\Delta}z, \tilde{\Delta}x, \tilde{\Lambda}z$ และ $\tilde{\Lambda}x$
 ทั้งหมดถูกตัดทอนอยู่ที่ช่วงของ $[\pm 1/2]$ เมื่อกำหนดให้สัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกเท่ากับ $x\%$
 ซึ่งหมายความว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $\Delta z, \Delta x, \Lambda z$ และ Λx เป็น $x\%$ ของ T_z, T_x, L_z และ L_x
 ตามลำดับ

ลักษณะการจัดวางบิตข้อมูลที่มีอัตราส่วนของความกว้างของแทร็กและระยะห่างระหว่างบิต
 ที่มีความแตกต่างกัน (bit aspect ratio :BAR) เพื่อมุ่งที่จะลดผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติ
 แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างลักษณะการจัดวางบิตข้อมูลที่มีอัตราส่วนของบิตและความกว้างของแทร็กที่มีความ
 ความแตกต่างกันที่ 4 Tb/in² a) BAR=1 และ b) BAR=1 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการสร้างแบบจำลองแสดงใน 3×3 ผลตอบสนองของสัญญาณช่อง H_r สำหรับอาร์เรย์แบบปกติสามารถจำลองดังนี้

$$H_r = \begin{bmatrix} \alpha\beta & \beta & \alpha\beta \\ \beta & 1 & \beta \\ \alpha\beta & \beta & \alpha\beta \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

และเมื่อใช้ผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์ใน(2.25)การตอบสนองที่สอดคล้องกันกับ H_r สำหรับบิตข้อมูลเบื้องต้นด้วย $N = 1$ นั้นผลตอบสนองของสัญญาณพัลส์ H_s จะแสดงใน (2.26)

$$H_s = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha^{\frac{1}{4}}\beta & \alpha^{\frac{1}{4}}\beta \\ \alpha & 1 & \alpha \\ \alpha & \alpha^{\frac{1}{4}}\beta & \alpha^{\frac{1}{4}}\beta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

หมายเหตุที่ผลตอบสนองของช่องสัญญาณ [18] และ [19]เป็นกรณีพิเศษของ H_r และในทำนองเดียวกัน [20]และ [21]เป็นกรณีพิเศษของ H_s ผลตอบสนองของช่องสัญญาณที่แตกต่างกันของ BAR ทั้งสองสามารถแสดงโดย H_r และ H_s โดยการปรับค่าสำหรับ α และ β เหมาะสมในบทความนี้มีการสันนิษฐานว่าการเกิดผลกระทบจาก ISI / ITI เกิดจากแท่งที่อยู่ใกล้เคียงทันทีเท่านั้น

ในการจำลองการที่มีความหนาแน่นของการบันทึก 4 Tb/in² ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์สำหรับ BAR ทั้งที่ 1 และ 2 การตอบสนองช่องทางของหมู่เกาะอาร์เรย์ที่ BAR = 1 และ 2 ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0.0053 & 0.0002 \\ 0.0118 & 0.2692 & 0.0118 \\ 0.0435 & 0.9942 & 0.0435 \\ 0.0118 & 0.2692 & 0.0118 \\ 0.0002 & 0.0053 & 0.0053 \end{bmatrix}, \quad (2.27)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0002 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0165 & 0.1146 & 0.0165 & 0 \\ 0.0004 & 0.1436 & 0.9946 & 0.1436 & 0.0004 \\ 0 & 0.0165 & 0.1146 & 0.0165 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0002 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

จากนั้นมีการปรับรูปแบบเมทริกซ์ที่ตอบสนองช่องทางของหมู่เกาะอาเรย์แบบเยื้อง $N = 2$ ที่ $\text{BAR} = 1$ และ 2 ตามลำดับดังต่อไปนี้

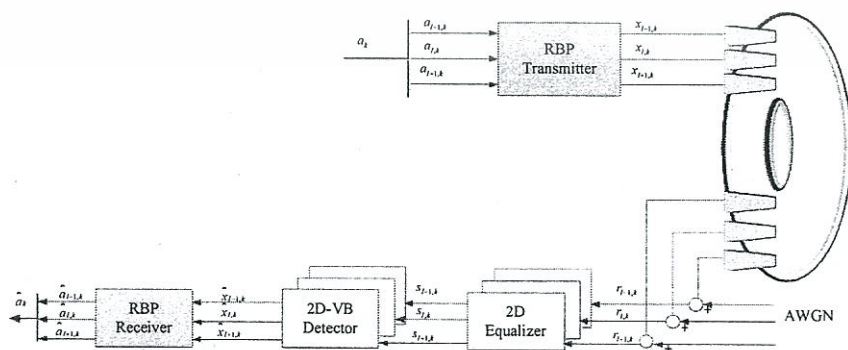
$$H_3 = \begin{bmatrix} & & 0.0002 & & 0.0053 & & 0.0002 & & \\ & 0.0002 & & 0.1231 & & 0.1231 & & 0.0002 & \\ 0 & & 0.0435 & & 0.9942 & & 0.0435 & & 0 \\ & 0.0002 & & 0.1231 & & 0.1231 & & 0.0002 & \\ & & 0.0002 & & 0.0053 & & 0.0002 & & \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} & & 0 & & 0.0002 & & 0 & & \\ & 0.0015 & & 0.0706 & & 0.0706 & & 0.0015 & \\ 0.0004 & & 0.1436 & & 0.9946 & & 0.1436 & & 0.0004 \\ & 0.0015 & & 0.0706 & & 0.0706 & & 0.0015 & \\ & & 0 & & 0.0002 & & 0 & & \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

จากการนำเสนอก่อนหน้านี้ [3] แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการแทรกสอดสองมิติของการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดบิตข้อมูลเยื้อง และเมื่อมีการจัดรูปแบบบิตที่มีอัตราส่วนของความกว้างของแตรีก และระยะห่างระหว่างบิตที่มีความแตกต่างกันส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.3 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก (Recorded-Bit Patterning: RBP)[32]

เพื่อหลีกเลี่ยงรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่จะก่อให้เกิดการแทรกสอดสองมิติที่มีผลด้านลดทอนสัญญาณอ่านกลับ จึงมีการนำเสนอเทคนิคการเข้ารหัสชุดข้อมูล ก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลจริงลงในมีเดีย โดยการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงรูปแบบชุดข้อมูลที่จะก่อให้เกิดการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน ภาพรวมของช่องสัญญาณแสดงในภาพที่ 2.7



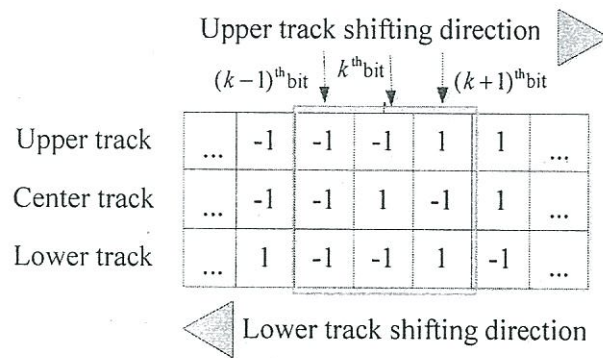
รูปที่ 2.7 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม RBP[32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ลำดับชุดข้อมูล a_k จะถูกแบ่งออกเป็น 3 แพทริก $\{a_{l-1,k}, a_{l,k}, a_{l+1,k}\}$ เพื่อส่งเข้าไปใน วงจรเข้ารหัส RBP เพื่อเรียงข้อมูลสำหรับการบันทึกเป็น 3 อันดับได้แก่ $\{x_{l-1,k}, x_{l,k}, x_{l+1,k}\}$ จำนวน 3 แพทริกติดกันคือ $(l-1), (l)$ และ $(l+1)$ ตามลำดับ ในกระบวนการอ่านข้อมูลของภาครับ ข้อมูลจะถูก อ่านโดย 3 หัวอ่านในเวลาเดียวกัน หรืออีกกรณีหนึ่ง ใช้ 1 หัวอ่านทีละแพทริกแล้วนำไปเก็บในบัฟเฟอร์ เพื่อช่วยเก็บข้อมูลที่ละแพทริก จากนั้นกระบวนการอ่านข้อมูล (read process) จะลำดับข้อมูลของ สัญญาณอ่านกลับ $r_{l,k}$ จะถูกปรับรูปแบบ(equalize)โดยอีควอลไลเซอร์แบบสองมิติ (2D equalizer) ขนาด 3×7 ที่ถูกออกแบบโดยทาร์เก็ตสองมิติขนาด 3×3 แบบสมมาตร (2D symmetric target) และ วิธีการ MMSE [20,21,22] เพื่อปรับแต่งสัญญาณให้เป็นลำดับข้อมูล $s_{l,k}$ และถูกป้อนเข้าสู่วงจร ตรวจหาวิเทอร์บีแบบสองมิติ (2D Viterbi detector) โดยใช้แผนภาพเทรลลิส (trellis diagram) 64 สถานะ (state) ที่มี 8 เส้นสาขา ออกจากแต่ละสถานะ(outgoing branches) [21,22] เพื่อทำการหา ลำดับข้อมูลที่เป็นไปได้มากที่สุด ก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลที่ได้เข้าไปยังอัลกอริทึม RBP ที่อยู่ทางภาครับ เพื่อจัดเรียงลำดับข้อมูลใหม่ด้วยความช่วยเหลือของหน่วยความจำหรือบัฟเฟอร์

ความรุนแรงของการแทรกสอดสองมิตินั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบสัญญาณอ่านกลับของบิตข้อมูลที่ สนใจและบิตข้อมูลที่อยู่โดยรอบบิตที่เราสนใจ อัลกอริทึม RBP จะทำการหลีกเลี่ยงรูปแบบข้อมูลบาง รูปแบบที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย ณ วงจรตรวจหาโดยทำการเรียงบิตข้อมูลใหม่ เพื่อหลีกเลี่ยง รูปแบบชุดข้อมูลที่เกิดการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอนก่อนทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก

หลักการทำงานของวงจรเข้ารหัส RBP จะเริ่มจากการพิจารณาข้อมูล 3 แพทริก แล้วทำการ เลื่อนหน้าต่างขนาด 3×3 ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่แพทริก l (แพทริกกลาง) จากตำแหน่งเริ่มต้น (ซ้ายสุดของ แพทริก) ไปยังตำแหน่งสุดท้าย (ด้านขวาสุดของแพทริก) และทำการนับจำนวนรูปแบบของชุดข้อมูลมาก่อน ให้เกิดการลดทอน ทั้งหมดที่เกิดขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับรูปแบบข้อมูลในตารางที่ 2.1 จากนั้น กำหนดให้แพทริก l คงที่แล้วทำการเลื่อนวน (circular shift) ในแพทริกที่ $l-1$ และแพทริกที่ $l+1$ เพื่อสร้าง รูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งในแต่ละการเลื่อนวนในแพทริกที่ $l-1$ และแพทริกที่ $l+1$ ก็จะทำซ้ำ กระบวนการเลื่อนหน้าต่างขนาด 3×3 จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้ายของแพทริกอีกครั้ง เพื่อ นับจำนวนรูปแบบของชุดข้อมูลก่อนให้เกิดการลดทอน ทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยเมื่อทำการเลื่อนวนข้อมูล ทั้งหมดแล้ว ก็จะพิจารณาว่าการเลื่อนวนข้อมูลของแพทริกที่ $l-1$ และแพทริกที่ $l+1$ ครั้งใดที่มีผลทำให้ได้ รูปแบบชุดข้อมูลที่ดีที่สุด คือมีการเกิดรูปแบบที่ชุดข้อมูลก่อนให้เกิดการลดทอนน้อยที่สุด จากนั้นก็จะ ทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ใช้ในการเลื่อนวนของข้อมูลชุดนั้นไว้ในหน่วยความจำหรือบัฟเฟอร์ เพื่อใช้ในการ เลื่อนวนข้อมูลให้กลับมายังตำแหน่งเดิม ณ วงจรถอดรหัส RBP ที่ภาครับต่อไป



รูปที่ 2.8 วิธีการ RBP [32]

ตารางที่ 2.1 รูปแบบข้อมูลแบบลดทอน [32]

Destructive pattern number	Upper Track			CenterTrack			Lower Track		
	$(k-1)^{\text{th}}$	k^{th}	$(k+1)^{\text{th}}$	$(k-1)^{\text{th}}$	k^{th}	$(k+1)^{\text{th}}$	$(k-1)^{\text{th}}$	k^{th}	$(k+1)^{\text{th}}$
1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
2	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1
3	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
4	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
5	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
7	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1
8	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1
9	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
10	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1
11	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
13	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
14	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
15	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
16	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
18	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
19	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
20	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
21	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
22	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
23	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
24	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
25	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
26	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
27	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
28	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
30	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
31	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
32	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
33	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
34	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1

2.4 สรุปทฤษฎีและหลักการ

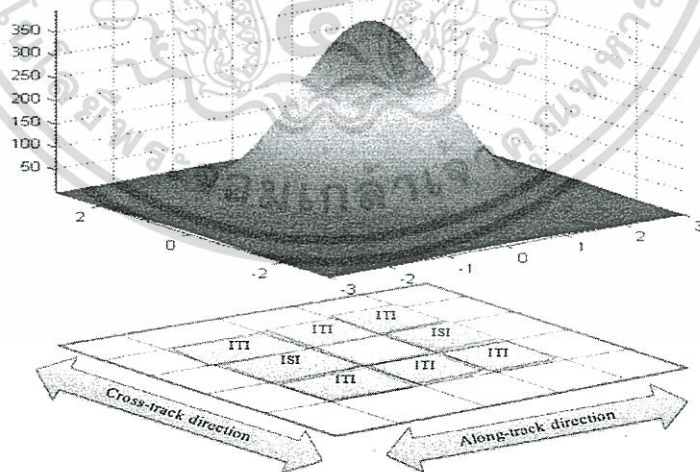
ในบทนี้เราได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในแบบ บิตแพตเทิร์นมีเดียทั้งในแบบบิตอาเรย์ปกติและแบบบิตอาเรย์เอียง รวมถึงช่องสัญญาณและรูปแบบการ เข้ารหัสก่อนการบันทึกเพื่อหลีกเลี่ยงการบันทึกข้อมูลที่มี รูปแบบชุดข้อมูลที่ก่อให้เกิดการแทรกสอด สองมิติแบบลดทอน ทำให้เราเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและจำลอง ระบบ ซึ่งในการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย นั้นมีหลายปัจจัยในการเพิ่มปริมาณความหนาแน่น ในการบันทึกข้อมูลได้หลายแบบ เช่นการลดระยะห่างระหว่างบิตและแทร็ก หรือการจัดเรียงรูปแบบ เกาะสำหรับบิตข้อมูล ทั้งนี้วิธีที่กล่าวถึงจะก่อให้เกิดปัญหาการแทรกสอดสองมิติ ซึ่งรายละเอียดจะ กล่าวถึงในส่วนต่อไป

การแทรกสอดสองมิติและแนวทางการลดผลกระทบ

บทนี้จะกล่าวถึงปัญหาการแทรกสอดสองมิติ และผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติในรูปแบบต่างๆ และแนวทางการแก้ปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบัน ตลอดจนข้อดี ข้อเสีย รวมถึงแนวทางการแก้ไขและ เทคนิคต่างๆ ที่สามารถปรับปรุง เพื่อใช้ในการทำวิจัยต่อไป

3.1 การแทรกสอดสองมิติ (two dimensional interference)

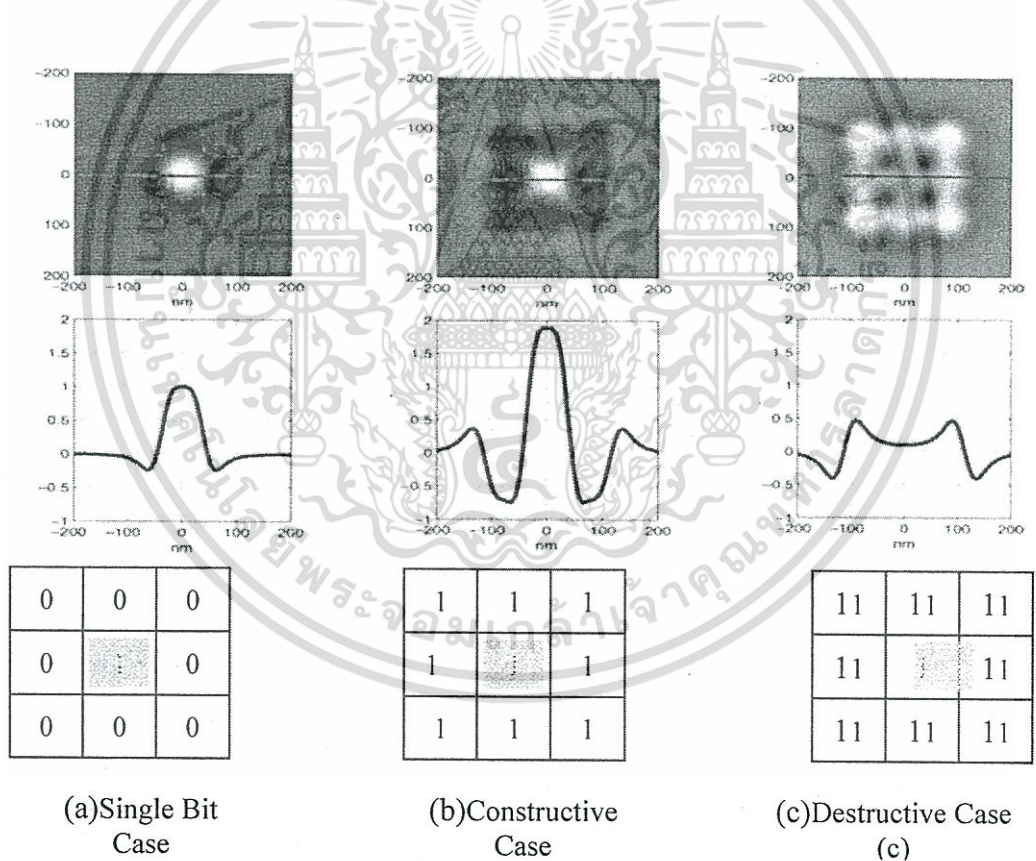
เพื่อที่จะสามารถเก็บข้อมูลให้ได้มากขึ้น ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย ที่มีความหนาแน่นสูง ทำได้โดยลดระยะห่างของเกาะข้อมูล (data bit island) ทั้งในแนวตามแทร็กและแนวขวางแทร็ก ซึ่งเมื่อระยะห่างของแทร็กข้อมูลถูกแคบลงและระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลในแทร็กเดียวกันก็จะลดลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการแทรกสอดสองมิติ (2D interference: 2DI) ซึ่งประกอบด้วย การแทรกสอดทางสัญลักษณ์ (inter symbol interference: ISI) ที่เกิดจากการบิตข้อมูลที่เราต้องการถูกแทรกสอดจากบิตข้อมูลข้างๆ ในแนวตามแทร็ก และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (inter track interference: ITI) ที่เกิดจาก บิตข้อมูลที่เราต้องการถูกแทรกสอดจากบิตข้อมูลข้างๆ ในแนวขวางแทร็กแสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 การแทรกสอดสองมิติ

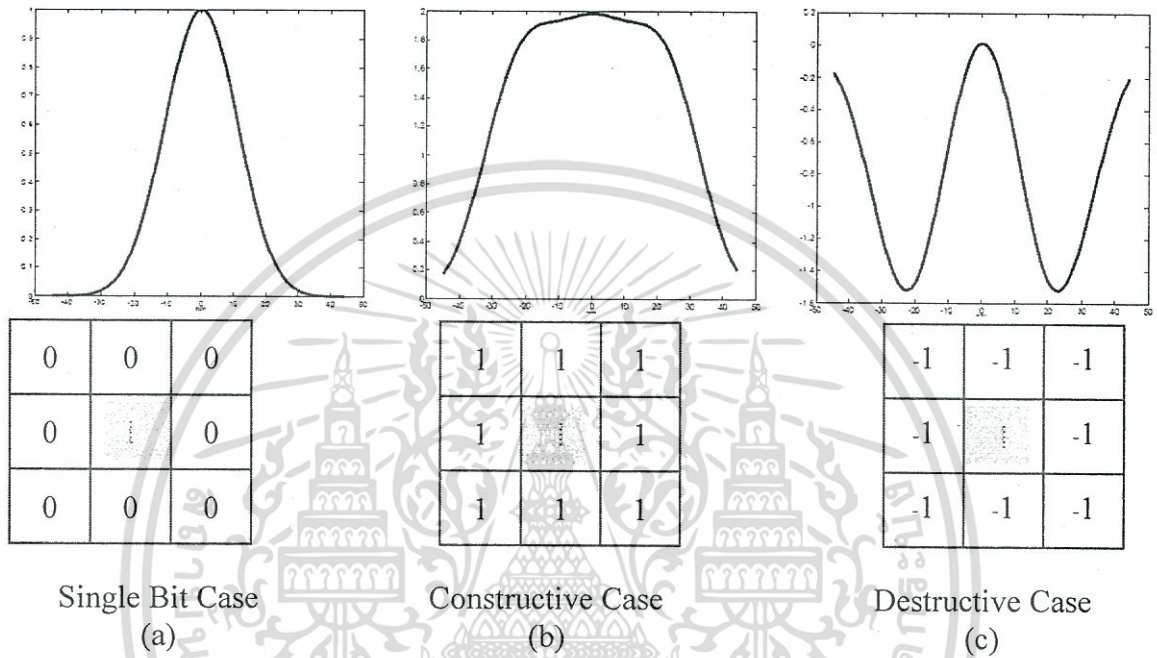
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดสองมิติมีผลกระทบต่อสัญญาณอ่านกลับของข้อมูล ได้ทั้งแบบส่งเสริม (Constructive) และแบบลดทอน (Destructive) ทั้งนี้เราทราบจากอ่านสัญญาณอ่านกลับว่ามีโอเวอร์ชูต (Overshoot) เกิดขึ้นหรือไม่ และพิจารณาค่าของบิตที่อยู่รอบๆ บิตข้อมูลที่เราต้องการเป็นอย่างไรโดยในงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ได้มีการพิจารณาถึงกรณีการเกิดโอเวอร์ชูตของสัญญาณอ่านกลับ [2,3] โดยเกิดขึ้นในสื่อบันทึกแบบไม่มี SUL (Soft under layer) โดยจะทำหน้าที่ส่งผ่านชั้นแม่เหล็กที่เป็นทิศทางตรงข้ามกับชั้นที่เราต้องการบันทึก จึงทำให้สภาพของชั้นแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามนั้นสะท้อนกลับมาที่รอบๆ เกาะข้อมูล ทั้งนี้เมื่อมีการเกิดโอเวอร์ชูตจะทำให้บางครั้งสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางถูกเพิ่มขึ้น ดังกรณีที่ข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล -1 (กรณีที่ดีที่สุด) และในทางกลับกัน หากข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล 1 (กรณีที่แย่ที่สุด) สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะถูกลดทอนลงอย่างมาก โดยสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก และจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก ทำให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านหรือทำให้เกิดความไม่ถูกต้องในการะบวนอ่านข้อมูลกลับในภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบสัญญาณอ่านกลับที่มีโอเวอร์ชูตในแต่ละกรณี [3]
 (a) กรณีบิตเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด (c) กรณีที่แย่ที่สุด

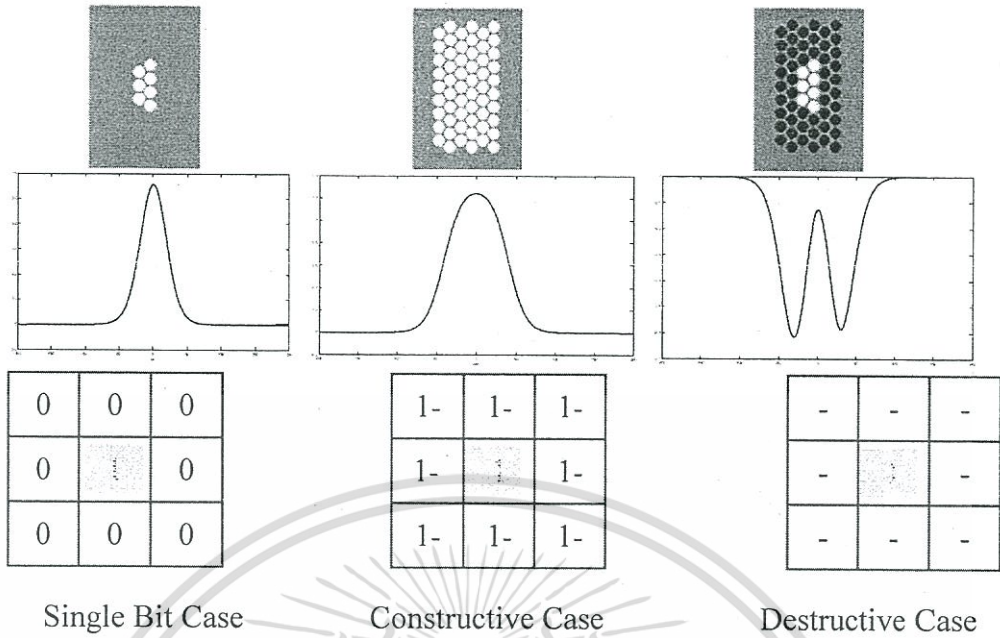
ในงานวิจัยนี้ เราจะพิจารณาระบบที่มี SUL(soft under layer) ซึ่งไม่มีโอเวอร์ชูด โดยเมื่อข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล 1 (กรณีที่ดีที่สุด) สัญญาณอ่านกลับจะเป็นการแทรกสอดแบบส่งเสริม และในทางกลับกัน หากข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล -1 (กรณีที่แย่มากที่สุด) สัญญาณอ่านกลับจะเป็นการแทรกสอดแบบลดทอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบสัญญาณอ่านกลับที่ไม่มีโอเวอร์ชูดในแต่ละกรณี [32]

(a) กรณีบิตเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด (c) กรณีที่แย่มากที่สุด

จากนั้นเมื่อเราพิจารณาสัญญาณอ่านกลับของแบบจำลองสี่แบบต่อเนื่องโวโรนอย (discrete voronoi model) ทั้งนี้แบบจำลองนี้ปราศจากโอเวอร์ชูด จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล 1 (กรณีที่ดีที่สุด) แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับจะถูกเพิ่ม ซึ่งแสดงว่าเป็นการแทรกสอดแบบส่งเสริม และในทางกลับกัน เมื่อข้อมูลบิตที่เราต้องการคือ 1 และถูกล้อมรอบด้วย บิตข้อมูล -1 (กรณีที่แย่มากที่สุด) แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับจะต่ำมาก ซึ่งแสดงว่าเป็นการแทรกสอดแบบลดทอนส่งผลอาจทำให้เกิดการผิดพลาดในกระบวนการอ่านกลับ



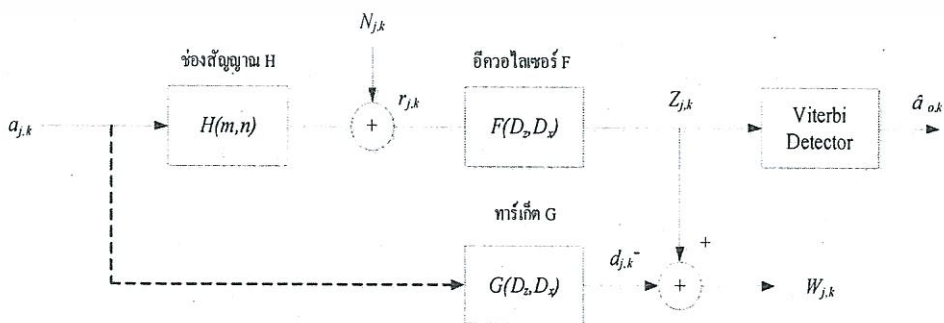
รูปที่ 3.4 รูปแบบสัญญาณอ่านกลับของแบบจำลองสื่อไวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องในแต่ละกรณี [32]
 (a) กรณีบิตเดี่ยว (b) กรณีที่ตีที่สุด (c) กรณีที่แย่มากที่สุด

3.2 วิธีการจัดรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึก

เนื่องจากการแทรกสอดสองมิติแบบลวดทอนนั้น มีผลทำให้เกิดการผิดพลาดต่อกระบวนการอ่านสัญญาณกลับของบิตข้อมูลที่เราต้องการ ดังนั้นจึงมีวิธีการเพื่อที่จะลดการผิดพลาดของระบบโดยวิธีการพื้นฐาน 3 วิธีคือ การออกแบบอีควอไลเซอร์การออกแบบวงจรตรวจหา และการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูล

3.2.1 การออกแบบอีควอไลเซอร์แบบสองมิติ

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีการลดผลกระทบของ ISI และ ITI โดยอาศัยการใช้ทาร์เก็ตสองมิติและอีควอไลเซอร์สองมิติ [12] ซึ่งจะมีสมรรถนะที่สูงกว่าอีควอไลเซอร์หนึ่งมิติ[14]



เอกสารนี้รูป 3.5 แบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับการออกแบบทาร์เก็ตสองมิติและอีควอไลเซอร์สองมิติ การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อข้อมูล $a \in \{\pm 1\}$ ผ่านช่องสัญญาณ BPMPR ที่มีผลตอบสนองสัญญาณพัลส์แบบสองมิติ $H(m, n)$ โดยจะได้สัญญาณอ่านกลับ $r_{j,k}$ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 3.1

$$r_{j,k} = \sum_m \sum_n h_{m,n} a_{j-m,k-n} + n_{j,k} \quad (3.1)$$

โดย $h_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ $H(m, n)$, $n_{j,k}$ คือสัญญาณรบกวน AWGN, $r_{j,k}$ คือสัญญาณอ่านกลับ และ $a_{j,k}$ คือสัญญาณขาเข้า

จากนั้นที่วงจรภาครับ เมื่อสัญญาณอ่านกลับ $r_{j,k}$ จะถูกนำไปยังอีควอลไลเซอร์สองมิติ $F(D_z, D_x)$ ที่เขียนแทนด้วยสมการที่ 3.2

$$F(D_z, D_x) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-K}^K f_{m,n} D_z^m D_x^n \quad (3.2)$$

โดย $f_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $F(D_z, D_x)$
 $\{M, K\}$ คือ เลขจำนวนเต็มบวก
 D_x คือ ตัวเลื่อนหน่วย (unit shift) ในแนวขวางแตรีก
 D_z คือ ตัวเลื่อนหน่วย (unit shift) ในแนวตามแตรีก

ทั้งนี้ $F(D_z, D_x)$ จะปรับคุณสมบัติของสัญญาณอ่านกลับให้สามารถเข้าได้กับทาร์เก็ตสองมิติ $G(D_z, D_x)$ ตามที่ต้องการ ก่อนที่จะส่งไปยังวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbidetector) เพื่อหาค่าประมาณของลำดับข้อมูล $a_{0,k}$ (ซึ่งก็คือ $\hat{a}_{0,k}$) ทั้งนี้ $G(D_z, D_x)$ ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 3.3

$$G(D_z, D_x) = \sum_{m=L}^L \sum_{n=0}^{2L} g_{m,n} D_z^m D_x^n \quad (3.3)$$

โดย $g_{m,n}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ $G(D_z, D_x)$
 L คือ เลขจำนวนเต็มบวก
 D_x คือ ตัวเลื่อนตำแหน่งในแนวตามแตรีก
 D_z คือ ตัวเลื่อนตำแหน่งในแนวตามแตรีก

จากนั้นวงจรภาครับจะทำการตรวจหาลำดับข้อมูลเฉพาะของแตรีกกลาง ($j = 0$) ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะข้อมูลทางด้านเอาท์พุทเท่านั้น โดยที่ $Z_{0,k}$ คือ อีควอไลเซอร์ของแตรีกกลาง และ $d_{0,k}$ คือ เอาท์พุทของแตรีกกลาง เมื่อกำหนดให้ $F(D_z, D_x)$ อยู่ในรูปเมทริกซ์ขนาด $(2M + 1) \times (2K + 1)$ ได้ดังสมการที่ 3.4

$$F = \begin{bmatrix} f_{-M,-K} & \cdots & f_{-M,0} & \cdots & f_{-M,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{0,-K} & \cdots & f_{0,0} & \cdots & f_{0,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{M,-K} & \cdots & f_{M,0} & \cdots & f_{M,K} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

กำหนดให้ $G(D_z, D_x)$ ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ขนาด $(2L + 1) \times (2L + 1)$ ได้ดังสมการที่ 3.5

$$G = \begin{bmatrix} g_{-L,0} & \cdots & g_{-L,L} & \cdots & g_{-L,2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{0,0} & \cdots & g_{0,L} & \cdots & g_{0,2L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{L,0} & \cdots & g_{L,L} & \cdots & g_{L,2L} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดย $2M + 1$ คือ จำนวนของหัวอ่าน

$N = 2K + 1$ คือ จำนวนแท็ปของอีควอไลเซอร์

$2L + 1$ คือ จำนวนแท็ปของทาร์เก็ตในแต่ละแถว

ดังนั้นเอาท์พุทของอีควอไลเซอร์ของแตรีกกลางจากแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMPR ในรูปที่ 3.5 สามารถแทนสมการของข้อมูลได้ตามสมการที่ 3.6

$$z_k = z_{0,k} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-K}^K f_{m,n} r_{-m,k-n} = f^T r_k \quad (3.6)$$

ซึ่ง z_k เป็นการทำคอนโวลูชันแบบสองมิติ (2D Convolution) ระหว่างข้อมูล $r_{j,k}$ กับ $f_{m,n}$ โดยที่

$$f = [f_{-M,-K} \quad f_{-M,-K+1} \quad \cdots \quad f_{-M,K} \quad f_{-M+1,-K} \quad \cdots \quad f_0 \quad \cdots \quad f_{M,K-1} \quad f_{M,K}]^T$$

ซึ่ง f คือเวกเตอร์แนวตั้งของอีควอไลเซอร์ ที่เป็นการนำสมาชิกในแต่ละแถวของเมทริกซ์ F มาเรียงต่อกันเป็นเวกเตอร์ f ที่มีสมาชิก $M(2N + 1)$ ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{r}_k = [r_{M,k+K} \quad r_{M,k+K-1} \quad \cdots \quad r_{M,k-K} \quad r_{M-1,k+K} \quad \cdots \quad r_{0,k} \quad \cdots \quad r_{M,k-K+1} \quad r_{M,K}]^T$$

ซึ่ง \mathbf{r}_k คือ เวกเตอร์แนวตั้งของสัญญาณอ่านกลับที่มีความสอดคล้องกับเวกเตอร์ \mathbf{f} ในลักษณะเดียวกันกับข้อมูลเอาท์พุทของทาร์เก็ตของแตรีกกลางมีค่าเท่ากับ d_k ซึ่งเขียนได้ตามสมการที่ 3.7

$$\mathbf{g} = [g_{-L,0} \quad g_{-L,1} \quad \cdots \quad g_{-L,2L} \quad g_{-L+1,0} \quad \cdots \quad g_{0,L} \quad \cdots \quad g_{L,2L-1} \quad g_{L,2L}]^T$$

โดยที่ \mathbf{g} คือ เวกเตอร์แนวตั้งของทาร์เก็ต โดยเป็นการนำสมาชิกในแต่ละแถวของเมทริกซ์ \mathbf{G} มาเรียงต่อกันเป็นเวกเตอร์ \mathbf{g}

เพราะฉะนั้นผลต่างระหว่างลำดับข้อมูล z_k และลำดับข้อมูล d_k มีค่าเท่ากับ w_k ซึ่งเขียนได้ตามสมการที่ 3.8

$$E[w^2] \text{ เท่ากับค่าข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Minimum square error: MSE)}$$

ตามสมการที่ 3.9 โดยที่

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{r}_k \mathbf{r}_k^T] \text{ คือเมทริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ของข้อมูล } \mathbf{r}_k,$$

$$\mathbf{P} = E[\mathbf{r}_k \mathbf{a}_k^T] \text{ คือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามของข้อมูล } \mathbf{r}_k \text{ กับ } \mathbf{a}_k$$

$$\mathbf{A} = E[\mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^T] \text{ คือเมทริกซ์อัตโนมัติสหสัมพันธ์ของข้อมูล } \mathbf{a}_k$$

$$d_k = d_{0,k} = \sum_{m=-L}^L \sum_{n=0}^{2L} g_{m,n} a_{-m,k-n} = \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k \quad (3.7)$$

$$w_k = z_k - d_k = \mathbf{f}^T \mathbf{r}_k - \mathbf{g}^T \mathbf{a}_k \quad (3.8)$$

$$E[w^2] = E[(z_k - d_k)^2] = \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{P} \mathbf{g} \quad (3.9)$$

ในการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอลไลเซอร์ โดยวิธีการข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (minimum mean-square error: MMSE) จะใช้เงื่อนไขข้อบังคับโมนิก โดยที่ $g_{0,0} = 1$ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการได้คำตอบเป็นศูนย์ ($\mathbf{f} = \mathbf{g} = 0$) และเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้งานวงจรตรวจหาวิเทอร์บีตีที่มีความซับซ้อนสูงมาก ก็จะทำการใส่เงื่อนไขข้อบังคับอีกข้อหนึ่งให้กับ \mathbf{g} โดยการทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ตของแตรีกข้างเคียงทั้งหมดมีค่าเป็น 0 เพื่อกำจัดผลกระทบของ ITI (zero ITI forcing constraint) และทำให้สามารถใช้งานวงจรตรวจหาวิเทอร์บีแบบ 1 มิติได้ ตัวอย่างของทาร์เก็ต \mathbf{G} ที่มีขนาด 3×3 ที่มีความยาวของ ISI และ ITI เท่ากับ 3 หน่วย ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้อบังคับสองข้อนี้ ดังแสดงในสมการที่ 3.10 โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ตามสมการที่ 3.11

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ g_{0,0} & 1 & g_{0,2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{g} = [0 \ 0 \ 0 \ g_{0,0} \ 1 \ g_{0,2} \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3.11)$$

ดังนั้นเงื่อนไขบังคับทั้งสองแบบจะสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\mathbf{E}^T \mathbf{g} = \mathbf{I} \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\mathbf{I} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.13)$$

และ

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ซึ่งวิธีการ MMSE ที่ใช้เงื่อนไขบังคับทั้งสองแบบจะพยายามทำให้ค่า MSE ในสมการที่ 3.9 มีค่าน้อยที่สุดโดยรักษาให้ $\mathbf{E}^T \mathbf{g} = \mathbf{I}$ ตลอดเวลา กล่าวคือการออกแบบทาร์เก็ตวิธีนี้จะทำให้ค่า $E[w^2]$ มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ λ คือเวกเตอร์แนวตั้งที่มีสมาชิกเป็นตัวคูณลากรางจ์จำนวน 7 ตัว (สอดคล้องกับจำนวนแถวของเมทริกซ์ \mathbf{E}^T) ตามสมการที่ 3.15

$$E[w^2] = E[(z_k - d_k)^2] = \mathbf{f}^T \mathbf{R} \mathbf{f} + \mathbf{g}^T \mathbf{A} \mathbf{g} - 2\mathbf{f}^T \mathbf{P} \mathbf{g} - 2\lambda^T (\mathbf{E}^T \mathbf{g} - \mathbf{I}) \quad (3.15)$$

จากนั้นจะทำการหาอนุพันธ์ของสมการ 3.15 เทียบกับ \mathbf{f}, \mathbf{g} และ λ แล้วให้ผลลัพธ์เท่ากับ 0 ก็จะได้คำตอบจะได้ตามสมการที่ 3.16 ถึง 3.18

$$\lambda = (\mathbf{E}^T (\mathbf{A} - \mathbf{P}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{E})^{-1} \mathbf{I} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{g} = (\mathbf{A} - \mathbf{P}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P})^{-1} \mathbf{E} \lambda \quad (3.17)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{g} \quad (3.18)$$

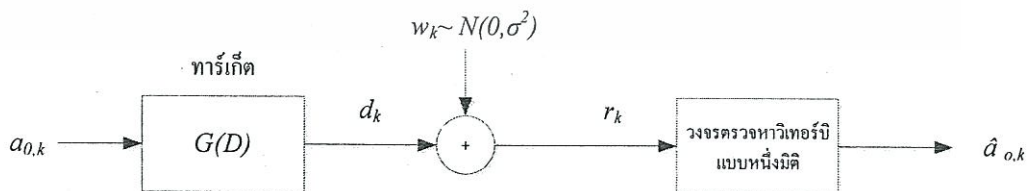
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งต่อไปเราจะหาสัมประสิทธิ์ของทาร์เก็ต (G) และสัมประสิทธิ์ของอีควอลไลเซอร์ (F) โดยอาศัยสมการที่ 3.16 ถึง 3.18

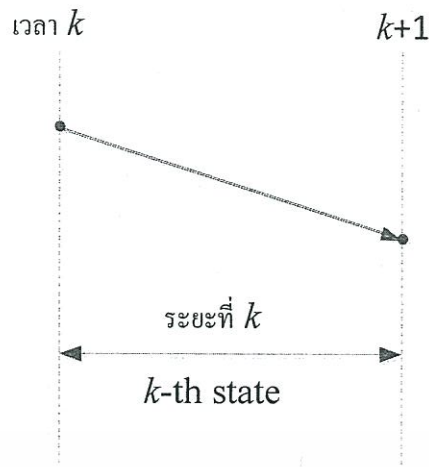
3.2.2 การออกแบบวงจรตรวจหาแบบสองมิติ

ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก หรือระบบฮาร์ดดิสก์ปัจจุบัน จะอาศัยพื้นฐานจากวงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi detector) ซึ่งเป็นวงจรตรวจหาลำดับ (sequence detector) ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยอัลกอริทึมวิเทอร์บี (Viterbi algorithm)[25] และใช้การถอดรหัสข้อมูลที่ได้ถูกเข้ารหัสด้วย “รหัสคอนโวลูชัน(convolution code) มาใช้ในการออกแบบวงจรตรวจหา (Detector design) ซึ่งในทางปฏิบัติที่พิจารณาว่าเป็นช่องสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสคอนโวลูชันประเภทหนึ่งที่มีอัตรารหัส (code rate) เท่ากับ 1 เมื่อมีอินพุตข้อมูลเข้ามา 1 บิต หลังจากทำการเข้ารหัสแล้วจะได้ข้อมูลเอาต์พุตออกมา 1 บิต ซึ่งวงจรตรวจหาวิเทอร์บีมีความสามารถที่จะถอดรหัสข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้จะมีการแทรกสอดแฉงมากกับข้อมูลก็ตาม โดยหากการแทรกสอดยิ่งมาก ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีก็จะยิ่งมากตามเช่นกัน และในทางกลับกันหากการแทรกสอดมีน้อย ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีก็จะน้อยลงตามหลักการทำงานของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีหนึ่งมิติมีความคล้ายกับหลักการทำงานของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีสองมิติ ซึ่งเมื่อเข้าใจหลักการทำงานของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีหนึ่งมิติแล้วก็สามารถเข้าใจหลักการทำงานของวงจรตรวจหาวิเทอร์บีสองมิติได้ดียิ่งขึ้น

โดยกำหนดให้อีควอลไลเซอร์เป็นแบบสมบูรณ์ (perfect equalizer) ตามแบบจำลองรูปที่ 3.6 เมื่อ $w_k \sim N(0, \sigma^2)$ คือสัญญาณรบกวน AWGN ในทางปฏิบัติวงจรตรวจหาวิเทอร์บีจะมีการทำงานที่อยู่บนพื้นฐานของแผนภาพเทรลลิส (trellis diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 นั้นจะอธิบายสัญลักษณ์ในแผนภาพเทรลลิสได้ดังนี้ $\psi_k = [a_k \ a_{k-1} \ \dots \ a_{k-v+1}]$ โดยสถานะ (state) ที่เวลา k , $Q = |A|^2$ คือจำนวนสถานะทั้งหมดที่เป็นไปได้ $|A|$ คือจำนวนค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของอินพุต v คือหน่วยความจำของช่องสัญญาณหรือทาร์เก็ต และ (u, q) คือสัญลักษณ์ที่ใช้แทนการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ u ไปสถานะ q

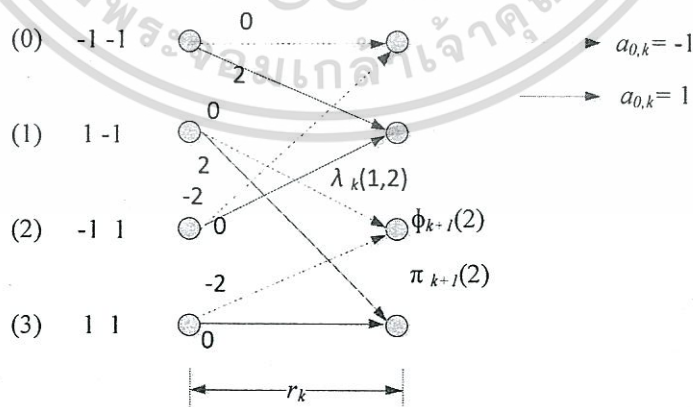


รูปที่ 3.6 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบสมมูล [32]



รูปที่ 3.7 คำอธิบายแผนภาพเทรลลิส [32]

ในช่องสัญญาณ PR4 สามารถแสดงตัวอย่างแบบแผนภาพเทรลลิสได้ดังรูปที่ 3.8 โดยที่ $H(D) = 1 - D^2$ ซึ่งมี $Q = 2^2 = 4$ สถานะ ที่สามารถแสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ (0),(1),(2)และ(3) เมื่อได้ข้อมูลอินพุต $a \in \{\pm 1\}$ ในการทำงานของอัลกอริทึมวิเทอร์บี จะต้องทำการคำนวณค่าเมตริสาขา (branch metric) ในทุกช่วงเวลาโดย ณ เวลา k ของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะ $k+1$ นั่นคือ $\Phi_{k+1}(q)$ และตัวนำหน้า (predecessor) สำหรับทุกสถานะ q ณ เวลา $k+1$ นั่นคือ $\pi_{k+1}(q)$ ซึ่งจะได้ค่าสถานะเริ่มต้นและสามารถกำหนดเส้นทางการเปลี่ยนสถานะที่ดีที่สุด (best transition) ตัวอย่างเช่น พิจารณาที่สถานะ (2) ณ เวลา $k+1$ จะมีเส้นทางการเปลี่ยนสถานะ 2 เส้นทางคือ (1,2)และ (3,2) อัลกอริทึมวิเทอร์บีจะเลือกเส้นทางการเปลี่ยนสถานะที่ดีที่สุดเพียงสายเดียวที่มาถึงสถานะ (2) ณ เวลา $k+1$ ถ้าหากเส้นทาง (1,2) คือเส้นทางการเปลี่ยนสถานะที่ดีที่สุด ดังนั้นจะได้ $\pi_{k+1}(2) = 1$



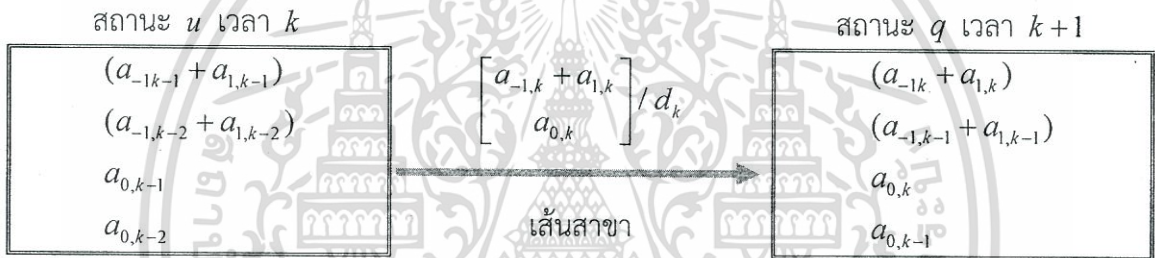
รูปที่ 3.8 แผนภาพเทรลลิสของช่องสัญญาณ PR4 $H(D) = 1 - D^2$ [32]

โดยในงานวิจัยที่ศึกษานี้[32] เลือกใช้ทาร์เก็ตแบบสมมาตรตามเมทริกซ์ของช่องสัญญาณขนาด 3×3 ตามสมการที่ 3.19 และจะหมายถึงทาร์เก็ตสองมิติ G ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของแตรีกบนและแตรีกล่างเท่ากันดังสมการที่ 3.14 และจะได้เอาท์พุทของทาร์เก็ตมีค่าเท่ากับ d_k ตามสมการที่ 3.20

$$G = \begin{bmatrix} G_{-1}(D) \\ G_0(D) \\ G_1(D) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & c & d \\ u & p & w \\ b & c & d \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$d_k = b(a_{-1,k} + a_{1,k}) + c(a_{-1,k+1} + a_{1,k-1}) + d(a_{-1,k-2} + a_{1,k-2}) + p(a_{0,k-1}) + w(a_{0,k-2}) \quad (3.20)$$

เนื่องจากระบบ BPMPR ใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร จึงทำให้สามารถใช้ข้อมูลอินพุทของแตรีกบน $a_{-1,k}$ และแตรีกล่าง $a_{1,k}$ มารวมกันได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงสถานะในหนึ่งเส้นทางสาขาของแผนภาพเทรลลิสที่สร้างทาร์เก็ตแบบสมมาตร[32]

$$(a_{-1,k} + a_{1,k}) = \begin{cases} -2 & \text{if } a_{-1,k} = -1 \text{ and } a_{1,k} = -1 \\ 0 & \text{if } a_{-1,k} = -1 \text{ and } a_{1,k} = +1 \\ 0 & \text{if } a_{-1,k} = +1 \text{ and } a_{1,k} = -1 \\ +2 & \text{if } a_{-1,k} = +1 \text{ and } a_{1,k} = +1 \end{cases} \quad (3.21)$$

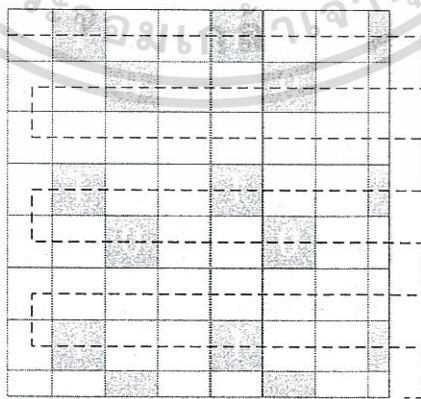
ในการนำข้อมูลอินพุทของทั้งสองแตรีกมาพิจารณาาร่วมกันจะช่วยให้ความซับซ้อนของวงจรตรวจหาวิเทอร์บิดลดลง ตามรูปที่ 3.9 ที่แสดงรายละเอียดของการเปลี่ยนสถานะในหนึ่งเส้นทางสาขาของแผนภาพเทรลลิสที่ได้จากทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตร โดยที่แต่ละสถานะ ณ เวลา k จะถูกกำหนดด้วยข้อมูล 4 ตัวได้แก่ ผลรวมของข้อมูลอินพุทแตรีกบนและแตรีกล่าง ณ เวลา $k-2$ ผลรวมของข้อมูลอินพุทแตรีกบนและแตรีกล่าง ณ เวลา $k-1$ ข้อมูลอินพุทของแตรีกกลาง ณ เวลา $k-2$ และข้อมูลอินพุทของแตรีกกลาง ณ เวลา $k-1$ ดังนั้นแผนภาพเทรลลิสที่สร้างจากทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตรจะมีสถานะทั้งหมด $3 \times 3 \times 2 \times 2 = 36$ สถานะ เนื่องจาก $(a_{-1,n} + a_{1,n}) \in \{0, \pm 2\}$ มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเป็นไปได้ทั้งหมด 3 แบบ สำหรับ $n = k - 1$ และ $k - 2$ และแต่ละสถานะ ณ เวลา k จะมีจำนวนเส้นสาขาทั้งหมด $3 \times 2 = 6$ เส้นสาขา ที่เดินทางไปยัง 6 สถานะที่แตกต่างกัน ณ เวลา $k + 1$ นอกจากนี้แต่ละเส้นสาขาได้ถูกกำหนดด้วยสัญลักษณ์ x / y โดยที่ $x = [(a_{-1,k} + a_{1,k})a_{0,k}]$ คือข้อมูลอินพุตของทาร์เก็ต ณ เวลา k และ $y = d_k$ คือข้อมูลเอาต์พุตของทาร์เก็ต ณ เวลา k ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของเส้นสาขานั้นๆ

3.2.3 การออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลแบบทั่วไป

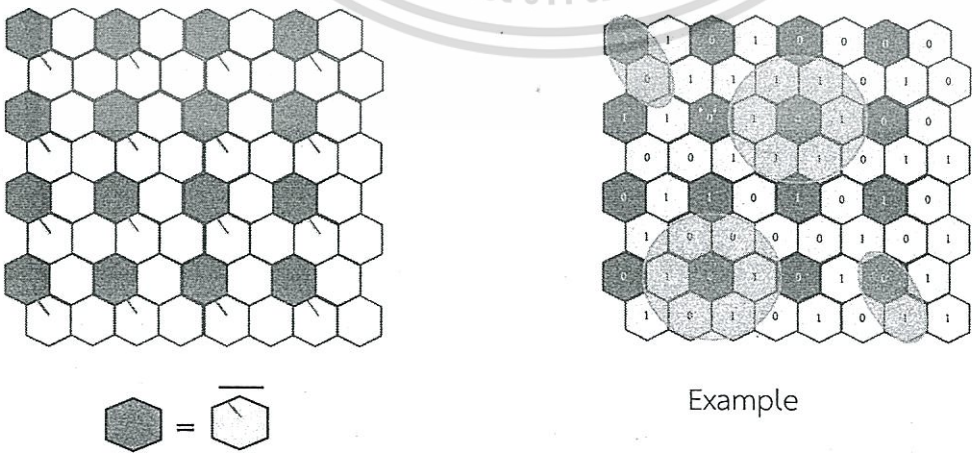
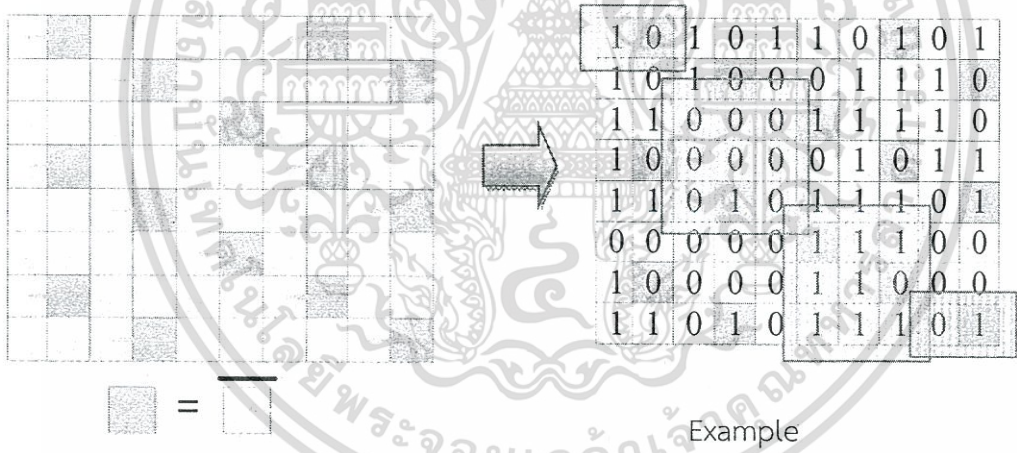
โดยทั่วไปการแทรกสอดสามารถเป็นไปได้ทั้งการแทรกสอดแบบส่งเสริมและการแทรกสอดแบบลดทอน โดยสามารถหาได้จากรูปแบบของสัญญาณอ่านกลับ (read back signal waveform) และค่าของบิตข้างเคียงในงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าเป็นการพิจารณาสัญญาณอ่านกลับแบบมีโอเวอร์ซุ่มในมีเดียแบบไม่มี soft under layer ที่แสดงในรูปที่ 3.2[2] โดยกรณีที่บิต “1” ถูกบันทึกในทุกบิตจะทำให้เป็นกรณีที่แย่ที่สุด คือแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับของบิตที่เราต้องการถูกลดทอนจึงง่ายต่อการที่จะอ่านสัญญาณอ่านกลับผิดพลาด นั่นคือการแทรกสอดสองมิติในรูปแบบลดทอน และแอมพลิจูดของบิตกลางจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อบิต “1” (แทนสถานะแม่เหล็ก +1) ถูกบันทึกแล้วล้อมรอบด้วย “0” (แทนสถานะแม่เหล็ก -1) ในเมทริกซ์ 3×3 เป็นกรณีที่แย่ที่สุด จะเป็นการแทรกสอดสองมิติชนิดส่งเสริม เพราะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับมีความแรงมาก และเพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน จึงมีการเข้ารหัสสองมิติที่มีอัตรา 7/9 ถูกออกแบบเป็นพิเศษใน [2] เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีที่แย่ที่สุด ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถลดบิตผิดพลาดได้ในระดับหนึ่ง โดยการอาศัยบิตเกิน (redundant bit) 0 และ 1 ถูกแทรกในตำแหน่งที่เจาะจงทุกๆเมทริกซ์ 3×3 ในข้อมูลที่ต้องการบันทึก แสดงในรูปที่ 3.10 แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเข้ารหัสนี้จะต้องอาศัยบิตเกิน ที่ไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ ดังนั้น shao และคณะ [3] จึงนำเสนอการเข้ารหัสที่มีอัตรารหัส 5/6 ซึ่งมีจำนวนบิตเกินที่ต่ำกว่าแต่มีประสิทธิภาพดีกว่าที่ผ่านมา



รูปที่ 3.10 แบบแผนการเข้ารหัสสองมิติที่มีอัตรารหัส 7/9 [2]

รูปแบบรหัสสองมิตินี้ถูกนำเสนอเพื่อจัดการกับผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติ เนื่องด้วยเพราะผลกระทบจากการแทรกสอดนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบสัญญาณอ่านกลับ มีหรือไม่มีโอเวอร์ชูตและบิตที่อยู่รอบๆ รูปแบบสัญญาณที่ต่างกัน และรูปแบบการเรียงตัวของของบิตข้อมูลในสื่อบันทึก ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะต้องทำการออกแบบรหัสที่เหมาะสม โดยเราจะอธิบายรูปแบบรหัสสองมิติที่มีการเรียงตัวในสื่อแบบสี่เหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยช่องสัญญาณที่ใช้จะเป็นแบบมีโอเวอร์ชูต

รูปแบบรหัสสองมิติที่ shao นำเสนอสำหรับสื่อบันทึกที่เรียงตัวแบบสี่เหลี่ยม ได้แสดงในรูปที่ 3.11 โดยจุดสีขาวจะถูกใช้เก็บข้อมูลและจุดสีดำจะใช้เก็บตัวพาริตีเช็ค (parity check bit) ของบิตที่อยู่ติดกันซึ่งในกรณีที่ย่ำที่สุด คือทุกบิตเป็น 0 หรือทุกบิตเป็น 1 ในเมทริกซ์ 3x3 สามารถถูกหลีกเลี่ยงได้ ยิ่งไปกว่านั้น บิตเกินยังเป็นตัวช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดอีกด้วย เนื่องจากการที่เป็นพาริตีเช็คของบางบิตข้อมูล ซึ่งก่อนหน้านี้รูปแบบรหัสสองมิติ 7/9 หลีกเลี่ยงกรณีที่แย่มากที่สุดโดยการใส่บิต 1 และ 0 ในตำแหน่งที่มีการเจาะจง (fixed place) โดยที่บิตเกินดังกล่าวไม่ได้ทำหน้าที่เก็บข้อมูลใดๆที่เราต้องการบันทึก จึงทำให้รูปแบบรหัสสองมิติที่ Shao นำเสนอนี้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบรหัส 7/9 และที่สำคัญอัตรารหัสที่เป็น 5/6 จึงทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้เพิ่มขึ้น 5.5% เมื่อเทียบกับรูปแบบรหัส 7/9



รูปที่ 3.11 แบบแผนการเข้ารหัสสองมิติของ Shao [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปแบบของรหัสสองมิติที่ได้นำเสนอนี้สามารถปรับให้สามารถใช้กับสื่อบันทึกที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 3.11 โดยมีหลักการเหมือนสื่อบันทึกที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมคือ จุดสีขาวจะถูกใช้เก็บข้อมูลและจุดสีดำจะใช้เก็บตัวพาริตีเช็ค จะเห็นได้ว่าการบันทึกจะไม่มีบิต 1 ที่ถูกล้อมรอบด้วยบิต 1 หรือบิต 0 ที่ถูกล้อมรอบด้วยบิต 0 เลย และสำหรับสื่อบันทึกที่เรียงตัวแบบหกเหลี่ยมนั้น จะมีอัตรารหัสที่ $3/4$

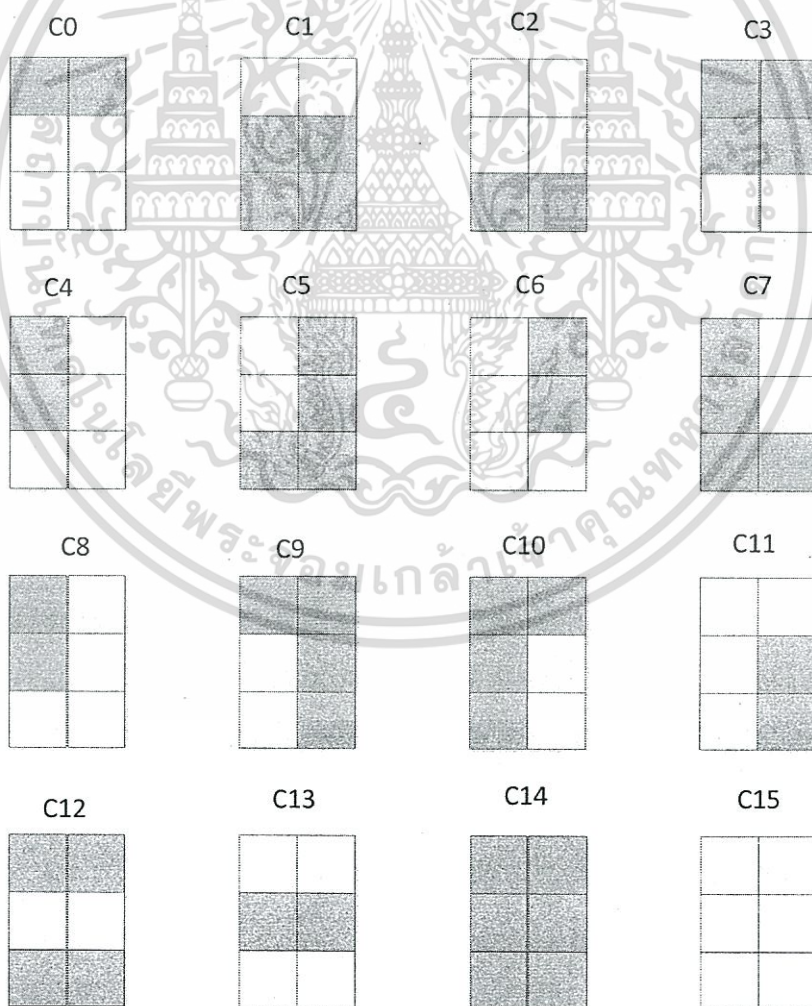
เมื่อพิจารณาด้านประสิทธิภาพ รูปแบบของการเข้ารหัสสองมิติที่ Shao นำเสนอเมื่อถูกประเมินด้วยแบบจำลอง ในกรณีที่ไม่ได้ใช้อัลกอริทึมใดๆ และไม่ได้ใช้วิเทอร์บีอัลกอริทึม ถึงจะมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีความซับซ้อนสูง [16] ซึ่งในแบบจำลองการแทรกสอดแบบสองมิติที่มีขนาด $L \times L$ จะทำให้วิเทอร์บีอัลกอริทึมมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลัง (exponential) L^2 ซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ [16] ดังนั้น shao จึงเลือกใช้อัลกอริทึมในการตรวจหาอย่างง่ายโดยอาศัยค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) เพื่อที่จะใช้ในการถอดรหัสสัญญาณในการจำลอง การใช้วงจรตรวจหาอย่างง่าย ช่วยให้เราสามารถปรับปรุงระบบในเรื่องการซับซ้อนเบื้องต้น ที่ซึ่งเราสามารถขดเชยประสิทธิภาพที่ลดลงไปได้โดยใช้รูปแบบรหัสสองมิติ นอกจากนี้อัลกอริทึมของวงจรตรวจหาที่มีความซับซ้อนกว่าก็สามารถนำมาใช้งานได้หากมีความซับซ้อนที่ต่ำใกล้เคียงกัน เช่นอัลกอริทึมวิเทอร์บีความซับซ้อนต่ำหรืออัลกอริทึมบีซีเจอร์ (low complexity Viterbi or BCJR)[18] โดยในแบบจำลองนี้จะมีบิตข้อมูลมากกว่า 15 ล้านบิต ที่จะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแบบสองมิติที่มีโอเวอร์ซูด นอกจากนั้น Shao มีการพิจารณาถึงการคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาะข้อมูล (position jitter) โดยกำหนดให้เป็นตัวรบกวนหลักในสื่อบันทึกแบบบิตแพตเทิร์นมีเดีย[14]

โดยในการทดลองของ Shao นี้การเลื่อนตำแหน่งของเกาะข้อมูล ได้ถูกกำหนด ให้มีการกระจายตัวในช่วงความผันผวนของตำแหน่งและช่วงความกว้างระหว่างจุด (dot period) ที่หลากหลายโดย Shao ได้ใช้แบบจำลองการจำลอง 3 แบบดังนี้ แบบที่ 1 เป็นการไม่ใช้รูปแบบรหัสใดๆในการลดผลกระทบจากการแทรกสอด แบบที่ 2 เป็นการไม่ใช้รูปแบบรหัสสองมิติ ที่มีอัตรารหัส $7/9$ ในการลดผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน และแบบที่ 3 เป็นการใช้การไม่ใช้รูปแบบการเข้ารหัสอย่างง่ายที่ Shao นำเสนอเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอนในกรณีที่แย่ที่สุด สำหรับสื่อบันทึกที่มีการเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมนั้นสามารถทำการเปรียบเทียบได้เพียงแบบที่ 1 และแบบที่ 3 โดยการเปลี่ยนรูปแบบรหัสสองมิติแบบหกเหลี่ยมตามที่กล่าวมาก่อนหน้า

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพนั้น Shao ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีการเข้ารหัส ระบบที่มีการเข้ารหัสที่มีอัตรารหัส $7/9$ และระบบที่มีการเข้ารหัสที่มีอัตรารหัส $5/6$ ที่ความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลและมีอัตราความผันผวนทางตำแหน่งข้อมูลเท่ากัน ผลจากการทดลองคือ ระบบที่มีการเข้ารหัสที่มีอัตรารหัส $5/6$ ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสามารถทำงานได้ดีเมื่อระบบมีความผันผวนทางตำแหน่งเกาะข้อมูลสูง

แม้ว่าการเข้ารหัสข้อมูลทั่วไปโดยการแทรกบิตเกินนั้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดรูปแบบข้อมูลที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบลวดทอนที่แย่ที่สุดได้ แต่ก็ถูกแลกด้วยการเพิ่มบิตเกินที่แทรกเข้าไปทำให้สูญเสียพื้นที่การจัดเก็บข้อมูล และยังมีข้อจำกัดที่ระบบจะต้องเป็นช่องสัญญาณที่มีโอเวอร์ชูดเท่านั้น

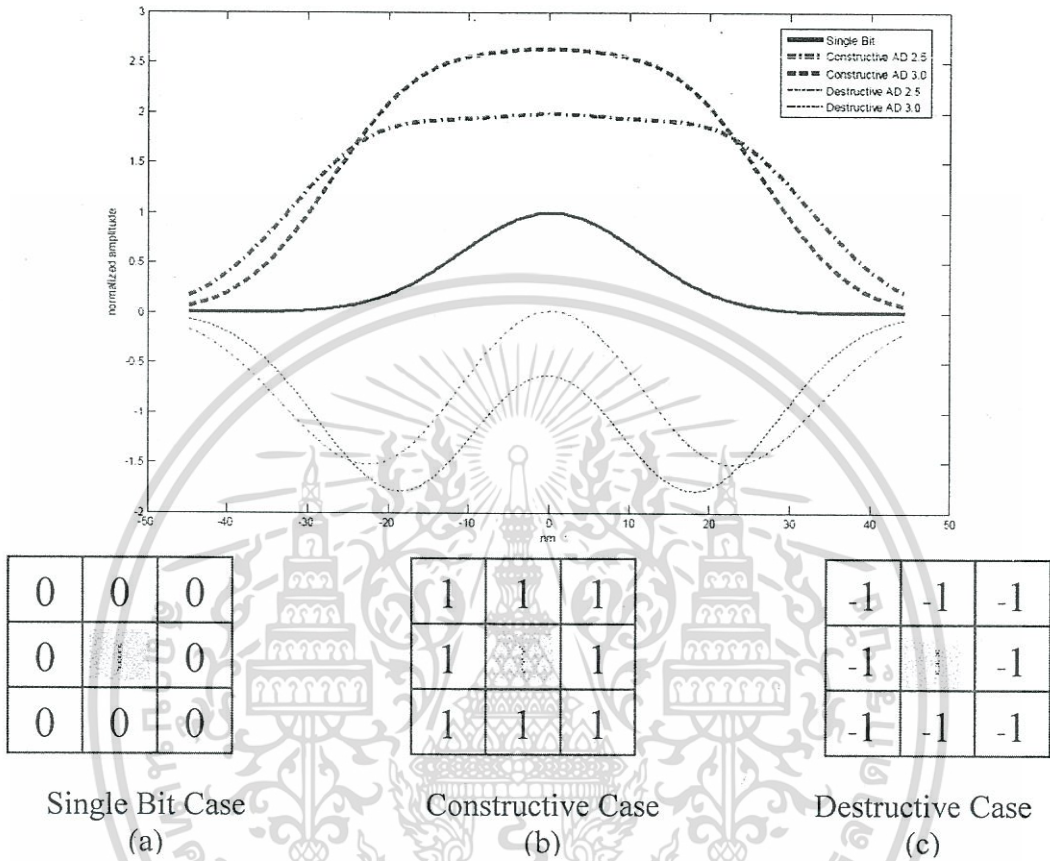
ต่อมา Autthasit และคณะ [7] ได้มีการนำเสนอการเข้ารหัสมอดูเลชันสองมิติที่หลีกเลี่ยงการแทรกบิตเกินและสามารถใช้งานที่ช่องสัญญาณที่ไม่มีโอเวอร์ชูดได้โดยได้ศึกษาตัวอย่างรหัสมอดูเลชันที่ใช้หลีกเลี่ยงการแทรกสอดในรูปแบบต่างๆ [19,20] เช่นการเข้ารหัสมอดูเลชันที่มีอัตรารหัส 4/6 [20] ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลแบบโฮโลกราฟฟิก (holographic data storage) ซึ่งการใช้แสงในการบันทึก และมีการแทรกสอดที่เรียกว่าการแทรกสอดระหว่างเพจ (inter page interference) ซึ่งการเข้ารหัสแบบนี้ต้องการหลีกเลี่ยงการบันทึกโดยการคือเปลี่ยนข้อมูลอินพุต 4 บิตให้กลายเป็นคำรหัส 6 บิต ที่ไม่ก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างเพจ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และที่ขั้นตอนถอดรหัสจะใช้หลักการระยะห่างยูคลีเดียน และการปรับปรุงวงจรตรวจหา ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 3.12 คำรหัสของการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัส 4/6 [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้นำแนวคิดดังกล่าวมาสร้างเป็นการเข้ารหัสมอดูเลชัน สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นมีเดียโดยได้ศึกษาผลกระทบจากการเกิดการแทรกสอดสองมิติในช่องสัญญาณที่ปราศจากโอเวอร์ชูดตังรูปที่ 3.14



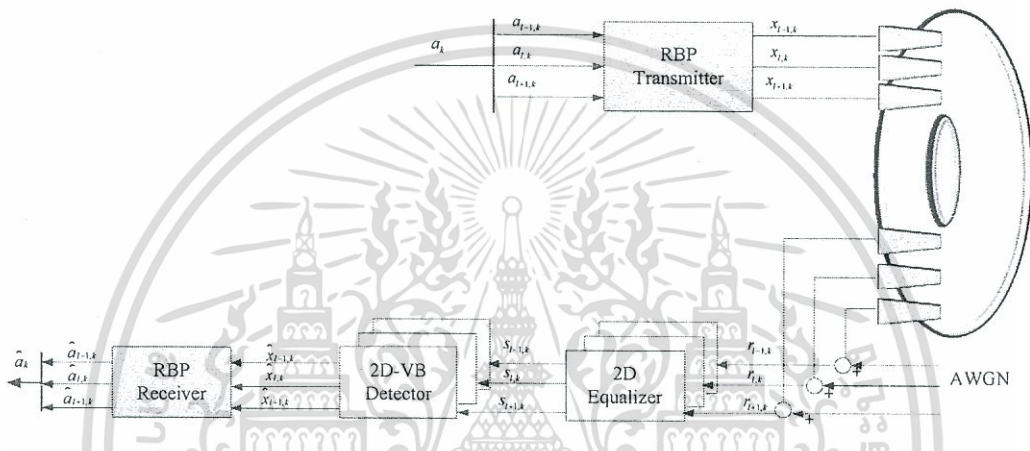
รูปที่ 3.13 การศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติเมื่อความหนาแน่นการบันทึกข้อมูลเพิ่มขึ้น [31]

จากรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาแน่นของการบันทึกเพิ่มขึ้นจาก 2.5 Tb/in^2 เป็น 3.0 Tb/in^2 แอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับจะเพิ่มจาก 2 เป็น 2.5 ในกรณีที่บิตที่อยู่ล้อมรอบมีค่าเหมือนกับบิตที่อยู่ตรงกลางซึ่งเป็นรูปแบบส่งเสริม และจะลดลงจาก 0 เป็น -0.5 ในกรณีที่บิตที่อยู่ล้อมรอบมีค่าตรงข้ามกับบิตที่อยู่ตรงกลางซึ่งเป็นกรณีลดทอนสัญญาณ ทำให้ทราบถึงผลการแทรกสอดจะรุนแรงขึ้นเมื่อความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลสูงขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของสมมุติฐานและมีการพัฒนาวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก เพื่อใช้ในช่องสัญญาณที่ไม่มีโอเวอร์ชูดและไม่มีการแทรกบิตเกิน

3.3 วิธีการจัดรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึก

3.3.1 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก (Recorded-bit patterning: RBP)[32]

แนวคิดของอัลกอริทึม RBP เกิดขึ้นจาก Autthasit และคณะ ได้มีการนำเสนอความต้องการหลีกเลี่ยงรูปแบบของบิตข้อมูลที่ต้องการบันทึกที่จะก่อให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอน ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายในการอ่านกลับของข้อมูล เริ่มจากการพิจารณาในช่องสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดทางตำแหน่ง ซึ่งแบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม RBP แสดงในรูปที่ 3.14



รูป 3.14 แบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม RBP

เมื่อลำดับบิตข้อมูล (data sequence) $a_k \in \{\pm 1\}$ ที่เป็นลำดับข้อมูลที่ต้องการบันทึก โดยแบ่งออกเป็น 3 แทร็ก จากนั้นจะถูกส่งไปยังอัลกอริทึม RBP เพื่อทำการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก โดยสัญญาณอ่านกลับของบิตข้อมูลที่ k^{th} ซึ่งอยู่บนแทร็ก l^{th} เป็นดังสมการที่ (3.22)

$$r_{l,k} = \sum_n \sum_m h_{m,n} x_{l-m,k-n} + n_{l,k} = x_{l,k} \otimes h_{l,k} + n_{l,k} \quad (3.22)$$

โดย

$$h_{m,n} = P(-mT_x, -nT_z), \quad \{m, n\} \in (-L, 0, L) \quad (3.23)$$

$x_{l,k}$ เป็นบิตข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสที่พร้อมทำการบันทึกลงสื่อบันทึก

$h_{m,n}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ

m เป็นตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวขวางแทร็ก

n เป็นตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก

- ⊗ คือเครื่องหมายการดำเนินการคอนโวลูชันแบบสองมิติ
 $n_{l,k}$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก

ในทางปฏิบัติเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ $h_{m,n}$ ในระบบ BPMR ได้จากการชักตัวอย่าง (sampling) ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์ของเกาะข้อมูล ที่มีคาบเวลาบิต (bit period) T_x และความกว้างของแทร็ก (track pitch) T_z โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.23) และสามารถหาผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบสองมิติสำหรับระบบ BPMR เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.24)[12,13]

$$P(x, z) = (A) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x + \Delta_x}{c(PW_x)} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta_z}{c(PW_z)} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.24)$$

โดย	$P(x, z)$	คือผลตอบสนองสัญญาณเกาส์เซียนแบบสองมิติ
	$2L+1$	คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณแบบสองมิติ
	A	คือ แอมพลิจูดของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบสองมิติ ($A = 1$)
	Δ_x	คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก
	Δ_z	คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเกาะข้อมูลในแนวขวางแทร็ก
	PW_x	คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวตามแทร็ก
	PW_z	คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวขวางแทร็ก
	PW_{50}	คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูดสูงสุด
	c	คือ ค่าคงตัวที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณเกาส์เซียน ($c = 1/2.3548$)
	Δ_x	คือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก
	Δ_z	คือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวขวางแทร็ก

ทั้งนี้ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาะข้อมูล (position jitter noise) จะถูกจำลองโดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวน σ_j^2 โดย σ_j เป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวบิต T_x

จากรูปที่ 3.14 เมื่อลำดับข้อมูล a_k ถูกแบ่งออกเป็น 3 แทร็ก $\{a_{l-1,k}, a_{l,k}, a_{l+1,k}\}$ ก่อนจะส่งเข้าวงจรเข้ารหัส RBP เพื่อที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึกเป็น 3 ลำดับข้อมูล $\{x_{l-1,k}, x_{l,k}, x_{l+1,k}\}$ จำนวน 3 แทร็ก ที่ติดกันคือแทร็ก $(l-1)$, (l) และ $(l+1)$ ตามลำดับ และใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการอ่านข้อมูลกลับที่วงจรถอดรหัส ทั้ง 3 แทร็กจะถูกอ่านโดย 3 หัวอ่าน หรือใช้ 1 หัวอ่านที่ละแทร็กแล้วเก็บข้อมูลไว้ในบัฟเฟอร์หรือหน่วยความจำที่ละแทร็ก จากนั้นที่กระบวนการอ่าน (read process) ลำดับข้อมูลของสัญญาณอ่านกลับ $r_{l,k}$ จะถูกปรับ(equalize) โดยอีควอลไลเซอร์แบบสองมิติ (2D equalizer) ขนาด 3×7 ที่ถูกออกแบบโดยทาร์เก็ตสองมิติขนาด 3×3 แบบสมมาตร (2D symmetric equalizer) และวิธีการ minimum mean square error: MMSE [21,22,23] เพื่อทำการปรับสัญญาณให้เป็นลำดับข้อมูล $s_{l,k}$ จากนั้นจะผ่านวงจรตรวจหาวิเทอร์บีสองมิติ (2D Viterbi detector) โดยอาศัยแผนภาพทริลลิส (trellis diagram) 64 สถานะ (state) ที่มี 8 เส้นสาขาออกจากแต่ละสถานะ (outgoing branches) [22,23] เพื่อหาลำดับข้อมูลที่เป็นไปได้มากที่สุด ก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลไปยังอัลกอริทึม RBP ที่ภาครับเพื่อทำการเรียงลำดับข้อมูลใหม่ซึ่งต้องอาศัยบัฟเฟอร์หรือหน่วยความจำในการเก็บข้อมูล

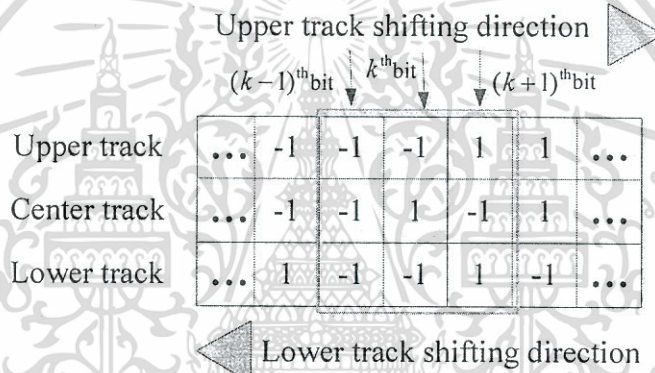
การทำงานของอัลกอริทึม RBP อธิบายโดยการพิจารณาหน้าต่างอาร์เรย์ 3×3 ที่มีบิตข้อมูล 9 บิต โดยแบ่งเป็น 3 บิตในแทร็กกลาง $[a_{l,k-1}, a_{l,k}, a_{l,k+1}]$, 3 บิตจากแทร็กบน $[a_{l-1,k-1}, a_{l-1,k}, a_{l-1,k+1}]$ และ 3 บิตจากแทร็กล่าง $[a_{l+1,k-1}, a_{l+1,k}, a_{l+1,k+1}]$ โดยหน้าต่างนี้จะใช้ในการค้นหารูปแบบข้อมูล $[a_{l-1,k-1}, a_{l-1,k}, a_{l-1,k+1}, a_{l,k-1}, a_{l,k}, a_{l,k+1}, a_{l+1,k-1}, a_{l+1,k}, a_{l+1,k+1}]$ ที่จะก่อให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดแบบลวดทอน ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการอ่านกลับที่วงจรถอดรหัส ในการทำงานจะเริ่มจากสัญญาณอ้างอิง (reference signal) เป็นสัญญาณอ่านกลับของบิตเดียวที่ไม่มีโอเวอร์ซูด ตามรูปที่ 3.3 (a) ที่ได้มาจากแบบจำลองของช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนใดๆ จากนั้นจะทำการพิจารณารูปแบบของข้อมูลทั้งหมดในหน้าต่างอาร์เรย์ขนาด 3×3 เพื่อพิจารณาแอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับของบิตกลาง $\{r_{l,k}\}$ หากมีแอมพลิจูดมีค่า (เครื่องหมาย)ตรงข้ามกับสัญญาณอ้างอิงจะถือว่าเป็นรูปแบบข้อมูลแบบลวดทอน (destructive data pattern) และหากนอกเหนือจากนี้จะถือว่าเป็นรูปแบบส่งเสริม (constructive data pattern) โดยตารางที่ 3.1 แสดงรูปแบบข้อมูลแบบลวดทอนที่ได้ได้สัญญาณอ่านกลับ ที่มีเครื่องหมายตรงข้ามกับข้อมูลบิตเดียว

ตารางที่ 3.1 รูปแบบข้อมูลแบบลดทอน[32]

Destructive pattern number	Upper Track			CenterTrack			Lower Track		
	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$
1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1
3	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
4	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
5	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1
7	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1
8	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1
9	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
10	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
11	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
12	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
13	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
14	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
15	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
16	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
18	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
19	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
20	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
21	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1
22	1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
23	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	-1
24	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
25	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
26	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
27	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
28	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1
29	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1
30	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
31	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
32	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1
33	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
34	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของวงจรถ่ายรหัส RBP อธิบายได้ดังรูปที่ 3.15 โดยการพิจารณาข้อมูล 3 แทร็ก จากนั้นทำจากเลื่อนหน้าต่างขนาด 3×3 ที่มีจุดศูนย์กลางที่แทร็กล่าง (l) จากจุดเริ่มต้นทางซ้ายสุดของแทร็ก ไปยังตำแหน่งสุดท้ายทางขวาสุดของแทร็ก แล้วนับจำนวนรูปแบบลวดทอนที่เกิดขึ้นทั้งหมดโดยอาศัยการเทียบกับตารางที่ 3.1 จากนั้นกำหนดให้แทร็กล่าง (l) คงที่ จากนั้นทำการเลื่อนวน (circular shift) ในแทร็บบน ($l-1$) และแทร็กล่าง ($l+1$) เพื่อสร้างรูปแบบข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งในแต่ละการเลื่อนวนแทร็บบน ($l-1$) และแทร็กล่าง ($l+1$) ก็จะทำซ้ำในการเลื่อนหน้าต่างทุกครั้ง เพื่อนับจำนวนรูปแบบข้อมูลลวดทอนทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเลื่อนวนจนครบทั้งหมดแล้ว จะทำการเทียบว่าการเลื่อนครั้งใดที่ให้รูปแบบข้อมูลลวดทอนที่น้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด จากนั้นจะทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ใช้ในการเลื่อนวนของชุดข้อมูลชุดนั้น เพื่อใช้ในการเลื่อนวนข้อมูลให้กลับมาตำแหน่งเดิม ในวงจรถ่ายรหัส RBP ที่ภาครับ



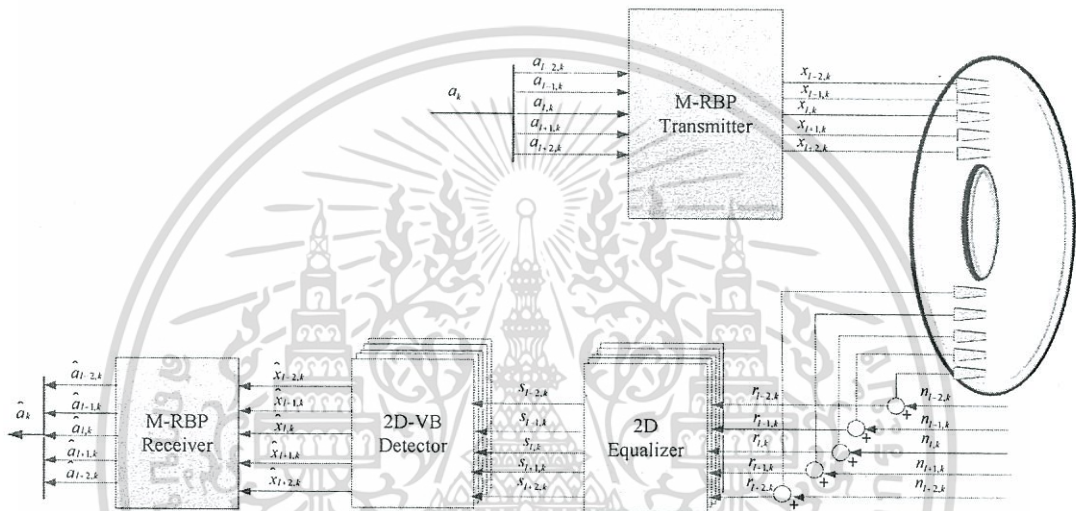
รูปที่ 3.15 หน้าต่างขนาด 3×3 ของวิธีการ RBP[32]

3.3.2 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกหลายแทร็ก (Multi-track Recorded-bit patterning: M-RBP)[32]

ก่อนหน้านี้ได้มีการกล่าวถึง วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึก (Recorded-bit patterning: RBP) แต่เนื่องจากวิธีการ RBP ถูกออกแบบเพื่อช่องสัญญาณแบบ 3 แทร็ก ต่อมา Autthasit และคณะ ได้มีการนำเสนอวิธีการ M-RBP กับช่องสัญญาณที่ไม่จำกัดจำนวนแทร็กดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยเริ่มต้นจากการแบ่งลำดับบิตข้อมูล (data sequence) $a_k \in \{\pm 1\}$ ที่เป็นลำดับข้อมูลที่ต้องการบันทึก โดยแบ่งออกเป็น 5 แทร็ก จากนั้นจะถูกส่งไปยังอัลกอริทึม M-RBP เพื่อทำการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก โดยมีหลักการที่คล้ายกับอัลกอริทึม RBP คือพิจารณาข้อมูล 3 แทร็ก จากนั้นทำจากเลื่อนหน้าต่างขนาด 3×3 ที่มีจุดศูนย์กลางที่แทร็กล่าง (l) จากจุดเริ่มต้นทางซ้ายสุดของแทร็ก ไปยังตำแหน่งสุดท้ายทางขวาสุดของแทร็ก

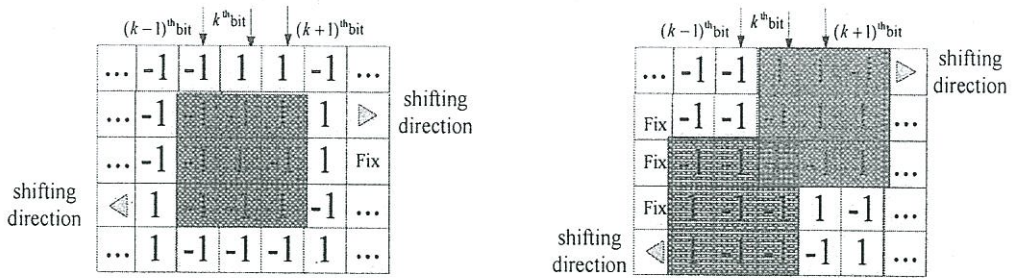
แล้วนับจำนวนรูปแบบลวดทอนที่เกิดขึ้นทั้งหมดโดยอาศัยการเทียบกับตารางที่ 3.1 จากนั้นกำหนดให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตรีกกลาง (l) คงที่ จากนั้นทำการเลื่อนวน (circular shift) ในแตรีกบน ($l-1$) และแตรีกล่าง ($l+1$) เพื่อสร้างรูปแบบข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งในแต่ละครั้งของการเลื่อนวนแตรีกบน ($l-1$) และแตรีกล่าง ($l+1$) ก็จะทำซ้ำในการเลื่อนหน้าตาต่างทุกครั้ง เพื่อนับจำนวนรูปแบบข้อมูลสตทอนทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อทำการเลื่อนวนจนครบทั้งหมดแล้ว จะทำการเทียบว่าการเลื่อนครั้งใดที่ให้รูปแบบข้อมูลสตทอนที่น้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด จากนั้นจะทำการบันทึกจำนวนครั้งที่ใช้ในการเลื่อนวนของชุดข้อมูลชุดนั้น เพื่อใช้ในการเลื่อนวนข้อมูลให้กลับมาตำแหน่งเดิม ในวงจรถอดรหัส M-RBP ที่ภาครับ



รูปที่ 3.16 แบบแบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียพร้อมอัลกอริทึม M-RBP

จากนั้นจะใช้ หน้าต่างขนาด 3×3 จำนวน 2 ชุดที่เป็นอิสระจากกัน โดยที่ศูนย์กลางของหน้าต่างที่แตรีกบน ($l-1$) และแตรีกล่าง ($l+1$) จากนั้นก็กำหนดให้ แตรีกบน ($l-1$) และแตรีกล่าง ($l+1$) คงที่ แล้วทำการเลื่อนวนแตรีกที่ $l-2$ และ $l+2$ เพื่อหาจำนวนครั้งในการเลื่อนวนชุดข้อมูล ที่ทำให้ได้รูปแบบที่ดีที่สุดเช่นเดียวกับการเลื่อนวนในส่วนแรก ของชุดข้อมูลในแตรีก $\{l-2, l-1$ และ $l\}$ และ $\{l, l+1$ และ $l+2\}$ เมื่อทำเสร็จแล้วจะได้รูปแบบของข้อมูลทั้ง 5 แตรีกที่พร้อมจะทำการบันทึกลงสื่อบันทึกและจำนวนครั้งในการเลื่อนวนแตรีก $l-2$ และ $l+2$ พร้อมจำนวนครั้งที่ทำให้การเลื่อนวนชุดข้อมูลดีที่สุด และผู้นำเสนอได้แนะนำถึงในกรณีที่มีแตรีกข้อมูลมากกว่า 5 แตรีกได้โดยการดำเนินการในลักษณะเดียวกับการเลื่อนวนในส่วนที่สองซ้ำจนกว่าจะครบทุกแตรีก โดยไม่จำเป็นต้องมีแถบป้องกันกันระหว่างแตรีกซึ่งทำให้เป็นการเพิ่มเนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลอีกทางหนึ่งด้วย



รูปที่ 3.17 หน้าต่างขนาด 3x3 ของวิธีการ M-RBP [32] (a) การดำเนินการในส่วนแรก
(b) การดำเนินการในส่วนหลัง

โดยวิธีการ M-RBP ได้มีการนับจำนวนรูปแบบข้อมูลที่เกิดการลดทอนที่เกิดขึ้น มาใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulation weight calculation) โดยกำหนดค่าน้ำหนักที่ใช้บอกความรุนแรงของการแทรกสอดสองมิติ ซึ่งสามารถเป็นไปได้ทั้งทางบวก (positive) และทางลบ (negative) โดยขึ้นอยู่กับว่าการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นในรูปแบบส่งเสริม (constructive) หรือแบบลดทอน (destructive) โดยมีการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการสร้างรูปแบบข้อมูลขนาด 3x3 ที่จะเป็นไปได้ทั้งหมด และนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละรูปแบบที่ได้มาทำการคำนวณเทียบกับสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยวดังสมการที่ 3.25

$$W_i = \begin{cases} Y_i - Y_s & Y_i > 0 \text{ and } Y_s > 0 \\ -(Y_i + Y_s) & Y_i < 0 \text{ and } Y_s > 0 \\ -(Y_i + |Y_s|) & Y_i > 0 \text{ and } Y_s < 0 \\ |Y_i| - |Y_s| & Y_i < 0 \text{ and } Y_s < 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

โดย สมการนี้เป็นการนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละรูปแบบมาคำนวณเทียบกับสัญญาณอ่านกลับบิตเดี่ยว W_i คือค่าน้ำหนักรูปแบบที่ i ของข้อมูล 3x3, Y_i คือแอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยว โดยวิธีการนี้ได้ค่าน้ำหนักจำนวน 512 รูปแบบ ในตัวอย่างตารางที่ 3.2 โดยจะนำค่าน้ำหนักนี้ไปใช้แทนตารางรูปแบบลดทอน มีวิธีการสะสมค่าน้ำหนักทั้งหมด 3 วิธี วิธีการแรกใช้การหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักทั้งค่าบวกและลบ วิธีที่สองจะหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักแต่เฉพาะค่าบวก และวิธีสุดท้ายจะหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักแต่เฉพาะค่าลบ โดยวิธีสุดท้ายเป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากเพราะสองวิธีแรกบางค่าน้ำหนักแบบลดทอนจะถูกกลบล้างไปด้วยรูปแบบส่งเสริม ทำให้การพิจารณาหารูปแบบที่ดีที่สุดนั้น กลับไม่ได้รูปแบบชุดข้อมูลที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าน้ำหนัก [30]

Index	Upper Track			CenterTrack			Lower Track			Weight
	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$	$(k-1)^{th}$	k^{th}	$(k+1)^{th}$	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.1255
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.0298
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.4947
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.3991
5	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.0298
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0.0957
16	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0.0000
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1.1255
18	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1.0298
19	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-0.4947
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
254	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	0.3991
255	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	0.9341
256	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1.0298
257	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.0298
258	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0.9341
259	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0.9331
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
494	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-0.4947
495	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1.0298
496	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1.1255
497	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0.0000
498	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0.0957
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
508	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1.0298
509	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0.3991
510	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	0.4947
511	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0298
512	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.1255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP)[32]

จากนั้น Autthasit และ Chanon ได้มีการนำเสนอวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP) [15] จากแนวคิดของอัลกอริทึม RBP ที่ Autthasit และคณะ ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ โดยความต้องการหลักเลือกรูปแบบของบิตข้อมูลที่ต้องการบันทึกที่จะก่อให้เกิดการแทรกสอดแบบลดทอน ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่ายในการอ่านกลับของข้อมูล เริ่มจากการพิจารณาในช่องสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดทางตำแหน่ง ซึ่งแบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้องพร้อมอัลกอริทึม RBP แสดงในรูปที่ 3.18 โดยวิธีการนี้ จะแตกต่างจากวิธีการที่ผ่านมาในส่วนการให้นำหน้าของจำนวนบิตข้างเคียงมาคิดเพียง 7 บิต ภายใต้ผลการตอบสนองของหัวอ่าน ตามรูปที่ 3.20 คือ 3 บิตในแทร็กกลาง (l) และ 2 บิต จากแทร็กบน ($l-1$) และ 2 บิต จากแทร็กล่าง ($l+1$)

เมื่อลำดับบิตข้อมูล (data sequence) $a_k \in \{\pm 1\}$ ที่เป็นลำดับข้อมูลที่ต้องการบันทึก โดยแบ่งออกเป็น 3 แทร็ก จากนั้นจะถูกส่งไปยังอัลกอริทึม S-RBP เพื่อทำการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก โดยสัญญาณอ่านกลับของบิตข้อมูลที่ k^{th} ซึ่งอยู่บนแทร็ก l^{th} เป็นดังสมการที่ (3.26)

$$r_{l,k} = \sum_n \sum_m b_{l-m,k-n} h(m,n) + w_{l,k} \quad (3.26)$$

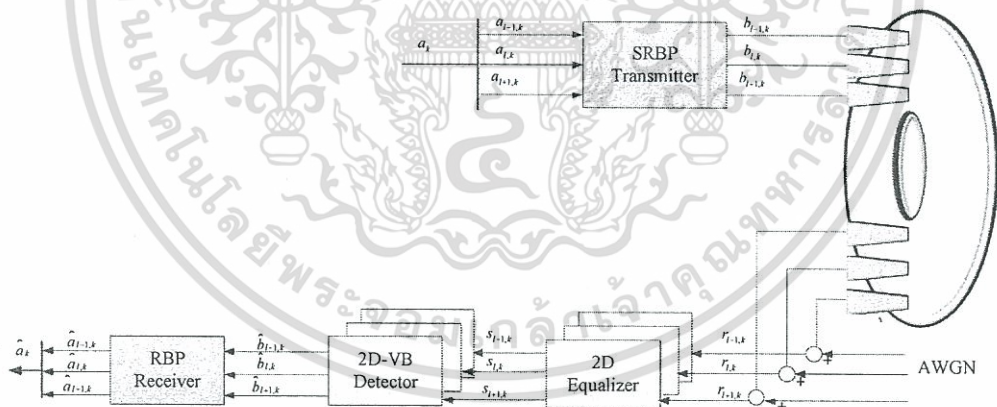
เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ $h_{m,n}$ ในระบบ S-BPMR ได้จากการซัดตัวอย่าง (sampling) ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์ของเกาะข้อมูล ที่มีคาบเวลาบิต (bit period) T_x แต่ด้วยระยะห่างระหว่างบิตของ มีเดียชนิดนี้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของคาบเวลาในมีเดียแบบปกติ จึงมีการบวกด้วย 0.5 และความกว้างของแทร็ก (track pitch) T_z โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.27) และสามารถหาผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เขียนแบบสองมิติสำหรับระบบ S-BPMR เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.28)

$$h_{m,n} = P((m+0.5n)T_x, nT_z) \quad (3.27)$$

$$P(x,z) = (A) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x+\Delta_x}{c(PW_x)} \right)^2 + \left(\frac{z+\Delta_z}{c(PW_z)} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.28)$$

- $P(x, z)$ คือ ผลตอบสนองสัญญาณเกาส์เซียนแบบสองมิติ[12]
- A คือ แอมพลิจูดของผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาส์เซียนแบบสองมิติ ($A = 1$)
- Δ_x คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเกาซ์ข้อมูลในแนวตามแตรีก,
- Δ_z คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเกาซ์ข้อมูลในแนวขวางแตรีก
- PW_x คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวตามแตรีก
- PW_z คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวขวางแตรีก
- PW_{50} คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูดสูงสุด
- Δ_x คือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาซ์ข้อมูลในแนวตามแตรีก
- Δ_z คือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเกาซ์ข้อมูลในแนวขวางแตรีก
- c คือ ค่าคงตัวที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณเกาส์เซียน ($c = 1/2.3548$)

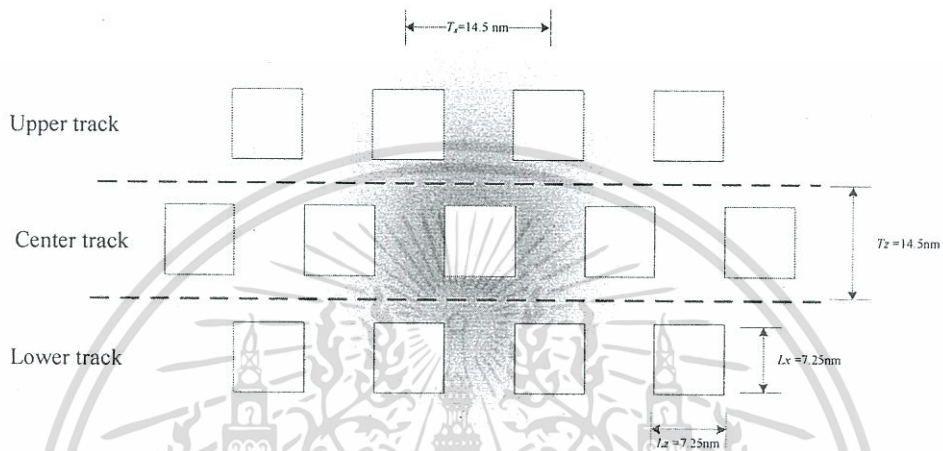
โดยกำหนดให้ Δ_x, Δ_z ซึ่งเป็นความผิดพลาดของตำแหน่งเกาซ์ข้อมูล (position jitter noise) จะถูกจำลองโดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบเกาส์เซียนที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวน σ_j^2 เมื่อ σ_j เป็นเปอร์เซ็นต์ของความยาวบิต T_x



รูปที่ 3.18 แบบจำลองของช่องสัญญาณการบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้องพร้อมอัลกอริทึม S-RBP[31]

จากรูปที่ 3.18 เมื่อลำดับข้อมูล a_k ถูกแบ่งออกเป็น 3 แตรีก $\{a_{l-1,k}, a_{l,k}, a_{l+1,k}\}$ ก่อนจะส่งเข้าวงจรเข้ารหัส SRBP เพื่อที่จะทำการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึกเป็น 3 ลำดับข้อมูล $\{b_{l-1,k}, b_{l,k}, b_{l+1,k}\}$ จำนวน 3 แตรีก ที่ติดกันคือแตรีก $(l-1), (l)$ และ $(l+1)$ ตามลำดับ และในกระบวนการอ่านข้อมูลกลับ ที่วงจรถ่ายกลับ ทั้ง 3 แตรีกจะถูกอ่านโดย 3 หัวอ่าน หรือใช้ 1 หัวอ่านที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละแตร็กแล้วเก็บข้อมูลไว้ในบัฟเฟอร์หรือหน่วยความจำที่ละแตร็ก จากนั้นที่กระบวนการอ่าน (read process) ลำดับข้อมูลของสัญญาณอ่านกลับ $r_{l,k}$ จะถูกปรับ(equalize) โดยอีควอลไลเซอร์แบบสองมิติ (2D equalizer) เพื่อทำการปรับสัญญาณให้เป็นลำดับข้อมูล $s_{l,k}$ จากนั้นจะผ่านวงจรตรวจหาวิเทอร์บีสองมิติ (2D Viterbi detector) ก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลไปยังอัลกอริทึม SRBP ที่ภาครับเพื่อทำการเรียงลำดับข้อมูลใหม่ซึ่งต้องอาศัยบัฟเฟอร์หรือหน่วยความจำในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.19 ขอบเขตผลการตอบสนองของหัวอ่านในสื่อบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดียที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง[32]

การทำงานของอัลกอริทึม SRBP อธิบายอย่างง่ายโดย เริ่มจากการพิจารณาบิตข้อมูล 7 บิต ภายใต้ผลการตอบสนองของหัวอ่าน ตามรูปที่ 3.19 คือ 3 บิตในแตร็กกลาง (l) และ 2 บิตจากแตร็กบน ($l-1$) และ 2 บิต จากแตร็กล่าง ($l+1$) โดยจะใช้ในการค้นหารูปแบบข้อมูลที่จะก่อให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดแบบสลดทอน ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการอ่านกลับ โดยจะทำการยึดข้อมูลในแตร็กกลางไว้กับที่ จากนั้นจะทำการเลื่อนสองบิตแบบวนในแตร็กบน ($l-1$) ไปทางขวาทีละหนึ่งบิต และ เลื่อนสองบิตแบบวนในแตร็กล่าง ($l+1$) ไปทางซ้ายทีละหนึ่งบิตซึ่งแต่ละการเลื่อนจะมีการนับจำนวนการเลื่อนและมีการนำมาคิดค่ารูปแบบที่ดีที่สุดในการบันทึกข้อมูล และใช้หน่วยความจำเพิ่มในการนับการเลื่อนของชุดข้อมูลและมีการบันทึกจำนวนครั้งในการเลื่อนชุดข้อมูลที่ทำให้เกิดรูปแบบชุดข้อมูลที่ดีที่สุดลงไปด้วย

การคำนวณเปรียบเทียบ โดยการนับจำนวนรูปแบบข้อมูลที่เกิดการลดทอนที่เกิดขึ้น ใช้การคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulation weight calculation) โดยกำหนดค่าน้ำหนักที่ใช้บอกความรุนแรงของการแทรกสอดสองมิติ ซึ่งสามารถเป็นไปได้ทั้งทางบวก (positive) และทางลบ (negative) โดยขึ้นอยู่กับว่าการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นในรูปแบบส่งเสริม(constructive) [32] หรือแบบสลดทอน (destructive) โดยมีการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการสร้างรูปแบบข้อมูลทั้ง 7 บิตที่จะเป็นไปได้ทั้งหมด และนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละ

รูปแบบที่ได้มาทำการคำนวณเทียบกับสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยวดังสมการที่ 3.34 เป็นการนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละรูปแบบมาคำนวณเทียบกับสัญญาณอ่านกลับบิตเดี่ยว

$$W_i = \begin{cases} A_i - A_s & A_i > 0 \text{ and } A_s > 0 \\ |A_i| - A_s & A_i < 0 \text{ and } A_s < 0 \\ -(A_i + |A_s|) & A_i > 0 \text{ and } A_s < 0 \\ -(|A_i| + A_s) & A_i < 0 \text{ and } A_s > 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

W_i คือ ค่าน้ำหนักรูปแบบที่ i ของข้อมูลทั้ง 7 บิตภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน

A_s คือ แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับของหัวอ่าน

A_i คือ แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยว

โดยวิธีการนี้ได้ค่าน้ำหนักจำนวน 128 รูปแบบ ในตัวอย่างตารางที่ 3.3 โดยจะนำค่าน้ำหนักนี้ไปใช้แทนตารางรูปแบบลวดทอน มีวิธีการผสมค่าน้ำหนักทั้งหมด 3 วิธี วิธีการแรกใช้การหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักทั้งค่าบวกและลบ วิธีที่สองจะหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักแต่เฉพาะค่าบวก และวิธีสุดท้ายจะหาผลรวมทุกค่าน้ำหนักแต่เฉพาะค่าลบ โดยวิธีสุดท้ายเป็นวิธีการที่ดีที่สุด เนื่องจากสองวิธีแรก บางค่าน้ำหนักแบบลวดทอนจะถูกกลบไล้ไปด้วยรูปแบบส่งเสริม ทำให้การพิจารณาหารูปแบบที่ดีที่สุดนั้น กลับไม่ได้รูปแบบชุดข้อมูลที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างค่าน้ำหนักของวิธีการ S-RBP โดยผลตอบสนองของหัวอ่านในสื่อบันทึกชนิดแพตเทิร์นมีเดีย ที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง[15]

Pattern index/th	2bits of upper track		3 bits of center track			2bits of upper track		Weight
	Left	Right	Left	Center	Right	Left	Right	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.0906
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.697
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0.697
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0.3033
5	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0.7872
...
63	-1	1	1	1	1	1	-1	0.3033
64	1	1	1	1	1	1	-1	0.697
65	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0.697
...
124	1	1	-1	1	1	1	1	0.7872
125	-1	-1	1	1	1	1	1	0.3033
126	1	-1	1	1	1	1	1	0.697
127	-1	1	1	1	1	1	1	0.697
128	1	1	1	1	1	1	1	1.0906

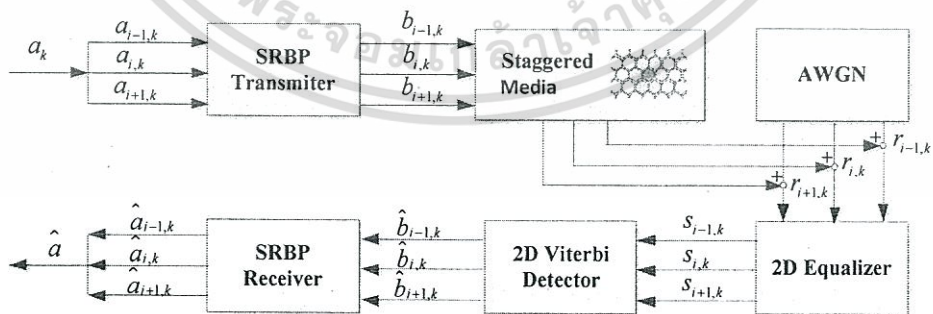
3.4 สรุปปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา

ในบทนี้เราได้กล่าวถึงปัญหาการแทรกสอดสองมิติที่มีความรุนแรง ยังผลให้มีความผิดพลาดในกระบวนการอ่านกลับข้อมูลและเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูล ก็จะทำให้ปัญหาดังกล่าวรุนแรงขึ้น ทั้งนี้รูปแบบสัญญาณอ่านกลับและรูปแบบบิตข้อมูลที่อยู่โดยรอบ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแทรกสอดสองมิติ ที่ผ่านมานำแนวทางแก้ไขปัญหามีอยู่ 3 วิธีการหลักได้แก่การออกแบบอีควอไลเซอร์ การออกแบบวงจรตรวจหา และการออกแบบการเข้ารหัส โดยวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสำคัญต่อการกับปัจจัยของสื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบเกาซ์ข้อมูลแบบเยื้อง และการนำเอาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลที่จะนำไปใช้กับสื่อบันทึกที่มีการจัดรูปอาร์เรย์แบบปกติมาใช้กับสื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบเกาซ์ข้อมูลแบบเยื้อง โดยรายละเอียดของการศึกษาเหล่านี้จะอธิบายในบทต่อไป

การออกแบบรหัสสองมิติสำหรับบิตแพตเทิร์นมีเดียแบบเยื้อง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยต่างๆที่ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีความแข็งแรงขึ้น และวิธีต่างๆ ที่ช่วยให้สัญญาณอ่านกลับมีความถูกต้อง พบว่าขนาดของเกาะข้อมูล และอัตราส่วน ระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล(Bit range) และระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล(Track Pitch) ในสื่อบันทึก ข้อมูลที่มีการจัดรูปแบบอาเรย์เยื้อง(Staggered island bit pattern media) มีผลต่อความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับ และช่วยลดอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) ลงจากระบบปกติ และจากการศึกษาพบว่าวิธีการเข้ารหัสข้อมูลและการจัดรูปแบบชุดข้อมูล ก่อนทำการบันทึก[15] สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่สัญญาณอ่านกลับเป็นผลให้ลดความผิดพลาดในกระบวนการการอ่านกลับข้อมูลได้อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงพัฒนาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบบิตข้อมูล ก่อนทำการบันทึก ซึ่งผลการทดลองสามารถเพิ่มความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับจากระบบปกติได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังนำวิธีคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulation weight calculation) มาใช้ในการเปรียบเทียบ ความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับในระบบ BPMR โดยระหว่างวิธีการS-RBP กับวิธีการหมุนวนบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึก โดยมีการเทียบในส่วนความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับ โดยการหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ย

จากการศึกษาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีต่างๆจนถึงวิธีการเข้ารหัสข้อมูลในสื่อบันทึก ข้อมูลที่มีการจัดรูปแบบอาเรย์เยื้อง ด้วยวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP)[15] โดยมีแบบจำลองของช่องสัญญาณแสดงในรูปที่ 4.1



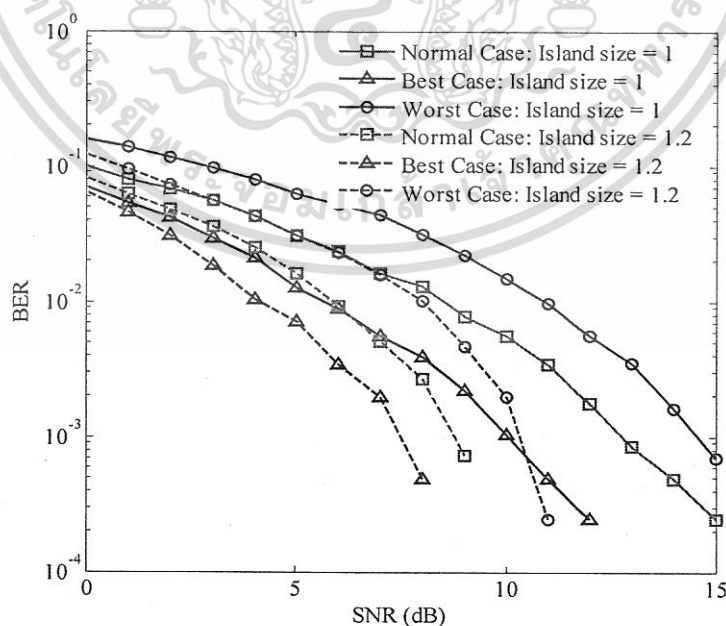
รูปที่ 4.1 แบบจำลองช่องสัญญาณของวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP)

4.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ

4.1.1 การเพิ่มขนาดของบิตข้อมูล[33]

จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ความผิดพลาดของสัญญาณอ่านกลับนั้นเกิดจากความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับมีน้อย ผู้วิจัยจึงตั้งสมมุติฐานว่าหากขนาดของเกาะข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีผลอย่างไรต่อระบบ และจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับได้หรือไม่ เพราะเมื่อสัญญาณอ่านกลับแข็งแรงขึ้น จะเป็นการลดอัตราบิตผิดพลาดซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวม ผู้วิจัยจึงทำการทดลองโดยมีเงื่อนไขความแตกต่างกันของขนาดบิตข้อมูลซึ่งมีการเปรียบเทียบในการทดสอบที่ขนาดของเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1$) และการทดสอบที่ขนาดของเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1.2 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1.2$) โดยทำการเปรียบเทียบที่เงื่อนไขของบิตข้อมูลต่างกันโดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือกรณีปกติ กรณีที่ดีที่สุดและกรณีที่แย่ที่สุด

จากการจำลองช่องสัญญาณพบว่า การทดสอบที่ขนาดของเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1.2 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1.2$) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า มีประสิทธิภาพดีกว่าการทดสอบที่ขนาดของเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1$) ซึ่งบิตข้อมูลมีขนาดเล็กกว่า ในทุกกรณีของรูปแบบบิตข้อมูล ในกรณีเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1.2 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1.2$) จะเห็นว่า ระยะห่างระหว่างกรณีที่ดีที่สุดและกรณีที่แย่ที่สุดมีระยะห่างลดลง และในกรณีที่แย่ที่สุด ยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า รูปแบบที่ดีที่สุดของการทดสอบที่ขนาดของเกาะข้อมูลที่ขนาดเท่ากับ 1 ($\Lambda_x = \Lambda_z = 1$) ดังรูปที่ 4.2 แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีเมื่อมีการเปรียบเทียบเมื่อมีการเพิ่มขนาดของเกาะข้อมูลและที่ความต่างของกรณีบิตข้อมูลในกรณีต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากอัตราบิตผิดพลาด(Bit error rate: BER) ของระบบ SRBP เมื่อเทียบกับการเข้ารหัสแบบอื่นเมื่อมีการเพิ่มขนาดของบิตข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การเพิ่มอัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลกับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (Bit aspect ratio: BAR)[33]

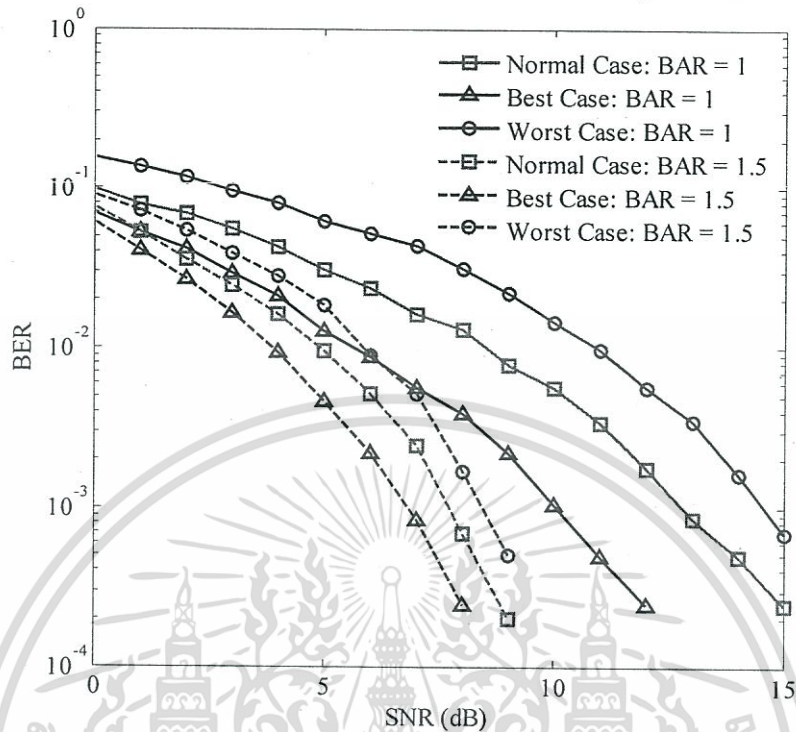
ที่ผ่านมาผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมุติฐานว่าหากขนาดของเกาะข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว จะมีผลอย่างไรต่อความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับและมีผลอย่างไรต่อระบบโดยรวม จากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่ก่อให้เกิด ความผิดพลาดของสัญญาณอ่านกลับนั้นเกิดจาก แทรกสอดสองมิติ (2DI) ของบิตข้างเคียงทั้งการแทรกสอดทางสัญญาณ (ISI) ในแนวตามแทร็ก และการแทรกสอดในแนวขวางแทร็ก (ITI) ผู้วิจัยจึงตั้งสมมุติฐานว่าหากสามารถลดผลกระทบจากการแทรกสอดในแนวขวางแทร็ก (ITI) ลงได้ก็จะเป็นการลดอัตราบิตผิดพลาดลงเช่นกัน อีกทั้งยังสามารถทำให้เพิ่มความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับได้หรือไม่ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวม เนื่องจากในระบบสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้องนั้น ระยะห่างระหว่างบิต(bit range) ของสื่อบันทึกชนิดนี้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของคาบเวลาในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์แบบปกติ และหากเพิ่มระยะห่างของแทร็กข้อมูล(Track pitch) ออกไป การวางตำแหน่งของเกาะข้อมูลก็จะใกล้เคียงในกรณีบิตเดียว

ผู้วิจัยจึงทำการทดลองโดยมีเงื่อนไขความแตกต่างกันของอัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลกับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (Bit aspect ratio : BAR) ซึ่งมีการเปรียบเทียบในการทดสอบที่ระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล (T_x) (bit range) เท่ากับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (T_z) (Track pitch) ($T_x = T_z$) ($BAR = 1$) และอัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลกับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (Bit aspect ratio : BAR) ซึ่งมีการเปรียบเทียบในการทดสอบที่ระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล (T_x) (bit range) เป็น 1.5 เท่า ของระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (T_z) (Track pitch) ($T_x = 1.5T_z$) ($BAR = 1.5$) โดยทำการเปรียบเทียบที่เงื่อนไขของบิตข้อมูลต่างกันโดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือกรณีปกติ กรณีที่ดีที่สุดและกรณีที่แย่มากที่สุด

จากการจำลองช่องสัญญาณพบว่าการทดสอบเปรียบเทียบในการทดสอบที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล (T_x) (bit range) เป็น 1.5 เท่า ของระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (T_z) (Track pitch) ($T_x = 1.5T_z$) ($BAR = 1.5$) มีประสิทธิภาพดีกว่าการทดสอบที่การทดสอบที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล (T_x) (bit range) เท่ากับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (T_z) (Track pitch) ($T_x = T_z$) ($BAR = 1$) ในทุกกรณีของรูปแบบบิตข้อมูล ใน จะเห็นว่า ที่ระยะห่างระหว่างบิตข้อมูล (T_x) (bit range) เป็น 1.5 เท่า ของระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (T_z) (Track pitch) ($T_x = 1.5T_z$) ($BAR = 1.5$) ทั้งนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลเท่ากับ 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล ($T_x = 1.5T_z$) ระยะห่างระหว่างกรณีที่ดีที่สุดและกรณีที่แย่มากที่สุดมีระยะห่างลดลง และในกรณีที่แย่มากที่สุดของ $BAR=1.5$ ยังมีประสิทธิภาพสูงกว่า รูปแบบที่ดีที่สุดของการทดสอบที่อัตราส่วนระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลเท่ากับระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล ($T_x = T_z$) ($BAR = 1$) ในทุกกรณีของรูปแบบบิตข้อมูล ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีเมื่อมีการเปรียบเทียบเมื่อมีการเพิ่มของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแทร็กที่ความต่างของกรณีบิตข้อมูลในกรณีต่างๆ

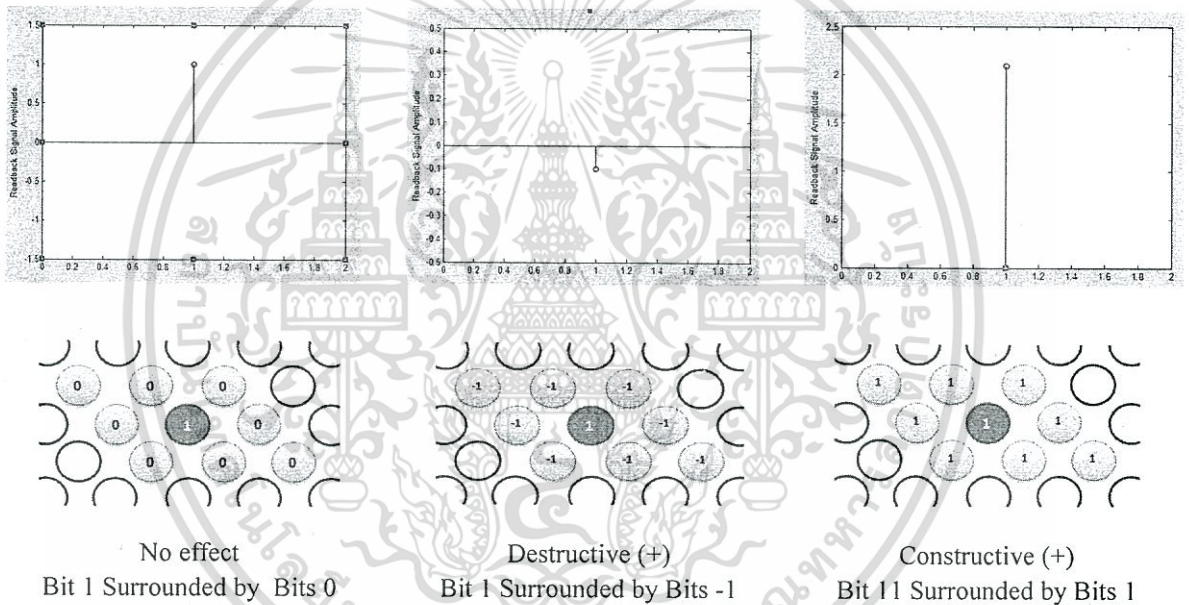


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จากอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) ของระบบS-RBP เมื่อเทียบกับการเข้ารหัสแบบอื่นและมีการเพิ่มอัตราส่วนของระยะห่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแทร็ก (Bit aspect ratio : BAR)

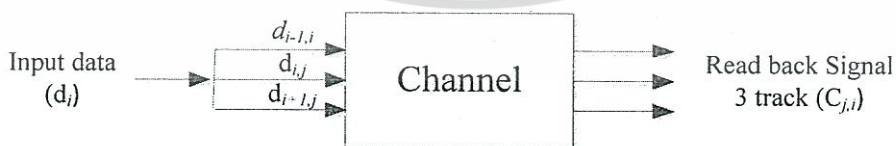
จากการศึกษาผลของการเพิ่มขนาดของเกาะบันทึกข้อมูลและการเพิ่มอัตราส่วนของระยะห่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแทร็ก (Bit aspect ratio : BAR) ที่มีต่อระบบที่ใช้วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP) มีประสิทธิภาพดีขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของระยะห่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแทร็ก (Bit aspect ratio : BAR) หรือ เมื่อมีการเพิ่มของขนาดของเกาะข้อมูล ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ระบบการจัดรูปแบบบิตข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเยื้อง (Staggered island Recorded-bit patterning: S-RBP) สามารถทำงานได้ที่ขนาดเกาะข้อมูลมีขนาดเล็กและ อัตราส่วนของระยะห่างบิตข้อมูลและระยะห่างระหว่างแทร็ก (Bit aspect ratio : BAR) ต่ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การเข้ารหัสรูปแบบข้อมูลสองมิติที่นำเสนอ[34]

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญเกิดจากการแทรกสอดสองมิติ (2D interference) ซึ่งประกอบด้วย การแทรกสอดทางสัญญาณ (ISI) ในแนวตามแตรีก และการแทรกสอดในแนวขวางแตรีก (ITI) ที่เป็นไปได้ทั้งการแทรกสอดแบบส่งเสริม (constructive) และการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive case) ถ้าความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจะทำให้ความผิดพลาดของสัญญาณอ่านกลับลดลงเนื่องจากสัญญาณอ่านกลับเหล่านี้ สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกได้ดีขึ้น ทำให้เกิดแนวคิดที่ว่าหากสามารถหลีกเลี่ยงรูปแบบของชุดข้อมูลที่ก่อให้เกิดการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน (destructive case) ก่อนทำการบันทึกได้ ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดหนึ่งเพื่อเป็นตัวอย่างในการเพิ่มความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับให้กับทุกรูปแบบข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึกดังนี้



รูปที่ 4.4 การศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดสองมิติ



รูปที่ 4.5 รูปแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $d_i \in \{\pm 1\}$ เป็นลูกแบ่งออกเป็น 3 แทร็ก $\{d_{i-1,j}, d_{i,j}, d_{i+1,j}\}$ ก่อนจะส่งเข้าช่องสัญญาณปราศจากสัญญาณรบกวนชนิดไม่ต่อเนื่อง ได้สัญญาณอ่านกลับ $C_{i,j}$ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$c_{i,j} = \sum_m \sum_n d_{i-m,k-n} G(m,n) \quad (4.6)$$

โดย	$C_{i,j}$	คือ สัญญาณอ่านกลับ
	$d_{i,j}$	คือ บิตที่บันทึก $\{\pm 1\}$
	$G(m,n)$	คือ ผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ
	i	คือ ลำดับในแถว
	j	คือ ลำดับในหลัก
	m	คือ ตัวชี้ตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก
	n	คือ ตัวชี้ตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก

ซึ่งในระบบ S-BPMR นั้น $G(m,n)$ สามารถหาได้การชักตัวอย่าง (sampling) ผลตอบสนองสัญญาณพัลส์ของเกาะข้อมูล ที่มีคาบเวลาบิต (bit period) T_x แต่ด้วยระยะห่างระหว่างบิตของ มีเดียชนิดนี้มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของคาบเวลาในมีเดียแบบปกติ จึงมีการบวกด้วย 0.5 และความกว้างของแทร็ก (track pitch) T_z โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4.7) และสามารถหาผลตอบสนองสัญญาณพัลส์เกาะเขียนแบบสองมิติสำหรับระบบ S-BPMR เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (4.8)

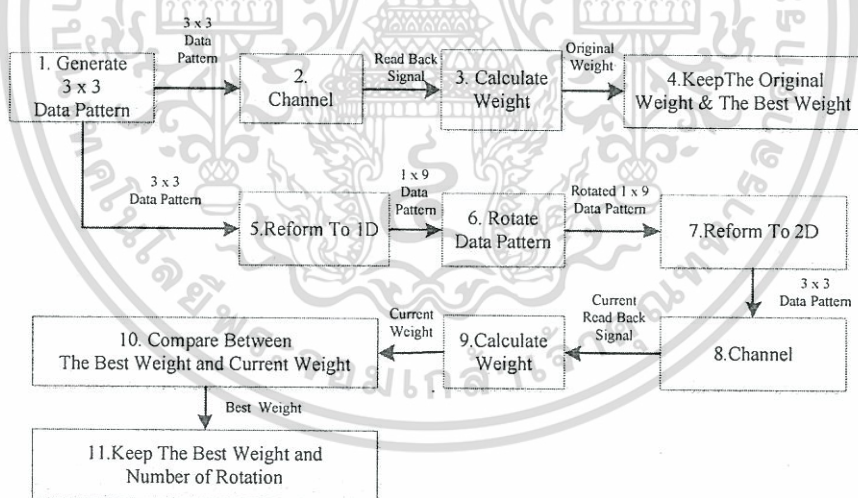
$$G(m,n) = S(m+0.5n)T_x, nT_z \quad (4.7)$$

โดย	$G(m,n)$	คือ ผลตอบสนองของช่องสัญญาณสองมิติ
	S	คือ ผลตอบสนองสัญญาณเกาะเขียนแบบสองมิติ
	m	คือ ตัวชี้ตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก $\in \{-1, 0, 1\}$
	n	คือ ตัวชี้ตำแหน่งของเกาะข้อมูลในแนวตามแทร็ก $\in \{-1, 0, 1\}$
	T_x	คือ ระยะห่างระหว่างบิต/คาบเวลาบิต (bit period)
	T_z	คือ ความกว้างของแทร็ก (track pitch)

$$S(x, z) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{C_x}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{C_z}{PW_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.8)$$

- โดย $S(x, z)$ คือ ผลตอบสนองสัญญาณเกาส์เซียนแบบสองมิติ
 A คือ สัญญาณตอบสนองที่สูงที่สุด ($A=1$)
 PW_x คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวตามแตรีก
 PW_z คือ PW_{50} ของสัญญาณพัลส์ในแนวขวางแตรีก
 x คือ ทิศทางในแนวตามแตรีก
 z คือ ทิศทางในแนวขวางแตรีก
 C คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง PW_{50} กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกาส์เซียนพัลส์ โดย ($C = 2.3548$)

จากการศึกษารูปแบบชุดข้อมูลที่ทำให้เกิดการแทรกสอดสองมิติแบบลดทอน (destructive case) ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดที่จะลดความรุนแรงของการเกิดกรณีดังกล่าว โดยการหลีกเลี่ยงการเกิดรูปแบบชุดข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึกโดยอาศัยการหาค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับ ซึ่งจะทำให้เป็นการเพิ่มความแรงของสัญญาณอ่านกลับให้กับทุกรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึกอีกด้วย

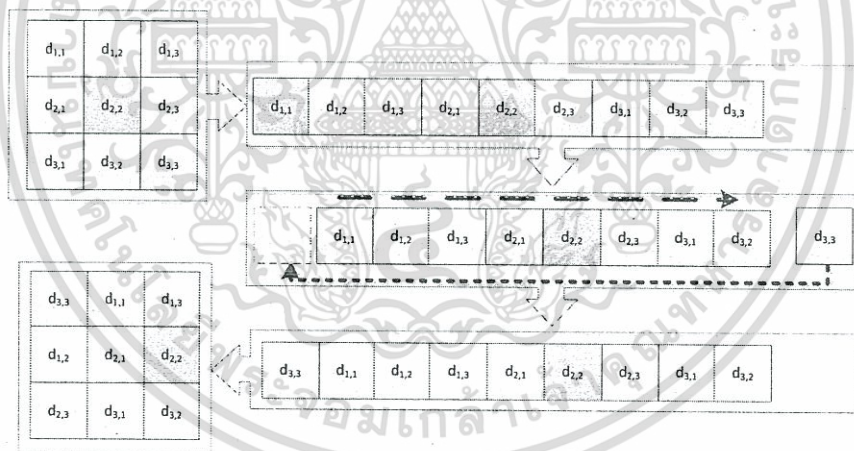


รูปที่ 4.6 หลักการทำงานของวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลด้วยวิธีหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเฉียง

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างรูปแบบของข้อมูล 3x3 ที่จะเป็นไปได้ทั้งหมด 128 รูปแบบชุดข้อมูล จากนั้นจึงนำรูปแบบ n^h เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งผ่านเข้าช่องสัญญาณ เพื่อหาสัญญาณอ่านกลับออกมา จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับของรูปแบบชุดข้อมูล n^h เมื่อได้ค่าน้ำหนักดังกล่าวจะทำการเก็บเป็นค่าตั้งต้นโดยเป็นค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุดและบันทึกจำนวนการหมุนวนเท่ากับศูนย์ในเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นผู้วิจัยนำชุดข้อมูล n^{th} เดิมนั้นมาทำการจัดรูปแบบใหม่จาก 3×3 เป็น 1×9 และทำการหมุนวนชุดข้อมูลดังกล่าว และนับการหมุนเท่ากับ 1 ครั้ง จากนั้นก็จะทำการจัดรูปแบบชุดข้อมูล 1×9 กลับไปเป็น รูปแบบ 3×3 ตามเดิม เพื่อทำการหาสัญญาณอ่านกลับออกมา เพื่อใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับหลังจากการหมุนวนรูปแบบชุดข้อมูลเป็นค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบัน เมื่อได้ค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบันแล้วจะทำการเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับตั้งต้นซึ่งขณะนี้ เป็นค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุด และจำนวนการหมุนวนยังเท่ากับศูนย์ หากผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบันมีค่าต่ำกว่าค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุดระบบก็จะละทิ้งข้อมูลชุดนี้ เพื่อไปทำขั้นตอนต่อไป แต่หากผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบันมีค่าสูงกว่าค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุด ระบบจะนำค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบันแทนที่เป็นค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุด และจะนำค่าจำนวนการหมุนวนของปัจจุบันเก็บแทนจำนวนการหมุนวน จากนั้นระบบนำข้อมูล 3×3 ที่มีการหมุนวนไปแล้ว 1 ครั้ง ทำซ้ำจากในการปรับรูปแบบชุดข้อมูล 1×9 กลับไปเป็น รูปแบบ 3×3 ตามเดิม เพื่อทำการหาสัญญาณอ่านกลับออกมา เพื่อใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับหลังจากการหมุนวนรูปแบบชุดข้อมูลเป็นค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับปัจจุบันอีก 8 ครั้ง ตามความเป็นไปได้ของรูปแบบในแต่ละชุดข้อมูล ซึ่งจะได้ค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุดพร้อมกับจำนวนครั้งของการหมุนวนในแต่ละรูปแบบชุดข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการถอดรหัสข้อมูลกลับไปเป็นข้อมูลตั้งต้นที่ถูกต้องต่อไป



รูปที่ 4.7 วิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลด้วยวิธีหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนการบันทึก

ในการคำนวณเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับ โดยการนับจำนวนรูปแบบข้อมูลที่เกิดการลדתอนที่เกิดขึ้น ใช้การคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulation weight calculation) โดยกำหนดค่าน้ำหนักที่ใช้บอกความรุนแรงของการแทรกสอดสองมิติ ซึ่งสามารถเป็นไปได้ทั้งทางบวก (positive) และทางลบ (negative) โดยขึ้นอยู่กับว่าการแทรกสอดที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นในรูปแบบส่งเสริม (constructive) หรือแบบลดทอน (destructive) โดยมีการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการพิจารณาค่าน้ำหนักจากการสร้างรูปแบบข้อมูลทั้ง 9 บิตที่จะเป็นไปได้ทั้งหมด และนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละรูปแบบที่ได้มาทำการคำนวณเทียบกับสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยวดังสมการที่ 4.9 โดยเป็นการนำสัญญาณอ่านกลับของบิตกลางในแต่ละรูปแบบมากำหนดค่า

เอกส...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับสัญญาณอ่านกลับบิตเดียว ในแต่ละรูปแบบของข้อมูล ทั้ง 9 บิตภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน โดยวิธีการนี้ได้ค่าน้ำหนักจำนวน 128 รูปแบบ [15]

$$W_i = \begin{cases} A_i - A_s & A_i > 0 \text{ and } A_s > 0 \\ |A_i| - A_s & A_i < 0 \text{ and } A_s < 0 \\ -(A_i + |A_s|) & A_i > 0 \text{ and } A_s < 0 \\ -(|A_i| + A_s) & A_i < 0 \text{ and } A_s > 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

โดย W_i คือ ค่าน้ำหนักรูปแบบที่ i
 A_i คือ แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับของบิตเดี่ยว รูปแบบที่ i
 A_s คือ แอมพลิจูดสัญญาณอ่านกลับของหัวอ่าน

จากการทดลองผู้วิจัยได้ผลเปรียบเทียบระหว่างค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับตั้งต้นเทียบกับค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับหลังการหมุนรูปแบบชุดข้อมูลพร้อมจำนวนครั้งที่ทำการหมุนรูปแบบชุดข้อมูลที่ทำให้เกิดค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุดทั้งหมด 128 รูปแบบที่จะเป็นไปได้ดังตารางที่ 4.2



ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับโดยผลตอบสนองของหัวอ่านในสื่อบันทึกบิตแพตเทิร์นมีเดีย ที่มีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลเยื้อง และเทียบความต่างของค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับระหว่างค่าน้ำหนักดั้งเดิมกับค่าน้ำหนักหลังจากการหมุนวนแล้ว พร้อมจำนวนการหมุนที่ทำให้เกิดรูปแบบชุดข้อมูลที่ดีที่สุด [34]

Pattern index	3x3 Data Pattern									Weight	Mth Of Rotation	Weight difference
nth	$d_{1,1}$	$d_{1,2}$	$d_{1,3}$	$d_{2,1}$	$d_{2,2}$	$d_{2,3}$	$d_{3,1}$	$d_{3,2}$	$d_{3,3}$	Weight	Rotation	difference
1 O	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.0997059		
1 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.0997059	0	0
2 O	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.090648		
2 R	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.090648	0	0
3 O	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.7060771		
3 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.090648	7	0.384571
4 O	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.6970192		
4 R	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.08159	8	0.384571
5 O	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.7060771		
5 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.090648	6	0.384571
6 O	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.6970192		
6 R	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.6970192	0	0
...
63 O	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.2943324		
63 R	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.2943324	0	0
64 O	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.3033903		
64 R	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.6879612	1	0.384571
65 O	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.7060771		
65 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1.090648	2	0.384571
66 R	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.6970192		
66 R	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0.7872576	3	0.090238
67 O	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.3124483		
67 R	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0.7872576	2	0.474809
68 O	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.3033903		
68 R	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	0.7781997	8	0.474809
...
123 O	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.2943324		
123 R	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	0.3845709	1	0.090238
124 O	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.3033903		
124 R	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	0.7781997	1	0.474809
125 O	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.2943324		
125 R	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.2943324	0	0
126 O	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.3033903		
126 R	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	0.6879612	1	0.384571
127 O	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.6879612		
127 R	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.6879612	0	0
128 O	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.6970192		
128 R	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1.08159	1	0.384571
											Total	253.0502
											Average	0.4942387

* R=Rotation Pattern, O= Original Pattern

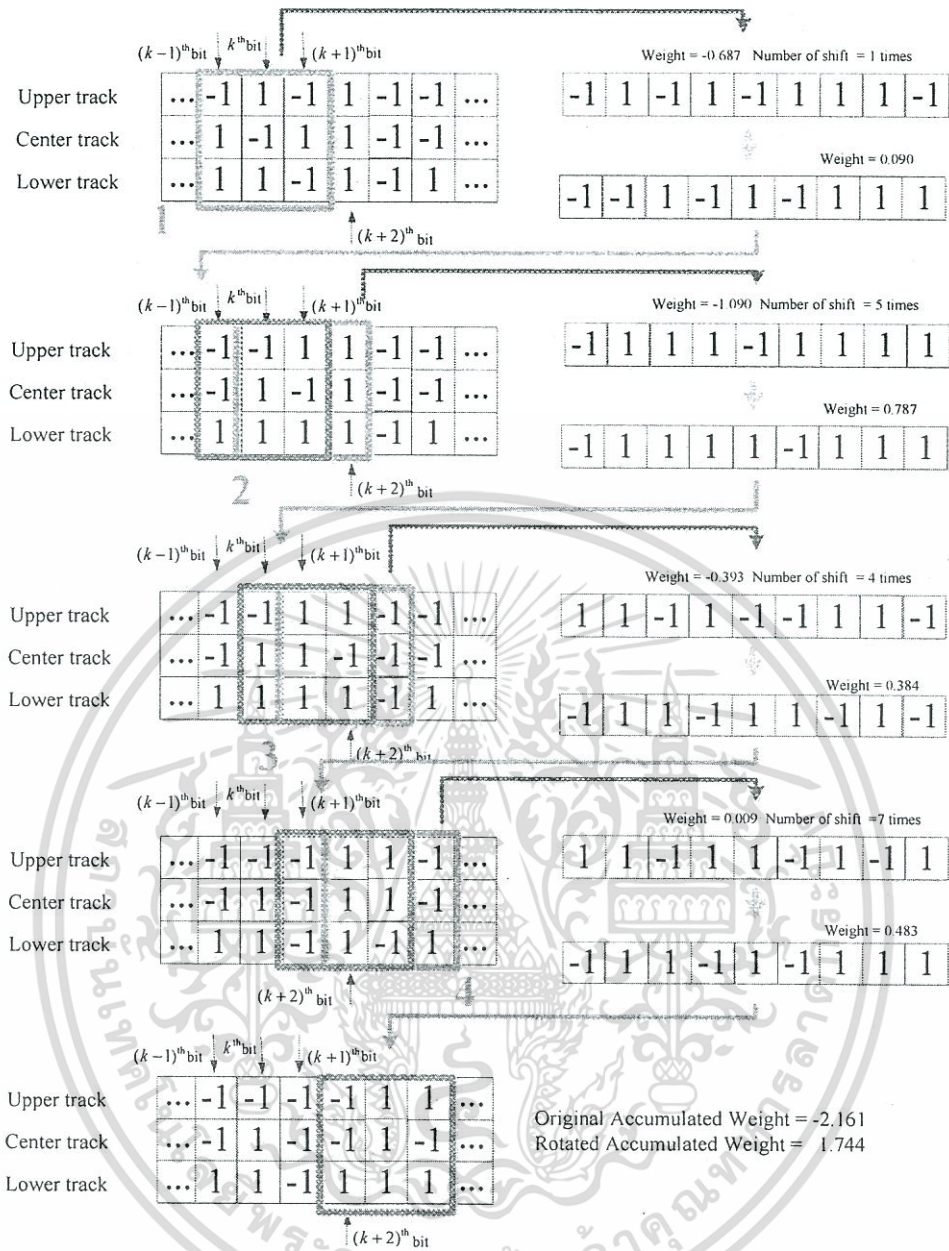
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองช่องสัญญาณผู้วิจัยมุ่งให้ความสนใจกับการเพิ่มความแรงของสัญญาณอ่านกลับเพื่อให้สามารถทนทานต่อการแทรกสอดสองมิติซึ่งประกอบด้วยการแทรกสอดทางสัญลักษณ์และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก ทั้งนี้ในช่องสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกและ AWGN จากตารางที่ 4.1 แสดงให้ทราบถึงผลการเปรียบเทียบของค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากรูปแบบข้อมูลดั้งเดิมกับค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากการหมุนวนเพื่อเปลี่ยนรูปแบบและจำนวนครั้งในการหมุนวน

ผู้วิจัยพบว่าค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากการใช้เทคนิคการหมุนวนเพื่อเปลี่ยนรูปแบบชุดข้อมูลเพื่อสร้างรูปแบบชุดข้อมูลใหม่นั้นมีความแรงของสัญญาณอ่านกลับเท่ากับหรือสูงกว่าค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากรูปแบบข้อมูลดั้งเดิมในรูปแบบ 3×3 โดยเฉลี่ยแล้วมีความแรงของสัญญาณเพิ่มขึ้น

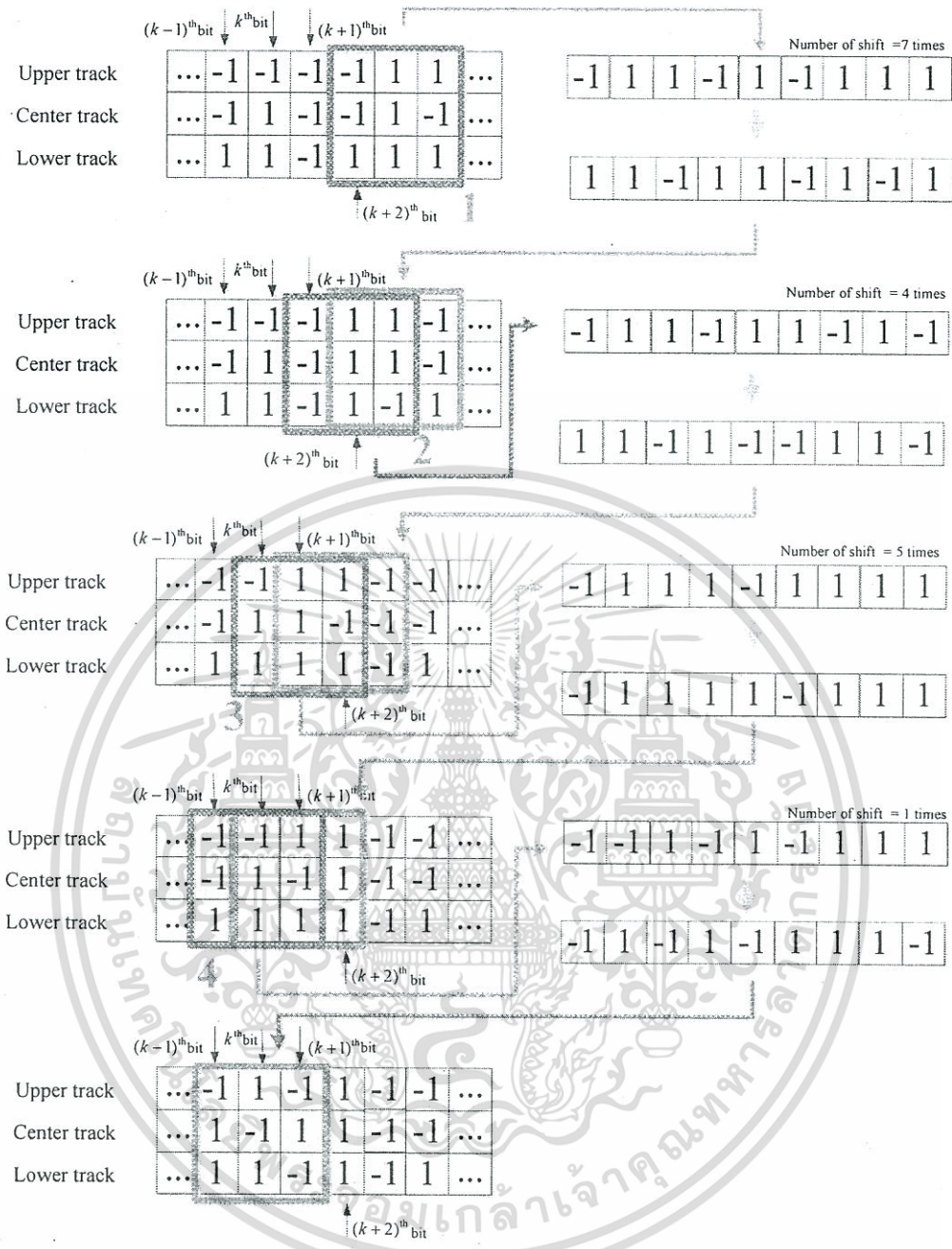
เนื่องจากการคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (Accumulation weight calculation) สามารถใช้ในการเปรียบเทียบ ความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับในระบบ BPMR ได้ ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้การหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ย โดยวิธีการ S-RBP กับวิธีการหมุนวนบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึก โดยมีการเทียบในส่วนความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับเฉลี่ย ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยใช้จำนวนข้อมูล 4080 บิตต่อแทร็ก 3 แทร็ก ต่อ 1 บล็อก ด้วย 3 รูปแบบวิธีการที่ใช้ในการเลื่อนหน้าต่างการหมุนวนชุดข้อมูลในแต่ละเซกเตอร์เพื่อหาค่าความต่างของค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยโดยผลการจำลองระบบแสดงในตารางที่ 4.2

รูปแบบที่ 1 ในการหมุนวนชุดข้อมูล เริ่มจากเคลื่อนที่หน้าต่างอาเรย์ขนาด 3×3 ที่ครอบคลุมบิตข้อมูล 9 บิตคือ 3 บิตจากแทร็กบน $[a_{l-1,k-1} \ a_{l-1,k} \ a_{l-1,k+1}]$, 3 บิตจากแทร็กกลาง $[a_{l,k-1} \ a_{l,k} \ a_{l,k+1}]$ และ 3 บิตจากแทร็กล่าง $[a_{l+1,k-1} \ a_{l+1,k} \ a_{l+1,k+1}]$ เพื่อหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นก่อนทำการหมุนวนชุดข้อมูล ของ $[a_{l-1,k-1} \ a_{l-1,k} \ a_{l-1,k+1} \ a_{l,k-1} \ a_{l,k} \ a_{l,k+1} \ a_{l+1,k-1} \ a_{l+1,k} \ a_{l+1,k+1}]$ จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการหมุนวนได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 หมุนวนชุดข้อมูล 3×3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{\text{th}}$ bits และทำการเก็บจำนวนการหมุนวนชุดข้อมูลในหน่วยความจำเพิ่มเติม จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะขยับไปที่ k^{th} bits และทำการหมุนวนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.8 โดยค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นเท่ากับ -2.161 และค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 1.744 และในส่วนของการถอดรหัสชุดข้อมูลกลับระบบจะทำการถอดรหัสจากท้ายเซกเตอร์โดยอาศัยจำนวนการหมุนวนข้อมูล ที่มีการเก็บไว้ในหน่วยความจำเพิ่มเติม ที่ได้จากการเข้ารหัสก่อนทำการบันทึก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การเข้ารหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 1

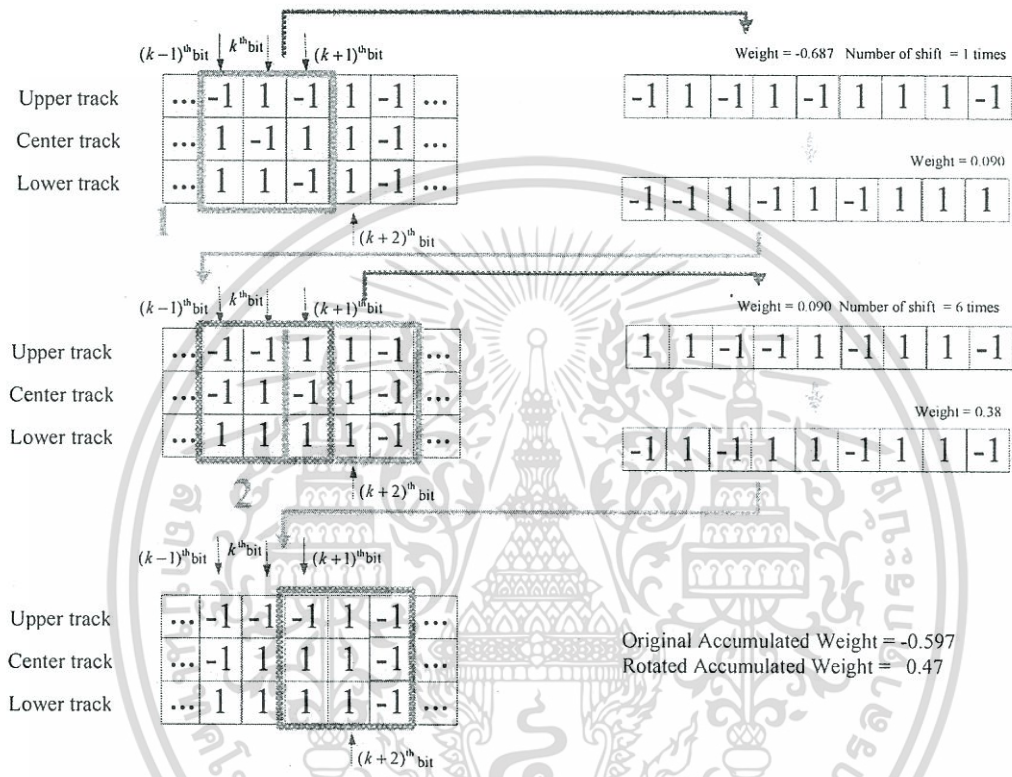
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



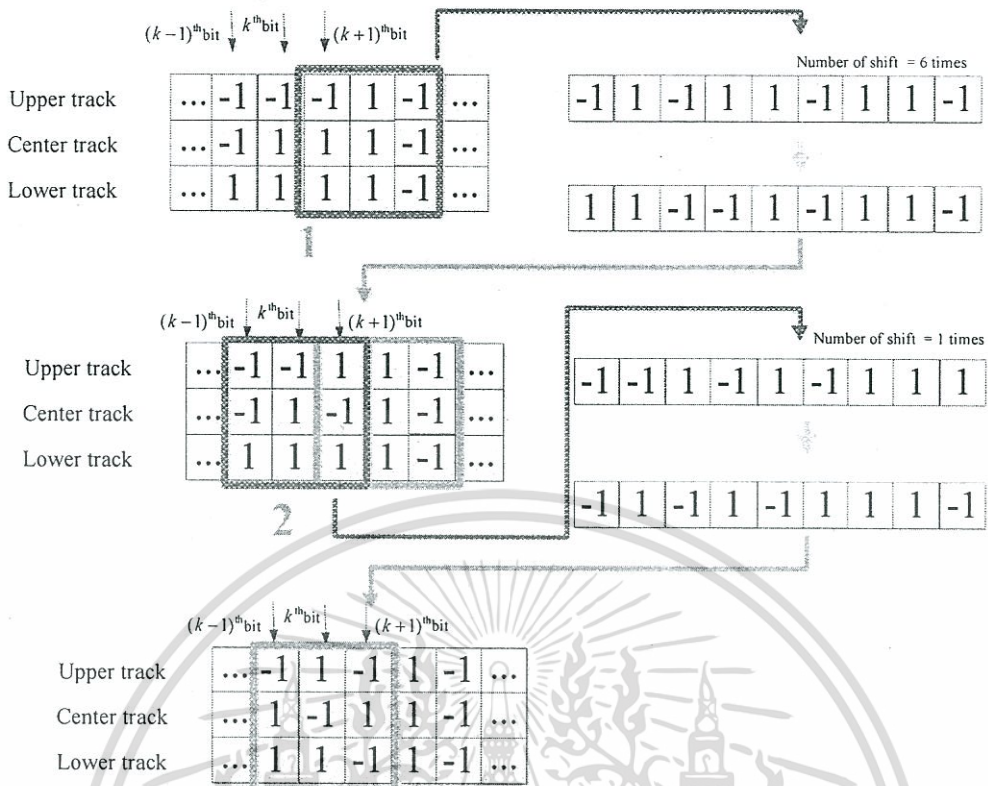
รูปที่ 4.9 การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 1

รูปแบบที่สองในการหมุนวนชุดข้อมูล เริ่มจากเคลื่อนที่หน้าต่างอาเรย์ขนาด 3x3 ที่ครอบคลุมบิตข้อมูล 9 บิตคือ 3บิตจากแถวกบน $[a_{l-1,k-1} a_{l-1,k} a_{l-1,k+1}]$, 3 บิตจากแถวกกลาง $[a_{l,k-1} a_{l,k} a_{l,k+1}]$ และ 3 บิตจากแถวกล่าง $[a_{l+1,k-1} a_{l+1,k} a_{l+1,k+1}]$ เพื่อหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นก่อนทำการหมุนวนชุดข้อมูล ของ $[a_{l-1,k-1} a_{l-1,k} a_{l-1,k+1} a_{l,k-1} a_{l,k} a_{l,k+1} a_{l+1,k-1} a_{l+1,k} a_{l+1,k+1}]$ จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการหมุนวนได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 หมุนวนชุดข้อมูล 3x3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bits และทำการเก็บจำนวนการหมุนวนชุดข้อมูลในหน่วยความจำเพิ่มเติม จากนั้นในขั้นตอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2 จะขยับไปที่ $(k+1)^{th}$ bits และทำการหมุนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์ดังรูปที่ 4.10 โดยค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นเท่ากับ -0.597 และค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.47 และในส่วนของ การถอดรหัสชุดข้อมูลกลับ ระบบจะทำการถอดรหัสจากท้ายเซกเตอร์โดยอาศัยจำนวนการหมุนวนข้อมูล ที่มีการเก็บไว้ในหน่วยความจำเพิ่มเติม ที่ได้จากการเข้ารหัสก่อนทำการบันทึก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.11

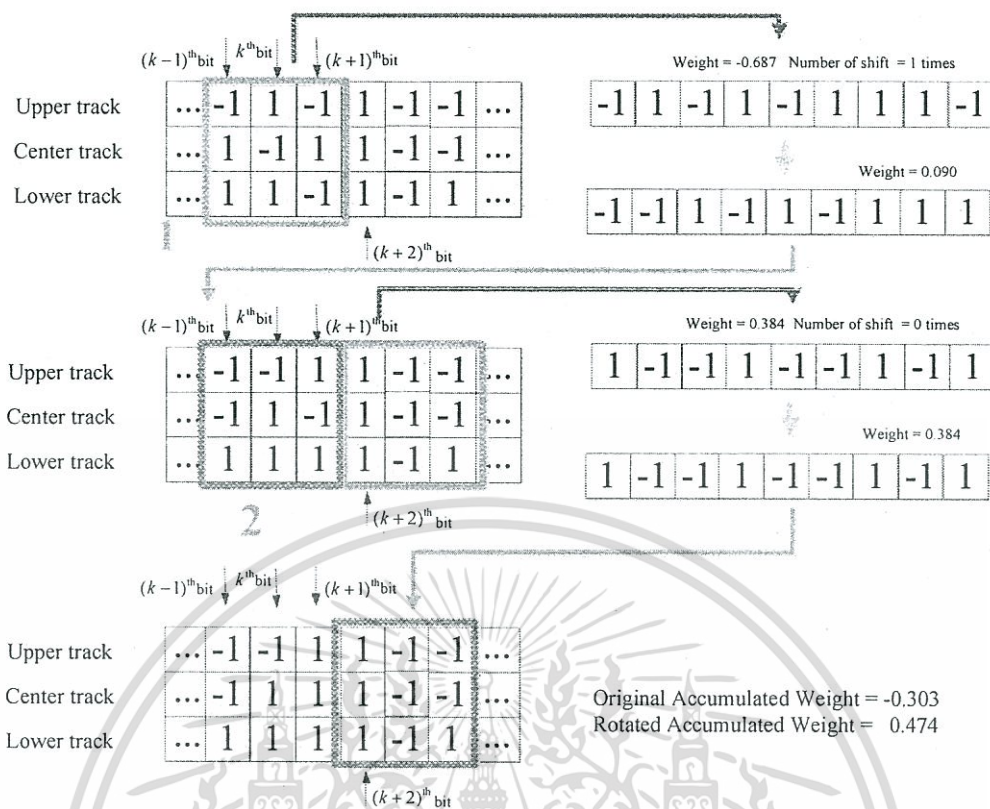


รูปที่ 4.10 การเข้ารหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2

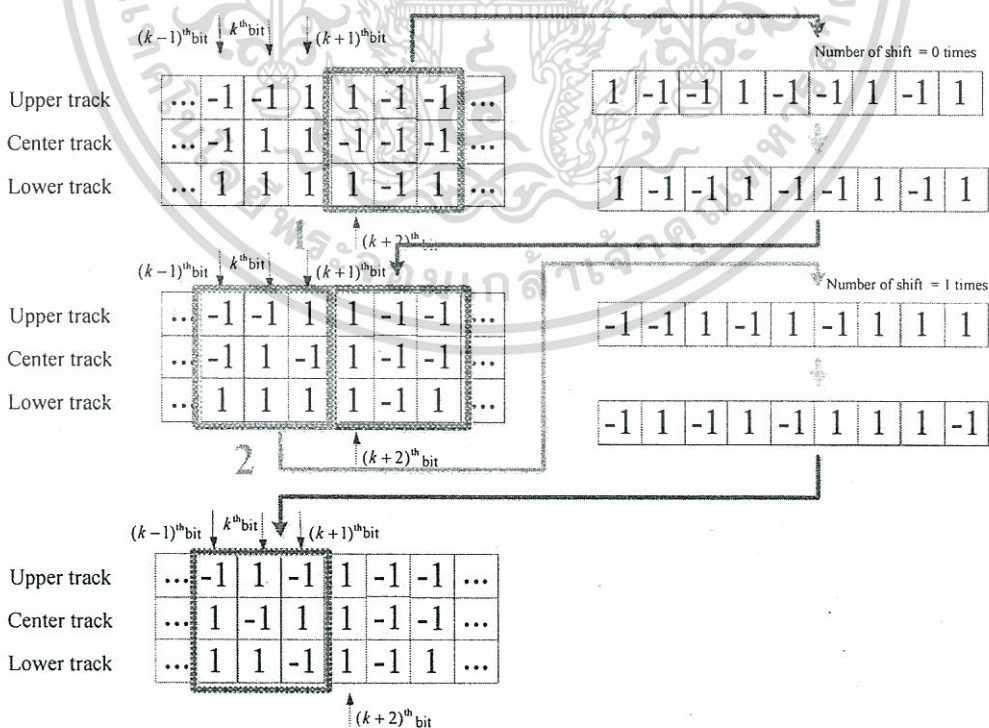


รูปที่ 4.11 การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2

รูปแบบที่ 3 ในการหมุนวนชุดข้อมูล เริ่มจากเคลื่อนที่ของหน้าต่างอาร์เรย์ขนาด 3×3 ที่ครอบคลุมบิตข้อมูล 9 บิตคือ 3 บิตจากแถวกบน $[a_{l-1,k-1} \ a_{l-1,k} \ a_{l-1,k+1}]$, 3 บิตจากแถวกกลาง $[a_{l,k-1} \ a_{l,k} \ a_{l,k+1}]$ และ 3 บิตจากแถวกล่าง $[a_{l+1,k-1} \ a_{l+1,k} \ a_{l+1,k+1}]$ เพื่อหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นก่อนทำการหมุนวนชุดข้อมูล ของ $[a_{l-1,k-1} \ a_{l-1,k} \ a_{l-1,k+1} \ a_{l,k-1} \ a_{l,k} \ a_{l,k+1} \ a_{l+1,k-1} \ a_{l+1,k} \ a_{l+1,k+1}]$ จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการหมุนวนได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 หมุนวนชุดข้อมูล 3×3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bits และทำการเก็บจำนวนการหมุนวนชุดข้อมูลในหน่วยความจำเพิ่มเติม จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะขยับไปที่ $(k+2)^{th}$ bits และทำการหมุนวนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์ดังรูปที่ 4.12 โดยค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นเท่ากับ -0.0303 และค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.474 และในส่วนของการถอดรหัสชุดข้อมูลกลับ ระบบจะทำการถอดรหัสจากท้ายเซกเตอร์โดยอาศัยจำนวนการหมุนวนข้อมูล ที่มีการเก็บไว้ในหน่วยความจำเพิ่มเติม ที่ได้จากการเข้ารหัสก่อนทำการบันทึก ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การเข้ารหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 3

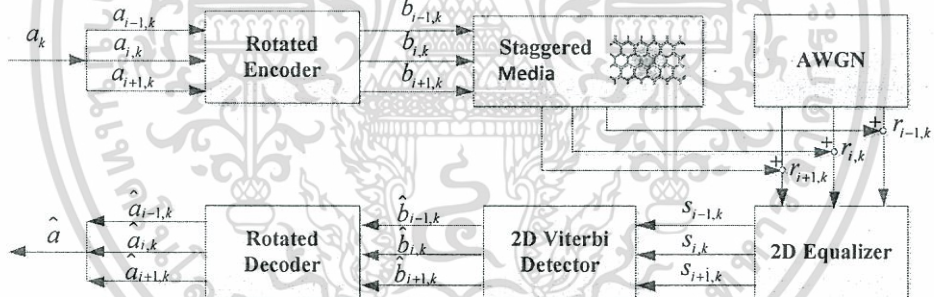


รูปที่ 4.13 การถอดรหัสของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ในยูทิตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองระบบ

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวิธีการหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึกทั้ง 3 รูปแบบเทียบกับวิธีการด้วยวิธี S-RBP ด้วยข้อมูลชุดเดียวกัน คือจำนวนข้อมูล 4080 บิตต่อแตร็ก 3 แตร็ก ต่อ 1 บล็อก เพื่อทดสอบหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นก่อนทำการเข้ารหัสชุดข้อมูล ของ $[a_{i-1,k-1} \ a_{i-1,k} \ a_{i-1,k+1} \ a_{i,k-1} \ a_{i,k} \ a_{i,k+1} \ a_{i+1,k-1} \ a_{i+1,k} \ a_{i+1,k+1}]$ ซึ่งได้ผลการทดลอง ด้วยการหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึกวิธีที่ 1 มีค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นเท่ากับ -0.0015 และค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.1585 จากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองด้วยการหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึกวิธีที่ 2 ให้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.1666 และทดสอบเทียบกับการหมุนวนรูปแบบข้อมูลก่อนทำการบันทึกวิธีที่ 3 ซึ่งมีผลค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.1662 และสุดท้ายเทียบกับวิธี S-RBP มีค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยตั้งต้นเท่ากับ -0.0015 และค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยหลังจากการจัดรูปแบบบิตข้อมูลใหม่ได้ค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ยเท่ากับ 0.1706 โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 แสดงผล BER ของการหมุนวนข้อมูลทั้ง 3 วิธีเมื่อเทียบกับวิธีการ S-RBP



รูปที่ 4.14 ช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบระบบ

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญด้านเวลาที่ใช้ในการทำงานด้วย ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าความเร็วในการทำงานก็มีส่วนสำคัญอีกด้านหนึ่งด้วยในการทดลองผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันการจับเวลาใน Simulation Program ได้คาบเวลาในการเข้ารหัสเฉลี่ยในการทำงานต่อ 1 บล็อกข้อมูล โดยวิธีการ S-RBP ใช้เวลาในการทำงาน 18.610 วินาทีต่อ 1 บล็อกข้อมูล ในขณะที่วิธีการหมุนวนบิตข้อมูลใช้เวลาเพียง 0.111 วินาทีต่อ 1 บล็อกข้อมูล

จากนั้นผู้วิจัยได้คำนึงถึงความซับซ้อนในการทำงานของการเข้ารหัสของวิธีการหมุนวนของบิตข้อมูลเทียบกับวิธีการ S-RBP ได้โดยการคำนวณได้จาก $C = n_b \times n_b \times n_b \times n_p = n_b \times n_b \times L$ [33] โดย $n_b = L / n_p$ คือจำนวนบิตข้อมูลของส่วนที่ถูกแบ่ง n_p คือจำนวนส่วนย่อยที่ถูกแบ่ง L คือจำนวนบิตในหนึ่งแตร็ก และ n คือจำนวนแตร็ก

ดังนั้น ความซับซ้อนในการทำงานของการเข้ารหัสวิธีการ S-RBP สามารถคำนวณได้จาก

$$C = n_b \times n_b \times L_r$$

จากนั้นผู้วิจัยทำการคำนวณความซับซ้อนในการทำงานของการเข้ารหัสของวิธีการหมุนวนของบิตข้อมูลด้วยวิธีที่ 1 สามารถคำนวณได้จาก $C = n_b$

และ ทำการคำนวณความซับซ้อนในการทำงานของการเข้ารหัสของวิธีการหมุนวนของบิตข้อมูลด้วยวิธีที่ 2 สามารถคำนวณได้จาก $C = n_b / 2$

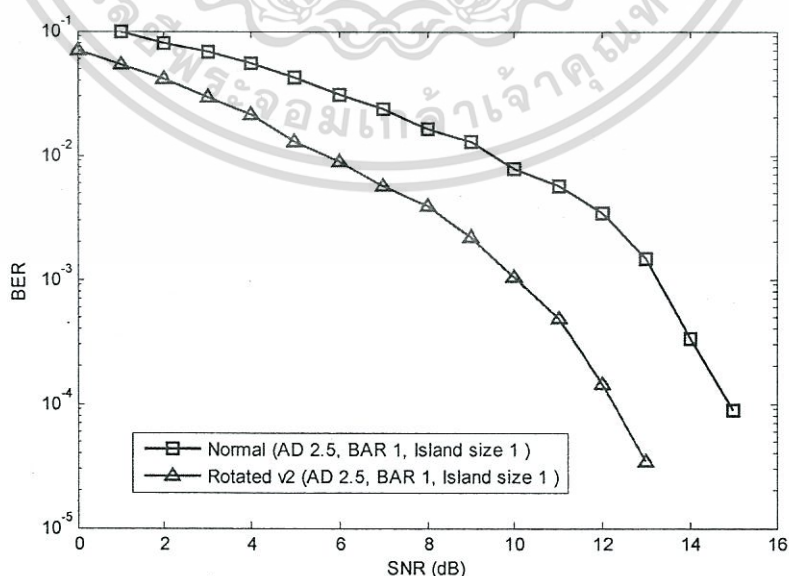
สุดท้าย ทำการคำนวณความซับซ้อนในการทำงานของการเข้ารหัสของวิธีการหมุนวนของบิตข้อมูลด้วยวิธีที่ 3 สามารถคำนวณได้จาก $C = n_b / 3$

ผลการทดลองแสดงเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าวิธีการนำเสนอแบบที่ 2 ให้ค่าผลรวมน้ำหนักที่มากที่สุดผู้วิจัยจึงเลือกมาใช้ในการทดสอบในระบบ Staggered BPRM

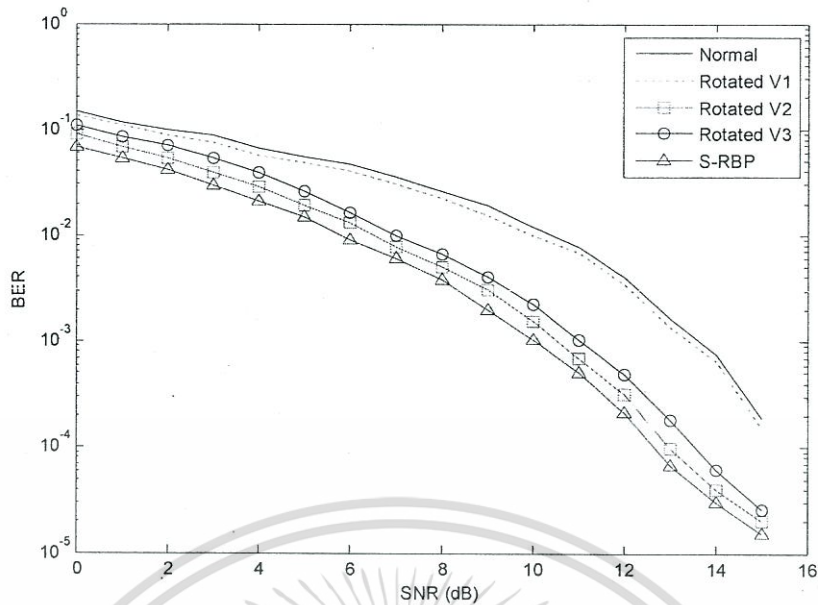
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบ accumulated weight และคาบเวลาที่ใช้

Coding Scheme	Sector size (Track x bits)	Average Weight (after process)	Encoder Complexity	Additional Memory	Time /block (Sec)
S-RBP	3x 4080	0.1706	$n_b \times n_b \times L_r$	$(4 \log_2 n_b) \times n_p$	18.610
Rotated v1	3x 4080	0.1585	L_r	$L_r \times 4$	0.479
Rotated v2	3x 4080	0.1666	$L_r / 2$	$(L_r / 2) \times 4$	0.1155
Rotated v3	3x 4080	0.1662	$L_r / 3$	$(L_r / 3) \times 4$	0.1149

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวิธีการเข้ารหัสโดยใช้ช่องสัญญาณดังรูปที่ 4.14 แล้วทำการหาค่า BER เพื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณที่ไม่มีวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลด BER ของระบบได้ใกล้เคียงกับวิธีการ SRBP ดังรูปที่ 4.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.15 ผล BER ของการหมุนวนข้อมูลตามวิธีที่ 2 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผล BER ของการหมุนวนข้อมูลทั้ง 3 วิธีเมื่อเทียบกับวิธีการ S-RBP

4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณอ่านกลับและวิธีต่างๆที่ช่วยให้แอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มขนาดของเกาะข้อมูล สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเมื่อเทียบกับระบบที่มีขนาดบิตข้อมูลปกติ ซึ่งจากการทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่มีเมื่อมีการเปรียบเทียบเมื่อมีการเพิ่มของขนาดของเกาะข้อมูลและที่ความต่างของกรณีบิตข้อมูลในกรณีต่างๆอย่างชัดเจน ที่ ความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(Signal to noise ratio: SNR) เดียวกัน เช่นในกรณีที่แอมป์ที่สุดของรูปแบบข้อมูลที่มีขนาดใหญ่กว่าก็ยังมีอัตราบิตผิดพลาด(Bit error rate: BER) ที่ต่ำกว่า แสดงถึงประสิทธิภาพที่สูงกว่ากรณีที่ดีที่สุดของรูปแบบข้อมูลที่ดีที่สุดใเกาะข้อมูลที่มีขนาดปกติ [33]

อีกทั้งได้ศึกษาในด้านการเพิ่มอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลต่อระยะห่างระหว่างแทร็กข้อมูล (Bit aspect ratio:BAR)ในสื่อบันทึกข้อมูลที่มีการจัดรูปแบบอ่าวเรียง (Staggered island bit pattern media) โดยทดลองที่ BAR=1 และ BAR= 1.5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของระยะห่างระหว่างบิตข้อมูลต่อระยะห่างระหว่างแทร็กเพิ่มขึ้น(BAR=1.5) มีผลต่อความแรงของสัญญาณอ่านกลับ และช่วยลดอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate: BER) ลงจากระบบปกติ(BAR=1)อย่างชัดเจน [33]

จากการศึกษาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลและการจัดรูปแบบชุดข้อมูลก่อนทำการบันทึกในสื่อบันทึกที่มีการจัดอาร์เรย์ข้อมูลแบบเฉียง(S-RBP)[15] ซึ่งระบบดังกล่าวมีความสามารถเพิ่มความแข็งแรงของอ่านกลับอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงพัฒนาวิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึกโดยการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากรูปแบบชุด

ข้อมูลดั้งเดิมก่อนทำการหมุนวนกับค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหมุนวนรูปแบบชุดข้อมูล เพื่อทำการจัดรูปแบบของชุดข้อมูลเพื่อหาค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุด รวมถึงจำนวนการหมุนวนที่ทำให้เกิดรูปแบบชุดข้อมูลที่ทำให้ได้ค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุดที่มากที่สุด ซึ่งผลการทดลองสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณอ่านกลับจากระบบปกติโดยสัญญาณอ่านกลับสูงสุดคือ 1 ในรูปแบบ 3x3 ไม่น้อยกว่าค่าน้ำหนักของสัญญาณอ่านกลับดั้งเดิม โดยเฉลี่ยแล้วมีความแรงของสัญญาณเพิ่มขึ้นถึง [34]

ซึ่งในการทดลองของผู้วิจัยพบว่าวิธีการหมุนวนชุดข้อมูลแบบที่สองมีประสิทธิภาพดีที่สุดในวิธีการหมุนวนฯ ทั้ง 3 แบบ สาเหตุที่ทำให้วิธีการหมุนวนฯ แบบที่ 2 นั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุคนั้น เพราะ การหมุนวนฯ แบบที่ 1 เมื่อได้ทำการหมุนวนชุดข้อมูล 3x3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bit จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะขยับไปที่ k^{th} bit และทำการหมุนวนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์นั้น การหมุนวนในครั้งที่ 2 และครั้งต่อมา จะไปเปลี่ยนแปลงรูปแบบข้อมูลที่ถูกจัดไว้ดีที่สุดแล้ว ทำให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของทั้งเซกเตอร์ไม่ได้อย่างที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งในวิธีการหมุนวนรูปแบบที่ 2 นั้น เมื่อได้ทำการหมุนวนชุดข้อมูล 3x3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bit จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะขยับไปที่ $(k+1)^{th}$ bit และทำการหมุนวนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งวิธีการที่ 2 นี้เป็นการจัดรูปแบบที่ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดของผู้วิจัย เพราะเมื่อมีการจัดรูปแบบชุดข้อมูลที่ให้ค่าน้ำหนักที่ดีที่สุดแล้ว การหมุนวนลำดับต่อมาได้ขยับไปเริ่มในลำดับบิตข้อมูลที่ยังไม่ได้ให้ค่าน้ำหนักที่ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการหมุนวนฯ รูปแบบนี้ ให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับวิธีการ S-RBP ที่สุด และในวิธีการหมุนวนฯ แบบที่ 3 นั้นเมื่อได้ทำการหมุนวนชุดข้อมูล 3x3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bit จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 จะขยับไปที่ $(k+2)^{th}$ bit และทำการหมุนวนรูปแบบข้อมูลไปจนครบทั้งเซกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งผลการทดลองวิธีการนี้ให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับวิธีการที่ 2 ของผู้วิจัย แต่ด้วยการทำงานของวิธีการนี้ เมื่อมีการจัดรูปแบบข้อมูลใน 3x3 แรกที่ตำแหน่ง $(k-1)^{th}$ bit แล้ว ระบบขยับไปยัง 3x3 ต่อมาที่ $(k+2)^{th}$ bit ซึ่งในส่วนของการยอต่อระหว่างชุดข้อมูล 3x3 ก่อนหน้า และชุดข้อมูล 3x3 ต่อมาไม่ได้มีการพิจารณาค่าน้ำหนักของรูปแบบที่เกิดขึ้น ทำให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของวิธีการที่ 3 นี้ไม่ดีเท่ากับค่าน้ำหนักเฉลี่ยของวิธีการที่ 2

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบความซับซ้อนและหน่วยความจำเพิ่มที่ใช้

Coding Scheme	Sector size (Track x bits)	Average Weight (after process)	Encoder Complexity	Additional Memory (bit)	Time /block (Sec)**
S-RBP	3x 4080	0.1706	3,353,000	48	18.610
Rotated v1	3x 4080	0.1585	4,080	16,200	0.479
Rotated v2	3x 4080	0.1666	2,040	8,320	0.1155
Rotated v3	3x 4080	0.1662	1,360	5,440	0.1149

** Intel® Core™ i7 5500U 2.4GHz memory 8GB OS: Windows 10 64 Bit

นอกจากนี้ได้ประยุกต์ใช้การหาค่าน้ำหนักสะสมเฉลี่ย ด้วยวิธีการคำนวณค่าน้ำหนักสะสม (accumulation weight calculation) มาใช้ในการเปรียบเทียบ ความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับ ในระบบ BPMR ระหว่างวิธีการ S-RBP กับวิธีการหมุนวนบิตข้อมูลก่อนทำการบันทึก โดยมีการเทียบ ในส่วนความแข็งแรงของสัญญาณอ่านกลับเฉลี่ย รวมถึงการพิจารณาในด้านความเร็วในการทำงาน ซึ่งในการทดลองผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันการจับเวลาใน Simulation Program ได้คาบเวลาในการเข้ารหัสเฉลี่ย ในการทำงานต่อ 1 บล็อกข้อมูล โดยวิธีการ S-RBP ใช้เวลาในการทำงาน 18.61 วินาทีต่อ 1 บล็อกข้อมูล ในขณะที่วิธีการหมุนวนบิตข้อมูลใช้เวลาเพียง 0.12 วินาทีต่อ 1 บล็อกข้อมูล

อย่างไรก็ตาม วิธีการเข้ารหัสด้วยวิธีการหมุนวนชุดข้อมูลก่อนทำการบันทึกทั้ง 3 รูปแบบที่ได้นำเสนอนั้น ถึงจะมีข้อดีในเรื่องความเร็วในการทำงานเพราะความซับซ้อนของระบบที่ต่ำแต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดในการใช้หน่วยความจำเพิ่มเติมซึ่งสูงกว่าวิธีการ S-RBP และหากการอ่านข้อมูลดังกล่าวผิดพลาดหรือจำนวนครั้งของการหมุนวนของชุดข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำเพิ่มสูญหาย ก็จะทำให้การอ่านข้อมูลในบล็อกข้อมูลนั้นๆ ผิดพลาดไปทั้งบล็อกข้อมูล



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยในด้านการเพิ่ม BAR และขนาดของเกาะข้อมูล ในช่องสัญญาณ S-BPMR ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่ม BAR จาก BAR=1 เทียบกับ BAR = 1.5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อ BAR เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบในด้าน BER ดีขึ้น เนื่องจากผลกระทบจาก ITI ลดลง จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มขนาดของเกาะข้อมูล โดยทำการทดลองที่ขนาดของเกาะข้อมูลเท่ากับ 1 เท่า และ 1.2 เท่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดของเกาะข้อมูลเพิ่มขึ้นทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณอ่านกลับเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพของระบบด้าน BER ดีขึ้น จากการทดลองทำให้ผู้วิจัยเห็นว่าผู้วิจัยสามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณอ่านกลับด้วยการเพิ่ม BAR และขนาดของเกาะข้อมูล

หลังจากนั้น ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลด้วยวิธีการหมุนวนรูปแบบข้อมูลทีละ 3x3 ก่อนทำการบันทึก โดยการบันทึกจำนวนการหมุนวนที่ทำให้เกิดรูปแบบข้อมูลที่ทำให้ได้สัญญาณอ่านกลับที่ดีที่สุด ในหน่วยความจำเพิ่ม และอาศัยวิธีการคำนวณค่าน้ำหนักสะสมโดยผู้วิจัยทดลองด้วยวิธีการหมุนวน 3 รูปแบบ ในวิธีการที่ 1 เป็นการหมุนวนครั้งละ 3x3 ใช้วิธีการเลื่อนหน้าต่างในการหมุนวนทีละ 1 บิต ซึ่งวิธีการนี้ การหมุนวนในครั้งที่ 2 และต่อๆ ไปจะทำให้รูปแบบที่มีการจัดไว้ดีแล้วเสียหาย และวิธีการที่ 2 เป็นการหมุนวนครั้งละ 3x3 ใช้วิธีการเลื่อนหน้าต่างในการหมุนวนทีละ 2 บิต มีผลให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นในด้าน BER มากที่สุดของวิธีการทั้ง 3 แบบ เพราะเป็นการพิจารณาบิตข้างเคียงในการหมุนวนข้อมูลด้วย และวิธีการที่ 3 เป็นการหมุนวนครั้งละ 3x3 ใช้วิธีการเลื่อนหน้าต่างในการหมุนวนทีละ 3บิต วิธีการที่ 3 นี้ให้ผลการทดลองเป็นรองจากวิธีการที่ 2 ทั้งนี้วิธีการหมุนวนทั้ง 3 รูปแบบใช้เวลาในการทำงานน้อยกว่าวิธีการที่มีอยู่เดิมอย่างเช่น SRBP เพราะมีความซับซ้อนของระบบต่ำ

แต่วิธีการที่นำเสนอนี้ มีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้หน่วยความจำเพิ่มที่มาก และหากการอ่านค่าจำนวนครั้งของการหมุนวนผิดพลาด จะทำให้การอ่านข้อมูลในบล็อกดังกล่าวผิดพลาดไปอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นการเก็บจำนวนครั้งของการหมุนวนด้วยวิธีการนี้จะต้องอาศัยหน่วยความจำเพิ่มที่ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

ซึ่งแนวทางในการปรับปรุงหรือต่อยอดการเข้ารหัสมีดังนี้ 1. ทดสอบการทำงานในช่องสัญญาณจริงเพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุงและแก้ไขต่อไป 2. นำแนวคิดที่ได้จากการวิจัยนี้ไปทำการออกแบบวิธีการเข้ารหัสข้อมูลแบบใหม่ที่ใช้หน่วยความจำเพิ่มที่น้อยลง 3. ปรับปรุงเรื่องข้อผิดพลาดของจำนวนครั้งของการหมุนวนข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Moser, "Magnetic recording: Advancing into the future," J. Phys. D, Appl. Phys., vol. 35, no. 19, pp. R157–R167, 2002.
- [2] J. P. J. Groenland and L. Abelman, "Two dimensional Coding for Probe Recording on Magnetic Patterned Media," IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2307–2309, Jun. 2007.
- [3] X. Shao, L. Alink, J.P.J. Groenland, L. Abelman, and C. H. Slump, "A Simple Two-Dimensional Coding Scheme for Bit Patterned Media," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, pp. 2559–2562, Oct. 2011.
- [4] A. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ECTI-CON 2013, Krabi, May 15-17, 2013.
- [5] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A 2D-Interference Mitigation with a Multitrack Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 June – 3 July 2013.
- [6] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Recorded-Bit Patterning Scheme with Accumulated Weight Decision for Bit Patterned Media Recording," IEICE Trans. Electronics, 2013.
- [7] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Two-Dimensional Coding for Bit-Patterned Media Magnetic Recording System", ECTI Transaction 2013.
- [8] Y. Kurihara, M.Z. Ahmde, H. Osawa, and Y. Okamoto, "CITI code based on PR1 equalized level for perpendicular recording", in Proc. of INTERMAG Asia 2005, pp. 979-980, 2005.
- [9] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System", in Proc. of The 58th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference 2013.
- [10] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System", Journal of Applied Physics 2014.
- [11] 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.
- [12] R. New, "The Future of Magnetic Recording Technology", Hitachi Global Storage Technologies, April 11, 2008.
- [13] S. Navabi, B. V. K. Vijaya Kumar, and J. A. Bain, "Two-Dimensional Pulse Response and Media Noise Modeling for Bit Patterned Media", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 3789–3792, November, 2008.

- [14] S. Navabi, B. V. K. Vijaya Kumar, and J. A. Bain, Chip Hogg and S. A. Majetich, "Application of Image Processing to Characterize Patterning Noise in Self-Assembled Nano-Masks for Bit Patterned Media", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.10, pp.3523-3526, Oct. 2009.
- [15] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, Introduction to Algorithms, 2nd ed. Cambridge: MIT Press and McGraw-Hill, 2001.
- [16] H. Burkhardt, "Optimal data retrieval for high density storage," in CompEuro 89, VLSI and Computer Peripherals. VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and their Interconnection Networks, 2002
- [17] B. Terris and T. Thomson, "Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 38, pp. R199, 2005.
- [18] Z. Wu and J. Cioffi, "Low-complexity iterative decoding with decision aided equalization for magnetic recording channels," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 19, no. 4, pp. 699-708, 2001.
- [19] J. Kim, and J. Lee, "Two-Dimensional 5:8 Modulation Code for Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl. Phys. 48, 2009.
- [20] J. Kim, J. K. Wee, and J. Lee, "Error Correcting 4/6 Modulation Codes for Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl. Phys. 49, Aug. 2010.
- [21] L. M. M. Myint and P. Supnithi, "Off-Track Detection Based on the Readback Signals in Magnetic Recording," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 11, Nov. 2012.
- [22] S. Koonkarnkhai, N. Chirdchoo, and P. Kovintavewat, "Iterative Decoding for High-Density Bit-Patterned Media Recording," Procedia Engineering 32, pp.323-328, 2012.
- [23] J. Moon and W. Zeng, "Equalization for maximum likelihood detector," IEEE Trans. Magn., vol. 31, no. 2, pp. 1083-1088, Mar. 1995.
- [24] E. Deza and M. Marie, Encyclopedia of Distances, page 94, Springer, 2009.
- [25] A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," IEEE Transactions on Information Theory, April, 1967.
- [26] C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording," The 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference 2014. (under review process)
- [27] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording," in Proc. of IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG Europe 2014, 2014.

- [28] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn. 2014.
- [29] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Study of 2D Coding Schemes for ISI and ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording Channels," in Proc. of ITC-CSCC 2014, Phuket, Thailand, 1 July - 4 July 2014.
- [30] Yibin Ng, KuiCai, and B.V.K Vijaya Kumar, "Channel Modeling and Equaizer Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 6, pp.1976-1982, June. 2012.
- [31] A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Two-Dimensional Coding Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," Journal of Applied Physics 117, 17A904 (2015).
- [32] A. Arrayangkool, "2D coding Scheme for ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording Channels," a thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for degree of doctor of philosophy in information and system engineering. Faculty of collage of data storage innovation., King Monhkut's institute of Technology Ladkrabang., 2014, KMITL-2014 DS-D-001-01
- [33] C. Boonlorm, A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMR Channel with SRBP Method" in Proc. of ITC-CSCC 2015, pp. 452-454, Seoul, Korea, 29 June - 2 July 2015
- [34] C. Boonlorm, A. Arrayangkool, "Read-Back Signal Amplitude Improvement Using Rotation Method in Staggered BPMR Channel" in Proc. of ITC-CSCC 2015, pp. 449-451, Seoul, Korea, 29 June - 2 July 2015



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1 C. Boonlorm, A. Arrayangkool, "Read-Back Signal Amplitude Improvement Using Rotation Method in Staggered BPMR Channel" in Proc. of ITC-CSCC 2015, pp. 449-451, Seoul, Korea, 29 June – 2 July 2015
- 2 C. Boonlorm, A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMR Channel with SRBP Method" in Proc. of ITC-CSCC 2015, pp. 452-454, Seoul, Korea, 29 June – 2 July 2015

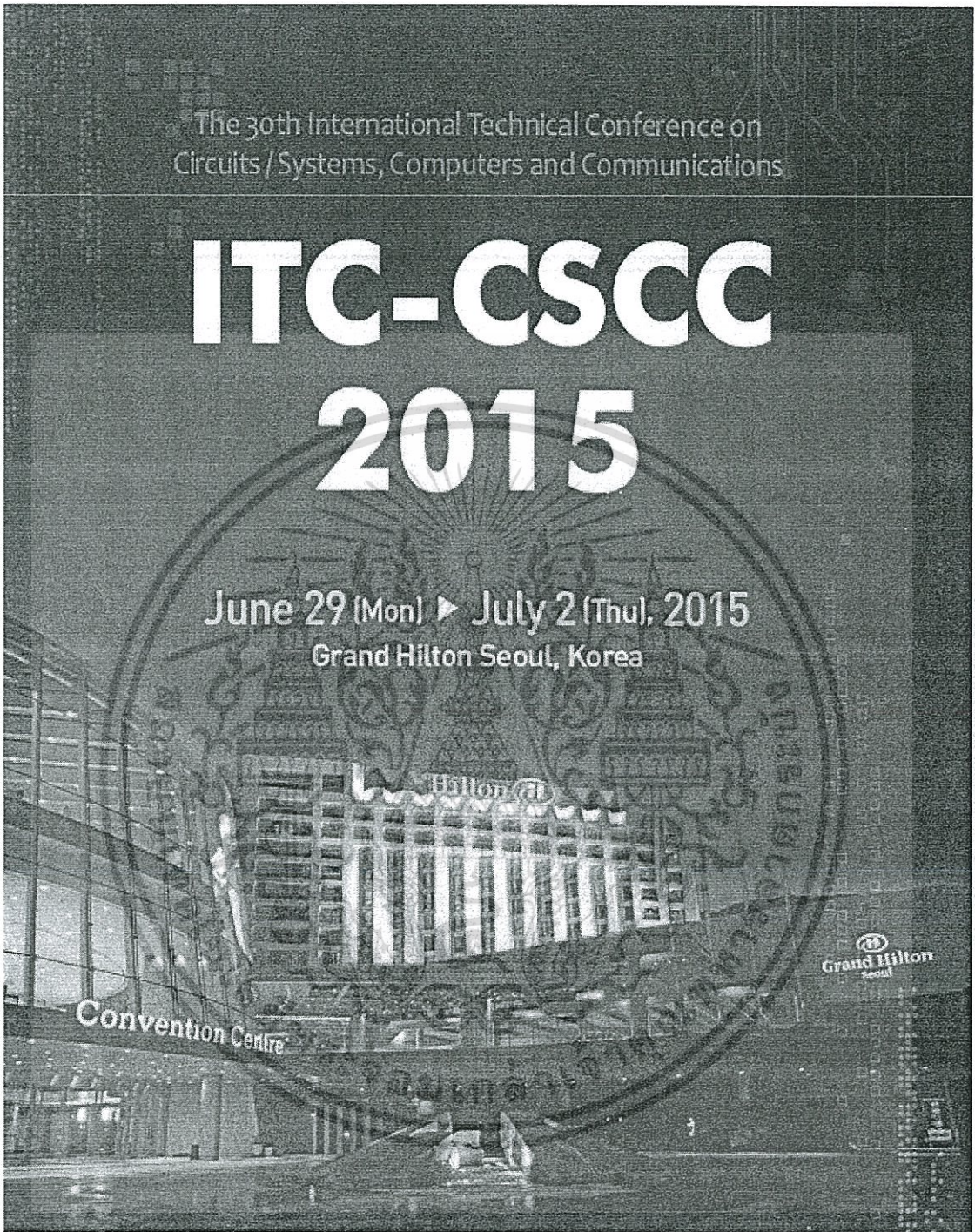


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 30th International Technical Conference on
Circuits / Systems, Computers and Communications

ITC-CSCC 2015

June 29 (Mon) ▶ July 2 (Thu), 2015
Grand Hilton Seoul, Korea



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ITC-CSCC 2015

The 30th International Technical Conference on
Circuits / Systems, Computers and Communications

Oral Session

OS-11

Communications
(Communication Signal Processing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Read-Back Signal Amplitude Improvement Using Rotation Method in Staggered BPMR Channel

Chitaworn Boonlorm, and Autthasith Arrayangkool

College of data storage innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
s6609005@kmitl.ac.th, kaauttha@kmitl.ac.th

Abstract

This paper proposes an alternative for reducing effect of two-dimensional interference (2DI) in staggered bit pattern media system (SBPMR). By analyzing 3×3 data matrix which will be recorded in the channel, we found that 2DI can be both constructive and destructive signal. The destructive interference reduces the read back signal strength. To avoid the destructive cases, we change the data pattern by rotating technique. Then the statistical results show that the proposed methodology can improve the signal amplitude about 49%

Keywords: Signal Amplitude Improvement, 2D interference, Staggered BPMR.

1. Introduction

In the present the recording area requirements is growing up rapidly for digital media, music, photo and social media content storage. Consequently data storage industry needs more capacity for hard disk drive (HDD). Unfortunately the super paramagnetic effect [1] limits the maximum areal density (AD) of the magnetic recording in HDD. Therefore the Bit Pattern Media Recording (BPMR) is one of the possible technologies to achieve this limitation. The BPMR can be consisted of not only regular array media but also staggered media.

Some research [1] focuses on the coding scheme to avoid the worst destructive pattern for regular array BPMR. For example, Groenland et al. [2] introduces the 7/9 coding methodology using fixed additional bits. Moreover, Shao et al. [3] presents the 5/6 encoding scheme with parity bit and error correction ability. Then A. Arrayangkool et al. [4] proposes the recorded bit patterning scheme by simple shifting method and accumulated weight decision. However this paper contributes the new rotating method in another dimension for reducing the destructive interference in SBPMR which provides the different condition.

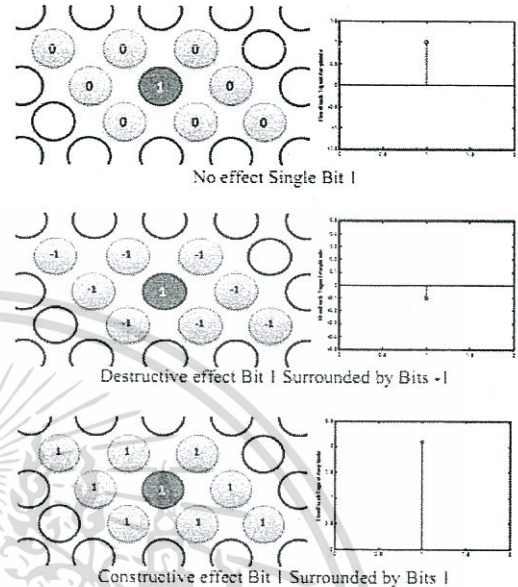


Figure 1. 2DI effect

2. Channel Model



Figure 2. Channel Model

In this paper, we analyze the discrete staggered BPMR channel in [5]. As in figure 1. A message input $d_i \in \{\pm 1\}$ is separated into 3 tracks (upper track $d_{i-1,j}$, main track: $d_{i,j}$, and lower track: $d_{i+1,j}$) and they are passed to the discrete channel without noise as $c_{i,j} = \sum_m \sum_n d_{i-m,j-n} G(m,n)$, Where $c_{i,j}$ is 3 track: read-back signal, $G(m,n)$ describes 3×3 channel

matrix which is determined by $G(m, n) = S((m + 0.5n)T_x, nT_z)$, S represents the value from sensitivity function which is defined as $S(x, z) = A \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{Cx}{PW_x}\right)^2 + \left(\frac{Cz}{PW_z}\right)^2\right]\right\}$, m and $n \in \{-1, 0, 1\}$ mean indices of the bit island in down track and cross track respectively, i is the bit index, j presents track index, and A means peak amplitude of the sensitivity function, C is Constant for the relationship between PW_{50} and standard deviation of normal distribution, ($C = 2.3548$), PW_x and PW_z are pulse width at 50% of amplitude (PW_{50}) in the down track and cross track direction, x and z are down track and cross track position in nm.

3. Proposes Methodology

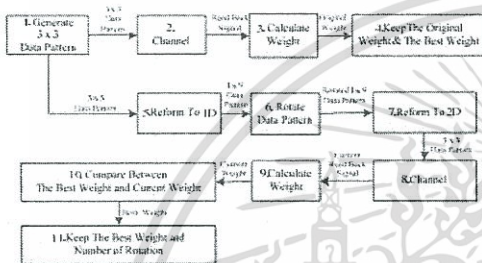


Figure 3. Flow Diagram

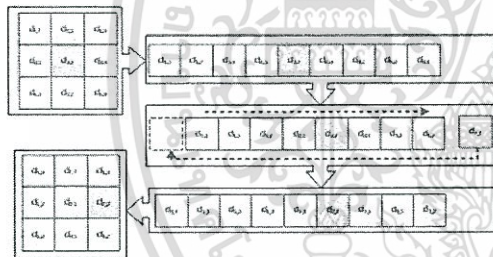


Figure 4. Rotation Technique

Based on figure 3, we firstly generated all possible 3 x 3 data patterns. Then each 3x3 data pattern is passed through the staggered BPMR channel. After that, we got the central bit read-back signal to calculate weight and keep it as the original weight and the best weight. As in figure 3, the original 3x3 data pattern is

changed size to 1x9 format. Then we rotate the 1x9 data pattern. After rotating, we changed data pattern from 1x9 data pattern back to 3x3 data pattern for passing to the channel again as in figure 4. Then we got rotated center bit read-back signal to calculate the rotated weight. In order to find the best data pattern, we compare between best weight and rotated weight. If the rotated weight is more than the best weight, we will keep the rotated weight and number of rotation. The 5th to 11th steps will be repeated for 8 times (all possible rotation). By this method, the weight represents the severity of the interference. If the weight is positive, it means the data pattern provides the constructive effect. On the other hand, the weight is negative when it is calculated from the destructive data pattern. For weight calculation, we used the equation

$$W_i = \begin{cases} A_i - A_j, & A_i > 0 \text{ and } A_j > 0 \\ |A_i| - A_j, & A_i < 0 \text{ and } A_j < 0 \\ -|A_i| + |A_j|, & A_i > 0 \text{ and } A_j < 0 \\ |A_i| + |A_j|, & A_i < 0 \text{ and } A_j > 0 \end{cases}$$

based on [4], where A_i and A_j are the read-back amplitude of central bit and single bit case respectively.

Table 1: Results

Pattern Index #1k	3x3 Data Pattern									Weight	Number of Rotation	Weight Difference	
	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{21}	d_{22}	d_{23}	d_{31}	d_{32}	d_{33}				
1 O	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.1	0	0.00000	
1 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.1	0	0.00000	
2 O	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
2 R	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
3 O	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.706	7	0.38457	
3 R	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
4 O	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.697	8	0.38457	
4 R	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
5 O	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.706	6	0.38457	
5 R	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
6 O	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.697	0	0.00000	
6 R	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.697	0	0.00000	
...	
63 O	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.294	0	0.00000	
63 R	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.294	0	0.00000	
64 O	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.303	1	0.38457	
64 R	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0.588	0	0.00000	
65 O	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.706	2	0.38457	
65 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1.091	0	0.00000	
66 R	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.497	3	0.09024	
66 O	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.787	0	0.00000	
67 O	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.312	2	0.47481	
67 R	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.787	0	0.00000	
68 O	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.303	0	0.00000	
68 R	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0.778	1	0.38457	
...	
123 O	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0.294	1	0.09024	
123 R	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0.385	0	0.00000	
124 O	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.303	0	0.00000	
124 R	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	0.778	1	0.47481	
125 O	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.294	0	0.00000	
125 R	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.294	0	0.00000	
126 O	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.303	1	0.38457	
126 R	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	0.588	0	0.00000	
127 O	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.588	0	0.00000	
127 R	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.588	0	0.00000	
128 O	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	0.497	0	0.00000	
128 R	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1.082	1	0.38457	
Total											253.05620		
Average											0.49424		

*R = Rotated Pattern, O = Original Pattern

4. Experiment

In the simulation model we focus only on the effect of ITI and ISI without AWGN and media noise. The table 1 shows the simulation results with the weight calculation. By comparing between the original weight and rotated weight, we found that each rotated weight is equal or higher than its original weight for all 3x3 data patterns. Furthermore, average of difference between the original and rotated weight is about 0.4942 which is the 49% relative to the peak amplitude = 1.

5. Conclusion

The different weight result shows that the proposed methodology constructs the peak amplitude about 49%. Therefore, the methodology can conceptually improve the read-back signal amplitude by using rotation method and the weight calculation. In the next research, we will use this finding to design coding scheme to reduce the bit error rate in the staggered BPMR channel with AWGN, media noise, equalizer and detector.

References

- [1] W. Chang and J. R. Cruz, "Inter-Track Interference Mitigation for Bit Patterned Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp.3899–3908, Nov. 2010.
- [2] J. P. J. Groenland and L. Abelmann, "Two dimensional Coding for Probe Recording on Magnetic Patterned Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2307–2309, Jun. 2007.
- [3] X. Shao, L. Alink, J.P.J. Groenland, L. Abelmann, and C. H. Slump, "A Simple Two-Dimensional Coding Scheme for Bit Patterned Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 2559–2562, Oct. 2011.
- [4] A. Arrayangkool, C. Warisam, 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.
- [5] Yibin Ng, Kui Cai, and B.V.K Vijaya Kumar, "Channel Modeling and Equaizer Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 6, pp.1976-1982, June. 2012.

A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMR Channel with SRBP Method

Chitaworn Boonlorm, Autthasith Arrayangkool and Chanon Warisarn

College of data storage innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
s6609005@kmitl.ac.th, kaauttha@kmitl.ac.th, kwchanon@kmitl.ac.th

Abstract

One of the biggest problems in bit patterned media recording systems is the two-dimensional interference (2DI). Because of the 2DI can reduce/amplify the read-back signal amplitude, it can cause an error at the read-back process. Moreover, the 2DI severity depends on the distance between bit islands and bit aspect ratio (BAR) as well. Therefore, this paper presents the effect of the island size and BAR of the staggered bit patterned media recording (SBPMR) channel with staggered recorded-bit patterning (SRBP) method.

Keywords: Island Size, Bit Aspect Ratio, staggered bit patterned media recording (SBPMR), staggered recorded-bit patterning (SRBP).

1. Introduction

To serve the abundance of the data storage demand, various data storage technologies have been improved. However, some methodology faced with the super-paramagnetic limitation that delays growing of hard-disk drive capacity. A bit-patterned media recording (BPMR) system is one of alternative approach, which expected to crop this limit and achieve an areal density (AD) beyond 4 Tb/in² [1]. In BPMR, the two dimensional interference (2DI) is a major problem because of the small track pitch and bit length at high areal density (AD). Therefore, many researchers proposed some methodologies such as the way to reduce the 2DI by placing the recorded bit island in staggered pattern [2] and shows that the bit error rate (BER) performance can be reduced using the staggered bit pattern, the 2D coding scheme to protect the data from the severe 2DI as presented in our previous proposed method [3-5]. The 2DI is originated from the magnetization of surrounding magnetic islands which has an effect on the recorded bit. Therefore, our previous work proposed the staggered recorded bit patterning (SRBP) scheme [5] to reduce the destructive inter-track interference (ITI) in staggered BPMR channel. Our proposed scheme well performs in bit

aspect ratio equal to 1; however, it never considered in other BAR factors and bit island size. Therefore, this paper presents the results of the study of these factors that have an effect on the SRBP performance.

The paper is organized as follows. After describing a SBPMR channel model in Section 2, Section 3 briefly explains how the SRBP decoding scheme perform. Simulation results are given in Section 4. Finally, Section 5 is the conclusion of this paper.

2. Channel Modeling

We consider the discrete-time staggered array BPMR channel model [5] with the proposed SRBP scheme as shown in Fig 1. A binary input sequence $a_k \in \{+1, -1\}$ with a bit period T_x is split into 3 tracks, and is sent to the SRBP transmitter block before passing through a channel which introduces the inter-symbol interference (ISI), ITI, and position jitter noise. The read-back signal is further corrupted by electronics noise, w_k normally modeled as an additive white Gaussian noise (AWGN) with zero mean and variance, σ^2 . The read-back signal from k -th data bit on the i -th track can then be expressed as

$$r_{i,k} = \sum_m \sum_n b_{i-m,k-n} h(m,n) + w_{i,k}, \quad (1)$$

where $b_{i,k}$'s are the recorded bits, $h(m,n)$ is the 2D channel response coefficients, m and n represent the indices of the bit islands in down-track and cross-track directions, respectively.

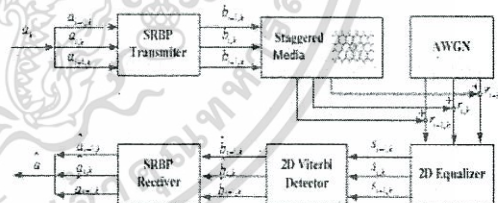


Fig. 1: The SBPMR channel model with the proposed SRBP method.

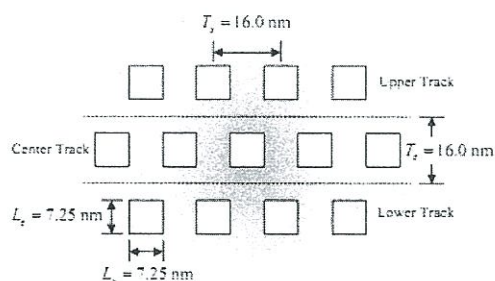


Fig. 2: Configuration of the staggered array islands for 2.5 Tb/in² under the isolated island's pulse response.

For the staggered array BPMR system, the 2D channel response coefficient $h(m, n)$ can be obtained by sampling the isolated island's pulse response at non-integer multiples of the bit period T_x and the track pitch T_z i.e.,

$$h(m, n) = P((m + 0.5n)T_x, T_z), \quad (2)$$

where $P(x, z)$ is the isolated island's pulse response, x denotes down-track direction and z denotes cross-track direction. We consider the isolated island's pulse response in a form of

$$P_{(x,z)} = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\Lambda_x \left(\frac{x + \Delta_x}{cPW_x} \right)^2 + \Lambda_z \left(\frac{z + \Delta_z}{cPW_z} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

where A is the peak amplitude of the pulse response, which is assumed to be 1, Λ_x and Λ_z are the down-track and cross-track island size fluctuations, respectively. Δ_x is the down-track location fluctuation, Δ_z is the across-track location fluctuation, PW_x is the PW_{50} of the along-track pulse, PW_z is the PW_{50} of the across-track pulse, and c is a constant to account for the relationship between PW_{50} and the standard deviation of a Gaussian pulse ($c = 1/2.3548$) [6]. Here, we assume that there is only the along-track location fluctuation in the system (i.e., $\Delta_z = 0$), and it is modeled as a truncated Gaussian probability distribution function with zero mean and σ_x^2 , where σ_x is specified as percentage of the bit period T_x . Next, the read-back data sequence $r_{i,k}$ is equalized by a 2D equalizer to obtain the data sequence $s_{i,k}$, and it is fed to the 2D Viterbi detector [5] to determine the most likely input sequence.

Finally, the SRBP receiver block is used to rearrange the data sequence with an aid of the

additional buffer memory. Specifically, the data sequence in each track will be shifted back to its original position according to the number of shifting stored in the additional buffer memory that is obtained from the SRBP transmitter block.

3. SRBP Method

The proposed SRBP scheme can be explained as follow. We consider the 3 data tracks as shown in Fig. 2, then the isolated island's pulse is moved (centered at the center track) from the beginning to the end of the track. In each shifting time of the isolated island's pulse, the weight (signal amplitude) will be computed and accumulated through all bit sequence to obtain the total weight. In one shifting time, we define the weight to describe the severity level of the 2DI within the isolated island's pulse as illustrated in Fig. 2. According to our investigation outcomes, we found that the value of the weight could be either positive or negative, depending on whether the 2DI is constructive or destructive. However, in this study, we consider the total weight obtained only from the negative weight summation so as to take only the destructive effect into account. Then, we given the detected k -th bit on the i -th track, the weight of the i -th data pattern denoted as W_i is defined as following

$$W_i = \begin{cases} A_i - A_r, & A_i > 0 \text{ and } A_r > 0 \\ A_i [-A_r], & A_i < 0 \text{ and } A_r > 0 \\ -(A_i + |A_r|), & A_i > 0 \text{ and } A_r < 0 \\ -(|A_i| + A_r), & A_i < 0 \text{ and } A_r < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

where A_i and A_r are the peak amplitude of the read-back signal obtained from the i -th data pattern and the single bit case, respectively. Based on (4), we can find 128 weights for all possible data patterns [5].

4. Simulation and Results

We test the performance at the AD = 2.5 Tb/in². The along-track PW_{50} is 19.4 nm, and the across-track PW_{50} is 24.8 nm.

A signal-to-noise ratio (SNR) is defined as

$$\text{SNR} = 20 \log_{10}(1/\sigma) \quad (5)$$

in decibel (dB), where '1' is assumed to be the peak amplitude of the readback signal. The 2D 3×3 target and 2D 3×7 equalizer are designed based on an MMSE approach [5] in the presence of position jitter noise at the SNR required to achieve BER = 10⁻⁴. In the simulation, each BER is computed based on a

minimum number of 300 erroneous bits, and one data sector consisting of 4032 bits.

Fig. 3 shows the BER performance of differences schemes, where the labeled as "Normal Case: Island side = 1" represents the system using the island size $\Lambda_x = \Lambda_z = 1$ and without SRBP coding scheme, the labeled as "Best Case: Island side = 1" also represents the system using the island size $\Lambda_x = \Lambda_z = 1$ but performs with the proposed SRBP coding scheme, and the labeled as "Worst Case: Island side = 1" represents the possible case that system must be faced with the most severe 2DI and using the island size $\Lambda_x = \Lambda_z = 1$.

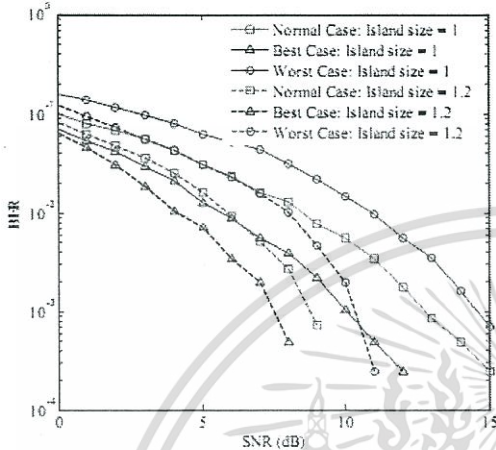


Fig. 3. BER Performance comparison with other schemes when the bit island sizes were increased.

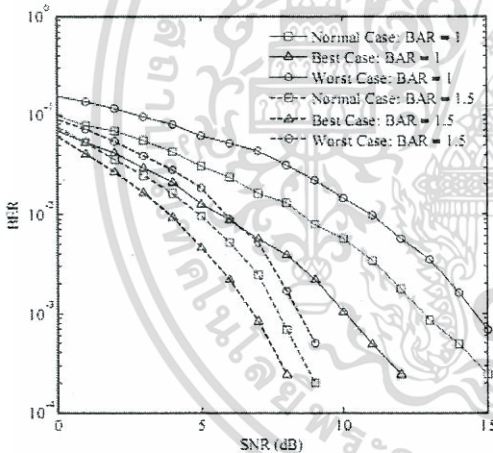


Fig. 4. BER Performance comparison with other schemes when the bit aspect ratios were increased.

The labeled as "Island side = 1.2" represents the system that given the $\Lambda_x = \Lambda_z = 1.2$ (e.g., in case of bigger islands). The result shows that the bigger island size provides the better than the normal case (smaller island size). However, our proposed SRBP scheme still yields the best performance in both cases.

We also study the effect of BAR of our proposed scheme by changing the bit period T_x and the track pitch T_z . Normally, we defined the T_x is equal to T_z (BAR = 1 as shown in Fig. 2); however, to find the BER performance when the BAR was increased (e.g. BAR = 1.5), we define the $T_x = 1.5T_z$ (BAR = 1.5) instead. As illustrated in Fig. 4, when the BAR was increased to be 1.5, although the gap performance between the proposed scheme was decreased when compared with BAR = 1. However, our proposed scheme still yields the better performance than the normal one (red line). The reduction of gap performance is due to when the BAR is higher; the ITI severity will be decreased. Therefore, in this study, we would like to design 2D coding to avoid the severe ITI. That is why the BAR = 1 was used in our research

5. Conclusion

This paper presents the results of the effect of bit island sizes and BARs to the proposed SRBP coding scheme in a SBPMR systems. The results show that the SRBP performance is greater when the BAR and/or island size are reduced. Consequently, the SRBP can work with small island size and BAR.

References

- [1] H. J. Richter et al., "Recording on bit-patterned media at densities of 1 Tb/in² and beyond," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2255–2260, Oct. 2006.
- [2] Ng, K. Cai, B. V. K. Kumar, T. C. Chong, S. Zhang, and B. J. Chen, "Channel Modeling and Equalizer Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 6, pp. 3214–3216, Jun. 2012.
- [3] 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.
- [4] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A constructive inter-track interference coding scheme for bit-patterned media recording system," *Journal of Applied Physics* 115, 17B703 (2014).
- [5] A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Two-Dimensional Coding Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," *Journal of Applied Physics* 117, 17A904 (2015).
- [6] 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.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายชิตวร บุญล้อม

วัน เดือน ปีเกิด 24 กันยายน 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ที่อยู่ 225/359 หมู่บ้านพฤษภาวิไล 1 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา
จังหวัดปทุมธานี 12130

ประวัติการศึกษา 2543 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น

ประวัติการทำงาน 2545 หัวหน้าชุด ระดับ 5 ฝ่ายเทคนิคและออกอากาศ
2558 วิศวกร ระดับ 6 ฝ่ายเทคนิคและออกอากาศ
สถานีวิทยุโทรทัศน์กองทัพบก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้