

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่เที่ยงตรงสำหรับ

ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ

Application of Image Processing to Model an Accurate Medium Modeling for  
Two-Dimensional Magnetic Recording

ดร. ชานนท์ วริสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่เที่ยงตรงสำหรับ  
ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ

**Application of Image Processing to Model an Accurate Medium Modeling for  
Two-Dimensional Magnetic Recording**

ดร. ชานนท์ วริสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

12833320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่เที่ยงตรง สำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ

แหล่งเงิน : งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ..... 2557..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 150,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

..... หัวหน้าโครงการ : ดร. ชานนท์ วิจารณ์ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล.....

..... ผู้ร่วมโครงการ: นายณนทรัฐ บำรุงเกียรติ.....

### บทคัดย่อ

..... เการมีแบบจำลองสำหรับการจำลองโครงสร้างเกรนแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลที่ีร่วมกับการจำลอง การเขียนข้อมูลระดับบิตลงบนสื่อบันทึกข้อมูลที่เสมือนจริงนั้น ถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับระบบ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ (Two-Dimensional Magnetic Recording, TDMR) ดังนั้น บทความนี้เรา จึงได้นำเสนอกระบวนการการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่เที่ยงตรงของกรานูลาร์ (granular) สื่อบันทึกข้อมูล แบบที่มีความไม่เป็นแม่เหล็กกันระหว่างเกรนด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ โดยการนำภาพดิจิทัลกรานูลาร์ของสื่อบันทึกข้อมูลจริงมาเป็นภาพรับเข้าหรือภาพต้นแบบ นอกจากนั้นยังได้เสนอวิธีการดึงคุณลักษณะ สำคัญของกลุ่มข้อมูลภายในภาพดิจิทัลร่วมในขั้นตอนของการจำลองการเขียนข้อมูลลงสื่อบันทึกข้อมูลด้วย ทั้งนี้เพื่อให้กระบวนการเขียนข้อมูลมีความสมจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพ ความเป็นแม่เหล็กจากกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิตมีความคล้ายคลึงกับลักษณะของสื่อบันทึกข้อมูลจริง มากกว่าแบบจำลองกรานูลาร์ของสื่อบันทึกข้อมูลในลักษณะอื่นาที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้.....

คำสำคัญ : การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ, โครงสร้างเกรนแม่เหล็ก, กรานูลาร์ของสื่อบันทึกข้อมูล, การประมวลผลภาพ

**Research Title:** ..... Application of Image Processing to Model an Accurate Medium Modeling for  
Two-Dimensional Magnetic Recording.....

**Researcher:** ..... Dr. Chanon Warisarn.....

**Faculty:** ..... College of Data Storage Innovation **Department:**.....

## ABSTRACT

..... A good model for generating the grain structure of the medium together with a method to magnetize the data bits onto such a medium are becoming increasingly important for two-dimensional magnetic recording (TDMR) system. Therefore, in this paper proposes an accurate medium modeling method of granular medium with non-magnetic grain boundaries using an application of image processing, which the image of real magnetic grains is used to construct the magnetized medium. Moreover, the application of the blob feature extraction algorithm is also proposed for modeling the writing process. The magnetized medium is shown that the proposed magnetized medium is more closely related to the actual one, which contains more realistic grains with non-magnetic grain boundaries, than the existing grain modeling methods.....

**Keywords:** two-dimensional magnetic recording (TDMR), grain structure, granular medium, image processing.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนภายใต้ทุนโครงการวิจัยเงินรายได้ รหัสทุน 2557-01-10001 จาก  
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

*สมาน พิมล*

ดร. ชานนท์ วรিসาร

4 กรกฎาคม 2557



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IV

### สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลสองมิติ.....	3
บทที่ 3 วิธีการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูล.....	16
บทที่ 4 การตรวจหาข้อมูลแบบวนซ้ำโดยการใช้ข้อมูลอะพริออร์.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	37
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	39
ภาคผนวก.....	40
ประวัตินักวิจัย.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เปรียบเทียบความซับซ้อนในการวนรอบ ของแต่ละวิธีการตรวจหาข้อมูล .....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสี่บั้นทึกเชิงแม่เหล็กแบบกรานูลาร์.....	3
2.3 การกระจายตัวของดิสก์แบบปัวส์ซงและอัลกอริทึมคาร์ทโทรว์.....	4
2.4 กระบวนการล้อยครีเลกเซชัน.....	5
2.5 แผนภาพไวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องของจุดเคอร์เนล $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ และ $p_7$ .....	5
2.6 แสดงคอนเวกโพลีกอนรูปไวโรนอย $V(p_7)$ .....	7
2.7 แสดงขั้นตอนของอัลกอริทึมแกรแฮมสแกน.....	7
2.8 เงื่อนไขเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลอง.....	9
2.9 วางจุดเคอร์เนลลงบนระนาบ.....	9
2.10 อาณาบริเวณไวโรนอยที่สอดคล้องกับจุดเคอร์เนล.....	10
2.11 แสดงการหาจุดศูนย์กลางมวลของแต่ละอาณาบริเวณไวโรนอย.....	10
2.12 แสดงรูปไวโรนอยในรอบที่ 2, 3, 4 และ 5.....	11
2.13 แสดงการลบขอบเพื่อสร้างบริเวณสารไม่ใช่สารแม่เหล็ก.....	12
2.14 สภาพทางแม่เหล็กของสี่บั้นทึก.....	14
2.15 โครงสร้างของหัวอ่าน.....	14
2.16 รูปจำลองการอ่านข้อมูลหนึ่งบิตที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาด.....	15
3.1 โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพสี, (b) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพระดับสีเทา, และ (c) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพขาวดำ.....	17
3.2 (a) ตัวอย่างภาพดิจิทัลของสี่บั้นทึกข้อมูลจริง, (b) ผลลัพธ์หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมและปรับปรุงคุณภาพของภาพดิจิทัลสี่บั้นทึกข้อมูลจริง (ขนาดภาพ $W \times H$ จุดภาพ).....	17
3.3 แสดงการกำหนดตารางสี่เหลี่ยมสำหรับการเขียนข้อมูลระดับบิตลงบนภาพสี่บั้นทึกข้อมูล เมื่อ $NT = 3$ และ $NB/T = 6$ .....	19
3.4 แสดงถึงตัวอย่างการแทนบิตข้อมูลตัวอย่างที่ต้องการบันทึกลงบนภาพดิจิทัลสี่บั้นทึกข้อมูล เมื่อ (a) $NT = 1, NB/T = 10$ , และ (b) $NT = 2, NB/T = 8$ ในที่นี้บิตข้อมูล "0" ถูกแทนด้วยสีดำ และบิตข้อมูล "1" แทนด้วยสีขาว.....	20

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 ตัวอย่างการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิต เมื่อ (a) $NT = 1$ , $NB/T = 10$ , และ (b) $NT = 2$ , $NB/T = 8$ .....	20
3.6 (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected ซึ่งเป็นแพทเทิร์นที่พิจารณาใน 4 ทิศทางของจุดภาพ, (b) แพทเทิร์นแบบ 8-connected ซึ่งเป็นแพทเทิร์นที่พิจารณาใน 8 ทิศทางของจุดภาพรอบจุดกึ่งกลางแพทเทิร์น.....	21
3.7 ตัวอย่างของการจัดกลุ่มด้วย m-connected เมื่อ (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected และ (b) แพทเทิร์นแบบ 8-connected.....	21
3.8 ตัวอย่างของผลจากการจัดกลุ่มด้วย m-connected เมื่อ (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected, (b) ตัวอย่างส่วนหนึ่งของภาพดิจิทัลที่ต้องการจัดกลุ่ม, และ (c) ผลลัพธ์ในการจัดกลุ่มวัตถุภายในภาพ.....	21
3.9 ตัวอย่างแสดงการหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละเกรนของสื่อบันทึกข้อมูล.....	22
3.10 แสดงตัวอย่างการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิตรวมกับการดึงคุณลักษณะสำคัญของกลุ่มข้อมูลในภาพ เมื่อ (a) $NT = 1$ และ $NB/T = 10$ , และ (b) $NT = 2$ และ $NB/T = 8$ .....	22
3.11 แสดงตัวอย่างการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กกันระหว่างเกรนตามที่เสนอในวารสาร [6] เมื่อ (a) $NT = 1$ และ $NB/T = 10$ , และ (b) $NT = 2$ และ $NB/T = 8$ .....	23
4.1 การตรวจหาข้อมูลแบบหลายแท่ง.....	26
4.2 ลำดับการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างตัวตรวจหา.....	26
4.3 อัลกอริทึมการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะซิงโครระหว่างตัวตรวจหา.....	27
4.4 เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตระหว่างความหนาแน่น $1.42 \text{ Tb/in}^2$ , $1.77 \text{ Tb/in}^2$ , และ $2.37 \text{ Tb/in}^2$ .....	28
4.5 ลำดับการตรวจหาข้อมูลหลายแท่งแบบวนซ้ำ.....	30
4.6 บล็อกโคเดแกรมการตรวจหาข้อมูลหลายแท่งแบบวนซ้ำ.....	31
4.7 การแบ่งข้อมูล $a_k$ ออกเป็น 3 บล็อกย่อย.....	31
4.8 เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตระหว่างการตรวจหาข้อมูลแบบต่างๆ ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ $2.37 \text{ Tb/in}^2$ และ $4.21 \text{ Tb/in}^2$ .....	32
4.9 อัตราข้อผิดพลาดบิตในฟังก์ชันของจำนวนที่ $4.21 \text{ Tb/in}^2$ เมื่ออัตราส่วน $\text{SNR} = 13.5 \text{ dB}$ .....	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.10 เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตที่ความซับซ้อนเท่ากัน.....	34



# บทที่ 1

## บทนำ

เพื่อรองรับความต้องการการจัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน เทคโนโลยีในการบันทึกข้อมูลจึงต้องได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับความต้องการดังกล่าวอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน หนึ่งในอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่ได้รับการนิยมนามากที่สุดด้วยราคาต่อหน่วยความจุข้อมูลที่ต่ำนั่นก็คือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

เนื่องจากเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Perpendicular Magnetic Recording, PMR) [1] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ปัจจุบันนั้นเริ่มเข้าสู่ข้อจำกัดในหลายด้าน ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ได้เพียงพอตามความต้องการ ดังนั้นเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทางเลือกอีกหลายเทคโนโลยีจึงได้ถูกนำเสนอเพื่อก้าวผ่านข้อจำกัดของระบบ PMR อาทิเช่น ระบบการบันทึกข้อมูลแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึก (Bit-Patterned Media Recording, BPMP) [2] และเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใช้ความร้อนเข้าช่วย (Heat-Assistant Magnetic Recording, HAMR) [3] ซึ่งเทคโนโลยีทั้งทั้งสองสามารถเพิ่มความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ได้มากถึง 4 เทราบิตต่อตารางนิ้ว ( $Tb/in^2$ ) อย่างไรก็ตามระบบการบันทึกข้อมูลแบบ BPMP จำเป็นต้องเปลี่ยนเทคโนโลยีการสร้างสื่อบันทึกข้อมูล (media) ใหม่ ส่วนระบบการบันทึกข้อมูลแบบ HAMR ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนเทคโนโลยีของหัวเขียน (write head) ใหม่ซึ่งล้วนแล้วต้องใช้งบลงทุนในการลงทุนสูง

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-Dimensional Magnetic Recording, TDMP) [4] จึงได้ถูกนำเสนอขึ้น เพื่อเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือก โดยยังคงใช้เทคโนโลยีของสื่อบันทึกข้อมูลและหัวเขียนเดิม แต่ได้เน้นการพัฒนาทางด้านการประมวลผลสัญญาณเป็นหลัก ซึ่งระบบการบันทึกข้อมูลประเภทนี้ถูกคาดหวังว่าจะสามารถเพิ่มความจุข้อมูลเชิงพื้นที่ได้สูงถึง  $10 Tb/in^2$  นั้นหมายความว่าหนึ่งบิตข้อมูลจะใช้พื้นที่ประมาณ 50 ตารางนาโนเมตร ( $nm^2$ ) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวจะใช้เกรนแม่เหล็ก (magnetic grain) เพียงหนึ่งถึงสองเกรนเท่านั้น [4]

ดังนั้นเพื่อให้ได้สัญญาณอ่านกลับ (readback signal) ที่สมจริงก่อนนำไปใช้ประมวลผลร่วมกับการออกแบบอัลกอริทึมต่างๆ อาทิเช่น การออกแบบวงจรปรับเท่า (equalizer) วงจรตรวจจับ (detector) รวมถึงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ารหัสข้อมูล (coding) จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสัญญาณอ่านกลับของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิตินี้จะถูกสร้างหรือจำลองจากการประสาน (convolution) ระหว่างผลตอบสนองของหัวอ่าน (read head response) กับสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูล (magnetized) ที่ได้จากระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิตลงในเกรนแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูล

การออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่สมจริงเพื่อนำมาใช้ในการจำลองช่องสัญญาณระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งมีงานวิจัยต่างๆ ถูกนำเสนอในหลายวิธีการสร้าง อาทิเช่น การออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลด้วยการจำลองลักษณะของเกรนแม่เหล็กด้วยโวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete Voronoi grain model) [5] ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัย [6] นำเสนอการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกับสื่อบันทึกข้อมูลจริงด้วยแบบจำลองโวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความไม่เป็นแม่เหล็กคั่นระหว่างเกรน อย่างไรก็ตามแบบจำลองทั้งสองได้ถูกออกแบบด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งนอกจากจะมีความซับซ้อนสูงแล้ว ลักษณะของเกรนแม่เหล็กยังมีความคล้ายคลึงกับเกรนแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลจริงต่ำอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่เที่ยงตรงและเทคนิคการเขียนข้อมูลลงบนแบบจำลองสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่เรานำเสนอสามารถจำลองการเขียนข้อมูลและจำลองการสร้างเกรนแม่เหล็กได้คล้ายคลึงกับสื่อบันทึกข้อมูลจริง

## บทที่ 2

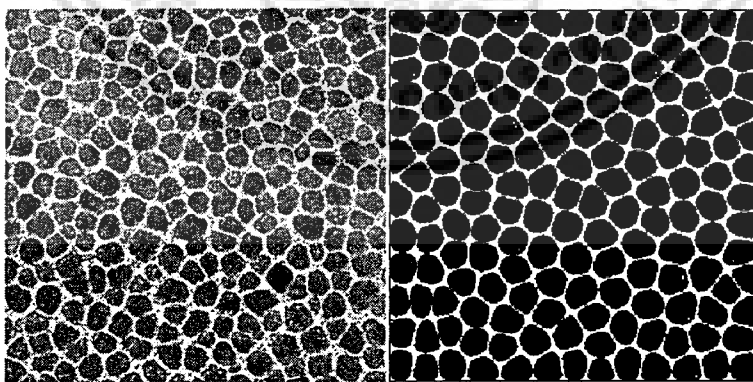
### แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลสองมิติ

#### 2.1 แบบจำลองของสื่อบันทึกแบบกรานูลาร์ (Granular medium modeling)

สื่อบันทึกเชิงแม่เหล็ก (Magnetic Recording Medium) โดยทั่วไปจะมีโครงสร้างแบบกรานูลาร์ (Granular structure) ซึ่งประกอบขึ้นจากหน่วยที่เล็กที่สุดเรียกว่าเกรนแม่เหล็ก (Magnetic grain) ที่มีการกระจายตัวอย่างสุ่มและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนในหัวข้อนี้นำเสนอการใช้เทคนิคเรขาคณิตเชิงคำนวณ (Computational geometry) เพื่อจำลองรูปร่างและการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็กแม่เหล็กดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

- 1) กำหนดเขตของจุดที่มีการกระจายตัวแบบสุ่มโดยหลักการกระจายตัวแบบปัวส์ซง (Poisson disk distribution) [6] ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการจำลองการกระจายตัวของเกรนแม่เหล็ก
- 2) สร้างรูปโพลีกอนขึ้นจากเขตของจุดที่ได้ทำการสุ่มวางลงไปในช่วงขั้นตอนที่ (1) โดยวิธีการลอร์ดรีแลกเซชัน (Lloyd's relaxation) ซึ่งเสมือนเป็นการจำลองรูปร่างของเกรนแม่เหล็ก
- 3) สร้างบริเวณของสารไม่ใช่แม่เหล็ก (Non-magnetic region) โดยวิธีคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ซึ่งเป็นการจำลองส่วนของสารไม่ใช่แม่เหล็กที่อยู่ระหว่างเกรนแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบกรานูลาร์ของจริงและแบบจำลองทางเรขาคณิต



รูปที่ 2.1: สื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบกรานูลาร์ที่ประกอบด้วยเกรนแม่เหล็กซึ่งแต่ละเกรนแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยสารไม่ใช่แม่เหล็ก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1

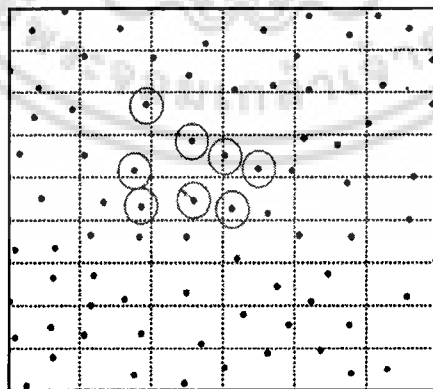
ขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 3

รูปที่ 2.2: ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสี่เหลี่ยมทึกเชิงแม่เหล็กแบบกรานูลาร์

## 2.2 การกระจายตัวของดิสก์แบบปัวส์ซง (Passion disk distribution)

การกระจายตัวของดิสก์แบบปัวส์ซงคือ การกระจายของจุดที่มีการกระจายตัวแบบสุ่ม (เรียกจุดดังกล่าวว่า จุดเคอร์เนล, Kernel points) ซึ่งทุกๆจุดถูกกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างกันไม่น้อยกว่า 2 เท่าของรัศมีค่าหนึ่ง ดังนั้น หากทำการวางวงกลม (Disk) ที่มีรัศมีดังกล่าวลงไปทีละจุดนั้นๆ จะไม่มีวงกลมใดที่ซ้อนทับกัน, อัลกอริทึม คาร์ทโทรว์ (Dart throwing algorithm) จะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการสร้างการกระจายตัวดังกล่าว อัลกอริทึม คาร์ทโทรว์จะทำงานในรูปแบบอนุกรม โดยที่จุดเคอร์เนลจะถูกสุ่มเลือกอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) จากนั้นทำการตรวจสอบว่าจุดเคอร์เนลนั้นๆ อยู่ห่างจากจุดเคอร์เนลที่สุ่มขึ้นมาก่อนหน้านี้มากกว่าระยะ  $2r$  หรือไม่ ถ้ามากกว่าจุดเคอร์เนลนั้นจะถูกบันทึกไว้ แต่ถ้าไม่น้อยกว่าจะทำการสุ่มใหม่กระบวนการนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้จุดเคอร์เนลครบตามต้องการ

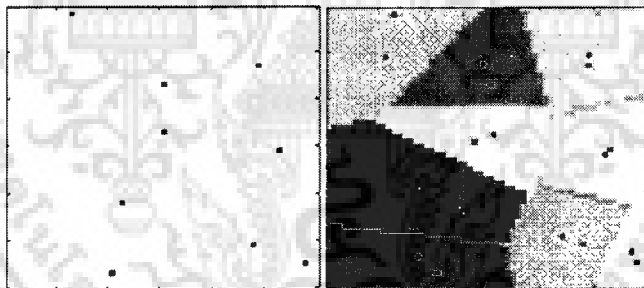


รูปที่ 2.3: การกระจายตัวของดิสก์แบบปัวส์ซงและอัลกอริทึมคาร์ทโทรว์

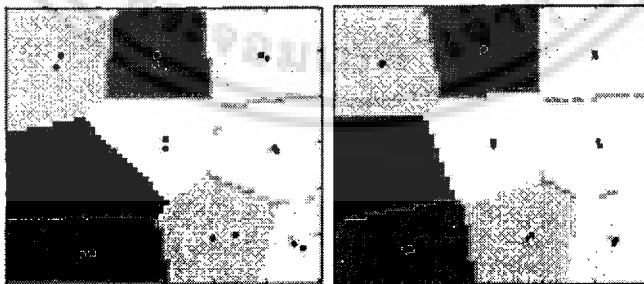
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ลอยด์รีแลกเซชัน (Lloyd's relaxation)

กระบวนการลอยด์รีแลกเซชันเป็นการทำงานในลักษณะวนซ้ำ (Iterative process) เพื่อสร้างรูปไวโรนอยที่มีขนาดตามต้องการ ขั้นตอนที่ 1) หลังจากได้จุดเคอร์เนลที่มีการกระจายตัวของดิสก์แบบบิวส์ซิงแล้ว ทำการสร้างแผนภาพไวโรนอย (Voronoi diagram) ที่สอดคล้องกับจุดเคอร์เนลที่ได้ ขั้นตอนที่ 2) ทำการหาจุดศูนย์กลางมวล (Centroid) ของแต่ละรูปไวโรนอย ขั้นตอนที่ 3) กำหนดให้จุดศูนย์กลางมวลคือจุดเคอร์เนลของรอบถัดไป จากนั้นกระบวนการจะวนซ้ำ 1)  $\rightarrow$  2)  $\rightarrow$  3)  $\rightarrow$  1)  $\rightarrow$  2)  $\rightarrow$  3) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความแปรปรวน (Variance) ของขนาดของรูปไวโรนอยมีค่าตามต้องการ (ขนาดของรูปไวโรนอยคำนวณได้จากจำนวนพิกเซลของรูปไวโรนอยนั้นๆ) รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนลอยด์รีแลกเซชันเพื่อสร้างสไลด์บันทึกขนาด 3x3 เกรนแม่เหล็ก เริ่มจากกลุ่มวางจุดเคอร์เนล 9 จุดวางลงบนระนาบ จากนั้นทำการสร้างแผนภาพไวโรนอยที่สอดคล้องกับจุดเคอร์เนลทั้ง 9, ทำการหาจุดศูนย์กลางมวลของรูปไวโรนอยนั้นๆ, แทนที่จุดเคอร์เนลด้วยจุดศูนย์กลางมวลที่หาได้ จากนั้นทำการสร้างแผนภาพไวโรนอยอีกรอบ ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบสามรอบ จะเห็นว่าในรอบที่หนึ่งขนาดของรูปไวโรนอยยังมีความแตกต่างกันอยู่ แต่เมื่อวนซ้ำรอบที่สูงขึ้นรูปไวโรนอยจะถูกปรับให้มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกัน



จุดเคอร์เนลเริ่มต้น    วนรอบครั้งที่ 1



วนรอบครั้งที่ 2    วนรอบครั้งที่ 3

รูปที่ 2.4: กระบวนการลอยด์รีแลกเซชัน

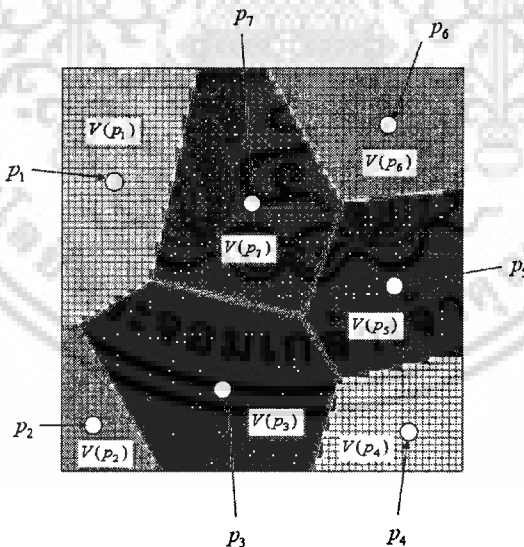
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 แผนภาพโวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete voronoi diagram)

แผนภาพโวโรนอยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก 1) จุดเคอร์เนล (Kernel points) 2) อาณาบริเวณโวโรนอย (Voronoi region) แผนภาพโวโรนอยถูกนิยามโดยสมการ (1)

$$V(p) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid \|x-p\| \leq \|x-q\|\} \text{ สำหรับทุกจุด } q \text{ บนระนาบ } S \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $V(p)$  แทนอาณาบริเวณโวโรนอยของจุด  $p$ ,  $\|x-p\|$  แทนระยะทางยูคลิดีเนียนระหว่างจุด  $x$  ใดๆ (หรือพิกเซล  $x$  ใดๆ) และจุด  $p$  หรือกล่าวได้ว่าอาณาบริเวณโวโรนอย  $V(p)$  คือเซตของจุดหรือพิกเซลใดๆบนระนาบ  $S$  ที่มีระยะยูคลิดีเนียนใกล้กับจุดเคอร์เนล  $p$  มากกว่าจุดเคอร์เนลอื่น รูป 2.5 แสดงแผนภาพโวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องที่ประกอบด้วยจุดเคอร์เนล 7 จุด  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$  และ  $p_7$  กระจายตัวอย่างสุ่มเกิดเป็นอาณาบริเวณโวโรนอยที่สัมพันธ์กับแต่ละจุด คือ  $V(p_1), V(p_2), V(p_3), V(p_4), V(p_5), V(p_6)$  และ  $V(p_7)$  ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น อาณาบริเวณโวโรนอย  $V(p_3)$  ถูกแสดงโดยเซตของพิกเซลสีน้ำเงิน (นั่นคือ พิกเซลสีน้ำเงินมีจุดเคอร์เนลที่ใกล้ที่สุดคือจุด  $p_3$ ) อาณาบริเวณโวโรนอย  $V(p_7)$  ถูกแสดงโดยเซตของพิกเซลสีแดง เป็นต้น

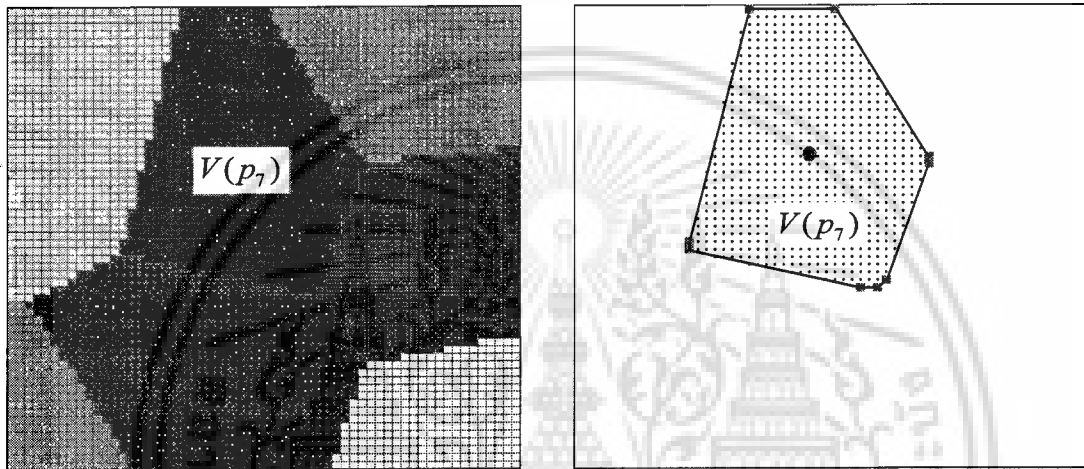


รูปที่ 2.5: แผนภาพโวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องของจุดเคอร์เนล  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$  และ  $p_7$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 คอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull)

คอนเวกซ์ฮัลล์ คือ อัลกอริทึมในการหาจุดคอนเวกซ์ (Convex points) ของเซตของจุดบนระนาบ ในงานสร้างแบบจำลองสี่เหลี่ยมที่แบบกรานูลาร์คอนเวกซ์ฮัลล์ถูกใช้ใน 2 รูปแบบ คือ 1) ใช้หาคอนเวกซ์โพลิگون (Convex polygon) เพื่อใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลของรูปโคโนย และ 2) ใช้ในการลบขอบของโพลิگونเพื่อสร้างบริเวณสารไม้ไข่ม่มเหล็ก



รูปที่ 2.6: แสดงคอนเวกซ์โพลิگونรูปโคโนย  $V(p_7)$

### 2.5.1 คอนเวกซ์โพลิگون (Convex polygon)

กำหนดให้  $S$  คือ เซตของจุดใดๆบนระนาบคอนเวกซ์โพลิگون (Convex polygon) คือ เซตของจุดที่ขนาดเล็กที่สุดที่สามารถบรรจุทุกจุดบนระนาบไว้ได้ภายในนั้นคือคอนเวกซ์เซต (Convex set) ของรูปโพลิگونนั้น ตัวอย่างรูป 2.6 แสดงเซตของคอนเวกซ์โพลิگونของรูปโคโนย  $V(p_7)$  จุดสี่เหลี่ยมสีแดงที่แต่ละมุม (หรือขอบ) ของของรูปโพลิگونทางขวามือ

### 2.5.2 จุดศูนย์กลางมวลของรูปโพลิگون

คอนเวกซ์โพลิگونใดๆที่ประกอบขึ้นจากเซตของจุด  $n$  จุด  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})$  ดังนั้นสามารถหาศูนย์กลางมวลและพื้นที่ได้จากสมการ 2 – 4 ตัวอย่างรูป 2.6 ขวามือจุดกลมๆตรงกลางรูปโพลิگونแทนจุดศูนย์กลางมวลของรูปโคโนย  $V(p_7)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.2)$$

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.3)$$

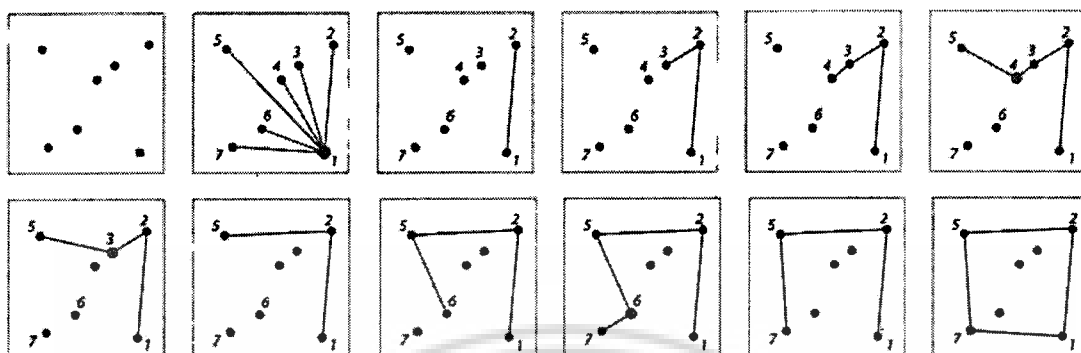
$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.4)$$

## 2.6 แกรแฮมสแกน (Graham's scan)

แกรแฮมสแกนเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาเซตของคอนเวกโพลีกอนถูกนำเสนอโดย Ronald Graham ในปี 1972 ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การเรียงลำดับแต่ละจุด และ 2) การสแกนจากจุดแรกจนถึงจุดสุดท้ายเพื่อหาเซตของคอนเวกโพลีกอน รูป 2.7 (เรียงจากซ้ายไปขวา บนลงล่าง) แสดงหลักการของแกรแฮมสแกน เริ่มจากเรียงลำดับแต่ละจุดบนระนาบโดย กำหนดจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง ในที่นี้เลือกจุดที่หนึ่งทำการเรียงลำดับแต่ละจุดจากขนาดของมุมที่จุดต่างๆทำกับจุดที่หนึ่งในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.7.2 ทำการสแกนครั้งละ 3 จุด โดยเริ่มพิจารณา 3 จุดแรกคือ 3, 2 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.7.4 ถ้าจุดตรงกลาง (จุดที่ 2) อยู่ทางด้านขวามือของจุดหัว-ท้าย (จุดที่ 3 และ 1) แสดงว่าเป็นจุดที่ขอบนอก เลื่อนการพิจารณาไปยังจุดต่อไปที่ 4,3 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.7.5 จุดกลาง(จุดที่ 3) ยังคงอยู่ทางขวามือของจุดหัว-ท้าย (จุดที่ 4 และ 2) ดังนั้นเลื่อนการสแกน ไปยังจุดต่อไปที่ 5,4 และ 3 ผลปรากฏว่าตำแหน่งนี้จุดกลาง (จุดที่ 4) อยู่ทางซ้ายมือของจุดหัว-ท้าย (จุดที่ 5 และ 3) จึงทำการลบจุดที่ 4 ออก แล้วเลื่อนการพิจารณา 2 จุดหลังกลับ (จุดที่ 4, 3) ไปยังที่จุดที่ 3 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.7.7 อย่างไรก็ตามจุดกลางยังคงอยู่ทางซ้ายมือของจุดหัว-ท้าย ดังนั้นทำการลบจุดที่ 3 ออกและเลื่อนการพิจารณา 2 จุดหลัง (จุดที่ 3, 2) กลับไปที่ 2 และ 1 คราวนี้จุดกลางกลับมาอยู่ทางขวามือของจุดหัว-ท้าย เลื่อนการพิจารณาไปเป็นจุดที่ 6, 5 และ 2 จากนั้นเลื่อนการพิจารณาต่อไปเป็นจุดที่ 7, 6 และ 5 ลบจุดที่ 6 ออกเลื่อนการพิจารณา 2 จุดหลัง กลับไปที่จุดที่ 5 และ 2 คราวนี้จุดกลางกลับมาอยู่ทางขวามือของจุดหัว-ท้าย ดังนั้นเลื่อนการพิจารณาไปเป็นจุดที่ 1, 7 และ 5 เป็นอันจบกระบวนการดังนั้น คอนเวกโพลีกอน (หรือขอบของเซตนี้) ของกลุ่มของจุดนี้คือจุดที่ 1,2,5 และ 7

$$\alpha = (p2.x - p1.x)(p3.y - p1.y) - (p2.y - p1.y)(p3.x - p1.x) \quad (2.5)$$

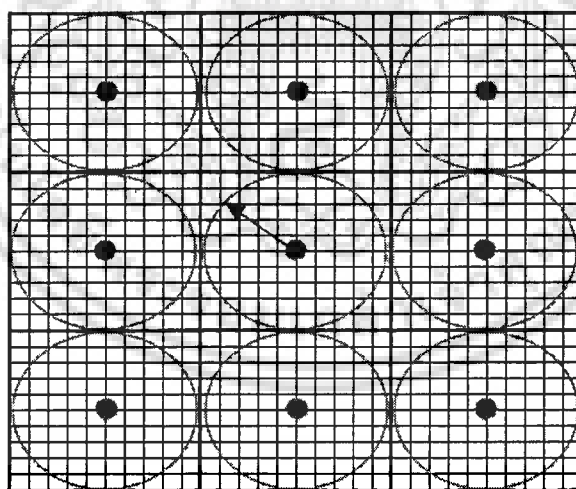
สมการ 5 ใช้ในการพิจารณาว่าจุดตรงกลางในระหว่างสามจุดอยู่ทางขวาหรือทางซ้ายของจุดหัว-ท้ายโดยที่ถ้า  $\alpha$  เป็นลบหมายถึงจุดกลางจะอยู่ทางซ้าย ถ้า  $\alpha$  เป็นบวกจุดกลางจะอยู่ทางขวาและถ้า  $\alpha$  เป็นศูนย์หมายถึงจุด ทั้ง 3 จุดเรียงอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน



รูปที่ 2.7: แสดงขั้นตอนของอัลกอริทึมเกรแฮมสแกน

### ตัวอย่าง 2.1 การสร้างแผนภาพไวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่อง

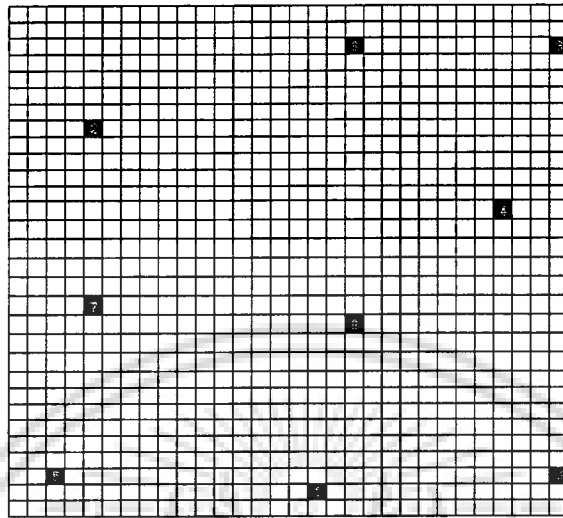
ขั้นตอนที่ 1) เส้นใยเริ่มต้น กำหนดให้สี่เหลี่ยมที่มีขนาด  $30 \times 30$  พิกเซล ซึ่งประกอบด้วย 9 เกรนแม่เหล็ก โดยที่กำหนดให้ 1 เกรนแม่เหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.5 นาโนเมตร ดังนั้น 1 พิกเซลมีขนาด  $(0.55)(0.55) = 0.3025$  ตารางนาโนเมตร รูป 2.8 แสดงการเรียงดังแบบอุดมคติของเกรนแม่เหล็กดังกล่าว



รูปที่ 2.8: เส้นใยเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลอง

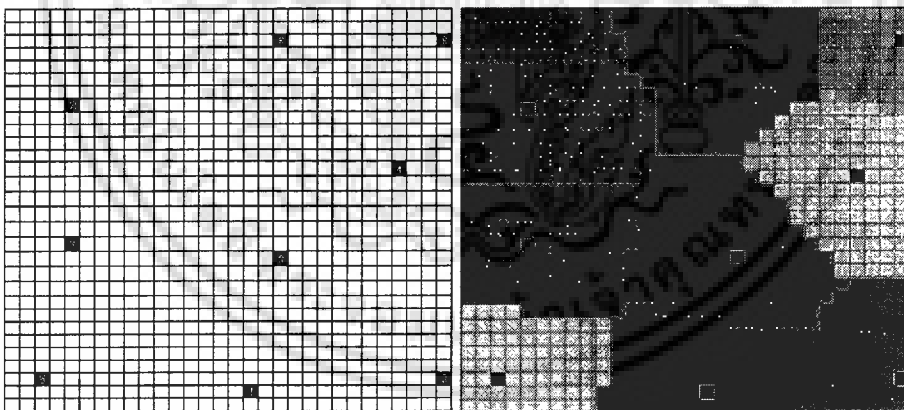
ขั้นตอนที่ 2) ใช้อัลกอริทึมคาร์ทโทรว์ทำการสุ่มวางจุดเคอร์เนลทั้ง 9 ลงบนระนาบภายใต้เงื่อนไขบังคับที่แต่ละเคอร์เนลจะต้องห่างกันไม่น้อยกว่า  $(2)(5.5) = 11$  นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9: วางจุดเคอร์เนลลงบนระนาบ

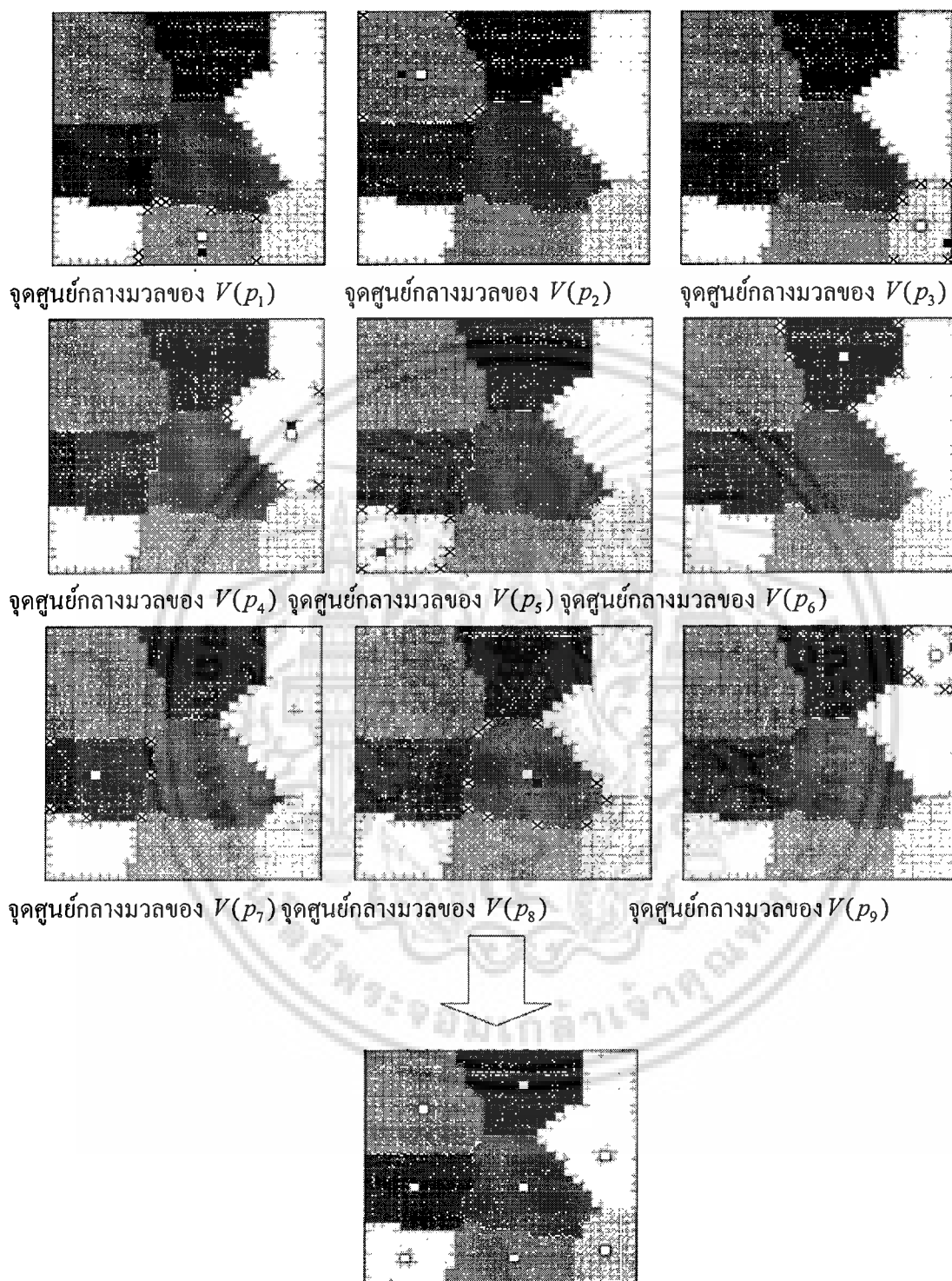
ขั้นตอนที่ 3) ทำการสร้างอาณาบริเวณไวโรนอยที่สัมพันธ์กับแต่ละเคอร์เนลตามสมการที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10: อาณาบริเวณไวโรนอยที่สอดคล้องกับจุดเคอร์เนล

ขั้นตอนที่ 4) หาจุดศูนย์กลางของแต่ละอาณาบริเวณไวโรนอย  $V(p_1)$  ถึง  $V(p_9)$  โดยการทำคอนเวกซฮูลล์และหาจุดศูนย์กลางมวลในรอบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.11

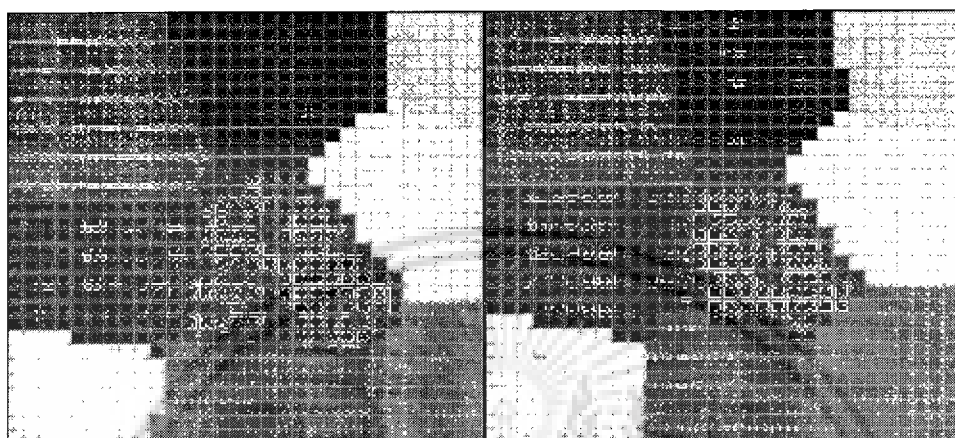
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11: แสดงการหาจุดศูนย์กลางมวลของแต่ละอาณาบริเวณไวโรนอย

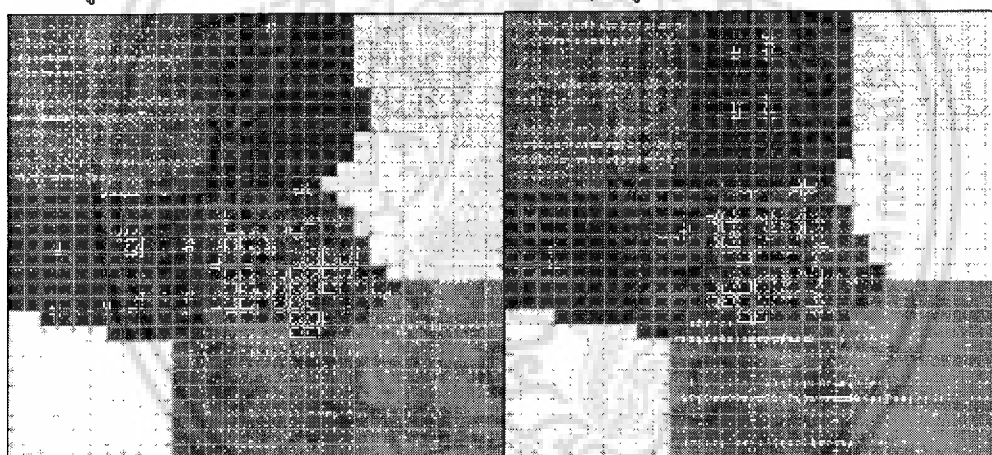
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการหาอาณาบริเวณไวโรนอยอีกครั้งโดยใช้จุดศูนย์กลางมวลเป็นจุดเคอร์เนลใหม่  
รูปที่ 2.12 แสดงการหาอาณาบริเวณไวโรนอยรอบที่ 2, 3, 4 และ 5



รูปไวโรนอยรอบที่ 2

รูปไวโรนอยรอบที่ 3



รูปไวโรนอยรอบที่ 4

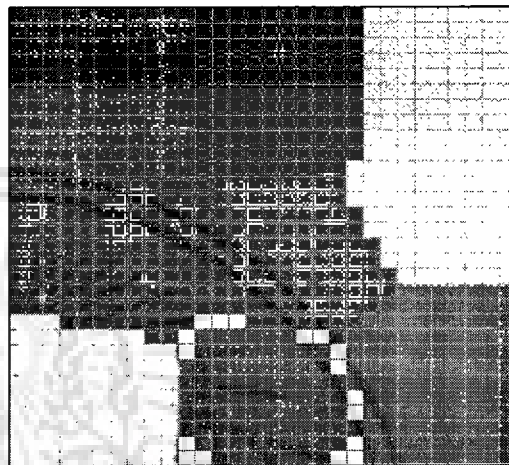
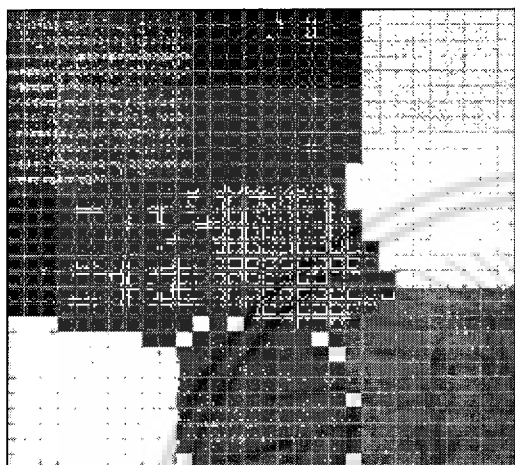
รูปไวโรนอยรอบที่ 5

รูปที่ 2.12: แสดงรูปไวโรนอยในรอบที่ 2, 3, 4 และ 5

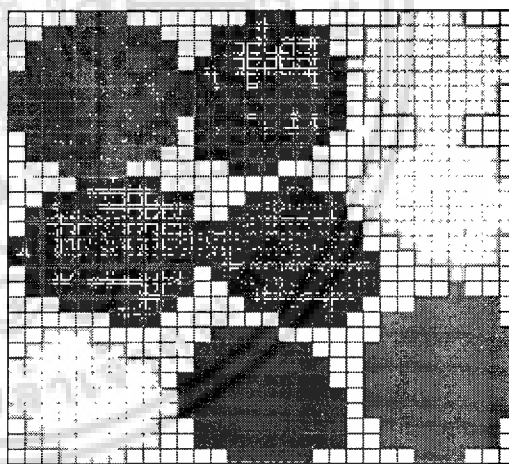
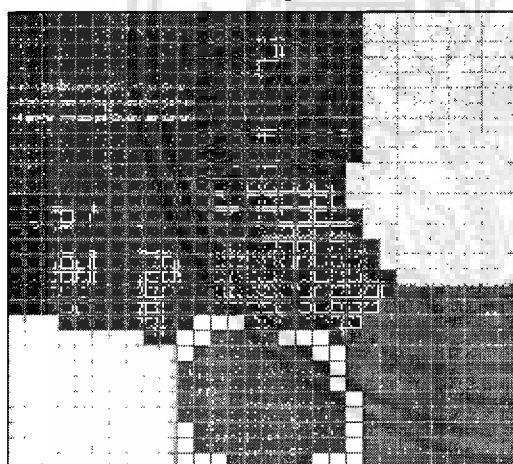
ขั้นตอนที่ 5) ทำการสร้างบริเวณสารไม่ใช่สารแม่เหล็กโดยการวนซ้ำคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex hull iteration) ในแต่ละรอบการวนซ้ำรูปไวโรนอยจะถูกลบบางพิกเซลล์ (Trimming) จนทำให้รูปไวโรนอยมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เกิดเป็นบริเวณของสารไม่ใช่สารแม่เหล็ก จำนวนรอบการวนซ้ำจะขึ้นอยู่กับว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการให้พื้นที่ของบริเวณที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กมีขนาดเท่าไร โดยทั่วไปพื้นที่บริเวณสารแม่เหล็กจะมีความหนาประมาณ 0.8-0.9 นาโนเมตรรูปที่ 2.13แสดงตัวอย่างการทำคอนเวกชวลต์ (การหาบริเวณสารแม่เหล็ก) ของอาณาบริเวณโวลอนอย  $V(p_1)$  ในรอบที่ 1, 2 และ 3



การลบขอบ (Trimming) รอบที่ 1 การลบขอบ (Trimming) รอบที่ 2



การลบขอบ (Trimming) รอบที่ 3

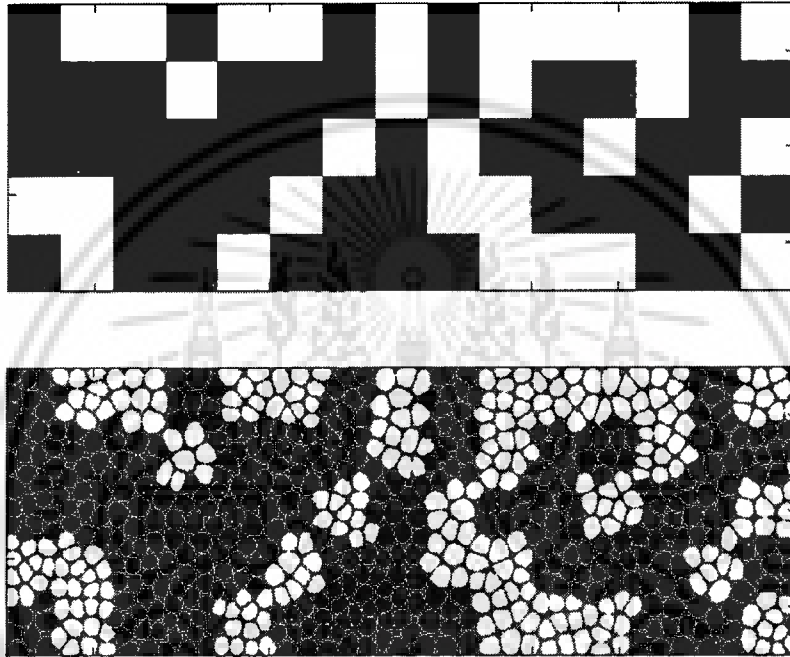
ผลการลบขอบที่สมบูรณ์

รูปที่ 2.13: แสดงการลบขอบเพื่อสร้างบริเวณสารแม่เหล็ก

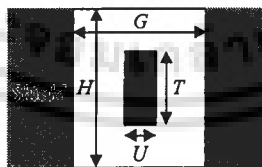
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 กระบวนการเขียน (Writing process)

สำหรับจำลองสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกแบบกรานูลาร์ใช้หลักการที่ว่า “จุดศูนย์กลางมวลของเกรนแม่เหล็กนั้นตกอยู่ภายในบิตข้อมูลใด เกรนแม่เหล็กนั้นทั้งเกรนจะมีสภาพความเป็นแม่เหล็กตามข้อมูลของบิตนั้น”รูปที่ 2.14แสดงสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกที่สอดคล้องกับบิตข้อมูล



รูปที่ 2.14: สภาพทางแม่เหล็กของสื่อบันทึก



Side shield

รูปที่ 2.15: โครงสร้างของหัวอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 กระบวนการอ่าน (Reading process)

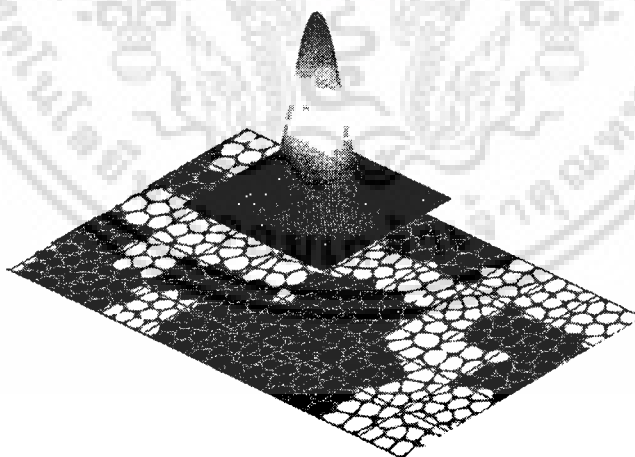
กระบวนการอ่านค่ากลับหาได้จากการประสานกันแบบ 2 มิติ (2D Convolution) ระหว่างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกกับหัวอ่าน

$$v(x, y) = \iint m(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta + n(x, y), \quad (2.6)$$

เมื่อ  $v(x, y)$  แทนแรงดันของสัญญาณอ่านกลับ,  $m(\xi, \eta)$  สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก,  $h(x, y)$  แทนฟังก์ชันผลตอบสนอง (Sensitivity function) ของหัวอ่านและ  $n(x, y)$  แทนสัญญาณรบกวนฟังก์ชันผลตอบสนองของหัวอ่านสามารถเขียนได้โดยสมการ (7) และมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.15

$$h(x, y) = \alpha_0 \{ \tanh(\alpha_1 x + \alpha_2) - \tanh(\alpha_1 x - \alpha_2) \} \cdot \{ \tanh(\alpha_3 y + \alpha_4) - \tanh(\alpha_3 y - \alpha_4) \} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\alpha_k = |(H, G, T, U, h_m, t_m, t_s, 1)|$  คือตัวแปรที่ได้จากการฟิตติ้ง,  $H$  คือ ความกว้างระหว่างไซด์ซิลด์,  $G$  คือ ความกว้างของซิลด์,  $T$  คือ ความกว้างของเมนโพล,  $U$  คือ ความหนาของเมนโพล,  $h_m$  คือ แมกเนติกสเปซซิ่ง,  $t_m$  คือ ความหนาของเรคคอดดิงเลเยอร์,  $t_s$  คือ ความหนาของอินเตอร์มิเดียตเลเยอร์



รูปที่ 2.16: รูปจำลองการอ่านข้อมูลหนึ่งบิตที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการออกแบบสื่อบันทึกข้อมูล

การออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องตรงจะได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้อาศัยภาพรับเข้าหรือภาพต้นแบบที่ได้จากภาพของสื่อบันทึกข้อมูลจริง โดยมีขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองสื่อบันทึก 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและปรับปรุงคุณภาพภาพสื่อบันทึกข้อมูลจริง

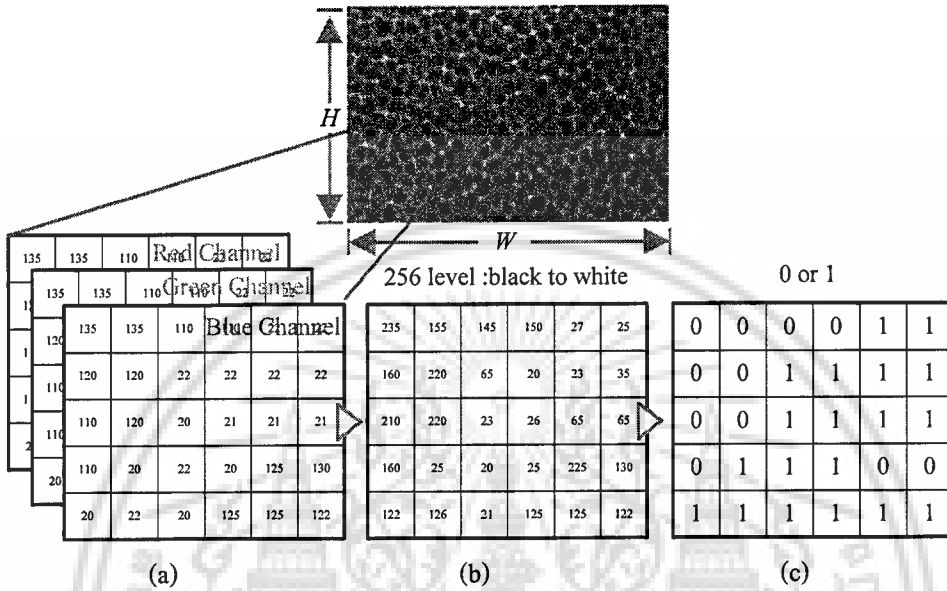
การออกแบบสื่อบันทึกข้อมูลให้มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือสอดคล้องกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสื่อบันทึกข้อมูลจริงที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น ถือเป็นสิ่งที่สำคัญ งานวิจัยนี้จึงอาศัยภาพดิจิทัลของสื่อบันทึกข้อมูลจริงที่ถ่ายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [7] เป็นภาพรับเข้าดังรูปที่ 3.1 ที่มีขนาดเท่ากับ  $W \times H$  จุดภาพ (pixels) ซึ่งการเก็บข้อมูลในแต่ละจุดภาพจะเป็นชนิดเลขจำนวนเต็มที่แสดงถึงข้อมูลของการผสมสีจากแม่สีหลักสามสี ได้แก่ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินดังแสดงรูปที่ 3.1 (a) แต่เนื่องด้วยลักษณะการเก็บข้อมูลในแต่ละจุดภาพของภาพสีนั้นมีความซับซ้อน ยากต่อการประมวลผล เราจึงเสนอวิธีการแปลงและปรับปรุงคุณภาพของภาพสีให้เป็นเป็นประเภทภาพระดับสีเทา (ภาพระดับสีเทาจะเป็นภาพดิจิทัลที่ค่าแต่ละจุดภาพเรียงระดับความเข้มจากสีดำไปสีขาวจำนวน 256 ระดับ) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพระดับสีเทา แสดงดังรูปที่ 3.1(b) อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถแยกพื้นที่ของเกรนแม่เหล็กและบริเวณที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetized) ให้ชัดเจน ภาพระดับสีเทาจะถูกแปลงและปรับปรุงคุณภาพภาพให้เป็นภาพขาวดำ โดยอาศัยหลักการการใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (thresholding method) เป็นตัวกำหนดจุดภาพระดับสีเทาให้เป็นภาพขาวดำ ดังสมการที่ (3.1)

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{if } g(x, y) \geq n \\ 1, & \text{if } g(x, y) < n \end{cases} \quad (3.1)$$

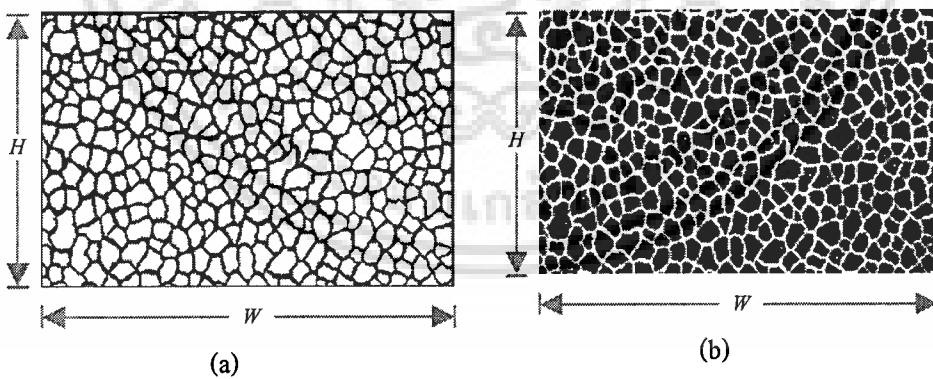
โดยที่  $g(x, y)$  และ  $f(x, y)$  แสดงถึงค่าของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  จากภาพดิจิทัลประเภทระดับสีเทาและภาพดิจิทัลประเภทภาพขาวดำ ตามลำดับ และกำหนดให้ค่า  $n$  แสดงถึงค่าขีดเริ่มเปลี่ยน

สำหรับการกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนนั้น เรากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 128 หรือ “1000 0000” ในระบบเลขฐานสอง เนื่องจากเป็นค่ากึ่งกลางของค่าข้อมูลระดับสีเทา โดยพิจารณาว่า ถ้าค่าจุดภาพตำแหน่งใดๆ ของภาพระดับสีเทามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 128 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดภาพสีดำ และในทางตรงกันข้ามถ้าค่า

จุดภาพตำแหน่งใดๆ ของภาพระดับสีเทามีค่าต่ำกว่า 128 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดภาพสีขาว ผลลัพธ์หลังจากการแปลงภาพระดับสีเทาให้เป็นภาพขาวดำแสดงดังรูปที่ 3.2(b) ซึ่งถูกเรียกว่า “กรานูลาร์” ของสื่อบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.1: (a) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพสี, (b) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพระดับสีเทา, และ (c) โครงสร้างการเก็บข้อมูลของภาพดิจิทัลประเภทภาพขาวดำ



รูปที่ 3.2: (a) ตัวอย่างภาพดิจิทัลของสื่อบันทึกข้อมูลจริง, (b) ผลลัพธ์หลังจากผ่านขั้นตอนการเตรียมและปรับปรุงคุณภาพของภาพดิจิทัลสื่อบันทึกข้อมูลจริง (ขนาดภาพ  $W \times H$  จุดภาพ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการกำหนดขนาดบิตข้อมูล

ในขั้นตอนการกำหนดขนาดบิตข้อมูลหรือที่เรียกกันว่า “บิตเซลล์ (bit-cell)” สิ่งแรกที่ต้องทำคือการกำหนดจำนวนแทร็กข้อมูล (data track,  $N_T$ ) และจำนวนบิตข้อมูล (data bit) ต่อแทร็ก ( $N_{BIT}$ ) ให้กับภาพดิจิทัลสื่อบันทึกข้อมูลจริงที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมและปรับปรุงคุณภาพภาพดิจิทัลแล้ว โดยกำหนดรูปแบบให้กับภาพสื่อบันทึกข้อมูลในลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยม (แทน 1 บิตเซลล์) สำหรับรองรับการเขียนข้อมูลระดับบิตลงบนสื่อบันทึกข้อมูล

ตัวแปรสำคัญในขั้นตอนการกำหนดขนาดบิตข้อมูลนั้น ประกอบด้วย 2 ตัวแปร ได้แก่ จำนวนจุดภาพต่อบิตข้อมูลตามแนวยาวของภาพ ( $W_{Bit}$ ) และจำนวนจุดภาพต่อบิตข้อมูลตามแนวกว้างของภาพ ( $H_{Bit}$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) ดังนี้

$$W_{Bit} = \frac{W}{N_{BIT}} \quad (3.2)$$

และ

$$H_{Bit} = \frac{H}{N_T} \quad (3.3)$$

โดยทั้งสองสมการใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดภาพทั้งหมดของภาพสื่อบันทึกข้อมูลจริงตามแนวยาว ( $W$ ) และจำนวนจุดภาพทั้งหมดของภาพสื่อบันทึกข้อมูลจริงตามแนวกว้าง ( $H$ ) ในรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการเตรียมพื้นที่สำหรับรองรับการเขียนข้อมูลขนาด 3 แทร็ก โดยที่แต่ละแทร็กมีข้อมูลทั้งหมด 6 บิตภายใต้พื้นที่ของสื่อบันทึกข้อมูลขนาด  $W \times H$  จุดภาพ

จากนั้นคำนวณค่าจุดกึ่งกลางของแต่ละพื้นที่บิตข้อมูลสำหรับรองรับการเขียนข้อมูลระดับบิตลงบนภาพสื่อบันทึกข้อมูล ได้จากสมการที่ (3.4) และ (3.5)

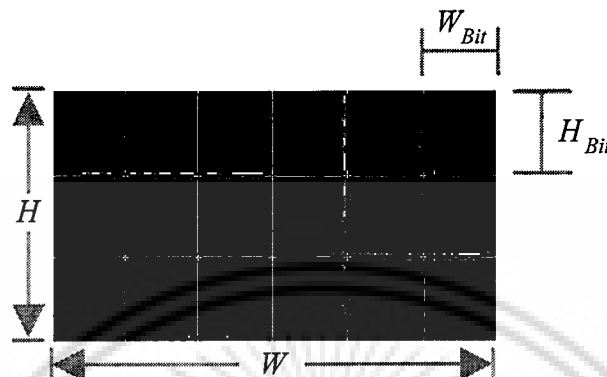
$$W_{Center-Bit} = \frac{W_{Bit}}{2}, \quad (3.4)$$

และ

$$H_{Center-Bit} = \frac{H_{Bit}}{2}. \quad (3.5)$$

เมื่อ  $W_{Center-Bit}$  คือ ค่าจุดกึ่งกลางของแต่ละบิตเซลล์ตามแนวยาว และ  $H_{Center-Bit}$  คือ ค่าจุดกึ่งกลางของแต่ละบิตเซลล์ตามแนวกว้าง เนื่องจากเป็นภาพขาวดำค่าของแต่ละจุดภาพจะเป็นเพียงค่า “0” และค่า “1” เท่านั้น ดังนั้นถ้า

พบว่าค่าจุดภาพ ณ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของบิตเซลล์มีค่าใด พื้นที่บิตเซลล์นั้นทั้งหมดจะมีค่าจุดภาพเช่นเดียวกับค่าจุดกึ่งกลางภาพของบิตเซลล์นั้นๆด้วย

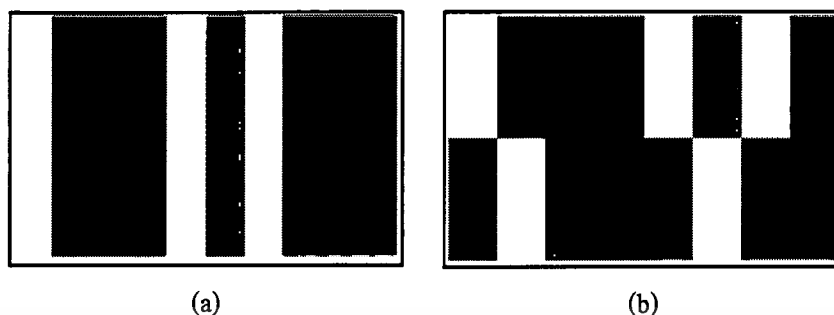


รูปที่ 3.3: แสดงการกำหนดตารางสี่เหลี่ยมสำหรับการเขียนข้อมูลระดับบิตลงบนภาพสี่เหลี่ยมที่ข้อมูล

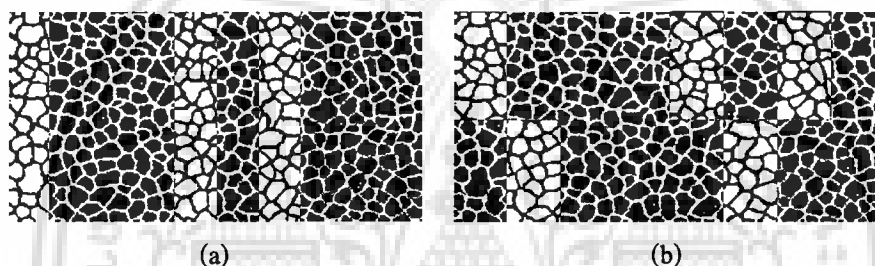
เมื่อ  $N_T = 3$  และ  $N_{BT} = 6$

### 3.3 ขั้นตอนการแทนบิตข้อมูลตัวอย่าง

ในขั้นตอนการแทนบิตข้อมูลตัวอย่างลงบนภาพสี่เหลี่ยมที่ข้อมูลจริงให้ถูกต้องนั้น งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีของการประมวลผลภาพด้วยตัวดำเนินการทางตรรกะ (logical image processing) ซึ่งตัวดำเนินการทางตรรกะแบบ XOR ได้ถูกนำมาใช้ นั้นหมายความว่าถ้าข้อมูลจุดภาพ ณ ตำแหน่งเดียวกันของสองภาพดิจิทัลใด ๆ มีค่าเดียวกันให้กำหนดข้อมูลจุดภาพใหม่เป็น “0” หรือสีดำ ในทางกลับกันถ้าข้อมูลจุดภาพ ณ ตำแหน่งเดียวกันของสองภาพมีค่าต่างกัน ให้กำหนดข้อมูลเป็น “1” หรือสีขาว จากรูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างการแทนบิตข้อมูลตัวอย่างลงบนภาพดิจิทัลสี่เหลี่ยมที่ข้อมูลจริงขนาด  $W \times H$  จุดภาพ เมื่อ (a) กำหนดจำนวนแท็กรหัสข้อมูลเท่ากับ 1 แท็กรหัสและบิตข้อมูลเท่ากับ 10 บิต คือบิต “1000101000” และ (b) มีจำนวนแท็กรหัสข้อมูลเท่ากับ 2 แท็กรหัสและบิตข้อมูลเท่ากับ 8 บิตต่อแท็กรหัส เช่น บิต “10001010” ในแท็กรหัสบน และบิต “01000100” ในแท็กรหัสล่าง พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการจำลองสี่เหลี่ยมที่ข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กในรูปที่ 3.5 ซึ่งเกิดจากการ XOR กันระหว่างกราฟานูลาร์ในรูปที่ 3.2 (b) กับบิตที่ต้องการบันทึกลงในรูปที่ 3.4 (a, b)



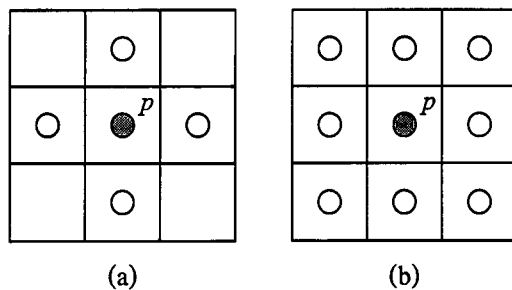
รูปที่ 3.4: แสดงถึงตัวอย่างการแทนบิตข้อมูลตัวอย่างที่ต้องการบันทึกลงบนภาพดิจิทัลสื่อบันทึกข้อมูล เมื่อ (a)  $N_T = 1$ ,  $N_{BIT} = 10$ , และ (b)  $N_T = 2$ ,  $N_{BIT} = 8$  ในที่นี้บิตข้อมูล “0” ถูกแทนด้วยสีดำ และบิตข้อมูล “1” แทนด้วยสีขาว



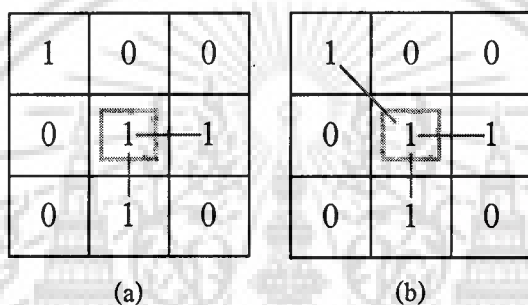
รูปที่ 3.5: ตัวอย่างการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิต เมื่อ (a)  $N_T = 1$ ,  $N_{BIT} = 10$ , และ (b)  $N_T = 2$ ,  $N_{BIT} = 8$

### 3.4 ขั้นตอนการแยกส่วนและการตรวจหาจุดกึ่งกลางเกรน

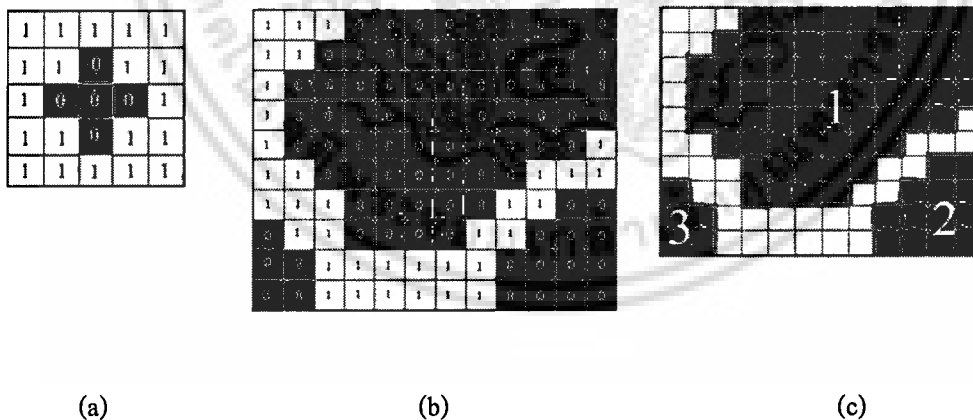
เนื่องจากผลการจำลองสื่อบันทึกข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิตดังแสดงในรูปที่ 3.5 นั้น จะสังเกตเห็นว่าสภาพความเป็นแม่เหล็กในเกรนเดียวกันจะมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะของการเขียนข้อมูลลงสื่อบันทึกข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการกำหนดสภาพความเป็นแม่เหล็กให้แต่ละเกรนแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลให้ถูกต้องด้วยการแยกส่วนเกรนและตรวจหาจุดกึ่งกลางเกรนด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการดึงคุณลักษณะสำคัญของกลุ่มข้อมูลในภาพ [8-9] โดยอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า “*m*-connected” เข้ามาช่วย



รูปที่ 3.6: (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected ซึ่งเป็นแพทเทิร์นที่พิจารณาใน 4 ทิศทางของจุดภาพ, (b) แพทเทิร์นแบบ 8-connected ซึ่งเป็นแพทเทิร์นที่พิจารณาใน 8 ทิศทางของจุดภาพรอบจุดกึ่งกลางแพทเทิร์น



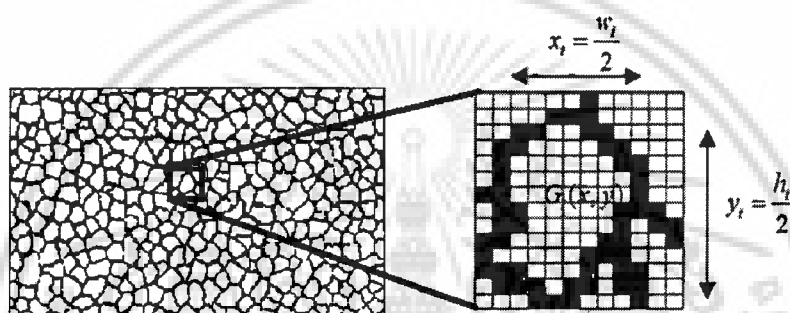
รูปที่ 3.7: ตัวอย่างของการจัดกลุ่มด้วย m-connected เมื่อ (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected และ (b) แพทเทิร์นแบบ 8-connected



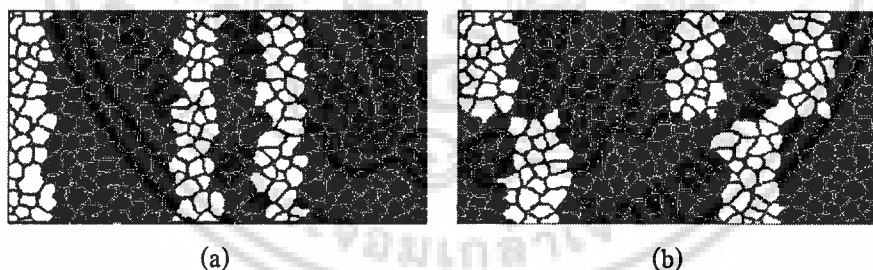
รูปที่ 3.8: ตัวอย่างของผลจากการจัดกลุ่มด้วย m-connected เมื่อ (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected, (b) ตัวอย่างส่วนหนึ่งของภาพดิจิทัลที่ต้องการจัดกลุ่ม, และ (c) ผลลัพธ์ในการจัดกลุ่มวัตถุภายในภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 แสดงแพทเทิร์นแบบ  $m$ -connected ซึ่งประกอบด้วย รูปที่ 3.6 (a) แพทเทิร์นแบบ 4-connected รูปที่ 3.6 (b) แพทเทิร์นแบบ 8-connected โดยจุด  $p$  คือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแพทเทิร์นใดๆ ตัวอย่างของวิธี  $m$ -connected ที่แสดงในรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าจุดภาพบริเวณใดมีลักษณะข้อมูลเหมือนกับแพทเทิร์นแบบ  $m$ -connected แล้ว ให้ถือว่าเป็นข้อมูลกลุ่มเดียวกัน วิธีการดำเนินการเพื่อแบ่งกลุ่มวัตถุที่สนใจด้วยหลักการ  $m$ -connected นั้นจะอาศัยการนำรูปแบบของ  $m$ -connected มาเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับ โดยเริ่มจากตำแหน่งบนขวาของภาพและกระทำต่อเนื่องทั่วทั้งบริเวณภาพ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดกลุ่มวัตถุภายในภาพแสดงดังรูปที่ 3.8



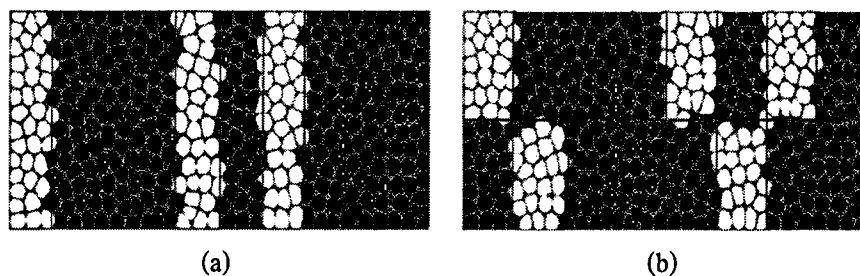
รูปที่ 3.9: ตัวอย่างแสดงการหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแต่ละเกรนของสีบั้นที่กข้อมูล



รูปที่ 3.10: แสดงตัวอย่างการจำลองสีบั้นที่กข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กหลังจากผ่านกระบวนการเขียนข้อมูลระดับบิตร่วมกับการดึงคุณลักษณะสำคัญของกลุ่มข้อมูลในภาพ เมื่อ (a)  $N_T = 1$  และ  $N_{BT} = 10$ , และ (b)

$$N_T = 2 \text{ และ } N_{BT} = 8$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11: แสดงตัวอย่างการจำลองสี่บันทึกรหัสข้อมูลที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กคั่นระหว่างเกรนตามที่เสนอในวารสาร [6] เมื่อ (a)  $N_T = 1$  และ  $N_{BT} = 10$ , และ (b)  $N_T = 2$  และ  $N_{BT} = 8$

หลังจากจัดกลุ่มของข้อมูลที่สนใจภายในภาพได้แล้ว ขั้นตอนสุดท้ายที่งานวิจัยนี้นำเสนอคือ ขั้นตอนการตรวจหาจุดกึ่งกลางของแต่ละเกรน ซึ่งจุดกึ่งกลางของเกรนที่  $i$  ( $G_i$ ) สามารถหาดำแหน่งได้จากจุดกึ่งกลางภาพตามแนวนอน  $x_i$  และจุดกึ่งกลางภาพตามแนวตั้ง  $y_i$  ของแต่ละเกรนดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทั้งนี้เพื่อระบุว่าเกรนนั้นๆควรมีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กเป็นบิต “0” หรือบิต “1” เพื่อให้สอดคล้องกับบิตข้อมูลที่ต้องการบันทึก โดยเราสมมติว่าเมื่อจุดกึ่งกลางของเกรนตกอยู่ในบิตเซลล์ที่ต้องการบันทึกบิตเซลล์ใด เกรนนั้นทั้งเกรนจะมีสภาพความเป็นแม่เหล็กเช่นเดียวกับบิตที่ถูกบันทึก ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นว่าความเป็นแม่เหล็กในสี่บันทึกรหัสข้อมูลตรงตามบิตข้อมูลที่เราทำการบันทึก (ในรูปที่ 3.4)

เมื่อเราเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่เราได้นำเสนอกับแบบจำลองไวโรนอยแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความไม่เป็นแม่เหล็กคั่นระหว่างเกรนตามที่นำเสนอในวารสาร [6] ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าวิธีที่เรานำเสนอสามารถจำลองการเขียนข้อมูลลงบนสี่บันทึกรหัสข้อมูลได้เช่นเดียวกับวิธีดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้นแบบจำลองที่เราเสนอมีความคล้ายคลึงกับสี่บันทึกรหัสข้อมูลจริงมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองที่เราเสนอถูกสร้างจากสี่บันทึกรหัสข้อมูลจริง

### 3.5 บทสรุป

การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพเพื่อการออกแบบสี่บันทึกรหัสข้อมูลที่เที่ยงตรงสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติที่เราได้นำเสนอได้อาศัยภาพดิจิทัลของสี่บันทึกรหัสข้อมูลจริงเป็นภาพรับเข้าหรือภาพต้นแบบ ดังนั้น กราฟูลาร์หรือเกรนแม่เหล็กที่ได้จึงมีความสมจริงเป็นอย่างมาก นอกจากนั้นเรายังได้เสนอวิธีการจำลองการเขียนข้อมูลระดับบิตลงไปบนสี่บันทึกรหัสข้อมูลดังกล่าวด้วยจากแบบจำลองนี้จะช่วยให้สัญญาณอ่านกลับมีความสมจริงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อถูกนำไปประมวลผลร่วมกับการออกแบบอัลกอริทึมต่างๆในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติก็ย่อมมีความเที่ยงตรงสูงด้วยเช่นกัน

## บทที่ 4

### การตรวจหาข้อมูลแบบวนซ้ำโดยใช้ข้อมูลอะพริออริ

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางเลือกที่สามารถเก็บข้อมูลได้สูงถึง 10 Tb/in<sup>2</sup> [4] อย่างก็ตามเมื่อความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลสูงขึ้น สัญญาณอ่านกลับจะถูกแทรกสอดแบบสองมิติ กล่าวคือ มีการแทรกสอดระหว่างสัญญาณลักษณะและการแทรกสอดระหว่างแทร็กข้างเคียง โดยอาศัยทำงานของตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์ ที่ให้ค่าการตัดสินใจเป็นจำนวนจริงซึ่งทำให้สามารถแลกเปลี่ยนข่าวสารและทำงานแบบวนซ้ำ ซึ่งในแต่ละรอบของการวนซ้ำช่วยให้ค่าตัดสินใจน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

#### 4.1 หลักการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็ก

พิจารณาการเมตริกการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ  $u$  ที่เวลา  $k$  ไปยังสถานะ  $q$  ที่เวลา  $k+1$  หรือ  $\gamma_k(u, q)$  ของอัลกอริทึมบีซีเจอร์ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสัญญาณอ่านกลับ

$$\gamma_k(u, q) = p(y_{k, cn} | u, q) \times p(q | u) \quad (4.1)$$

$$\gamma_k(u, q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2\right\} \times p(q | u) \quad (4.2)$$

$$\ln(\gamma_k(u, q)) = \ln\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\right] - \frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(q | u)) \quad (4.3)$$

$$\tilde{\gamma}_k(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(q | u)) \quad (4.4)$$

พจน์แรกในสมการ (4.4) คำนวณได้จากสัญญาณอ่านกลับแทร็กกลาง  $y_{k, cn}$  เมื่อกำหนดให้สัญญาณรบกวนเป็นแบบเกาส์เซียน (gaussian) และ  $r(u, q)$  คือ ค่าประจำสาขาที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการเปลี่ยนสถานะ ส่วนพจน์ที่ 2 คือ ความน่าจะเป็นอะพริออริของเมตริกการเปลี่ยนสถานะจาก  $u$  ไป  $q$  ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้น พจน์  $\ln(p(q | u))$  ในสมการ (4.4) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ค่าความน่าจะเป็นอะพริออริของข้อมูลแทร็กบน  $p(a_{k, up})$ , ข้อมูลแทร็กกลาง  $p(a_{k, cn})$  และข้อมูลแทร็กล่าง  $p(a_{k, lw})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{\gamma}_k(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(a_{k, up}) \times p(a_{k, cn}) \times p(a_{k, lw})) \quad (4.5)$$

$$\tilde{\gamma}_k(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(a_{k, up})) + \ln(p(a_{k, cn})) + \ln(p(a_{k, lw})) \quad (4.6)$$

ค่าความน่าจะเป็นอะพิริออริ  $p(a_{k, up})$ ,  $p(a_{k, cn})$ , และ  $p(a_{k, lw})$  ในสมการที่ (4.6) สามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่า LLR เมื่อกำหนดให้  $a_{k, cn} \in \{\pm 1\}$ ,  $a_{k, up} \in \{\pm 1\}$ ,  $a_{k, lw} \in \{\pm 1\}$  ดังแสดงในสมการที่ (4.7) - (4.9)

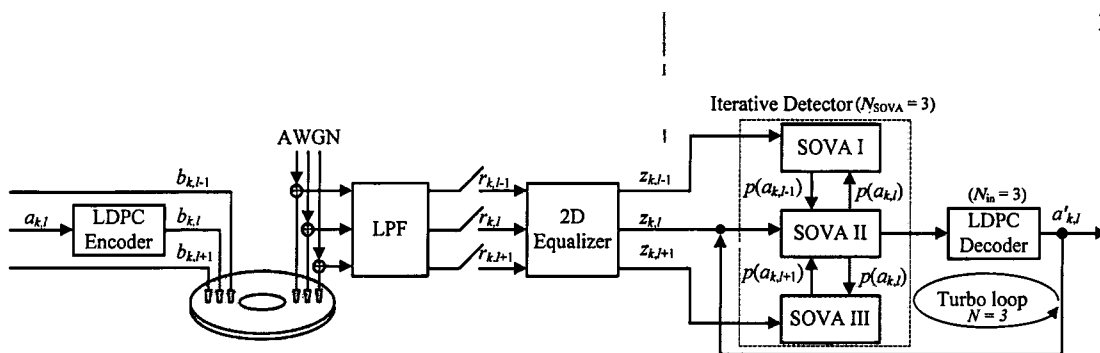
$$p(a_{k, up} = +1) = \frac{\exp(\lambda(a_{k, up}))}{1 + \exp(\lambda(a_{k, up}))}, \quad p(a_{k, up} = -1) = 1 - p(a_{k, up} = +1) \quad (4.7)$$

$$p(a_{k, cn} = +1) = \frac{\exp(\lambda(a_{k, cn}))}{1 + \exp(\lambda(a_{k, cn}))}, \quad p(a_{k, cn} = -1) = 1 - p(a_{k, cn} = +1) \quad (4.8)$$

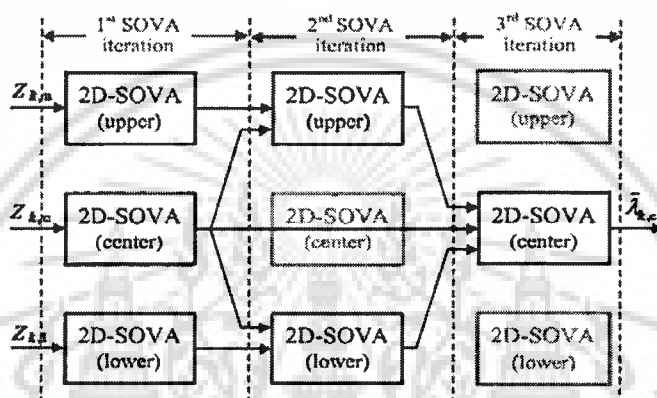
$$p(a_{k, lw} = +1) = \frac{\exp(\lambda(a_{k, lw}))}{1 + \exp(\lambda(a_{k, lw}))}, \quad p(a_{k, lw} = -1) = 1 - p(a_{k, lw} = +1) \quad (4.9)$$

## 4.2 ทดสอบสมรรถนะของการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็ก

รูปที่ 4.1 แสดงหลักการทำงานของการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็ก [10] โดยมีหลักการทำงานดังนี้ ข้อมูลอินพุตแทร็กกลาง  $a_{k, l} \in \{\pm 1\}$  ถูกเข้ารหัสโดยรหัสแอลดีพีซี (ขณะที่แทร็กข้างเคียง  $b_{k, l-1}$  และ  $b_{k, l+1}$  ไม่ถูกเข้ารหัส เนื่องจากต้องการทดสอบประสิทธิภาพของการตรวจหาข้อมูลของแทร็กกลางเมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลจากแทร็กข้างเคียง) ทำการบันทึกข้อมูล 3 ชุด รวมทั้งแถบป้องกัน (guard band) (แถบป้องกัน คือ ข้อมูลส่วนเกินที่ต้องบันทึกเพิ่มเข้าไป เนื่องจากการสร้างสัญญาณอ่านกลับจำนวน 3 แทร็กจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอินพุตจำนวน 5 แทร็ก แทร็กที่เกินจะกำหนดให้เป็นแถบป้องกันโดยมีค่าเป็นศูนย์) ลงบนช่องสัญญาณแบบสี่เกรนที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.5 จากนั้นจะได้สัญญาณอ่านกลับกลับ 3 แทร็ก ส่งผ่านตัวกรองความถี่ต่ำตัดเดอริเวอร์ที่ 7 และซีกตัวอย่างที่ศูนย์กลางของบิตเซลล์ จากนั้นส่งไปยังวงจรปรับเท่าสองมิติเพื่อแก้ไขสัญญาณอ่านกลับให้อยู่ในรูปผลตอบสนองตามต้องการ แล้วจึงส่งแยกกันไปยังตัวตรวจหาทั้งสาม ในรอบที่ 1) ตัวตรวจหาทั้งสาม คำนวณค่า LLR โดยกำหนดให้ค่าอะพิริออริจากแทร็กข้างเคียงเท่ากับ 0.5 ทั้งสามแทร็ก, รอบที่ 2)



รูปที่ 4.1: การตรวจหาข้อมูลแบบหลายแตรีก



รูปที่ 4.2: ลำดับการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างตัวตรวจหา

ตัวตรวจหาแตรีกบนและแตรีกล่างทำการคำนวณค่า LLR โดยอาศัยอะพริออริจากแตรีกกลาง, รอบที่ 3) ตัวตรวจหาแตรีกกลางคำนวณค่า LLR โดยอาศัยค่าอะพริออริที่ได้รับจากแตรีกบนและแตรีกล่างเพื่อทำให้การตรวจหาข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากนั้นจึงส่งค่าอะพริออริ (เฉพาะแตรีกกลาง) ไปยังวงจรแอลดีพีซีทำแก้ไขข้อมูล จากนั้นจึงส่งค่าอะพริออริกลับไปยังตัวตรวจหาแตรีกกลางอีกครั้งเพื่อทำการวนรอบเทอร์โบถัดไป อัลกอริทึมในการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจหาและวงจรแอลดีพีซีแสดงในรูปที่ 4.3

**Turbo loop ( $N_{\text{TURBO}}$ )****SOVA loop ( $N_{\text{SOVA}}$ )**

รอบที่หนึ่ง : ตัวตรวจหาทั้งสามทำการคำนวณค่า LLR จากสมการที่ (6.6) โดยที่ กำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นอะพริออริเริ่มต้น  $p(a_{k,up})$ ,  $p(a_{k,ct})$ , และ  $p(a_{k,lw})$  เท่ากับ 0.5 ทั้งสามแตรีก

รอบที่สอง : ตัวตรวจหา upper-SOVA และตัวตรวจหา lower-SOVA จะทำการคำนวณค่า LLR ของแตรีกบนและล่างโดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นอะพริออริของแตรีกกลางจากรอบที่หนึ่ง

รอบที่สาม : ตัวตรวจหา center-SOVA คำนวณค่า LLR โดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นอะพริออริสองด้านจากตัวตรวจหา upper-SOVA และตัวตรวจหา lower-SOVA ในรอบที่สอง

End

**LDPC loop ( $N_{\text{LDPC}}$ )**

ทำการถอดรหัสโดยวิธีการ Sum of Product เฉพาะข้อมูลแตรีกกลาง

End

End

รูปที่ 4.3: อัลกอริทึมการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจหา

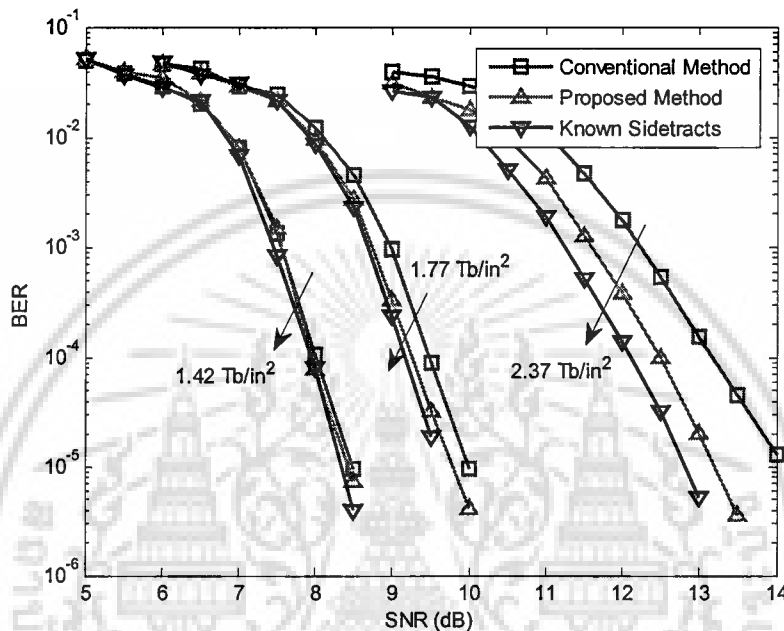
ในการทดลองกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ อัตราการเข้ารหัส 0.89, ความยาวข้อมูล 3638 บิต, ทาร์เกตแบบไม่สมมาตรขนาด  $3 \times 3$ , จำนวนการวนรอบ  $N_{\text{TURBO}} = 3$ ,  $N_{\text{SOVA}} = 3$ ,  $N_{\text{LDPC}} = 3$ , สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนสีขาว ซึ่งนิยามโดยสมการ (4.10)

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left( \frac{A}{\sigma^2} \right) \quad (4.10)$$

เมื่อ  $A$  คือ ระดับการอิมพัลส์ของไอโซเลตพัลส์ (isolate pulse),  $\sigma^2$  ค่าความแปรปรวน, แต่ละจุดในการคำนวณอัตราข้อผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) คำนวณจากจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ทำให้เกิดบิตข้อผิดพลาดสะสมเท่ากับ 500 บิต รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจหาข้อมูลแต่ละแบบที่ค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่างๆกัน ซึ่งประกอบด้วย 1) การตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไป (conventional method) คือ การตรวจหาข้อมูลโดยตัวตรวจหาสองมิติแบบทั่วไปที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนค่าอะพริออริจากตัวตรวจหาแตรีกข้างเคียง, 2) การตรวจหาข้อมูลแบบหลายแตรีก (proposed method) คือ การตรวจหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลแบบหลายแทร็กโดยตัวตรวจหาสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนค่าอะพริออร์จากแทร็กข้างเคียง และการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็กที่รู้ค่าแทร็กข้างเคียง (known side tracks) คือ การตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็กโดยมีการแลกเปลี่ยนค่าอะพริออร์ที่ถูกต้องจากแทร็กข้างเคียง (ดังนั้น เราจึงสมมติให้เป็นกรณีอุดมคติ)



รูปที่ 4.4: เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตระหว่างความหนาแน่น

1.42 Tb/in<sup>2</sup>, 1.77 Tb/in<sup>2</sup>, และ 2.37 Tb/in<sup>2</sup>

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความหนาแน่นไม่สูงมาก เช่นที่ 1.42 Tb/in<sup>2</sup> การตรวจหาข้อมูลทั้งสามวิธีให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันเนื่องมาจากระดับการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่ต่ำ, ที่ความหนาแน่นปานกลาง เช่นที่ 1.77 Tb/in<sup>2</sup> วิธีการตรวจหาข้อมูลที่น่าเสนอเริ่มเห็นได้ชัดเจนว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไปและเกือบเข้าใกล้กรณีอุดมคติ, ยิ่งไปกว่านั้นที่ความหนาแน่นสูง เช่นที่ 2.37 Tb/in<sup>2</sup> วิธีที่การตรวจหาข้อมูลที่น่าเสนอให้ประสิทธิภาพดีกว่าการตรวจหาข้อมูลทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด, ดังนั้น สรุปได้ว่าการตรวจหาข้อมูลที่มีการแลกเปลี่ยนค่าอะพริออร์ระหว่างกันสามารถลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็กได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง

### 4.3 การลดความซับซ้อนของตัวตรวจหาแบบสองมิติ

จากผลการทดสอบสมรรถนะในหัวข้อที่ 4.2 แสดงได้อย่างชัดเจนว่าการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็กที่มีการแลกเปลี่ยนค่าอะพิริออริสามารถทำงานได้ดีกว่าการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไป โดยเฉพาะที่ความหนาแน่นข้อมูลสูงๆ ซึ่งมีการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรง อย่างไรก็ตามการตรวจหาที่ใช้สร้างจากทาร์เกตขนาด  $3 \times 3$  แบบไม่สมมาตร มีความซับซ้อนสูงมากเช่นกัน (มีจำนวนสาขาทั้งหมด 512 สาขา โดยที่มี 8 สาขาวิ่งออกจากแต่ละสถานะที่เป็นไปได้ทั้ง 64 สถานะ) ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนจึงทำการออกแบบให้ทาร์เกตมีขนาดเท่ากับ  $3 \times 3$  แต่มีค่าสัมประสิทธิ์สมมาตรกันระหว่างแทร็กบนและแทร็กล่าง จากสมการที่ (4.6) จะได้ว่า

$$\tilde{\gamma}_k(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(a_{k, cn})) + \ln(p(a_{k, up})) + \ln(p(a_{k, lw})) \quad (4.11)$$

$$\tilde{\gamma}_k(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k, cn} - r(u, q)|^2 + \ln(p(a_{k, cn})) + \ln(p(z)) \quad (4.12)$$

กำหนดให้  $\ln(p(z)) = \ln(p(a_{k, up})) + \ln(p(a_{k, lw}))$  จะได้ว่า  $(a_{k, up} + a_{k, lw}) \in \{0, \pm 2\}$  ดังนั้น สามารถแบ่งพจน์  $\ln(p(z))$  ในสมการที่ (4.12) ได้เป็น 3 กรณี คือ

$$\ln(p(z = -2)) = \ln(p(a_{k, up} = -1) \times p(a_{k, lw} = -1)), \quad (4.13)$$

$$\ln(p(z = +2)) = \ln(p(a_{k, up} = +1) \times p(a_{k, lw} = +1)), \quad (4.14)$$

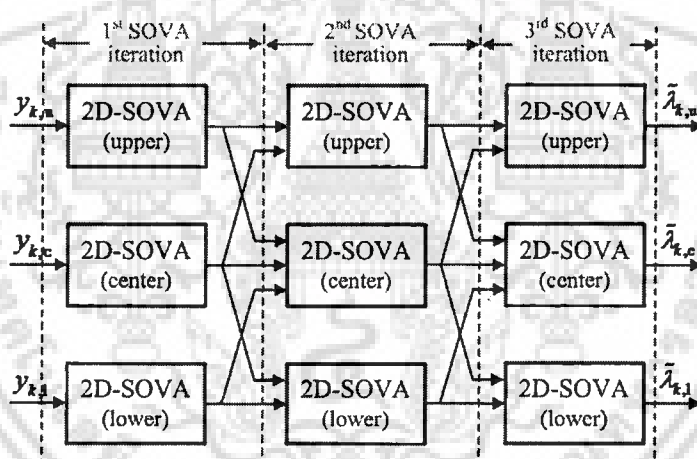
$$\ln(p(z = 0)) = \ln(p(a_{k, up} = -1) \times p(a_{k, lw} = +1) + p(a_{k, up} = +1) \times p(a_{k, lw} = -1)), \quad (4.15)$$

เมื่อกำหนดให้ทาร์เกตสองมิติ มีขนาด  $3 \times 3$  แบบสมมาตร จะมีสถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมด 36 สถานะ โดยที่แต่ละสถานะจะมีสาขาที่วิ่งออก 6 สาขา (มีจำนวนสาขาทั้งหมด 216 สาขา โดยที่มี 6 สาขาวิ่งออกจากแต่ละ 36 สถานะ)

### 4.4 การตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ

จากการทดสอบสมรรถนะของการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็กในหัวข้อที่ 4.2 ได้พิสูจน์ให้เห็นความเป็นไปได้ในการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแทร็กและประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น เมื่อตัวตรวจหาทำการแลกเปลี่ยนค่าอะพิริออริระหว่างกัน อย่างไรก็ตามเป็นการแลกเปลี่ยนดังกล่าวทำเพื่อการตรวจหาเฉพาะข้อมูลแทร็กกลางเท่านั้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอการตรวจหาหลายแทร็กแบบวนซ้ำ ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจหาทั้ง 3 เพื่อตรวจหาข้อมูลทั้ง 3 แทร็ก แนวคิดพื้นฐานสำหรับการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ คือ การใช้งานตัวตรวจหา 3 ตัวทำงานร่วมกันเพื่อช่วยในการคำนวณหาความน่าจะเป็นอะพริออริของแต่ละแทร็กและแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกัน รูปที่ 4.5 แสดงการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างตัวตรวจหา 3 ตัวเพื่อตรวจหาข้อมูลแทร็กบน, แทร็กกลาง, และแทร็กล่างซึ่งมีการทำงานดังนี้ ในรอบแรก ตัวตรวจหาทั้ง 3 จะทำการคำนวณค่า LLR โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นอะพริออริเริ่มต้นของแต่ละแทร็กเท่ากับ 0.5 ในการทำงานรอบที่สอง ตัวตรวจหาแทร็กกลางจะคำนวณค่า LLR โดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นอะพริออริจากทั้งแทร็กบนและแทร็กล่าง ขณะเดียวกันตัวตรวจหาแทร็กบนจะคำนวณค่า LLR โดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นอะพริออริจากแทร็กกลางและตัวตรวจหาแทร็กล่างจะคำนวณค่า LLR โดยอาศัยค่าความน่าจะเป็นอะพริออริจากแทร็กกลางเช่นเดียวกัน สำหรับการทำงานรอบที่สามหรือรอบที่สูงขึ้น การแลกเปลี่ยนจะวนซ้ำลักษณะเดียวกับรอบที่สอง จากนั้นจึงส่งค่า LLR ไปให้วงจรถอดรหัสแอลดีพีซีเพื่อทำการแก้ไขข้อผิดพลาดและส่งกลับมายังตัวตรวจหาทั้งสามอีกครั้งในรอบเทอร์โบถัดไป

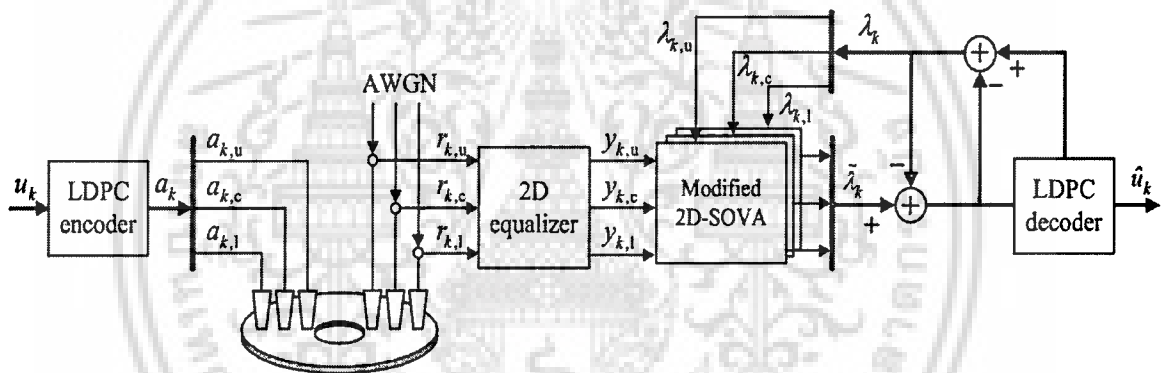


รูปที่ 4.5: ลำดับการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ

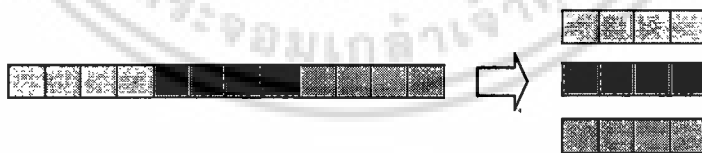
#### 4.5 ทดสอบสมรรถนะของการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ

ในรูปที่ 4.6 แสดงหลักการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ [11] ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ ลำดับข้อมูล  $u_k$  ถูกเข้ารหัสได้คำรหัส  $a_k$ , คำรหัส  $a_k$  ถูกแบ่งเป็นสามบล็อกย่อยขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อทำการบันทึกลงบนแทร็กบน, แทร็กกลาง และแทร็กล่าง คำรหัสย่อยทั้ง 3 ถูกบันทึกลงบนช่องสัญญาณแบบไวโรนอยไม่ต่อเนื่องดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3 จากนั้นทำการอ่านข้อมูลได้สัญญาณอ่านกลับ 3 ชุด  $r_{k,up}$ ,  $r_{k,cm}$ ,  $r_{k,lv}$  จากนั้นจึงส่งต่อไปยังวงจรปรับเท่าสองมิติเพื่อปรับรูปร่างสัญญาณอ่านกลับให้อยู่ในรูปของผลตอบสนองสองมิติแบบสมมาตร จากนั้นจึงส่งต่อไปยังตัวตรวจหา

ทั้งสามตัว ซึ่งตัวตรวจหาแต่ละตัวจะทำการคำนวณค่า LLR และทำการแลกเปลี่ยนค่าอะพริออริซึ่งกันและกัน  $N_{SOVA}$  รอบ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 จากนั้นจึงรวมค่าอะพริออริกันที่ได้จากตัวตรวจหาทั้งสามกลับเป็นบล็อกข้อมูลตามเดิม แล้วจึงส่งต่อไปยังวงจรถอดรหัสแวลดีฟิซีทำการวนซ้ำ  $N_{LDPC}$  รอบ ได้ค่าอะพริออริจากวงจรถอดรหัสแวลดีฟิซี, จากนั้นจึงแบ่งค่าอะพริออริกลับเป็นบล็อกย่อยอีกครั้ง แล้วจึงส่งค่าอะพริออริดังกล่าวแยกกันไปยังตัวตรวจหาแต่ละตัวเพื่อทำการตรวจหาซ้ำในรอบเทอร์โบ  $N_{TURBO}$  ถัดไป ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำกับการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไปและตรวจหาแบบบรรเทาการแทรกสอดบางส่วน (Partial ITI Mitigation Method, PIMM) [14] (PIMM เป็นอีกหนึ่งวิธีในการจัดการกับการแทรกสอดแบบสองมิติ โดยทำการแลกเปลี่ยนข้อมูล  $a_k \{\pm 1\}$  กับแทร็กข้างเคียง จากนั้นทำการประมาณ (estimate) ค่าการแทรกสอด แล้วจึงนำไปลบออกจากสัญญาณอ่านกลับ ดังนั้น การตรวจหาแบบ PIMM จะใช้ตัวตรวจหาเพียงหนึ่งมิติ) ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ 2.37 Tb/in<sup>2</sup>, 3.41 Tb/in<sup>2</sup> และ 4.21 Tb/in<sup>2</sup>



รูปที่ 4.6: บล็อกไดอะแกรมการตรวจหาข้อมูลหลายแทร็กแบบวนซ้ำ

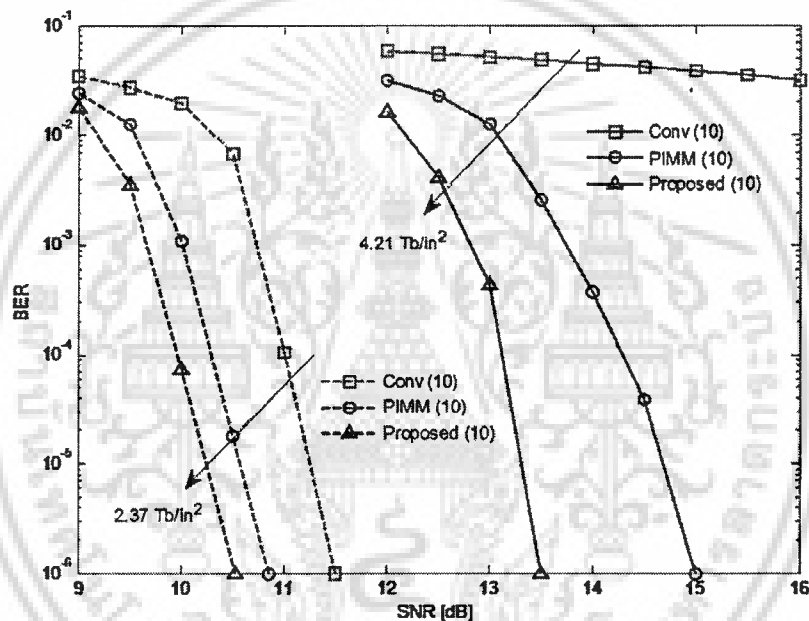


รูปที่ 4.7: การแบ่งข้อมูล  $a_k$  ออกเป็น 3 บล็อกย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

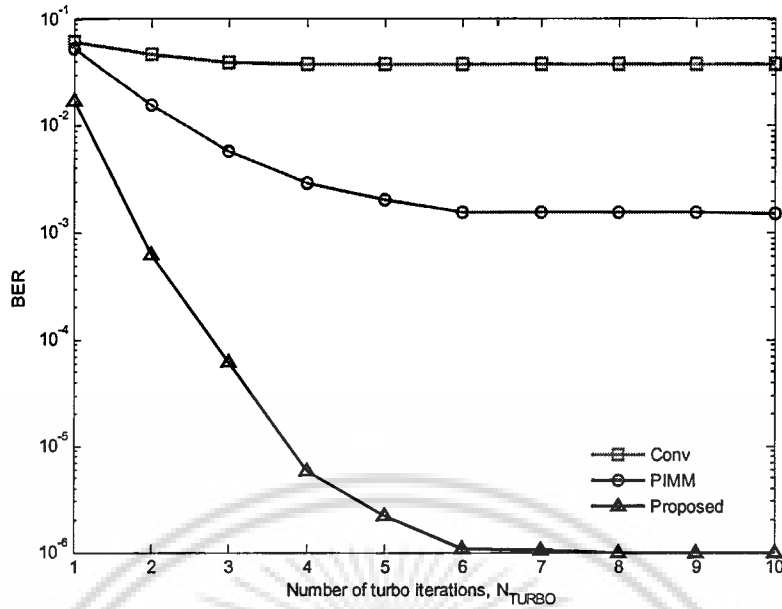
#### 4.6 ผลการทดลอง

โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ข้อความขนาด 3640 บิตถูกเข้ารหัสที่อัตราเข้ารหัส 8/9 ได้คำรหัสขนาด 4095 บิต โดยรหัสแอลดีพีซีปรกติ (Regular  $(j, k)$  LDPC) เมื่อ  $j=3$  และ  $k=27$  สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนสีขาว ซึ่งนิยามโดยสมการ (4.10), ทาร์เก็ตแบบสมมาตรขนาด  $3 \times 3$  วงจรปรับเท่าสองมิติขนาด 21 แท็ป, สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนสีขาว ดังที่แสดงในสมการที่ 4.10 แต่ละจุดของ BER ทำการคำนวณหาอัตราข้อผิดพลาดบิต โดยสะสมบิตที่ผิดพลาดมากกว่าหรือเท่ากับ 500 บิต, และกำหนดให้จำนวน  $N_{\text{TURBO}}=10$  รอบ (เนื่องจากที่  $N_{\text{TURBO}} > 10$  ทั้งสามวิธีให้ประสิทธิภาพที่คงที่)



รูปที่ 4.8: เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตระหว่างการตรวจหาข้อมูลแบบต่างๆ ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่  $2.37 \text{ Tb/in}^2$  และ  $4.21 \text{ Tb/in}^2$

จากรูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตระหว่างการตรวจหาข้อมูลทั้ง 3 วิธี จะเห็นได้ว่า ที่ความหนาแน่นข้อมูลต่ำ เช่นที่  $2.37 \text{ Tb/in}^2$  ที่อัตราส่วนข้อผิดพลาดบิต  $\text{BER} = 10^{-6}$  วิธีที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีแบบทั่วไป ประมาณ 1.0 dB ขณะเดียวกันมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับวิธี PIMM และเมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาแน่นข้อมูลสูง เช่นที่  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  วิธีที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีแบบทั่วไปอย่างชัดเจนและให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธี PIMM ประมาณ 1.5 dB ที่อัตราส่วนข้อผิดพลาดบิต  $\text{BER} = 10^{-6}$



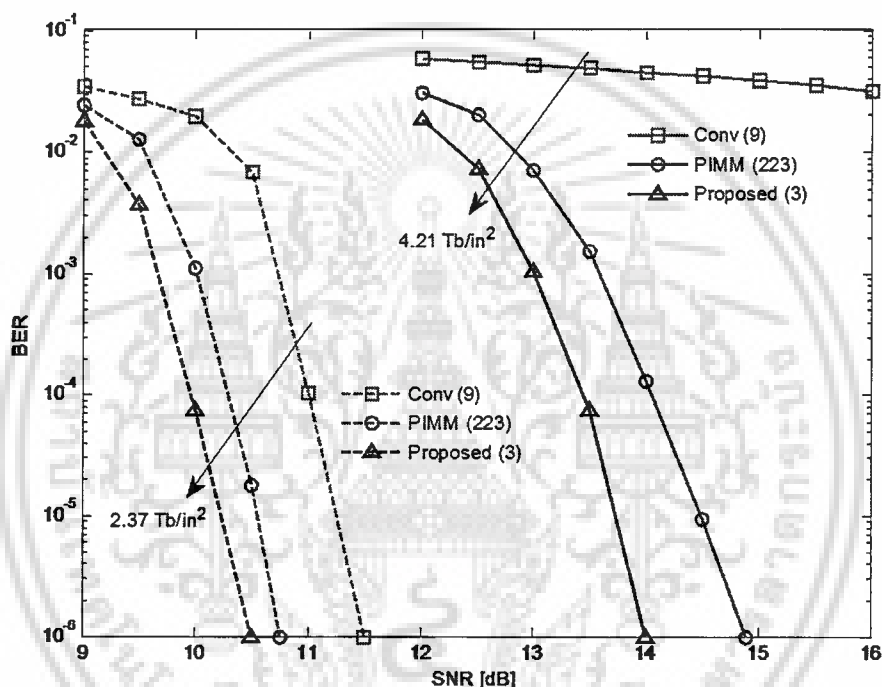
รูปที่ 4.9: อัตราข้อผิดพลาดบิตในฟังก์ชันของจำนวน  $N_{TURBO}$  ที่  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  เมื่ออัตราส่วน SNR = 13.5 dB

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบความซับซ้อนในการวนรอบ  $N_{TURBO}$  ของแต่ละวิธีการตรวจหาข้อมูล

Module	Proposed scheme		Conventional receiver		PIMM	
	Addition	Multiplication	Addition	Multiplication	Addition	Multiplication
SOVA detection	$N_{SOVA}(4Q_{2D} + 13)$	$N_{SOVA}(5Q_{2D} + 11)$	$4Q_{2D} + 2$	$5Q_{2D}$	$4Q_{1D} + 7$	$5Q_{1D} + 3$
LDPC decoding	$N_{LDPC}(1 + (k-1)(1-R)) + 1$	$(1-R)N_{LDPC}$	$N_{LDPC}(1 + (k-1)(1-R)) + 1$	$(1-R)N_{LDPC}$	$N_{LDPC}(1 + (k-1)(1-R)) + 1$	$(1-R)N_{LDPC}$
<b>Total</b>	<b><math>2671N_{TURBO}</math></b>	<b><math>3274N_{TURBO}</math></b>	<b><math>906N_{TURBO}</math></b>	<b><math>1081N_{TURBO}</math></b>	<b><math>79N_{TURBO}</math></b>	<b><math>44N_{TURBO}</math></b>

นอกจากนี้เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตในฟังก์ชันของจำนวนรอบ  $N_{TURBO}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อกำหนดให้อัตราส่วน SNR เท่ากับ 13.5 dB, ที่หนาแน่นเชิงพื้นที่  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  ผลการทดลองชัดเจนว่าวิธีที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธี PIMM และวิธีแบบทั่วไป โดยที่เมื่อ  $N_{TURBO} = 6$  รอบวิธีที่นำเสนอให้อัตราส่วนอัตราข้อผิดพลาดบิตที่ต่ำกว่าวิธี PIMM ประมาณ  $10^3$  เท่า และสุดท้ายทำการเปรียบเทียบความซับซ้อนของทั้ง 3 วิธี ต่อการวนรอบ  $N_{TURBO} = 1$  รอบ โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ 1) การบวก, การลบ, การเปรียบเทียบ, การหาค่าสูงสุด ถือว่าซับซ้อนเท่ากัน 2) การคูณ, การหาร ถือว่าซับซ้อนเท่ากัน และ 3) ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เช่น  $\log(x)$ ,  $\exp(x)$  ถือว่าเป็นการเปิดตาราง (look-up Table) ไม่นับเป็นความซับซ้อน ผลการเปรียบเทียบแสดงในตาราง 4.1 เมื่อ  $Q_{2D}$  แทนเมตริกสาขาของทาร์เก็ตสองมิติแบบสมมาตรขนาด  $3 \times 3$  ซึ่งเท่ากับ 216 สาขา (36 สถานะ, 6 สาขา) และ  $Q_{1D}$  แทนเมตริกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาขาของทาร์เกตหนึ่งมิติขนาด  $1 \times 3$  ซึ่งเท่ากับ 8 สาขา (4 สถานะ, 2 สาขา),  $k$  คือ พารามิเตอร์ของรหัสแอลดีพีซี ซึ่งเท่ากับ 27 และ  $R$  คือ อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ  $8/9$  รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตในการตรวจหาเมื่อแต่ละวิธีมีความซับซ้อนที่เท่ากัน โดยที่เมื่อ  $N_{\text{TURBO}}$  เท่ากับ 3 รอบของวิธีที่นำเสนอจะมีความซับซ้อนเทียบเท่ากับ 9 รอบและ 223 รอบของวิธีแบบทั่วไปและวิธี PIMM ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงชัดเจนว่าวิธีที่นำเสนอยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่สูงๆ เช่นที่  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  วิธีที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธี PIMM ประมาณ  $1.0 \text{ dB}$  ที่อัตราข้อผิดพลาดบิต  $\text{BER} = 10^{-6}$



รูปที่ 4.10: เปรียบเทียบอัตราข้อผิดพลาดบิตที่ความซับซ้อนเท่ากัน

#### 4.7 บทสรุป

ในบทนี้ ได้นำเสนอวิธีการตรวจหาข้อมูลหลายเทร็กแบบวนซ้ำ เริ่มต้นมีสมมติฐานที่ว่า “การตรวจหาข้อมูลข้อมูลของเทร็กกลางน่าจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น ถ้าทราบค่าความน่าจะเป็นอะพริออริกของเทร็กข้างเคียง” ดังนั้นจึงทำการทดสอบสมมติฐาน โดยการตรวจหาข้อมูลของเทร็กกลางโดยใช้ตัวตรวจหาที่มีการปรับปรุงค่าเมตริกการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งมีการเพิ่มส่วนของความน่าจะเป็นอะพริออริกจากเทร็กข้างเคียงรวมเข้าไปด้วย จากนั้นจึงตรวจหาข้อมูลเทร็กกลางโดยนำเอาข้อมูลของเทร็กข้างเคียงที่ทราบค่าแน่นอนบนแทนลงในสมการ 4.6 ผลการทดลองแสดงชัดเจนว่าการตรวจหาข้อมูลเทร็กกลางมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าการตรวจหาข้อมูลแบบปกติ ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะเพิ่มตัวตรวจหา 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเพื่อทำหน้าที่ตรวจหาข้อมูลของแตร็กข้างเคียง และส่งค่าความน่าจะเป็นอะพริออริให้กับตัวตรวจหาแตร็กกลาง โดยในหัวข้อที่ 4.2 เป็นการทดสอบสมรรถนะของการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแตร็ก ผลการทดลองแสดงชัดเจนว่าที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำๆ เช่น  $1.42 \text{ Tb/in}^2$  การตรวจหาข้อมูลแบบที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไป และใกล้เคียงกับกรณีที่ทราบค่าข้อมูลแตร็กข้างเคียงที่แน่นอน (ซึ่งกำหนดให้เป็นกรณีอุดมคติ), และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ขึ้นไปถึง  $1.77 \text{ Tb/in}^2$  ปรากฏว่าการตรวจหาข้อมูลที่นำเสนอยังคงให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับกรณีอุดมคติขณะที่การตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไปเริ่มทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร, ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่จนถึง  $2.37 \text{ Tb/in}^2$  การตรวจหาข้อมูลที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีกว่าการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไปอย่างชัดเจน จึงสรุปในเบื้องต้นได้ว่าการตรวจหาข้อมูลแบบหลายแตร็กที่มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารอะพริออริกันทำงานได้ดีกว่าการตรวจหาข้อมูลแบบปรกติ

อย่างไรก็ดี การทดลองในหัวข้อที่ 4.3 เป็นการวัดประสิทธิภาพของการตรวจหาข้อมูลแตร็กกลางเท่านั้น (ข้อมูลแตร็กข้างเคียงถูกตรวจหาเพื่อคำนวณค่าอะพริออริให้กับแตร็กกลางเท่านั้น ไม่ได้นำมาคำนวณหาอัตราผิดพลาด) นอกจากนี้ตัวตรวจหาที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.3 สร้างขึ้นจากผลตอบสนองแบบสองมิติขนาด  $3 \times 3$  ที่มีสัมประสิทธิ์ไม่สมมาตรจึงมีความซับซ้อนสูง (มีจำนวนสาขาทั้งหมด 512 สาขา) ดังนั้นในการทดลองหัวข้อที่ 4.6 จึงทดลองให้ตัวตรวจหาทั้งสามทำงานร่วมกันโดยกำหนดให้ทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริซึ่งกันและกัน และทำการตรวจหาข้อมูลทั้งสามแตร็ก นอกจากนี้ยังทำการลดความซับซ้อนของตัวตรวจหาโดยกำหนดให้ผลตอบสนองเป็นแบบสองมิติขนาด  $3 \times 3$  ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แบบสมมาตรทำให้จำนวนเมตริกสาขาลดลงจาก 512 สาขาเหลือ 216 สาขา จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ วิธีที่นำเสนอกับการตรวจหาข้อมูลแบบบรรเทาการแทรกสอดบางส่วนและการตรวจหาข้อมูลแบบทั่วไป โดยทำการวนรอบเทอร์โบบนกระทั่งอัตราส่วนข้อผิดพลาดมีค่าคงที่ จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลที่ดีที่สุดของทั้งสองวิธี พบว่าวิธีที่นำเสนอให้ผลที่ดีกว่า PIMM โดยเฉพาะที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงๆ นอกจากนี้เมื่อทำการตรวจหาข้อมูลโดยกำหนดให้ทั้งสามวิธีมีความซับซ้อนในการคำนวณทางคณิตศาสตร์เท่ากัน พบว่าวิธีที่นำเสนอยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าวิธีที่นำเสนอจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีอื่นอย่างชัดเจนเมื่อทำงานที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง ในทางตรงกันข้าม ที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำทั้งวิธีที่นำเสนอและวิธี PIMM ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันและวิธี PIMM ก็มีความซับซ้อนที่ต่ำกว่า ดังนั้น จึงต้องมีการประนีประนอม (compromise) กันระหว่างประสิทธิภาพที่ได้รับและระดับความซับซ้อนของการตรวจหาข้อมูลแต่ละวิธี เพื่อเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับแต่ละความหนาแน่นของข้อมูล

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

คีย์ข้อจำกัดของ “ซูเปอร์พาราแมกเนติก” ที่จะทำให้ความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลสำหรับสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กถูกจำกัดอยู่ที่ไม่เกิน  $1.0 \text{ Tb/in}^2$  ทำให้ในปัจจุบันมีการนำเสนอรูปแบบการบันทึกข้อมูลใหม่ๆ เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย, การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต, และการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ สองรูปแบบแรกนำเสนอการแก้ปัญหาโดยเปลี่ยนการออกแบบทางด้านสื่อบันทึกและหัวเขียน ขณะที่รูปแบบสุดท้ายนำเสนอการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลสัญญาณเป็นหลัก

ปัญหาหลักของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ คือ การแทรกสอดสองมิติ (แทรกสอดในแนวตามแตรีกและแนวขวางแตรีก) ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น การออกแบบวงจรปรับเท่าที่สามารถปรับแต่งสัญญาณอ่านกลับให้อยู่ในรูปผลตอบสนองสองมิติการออกแบบตัวตรวจหาที่ทำงานกับผลตอบสนองสองมิติ การลดความซับซ้อนของตัวตรวจหาแบบสองมิติ [14] และเทคนิคการตรวจหาข้อมูลที่ใช้ตัวตรวจหาหลายในการทำงาน งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหการแทรกสอดสองมิติ โดยเสนอตัวตรวจหาแบบสองมิติที่มีการปรับปรุงการคำนวณค่าเมตริกสาขา เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจหาแตรีกข้างเคียง ในแต่ละครั้งที่ทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริจะทำให้การตรวจหาข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังเสนอการลดความซับซ้อนของตัวตรวจหาสองมิติ โดยออกแบบให้ผลตอบสนองของทาร์เกตเป็นแบบสมมาตร เมื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจหาที่นำเสนอและวิธีการตรวจหาแบบทั่วไปพบว่าวิธีที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า กล่าวได้ว่าการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริช่วยทำให้ตัวตรวจหาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงๆ

อย่างไรก็ตาม งานชิ้นนี้ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากการเรียงตัว (alignment) ของข้อมูลในแต่ละแตรีกที่ทำการแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกัน กล่าวคือ เป็นการตั้งสมมติฐานที่ว่าข้อมูลทั้งสามแตรีกถูกเขียนโดยมีเรียงตัวในแนวเดียวกัน ผลคือ ทำให้ทั้งสามแตรีกสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ข้อมูลที่บันทึกในแต่ละแตรีกจะมีการเรียงตัวที่เหลื่อมกันทำให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างข้อมูลของแตรีกบน, แตรีกกลาง, และแตรีกล่างไม่ถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการตรวจหาข้อมูล และเป็นความท้าทายต่อไปสำหรับงานวิจัยในอนาคตที่จะศึกษาผลกระทบดังกล่าวต่อประสิทธิภาพในการตรวจหาแบบวนซ้ำซึ่งอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] T. A. Roscamp, E. D. Boerner and G. J. Parker, "Three-Dimensional Modeling of Perpendicular Recording with Soft Underlayer," *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 10, pp. 8366-8368. May, 2002.
- [2] B. Terris, T. Thomson, and G. Hu, "Patterned Media for Future Magnetic Data Storage," *Microsyst. Technol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 189-196, Nov., 2006.
- [3] R. Rottmeyer et al., "Heat-Assisted Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 10, pp. 2417-2421, Oct., 2006.
- [4] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The Feasibility of Magnetic Recording at 10 Terabits Per Square Inch on Conventional Media," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 2, pp. 917-923, Feb., 2009.
- [5] K. S. Chan, J. J. Miles, E. Hwang, B. V. K. V. Kumar, J. Zhu, W. Lin, and R. Negi, "TDMR Platform Simulations and Experiments," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, No. 10, pp. 3837-3843, Oct., 2009.
- [6] M. Yamashita, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Miura, and H. Muraoka, "Read/Write Channel Modeling and Two-Dimensional Neural Network Equalization for Two-Dimensional Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 47, No. 10, pp. 3558-3561, Oct., 2011.
- [7] J. G. Zhu, Y. Peng, and D. E. Laughlin, "Toward an Understanding of Grain-to-Grain Anisotropy Field Variation in Thin Film Media," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 2, pp. 543-548, Feb., 2005.
- [8] Q. R. Razlighi and Y. Stern, "Blob-Like Feature Extraction and Matching for Brain MR Images," *33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS*, Aug., 2011.
- [9] M. Li, X. Zheng, X. Wan, H. Luo, S. Zhang, and L. Tan, "Segmentation of Brain Tissue Based on Connected Component Labeling and Mathematic Morphology," *IEEE BMEI*, Vol. 1, pp. 482-485, Oct., 2011.
- [10] T. Losuwan, C. Warisarn, L. M. Myint, and P. Supnithi, "A Study of Iterative Detection Method for Four-Grain Based Two-Dimensional Magnetic Recording," submitted to **APMRC 2012**,

Singapore, Oct 31-Nov 2, 2012.

- [11] C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, “An Inter-Track Interference Mitigation Scheme for Two-Dimensional Magnetic Recording,” submitted to **The 58th MMM CONFERENCE**, Denver, Colorado, Nov 4-8, 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] N. Bumrungrat, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Magnetized Grain Modeling Method Based on the Image of Real Magnetic Grains for Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013

[2] C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An iterative inter-track interference mitigation method for two-dimensional magnetic recording systems," *J. Appl. Phys.* 115, 17B703, Feb. 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Magnetized Grain Modeling Method Based on the Image of Real Magnetic Grains for Two-Dimensional Magnetic Recording

Nontarat Bumrungrat<sup>1</sup>, Chanon Warisarn<sup>1</sup>, and Piya Kovintavewat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Data Storage Innovation,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

<sup>2</sup>Data Storage Technology Research Center,  
Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand.  
nontarat.b@tru.ac.th, kwchanon@kmitl.ac.th, piya@npru.ac.th

## Abstract

In two-dimensional magnetic recording (TDMR), the readback signal is obtained by convolving the read head sensitivity function with a magnetized medium. Thus, a good model for generating the grain structure of the medium together with a method to magnetize the data bits onto such a medium are becoming increasingly important. Therefore, we propose a magnetized grain modeling method for TDMR, where the image of real magnetic grains is used to construct the magnetized medium. It is shown that the proposed magnetized medium is more closely related to the actual one, which contains more realistic grains with non-magnetic grain boundaries, than the existing grain modeling methods.

**Keywords:** Grain structure, image processing, magnetic medium, two-dimensional magnetic recording (TDMR)

## 1. Introduction

TDMR is a promising technology for future hard disk drives (HDDs) because it can achieve an areal density up to 10 Tb/in<sup>2</sup> by storing one data bit per few magnetic grains [1]. The performance degradation of TDMR systems depends not only on the severity of two-dimensional (2D) interferences but also on the grain size effect in a magnetic medium. Then, having an accurate model to generate a realistic magnetized medium is of great importance, because the TDMR readback signal is obtained by convolving the read head sensitivity function with the magnetized medium.

Several methods to generate the magnetic medium used for TDMR have recently been proposed [2, 3], which are based on a continuous/discrete Voronoi model and a discrete grain model. In addition, an accurate medium modeling method for a discretized granular medium with non-magnetic grain boundaries was

presented in [4]. Nonetheless, all of them rely on many mathematical techniques to construct the medium (such as a Voronoi based modeling), which are complicated and yield unrealistic grains for the medium.

Therefore, we propose a magnetized grain modeling method based on the image of real magnetic grains by using some image processing techniques. Specifically, the proposed method can generate a more realistic magnetized medium with non-magnetic grain boundaries by applying the blob feature extraction technique [5] to demarcate the grains. In addition, our method is relatively easy to implement in terms of signal processing development.

## 2. Proposed Method

The magnetized grain modeling method based on the image of real magnetic grains is shown in Fig. 1, which consists of four steps, i.e., 1) preprocessing the image to enhance its quality; 2) generating a random binary data sequence; 3) assigning the binary data bits onto the image; and 4) applying a blob feature extraction algorithm to map the data bits onto the medium.

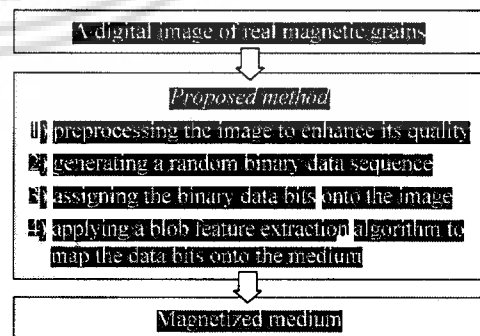


Fig. 1 A block diagram of the proposed method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

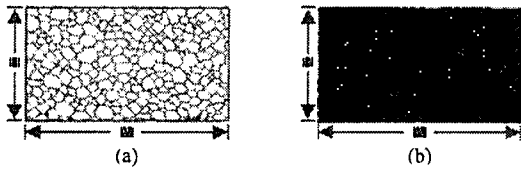


Fig. 2 (a) The image of an actual medium, and (b) the image obtained from an enhancement process (with  $W \times H$  pixels).

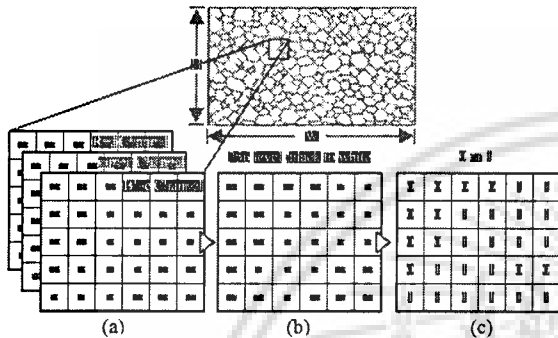


Fig. 3 The medium image representation of (a) a color image, (b) a grayscale image, and (c) a binary image.

Basically, to make the medium modeling process more reliable and similar to the characteristics of the actual medium used in HDDs, we utilize the digital image taken from a real magnetic medium (see Fig. 2(a)) as the input for our proposed method. In general, the image taken from an actual medium is in color.

In general, a color image is consisted of red, green, and blue colors (see the color image representation in Fig. 3(a)). Nevertheless, the color image is more complexity, needs more processing power, and is unnecessary for our purpose. Therefore, we convert this color image into a grayscale image. Note that the value of each pixel of the grayscale image is a range of monochromatic shades from black to white. Then, a grayscale image contains only shades of gray, which has 256 levels calculated by red, green, and blue color values (see grayscale image representation in Fig. 3(b)). Finally, the grayscale image will be changed to a binary image by using a thresholding method according to

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } g(x, y) \geq n \\ 0, & \text{if } g(x, y) < n \end{cases} \quad (1)$$

where  $f(x, y)$  and  $g(x, y)$  are the 2D function of the digital image at the  $x$ -th row and  $y$ -th column pixel, respectively, and  $n$  is a threshold value. Because a binary image is clearly separated between two interesting objects, the value of each pixel of a binary image is only zero or one (see binary image representation in Fig. 3(c) and Fig. 2(b)).

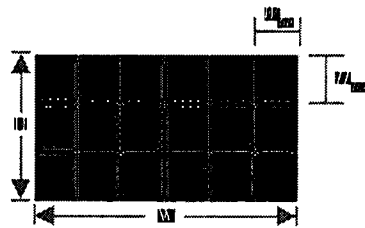


Fig. 4 A random binary data sequence pattern (example  $N_T = 3, N_{BT} = 6$ ).

For the thresholding method, we define a threshold value of 128 (in decimal number) or '10000000' (in binary number) because it is a middle value of the grayscale level in grayscale image processing. Then, if the pixel value of a grayscale image is greater than or equal to a threshold value, we set it equal to '0' (or black). On the other hand, if the pixel value of a grayscale image is less than a threshold value, we set it equal to '1' (or white).

Next, we generate a random binary data sequence and specify the number of tracks ( $N_T$ ) and the number of bits per track ( $N_{BT}$ ) that will be used on a given medium image pattern in Fig. 4.

The two important parameters in this process are the number of pixels per bit in width and in height of the medium image, which can be computed from

$$W_{BH} = \frac{W}{N_{BT}} \quad (2)$$

and

$$H_{BH} = \frac{H}{N_T} \quad (3)$$

where  $W_{BH}$  and  $H_{BH}$  are the number of pixels per bit in width and in height, respectively. These two equations describe the relationship between the total numbers of pixels along the image's width ( $W$ ) and height ( $H$ ), and specify the pattern of a random binary data sequence ( $N_T$  and  $N_{BT}$ ).

Fig. 5 shows an example of assigning the data bits onto the image of  $W \times H$  pixels, when (a) for one track with 10 bits and (b) for two tracks each with 8 bits. It should be noted that one data bit covers a group of grains. Therefore, an XOR operation is employed to magnetize the data bits in Fig. 5 onto the medium image in Fig. 2(a) as demonstrated in Fig. 6.

The XOR operation is a logical image processing technique, which takes two binary inputs, and outputs '0' only when both the inputs have same value (i.e., either both inputs are '0' or '1'), and '1' if both inputs have different values. The detail of XOR operation is shown in Table 1 and Fig. 7.

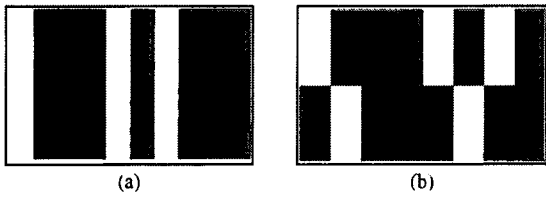


Fig. 5 An example of assigning data on the image when (a)  $N_T = 1$  and  $N_{BT} = 10$ , and (b)  $N_T = 2$  and  $N_{BT} = 8$ .

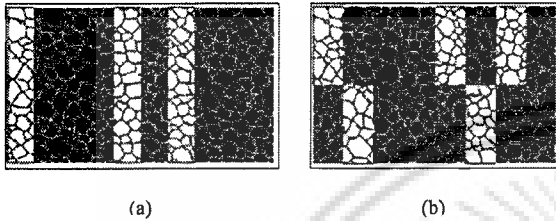


Fig. 6 A magnetized medium after using XOR operation when (a)  $N_T = 1$  and  $N_{BT} = 10$ , and (b)  $N_T = 2$  and  $N_{BT} = 8$ .

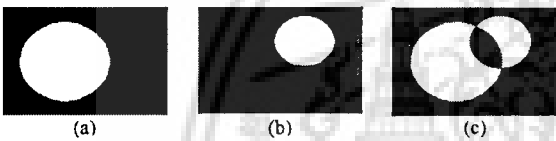


Fig. 7 The XOR operation of logical image processing.

Table 1: XOR operation.

(a) Image A	(b) Image B	(c) A XOR B
White	White	Black
White	Black	White
Black	White	White
Black	Black	Black

The mapping in Fig. 6 is still not good because the grains at the boundary of bit ‘0’ and ‘1’ are not fully magnetized. To make it is more accurately, we propose to use the blob feature extraction algorithm [5] to refine the magnetized grains.

The blob feature extraction algorithm (Also known as connected component analysis, region labeling, blob discovery, or region extraction) is an algorithmic application of image processing and computer vision techniques, where the subsets of connected components are uniquely labeled based on a given solution. Then, we use the  $m$ -connected component algorithm [6] (where  $m$  is a number of pixel neighbors in an  $m$ -connected pattern centered at  $p$ ) to detect the connected regions and label them in binary images. Generally, this algorithm is suitable for small object extraction in the image. For example, Fig. 8 shows the pixel relationship of the 4-connected pattern and the 8-connected pattern, respectively.

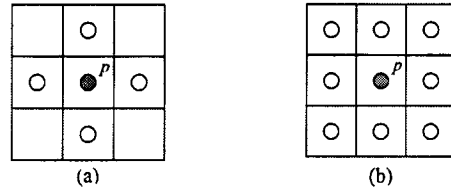


Fig. 8 (a) The 4-connected pattern: a pixel has four horizontal and vertical neighbors; and (b) the 8-connected pattern: a pixel has four horizontal, four vertical, and four diagonal neighbors, where  $p$  is a center of  $m$ -connected pattern.

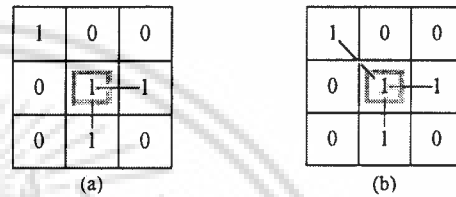


Fig. 9 The result of (a) 4-pixel connectivity, and (b) 8-pixel connectivity.

The example result of  $m$ -connected component algorithm as shown in Fig. 9, where we scan an input image and group its pixels into the components based on  $m$ -pixel connectivity, (i.e., all pixels in a connected component will share similar pixel values and are in some ways connected with each other). Specifically, all pixel connectivity groups are determined, and each group is labeled as a number. It was assigned to extracting the disjoint area and labeling the connected pixel region in the image.

The  $m$ -connected component labeling works by scanning an input image, pixel-by-pixel (from top to bottom and left to right) so as to identify the connected pixel regions, i.e., the regions of adjacent pixels which share the same set of pixel values. As a result, for our proposed method, we use a medium binary image, where we are interested in the black connected pixel regions  $V = \{0\}$  (represents a magnetized grain area) and extract the white connected pixel regions to be the disjoint area (represents a boundary of grain area) by using the 4-connected pattern.

The 4-connected component labeling operator scans the image by moving along a row until it reaches to a point  $p$  for which  $V = \{0\}$ , where  $p$  denotes the pixel to be labeled at any stage in the scanning process. When this is true, it examines the four neighbors of  $p$ , which have already been encountered in the scanning process (i.e., the neighbors (i) to the left of  $p$ , and (ii) above it). Based on this information, the labeling of  $p$  occurs as follows:

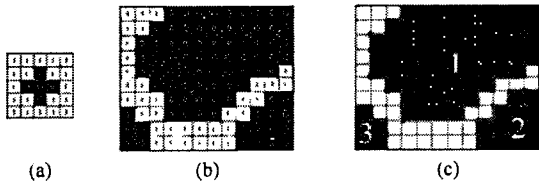


Fig. 10 (a) The 4-connected pattern, (b) a part of media image, and (c) the labeling result.

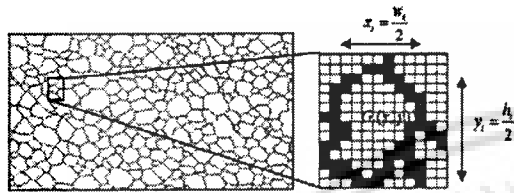


Fig.11 How to find the center of grain  $i$  for decision area to write a random sequence.

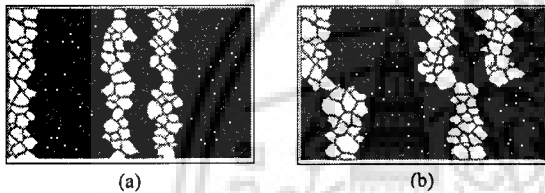


Fig.12 The magnetized medium after the blob feature extraction algorithm when (a)  $N_T = 1$  and  $N_{BT} = 10$ , and (b)  $N_T = 2$  and  $N_{BT} = 8$ .

- if all four neighbors are '0', we assign a new label to  $p$ , else
- if only one neighbor has  $V = \{0\}$ , we assign its label to  $p$ , else
- if more than one neighbors have  $V = \{0\}$ , we assign one of the labels to  $p$  and make a note of the equivalences.

After completing the scan, the equivalent label pairs are sorted into the equivalence classes, and a unique label is assigned to each blob is shown in Fig. 10(c). As a final step, a second scan is made through the image, during which each label is replaced by the label assigned to its equivalence blobs. For displaying, the labels might be in different gray levels.

For the last process in our proposed, we find the center of each grain (or each blob). The number of grains ( $i$ ) is checked by a specific grain area of the medium image sequence in four directions provided that any grain component has same pixel value in four directions surrounding it. Hence, the area of each grain will be expanded until it is large, and will be stopped when the area detect grain's boundary. The three parameters of each grain are extracted such as the total pixel of each grain, the pixel position of each grain,

and the center of the grains. Fig. 11 shows the center of the grain  $i$  in the row direction ( $x_i$ ) and the center of the grain  $i$  in column direction ( $y_i$ ), which can be calculated by the pixel position of each grain.

It is apparent that all grains at the boundary of bit '0' and '1' are fully magnetized according to the recorded data bits as shown in Fig 12. Consequently, it can be concluded that the proposed method can generate the magnetized medium, which closely resembles the actual magnetized medium found in HDDs.

### 3. Conclusion

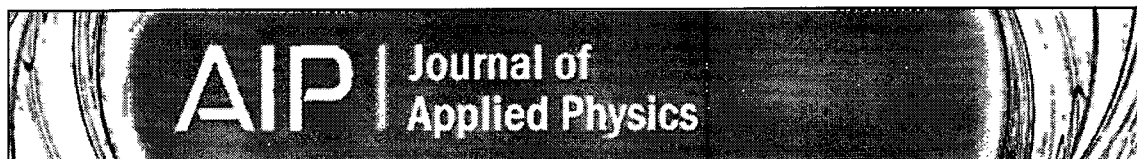
The magnetized grain modeling method for two dimension magnetic recording (TDMR) was proposed, where the image of real magnetic grains is used to construct the magnetized medium. Therefore, the proposed magnetized medium is more closely related to the actual magnetized medium found in HDDs.

### Acknowledgement

This work was supported by College of Data Storage Innovation (D\*STAR) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, Thailand.

### References

- [1] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 2, pp. 917–923, Feb. 2009.
- [2] A. R. Krishnan, R. Radhakrishnan, B. Vasic, A. Kavcic, W. Ryan, and F. Erden, "2-D magnetic recording: Read channel modeling and detection," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3830–3836, Oct. 2009.
- [3] K. S. Chan, J. J. Miles, E. Hwang, B. V. K. V. Kumar, J. Zhu, W. Lin, and R. Negi, "TDMR platform simulations and experiments," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3837–3843, Oct. 2009.
- [4] M. Yamashita, H. Osawa, Y. Okamoto, Y. Nakamura, Y. Suzuki, K. Miura, and H. Muraoka, "Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 3558–3561, Oct. 2011.
- [5] Q. R. Razlighi and Y. Stern, "Blob-like feature extraction and matching for brain MR images," 33<sup>rd</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS, August 2011.
- [6] M. Li, X. Zheng, X. Wan, H. Luo, S. Zhang, and L. Tan, "Segmentation of brain tissue based on connected component labeling and mathematic morphology," *IEEE BMEI*, vol. 1, pp. 482 - 485, Oct. 2011.



## An iterative inter-track interference mitigation method for two-dimensional magnetic recording systems

C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat

Citation: Journal of Applied Physics **115**, 17B732 (2014); doi: 10.1063/1.4866849

View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4866849>

View Table of Contents: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/115/17?ver=pdfcov>

Published by the AIP Publishing

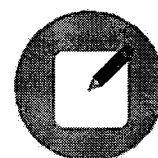


## Re-register for Table of Content Alerts

Create a profile.



Sign up today!



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

# An iterative inter-track interference mitigation method for two-dimensional magnetic recording systems

C. Warisarn,<sup>1</sup> T. Losuwan,<sup>1</sup> P. Supnithi,<sup>2</sup> and P. Kovintavewat<sup>3,a)</sup>

<sup>1</sup>College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>3</sup>Data Storage Technology Research Center, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

(Presented 8 November 2013; received 23 September 2013; accepted 22 November 2013; published online 26 February 2014)

At high recording density, the readback signal of two-dimensional magnetic recording is inevitably corrupted by the two-dimensional (2D) interference consisting of inter-symbol interference and inter-track interference (ITI), which can significantly degrade the overall system performance. This paper proposes an iterative ITI mitigation method using three modified 2D soft-output Viterbi algorithm (2D-SOVA) detectors in conjunction with an iterative processing technique to combat the 2D interference. The codeword of the outer code is divided and then written on three separate tracks. For every iteration, all 2D-SOVA detectors exchange the soft information to improve the reliability of the *a priori* information and use it in the branch metric calculation, before feeding the refined soft information to the outer decoder. Simulation results show that the proposed method outperforms the conventional receiver and the existing partial ITI mitigation method. © 2014 AIP Publishing LLC. [http://dx.doi.org/10.1063/1.4866849]

## I. INTRODUCTION

Two-dimensional magnetic recording (TDMR) by shingled magnetic recording<sup>1</sup> is a promising technology for realizing an areal density (AD) toward 10 Tb/in<sup>2</sup>, which attempts to store one channel bit in few grains of a magnetic medium so as to reach about 1/2 data bits per grain.<sup>1</sup> When reproducing a shingle-recorded data sequence by a wide reader, the readback signal is severely corrupted by the two-dimensional (2D) interference, consisting of inter-symbol interference and inter-track interference (ITI), which can deteriorate the system performance considerably. Generally, there are two techniques proposed to mitigate the 2D interference, namely, an ITI cancellation method<sup>2,3</sup> and a multi-track detection method.<sup>4,5</sup> For example, a partial ITI mitigation method (PIMM)<sup>2</sup> used the bit estimates from the low-density parity-check (LDPC)<sup>6</sup> decoder as partial ITI estimates for the branch metric calculation in the modified soft-output Viterbi algorithm (SOVA)<sup>7</sup> detector. In addition, the multi-track detection<sup>4</sup> was introduced to recover only the user data on the center track, but did not mention how to recovery the user data from adjacent tracks in a multi-track recording system. This paper proposes an iterative ITI mitigation method to alleviate the severe 2D interference in a coded TDMR channel.

## II. CHANNEL MODEL

Fig. 1 illustrates the TDMR system based on a discrete Voronoi-grain model.<sup>8</sup> An input data sequence  $x_k \in \{0,1\}$  with bit period  $T_x$  is encoded by an LDPC encoder and is mapped to a coded sequence  $a_k \in \{\pm 1\}$ , which will then be

split into three adjacent tracks  $\{a_{k,l-1}, a_{k,l}, a_{k,l+1}\}$  with track pitch  $T_z$  for recording onto a magnetic medium. In this paper, we consider the medium, approximately with the grain size of 4.6 nm diameter and the non-magnetic boundary of 0.9 nm.<sup>8</sup> Also, we employ the method (with same parameters) proposed by Yamashita *et al.*<sup>8</sup> to generate the TDMR readback signal, which is obtained by convolving the magnetization pattern of discrete Voronoi grains,  $M(m, n)$ , with the read-head sensitivity function,  $\psi(m, n)$ , where  $m$  and  $n$  are the time indices of the bit period in the along- and across-track directions, and then add a small amount of additive white Gaussian noise (AWGN) for the electronics noise.<sup>5,8</sup>

Then, the readback sequence,  $r_{k,l}$ , is equalized by a 2D equalizer<sup>9</sup> so as to shape the overall channel response to the 2D target.<sup>9,10</sup> Specifically, the  $k$ th equalizer output on the  $l$ th track can be expressed as

$$y_{k,l} = \sum_n \sum_m \underbrace{h_{m,n} a_{k-m,l-n}}_{s_{k,l}} + w_{k,l}, \quad (1)$$

where  $a_{k,l}$ 's are the recorded bits,  $h_{m,n}$ 's are the 2D target coefficients,  $s_{k,l}$ 's are the noiseless target outputs, and  $w_{k,l}$  is the filtered noise.

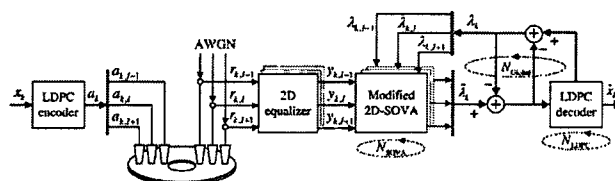


FIG. 1. A TDMR channel model with the proposed method.

<sup>a)</sup> Author to whom correspondence should be addressed. Electronic mail: piya@npru.ac.th

Next, each of the equalizer outputs  $\{y_{k,l-1}, y_{k,l}, y_{k,l+1}\}$  is processed by a separate 2D-SOVA<sup>11</sup> detector to produce the soft outputs  $\{\tilde{\lambda}_{k,l-1}, \tilde{\lambda}_{k,l}, \tilde{\lambda}_{k,l+1}\}$ . The 2D-SOVA detectors exchange this soft information for  $N_{\text{SOVA}}$  times, before combining and sending the refined soft information to the LDPC decoder to produce the log-likelihood ratio (LLR) of bit  $a_k$ ,  $\lambda_k$ . Thus, this LLR sequence will be split into three sequences  $\{\lambda_{k,l-1}, \lambda_{k,l}, \lambda_{k,l+1}\}$  before feeding them back to each corresponding 2D-SOVA detector for the next global iteration.

**III. PROPOSED SCHEME**

To handle the 2D interference, we propose to exchange the soft information among all 2D-SOVA detectors as shown in Fig. 2, where the conventional 2D-SOVA detector is employed in the 1st SOVA iteration (i.e.,  $N_{\text{SOVA}} = 1$ ). However, the proposed method begins at the 2nd and higher SOVA iteration, where the  $l$ th detector exploits the sidetrack information from the  $(l - 1)$ th and  $(l + 1)$ th detectors, and the  $(l - 1)$ th and  $(l + 1)$ th detectors employ the sidetrack information only from the  $l$ th detector. Specifically, this sidetrack information is used to enhance the reliability of the  $a$  priori information before evaluating the branch metric in the 2D-SOVA detector for the next SOVA iteration.

To perform maximum-likelihood equalization via 2D-SOVA, we apply a technique introduced in the bidirectional SOVA<sup>12</sup> to compute the extrinsic information of the bit  $a_k$ ,  $\tilde{\lambda}_k$ , for the LDPC decoder. Define  $(u, q)$  as the transition from stage  $u$  to stage  $q$  in the trellis diagram.<sup>7</sup> In practice, the conventional SOVA detector computes the  $k$ th branch metric on the  $l$ th track associated with  $(u, q)$  according to<sup>7,12</sup>

$$\gamma_{k,l}(u, q) \approx -\frac{1}{2\sigma^2} |y_{k,l} - s_{k,l}(u, q)|^2 + \ln(p_{k,l}(q|u)), \quad (2)$$

where  $\sigma^2$  is the noise variance seen at the input of the SOVA detector,  $s_{k,l}(u, q)$  is the  $k$ th target output on the  $l$ th track from Eq. (1) associated with  $(u, q)$ , and  $p_{k,l}(q|u)$  is the  $k$ th  $a$  priori probability on the  $l$ th track. Generally, the quality of the extrinsic information  $\tilde{\lambda}_k$  depends on how good the branch metric  $\gamma_{k,l}(u, q)$  is, which in turn helps reduce the ITI effect. In this paper, all 2D-SOVA detectors iteratively exchange the soft information so that a better  $\gamma_{k,l}(u, q)$  can be obtained. To achieve this, we need to modify the branch metric calculation in Eq. (2) such that an improved  $p_{k,l}(q|u)$  is included.

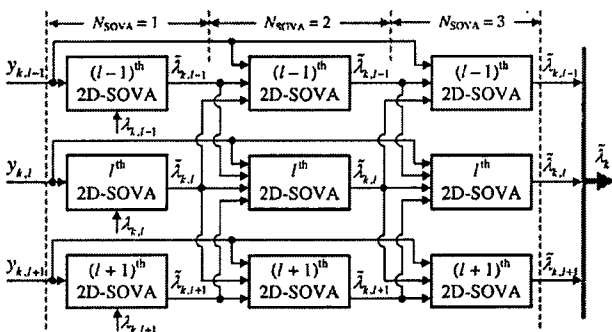


FIG. 2. The soft information exchange process at the modified 2D-SOVA detectors for  $N_{\text{SOVA}} = 3$ .

Consider the 3-by-3 asymmetric target,<sup>10</sup> whose trellis diagram has 64 states with 8 outgoing branches connected to 8 different states. Because each branch corresponds to the input data  $[a_{k,l-1}, a_{k,l}, a_{k,l+1}]$ , the  $a$  priori probability in Eq. (2) can then be calculated from

$$p_{k,l}(q|u) = p(a_{k,l-1})p(a_{k,l})p(a_{k,l+1}), \quad (3)$$

where  $p(a_{k,l} = +1) = e^{\lambda_{k,l}} / (1 + e^{\lambda_{k,l}})$  and  $p(a_{k,l} = -1) = 1 - p(a_{k,l} = +1)$ . Note that when the sidetrack information is used to compute  $p_{k,l}(q|u)$ , the  $\lambda_{k,l}$  will be replaced by the 2D-SOVA output,  $\tilde{\lambda}_{k,l}$ .

To reduce the complexity, we employ the 3-by-3 symmetric 2D target<sup>10</sup> in this paper, whose trellis diagram has 36 states with 6 outgoing branches connected to 6 different states because the upper and the lower target coefficients are the same. In this case, it can be shown that the  $p_{k,l}(q|u)$  in Eq. (3) can be computed as  $p_{k,l}(q|u) = p(a_{k,l})p(b_{k,l})$ , where  $b_{k,l} = a_{k,l-1} + a_{k,l+1}$ , and

$$p(b_{k,l}) = \begin{cases} p(a_{k,l-1} = -1)p(a_{k,l+1} = -1), & b_{k,l} = -2 \\ p(a_{k,l-1} = +1)p(a_{k,l+1} = +1), & b_{k,l} = +2 \\ p(a_{k,l-1} = -1)p(a_{k,l+1} = +1) \\ + p(a_{k,l-1} = +1)p(a_{k,l+1} = -1), & b_{k,l} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

**IV. SIMULATION RESULTS**

Consider a rate-8/9 coded system in which each block of 3640 message bits is encoded by a regular (3, 27) LDPC encoder, resulting in a 4095-bit block sector. The parity-check matrix has 3 ones on each column and 27 ones on each row. This paper defines the signal-to-noise ratio (SNR) as  $20 \log_{10}(A/\sigma_s)$ , where  $A$  assumed to be 1 is the saturation level of an isolated waveform calculated by using the ideal granular medium<sup>8</sup> and  $\sigma_s$  is the standard deviation of AWGN. The 2D 3-by-3 symmetric target and its corresponding 2D 3-by-7 equalizer are designed based on a minimum mean-squared error approach.<sup>9,10</sup> In simulation,  $N_{\text{SOVA}} = 3$  and  $\sigma = \sigma_s$  are used, and the LDPC decoder is implemented based on the message passing algorithm<sup>6</sup> with  $N_{\text{LDPC}} = 10$  internal iterations.

We make a comparison among (1) the conventional receiver denoted as ‘‘Conv’’ and three conventional 2D-SOVA detectors (i.e.,  $N_{\text{SOVA}} = 1$ ) are used, (2) the PIMM,<sup>2</sup> and (3) the proposed scheme, where all schemes have random data on the  $(l - 2)$ th and  $(l + 2)$ th tracks. Fig. 3(a) shows the BER

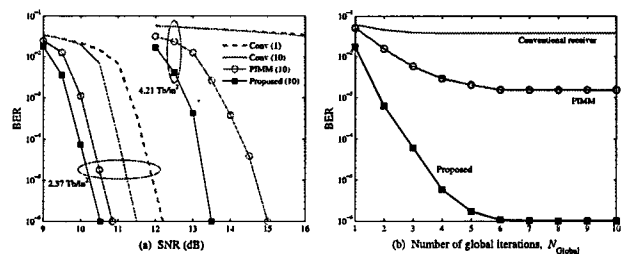


FIG. 3. Performance comparison (a) with different ADs and (b) as a function of  $N_{\text{Global}}$ 's at 4.21 Tb/in<sup>2</sup> and SNR = 13.5 dB.

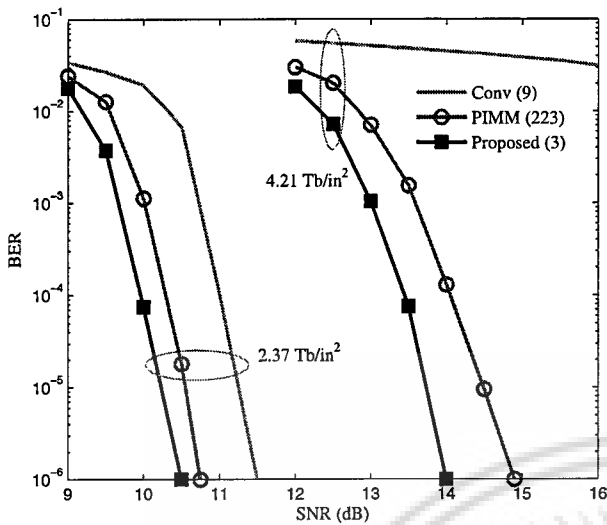


FIG. 4. Performance comparison with same complexity.

performance of different schemes at the AD of  $2.37 \text{ Tb/in}^2$  ( $T_x = T_z = 16.5 \text{ nm}$ ) and  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  ( $T_x = T_z = 12.375 \text{ nm}$ ). Notice that the number inside the parenthesis in Fig. 3(a) indicates the total number of global iterations,  $N_{\text{Global}}$ , used to generate each curve. Apparently, the proposed scheme performs better than the others, especially when AD is increased. For example, at  $4.21 \text{ Tb/in}^2$ , the proposed scheme is far superior to the conventional receiver and is better than the PIMM by about 1.5 dB at  $\text{BER} = 10^{-6}$ . Fig. 3(b) also shows the BER performance as a function of  $N_{\text{Global}}$ 's at AD of  $4.21 \text{ Tb/in}^2$  and  $\text{SNR} = 13.5 \text{ dB}$ . It is clear that the proposed scheme performs the best and no performance gain is obtained for all schemes after  $N_{\text{Global}} = 6$ .

Additionally, we also compare the performance of all schemes when they have same complexity. To do so, we define the complexity as the total number of multiplications (per bit), including the LDPC decoder. Note that only multiplication is considered because it has much more complexity than addition in terms of circuit implementation. With carefully counting the number of operations, it can be shown that the conventional receiver, the PIMM, and the proposed scheme have  $1081 N_{\text{Global}}$ ,  $44 N_{\text{Global}}$ , and  $3274 N_{\text{Global}}$  multiplications, respectively. Here, we assume that current technology can support the total number of multiplications equal

to 3 iterations of the proposed scheme, which is approximately equal to 9 and 223 iterations of the conventional receiver and the PIMM, respectively. Fig. 4 compares the performance of different schemes when they have same complexity. It is evident that the proposed scheme still performs better than other schemes, especially at high AD. This might be because the proposed scheme can combat the severe ITI as opposed to the other schemes.

## V. CONCLUSION

This paper proposes an iterative ITI mitigating method to combat the severe 2D interference in TDMR systems, which employs three modified 2D-SOVA detectors in conjunction with an iterative processing technique. Specifically, the three modified 2D-SOVA detectors exchange soft information to improve the reliability of the *a priori* information and use it in the branch metric calculation, before passing the refined soft information to the LDPC decoder. Simulation results indicate that the proposed scheme performs better than both the conventional receiver and the PIMM, especially when AD is high. Therefore, the proposed scheme is worth employing in the system that experiences the severe 2D interference (e.g., TDMR and bit-patterned media recording).

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) Research Fund, and partly by Nakhon Pathom Rajabhat University (NPRU), Thailand.

- <sup>1</sup>R. Wood *et al.*, IEEE Trans. Magn. 45, 917 (2009).
- <sup>2</sup>L. M. M. Lyint *et al.*, IEEE Trans. Magn. 45, 3691 (2009).
- <sup>3</sup>Y. Okamoto *et al.*, IEEE Trans. Magn. 47, 3570 (2011).
- <sup>4</sup>W. Chang and J. R. Cruz, IEEE Trans. Magn. 46, 3899 (2010).
- <sup>5</sup>R. M. Todd *et al.*, IEEE Trans. Magn. 48, 4594 (2012).
- <sup>6</sup>R. Gallager, IRE Trans. Inf. Theory 8, 21 (1962).
- <sup>7</sup>J. Hagenauer and P. Hoeher, in *Proceedings of IEEE Globecom'89* (Dallas, Texas, 1989), p. 1680.
- <sup>8</sup>M. Yamashita *et al.*, IEEE Trans. Magn. 47, 3558 (2011).
- <sup>9</sup>S. Nabavi and B. V. K. Vijaya Kumar, in *Proceedings of ICC'07* (Glasgow, 2007), p. 6249.
- <sup>10</sup>S. Karakulak *et al.*, IEEE Trans. Magn. 46, 3639 (2010).
- <sup>11</sup>S. Koonkarnkhai *et al.*, Procedia Eng. 32, 323 (2012).
- <sup>12</sup>B. Vucetic and J. Yuan, *Turbo Codes: Principles and Applications*, 2nd ed. (Kluwer, Norwell, MA, 2000).

## ภาคผนวก –ข–

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล...ดร. ชานนท์ วาริสาร

ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

### ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	ตัวอักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันการศึกษา	ประเทศ
2548	ปริญญาตรี	B. Eng. (1 <sup>st</sup> Hon)	Electronic Engineering Technology	KMITNB	ไทย
554	ปริญญาเอก	Ph.D.	Electrical Engineering	KMITL	ไทย

### ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- [1] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" IEEE Trans. Magn., Impact 1.83.
- [2] C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in Journal Association for Computing Machinery (ACM), Submitted, Impact 1.30.
- [3] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Constructive Inter-Track Interference Coding Scheme for Bit-Patterned Media Recording System" in Journal of Applied Physics, Accepted, Impact 2.30.
- [4] C. Warisarn, T. Losuwan, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative Inter-Track Interference Mitigation Technique for Two-Dimensional Magnetic Recording Systems" in Journal of Applied Physics, Accepted, Impact 2.30.
- [5] S. Chandrasekaran, P. Supnithi, C. Warisarn, and D. Bai, "Spinning Disk Test Study on Erase Band and Write Width for Shingled Magnetic Recording" in Journal of Applied Physics, Accepted, Impact 2.30.
- [6] A. Arrayangkool, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Recorded-Bit Patterning Scheme with Accumulated Weight Decision for Bit Patterned Media Recording" in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, Impact 0.34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [7] Lin M. M. Myint and C. Warisarn, "Estimate ITI information using Cross Correlation Functions in Equalizer Designing Process for BPM Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
- [8] N. Bumrungrat, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "A Magnetized Grain Modeling Method Based on the Image of Real Magnetic Grains for Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
- [9] 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. ITC-CSCC 2013, Yeosu, Korea, 30 Jun - Jul.3 2013
- [10] A. Arrayangkool, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple A Simple Recorded-Bit Patterning Scheme for Bit Patterned Media Recording," in Proc. of ECTI-CON 2013, Krabi, Thailand, May. 15-17 2013.
- [11] S. Koonkarnkhai, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Iterative Decoding for Bit-Patterned Media Recording Channels with Insertion/Deletion Errors," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.
- [12] P. Kovintavewat, C. Warisarn, and C. Tantibundhit, "Performance of Interpolated Timing Recovery in Perpendicular Magnetic Recording Channel," in Proc. of I-SEEC 2012, Phetchburi, Thailand, Dec. 11-14 2012.
- [13] T. Losuwan, C. Warisarn, L. M. Myint, and P. Supnithi, "A Study of Iterative Detection Method for Four-Grain Based Two-Dimensional Magnetic Recording," in Proc. of APMRC 2012, Singapore, Oct 31-Nov 2, 2012
- [14] Losuwan T., Warisarn C., and Kovintavewat P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" in Proc. of ITC-CSCC 2012, Sapporo, Japan, Jul. 15-18 2012.
- [15] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" ECTI-CIT Trans., Nov. 2012.
- [16] Warisarn C., Supnithi P. "A Novel IIR Equalizer Design for Perpendicular Recording Systems with Media Jitter Noise." KKU Res. J., 17(3), Jun. 2012. pp. 339-348.
- [17] M. Lin, P. Supnithi, C. Warisarn, and N. Puttarak, "Off-track detection in magnetic recording based on the readback signals" , in Proc. INTERMAG 2012, Vancouver, Canada, May 7 - 11, 2012.

- [18] C. Warisarn, P. Kovintavewat, and P. Supnithi, "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System," in Proc. of ISPACS 2011, Chiangmai, Thailand, Dec 7 - 9, 2011.
- [19] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery Using M-Algorithm for Magnetic Recording System" in Proc. of ISPACS 2011, Chaingmai, Thailand, Dec. 2011.
- [20] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Iterative Timing Recovery with the Split-Preamble Strategy for Coded Partial Response Channels." IEICE Trans. Elec., vol. E94-C, no. 3, Mar. 2011. pp. 368-374, Impact 0.53.
- [21] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery In Perpendicular Magnetic Recording." in Proc. of PMRC 2010, Sendai, Japan, Oct. 2010.
- [22] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Reduced-Complexity Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery for Coded Partial Response Channels." in Proc. of ICT2010, Bangkok, Thailand, Aug. 2010.
- [23] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Iterative Timing Recovery with the Split-Preamble Strategy for Magnetic Recording Channels." IEEE MMM-Intermag Conference (INTERMAG2010), Washington DC, USA, Jan. 2010. pp. GH-09.
- [24] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Bi-Directional Timing Recovery for Magnetic Recording Systems." in Proc. of TENCON2009, Singapore, Nov. 2009.
- [25] Kovintavewat P., Warisarn C., and Supnithi P. "An MMSE Infinite Impulse Response Equalizer for Perpendicular Recording Channels with Jitter Noise." in Proc. of ITC-CSCC 2008, Shimonoseki City, Japan, Jul. 2008. pp. 929-932.
- [26] Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "An Infinite Impulse Response Equalizer for Magnetic Recording Channels." KKU Research Journal, vol.13, no. 4, May 2008. pp. 521-525.
- [27] Warisarn C., Supnithi P. "The Effects of Modulation Code Rate and Channel Pulses on Noise Margin of the Magnetic Recording Channel." KKU Engineering Journal, vol. 34, no. 4, Aug. 2007. pp. 431-438.