



รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาตัวตรวจจับแบบหัวอ่านหลายหัวสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิง
แม่เหล็กความหนาแน่นสูงยิ่ง

The Development of Multiple Readhead Detection for Ultra-High
Density Magnetic Recording Systems

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วรรณสาร

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การพัฒนาตัวตรวจจับแบบหัวอ่านหลายหัวสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก
ความหนาแน่นสูงยิ่ง

แหล่งเงิน : งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 120,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 สิงหาคม 2559 ถึง 31 กรกฎาคม 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ : ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ผู้ร่วมโครงการ: นางสาวกนกเลขา บัวหิ๊ง

บทคัดย่อ

การแทรกสอดแบบสองมิติถือได้ว่าเป็นปัญหาที่ทำหายอย่างยิ่งในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูงยิ่งเช่นการบันทึกข้อมูลแบบบิตแพตเทิร์น การใช้การออกแบบการประมวลผลสัญญาณร่วมกันจากการทำงานของหัวอ่านหลายหัวเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ ยิ่งไปกว่านั้นการใช้หัวอ่านหลายหัวยังสามารถจัดการกับปัญหาการอ่านนอกแทร็กข้อมูลพร้อมทั้งบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามความซับซ้อนของตัวตรวจจับสองมิติก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การลดความซับซ้อนของตัวตรวจจับโดยที่สมรรถนะของระบบยังคงเท่าเดิมไม่สูญหาย โดยเราได้นำเสนอตัวตรวจจับสองมิติร่วมหลายแทร็กอย่างง่ายสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบหลายแทร็กหลายหัวอ่าน ในตัวตรวจจับที่เรานำเสนอเราจะใช้วิธีการลดความซับซ้อนของตารางเทรลลิสซึ่งออกแบบให้สอดคล้องกับตัวปรับเท่าทั้งแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ ยิ่งไปกว่านั้นสมรรถนะของระบบที่ทำงานแบบเต็มประสิทธิภาพยังได้ถูกประเมินเพื่อนำผลที่ได้มาเทียบกับวิธีที่เราได้นำเสนออีกด้วย ผลที่ได้จากการจำลองระบบเราพบว่าวิธีที่เรานำเสนอสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับระบบที่ทำงานแบบเต็ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบต้องเผชิญกับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกข้อมูลที่รุนแรง

คำสำคัญ : การแทรกสอดระหว่างแทร็ก, การบันทึกข้อมูลแบบสองมิติ, การอ่านแบบหลายแทร็กหลายหัว

RCH
๙๕๒๑ ๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต



เลขที่เอกสาร 147868

เลขทะเบียน 15 ๐ ๒ 2560

Research Title:The Development of Multiple Readhead Detection for Ultra-High Density Magnetic Recording Systems.....

Researcher:..... Assist. Prof. Dr. Chanon Warisarn.....

Faculty:College of Advanced Manufacturing Innovation..... **Department:**.....

ABSTRACT

.....Two-dimensional (2-D) interference is one of the prominent challenges in ultra-high density recording system such as bit patterned media recording (BPMR). The multitrack joint 2-D detection technique with the help of the array-head reading can tackle this problem effectively by jointly processing the multiple readback signals from the adjacent tracks. Moreover, it can robustly alleviate the impairments due to track misregistration (TMR) and media noise. However, the computational complexity of such detectors is normally too high and hard to implement in a reality, even for a few multiple tracks. Therefore, in this paper, we mainly focus on reducing the complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detector without paying a large penalty in terms of the performance. We propose a simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with a manageable complexity level for the BPMR's multi-track multi-head (MTMH) system. In the proposed method, the complexity of detector's trellis is reduced with the help of the joint-track equalization method which employs 1-D equalizers and 2-D generalized partial response (GPR) target. Moreover, we also examine the performance of a full-fledged multi-track joint 2-D detector and the conventional 2-D detection. The results show that the simplified detector can perform close to the full-fledge detector, especially when the system faces high media noise, with the significant low complexity.....

Keywords: Intertrack interference, Two-dimensional magnetic recording, Modulation code.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินงบประมาณสนับสนุนภายใต้ทุนโครงการวิจัยเงินรายได้ รหัสทุน 2560-02-10-003 จาก
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก.....	5
บทที่ 3 วิวัฒนาการของการบันทึกเชิงแม่เหล็ก.....	17
บทที่ 4 ตัวตรวจจับสนิทอโรบิสองมิติร่วมหลายแท่ง.....	33
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	40
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....	41
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	46
ภาคผนวก-ก- (เอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์).....	47
ภาคผนวก-ข- (ประวัตินักวิจัย).....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการเติบโตอย่างรวดเร็วของเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โซเชียลเน็ตเวิร์ค อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัล (Digital data storage) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสำคัญมากที่จะนำมาจัดเก็บข้อมูลตามความต้องการของผู้บริโภค ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) จัดเป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลชนิดหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากราคาต่อหน่วยความจุที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลชนิดอื่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่ใช้หลักการเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในการบันทึกข้อมูล ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) หัวเขียน (Recording head) 2) หัวอ่าน (Read head) และ 3) สื่อบันทึก (Media) โดยหัวเขียนทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่จะใช้ในการเหนี่ยวนำสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกให้มีทิศทางขึ้นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งและทิศทางตรงกันข้ามซึ่งสามารถใช้แทนข้อมูลดิจิทัลบิตที่เป็น “0” และบิตที่เป็น “1” ส่วนหัวอ่านจะทำหน้าที่ตรวจจับ (Sense) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกและเปลี่ยนไปเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะถูกกระบวนการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) แปลงกลับไปเป็นข้อมูลดิจิทัลตามเดิม

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป้าหมายคือการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ของข้อมูลให้มากขึ้น ดังนั้น ขนาดเกรนแม่เหล็ก (Magnetic grain) ของสื่อบันทึก (Media) จะถูกลดขนาดลงเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางกายภาพของสสารแม่เหล็กเมื่อขนาดของเกรนแม่เหล็กมีขนาดเล็กลงจนถึงจุดหนึ่ง เกรนแม่เหล็กจะสูญเสียความสามารถในการเก็บข้อมูลและไม่สามารถคงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเช่นเดิมอยู่ได้ซึ่งสถานะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “Super paramagnetic” เป็นสถานะที่ความร้อนจากภายนอกสามารถที่จะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กได้ กล่าวคือ ความร้อนสามารถทำให้ข้อมูลที่บันทึกไว้สูญหาย ในบทความ [1] ได้เสนอว่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะถูกจำกัดสูงสุดอยู่ที่ 1 Tb/in^2 ก่อนที่เกรนแม่เหล็กจะเปลี่ยนคุณสมบัติไปเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก ดังนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาค้นคว้ารูปแบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในรูปแบบแบบใหม่เพื่อข้ามพ้นข้อจำกัดนี้ ปัจจุบันวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในรูปแบบใหม่ได้ถูกวิจัยและนำเสนอในหลายวิธี เช่น

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (Heat assisted magnetic recording, HAMR) [2], การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต (Bit pattern media magnetic recording, BPM) [3] และ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-dimensional magnetic recording, TDMR) [4]

สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR) จะใช้สื่อบันทึกที่มีค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Coercivity) สูง เพื่อให้สามารถลดขนาดเกรนแม่เหล็กได้โดยที่ไม่สูญเสียคุณสมบัติในการเก็บข้อมูลอย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กที่มีลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กสูงจะต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กที่มากกว่าเดิมในการกลับ (Switch) ทิศทางสนามแม่เหล็ก ซึ่งขัดแย้งกับแนวโน้มขนาดของหัวอ่านที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงต้องมีการคิดเลเซอร์ขนาดเล็กที่หัวเขียนเพื่อให้ความร้อนแก่สื่อบันทึก ความร้อนจะทำให้ค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกลดลงชั่วขณะ ซึ่งเพียงพอที่ความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนจะกลับทิศทางสนามแม่เหล็กของสื่อบันทึก ทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามปัญหาสำหรับรูปแบบการบันทึกแบบนี้ คือการสร้างสื่อบันทึกที่มีค่าลบล้างสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง และมีเกรนแม่เหล็กขนาดเล็กสม่ำเสมอมีความยากลำบาก นอกจากนี้ตัวสื่อบันทึกต้องสามารถรักษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กแม้จะได้รับความร้อนสูง

สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต ตัวสื่อบันทึกถูกออกแบบให้เกรนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นเกาะ (Island) เรียงตัวตามรูปแบบ (Pattern) ที่กำหนดไว้ (ตรงข้ามกับสื่อบันทึกที่ใช้งานในปัจจุบันที่การเรียงตัวของเกรนแม่เหล็กเป็นลักษณะสุ่ม) แต่ละเกาะของเกรนแม่เหล็กจะถูกกั้นด้วยสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Non - magnetic) เพื่อลดรอยต่อซิกแซก (Zigzag) ระหว่างเกรนแม่เหล็ก ซึ่งเป็นที่มาของสัญญาณรบกวน (Media noise) อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต คือ การเขียนผิดพลาด (Error writing) กล่าวคือ หัวเขียนจะต้องจ่ายสนามแม่เหล็กให้ตรงตำแหน่งของเกรนแม่เหล็ก มิฉะนั้นแล้วจะเกิดการเขียนผิดตำแหน่ง ไปเขียนบริเวณสารที่ไม่ใช่แม่เหล็ก ซึ่งหมายความว่าข้อมูลที่บันทึกจะเกิดการสูญหาย นอกจากนี้ยังมีความลำบากในกระบวนการสร้างสื่อบันทึกให้แต่ละเกาะวางตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดเท่าทั่วทั้งแผ่นของสื่อบันทึก

ด้วยความยากในกระบวนการสร้างหัวเขียนสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนช่วยและความยากของกระบวนการสร้างสื่อบันทึกสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้สื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต จึงได้มีการเสนอการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ โดยมีแนวคิดที่จะยังคงใช้สื่อบันทึกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันแต่

ปรับปรุงกระบวนการเขียน - การอ่าน และใช้ประสิทธิภาพของการประมวลผลสัญญาณแบบ 2 มิติร่วมกับวิธีการเข้ารหัสข้อมูลชั้นสูง เพื่อช่วยในการเพิ่มความจุให้กับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก ซึ่งการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติจะสามารถเก็บข้อมูลได้สูงถึง 10 Tb/in² อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ คือ สัญญาณอ่านกลับ (Readback signal) จะมีความผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการประมวลผลสัญญาณในระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองมิติ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ให้ความสำคัญไปที่ 1) การศึกษาตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) ซึ่งเป็นกระบวนการหาลำดับที่เป็นไปได้มากที่สุดจากข้อมูลที่อ่านกลับคืนมาจากสื่อบันทึก และการประยุกต์การใช้งานตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ มากกว่าหนึ่งตัว ทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตัดสินใจมากขึ้น 2) การศึกษาหลักการของวงจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการทำงานแบบวนซ้ำโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข่าวสารอะพริออริ (a priori) ระหว่างตัวตรวจหาสัญลักษณ์และรหัสวนซ้ำแอลดีพีซี (Low density parity check, LDPC) ซึ่งในปัจจุบันรหัสแอลดีพีซีถือเป็นรหัสแก้ไขข้อผิดพลาดที่ดีที่สุด ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาสำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนอย่างรุนแรง เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ เป็นต้น

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาและพัฒนากิจการงานของตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) พร้อมทั้งตัวตรวจหาแบบหลายแทร็ก (Multi-track detector) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับเพื่อทำให้การตรวจหาข้อมูลมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 2) ศึกษาหลักการและพัฒนางจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับกับรหัสแอลดีพีซี สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
- 3) ศึกษาแนวทางในการพัฒนาวิธีแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
- 4) เพื่อผลิตบุคลากรทางด้านระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีความรู้ความสามารถเกี่ยวกับระบบการประมวลผลสัญญาณข้อมูล
- 5) เพื่อเป็นการบูรณาการการทำวิจัยสู่การเรียนการสอนในรายวิชา Signal Processing ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างแบบจำลองของสื่อบันทึก (Media) แบบแนวตั้งที่เป็นแบบ Discrete Voronoi Diagram ที่มีความไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) ชั้นระหว่างเกรน
2. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างแบบจำลองการเขียนข้อมูล (กระบวนการเขียน) ลงไปในสื่อบันทึกแบบแนวตั้ง
3. สร้างซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับการสร้างสัญญาณอ่านกลับ (กระบวนการอ่าน) ของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
4. ออกแบบและพัฒนาการทำงานของตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ (2D Symbol detector) พร้อมทั้งตัวตรวจหาแบบหลายแทร็ก (Multi-track detector) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับ
5. ออกแบบและพัฒนาวงจรปรับเท่าแบบเทอร์โบ (Turbo equalizer) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับกับรหัสแอลดีพีซี สำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
6. ออกแบบและพัฒนาวิธีแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างตัวตรวจจับแบบหลายแทร็กสำหรับระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ
7. นำเสนอวิธีการออกแบบและวิธีการลดผลกระทบจากการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์กับการแทรกสอดระหว่างแทร็กจากแบบจำลองของสื่อบันทึกแนวตั้งที่เป็นแบบ Discrete Voronoi Diagram ที่มีความไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic) ชั้นระหว่างเกรนด้วยตัวตรวจหาสัญลักษณ์แบบสองมิติ
8. ถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่พัฒนาได้ให้กับทางภาคอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ภาคการศึกษา ภาคอุตสาหกรรม และผู้สนใจทั่วไป

บทที่ 2

แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 2000 Roger Wood [1] ได้นำเสนอว่าอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กหรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของข้อมูลได้สูงสุดไม่เกิน 1 Tb/in^2 อันเนื่องมาจากสาเหตุของปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติก ปี ค.ศ. 2009 Y. Shiroishi [5] กล่าวว่าความจุสูงสุดของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Perpendicular magnetic recording) ในระดับห้องทดลองปัจจุบันสูงสุดอยู่ที่ 612 Gb/in^2 อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 2009 Roger Wood [4] ได้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการเพิ่มความจุของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่มีชื่อว่าการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ (Two-dimensional magnetic recording, TDMR) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) การเขียนแบบซ้อนทับ (Shingled writing) และ 2) การประมวลผลสัญญาณสองมิติ (Two-Dimensional Signal Processing) กระบวนการเขียนแบบซ้อนทับเป็นการบันทึกข้อมูลรูปแบบใหม่ที่ต่างจากวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน การบันทึกที่ใช้หัวเขียนที่มีขนาดใหญ่และมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง ทำการเขียนให้แต่ละแทรกมีลักษณะเหลื่อมกัน ผลที่ได้คือความกว้างของแต่ละแทรกจะลดลง จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ข้อเสียของการเขียนแบบซ้อนทับ คือ สัญญาณอ่านกลับ (Readback signal) จะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงซึ่งเกิดจากการรบกวนจากสองทิศทาง คือ แนวตามแทรก (Along track) และ แนวขวางแทรก (Cross track) ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการประมวลผลสัญญาณหนึ่งมิติ ที่ใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำเสนอกระบวนการประมวลผลสัญญาณแบบสองมิติ ซึ่งสามารถจัดการกับกระทบดังกล่าว อย่างไรก็ตามกระบวนการประมวลผลสัญญาณแบบสองมิติ นั้นมีความซับซ้อนกว่าหนึ่งมิติอย่างมาก ซึ่งโดยทางทฤษฎีแล้วการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลได้มากถึง 10 Tb/in^2 ในปี ค.ศ. 2009 A.R.Krishnan [6] ได้นำเสนอแบบจำลองชนิดต่างๆของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสองมิติไว้ 3 รูปแบบ คือ

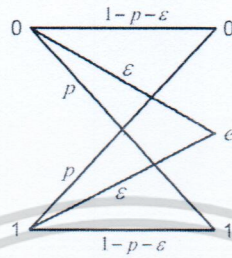
2.1 แบบจำลองการลบไบนารี (Binary erasure model)

ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นแบบจำลองที่ข้อมูลอินพุตถูกทำให้ผิดพลาดโดยขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่จะถูกลบ (erasure probability) และความน่าจะเป็นที่จะส่งผิดพลาด (Transmitted error probability, p) แม้ว่า

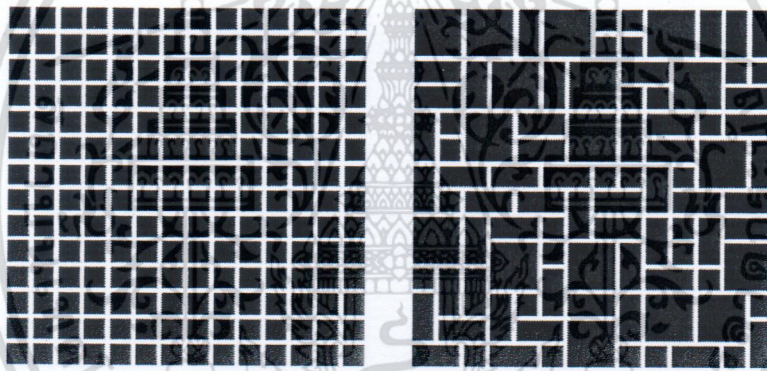
ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทูน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองนี้จะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับที่แท้จริงก็เหมาะสำหรับระบบการเข้ารหัสแบบรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (Error correction code)

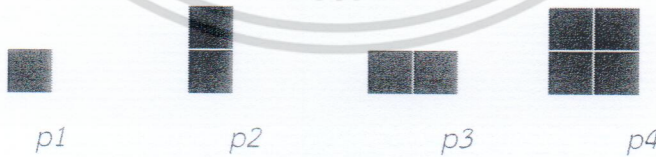


รูปที่ 2.1: แบบจำลองการลบไบนารี (Binary erasure model)



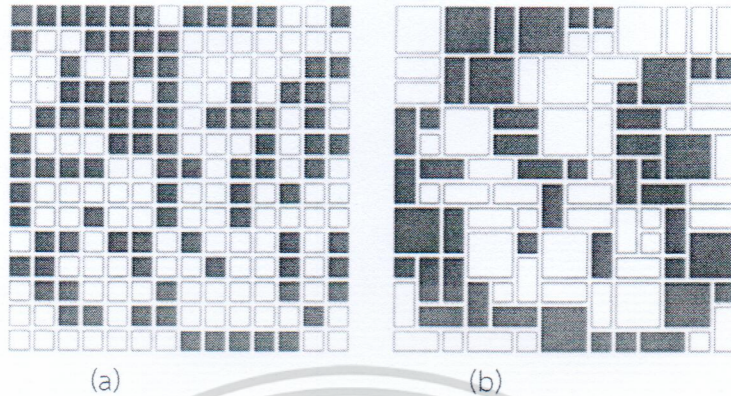
(a) (b)

รูปที่ 2.2: แบบจำลองกรณไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ



รูปที่ 2.3: รูปแบบกรณแม่เหล็กที่เป็นไปได้ 4 แบบ





รูปที่ 2.4: แบบจำลองการบันทึกของเกรนไม่ต่อเนื่อง (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ

รูปที่ 2.5: แผนภาพไวโรนอย (Voronoi)

2.2 แบบจำลองเกรนไม่ต่อเนื่อง (Discrete grain model)

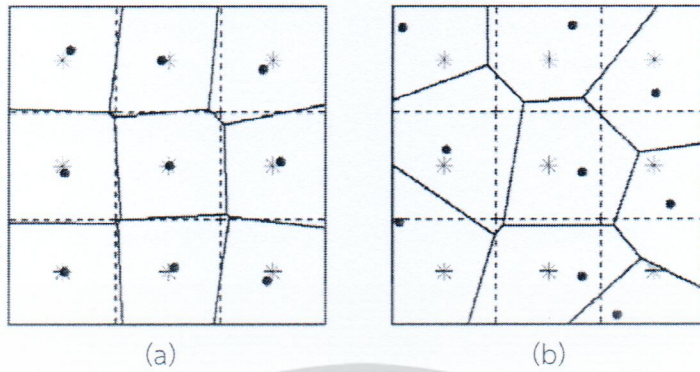
ในแบบจำลองนี้ลักษณะของสื่อบันทึกจะประกอบขึ้นจากเกรนแม่เหล็กที่ขนาดและรูปร่างถูกกำหนดเอาไว้ อย่างตายตัว กรณีของสื่อบันทึกอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2(a) แต่ละเกรนแม่เหล็กจะมีขนาดเท่ากับบิตข้อมูล จากนั้นกำหนดรูปแบบเกรนแม่เหล็กที่เป็นไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดเท่ากับ p_1 , p_2 , p_3 และ p_4 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะได้สื่อบันทึกแบบไม่อุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) สำหรับกระบวนการบันทึกจะทำโดยเขียนเรียงลำดับแต่ละบิตข้อมูล ผลคือเกรนแม่เหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของบิตข้อมูลจะถูกบันทึกซ้ำมากกว่าสองครั้งจากนั้นทำการอ่านค่ากลับโดยสมมติว่าหัวอ่านมีความละเอียดสูงและไม่เกิดการรบกวนจากบิตข้อมูลข้างเคียงผลจากการถูกเขียนทับแสดงดังรูปที่ 2.4 จากแบบจำลองนี้จะเห็นว่าข้อผิดพลาดจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบันทึก)

2.3 แบบจำลองโวโรนอย (Voronoi model)

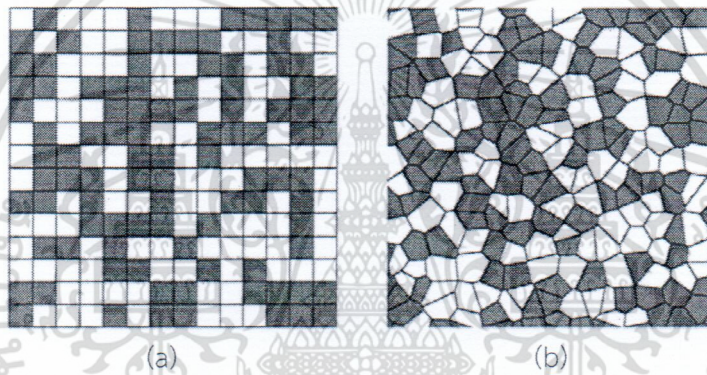
ซึ่งใช้หลักการสร้างแผนภาพโวโรนอยในการจำลองรูปร่างและขนาดของเกรนแม่เหล็ก แผนภาพโวโรนอยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ จุดไซท์ (Site points) และ เส้นเชื่อมโวโรนอย (Voronoi edge) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เส้นเชื่อมโวโรนอยประกอบขึ้นจากเซตของจุดที่อยู่กึ่งกลางระหว่างสองไซท์ใดๆ (Site points) สำหรับแบบจำลองโวโรนอยรูปร่างของเกรนแม่เหล็กจะมีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลองเริ่มจากกำหนดให้จุดไซท์เรียงตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งจะได้เกรนแม่เหล็กที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6(a) จากนั้นทำการเลื่อนตำแหน่งจุดไซท์อย่างสุ่มจากศูนย์กลางของบิตข้อมูลแล้วจึงคำนวณหาเส้นเชื่อมโวโรนอย โดยเชื่อมโวโรนอยจะแทนรอยต่อระหว่างแต่ละเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.6(b) ในแบบจำลองจะกำหนดให้การเลื่อนตำแหน่งจะต้องอยู่ภายในบิตข้อมูลนั้นๆ เท่านั้น ซึ่งระดับของการเลื่อนตำแหน่งของจุดไซท์จะส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของเกรนแม่เหล็ก รูปที่ 2.7 แสดงระดับการเลื่อนตำแหน่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 2.8 แสดงสภาพความเป็นแม่เหล็กเปรียบเทียบกันระหว่างสื่อบันทึกแบบอุดมคติและไม่อุดมคติที่ขนาด 14×14 โดยกำหนดให้สภาพความเป็นแม่เหล็ก +1 เป็นสีดำและสภาพความเป็นแม่เหล็ก -1 เป็นสีขาว สัญญาณอ่านกลับสามารถหาได้จากการประสาน (Convolution) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกและผลตอบสนองของหัวอ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



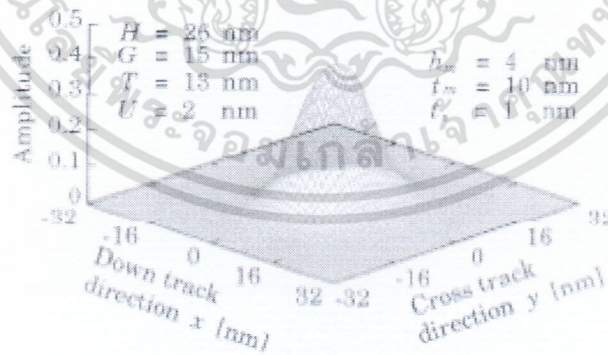
รูปที่ 2.6: แบบจำลองสื่อบันทึกโดยใช้แผนภาพโวโรนอย (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ



รูปที่ 2.7: ระดับความรุนแรงของการเลื่อนตำแหน่งจากศูนย์กลาง (a) ที่ค่าเฉลี่ยน้อยๆ (b) ที่ค่าเฉลี่ยมากๆ



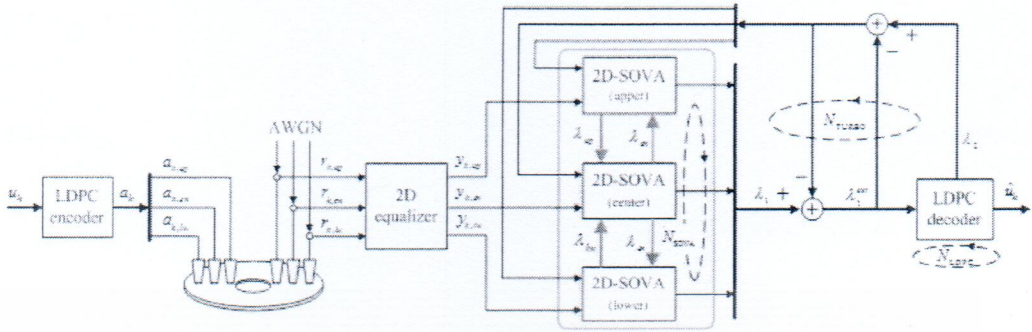
รูปที่ 2.8: แบบจำลองการบันทึกของไวเนอร์ (a) อุดมคติ (b) ไม่อุดมคติ



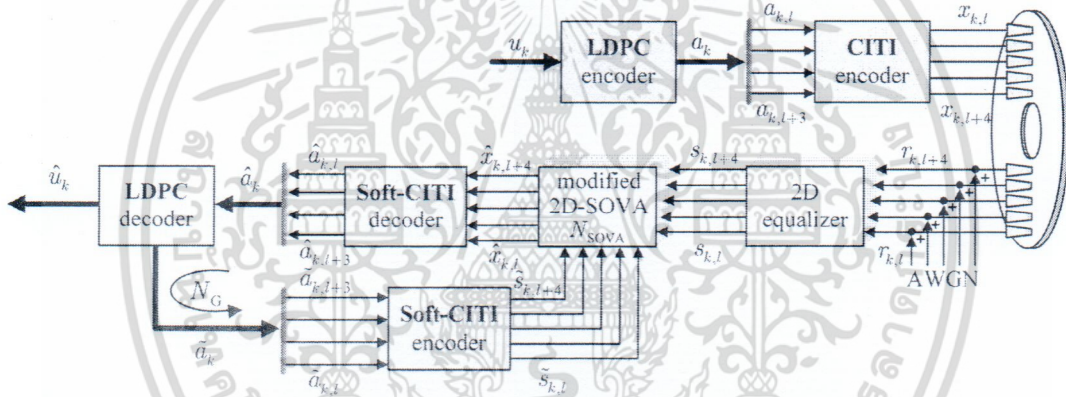
รูปที่ 2.9: ผลตอบสนองของหัวอ่าน

สำหรับกระบวนการประมวลผลสัญญาณสองมิติ ได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ขึ้นมา ในปี ค.ศ. 2007 Nabavi [7], [8] ได้นำเสนอการออกแบบวงจรปรับเท่าและทาร์เกตที่ใช้สำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากแทรกข้างเคียง (Inter track interference, ITI) ของสื่อบันทึกที่มีการจัดรูปแบบบิต นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการตรวจหาข้อมูลโดยใช้ตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่มีการปรับปรุง (Modified viterbi detector) ซึ่งเป็นการนำตัวตรวจหาวิเทอร์บีแบบทั่วไปมาปรับปรุงโดยการเพิ่มเส้นทางเมตริกสาขา (Parallel Branch metric) เพื่อช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนสองมิติ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่เพิ่มเส้นทางเมตริกสาขาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีแบบทั่วไป (Conventional viterbi detector) ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 Lin, M. M. Myint [9] ได้นำเสนอวิธีการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนรบกวนสองมิติ โดยทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วนเมื่อคำนวณค่าเมตริกสาขา (Branch metric) ข้อมูลที่บันทึกจะถูกแบ่งและเขียนแยกกัน 3 แทรก ในรอบการวนที่หนึ่งสัญญาณอ่านกลับจะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์พุทตีเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA) จากนั้นข่าวสาร (ข้อมูล) อะพริออริจากตัวตรวจหาจะถูกส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสแอลดีพีซี ซึ่งตัวถอดรหัสแอลดีพีซีจะทำการถอดรหัสและป้อนกลับค่าประมาณของบิตข้อมูล (Estimated bits) และข้อมูลอะพริออริกลับมายังตัวตรวจหาวิเทอร์บีทั้งสาม เพื่อทำการวนรอบที่สอง โดยที่ค่าประมาณของบิตข้อมูลจะถูกใช้เพื่อทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วน (Partial ITI) ซึ่งทำให้การคำนวณค่าเมตริกสาขา (Branch metric) มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการทำงานของตัวตรวจหาที่มีการป้อนกลับค่าประมาณของบิตข้อมูลเพื่อทำการประมาณค่าผลกระทบบางส่วนสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวตรวจหาวิเทอร์บีที่มีการปรับปรุง และดียิ่งขึ้นเมื่อจำนวนการวนรอบสูงขึ้น ปี ค.ศ. 2010 Chang [10] ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการตรวจหาแบบหลายแทรก (Multi track detector) แนวคิดพื้นฐานคือ ตัวตรวจหาจะทำงานโดยที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริระหว่างกัน กล่าวคือ ก่อนที่จะทำการตรวจหาข้อมูลแทรกใดๆ จะต้องทำการตรวจหาข้อมูลแทรกข้างเคียงทั้งสองข้างของแทรคนั้น ออกมาก่อนจาก นั้นจึงทำการตรวจหาข้อมูลแทรกที่ต้องการโดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลอะพริออริที่ได้จากแทรกข้างเคียงทั้งสอง เพื่อให้การตรวจหาที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาการตรวจหาแบบหลายแทรกซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลอะพริออริกันระหว่างตัวตรวจจับและทำงานร่วมกับรหัสแอลดีพีซีเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหาให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังรูปบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 เป็นต้น



รูปที่ 2.10: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรถวจจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลละฟิรือริ



รูปที่ 2.11: บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติพร้อมอัลกอริทึมของวงจรถวจจับแบบสองมิติที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลละฟิรือริพร้อมทั้งการเข้ารหัสของ outer code

แบบจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

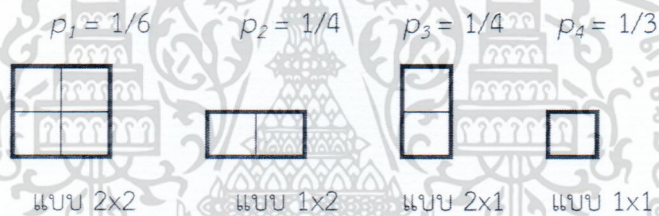
- 1) แบบจำลองสื่อบันทึกหรือช่องสัญญาณ (Media or Channel modeling)
- 2) วงจรปรับเท่าสองมิติ (2D Equalizer)
- 3) วงจรตรวจหาวิเทอร์บี (Viterbi Detection) และวงจรถวจหาซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm)

2.4 แบบจำลองของสื่อบันทึกแบบสี่เกรน (Four grain model)

แบบจำลองของสื่อบันทึกแบบสี่เกรนประกอบด้วยหัวข้อหลัก 3 ส่วน คือ 1) การจำลองสื่อบันทึก 2) กระบวนการบันทึกข้อมูล และ 3) กระบวนการอ่านข้อมูลกลับคืน

2.4.1 การจำลองสื่อบันทึก

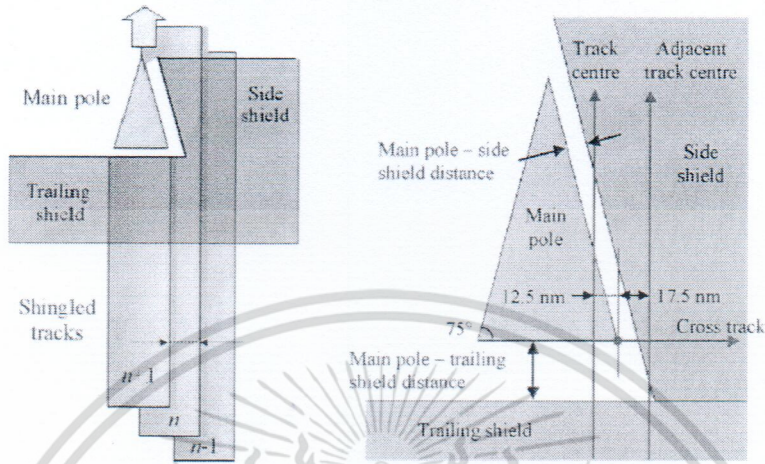
แบบจำลองของสื่อบันทึกแบบสี่เกรนจะกำหนดให้เกรนแม่เหล็กมีขนาดและรูปร่างที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 แบบ คือ 2×2 , 1×2 , 2×1 และ 1×1 โดยที่ตัวสื่อบันทึกจะประกอบขึ้นมาจากเกรนแม่เหล็กทั้ง 4 แบบดังกล่าว กำหนดให้แต่ละแบบมีค่าความน่าจะเป็นในการกระจายตัวเป็นแบบคงตัว (Uniform distribution) แทนด้วยสัญลักษณ์ p_1 , p_2 , p_3 และ p_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสื่อบันทึกแบบสี่เกรนเริ่มจากการสุ่มวางเกรนแม่เหล็กแบบ 2×2 , 1×2 , 2×1 และ 1×1 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก่อนที่จะนำเอาเกรนแต่ละแบบมาจัดเรียงกันดังรูปที่ 2.4



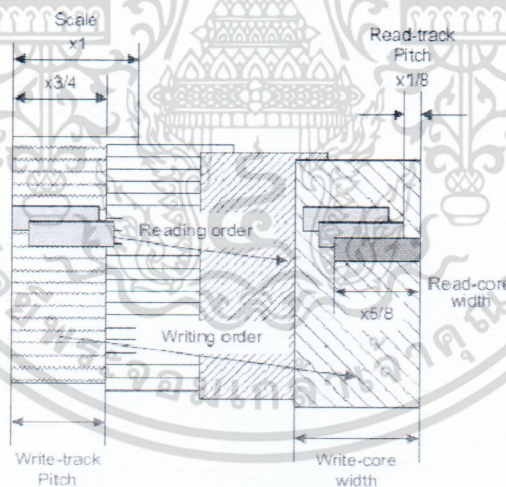
รูปที่ 2.12: แสดงขนาดเกรนที่เป็นไปได้ 4 แบบและความน่าจะเป็นที่จะพบในสื่อบันทึก

2.4.2 กระบวนการเขียนข้อมูล

โดยปกติสำหรับการบันทึกข้อมูลของสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กทั่วไปแต่ละแทรกจะถูกเขียนให้แยกห่างกันโดยมีระยะป้องกัน (Guard band) ซึ่งป้องกันการรบกวนกันระหว่างแทรกแต่ในสื่อบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ ความจุถูกเพิ่มโดยการยกเลิกระยะป้องกันและใช้รูปแบบการเขียนใหม่ที่เรียกว่า “การเขียนซ้อนทับ” (Shingled writing) ซึ่งแทรกข้อมูลจะถูกเขียนให้เลื่อมกันโดยหัวเขียนที่มีขนาดใหญ่และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงทำให้ได้จำนวนแทรกที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเขียนแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 อย่างไรก็ตามข้อเสียที่ตามมาก็คือ เนื่องจากหัวอ่านมีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของแทรกทำให้สัญญาณอ่านกลับจะถูกรบกวนอย่างรุนแรงจากแทรกข้างเคียง ทำให้จำเป็นต้องใช้การประมวลผลสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

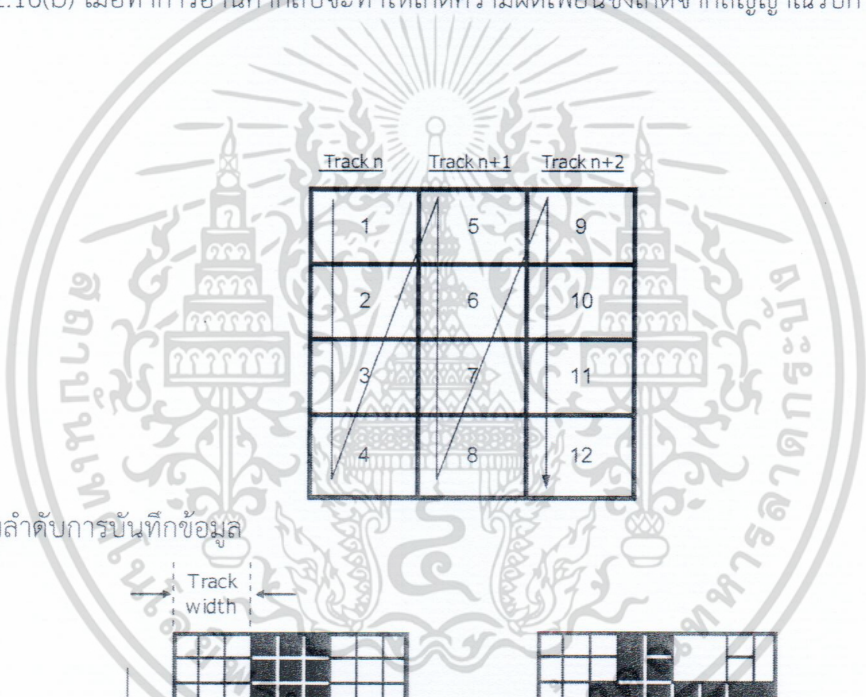


รูปที่ 2.13: ตัวอย่างของแบบจำลองวิธีการเขียนข้อมูลแบบซ้อนทับด้วยการใช้มุมของหัวเขียน (shingled magnetic recording)

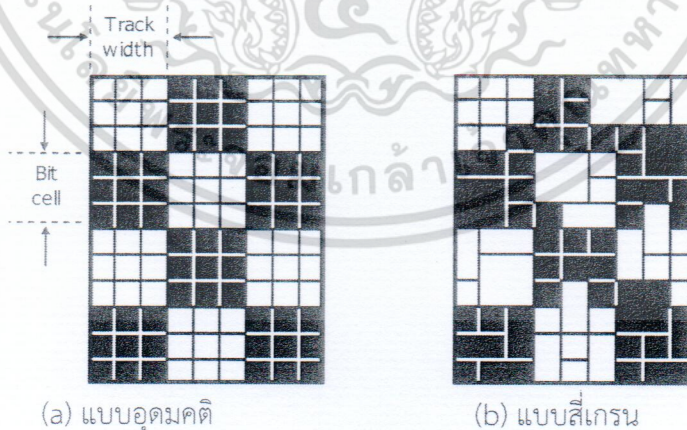


รูปที่ 2.14: ตัวอย่างของแทร็กที่ถูกเขียนทับ (write-track pitch), ลำดับในการอ่านและการเขียนข้อมูล (reading/writing order), และแทร็กข้อมูลสุดท้ายที่ไม่มีการเขียนทับ (write-core width) ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบเขียนซ้อนทับ

จากแบบจำลองของสื่อบันทึกแบบสี่เกรนเมื่อกำหนดให้ขนาดบิตข้อมูลที่จะทำการบันทึกเท่ากับ 3×3 เกรนต่อหนึ่งบิตข้อมูล และกำหนดให้หนึ่งเกรนมีขนาด 5.5 นาโนเมตร ดังนั้นจึงสามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density) ได้เท่ากับ 2.37 Tb/in^2 สำหรับในกระบวนการเขียนจะทำการบันทึกลงไปทีละบิตเซลล์เรียงต่อกันไป โดยบันทึกจากบนลงล่าง ซ้ายไปขวา แสดงดังรูปที่ 2.15 ในกรณีที่ทุกเกรนมีขนาดเท่ากันจะได้สภาพความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ของสื่อบันทึกในรูปที่ 2.16(a) ซึ่งสีขาวแทนสภาพความเป็นแม่เหล็กขั้วบวก สีดำแทนสภาพความเป็นแม่เหล็กขั้วลบ ในแบบจำลองแบบสี่เกรนซึ่งบางส่วนของเกรนแม่เหล็กยื่นออกมานอกบริเวณบิตเซลล์ทำให้เกรนนั้นถูกเขียนซ้ำมากกว่าหนึ่งครั้ง ซึ่งทำให้สภาพความเป็นแม่เหล็กของบิตเซลล์นั้นไม่สมบูรณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16(b) เมื่อทำการอ่านค่ากลับจะทำให้เกิดความผิดพลาดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนบนสื่อบันทึก (Media noise)



รูปที่ 2.15: แสดงลำดับการบันทึกข้อมูล



(a) แบบอุดมคติ

(b) แบบสี่เกรน

รูปที่ 2.16: การเปลี่ยนสภาพเชิงแม่เหล็กของสื่อบันทึก (a) อุดมคติ (b) สี่เกรน

2.4.3 กระบวนการอ่านค่ากลับ

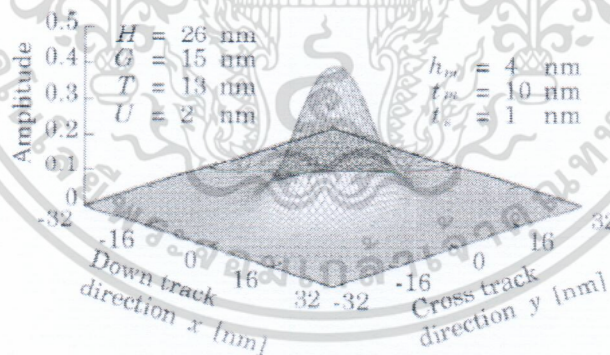
กระบวนการอ่านค่ากลับหาได้จากการประสานกันแบบสองมิติ (2D Convolution) ระหว่างสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกกับหัวอ่านตามสมการที่ (1)

$$v(x, y) = \iint m(\xi, \eta)h(x-\xi, y-\eta)d\xi d\eta + n(x, y), \quad (1)$$

เมื่อ $v(x, y)$ แทนแรงดันของสัญญาณอ่านกลับ $m(\xi, \eta)$ แทนสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก $h(x, y)$ แทนฟังก์ชันผลตอบสนอง (Sensitivity function) ของหัวอ่านและ $n(x, y)$ แทนสัญญาณรบกวน ฟังก์ชันผลตอบสนองของหัวอ่านสารเขียนได้โดยสมการ (2) และแสดงดังรูปที่ 2.17

$$h(x, y) = \alpha_0 \left\{ \tanh(\alpha_1 x + \alpha_2) - \tanh(\alpha_1 x - \alpha_2) \right\} \left\{ \tanh(\alpha_3 y + \alpha_4) - \tanh(\alpha_3 y - \alpha_4) \right\} \quad (2)$$

โดยที่ $\alpha_k = |w_{k0}H + w_{k1}G + w_{k2}T + w_{k3}U + w_{k4}h_t + w_{k5}t_m + w_{k6}t_s + w_{k7}|$, $k=0.1, \dots, 4$ W_k แทน Weight matrix, H แทนความกว้างของซีลด์ทั้งสองข้าง, G แทนช่องว่างระหว่างซีลด์, T, U ขนาดของโพลหลัก, h_t แทน Magnetic spacing, t_m แทนความหนาของ Recording layer, t_s แทนความหนาของ intermediate layer รูปที่ 17 แสดงกราฟสามมิติ Sensitivity function ของหัวอ่านที่ค่า $H = 26$ nm, $G = 15$ nm, $T = 13$ nm, $U = 2$ nm



รูปที่ 2.17: แสดง Sensitivity function ของหัวอ่าน

2.5 ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี (Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA)

วงจรตรวจหาวิเทอร์บีที่ใช้หลักการตรวจหาสัญลักษณ์แบบลำดับที่ควรจะเป็นสูงที่สุด (Maximum-likelihood sequence detector) ซึ่งทำการถอดข้อมูลโดยการเลือกลำดับข้อมูลที่มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด (เมตริกสาขาที่มีค่าน้อยที่สุด) แต่ไม่ได้รับประกันว่าการถอดข้อมูลบิตแต่ละบิตที่จะมีค่าถูกต้องที่สุด ในขณะที่ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บีใช้หลักการตรวจหาความน่าจะเป็นอะพริออริสูงสุด (Maximum a posteriori probability detector) โดยจะทำการตรวจหาเส้นทางเดินที่ดีที่สุดโดยคำนวณค่าเมตริกสาขาจากความน่าจะเป็นสูงสุดของการเปลี่ยนสถานะ โดยที่ค่าเมตริกสาขาของตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บี สามารถคำนวณได้ดังที่แสดงในสมการ (3)

$$\ln(p(y_k | a_k)) = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right] - \frac{1}{2\sigma^2} (y_k - \hat{r}(u, q))^2 + p(a_k = \bar{a}) \quad (3)$$

โดยที่ $\hat{r}(u, q)$ คือลำดับข้อมูลเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนสถานะ (u, q) ตามแผนภาพเทรลลิส σ คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนและเทอมสุดท้ายทางขวาคือข้อมูลความน่าจะเป็นอะพริออริของลำดับข้อมูลเอาต์พุต a_k จะเห็นว่าถ้ากำหนดให้ความน่าจะเป็นอะพริออริเท่ากับศูนย์จะทำให้สมการ (3) เท่ากับตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บีจะทำงานเหมือนกับตัวตรวจหาตรวจหาวิเทอร์บี กล่าวคือ วงจรตรวจหาตรวจหาวิเทอร์บีจะคำนวณค่าเมตริกสาขาโดยที่สมมติให้แต่ละลำดับข้อมูล a_k มีความน่าจะเป็นอะพริออริเท่าๆกัน อย่างไรก็ตามหากข้อมูล a_k มีโอกาสที่จะเกิดไม่เท่ากันจะทำให้ตัวตรวจหาตรวจหาวิเทอร์บีมีความถูกต้องน้อยลง นอกจากนี้ตัวตรวจหาแบบซอฟต์แวร์เอาพุตวิเทอร์บียังสามารถให้ค่าเอาต์พุตเป็นอัตราส่วนความน่าจะเป็น (Log Likelihood Ratio, LLR) โดยที่ LLR นิยามได้จากสมการที่ (4)

$$\lambda_p(a_k) = \ln \left[\frac{p(a_k = 1 | y)}{p(a_k = -1 | y)} \right] \quad (4)$$

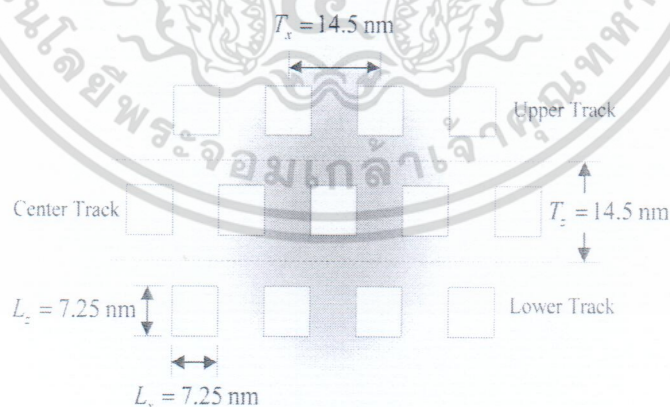
เพื่อบอกความน่าเชื่อถือของการตัดสินใจของบิตนั้นๆซึ่งสามารถนำไปใช้งานร่วมกับรหัสวนซ้ำแอลดีพีซี

บทที่ 3

วิวัฒนาการของการบันทึกเชิงแม่เหล็ก

3.1 การออกแบบระบบการบันทึกข้อมูล BPMR ด้วยหลักการการชักตัวอย่างข้อมูลเกินจริง

เพื่อหลีกเลี่ยงความต้องการการใช้หัวอ่านแบบแคบ (narrow track reader) ในการบันทึกข้อมูลแบบซ้อนทับที่มีค่าความหนาแน่นสูง เราจึงมีแนวคิดในการออกแบบวิธีการถอดรหัส (decoding schemes) สำหรับการอ่านข้อมูล 2 แทร็กในเวลาเดียวกันด้วยการใช้หัวอ่านแบบกว้างที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของแทร็กข้อมูล ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงจึงเป็นเรื่องยากที่จะเอาชนะได้ สำหรับวิธีการหลีกเลี่ยง ITI นั้น สภาวะความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกข้อมูลในระบบ 2 แทร็ก ควรจะเว้นระยะสลับฟันปลาหรือแบบเยื้อง (staggered pattern) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เทคนิคการถอดรหัสแบบสองมิติที่มีความเป็นไปได้สองแนว คือ 1) การถอดรหัสแบบวนซ้ำ (recursive decoding) โดยการชักตัวอย่างข้อมูลสัญญาณอ่านกลับด้วยอัตราการชักตัวอย่างที่สูงกว่าปกติ (oversampling) และ 2) การตรวจหาผลตอบสนองบางส่วนที่มีค่าความเป็นไปได้มากที่สุด (Partial Response Maximum Likelihood : PRML) เนื่องจากข้อมูล 2 แทร็กถูกอ่านขึ้นมาพร้อมกัน ดังนั้น อัตราการถ่ายโอนข้อมูลจึงสูงกว่าการอ่านข้อมูลปกติแบบแทร็กเดียว



รูปที่ 3.1: การวางบิตข้อมูลแบบเยื้อง (staggered pattern) ภายใต้ผลตอบสนองของหัวอ่าน (readhead sensitivity function) เพื่อหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่รุนแรงให้สามารถรองรับการใช้เทคนิคการชักตัวอย่างเกินจริง

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นแต่หัวอ่านก็ต้องสามารถอ่านข้อมูลที่มีความละเอียดสูงด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดย ลดความยาวของ shield gap ให้เล็กลง ลดระยะห่างระหว่างสื่อบันทึกแม่เหล็กกับหัวอ่านให้ใกล้ขึ้น [11] เป็นต้น

วิธีการเข้ารหัสข้อมูลก่อนที่จะทำการเขียนข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึกข้อมูลสามารถทำได้ดังนี้ [11] วิธีการแรกที่จะกู้ข้อมูลกลับคืนมาได้จากระบบ 2 แทร็ก ที่อ่านค่าได้ด้วยหัวอ่านแบบกว้างร่วมกับเทคนิค oversampling โดยรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงจุดของการซิกตัวอย่างข้อมูล (sampling points) สำหรับการอ่านค่าใน 2 แทร็ก จุดของการซิกตัวอย่างข้อมูลจะอยู่ในตำแหน่งตรงกลางด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้ เนื่องจากข้อมูลบิตทั้งสองจะถูกสร้างขึ้นภายในความยาวบิตของสภาวะแม่เหล็กที่บันทึกได้และอัตราการถ่ายโอนข้อมูลบิตจะเป็นสองเท่าของความยาวข้อมูลบิตในสภาวะแม่เหล็กใด ๆ สัญญาณอ่านกลับจากทั้งสองตัวอย่างบริเวณด้านหน้าและครึ่งหลังของสภาวะแม่เหล็ก M_n ในแต่ละแทร็กจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ความสัมพันธ์ได้นำเสนอด้วยสมการที่ (3.1) ที่จัดการกับข้อมูลผู้ใช้ A_n , สภาวะแม่เหล็ก M_n และสัญญาณอ่านกลับ R_n

$$\begin{aligned} M_n &= A_n \\ R_n &= M_n + M_{n-1} \\ A_n &= R_n - M_{n-1} \end{aligned} \tag{3.1}$$

ตารางที่ 3.1 การเข้ารหัสข้อมูลก่อนการบันทึกข้อมูลลงในสื่อบันทึก

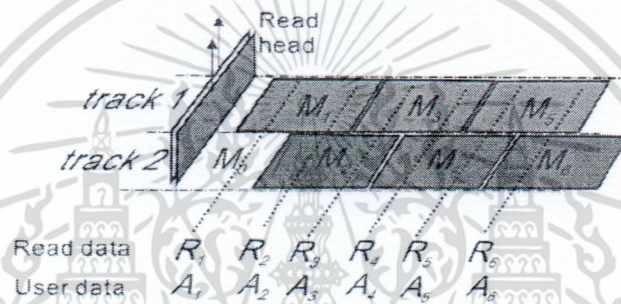
A_n	M_{n-1}	M_n	$R_n = M_{n-1} + M_n$
+1	-1	-1	-2
+1	+1	+1	+2
-1	-1	-1	0
-1	+1	+1	0

จากรูปที่ 3.2 เราจะเห็นว่าถ้าหากทราบสถานะความเป็นแม่เหล็กของบิตก่อนหน้า เช่น M_n ว่าเป็นการบันทึกข้อมูลบิต “1” หรือ “-1” ลงไปแล้ว เมื่อเราอ่านข้อมูลย้อนกลับพร้อมกับซิกตัวอย่างข้อมูลที่จุดที่เหลื่อมกันของแทร็กบนและแทร็กกลางเราจะได้ระดับของสัญญาณอ่านกลับทั้งหมด 3 กรณี 1) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “2” 2) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “-1” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “-2” และ 3) กรณีที่บิตก่อนหน้าและบิตปัจจุบันบันทึกบิต “บิตที่แตกต่างกัน” สัญญาณอ่านกลับที่ได้จะมีแอมพลิจูดเท่ากับ “0” ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถออกแบบเป็นการเข้ารหัสก่อน (pre-decoder) ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [11]

ผศ. ดร. ชานนท์ วรวิสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

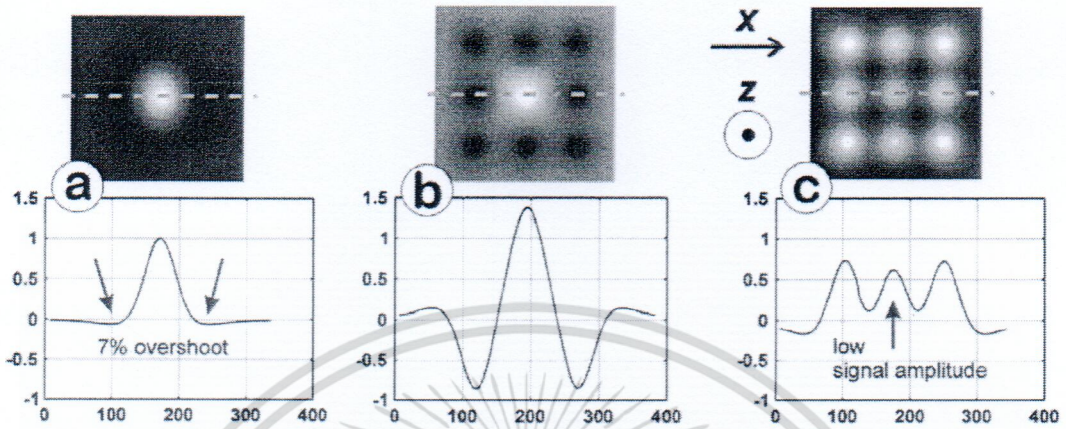
อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอผ่านช่องสัญญาณอุดมคติ ซึ่งยังไม่ได้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากความผันผวนของบิตข้อมูล เช่น ความผันผวนของขนาดของบิตข้อมูล (size fluctuation) ความผันผวนของตำแหน่งของบิตข้อมูล (position fluctuation) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งไปที่การศึกษาผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าว การออกแบบและพัฒนาช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูลข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพตเทิร์นเสมือนจริง การออกแบบการเข้ารหัสเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากสื่อบันทึกข้อมูล รวมถึงการพัฒนาตัวตรวจจับเพื่อช่องสัญญาณ 2T2H [12] ด้วย



รูปที่ 3.2: การเขียนข้อมูลลงในสื่อบันทึกข้อมูลที่มีการวางตัวแบบเฉียง [11]

3.2 การออกแบบการเข้ารหัสแบบสองมิติ (2D-Coding)

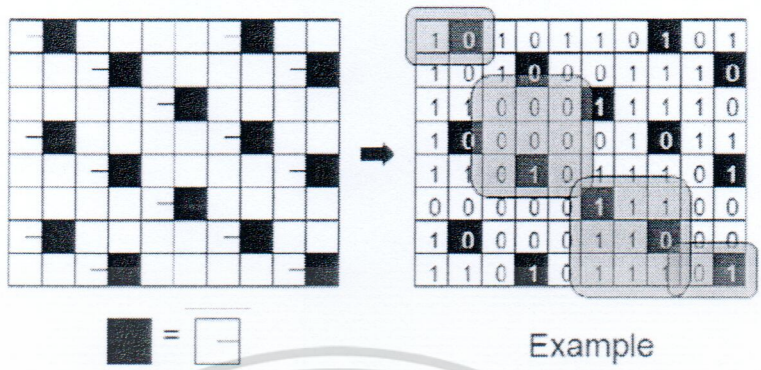
การเข้ารหัสแบบสองมิติที่มีการนำเสนอในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบจัดรูปแบบสื่อบันทึกให้เป็นบิต มีหลักการดังนี้ [13] เริ่มจากการศึกษารูปแบบของสัญญาณอ่านกลับ (readback) พบว่าเมื่อเราบันทึกข้อมูลแบบเกาะเดี่ยว (single dot) เราจะได้สัญญาณอ่านกลับดังรูปที่ 3.3a แต่ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแล้ว ต้องมีการบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI) ของบิตข้างเคียงหรือแม้แต่ผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทรก (ITI) ที่เกิดจากแทร็กข้างเคียงได้ ดังนั้น เราจึงพยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบการบันทึกข้อมูลที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองกรณี คือ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด นั่นคือ การบันทึกข้อมูลบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “0” ดังแสดงในรูปที่ 3.3b และ กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่เรากำลังต้องการหลีกเลี่ยง นั่นคือ การบันทึกบิต “1” ล้อมรอบด้วยบิต “1” ดังแสดงในรูปที่ 3.3c



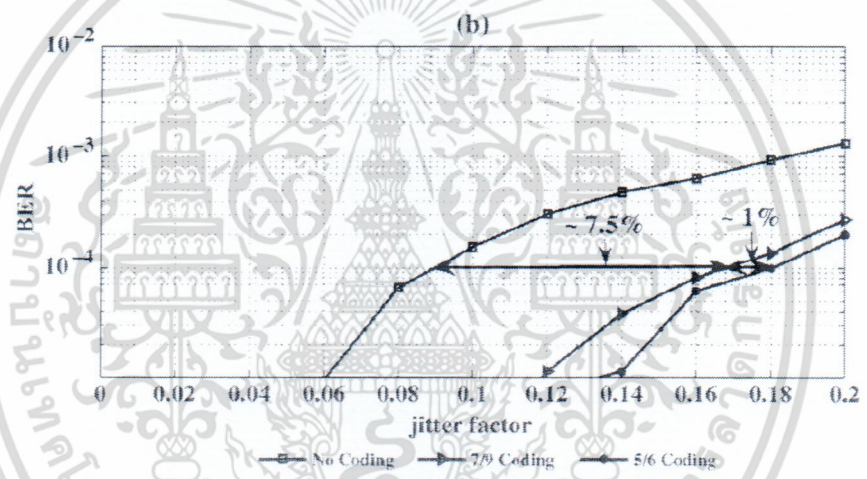
รูปที่ 3.3: รูปแบบของสัญญาณอ่านกลับกรณีที่เป็นเกาะเดี่ยว (a) กรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบน้อยสุด (b) และกรณีที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุด (c)

รูปที่ 3.4: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตราหัสเท่ากับ 5/6

หลักการการเข้ารหัสแบบสองมิติ คือ พยายามหลีกเลี่ยงรูปแบบที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดโดยการแทรกบิตส่วนเกินเข้าไปก่อนที่จะบันทึกข้อมูลลงไปยังสื่อบันทึก ดังรูปที่ 3.4 มีการบันทึกบิต “0” และบิต “1” ลงไปยังตำแหน่งที่แน่นอน โดยมีอัตราหัสเท่ากับ 5/6 ซึ่งช่วยทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นแล้วยังมีงานวิจัยที่พยายามเพิ่มค่าอัตราหัสให้สูงขึ้นโดยการเข้ารหัสด้วยรูปแบบใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีอัตราหัสเท่ากับ 7/9 [14] ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มอัตราหัสให้สูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสูงขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5: การเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสเท่ากับ 7/9



รูปที่ 3.6: แสดงสมรรถนะของระบบที่มีการเข้ารหัสแบบสองมิติที่อัตรารหัสต่างๆ [13]

แต่เนื่องจากการออกแบบรหัสทั้ง 2 แบบที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้ ถูกออกแบบเพื่อชองสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ without overshoot ซึ่งเทคโนโลยีนี้ปัจจุบันไม่มีใช้แล้ว ซึ่งได้เปลี่ยนเป็นชองสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot [15] ซึ่งการรบกวนกันของข้อมูลในบิตข้างเคียงก็จะแตกต่างกันออกไป ทำให้สัญญาณอ่านกลับมีรูปแบบที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 3.7 ดังนั้นจึงมีผู้นำเสนอวิธีการจัดรูปแบบบิตข้อมูลแบบหลายแทรก หรือ M-RBP (multi-track recorded-bit patterning) [16,17] ที่มีอัตรารหัสสูงสำหรับชองสัญญาณการบันทึกข้อมูลแบบ with overshoot โดยจะทำการเลื่อนลำดับข้อมูลในแต่ละแทรกเพื่อหารูปแบบของข้อมูลที่ดีสุดจากตารางค้นหา (look-up table) จากนั้นจึงบันทึกลำดับข้อมูลที่ดีสุดลงในสื่อบันทึก วิธีการนี้จะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก ISI และ ITI ได้มาก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเข้ารหัสอย่างไรก็ตาม วิธี M-RBP ยังคงมีความซับซ้อนสูง

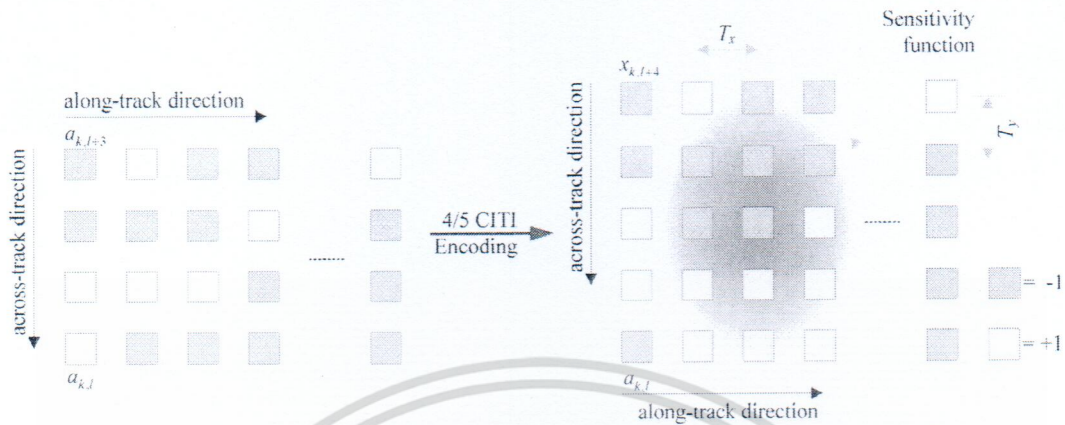
ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

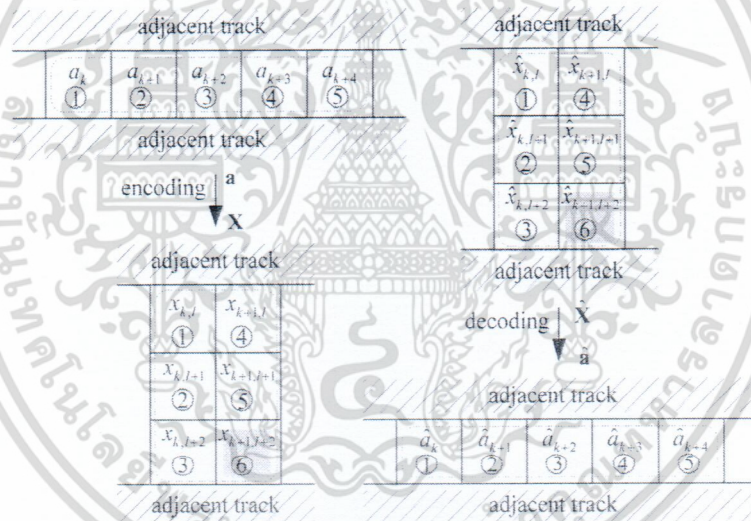
นอกจากนั้นแล้วเรายังได้ทำการออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลขชั้นแบบสองมิติที่มีความซับซ้อนต่ำ อัตราการรหัสข้อมูลสูง และมีประสิทธิภาพในการจัดการ/หลีกเลี่ยง/ลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างแทร็กสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็ก BPMPR ซึ่งแนวคิดการเข้ารหัสแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีหลักการดังนี้ ที่ได้ทำการเข้ารหัสจากข้อมูล 4 แทร็กให้ออกเป็นคำรหัส 5 บิต/ 5 แทร็ก ก่อนที่จะทำการบันทึกลงในสื่อบันทึกข้อมูล ซึ่งทำให้มั่นใจว่าจะไม่เกิดการแทรกสอดที่รุนแรงเกิดขึ้นระหว่างแทร็ก [18] และเรายังได้นำเสนอการเข้ารหัสด้วยอัตรารหัสเท่ากับ 5/6 [19,20] ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเริ่มจากลำดับข้อมูล a_k ที่ต้องการบันทึกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบสองมิติ คือเปลี่ยนจากข้อมูล 1 แทร็ก เป็นข้อมูล 3 แทร็ก เพื่อเลี่ยงบางรูปแบบเช่น $[+1 -1 +1]^T$ หรือ $[-1 +1 -1]^T$ ซึ่งรูปแบบของข้อมูลในแนวแทร็กสามารถรับประกันได้ว่าผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็กจะไม่เกิดขึ้น จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่ารูปแบบที่เป็นไปในที่จะนำมาสร้างเป็นรหัสข้อมูลมีทั้งหมด 32 รูปแบบ (patterns) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างเป็นตารางเพื่อการเข้ารหัสข้อมูลต่อไป



รูปที่ 3.7: สัญญาณอ่านกลับของ (a) บิตข้อมูลเดี่ยว (b) กรณีที่ดีที่สุด เมื่อบิตข้อมูล '1' ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล '1' และ (c) กรณีที่ด้อยสุด เมื่อบิตข้อมูล '1' ถูกล้อมรอบด้วยบิตข้อมูล '-1'

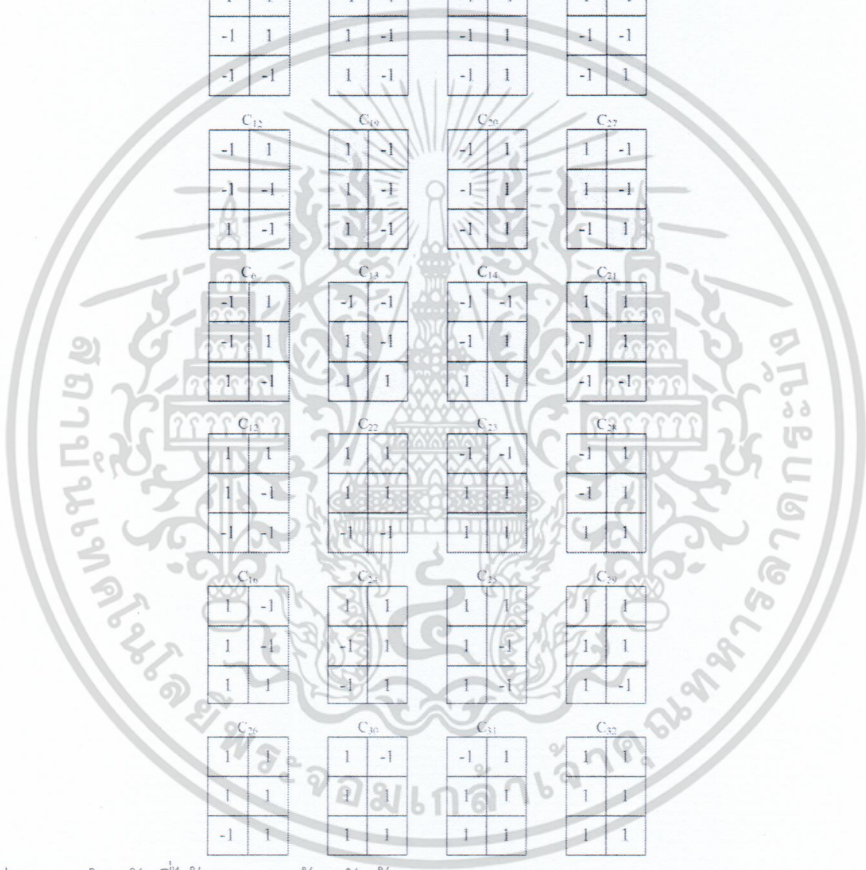


รูปที่ 3.8: วิธีการ M-RBP (a) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดในแทร็กกลางและ (b) ขั้นตอนการหาลำดับข้อมูลที่ดีที่สุดในแทร็กข้างเคียง



รูปที่ 3.9: วิธีการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสมอดดูเลขแบบสองมิติ

อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสทั้งสองวิธีไม่สามารถทำงานในระบบการวนซ้ำได้ เนื่องจากการเข้ารหัสแบบฮาร์ดมอดดูเลขอื่นก็ยังมีข้อด้อยตรงรอยต่อระหว่างชุดคำรหัสซึ่งยังก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการเข้ารหัสแบบซอฟต์แวร์พร้อมทั้งพัฒนาให้สามารถทำงานร่วมกับระบบการทำงานแบบวนซ้ำได้



C_1 -1 -1 -1 -1 -1 -1	C_2 -1 1 -1 -1 -1 -1	C_3 -1 -1 -1 -1 1 -1	C_4 -1 -1 -1 -1 -1 1
C_5 1 -1 -1 -1 -1 -1	C_6 1 1 -1 -1 -1 -1	C_7 -1 -1 -1 -1 1 1	C_8 1 -1 1 -1 -1 -1
C_9 1 1 -1 1 -1 -1	C_{10} -1 -1 1 -1 1 -1	C_{11} -1 -1 -1 1 -1 1	C_{12} 1 -1 -1 -1 -1 1
C_{13} -1 1 -1 -1 1 -1	C_{14} 1 -1 1 -1 1 -1	C_{15} -1 1 -1 1 -1 -1	C_{16} 1 -1 1 -1 -1 1
C_{17} -1 1 -1 1 1 -1	C_{18} -1 -1 1 -1 -1 1	C_{19} -1 1 -1 1 -1 -1	C_{20} 1 -1 1 -1 -1 1
C_{21} -1 1 -1 1 1 -1	C_{22} 1 -1 1 -1 -1 1	C_{23} -1 -1 -1 -1 1 -1	C_{24} 1 1 -1 1 -1 1
C_{25} 1 1 1 -1 -1 -1	C_{26} 1 1 -1 1 -1 -1	C_{27} 1 1 -1 -1 1 -1	C_{28} 1 1 1 1 1 -1
C_{29} 1 -1 1 -1 1 1	C_{30} 1 1 -1 1 -1 1	C_{31} -1 1 -1 1 1 1	C_{32} 1 1 1 1 1 1

รูปที่ 3.10: ตัวอย่างของคาร์รหัสที่ได้จากการเข้ารหัสด้วย 5/6 2D Modulation Encoder [19]

3.3 ความก้าวหน้าและวิวัฒนาการของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในปัจจุบันมีขีดจำกัดของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ 1 Tb/in² ซึ่งอ้างอิงจากปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราแมกเนติก (super-paramagnetic) และปัญหาสามอย่างในการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก [21]-[23] ในปี 2008 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกนำเสนอเพื่อผลักดันให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่



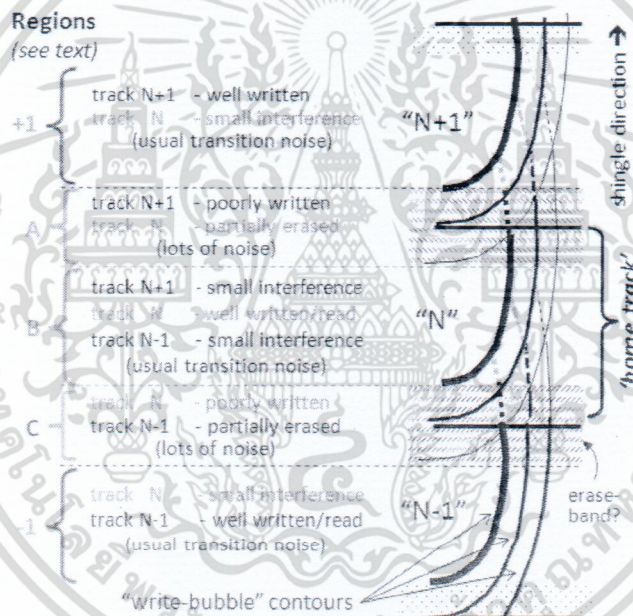
ให้ข้ามขีดจำกัดดังกล่าวโดยยังคงใช้ส่วนประกอบเดิมในการบันทึกแบบปัจจุบัน การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเกิดจากการรวมกันของเทคโนโลยีการเขียนซ้อนทับร่วมกับการอ่านกลับและตรวจจับสองมิติ โดยมีเทคนิคคือการให้ข้อมูลแต่ละแทร็กมีความสัมพันธ์กัน

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติได้ถูกถกเถียงว่าการใช้สนามหัวเขียนที่สูงและมีบริเวณกว้างจะสามารถลดเกรนแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลได้และยังทำให้การประมวลสัญญาณสองมิติมีความสามารถมากขึ้น ด้วยการให้เทคนิคอ่านตามแทร็กมาพร้อมกับการอ่านในแนวขวางแทร็ก ดังเดิม การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิตินำเสนอในเบื้องต้นว่าความจุของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก คือ “1 บิตต่อ 1 เกรน” แม้ว่าโครงสร้างเกรนจะเป็นแบบไม่แน่นอน และเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีบทความนำเสนอความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่เหมาะสมสูงสุด [4] บทความดังกล่าวได้จำลองการเขียนและการอ่านกลับรวมถึงการตรวจจับข้อมูลอย่างเหมาะสมที่สุด [24]-[26] ด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าที่เหมาะสมจะถูกลดลง 10%-30% อย่างไรก็ตามการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติก็ยังเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าจับตามอง ทั้งนี้เนื่องจากมีความเสี่ยงต่ำและความคุ้มค่าสูงกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ [5] ในหลายปีที่ผ่านมา เราได้เรียนรู้คุณลักษณะของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติมากมายเกี่ยวกับการเขียนแบบซ้อนทับและยังเข้าใจถึงกระบวนการอ่านแบบสองมิติและการปรับเทป/ตรวจจับที่จะสามารถนำจุดเด่นไปใช้ในการหักล้างจุดด้อยของความซับซ้อนของแผ่นบันทึกข้อมูลได้

การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติถูกเน้นไปที่การอ่านจะต้องสำเร็จที่กึ่งกลางแทร็กแต่ละแทร็กที่เขียนแบบซ้อนทับ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งหัวอ่านเดี่ยวและหลายหัวอ่าน แทร็กข้อมูลอาจจะอยู่ชิดกันมากขึ้น ดังนั้นการแทรกสอดระหว่างแทร็กจะสูง ภาครับจะต้องประกอบด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตหลายส่วน ดังนั้นข้อสรุปในปัจจุบันคือการเน้นงานวิจัยไปที่การวิเคราะห์ข้อมูลอ่านกลับและการกำจัดการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่สูงขึ้นอย่างมาก แนวคิดการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติเน้นไปที่การอ่านแทร็กกลางของแต่ละแทร็กที่เขียนซ้อนทับกันหลายๆ แทร็ก การกระทำดังกล่าวจะสำเร็จด้วยการอ่านหลาย ๆ ครั้งร่วมกับการใช้หน่วยความจำขนาดใหญ่ หรืออาจจะใช้หัวอ่านหลาย ๆ หัว ขนาดของแทร็กจะมีค่าเข้าใกล้ความกว้างของการอ่านมากขึ้น จึงอาจทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กที่มากขึ้นด้วย ในส่วนภาครับจำเป็นต้องใช้มัลติเพิลอินพุต-มัลติเพิลเอาต์พุตร่วมกับเป้าหมายทาร์เกต (Target) สองมิติและภาครับสองมิติตามลำดับ ภาครับอาจจะใช้ความรู้ทางสถิติของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลร่วมด้วย ในขณะที่แนวคิดถูกค้นคว้าลึกลงไป ข้อมูลเชิงลึกจะได้มาจากช่องสัญญาณเขียนอ่านเพื่อสนับสนุนการกู้ข้อมูลที่ผิดพลาด สิ่งที่น่าประหลาดใจคือผลสรุปในการวิจัยด้านนี้คืออุปกรณ์มีข้อดีที่เกิดจากการเฉลี่ยสัญญาณหลายๆ แทร็ก นอกจากนี้ยังลดสัญญาณรบกวน ซึ่งดีกว่าการอ่านจากการแทรกสอดระหว่างแทร็ก

3.4 การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบซ้อนทับ (shingled-write magnetic recording)

การเขียนซ้อนทับเป็นการบันทึกข้อมูลที่ไม่สมมาตร เนื่องจากข้อมูลฝั่งหนึ่งจะถูกเขียนทับในด้านข้าง ๆ ของแตรีก ในความเป็นจริงมีโครงสร้างและพฤติกรรมมากมายที่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อให้การเขียนอ่านมีความเหมาะสม รูปที่ 3.11 แสดงถึงบริเวณต่างๆ ของสัญญาณและสัญญาณรบกวน การเขียนข้อมูล 3 แตรีกะบุได้โดยการกำหนดแตรีกที่ $N-1$, N , $N+1$ ตามลำดับ โดยแตรีก N คือ แตรีกกึ่งกลางหรือ home track ที่เราต้องการอ่านข้อมูล เนื่องจากหัวเขียนมีขนาดกว้าง การเขียนจึงเกิดการซ้อนทับและการลบล้างเกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างแตรีกจะเป็นไปตามขนาดความเข้มของหัวเขียน จะสามารถแบ่งวิเคราะห์ได้เป็น 5 ส่วน แบ่งเป็นส่วนที่ $+1$, A, B, C, และ -1 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11: แผนภาพอธิบายสัญญาณ สัญญาณรบกวน และการแทรกสอดของบริเวณต่าง ๆ ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กซ้อนทับ [27]

บริเวณ B สัญญาณจากแตรีกกึ่งกลางจะดีที่สุด สัญญาณรบกวนจะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณขอบและมีสัญญาณรบกวนระหว่างแตรีกน้อย ความเข้มสัญญาณจะลดลงตามระยะ $N+1$ ถึง $N-1$ เนื่องจากผลของความโค้งของสนามหัวเขียน ในขณะเดียวกันก็จะทำให้การเลื่อนของสัญญาณรบกวนเด่นชัดมากขึ้น

บริเวณ A เป็นบริเวณที่สัญญาณของแตรีกกึ่งกลางเบาบาง เนื่องจากถูกเขียนทับบางส่วนจากสนามแม่เหล็กรั่วไหลของหัวเขียน ในทางปฏิบัติแม่เหล็กที่ยาวมีแนวโน้มที่จะเกิดสนามแม่เหล็กลบล้างทำให้ลด

ผศ. ดร. ขานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

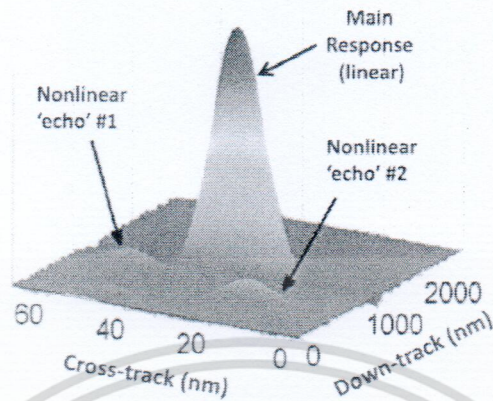
สัญญาณความยาวคลื่นสูง สัญญาณความยาวคลื่นสูงจะถูกกลับทิศทางในบริเวณแตรีก N เนื่องจากสนามรบกวนของหัวเขียนจากแตรีก N+1 ทำให้เกิดการเขียนทับ สัญญาณรบกวนในบริเวณนี้จึงสูงและมีส่วนจินตภาพเกิดขึ้นซึ่งก็คือสัญญาณรบกวนรอยต่อและสัญญาณรบกวนลบล้าง บริเวณ C เป็นบริเวณที่แยกไม่ออกกว่าเป็นบริเวณ A หรือไม่ ยกเว้นในเชิงการเลื่อนเช่นเดียวกับบริเวณ A

การเขียนข้อมูลจะเริ่มเขียนในแนวแตรีกที่ N-1 ก่อน ตามด้วยแตรีกที่ N และ N+1 ตามลำดับ เมื่อแต่ละแตรีกถูกเขียน แตรีกก่อนหน้าจะถูกเขียนทับและลบล้างออกไปบางส่วน เหลือเพียงบางส่วนของแตรีกที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้ รูปที่ 3.11 แสดงถึงโครงสร้างข้อมูล 3 แตรีกที่ถูกบันทึกลงแผ่นบันทึกข้อมูลและคอนทิวรัสสนามแม่เหล็กของหัวเขียน ในบริเวณ -1 แสดงถึงข้อมูลของแตรีก N-1 ที่ยังคงข้อมูลเดิมไว้อยู่ ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมานี้ถูกค้นพบในงานของ Salo [28] และ Galbraith [29]

3.5 การจำแนกระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ

การวิเคราะห์สัญญาณในปัจจุบันจะวิเคราะห์ในทิศทางตามแตรีกด้วยสัญญาณความถี่ที่เหมาะสมและอ่านกลับในย่านความถี่ดังกล่าวแบบหนึ่งมิติเพื่อดูผลตอบสนองของระบบ เนื่องจากในระบบการบันทึกแม่เหล็กจะถูกสมมติให้เป็นระบบเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงในระบบจริงมีความไม่เป็นเชิงเส้นแฝงอยู่ รูปแบบตัวเลขสุ่มเทียมจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบการบันทึกข้อมูล [30] ด้วยคุณสมบัติพิเศษของตัวเลขสุ่มเทียม การทำดีคอนโวลูชันสัญญาณอ่านกลับจะได้ผลตอบสนองของระบบที่มีระลอกคลื่นสั้นสะท้อน [31] เทคนิคดังกล่าวนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งระบบเชิงเส้นแล้วและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ถูกนำเสนอใน [32]

รูปที่ 3.12 แสดงถึงผลตอบสนองพัลส์สองมิติของชุดเลขสุ่มเทียม P ขนาด 7×73 เป็นสัญญาณกระตุ้นของระบบหลังจากบันทึกข้อมูล P ผ่านช่องสัญญาณแผ่นบันทึกข้อมูล อ่านกลับด้วยหัวอ่านกว้าง 30 nm และมีระยะห่างระหว่างแตรีก 38 nm เมื่อนำเมตริกซ์ของสัญญาณอ่านกลับมาหาค่าอัตราสัมพันธ์กับเมตริกซ์ P จะได้ผลตอบสนองพัลส์ดังรูปที่ 3.12 เกิดเป็นผลตอบสนองหลักที่จุดกำเนิดและคลื่นระลอกสองที่คลื่นระลอกแรกเกิดจาก Volterra kernel อันดับสองสอดคล้องกับผลคูณบิดข้างเคียง $P_{yx}P_{y(x+1)}$ ซึ่งคู่อันดับ Volterra kernel บ่งบอกถึงการกลับทิศทางของอินพุตไม่ส่งผลต่อการกลับทิศทางของเอาต์พุต ปรากฏการณ์นี้คือความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ [33],[34]



รูปที่ 3.12: ส่วนหนึ่งของผลตอบสนองพัลส์สองมิติที่ถูกคัดแยกออกมาแสดงให้เห็นความเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ชุดเลขสุ่มเทียมสองมิติขนาด 7×73 [27]

คลื่นระลอกที่สองในบริเวณขาเกิดจาก Volterra kernel อันดับสาม สอดคล้องกับผลคูณรูปตัว L ตามแนวขวางแตรีกและตามแตรีก $P_{(y-1)x} P_{yx} P_{y(x-1)}$ ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้เกิดจากสนามตีแมกนีไทเซชันของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีผลต่อการเขียนข้อมูล รูปที่ 3.13 แสดงภาพขยายของผลตอบสนองพัลส์ พบว่าเกิด undershoot ซึ่งเกิดจากประจุแม่เหล็กในชั้น soft underlayer ของแผ่นบันทึกข้อมูลและสนามตีกลับบริเวณขอบของหัวอ่าน



รูปที่ 3.13: ตัวอย่างของความไม่เป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองพัลส์ในมุมมองจากข้างบนและข้างล่าง [27]

3.6 การอ่านกลับสองมิติและการตรวจจับ

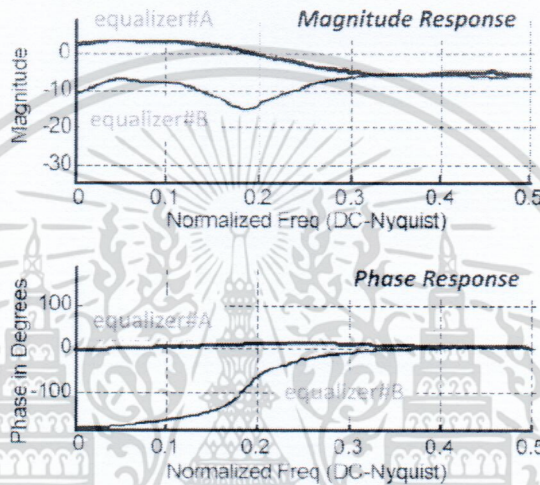
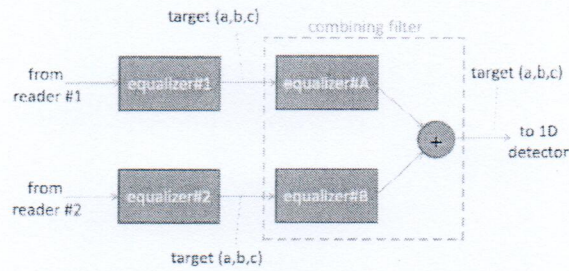
แนวคิดสำหรับการอ่านข้อมูล คือ อ่านให้สำเร็จในบริเวณกึ่งกลางของหลาย ๆ แตรีกข้อมูล อย่างไรก็ตาม การที่ตำแหน่งของหัวอ่านเลื่อนในแนวขวางแตรีกทำให้เกิดผลกระทบอย่างมาก โดยเฉพาะในการเขียนซ้อนทับ

เนื่องจากความไม่สมมาตรของแตรีกข้อมูลนั่นเอง เพื่อให้เข้าใจการเกิดผลกระทบดังกล่าวในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบสองมิติ จึงต้องศึกษาคุณลักษณะการอ่านเมื่อรัศมีทำการหรือมุมของหัวอ่าน ระยะห่างระหว่างแตรีก และการปรับตำแหน่งในทางขวางแตรีก ผลการทดลองดังกล่าวจะสามารถนำมาทำนายความจุของข้อมูลที่เป็นไปได้ได้

อนุกรมของรูปคลื่นถูกบันทึกจากการทดลองด้วยแผ่นบันทึกข้อมูลขนาด 2.5 นิ้ว บนเครื่อง spin-stand หัวเขียนและหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ทั่วไปได้ถูกนำมาใช้ในการทดลอง การบันทึกรูปคลื่นได้ทำ 5 ครั้งที่รัศมีของแผ่นบันทึกข้อมูลต่างกัน ความเร็วของแผ่นบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 5400 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างหัวบันทึกกับแผ่นบันทึกเท่ากับ 1 nm ช่องสัญญาณเขียนอ่านได้ใช้แบบเดียวกับฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์เชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยวิธีการ maximum transition run ในแต่ละรัศมีทำการ ความหนาแน่นเชิงเส้นและความหนาแน่นแตรีกจะใช้ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ที่ยังมีขอบ 9 nm จากตำแหน่งที่เรียกว่าระยะระหว่างแตรีกล้มเหลว ระยะดังกล่าวนี้ถูกกำหนดโดยเป็นค่าระยะห่างระหว่างแตรีกที่ทำให้มีอัตราการผิดพลาดของเซกเตอร์ 50% เมื่อเขียนด้วยกำลังสูงสุด

ในแต่ละการทดสอบจะมีแตรีกข้อมูล 6 แตรีก การเขียนทับจะอยู่ในทิศทางเขียนเข้าหารัศมีกึ่งกลางแผ่นบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตาม สำหรับตำแหน่งกึ่งกลางจะใช้การเขียนทับทั้งสองทิศทาง รูปคลื่นถูกบันทึกที่ทุก ๆ 5 nm ตลอดแนวขวางแตรีก รอบแตรีกกลาง และทุก ๆ 2.5 nm ของแตรีกกลาง ในแต่ละขั้นตอนจะถูกอ่านรูปคลื่นสองครั้งเพื่อแยกสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ออกมา แต่ละรูปคลื่นจะประกอบด้วย 95-160 ส่วน จากข้อมูล 4 kB เลือกตัวอย่างที่ความถี่ 2.5 พันล้านตัวอย่างต่อวินาที ในแต่ละรัศมีการบันทึก การเขียนจะทำ 5 ครั้ง แต่ละครั้งจะเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแตรีกลดลง 4 nm ดังนั้น จำนวนของข้อมูลทั้งหมดจะมี รัศมี 6 ค่า ระยะห่างระหว่างแตรีก 5 ค่า ตำแหน่งในการอ่านประมาณ 40 ค่า การบันทึกค่า 2 ครั้ง รวม 2400 ข้อมูล

กระบวนการรวมรูปคลื่นสองรูปเป็นหนึ่งรูปได้แสดงในรูปที่ 3.14 จุดมุ่งหมายของการรวมรูปคลื่นคือทำให้ได้อัตราการผิดพลาดที่น้อยลงกว่าการอ่านรูปคลื่นเดี่ยว ขั้นตอนแรกคือการปรับเท่าเพื่อหาผลตอบสนองบางส่วน โดยใช้กล่องตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 สำหรับการผสมรูปคลื่น ตัวกรอง finite impulse response (FIR) และการบวกแต่ละจุดได้ถูกใช้ ตัวกรอง FIR อินพุตสองค่าและเอาต์พุตหนึ่งค่าถูกบังคับให้ใช้เป้าหมายทาร์เกตตัวเดียวกัน



รูปที่ 3.14: ผลตอบสนองแมกนิจูดและเฟสของตัวกรองสำหรับผสมรูปคลื่น หัวอ่านที่ 1 อยู่ในบริเวณใกล้กึ่งกลาง แทร็กข้อมูล หัวอ่านที่ 2 ถูกปรับให้ยับยั้งไปทางแทร็กที่ N+1 เล็กน้อย อินพุตทั้งสองและเอาต์พุตมีเป้าหมายแบบเดียวกัน ดังนั้น ตัวปรับเท่า #1 และตัวปรับเท่า #2 มีผลตอบสนองหนึ่งหน่วย

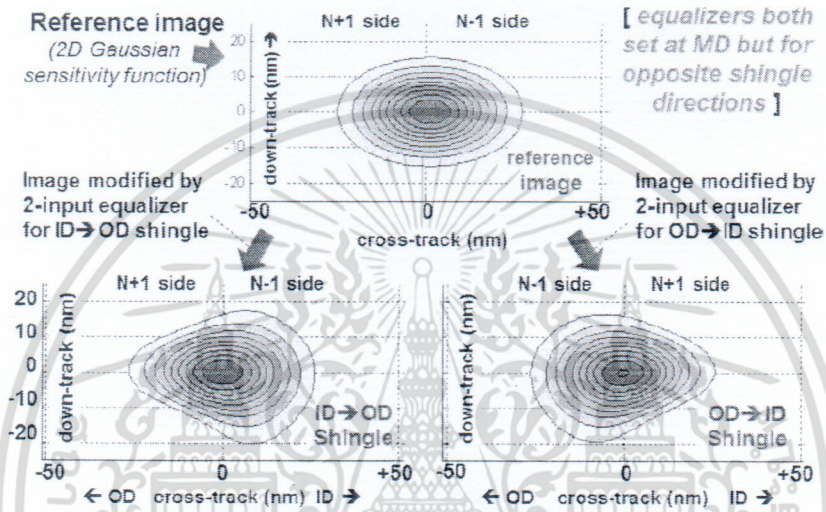
รูปที่ 3.14 แสดงถึงผลตอบสนองแมกนิจูดและผลตอบสนองเฟสของตัวกรอง FIR ทั้งสองตัว สัญญาณสองสัญญาณถูกปรับเท่าด้วยตัวปรับเท่าที่มีเป้าหมายเดียวกัน ที่ความถี่สูง ๆ ผลกระทบหลัก ๆ จากการรวมสัญญาณคือการรวมสองสัญญาณโดยตรงเฟสกันและมีแมกนิจูดเท่ากัน ดังนั้นสัญญาณจะถูกปรับเท่าด้วยสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์อย่างรุนแรง ที่ความถี่ต่ำ ๆ สัญญาณจากตัวปรับเท่า #2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเป็น 1/3 ของตัวปรับเท่า #1 ทำให้โดนหักล้าง ทำให้ลดการเกิดการแทรกสอดระหว่างแทร็กได้ จะเห็นว่านี่คือข้อดีของการรวมสัญญาณสองสัญญาณเมื่อรูปคลื่นหนึ่งอยู่ในตำแหน่ง 15%-30% ของระยะห่างระหว่างแทร็ก

วิธีการอื่นสำหรับการผสมรูปคลื่นคือการคิดถึงการรวมกันของการถ่วงน้ำหนักของรูปภาพสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เริ่มจากรูป Gaussian สองมิติเป็นรูปอ้างอิงค่าประมาณของฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน (read head sensitivity function) การคอนโวลูชันรูปอ้างอิงกับรูปฟังก์ชันตัวกรองสองมิติจะทำให้ได้ภาพใหม่ที่บ่งบอกถึงการที่ฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่านจะถูกปรับปรุงอย่างไรเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 3.15

ผศ. ดร. ขานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพอธิบายวิธีการผสมรูปคลื่นของตัวปรับเท่าโดยการปรับแต่งฟังก์ชันความอ่อนไหวของหัวอ่าน ฟังก์ชัน Gaussian สองมิติถูกใช้เป็นฟังก์ชันอ้างอิง สองภาพด้านล่างแสดงถึงฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับแต่งแล้วตามทิศทาง การเขียนซ้อนทับ จะเห็นว่าบริเวณแตรีก N+1 และ N-1 จะมีรูปร่างของฟังก์ชันแตกต่างกัน โดยมีปลายแหลมไปในทิศทางเดียวกับทิศทาง การเขียนซ้อนทับ

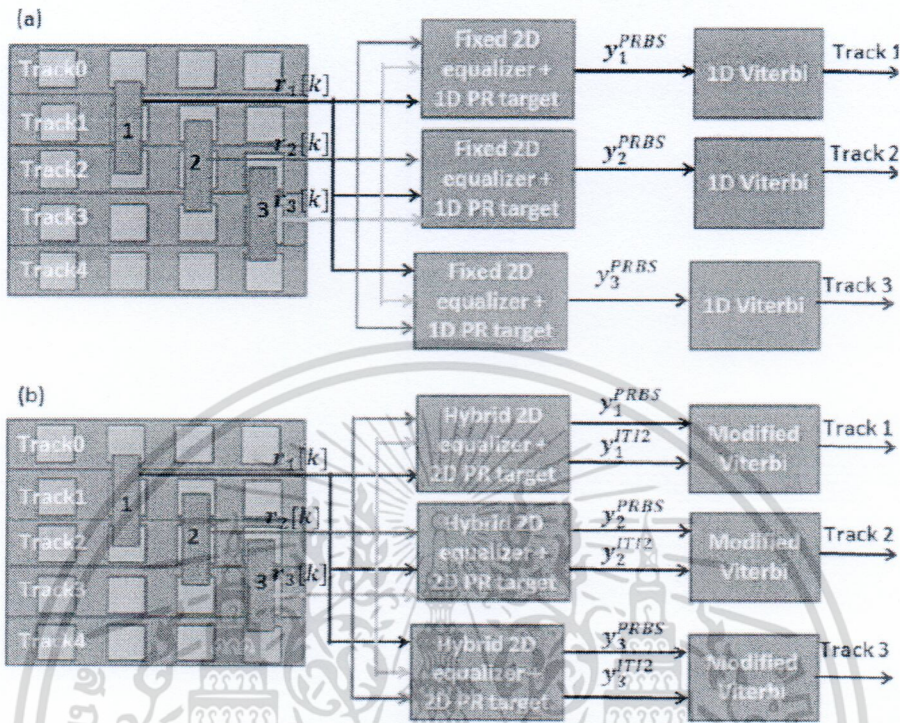


รูปที่ 3.15: แสดงถึงภาพของฟังก์ชันความอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงแล้ว ภาพแรก คือ ภาพฟังก์ชันอ่อนไหวที่ถูกปรับปรุงเมื่อข้อมูลถูกเขียนซ้อนทับในทิศทางรัศมีน้อยไปมาก และภาพทางขวา คือ จากตำแหน่งรัศมีมากไปน้อย เพื่อให้ได้การผสมสัญญาณที่ดี รูปคลื่นที่ได้จากตัวปรับเท่าถูกส่งไปยังซอฟต์แวร์เพื่อเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสด้วยรหัส LDPC [27]

3.7 การอ่านข้อมูลแบบหลายหัว

การอ่านข้อมูลแบบหลายหัวถูกนำเสนอขึ้นเพื่อให้ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กสามารถประมวลผลสัญญาณได้จากหลายแตรีกข้อมูลในเวลาเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จากการอ่านกลับของแต่ละหัวอ่านจะถูกนำมาประมวลผลด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น การประมวลผลในอ็ควอลไอเซอร์ 2 มิติ การประมวลผลของตัวตรวจจับแบบ 2 มิติตามที่ได้ อธิบายก่อนหน้านี้ หรือแม้แต่การออกแบบการเข้ารหัสข้อมูลแบบ 2 มิติด้วย

รูปที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งของหัวอ่านพร้อมทั้งการนำสัญญาณที่ได้ไปประมวลผล ในที่นี้เป็นการออกแบบตัวปรับเท่าหรืออ็ควอลไอเซอร์แบบ 2 มิติ [35]



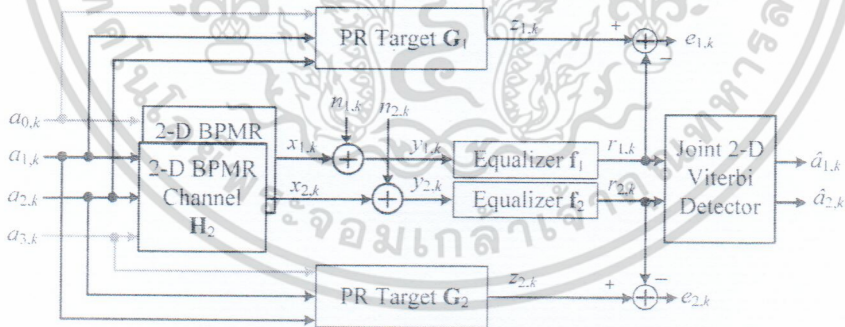
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งของหัวอ่านพร้อมทั้งการประมวลผลด้วยอีควอไลเซอร์และตัวตรวจจับแบบ 2 มิติ

บทที่ 4

ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมหลายแทร็ก

4.1 Full-fledged multi-track joint 2-D Viterbi detector

ในงานวิจัยนี้เราได้ออกแบบระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองแทร็กสองหัวอ่าน (two-track two-head, 2T2H) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในระบบนี้เราจะสมมติให้ลำดับข้อมูลอินพุตทั้ง 4 แทร็กที่อยู่ติดกันคือ $\{a_{l,k}\}$, $l \in \{0, 1, 2, 3\}$ ถูกส่งไปยังช่องสัญญาณการบันทึกข้อมูล โดยแทร็กข้อมูลที $l = 1, 2$ เป็นแทร็กที่เราต้องการอ่านข้อมูลด้วยการใช้หัวสองหัวอ่านอ่านข้อมูลขึ้นมาพร้อมกันนั่นคือลำดับข้อมูล $\{y_{1,k}\}$ และ $\{y_{2,k}\}$ จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกปรับเท่าด้วยวงจรปรับเท่าหนึ่งมิติ (1-D equalizer) ซึ่งได้ออกแบบมาให้ตรงกับทาร์เกตประเภท 2-D GPR บนพื้นฐานของหลักการค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (minimum mean square error, MMSE) จากนั้นสัญญาณที่ผ่านการปรับเท่าแล้วนั่นคือ $\{r_{1,k}\}$ และ $\{r_{2,k}\}$ จะถูกประมวลผลด้วยตัวตรวจจับเพื่อสร้างลำดับข้อมูลที่ได้นบันทึกกลับคืนมาในที่นี้คือลำดับข้อมูล $\{\hat{d}_{1,k}\}$ และ $\{\hat{d}_{2,k}\}$



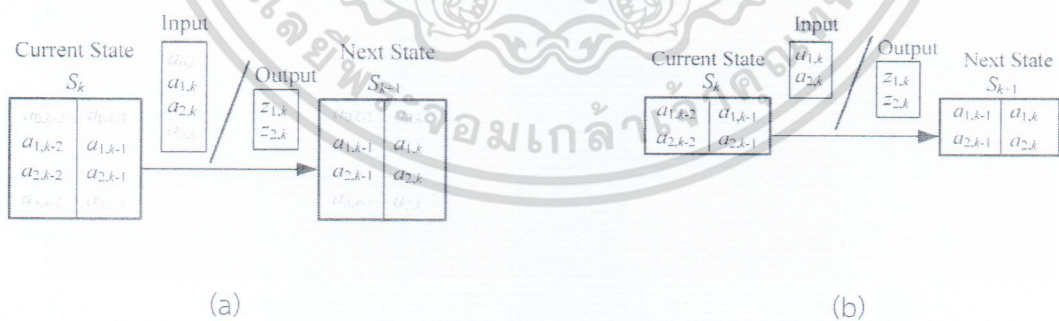
รูปที่ 4.1: แบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองแทร็กสองหัวอ่านร่วมกับตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมความซับซ้อนเต็ม (full-fledged multi-track joint 2-D Viterbi detector) [36]

เราเริ่มด้วยการวิเคราะห์ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมหลายแตรีกที่มีความซับซ้อนของตารางเทรลิสเต็ม (full-fledged trellis) ของระบบการบันทึกข้อมูลิตแบบเทิร์นมีเดียสองแตรีกสองหัวอ่านดังแสดงในรูปที่ 4.1 สำหรับตัวตรวจจับนี้สัญญาณอ่านกลับที่ถูกแทรกสอดด้วยแตรีกข้างเคียงจะถูกจัดการด้วยทาร์เกต GPR สองมิติขนาด 3×3 โดยแต่ละสัญญาณจะมีตัวปรับเท่าหนึ่ง f_l มิติสองตัวที่มีขนาดเท่ากับ $1 \times (2N + 1)$ ในที่นี้ $2N + 1$ คือจำนวนแท็บของตัวปรับเท่าหนึ่งมิติ และทาร์เกต GPR สองมิติ G_l ถูกออกแบบให้ทำงานอย่างเหมาะสมกับตัวปรับเท่าทั้งสองบนหลักการของ MMSE เวกเตอร์ f_l และเมทริกซ์ G_l ถูกกำหนดจากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับดังนี้

$$\mathbf{f}_l = [f_{l,-N} \cdots f_{l,0} \cdots f_{l,N}] \tag{4.1}$$

$$\mathbf{G}_l = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

สำหรับเส้นทางเทรลิสของแต่ละสัญลักษณ์อินพุตจากข้อมูลทั้ง 4 ลำดับข้อมูลของระบบ 2T2H และแต่ละสเตท (state) จะประกอบด้วยสองสัญลักษณ์ตามสมการที่ (4.2) [37] ดังนั้นเส้นทางเทรลิสทั้งหมดจะประกอบด้วย $2^{4 \times 2} = 256$ สเตท และในแต่ละสเตทจะมีเส้นทางเข้าและออกจำนวน $2^4 = 16$ เส้นทาง การเปลี่ยนสถานะสเตทระหว่างสเตทปัจจุบันไปยังสเตทถัดไปของเส้นทางเทรลิสถูกแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2: การเปลี่ยนสถานะสเตทระหว่างสเตทปัจจุบันไปยังสเตทถัดไปของเส้นทางเทรลิส (a) ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมความซับซ้อนเต็ม และ (b) ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมอย่างง่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอัลกอริทึมนี้ ค่าสาขาในแต่ละการเปลี่ยนแปลงของเสตทสามารถคำนวณได้จากสัญญาณที่ผ่านการปรับเท่าทั้งสองลำดับข้อมูลนั้นคือ $\{r_{1,k}\}$ และ $\{r_{2,k}\}$ ดังนี้

$$\beta(\xi_k) = -\sum_{l=1}^2 (r_{l,k} - z_l(\xi_k))^2, \quad (4.3)$$

ในที่นี้ ξ_k คือ การเปลี่ยนแปลงเสตทจากเสตทปัจจุบัน S_k ที่เวลา k^{th} และเสตทถัดไป S_{k+1} ที่เวลา $(k+1)^{\text{th}}$ และ $z_l(\xi_k)$ ค่าประจำสาขาที่ปราศจากสัญญาณรบกวนที่สามารถสร้างได้จากทาร์เกต GPR สองมิติ ของทั้งสองแทร็ก $l \in \{1, 2\}$ เช่น

$$z_l(\xi_k) = \sum_n \sum_m g_{n,m} a_{l-n,k-m}, \quad (4.4)$$

ในที่นี้ $a_{l,k}$ บิตอินพุตของเสตทปัจจุบันของการเปลี่ยนแปลงสถานะ ξ_k และ $g_{n,m}$'s ค่าสัมประสิทธิ์ของทาร์เกต GPR สองมิติในสมการที่ 4.2 ลำดับสุดท้ายตัวตรวจจับสร้างลำดับข้อมูลที่ได้ประมาณค่า $\{\hat{d}_{1,k}\}$ and $\{\hat{d}_{2,k}\}$ จากการประยุกต์อัลกอริทึมวิเทอร์บี

4.2 Simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with a low complexity trellis

เพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณที่ซับซ้อนตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีที่ง่ายขึ้นด้วยการลดความซับซ้อนของเทรลิสตอง ในที่นี้โครงสร้างเทรลิสตองสร้างจากแทร็กที่เรากำลังตรวจจับเท่านั้น เช่น $l = 1, 2$ และผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างแทร็ก $l = 0, 3$ ถูกลดลงด้วยการใช้ตัวปรับเท่าหนึ่งมิติกับทาร์เกต GPR สองมิติขนาด 2×3 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทาร์เกต GPR สองมิติถูกกำหนดใหม่ให้เป็น

$$\mathbf{G}_l = \begin{bmatrix} g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

เช่นเดียวกับเทคนิค MMSE ของ Chang กับ Cruz [38] ดังนั้นค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสามารถเขียนเป็นสมการในเทอมของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$E\{(e_{l,k})^2\} = \mathbf{f}_l^T \mathbf{R}_r \mathbf{f}_l - 2\mathbf{f}_l^T \mathbf{R}_{ra} \mathbf{g}_l + \mathbf{g}_l^T \mathbf{R}_a \mathbf{g}_l, \quad (4.6)$$

ในที่นี้ \mathbf{f}_l คือ เวกเตอร์หลักของทาร์เกตหนึ่งมิติจากสมการที่ 4.1, $\mathbf{g}_l = [g_{0,-1}, g_{0,0}, g_{0,1}, g_{1,-1}, g_{1,0}, g_{1,1}]^T$ คือ การจัดเรียงเวกเตอร์หลักจากเมทริกซ์ทาร์เกต \mathbf{G}_l ในสมการที่ 4.5, $\mathbf{R}_r = E\{\mathbf{r}\mathbf{r}^T\}$ คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ร่วมของสัญญาณอ่านกลับที่มีขนาดเท่ากับ $(2N+1) \times (2N+1)$, $\mathbf{R}_a = E\{\mathbf{a}\mathbf{a}^T\}$ คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ร่วมของข้อมูลที่ต้องการ



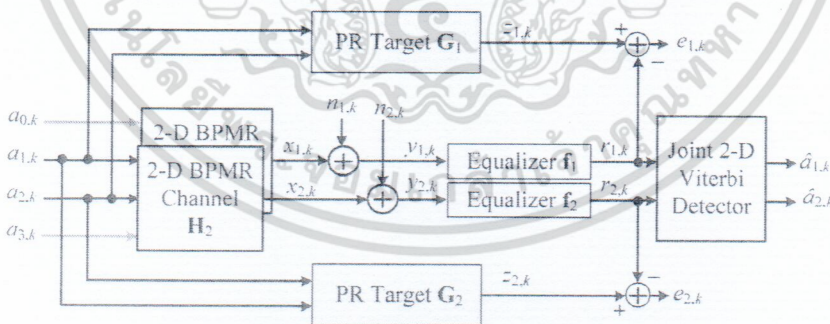
บันทึกที่มีขนาดเท่ากับ 6×6 , และ $R_{ra} = E\{ra^T\}$ คือ ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างลำดับข้อมูลอ่านกลับกับลำดับข้อมูลที่ต้องการบันทึกด้วยขนาดเท่ากับ $(2N+1) \times 6$ ในที่นี้ $r = [r_{l,k+N} \dots r_{l,k} \dots r_{l,k-N}]^T$ คือ เวกเตอร์หลักของสัญญาณอ่านกลับ $\{r_{l,k}\}$ ที่ซึ่ง $l \in \{1,2\}$ และ $a = [a_{1,k-1}, a_{2,k-1}, a_{1,k}, a_{2,k}, a_{1,k-1}, a_{2,k-1}]^T$ คือ เวกเตอร์หลักที่ถูกจัดเรียงใหม่ของลำดับข้อมูลที่ต้องการบันทึก $\{a_{1,k}\}$ และ $\{a_{2,k}\}$ ขั้นตอนสุดท้ายคือชุดข้อมูล λ , g_l , และ f_l ของในแต่ละสัญญาณอ่านกลับสามารถคำนวณได้จาก

$$\lambda = 1/A^T (R_a - R_{ra}^T R_r R_{ra})^{-1} A \tag{4.7}$$

$$g_l = \lambda (R_x - R_{ra}^T R_r R_{ra})^{-1} A \tag{4.8}$$

$$f_l = R_r^{-1} R_{ra} g_l \tag{4.9}$$

จากทาร์เกต GPR สองมิติตามสมการที่ 4.5 สัญลักษณ์ของค่าเทรลิสถูกออกแบบได้จากเพียง 2 บิต คือ $a_{1,k}$ และ $a_{2,k}$ ดังนั้นตารางเทรลิสจะประกอบด้วย $2^4 = 16$ เซต และ $2^2 = 4$ สาขาในแต่ละเซต การเปลี่ยนแปลงเสตระหว่างเสตทปัจจุบันไปยังเสตทถัดไปได้จากตารางเทรลิสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2(b) ในขั้นตอนการประมาณค่า ตัวตรวจจับใช้การคำนวณค่าเมตริกซ์สาขาเช่นเดียวกับสมการที่ 4.3 และ 4.4 ความซับซ้อนของตัวตรวจจับที่เรานำเสนอสามารถทำได้โดยใช้ทาร์เกต GPR สองมิติอย่างง่ายตามสมการที่ 4.5

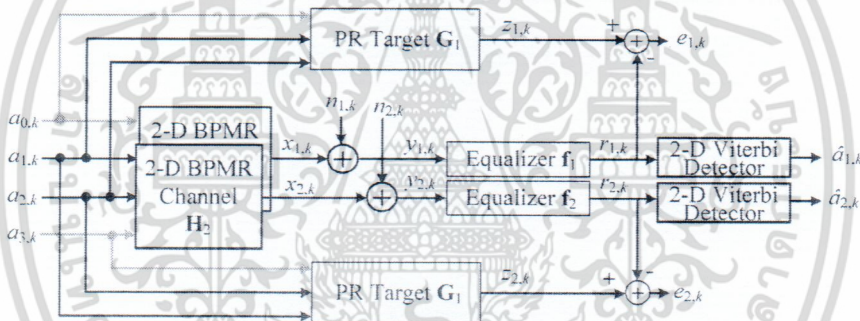


รูปที่ 4.3: แบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองแตรีกสองหัวอ่านร่วมกับตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติรวมอย่างง่าย (simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector) [37]

4.3 Multi-track detection technique using single-track 2-D Viterbi detectors

นอกจากตัวตรวจจับแบบที่ใช้ทาร์เกต GPR สองมิติอย่างง่ายตามที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้าแล้ว เรายังได้จำลองการทำงานของเทคนิคการตรวจจับหลายแทร็กที่ใช้กันทั่วไปด้วยการใช้ตัวตรวจจับสองมิติจำนวนสองตัวที่ซึ่งตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติ แยกกันทำงานด้วยการรับสัญญาณข้อมูลที่ผ่านมาประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 เพื่อจะได้เปรียบเทียบกับวิธีที่เรานำเสนอ

ในการทำงานของตัวตรวจจับแต่ละตัวนั้นเส้นทางเทรลลิสประกอบด้วย 64 เซตทและแต่ละเซตทมีทั้งหมด 16 สาขา ค่าประจำสาขาของแต่ละการเปลี่ยนสถานะของเซตทสามารถคำนวณได้จากลำดับข้อมูลผ่านการปรับเท่าของแต่ละลำดับข้อมูล ส่วนค่าเอาต์พุตของช่องสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวนนั้นคำนวณได้จากทาร์เกต GPR สองมิติ G ตามสมการที่ 4.2

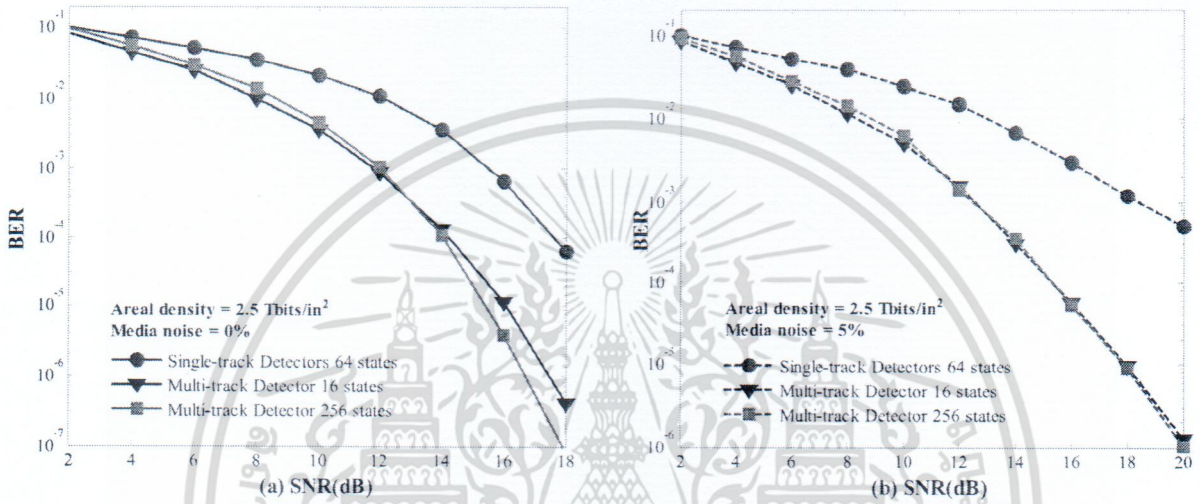


รูปที่ 4.4: แบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกข้อมูลแบบสองแทร็กสองหัวอ่านร่วมกับตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติสองแทร็ก (two single-track 2-D Viterbi detectors)

4.4 ผลการทดลองและการอธิบายผล

สำหรับการทดลองนี้เรามุ่งเน้นไปที่ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นมีเดียที่ความหนาเชิงพื้นที่เท่ากับ 2.5 Tbits/in² ที่มีช่วงห่างระหว่างแทร็ก (track pitch) และระหว่างบิต (bit period) เท่ากับ 16 นาโนเมตร ค่า PW_{50} ในแนวตามแทร็กและในแนวขวางแทร็กมีค่าเท่ากับ 19.4 นาโนเมตร และ 24.8 นาโนเมตรตามลำดับ และในแต่ละเซกเตอร์ของข้อมูลจะประกอบด้วย 4096 บิต อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) ถูกกำหนดจาก $20\log_{10}(V_p/\sigma_k)$ ในที่นี้ $V_p = 1$ คือค่าแอมพลิจูดสูงสุดของ

สัญญาณอ่านกลับ และ σ_k คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน AWGN จำนวนแท็บของตัวปรับเท่าแบบหนึ่งมิติกำหนดให้มีทั้งหมด 1×11 แท็บ สำหรับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก (media noise) เรากำหนดให้ผลตอบสนองพัลส์เก้าเขียนสองมิติถูกรบกวนด้วยความผันผวนเท่ากับ 5% ของช่วงห่างระหว่างแท็บ



รูปที่ 4.5: การเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละระบบเมื่อ (a) ปราศจากสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกและ (b) ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก 5% ที่ความหนาแน่นพื้นที่เท่ากับ 2.5 Tbits/in²

ตารางที่ 4.1: การเปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของแต่ละการประมาณค่าบิตข้อมูลสำหรับตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติในแต่ละประเภท

ชนิดของตัวตรวจจับสองมิติ	จำนวนของสเตท	จำนวนของสาขา	การคำนวณสาขา
Full Joint 2-D Detector	256	16	4096
Simplified Joint 2-D Detector	16	4	64
Multiple 2-D Detectors	$2 \times 64 = 128^*$	8	1024

*แต่ละตัวตรวจจับจะใช้ตารางเทรลิสจำนวน 64 สเตท

อันดับแรกนั้นเราเริ่มต้นด้วยการศึกษาสมรรถนะของอัตราผิดพลาด (bit error rate, BER) ของทุกๆ เทคนิคการตรวจจับในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นมีเดียทั้งที่ถูกและไม่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนสีบ้นทิก ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ในที่นี้ระบบทั้งสามคือ ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมความซับซ้อนเต็ม (full-fledged multi-track joint 2-D Viterbi detector) ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมอย่างง่าย (simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector) และตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติสองแทร็ก (two single-track 2-D Viterbi detectors) ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ “Multi-track Detector 256 states”, “Multi-track Detector 16 states”, และ “Single-track Detectors 64 states” ตามลำดับ

ผลการจำลองระบบสองหัวอ่านสองแทร็กข้อมูลทำให้เราเห็นว่าตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมอย่างง่ายที่เราแนะนำเสนอให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าระบบที่ใช้ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติสองแทร็ก ส่วนตัวตรวจจับที่เราได้นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าระบบที่ใช้ตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมความซับซ้อนเต็มประมาณ 1 dB ที่ $BER = 10^{-6}$ ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการลดความซับซ้อนของตารางเทรลิสต์ดังแสดงในรูปที่ 4.5(a) อย่างไรก็ตามสมรรถนะของตัวตรวจจับที่เราแนะนำเสนอให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวตรวจจับวิเทอร์บีสองมิติร่วมความซับซ้อนเต็มเป็นอย่างมาก เมื่อระบบต้องเผชิญกับสัญญาณรบกวนสีบ้นทิกดังแสดงในรูปที่ 4.5(b) เมื่อเราเปรียบเทียบความซับซ้อนของการคำนวณค่าสาขาของทั้ง 3 ระบบตามตารางที่ 4.1 เราจะเห็นว่าวิธีที่เราแนะนำเสนอนั้นมีเพียง 64 สาขาสำหรับการประมาณค่าบิตข้อมูลซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เราได้นำเสนอตัวตรวจจับวิเทอร์บิสองมิติรวมอย่างง่ายด้วยการลดความซับซ้อนของตารางเทรลิสสำหรับระบบการบันทึกแม่ข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นมีเดียแบบหลายหัวอ่านหลายแตรีกข้อมูล โดยวิธีที่เราได้นำเสนอใช้วิธีการถ้อยที่ถ้อยอาศัยกันระหว่างความซับซ้อนกับสมรรถนะที่ได้มาของระบบการ ซึ่งความซับซ้อนของระบบถูกลดลงด้วยการใช้วิธีการปรับเท่าแบบหลายแตรีกร่วมเพื่อให้พิจารณาได้โดยง่าย ในงานวิจัยนี้เราได้พิจารณาระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กบิตแพตเทิร์นแบบสองหัวอ่านสองแตรีกข้อมูลซึ่งตัวตรวจจับกู่บิตข้อมูลที่บันทึกจากสองแตรีกที่อยู่ติดกันขึ้นมาพร้อมกัน สมรรถนะของตัวตรวจจับที่ได้นำเสนอ เราได้เปรียบเทียบกับตัวตรวจจับสองมิติร่วมที่มีความซับซ้อนเต็ม เทคนิคที่ใช้ตัวตรวจจับสองมิติสองหัวอ่านข้อมูลทีละหนึ่งแตรีก ผลที่ได้จากการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับที่เราได้นำเสนอให้ประสิทธิภาพเหนือกว่าเทคนิคการใช้ตัวตรวจจับสองมิติสองหัวอ่านข้อมูลทีละหนึ่งแตรีกและให้สมรรถนะใกล้เคียงกับตัวตรวจจับสองมิติร่วมที่มีความซับซ้อนเต็ม โดยเฉพาะเมื่อระบบต้องเผชิญกับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกถึงแม้ว่าความซับซ้อนจะถูกลดลงอย่างมากก็ตาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wood R., “The Feasibility of Magnetic Recording at 1 Terabit per Square Inch,” IEEE Trans. Magn., vol. 36, no.1, pp. 36–42, Jan. 2000.
- [2] R. Rottmeyer et al., “Heat-assisted magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, pp. 2417–2421, Oct. 2006.
- [3] B.Terris, T.Thomson, and G.Hu., “Patterned media for future magnetic data storage,” Microsyst. Technology., vol. 13, no. 2, pp. 189–196, Nov. 2006
- [4] Wood R., Williams M., Kavcic A., and Miles J., “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] Y. Shiroishi et al., “Future Options for HDD Storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3816–3822, Oct. 2009
- [6] A. R. Krishnan, R. R. Redhakrishnan, 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
- [7] S. Navabi., “Signal processing for bit-patterned media channels with inter-track interference,” Ph.D thesis, University of California, San Diego, 2010.
- [8] S. Navabi, B.V.K.V Kumar, J. G. Zhu., “Modifying Viterbi Algorithm to Mitigate Intertrack Interference in Bit-Patterned Media,” IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2274–2276, Oct. 2007.

- [9] L. M. M. Lyint, P. Supnithi, P. Tantaswadi, "An Inter – Track Interference Mitigation Technique Using Partial ITI Estimate in Patterned Media Storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3691–3694, Oct. 2009.
- [10] Chang W. and Cruz J. R., "Inter-Track Interference Mitigation for Bit-Patterned Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp. 3899-3908, Nov. 2010.
- [11] H. Muraoka and S. J. Greaves, "Two-track reading with a wide-track reader for shingled track recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, Nov. 2015
- [12] W. Busyatras, C. Warisarn, L. M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording," *IEICE Trans. ELECTRON.*, vol. E98-C, no. 8, pp. 892–898, August. 2015.
- [13] J. P. J. Groenland and L. Abelman, "Two dimensional Coding for Probe Recording on Magnetic Patterned Media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2307–2309, Jun. 2007.
- [14] S. Nabavi, B. V. K. Vijaya Kumar, and J. A. Bain, "Mitigating the effects of track mis-registration in bit-patterned media," in *Proc. of International Conference on Communication (ICC) 2008.*, Beijing, China, pp.2061 – 2065.
- [15] P.W. Nutter, I. T. Ntokas, and B.K. Middleton, "An Investigation of the Effects of Media Characteristics on Read Channel Performance for Patterned Media Storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, pp. 4327-4334, Nov. 2005.
- [16] 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.*

- [17] 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.
- [18] 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*, ISI-Impact 2.30.
- [19] C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in *Electronic Trans. IEICE 2013*, Published, ISI-Impact 0.34.
- [20] P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" *IEEE Trans. Magn.*, ISI-Impact 1.83.
- [21] S. H. Charap, P. L. Lu, and Y. He, "Thermal stability of recorded information at high densities", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No.1, Jan 1997, pp.978-983.
- [22] R. Wood, "The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 1, Jan 2000, pp. 36-42.
- [23] H. J. Richter, "The transition from longitudinal to perpendicular recording," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 9, 2007, pp. R149-R177.
- [24] K. S. Chan et al., "TDMR platform simulations and experiments," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, Oct. 2009, pp. 3837-3843.
- [25] E. Hwang, R. Negi, B. V. K. V. Kumar, and R. Wood, "Investigation of two-dimensional magnetic recording (TDMR) with position and timing uncertainty at 4 Tb/in²," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 12, Dec. 2011, pp. 4775-4780.

- [26] M. Yamashita et al., "Read/write channel modeling and two-dimensional neural network equalization for two-dimensional magnetic recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, Oct. 2011, pp. 3558-3561.
- [27] R. Wood, R. Galbraith, and J. Coker, "2-D Magnetic Recording: Progress and Evolution," *IEEE Trans. Magn.* vol. 51, no.4, pp. 3100607, Apr. 2015.
- [28] M. Salo et al., "The structure of shingled magnetic recording tracks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 3, Mar. 2014, Art. ID 3100406.
- [29] R. Galbraith, W. Hanson, B. Lengsfeld, T. Oenning, J. Park, and M. Salo, "Noise characterization in high-areal density perpendicular and shingled magnetic recording," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 3, Mar. 2014, Art. ID 3200707.
- [30] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays," *IEEE Proceeding*, Vol. 64, No. 12, Dec. 1976, pp. 1715-1729.
- [31] D. Palmer, P. Ziperovich, R. Wood, and T. D. Howell, "Identification of nonlinear write effects using pseudorandom sequences," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23, No. 5, Sep. 1987, pp. 2377-2379.
- [32] R. Hermann, "Volterra modeling of digital magnetic saturation recording channels," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No.5, Sep. 1990, pp. 2125-2127.
- [33] J. Coker, Opportunities and Challenges in Two Dimensional Magnetic Recording (IEEE Magnetics Society Distinguished Lecture Series). Washington, DC, USA: Phillips Hall, 2014.

- [34] X. Tang, P. Fan, and J. Linder, "Multiple binary ZCZ sequence sets with good cross-correlation property based on complementary sequence sets," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 56, No. 8, Aug. 2010, pp. 4038-4045.
- [35] Yao Wang and B.V.K. Vijaya Kumar, "Improved Multitrack Detection with Hybrid 2D Equalizer and Modified Viterbi Detector" *IEEE Transactions on Magnetics*, DOI 10.1109/TMAG.2017.2708687.
- [36] B. Fan, H. Thapar, and P. Seigel, Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), London, UK, 425 (2015).
- [37] L. M. M. Myint and C. Warisarn, "Reduced complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detectors for bit-patterned media recording channel," *AIP Advances*, 7, 056502 (2017); doi: 10.1063/1.4973290.
- [38] W. Chang and J. Cruz, *IEEE Trans. Magn.* 46, 3899 (2010).

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] L. M. M. Myint and C. Warisarn, "Reduced complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detectors for bit-patterned media recording channel," AIP Advances 7, 056502 (2017); doi: 10.1063/1.4973290. (ISI Journal, Impact Factor 1.444)



ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทูน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reduced complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detectors for bit-patterned media recording channel

L. M. M. Myint and C. Warisarn

Citation: AIP Advances 7, 056502 (2017); doi: 10.1063/1.4973290

View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4973290>

View Table of Contents: <http://aip.scitation.org/toc/adv/7/5>

Published by the American Institute of Physics



ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทุน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Reduced complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detectors for bit-patterned media recording channel

L. M. M. Myint¹ and C. Warisarn²

¹*School of Information Technology, Shinawatra University, Pathumthani 12160, Thailand*

²*College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

(Presented 4 November 2016; received 22 September 2016; accepted 12 October 2016; published online 27 December 2016)

Two-dimensional (2-D) interference is one of the prominent challenges in ultra-high density recording system such as bit patterned media recording (BPMR). The multi-track joint 2-D detection technique with the help of the array-head reading can tackle this problem effectively by jointly processing the multiple readback signals from the adjacent tracks. Moreover, it can robustly alleviate the impairments due to track mis-registration (TMR) and media noise. However, the computational complexity of such detectors is normally too high and hard to implement in a reality, even for a few multiple tracks. Therefore, in this paper, we mainly focus on reducing the complexity of multi-track joint 2-D Viterbi detector without paying a large penalty in terms of the performance. We propose a simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with a manageable complexity level for the BPMR's multi-track multi-head (MTMH) system. In the proposed method, the complexity of detector's trellis is reduced with the help of the joint track equalization method which employs 1-D equalizers and 2-D generalized partial response (GPR) target. Moreover, we also examine the performance of a full-fledged multi-track joint 2-D detector and the conventional 2-D detection. The results show that the simplified detector can perform close to the full-fledge detector, especially when the system faces high media noise, with the significant low complexity. © 2016 Author(s). All article content, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4973290>]

I. INTRODUCTION

Bit patterned media recording (BPMR) is a next generation ultra-high magnetic recording technology for the areal density beyond 1 Tbit/in². However, the readback channel in BPMR system suffers with the severe two-dimensional (2-D) interference: inter-symbol interference (ISI) and inter-track interference (ITI) and a high complexity 2-D detection technique and a joint track equalization is proposed^{1,2} to tackle it. Moreover, considering the conceived multi-head array technology, researchers focus on a multi-track multi-head recording (MTMH) recording system because processing multiple signals can improve the performance of data recovery from the 2-D interference channel.³⁻⁵ Exploiting the MTMH technique, a multi-track joint 2-D detector has recently been proposed for the high density magnetic recording system.⁶⁻⁸ Unlike a single-track 2-D detector,^{1,2} it jointly processes the multiple readback signals from the different location from a track or different tracks; therefore, it can be robust in mitigating on the ITI effects from the signals as well as in tackling the system impairments due to track mis-registration (TMR) and media noise. Zhen et al. studied the performance of a full-fledged multi-track joint 2-D detection and showed that better performance can be achieved by processing more number of tracks together.⁷ On the other hand, the complexity of such detectors grows exponentially with the number of tracks.⁹ Therefore, it is necessary to reduce its complexity until practicable level without paying a large penalty in terms of the performance.⁹⁻¹¹

In this work, we develop a multi-track joint 2-D Viterbi detector using a full-fledge trellis designed with all tracks in system. To avoid using the high complexity detector, we propose a simplified



multi-track joint 2-D Viterbi detector making a trade-off between the trellis's complexity and the performance gain. The performances of multi-track joint 2-D detectors are compared with a conventional 2-D detection using two single-track detectors. Finally, we also compare the complexity of all detectors.

II. BPMR'S DISCRETE CHANNEL MODEL

In this work, we consider a discrete-time channel model of BPMR system with the media noise so that the readback signal from the k^{th} data bit on the l^{th} track, $y_{l,k}$ is expressed as

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

where $a_{l,k}$ are the recorded bits from the bit island k^{th} at the track l^{th} , $h_{n,m}$'s are the 2-D BPMR channel response coefficients, $w_{l,k}$ is additive white Gaussian noise (AWGN) with a standard deviation σ , l and n are the indices of track in the cross-track direction, and k and m are the indices of bit islands of the along-track direction. The channel response coefficients $h_{n,m}$ in (1) is generated by sampling a 2D Gaussian pulse response at the integer multiples of the bit period, T_x , and the track period, T_z , i.e.,

$$h_{n,m} = A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{mT_x + \Delta_x}{c(PW_x + \Delta_{PW_x})} \right)^2 + \left(\frac{nT_z + \Delta_z}{c(PW_z + \Delta_{PW_z})} \right)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

where A is the amplitude of the pulse response, PW_x and PW_z are the width of the pulse response at its half maximum (PW_{50}), Δ_x and Δ_z are the location fluctuations, and Δ_{PW_x} and Δ_{PW_z} are the PW_{50} fluctuations.¹² The location fluctuations Δ_x and Δ_z , and the size fluctuations Δ_{PW_x} and Δ_{PW_z} are generated by the Gaussian random variables with the standard deviation which is defined by the percentage of T_x and T_z . Assuming that each read-sensor receives the magnetic field from the three adjacent islands on the track under it as well as the islands on the two adjacent tracks, a discrete BPMR channel can be represented by a 3×3 matrix, i.e.,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{-1,-1} & h_{-1,0} & h_{-1,1} \\ h_{0,-1} & h_{0,0} & h_{0,1} \\ h_{1,-1} & h_{1,0} & h_{1,1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

III. TWO-TRACK TWO-HEAD RECORDING SYSTEM

In this work, we model a two-track two-head (2T2H) recording system of the BPMR as illustrated in Fig. 1. In the system, four data sequences $\{a_{l,k}\}$, $l \in \{0, 1, 2, 3\}$ are the recording data sequences on the adjacent tracks. Assuming that the desired tracks, $l = 1, 2$ are scanned by a head-array with two read-sensors concurrently, the readback signal sequences, $\{y_{1,k}\}$ and $\{y_{2,k}\}$ are generated using two channel matrixes in (3). At the read channel, those sequences are equalized by two separated 1-D equalizers which are optimally designed for the 2-D GPR targets based on that the minimum mean square error (MMSE) criteria.⁷ Finally the equalized signal sequences, $\{r_{1,k}\}$ and $\{r_{2,k}\}$ are processed by a detector to generate the estimated recorded bit sequences $\{\hat{d}_{1,k}\}$ and $\{\hat{d}_{2,k}\}$.

A. Multi-track joint 2-D Viterbi detector with a full-fledged trellis

Firstly we consider a multi-track joint 2-D Viterbi detector with a full-fledged trellis for BPMR's 2T2H system as depicted in Fig. 1(a). For this detector, two 2-D GPR targets with the size of 3×3 are considered in order to tackle all ITI effects in the readback signals. For each signal, a pair of 1-D equalizer \mathbf{f}_l with the size of $1 \times (2N + 1)$, where $2N + 1$ is the 1-D equalizer tap numbers, and 2-D target \mathbf{G}_l are optimally designed based on MMSE technique similar to the joint-track equalization method.⁸ The vector \mathbf{f}_l , and the matrix \mathbf{G}_l are defined as

$$\mathbf{f}_l = [f_{l,-N} \cdots f_{l,0} \cdots f_{l,N}], \quad (4)$$

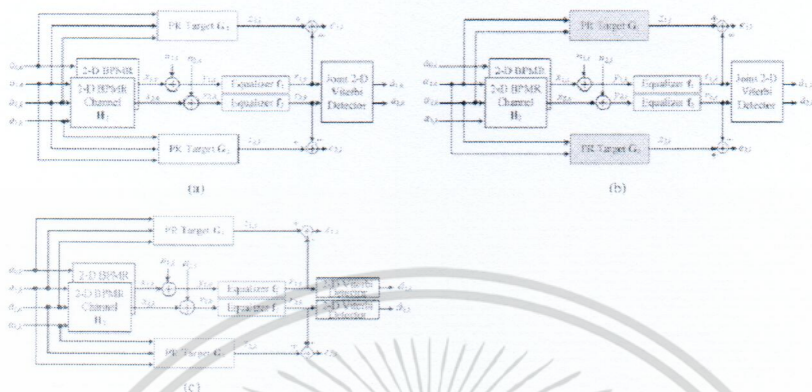


FIG. 1. BPMR's 2T2H recording system model with (a) full-fledged multi-track joint 2-D Viterbi detector, (b) simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector, and (c) 2-D detection technique using two single-track 2-D Viterbi detectors.

and

$$G_T = \begin{bmatrix} g_{-1,-1} & g_{-1,0} & g_{-1,1} \\ g_{0,-1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,-1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

For the trellis, each of its input symbols is modelled with the bits from all four tracks in the 2T2H system and each state is composed by two symbols based on (5).^{1,11} Hence, the trellis contains $2^{4 \times 2} = 256$ states and each state has $2^2 = 16$ incoming or outgoing branches at each state. A state transition between the current and next state of the resulted 2-D trellis is illustrated in Fig. 2(a). In the algorithm, the branch metric for each state transition can be computed with both of two equalized signal sequences, $\{r_{1,k}\}$ and $\{r_{2,k}\}$ together, i.e.:

$$\beta(\mathcal{E}_k) = - \sum_{l=1}^2 (r_{l,k} - z_l(\mathcal{E}_k))^2 \quad (6)$$

where \mathcal{E}_k represents the state transition between the current state S_k at time k^{th} and the next state S_{k+1} at time $(k+1)^{\text{th}}$, and $z_l(\mathcal{E}_k)$ is the noiseless possible channel output calculated by the 2-D GPR target of $l \in \{1, 2\}$ track for the transition \mathcal{E}_k , i.e.,

$$z_l(\mathcal{E}_k) = \sum_n \sum_m g_{n,m} a_{l,n,k} - m_l \quad (7)$$

where $a_{l,k}$ are the respective bits from the input symbol and current state of the transition \mathcal{E}_k and $g_{n,m}$'s are the 2-D GPR target's coefficients in (5). Finally, the detector generates the estimated recorded bit sequences $\{\hat{a}_{1,k}\}$ and $\{\hat{a}_{2,k}\}$ applying Viterbi algorithm over the trellis.

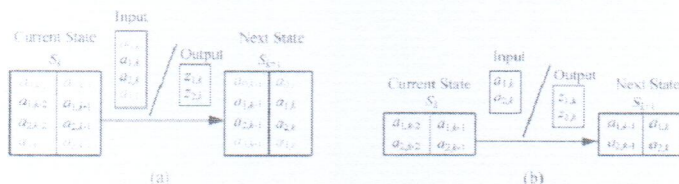


FIG. 2. State transition between the current and next state of the trellis for (a) full-fledged multi-track joint 2-D Viterbi detector, (b) simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector.

B. Simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with a low complexity trellis

To avoid using the full-fledged detector, we propose a simplified version of multi-track joint 2-D Viterbi detector reducing complexity trellis. In here, the trellis is constructed with the bits from only the detecting tracks i.e., $l = 1, 2$ and ITI effects from outer tracks, i.e., $l = 0, 3$ are alleviated using a 1-D equalizer which and a 2-D GPR target with the size of 2×3 as shown in Fig. 1(b), which different from the previous system that considers the a 2-D GPR target with the size of 3×3 . Therefore, the target G_l is redefined as

$$G_l = \begin{bmatrix} g_{0,1} & g_{0,0} & g_{0,1} \\ g_{1,1} & g_{1,0} & g_{1,1} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Similar to Chang and Cruz's MMSE technique,² the means squared error is now expressed in terms of vectors as,

$$E \{ (e_{l,k})^2 \} = \mathbf{f}_l^T \mathbf{R}_l \mathbf{f}_l - 2\mathbf{f}_l^T \mathbf{R}_{ra} \mathbf{g}_l + \mathbf{g}_l^T \mathbf{R}_a \mathbf{g}_l, \tag{9}$$

where \mathbf{f}_l is the column vector of the 1-D equalizer from (4), $\mathbf{g}_l = [g_{0,1}, g_{0,0}, g_{0,1}, g_{1,1}, g_{1,0}, g_{1,1}]^T$ is a column vector rearranged from the target matrix G_l in (8), $\mathbf{R}_r = E\{\mathbf{r}\mathbf{r}^T\}$ is an auto-correlation matrix of the readback signal sequence with the size of $(2N+1) \times (2N+1)$, $\mathbf{R}_a = E\{\mathbf{a}\mathbf{a}^T\}$ is an auto-correlation of recording data sequences with the size of 6×6 , and $\mathbf{R}_{ra} = E\{\mathbf{r}\mathbf{a}^T\}$ is the cross-correlation of the readback signal sequence and the input data sequences with the size of $(2N+1) \times 6$. In here, $\mathbf{r} = [r_{l,k+N}, \dots, r_{l,k}, \dots, r_{l,k-N}]^T$ is a column vector of the readback signal sequence $\{r_{l,k}\}$ where $l \in \{1,2\}$ and $\mathbf{a} = [a_{1,k-1}, a_{2,k-1}, a_{1,k}, a_{2,k}, a_{1,k+1}, a_{2,k+1}]^T$ is an column vector of the recording data formed by arranging two recording data sequences $\{a_{1,k}\}$ and $\{a_{2,k}\}$. Finally the set of \mathbf{f}_l , \mathbf{g}_l , and \mathbf{f}_l for each readback signals is computed using the following equations,

$$\mathbf{f}_l = \mathbf{1} / \mathbf{A}^T (\mathbf{R}_a - \mathbf{R}_{ra}^T \mathbf{R}_r \mathbf{R}_{ra})^{-1} \mathbf{A}, \tag{10}$$

$$\mathbf{g}_l = \mathbf{1} (\mathbf{R}_r - \mathbf{R}_{ra}^T \mathbf{R}_r \mathbf{R}_{ra})^{-1} \mathbf{A}, \tag{11}$$

$$\mathbf{f}_l = \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{R}_{ra} \mathbf{g}_l. \tag{12}$$

Based on the 2-D GPR target from (8), the input symbol of the trellis is designed with just two bits $a_{1,k}$ and $a_{2,k}$; therefore, the trellis contains $2^4 = 16$ states and $2^2 = 4$ branches at each state. A state transition between the current state and the next state of the resulted 2-D trellis is illustrated in Fig. 2(b). In estimating process, the detector uses the same branch metric computation as (6) and (7) for each transition along the trellis. In the proposed detector, the complexity in trellis is notably reduced using the simplified 2-D GPR target from (8).

C. Multi-track detection technique using single-track 2-D Viterbi detectors

Furthermore, we also model a conventional multi track detection technique using two single-track 2-D detectors as a conventional method. Here, we use two single-track 2-D Viterbi detectors^{1,2} and each detector processes each of the equalized readback signal separately as shown in Fig. 1(c). For each detector, the trellis has 64 states and 16 branches at each state and the branch metric for each state transition is computed with each of two equalized signal sequences and the noiseless possible channel output calculated by the 2-D GPR target G_l in (5).

IV. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

For the simulation model, we consider a BPMR system with the areal density of 2.5 Tbits/in² by means of setting the bit period and the track pitch to 16 nm. The along- and cross-track PW_{50} are considered with 19.4 nm and 24.8 nm respectively and each data sequences sector contains 4096 bits. The signal-to-noise ratio (SNR) is defined as $20 \log_{10} (V_p / \sigma_k)$, where $V_p = 1$ is the peak value of the readback signal and σ_k is the standard deviation of AWGN. The number of taps in the 1-D equalizer

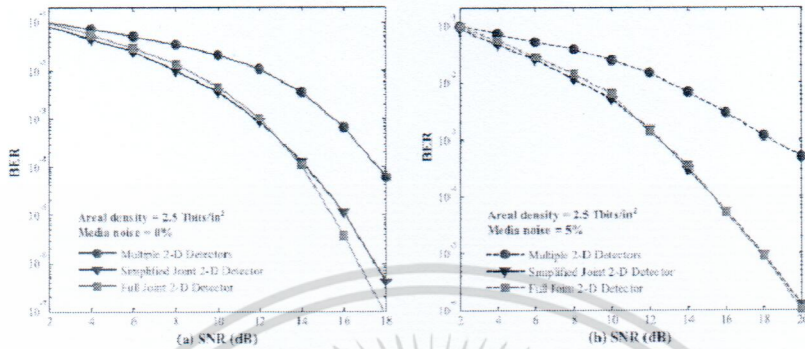


FIG. 3. Performance comparison of various detectors (a) without and (b) with 5% media noise at areal density of 2.5 Tb/in².

TABLE I. Comparison of the computational complexity for each data bit estimation for the 2-D Viterbi detectors.

Type of 2-D Detectors	Number of States	Number of Branches	Branch Computation
Full Joint 2-D Detector	256	16	4096
Simplified Joint 2-D Detector	16	4	64
Multiple 2-D Detectors	2x64 = 128 ^a	8	1024

^aEach of 2 detectors uses the trellis with 64 states.

is 1x11. For the BPMR system with media noise, we generate the 2-D Gaussian pulse response with the standard deviation of all fluctuations by 5% of the bit period T_b .

Firstly, we study the bit error rate (BER) performance of all detection techniques for the BPMR system with and without the media noise. The simulation result is shown in Fig. 3, where the multi-track joint 2-D Viterbi detector with full-fledged trellis, the proposed simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with low complexity trellis, and the technique using two single-track 2-D detectors are labeled as "Full Joint 2-D Detector", "Simplified Joint 2-D Detector", and "Multiple 2-D Detectors," respectively. The simulation result shows that the proposed simplified multi-track joint 2-D detectors significantly outperform over the technique using two single-track detectors for the BPMR's 2H2T recording system. The performance of proposed detector is inferior about 1 dB at BER = 10⁻⁶ to that of detector with full-fledged trellis because of reducing the trellis's complexity as shown in Fig. 3(a). However, the performances of two multi-track joint 2-D detectors are almost similar when the system is suffered by the media noise as shown in Fig. 3(b).

Finally, we compared the complexity of all 2-D Viterbi detectors considered in this work in terms of the number of branch metric computations for one data bit estimation, as illustrated in Table. I. The proposed simplified multi-track joint 2-D detector needs only 64 branch for each bit computations which is significantly less than others.

V. CONCLUSION

In this work, we propose a simplified multi-track joint 2-D Viterbi detector with a low complexity trellis for BPMR's multi-track multi-head system. In the proposed method, a fundamental trade-off between the performance and its complexity is done by using a joint-track equalization method. For simplicity, we considered a BPMR's two-track two-head system where the detector recovers the recorded bits of two adjacent tracks simultaneously. The performance of proposed detector is compared with those of the multi-track joint 2-D detector with full-fledged trellis and the technique using two single-track 2-D detectors. The simulation results show that the proposed detector outperforms obviously over the technique using two single-track 2-D detectors and yields performance very close

056502-6 L. M. M. Myint and G. Warisarn

AIP Advances 7, 056502 (2017)

to the full-fledged multi-track joint 2-D detector, especially when the system suffers the media noise although its complexity is reduced to the manageable level.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by the Thailand Research Fund (TRF), College of Advanced Manufacturing Innovation, and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund, Thailand.

- ¹ H. Burkhardt, Proc. IEEE Comp. Euro'89 Conf. VLSI Computer Peripherals, VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and Their Interconnection Networks, (1989).
- ² W. Chang and J. Cruz, IEEE Trans. Magn. 46, 3899 (2010).
- ³ A. Moilan, L. Fagoonee, W. M. J. Coene, and B. Honary, IEEE Trans. Magn. 43, 580 (2007).
- ⁴ L. M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Tantisawadi, IEEE Trans. Magn. 45, (2009).
- ⁵ J. Kim and J. Lee, IEEE Trans. Magn. 47, 594 (2011).
- ⁶ E. Soljanin and C. Georghades, IEEE Trans. Inf. Theory 44, 2988 (1998).
- ⁷ N. Zheng, K. S. Venkataranman, A. Kavcic, and T. Zhang, IEEE Trans. Magn. 50, 3100906 (2014).
- ⁸ B. Fan, H. Thapar, and P. Siegel, Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), London, UK, 425 (2015).
- ⁹ B. Fan, H. Thapar, and P. Siegel, IEEE Trans. Magn. 51, 3001404 (2015).
- ¹⁰ A. Hekstra, W. Coene, and A. Immink, IEEE Trans. Magn. 43, 3333 (2007).
- ¹¹ L. M. M. Myint, and T. Tubkaew, Proc. ITC-CSCC, Japan, 49 (2016).
- ¹² S. Nabavi, B. V. K. Kumar, and J. A. Bain, IEEE Trans. Magn. 44, 3789 (2008).





ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล: ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร

ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

ประวัติการศึกษา

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

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

International Journal Publications

1. W. Tipcharoen, C. Warisarn, and P. Kovintavewat, "Effects of Island Shape and Hotspot Position Fluctuation for Heated-Dot Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
2. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsomporn, "A Spin Stand Study of Head-to-Media Spacing Sensitivity for Shingled Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
3. K. Pituso, C. Warisarn, D. Tongsomporn, and P. Kovintavewat, "An ITI Subtraction Scheme of a Rate-4/5 Modulation Code for Two Dimensional Magnetic Recording," IEEE Magn. Letter, ISI-Impact 1.692 Submitted.
4. P. Nhunork, C. Warisarn, and D. Tongsomporn, "An experiment study of head-to-media spacing sensitivity in ultra-high density magnetic recording systems," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.
5. V. Pomsanam, C. Warisarn, A. Siritaratiwat, C. Surawanitkun, "Structural size effect with altered temperature on MgO-based magnetic tunnel junction device during current flow," Elsevier Procedia Computer Science, Scopus, Accepted.

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทูน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. W. Tipcharoen, C. Warisarn¹, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," JJAP ISI-Impact 1.27, accepted.
7. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding Approach of 2D Modulation Codes in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Electronic Trans. IEICE 2015, Published, ISI-Impact 0.34.
8. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, P. Supnithi, and P. Kovintavewat, "An Iterative TMR Mitigation Method Based on Readback Signal for Bit-Patterned Media Recording," IEEE Trans. Magn., Published, ISI-Impact 1.83.
9. Lin M. M. Myint, and C. Warisarn, "Equalizer Design for Bit-Patterned Media Recording System Based on ISI and ITI Estimations by Cross Correlation Functions" in AMM Journal, Published. Q3 SJR.
10. W. Busyatras, C. Warisarn, Lin M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A TMR Mitigation Method Based on Readback Signal in Bit-Patterned Media Recording", in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
11. C. Warisarn, A. Arrayangkool, and P. Kovintavewat, "An ITI-Mitigating 5/6 Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" in Electronic Trans. IEICE 2013, Published, ISI-Impact 0.34.
12. A. Arrayangkool and C. Warisarn, "A Two-Dimensional Coding Design for Staggered Islands Bit-Patterned Media Recording," in Journal of Applied Physics, ISI-Impact 2.30.
13. P. Kovintavewat, A. Arrayangkool, and C. Warisarn, "A Rate-8/9 2D Modulation Code for Bit-Patterned Media Recording" IEEE Trans. Magn., ISI-Impact 1.83.
14. 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, ISI-Impact 2.30.
15. 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, ISI-Impact 2.30.

16. 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, ISI-Impact 2.30.
17. 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, ISI-Impact 0.34.
18. 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.

International conference publications

1. K. Buehing, V. Brusyatras, C. Warisarn, S. Koonkarnkhai, and P. Kovintavewat, "A Performance Improvement of a Rate-5/6 2D Modulation Code in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
2. W. Teeraruangchaisri, C. Kanjanakunchorn, C. Warisarn, and C. Jettanasen, "Soft Information Adjustment Scheme of a Rate-4/5 2D Modulation Code in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
3. W. Ruksavong, W. Busyatras, C. Warisarn, L. Myint, and P. Kovintavewat, "Estimate Track Mis-registration Levels using an Energy Ratio Finding Technique in Bit-Patterned Media Recording Systems," in Proceeding of ITC-CSCC 2016, Okinawa Japan, Accepted.
4. W. Tipcharoen, C. Warisarn¹, A. Kaewrawang, and P. Kovintavewat, "Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording," in Proceeding MORIS 2015 Penang Malaysia.
5. C. Warisarn and P. Kovintavewat, "Soft-Output Decoding of 2D Modulation Codes for Bit-Patterned Media Recording," in Proceeding Intermag-CON 2015, Beijing, China.
6. S. Chandrasekaran, P. Supnithi, and C. Warisarn, "Spinning Disk Test Study in Determining the Optimum Writers and Shingled Track Pitch for Shingled Magnetic Recording," in Proceeding Intermag-CON 2015, Beijing, China.
7. C. Kanjanakunchorn and C. Warisarn, "Soft-Output Decoding Approach of a Rate-4/5 CITI Code in Magnetic Recording Systems," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.

ผศ. ดร. ชานนท์ วริสาร | รหัสทูน 2560-02-10-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. W. Busyatras, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple TMR Mitigation Approach for Bit Patterned Media Recording Based on Readback Signals," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
9. C. Boonlom, A. Arrayangkool, C. Warisarn, "A Study of Island Size and Bit Aspect Ratio Factors in Staggered BPMP Channel with SRBP Method," in Proceeding ITC-CSCC 2015, Korea.
10. Lin Min Min Myint, Chanon Warisarn, Wiparat Busyatras, and Piya Kovintavewat, "Single-Track Equalization Method with TMR Correction System based on Cross Correlation Functions for Patterned Media Recording System" in Proceeding ICAPMA 2015, Pattaya, Thailand.
11. P. Ketwong, A. Arrayangkool, C. Warisarn, L. M. M. Myint, and P. Kovintavewat, "A Simple Crossover-based Coding Technique for ITI Mitigation in Bit-Patterned Media Recording," in Proc. ITC-CSCC 2014, Siem Reap, Cambodia, Dec. 9-12, 2014
12. 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
13. 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
14. 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
15. 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.
16. S. Koonkarnchai, 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.
17. 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.

18. 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
19. Losuwan T., Warisarn C., and Kovintavewat P. "A Study of 2D detection for Two-Dimensional Magnetic Recording" in Proc. of ITC-CSCC 2012, Sapporo, Japan, Jul. 15-18 2012.
20. Warisarn C., Kovintavewat P., and Supnithi P. "Complexity Reduction of Modified Per-Survivor Iterative Timing Recovery" ECTI-CIT Trans., Nov. 2012.
21. Warisarn C., Supnithi P. "A Novel IIR Equalizer Design for Perpendicular Recording Systems with Media Jitter Noise." KCU Res. J., 17(3), Jun. 2012. pp. 339-348.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้