

ผลกระทบของอัตราหีสมอดูเลชันและพัลส์ ช่องสัญญาณต่อส่วนเพื่อสัญญาณรบกวนในระบบ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก

ประพันธ์ ลีกุล¹⁾ ชานนท์ วาริสาร²⁾ กิตติยาภรณ์ บุญเสริม¹⁾ และ พรชัย ทรัพย์นิธิ³⁾

- 1) นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520
- 2) นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520
- 3) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520
- 3) สำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

Email: s9060053@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทบทวนสถาปัตยกรรมของชิพช่องสัญญาณอ่านและผลการทดสอบค่าส่วนเพื่อสัญญาณรบกวน เมื่อทำการปรับค่าอัตราหีสและประเภทของพัลส์ช่องสัญญาณ โดยทำการปรับระดับสัญญาณรบกวนต่อบิตข้อมูลที่เขียนเมื่อเทียบกับอัตราหีสมอดูเลชันและช่องสัญญาณต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเร็วข้อมูลสูงขึ้นจะทำให้ต้องใช้ส่วนเพื่อสัญญาณรบกวนสูงขึ้น และพัลส์แบบ PR4 สามารถทำให้ระบบทนต่อสัญญาณรบกวนได้มากกว่าพัลส์แบบลอเรนด์

คำสำคัญ : ส่วนเพื่อสัญญาณรบกวน, รหัสมอดูเลชัน, Partial Response

The Effects of Modulation Code Rate and Channel Pulses on Noise Margin of the Magnetic Recording Channel

Prapan Leekul¹⁾ Chanon Warisarn ²⁾ Kitiyaporn Boonserm¹⁾ and Pornchai Supnithi³⁾

^{1), 3)} Master's student, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

²⁾ Ph.D. student, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

⁴⁾ Assistant Professor, Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

⁴⁾ I/U CRC in Data Storage Technology and Applications, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

Email: s9060053@kmitl.ac.th

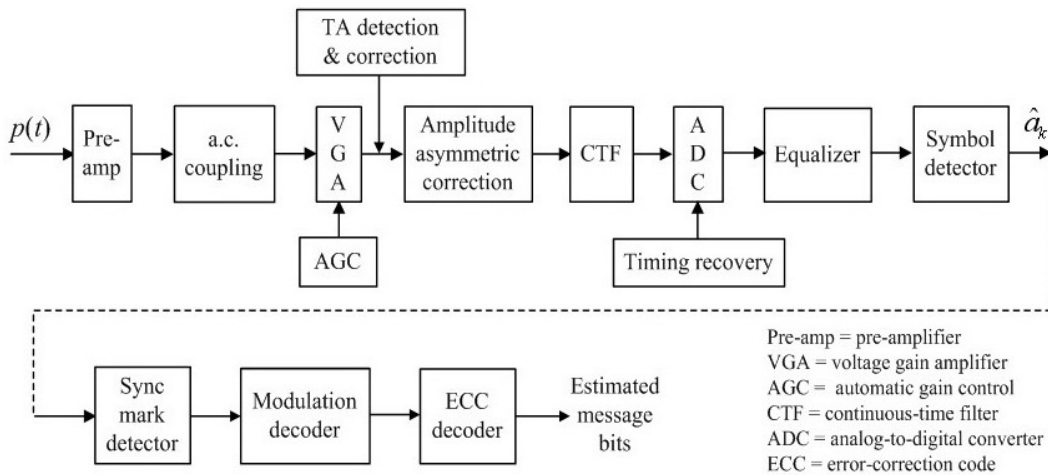
ABSTRACT

In this article, we present an overview of architecture of the read channel chip and the effects of modulation code rates and channel types to the noise margin, an important parameter in the magnetic recording system. The noise margin is adjusted by varying the noise level to the WRITE bit streams for each code rate and channel type. The experimental results show that required noise margin is higher as the data rate increases and the partial response IV channel can withstand higher noise level than the Lorentzian pulse.

Keywords : Noise Margin , Partial response, Modulation code

บทนำ

การทดสอบการทำงานของชิพช่องสัญญาณอ่าน (Read Channel Chip) เป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อตรวจสอบอัตราบิดผิดผลาดของระบบ สัญญาณจากหัวอ่านเกิดความผิดเพี้ยนจากการแทรกสอดสัญญาณและสัญญาณรบกวนหลายชนิด ชิพช่องสัญญาณอ่านทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่ผิดเพี้ยนเพื่อให้อัตราบิดผิดผลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ชิพช่องสัญญาณอ่านประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ เช่น วงจร AGC, วงจรกรองเวลาต่อเนื่อง (CTF) , วงจร ADC, อีควอลไลเซอร์ (Equalizer) ช่วยปรับทาร์เกตของช่องสัญญาณให้อยู่ในรูปของ partial response โดยใช้วงจรเอฟโออาร์, วงจรวีเทอร์บี, วงจรถอดรหัสสมอดูเลชัน และวงจรถอดรหัสแก้ไขความผิดผลาด (ECC) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นต้น



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของช่องสัญญาณอ่าน(Read Channel Architecture)

ในส่วนของวงจร CTF ค่าที่สามารถปรับได้คือ ขนาดแบนด์วิดท์ตัวกรอง ค่าเกินของตัวกรอง เป็นต้น การปรับขนาดแบนด์วิดท์ที่ไม่เหมาะสมจะมีผลให้ปริมาณสัญญาณรบกวนผ่านมากเกินไป มีผลให้ค่าเอสเอนอาร์ต่ำลง หากปรับต่ำเกินไปจะให้สัญญาณที่อ่านผิดเพี้ยนและมีผลให้ค่าอัตราบิดผิดผลาดสูงขึ้น

ในระบบการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น ตัวชิพช่องสัญญาณต้องทำงานร่วมกับส่วนประกอบเชิงกลเช่น หัวอ่าน โดยสามารถวัดสมรรถนะของระบบในรูปของอัตราบิดผิดผลาดและส่วนเผื่อของสัญญาณรบกวน เป็นต้น

พัลส์ช่องสัญญาณและทาร์เกต

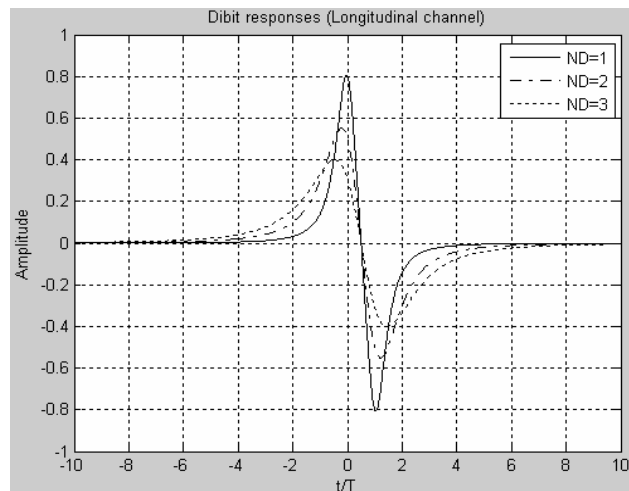
ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในปัจจุบัน มีสองเทคโนโลยีได้แก่ การบันทึกแวนอน และ การบันทึกแนวตั้ง การบันทึกทั้งสองแบบใช้แผ่นดิสก์ที่ต่างกันทำให้มีช่องสัญญาณต่างกัน ผลตอบสนองต่อพัลส์เดี่ยว (isolated pulse response) $g(t)$ ในการบันทึกแวนอน เป็นพัลส์แบบลอเรนซ์ (Lorentzian) เขียนอยู่ในสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น (Bergman, 1996)

$$g(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2t}{PW_{50}}\right)^2} \quad (1)$$

เมื่อ PW_{50} คือความกว้างของพัลส์ $g(t)$ ที่วัด ณ ตำแหน่งที่พัลส์มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูดสูงสุด ในกรณีของการบันทึกแนวตั้ง ผลตอบสนองต่อพัลส์เดี่ยว (isolated pulse response) $g(t)$ เขียนได้ในรูป (Roscmp, et al. 2002)

$$g(t) = \text{erf}\left(\frac{t\sqrt{\ln 16}}{PW_{50}}\right) \quad (2)$$

เมื่อ PW_{50} ความกว้างของพัลส์ $g'(t)$ (อนุพันธ์ของพัลส์ $g(t)$) ที่วัด ณ ตำแหน่งที่พัลส์มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด $\text{erf}(g)$ คือฟังก์ชันข้อผิดพลาด (Error function) ที่นิยามโดย $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ และหากกำหนดให้ $PW_{50} = ND \cdot T$ เมื่อ ND คือ ค่าความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล (ND: normalized recording density), T คือคาบเวลาของข้อมูลหนึ่งบิต หรือที่



รูปที่ 2 ผลตอบสนองไดบิต ของการบันทึกในแวนอน

เรียกกันว่า “บิตเซล (bit cell)” ค่า ND นี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าบริเวณ PW_{50} สามารถที่จะจัดเก็บข้อมูลได้จำนวนกี่บิต เมื่อสัญญาณเขียนมีบิต ‘1’ ติดกัน ขั้วแม่เหล็กจะต่างกันทำให้สัญญาณที่อ่านได้มีค่าบวกและลบแทนแต่ละบิต แสดงดังรูปที่ 2 สัญญาณนี้เรียกว่าผลตอบสนองไต่บิต (Dibit Response)

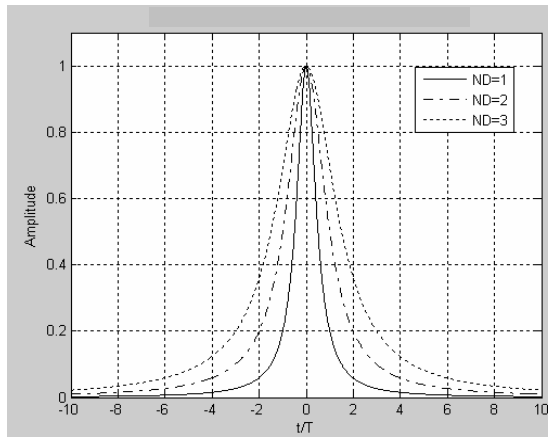
รูปที่ 2 แสดงผลตอบสนองไต่บิตเมื่อค่า ND ต่างกัน ถ้าให้ T เป็นค่าคงที่ เมื่อ PW_{50} หรือ ND เพิ่มขึ้น ทำให้มีความจุข้อมูลสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล ND เพิ่มมากขึ้นแอมพลิจูดของผลตอบสนองไต่บิตจะลดลงและจุดสูงสุดของสัญญาณพัลส์ไต่บิตจะเคลื่อนที่ห่างออกไปจากตำแหน่งปกติ สัญญาณที่อ่านได้จะครอบคลุมหลายคาบเวลาหรือหลายบิตเซล ดังนั้นหลังจากผ่านวงจร ADC ที่ซิกตัวอย่างค่าทุก ๆ บิต การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference) หรือไอเอสไอจะเกิดขึ้น ค่า ND ยิ่งสูง ความรุนแรงของไอเอสไอในสัญญาณที่อ่านได้จะเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราบิตผิดพลาดบิตคงที่แม้ว่าจะมีการเพิ่มเอสเอ็นอาร์ (SNR) การแก้ไขปัญหของไอเอสไอในรูปที่ 1 ในช่วงจวิเทอร์บี ผลตอบสนองไต่บิตในการบันทึกแนวตั้งแสดงในรูปที่ 3

เมื่อค่า ND สูงขึ้น ความยาวของไอเอสไอจะมากขึ้น ทำให้ความซับซ้อนของวงจรจวิเทอร์บีเพิ่มมากขึ้นในระดับเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นในการบันทึกแนวอน จึงนิยมใช้ฟิลเตอร์เอฟโฟอาร์เพื่อเปลี่ยนผลตอบสนองต่อพัลส์เดี่ยวแบบลอเรนต์ให้มีทาร์เกตเป็นแบบ partial response หรือ PR

ในรูปของการแปลงแบบ D ชองสัญญาณใหม่ $H(D)$ อยู่ในรูปของ

$$H(D) = (1-D)(1+D)^n \quad (3)$$

โดยที่ n เป็นจำนวนเต็ม ตัวอย่างเช่น ทาร์เกตแบบ PR4 มี $H(D) = 1 - D^2$



รูปที่ 3 ผลตอบสนองไต่บิต ของการบันทึกแนวตั้ง

รหัสมอดูเลชัน

รหัสมอดูเลชันที่ใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กและเชิงแสง ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลอินพุตเพื่อจำกัดจำนวนของบิต “0” และ “1” ก่อนเขียนลงไปบนแผ่นดิสก์ รหัส RLL (Run

Length Limited) จัดเป็นรหัสมอดูเลชัน ที่ถูกกำหนดด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ (d, k) โดย d คือ จำนวนบิต “0” ที่น้อยที่สุดระหว่าง “1” และ k คือจำนวนบิต “0” ที่มากที่สุดระหว่าง “1” พารามิเตอร์ d จะทำให้ บิต “1” สองบิตอยู่ห่างจากกันเพื่อลดผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณหรือไอเอสไอ นอกจากนี้รหัสมอดูเลชันนั้นจะช่วยทำให้องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงลดน้อยลง ช่วยปรับสเปกตรัมของสัญญาณให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณ เพื่อทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณลำดับสุดท้ายนั้นน้อยที่สุด ช่วยเพิ่มระยะทางของบิตเปลี่ยนสถานะ (Transition Bit) ที่จะเขียนลงไปบนสื่อบันทึก และช่วยลดผลกระทบของไอเอสไอ ส่วนพารามิเตอร์ k จะช่วยทำให้เรามั่นใจว่ารูปแบบที่จะเขียนลงไปบนสื่อบันทึก จะมีบิตเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นสม่ำเสมอเพียงพอ เพื่อช่วยให้ระบบการเข้ารหัสของข้อมูลสัญญาณเวลาทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่ทั้งนี้การที่จะกำหนดพารามิเตอร์ทั้งสองนั้นก็ขึ้นอยู่กับอัตรารหัสด้วย อัตรารหัสมอดูเลชัน R คำนวณได้จาก

$$R = \frac{K}{N} \quad (4)$$

เมื่อ K คือจำนวนบิตอินพุตและ N คือจำนวนบิตเอาต์พุต สำหรับบิตที่รหัสมอดูเลชัน ค่าเอสเอ็นอาร์หาได้จาก

$$\frac{E_c}{N_0} = R \frac{E_b}{N_0} \quad (5)$$

ผลกระทบของรหัสมอดูเลชันต่ออัตราบิตผิดพลาดที่เปลี่ยนไป ไม่ได้แปรผกผันกับอัตรารหัส ดังเช่นกรณีของรหัสช่องสัญญาณเสมอไป ทั้งนี้เป็นเพราะรหัสมอดูเลชันไม่เป็นรหัสเชิงเส้นและการสร้างคำรหัสต้องอาศัยตารางที่สร้างไว้เป็นหลัก นอกจากนี้จุดประสงค์หลักของรหัสมอดูเลชันก็ไม่ใช่การแก้ไขบิตผิดพลาด โดยปกติ รหัสมอดูเลชันโดยเฉพาะที่อัตรารหัสเข้าใกล้ 1 ไม่เป็นที่เปิดเผย จึงเป็นยากต่อการนำไปใช้และการคำนวณหาความสัมพันธ์ของอัตรารหัสมอดูเลชันและอัตราเร็วข้อมูลต่ออัตราบิตผิดพลาดโดยตรง ในบทความนี้อัตราบิตผิดพลาดสามารถหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

วิธีการทดลอง

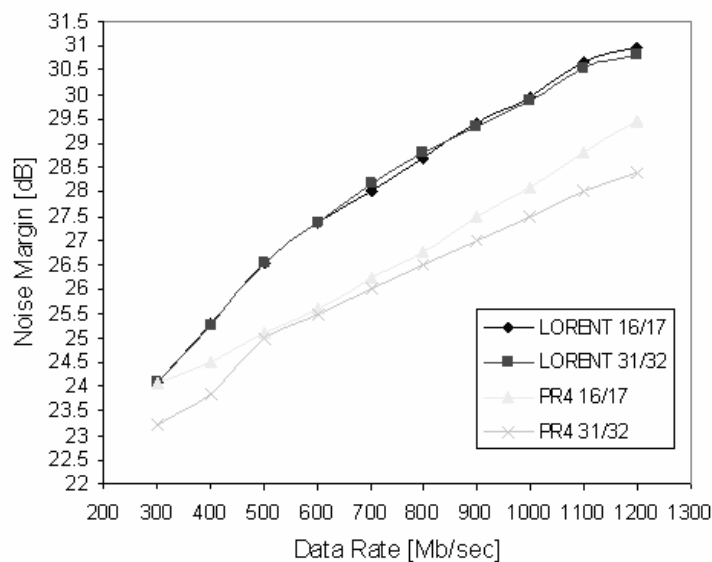
การทดสอบค่า BER ของชิพช่องสัญญาณอ่านสามารถทำได้โดยการส่งลำดับบิตข้อมูลสุ่มที่สร้างจากตัวชิพผ่านช่องสัญญาณสำหรับค่า user density ($ND = PW50/T$) เท่ากับ 2 ผ่านเครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวน สัญญาณที่อ่านได้มีความผิดเพี้ยนและจะถูกส่งเข้าไปในชิพช่องสัญญาณอ่านซึ่งจะผ่านบล็อกต่าง ๆ ในรูปที่ 1 เพื่อแก้ไขความผิดพลาดและนำลำดับบิตเริ่มต้นกลับมา จากนั้นทำการคำนวณระดับค่า BER ที่วัดได้โดยเริ่มจากระดับของสัญญาณรบกวนจากน้อยไปหามากจนกว่าค่า $BER \geq X$ โดย X คือค่า BER ที่ยอมรับได้ อัตราเร็วข้อมูลที่ใช้เท่ากับ 300-1200 เมกะบิตต่อวินาที โดยเพิ่มขึ้นทีละ 100 เมกะบิตต่อวินาที

อัตราบิตผิดพลาดหรือ BER สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของจำนวนบิตผิดพลาดต่อจำนวนบิตที่ทดสอบทั้งหมด ค่า BER ที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับบริเวณที่ทำการวัดค่าในรูปแบบที่ 1 โดยมักเขียนในรูปเอกซ์โพเนนเชียล เช่น ค่า $BER = 10^{-4}$ หมายความว่าโดยเฉลี่ยจะมีบิตผิดพลาดจำนวน 1 บิตจากจำนวนบิตที่บันทึกทุก ๆ 10,000 บิต โดยปกติค่า BER ก่อนตัวถอดรหัส ECC ตามมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ $10^{-4} - 10^{-5}$ ทั้งนี้เพื่อให้ค่า BER สุทธิหลังจากการถอดรหัส ECC ต้องอยู่ต่ำกว่า 10^{-10}

ส่วนเผื่อสัญญาณรบกวน เป็นการวัดระดับเอสเอนอาร์ที่ต้องมีเผื่อไว้ในการรักษาระดับค่า BER ไว้ เมื่อความจุของฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์หรืออัตราเร็วข้อมูลเปลี่ยนไป ค่า BER และส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์จำนวนมากในชิพตัวอ่าน ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่จะพิจารณาในบทความนี้ได้แก่ อัตราหัสมอดูเลชันและชนิดของพัลส์ชองสัญญาณ เป็นต้น และทำการทดลองที่อัตราหัสต่าง ๆ และสำหรับชองสัญญาณ PR4 และ Lorentzian

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองในรูปแบบที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเร็วข้อมูลสูงขึ้น ส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือมีความจำเป็นต้องเผื่อค่าเอสเอนอาร์มากขึ้นเพื่อที่จะรักษาระดับ BER เดิม สำหรับพัลส์แบบลอเรนต์ (ใช้ตัวย่อ “LOREN”) ที่มีอัตราหัส เท่ากับ 16/17 และ 31/32 ส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนไม่แตกต่างกันมาก โดยส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นมากและค่อยลดลงหลังจากอัตราเร็วเท่ากับ 500 เมกะบิตต่อวินาที โดยมีค่าตั้งแต่ 24 – 31 เดซิเบล พัลส์ชนิด PR4 มีระดับของส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าพัลส์แบบลอเรนต์ และผลต่างเห็นได้ชัดหลังจากอัตราเร็วข้อมูลเท่ากับ 500 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่ง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนกับอัตราเร็วข้อมูล

หมายความว่าพัลส์ชนิด PR4 ต้องการเอสเอนอาร์ต่ำกว่าพัลส์แบบลอเรนตีในระดับ BER เท่ากัน โดยมีค่าตั้งแต่ 24 – 29.5 เดซิเบลและ โดยมีค่าตั้งแต่ 23 – 28 เดซิเบล สำหรับอัตรารหัส 16/17 และ 31/32 สำหรับพัลส์แบบ PR4 อัตรารหัสเท่ากับ 31/32 จะได้ค่าส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนต่ำกว่าอัตรารหัสเท่ากับ 16/17 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราเร็วข้อมูลสูงกว่า 500 เมกะบิตต่อวินาที สังเกตว่าความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 มีความขรุขระเป็นบางช่วง ซึ่งเป็นปกติเมื่อทำการทดลอง ต่างจากการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการทบทวนสถาปัตยกรรมของซีพ้องสัญญาณอ่านของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และศึกษาผลกระทบของอัตรารหัสมอดูเลชันและประเภทของพัลส์ของสัญญาณต่อส่วนเผื่อสัญญาณรบกวน เนื่องจากรหัสมอดูเลชันไม่เป็นรหัสเชิงเส้นและมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงลำดับของบิตข้อมูลก่อนทำการเขียนลงบนแผ่นดิสก์ ดังนั้นในบทความนี้จึงอาศัยผลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และพบว่า เมื่ออัตราเร็วข้อมูลสูงขึ้นต้องเผื่อค่าเอสเอนอาร์เพิ่มขึ้นและค่อยลดลงหลังจากอัตราเร็วเท่ากับ 500 เมกะบิตต่อวินาที พัลส์ชนิด PR4 มีระดับของส่วนเผื่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่าพัลส์แบบลอเรนตีและผลต่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราเร็วข้อมูลสูงขึ้น สำหรับพัลส์แบบ PR4 . จากผลการทดลองควรใช้อัตรารหัสเท่ากับ 31/32 มากกว่าอัตรารหัส 16/17

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยและการทดลองนี้ นอกจากนี้ผลการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

อ้างอิง

- J.W.M. Bergman, 1996. **Digital baseband transmission and recording**, Boston/London/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
 T.A. Roscomp, E.D. Boerner, and G.J. Parker, May 2002. "Three-Dimensional modeling of perpendicular recording with soft underlayer," **J. of Applied Physics**, vol.91, no.10