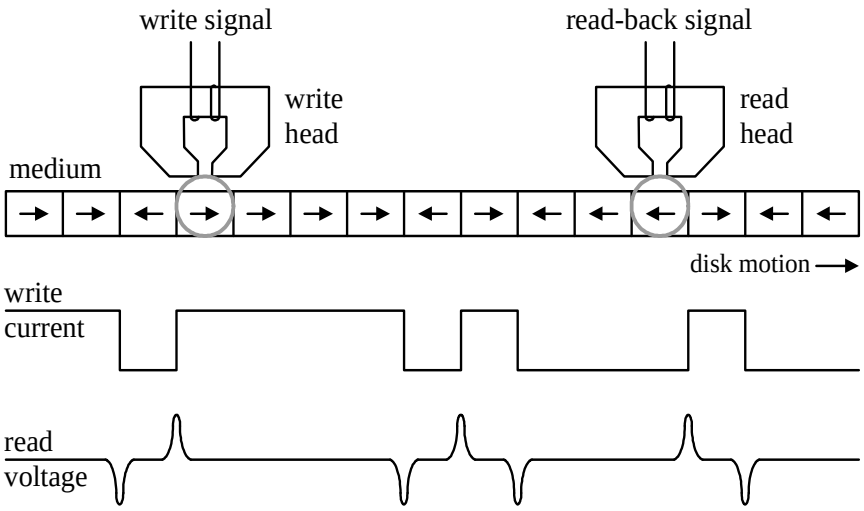
บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึงภาพรวมของระบบการบันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมให้ผู้อ่านเข้าใจถึงพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล รวมทั้งหลักการทำงานของกระบวนการเขียนและการอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ก่อนที่อธิบายเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบการประมวลผลสัญญาณและการออกแบบวงจรภาครับของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในบทต่อไป

1.1 พื้นฐานของการบันทึกระบบแม่เหล็กแบบดิจิทัล

การบันทึกระบบแม่เหล็ก (magnetic recording) คือ การจัดเก็บข้อมูลบิตให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงระดับสภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ในสื่อบันทึก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ [1] คือ แบบแอนะล็อก (analog) และแบบดิจิทัล (digital) ในหนังสือเล่มนี้จะพิจารณาเฉพาะการบันทึกระบบแม่เหล็กแบบดิจิทัลที่ใช้สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เท่านั้น โดยที่ การบันทึกระบบแม่เหล็กแบบดิจิทัลจะใช้ประโยชน์จากสมบัติของความเป็นแม่เหล็กของวัสดุบางชนิด ที่เมื่ออยู่ในสถานะอิ่มตัว (saturated) แล้ว จะทำให้สภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึกมีทิศทางชี้ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หรือในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งลักษณะการบันทึกข้อมูลแบบนี้ จะเหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลดิจิทัลที่มี 2 สถานะ คือ บิต “1” และบิต “0” หรือที่เรียกกันว่า “ข้อมูลไบนารี (binary data)” เพราะฉะนั้น



รูปที่ 1.1: หลักการพื้นฐานของการบันทึกระบบแม่เหล็ก

วัสดุเหล่านี้จึงถูกนำมาทำเป็นสื่อบันทึกเพื่อเก็บข้อมูลไบนารี เนื่องจากข้อมูลในปัจจุบันส่วนมากจะอยู่ในรูปของข้อมูลดิจิทัล เช่น ข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ และข้อมูลที่รับส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น นอกจากนี้ ข้อมูลแอนะล็อกก็สามารถที่จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของข้อมูลดิจิทัลได้เพื่อให้ง่ายต่อการจัดเก็บข้อมูล โดยผ่านขั้นตอนการกล้ำรหัสพัลส์ (PCM: pulse code modulation) [2] เพราะฉะนั้น การบันทึกระบบแม่เหล็กแบบดิจิทัลจึงเหมาะสมกับการเก็บข้อมูลในปัจจุบัน

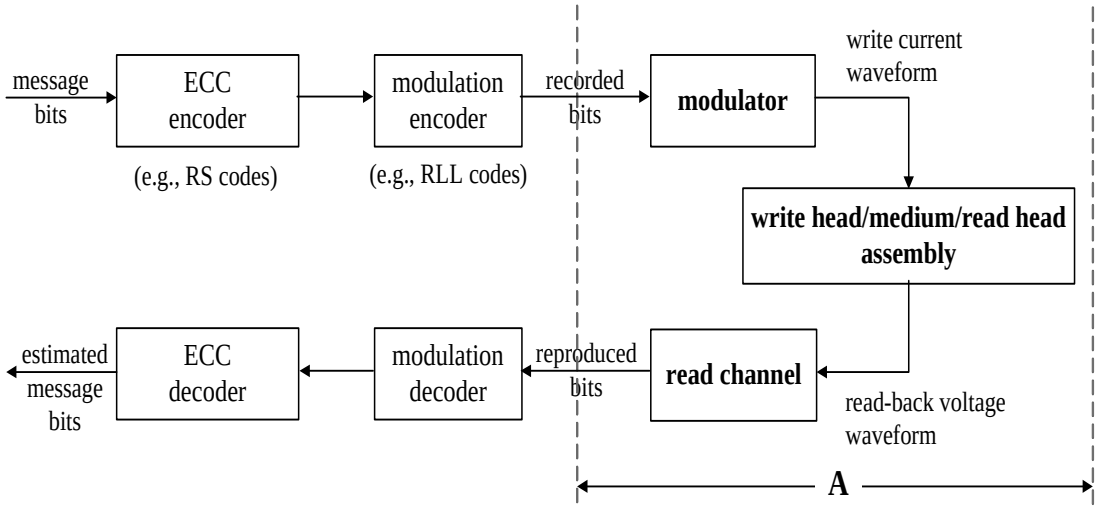
ในปัจจุบันนี้ ความต้องการเนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้แก่ คอมพิวเตอร์, โทรศัพท์เคลื่อนที่, เครื่องเล่นเพลงแบบพกพา, และกล้องถ่ายรูปดิจิทัล เป็นต้น มีมากขึ้นเรื่อยๆ เทคโนโลยีการบันทึกระบบแม่เหล็กแบบดิจิทัล ถือได้ว่าเป็น วิธีการหลักที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลของงานประยุกต์ (application) ต่างๆ รวมไปถึง แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (magnetic floppy disk), แถบบันทึกแม่เหล็ก (magnetic tape), ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, แผ่นซีดี (CD: compact disc), และแผ่นดีวีดี (DVD: digital versatile disc) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ทุกงานประยุกต์จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักการทำงานเดียวกันซึ่งเกี่ยวข้องกับ หัวอ่าน (read head), หัวเขียน (write head), และสื่อบันทึกแม่เหล็ก (magnetic media) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เมื่อ หัวอ่านและหัวเขียนแบบอินดักทีฟ (inductive head) จะทำมาจากสารแม่เหล็กรูปเกือกม้าที่มีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity) ต่ำ และค่าสภาพ

ให้ซึมผ่านได้ (permeability) สูง [1, 3] โดยจะมีขดลวดพันอยู่รอบๆ และสื่อบันทึกจะทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กสูง

ในหนังสือเล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล 2 แบบ คือ การบันทึกแบบแนวนอน (longitudinal recording) และการบันทึกแบบแนวตั้ง (perpendicular recording) โดยที่ เทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวนอนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน นั่นคือ สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกจะขนานกับระนาบของจานบันทึกแม่เหล็ก (magnetic disk) ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 ในขณะที่ เทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวตั้งได้เริ่มที่จะนำมาใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน โดยสภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกจะตั้งฉากกับระนาบของจานบันทึกแม่เหล็ก ซึ่งในปัจจุบันนี้ งานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว เพราะว่า เทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวนอนเข้าใกล้ “ขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic limit)” [1, 3, 4, 10] ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มากกว่า 1 เทระไบต์ (TB: terabyte) นอกจากนี้ เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้งสามารถช่วยเพิ่มขนาดความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้หลายสิบเท่า เมื่อเทียบกับการใช้เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอน [3, 5]

1.2 แบบจำลองของระบบการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ระบบการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล (digital data storage system) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถที่จะจำลองเป็นแผนภาพทั่วไปได้ ตามรูปที่ 1.2 เมื่อ บิตข่าวสาร (message bits) จะถูกทำการเข้ารหัสโดย “วงจรเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (error-correction code (ECC) encoder)” โดยที่ รหัส RS (Reed Solomon code) [7, 8] เป็นรหัสที่นิยมนำมาใช้ในการเข้ารหัสแก้ไขข้อผิดพลาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน จากนั้น ข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วก็จะถูกทำการเข้ารหัสอีกครั้งหนึ่งด้วย “วงจรเข้ารหัสมอดูเลชัน (modulation encoder)” เพื่อทำหน้าที่ในการปรับคุณสมบัติของข้อมูลให้เหมาะสมกับช่องสัญญาณของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น ทำให้ลำดับข้อมูล (data sequence) มีรูปแบบตามที่ต้องการ หรือทำให้ลำดับข้อมูลไม่มีส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (d.c. component) เป็นต้น รหัสที่นิยมใช้ในวงจรเข้ารหัสมอดูเลชัน คือ รหัส RLL (run-length limited code) [9] ข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเข้ารหัสมอดูเลชันจะถือว่าเป็นข้อมูลที่จะถูกเขียนเข้าไปในสื่อบันทึก ซึ่งจะเรียกกันว่า “บิตที่จะถูกบันทึก (recorded bit)”



รูปที่ 1.2: แบบจำลองทั่วไปของระบบการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [6]

หลังจากนั้น บิตที่จะถูกบันทึกก็จะถูกส่งไปยัง “วงจรมอดูเลเตอร์ (modulator)” เพื่อแปลงข้อมูลบิตให้อยู่ในรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเขียน (write current waveform) จากนั้น รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเขียนก็จะถูกป้อนไปยังหัวเขียน เพื่อทำการเขียนข้อมูลลงไปในสื่อบันทึก

สำหรับขั้นตอนในการอ่านข้อมูล หัวอ่านจะทำการอ่านข้อมูลจากสื่อบันทึก เมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็ก[1] (ดูรูปที่ 1.1) จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่เรียกกันว่า “สัญญาณ read-back” จากนั้น สัญญาณ read-back ก็จะถูกส่งเข้าไปทำการประมวลผลในช่องสัญญาณอ่าน (read channel) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ได้แก่ วงจรกรองผ่านต่ำ (LPF: low-pass filter), วงจรชักตัวอย่าง (sampler หรือ analog-to-digital converter), อีควอไลเซอร์ (equalizer), และวงจรตรวจหา (detector) เป็นต้น โดยข้อมูลเอาต์พุตที่ได้ก็จะถูกทำการถอดรหัสด้วย วงจรถอดรหัสมอดูเลชัน (modulation decoder) และวงจรถอดรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (ECC decoder) เพื่อหาค่าประมาณของบิตข่าวสารที่ส่งมาจากต้นทาง

[1]ในทางฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะถูกแทนด้วยข้อมูลบิต “1” และบริเวณที่มีไม่การเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นแม่เหล็ก จะถูกแทนด้วยข้อมูลบิต “0” โดยที่ รูปแบบข้อมูลลักษณะนี้จะเรียกกันว่า “รูปแบบ NRZI (non-return-to-zero interleaved)” เมื่อ ข้อมูลบิต “1” หมายถึง มีการเปลี่ยนสถานะ (transition) และข้อมูลบิต “0” หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

1.3 กระบวนการเขียน

ในระหว่างกระบวนการเขียนข้อมูล [10] ข้อมูลบิตจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปคลื่นกระแสไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม (rectangular current waveform) ที่เรียกกันว่า "กระแสไฟฟ้าเขียน (write current)" (ดูรูปที่ 1.1) โดยวงจรมอดูเลเตอร์ (modulator) [1, 4] จากนั้น กระแสไฟฟ้าเขียนจะถูกป้อนไปยังขดลวดของหัวเขียน (write head) ทำให้เกิดเป็นสนามเขียนแม่เหล็ก (magnetic write field) บริเวณช่องว่าง (gap) ระหว่างสื่อบันทึกกับหัวเขียน โดยทั่วไป สนามเขียนแม่เหล็กจะต้องมีขนาดหรือความเข้มมากกว่าสภาพลบล้างแม่เหล็กของสื่อบันทึก เพื่อที่จะได้สามารถทำให้สื่อบันทึก ณ บริเวณนั้นมีสภาพความเป็นแม่เหล็กตามทิศทางของสนามเขียนแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไป นอกจากนี้ การเปลี่ยนสถานะสภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization transition) ของสื่อบันทึก สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กสำหรับเขียน (หรือทิศทางของกระแสไฟฟ้าเขียน) เพื่อให้สอดคล้องกับการเขียนข้อมูลบิต 0 และบิต 1

ในทางปฏิบัติ ระบบการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้ "การบันทึกแบบไบนารี (binary recording)" นั่นคือ สภาพความเป็นแม่เหล็กที่อยู่ในสื่อบันทึกจะมีเพียง 2 ทิศทางเท่านั้น[2] หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบสามารถบันทึกข้อมูลได้เพียง 2 ระดับ (หรือ 2 ค่า) เท่านั้น ซึ่งต่างจากการบันทึกข้อมูลของดีวีดี (DVD) ที่สามารถบันทึกข้อมูลได้หลายๆ ระดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า โดยปกติกระบวนการเขียนข้อมูลมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) อยู่พอสมควร ดังนั้น ถ้าทำการบันทึกข้อมูลมากกว่า 2 ระดับลงไปในสื่อบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นก็จะยิ่งมีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบแย่ลงมาก [4]

1.4 กระบวนการอ่าน

ในระหว่างกระบวนการอ่านข้อมูล [10] หัวอ่านจะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะสภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) สำหรับบริเวณที่มีการ

[2] ถ้าพิจารณาทิศทางของสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ (หรือ จากขั้วบวกไปขั้วลบ) การบันทึกแบบแนวนอนจะมีลักษณะเป็นแบบขวาไปซ้าย หรือซ้ายไปขวา ในขณะที่ การบันทึกแบบแนวตั้งจะเป็นแบบบนลงล่าง หรือล่างขึ้นบน เท่านั้น

เปลี่ยนสถานะเอกเทศ (isolated transition) หัวอ่านจะให้สัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้า ที่เรียกกันว่า "สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ (transition pulse)" $g(t)$ หรือ $-g(t)$ โดยจะขึ้นอยู่กับทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึก (ดูรูปที่ 1.1)

สำหรับระบบการบันทึกแบบแนวนอน สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ (หรือ สัญญาณพัลส์ Lorentzian) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ คือ [4]

$$g(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2t}{\mathrm{PW}_{50}}\right)^2} \tag{1.1}$$

เมื่อ PW_{50} คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์ $g(t)$ วัด ณ ตำแหน่งที่สัญญาณพัลส์มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด และสำหรับการบันทึกแบบแนวตั้ง สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะจะมีรูปสมการ คือ [11]

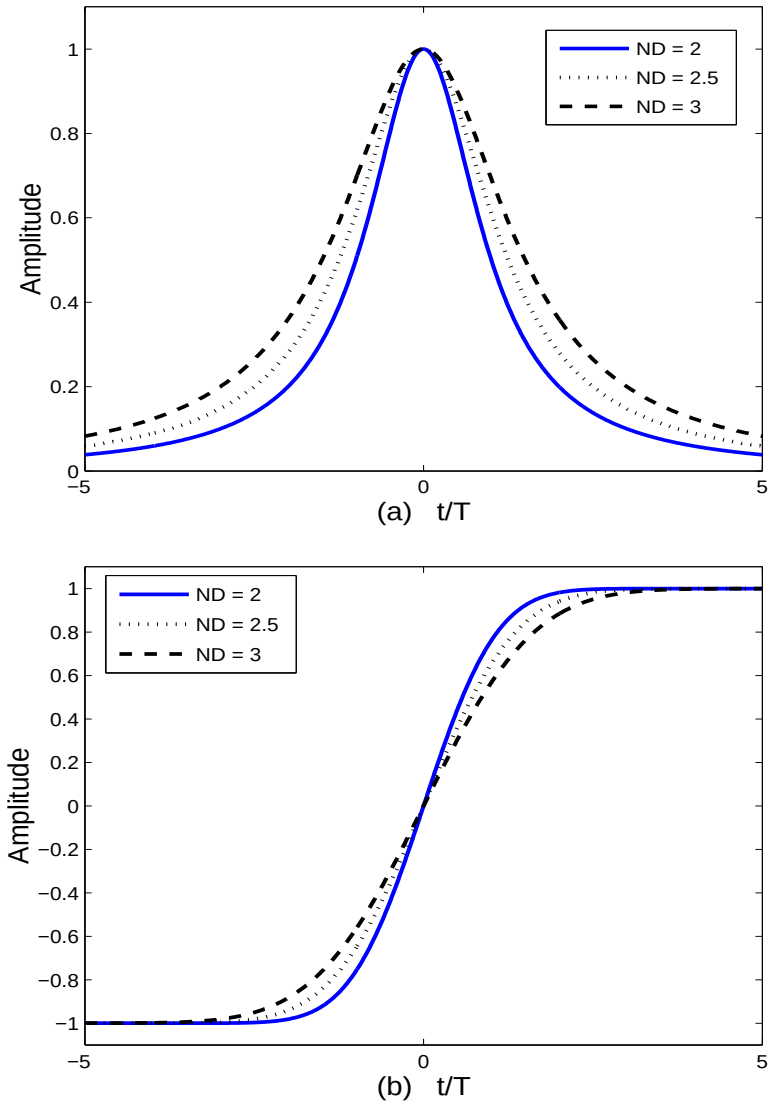
$$g(t) = \mathrm{erf}\left(\frac{2t\sqrt{\ln 2}}{\mathrm{PW}_{50}}\right) \tag{1.2}$$

เมื่อ $\ln(\cdot)$ คือ ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm), $\mathrm{erf}(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันข้อผิดพลาด (error function) ซึ่งนิยามโดย $\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, และ PW_{50} คือ ความกว้างของพัลส์ $g'(t)$ หรือ อนุพันธ์ของ $g(t)$ วัด ณ ตำแหน่งที่สัญญาณพัลส์มีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด

ในระบบการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ความหนาแน่นของการบันทึกแบบนอร์มอลไลซ์ (ND: normalized recording density) หรือ ความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล [4] จะนิยามโดย

$$\mathrm{ND} = \frac{\mathrm{PW}_{50}}{T} \tag{1.3}$$

เมื่อ T คือ คาบเวลาของข้อมูลหนึ่งบิต หรือที่เรียกกันว่า "บิตเซลล์ (bit cell)" ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกว่า บริเวณ PW_{50} สามารถที่จะจัดเก็บข้อมูลได้จำนวนกี่บิต ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ T เป็นค่าคงที่ เมื่อค่า PW_{50} หรือ ND เพิ่มขึ้น ก็หมายความว่า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถจุข้อมูลได้มากขึ้น รูปที่ 1.3 แสดงผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะสำหรับการบันทึกแบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง ณ ระดับ ND ต่างๆ จะเห็นได้ว่า สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะของทั้ง 2 ระบบจะครอบคลุมช่วงเวลาหลายๆ บิตเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อ ND มีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (ISI: intersymbol interference) ในสัญญาณ read-back จะมีความรุนแรงมากขึ้น เมื่อ ND มีค่า



รูปที่ 1.3: สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะ สำหรับการบันทึก (a) แบบแนวนอน และ (b) แบบแนวตั้ง

เพิ่มขึ้น เนื่องจาก โอกาสที่สัญญาณพัลส์เปลี่ยนสถานะที่อยู่ใกล้กันจะมาซ้อนเหลื่อม (overlap) กันมีความเป็นไปได้สูง

ในกรณีที่หัวอ่านเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่มีตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะติดกัน 2 ครั้ง สัญญาณพัลส์

สุทธิที่ได้ จะเรียกกันว่า “สัญญาณพัลส์ไดบิต (dibit pulse)” หรือ “ผลตอบสนองไดบิต (dibit response)” [4] ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$m(t) = g(t) - g(t - T) \tag{1.4}$$

ดังแสดงในรูปที่ 1.4

ถ้าใช้การแปลงฟูเรียร์ที่ต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time Fourier transform) [12] กับสัญญาณ $m(t)$ จะได้ว่า ผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response) ของ $m(t)$ สำหรับระบบการบันทึกแบบแนวนอน คือ

$$M(\Omega) = \exp\{-\pi|\Omega|\mathrm{ND}\}\,(1 - \exp\{-j2\pi\Omega\}) \tag{1.5}$$

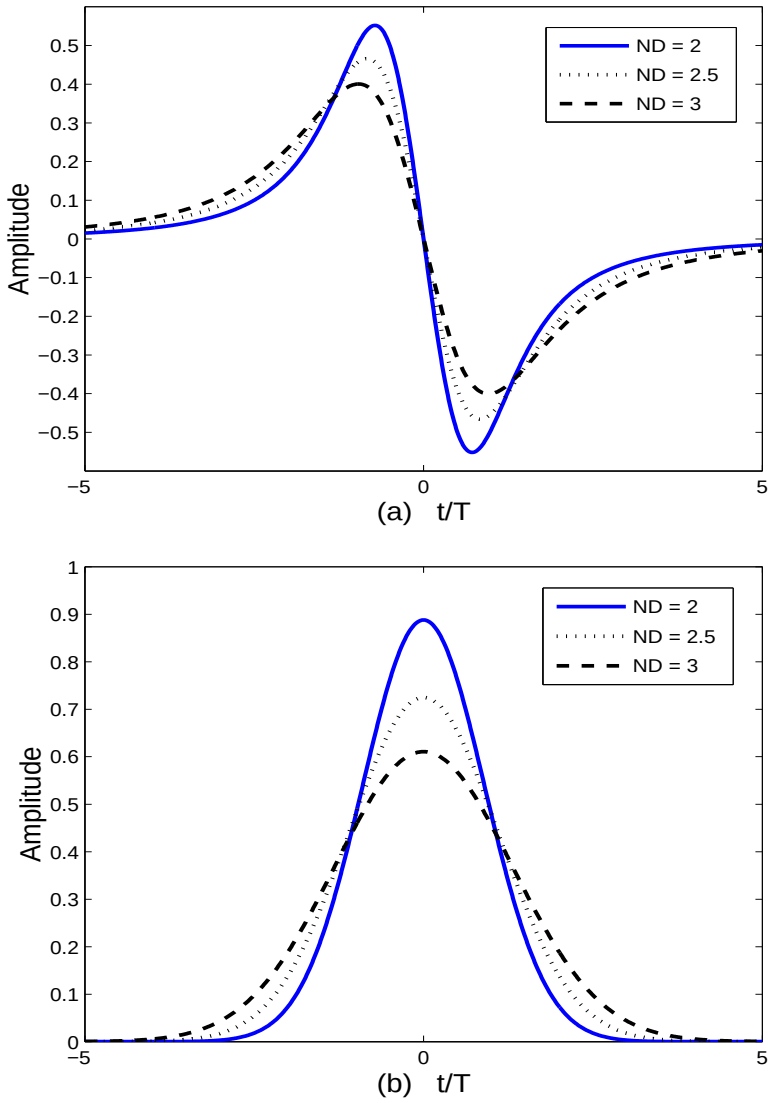
เมื่อ $\exp\{\cdot\}$ คือ ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (exponential function) ในขณะที่ ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ $m(t)$ สำหรับระบบการบันทึกแบบแนวตั้ง คือ

$$M(\Omega) = \frac{T}{j\pi\Omega}\,\exp\left\{-\frac{\pi^2\Omega^2\mathrm{ND}^2}{\ln(16)}\right\}\,(1 - \exp\{-j2\pi\Omega\}) \tag{1.6}$$

เมื่อ $\Omega = fT$ คือ ความถี่แบบนอร์มอลไลซ์ (normalized frequency), f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz), $|x|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ (absolute value) ของ x, และ $j = \sqrt{-1}$ คือ หน่วยจินตภาพ (imadinary unit) รูปที่ 1.5 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ไดบิต จะเห็นได้ว่า เมื่อ ND เพิ่มขึ้น รูปร่างของผลตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณพัลส์ไดบิตทั้ง 2 แบบจะถูกบีบให้มาอยู่ ณ บริเวณความถี่ต่ำ นอกจากนี้ ช่องสัญญาณของการบันทึกแบบแนวนอนจะมีสเปกตรัมค่าศูนย์ (spectral null) ณ ตำแหน่งที่ความถี่ $f = 0$ ซึ่งหมายถึง ไม่มีส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ช่องสัญญาณของการบันทึกแบบแนวตั้งจะมีส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสตรง

หมายเหตุ ในหนังสือเล่มนี้จะใช้โปรแกรม SCILAB[3] [14] ในการวาดรูปกราฟของสัญญาณต่างๆ รวมทั้งผลการทดลองที่ได้จากการทำการจำลอง (simulation) ระบบ ผู้อ่านควรที่จะพยายามทดลองวาดรูปกราฟต่างๆ ในหนังสือเล่มนี้ เพื่อที่จะได้ช่วยทำให้เข้าใจในบทเรียนมากยิ่งขึ้น

[3]โปรแกรม SCILAB เป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับโปรแกรม MATLAB [13] ซึ่งค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ของโปรแกรม MATLAB มีราคาแพงมาก แต่โปรแกรม SCILAB เป็นโปรแกรมที่ให้**ฟรี** (freeware) ผู้อ่านสามารถดาวน์โหลดตัวโปรแกรมได้จาก http//www.scilab.org หรือ http://home.npru.ac.th/∼t3058/Scilab.html



รูปที่ 1.4: ผลตอบสนองไดบิต สำหรับการบันทึก (a) แบบแนวนอน และ (b) แบบแนวตั้ง

1.5 แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกระบบแม่เหล็ก

โดยทั่วไป ช่องสัญญาณของระบบการบันทึกแม่เหล็กสามารถจำลองได้เป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองช่องสัญญาณเสมือนจริง (realistic channel model) และแบบจำลองช่องสัญญาณอุดมคติ (ideal