Communication Engineering Systems

Baseband Modulation (8)

Assoc.Prof.**Piya Kovintavewat**, Ph.D.

Data Storage Technology Research Center

Nakhon Pathom Rajabhat University

http://home.npru.ac.th/piya

"All things are difficult before they are easy"

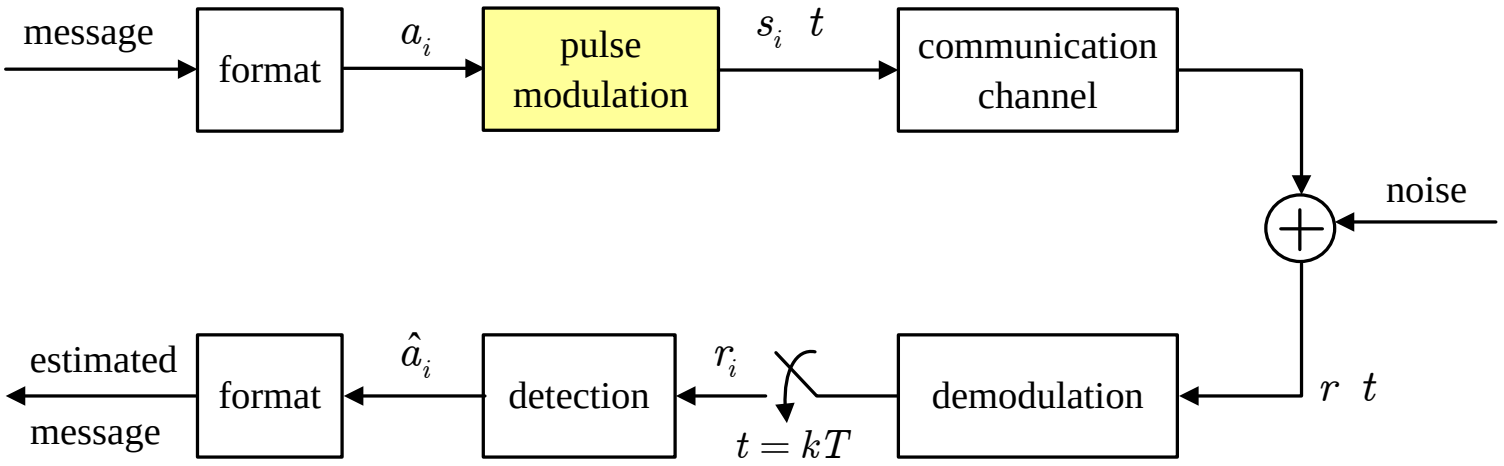
Outline

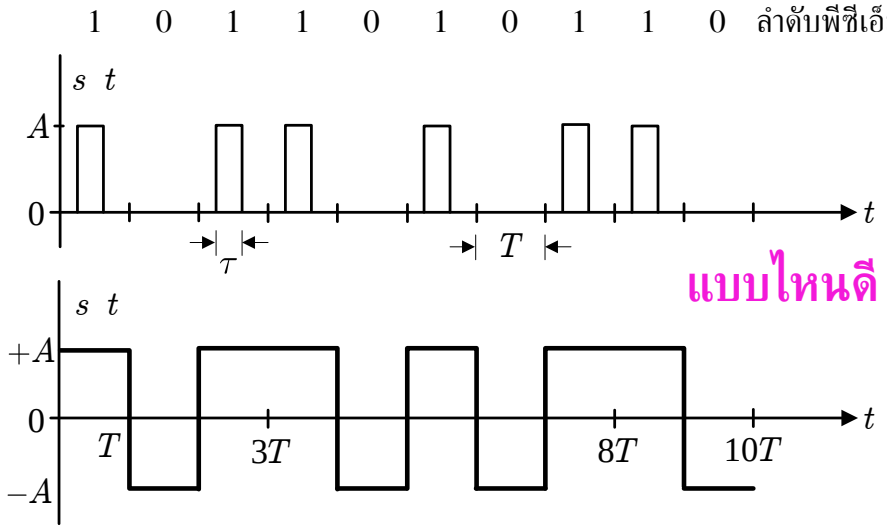
- ระบบการส่งสัญญาณแถบความถี่ฐาน
  - การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก
  - การกล้ำแอมพลิจูดของพัลส์
- การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบดิจิทัล
  - รหัสไลน์โค้ด

บทนำ

- การกล้ำสัญญาณแถบความถี่ฐาน (baseband modulation) แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ
  - การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก (analog pulse modulation)
  - การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบดิจิทัล (digital pulse modulation)
- วัตถุประสงค์เพื่อแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้าที่เหมาะสำหรับการส่งผ่านช่องสัญญาณในระบบสื่อสารดิจิทัล

ระบบการส่งสัญญาณแถบความถี่ฐาน



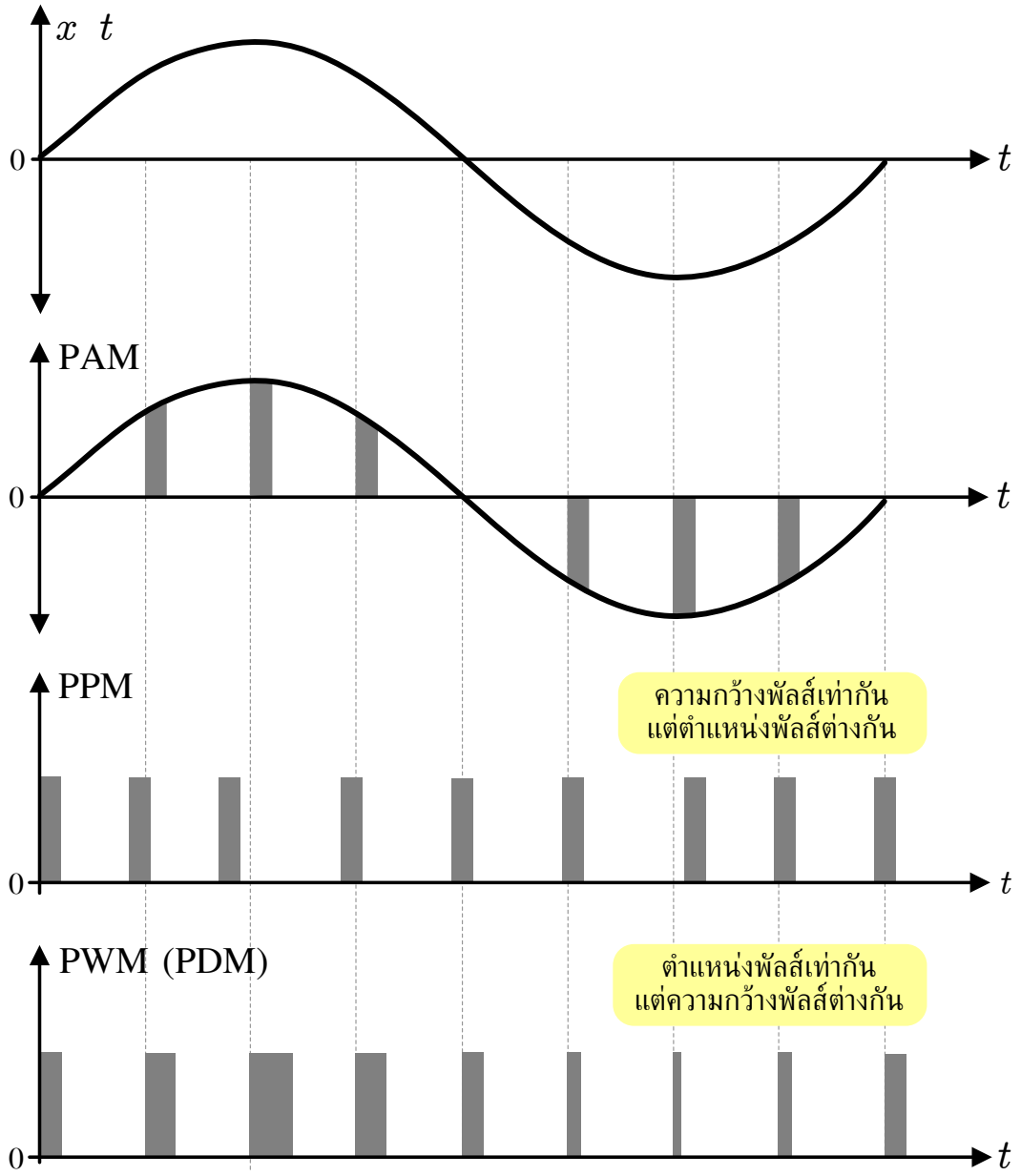


แบบไหนดี ?

สมรรถนะของวงจรภาครับในการถอดรหัสข้อมูลจะขึ้นอยู่กับพลังงานของสัญญาณที่ส่งมาจากวงจรภาคส่ง

การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก

- ถ้านำข้อมูลแซมเปิลที่**ไม่ผ่าน**การแจงหน่วยมาทำการกล้ำสัญญาณกับ**ขบวนสัญญาณพัลส์** ⇒ **กล้ำสัญญาณพัลส์แบบแอนะล็อก** ⇒ มี 3 แบบคือ
  - การกล้ำแอมพลิจูดของพัลส์ (PAM) ⇒ แบบง่ายสุด โดยแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์จะแปรเปลี่ยนตามค่าของข้อมูล และสัญญาณพัลส์ที่ใช้มีรูปร่างเป็นอะไรก็ได้
    - ข้อเสีย ⇒ ระบบต้องใช้แบนด์วิดท์มากขึ้น แต่ไม่ได้ช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ
    - การส่งผ่านสัญญาณ PAM ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ระบบมีข้อผิดพลาดน้อยลง แต่มีไว้ใช้สำหรับการรวมสัญญาณ (multiplexing)
  - การกล้ำตำแหน่งของพัลส์ (PPM) ⇒ ค่าของข้อมูลจะถูกนำมาใช้ในการปรับตำแหน่งของแต่ละสัญญาณพัลส์ในขบวนสัญญาณพัลส์
  - การกล้ำความกว้างของพัลส์ (PWM) หรือการกล้ำช่วงเวลาของพัลส์ (PDM) ⇒ ค่าของข้อมูลจะถูกนำมาใช้ในการปรับความกว้างของแต่ละสัญญาณพัลส์
    - ข้อมูลที่มีค่ามากก็จะถูกแทนด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างมาก (ใช้พลังงานมากในการส่ง)



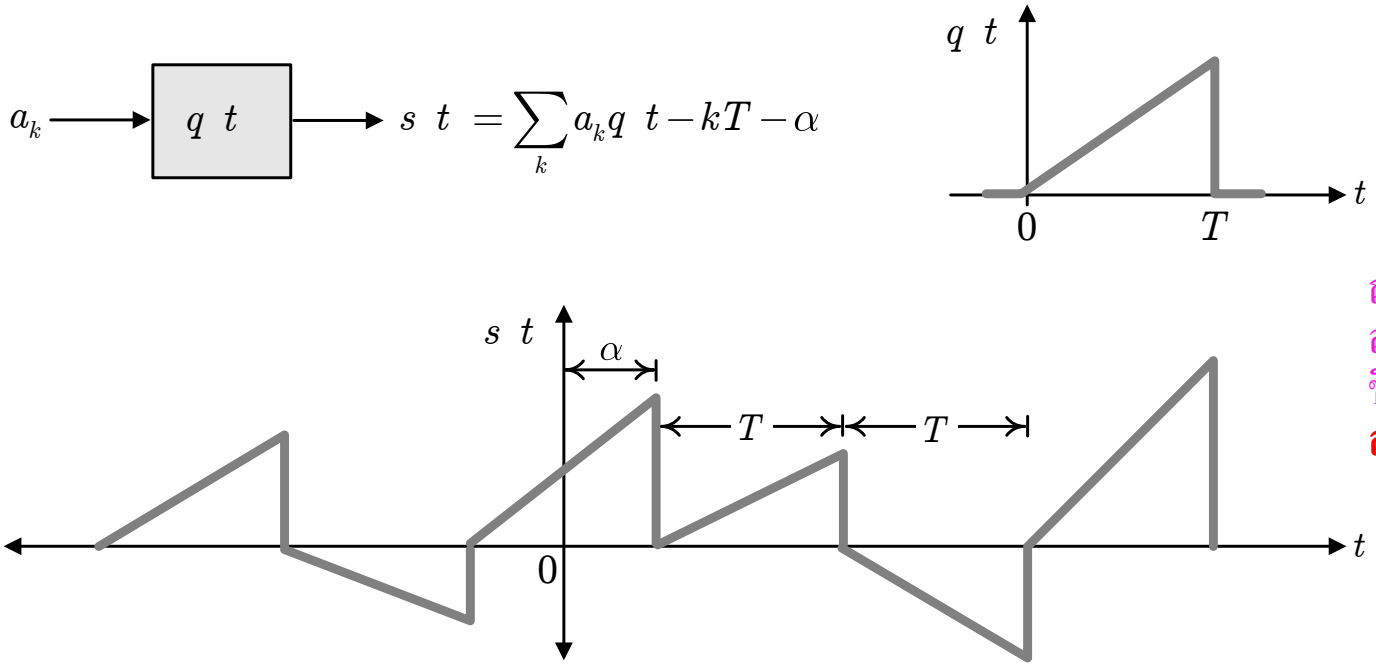
สรุป

- ระบบ PPM ⇒ ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (มากกว่าระบบ PWM)
- ข่าวสารที่ส่งในระบบ PWM และ PPM แฝงอยู่ในตำแหน่งสัมพัทธ์ของสัญญาณพัลส์ที่ถูกกลำ
  - **ทนทาน**ต่อสัญญาณรบกวนแบบบวก (additive noise) ซึ่งจะลดทอนเฉพาะแอมพลิจูดของสัญญาณ
- ระบบ PWM และ PPM มีสมรรถนะในรูปของอัตราข้อผิดพลาดบิต (BER) ดีกว่าระบบ PAM

การกล้ำแอมพลิจูดของพัลส์ (PAM)

วิธีการผสมสัญญาณระหว่างข้อมูลแซมเปิล a_k กับสัญญาณพัลส์ $q(t)$ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณแอนะล็อกที่เรียกกันว่า**สัญญาณ PAM**

$$s\ t\ =\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k q\ t-kT-\alpha$$



ถ้า q(t) มีค่ามากกว่า T วินาที ⇒ สัญญาณ PAM มีรูปร่างผิดเพี้ยน ซึ่งเป็นผลมาจากเกิด**การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์** (ISI)

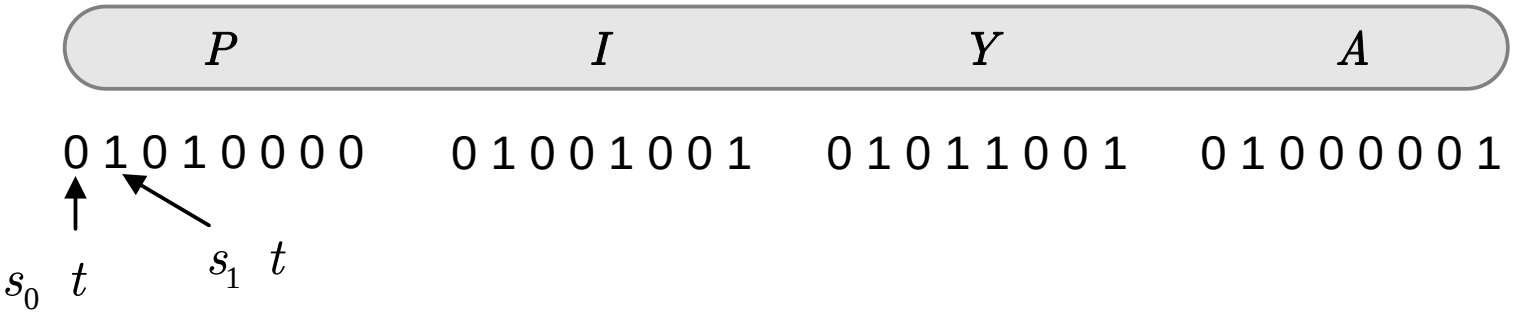
การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบดิจิทัล

- ถ้านำข้อมูลไบนารีที่ผ่านการแจงหน่วยและผ่านการเข้ารหัสพีซีเอ็ม มาทำการกล้ำสัญญาณพัลส์ จะได้ผลลัพธ์ที่เรียกว่ารูปคลื่นพีซีเอ็ม (PCM waveform) หรือ**รหัสไลน์โค้ด** (line code)

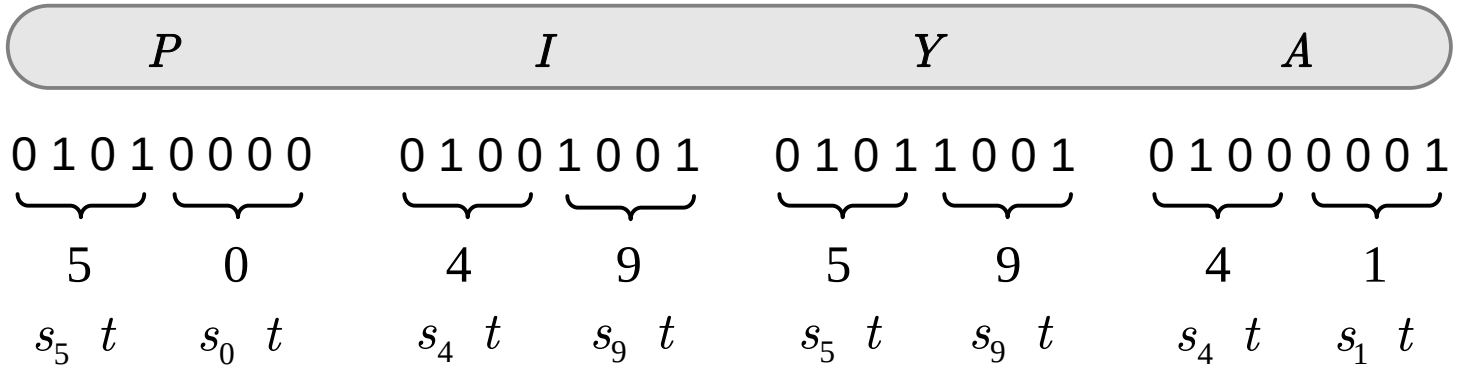
- ถ้านำข้อมูลไบนารีมาจัดกลุ่มให้เป็น**สัญลักษณ์** (symbol) ที่ประกอบด้วยข้อมูล $m = \lceil \log_2 M \rceil$ บิต เมื่อ $\lceil x \rceil$ คือเลขจำนวนเต็มบวกน้อยสุดที่ $\geq x$ และ M คือจำนวนสัญลักษณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการส่งข้อมูล
  - นำสัญลักษณ์เหล่านี้ไปกล้ำสัญญาณกับขบวนสัญญาณพัลส์ ก็จะได้ผลลัพธ์ที่เรียกว่า**การกล้ำสัญญาณพัลส์แบบเอ็ม-อารี** (M-ary pulse modulation)

Example

ระบบไบนารี $M = 2,\ m = 1$



ระบบ 16-ary $M = 16,\ m = 4$



ข้อมูลที่ส่งผ่านไปยังช่องสัญญาณจะมีความเร็วมากน้อยเพียงใดพิจารณาได้จาก**อัตราข้อมูล** (data rate) หรืออัตราบิตซึ่งนิยามโดย

$$R_b = \frac{1}{T_b} = \frac{m}{T_s} = \frac{\lceil \log_2(M) \rceil}{T_s}$$

มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (bps) โดยที่ $T_b = T_s / m$ คือคาบเวลาของบิต และ T_s คือคาบเวลาของสัญลักษณ์ (m บิต) มีหน่วยเป็นวินาที

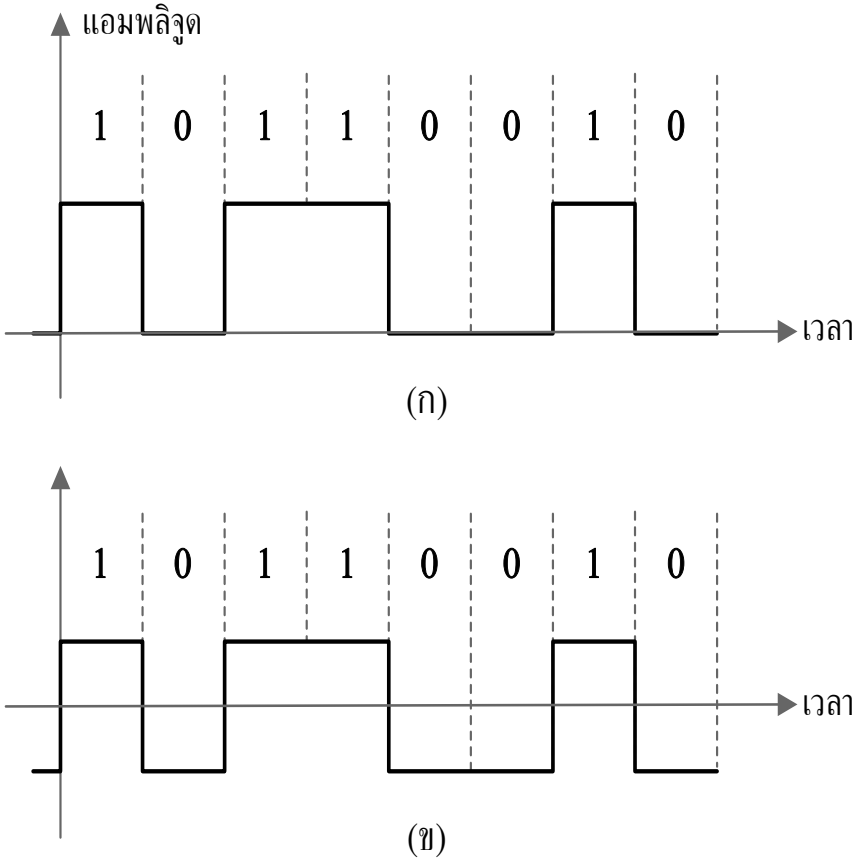
ตัวอย่าง กำหนดให้รูปภาพดิจิทัลมีขนาด 800×600 จุดภาพ (pixel) โดยที่แต่ละจุดภาพประกอบด้วยสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เมื่อแต่ละสีมีระดับค่าสีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 64 ระดับ ดังนั้นถ้าการส่งรูปภาพนี้ด้วยบริการสารสื่อประสม (MMS) ผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่ใช้เวลาทั้งหมด 10 วินาที จงคำนวณหาอัตราข้อมูลของรูปภาพนี้

วิธีทำ เนื่องจากแต่ละระดับค่าสีแทนด้วยข้อมูล $m = \lceil \log_2(64) \rceil = 6$ บิต และแต่ละจุดภาพจะใช้จำนวนบิตทั้งหมด $3 \times 6 = 18$ บิต ดังนั้นรูปภาพดิจิทัลนี้จะใช้จำนวนบิตทั้งหมด $800 \times 600 \times 18 = 8640000$ บิต และอัตราข้อมูลของรูปภาพนี้คือ $R_b = 8640000 / 10 = 864000$ bps

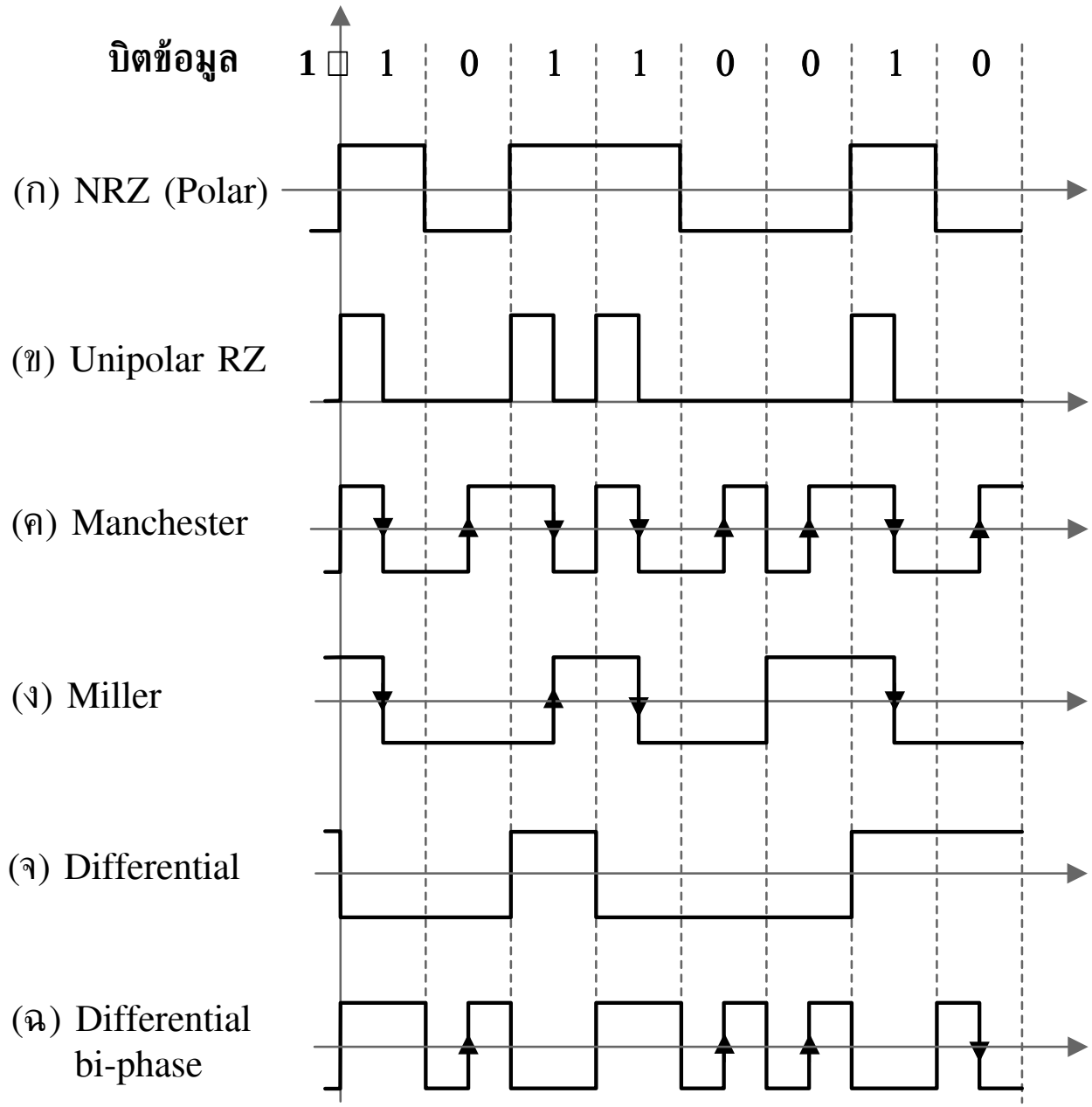
รหัสไลน์โค้ด

- ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ส่งข้อมูลดิจิทัลผ่านสายทองแดงในระบบโทรศัพท์
- นิยมใช้เข้ารหัสข้อมูล ก่อนส่งสัญญาณที่ได้เข้าไปในระบบสื่อสารดิจิทัล
- ถ้าพิจารณาจากขั้ว (polarity) ของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการแทนข้อมูล รหัสไลน์โค้ดจะจำแนกออกได้เป็น 3 แบบคือ
  - **Unipolar** บิต 1 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า ±V โวลต์ (+V หรือ –V อย่างใดอย่างหนึ่ง) และบิต 0 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์
  - **Polar** บิต 1 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า +V โวลต์ และบิต 0 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า –V โวลต์
  - **Bipolar** บิต 1 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า +V และ –V โวลต์สลับกันไป และบิต 0 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์
    - การส่งสัญญาณแบบ Polar และ Bipolar อาจถูกพิจารณาว่าเป็นแบบเดียวกันก็ได้

- การพิจารณาเลือกรหัสไลน์โค้ดแบบใดมาใช้งานมีดังนี้
  - **สัญญาณนาฬิกา** สัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสไลน์โค้ดที่ดีควรมีข่าวสารทางเวลา (timing information) ที่เพียงพอ
  - **องค์ประกอบกระแสตรง** (d.c. component) พิจารณาได้จากสเปกตรัมของสัญญาณ ณ จุดที่มีความถี่เป็นศูนย์
    - ข้อดีคือการออกแบบเครื่องรับ-ส่งทำได้ง่าย
    - ข้อเสียคือทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านระบบเชื่อมต่อของช่องสัญญาณที่ทำงานโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามเวลา เช่น หม้อแปลง เป็นต้น
  - **สเปกตรัมกำลังและแบนด์วิดท์** ควรมีความเหมาะสมกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของช่องสัญญาณ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก ISI ได้
    - พลังงานของสัญญาณที่ส่งก็ควรจำกัดอยู่ภายในแบนด์วิดท์ที่น้อยสุด

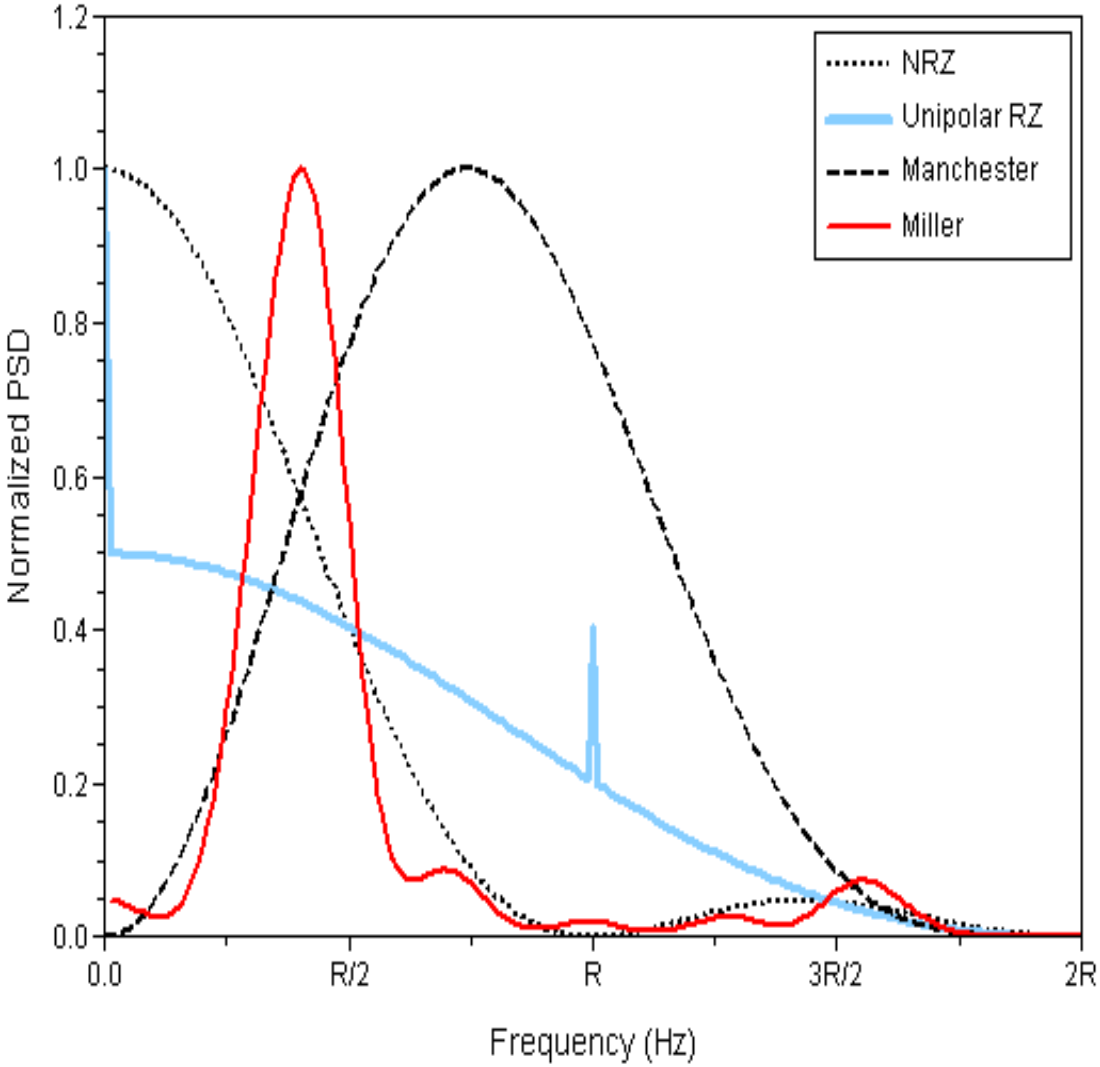


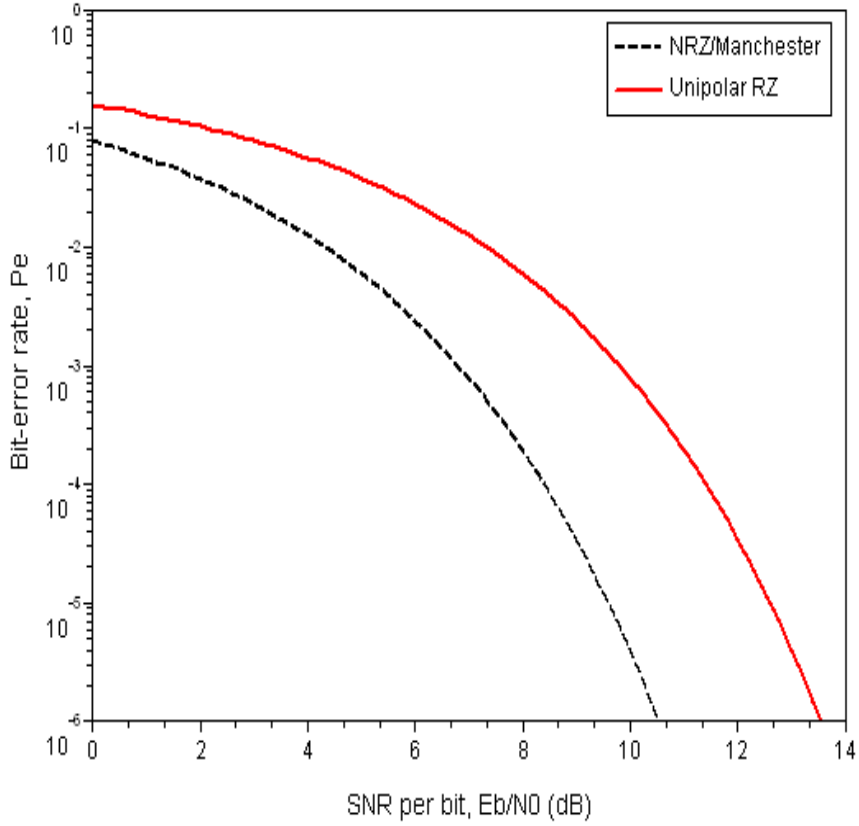
- **การตรวจหาข้อผิดพลาด** ควรมีความสามารถในการตรวจหาข้อผิดพลาด (error detection) ที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนในระบบ
  - ตรวจสอบเบื้องต้น ⇒ ช่วยทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในกรณีที่มีการตรวจพบข้อผิดพลาดในขั้นตอนอื่นๆ
- **ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาด** ควรมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน
  - วงจรถอดรหัสไลน์โค้ดสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่าง เช่น รหัส Differential มีความทนทานต่อความกำกวมของเฟส 180° (phase ambiguity)
- **ความคล่องตัว** ต้องรองรับการเข้ารหัสลำดับข้อมูลไบนารีได้ทุกรูปแบบ
  - ถ้ามีรูปแบบข้อมูลบางแบบที่ระบบไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในสัญญาณที่จะส่งไปยังปลายทาง รหัสไลน์โค้ดนั้นก็ควรมีความสามารถในการแทนรูปแบบข้อมูลที่ไม่ต้องการนั้นให้เป็นรูปแบบข้อมูลอื่นที่ระบบยอมรับได้


บิตข้อมูล
1 1 0 1 1 0 0 1 0
(ก) NRZ (Polar)
(ข) Unipolar RZ
(ค) Manchester
(ง) Miller
(จ) Differential
(ฉ) Differential bi-phase

รหัส Non-Return-to-Zero (NRZ)

- หมายถึงรหัส NRZ-L (level) หรือ Polar NRZ ⇒ มี 2 ระดับสัญญาณคือ $+V$ หรือ $-V$ โวลต์ โดยที่บิต 1 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า $+V$ โวลต์ และบิต 0 แทนด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า $-V$ โวลต์ ตลอดคาบเวลาของแต่ละบิต
- ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ NRZ มีค่าเท่ากับ $G_{\text{NRZ}}(f) = V^2 T \,\text{sinc}^2(\pi f T)$
- ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดของระบบ P_e มีค่าเท่ากับ $P_{e,\text{NRZ}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
- **ข้อดี**คือต้องการแบนด์วิดท์น้อย (ประมาณ R เฮิรตซ์) มีความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดต่ำ และไม่มีองค์ประกอบกระแสตรง (เมื่อพิจารณาจากลำดับข้อมูลที่มีบิตข้อมูลจำนวนมาก)
- **ข้อเสีย**คือไม่มีความสามารถในการตรวจหาข้อผิดพลาด, ไม่มีสัญญาณนาฬิกาในตัวเอง (ช่วงเวลาที่มีบิต 0 หรือบิต 1 ติดต่อกันหลายบิต ก็อาจทำให้เกิดการสูญเสียการประสานเวลาได้), และต้องใช้แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสองตัวในการสร้างสัญญาณ NRZ


NRZ
Unipolar RZ
Manchester
Miller
Normalized PSD
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0
R/2
R
3R/2
2R
Frequency (Hz)


NRZ/Manchester
Unipolar RZ
Bit-error rate, Pe
SNR per bit, Eb/N0 (dB)
0
2
4
6
8
10
12
14

รหัส Unipolar RZ

- บิต 1 แทนด้วยแรงดันไฟฟ้า $+V$ โวลต์ในช่วงครึ่งแรกและ 0 โวลต์ในช่วงครึ่งหลังของคาบเวลาของบิต 1 และบิต 0 แทนด้วยแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์ตลอดคาบเวลาของบิต 0
- ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ Unipolar RZ มีค่าเท่ากับ

$$G_{\text{Unipolar RZ}}(f) = \frac{V^2 T}{16}\text{sinc}^2(\pi f T/2) + \frac{V^2}{4\pi^2}\left[\frac{\pi^2}{4}\delta(f) + \sum_{n=-\infty}^{\infty}\frac{\delta\left(f-(2n+1)R\right)}{(2n+1)^2}\right]$$

- ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดของระบบมีค่าเท่ากับ $P_{e,\text{Unipolar RZ}} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$
- **ข้อดีคือ** วงจรเข้ารหัสทำได้ง่าย (แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงตัวเดียว), การกู้สัญญาณเวลาทำได้ง่าย
- **ข้อเสียคือ** มีองค์ประกอบกระแสตรงสูง, อาจเกิดการสูญเสียการประสานเวลาได้ (ถ้ามีบิต 0 ติดกันจำนวนมาก), ต้องการแบนด์วิทด์สูง ($\approx 2R$ เฮิรตซ์), ไม่มีความสามารถในการตรวจหาข้อผิดพลาด, และความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดสูงเมื่อเทียบกับ NRZ หรือ Manchester

รหัส Manchester

- บางครั้งเรียกว่ารหัส bi-phase หรือ split-phase
- มีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ ณ จุดกึ่งกลางของคาบเวลาในแต่ละบิตข้อมูล โดยบิต 1 แทนด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีแรงดันไฟฟ้า $+V$ โวลต์ในช่วงครึ่งแรก และ $-V$ โวลต์ในช่วงครึ่งหลังของคาบเวลาของบิต ในขณะที่บิต 0 แทนด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีแรงดันไฟฟ้า $-V$ โวลต์ในช่วงครึ่งแรกและ $+V$ โวลต์ในช่วงครึ่งหลังของคาบเวลาของบิต
- ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง $G_{\text{Manchester}}(f) = V^2 T \,\text{sinc}^2(\pi f T/2)\sin^2(\pi f T/2)$
- ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดคือ $P_{e,\text{Manchester}} = P_{e,\text{NRZ}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
- **ข้อดี**คือ ไม่มีองค์ประกอบกระแสตรง, การกู้สัญญาณเวลาทำได้ง่าย (มีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ ณ ทุกจุดกึ่งกลางของบิต), ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาดต่ำ (เหมือน NRZ)
- **ข้อเสีย**คือ ต้องการแบนด์วิทด์สูง ($\approx 2R$) และไม่มีความสามารถในการตรวจหาข้อผิดพลาด

รหัส Miller

- บิต 1 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ (จาก $+V$ โวลต์เป็น $-V$ โวลต์ หรือกลับกัน) ณ จุดกึ่งกลางของคาบเวลาของบิต และบิต 0 หมายถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ
  - ถ้ามีบิต 0 ติดกัน ระดับสัญญาณของบิต 0 ที่ตามหลังมาแต่ละตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ณ ตอนเริ่มต้นของคาบเวลาของบิต 0 นั้นๆ
- รหัส Miller เป็นรหัสที่มีหน่วยความจำ
- ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังมีค่าเท่ากับ

$$G_{\text{Miller}}(f) = \frac{V^2 T}{2(\pi f T)^2 (17 + 8\cos(2\pi f T))} \{23 - 2\cos(\pi f T) - 22\cos(2\pi f T) - 12\cos(3\pi f T) + 5\cos(4\pi f T) + 12\cos(5\pi f T) + 2\cos(6\pi f T) - 8\cos(7\pi f T) + 2\cos(8\pi f T)\}$$

- **ข้อดี**คือต้องการแบนด์วิทด์ต่ำ ($\approx R$ เฮิรตซ์), มีองค์ประกอบกระแสตรงน้อย, การกู้สัญญาณเวลาทำได้ง่าย, ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาด P_e ใกล้เคียงกับรหัสไลน์โค้ดทั่วไป
- **ข้อเสีย**คือ ไม่มีความสามารถในการตรวจหาข้อผิดพลาด

❑ เปรียบเทียบคุณสมบัติของรหัสไลน์โค้ดที่สำคัญ

รหัสไลน์โค้ด	องค์ประกอบกระแสตรง	ความต้องการแบนด์วิดท์	การตรวจหาข้อผิดพลาด	การกู้สัญญาณเวลา	ความน่าจะเป็นของข้อผิดพลาด
Polar NRZ	ต่ำ	R	ไม่มี	Poor	ต่ำ
Unipolar RZ	สูง	$2R$	ไม่มี	Good	สูง
Manchester	ต่ำ	$2R$	ไม่มี	Best	ต่ำ
Miller	ต่ำ	$\approx R$	ไม่มี	Best	ต่ำ

หมายเหตุ Poor (เกิดปัญหา ถ้ามีบิต 0 หรือบิต 1 ติดกันจำนวนมาก), Good (เกิดปัญหา ถ้ามีบิต 0 ติดกันจำนวนมาก), และ Best (ไม่มีปัญหาเรื่องการกู้สัญญาณเวลา)

❑ **หมายเหตุ** การตัดสินใจว่าจะนำรหัสไลน์โค้ดใดมาใช้งาน ควรคำนึงถึงลักษณะของแต่ละงานประยุกต์และปัจจัยต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้น