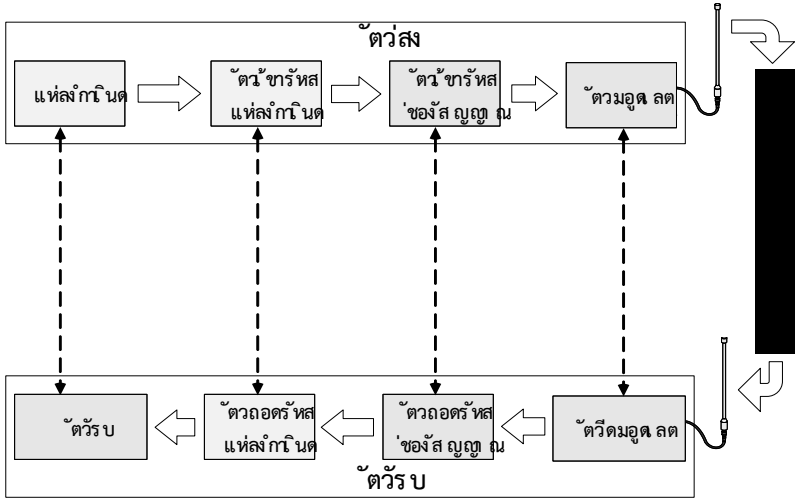
เทคนิคการเข้ารหัสสัญญาณ

รศ.ดร.ธนภัทร์ อนุศาสน์อมรกุล

Week 5

การสื่อสารไร้สาย



ส่วนประกอบของการสื่อสารไร้สาย

- แหล่งกำเนิด (Source)
  - สร้างข้อมูลสำหรับการส่ง เช่น เสียง ข้อมูลการพิมพ์บนแป้นพิมพ์ อื่นๆ
- ตัวเข้ารหัสแหล่งกำเนิด (Source encoder)
  - ตัดการเข้ารหัสตัวอักษรที่ฟุ่มเฟือยและมีประสิทธิภาพดีขึ้น
  - เช่น ในภาษาอังกฤษ เราอาจเข้ารหัสตัวอักษร e โดยใช้บิตจำนวนน้อยกว่าบิตที่แทนตัวอักษร q โดยใช้ Vocoder
- ตัวเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel encoder)
  - เพิ่มบิตเข้าไปในบิตของตัวส่งเพื่อที่จะกู้คืนได้จากความผิดพลาดในช่องสัญญาณที่อาจเกิดขึ้น
- ตัวมอดูเลต (Modulator)
  - แปลงการเข้ารหัสบิตให้เป็นสัญญาณสำหรับส่งเข้าไปในช่องสัญญาณ
- เสาอากาศ (Antenna)
  - ตัวแปลงสัญญาณสำหรับเปลี่ยนสัญญาณที่ส่งไปในสายให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสื่อที่ไม่มีขอบเขต หรือในทางกลับกัน
- ช่องสัญญาณ (Channel)
  - นำสัญญาณ แต่ปกติจะทำให้เกิดการผิดรูปของสัญญาณได้
- ตัวรับ (Receiver)
  - ทำย้อนกลับจากที่ตัวส่งทำ

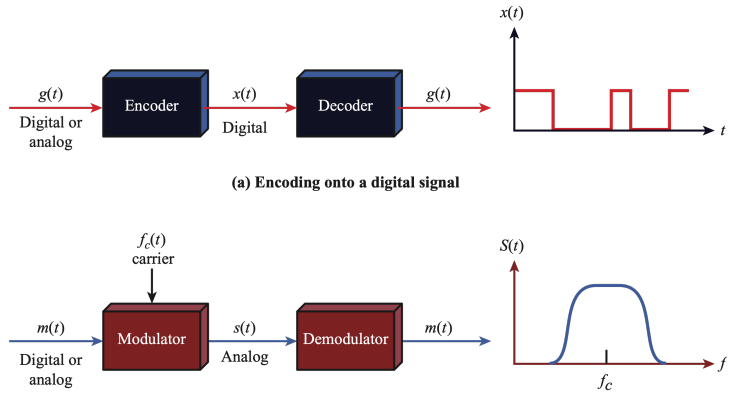
เหตุผลของการเลือกเทคนิคการเข้ารหัส

- ข้อมูลดิจิทัล สัญญาณดิจิทัล
  - อุปกรณ์มีความซับซ้อนและแพงน้อยกว่าอุปกรณ์แปลงจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
- ข้อมูลแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัล
  - ใช้การส่งดิจิทัลและอุปกรณ์สวิทซ์ชิงสมัยใหม่ได้

เหตุผลของการเลือกเทคนิคการเข้ารหัส

- ข้อมูลดิจิทัล สัญญาณแอนะล็อก
  - สื่อที่ใช้ส่งบางชนิดสามารถแพร่กระจายได้เพียงสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น
  - เช่น สายเคเบิ้ลใยแก้วนำแสง และ สื่อที่ไม่มีการนำ (ไร้สาย)
- ข้อมูลแอนะล็อก สัญญาณแอนะล็อก
  - ข้อมูลแอนะล็อกในรูปแบบของไฟฟ้าสามารถส่งได้ง่ายและถูกกว่า
  - สามารถทำการส่งสัญญาณเสียงผ่านสายที่ใช้ส่งเสียงได้

Encoding and Modulation Techniques



เกณฑ์การเข้ารหัสสัญญาณ

- อะไรที่บ่งบอกความสำเร็จของตัวรับอยู่ที่สัญญาณที่รับเข้ามามีการตีค่าได้
  - อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)
  - อัตราการส่งข้อมูล (Data rate)
  - แบนด์วิดท์ (Bandwidth)
- การเพิ่มขึ้นในอัตราส่งข้อมูลทำให้อัตราบิตผิดพลาด (bit error rate) เพิ่มขึ้น
- การเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ทำให้อัตราบิตผิดพลาดลดลง
- การเพิ่มขึ้นของแบนด์วิดท์ ทำให้อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น

คำที่สำคัญของการส่งข้อมูล

คำศัพท์	หน่วย	ความหมาย
ข้อมูล (Data)	บิต	ไบนารี 1 หรือ 0
อัตราการส่งข้อมูล (Data rate)	บิตต่อวินาที (bps)	อัตราที่ข้อมูลถูกส่ง
สัญลักษณ์ (Symbol)	ดิจิทัล – เป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูดคงที่ แอนะล็อก – เป็นพัลส์ของความถี่ มุมเฟส และแอมพลิจูดที่คงที่	ส่วนของสัญญาณที่จองช่วงเวลาที่สั้นที่สุดของรหัสสัญญาณ
อัตราการส่งสัญญาณ หรือ อัตราการมอดูเลต (Baud rate)	สัญลักษณ์ต่อวินาที (baud หรือ symbols per second)	อัตราที่สัญลักษณ์ถูกส่ง

ปัจจัยที่ใช้ในการเปรียบเทียบรูปแบบการเข้ารหัส

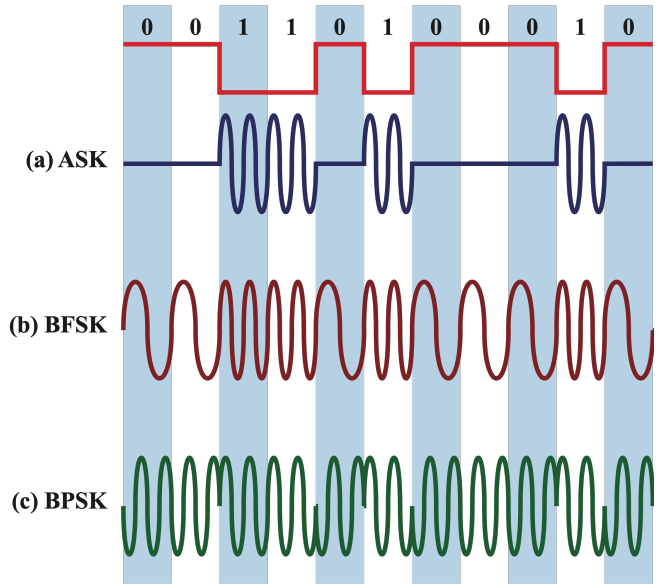
- สเปกตรัมของสัญญาณ
  - ถ้าไม่มีส่วนประกอบ (component) ของความถี่สูง จะทำให้แบนด์วิดท์น้อยลงสำหรับการส่ง
  - ถ้าไม่มีส่วนประกอบของกระแสตรง เป็นไปได้ที่จะใช้ AC coupling ผ่านตัวหม้อแปลง เพื่อให้มีการแยกกันของสัญญาณและลดสัญญาณรบกวน
  - Transfer function ของช่องสัญญาณจะแย่ที่ขอบใกล้ๆ กับแถบสัญญาณ ดังนั้นจึงควรส่งสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของแบนด์วิดท์ของการส่ง
- จังหวะเวลา
  - ความง่ายของการหาจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของแต่ละบิตอยู่ที่ใดในสัญญาณที่รับมา

ปัจจัยที่ใช้ในการเปรียบเทียบรูปแบบการเข้ารหัส

- การแทรกสอดของสัญญาณและความทนทานต่อสัญญาณรบกวน
  - ความสามารถของการเข้ารหัสในขณะที่มีสัญญาณรบกวน
- ราคาและความซับซ้อน
  - การอยากได้อัตราการส่งสัญญาณที่มากกว่าเพื่อให้ได้มาซึ่งอัตราการส่งข้อมูลที่ต้องการ ทำให้ราคาแพงกว่า

เทคนิคพื้นฐานของการเข้ารหัส

- ข้อมูลดิจิทัล เป็นสัญญาณแอนะล็อก
  - การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด Amplitude-shift keying (ASK)
    - แอมพลิจูดเปลี่ยนบนความถี่คลื่นพาห์
  - การมอดูเลตเชิงเลขทางความถี่ Frequency-shift keying (FSK)
    - ความถี่เปลี่ยนบนความถี่คลื่นพาห์
  - การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส Phase-shift keying (PSK)
    - เฟสของสัญญาณพาห์มีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับข้อมูล



Amplitude-shift keying

- หนึ่งค่าของไบนารีจะถูกแทนด้วยสัญญาณพาห์ ที่มีความถี่คงที่
- อีกหนึ่งค่าของไบนารี จะถูกแทนด้วยการไม่มีสัญญาณพาห์

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary 1} \\ 0 & \text{binary 0} \end{cases}$$

  - เมื่อสัญญาณพาห์ คือ $A\cos(2\pi f_c t)$

Amplitude-shift keying

- มีผลกระทบได้ง่ายสำหรับการเปลี่ยนแปลงการขยายอย่างกระทันหัน
- เป็นเทคนิคการมอดูเลตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
- ในสายโทรศัพท์ สามารถทำได้สูงสุดเพียง 1200 bps
- ใช้ในการส่งข้อมูลดิจิทัลไปบนสายใยแก้วนำแสง

Binary frequency shift keying (BFSK)

- ตัวเลขไบนารี 2 ตัว ถูกแทนที่โดยความถี่ 2 ความถี่ที่ใกล้กับคลื่นพาห์

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_1 t) & \text{binary 1} \\ A\cos(2\pi f_2 t) & \text{binary 0} \end{cases}$$

โดย f_1 และ f_2 คือค่าความถี่ที่กำหนดขึ้นจากความถี่คลื่นพาห์ f_c โดยห่างเท่ากันแต่มีค่าตรงข้ามกัน

Binary frequency shift keying (BFSK)

- มีผลกระทบต่อความผิดพลาดที่น้อยกว่า ASK
- ในสายโทรศัพท์ สามารถทำได้สูงสุดเพียง 1200 bps
- ทั่วไปใช้กับการส่งสัญญาณวิทยุที่ความถี่สูง (3-30 MHz)
- สามารถใช้ได้กับความถี่ที่สูงกว่าใน LAN ที่ใช้สายโคแอ็กซ์

Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- ความถี่ที่ใช้มีมากกว่า 2 ความถี่
- ใช้ประสิทธิภาพของแบนด์วิดท์มากกว่า แต่มีโอกาสผิดพลาดมากกว่า

$$s_i(t) = A\cos 2\pi f_i t \qquad 1 \le i \le M$$

- $f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$
- f_c = ความถี่คลื่นพาห์
- f_d = ความแตกต่างของความถี่
- M = จำนวนความแตกต่างของส่วนย่อยของสัญญาณ = 2^L
- L = จำนวนบิตต่อส่วนย่อยของสัญญาณ

Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- เพื่อที่จะได้อัตราส่งข้อมูลที่ต้องการของบิตสตรีมที่เข้ามา แต่ละส่วนของสัญญาณขาออกจะถูกดึงเวลาไว้
  - $T_s = L * T$ seconds
    - โดยที่ T คือ คาบของบิต (data rate = 1 / T)
    - T_s คือ คาบของสัญลักษณ์ (สัญญาณ)
- ดังนั้น หนึ่งสัญญาณขาออก จะเข้ารหัสจำนวน L บิต

Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

- จำนวนแบนด์วิดท์ที่ต้องการทั้งหมด

$$2\,M f_d$$

  - ความถี่ต่ำสุดที่จะแยกออกจากกันคือ

$$2 f_d = 1 / T_s$$

- ดังนั้น ตัวมอดูเลตจำเป็นต้องใช้แบนด์วิดท์

$$W_d = 2Mf_d = M / T_s$$

Multiple Frequency-Shift Keying (MFSK)

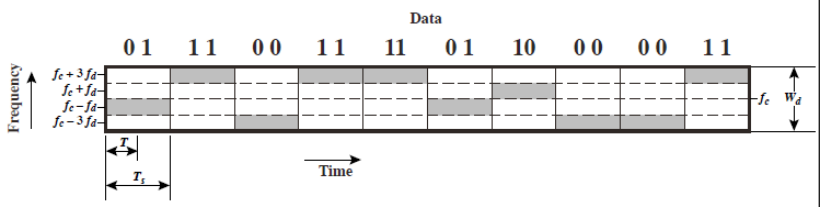


Figure 6.4 MFSK Frequency Use ($M = 4$)

โจทย์

- จงหาค่าความถี่ทั้งหมด ของ MFSK ที่มีความถี่คลื่นพาห์ 250 kHz และความถี่ต่าง 25 kHz โดยมีจำนวนระดับ 8 ระดับ

Phase-Shift Keying (PSK)

- Binary PSK (BPSK)
  - ใช้สองเฟสเพื่อแทนเลขไบนารี

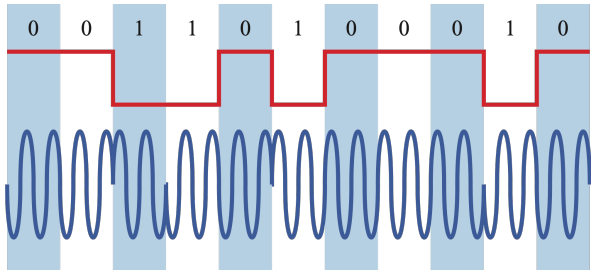
$$s(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 1 \\ A\cos(2\pi f_c t+\pi) & \text{binary } 0 \end{cases}$$

  - หรือ

$$s(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 1 \\ -A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary } 0 \end{cases}$$

Phase-Shift Keying (PSK)

- Differential PSK (DPSK)
  - เฟสจะเปลี่ยนโดยการอ้างอิงจากบิตก่อนหน้านี้
    - ไบนารี 0 – สัญญาณมีเฟสเดียวกับเฟสของสัญญาณก่อน
    - ไบนารี 1 – สัญญาณมีเฟสตรงกันข้ามกับเฟสของสัญญาณก่อน

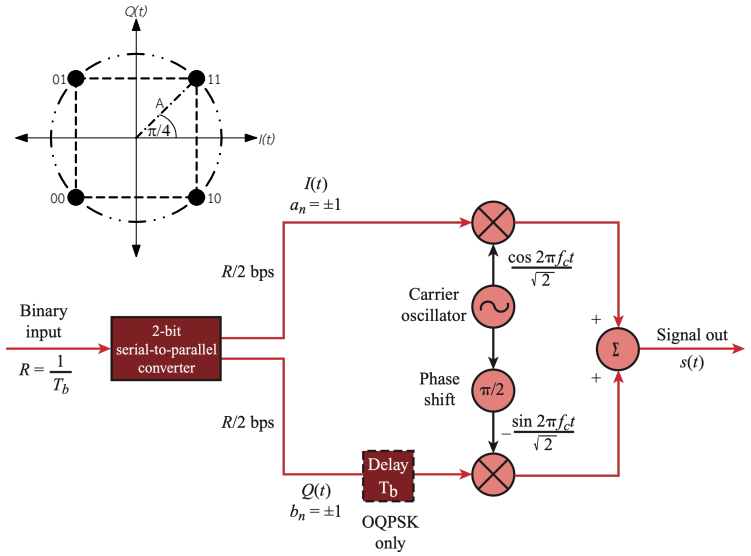


Phase-Shift Keying (PSK)

- Four-level PSK (QPSK)
  - แต่ละสัญลักษณ์ถูกแทนค่าได้มากกว่า 1 บิต

$$s(t)=\begin{cases} A\cos\left(2\pi f_c t+\frac{\pi}{4}\right) & 11 \\ A\cos\left(2\pi f_c t+\frac{3\pi}{4}\right) & 01 \\ A\cos\left(2\pi f_c t-\frac{3\pi}{4}\right) & 00 \\ A\cos\left(2\pi f_c t-\frac{\pi}{4}\right) & 10 \end{cases}$$

QPSK และ OQPSK Modulators



Phase-Shift Keying (PSK)

- Multilevel PSK
  - ใช้มุมเฟสหลายๆ มุม และแต่ละมุมมีมากกว่า 1 แอมพลิจูด อัตราการส่งสัญลักษณ์สามารถคำนวนได้จาก

$$D = \frac{R}{L} = \frac{R}{\log_2 M}$$

- D = อัตราการมอดูเลต หรือ baud rate (symbol/sec.)
- R = อัตราการส่งข้อมูล หรือ bit rate (bps)
- M = จำนวนระดับของสัญญาณ = 2^L
- L = จำนวนบิตต่อส่วนย่อยของสัญญาณ

ความสามารถ (performance)

- แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกมอดูเลต (B_T)
  - ASK, PSK $\quad B_T = (1+r)R$
  - FSK $\quad B_T = 2DF + (1+r)R$

R = อัตราบิต

- $0 < r < 1$; related to how signal is filtered
- $DF = f_2 - f_c = f_c - f_1$

ความสามารถ (performance)

- แบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกมอดูเลต (B_T)
  - MPSK

$$B_T = \left(\frac{1+r}{L}\right)R = \left(\frac{1+r}{\log_2 M}\right)R$$

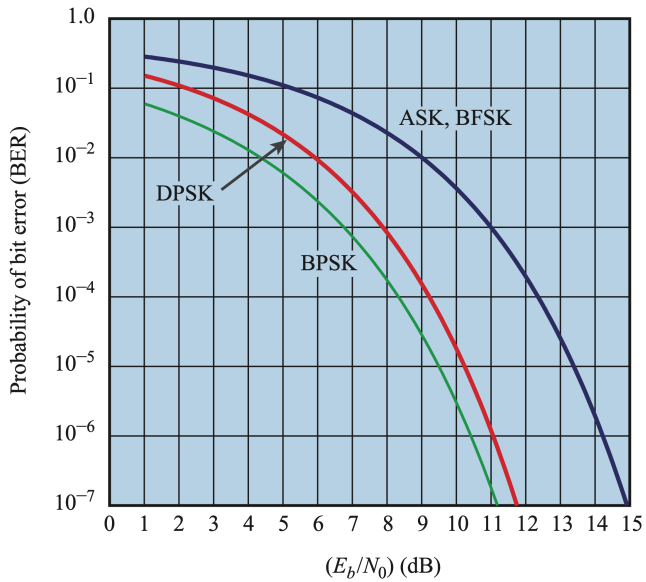
  - MFSK

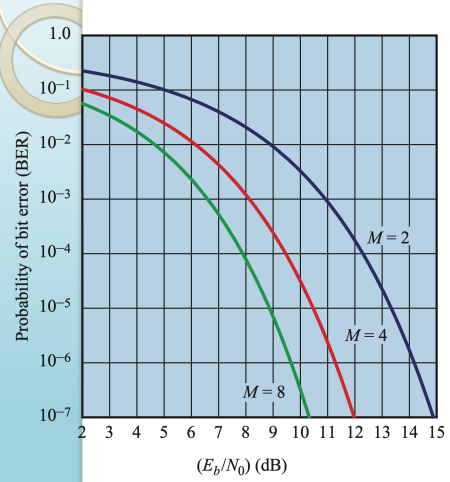
$$B_T = \left(\frac{(1+r)M}{\log_2 M}\right)R$$

- M = จำนวนความแตกต่างของส่วนย่อยของสัญญาณ = 2^L
- L = จำนวนบิตต่อส่วนย่อยของสัญญาณ
- Bandwidth Efficiency = Spectral Efficiency = R / BW

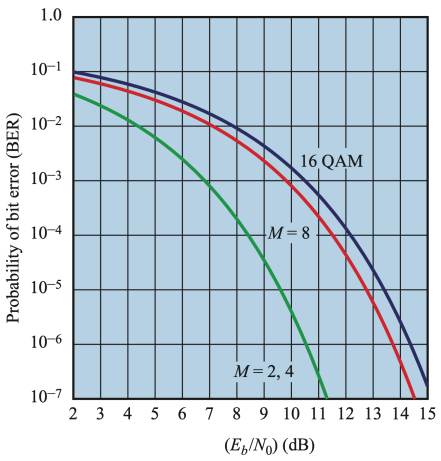
Table 6.2 Bandwidth Efficiency (R/B_T) for Various Digital-to-Analog Encoding Schemes

	$r = 0$	$r = 0.5$	$r = 1$
ASK	1.0	0.67	0.5
FSK	0.5	0.75	1.00
Multilevel FSK			
$M = 4, L = 2$	0.5	0.75	1.00
$M = 8, L = 3$	0.375	0.56	0.75
$M = 16, L = 4$	0.25	0.375	0.5
$M = 32, L = 5$	0.156	0.234	0.312
PSK	1.0	0.67	0.5
Multilevel PSK			
$M = 4, L = 2$	2.00	1.33	1.00
$M = 8, L = 3$	3.00	2.00	1.50
$M = 16, L = 4$	4.00	2.67	2.00
$M = 32, L = 5$	5.00	3.33	2.50





(a) Multilevel FSK (MFSK)



(b) Multilevel PSK (MPSK) and 16 QAM

โจทย์

- จงหาค่าประสิทธิภาพของแบนด์วิดท์ สำหรับ SNR = 12 dB ที่ BER 10^{-7} ของ ASK , FSK และ PSK

Quadrature Amplitude Modulation

- QAM เป็นการรวมกันของ ASK และ PSK
  - สองสัญญาณที่แตกต่างกัน ถูกส่งพร้อมกันในความถี่พาห์เดียวกัน

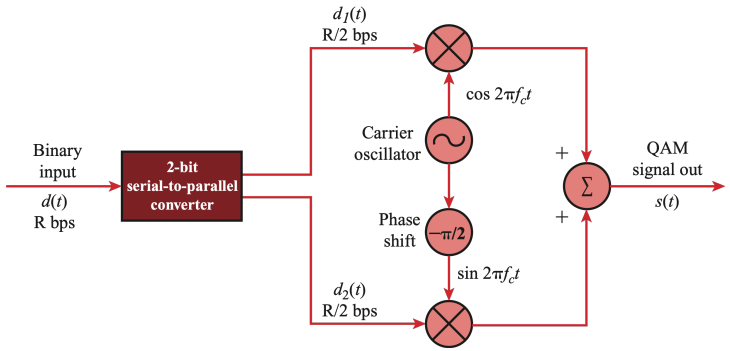
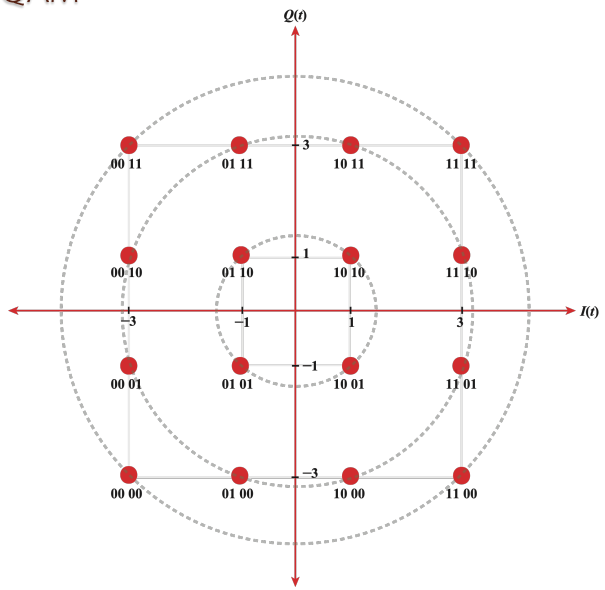
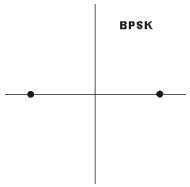


Figure 6.10 QAM Modulator

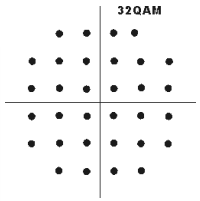
16 QAM

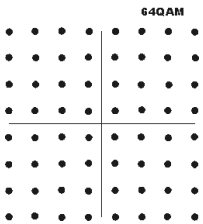


QAM



Constellation Diagrams





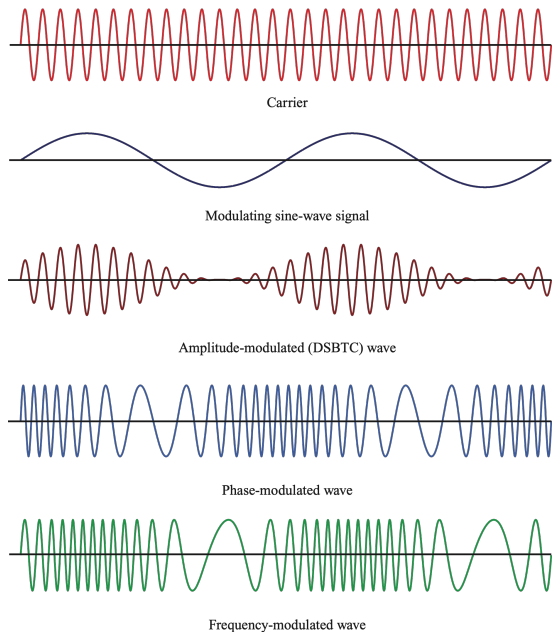
Modulation	Bits per symbol	Symbol Rate
BPSK	1	1 x bit rate
QPSK	2	1/2 bit rate
8PSK	3	1/3 bit rate
16QAM	4	1/4 bit rate
32QAM	5	1/5 bit rate
64QAM	6	1/6 bit rate

เหตุผลสำหรับการมอดูเลตทางแอนะล็อก

- การมอดูเลตของข้อมูลดิจิทัล
  - เมื่อมีเพียงอุปกรณ์ส่งแบบแอนะล็อกเท่านั้นที่ใช้ได้ เราต้องทำการแปลงจากดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
- การมอดูเลตของข้อมูลแอนะล็อก
  - ความถี่ที่สูงกว่าอาจจะจำเป็นเพื่อให้การส่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น
  - การทำมอดูเลชันเป็นการช่วยให้ทำ FDM (frequency division multiplexing) ได้

เทคนิคพื้นฐานของการเข้ารหัส

- ข้อมูลแอนะล็อก ไปเป็น สัญญาณแอนะล็อก
  - Amplitude modulation (AM)
  - Angle modulation
    - Frequency modulation (FM)
    - Phase modulation (PM)



Amplitude, Phase, and Frequency Modulation of a Sine-Wave Carrier by a Sine-Wave Signal

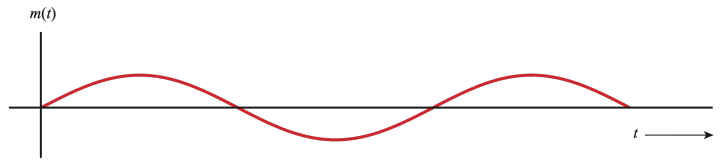
Amplitude Modulation

- Amplitude modulation

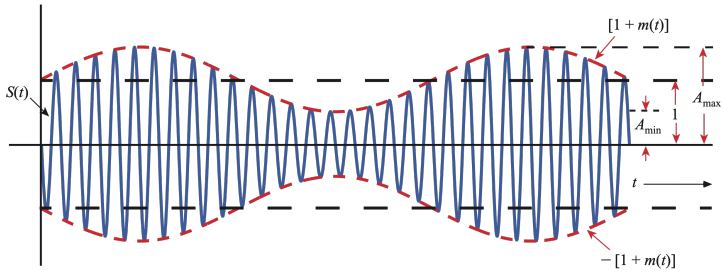
$$s(t) = [1 + n_a x(t)]\cos 2\pi f_c t$$

  - $\cos 2\pi f_c t$ = คลื่นพาห์
  - $x(t)$ = สัญญาณขาเข้า
  - n_a = modulation index
    - Ratio of amplitude of input signal to carrier
  - a.k.a. double sideband transmitted carrier (DSBTC)
- Bandwidth: $B_T = 2B$
  - B = แบนด์วิดท์ของสัญญาณต้นฉบับ หรือสัญญาณขาเข้า

สัญญาณ AM

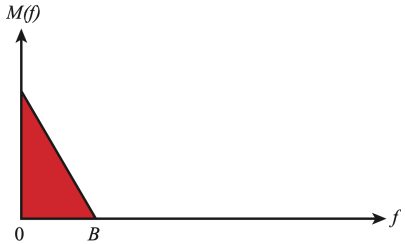


(a) Sinusoidal modulating wave

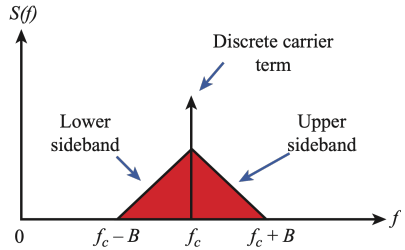


(b) Resulting AM Signal

สเปคตรัมของสัญญาณ AM



(a) Spectrum of a modulating signal



(b) Spectrum of an AM signal with carrier at f_c

Amplitude Modulation

- กำลังที่ใช้ส่ง (Transmitted power)

$$P_t = P_c\left(1 + \frac{n_a^{\,2}}{2}\right)$$

  - P_t = total transmitted power in $s(t)$
  - P_c = transmitted power in carrier

Single Sideband (SSB)

- สัญญาณที่แปรไปจาก AM คือ single sideband (SSB)
  - ส่งเฉพาะแถบสัญญาณเดียว
  - กำจัดสัญญาณและสัญญาณพาห์อีกด้านหนึ่ง
  - $B_T = B$
- ข้อดี
  - ใช้แบนด์วิดท์เพียงครึ่งเดียว
  - ใช้กำลังส่งน้อยกว่า
- ข้อเสีย
  - สัญญาณพาห์ที่โดนลดลงทำให้ไม่สามารถใช้เพื่อทำการซิงโครไนเซชันได้

Angle Modulation

- Angle Modulation

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

- Phase Modulation
  - เฟสเป็นสัดส่วนกับสัญญาณมอดูเลต

$$\phi(t) = n_p m(t)$$

    - n_p = phase modulation index

Angle Modulation

- Frequency modulation
  - การหาค่าของเฟส จะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณมอดูเลต

$$\phi'(t) = n_f m(t)$$

  - n_f = frequency modulation index

Angle Modulation

- เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง AM FM และ PM ในแง่ของแบนด์วิดท์
  - จะมีความถี่พาห์อยู่ตรงกลางเหมือนกัน
  - แต่จะมีขนาดที่มีความแตกต่างกัน
    - Angle modulation จะรวมเอา cos($\phi(t)$) ซึ่งจะทำให้เกิดช่วงกว้างของความถี่
  - ดังนั้น FM และ PM ต้องการแบนด์วิดท์ที่มากกว่าของ AM

Angle Modulation

- กฎของคาร์สัน (Carson's rule)

โดย

$$B_T = 2(\beta + 1)B$$

$$\beta = \begin{cases} n_p A_m & \text{for PM} \\ \dfrac{\Delta F}{B} = \dfrac{n_f A_m}{2\pi B} & \text{for FM} \end{cases}$$

- สูตรสำหรับ FM จะเป็น

$$B_T = 2\Delta F + 2B$$

พื้นฐานการเข้ารหัส

- ข้อมูลแอนะล็อก เป็น สัญญาณดิจิทัล
  - **การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์** - Pulse code modulation (PCM)
  - **การมอดูเลตแบบเดลตา** - Delta modulation (DM)

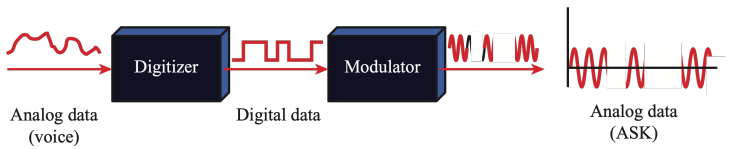


Figure 6.14 Digitizing Analog Data

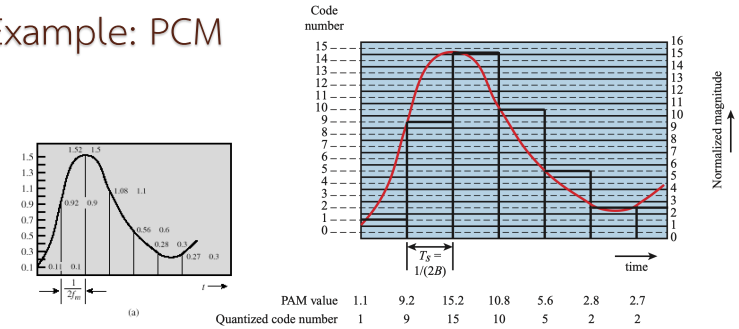
ข้อมูลแอนะล็อก เป็น สัญญาณดิจิทัล

- เมื่อข้อมูลแอนะล็อกต้องถูกแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล ข้อมูลดิจิทัล
  - สามารถส่งได้โดยใช้ NRZ-L
  - สามารถเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิทัลได้โดยใช้รหัสอื่นนอกจาก NRZ-L
  - สามารถแปลงเป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยใช้เทคนิคก่อนหน้านี้

Pulse Code Modulation (PCM)

- ใช้พื้นฐานของทฤษฎีการสุ่ม (Sampling)
- ตัวอย่างแอนะล็อกแต่ละจุด จะถูกให้ค่าเป็น 1 รหัสไบนารี
  - ตัวอย่างแอนะล็อก อ้างอิงจาก ตัวอย่างของ Pulse amplitude modulation (PAM)
- สัญญาณดิจิทัลประกอบด้วย บล็อกของ n บิต ซึ่งแต่ละตัวเลข n บิตก็คือค่าของแอมพลิจูดของพัลซ์ PCM

Example: PCM



Digit	Binary Equivalent	PCM waveform
0	0000	
1	0001	
2	0010	
3	0011	
4	0100	
5	0101	
6	0110	
7	0111	

Digit	Binary Equivalent	PCM waveform
8	1000	
9	1001	
10	1010	
11	1011	
12	1100	
13	1101	
14	1110	
15	1111	

(b)

Figure 6.15 Pulse-Code Modulation Example

Pulse Code Modulation (PCM)

- การทำควอนไทซ์กับสัญญาณพัลส์ PAM ทำให้สัญญาณต้นแบบจะเป็นแค่การประมาณเท่านั้น
- ทำให้เกิด สัญญาณรบกวนควอนไทซ์ (Quantizing noise)
- อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) สำหรับ สัญญาณรบกวนควอนไทซ์

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{dB}} = 20\log 2^n + 1.76\ \mathrm{dB} = 6.02n + 1.76\ \mathrm{dB}$$

- ดังนั้น แต่ละบิตที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่ม SNR ประมาณ 6 dB หรือ เป็นตัวคูณของ 4

ผลของการเข้ารหัสแบบไม่เป็นเส้นตรง

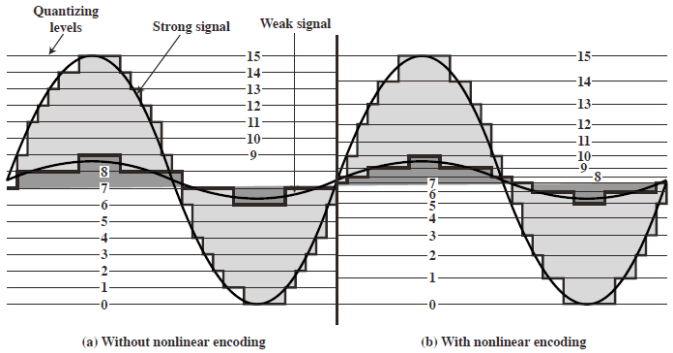


Figure 6.16 Effect of Nonlinear Coding

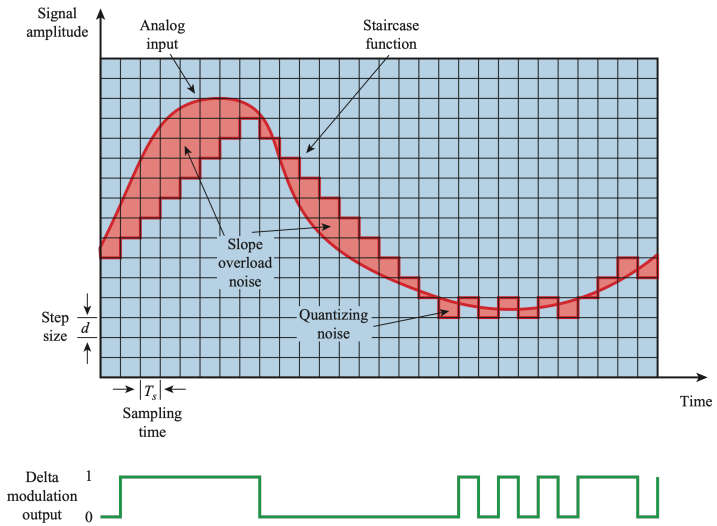
โจทย์

- ถ้าสัญญาณ PCM มีแบนด์วิดท์ 2,700 Hz ใช้ Sampling rate 7000 samples/sec.
  - SNR = 30 dB จงหาระดับของการทำ Quantization
  - จงหาอัตราการส่งข้อมูล

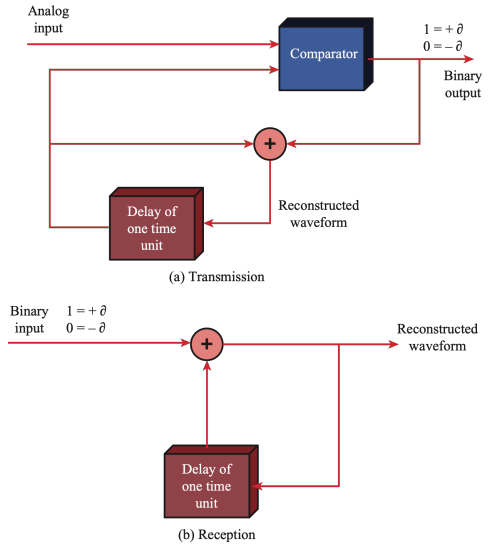
Delta Modulation (DM)

- อินพุตที่เป็นแอนะล็อกจะถูกประมาณด้วยฟังก์ชันขั้นบันได
  - จะเลื่อนขึ้นหรือลงทีละ 1 ระดับของควอนไทซ์เซชัน (δ) ในแต่ละช่วงที่สุ่มตัวอย่าง
- สายของบิต (bit stream) เป็นการประมาณจากสัญญาณแอนะล็อก (ไม่ใช่มาจากแอมพลิจูด)
  - 1 ถูกสร้างเมื่อฟังก์ชันนั้น <u>ขึ้น</u>
  - 0 ถูกสร้างเมื่อฟังก์ชันนั้น <u>ลง</u>

ตัวอย่าง Delta modulation



Delta modulation



Delta modulation

- สองตัวแปรที่สำคัญ
  - ขนาดของขั้นบันไดที่ถูกให้ในแต่ละค่าของไบนารี (δ)
  - อัตราการสุ่ม (sampling rate)
- ความถูกต้องสามารถเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มอัตราการสุ่ม
  - แต่ว่า การเพิ่มนี้จะทำให้อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นด้วย
- ข้อดีของ DM ที่เหนือกว่า PCM คือ ความง่ายในการใช้งาน

Model-based encoding and Vocoders

- PCM and DM above are types of *waveform encoders*
  - Seek to reproduce the sampled waveform
- The nature of the signal can also be encoded
  - For example, voice has particular characteristics
  - Pitch
  - Voiced sounds – m, n, b, etc.
  - Unvoiced sounds – c, k, t, etc.

Model-based encoding and Vocoders

- Linear Prediction Coding (LPC)
  - Estimate how the voice is producing the sound
- Code-excited Linear Prediction (CELP)
  - Create a *codebook* of typical LPC results
  - Transmit a digital signal of codebook indices
    - If the codebook is small, the data rate of the signal can be quite small
    - But larger codebooks produce better quality results since they match the voice more precisely
- LPC and CELP coders can produce rates of 1.2 kbps to 13 kbps

VIDEO CODING

- Video compression
  - Pictures may not change much frame-to-frame
    - So, just mainly encode the differences instead of the entire images
  - There may be redundancy inside each image as well
    - These redundant elements can be encoded as repetitions
- Video can be compressed down to 1-3 Mbps, even down to 64 kbps

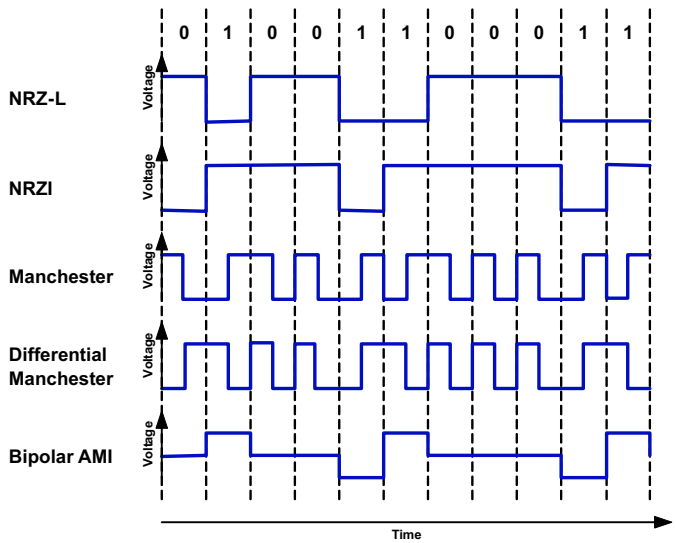
เหตุผลของการเติบโตของเทคนิคดิจิทัล

- การเติบโตในความนิยมใช้ของเทคนิคดิจิทัลสำหรับส่งข้อมูลแอนะล็อก
  - ใช้เครื่องทวนสัญญาณ (repeater) แทนที่จะใช้ เครื่องขยาย (amplifier)
    - ไม่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวน
  - ใช้ TDM แทนที่จะใช้ FDM
    - ไม่มี intermodulation noise
  - การแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำให้ใช้เทคนิคการสวิทช์ดิจิทัลมีประสิทธิภาพมากกว่า

ข้อมูลดิจิทัล เป็นสัญญาณดิจิทัล

- NRZ-L (Non-return to zero-level)
  - ถ้าบิตข้อมูลมีค่า 1 แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ แต่ถ้าบิตข้อมูลมีค่า 0 แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก
- NRZI (Non-return to zero Inverted)
  - วิธีนี้จะไม่สนใจว่าแรงดันไฟฟ้าจะเป็นบวก หรือลบ วิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ก็ต่อเมื่อบิตข้อมูลเป็น “1” เท่านั้น
- Manchester
  - มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางบิต แสดงถึงสัญญาณนาฬิกา
  - เปลี่ยนจาก Low เป็น High แสดงถึง บิต 1
  - เปลี่ยนจาก High เป็น Low แสดงถึง บิต 0
- Differential Manchester
  - มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นของบิต แสดงถึง บิต 0
  - ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเริ่มต้นของบิต แสดงถึง บิต 1
- Bipolar AMI
  - บิต 0 แสดงได้โดยไม่มีสัญญาณ
  - บิต 1 แสดงได้โดยพัลส์บวก หรือ พัลส์ลบสลับกัน

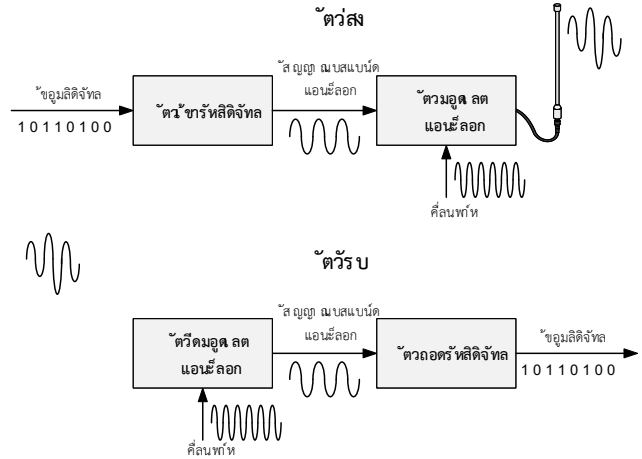
การเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัล



สรุป

ข้อมูล	สัญญาณ	เทคนิคในการเข้ารหัส	อุปกรณ์ที่ใช้	ระบบที่ใช้
ดิจิทัล	แอนะล็อก	- Amplitude shift keying (ASK) - Frequency shift keying (FSK) - Phase shift keying (PSK)	- โมเด็ม (Modem)	- Dial-up Internet access - Digital Subscriber Lin - เคเบิลโมเด็ม
แอนะล็อก	แอนะล็อก	- Amplitude modulation (AM) - Frequency modulation (FM)	- จูนเนอร์เครื่องรับวิทยุ (Radio tuner) - จูนเนอร์สำหรับโทรทัศน์ (TV tuner)	- โทรศัพท์ - วิทยุ FM และ AM - โทรทัศน์
แอนะล็อก	ดิจิทัล	- Pulse code modulation (PCM) - Delta modulation (DM)	- ตัวเข้ารหัสสัญญาณ (Codec)	- ระบบโทรศัพท์ดิจิทัล - ระบบดนตรี (Music systems)
ดิจิทัล	ดิจิทัล	- Non-return to zero-Level (NRZ-L) - Manchester, Differential Manchester - Bipolar-AMI	- ตัวเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัล (Digital encoder)	- เครือข่ายบริเวณเฉพาะที่

การสื่อสารไร้สายดิจิทัล



การสื่อสารไร้สายดิจิทัล คือ การส่งสัญญาณแอนะล็อกที่มีข้อมูลดิจิทัล ไม่ใช่การส่งสัญญาณดิจิทัล