



The Signals (Part II)

Paramate Horkaew

School of Computer Engineering
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology



Lecture Outline

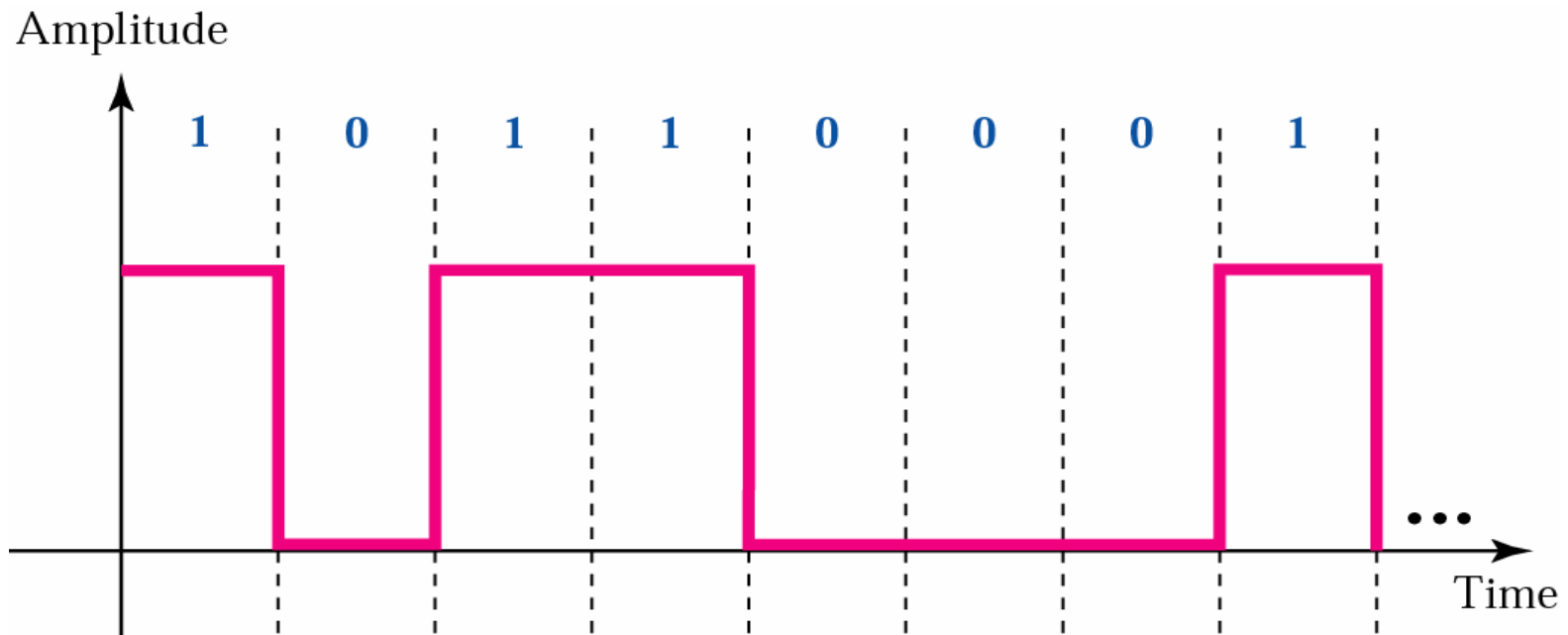
- Physical Layers
- Signals
 - Analog vs. Digital
 - Periodic vs. Non-periodic
 - Phase and Frequency
- Composite Signals
- Signal Spectrum and Bandwidth
- Digital Signals
- Analog vs. Digital
- Data Rate Limits
- Transmission Impairment



Digital Signals

หัวข้อที่ผ่านมา อธิบายการนำเสนอข้อมูลข่าวสารด้วยสัญญาณ **Analog**

สัญญาณ **Digital** สามารถใช้นำเสนอ **ข้อมูลข่าวสาร** ได้เช่นกัน โดยแทนเลข '1' ด้วยระดับแรงดัน ที่เป็นจำนวนจริงบวก และแทนเลข '0' ด้วยระดับแรงดันศูนย์ (Ground) – *Binary*





Bit Interval and Bit Rate

เนื่องจาก Digital Signal ในการสื่อสาร เป็นแบบ ไม่ซ้ำคาบ (Aperiodic) ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ โดยใช้ **ความถี่** และ **คาบเวลา** เหมือน Analog Signal ได้

สำหรับการสื่อสารในรูปแบบนี้ จะนิยามตัวแปรที่สมมูลกัน ได้แก่

- **Bit Interval**

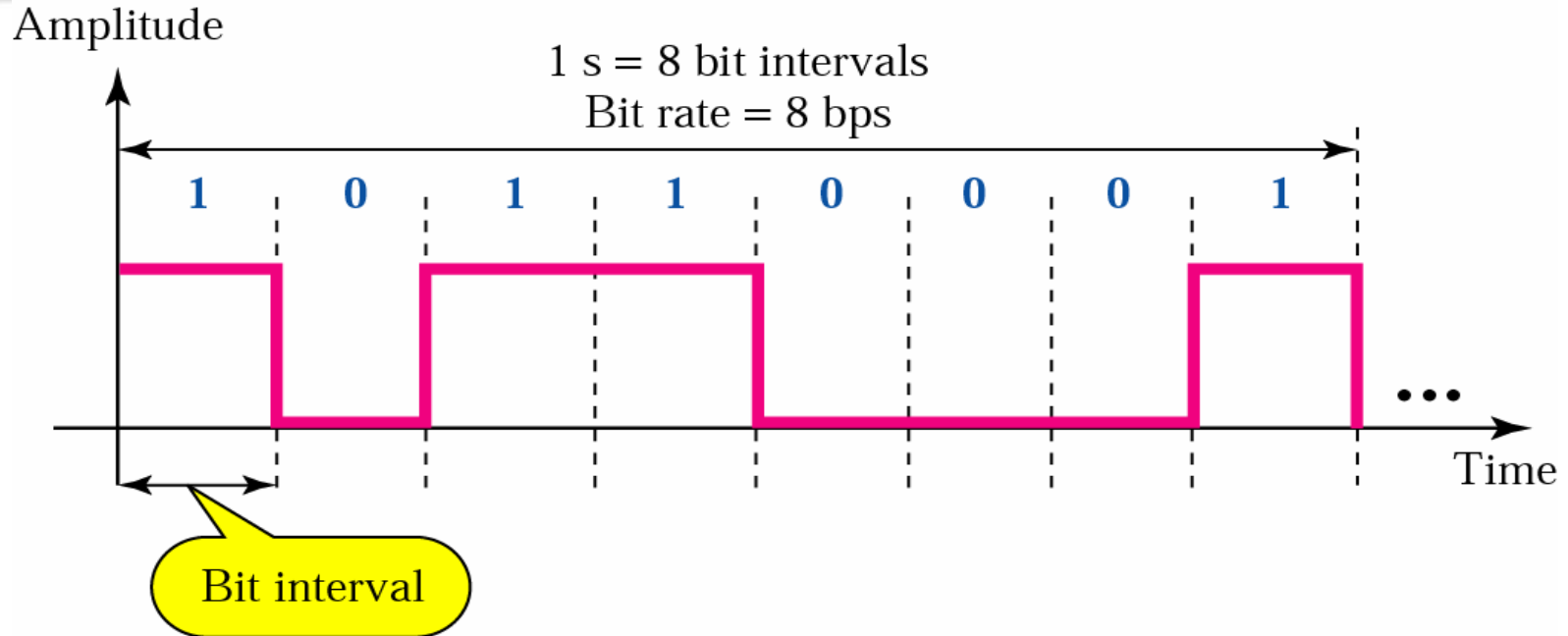
ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 บิต (วินาที – s) (สมมูลกับตัวแปรคาบเวลาใน สัญญาณแบบ Analog)

- **Bit Rate**

จำนวนของบิตข้อมูลที่สามารถส่งได้ภายในหนึ่งหน่วยเวลา (บิตต่อวินาที – bps) (สมมูลกับตัวแปรความถี่ในสัญญาณแบบ Analog)₄



Example



Example 6

สัญญาณดิจิทัลที่มี Bit Rate เท่ากับ 2 Kbps จะมี Bit Interval เท่ากับเท่าใด

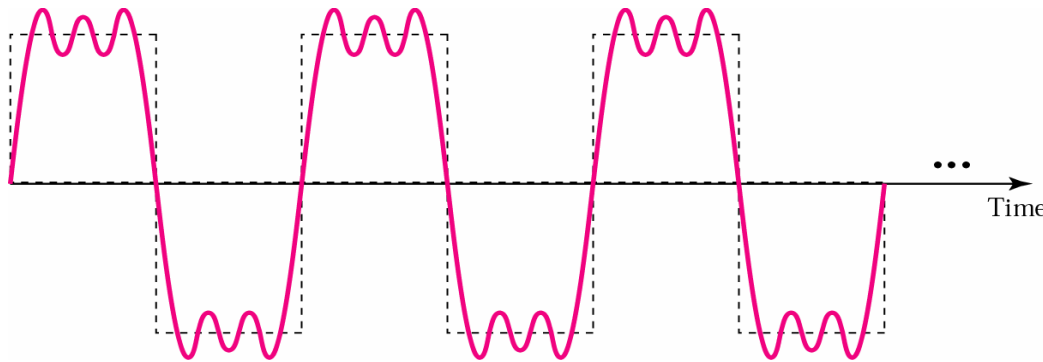
Solution

Bit Interval คือส่วนกลับของ Bit Rate

$$\text{Bit Interval} = 1 / 2000 \text{ s} = 0.000500 \text{ s} = 0.000500 \times 10^6 \mu\text{s} = 500 \mu\text{s}$$

Composite Analog Signal

จากการวิเคราะห์ Fourier หากต้องการแสดงสัญญาณ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่าง
กะทันหัน (เช่น สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม) ต้องใช้องค์ประกอบความถี่จำนวนอนันต์



หมายเหตุ

การวิเคราะห์ สัญญาณไม่ซ้ำ
คาบ จะใช้เทคนิคที่คล้ายกัน
ได้แก่ *Fourier Transform* ซึ่ง
พิจารณาเสมือนว่าสัญญาณนั้น
ซ้ำคาบที่เวลาอนันต์ $T = \infty$

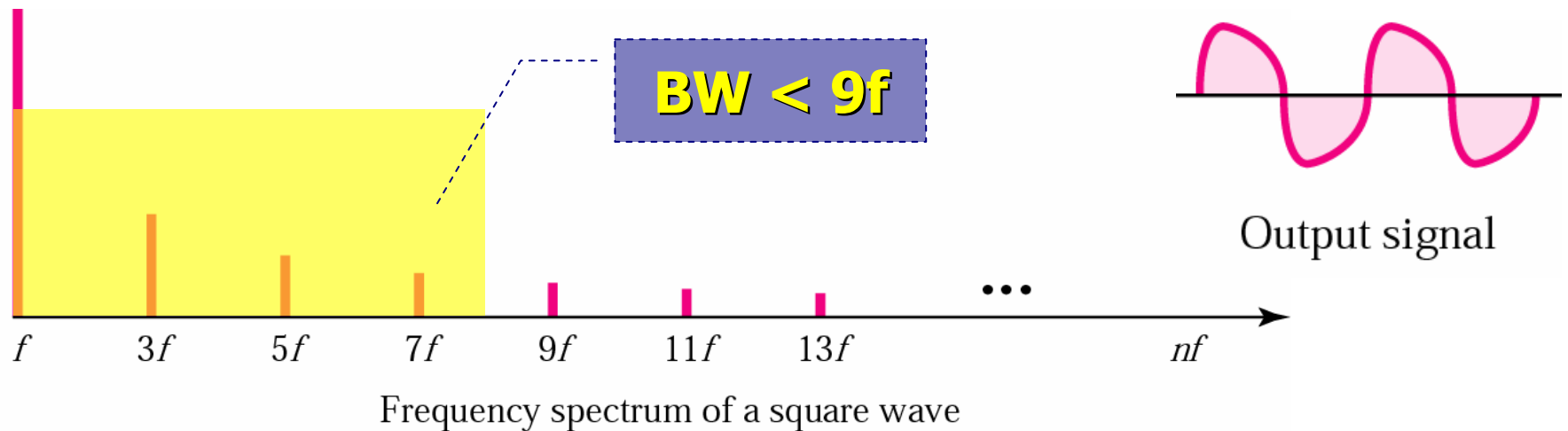
ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า

- Digital Signal คือ Analog Signal ชนิด Composite ที่มี Spectrum เป็นอนันต์
- Bandwidth ของ Digital Signal มีความกว้างไม่สิ้นสุด



Digital Signal and Medium

ถ้า Bandwidth ของตัวกลาง ไม่สอดคล้องกับ Signal Spectrum จะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ด้านรับ (Distortion)



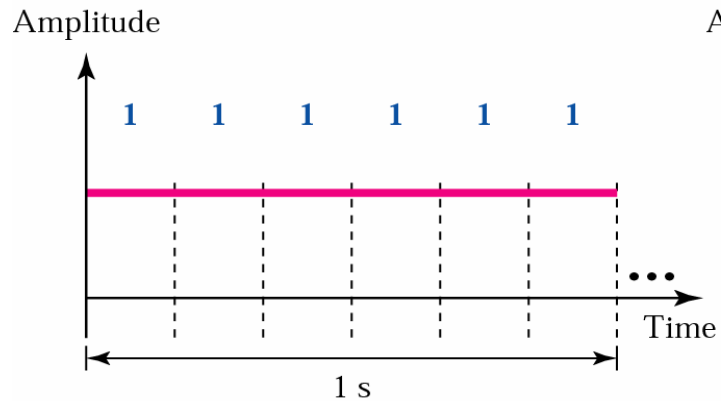
ถ้า Bandwidth ของตัวกลาง กว้างเพียงพอ (เช่น เส้นใยแก้วนำแสง หรือสายแกนร่วม เป็นต้น) ตัวกลางนั้นสามารถส่ง Digital Signal ได้โดยไม่เกิดการผิดเพี้ยนที่ด้านรับมากนัก

ถ้า Bandwidth ของตัวกลางมีจำกัด ตัวกลางนั้น ยังสามารถส่ง Digital Signal ได้ก็ต่อเมื่อ Bandwidth นั้นสัมพันธ์กับ Bit Rate (BR) ตามเงื่อนไข Nyquist หรือ Shannon Capacity₇

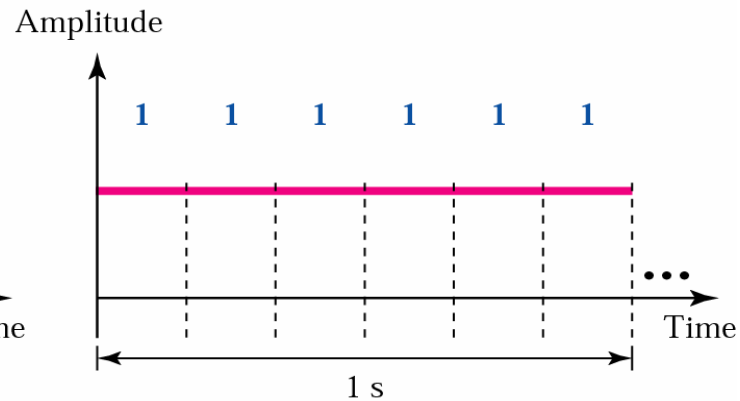


Single Harmonic Digital Signal

Digital

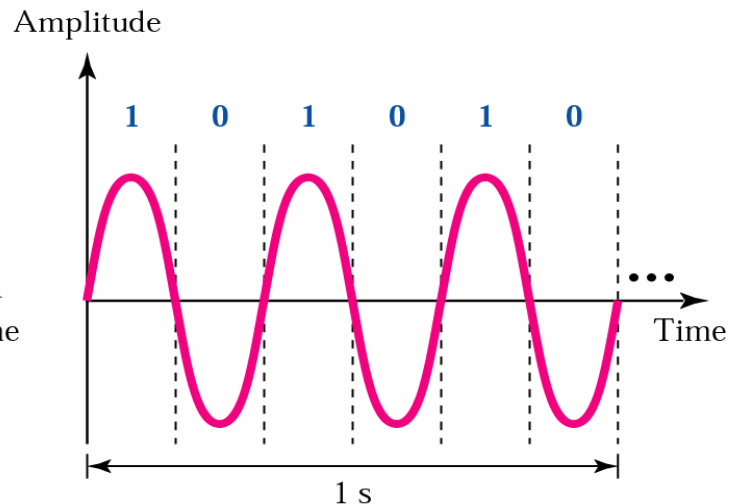
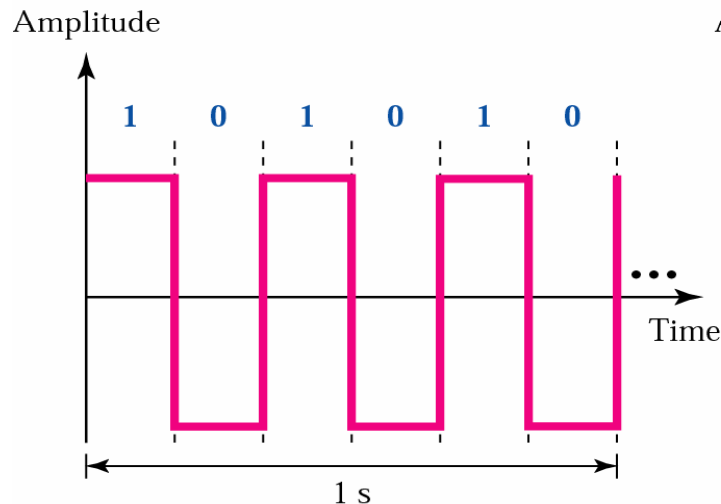


Analog



D = 000 000
D = 111 111
Bit Rate = 6
F = 0 Hz

a. Best case, bit rate = 6, $f = 0$



D = 101 010
D = 010 101
Bit Rate = 6
F = 3 Hz

b. Worst case, bit rate = 6, $f = 3$



$$\mathbf{BW = BR/2}$$



Using More Harmonics

การส่ง Digital Signal เพียง 1 Harmonic ต้องการ Bandwidth เพียงแค่ ครึ่งหนึ่ง ของ Bit Rate ($BW = BR/2$) อย่างไรก็ตาม สำหรับ Bit Pattern ทั่วไป Analog Signal ที่ปลายทางด้านรับ อาจจะผิดเพี้ยนไปมาก จนไม่สามารถกู้ข้อมูลเดิมกลับมาได้อย่างถูกต้อง

ที่ Bit Rate สูงๆ จึงควรเพิ่ม BW ครึ่งละเท่ากับ Harmonic คี่ (คลื่นสี่เหลี่ยม)

$$BW \geq \frac{BR}{2} \rightarrow BW = \frac{BR}{2} + \frac{1}{2} [3BR + 5BR + \dots + (2n+1)BR]$$

Bit Rate	Harmonic 1	Harmonics 1, 3	Harmonics 1, 3, 5	Harmonics 1, 3, 5, 7
1 Kbps	500 Hz	2 KHz	4.5 KHz	8 KHz
10 Kbps	5 KHz	20 KHz	45 KHz	80 KHz

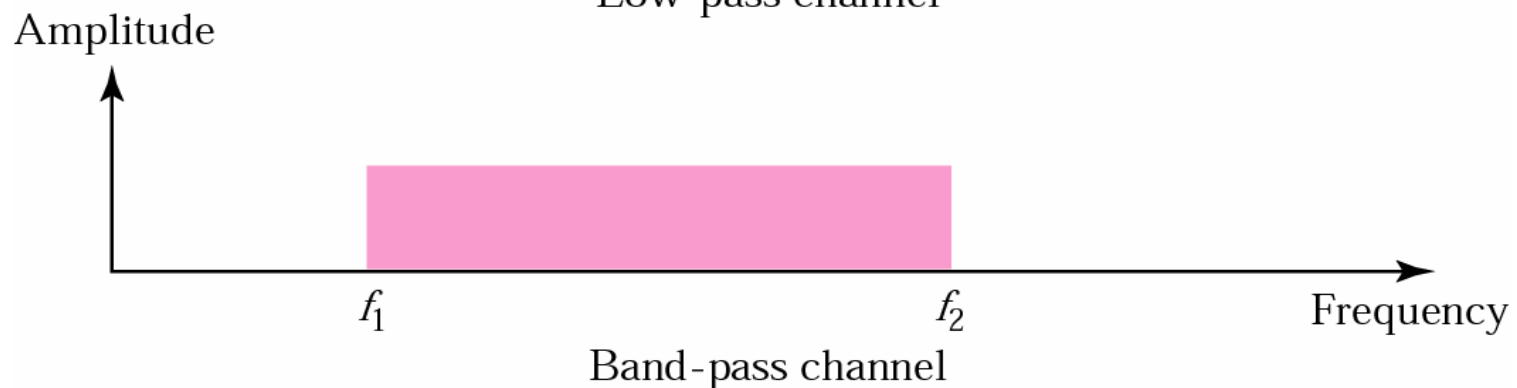
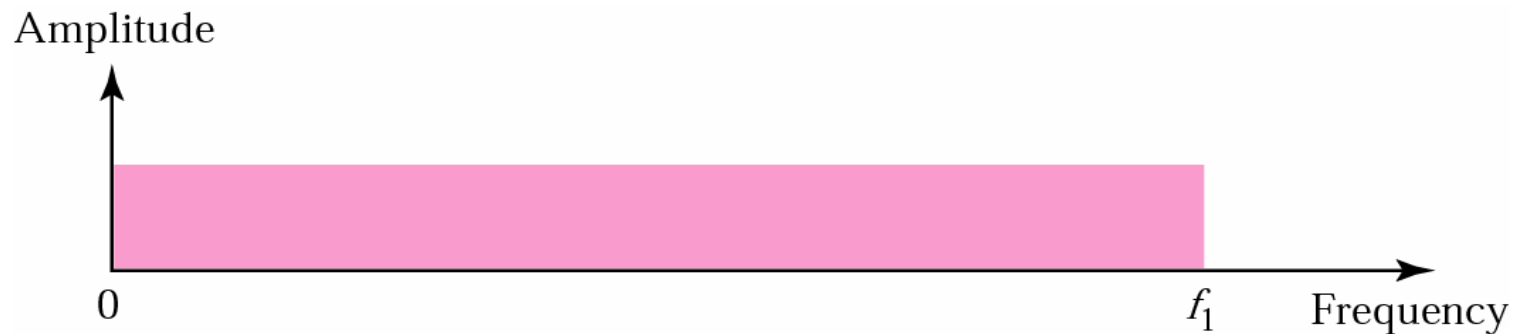
“Digital Bandwidth คือ Bit Rate สูงสุดที่ตัวกลางสามารถส่งผ่านได้” มีหน่วยเป็น bps 9



Analog vs. Digital

การพิจารณาเลือกรูปแบบ การสื่อสารข้อมูลระหว่าง Analog หรือ Digital Signal ขึ้นอยู่กับสถานการณ์ และ Bandwidth ที่มีอยู่

Low Pass vs. Band Pass Medium



Digital Transmission

Digital Signal มี Spectrum ระหว่าง 0 ถึงอนันต์ แต่สามารถผ่อนผันให้ความถี่สูงสุดมีค่าไม่มากไปกว่าที่ตัวกลางส่งผ่านได้ โดยยอมรับความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น

ดังนั้น **Digital เป็น Low Pass Signal** ที่มี Bandwidth ระหว่าง 0 ถึง f



Workstation



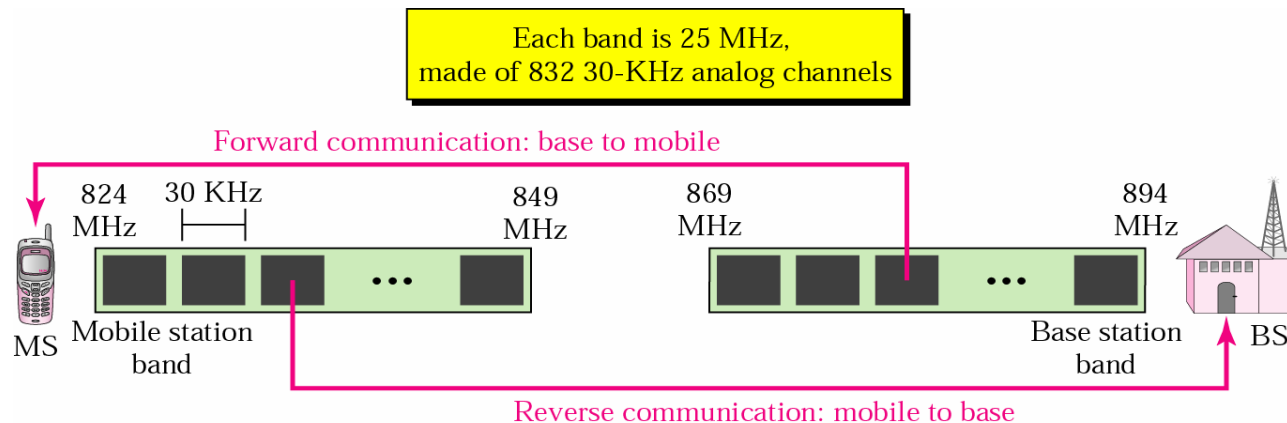
Workstation

Low Pass Signal ต้องการตัวกลางประเภท Low Pass Channel ซึ่งเป็นไปได้เพียงแค่ 2 กรณี คือ 1) เมื่อตัวกลางสงวนไว้สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างจุดเท่านั้น (Point to Point Connection) หรือ 2) เมื่อตัวกลางมีการใช้ร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ ด้วยการจัดสรรทางเวลา (Time Multiplexing)

Analog Transmission

Analog Signal โดยทั่วไปประกอบด้วย Frequency Components จำนวนจำกัด ระหว่างช่วง f_1 ถึง f_2 จึงมี Bandwidth แคบกว่า Digital Signal

ดังนั้น **Analog เป็น Band Pass Signal** ที่มี Bandwidth ระหว่าง f_1 ถึง f_2



คุณสมบัติที่สำคัญของ Band Pass Signal คือสามารถ **เลื่อน** Spectrum เป็น
เท่าใดก็ได้ตราบที่ Bandwidth มีค่าคงที่ ตัวกลางประเภท Band Pass Channel
สามารถจัดสรรให้อุปกรณ์ใช้งานร่วมกันได้หลายวิธี รวมถึง การจัดสรรทาง
ความถี่ (Frequency MUX) เช่นในระบบ Cellular จัดสรรให้ผู้ใช้รายละ 30 kHz₁₂

Data Rate Limits

ความเร็วสูงสุดของข้อมูลที่สามารถส่งผ่านตัวกลางได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ

- **Available Bandwidth** ที่ใช้ได้ หรือที่ได้รับจัดสรร
- **Levels of Signal** ระดับของสัญญาณ (Amplitude) ที่ต้องการส่ง
- **Quality of Channel** ระดับของสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในตัวกลาง
 - Noiseless Channel ใช้สมการของ Nyquist Bit Rate
 - Noisy Channel ใช้สมการของ Shannon

Noiseless Channel: Nyquist Bit Rate นิยามความเร็วสูงสุดทางทฤษฎีดังนี้

$$\text{Bit Rate} = 2 \times \text{Bandwidth} \times \log_2 L$$

Bandwidth คือ Bandwidth ของตัวกลาง (ช่องทางการสื่อสาร)

L คือจำนวนของระดับสัญญาณที่ใช้นำเสนอข้อมูล (Digital Signal)



Examples

Example 7 Noiseless Channel

พิจารณาช่องทางการสื่อสาร ซึ่งใช้ตัวกลางมี Bandwidth 3000 Hz โดยส่งข้อมูลในรูป Digital Signal ซึ่งมีระดับสัญญาณ 2 ระดับ จงหา Bit Rate สูงสุดที่ตัวกลางนี้สามารถส่งข้อมูลได้

$$\text{Bit Rate} = 2 \times 3000 \times \log_2 2 = 6000 \text{ bps}$$

Example 8 Noiseless Channel

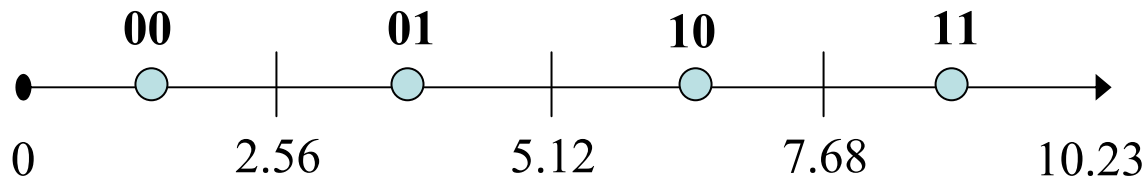
พิจารณาช่องทางการสื่อสาร ซึ่งใช้ตัวกลางมี Bandwidth 3000 Hz โดยส่งข้อมูลในรูป Digital Signal ซึ่งมีระดับสัญญาณ 4 ระดับ จงหา Bit Rate สูงสุดที่ตัวกลางนี้สามารถส่งข้อมูลได้ (ระดับยิ่งมากส่งได้เร็ว จะเกิด Error จาก Noise ได้ง่าย)

$$\text{Bit Rate} = 2 \times 3000 \times \log_2 4 = 12\,000 \text{ bps}$$

Noise Margin in Digital Signal

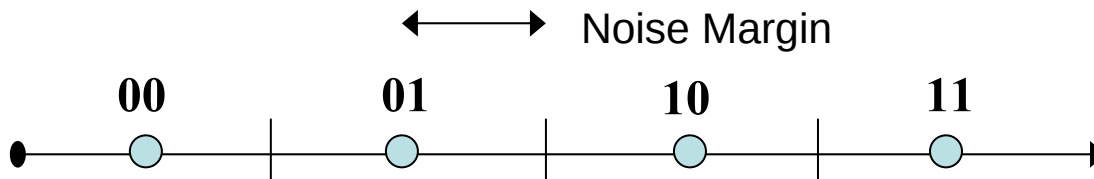
ในทางทฤษฎี สามารถแบ่งข่าวสารในรูปสัญญาณ Analog ออกเป็นช่วงย่อยๆ ได้ไม่จำกัด

ดังตัวอย่าง ถ้าแบ่งสัญญาณออกเป็น 4 ระดับ จะสามารถแทนด้วยเลขฐาน 2 จำนวน 2 บิต ซึ่งจากตัวอย่างที่ 8 พบว่า จะทำให้ส่งไปในตัวกลางได้เร็วขึ้น



อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติ ยิ่งแบ่งช่วงมากเท่าไร ค่า Noise Margin จะน้อยลงเท่านั้น

ค่า **Noise Margin** คือ ระดับของสัญญาณรบกวนที่มากที่สุด ที่สัญญาณสามารถรับได้ โดยไม่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น





Noisy Channel

เนื่องจากเส้นทางการสื่อสารย่อมมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงไม่สามารถส่งสัญญาณด้วยความเร็วไม่จำกัด ตามทฤษฎี Nyquist ได้

Noisy Channel: Shannon Capacity นิยามความเร็วสูงสุดเมื่อมีสัญญาณรบกวน

$$\text{Bit Rate} = \text{Bandwidth} \times \log_2 (1 + \text{SNR})$$

บางครั้งใช้ Capacity แทน Bit Rate ได้ โดย Capacity มักหมายถึงความเร็วข้อมูลที่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางได้ ส่วน Bit Rate หมายถึงความเร็วข้อมูลที่ด้านส่ง

SNR หรือ Signal-to-Noise-Ratio หมายถึงอัตราส่วนของ **กำลังงาน** (power) ของสัญญาณที่ต้องการส่ง (Data Signal) ต่อกำลังงาน ของสัญญาณรบกวน (Noise)

สมการ Shannon Capacity ไม่คำนึงถึงวิธีการเข้ารหัส ไม่ว่าจะใช้ Digital Signal ก็ระดับจะให้ผลเหมือนกัน ถ้าช่องทางการสื่อสารที่ใช้ มีสัญญาณรบกวนคงที่



Examples

Example 9 Noisy Channel

พิจารณาช่องทางการสื่อสาร มีสัญญาณรบกวนสูงมากจนกระทั่ง SNR มีค่าเป็น 0
จะได้ว่า Channel Capacity = 0 หรือ ตัวกลางนั้นไม่สามารถใช้ส่งสัญญาณได้เลย

$$\text{Channel Capacity} = \text{Bandwidth} \times \log_2 (1 + 0) = 0 \text{ bps}$$

ถ้าไม่มี Noise เลย $SNR \rightarrow \infty$ หรือ Channel Capacity เท่ากับคิดด้วยวิธี Nyquist

Example 10 Noisy Channel

พิจารณาสายโทรศัพท์ ซึ่งมี Bandwidth 3000 Hz (300 – 3000 Hz) ซึ่งมักมีค่า
SNR เท่ากับ 3162 ($10 \log_{10} 3162 \sim 35 \text{ dB}$) จงหา Channel Capacity

$$\text{Channel Capacity} = 3000 \times \log_2 (1 + 3162) \sim 34\,860 \text{ bps}$$



Example Practical Limit

กำหนดตัวกลาง Bandwidth เท่ากับ 1 MHz และ SNR 63 (~18 dB) จงหาว่าควรใช้ระดับสัญญาณกี่ระดับจึงจะเหมาะสม

Solution

ใช้สมการ Shannon หาขอบเขตบน แล้วใช้สมการ Nyquist หาจำนวน Level ที่ควรใช้

ขั้นที่ 1 Shannon Capacity Limit

$$\text{Capacity} = \text{BW} \log_2 (1 + \text{SNR}) = 10^6 \log_2 (1 + 63) = 10^6 \log_2 (64) = 6 \text{ Mbps}$$

ขั้นที่ 2 Nyquist Signal Level

$$6 \text{ Mbps} = 2 \times 1 \text{ MHz} \times \log_2 L$$



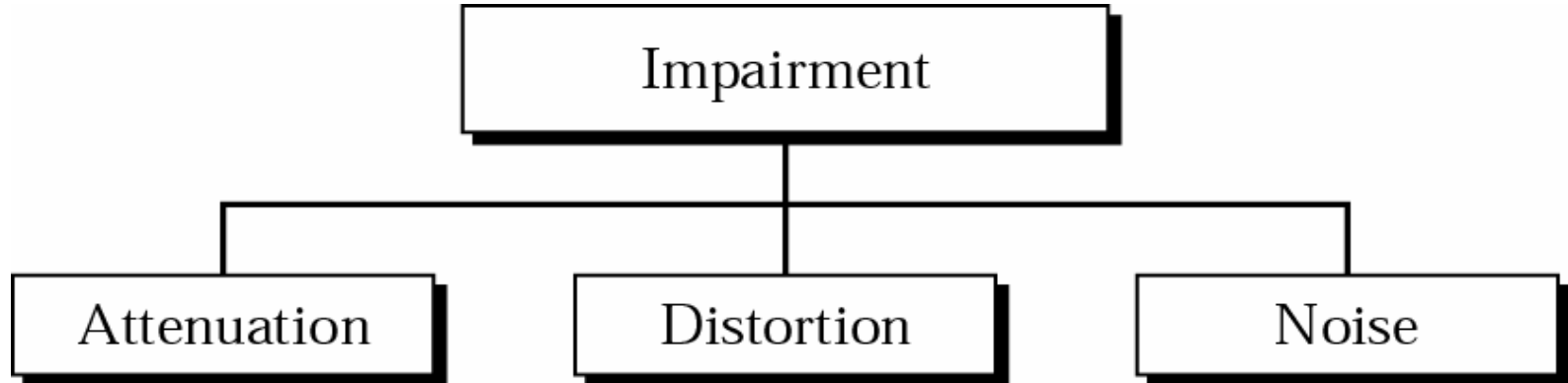
$$3 = \log_2 L,$$

$$L = 8$$

เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด อาจเลือกเพื่อให้ระดับสัญญาณ น้อยกว่าค่าสูงสุดที่รองรับได้ ในที่นี้ระดับสัญญาณที่สามารถแสดงด้วยเลขฐาน 2 ลำดับต่ำลงมา คือ $L = 4$

Transmission Impairment

จากตัวอย่าง สาเหตุที่ผู้ออกแบบระบบการสื่อสาร ต้องคิดเพื่อให้ความเร็วที่ใช้จริงมีค่าน้อยกว่า ค่าที่คำนวณได้ คือ ระบบส่งสัญญาณทั่วไปอาจมีข้อจำกัดอื่นๆ ที่มีผลต่อความเร็วของข้อมูล ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

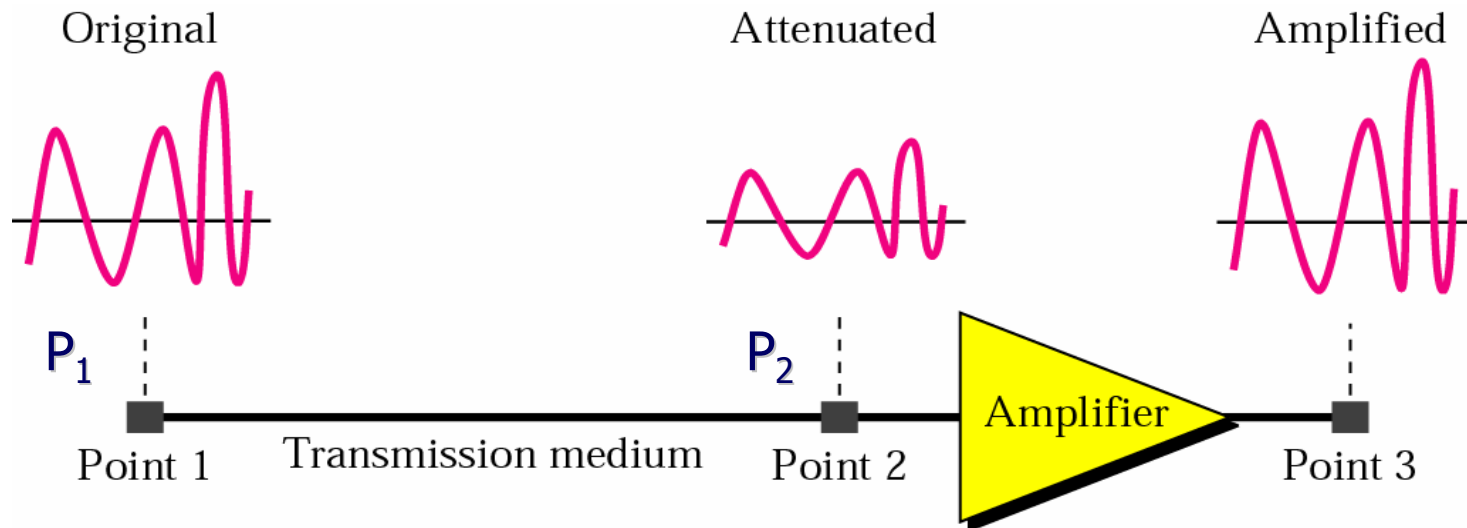


ผลกระทบจาก Impairment ดังกล่าว ข้างต้นมีดังนี้

- เกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างการส่งข้อมูล
- เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณที่ด้านรับ ทำให้แตกต่างจากทางด้านส่ง ซึ่งนำไปสู่การแปลความหมายข่าวสารที่ผิดพลาด

Attenuation

คือการสูญเสียพลังงานของสัญญาณ (Simple และ Composite) ภายในตัวกลาง อันเนื่องมาจาก ความต้านทาน (เช่น ในรูปของความร้อน) ซึ่งอาจแก้ไขโดยใช้ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) หรือในระบบเครือข่ายเรียกว่า Repeater ดังรูป



Attenuation หรือ Gain วัดได้จาก ความเข้มสัมพัทธ์ระหว่าง สัญญาณปลายทาง และต้นทาง (ในหน่วย dB)

$$\text{Attenuation} = 10 \times \log_{10} (P_2 / P_1) \quad \text{dB}$$

Examples (I)

Example 12

พิจารณาการส่งสัญญาณภายในตัวกลางที่กำลังของสัญญาณด้านรับลดเหลือครึ่งหนึ่งของที่ด้านส่ง จงคำนวณหา Attenuation

Solution

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} (P_2 / P_1) &= 10 \log_{10} (0.5 P_1 / P_1) = 10 \log_{10} (0.5) \\ &= 10 (-0.3) = -3 \text{ dB} \end{aligned}$$

Example 13

พิจารณาการขยายสัญญาณด้วย Amplifier กำลังของสัญญาณด้านรับเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่าของที่ด้านส่ง จงคำนวณหา Gain

Solution

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} (P_2 / P_1) &= 10 \log_{10} (10 P_1 / P_1) = 10 \log_{10} (10) \\ &= 10 (1) = 10 \text{ dB} \end{aligned}$$

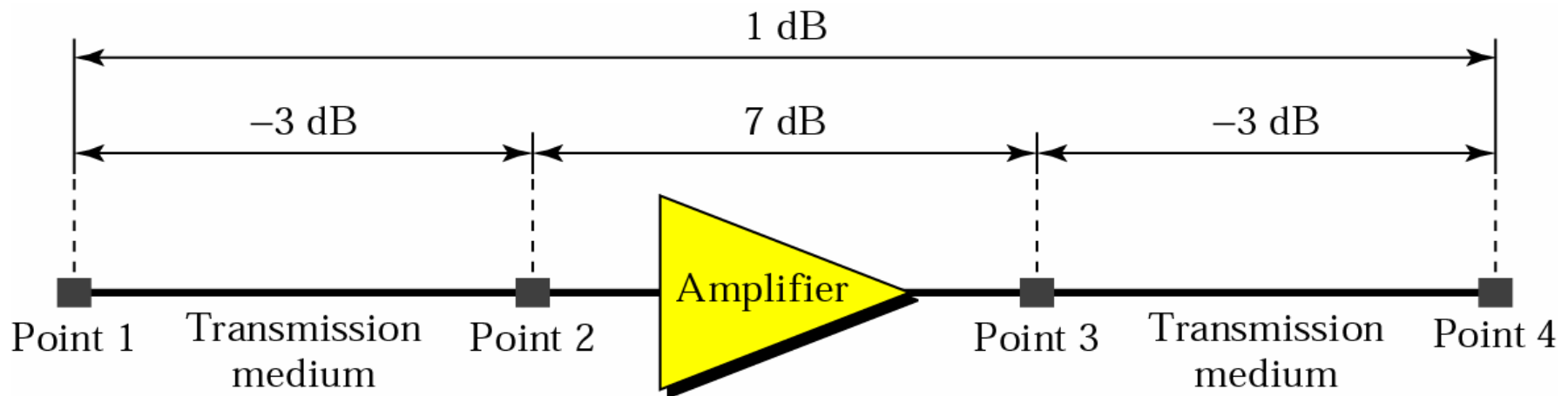
Attenuation มีค่า dB เป็นลบ และ Gain มีค่า dB เป็นบวก

Examples (II)

สาเหตุที่ผู้ออกแบบระบบ นิยมใช้หน่วย dB ในการวัด Attenuation หรือ Gain เนื่องจากว่าในการสื่อสารทางไกล สัญญาณจะผ่านข้อมูลหลายจุด ดังนั้นการคำนวณกำลังของสัญญาณที่ด้านรับ สามารถทำได้ง่ายกว่า (+/-)

Example 14

พิจารณาการส่งสัญญาณผ่านจุด 4 จุดดังรูป จงหาว่าสัญญาณที่ด้านรับมีการลดทอน (Attenuation) หรือว่าขยาย (Gain) เท่าใด



Solution

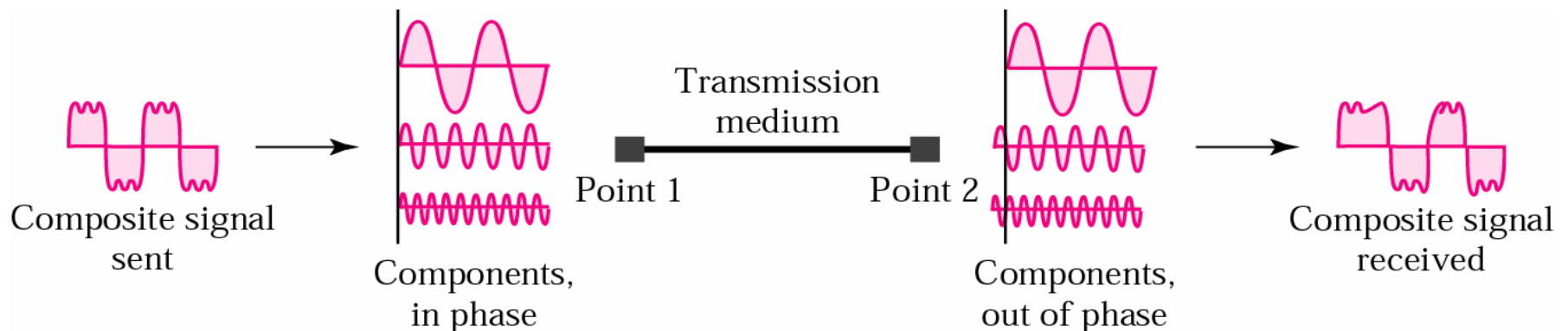
$$\text{dB} = -3 \text{ dB} + 7 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 1 \text{ dB} \rightarrow \text{Gain}$$

Distortion

คือการที่สัญญาณเปลี่ยนลักษณะ หรือรูปร่าง ทั้งนี้ มักจะเกิดขึ้นเฉพาะกับสัญญาณประเภท Composite เท่านั้น เนื่องจาก

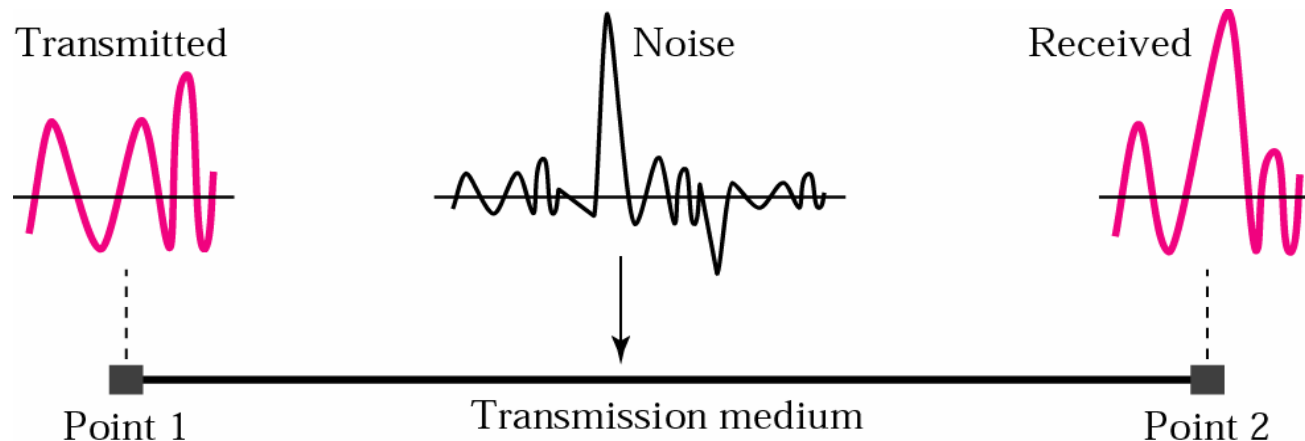
- สัญญาณแต่ละความถี่เคลื่อนที่ไปในตัวกลางด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ทำให้ไปถึงด้านรับไม่พร้อมกัน
- สัญญาณแต่ละความถี่ ถูกลดทอนภายในตัวกลางด้วยอัตราที่ ไม่เท่ากัน

ดังนั้นผลรวมของสัญญาณที่ด้านรับ จึงแตกต่างจากด้านส่ง



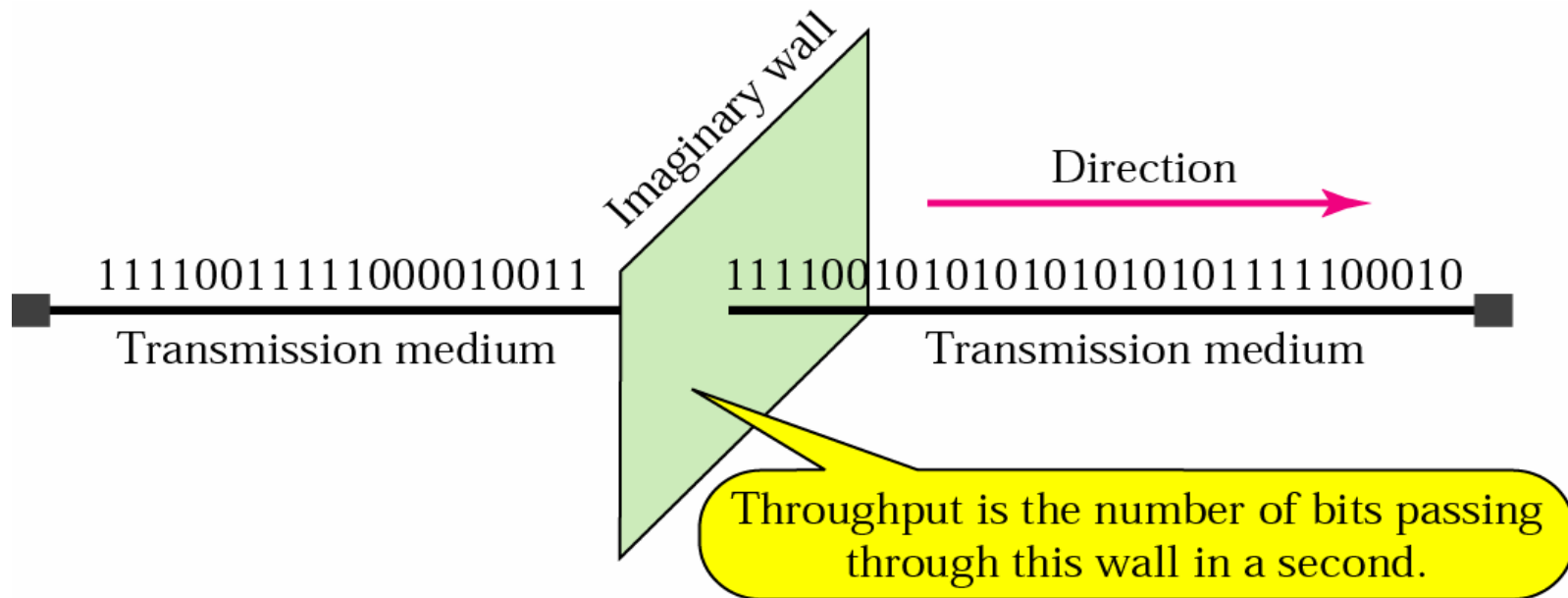
Noise

- **Thermal Noise** เกิดจากการสั่นแบบสุ่มของ Electron ในตัวกลาง ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า (Electron เคลื่อนที่ที่เกิดกระแสไฟฟ้า) ไปกวนสัญญาณต้นฉบับ
- **Induced Noise** เกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ (สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ เกิดกระแสไฟฟ้า)
- **Cross Talk** คือสัญญาณรบกวนชนิด Induced Noise รูปแบบหนึ่ง ซึ่งเกิดจากสายนำสัญญาณข้างเคียง (กระแสไฟฟ้าสลับ เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้า)
- **Impulse Noise** (สัญญาณรบกวนที่มีระดับสูงมาก ในช่วงเวลาสั้นๆ) มักเกิดจากข้อบกพร่องในสายไฟฟ้ากำลังสูงใกล้เคียง และฟ้าผ่า เป็นต้น



Throughput

คือการวัดประสิทธิภาพของการสื่อสาร โดยพิจารณาจาก ความเร็วของข้อมูลที่ไหลผ่านหน่วยย่อย (Entity) ในระบบ เช่น Repeater หรือเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นต้น



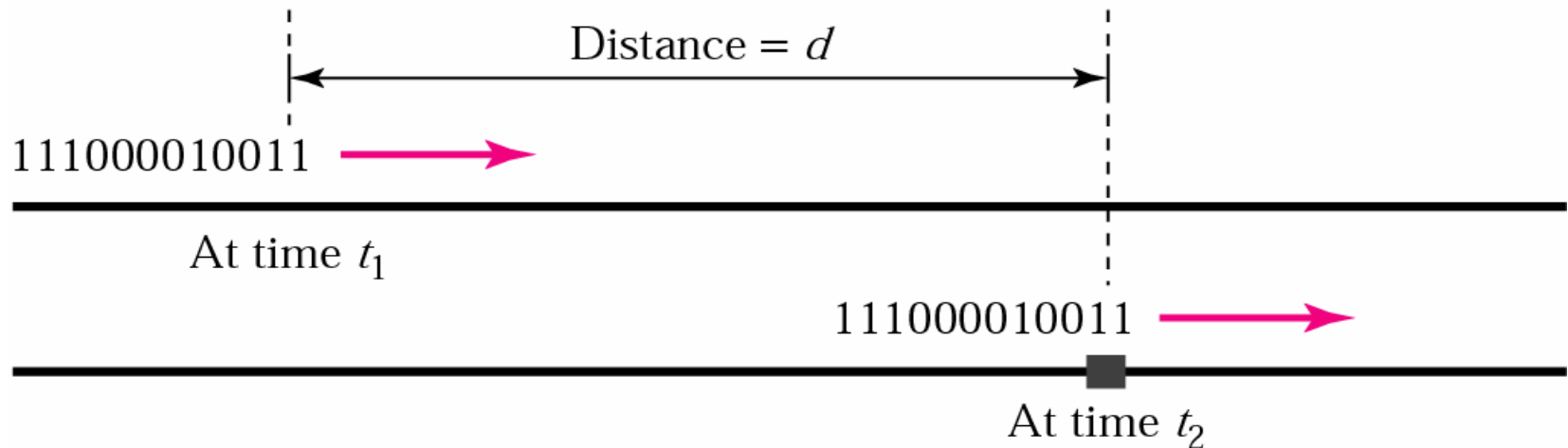
Throughput วัดได้จาก ปริมาณของข้อมูล (Bit) ที่ไหลผ่านกำแพงเสมือน (จุดที่ต้องการทดสอบ) ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา (วินาที)

Propagation Time

คือเวลาที่ข้อมูลใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

คำนวณได้จาก การหารระยะที่ข้อมูลใช้ในการเดินทาง ด้วยความเร็วของข้อมูล

$$\text{Propagation time} = t_2 - t_1 = d / \text{Propagation speed}$$

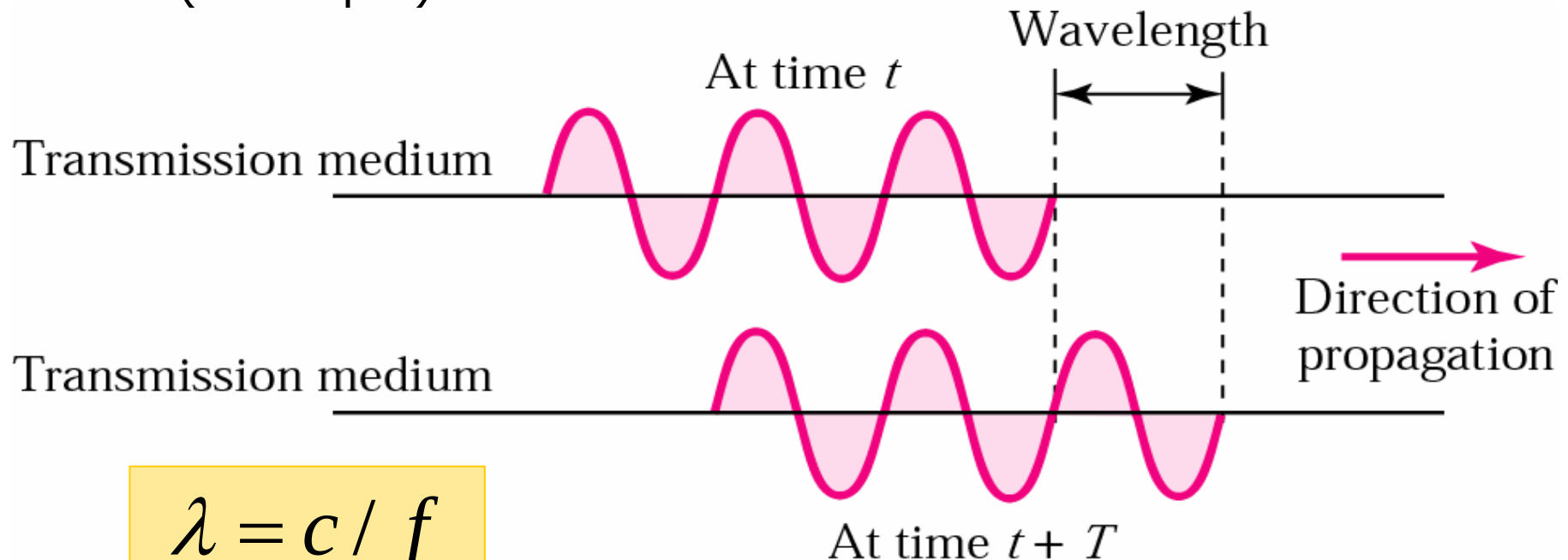


ถ้าข้อมูลส่งผ่านตัวกลางด้วยความเร็ว 1 Mbps ไปเป็นระยะทาง 10 m เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายข้อมูล (Propagation Time) = $10/10^6 = 10 \mu\text{s}$

Ans 26

Wavelength

คือคุณสมบัติหนึ่งของ **สัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง** ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ (f) และคุณสมบัติของตัวกลาง ซึ่งสำคัญมากในการวิเคราะห์การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)



$$\lambda = c / f$$

แสงเดินทางด้วยความเร็วประมาณ 3×10^8 m/s ถ้าส่งแสงสีแดงซึ่งมีความถี่เท่ากับ 4×10^{14} Hz ความยาวคลื่น = $(3 \times 10^8) / (4 \times 10^{14}) = 0.75 \mu\text{m}$ **Ans**



Conclusions

- Physical Layers
- Signals
 - Analog vs. Digital
 - Periodic vs. Non-periodic
 - Phase and Frequency
- Composite Signals
- Signal Spectrum and Bandwidth
- Digital Signals
- Analog vs. Digital
- Data Rate Limits
- Transmission Impairment