



The Signals (Part I)

Paramate Horkaew

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



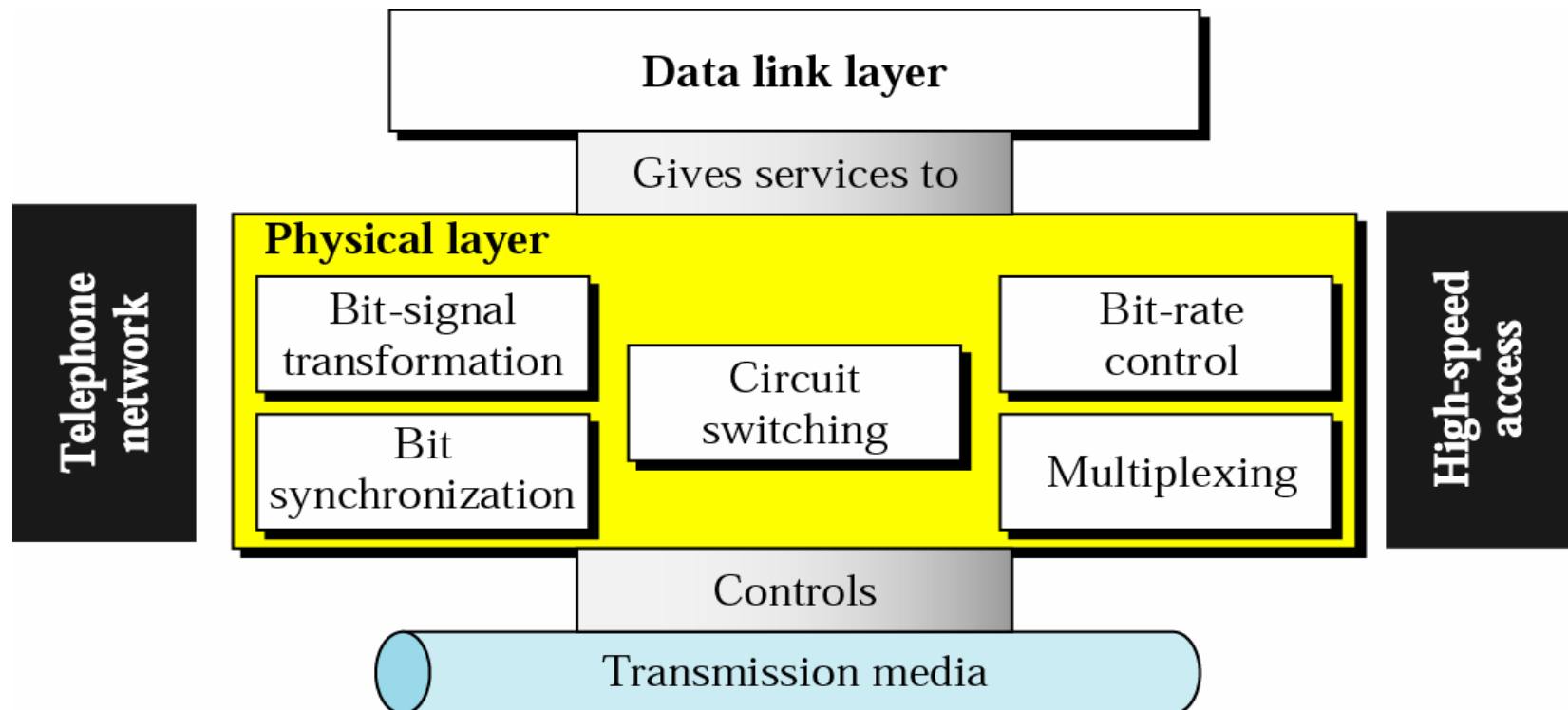
Lecture Outline

- 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

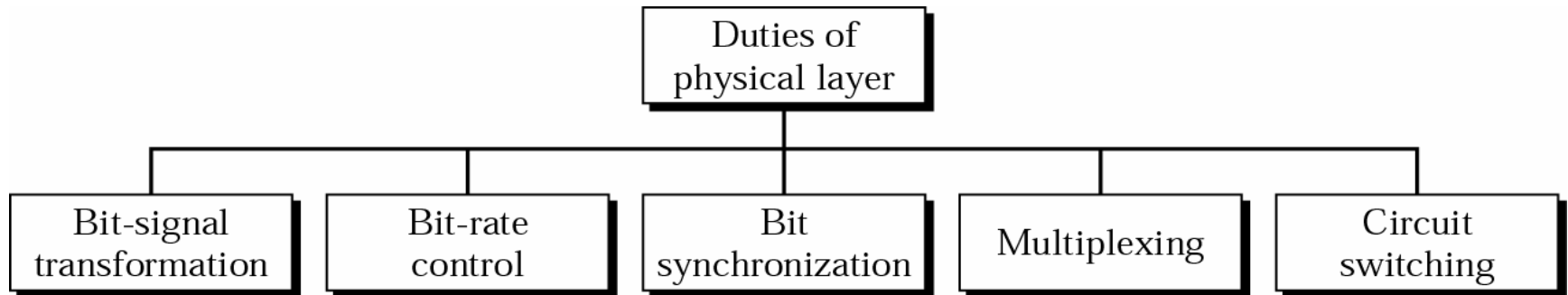
Position of the Physical Layer

Physical Layer ฝังตัวอยู่ด้านล่างสุดของแบบจำลอง OSI โดยทำหน้าที่

- 1) ควบคุมการรับ/ส่งข้อมูลในตัวกลาง เช่น ทิศทางของสัญญาณ และ
- 2) บริการเชื่อมโยงข้อมูลกับ ชั้นถัดไปด้านบน ได้แก่ **Data Link Layer**



Important Functions



- **Bit-Signal Transformation** การนำเสนอบิตข้อมูลในรูปแบบที่เหมาะสมกับตัวกลางการสื่อสาร เช่น การแปลงสัญลักษณ์เลขฐานสอง (0/1) เป็น สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า
- **Bit-Rate Control** ควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลง (ความเร็ว) ของสัญญาณ โดยมีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ กำหนดโดยความสามารถของตัวกลางที่พิจารณา
- **Bit Synchronization** กำหนดจังหวะของการรับส่งข้อมูล เช่น ใช้สัญญาณนาฬิกา (Clock) เป็นหมายในการอ่าน (หรือส่ง) ข้อมูลในตัวกลาง
- **Multiplexing** คือการแบ่งช่องสัญญาณทางกายภาพ ออกเป็นช่องย่อย (Logical Channel) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร
- **Circuit Switching** คือการสร้างเส้นทางเชื่อมโยงระหว่าง Node คู่ใดๆ



Signals

จุดประสงค์หลักของ **Physical Layer** คือ การถ่ายโอนข้อมูล จากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับการสื่อสารคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลแต่ละชุด สามารถเข้ารหัสในรูปของเลขฐานสอง

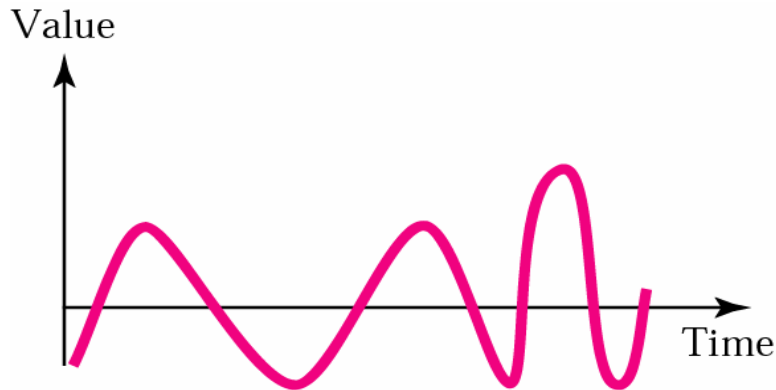
Physical Layer จะสามารถ รับ-ส่งอนุกรมของเลขฐานสองได้ ก็ต่อเมื่อ อนุกรมดังกล่าว ได้รับการแปลงให้อยู่ในรูปที่เหมาะสม กับช่องการสื่อสาร เช่น คลื่นเสียง คลื่นกล พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ในบริบทนี้ เราเรียกการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในช่องการสื่อสารว่า สัญญาณ (Signal)

- **Analog Signal** คือ สัญญาณที่ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา มีระดับที่เป็นไปได้ จำนวนอนันต์ กล่าวคือ พลังงานเปลี่ยนระดับจาก A ไป B ด้วยเส้นทางที่ประกอบด้วยระดับย่อยเป็นจำนวนอนันต์ โดยที่ความแตกต่างของระดับย่อยที่ติดกันมีค่าเข้าใกล้ 0
- **Digital Signal** คือ สัญญาณที่มีระดับที่เป็นไปได้ จำนวนจำกัด (หมายเหตุ ไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 2)

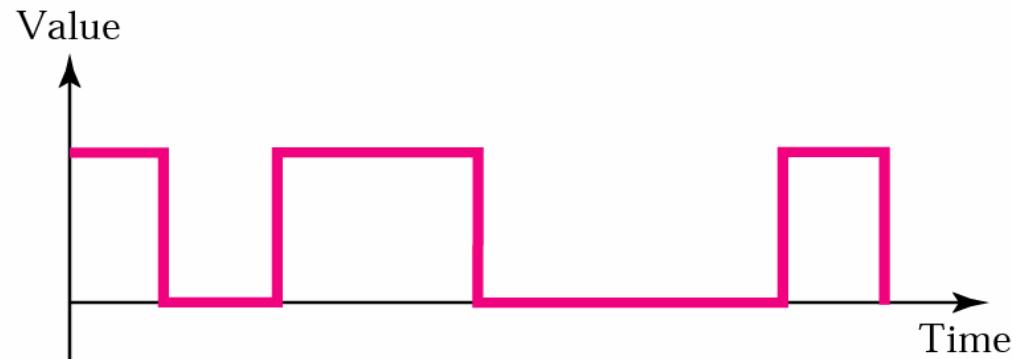


Analog and Digital Signals

การแสดงผลสัญญาณอย่างง่าย สามารถทำได้ดังรูป โดยแสดงการเปลี่ยนแปลง (พลังงาน หรือ ความเข้ม) ของสัญญาณ ในแกนตั้ง (Y) เทียบกับเวลา ในแกนนอน (X)



a. Analog signal



b. Digital signal

หมายเหตุ

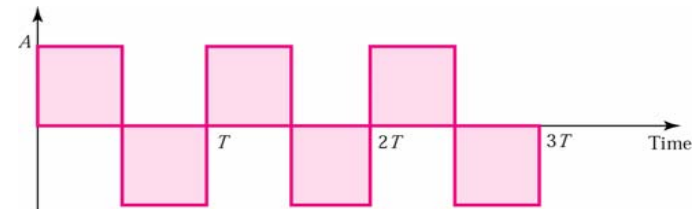
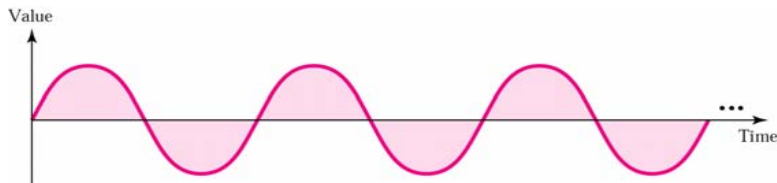
สำหรับสัญญาณดิจิทัล ที่มีจำนวนระดับที่เป็นไปได้มากกว่า 2 ระดับจะเรียกว่า M-ary ตัวอย่างเช่น 4-ary ใช้เรียกสัญญาณที่มีทั้งหมด 4 ระดับ → แทนสัญญาณลักษณะได้ 2 บิต



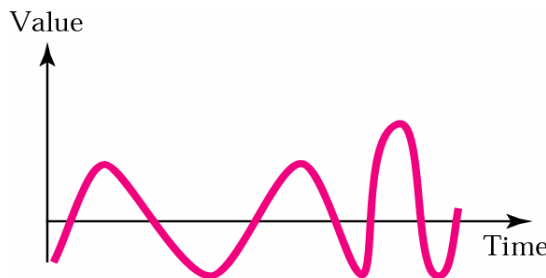
Periodic and Aperiodic Signals

สัญญาณแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

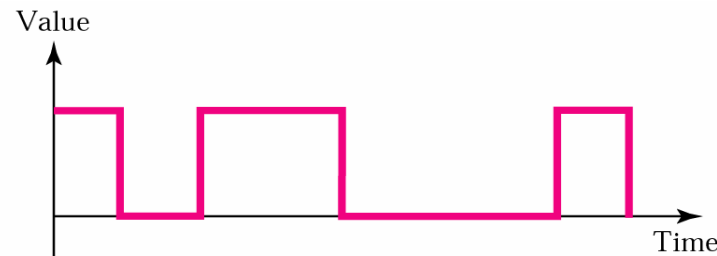
Periodic คือ สัญญาณที่มีรูปแบบ ภายในรอบเวลาคงที่ (คาบเวลา – Period) ซ้ำกัน โดยที่เมื่อ สัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบจน ครบ 1 รอบเรียกว่า Cycle



Aperiodic คือ สัญญาณที่ไม่ปรากฏรูปแบบที่ซ้ำกัน ในช่วงเวลาที่พิจารณา



a. Analog signal



b. Digital signal

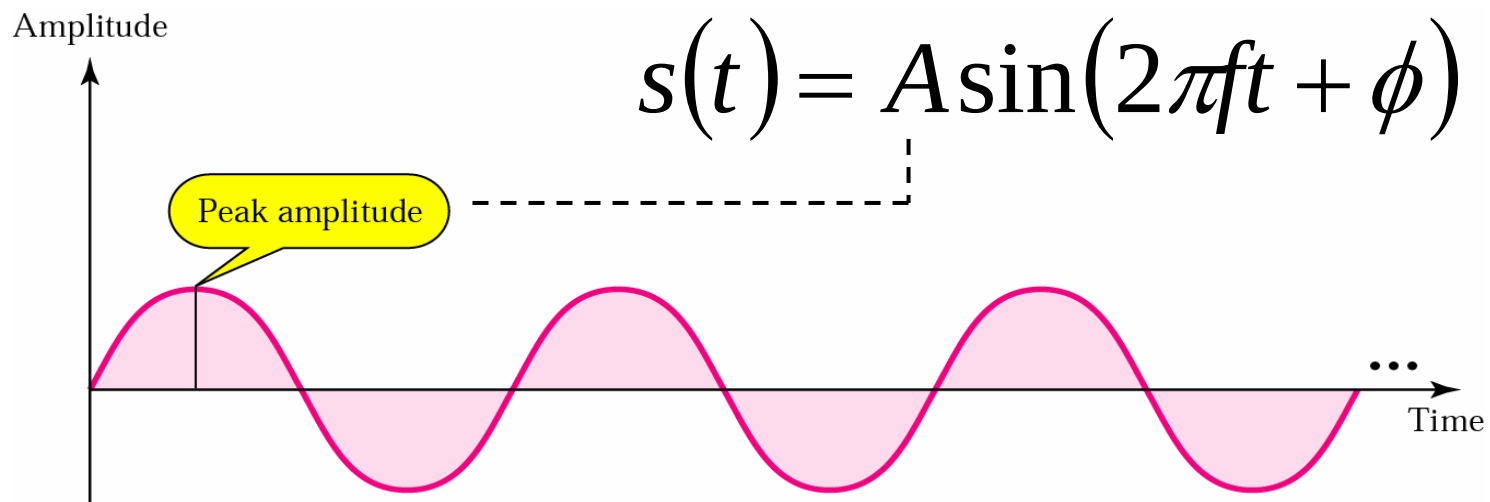


Analog Signals

ในการสื่อสารข้อมูล นิยมใช้สัญญาณทั้งแบบ Analog และ Digital หากในกรณีสัญญาณ Analog เรามักจะใช้ประเภทที่เป็นคาบเวลา (Periodic) สัญญาณ Analog ยัง แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

Simple คือ สัญญาณมูลฐานชนิด Sinusoidal (Sine Wave) ซึ่งมีความถี่คงที่ ไม่สามารถแบ่งแยกออกเป็นสัญญาณย่อยได้อีก ดังรูป

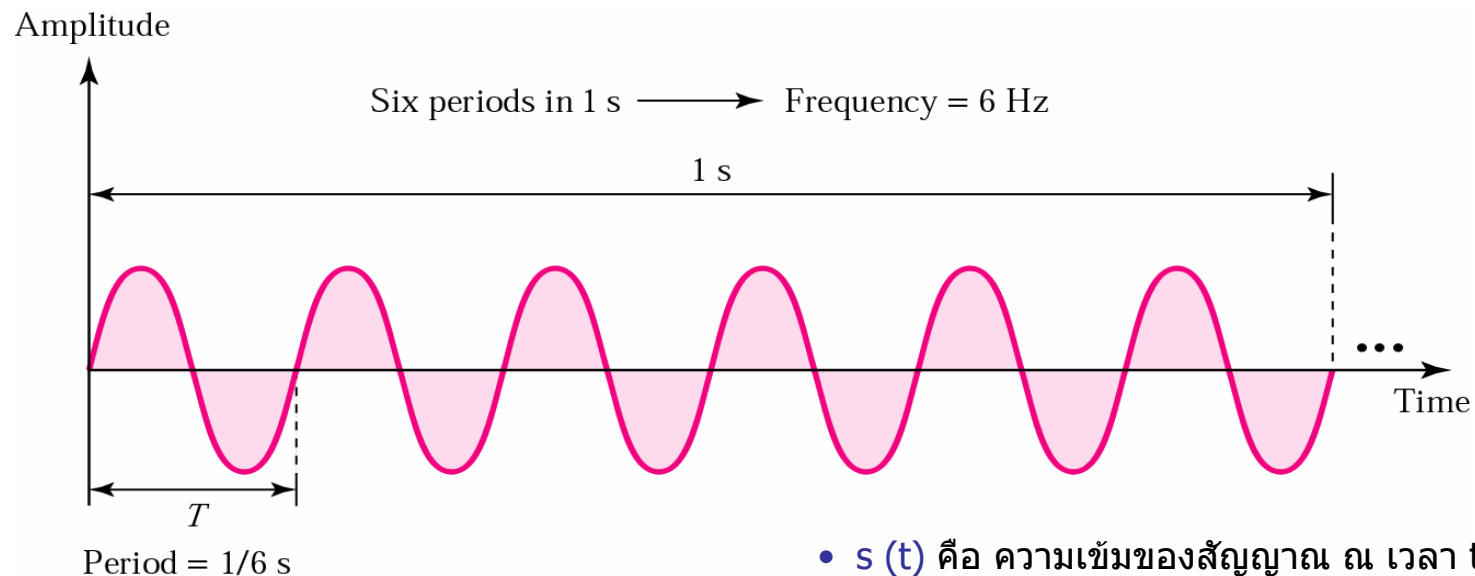
Composite คือ สัญญาณที่ประกอบขึ้นจาก สัญญาณ Sinusoidal ที่มีความถี่และขนาดแตกต่างกัน หลายสัญญาณ





Sinusoidal (Sine) Signals

Sinusoidal Signal เป็นสัญญาณซ้ำคาบมูลฐาน สำหรับการสื่อสารแบบ Analog มีลักษณะเส้นโค้งต่อเนื่อง ที่มีการแกว่งด้วยคาบเวลาคงที่ T (วัดจากท้องคลื่น ถึง ยอดคลื่น) ดังรูป



$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

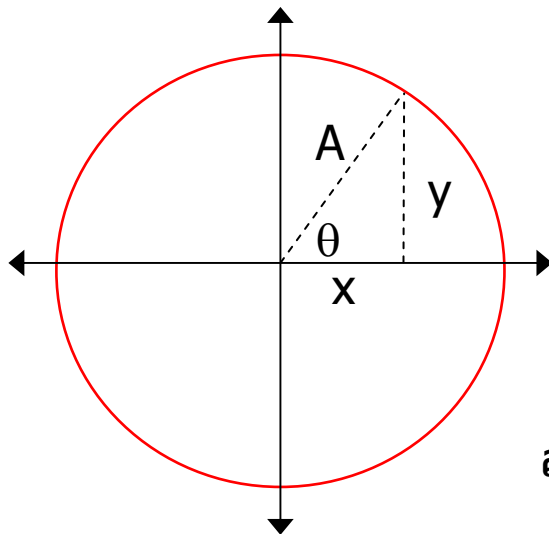
- $s(t)$ คือ ความเข้มของสัญญาณ ณ เวลา t
- A คือ ความเข้มสูงสุดของสัญญาณ วัดจากจุดสมดุล ถึงยอด (หรือท้อง) คลื่น
- f คือ ความถี่ของสัญญาณ (จำนวนของรอบการเปลี่ยนของ pattern ต่อวินาที)
- ϕ คือ Phase หรือ ตำแหน่งเชิงมุม ณ จุดเริ่มต้น $t = 0$ ของสัญญาณ (เวลาอ้างอิง)



Coffee Break

เราสามารถสร้างสัญญาณ Sine ที่มีความสูง A หน่วย ได้จากรูปวงกลมรัศมี A

เนื่องจาก วงกลมที่มีรัศมี 1 หน่วยนิยามด้วยสมการ $x^2 + y^2 = A^2$



ซึ่งสอดคล้องกับ ทฤษฎีบท Pythagoras สำหรับความยาวด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลมดังรูป และ ด้วยทฤษฎีตรีโกณมิติ เราสามารถเขียน ค่าของ x , y ในรูปของ A และ θ

$$x(\theta) = A \cos(\theta) \quad y(\theta) = A \sin(\theta)$$

สมมติให้ $s(t) = y(\theta(t))$ จะได้ $\theta(t) = \omega t + \phi$, $\omega = 2\pi f$

อีกนัยหนึ่ง ความเข้มของ Sine Wave ณ เวลา t ใดๆ สามารถคำนวณได้จากความสูง y ของสามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลมรัศมี A ที่มุม $\theta = \omega t + \phi$ และเรียก ω ว่าความเร็วเชิงมุม



Period and Frequency Units

จากรูป จะเห็นว่า ความถี่ (f) แปรผกผัน กับคาบเวลา (T) ด้วยสมการ $f = 1 / T$

Unit	Equivalent	Unit	Equivalent
Seconds (s)	1 s	Hertz (Hz)	1 Hz
Milliseconds (ms)	10^{-3} s	Kilohertz (KHz)	10^3 Hz
Microseconds (μ s)	10^{-6} s	Megahertz (MHz)	10^6 Hz
Nanoseconds (ns)	10^{-9} s	Gigahertz (GHz)	10^9 Hz
Picoseconds (ps)	10^{-12} s	Terahertz (THz)	10^{12} Hz



Example (I)

สมมติให้สัญญาณมีคาบเวลา $T = 100 \text{ ms}$ จงแสดงค่าที่สัมพันธ์กันในหน่วย KHz (Kilohertz)

วิธีทำ

เนื่องจาก 1 ms มีค่าเท่ากับ 10^{-3} s ดังนั้น $100 \text{ ms} = 100 \times 10^{-3} \text{ s}$

แทนค่า $f = 1/T$ จะได้ว่า $f = 1 / (100 \times 10^{-3}) = 10 \text{ Hz}$

เนื่องจาก $1000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$ ดังนั้น $10 \text{ Hz} = 10 / 1000 \text{ Hz}$

หรือ $f = 10^{-2} \text{ kHz}$

Ans



More about Frequency

ลักษณะของสัญญาณในการสื่อสาร เมื่อพิจารณาเชิงความถี่ สามารถ
แจกแจงได้ดังนี้

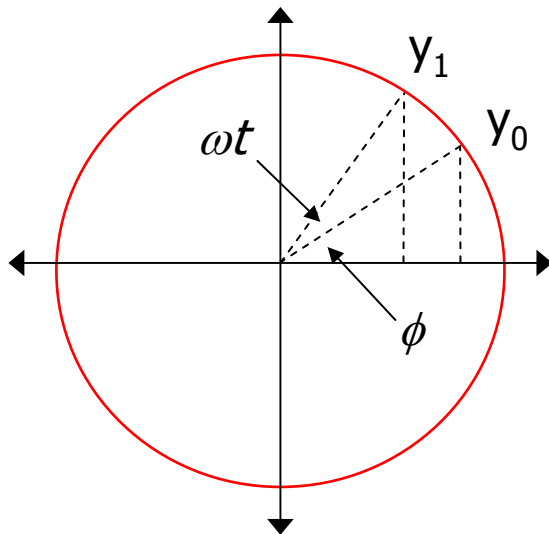
- ความถี่คืออัตราการเปลี่ยนแปลง (ของสัญญาณ) เทียบกับเวลา
- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลานั้น หมายถึง ความถี่สูง
- การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลายาว หมายถึง ความถี่ต่ำ
- ถ้าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความถี่มีค่าเป็น 0 (DC – Direct Current)
- ถ้าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ความถี่มีค่าเป็นอนันต์ (Infinite)



Phase of A Signal (I)

Phase ของสัญญาณ คือ ตำแหน่งเชิงมุม ϕ (radian) ณ จุดเริ่มต้น (เวลา $t = 0$) หรือ อีกนัยหนึ่ง การเลื่อนของสัญญาณ ในแกนเวลา ณ คาบแรก (First Cycle)

พิจารณา การสร้างสัญญาณ Sinusoidal ด้วย วงกลมรัศมี A



เนื่องจาก $\theta(t) = \omega t + \phi$ ดังนั้น เราอาจแบ่งมุม $\theta(t)$ ออกเป็น สองส่วน ได้แก่

ωt ตำแหน่งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา (t) และ
 ϕ ตำแหน่งคงที่ หรือ Phase ของสัญญาณ

ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนผัง แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง
ขนาดของสัญญาณ และ ตำแหน่งเชิงมุม ได้ดังรูป

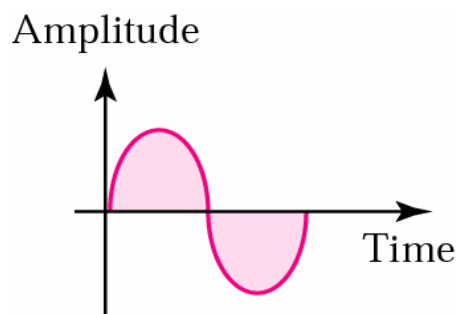
เรากล่าวได้ว่า ณ เวลา $t = 0$ องค์ประกอบ ωt มีค่าเป็น 0 ดังนั้น $s(t) = A \sin(\phi)$ ซึ่ง
จากรูป ขนาดของสัญญาณ ณ จุดเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ $s(0) = y_0$



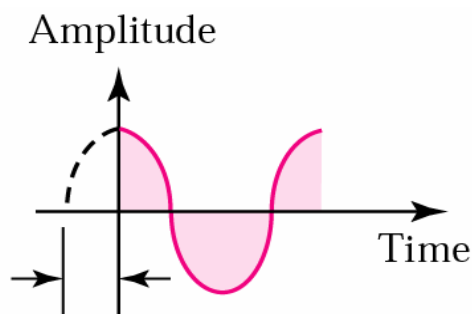
Phase of A Signal (II)

หน่วยการวัดของ Phase ได้แก่ rad หรือ degree โดยที่ $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$
degree

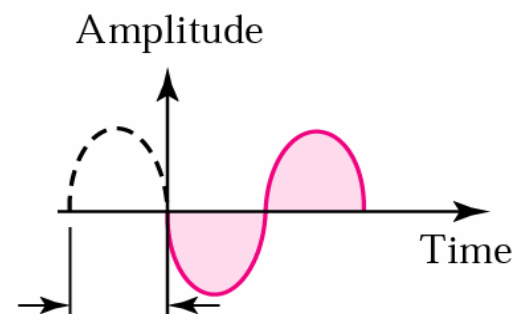
จากรูป a. b. และ c. คือรูปสัญญาณ sinusoidal ที่มี phase shift ไป 0 90 และ 180 องศา ตามลำดับ



a. 0°



b. 90°



c. 180°

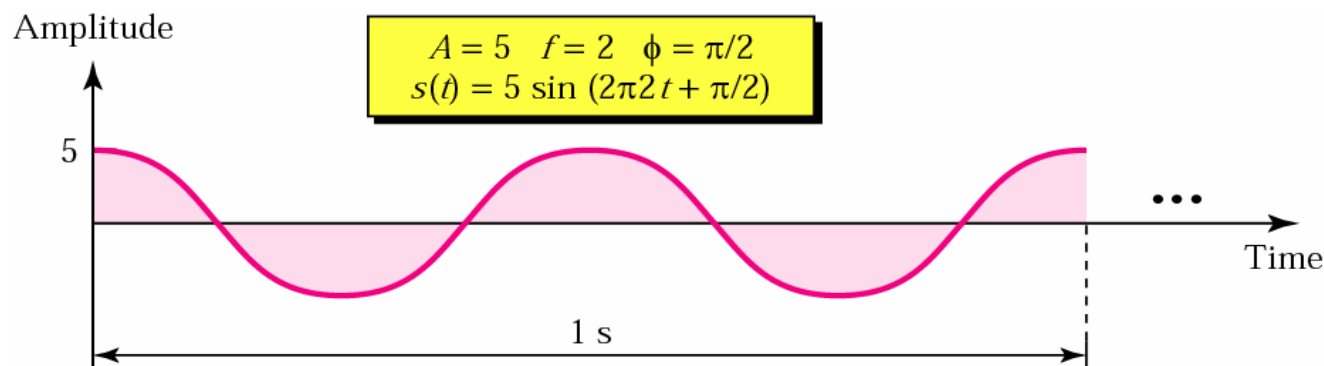
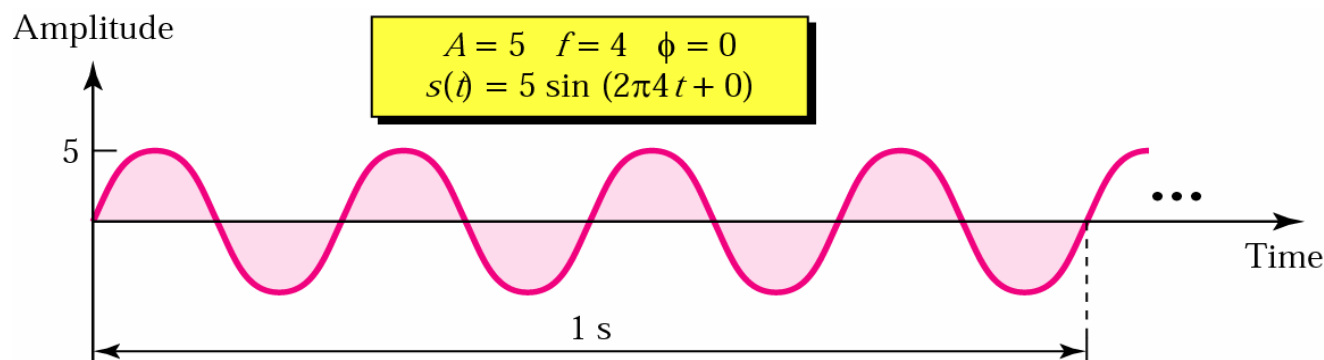
ตัวอย่าง ถ้า phase เลื่อน (shift) ไป $1/6$ เท่าของ 1 คาบ จะมีค่าเท่ากับกี่ rad

วิธีทำ $\text{phase} = (1/6) * 2\pi = 1/3\pi \text{ rad}$ หรือ 60 องศา **ANS**



Sine Wave Characteristics

Sinusoidal Signal สามารถแสดงได้ด้วย **Time Domain Plot** โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ความเข้ม (A) ความถี่ (f) และ เฟส (ϕ) ดังตัวอย่าง



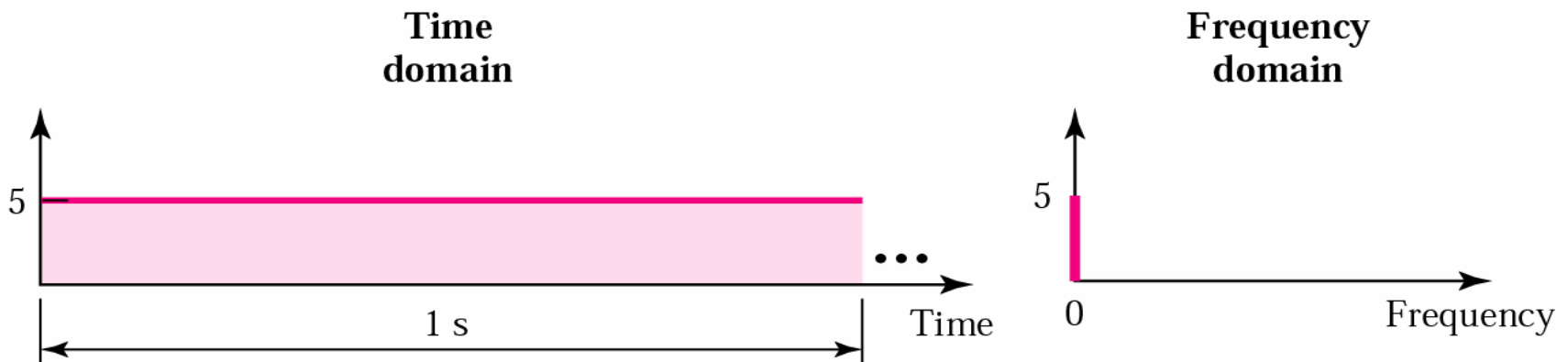


Frequency Domain Plots (I)

สังเกตว่า **Time Domain Plot** แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสัญญาณเทียบกับ
แกนเวลา ซึ่งมีองค์ประกอบ 3 ประการ ได้แก่ ความเข้ม ความถี่ และ เฟส (Phase)

เพื่อลดความซ้ำซ้อนในการนำเสนอ และ วิเคราะห์สัญญาณ เราอาจแสดงสัญญาณ
เดียวกันนั้นด้วย **Frequency Domain Plot** ดังรูป

ตัวอย่าง Frequency Domain Plot ของสัญญาณ Sinusoidal ที่ความถี่ต่างๆ กัน

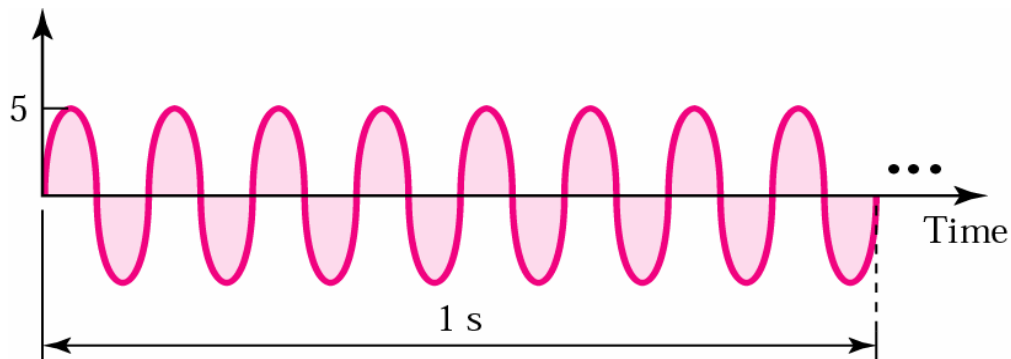


a. A signal with frequency 0

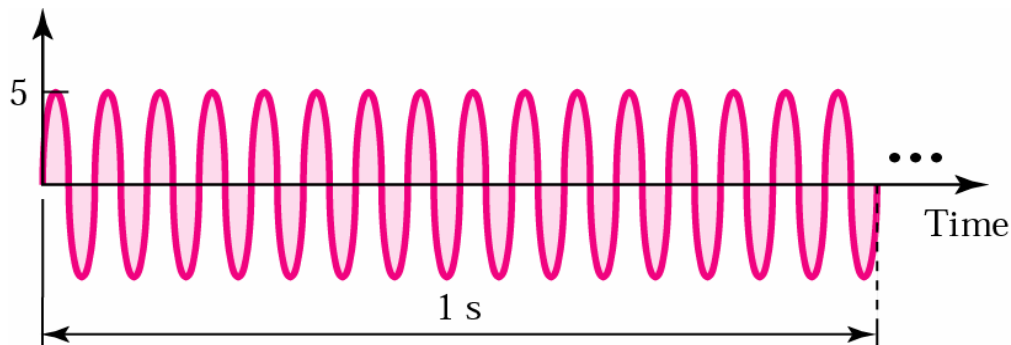
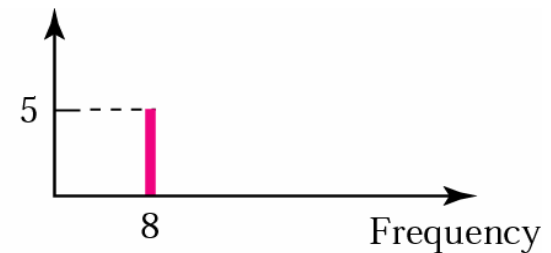


Frequency Domain Plots (II)

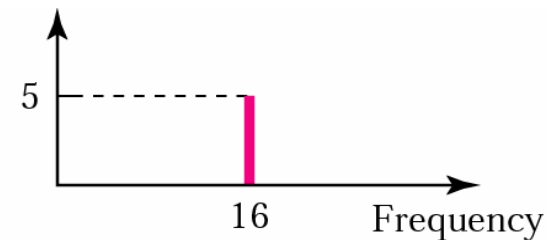
ตัวอย่างแสดงเฉพาะ ความเข้ม เทียบกับ ความถี่ หากต้องการแสดงองค์ประกอบให้ครบถ้วน จะต้องเพิ่มแกนแสดง เฟส เทียบกับความถี่ด้วย (ไม่กล่าวถึงในขั้นนี้)



b. A signal with frequency 8



c. A signal with frequency 16





Simple vs. Composite Signals

ในการสื่อสาร Simple Signal ไม่มีประโยชน์มากนัก เนื่องจากบรรจุข่าวสารได้น้อย (อะไรคือข่าวสารของ Simple Signal?)

เราสามารถดัดแปลงลักษณะของสัญญาณ Sinusoidal พื้นฐาน หลายๆสัญญาณ ที่มีความถี่ต่างกัน แล้วนำมารวม (บวก) กัน ผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่า

Composite Signal

$$s(t) = \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)$$

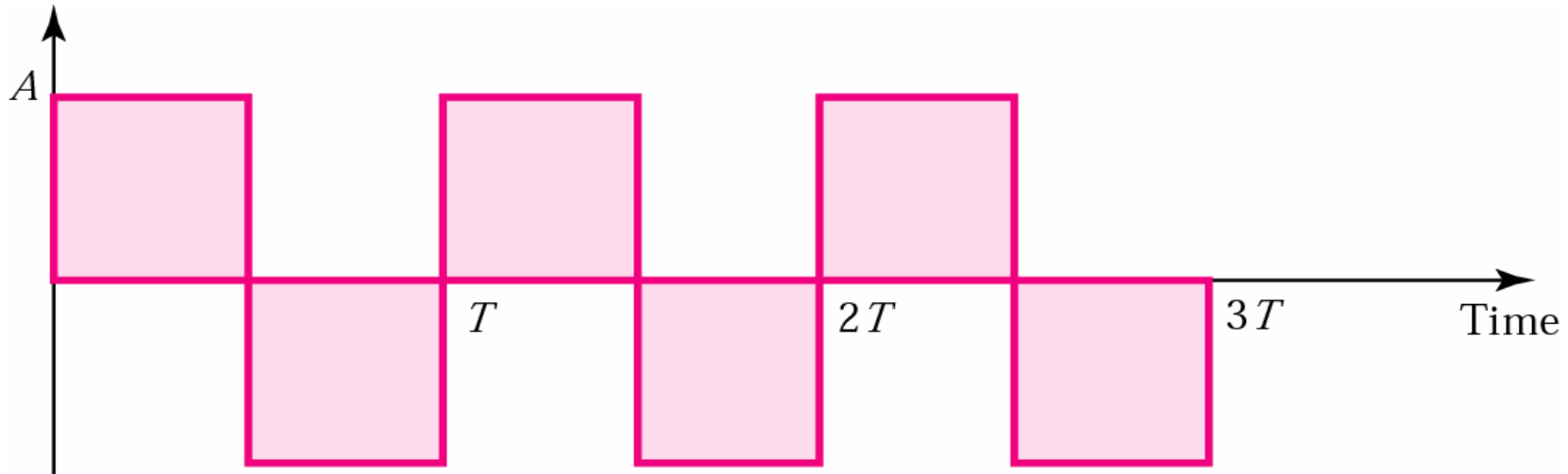
จากการวิเคราะห์ Fourier Composite Signal สามารถแสดงได้โดย

1. สัญญาณ Sine wave ที่มีความถี่ต่างๆ กันใน Time Domain
2. ฟังก์ชัน Delta (δ) ณ จุดความถี่ต่างๆ กันใน Frequency Domain



Composite Signal Example

ตัวอย่าง Composite Signal เบื้องต้นได้แก่ คลื่นสี่เหลี่ยม หรือ Square Wave (ไม่ควรสับสนกับสัญญาณ Digital) ซึ่งกระจายอนุกรม Fourier ได้ดังนี้



$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi f t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi(3f)t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi(5f)t + \dots \\ &= \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \end{aligned}$$



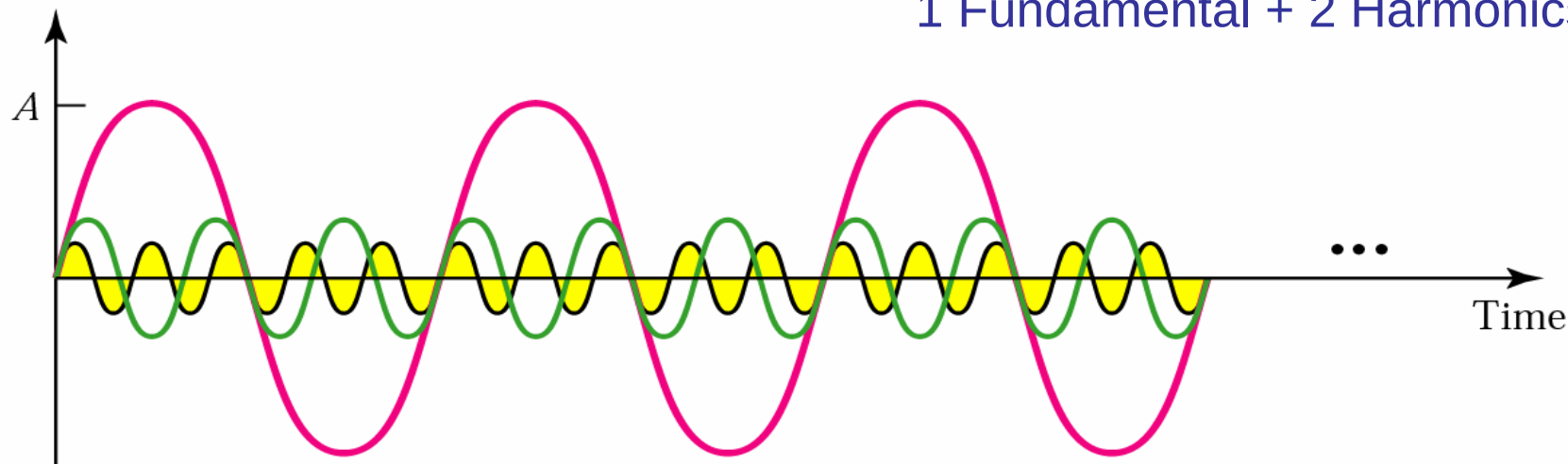
Frequency Components

$$s(t) = \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi f t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi(3f)t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi(5f)t + \dots$$

Fundamental Frequency (f) มีขนาด $4A/\pi$

Harmonics Frequencies $(2n + 1) f$ มีขนาด $4A/[(2n + 1)\pi]$, $n = 1 \dots \infty$

Amplitude

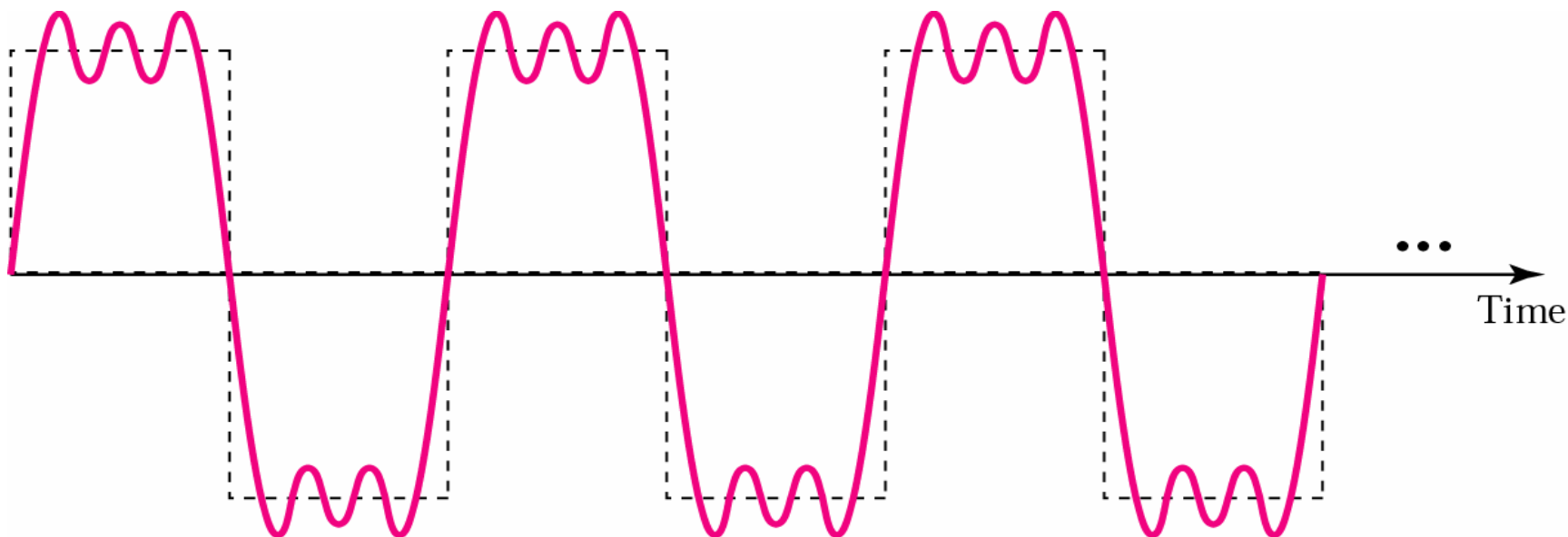




Fourier Series up to n^{th} Harmonics

ถ้านำองค์ประกอบความถี่มาบวกกัน ยิ่งจำนวนพจน์ที่รวมมากเท่าใด ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเข้าใกล้สัญญาณต้นฉบับมากเท่านั้น (*Converge*)

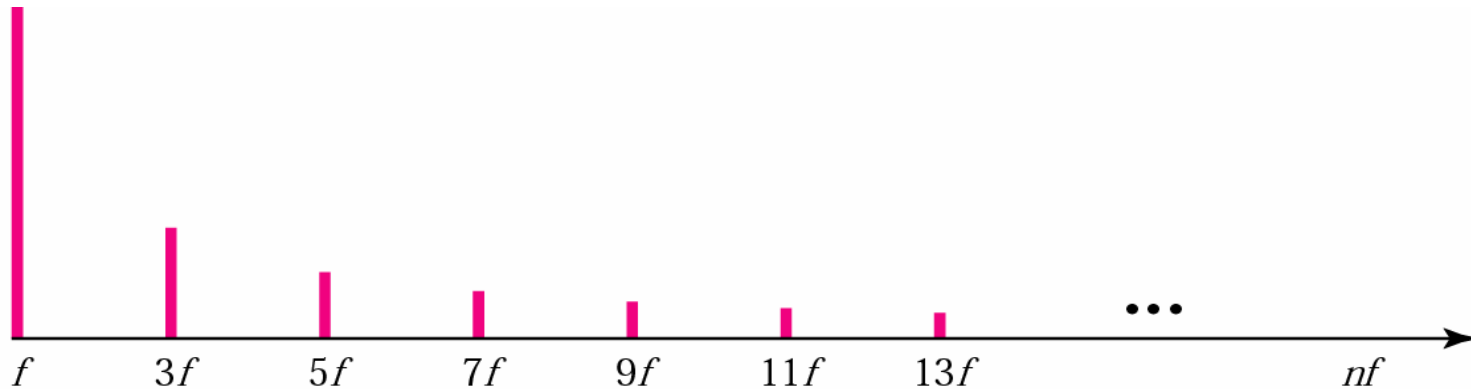
$$s(t) = \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi f t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi (3f)t + \frac{4A}{\pi} \sin 2\pi (5f)t$$





Frequency Spectrum

การอธิบายสัญญาณใน Frequency Domain โดยแสดง **ความถี่** และ**ระดับสัญญาณ** ของแต่ละองค์ประกอบ เรียกว่า **Frequency Spectrum** ของสัญญาณนั้น



a. Frequency spectrum of a square wave



b. Frequency spectrum of an approximation with only three harmonics



Solving a Fourier Expansion

การวิเคราะห์ Composite Signal ด้วยการกระจายอนุกรม Fourier เพื่อหาความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) และความถี่ Harmonics แสดงได้ดังนี้

$$s(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t))$$

เมื่อ $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T$ โดยที่สัมประสิทธิ์ Fourier คำนวณได้ดังนี้

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (n \geq 0)$$

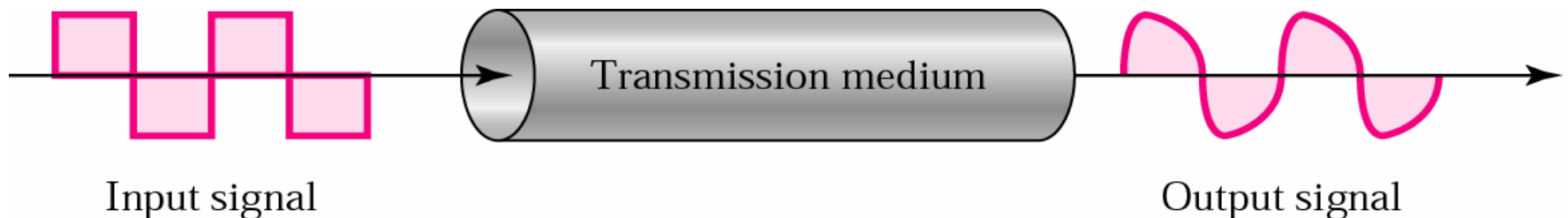
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (n > 1)$$

Transmission Medium

ในการสื่อสาร สัญญาณ Composite จะส่งผ่านตัวกลาง (เช่น สายนำสัญญาณ หรือ อากาศ) ซึ่งตัวกลางแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

คุณสมบัติของตัวกลาง **สัมพันธ์กับความถี่** กล่าวคือ ตัวกลางอาจ ส่งผ่าน เพียง บางความถี่ และ **ลดทอน** หรือ **กัก** ความถี่ที่เหลือ

ดังนั้น *สัญญาณที่รับได้ที่ปลายด้านรับของตัวกลางอาจไม่สมบูรณ์ เช่น เมื่อส่ง สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเข้าสู่ตัวกลาง ฝั่งด้านรับอาจจะไม่ได้รับสัญญาณที่เหมือนกับ ต้นทางก็ได้*

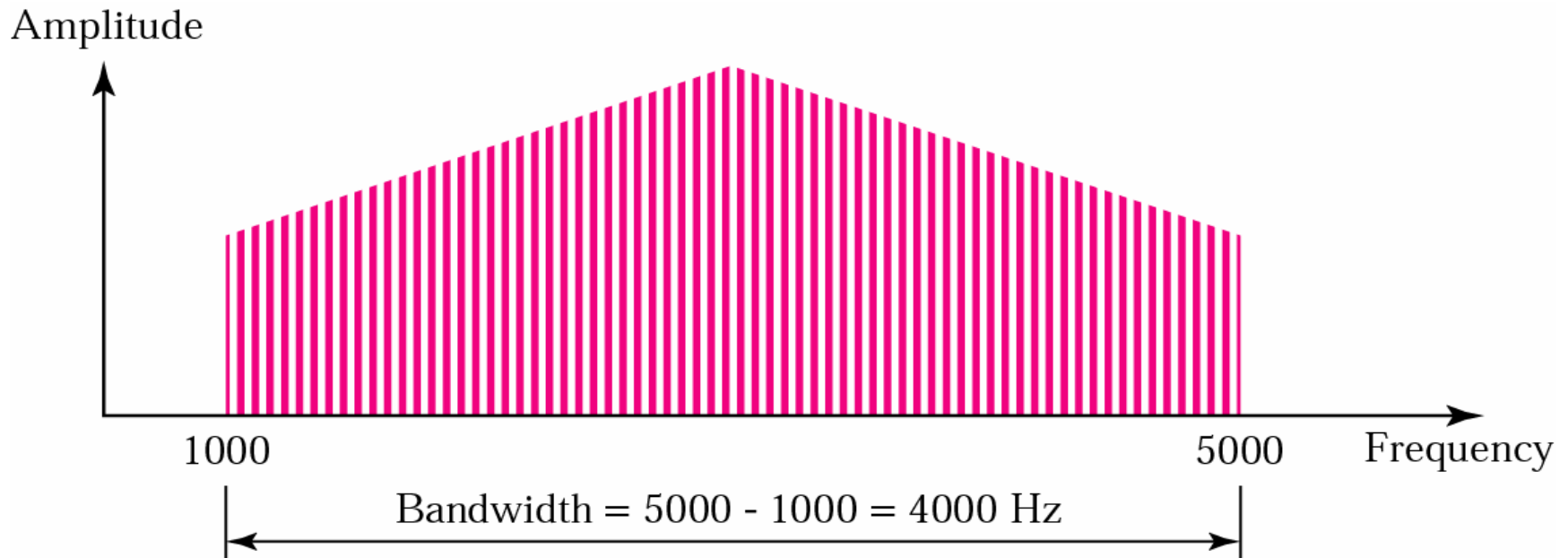




Bandwidth

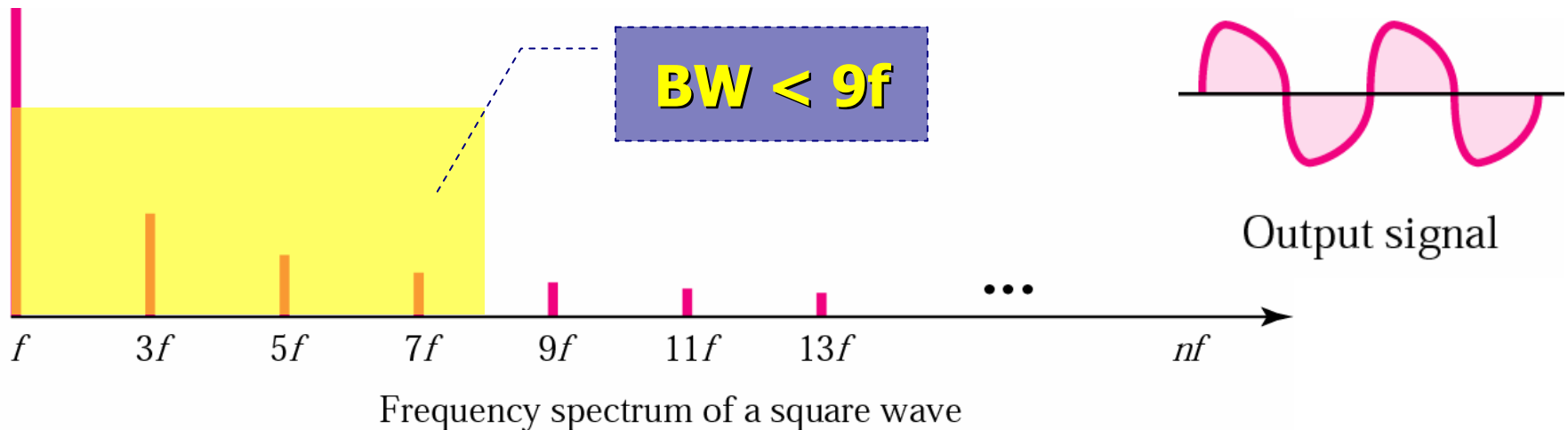
Bandwidth คือ พิสัยของความถี่ ซึ่งตัวกลางยอมให้ผ่านไปได้ คำนวณได้จากผลต่างระหว่างความถี่สูงสุด และต่ำสุด ซึ่งมีระดับพลังงานลดทอนลงไม่เกินกึ่งหนึ่ง

$$0.5 \cdot A_{in}^2(f) \leq A_{out}^2(f) \leq A_{in}^2(f)$$



Bandwidth and Signal Spectrum

ถ้า Bandwidth ของตัวกลาง ไม่สอดคล้องกับ Signal Spectrum จะเกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณที่ด้านรับ (Distortion) ตัวอย่างเช่น ในปีปัจจุบัน ยังไม่มีตัวกลางชนิดใด ที่สามารถส่งผ่านความถี่ได้ถึงอนันต์ ดังนั้นถ้าส่งสัญญาณ Square ไปตามตัวกลางจะเกิด Error เสมอ



ตัวอย่าง Signal Spectrum ของเสียงพูดอยู่ระหว่าง 300 – 3300 Hz (พิสัย = 3000 Hz) ถ้า นำส่งผ่านตัวกลางที่มี Bandwidth 2000 Hz (500 – 2500 Hz) จะเกิด Error (Distortion) ขึ้น แต่ความบิดเบี้ยวนี้อาจน้อยมาก จนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้



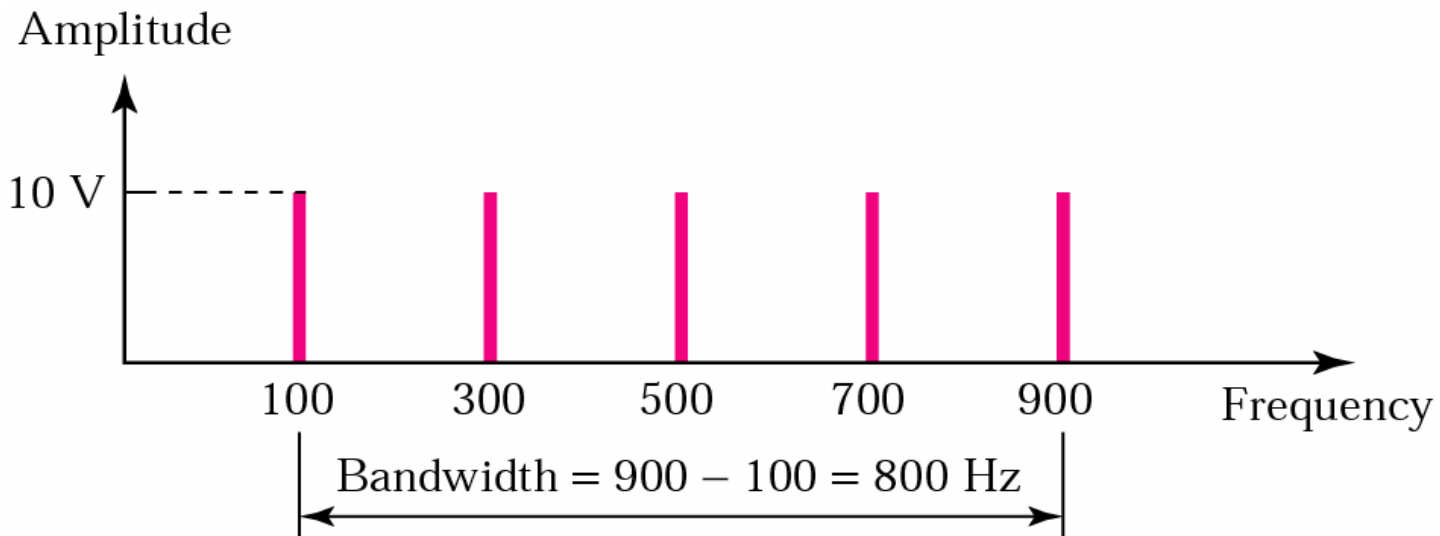
Examples

Example 3 ถ้าสัญญาณแบบคาบ Periodic แยกออกได้เป็น Sinusoidal Waves 5 ความถี่ ได้แก่ 100 300 500 700 และ 900 Hz แล้ว Bandwidth ของสัญญาณนี้มีค่าเท่ากับเท่าใด และจงวาด Spectrum สมมติว่าทุกๆ ความถี่มีระดับสัญญาณเท่ากับ 10 V

Solution

$$BW = f_h - f_l = 900 - 100 = 800 \text{ Hz}$$

Spectrum มี Spike 5 แห่ง ที่ 100 300 500 700 และ 900 Hz





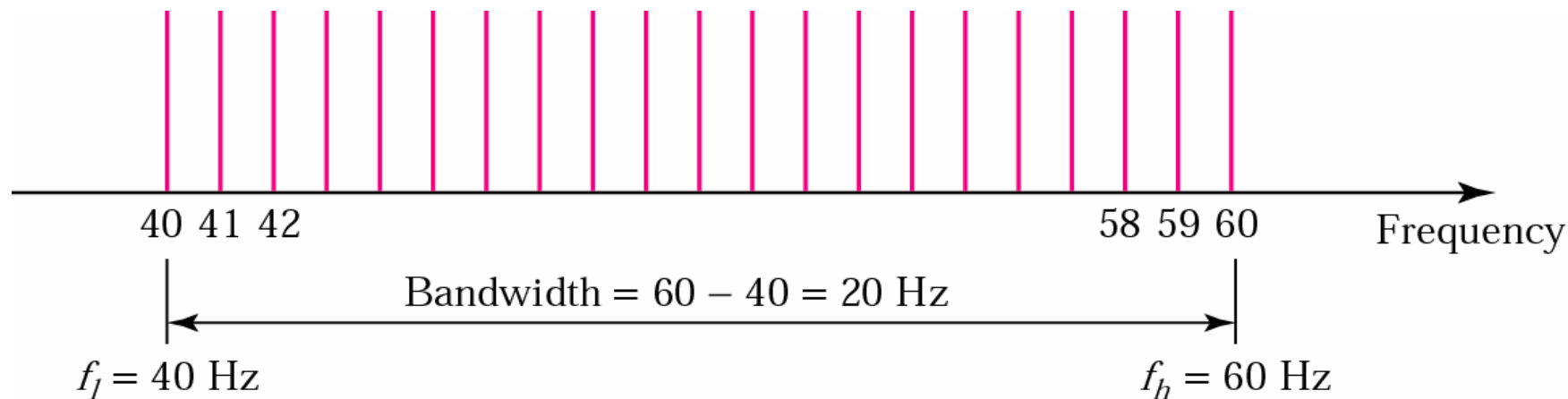
Examples

Example 4 ถ้าสัญญาณมี Bandwidth 20 Hz และความถี่สูงสุดเท่ากับ 60 Hz จงหาความถี่ต่ำสุด จงวาด Spectrum ของสัญญาณนี้ ถ้าสัญญาณประกอบด้วยคลื่น Sine ความถี่จำนวนเต็มหน่วย ที่มีขนาดเท่ากัน

Solution

$$f_l = f_h - BW = 60 - 20 = 40 \text{ Hz}$$

Spectrum มี Spike 21 แท่ง ที่ความถี่เต็มหน่วย

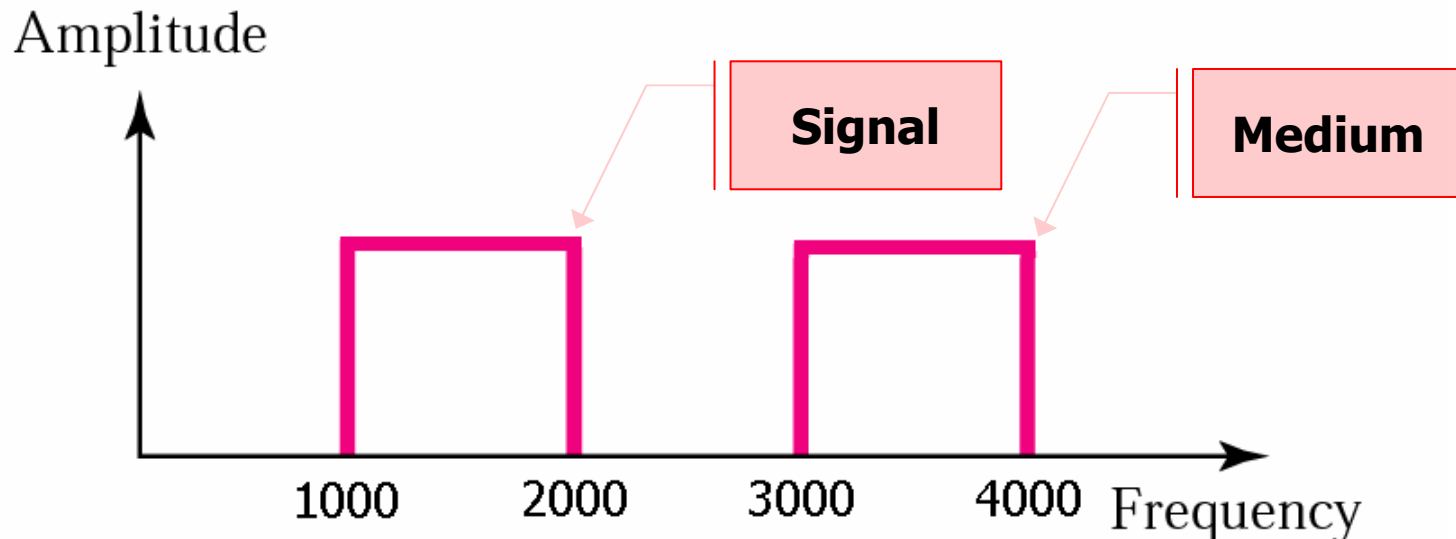


Examples

Example 5 ถ้าสัญญาณมี Spectrum อยู่ในช่วงระหว่าง 1000 Hz และ 2000 Hz (มี Bandwidth = 1000 Hz) และ ถ้าตัวกลางส่งผ่านความถี่ในช่วงระหว่าง 3000 Hz และ 4000 Hz สัญญาณนี้จะผ่านตัวกลางได้หรือไม่

Solution

ไม่ได้ เพราะถึงแม้ว่า Bandwidth จะเท่ากัน แต่พิสัยของช่วงความถี่ระหว่างสัญญาณ และตัวกลาง ไม่ซ้อนทับกัน ดังรูป





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