

สัญญาณ (Signal)

Signal is a varying physical quantity that can carry information.

ข้อพึงพิจารณาที่สำคัญประการหนึ่งของการสื่อสารใน Physical Layer ได้แก่การส่งผ่านข้อมูลระหว่างจุดเชื่อมต่อในเครือข่าย (Network Connections) ในรูปของพลังงานทางกายภาพ ผ่านทางตัวกลางส่งผ่าน (Transmission Medium) ในหลายๆ กรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์ พลังงานดังกล่าวมักจะอยู่ในรูปของ **สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า** (Electromagnetic Signal)



นิยามของสัญญาณ คือ **ปริมาณทางกายภาพ (Physical Quantity) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time: t)** และสามารถถ่ายทอดข่าวสารได้ ทั้งนี้ปริมาณดังกล่าวอาจอยู่ในรูปของ พลังงานเชิงกล พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า หรือปริมาณอื่นๆ ใดๆ ก็ได้ ในบริบทของการสื่อสารข้อมูล บทนี้จะจำแนกประเภทของสัญญาณโดยพิจารณาจากคุณสมบัติเชิงอนุพันธ์ของฟังก์ชันเทียบกับตัวแปรเวลาออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ สัญญาณ Analog และ สัญญาณ Digital

โดยทั่วไปข้อมูลที่จะมีการแลกเปลี่ยนกันระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ มักจะไม่อยู่ในรูปแบบที่สามารถส่งผ่านไปบนเครือข่ายได้ ตัวอย่างเช่น เราไม่สามารถสอดมันฟิล์มภาพยนตร์ ไปในหัวต่อโทรศัพท์พื้นฐาน (Land-line Telephone) เพื่อส่งไปให้ผู้ชมที่บ้านดูได้ แต่เราสามารถส่ง **การเข้ารหัส** หลักเกณฑ์อธิบายขั้นตอนในการสร้างภาพเคลื่อนไหวในภาพยนตร์ ในรูปของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าในสายตัวนำ สัญญาณที่สร้างขึ้นจะเดินทางผ่านตัวนำโดยอาศัยการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อไปถึงปลายทางด้านรับ จะมีอุปกรณ์ทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณ และทำ **การถอดรหัส** หลักเกณฑ์ดังกล่าว เพื่อสร้างภาพเคลื่อนไหวในฟิล์มต้นฉบับกลับคืนมา (Reconstruction) เป็นต้น

สรุป

การส่งข้อมูลไปในตัวกลางระหว่างจุดเชื่อมต่อในเครือข่าย จำเป็นจะต้องมีการแปลง (Transformation) ข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณ (Signal) ที่เหมาะสมกับตัวกลางส่งผ่านนั้น เช่น การส่งข้อมูลไปในตัวกลางประเภทตัวนำไฟฟ้า ต้องมีการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Signal) เป็นต้น

สัญญาณอนาล็อก และ สัญญาณดิจิตอล

ในกระบวนการสื่อสาร สัญญาณสามารถจำแนกออกได้เป็นสองประเภทหลักๆ ได้แก่ สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) และสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal) โดยอาศัยการวิเคราะห์ความต่อเนื่อง หรืออนุพันธ์ (Derivatives) ของสัญญาณเทียบกับเวลา ดังนี้

สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal)

สัญญาณประเภทนี้เป็นสัญญาณที่สามารถนำเสนอ (Represent) ปริมาณทางกายภาพที่เป็นปริมาณจริง (Real Quantity) กล่าวคือ สัญญาณ Analog เป็นสัญญาณที่มีระดับ (Levels) ของความเข้มที่เป็นไปได้ เป็นจำนวนอนันต์ ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา ระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปจาก เวลา A ไปเวลา B จะผ่าน และครอบคลุมค่าของระดับเป็นจำนวนอนันต์ หรืออีกนัยหนึ่ง ในทางคณิตศาสตร์ เราสามารถหาค่าของอนุพันธ์ของฟังก์ชันของสัญญาณเทียบกับเวลาได้ทุกๆ จุดตลอดช่วง (A, B)

สัญญาณดิจิตอล (Digital Signal)

สัญญาณประเภทนี้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับนำเสนอ ปริมาณในรูปแบบของสัญลักษณ์ (Symbols) เนื่องจากเป็นสัญญาณที่มีระดับของความเข้มเป็นค่าคงที่จำนวนจำกัด (เป็นจำนวนที่นับได้) โดยที่ระดับสัญญาณค่าหนึ่งจะหมายถึงสัญลักษณ์ตัวหนึ่ง ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา จากเวลา A ไปเวลา B จะมีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Abrupt) ระหว่างสัญลักษณ์ที่ติดกัน หรืออีกนัยหนึ่ง ในทางคณิตศาสตร์ เราไม่สามารถหาค่าของอนุพันธ์ของฟังก์ชันของสัญญาณเทียบกับเวลาได้ทุกๆ จุดตลอดช่วง (A, B) โดยทั่วไป ค่าของสัญญาณมักจะมี 2 ค่า เพื่อใช้แทน สัญลักษณ์ 0 และ 1 เป็นต้น

การแสดงผลสัญญาณอย่างง่าย สามารถทำได้ดังรูป โดยแสดงการเปลี่ยนแปลง (ค่าของพลังงานหรือ ความเข้ม) ของสัญญาณ ในแกนตั้ง (Value) เทียบกับเวลา ในแกนนอน (Time)

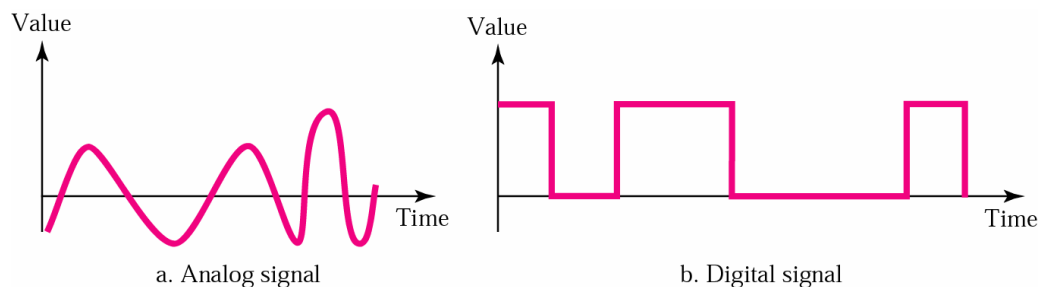


FIGURE 3.1 เปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อก (a) และสัญญาณดิจิตอล (b)

หมายเหตุ

สำหรับสัญญาณดิจิตอล ที่มีจำนวนระดับที่เป็นไปได้มากกว่า 2 ระดับจะเรียกว่า M-ary เมื่อ M คือจำนวนของระดับตัวอย่างเช่น 4-ary ใช้เรียกสัญญาณที่มีทั้งหมด 4 ระดับ (สัญลักษณ์) ซึ่งสามารถแสดงด้วยเลขฐานสองขนาด 2 บิต ได้แก่ 00, 01, 10 และ 11

ตัวอย่างของข้อมูลที่แทนด้วยสัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิตอล ได้แก่ สัญญาณเสียงพูดซึ่งแปลงจากคลื่นเสียงในอากาศเป็น พลังงานไฟฟ้า ด้วย Microphone และข้อมูลที่บรรจุในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Memory) ในรูปของ ปริมาณของประจุไฟฟ้า ในอุปกรณ์วงจรรวม ตามลำดับ

สัญญาณซ้ำคาบ และไม่ซ้ำคาบ (Periodic and Non-periodic Signals)

ทั้งสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณอนาล็อก ยังสามารถ จำแนกออกได้เป็นแบบ **ซ้ำคาบ** และ **ไม่ซ้ำคาบ** กล่าวคือ

สัญญาณซ้ำคาบ (Periodic Signal) คือสัญญาณที่มีรูปแบบ (Pattern) หนึ่งภายในช่วงเวลา หรือ **คาบ (Period)** ที่จำกัด (สามารถวัดได้) โดยรูปแบบดังกล่าวปรากฏซ้ำ ด้วยคาบที่เท่าๆ กัน *ตลอดช่วงที่พิจารณา* และเรียกการวนครบรูปแบบหนึ่งครั้ง ของสัญญาณดังกล่าวว่า **รอบ (Cycle)**

สัญญาณไม่ซ้ำคาบ (Non-periodic หรือ Aperiodic Signal) ได้แก่สัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถระบุรูปแบบที่แน่นอน หรือระบุรอบการปรากฏซ้ำของสัญญาณได้ *ตลอดช่วงที่พิจารณา*



ถึงแม้ว่าในกรณีทั่วไป ทั้งสัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิทัล สามารถเป็นได้ทั้งแบบที่ซ้ำคาบ และแบบที่ไม่ซ้ำคาบ แต่ในแง่ของการสื่อสารข้อมูลแล้ว สัญญาณที่มีการใช้งานบ่อย เนื่องจากสามารถ **บรรจุข้อมูลข่าวสาร** ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ สัญญาณอนาล็อก แบบซ้ำคาบ (Periodic Analog Signal) และ สัญญาณดิจิทัล แบบไม่ซ้ำคาบ (Non-periodic Digital Signal)

สัญญาณอนาล็อก

สัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ชนิดซ้ำคาบ สามารถแบ่งจำแนกออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่ Simple Signal และ Composite Signal ดังนี้

สัญญาณอย่างง่าย (Simple Signal)

สัญญาณอย่างง่าย (Simple Signal) อีกชื่อหนึ่งเรียกว่า Sine Wave ได้แก่สัญญาณที่สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันประเภท Sinusoidal และไม่สามารถแบ่งย่อยออกเป็นฟังก์ชันที่ง่ายกว่านั้นได้ Simple Signal หรือ Sinusoidal Signal เป็นสัญญาณซ้ำคาบมูลฐาน สำหรับการสื่อสารแบบ Analog มีลักษณะเส้นโค้งต่อเนื่อง ที่มีการแกว่งด้วยคาบเวลาคงที่ T (วัดจากท้องคลื่น ถึง ยอดคลื่น) ดังรูป

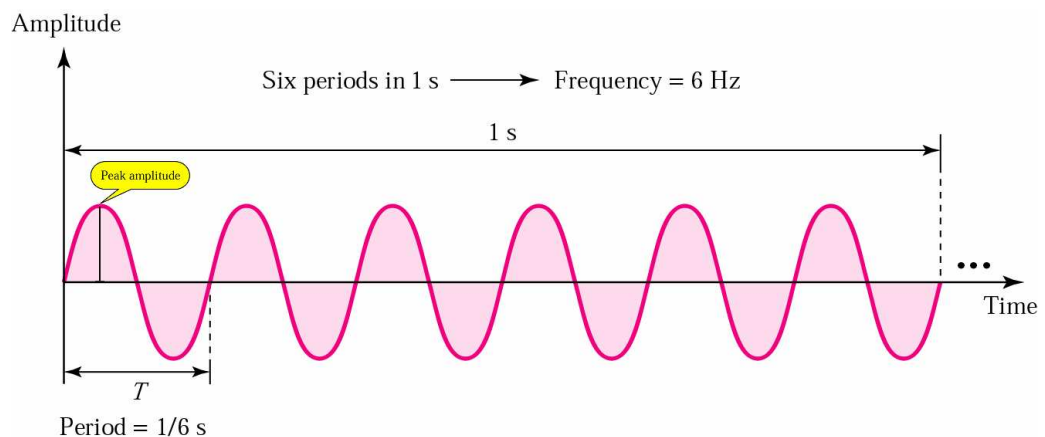


FIGURE 3.2 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมีความถี่ 6 Hz แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณ (Amplitude) เทียบกับเวลา (Time) ในช่วงเวลา 1 วินาที

สัญญาณดังรูปสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$ โดยที่

$s(t)$ คือ ความเข้มของสัญญาณ ณ เวลา t ใดๆ ในช่วงที่พิจารณา

A คือ ความเข้มสูงสุดของสัญญาณ (Peak Amplitude) วัดจากจุดสมดุล ถึงยอดคลื่น

f คือ ความถี่ของสัญญาณ (จำนวนของรอบการเปลี่ยนของรูปแบบ ต่อวินาที) ซึ่งสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของคาบเวลา T (วินาที) กล่าวคือ $f = 1/T$

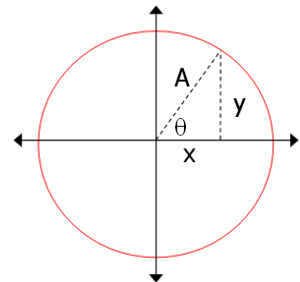
ϕ คือ Phase หรือ ตำแหน่งเชิงมุม ณ จุดเริ่มต้น $t = 0$ ของสัญญาณ (เวลาอ้างอิง)



เราสามารถสร้างสัญญาณ Sine ที่มีความสูง A หน่วย ได้จากรูปวงกลมรัศมี A นิยามด้วยสมการ $x^2 + y^2 = A^2$ ซึ่งสอดคล้องกับ ทฤษฎีบท Pythagoras สำหรับความยาวด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลม และ ด้วยทฤษฎีบทดังกล่าว เราสามารถเขียน ค่าของ x และ y ในรูปของ A และ θ ดังต่อไปนี้ $x(\theta) = A \cos(\theta)$ และ $y(\theta) = A \sin(\theta)$

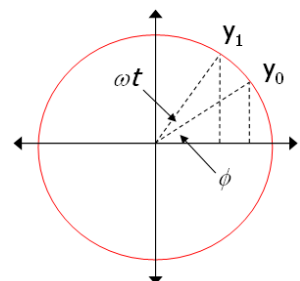
ถ้าสมมติให้ $\text{Sine}(t) = y(\theta(t))$ จะได้ว่า $\theta(t) = \omega t + \phi$, $\omega = 2\pi f$

อีกนัยหนึ่ง ความเข้มของ Sinusoidal Signal ณ เวลา t ใดๆ สามารถคำนวณได้จากความสูง y ของ สามเหลี่ยมมุมฉาก ภายในวงกลมรัศมี A ที่มุม $\theta = \omega t + \phi$ เรียก ω ว่า ความเร็วเชิงมุม ดังรูปด้านขวาบน



Phase ของสัญญาณ คือ ตำแหน่งเชิงมุม ϕ (radian) ณ จุดเริ่มต้น (เวลา $t = 0$) หรือ คือการเลื่อนของสัญญาณ ในแกนเวลา ณ คาบแรก เนื่องจาก $\theta(t) = \omega t + \phi$ ดังนั้น เราอาจแบ่งมุม $\theta(t)$ ออกเป็น สองส่วน ได้แก่ ωt และ ϕ ซึ่งเป็นตำแหน่งซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา (t) และ ตำแหน่งคงที่ หรือ Phase ของสัญญาณ ตามลำดับ

เราสามารถเขียนเป็นแผนผัง แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง ขนาดของสัญญาณ และตำแหน่งเชิงมุม ได้ดังรูปด้านขวาล่าง และอาจกล่าวได้ว่า ณ เวลา $t = 0$ องค์ประกอบ ωt มีค่าเป็น 0 ดังนั้น $\text{Sine}(t) = A \sin(\phi)$ โดยขนาดของสัญญาณ ณ จุดเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $\text{Sine}(0) = y_0$



หน่วยการวัดของ Phase ได้แก่ *rad* หรือ *degree* โดยที่ $2\pi \text{ rad} = 360^\circ \text{ degree}$ จากรูปที่ 3.3 a. b. และ c. คือรูปสัญญาณ Sinusoidal หนึ่งคาบ ที่มี phase เลื่อน ไป 0 90 และ 180 องศา ตามลำดับ

เนื่องจากความถี่คืออัตราการเปลี่ยนแปลง (ของสัญญาณ) เทียบกับเวลา ดังนั้นเราอาจพิจารณาจำแนก ลักษณะของสัญญาณเชิงความถี่ ได้ดังต่อไปนี้

การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลานั้น หมายถึง ความถี่สูง (High Frequency)

การเปลี่ยนแปลงในระยะเวลายาว หมายถึง ความถี่ต่ำ (Low Frequency)

ถ้าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความถี่มีค่าเป็น 0 (DC – Direct Current)

ถ้าสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ความถี่มีค่าเป็นอนันต์ (Infinity)

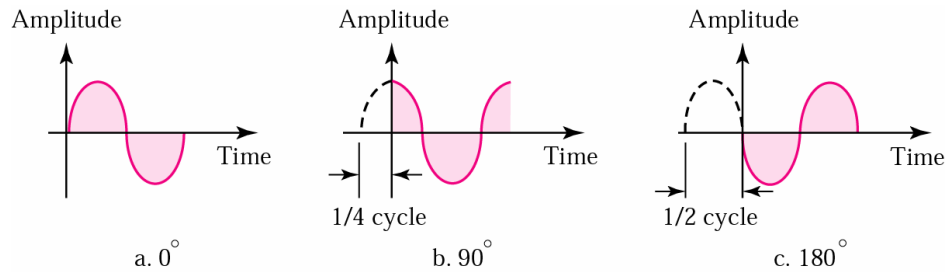


FIGURE 3.3 สัญญาณ Sinusoidal ซึ่งมี Phase เลื่อนไป 0 90 และ 180 องศา ตามลำดับ

โดเมนเวลา และโดเมนความถี่ (Time and Frequency Domains)

Sinusoidal Signal หนึ่งประกอบด้วยสมบัติ 3 ประการ ได้แก่ Amplitude Frequency และ Phase การนำเสนอสัญญาณดังกล่าวด้วยแผนภาพ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การแสดงผลในโดเมนเวลา (Time-domain Plots) และในโดเมนความถี่ (Frequency-domain Plots)

Time Domain Plot เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้ม (A) เทียบกับเวลา (t) โดยที่สำหรับความถี่ (f) และ เฟส (φ) นั้นถึงแม้จะไม่มี การแสดงอย่างชัดเจน แต่สามารถวัดได้ ดังตัวอย่าง

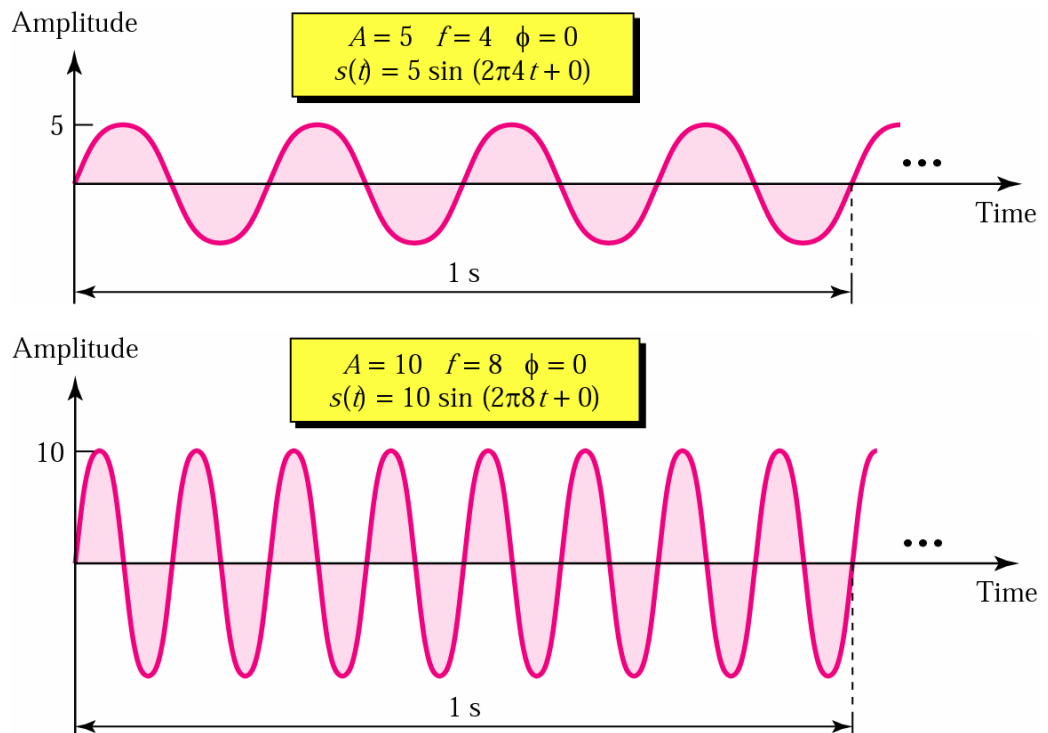


FIGURE 3.4 Time-domain Plots ของ Sinusoidal Signals ที่มี Amplitude และ Frequency ต่างกัน แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้ม (Amplitude) ของสัญญาณทั้งสอง เทียบกับเวลา (Time)

Frequency-domain Plot เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Amplitude และ Frequency ของสัญญาณ ดังตัวอย่างเปรียบเทียบ Time-domain Plot และ Frequency-domain Plot ของสัญญาณที่สมมูลกันต่อไปนี้ (หมายเหตุ หากต้องการแสดงองค์ประกอบให้ครบถ้วน จะต้องเพิ่มแกนแสดง Phase เทียบกับความถี่ด้วยซึ่ง ไม่กล่าวถึงในขั้นนี้)

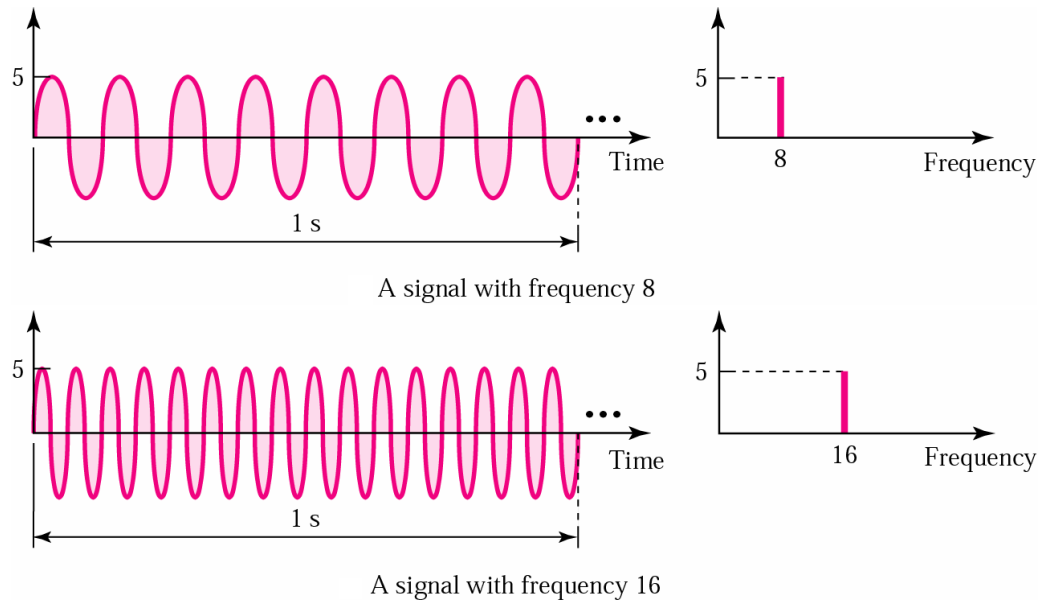


FIGURE 3.5 Time-domain Plots (ซ้าย) เทียบกับ Frequency-domain Plots (ขวา) ของ Sinusoidal Signals ที่มี Frequency ต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเราสามารถอธิบายคุณสมบัติด้าน Amplitude และ Frequency ของสัญญาณ ใน Frequency-domain Plot ด้วยแท่งตรง (Spike) เพียง 1 แท่ง ซึ่งกระชับกว่าการแสดงด้วย Time-domain Plot ของสัญญาณที่สมมูลกัน

ดังนั้น สัญญาณ Frequency-domain Plots จึงเหมาะสำหรับใช้อธิบาย Analog Signal ชนิดซ้ำคาบ

สัญญาณผสม (Composite Signal)

สัญญาณประเภท Simple Signal เพียงหนึ่งสัญญาณ เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในรูปแบบซ้ำๆ กัน ซึ่งไม่สามารถบรรจุปริมาณข่าวสารได้เพียงพอต่อการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นหากต้องการใช้ Sine Wave ในการสื่อสาร จำเป็นต้องมีการปรับแต่งคุณลักษณะของสัญญาณ ได้แก่ ระดับความสูง (A) เฟส (ϕ) และความถี่ (ω) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างประกอบกัน

การสื่อสารข้อมูลที่ประกอบด้วยการปรับแต่งคุณลักษณะ (Characteristics) ของสัญญาณ ตามข่าวสารที่ต้องการถ่ายโอนดังกล่าว ก่อให้เกิด สัญญาณชนิดใหม่เรียกว่าสัญญาณผสม (Composite Signal) ซึ่งประกอบด้วย Simple Signal หลายสัญญาณ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นจำนวนความถี่ของ Composite Signal จึงแปรผันโดยตรงกับ ความหลากหลายของกลุ่มคุณลักษณะเหล่านั้น

การกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series Expansion)

สัญญาณผสมใดๆ สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series Expansion) เพื่อหา Simple Signals ที่ประกอบขึ้นเป็นสัญญาณผสมนั้นๆ กล่าวคือ $s(t) = \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)$

ซึ่งผลลัพธ์สามารถแสดงได้ทั้งในรูปของ Sinusoidal Signal ที่มีความถี่ต่างๆ กันใน **Time Domain** และในรูปของฟังก์ชัน Delta (δ) ณ ความถี่ต่างๆ กันใน **Frequency Domain** การวิเคราะห์ Composite Signal ด้วยการกระจายอนุกรมฟูรีเยร์เพื่อหาความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) และความถี่ก่าทอน (Harmonics) แสดงได้ดังตังสมการ

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

เมื่อ $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T$ โดยที่ T คือคาบของสัญญาณฟูรีเยร์ คำนวณได้ดังนี้

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

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

ตัวอย่าง Composite Signal เบื้องต้นได้แก่ คลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ซึ่งมีคาบเวลา T และขนาด (ระดับความสูง) A จะกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังนี้

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

จากสมการวิเคราะห์ได้ว่า **Fundamental Frequency** (f) มีขนาด $4A/\pi$ และ **Harmonics Frequencies** ที่ $(2n+1)f$ มีขนาด $4A/[(2n+1)\pi]$ เมื่อ $n = 1 \dots \infty$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

Amplitude

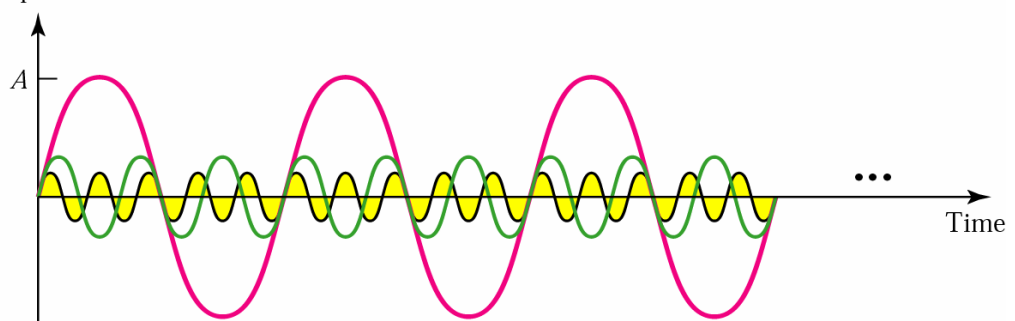


FIGURE 3.6 Time-domain Plot ของ Fundamental Signal และ Harmonic Signal จำนวน 2 สัญญาณแรกในแกนเดียวกัน

ถ้านำองค์ประกอบความถี่มาบวกกัน ยิ่งจำนวนพจน์ของ Simple Signal ที่รวมมากเท่าใด ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเข้าใกล้ (Converge) สัญญาณต้นฉบับมากเท่านั้น เช่นหากนำ Simple Signal ซึ่งประกอบด้วย Fundamental Signal และ Harmonic Signal อีก 2 ความถี่ดังรูปที่ 3.6 มารวมกันตามสมการ

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

จะได้สัญญาณซึ่งใกล้เคียงกับ Square Wave ต้นฉบับดังรูปที่ 3.7

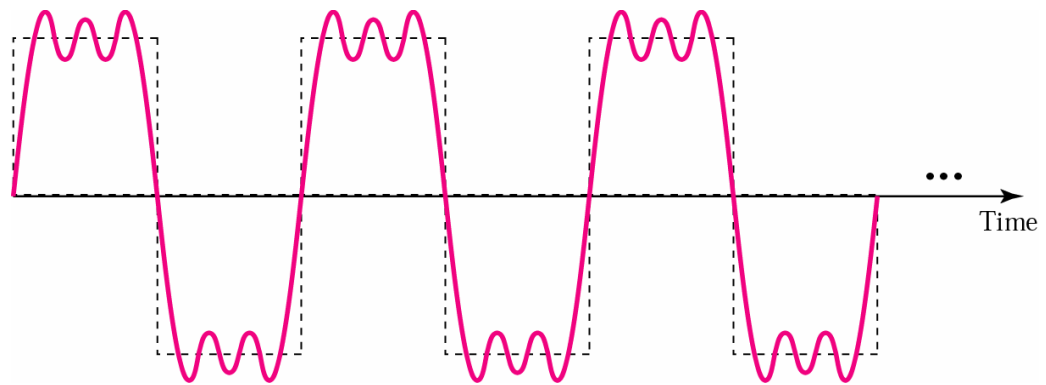
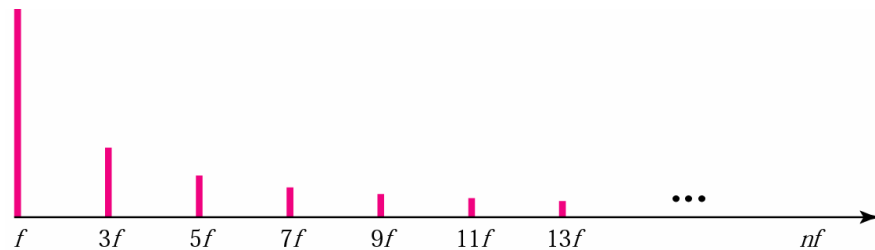
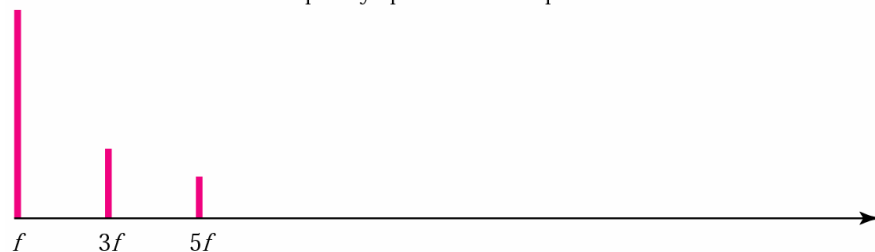


FIGURE 3.7 Time-domain Plot ของ Composite Signal ที่ได้จากการรวม Simple Signal ในรูปที่ 3.6

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

FIGURE 3.8 Frequency Spectrum ของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (a) และของสัญญาณซึ่งประมาณด้วย Harmonic เพียง 3 ความถี่

ตัวกลางส่งผ่าน

ในการสื่อสาร สัญญาณ Composite จะส่งผ่านตัวกลาง (เช่น สายนำสัญญาณ หรืออากาศ) ซึ่งตัวกลางส่งผ่าน (Transmission Medium) แต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

คุณสมบัติของตัวกลาง สัมพันธ์กับความถี่ กล่าวคือตัวกลางอาจ ส่งผ่าน เพียงบางความถี่ และ **ลดทอน** หรือ **กัก** ความถี่อื่นที่เหลือ ดังนั้น สัญญาณที่รับได้ที่ปลายด้านรับของตัวกลางอาจไม่สมบูรณ์ เช่น เมื่อส่งสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมเข้าสู่ตัวกลาง ฝั่งด้านรับอาจจะไม่ได้รับสัญญาณที่เหมือนกับต้นทางก็ได้

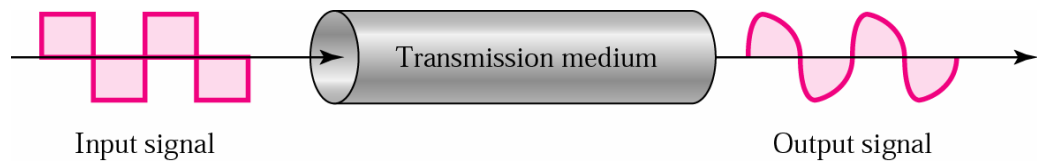


FIGURE 3.9 แสดงแนวคิดของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ที่ฝั่งด้านรับ (Output Signal) จากสัญญาณที่ฝั่งด้านส่ง (Input Signal)

ความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth)

ความกว้างของแถบความถี่ (Bandwidth) คือพิสัยของความถี่ ซึ่งตัวกลางยอมให้ผ่านไปได้ คำนวณได้จากผลต่างระหว่างความถี่สูงสุด และต่ำสุด ซึ่งมีระดับพลังงานลดทอนลงไม่เกินกึ่งหนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่ง

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

เมื่อ A_{in} และ A_{out} คือระดับสัญญาณที่ฝั่ง Input และ Output ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

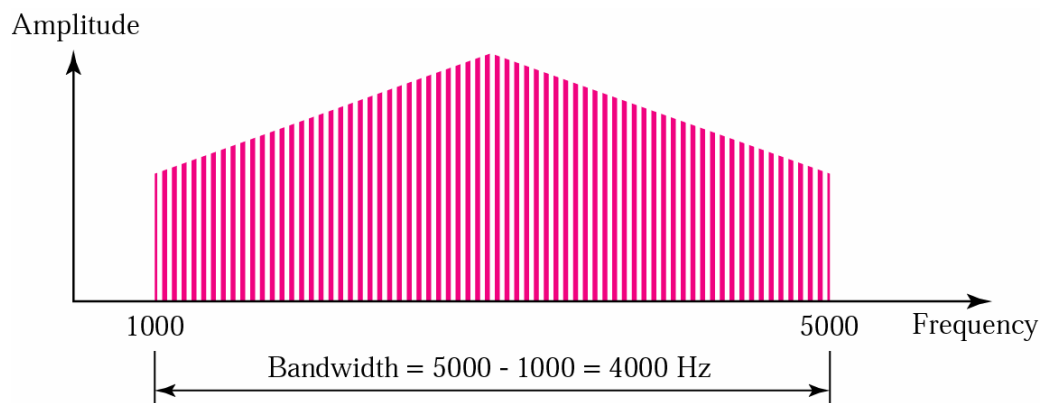


FIGURE 3.10 Frequency Plot ของแถบความถี่ที่สามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 Hz ถึง 5000 Hz หรือคิดเป็น Bandwidth ซึ่งกว้างเท่ากับ 4000 Hz

แถบความถี่ของตัวกลางและสัญญาณ (Bandwidth and Signal Spectrum)

ถ้า Bandwidth ของตัวกลางส่งผ่าน ไม่สอดคล้องกับ Signal Spectrum จะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ด้านรับ (Distortion) ตัวอย่าง Signal Spectrum ของเสียงพูดอยู่ระหว่าง 300 – 3300 Hz (พิสัย = 3000 Hz) ถ้านำส่งผ่านตัวกลางที่มี Bandwidth 2000 Hz (500 – 2500 Hz) จะเกิด Error (Distortion) ขึ้น แต่ความผิดเพี้ยนนี้อาจน้อยมาก จนไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างได้

อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ ในปัจจุบัน ยังไม่มีตัวกลางชนิดใด ที่สามารถส่งผ่านความถี่ได้ถึงอนันต์ ดังนั้นถ้าส่งสัญญาณ Square ไปตามตัวกลางจะเกิด Distortion เสมอ ดังรูป

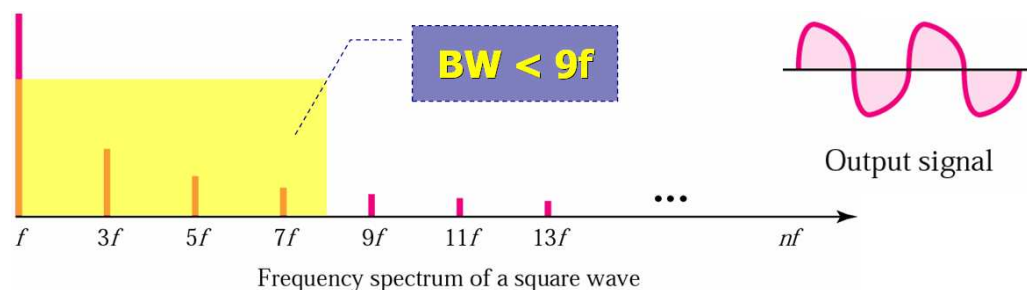


FIGURE 3.11 ในกรณีที่ Bandwidth ของตัวกลางมีค่าน้อยกว่าความถี่ Harmonic ที่ 9 (ความถี่ 9 เป็นเท่าของความถี่มูลฐาน) ของสัญญาณสี่เหลี่ยม จะได้ว่ามีเพียงองค์ประกอบตั้งแต่ความถี่ Harmonic ที่ 7 ลงไปเท่านั้นซึ่งสามารถส่งผ่านตัวกลางไปได้ ซึ่งทำให้เกิด Output Signal ที่ผิดเพี้ยนไปดังรูปด้านขวา

สัญญาณดิจิทัล

สัญญาณดิจิทัล สามารถใช้นำเสนอ **ข้อมูลข่าวสาร** ได้เช่นเดียวกับสัญญาณอนาลอก อาทิเช่น หากแทนเลข '1' ด้วยระดับแรงดัน ที่เป็นจำนวนจริงบวก และแทนเลข '0' ด้วยระดับแรงดันศูนย์ (Ground) จะเรียกสัญญาณดิจิทัลนั้นว่า สัญญาณเลขฐานสอง (Binary Signal)

ช่วงบิตและอัตราบิต (Bit Interval and Bit Rate)

เนื่องจากสัญญาณดิจิทัลในการสื่อสาร เป็นแบบ **ไม่ซ้ำคาบ** (Non-periodic Signal) ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ โดยใช้ ความถี่ และคาบเวลา เหมือนสัญญาณอนาลอกได้ ดังนั้น สำหรับการสื่อสารในรูปแบบนี้ จะนิยามตัวแปรที่เทียบเคียงกัน ได้แก่

Bit Interval

ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 บิต (วินาที – s) เทียบเคียงได้กับตัวแปรคาบเวลา (T) ในสัญญาณอนาลอก)

Bit Rate

จำนวนของบิตข้อมูลที่สามารถส่งได้ภายในหนึ่งหน่วยเวลา (บิตต่อวินาที – bps) เทียบเคียงได้กับตัวแปรความถี่ในสัญญาณอนาลอก)

จากการวิเคราะห์ Fourier หากต้องการแสดงสัญญาณ ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน อย่างเช่นสัญญาณดิจิทัล (ซึ่งคล้ายกับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม) ต้องใช้องค์ประกอบความถี่จำนวนอนันต์ ด้วยเหตุนี้ อาจกล่าวได้ว่า สัญญาณดิจิทัลคือสัญญาณอนาลอกชนิดผสม (Composite Signal) ซึ่งมี Spectrum เป็นอนันต์ หรืออีกนัยหนึ่ง Bandwidth ของสัญญาณดิจิทัลมีความกว้างไม่สิ้นสุด

สัญญาณดิจิทัลและตัวกลาง (Digital Signal and Medium)

ถ้า Bandwidth ของตัวกลางไม่สอดคล้องกับ Signal Spectrum จะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ด้านรับ อย่างไรก็ตามหากตัวกลางมี Bandwidth กว้างเพียงพอ (เช่น สายใยแก้วนำแสง เป็นต้น) ตัวกลางนั้นสามารถส่งสัญญาณดิจิทัลได้โดยไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ด้านรับมากนัก ในกรณีที่

ตัวกลางมี Bandwidth จำกัด ตัวกลางนั้นอาจสามารถส่งสัญญาณดิจิทัลได้ก็ต่อเมื่อ Bandwidth นั้นสัมพันธ์กับ Bit Rate ตามเงื่อนไขของ Nyquist หรือ Shannon อาจกล่าวได้ว่า “Digital Bandwidth คือ Bit Rate ที่สูงที่สุดที่ตัวกลางนั้นสามารถส่งผ่านได้” มีหน่วยเป็น Bit per Second (bps)

การส่งสัญญาณดิจิทัลเพียง 1 Harmonic ต้องการ Bandwidth เพียงแค่ ครึ่งหนึ่งของ Bit Rate ($BW = BR/2$) อย่างไรก็ตาม สำหรับ Bit Pattern ทั่วไป Composite Signal ที่ปลายทางด้านรับอาจจะผิดเพี้ยนไปมาก จนไม่สามารถกู้ข้อมูลเดิมกลับมาได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นที่ Bit Rate ค่าสูงจึงควรเพิ่ม Bandwidth เป็นจำนวนเท่าของ Harmonic คือ (พิจารณาสัญญาณดิจิทัลเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม)

การส่งสัญญาณดิจิทัลและอนาล็อก (Digital and Analog Transmission)

ในการพิจารณาส่งข่าวสารในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลหรืออนาล็อกนั้น ขึ้นกับชนิดของตัวกลางและ Bandwidth ที่มีอยู่ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบได้แก่ Low Pass และ Band Pass Channel

จากการวิเคราะห์ Fourier สัญญาณดิจิทัลมี Spectrum ระหว่าง 0 Hz จนถึงอนันต์ แต่สามารถผ่อนผันให้ความถี่สูงสุดส่งผ่านมีค่าไม่มากไปกว่าขอบเขต Bandwidth ของตัวกลาง (โดยยอมรับความผิดเพี้ยนที่อาจเกิดขึ้นที่ Harmonic สูงๆ) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า “สัญญาณดิจิทัลเป็น Low Pass Signal ที่มี Bandwidth อยู่ในช่วง $0 - f$ (ความถี่สูงสุด)” Low Pass Signal ต้องการตัวกลางประเภท Low Pass Channel ซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณี ได้แก่ 1) เมื่อตัวกลางถูกส่งวนไว้สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างจุดเท่านั้น และ 2) เมื่อมีการใช้งานตัวกลางร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ด้วยการจัดสรรทางเวลา (Time Division Multiplex)

สัญญาณอนาล็อก โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่ (Frequency Components) ในช่วงจำกัดระหว่าง f_1 ถึง f_2 จึงมี Bandwidth แคบกว่าสัญญาณดิจิทัล ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า “สัญญาณอนาล็อกเป็น Band Pass Signal ที่มี Bandwidth อยู่ในช่วง f_1 ถึง f_2 ” คุณสมบัติที่สำคัญของ Band Pass Signal คือสามารถเลื่อน Spectrum เป็นเท่าใดก็ได้ตราบที่ความกว้างของ Bandwidth มีค่าคงที่ ตัวกลางประเภท Band Pass Channel สามารถจัดสรรให้อุปกรณ์ใช้งานร่วมกันได้หลายวิธี รวมถึงการจัดสรรเชิงความถี่ (Frequency Division Multiplex)

พิกัดของอัตราเร็วของข้อมูล (Data Rate Limit)

อัตราเร็วสูงสุดของข้อมูลที่สามารถส่งผ่านตัวกลางได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ ดังนี้

Available Bandwidth ของตัวกลางที่ได้รับการจัดสรร หรือสามารถใช้ส่งข้อมูลได้

Levels of Signal หรือจำนวนของระดับสัญญาณ (Amplitude) ดิจิทัลที่ต้องการส่ง

Quality of Channel ซึ่งพิจารณาจากปริมาณของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง ซึ่งแบ่งการพิจารณา Bit Rate ออกได้เป็น 2 กรณี กล่าวคือ

○ Noiseless Channel ใช้เงื่อนไขของ Nyquist ในการพิจารณา

○ Noisy Channel ใช้เงื่อนไขของ Shannon ในการพิจารณา

Noiseless Channel หรือช่องสัญญาณที่ปราศจากสัญญาณรบกวน ใช้ Nyquist Bit Rate นิยามอัตราเร็วของข้อมูลสูงสุดทางทฤษฎีไว้ดังนี้

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

เมื่อ Bandwidth คือ Bandwidth ของตัวกลางมีหน่วยเป็น Hz

L คือ จำนวนของระดับสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ในการนำเสนอข้อมูล

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าอัตราเร็วของข้อมูล (Bit Rate) แปรผันโดยตรงกับจำนวนของระดับสัญญาณ (L) หรืออีกนัยหนึ่ง ในทางทฤษฎีสามารถแบ่งข่าวสารออกเป็นช่วงย่อยๆ (Quantization) ได้ไม่จำกัด ซึ่งทำให้ส่งข้อมูลด้วยอัตราที่เร็วมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติยังแบ่งช่วงมากเท่าไร ค่า Noise Margin (ระดับของสัญญาณรบกวนที่มากที่สุด ที่สัญญาณสามารถรับได้ โดยไม่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น) จะน้อยลงตามไปด้วย

Noisy Channel เนื่องจากเส้นทางการสื่อสารย่อมมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงไม่สามารถส่งสัญญาณด้วยอัตราเร็วไม่จำกัดตามทฤษฎีของ Nyquist ได้ สำหรับในกรณีนี้ Shannon ได้นิยามอัตราเร็วของข้อมูลสูงสุดทางปฏิบัติ (Shannon Bit Rate หรือ Shannon Capacity) ไว้ดังนี้

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

เมื่อ Bandwidth คือ Bandwidth ของตัวกลางมีหน่วยเป็น Hz

SNR (Signal to Noise Ratio) คือ อัตราส่วนของกำลังงานของสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง (Data Signal) ต่อกำลังงานของสัญญาณรบกวน (Noise)

สมการของ Shannon Bit Rate หรือ Shannon Capacity ไม่คำนึงถึงวิธีการเข้ารหัส (จำนวนระดับของสัญญาณ) ตรงที่ช่องทางการสื่อสารที่ใช้มีระดับ SNR คงที่

หมายเหตุ สำหรับช่องสัญญาณโดยทั่วไปมักนิยมใช้สมการของ Shannon หาขอบเขตบนของอัตราเร็วของข้อมูล (Bit Rate) สำหรับ Bandwidth และ SNR ของตัวกลางที่กำหนด แล้วจึงใช้สมการของ Nyquist หาจำนวนของระดับสัญญาณ (L) ที่ควรใช้

ข้อบกพร่องในการส่งผ่านสัญญาณ

การออกแบบระบบการสื่อสารข้อมูลในทางปฏิบัติ มักจำเป็นต้องมีการเผื่อให้อัตราเร็วของข้อมูลที่ส่งจริงมีค่า **น้อยกว่า** ค่าที่คำนวณได้ ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งผ่านสัญญาณโดยทั่วไปอาจมีข้อบกพร่องต่างๆ (Transmission Impairments) ที่มีผลต่อสัญญาณข้อมูล อาทิเช่น เกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างการส่งข้อมูล และ เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณที่ด้านรับจากด้านส่ง ซึ่งนำไปสู่การแปลความหมายของข้อมูลผิดพลาด ข้อบกพร่องดังกล่าวสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

การลดทอน (Attenuation)

การลดทอน คือการสูญเสียพลังงานของสัญญาณ (ทั้ง Simple และ Composite Signals) ภายในตัวกลางส่งผ่าน อันเนื่องมาจาก ความต้านทาน (เช่น ในรูปของความร้อน) ซึ่งอาจแก้ไขโดยใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) หรือในระบบเครือข่ายเรียกว่า Repeater ดังรูปที่ 3.12 Attenuation หรือ Gain (อันเกิดจากการลดทอน หรือ การทวนสัญญาณตามลำดับ) วัดได้จาก ความเข้มสัมพัทธ์ระหว่างสัญญาณปลายทาง (P_2) และต้นทาง (P_1) (ในหน่วย dB) ดังสมการ

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

ความผิดเพี้ยน (Distortion)

ความผิดเพี้ยน คือการที่สัญญาณเปลี่ยนรูปร่าง มักเกิดขึ้นเฉพาะกับ Composite Signal เท่านั้น เพราะ

- สัญญาณแต่ละความถี่เคลื่อนที่ไปในตัวกลางด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้ไปถึงด้านรับไม่พร้อมกัน
- สัญญาณแต่ละความถี่ ถูกลดทอนภายในตัวกลางด้วยอัตราที่ต่างกัน

ดังนั้นผลรวมของสัญญาณที่ด้านรับจึงแตกต่างจากด้านส่ง ดังรูปที่ 3.13

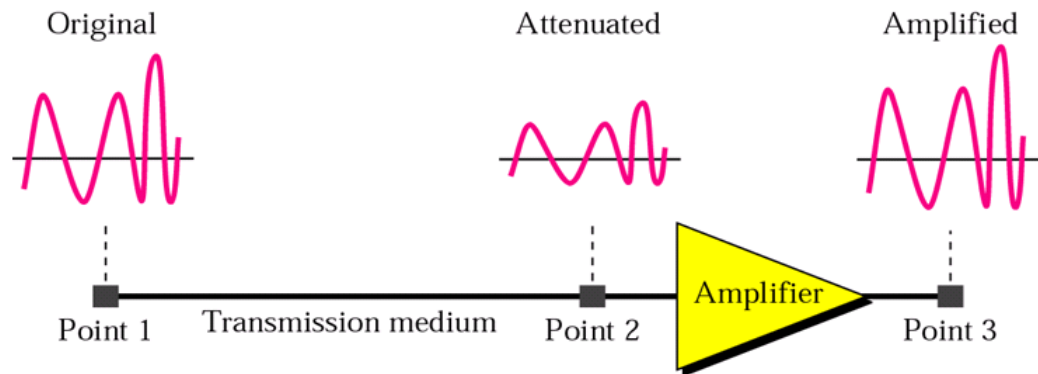


FIGURE 3.12 การเกิดการลดทอนในตัวกลางระหว่าง Point 1 และ Point 2 ซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณให้มีกำลังที่ Point 3 เท่ากับ Point 1

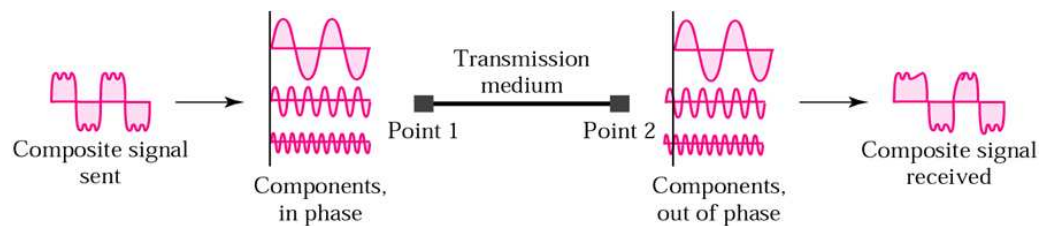


FIGURE 3.13 การเกิดความผิดเพี้ยนในตัวกลางอันเนื่องมาจากความต่างเฟสกันของความถี่แต่ละองค์ประกอบ

สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวน คือสัญญาณไม่พึงประสงค์ซึ่งปนมากับสัญญาณข่าวสารในตัวกลาง แบ่งออกได้หลายประเภทดังต่อไปนี้

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

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อการส่งข่าวสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณ และตัวกลางดังนี้

Propagation Time คือเวลาที่ข้อมูลใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง ระยะที่ข่าวสารเดินทาง (Distance) และความเร็วของข่าวสารนั้น (Speed)

Wavelength คือคุณสมบัติหนึ่งของ สัญญาณที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ (f) และคุณสมบัติของตัวกลาง ความยาวคลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากในการวิเคราะห์การสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

แบบฝึกหัด

- อธิบายความแตกต่างระหว่าง สัญญาณแอนาลอก และดิจิทัล ทั้งแบบซ้ำคาบ และไม่ซ้ำคาบ
- Simple Signal สามารถนิยามได้ด้วยฟังก์ชันใด มีองค์ประกอบ (ตัวแปร) ไตบ้าง อธิบาย
- คุณลักษณะใดบ้างของสัญญาณที่สามารถแสดงได้ด้วย Time Domain Plot และ Frequency Domain Plot
- กระจายอนุกรม Fourier ของสัญญาณสามเหลี่ยมสูง A หน่วย และมีคาบเวลา 1 วินาที
- ใช้การกระจายอนุกรม Fourier พิสูจน์ว่าถ้าสัญญาณสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันคี่แล้ว องค์ประกอบ Cosine (a_n) มีค่าเป็น 0
- ถ้าสัญญาณแบบซ้ำคาบ แยกออกได้เป็น Sinusoidal Waves 5 ความถี่ ได้แก่ 100 300 500 700 และ 900 Hz แล้ว Bandwidth ของสัญญาณนี้มีค่าเท่ากับเท่าใด และวาด Spectrum สมมติว่า ทุกๆ ความถี่มีระดับสัญญาณเท่ากับ 10 V
- ถ้าสัญญาณมี Spectrum อยู่ในช่วงระหว่าง 1 000 Hz และ 2 000 Hz (มี Bandwidth = 1 000 Hz) และ ถ้าตัวกลางส่งผ่านความถี่ในช่วงระหว่าง 3 000 Hz และ 4 000 Hz สัญญาณนี้จะผ่านตัวกลางได้หรือไม่
- ถ้าต้องการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 16 000 บิตต่อวินาทีผ่านตัวกลางที่มี Bandwidth 1 000 Hz และปราศจากสัญญาณรบกวน จะต้องแบ่งระดับสัญญาณดิจิทัลออกเป็นกี่ระดับ
- สามารถส่งข้อมูลผ่านตัวกลางที่มี Bandwidth 4 000 Hz ซึ่งมี SNR ประมาณ 11.77 dB ด้วยอัตราเร็วสูงสุดเท่าไร และจะต้องแบ่งระดับสัญญาณดิจิทัลออกเป็นกี่ระดับ
- อธิบายความหมายของ Attenuation Distortion และ Noise ในแง่ของผลกระทบต่อสัญญาณมาพอสังเขป