

บทที่ 2

ทฤษฎี

การสั่นสะเทือน (Vibration)

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ที่วัตถุมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมารอบจุดสมดุล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นแต่มักจะหลีกเลี่ยงไม่ได้ สำหรับเครื่องจักรแล้วสาเหตุของการสั่นสะเทือนนั้นมีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น การไม่สมดุลของชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่มีการหมุน การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของชิ้นส่วนเครื่องจักร การเสียดสีหรือการขัดถูกันของชิ้นส่วน การกระทบกันของชิ้นส่วน ฯลฯ ปรากฏการณ์เหล่านี้ล้วนแล้วแต่จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนทั้งสิ้น ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร ดังนั้นการที่จะทำให้เครื่องจักรทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนเพื่อที่จะสามารถจำกัดการสั่นสะเทือนให้มีค่าน้อยที่สุด

ประเภทของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้สองประเภทคือ

1. การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration)

คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบภายใต้การกระทำของแรงภายในระบบ โดยปราศจากแรงภายนอกมากระทำ

2. การสั่นสะเทือนแบบถูกกระตุ้น (Forced Vibration)

คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวลในระบบอันเกิดจากแรงภายนอก และการสั่นสะเทือนนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงภายนอกและความถี่ที่มากระตุ้น หากความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำนั้นตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้น นั่นคือขนาดของความสั่นสะเทือนของระบบจะมีค่ามากจนอาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration signal)

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่จะใช้วิเคราะห์มีอยู่ 3 รูปแบบ

- 1) สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา (Time Domain)
- 2) สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain)
- 3) สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนควิเฟรนซี (Quenfrensy Domain)

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา

คือ สัญญาณแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนของการกระจัด ความเร็ว หรือความเร่ง ในช่วงเวลาที่ทำการวัดสัญญาณ โดยในแง่ของคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลาจะพิจารณาจากผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) ของระบบที่พิจารณา

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่และผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมีความซับซ้อนมากจึงได้มีการจำลองสัญญาณขึ้นจากการทดลองวัดสัญญาณจริง เพื่อให้ได้สมการที่มีลักษณะใกล้เคียงการสั่นสะเทือนจริงของเฟืองมากที่สุดซึ่งสมการดังกล่าวจะมีรูปแบบดังนี้

$$y(t) = \sum_{n=0}^N X_n [1 + am_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \phi_n + fm_n(t)] \quad (2-1)$$

โดย f_m คือ ความถี่ของการขบกันของฟันเฟือง (Gear meshing frequency)

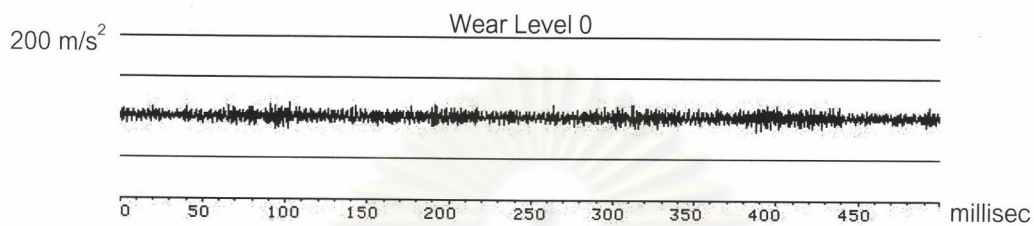
$am_n(t)$ คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation)

$fm_n(t)$ คือ ฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่ (Phase Modulation)

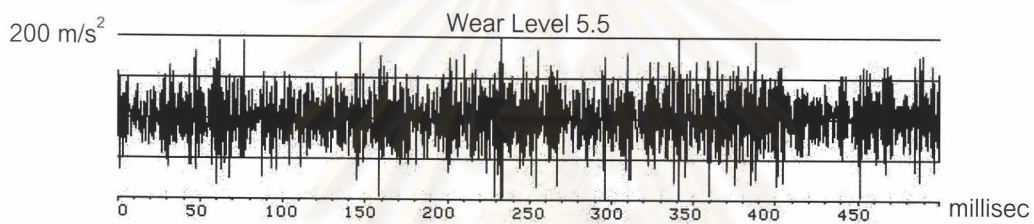
ϕ_n คือ มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n

ลักษณะสัญญาณจะมีความถี่พาหะ (Carrier Frequency) คือความถี่ของการขบกันของฟันเฟือง (GMF) ซึ่งถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณของการหมุนรอบตัวเองของเฟืองแต่ละตัวและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นต่างๆ การมอดูเลต (Modulation) จะมีทั้งแอมพลิจูดมอดูเลชัน และมอดูเลชันของความถี่ เนื่องจากสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองที่เกิดขึ้นจริงจะมีลักษณะของมอดูเลชันที่หลายความถี่รูปแบบของสัญญาณจึงมีความซับซ้อนมาก ซึ่งเป็นการยากที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุของความบกพร่องเนื่องจากไม่สามารถสังเกตเห็นความถี่พื้นฐานและความถี่มอดูเลชันของสัญญาณได้ การวิเคราะห์ที่

ทำได้ คือ การพิจารณาขนาดแอมพลิจูดโดยรวมของสัญญาณจากเครื่องวัดสัญญาณและนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณในรูปแบบเดียวกันของชิ้นส่วนดังกล่าวที่มีสภาพสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ (2-1) ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของสัญญาณบนโดเมนเวลาของชุดเฟืองตรงที่ทำจากทองเหลืองที่ความเร็ว 800 RPM รับภาระ 340 วัตต์ ที่มีระดับของการสึกหรอของเฟืองซึ่งที่ระดับ 0 (ไม่มีการสึกหรอ) และ 5.5 (พื้นสึกหรอประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาที่ปลายฟัน) [13]



(ก) เฟืองในสภาพสมบูรณ์



(ข) เฟืองที่เกิดการสึกหรอ

รูปที่ 2-1 การเปรียบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองบนโดเมนเวลา [13]

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลา

1) ค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak, X_{max})

คือค่าการสั่นสะเทือนที่มีระดับสูงสุดในช่วงเวลาที่ทำการวัดสัญญาณ โดยอาจเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ

2) ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส (Root Mean Square , RMS)

คือค่าการสั่นสะเทือนโดยรวม สามารถคำนวณได้จากการนำเอาข้อมูลเวลาแต่ละจุดในหน้าต่างเวลามายกกำลังสองแล้วทำการเฉลี่ยและถอดรากที่สอง ดังสมการต่อไปนี้

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} \quad (2-2)$$

3) ค่าเคอร์โทซิส (Kurtosis, kurt)

คือพารามิเตอร์ทางสถิติโมเมนต์อันดับที่ 4 ของสัญญาณการสั่นสะเทือน ใช้สำหรับวัดขนาดการแผ่กว้างของฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น (Probability Distribution Function) ฟังก์ชันชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการกระจายตัวของแอมพลิจูดสัญญาณ





ค่าเคอร์โทซิสหาได้จากสมการ 2-3 [15]

$$\text{kurt} = \frac{m_4}{(\sqrt{m_2})^4} \quad (2-3)$$

โดยที่ โมเมนต์อันดับที่ 2, $m_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2$

โมเมนต์อันดับที่ 4, $m_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^4$

จากสมการจะเห็นได้ว่า โมเมนต์อันดับที่ 2 ก็คือค่าความแปรปรวน (Variance) ของแอมพลิจูดสัญญาณนั่นเอง ในรูปที่ 2-2 คือค่าของเคอร์โทซิสโดยประมาณตามลักษณะของสัญญาณบนโดเมนเวลา

Waveform		Kurtosis coefficient
Square wave		1.0
Sine		1.5
Random		3.0
Random + impulsive		> 3.0

รูปที่ 2-2 ค่าเคอร์โทซิสสำหรับรูปแบบสัญญาณต่าง ๆ [5]

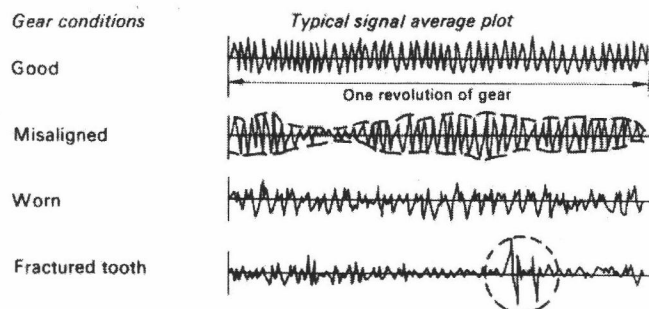
4) ค่าแครสต์แฟคเตอร์ (Crest Factor)

คือ อัตราส่วนระหว่างค่าแอมพลิจูดสูงสุด และ ค่าแอมพลิจูดอาร์เอ็มเอส เพื่อให้ได้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ที่ไร้หน่วย (Normalized) จึงสามารถนำค่านี้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณชนิดอื่นได้ ถ้าสัญญาณมีค่าแครสต์แฟคเตอร์สูงกว่าสัญญาณในกรณีที่เครื่องจักรมีสภาวะปกติ แสดงว่าสัญญาณมีพัลส์เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด (Shock Pulse) เช่น ความบกพร่องในแบร็งและชุดเฟือง

$$\text{Crest Factor} = \frac{X_{\max}}{RMS} \quad (2-4)$$

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณบนโดเมนเวลาเป็นเพียงการบอกระดับของการสั่นสะเทือนโดยรวมไม่สะดวกต่อการแยกแยะสาเหตุของความเสียหาย ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักใช้สัญญาณบนโดเมนเวลาในการวิเคราะห์แนวโน้มหรือเป็นเพียงตัวบ่งชี้ระดับการสั่นสะเทือนเบื้องต้น โดยเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณการสั่นสะเทือนของเฟืองที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์หรือเทียบกับระดับการสั่นสะเทือนตามสภาวะมาตรฐาน

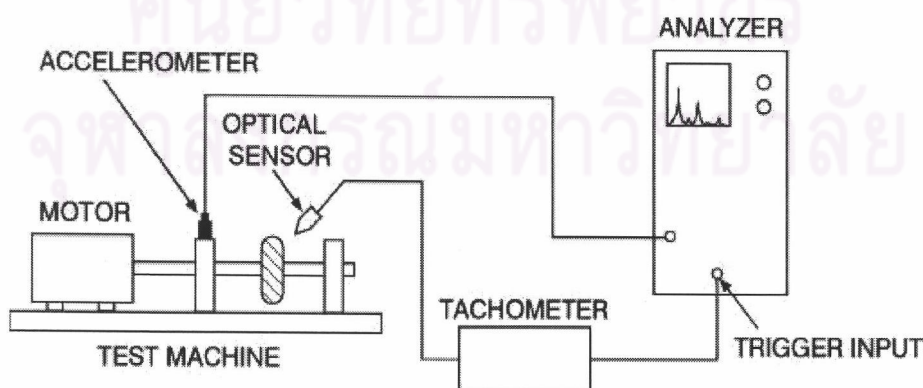
นอกจากการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนเวลาด้วยพารามิเตอร์ทั้ง 4 ชนิดข้างต้นแล้ว ในบางกรณี การสังเกตลักษณะความเป็นคาบของพัลส์แบบทันทีทันใดหรือการมอดูเลตด้วยความถี่ต่ำก็สามารถช่วยบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ การสังเกตลักษณะดังกล่าวในสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้จากการเก็บสัญญาณด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนความถี่ทำได้ยาก เนื่องจากภาพสัญญาณที่แสดงเป็นสัญญาณชุดสุดท้ายเพียงชุดเดียว สัญญาณรบกวนที่ยังไม่ได้ถูกขจัดออกไปอาจจะบดบังลักษณะดังกล่าวทำให้กว่าจะสามารถตรวจพบพัลส์หรือการมอดูเลตสัญญาณได้ก็ต่อเมื่อความผิดปกติรุนแรงจนถึงขั้นวิกฤตแล้ว ในขณะที่การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะช่วยให้การสังเกตสัญญาณบนโดเมนเวลาทำได้ง่ายขึ้นสามารถทำนายลักษณะของความเสียหายได้ ดังเช่นในรูปที่ 2-13 และยังสามารถระบุตำแหน่งของความเสียหายได้ในกรณีความบกพร่องเฉพาะที่ เช่น ฟันเฟืองแตกร้าว โดยการหาขนาดของมุมที่นับจากตำแหน่งที่ติดตั้งสะท้อนแสงหรือร่องลิ้นที่สัมพันธ์กับระยะเวลาที่พัลส์แรกเกิดขึ้นนับจากเวลาที่ศูนย์



รูปที่ 2-3 ผลของสภาพเฟืองที่มีต่อสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา [5]

การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ (Synchronous Time Averaging)

สัญญาณบนโดเมนเวลาอีกรูปแบบหนึ่ง คือ สัญญาณบนโดเมนเวลาแบบเฉลี่ยเข้าจังหวะ ซึ่งเป็นการนำสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ตำแหน่งองศาของการหมุนซึ่งตรงกันในแต่ละรอบการหมุนของเพลามาหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ณ องศาการหมุนนั้นๆ การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะเป็นการเก็บสัญญาณที่ช่วยให้สามารถดึงเอาสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณแบบคาบที่ต้องการวิเคราะห์ สัญญาณรบกวนในที่นี้คือสัญญาณการสั่นสะเทือนต่างๆ ที่มีได้มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่รอบหมุนของเพลานั่นเอง ในที่นี้อาจหมายถึงความถี่ธรรมชาติ สัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลานี้ เครื่องจักรเดียวกันแต่มีอัตราทดที่ไม่เป็นตัวเลขที่ลงตัวกับเพลานั่นเอง และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรอื่นๆ ใกล้เคียง โดยสัญญาณรบกวนอาจมีลักษณะเป็นคาบหรือแบบสุ่มก็ได้ทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น วิธีการเก็บสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 2-4 ถึงแม้ว่าอาจจะไม่สามารถกำจัดได้หมด แต่ก็สามารถลดขนาดของสัญญาณรบกวนลงได้ประมาณ 20-40 dB ขึ้นอยู่กับจำนวนการเฉลี่ยที่เลือกใช้



รูปที่ 2-4 การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรด้วยวิธีการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ [9]

การเก็บสัญญาณด้วยวิธีนี้หน้าต่างเวลาจะเริ่มเก็บข้อมูลเมื่อได้รับสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นตัวทริกเกอร์ (Trigger) จากภายนอก เมื่อเก็บสัญญาณครบทุกจุดข้อมูลแล้วเครื่องวิเคราะห์จะหยุดรอสัญญาณพัลส์ครั้งต่อไปเพื่อเริ่มเก็บสัญญาณอีกครั้ง สัญญาณพัลส์นี้สามารถสร้างขึ้นได้จากแทคโคมิเตอร์ (Tachometer) แบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงอินฟราเรด ซึ่งจะสร้างพัลส์เมื่อการสะท้อนกลับของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป ณ บริเวณร่องลิ่มหรือแผ่นสะท้อนแสงที่อยู่บนเพลลาของเครื่องจักรที่ต้องการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน การเริ่มเก็บสัญญาณแต่ละครั้งจึงสามารถเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการหมุนเดียวกันได้

เมื่อเก็บสัญญาณชุดแรกมาแล้วข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำ จากนั้นเครื่องวิเคราะห์จะรอสัญญาณทริกเกอร์ครั้งต่อไปเพื่อเริ่มเก็บสัญญาณครั้งที่สอง แล้วนำข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาที่ได้มาเฉลี่ยกับข้อมูลชุดแรกแล้วเก็บบันทึกไว้ จากนั้นนำไปแปลงแบบ FFT ต่อไปทำซ้ำเช่นนี้กับทุกๆ ข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาที่เก็บเพิ่มเข้ามา จำนวนชุดสัญญาณที่นำมาเฉลี่ยกันมีผลต่อความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน ถ้าสมมติให้มีจำนวนชุดสัญญาณทั้งหมด N_A ชุดจะทำให้สัญญาณรบกวนบนโดเมนเวลามีขนาดลดลง $\frac{1}{\sqrt{N_A}}$ เท่า เมื่อเทียบกับสัญญาณบนโดเมนเวลาเพียงชุดเดียว ในขณะที่สัญญาณสเปกตรัมซึ่งเป็นแบบออกโตสเปกตรัมสัญญาณรบกวนจะมีขนาดลดลง $\frac{1}{N_A}$ เท่า และมีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ

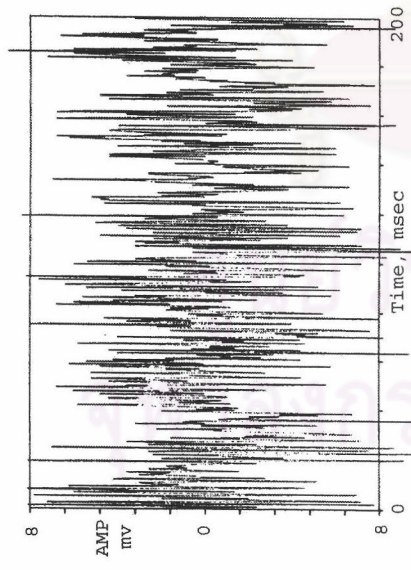
N_A	$10\log_{10}(N_A)$
10	10 dB
100	20 dB
1,000	30 dB
10,000	40 dB
32,767	45 dB

ตัวอย่างการเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะแสดงในรูปที่ 2-5 [4] โดยรูปที่ 2-5(ก) แสดงสัญญาณบนโดเมนเวลาของเครื่องกลึงที่ความเร็วรอบ 822 RPM ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาจากสัญญาณในรูปแบบนี้จะทำได้ยาก ส่วนในรูปที่ 2-5(ข) แสดงสัญญาณของเครื่องจักรตัวเดียวกันแต่ใช้วิธีการเก็บสัญญาณแบบเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาโดยไม่ใช้ตัวทริกเกอร์ จากภายนอกร่วมด้วยในการเก็บสัญญาณ สัญญาณที่ได้จากการเฉลี่ยกันบนโดเมนของเวลาจากสัญญาณทั้งหมด 1024 ชุด

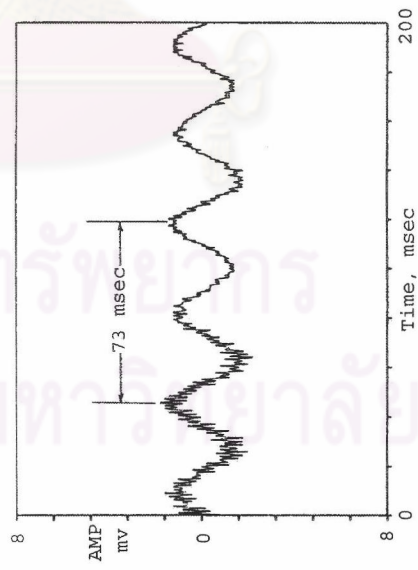
สัญญาณ โดยไม่ใช้ตัวทริกเกอร์จะหักล้างกันจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในรูปที่ 2-5(ค) เป็นการเฉลี่ยกันบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะโดยใช้ตัวทริกเกอร์ ได้จากการเฉลี่ยกันของสัญญาณ 1024 ชุดสัญญาณสัญญาณที่ได้จะมีลักษณะของความเป็นคาบที่มีคาบ 73 msec ซึ่งสอดคล้องกับฮาร์มอนิกที่ 2 ของความเร็วรอบ 822 RPM เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณในรูป 2-5(ง) ซึ่งเป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่หรือสเปกตรัม จะปรากฏยอดที่ 1,640 RPM ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะ ส่วนยอดที่ 7,140 RPM เป็นความถี่ที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับความเร็วรอบหมุนของเครื่องกลึงจึงถูกกำจัดไปโดยการเฉลี่ย ดังนั้นสัญญาณเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะจึงไม่ปรากฏลักษณะของความเป็นคาบที่ความถี่ดังกล่าว

การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะมีคุณลักษณะความเป็นตัวกรองความถี่ตรงกับการกรองแบบหวี (Comb Filtering) ที่มีความถี่ศูนย์กลางซ้อนทับกันกับทุกๆ เส้นสเปกตรัม จำนวนของการเฉลี่ย N_A ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีจำนวนลอนด้านข้างเพิ่มขึ้นตาม และทำให้ลอนกึ่งกลางมีลักษณะแหลมมากขึ้น การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะจึงไม่ต้องใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักคูณกับข้อมูลสัญญาณบนโดเมนเวลาก่อนนำมาแปลงแบบ FFT

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

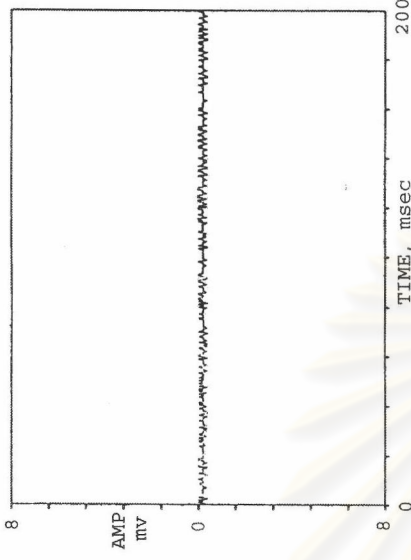


(ก) สัญญาณบนโดเมนเวลา



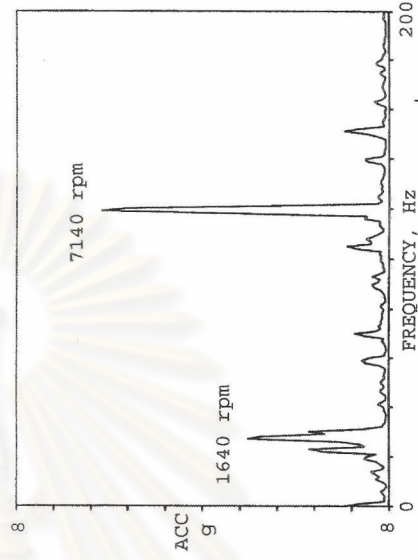
(ข) สัญญาณบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะโดยใช้ตัวทริกเกอร์

จากการเฉลี่ยกัน 1024 ชุดสัญญาณ



(ค) สัญญาณบนโดเมนเวลาโดยไม่ใช้ตัวทริกเกอร์

จากการเฉลี่ยกัน 1024 ชุดสัญญาณ



(ง) สัญญาณบนโดเมนความถี่

รูปที่ 2-5 การเฉลี่ยบนโดเมนเวลาเข้าจังหวะของเครื่องกลึงที่ความเร็วรอบ 822 RPM

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่

คือสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีแกนตั้งแสดงแอมพลิจูดของการกระจัด ความเร็ว หรือ ความเร่ง และแกนนอนเป็นความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยจะเรียกสัญญาณบนโดเมนความถี่ว่า สเปกตรัม ในทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนของความถี่ได้มาจากการแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาแบบฟูรีเยร์ (Fourier Transform) ซึ่งมีหลักการว่าสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบ (Periodic Signal) ทุกชนิดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลบวกของคลื่นไซน์ (Sine Wave) ได้โดยที่คลื่นไซน์แต่ละคลื่นนั้นมีแอมพลิจูดและความถี่ต่างๆ กัน

ในทางปฏิบัติแล้วสามารถวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้ทั้งแบบโดเมนเวลาและโดเมนความถี่โดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์เฟอฟูรีเยร์ (FFT Analyzer) ซึ่งจะรับสัญญาณจากตัวทรานส์ดีวเซอร์ มาคำนวณเป็นอนุกรมของคลื่นรูปไซน์และแสดงออกมาเป็นสัญญาณโดเมนความถี่

สเปกตรัม (Spectrum)

สเปกตรัมเป็นการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือน นิยามได้หลายรูปแบบโดยแบบที่นำมาวิเคราะห์เป็นแบบพาวเวอร์สเปกตรัม ซึ่งนิยามโดยให้อินทิกรัลของฟูรีเยร์หรือการแปลงแบบฟูรีเยร์ $X(\omega)$ ของสัญญาณโดเมนเวลา $x(t)$ อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ดังนี้

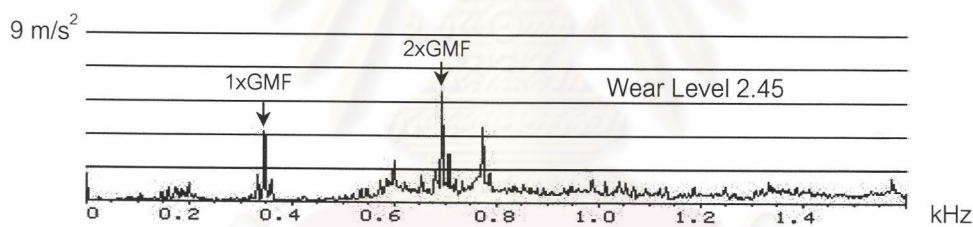
$$X(\omega) = R(\omega) + jS(\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)} \quad (2-5)$$

- โดย $A(\omega)$ คือ สเปกตรัมของฟูรีเยร์ (Fourier Spectrum of $x(t)$)
 $A^2(\omega)$ คือ เพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum of $x(t)$)
 $\phi(\omega)$ คือ มุมเฟส (Phase Angle of $x(t)$)
 $X(\omega)$ หาได้จากสมการ (ก-1) ซึ่งเป็นสมการการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) จากสัญญาณโดเมนเวลา ($x(t)$)

การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ คือ การวิเคราะห์ความถี่ (frequency analysis) ของสัญญาณว่าประกอบไปด้วยสัญญาณฮาร์มอนิกหรือสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ใดบ้าง และแต่ละความถี่มีขนาดแอมพลิจูดเท่าไร

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่

ข้อได้เปรียบของการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ คือ สามารถแยกแยะการสั่นสะเทือนที่เกิดจากความบกพร่องของชิ้นส่วนต่างๆ ที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกันออกจากความถี่พื้นฐานที่สนใจ เนื่องจากความบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่หมุนนั้นจะสร้างความถี่เฉพาะตัว ในการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนความถี่ของเฟืองจะทำให้สามารถสังเกตเห็นความถี่ GMF ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นแถบความถี่ข้างซึ่งเกิดจากการมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ โดยแถบความถี่ข้างจะอยู่ห่างจากความถี่ GMF เท่ากับจำนวนเท่าของความถี่รอบของแต่ละเฟือง สำหรับชุดเฟืองที่มีสภาพดีเมื่อเวลาผ่านไประดับของแถบความถี่ข้างจะคงที่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งแอมพลิจูดและจำนวนของแถบความถี่ข้างจะแสดงถึงสภาพที่เสื่อมลงของเฟือง รูปที่ 2-6 แสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ของชุดเฟืองทองเหลืองที่ความเร็ว 800 RPM รับภาระ 340 วัตต์ ที่มีระดับการสึกหรอของเฟืองขับที่ระดับ 2.45 (พื้นสึกหรอประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของความหนาที่ปลายฟัน) [13] จากรูปจะสังเกตเห็นความถี่ GMF และฮาร์มอนิกอย่างชัดเจน แต่สัญญาณจริงในเครื่องจักรจะสังเกตเห็นแถบความถี่ข้างได้ยากเนื่องจากมีการมอดูเลตหลายสัญญาณทำให้มีหลายแถบความถี่ข้างรอบๆ ความถี่ GMF



รูปที่ 2-6 สัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองที่เกิดการสึกหรอไประดับหนึ่ง [13]

การวิเคราะห์แถบความถี่ข้างมีประโยชน์มากในการระบุตำแหน่งของเฟืองที่เกิดความบกพร่องภายในชุดเฟือง เนื่องจากภายในชุดเฟืองจะมีเฟืองอยู่หลายตัวที่หมุนด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์จะทำได้โดยสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างที่ความเร็วรอบเฟืองนั้นๆ ซึ่งจะทำให้ทราบเบื้องต้นได้ว่าความเสียหายนั้นมาจากเฟืองตัวใด

กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing)

เนื่องจากระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัม (Δf) แต่ละเส้นเป็นตัวกำหนดความละเอียดของโดเมนความถี่ ถ้าแต่ละองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ห่างกันน้อยกว่า 4 เส้นสเปกตรัมจำเป็นต้องขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ เช่น ในกรณีการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมักจำเป็นต้องขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ เนื่องจากสัญญาณสเปกตรัมของชุดเฟืองจะปรากฏชุดแถบความถี่ข้าง (Sidebands) รอบๆ ความถี่ GMF และ ฮาร์มอนิกของ GMF เกิดขึ้นจากการมอดูเลต (Modulation) ด้วยสัญญาณที่มีความถี่คือความเร็วรอบของเฟืองแต่ละตัว จำเป็นต้องวัดระยะห่างระหว่างยอดสเปกตรัมแต่ละยอดในชุดแถบความถี่ข้างเพื่อหาต้นเหตุของการมอดูเลต ซึ่งการมอดูเลตมักบ่งบอกว่ามีคามผิดปกติเกิดขึ้น

ถ้าทำการเพิ่มความละเอียดของโดเมนความถี่ด้วยการลดความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (f_s) ลงจะทำให้หน้าตาเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณ (T) นานขึ้น จึงจะสามารถทำให้ค่า Δf ลดลงได้ แต่การกระทำเช่นนี้จะทำให้ความถี่สูงสุดที่สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณได้ (Frequency Span) ลดลง จนบางครั้งช่วงความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์อยู่เกินค่าความถี่สูงสุดนี้ วิธีการเดียวที่จะสามารถเพิ่มความละเอียดของโดเมนความถี่โดยที่สามารถรักษาให้ความถี่สูงสุดนี้คงเดิมคือการเพิ่มขนาดของหน้าตาเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลให้นานขึ้นกว่าเดิมเป็นจำนวนเท่าที่หารลงตัว (N) ในขณะที่ใช้ความถี่สุ่มตัวอย่างข้อมูลเท่าเดิม ดังนั้นจะได้ระยะห่างระหว่างเส้นสเปกตรัมที่ปรับปรุงแล้ว (Δf_n) ดังนี้

$$\Delta f_n = \frac{f_s}{N_r} = \frac{f_s}{NN_0} = \frac{\Delta f}{N} \quad (2-6)$$

โดยที่ N_0 คือ จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับกรณีปกติ (Base Band Analysis) ซึ่งมักมีจำนวนจุดข้อมูล 1024 หรือ 2048 จุด ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นสเปกตรัมที่เลือกใช้

N คือ ตัวประกอบที่เป็นจำนวนเต็มเพื่อขยายความละเอียด

โดยที่ $N = 2^n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)

N_r คือ จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดที่ใช้เก็บสัญญาณ

จากสมการ 2-6 ความละเอียดของโดเมนความถี่เพิ่มขึ้นตามตัวประกอบ N ที่เลือกใช้ ทำให้สามารถขยายความละเอียดในช่วงความถี่ใดๆ ที่ต้องการได้ แต่เวลาที่ใช้เก็บสัญญาณก็จะนานขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดหน้าตาเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลในระหว่างเก็บสัญญาณ สัญญาณที่ทำการวัดอาจ

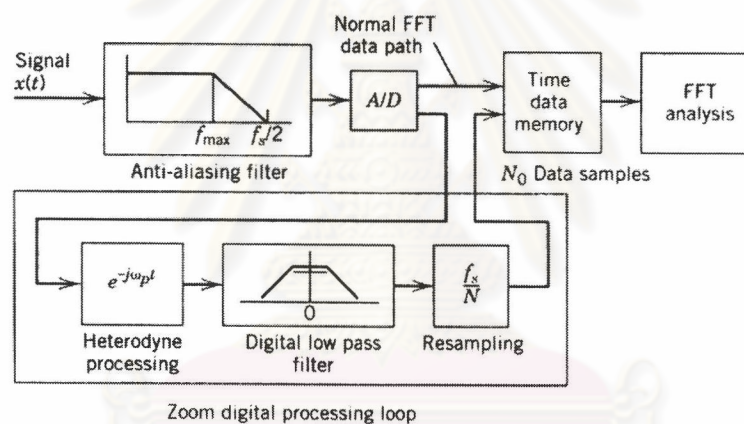
มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความเร็วรอบหมุนที่ไม่คงที่ ส่งผลให้ยอดสเปกตรัมมีลักษณะฐานกว้างขึ้น และแอมพลิจูดลดลง (Smearred Frequency Spectrum) วิธีการที่ใช้ขยายความละเอียดของโดเมนความถี่มี 2 วิธีพื้นฐาน คือ

1) วิธีการเลื่อนความถี่ (Frequency Shift Method)

หรืออาจเรียกว่า Heterodyning Method เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการที่ว่า การคูณกันบนโดเมนเวลาทำให้เกิดการม้วนขดบนโดเมนความถี่ เป็นวิธีการที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

2) วิธีการเก็บสัญญาณในช่วงเวลานาน (Long Time Record)

ใช้เวลาเก็บสัญญาณนานขึ้นกว่าปกติ N เท่า จึงต้องการหน่วยความจำเวลามากขึ้น N เท่า และต้องใช้เวลาในการแปลงแบบ FFT มากกว่าเดิม $N_r \log(N_r)$

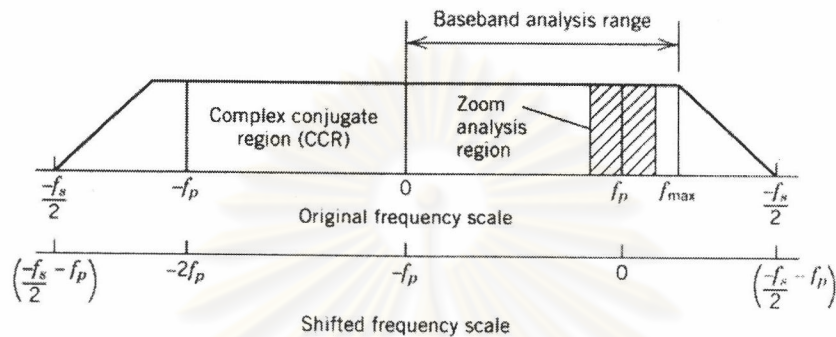


รูปที่ 2-7 ขั้นตอนการทำงานของ การขยายความละเอียดโดเมนความถี่ด้วยวิธีเลื่อนความถี่ [2]

กระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ Brüel & Kjaer รุ่น 2035 ใช้คือ วิธีการเลื่อนความถี่ [3] ขั้นตอนเก็บสัญญาณเริ่มจากการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองป้องกันการผันกลับ แล้วทำการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลตามปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2-7 ซึ่งความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลยังคงเป็น f_s ดังเดิม ดังนั้นความถี่สูงสุดที่เคยใช้วิเคราะห์ในกรณีปกติยังคงเดิมและสามารถขยายความละเอียด ณ บริเวณความถี่ใดๆ ภายในช่วงความถี่สูงสุดนี้ได้ ก่อนที่ข้อมูลเวลาจะถูกนำไปเก็บในหน่วยความจำจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการขยายความละเอียดสัญญาณ โดยที่นำข้อมูลมาคูณด้วยด้วยฟังก์ชัน Heterodyning

$$f(t) = e^{-j\omega_p t} \quad (2-7)$$

โดยที่ $\omega_p = 2\pi f_p$, f_p คือ ความถี่ที่อยู่กึ่งกลางช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียด จึงเรียก f_p นี้ว่าความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency)



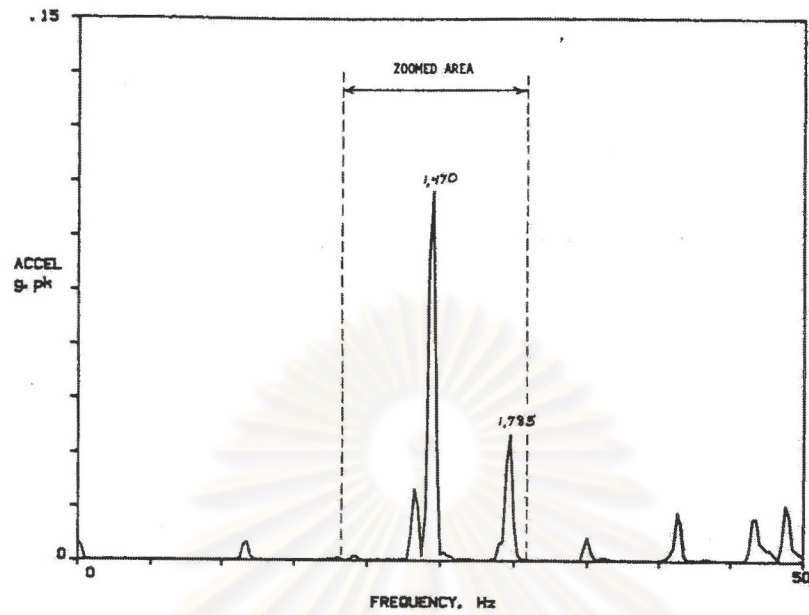
รูปที่ 2-8 โดเมนความถี่ แสดงช่วงความถี่สูงสุดที่ต้องการในการวิเคราะห์แบบปรกติ และความถี่ที่ทำการเลื่อนแล้วสำหรับนำไปขยายความละเอียด [2]

การคูณฟังก์ชันบนโดเมนเวลาและการม้วนขดบนโดเมนความถี่ทำให้สเกลความถี่ของสเปกตรัมเลื่อนไปทางซ้าย f_p Hz ดังนั้นความถี่ศูนย์จึงย้ายมาอยู่ที่ f_p ดังแสดงในรูปที่ 2-15 บริเวณที่แรงในสัญญาณเดิมคือช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียด ซึ่งทำได้โดยการกรองผ่านความถี่ต่ำแบบดิจิทัลเพื่อให้ได้เฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียด แล้วจึงนำสัญญาณมาสุ่มตัวอย่างข้อมูลอีกครั้งด้วยการเอาข้อมูลหนึ่งจุดจากทุกๆ N จุด (f_s/N) มาเก็บไว้ในหน่วยความจำเวลาเพื่อที่จะนำไปทำการแปลงแบบ FFT ต่อไป ดังนั้นถึงแม้ว่าจะเก็บสัญญาณนานขึ้นเป็น $T_r = NT$ แต่มีข้อมูลเพียง N_0 เท่านั้นที่ถูกนำไปวิเคราะห์ FFT โดยที่จุด ข้อมูลทั้ง N_0 จุดนี้จะเป็นตัวแทนส่วนของเวลาที่มืองค์ประกอบความถี่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการขยายความละเอียด การวิเคราะห์ FFT ด้วยข้อมูล N_0 จากทั้งหมด NN_0 ทำให้มีจำนวนเส้นสเปกตรัมเท่าเดิม แต่เส้นสเปกตรัมเหล่านี้ อยู่ห่างกัน Δf_p ดังที่ต้องการตามสมการ 2-6

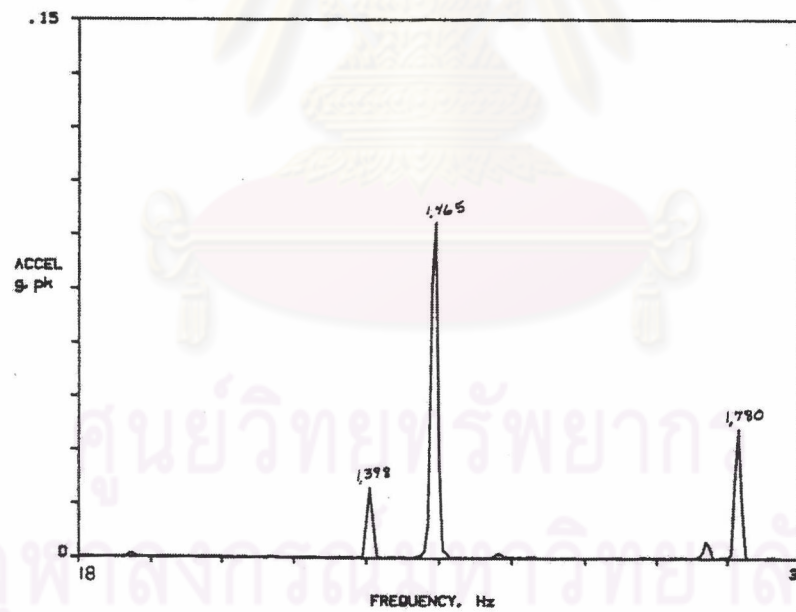
ข้อดีของการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ด้วยวิธีนี้คือ สามารถขยายความละเอียดได้มากโดยที่ยังสามารถทำการวิเคราะห์ในชวงเวลาจริง (Real Time) ส่วนข้อเสียคือหน่วยความจำเวลาไม่ได้เก็บสัญญาณดั้งเดิมไว้ จึงไม่สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ห้อย่างอื่นได้อีกและยังพบว่าการคลาดเคลื่อนต่างๆ ในการแปลงสัญญาณจะสะสมอยู่ที่บริเวณความถี่กึ่งกลาง ซึ่งอาจเป็นต้น

เหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณสเปกตรัม จึงเป็นการดีที่จะตั้งค่าให้ f_p อยู่ห่างออกไปจากบริเวณความถี่ที่ให้ความสนใจเป็นพิเศษ การสูญเสียข้อมูลในระหว่างการขยายความละเอียดสามารถกลายเป็นปัญหาใหญ่ได้เมื่อนำไปใช้กับสัญญาณแบบชั่วคราวหรือสัญญาณที่มีองค์ประกอบความถี่ต่ำ ที่ต้องใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างยาวนาน สัญญาณสเปกตรัมตัวอย่างของกระบวนการขยายความละเอียดของโดเมนความถี่ (Zoom Processing) [4] แสดงดัง รูป 2-9 ซึ่งเป็นสัญญาณสเปกตรัมของ belt-driven rotor ในช่วงความถี่ 0-50 Hz โดยที่ความเร็วรอบของมอเตอร์และโรเตอร์ที่ค่าเป็น 1,785 RPM (29.75Hz) และ 1,470 RPM (24.5Hz) ตามลำดับ จากสัญญาณสเปกตรัมในรูปที่ 2-9(ก) จะปรากฏยอดสเปกตรัมที่เด่นชัดที่ความถี่ 1,470 RPM (24.5Hz) ซึ่งเป็นความเร็วรอบของโรเตอร์ กับยอดเดี่ยวๆ ทางด้านซ้ายที่อยู่ติดกันจากการ Zoom ในช่วงความถี่ 18-31 Hz ได้สัญญาณสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 2-9(ข) ซึ่งยอดเดี่ยวๆ ดังกล่าวจะปรากฏอยู่ที่ความถี่ 1,398 RPM และที่ความถี่ 1,470 RPM เดิมก็เลื่อนตำแหน่งมาอยู่ที่ 1,465 RPM นอกจากนี้ยอดสเปกตรัมที่ความเร็วรอบมอเตอร์หรือที่ความถี่ 1,785 RPM เดิมก็ถูกแยกออกเป็นสองยอดสเปกตรัมเช่นกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่(ก) สัญญาณสเปกตรัมของ belt-driven rotor ในช่วงความถี่ 0-50 Hz



รูปที่(ข) สัญญาณ Zoom Processing ของ belt-driven rotor ในช่วงความถี่ 18-31 Hz

รูปที่ 2-9 การเก็บสัญญาณโดยวิธีการ Zoom Processing [4]

สัญญาณการสั่นสะท้อนบนโดเมนคิวเฟรนซี

คือสัญญาณการสั่นสะท้อนที่มีแกนตั้งแสดงแกมมินิกูดหรือแอมพลิจูดของความเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ และมีแกนนอนแสดงคิวเฟรนซีหรือเวลา นิยมเรียกสัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซีว่า เซปส์ตรัม ซึ่งในทางคณิตศาสตร์สัญญาณการสั่นสะท้อนบนโดเมนคิวเฟรนซีเกิดจากการแปลงกลับแบบฟูริเยร์ (Inverse Fourier Transform) ของลอการิทึมของสัญญาณบนโดเมนความถี่

เซปส์ตรัม (Cepstrum)

เซปส์ตรัมเป็นการวิเคราะห์ความถี่ของสเปกตรัม (Frequency Analysis of Spectrum) เพื่อตรวจจับสภาวะเป็นคาบในสเปกตรัม เช่น ชุดฮาร์โมนิก (Harmonics Family) ชุดแถบความถี่ข้าง (Sidebands Family) หรือจากผลของเสียงสะท้อน (Echoes) เป็นต้น ซึ่งเซปส์ตรัมนั้นจะมีอยู่หลายรูปแบบ

เซปส์ตรัมถูกนำมาใช้ในครั้งแรกในปี ค.ศ. 1963 เพื่อช่วยในการวิเคราะห์เสียงสะท้อน และช่วยหาความลึกของ ไฮโปเซนเตอร์ (Hypocenter) ของเหตุการณ์แผ่นดินไหว เซปส์ตรัมแบบนี้ถูกนิยามไว้ดังนี้

$$C(\tau) = |F\{\log F_{xx}(f)\}|^2 \quad (2-8)$$

เมื่อสัญลักษณ์ $F\{\}$ แทนการแปลงฟูริเยร์และ $F_{xx}(f)$ เป็นเพาเวอร์สเปกตรัมของสัญญาณเวลา $f(t)$ หรือเขียนว่า

$$F_{xx}(f) = |F\{f(t)\}|^2$$

ซึ่ง $F\{f(t)\} = F(f) = R(f) + j * X(f) = A(f)e^{j*\phi(f)} \quad (2-9)$

ต่อมาได้มีการนิยามเซปส์ตรัมอีกแบบหนึ่งโดยใช้ชื่อว่าเพาเวอร์เซปส์ตรัม (Power Cepstrum)

$$C(\tau) = F^{-1}\{\log F_{xx}(f)\} \quad (2-10)$$

มีเซปส์ตรัมอีกสองรูปแบบ คือ แอมพลิจูดเซปส์ตรัม (Amplitude Cepstrum, $C_a(\tau)$) และเซปส์ตรัมเชิงซ้อน (Complex Cepstrum, $C_c(\tau)$) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$C_a(\tau) = |F\{\log F_{xx}(f)\}| \quad (2-11)$$

$$C_c(\tau) = F^{-1}\{\log F(f)\} \quad (2-12)$$

ซึ่ง $F(f)$ เป็นสเปกตรัมเชิงซ้อนของ $f(t)$ ดังสมการที่ (2-9)

เซปส์ตรัมที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเฝ้าตรวจและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลคือ เพาเวอร์เซปส์ตรัม

คำว่า “เซปส์ตรัม” (Cepstrum) มาจากการสลับที่คำว่า สเปกตรัม (Spectrum) ในภาษาอังกฤษ เหตุผลในการใช้ลักษณะการสลับตัวอักษรก็เนื่องจากว่าเซปส์ตรัมเป็นสเปกตรัมของสเปกตรัมนั่นเอง เซปส์ตรัมใช้ประโยชน์ได้คล้ายกับอโตคอรรีเลชันฟังก์ชัน (Autocorrelation Function) ดังนั้นเซปส์ตรัมจะแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณที่ระยะเวลาเหลื่อมต่างกันเช่นเดียวกับอโตคอรรีเลชัน แต่ลักษณะสำคัญที่แตกต่างจากอโตคอรรีเลชันก็คือการแปลงจากลอการิทึมของสเปกตรัมนั่นเอง

คำศัพท์เทคนิคต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเซปส์ตรัมมีดังนี้

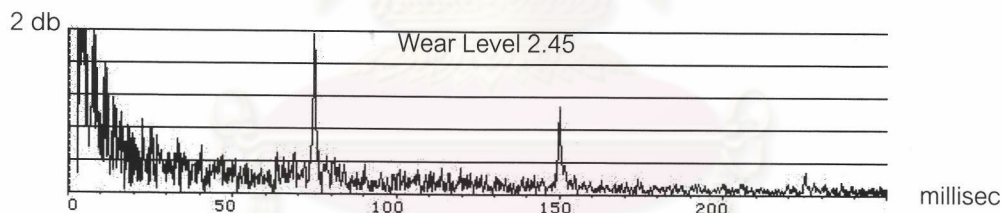
เซปส์ตรัม (Cepstrum)	มาจากคำว่า	สเปกตรัม (Spectrum)
คิวเฟรนซี (Quefrensy)	มาจากคำว่า	ความถี่ (Frequency)
ราฮ์มอริก (Rahmonics)	มาจากคำว่า	ฮาร์มอริก (Harmonic)
แกมนิจูด (Gamnitude)	มาจากคำว่า	แกมนิจูด (Magnitude) หรือ แอมพลิจูด (Amplitude)
แซฟ (Saphe)	มาจากคำว่า	เฟส (Phase)
ลิฟเตอร์ (Lifter)	มาจากคำว่า	ฟิลเตอร์ (Filter)
ชอร์ต พาส ลิฟเตอร์ (Short Pass Lifter)	มาจากคำว่า	ตัวกรองความถี่สูง (Low Pass Filter)
ลอง พาส ลิฟเตอร์ (Long Pass Lifter)	มาจากคำว่า	ตัวกรองความถี่ต่ำ (High Pass Filter)

คิวเฟรนซีเป็นหน่วยของเวลา (sec) และในทางทฤษฎีคิวเฟรนซีมีความหมายเช่นเดียวกับช่วงเวลาประวิง (Delay Time) τ ของอโตคอรรีเลชัน คำว่า “คิวเฟรนซีสูง” (High Quefrensy) หมายถึงมีการสั่นขึ้นลงอย่างรวดเร็วในสัญญาณสเปกตรัมหรือมีระยะห่างของความถี่น้อย (Small Frequency

Space) และคำว่า “คิวเฟรนซีต่ำ” หมายถึงการสั้นขึ้นลงที่ช้าหรือมีระยะห่างของความถี่มากในสเปกตรัม

การวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนคิวเฟรนซี

การวิเคราะห์บนโดเมนคิวเฟรนซีหรือการวิเคราะห์เซปส์ตรัม คือ การวิเคราะห์ความถี่สภาวะความเป็นคาบของสัญญาณบนโดเมนความถี่ อันได้แก่ กลุ่มของฮาร์โมนิก และ แถบความถี่ข้างที่ห่างเท่าๆ กัน ทำให้สามารถวิเคราะห์ความเป็นคาบของแถบความถี่ข้างและสามารถสังเกตแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างได้โดยการวิเคราะห์แกมมาจุดของแถบความถี่ข้างหรือแกมมาจุดของยอด $1/P$ ของเฟืองขับ และ $1/G$ ของเฟืองตามได้ง่ายขึ้นเมื่อสัญญาณอยู่ในรูปของเซปส์ตรัม ดังนั้นการวิเคราะห์แบบเซปส์ตรัมจึงเป็นการช่วยการวิเคราะห์แบบสเปกตรัม ซึ่งจะสามารถบอกตำแหน่งของเฟืองที่เสียหายภายในชุดเฟืองได้สะดวกกว่าการวิเคราะห์แถบความถี่ข้างในสเปกตรัมโดยตรง ตัวอย่างเซปส์ตรัมของสัญญาณของชุดเฟืองขับที่ระดับ 2.45 (ฟันสึกหกรอประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ของความหนาที่ปลายฟัน) [13] จะแสดงไว้ดังรูปที่ (2-10) สามารถเห็นยอดของ GMF และ แถบความถี่ข้างในสเปกตรัม ซึ่งในยอดที่เป็นของแถบความถี่ข้างเกิดมาจากความบกพร่องของเฟือง ซึ่งในตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นเฉพาะยอดที่เป็นคิวเฟรนซีของเฟืองขับเท่านั้น นั่นย่อมแสดงว่าความบกพร่องเกิดขึ้นเฉพาะที่เฟืองขับเท่านั้น



รูปที่ 2-10 สัญญาณเซปส์ตรัมของชุดเฟืองที่เกิดการสึกหกรอไประดับหนึ่ง [13]

การสั่นสะเทือนของระบบเฟือง

ถ้าฟันเฟืองคู่ที่ขบกันมีโพรไฟล์เป็นโค้งอินโวลูทสมบูรณ์มีระยะพิตช์คงที่สม่ำเสมอทุกฟันและไม่มีภาวะมากระทำ เมื่อเฟืองตัวดังกล่าวหมุนที่ความเร็วรอบที่คงที่จะเกิดการสั่นสะเทือนในลักษณะของคลื่นไซน์ด้วยความถี่ของการขบกันของเฟือง (Gear Meshing Frequency : GMF) ในระบบเฟืองตรงขณะที่ฟันกำลังเคลื่อนขบกัน จะมีฟันที่กำลังเคลื่อนที่เข้ามาขบกันและฟันที่กำลังเคลื่อนที่ออกจากการขบกันอย่างละหนึ่งฟัน โดยเฟืองขับจะเริ่มขบจากโคนฟันไปยังปลายฟันส่วนเฟืองตามจะขบจากปลายฟันลงมายังโคนฟัน ดังนั้นในแต่ละไซเคิลของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลาที่มีความถี่ GMF จะเกี่ยวข้องกับโพรไฟล์ที่หน้าสัมผัสของทั้งเฟืองขับและเฟืองตาม ถ้ามีความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่าน (Transmission Error) เกิดขึ้นที่ฟันของเฟืองฟันใดฟันหนึ่ง นั่นคือโพรไฟล์หน้าสัมผัสของเฟือง ณ ตำแหน่งนั้นเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะของสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนของเวลาที่ไซเคิลนั้นๆ ก็ควรที่จะแตกต่างจากไซเคิลที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านและสัญญาณไซเคิลนี้จะกลับมาอีกครั้งเมื่อฟันคู่เดิมกลับมาขบกันอีกครั้ง ซึ่งจะเรียกความถี่ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้ว่าความถี่ฮันติงทูธ (Hunting Tooth Frequency)

ในการทำงานจริงเมื่อเฟืองต้องมีการรับภาระในขณะที่เฟืองเคลื่อนที่ฟันของเฟืองจะมีการโก่งตัวอันเนื่องมาจากการรับภาระ (Tooth Deflection) ที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นคาบเท่ากับ GMF เมื่อเฟืองมีการรับภาระเฟืองคู่อื่นๆ ต้องมีการเคลื่อนที่เสียดสีกันก็จะทำให้เกิดการสึกหรอขึ้น ซึ่งจะทำให้โค้งอินโวลูทเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้คาบของการโก่งตัวของฟันเฟืองจะเปลี่ยนด้วย เมื่อเฟืองสึกหรอไประดับหนึ่งช่องว่างระหว่างฟันที่ขบกัน (Backlash) จะเพิ่มขึ้นทำให้ฟันเฟืองหลุดจากการสัมผัสกันง่ายขึ้นจนเกิดการกระแทกซึ่งจะทำให้ระดับของการสั่นสะเทือนมีค่าสูงขึ้น โดยทฤษฎีการไถลระหว่างฟันจะเกิดที่ทุกจุดยกเว้นที่จุดพิตช์ (Pitch Point) ดังนั้นที่จุดพิตช์จะเป็นจุดที่ไม่เกิดการสึกหรอ [11] แต่ในทางปฏิบัติจุดพิตช์อาจจะเป็นจุดที่เกิดการสึกหรอน้อยที่สุดบนโพรไฟล์หรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของชุดเฟืองนั้นๆ

เนื่องจากการสึกหรอทำให้ระดับของการสั่นสะเทือนของระบบเฟืองสูงขึ้นเกิดการหลุดจากการสัมผัสกันได้ง่ายขึ้นด้วย เมื่อเฟืองหลุดจากการสัมผัสแล้วกลับมาสัมผัสกันใหม่จะเกิดการกระแทกกันเฟืองแต่ละตัวจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ นอกจากสาเหตุจะมาจากความไม่สมบูรณ์ของเฟืองแล้ว การสั่นสะเทือนของชุดเฟืองยังขึ้นกับการติดตั้งระบบที่เฟืองทำการขบเคลื่อน มอเตอร์กำลัง และ การติดตั้งเพลอาซ์ เนื่องจากการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนไม่อาจวัดที่เฟืองได้โดยตรง ซึ่งการวัดจะต้องวัดผ่านตลับยึดเบริง (Bearing Housing) สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จะสะสมการสั่นสะเทือนของส่วนต่างๆ ที่สามารถถ่ายทอดไปสู่จุดที่ทำการวัดได้ ดังนั้นรูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองจึงมักจะมีความซับซ้อน

สรุปสาเหตุของการสั่นสะเทือนของชุดเฟือง

สาเหตุของการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองนั้นอาจจะแบ่งตามต้นเหตุของการเกิดได้ 2 ชนิดคือ

1. สาเหตุจากเฟือง

- การสึกหรอของซี่ฟัน
- เฟืองเยื้องศูนย์
- รอยร้าวของฟัน

2. สาเหตุจากระบบ

- เพลาขับเฟืองไม่ได้แนวแกน
- มอเตอร์ส่งกำลังมีความบกพร่อง
- เครื่องจักรที่เฟืองทำการขับเคลื่อนไม่สมดุล
- มีการหลุดหลวมทางกล
- ข้อบกพร่องจากชิ้นส่วนอื่นๆภายในเครื่องจักร

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของระบบเฟือง [1,10]

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าเนื่องจากผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองมีความซับซ้อนมาก จึงได้มีการจำลองสัญญาณขึ้นจากการทดลองวัดสัญญาณจริงเพื่อให้ได้สมการที่มีลักษณะใกล้เคียงการสั่นสะเทือนจริงของเฟืองมากที่สุด โดยสมการดังกล่าวจะอยู่ภายใต้สมมติฐานต่อไปนี้

- 1) ชุดเฟืองมีระยะพิตซ์เท่ากันทุกฟัน
- 2) มีความคลาดเคลื่อนของโพรไฟล์เบี่ยงเบนไปจากโค้งอินโวลูทเท่ากันทุกฟัน
- 3) มีความเร็วรอบที่คงที่
- 4) รับภาระคงที่

กำหนดพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

สมการการสั่นสะเทือนของเฟืองเมื่อยังไม่มี ความบกพร่องหรือยังไม่ถูกมอดูเลต

$$y(t) = \sum_{n=0}^N x_n \cos[2\pi n f_{mt} + \phi_n] \quad (2-13)$$

เมื่อเฟืองมีข้อบกพร่อง เช่น การสึกหรอ หรือรอยแตกร้าวเนื่องจากความล้า จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นซึ่งจะมีผลทำให้การสั่นสะเทือนของเฟืองเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นถูกนิยามโดยฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูดและความถี่ ฟังก์ชันมอดูเลตอาจจะแตกต่างกันไปตาม n เนื่องจากการมอดูเลตมีลักษณะที่เป็นคาบตามความเร็วรอบของเฟือง ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแสดงโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ดังต่อไปนี้

$$am_n(t) = \sum_{p=0}^P A_{np} \cos[2\pi p f_r t + \alpha_{np}] \quad (2-14)$$

$$fm_n(t) = \sum_{s=0}^S F_{ns} \cos[2\pi s f_r t + \beta_{ns}] \quad (2-15)$$

โดย	A_{np}	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางแอมพลิจูด
	F_{ns}	คือ	แอมพลิจูดของฟังก์ชันมอดูเลตทางความถี่
	f_r	คือ	ความถี่ของการขบกันของฟันเฟือง (Gear meshing frequency)
	α_{np}, β_{ns}	คือ	มุมเฟสฮาร์โมนิกที่ n ของฟังก์ชันมอดูเลต

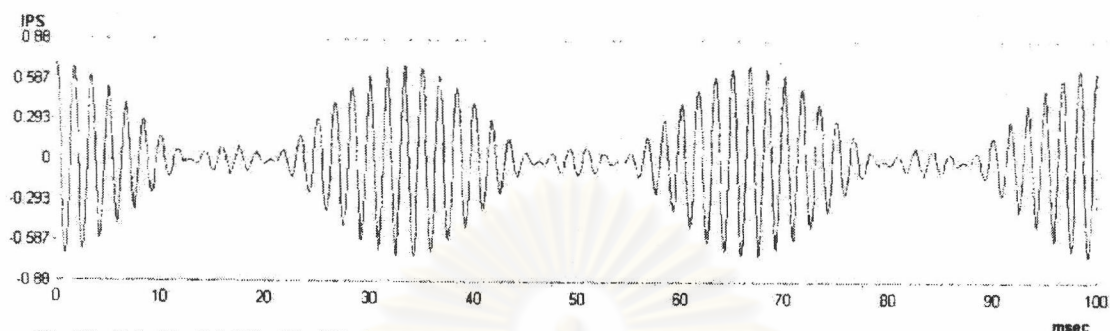
ดังนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนจากการขบกันของเฟืองที่มีความบกพร่องจะเป็นดังสมการที่ (2-1) คือ

$$y(t) = \sum_{n=0}^N X_n [1 + am_n(t)] \cos[2\pi n f_m t + \phi_n + fm_n(t)]$$

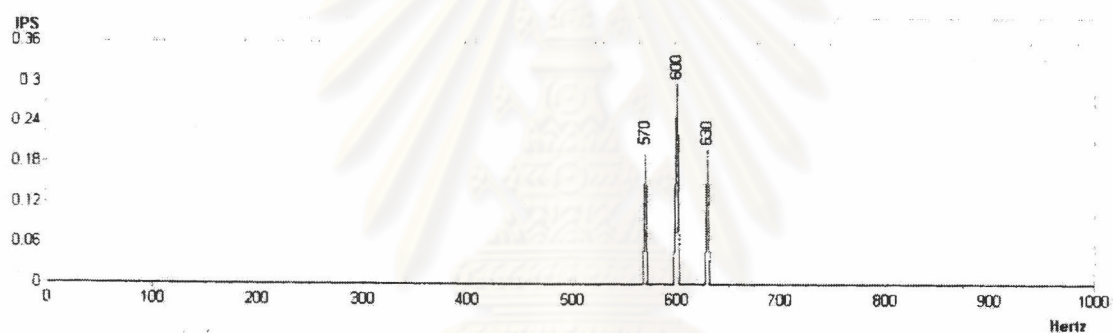
สัญญาณการสั่นสะเทือนและแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปของโดเมนเวลาสามารถทำให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่โดยการแปลงแบบฟูรีเยร์ของสัญญาณดังกล่าว และสามารถทำให้อยู่ในรูปของโดเมนควิเฟรนซีหรือเซปส์ตรัมได้โดยการแปลงกลับแบบฟูรีเยร์ของลอการิทึมของสัญญาณบนโดเมนความถี่

เมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลามีการมอดูเลตทางแอมพลิจูด แอมพลิจูดจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อคลื่นพาหะ (Carrier Frequency) และคลื่นมอดูเลตมีเฟสตรงกันแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะมีค่าที่สูงขึ้น และเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสที่ต่างกันแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือนก็จะมีค่าลดลง เมื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวให้อยู่บนโดเมนความถี่จะเกิดแถบความถี่ข้าง (Sidebands) รอบๆ ความถี่พาหะ คือ GMF โดยแถบความถี่ข้างจะอยู่ห่างออกไปเท่ากับความถี่ของฟังก์ชันมอดูเลต คือความเร็วรอบของเฟือง ถ้าฟังก์ชันมอดูเลตมีความถี่ค่าเดียวก็จะได้

แถบความถี่ข้างเพียงชุดเดียวดังแสดงในรูปที่ 2-11 แต่ถ้าฟังก์ชันของการมอดูเลตมีค่าของความถี่สองค่ายกตัวอย่างเช่น เฟืองสองตัวที่มีการเยื้องศูนย์ จะปรากฏแถบความถี่ข้างสองชุดซึ่งอยู่ห่างจากความถี่ GMF เท่ากับความเร็รรอบของเฟืองทั้งสองตัว



(ก) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลา



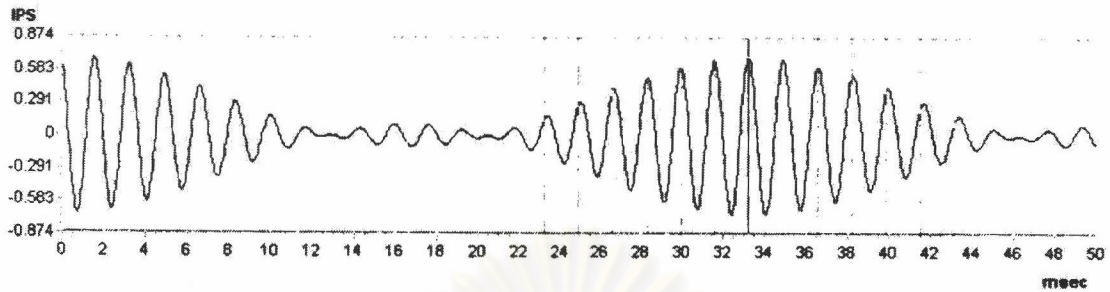
(ข) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของความถี่

รูปที่ 2-11 สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลาและความถี่ [4]

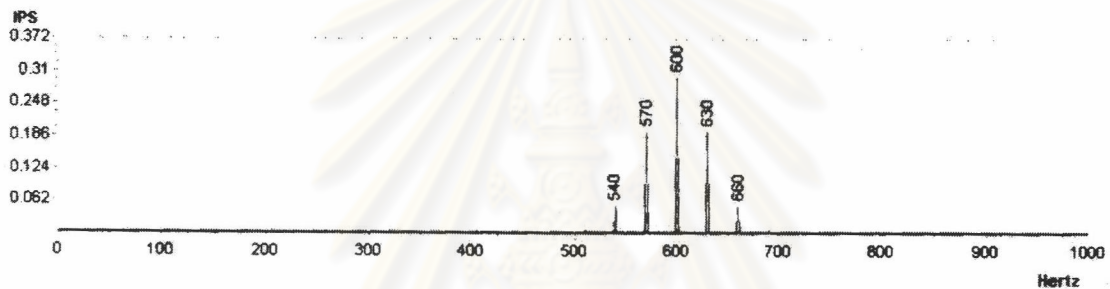
สาเหตุที่ทำให้เกิดการมอดูเลตทางแอมพลิจูดได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและการติดตั้งทำให้เกิด การเยื้องศูนย์ของเฟือง การสึกหรอของฟันเฟือง การแตกร้าวของฟันเฟือง เป็นต้น นอกจากนี้ อาจเกิดจากความแปรปรวนของภาระที่มากกระทำกับชุดเฟือง ซึ่งจะทำให้ขนาดของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความบกพร่องของฟันเฟืองมีการแปรปรวนไปด้วย ซึ่งมีได้นำมาพิจารณาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การมอดูเลตทางความถี่จะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนมีความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าพิจารณาสัญญาณบนโดเมนของความถี่จะพบว่า มีแถบความถี่ข้างเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2-12 เช่นเดียวกันกับรูปที่ 2-11 แต่การมอดูเลตทางความถี่จะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟส (Phase Variation) ± 30

องศาที่ความถี่ 30 Hz ซึ่งภาพบนจะเป็นสัญญาณในโดเมนเวลาที่ขยายขึ้นเพื่อให้เห็นลักษณะของความถี่ที่แปรเปลี่ยนไปชัดเจนยิ่งขึ้น



(ก) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลา

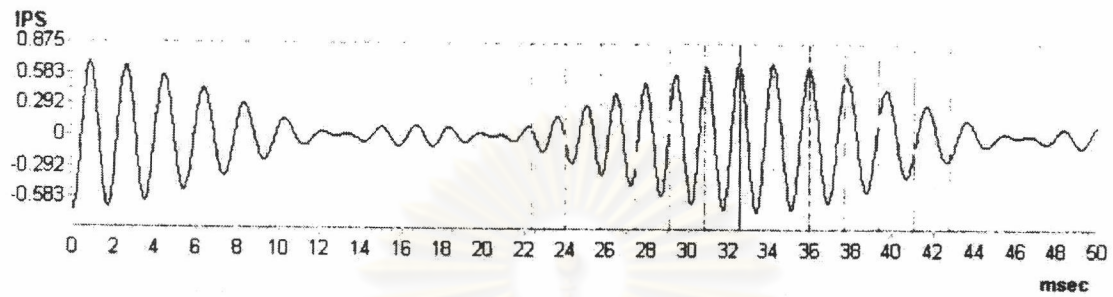


(ข) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของความถี่

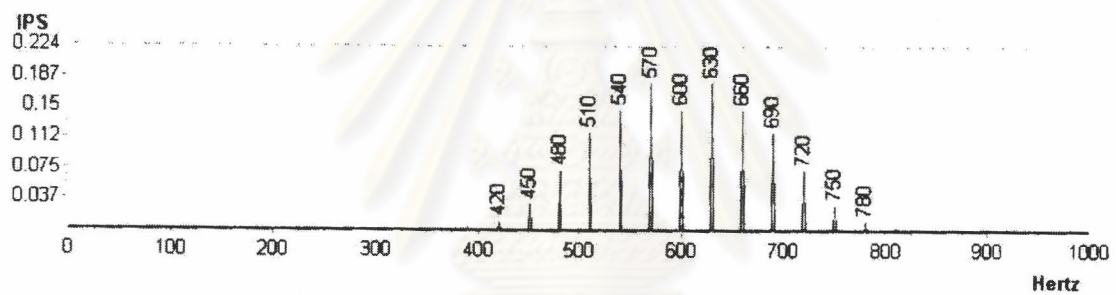
รูปที่ 2-12 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด และการมอดูเลตทางความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส ± 30 องศา [4]

ถ้าการมอดูเลตทางความถี่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนและแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างมีค่าที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 2-13 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสเพิ่มขึ้นเป็น ± 180 องศา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



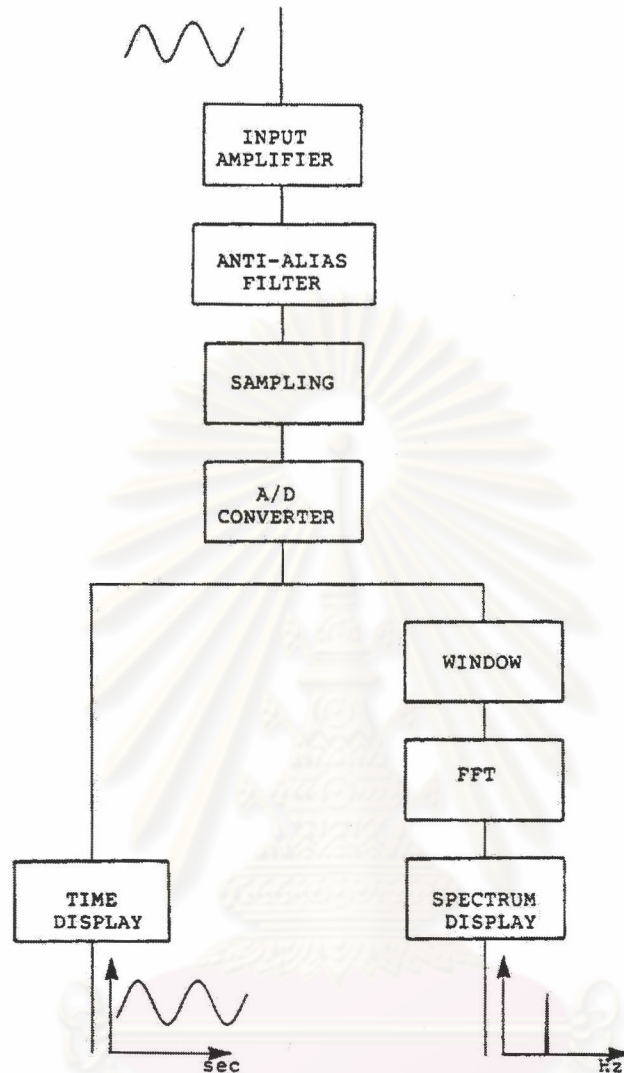
(ก) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของเวลา



(ข) สัญญาณจำลองการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองบนโดเมนของความถี่
รูปที่ 2-13 การมอดูเลตทางแอมพลิจูด และการมอดูเลตทางความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส
 ± 180 องศา [4]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

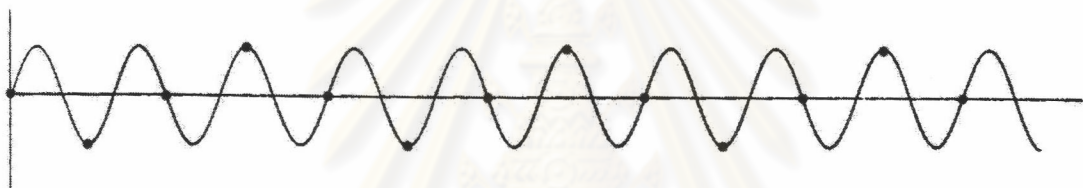
การจัดเก็บข้อมูล (Data Acquisition)



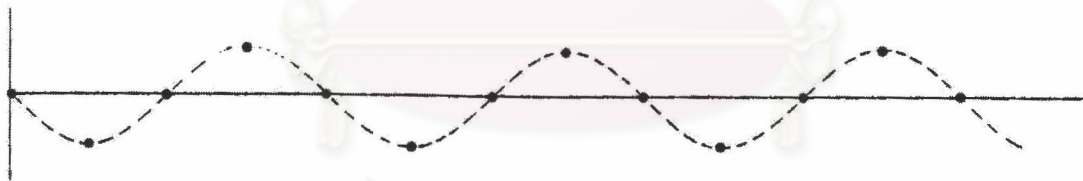
รูปที่ 2-14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT [4]

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT (FFT Analyzer) มีลักษณะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2-14 เป็นเครื่องมือที่มีพื้นฐานเหมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ สัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog) ที่รับมาจากตัวตรวจจู่ชนิดวัดความแรงและเครื่องขยายประจุถูกแปลงให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital) ด้วยตัวแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D Converter) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampling) และการหาขนาดของสัญญาณ (Quantification) ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampling Frequency) เปรียบได้กับความเร็วของภาพแต่ละภาพในกล้องถ่ายภาพยนตร์ ถ้าความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลไม่มากพอ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะแปลความหมายของข้อมูลผิดพลาด ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2-15 โดยรูปที่ 2-15(ก) แสดงการสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่มีลักษณะ

เป็นสัญญาณของคลื่นไซน์โดยความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าเป็น $3/4$ เท่าของความถี่สัญญาณ เมื่อเครื่องวิเคราะห์นำข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มไปพล็อตจะให้ผลดังรูปที่ 2-15(ข) จะให้ค่าของความถี่เป็น $1/3$ เท่าของความถี่จริง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดการผันกลับ (Aliasing) สามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลและใช้ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ที่เรียกว่า ตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (Anti-aliasing Filter) กรองสัญญาณก่อนที่จะทำการแปลงสัญญาณให้เป็นดิจิทัล เพื่อกรองเอาองค์ประกอบความถี่ที่สูงกว่าความถี่ตัดออก (Cut-off Frequency) ซึ่งถูกตั้งให้มีค่าเท่ากับความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์ทิ้งไป โดยปกติแล้วความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลจะต้องมากกว่า 2 เท่าขององค์ประกอบความถี่สูงสุดของสัญญาณที่พิจารณา เพื่อให้การสุ่มตัวอย่างข้อมูลมากกว่า 2 ครั้งต่อหนึ่งรอบการสั่น ซึ่งเรียกหลักการนี้ว่าเกณฑ์ของไนควิสต์ (Nyquist Criterion) โดยความถี่ที่เท่ากับครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลเรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency, f_n)



รูปที่ (ก) การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด



รูปที่ (ข) การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด

รูปที่ 2-15 การสุ่มตัวอย่างข้อมูลที่ผิดพลาด [4]

เนื่องจากตัวกรองสัญญาณมีคุณลักษณะค่อยๆ ลาดลงที่ความถี่เหนือความถี่ตัดออก เช่น 12 dB/Octave ในกรณีเครื่องวิเคราะห์ Brüel & Kjaer รุ่น 2035 จึงมีความเป็นไปได้ที่บางข้อมูลบริเวณความถี่ใกล้ๆ กับขอบเขตด้านบนของช่วงความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์ (Frequency Span) จะถูกปะปนด้วยข้อมูลผันกลับ ดังนั้นเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจึงมีความถี่การสุ่มตัวอย่างข้อมูลเป็น 2.56 เท่าของความถี่ตัดออกของตัวกรองต่อต้านการผันกลับ (2.56 เท่าของความถี่สูงสุดที่ต้องการวิเคราะห์)

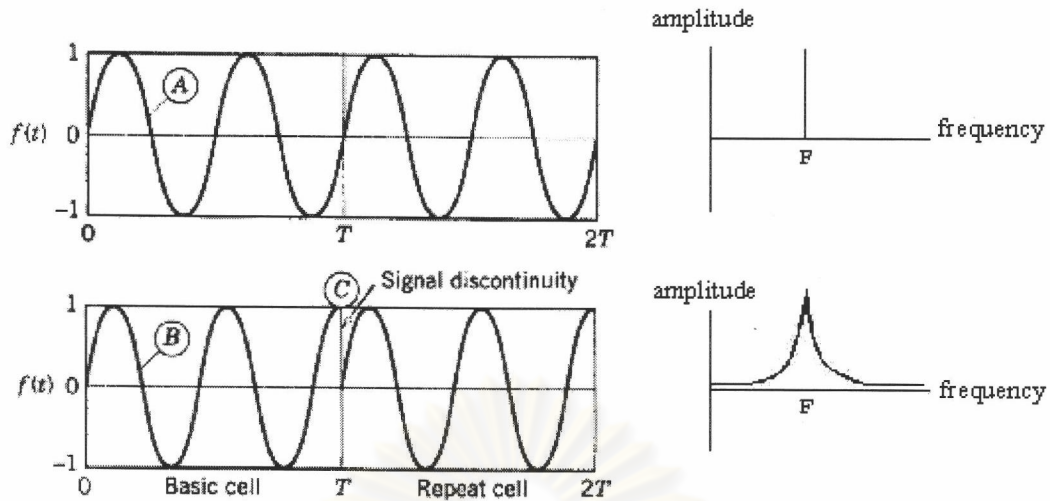
เมื่อทำการสุ่มตัวอย่างข้อมูลแล้ว ข้อมูลที่ได้มาจะถูกแปลงเป็นดิจิทัลโดยอยู่ในรูปแบบเลขฐานสอง เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT ส่วนใหญ่ใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 12 บิต (12 Bit A/D Converter) ทำให้สามารถเก็บข้อมูลที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุดต่างกัน 4095 เท่า หรือมีขอบเขตทางพลศาสตร์ (Dynamic Range) 72 dB จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปเก็บในหน่วยความจำเวลาเพื่อรอการนำไปใช้ต่อไป ถ้าต้องการแสดงสัญญาณบนโดเมนเวลาเครื่องวิเคราะห์จะนำข้อมูลเหล่านี้ออกมาแสดงได้ทันที โดยอาศัยการประมาณภายในช่วง (Interpolation) สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมหรือสัญญาณบนโดเมนความถี่ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปแปลงแบบ FFT ต่อไป

ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function)

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ FFT ทำงานด้วยการตั้งสมมติฐานว่า สัญญาณมีลักษณะเป็นคาบมีคาบรากฐาน (Fundamental Period) เท่ากับ T ตามขนาดช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณที่เรียกว่าหน้าต่างเวลา (Time Window) ซึ่งก็หมายความว่าสัญญาณประกอบขึ้นในรูปองค์ประกอบความถี่ของอนุกรมฟูรีเยร์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่รากฐาน (Fundamental Frequency, f_0)

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{N} f_s \quad (2-16)$$

ซึ่งจะทำงานได้ดีถ้าสัญญาณมีองค์ประกอบความถี่สูงกว่า f_0 เป็นจำนวนเท่าที่ลงตัว เนื่องจากสัญญาณในหน้าต่างเวลาเป็นตัวแทนของสัญญาณจริงทั้งหมด เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะสมมติให้สัญญาณจริงที่ทำการวัดมีลักษณะเหมือนกับว่ามีสัญญาณเช่นเดียวกับที่ปรากฏในหน้าต่างเวลามาเรียงต่อกันทั้งในช่วงเวลาก่อนหน้าและภายหลังหน้าต่างเวลา แต่ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณมักมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของ f_0 ที่ไม่ลงตัว ทำให้หน้าต่างเวลาไม่สามารถบรรจุสัญญาณได้เต็มรอบการสั่นพอดีจึงปรากฏความไม่ต่อเนื่องทั้งขนาดและความชันที่รอยต่อของหน้าต่างเวลา ทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า การรั่วเนื่องจากการกรองสัญญาณ (Filter Leakage) คือมียอดสเปกตรัมที่ความถี่อื่นเพิ่มเข้ามา เพื่อเป็นตัวแทนความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของหน้าต่างเวลา ดังรูปที่ 2-16 สัญญาณคลื่นไซน์ A มีคาบของสัญญาณบรรจุลงในหน้าต่างของเวลาได้พอดี ในขณะที่สัญญาณคลื่นไซน์ B มีความถี่ต่างไปเล็กน้อย

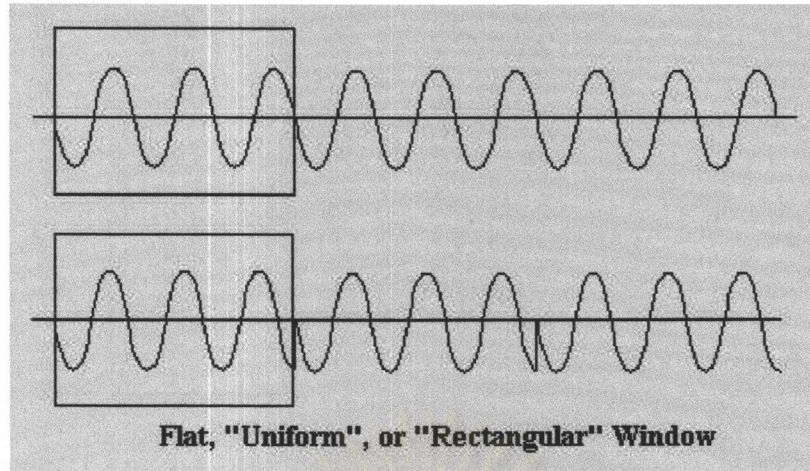


รูปที่ 2-16 การร่วของสัญญาณซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของหน้าต่างของเวลา

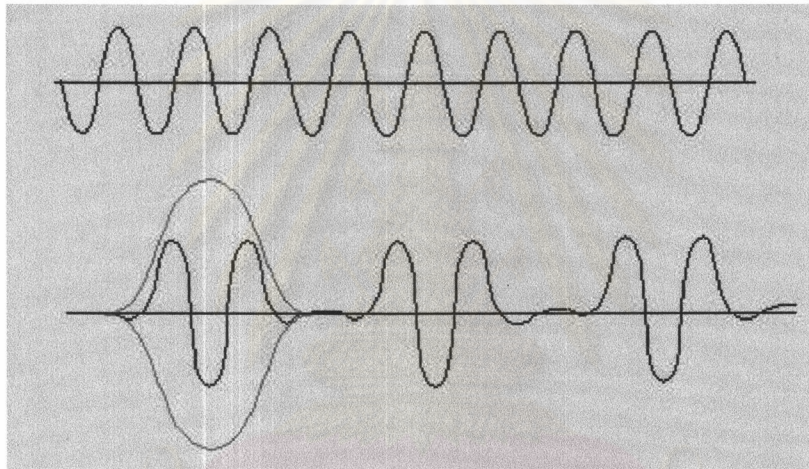
สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยเลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม ฟังก์ชันที่นิยมใช้กันมีหลายชนิด การเลือกฟังก์ชันใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสัญญาณและผลที่ต้องการ

- ฟังก์ชันสี่เหลี่ยม (Rectangular Function) เหมาะสำหรับสัญญาณประเภทชั่วคราวเพื่อให้หน้าต่างกับสัญญาณเท่ากันตลอดช่วง มีรูปแบบตามรูปที่ 2-17 ให้ความถี่ที่แม่นยำ
- ฟังก์ชันแฮนนิ่ง (Hanning Function) เหมาะสำหรับสัญญาณที่ต้องการความละเอียด (Resolution) สูง ให้นำหน้าต่างกับช่วงกลางๆ ของระยะเวลาที่วัด มีรูปแบบตามรูปที่ 2-18 ให้ความแม่นยำของความถี่และแอมพลิจูดปานกลาง
- ฟังก์ชันแฟลต-ท็อป (Flat-Top Function) เหมาะสำหรับสัญญาณที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำของขนาดค่าแอมพลิจูด เช่นการวัดสัญญาณเพื่อการสอบเทียบอุปกรณ์วัด (Calibration) มีรูปแบบของหน้าต่างตามรูปที่ 2-19 ให้แอมพลิจูดที่แม่นยำ

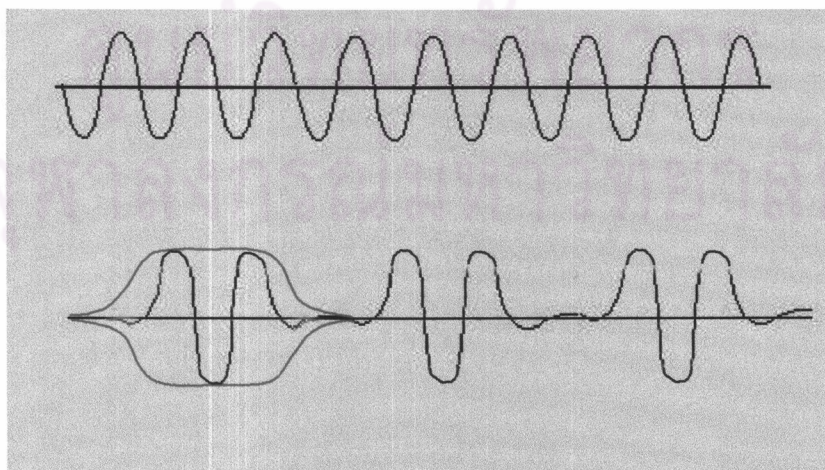
ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-17 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันสี่เหลี่ยม [13]



รูปที่ 2-18 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฮนนิ่ง [13]



รูปที่ 2-19 หน้าต่าง (Window) ของฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบฟังก์ชันแฟล็ต-ท็อป [13]