

## อินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบหลักการแยกองค์ประกอบสเปกตรัมของแสง

### เพื่องานลักษณะเฉพาะทางมาตรวิทยา

### Dispersive Comb-Spectrum Interferometer Metrological Characterization

#### บทนำ

หลักการของอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์ (Interferometric) นิยมนำมาประยุกต์เป็นเครื่องมือวัดที่มีศักยภาพสูงใช้กันอย่างกว้างขวางในการวัดระยะที่คงที่ ในจำพวกอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์ทั้งหลายนั้น อินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบใช้แสงขาว (White Light) จะเป็นที่น่าสนใจต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก อันเนื่องมาจากอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบใช้แสงขาว เป็นอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์ที่สามารถติดตั้งส่วนที่เป็นอุปกรณ์เชิงกลและเชิงแสงได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีความคงทน (robust) เชื่อถือได้ (reliable) และผลการวัดที่ได้ก็ยังคงเป็นที่ยอมรับ หลักการวัดนี้จะมีศักยภาพและความแม่นยำสูง (high-accuracy) ใช้เลเซอร์ไดโอดเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีราคาต่ำ

ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นเทคนิคอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบใช้การแยกองค์ประกอบสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงออก (Dispersive Comb-Spectrum Interferometer-DCSI) ในการวัดก็จะประยุกต์จากการแทรกสอดของแสงแต่ละโหมดขององค์ประกอบสเปกตรัมของแสง พิสัยการวัดที่แน่นอนจะสัมพันธ์กับระยะห่างของสเปกตรัมของโหมดที่อยู่ติดกัน หลักการของอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์ยังสามารถรวมเอาเทคนิคการมอดูเลตความถี่ของคลื่นที่ต่อเนื่องเข้าไป (frequency-modulated continuous-wave) เมื่อต้องการขยายพิสัยการวัดที่กว้างออกไปโดยไม่ทำให้สูญเสียความแม่นยำของการวัด

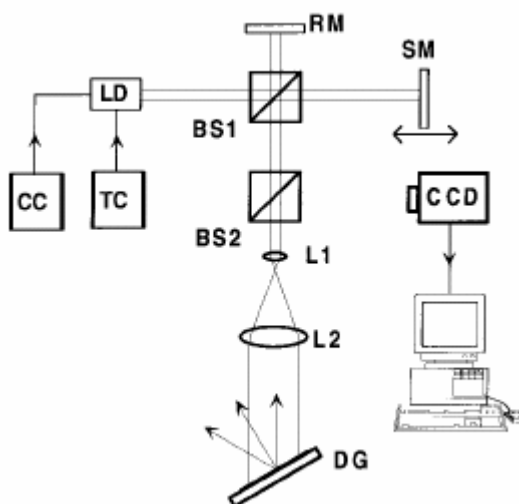
ในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวัด องค์ประกอบของระบบวัด และการวิเคราะห์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน ในส่วนท้ายสุดจะกล่าวถึงการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองเป็นลำดับต่อไป

#### ทฤษฎี

##### หลักการวัด

องค์ประกอบของเครื่องมือวัดแสดงตามรูปที่ 1 เมื่อเลเซอร์ไดโอด (LD) ถูกขับภายใต้กระแสเทรตโซลที่เหมาะสม ลำแสงจะเข้าสู่ระบบอินเทอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบของไมเคิลสัน (Michelson's Interferometer) โดยผ่านตัวแยกแสง beam splitter (BS1) โดยมีกระจก (RM) เป็นจุดอ้างอิง (Reference mirror) และมีกระจก (SM) สามารถเลื่อนได้ ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับเป็นแขนวัด หลังจากนั้นลำแสงที่ถูกแยกโดย (BS1) ทั้งสองลำ จะสะท้อนกลับจากกระจกทั้งสองบาน เกิดการแทรกสอดกันของแสง ลำแสงที่แทรกสอดกันจะเข้าสู่ (BS2) และไปต่อยังเกรตติงแยกแสง (DG) โดยผ่านเลนส์ (L1) และ (L2) เกรตติงแยกแสง จะถูกวางในตำแหน่งที่ทำให้ลำแสงเกิดการเลี้ยวเบน

ในลำดับที่ 2 เดินทางสะท้อนกลับไปในแนวเดิมโดยผ่านเลนส์ทั้งสองอีกครั้งเข้าสู่ (BS2) การติดตั้งเกรตติงแยกแสงเป็นไปตามหลักการติดตั้งของ Littrow (Littrow configuration) [4] หลังจากนั้นจึงตรวจจับสัญญาณที่ออกจาก (BS2) ด้วยกล้อง CCD และวิเคราะห์สัญญาณด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องวัด

เรากำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงเป็น Comb spectrum คือชุดของสเปกตรัมที่ประกอบด้วยหลายๆความถี่นั่นเอง โดยแต่ละโหมดของเลเซอร์จะเป็นไปตามรูปทรงของลอเรนซ์ (Lorentzian shape) และสเปกตรัมของเลเซอร์ทั้งหมดจะกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) สนามไฟฟ้าปกติทั่วไปของหนึ่งโหมดเลเซอร์จะเขียนแทนด้วยสมการได้ดังนี้ [2]

$$E_j(\nu) = \frac{(\delta'\nu)^2}{(\delta'\nu)^2 + 4(\nu - \nu_0 - j\Delta\nu)^2} \exp\left[-\pi\left(j\frac{\Delta\nu}{\delta\nu}\right)^2 + i2\pi\nu t\right] \quad (1)$$

- เมื่อ  $\nu$  คือ ความถี่เชิงแสง (Optical frequency)  
 $\nu_0$  คือ ความถี่เชิงแสงตรงกลาง (Optical center frequency)  
 $\delta\nu$  คือ ความกว้างของสเปกตรัมที่ครอบคลุมทุกโหมด (The envelope full width of all modes)  
 $\delta'\nu$  คือ ความกว้างของสเปกตรัมของหนึ่งโหมด (The spectrum width of the lasing mode)  
 $\Delta\nu$  คือ ความต่างของความถี่โหมดที่อยู่ติดกัน (The frequency difference between adjacent modes)

ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้าของคลื่นสองขบวนที่แทรกสอดกัน คือ

$$\begin{aligned} E_{jr}(\nu) &= E_j(\nu) \exp\left[i \frac{4\pi\nu}{c} s_r\right] \\ E_{jm}(\nu) &= E_j(\nu) \exp\left[i \frac{4\pi\nu}{c} s_m\right] \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง (Speed of light)  
 $s_r$  คือ ความยาวของแขนอ้างอิง (The length of the reference arm)  
 $s_m$  คือ ความยาวของแขนวัด (The length of measuring arm)

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้สนามไฟฟ้ารวมเป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าของคลื่นทั้งสองเนื่องจากการแทรกสอดกันเป็นไปตามหลักการซ้อนทับ (Superposition) และความเข้มแสงจะแปรผันตรงกับกำลังสองของสนามไฟฟ้ารวม ดังนั้นจะทำให้ความเข้มแสง  $I_j$  ของโหมดที่  $j$  ของเลเซอร์เขียนได้เป็น [2], [3]

$$\begin{aligned} I_j &= (E_{jr}(\nu) + E_{jm}(\nu))(E_{jr}(\nu) + E_{jm}(\nu))^* \\ I_j &= 2 \left( \frac{(\delta'\nu)^2}{(\delta'\nu)^2 + 4(\nu - \nu_0 - j\Delta\nu)^2} \right) \exp\left[-2\pi \left( j \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} \right)^2\right] \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi\nu}{c} s\right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ  $s = s_r - s_m$

ความเข้มแสงรวมทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของทุกๆ โหมด ดังนั้นจะได้

$$I(\nu) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} 2 \left( \frac{(\delta'\nu)^2}{(\delta'\nu)^2 + 4(\nu - \nu_0 - j\Delta\nu)^2} \right) \exp\left[-2\pi \left( j \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} \right)^2\right] \left[ 1 + \cos\left(\frac{4\pi\nu}{c} s\right) \right] \quad (4)$$

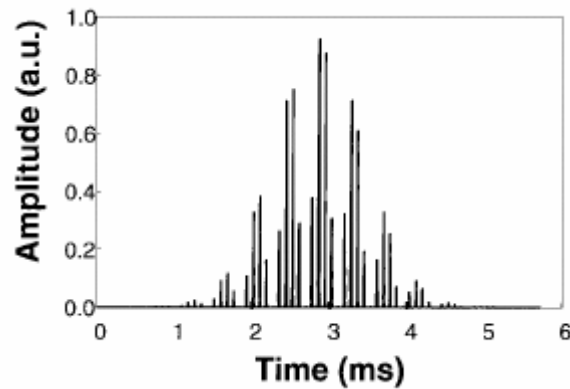
ในเทอมของฟังก์ชัน  $\cos(4\pi\nu s/c)$  จะมีระยะ  $s$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่เราสนใจอยู่

สัญญาณหรือความเข้มแสงจริงๆ จะเป็นสัดส่วนกับ  $I(\nu)$  ตามสมการที่ (4) แต่ในการตรวจจับสัญญาณด้วยกล้อง CCD และประมวลผลสัญญาณด้วยคอมพิวเตอร์นั้น กล้อง CCD จะทำการชักตัวอย่างสัญญาณ (Sampling) และส่งผ่านข้อมูล (transforms) ที่ตรวจจับได้ไปเป็นสัญญาณแรงดัน  $h$  (voltage signal) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา  $t$

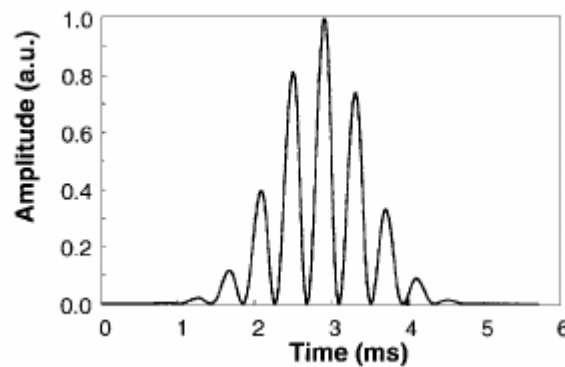
ดังนั้นสมการที่ (4) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$h(t) = K_1 \sum_{j=-\infty}^{\infty} 2 \left( \frac{(\delta'v)^2}{(\delta'v)^2 + 4(K_2 t - v_0 - j\Delta v)^2} \right)^2 \exp \left[ -2\pi \left( j \frac{\Delta v}{\delta v} \right)^2 \right] \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi K_2 t}{c} s \right) \right] \quad (5)$$

โดยที่ค่าของ  $K_1, K_2$  จะเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2 แสดงภาพที่ได้จากการตรวจจับด้วยกล้อง CCD



รูปที่ 3 แสดงภาพที่ได้ก่อนจากการชักตัวอย่าง

ในส่วนองระยะ  $s$  ที่เราสนใจจากสมการที่ (5) สามารถใช้การประยุกต์ฟูเรียร์ (Fourier transform) [2] เพื่อหาระยะ  $s$  ได้ ถ้าความกว้างของสเปกตรัม  $\delta'v$  ของแต่ละโหมดแคบกว่าความกว้างของทุกโหมดรวมกัน  $\delta v$  มากๆ เราสามารถสมมุติให้ comb spectrum ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นไปตามการชักตัวอย่าง (sampling) ตามฟังก์ชัน

$$f(t) = 2K_1 \cdot \exp \left[ -2\pi \left( \frac{K_2 t - v_0}{\delta v} \right)^2 \right] \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi K_2 t}{c} s \right) \right] \quad (6)$$

ฟูรีเยร์ทรานฟอร์มของฟังก์ชัน  $f(t)$  คือ

$$|F(i\omega)| = \frac{\delta v}{\sqrt{2K_2}} \left\{ \exp\left(-\frac{\delta v^2}{8\pi K_2^2} \omega^2\right) + \frac{1}{2} \left[ \exp\left(-\frac{\delta v^2}{8\pi K_2^2} \left(\omega - \frac{4\pi K_2 s}{c}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{\delta v^2}{8\pi K_2^2} \left(\omega + \frac{4\pi K_2 s}{c}\right)^2\right) \right] \right\} \quad (7)$$

เปรียบเทียบผลการลากเส้น (Plot) ตามฟังก์ชันของสมการที่ (5) และตามฟังก์ชันของสมการที่ (6) จะได้แผนภาพดังรูปที่ 2 และ ดังรูปที่ 3 ตามลำดับ

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของฟังก์ชันตามสมการที่ (5) นั้นสามารถทำการชักตัวอย่างสัญญาณซึ่งจะเป็นไปตามฟังก์ชันของสมการที่ (6) ซึ่งก็คือการ modulated ด้วยฟังก์ชันโคซายน์ (cosine function) การชักตัวอย่างความถี่ ก็คือการเก็บค่าความถี่ของแต่ละโหมดเป็นช่วงๆ จากฟังก์ชันตามสมการที่ (6) เราสามารถหาระยะ  $s$  ได้โดยการวัดคาบสัญญาณ  $T_{\cos}$  ของทอมโคซายน์ และประยุกต์สูตรใหม่เป็น

$$s = \frac{c}{2K_2} \cdot \frac{1}{T_{\cos}} \quad (8)$$

ถ้าเริ่มต้นให้  $l$  เป็นระยะกล้อง ค่าสัมประสิทธิ์  $K_2$  สามารถเขียนได้เป็น

$$K_2 = \frac{dv}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = K_{dg} \cdot K_{ccd} \quad (9)$$

เมื่อ  $K_{dg}$  คือ แฟกเตอร์ตัวคูณ (Scale factor) ที่เปลี่ยนระยะความถี่ของแต่ละโหมดไปเป็นการกระจายของความถี่เชิงแสง และ  $K_{ccd}$  คือ ค่าแฟกเตอร์ที่แปลงสัญญาณจากสเกลเวลา (Time scale) ของกล้องไปเป็นพิกเซลส์ (pixels) ซึ่งค่าของ  $K_{ccd}$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณนาฬิกาของกล้อง (Camera clock frequency)

ถ้าให้  $D_l$  เป็นค่าแฟกเตอร์การแยกเชิงเส้นของแสง (Linear dispersion factor) ของ เกรตติงแยกแสง ค่าของพารามิเตอร์  $K_{dg}$  สามารถเขียนได้เป็น

$$K_{dg} = \frac{1}{D_l} = \frac{d \cos \beta c}{L \lambda_0^2 m} \quad (10)$$

|       |             |                                                                                          |
|-------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $d$         | คือ ระยะช่องของเกรตติง (Grating period)                                                  |
|       | $L$         | คือ ระยะทางระหว่างกล้องกับเกรตติง (Total distance of the linear camera from the grating) |
|       | $\lambda_0$ | ความยาวคลื่นแสงตรงกลาง (Center wavelength)                                               |
|       | $\beta$     | มุมเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction angle)                                                   |
|       | $m$         | ลำดับของการเลี้ยวเบน ในที่นี้เท่ากับ 2 (Diffraction order)                               |

เราสมมุติให้ลำแสงนั้นครอบคลุมตลอดช่วงเซนเซอร์ของกล้อง CCD ดังนั้นในการตรวจจับสัญญาณสามารถเขียน  $K_{ccd}$  ใหม่ได้เป็น

$$K_{ccd} = \frac{L_{ccd}}{T_{ccd}} \quad (11)$$

เมื่อ  $L_{ccd}$  คือ ระยะบันทึกภาพ (The length of the CCD register) และ  $T_{ccd}$  คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสแกนภาพ (The time interval needed to operate one scan of the camera sensor)

### แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน (Uncertainty source)

มีสองหัวข้อหลักที่จะกล่าวถึงแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนของการวัด หนึ่งก็คือมาจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และการควบคุมแหล่งกำเนิดแสงโดยตรง สองก็มาจากการติดตั้งอุปกรณ์เชิงแสง (Optical setup) รวมไปถึงการตรวจจับสัญญาณที่แทรกสอดกัน สำหรับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นั้นพารามิเตอร์หลักที่ต้องพิจารณาคือความกว้างสเปกตรัม (line width) ของแต่ละโหมดและค่าของความถี่กลางของโหมดการกระจาย สำหรับพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนั้น ค่าของกระแสและอุณหภูมิที่แตกต่างกันยังส่งผลกระทบต่อตัวแปรทั้งคู่ด้วย ในส่วนของการติดตั้งเชิงแสงนั้นเราสมมุติว่าระบบอินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์นั้นมีเสถียรภาพและเชื่อถือได้ ดังนั้นส่วนที่ต้องพิจารณาก็คือผลกระทบของการเลื่อนของการเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากเกรตติง และส่วนประกอบเชิงแสงที่ได้จากการตรวจจับด้วยกล้อง CCD

การหาความไม่แน่นอนของการวัดนั้นเริ่มจากสมการที่ (8) ซึ่งเป็นค่าของระยะที่วัดซึ่งจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันคาบเวลาที่ถูกวัดเป็น  $T_{cos}$  เรากำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของ

อากาศ (Refractive index) เปลี่ยนไปน้อยมากซึ่งไม่ส่งผลต่อการวัด ดังนั้นความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนของการวัดระยะ  $s$  เขียนได้เป็น

$$u_r(s) = \sqrt{u_r^2(T_{\cos}) + u_r^2(K_2)} \quad (12)$$

การคำนวณหาความไม่แน่นอนของ  $T_{\cos}$  นั้นทำได้ยากเนื่องจากมันจะขึ้นกับพฤติกรรมของสัญญาณที่เกิดในขณะนั้นอย่างละเอียด อย่างไรก็ตามเราสามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนที่สัมพันธ์กับเวลาได้โดยการ mapping ความถี่เชิงแสง (Optical frequency) ไปเป็นสเกลเวลาของสัญญาณกล้อง CCD แทน โดยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ดังนั้นผลของ  $u_r(T_{\cos})$  สามารถเขียนใหม่โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของ  $u_r(t)/\sqrt{N}$  เมื่อ  $N$  คือค่าตัวเลขที่มีนัย (significant) ต่อการคำนวณหา  $T_{\cos}$  การหาของ  $u_r(t)$  นั้นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการวัดคือ CCD pixel กล่าวคือความสามารถในการแยกชัดของความถี่ของกล้อง CCD นั้นเอง ความไม่แน่นอนของการวัด  $u_r(t)$  จะสัมพันธ์กับความไม่แน่นอนของการวัด  $u_r(\nu)$  การวัดค่าความถี่เชิงแสงของกล้องจะขึ้นกับความกว้างโหนด (line width)  $\delta\nu$  และความสามารถในการแยกชัด (Resolving power) ของเกรตติง  $\delta\nu_{dg}$  ค่าของ  $u_r(\nu)$  เป็นผลจากการกระจายของ  $u_r(t)$  จะมีค่าเท่ากับ  $u_r(t)/K_2$

เราสามารถคำนวณหาของ  $u_r(K_2)$  จากสมการที่ (9) กับ (11) จะได้

$$K_2 = \frac{d \cos \beta c}{L \lambda_0^2 m} \frac{L_{ccd}}{T_{ccd}} \quad (13)$$

การกระจายของความไม่แน่นอนของ  $K_2$  เป็น

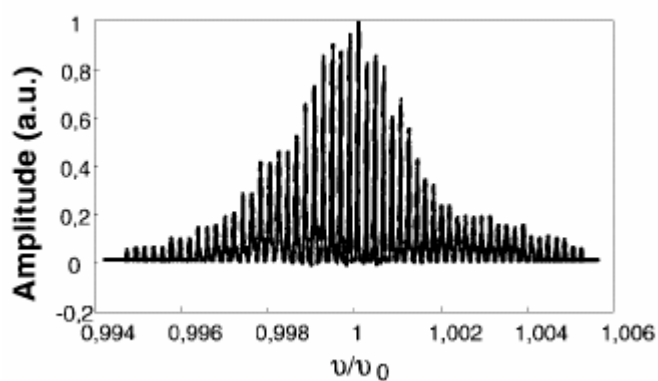
$$u_r(K_2) = \sqrt{u_r^2(d) + u_r^2(L_{ccd}) + u_r^2(L) + u_r^2(T_{ccd}) + 4u_r^2(\lambda_0)} \quad (14)$$

แต่ละเทอมของสมการที่ (14) คือพารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนของแต่ละตัว ดังนี้  $u_r(d)$  คือความไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเกรตติง  $u_r(L_{ccd})$  ความไม่แน่นอนของการบันทึกภาพของกล้อง CCD  $u_r(T_{ccd})$  คือความไม่แน่นอนของช่วงเวลาที่ใช้ในการสแกนภาพของกล้อง CCD  $u_r(L)$  คือความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากสมรรถนะของระบบเชิงกลของการติดตั้งเครื่องมือ  $u_r(\lambda_0)$  คือความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นที่จุดกึ่งกลางซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการจับเลเซอร์ไดโอด

## ผลการทดลอง

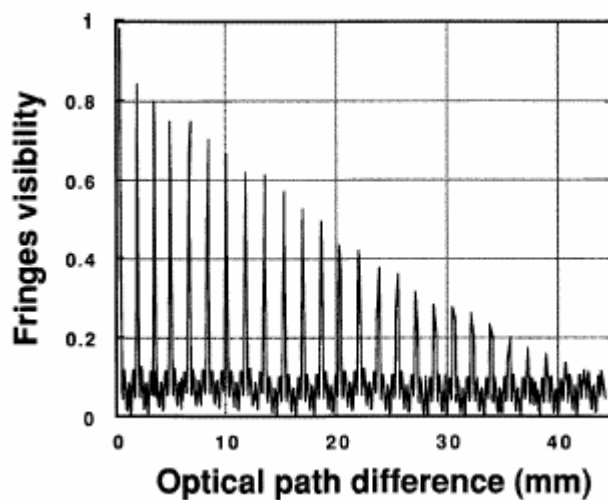
### ลักษณะเฉพาะของเลเซอร์ (Laser Characterization)

การทดลองนี้ใช้เลเซอร์ไดโอดโมเดล KD67004P เลเซอร์ไดโอดถูกขับโดยมีกำลังเชิงแสง (Optical power) 4 mW ที่ 670 nm ตอนแรกนั้นการทดลองจะทำการขับเลเซอร์ไดโอดที่กระแสและอุณหภูมิที่ต่าง ๆ กัน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการแผ่รังสี สำหรับมัลติโหมดของแสงขาวที่สังเกต comb-spectrum ได้ดี คือที่กระแสเท่ากับ 43 mA อุณหภูมิของเลเซอร์อยู่ในช่วง  $6^{\circ}\text{C}$  ถึง  $14^{\circ}\text{C}$  และให้กำลังเชิงแสงประมาณ  $200\text{ }\mu\text{W}$  สเปกตรัมของลำแสงที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดจากการทดลอง

ในรูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมจากการทดลองขับเลเซอร์ไดโอดที่กระแสเท่ากับ 41 mA อุณหภูมิของเลเซอร์เท่ากับ  $8^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5 แสดงความชัดเจนของฟริ่งเทียบกับความต่างทางเดินแสง

ลักษณะของฟริ้งที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดของแสงอันเนื่องมาจากความต่างของทางเดินแสงดังรูปที่ 5 แสดงฟริ้งที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความต่างของทางเดินแสงของอินเตอร์เฟียร์รอมิเตอร์ ความต่างของความถี่ของโหมดที่อยู่ติดกัน  $\Delta\nu$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15 [2]

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\Delta L} \quad (15)$$

เมื่อ  $\Delta L$  เป็นระยะผลต่างของแขนทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟียร์รอมิเตอร์ จากการทดลองตามรูปที่ 5 สามารถหาค่าของ  $\Delta L$  เท่ากับ 1.7 mm ที่ความต่างของความถี่ของโหมดที่อยู่ติดกัน  $\Delta\nu$  เท่ากับ 88 GHz

### ข้อมูลตัวเลขของการทดลอง (Numerical Case)

ในระดับค่าประมาณของตัวเลขของความไม่แน่นอนของการวัด เราจำเป็นที่จะต้องทราบค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องก่อน เราใช้ข้อมูลตัวเลขจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและจากลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยที่  $L$  เท่ากับ 400 mm,  $d$  เท่ากับ 833 nm,  $\lambda_0$  เท่ากับ 670 nm,  $L_{ccd}$  เท่ากับ 13.3 mm,  $T_{ccd}$  เท่ากับ 6 ms,  $\beta$  เท่ากับ  $53.5^\circ$  จากค่าพารามิเตอร์ข้างต้นสามารถคำนวณค่า  $K_2$  เท่ากับ  $9.18 \times 10^{14} \text{ s}^{-2}$  ตาราง I แสดงค่าความไม่แน่นอนของแต่ละพารามิเตอร์ที่ได้ ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานของ  $K_2$  จะได้จากการคำนวณตามสำการที่ (14) เราจะได้ค่าของ  $u_r(K_2)$  เท่ากับ  $9 \times 10^{-4}$

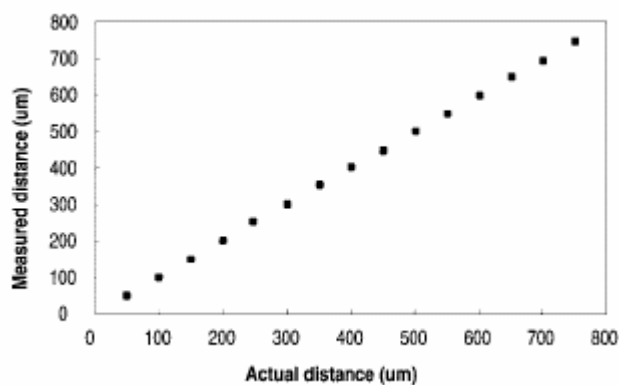
| $X_i$                                                                 | $d$                              | $\lambda_0$                    | $L$                       | $T_{ccd}$                        | $L_{ccd}$                  |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| $\frac{1}{K_2} \left  \frac{\partial K_2(x_i)}{\partial x_i} \right $ | $1.2 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ | $3 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ | $2.5 \text{ m}^{-1}$      | $1.7 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ | $75.2 \text{ m}^{-1}$      |
| $u(x_i)$                                                              | $8.3 \times 10^{-3} \text{ nm}$  | $0.16 \text{ nm}$              | $10 \text{ } \mu\text{m}$ | $10 \text{ ns}$                  | $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ |
| Contribution to $u_r(K_2)$                                            | $10^{-5}$                        | $4.7 \times 10^{-4}$           | $2.5 \times 10^{-5}$      | $1.7 \times 10^{-6}$             | $3 \times 10^{-5}$         |

ตาราง I แสดงค่าแต่ละองค์ประกอบความไม่แน่นอนของ  $K_2$

ค่าความไม่แน่นอนของ  $u_r(T_{\cos})$  ได้มาจากลักษณะเฉพาะของเลเซอร์และความละเอียดของสัญญาณที่ 800 จุด ( $N = 800$ ) เราจะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $u_r(T_{\cos})$  เท่ากับ  $1.6 \times 10^{-3}$  และเมื่อคิดค่าความไม่แน่นอนรวม (Combine uncertainty) ตามสมการที่ (12) จะได้ค่าความไม่แน่นอนรวม  $1.8 \times 10^{-3}$  ของพิสัยการวัดที่ 800  $\mu\text{m}$  ประมาณ 1.4  $\mu\text{m}$

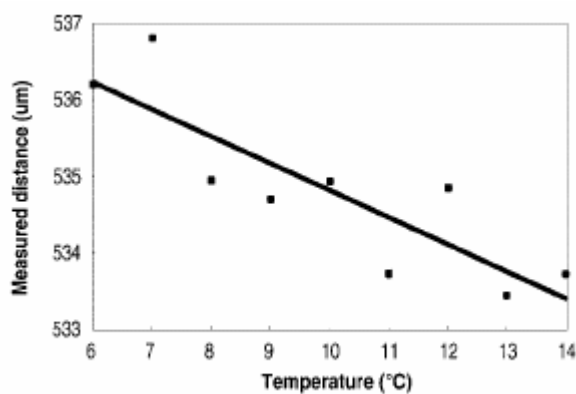
### การวัดระยะ (Distance Measurement)

ระบบเครื่องมือวัดในการทดลองนี้จะถูกสอบเทียบอีกครั้งด้วยอินเตอร์เฟียร์รอมิเตอร์ที่สับยอนไปยังมาตรฐานนานาชาติ ผลการสอบเทียบแสดงตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดในการทดลองกับค่าจริง

ในผลการสอบเทียบนี้ เลเซอร์ไดโอดถูกขับที่กระแส 42 mA อุณหภูมิของเลเซอร์เท่ากับ  $8^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ  $22^{\circ}\text{C}$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $1.3\ \mu\text{m}$



รูปที่ 7 แสดงความไวของเครื่องวัดต่ออุณหภูมิ

ความไว (Sensitivity) ของมิเตอร์วัดระยะเทียบกับอุณหภูมิแสงตามรูปที่ 7 ซึ่งคิดคำนวณมาจากตาราง I ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความไวต่อความยาวคลื่นที่จุดกลาง ( $\lambda_0$ ) ต่ออุณหภูมิของเลเซอร์เป็น  $0.39\ \text{nm}/^{\circ}\text{C}$  ค่าเบี่ยงเบนที่คำนวณได้ที่อุณหภูมิของเลเซอร์ตลอดช่วง  $8^{\circ}\text{C}$  คือ  $4.6\ \mu\text{m}$  ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ดีเยี่ยมสำหรับการทดลองนี้

## บทสรุป

การวัดระยะโดยเทคนิคอินเตอร์เฟียร์รอมิเตอร์แบบหลักการแยกองค์ประกอบสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง ตามที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น ทั้งทฤษฎีและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบมีความเหมาะสมต่อการวัดในพิสัยประมาณ 1 mm โดยมีความไม่แน่นอน 0.18 % เทียบกับค่ามาตรฐาน มีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ใช้แหล่งกำเนิดแสงราคาถูก เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์พัฒนาเพื่อใช้งานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

---

## เอกสารอ้างอิง

- [1] U. Minoni, L. Rovati, M. Bonardi, and F. Docchio, Dispersive Comb-Spectrum Interferometer: Metrological Characterization, IEEE J. Instrumentation and Measurement, vol. 48, No. 6, 1999
- [2] L. Rovati, U. Minoni, and F. Docchio, Absolute distance measurement using dispersive comb-spectrum interferometry, J. Opt., vol. 29, p. 121, 1998
- [3] Kjell J. Gasvik "OPTICAL METROLOGY", 2<sup>ed</sup>, JOHN WILEY & SON, p. 27-50
- [4] M. C. Hutly "DIFFRACTION GRATINGS", Academic Press Inc., p. 38