

การพัฒนาเลเซอร์ดีอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ แบบไมเคลสันและมัค- เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์

Development of Laser Doppler Vibrometer (LDV) Using Combination of Michelson and Mach-Zehnder Interferometer

ศิริเดช บุญแสง วันชัย อรุณเจริญฉาย

ภาควิชาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างเลเซอร์ดีอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์แบบใหม่ โดยนำการแทรกสอดของแสงแบบไมเคลสัน อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) มาทำงานร่วมกับแบบมัค-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) และเทคนิคการหักล้างกันทางแสง โดยไม่ต้องอาศัยการทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นระบบที่มีตัวรับสัญญาณแสง (Photo Detector) เพียง 2 ตัว ดังนั้นระบบที่นำเสนอจะมีระดับของสัญญาณรบกวนที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่เคยมีการนำเสนอมา แต่ยังคงความสามารถในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนที่ได้ในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรในการทดลองที่มีความละเอียดระดับนี้ จำเป็นต้องอาศัยการสั่นสะเทือนของตัวเพียโซ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระยะทางการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ระบบแสงนี้วัดได้ คือ 0.13 ไมโครเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกับระยะทางที่ตัวเพียโซมีการสั่นสะเทือนสูงสุดจริงคือ 0.09 ไมโครเมตร และความละเอียดสูงสุดที่ระบบนี้สามารถวัดได้อยู่ที่ระดับ 0.02 ไมโครเมตร

คำสำคัญ : อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์, เลเซอร์, เพียโซ

Abstract

This paper attempts to present the fabrication of a novel Laser Doppler Vibrometer (LDV) by combining the Michelson Interferometer with Mach-Zehnder Interferometer and optical subtraction technique for avoiding the additional system such as electronics circuit. The system has the capability of measuring vibration in micro or nanometer levels. This is resulted from the relatively lower noise level from only two photodetectors in the measuring circuits. For detecting and testing in micrometer or nanometer movement level, we applied the nano-movement by a piezoelectric actuator. The experimental result from the experiments shows that the maximum distance of the piezo movement is 0.13 micrometer that closed to the specification of this piezo at 0.09 micrometer. and the resolution of this system is approximately equal to 0.02 micrometer.

Key words : Interferometer, Laser, Piezo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การพัฒนาเครื่องวัดการสั่นสะเทือน หรือ เลเซอร์ดีอปเพลอร์ไวโบรมิเตอร์ (Laser Doppler Vibrometer: LDV) มีการวิจัยและพัฒนาอย่างแพร่หลาย [1-8] ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการตรวจจับการสั่นสะเทือนได้ โดยมีรูปแบบของระบบที่นำเสนอค่อนข้างหลากหลายสามารถจำแนกได้ดังนี้

ระบบแสงรูปแบบแรกคือแบบเฮเทอโรไดน์ที่มี อะคูสติก ออปติก มอดูเลเตอร์ (Acousto Optic Modulator: AOM) เป็นส่วนประกอบของระบบ [1-4] ทำหน้าที่ควบคุมความถี่แสงเข้ากับความถี่ที่สร้างขึ้น เพื่อนำผลการรวบรวมนี้ไปใช้ประโยชน์ในการหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่ำ ซึ่ง Teng และคณะ [1-4] ได้นำเสนอระบบแสงที่มี AOM 2 ตัวเป็นส่วนประกอบ วัตถุประสงค์ที่ใช้ AOM 2 ตัว เพื่อให้การวัดถูกต้องยิ่งขึ้น กล่าวคือ AOM ทั้ง 2 ตัวมีความถี่ที่ต่างกัน ตัวที่ 1 จะทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงของการวัด ส่วนตัวที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทางแสง ซึ่งเมื่อนำความถี่ทั้ง 2 มารวมกันจะทำให้การแยกแยะทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากความถี่ที่ต่างกันทำให้เฟสต่างกัน

ระบบแสงอีกรูปแบบคือแบบเฮเทอโรไดน์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบซีแมน ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ (Zeeman He-Ne Laser) [5-6] ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความถี่ 2 ความถี่อยู่ในลำแสงเดียวกัน ความแรงของสัญญาณทั้ง 2 นี้ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้ ซึ่ง La และคณะ [5] ได้นำเสนอระบบแสงที่นำซีแมน ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ มาทำงานร่วมกับระบบแสงแบบไมเคิลสัน อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ โดยนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มาทำหน้าที่ควบคุมระดับความแรงของสนามแม่เหล็กโดยอาศัยการทำงานของอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันทางไฟฟ้า (Frequency to voltage converter: F/V), กรองความถี่ต่ำ และ แยกความถี่ที่วัดได้ออกจากความถี่แสง ซึ่งการมีตัวรับแสง 2 ตัว (Photo Detector: PD) เพื่อการอ้างอิงทางแสง โดยที่ ตัวที่ 1 (PD1) จะเป็นตัวทำหน้าที่อ้างอิงทางแสง และตัวที่ 2 จะทำหน้าที่เป็นตัววัดสัญญาณแสง อีกตัวอย่างที่มีการนำ ซีแมน ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ มาใช้งานคือ Choi และคณะ [6] โดยระบบที่นำเสนอจะเพิ่มเติม

จากที่ La ได้เสนอไว้แล้ว กล่าวคือมีการเพิ่มตัวรับสัญญาณ (PD) เข้าไปอีก 1 ตัว เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงทางการวัดเพื่อการวัดที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

รูปแบบสุดท้ายคือแบบที่มีตัววัดสัญญาณแสงในระบบถึง 4 ตัว [7-8] เช่น La และคณะ [7] ได้นำเสนอการตรวจจับการสั่นสะเทือนโดยใช้การรวมและถอดสัญญาณแบบ FM (FM mod-demodulator) มาทำงานร่วมกับตัวรับแสงจำนวน 4 ตัว ซึ่งความน่าสนใจอยู่ที่การเปลี่ยนความถี่ทางแสงมาเป็นความถี่ทางอิเล็กทรอนิกส์ ทางผู้วิจัยนำเสนอระบบการปรับระดับสัญญาณอัตโนมัติ (Automatic Gain Control) และระบบตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของเฟส (Phase Lock Loop: PLL) ทำให้เกิดการรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะพร้อมทำงาน (Steady State) ก่อนจึงจะสามารถปฏิบัติงานได้ ซึ่งระดับของสัญญาณรบกวนยังคงลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่ง La และคณะ ยังได้นำเสนออีกระบบ [8] เพื่อลดระดับของสัญญาณรบกวนโดยการใช้องค์ประกอบความถี่สูง (High Pass Filter) มาทำงานร่วมกับระบบเฮเทอโรไดน์สังเคราะห์ (Synthetic Heterodyne Interferometer) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเกิดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่ำ

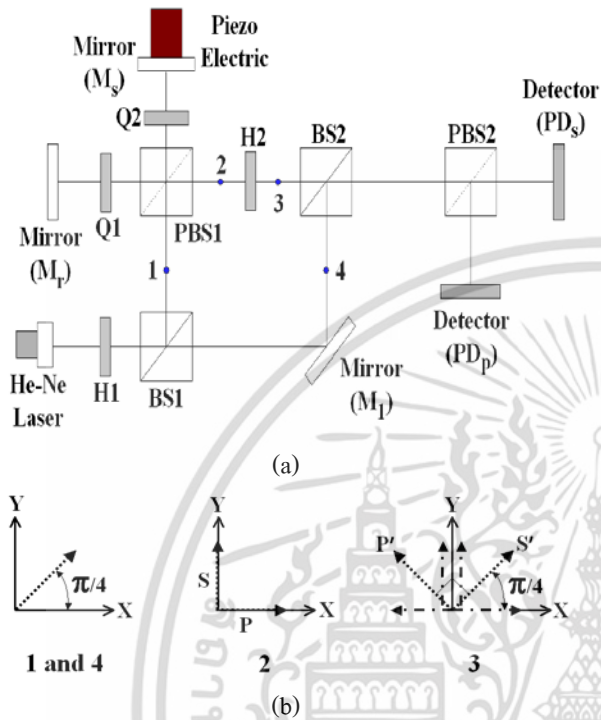
จากการศึกษาระบบแสงที่มีการนำเสนอไปแล้วข้างต้น พบว่าในการวัดการสั่นสะเทือนจะอาศัยการทำงานทางแสง (Interferometer) แต่ในการแยกสัญญาณที่ได้จากการสั่นสะเทือนออกจากสัญญาณแสงยังคงอาศัยการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Subtraction) ซึ่งบทความนี้นำเสนอระบบการวัดการสั่นสะเทือนที่ใช้การหักล้างทางแสง (Optical Subtraction) เพียงอย่างเดียวในการแยกสัญญาณที่ต้องการวัดออกจากสัญญาณทางแสง ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดสัญญาณรบกวนให้มีระดับที่ต่ำลง

2. รายละเอียดของระบบ

ระบบการวัดการสั่นสะเทือนที่บทความนี้นำเสนอเป็นการนำระบบแสงแบบไมเคิลสัน อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) มาทำงานร่วมกับแบบ มัค-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) ซึ่งจะมีข้อดีคือทำให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องยิ่งขึ้น กล่าวคือจะเกิดการอ้างอิงทั้งในทางแสงและในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงนามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัด การหักล้างกันนี้ทำให้เราสามารถแยกสัญญาณที่ต้องการจะวัดออกจากสัญญาณอ้างอิงได้โดยไม่ต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์อื่นเข้ามาช่วย ซึ่งรายละเอียดของระบบแสงนี้ได้แสดงดังรูปที่ 1 (a)



รูปที่ 1: (a) แผนผังระบบแสงแบบโฮโมไดน์ อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Homodyne Interferometer) (b) แนวการเคลื่อนที่ของแสงที่ผ่านในแต่ละจุดของรูปที่ 1 (a)

แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิด ซึ่งระบบนี้ใช้แหล่งกำเนิดแบบฮีเลียม-นีออน (He-Ni Laser) ที่มีความยาวคลื่น 633 nm ผ่านฮาฟเวฟเพลทตัวที่ 1 (Half Wave Plate, H1) ซึ่งจะทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงในแนวแกน x (x-Axis) เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นมุม 45 องศา หรือ $\pi/4$ จากนั้นแสงจะผ่านบีมสปลิตเตอร์ตัวที่ 1 (BS1) เพื่อทำการแยกลำแสงออกเป็น 2 ทางและทำมุมเป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน ก่อนที่แสงด้านหนึ่งจะเดินทางผ่านจุดที่ 1. ซึ่งมีทิศในการเดินทางตามรูปที่ 1 (b) แล้วเข้าสู่โพลาไรซ์ บีมสปลิตเตอร์ตัวที่ 1 (PBS1) ซึ่งเป็นศูนย์กลางของระบบแสงแบบไมเคิลสัน อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) แสงด้าน S และ P จะถูกแยกออกจากกันเป็นมุมฉากและเดินทางไปทางกระจก M_S และ M_P ผ่านควอเตอร์เวฟเพลท (Quarter Wave Plate,

Q1-Q2) สำหรับกระจก M_S ถูกติดอยู่กับตัวเพียร์โซ (Piezo Element) ซึ่งเมื่อเราจ่ายพลังงานจะทำให้เกิดการขยายตัวและเคลื่อนที่ตามระดับพลังงานที่ป้อนให้ เมื่อแสงกระทบกระจกทั้ง 2 ตัวก็จะเดินทางผ่านมาทางจุดที่ 2 สำหรับทิศทางการเดินทางของ แสงด้าน S และ P เป็นไปตามรูปที่ 1 เมื่อแสงเดินทางผ่านฮาฟเวฟเพลทตัวที่ 2 (Half Wave Plate, H2) แสงก็จะผ่านมาที่จุดที่ 3 ซึ่งความสัมพันธ์ของแสงด้าน S และ P ที่จุดนี้ก็จะเป็นไปตามรูปที่ 1 (b) ซึ่งเป็นผลมาจากฮาฟเวฟเพลทตัวที่ 2 นั่นเอง จากนั้นแสงก็จะกลับมาพร้อมกับแสงที่มาจากทางด้านกระจก M_P ที่มีบีมสปลิตเตอร์ตัวที่ 2 (BS2) จากนั้นลำแสงจะถูกแยกอีกครั้งที่โพลาไรซ์ บีมสปลิตเตอร์ตัวที่ 2 (PBS2) เพื่อแยกลำแสง S และ P ส่งให้ตัวรับสัญญาณแสง (Photo Detector) ทั้ง 2 ตัว (PD_S และ PD_P) ซึ่งตัวรับสัญญาณทั้ง 2 ตัวนี้จะต่ออยู่กับออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อทำการแสดงสัญญาณที่ได้จากระบบ ซึ่งรายละเอียดจะถูกแสดงในหัวข้อการดำเนินการทดลอง

3. สมการเพื่อการคำนวณหาค่าการสั้นสะท้อน

เริ่มต้นที่การหาสนามไฟฟ้าที่จุดที่ 1. (E_A) ในรูปที่ 1 (a) สามารถหาได้จากสมการ (1) โดยอธิบายได้ด้วย Jones Matrix รวมไปถึงการส่งเข้า (J_T) และ การสะท้อนกลับ (J_R) ของลำแสงที่เช่นกัน [1-2]

$$E_A = a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_R = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ที่ a คือ ระดับความแรงของสัญญาณที่ลำแสง

t และ r คือระดับการสูญเสียของสัญญาณแสงที่ส่งผ่าน (t) และสะท้อน (r) ผ่านมายัง PBS1 และ PBS2 ซึ่งค่าของทั้ง t และ r จะน้อยกว่า 1 มาก

จากนั้นที่จุดที่ 2. จะสามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้าได้เป็น 2 ชุด กล่าวคือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนกลับมาจากกระจก M_P คือ E_{ref} ได้จากสมการที่ (4) เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง

$$E_{\text{ref}} = J_T J_Q(-\pi/4) J_M J_Q(\pi/4) J_R E_A \exp(i\phi_S) \quad (4)$$

ที่ $J_Q(-\pi/4)$ และ $J_Q(\pi/4)$ คือ Jones Matrix ของควอเตอร์เวฟเพลท (Quarter Wave Plate) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (5) และ (6) ส่วน J_M คือ Jones Matrix ของกระจก M_T และ ϕ_S คือเฟสของแสงที่เปลี่ยนไประหว่างการเดินทางจาก PBS1 และ กระจก M_T

$$J_Q(-\pi/4) = \exp(-i\pi/4) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$J_Q(\pi/4) = \exp(i\pi/4) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \quad (6)$$

ส่วนสมการของแสงเกิดจากการสะท้อนมาจากกระจก M_S สามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้า (E_{pro}) ได้จากสมการที่ (7) ซึ่งก็จะคล้ายกับสมการที่ (4)

$$E_{\text{pro}} = J_R J_Q(-\pi/4) J_M J_Q(\pi/4) J_T E_A \exp(i\phi_P) \quad (7)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวม (E_P) ที่จุดที่ 2. สามารถคำนวณหาได้จาก $E_{\text{ref}} + E_{\text{pro}}$ แทนค่าตัวแปรต่างๆ ภายใต้สมมุติฐานว่าไม่มีการสูญเสียของแสงในตัวบีมสปลิตเตอร์ทั้งสองเลยจะได้ผลการบวกตามสมการที่ (8)

$$E_B = a \begin{bmatrix} -\exp(i\Phi_S) - \exp(i\Phi_P) \\ \exp(i\Phi_P) + \exp(i\Phi_S) \end{bmatrix} \quad (8)$$

สนามไฟฟ้าที่จุดที่ 3. (E_C) สามารถคำนวณได้จากการนำสมการที่ (8) มาคูณกับ Jones Matrix ของฮาฟเวฟเพลทตัวที่ 2 ตามสมการที่ (9)

$$E_C = J_H E_B \quad (9)$$

$$\text{ที่ } J_H = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$$

พบว่าที่มุม $\theta = 22.5$ องศา ($\pi/8$) จะทำให้ J_H มีค่าดังสมการ (10)

$$J_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

เมื่อนำสมการ (8) คูณด้วยสมการ (10) จะได้ค่าสนามไฟฟ้าที่จุดที่ 3. (E_C) ตามสมการที่ (11)

$$E_C = a \begin{bmatrix} [\exp(i\Phi_P) - \exp(i\Phi_S)] \\ [\exp(i\Phi_P) + \exp(i\Phi_S)] \end{bmatrix} \quad (11)$$

สำหรับลำแสงอีกด้านคือที่จุดที่ 4. มีค่าสนามไฟฟ้า (E_D) ตามสมการที่ (12)

$$E_D = b \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ที่ b คือ ระดับความแรงของสัญญาณที่ลำแสงเมื่อลำแสงทั้ง 2 มารวมกันและผ่านมาที่ตัวโพลาไรซ์บีมสปลิตเตอร์ตัวที่ 2 (PBS2) สนามไฟฟ้ารวมที่มากกระทบที่ตัวรับแสงด้าน P หรือ $PD_P (E_P)$ จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (13)

$$E_P = \begin{bmatrix} a[\exp(i\Phi_P) - \exp(i\Phi_S)] \exp(i\omega_1 t) + b \exp(i\omega_2 t) \\ a[\exp(i\Phi_P) + \exp(i\Phi_S)] \exp(i\omega_1 t) + b \exp(i\omega_2 t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ที่ ω_1 แทนความเร็วเชิงมุมของแสงที่ผ่านมาทางจุดที่ 1. และ ω_2 แทนความเร็วเชิงมุมของแสงที่ผ่านมาทางจุดที่ 2. ส่วนสนามไฟฟ้ารวมที่มากกระทบที่ตัวรับแสงด้าน S หรือ $PD_S (E_S)$ จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (14)

$$E_S = \begin{bmatrix} a[\exp(i\Phi_P) - \exp(i\Phi_S)] \exp(i\omega_1 t) + b \exp(i\omega_2 t) \\ a[\exp(i\Phi_P) + \exp(i\Phi_S)] \exp(i\omega_1 t) + b \exp(i\omega_2 t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) และ (14) ภายใต้ความสัมพันธ์ของความเข้มของแสง ($I = \mathcal{E}_0 n |E|^2$) [10] และ $\exp(x) = \cos(x) + i \sin(x)$ สามารถคำนวณค่าความเข้มของแสงทางด้าน P (I_P) และ S (I_S) ได้ตามสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$I_P = 4ab\eta \sin(\Delta\Phi/2) \cos(\Delta\omega t + \alpha_P) \quad (15)$$

$$I_S = 4ab\eta \cos(\Delta\Phi/2) \cos(\Delta\omega t + \alpha_S) \quad (16)$$

ที่ $\Delta\Phi$ คือ ความแตกต่างของเฟสของแสงทางด้าน P และ S หรือ $\Phi_P - \Phi_S$ ส่วน $\Delta\omega$ ความแตกต่างของความเร็วเชิงมุมของแสงหรือ $\omega_1 - \omega_2$ ซึ่งทั้ง ω_1 และ ω_2 มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ ซึ่ง f คือความถี่ของระบบและระบบไฮโมคายนี้นำเสนอนี้มีเพียงความถี่เดียว ฉะนั้น ω_1 จึงเท่ากับ ω_2 และ $\Delta\omega$ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถคำนวณหาความเข้มของแสงได้ใหม่ตามสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_P = 4ab\eta \sin(\Delta\Phi/2)\cos(\alpha_P) \quad (17)$$

$$I_S = 4ab\eta \cos(\Delta\Phi/2)\cos(\alpha_S) \quad (18)$$

โดย α_P และ α_S คือความแปรปรวนของเฟสของแสงทางด้าน P และ S ของทั้งด้านอ้างอิง (Reference) และด้านที่วัด (Probe) ซึ่งถ้าพิจารณาเฉพาะแสงที่มีเฟสเดียวกันจะทำให้สามารถหาค่าความแตกต่างของเฟส ($\Delta\Phi$) จากค่าความแรงของสัญญาณแสงทางด้าน P และ S ได้จากสมการที่ (19)

$$\Delta\Phi = 2 \tan^{-1} \left[\frac{I_P}{I_S} \right] \quad (19)$$

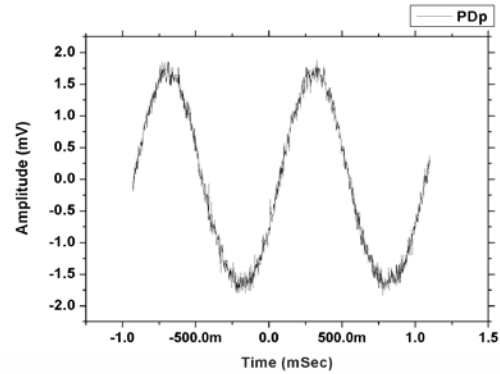
เมื่อทราบค่า $\Delta\Phi$ แล้วสามารถคำนวณค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวเฟิรโซ (ΔL) ได้จากสมการที่ (20)

$$\Delta L = \frac{\Delta\Phi \times \lambda}{4n\pi} \quad (20)$$

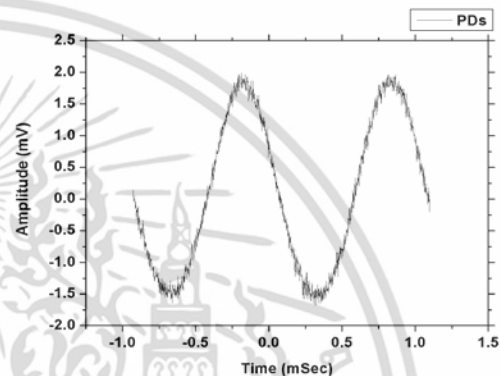
โดย λ คือความยาวของคลื่นแสงที่ระบบนี้ใช้มีค่าเท่ากับ 633 nm และ n คือค่าดัชนีการสะท้อนและหักเหของแสงผ่านตัวกลางซึ่งในที่นี้ตัวกลางคืออากาศทำให้ n มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ (20) จะทำให้ทราบค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป

4. การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อต่ออุปกรณ์ตามแผนผังในรูปที่ 1 (a) แล้วปรับทิศทางของแสงให้เดินทางไปในแนวเดียวกันในทุกมิติแล้วป้อนแรงดัน 100 VDC ที่ความถี่ภายนอก (External frequency) 1 KHz ที่ 300 mV เข้าที่ตัวเฟิรโซ จะปรากฏสัญญาณที่เครื่องวัดระดับสัญญาณ (Oscilloscope) ตามรูปที่ 2 ขึ้นที่ช่องสัญญาณที่ 1 ซึ่งเป็นสัญญาณทางด้าน P (PD_P) ส่วนสัญญาณที่ช่องสัญญาณที่ 2 เป็นสัญญาณทางด้าน S (PD_S) แสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งแกน X คือเวลามีหน่วยเป็น มิลลิวินาที แกน Y คือระดับความแรงของสัญญาณมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์



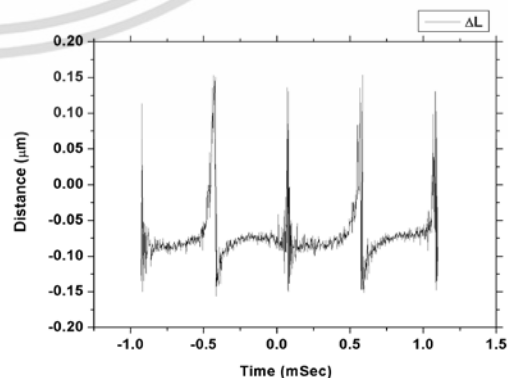
รูปที่ 2: สัญญาณทางด้าน P (PD_P)



รูปที่ 3: สัญญาณทางด้าน S (PD_S)

จากรูปที่ 2 และ 3 จะสังเกตว่าทั้งสองรูปมีเฟสที่แตกต่างกัน ($\Delta\Phi$) ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ (19)

เมื่อทราบค่าความแตกต่างของเฟสแล้วสามารถคำนวณค่าระยะทางที่ตัวเฟิรโซ เกิดการขยายตัวได้จากสมการที่ (20) ซึ่งผลการวัดถูกแสดงในรูปที่ 4 แกน X เป็นเวลามีหน่วยเป็น มิลลิวินาที แกน Y เป็นระยะทางซึ่งมีหน่วยเป็น ไมโครเมตร



รูปที่ 4: ค่าความแตกต่างของระยะทาง (ΔL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าเราสามารถบอกระยะทางที่ตัวเพียโซเกิดการขยายตัวได้ โดยการบอกช่วงเวลาที่วัดได้แล้วแปลงจากเวลาไปเป็นระยะทาง ซึ่งจะพบว่าจุดสูงสุดของกราฟมีระยะทางอยู่ที่ 0.13 μm เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของตัวเพียโซที่ระบุในเอกสารพบว่าใกล้เคียงกันกล่าวคือ ตัวเพียโซที่ใช้ในระบบนี้มาจาก บริษัท ทอร์แลป [9] รหัส AE0203d04F ระยะการเคลื่อนที่ที่แหล่งจ่าย 100 VDC มีค่าเท่ากับ $3.0 \pm 0.15 \mu\text{m}$ เมื่อนำพิจารณาร่วมกับความถี่ภายนอกที่ป้อนให้กับตัวเพียโซที่ 300 mV จะได้แรงดันเอาท์พุทที่ป้อนให้กับตัวเพียโซคือ 3 V นำแรงดันนี้มาคำนวณหาค่าระยะทางจะมีค่าเท่ากับ 0.09 μm

5. สรุป

จากการทำงานของระบบเป็นการนำการแทรกสอดของแสงแบบไมเคิลสัน อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Michelson Interferometer) มาทำงานร่วมกับแบบแมค-เซนเดอร์ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Mach-Zehnder Interferometer) ซึ่งความสำเร็จของระบบที่นำเสนอขึ้นในการแยกสัญญาณ โดยไม่อาศัยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Subtraction) คือการนำฮาวเฟลเพลท 2 ตัว มาเป็นตัวทำให้สัญญาณแสงมีการแยกและรวมกันที่มุม 22.5 องศาได้ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์มาทำหน้าที่นี้อีก ซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนในระบบนี้ลดลงได้

จากผลการทดลองพบว่าระยะทางที่วัดได้จากการขยายตัวสูงสุดของตัวเพียโซ (0.13 μm) มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้จากคุณสมบัติเฉพาะของตัวเพียโซ (0.09 μm) และจากรูปที่ 4 เราพบว่าความละเอียดที่ระบบนี้สามารถวัดได้อยู่ที่ 0.02 μm หรือ 20 nm

เมื่อเราแทนที่ตัวเพียโซด้วยวัตถุอื่นที่ต้องการวัดค่าระยะทางของการเคลื่อนที่ซึ่งต้องอยู่ในระดับไมโครหรือนาโนเมตร ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน ระบบนี้จึงเป็นการนำเสนอวิธีการสร้างระบบการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือ เลเซอร์คอปเปิลอร์ไวโบริมิเตอร์แบบง่าย ๆ แต่มีความละเอียดสูงและสามารถนำไปใช้งานจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์จากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ร่วมกับ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.K.Teng, C.Chou, C.N.Chang and H.T.Wu, "Application of phase-to-amplitude conversion technique to linear birefringence measurements," Applied Optics, Vol.42, No.10, pp.1798-1804, 2003.
- [2] H.K.Teng C.Chou, C.C.Tsai and L.P.Yu, "Balanced detector Interferometric ellipsometer," Optical Society of America, Vol.23, No.11, pp.2871-2879, 2006.
- [3] H.K.Teng and K.C.Lang, "Heterodyne interferometer for displacement measurement with amplitude quadrature and noise suppression," Optics Communications, Vol.280, pp.16-22, 2007.
- [4] H.K.Teng and K.C.Lang,, "Excess noise reduction by optical technique in amplitude-sensitive heterodyne interferometer for small differential phase detection," Applied Optics, Vol.47, No.36, pp.6860-6870, 2008.
- [5] J.La, H.Choi and K.Park, "Heterodyne laser Doppler vibrometer using a Zeeman-stabilized He-Ne laser with a one-short frequency to voltage converter," American Institute of Physics, Vol.76, pp.025112-1 – 025112-7, 2005.
- [6] H.Choi, J.La and K.Park, "Electronic frequency modulation for the increase of maximum measurable velocity in a heterodyne laser interferometer," American Institute of Physics, Vol.77, pp.106102-1 – 106102-3, 2006.
- [7] J.La, S.Wang, K.Kim and K.Park, "High-speed FM demodulator of homodyne laser interferometer for measuring mechanical vibration," Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol.43, No.6, pp.1341-1349, 2004.
- [8] J.La, S.Kang, H.Yoon and K.Park, "A synthetic heterodyne interferometer for small amplitude of vibration measurement," American Institute of Physics, Vol.79, pp.053106-1 – 053106-6, 2008.
- [9] Thorlabs Operating Manual, "MDT693A/MDT694A Piezo Controller", Doc12534 - D02 Rev E, 2010.
- [10] Dennis Goldstein, "Polarized Light," Air Force Research Laboratory, Eglin Air Force Base, Florida, U.S.A., Second Edition, 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนสาธิตให้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้