

Lock-in Amplification

1 บทนำ

เทคนิคการวัดแบบล็อกอิน (Lock-in Detection Technique) เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือการวัดที่มีอัตราส่วนสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) สูง เราเรียกเครื่องมือที่ใช้วัดสัญญาณแบบล็อกอินว่า เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-in Amplifier)

2 วัตถุประสงค์

การทดลองนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาพื้นฐานของเทคนิค Lock-in Detection และ การทำงานของ Lock-in Amplifier
2. เพื่อศึกษาตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Lock-in Amplifier

3 เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

อิเล็กทรอนิกส์, วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

4 ทฤษฎีและหลักการที่จำเป็น

เทคนิคการวัดแบบล็อกอิน อาศัยเทคนิคการวัดที่เรียกว่า การวัดแบบไวต่อเฟส (phase-sensitive detection) ซึ่งเป็นหลักการที่ทำการเลือกวัดเฉพาะ องค์ประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณอ้างอิง (reference signal) องค์ประกอบของสัญญาณส่วนอื่นที่มีความถี่ต่างไป ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวน (noise) จะถูกรองออกไป

เทคนิคการวัดแบบไวต่อเฟสนั้น อาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ คือ ออธอกอนัลลิตี (orthogonality) ของฟังก์ชัน sine และ cosine ดังนี้

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(mx) \sin(nx) dx = \frac{1}{2} \delta_{mn} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(mx) \cos(nx) dx = \frac{1}{2} \delta_{mn} \quad (2)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(mx) \cos(nx) dx = 0 \quad (3)$$

เมื่อ δ_{mn} คือ Kronecker delta มีค่าเท่ากับ 1 ในกรณี $m = n$ หรือ เท่ากับ 0 ในกรณี $m \neq n$

ถ้าสัญญาณ $V_{in}(t)$ ที่เรานำเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินนั้น ประกอบไปด้วยสัญญาณที่เราต้องการวัด

$$V_{sig}(t) = V_{sig}^0 \sin(2\pi ft + \theta) \quad (4)$$

ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความถี่ f เช่นเดียวกับสัญญาณอ้างอิง

$$V_{ref}(t) = V_{ref}^0 \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

แต่มีเฟสต่างจากสัญญาณอ้างอิงอยู่ θ และมีสัญญาณรบกวนที่มีความถี่อื่นๆ f' นั่นคือ

$$V_{in}(t) = V_{sig} \sin(2\pi ft + \theta) + \sum_{f'} a_{f'} \cos(2\pi f't) + b_{f'} \sin(2\pi f't) \quad (6)$$

หรือ

$$V_{in}(t) = V_{sig} \cos \theta \sin(2\pi ft) + V_{sig} \sin \theta \cos(2\pi ft) + \sum_{f'} a_{f'} \cos(2\pi f't) + b_{f'} \sin(2\pi f't) \quad (7)$$

วงจรในเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินนั้นจะทำการคูณ $V_{in}(t)$ เข้ากับ V_{ref} และทำการอินทิเกรตครอบคลุมช่วงเวลาหนึ่ง (โดยปกติในระดับ มิลลิวินาที ถึง วินาที) และได้สัญญาณขาออกเป็น

$$V_{out}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_{in}(t') V_{ref}(t') dt' = V_{sig}^0 \cos \theta \quad (8)$$

โดยใช้คุณสมบัติ (1) - (3)

สำหรับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินโดยทั่วไปจะสามารถปรับความต่างเฟส θ ระหว่างสัญญาณที่ต้องการวัดกับสัญญาณอ้างอิงให้เป็นศูนย์ ซึ่งทำให้

$$V_{out}(t) = V_{sig}^0 \quad (9)$$

สำหรับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินบางรุ่น (รวมทั้ง ใช้ DSP Lock-in Amplifier Model SR830 ของ Stanford Research Systems ที่ใช้ในการทดลองนี้) จะเป็นเครื่องขยายสัญญาณแบบเฟสคู่ ซึ่งมีการใช้สัญญาณอ้างอิงที่ปรับเฟสไป 90° กลายเป็น

$$V'_{ref}(t) = V_{ref}^0 \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{2}) = V_{ref}^0 \cos(2\pi ft) \quad (10)$$

ทำให้เราวัดสัญญาณ $V_{sig}(t)$ ได้ทั้งสององค์ประกอบคือ องค์ประกอบอินเฟส (in-phase component) $X(t) = V_{sig}^0 \cos \theta$ และ องค์ประกอบควอดราเจอร์ (quadrature component) $Y(t) = V_{sig}^0 \sin \theta$ โดยที่

$$X(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_{in}(t') V_{ref}^0 \sin(2\pi ft') dt' = V_{sig}^0 \cos \theta \quad (11)$$

$$Y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t V_{in}(t') V_{ref}^0 \cos(2\pi ft') dt' = V_{sig}^0 \sin \theta \quad (12)$$

โดยที่เราสามารถคำนวณแอมพลิจูดของสัญญาณได้จาก

$$R(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} = V_{sig}^0 \quad (13)$$

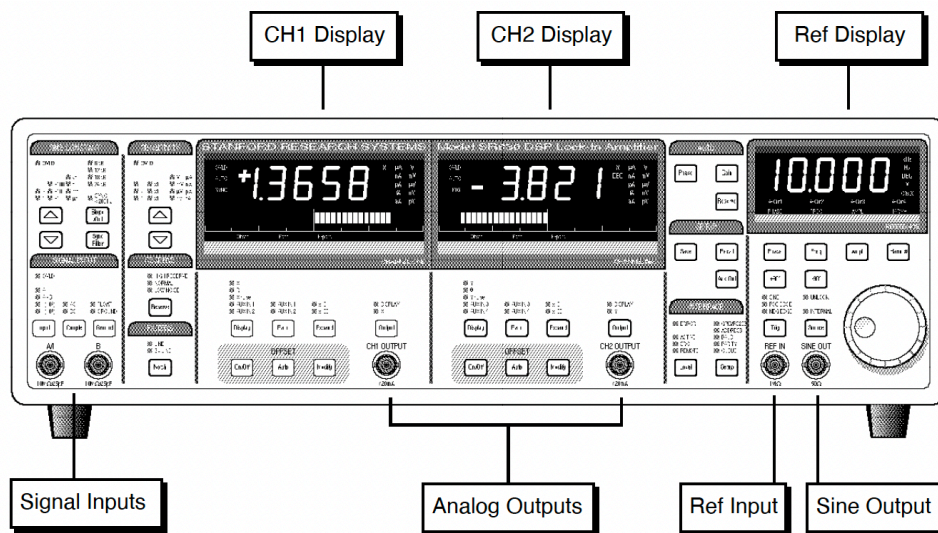
และ คำนวณความต่างเฟสของสัญญาณที่ต้องการวัดกับสัญญาณอ้างอิงได้จาก

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \quad (14)$$

โดยที่เครื่อง DSP Lock-in Amplifier Model SR830 นั้น สามารถแสดงผล Output ได้ทั้ง $X(t)$, $Y(t)$, $R(t)$ และ $\theta(t)$

5 การทดลอง

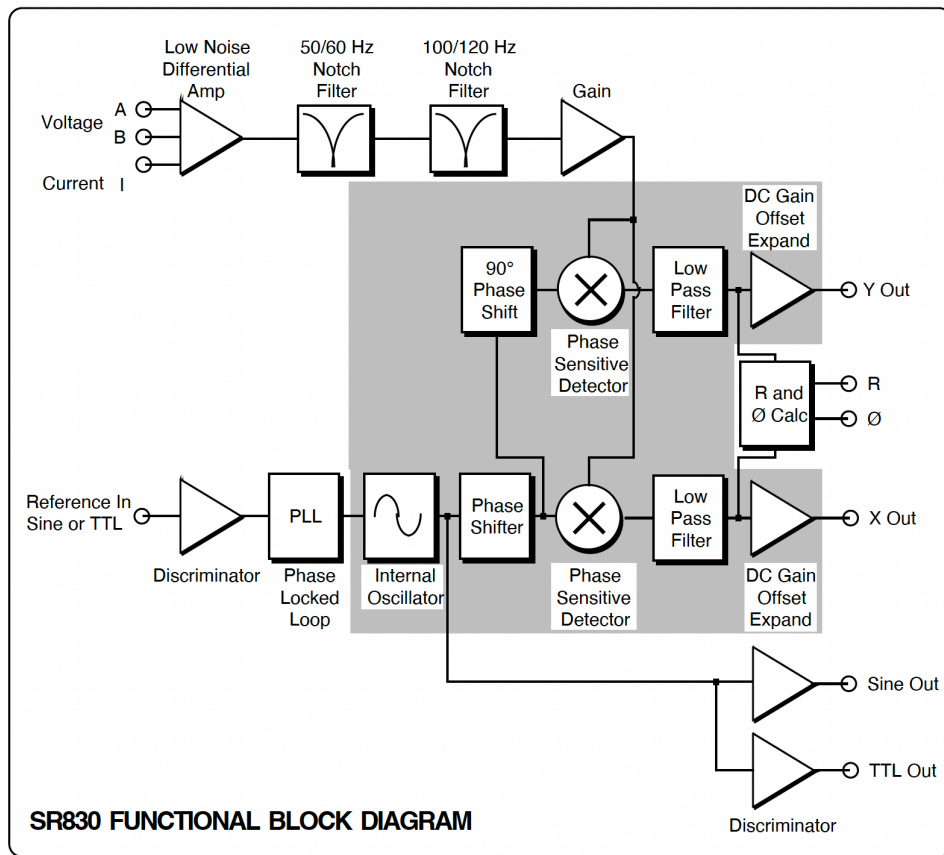
ในการทดลองนี้จะใช้ DSP Lock-in Amplifier Model SR830 ของ Stanford Research Systems ซึ่งมีแผงด้านหน้าแสดงในรูปที่ (1) และ แผนภาพการทำงานแสดงในรูปที่ (2)



รูปที่ 1: ด้านหน้าของ DSP Lock-in Amplifier Model SR830

5.1 ตอนที่ 1 ศึกษาการทำงานของ SR830 DSP Lock-In Amplifier

- อุปกรณ์: SR830 DSP Lock-In Amplifier, Oscilloscope, Co-axial cables with BNC terminators (สาย BNC), BNC junctions (ข้อต่อเชื่อมสัญญาณ)
- วัตถุประสงค์
 - เพื่อทำความคุ้นเคยกับอุปกรณ์ SR830 DSP Lock-In Amplifier
 - เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Lock-In Amplifier
- การทดลอง
 - นำสัญญาณคลื่นความต่างศักย์รูป sine ที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดภายในของ SR830 ไปใช้เป็น input ของเครื่อง SR830 นี้



รูปที่ 2: แผนภาพการทำงานของ DSP Lock-in Amplifier Model SR830

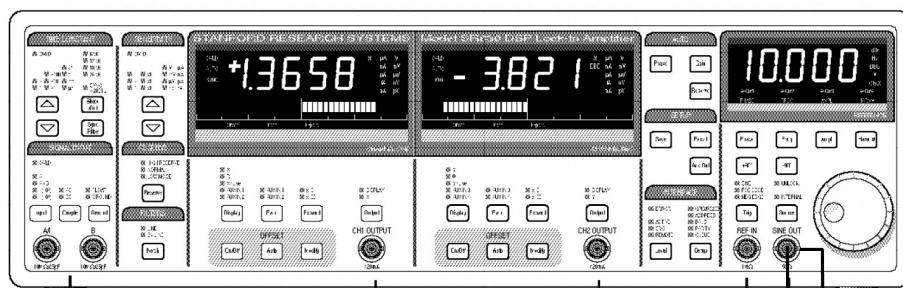
- เครื่อง SR830 จะนำสัญญาณ sine นี้ไปใช้เป็น reference โดยอัตโนมัติ
 - ลองพิจารณาว่าค่า output ของเครื่อง SR830 ควรมีค่าเท่าใด และตรวจสอบกับค่าจริงที่ได้
 - ค่าที่วัดได้นี้ ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณที่ใช้หรือไม่
 - ขั้นตอนการทดลอง
 - ทำการทดลองตามขั้นตอนในตารางด้านล่าง ซึ่งในตารางนี้
 - แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ คอลัมน์ซ้ายมือ เป็นขั้นตอนการทดลอง ส่วนคอลัมน์ขวามือเป็นคำอธิบาย
- Keys หมายถึงปุ่มที่อยู่ด้านหน้าของ SR830 ที่มีคำว่า “Keys” กำกับอยู่ เช่น [Setup], [Phase], [Freq]
- Knob เป็นลูกบิด ใช้สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงใน Ref Display

ขั้นตอนการทดลอง	คำอธิบาย
1. ถอดสายสัญญาณทุกเส้นออกจาก Lock-in และ กด [Setup] ค้างไว้พร้อมกับเปิดสวิตช์ Power On ด้านหลังเครื่อง รอจนกระทั่งเครื่องทำการทดสอบสถานะเริ่มต้นเสร็จ	<ul style="list-style-type: none"> เมื่อเครื่อง SR830 ถูกเปิดขึ้นพร้อมกับการกดปุ่ม [Setup] เครื่องจะทำการตั้งค่าต่างๆตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ จอภาพ Channel 1 จะแสดงค่า X ส่วน Channel 2 จะแสดงค่า Y ซึ่งทั้งคู่ควรจะเป็น 0.0000 ตอนเริ่มต้นนี้
2. กด [Chanel 1 Display] เพื่อเลือก R และ กด [Chanel 2 Display] เพื่อเลือก θ	<ul style="list-style-type: none"> จอภาพ Channel 1 จะแสดงค่า R ส่วน Channel 2 จะแสดงค่า θ ซึ่งทั้งคู่ควรจะเป็น 0.0000 ตอนเริ่มต้นนี้
3. ต่อสาย BNC ฝั่งหนึ่ง เข้ากับ SINE OUT ส่วนอีกฝั่งหนึ่ง ต่อกับข้อต่อเชื่อมสัญญาณ เพื่อแบ่งสัญญาณส่วนหนึ่งเชื่อมต่อกับ Input A และอีกส่วนเชื่อมต่อกับ CH1 ของ Oscilloscope กด [Freq] หรือ [Ampl] ได้ Ref Display เพื่อเลือกดูค่าความถี่หรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่สร้าง	<ul style="list-style-type: none"> สัญญาณที่สังเกตได้ใน Oscilloscope คือ สิ่งที่เป็น input ของ SR830 สังเกต ค่า X, Y, R, θ ซึ่ง สามารถ เลือก ดู ได้ จาก จอภาพ Channel 1 และ 2 ของ SR830 เทียบค่าความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณที่แสดงใน Ref Display ของ SR830 กับค่าที่ได้จาก Oscilloscope หาคำตอบว่า ค่าขนาดของสัญญาณต่างๆที่แสดงใน SR830 DSP Lock-In Amplifier นั้นเป็นค่าชนิดใด (half-of-peak-to-peak amplitude หรือ peak-to-peak หรือ rms)
4. กด [Freq] ได้ Ref Display และหมุน Knob เพื่อเปลี่ยนค่าความถี่ เช่นเพิ่มความถี่จนถึง 30 kHz	<ul style="list-style-type: none"> ค่า X, Y, R, θ ขึ้นกับความถี่อย่างไร

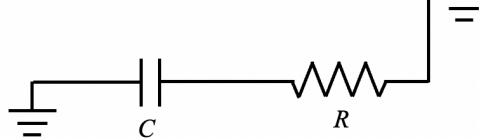
ตารางที่ 1: ศึกษาการทำงานของ SR830 DSP Lock-In Amplifier

5.2 ตอนที่ 2 การประยุกต์วัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ

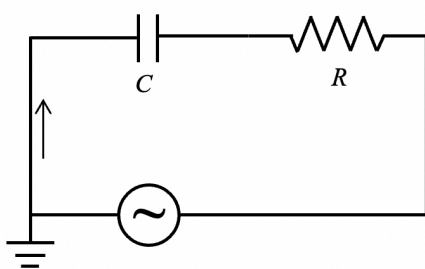
- อุปกรณ์: SR830 DSP Lock-In Amplifier, Oscilloscope, Co-axial cables with BNC terminators, BNC junctions, known resistor R ($47\ \Omega$), unknown capacitor C
- เราจะประยุกต์ใช้คุณสมบัติ phase-sensitive detection ของ Lock-in Amplifier ในการทดลองนี้
- เราควรรู้ว่าสายสัญญาณที่ใช้ (Co-axial cables with BNC terminators) เป็นสายที่แกนกลางเป็นสายสัญญาณ (signal) และขอบรอบนอกเป็นกราวด์ (ground)



(a)



(b)



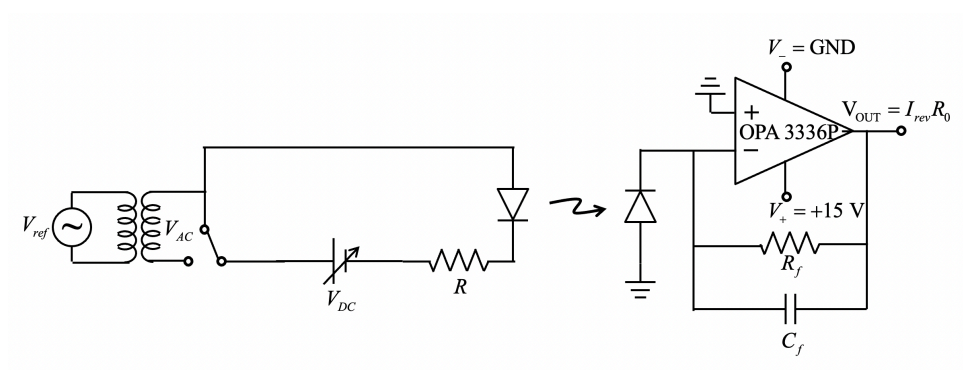
(c)

รูปที่ 3: การใช้ internal oscillator ของ SR830 DSP Lock-In Amplifier เป็นแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ และต่ออนุกรมกับ R และ C : (a) การต่อวงจร, (b) วงจรสมมูล, (c) phasor diagram

- ถอดสายสัญญาณทุกเส้นออกจาก SR830 DSP Lock-In Amplifier และ ทำการ Reset ตามวิธีที่ได้ศึกษามาในตอนที่ 1

2. ใช้ internal oscillator ของ SR830 DSP Lock-In Amplifier เป็นแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ และต่ออนุกรมกับ R และ C ดังแสดงในรูปที่ 3 (a)
3. ใช้ความต่างศักย์คร่อม C เป็น input ของ Lock-In Amplifier
4. จากวงจรสมมูล และ phasor diagram ของวงจร ในรูปที่ 3 (b) และ (c) พิจารณาว่า X, Y, R, θ และ Sine Out ของ Lock-In Amplifier คือปริมาณใดใน phasor diagram
5. จาก phasor diagram จงหาว่าเฟสที่แตกต่างกันของ V_C และ V_{RC} ขึ้นกับความถี่อย่างไร
6. ออกแบบและดำเนินการทดลองเพื่อหาค่า C

5.3 ตอนที่ 3 การใช้ Lock-In detection technique ในการวัดสัญญาณที่มี noise มาก



รูปที่ 4: การใช้ internal oscillator ของ SR830 DSP Lock-In Amplifier ในการมอดูเลตสัญญาณแสงจากไดโอดเปล่งแสง (ซ้าย) และ การวัดความเข้มแสงโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงต่อแบบบริเวอร์สไบแอส (ขวา)

- วัตถุประสงค์: เพื่อศึกษาวิธีการมอดูเลตสัญญาณ เพื่อใช้ Lock-in detection technique ในการวัดสัญญาณที่มี noise มาก
- อุปกรณ์: SR830 DSP Lock-In Amplifier, LED circuit with AC bias modulator, LED reversed-bias circuit, multimeter, oscilloscope, Co-axial cables with BNC terminators, BNC junctions
- ในการทดลองนี้ เราจะใช้ไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งต่อแบบบริเวอร์สไบแอส (รูปที่ 4 ด้านขวา) ในการวัดความเข้มของแสงซึ่งมาจาก LED อีกตัวหนึ่ง (รูปที่ 4 ด้านซ้าย) โดยผ่านแผ่นลดทอนแสงก่อนถูกวัด

การวัดโดยใช้ multimeter

- ต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับวงจรวัดความเข้มแสง (+5V) และวัดความต่างศักย์ของ output ของวงจรวัด ความเข้มแสง โดยใช้ multimeter เราจะพบว่า มีความต่างศักย์ที่ไม่เป็นศูนย์อยู่ ถึงแม้ว่าเรายังไม่ได้ จ่ายไฟเข้ากับ

แหล่งกำเนิดแสง (LED) เลย ความต่างศักย์นี้ เรียกว่า offset-voltage ให้บันทึกค่านี้ไว้

- ต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับเข้า LED ไว้ที่ประมาณ 2.0 V ให้สังเกตว่า ความต่างศักย์ที่ output ของวงจรวัด ความเข้มแสงนั้น เพิ่มขึ้นกี่ mV
- ความเข้มของแสงที่วัดได้
 - (ประมาณว่า) แปรผันโดยตรงกับ กระแส I_{rev} ที่เกิดขึ้นจาก LED ตัวรับแสง
 - แปรผันโดยตรงกับ V_{out} ที่เพิ่มขึ้นจาก offset-voltage
- ในตอนนี้ให้ใส่แผ่นลดทอนแสงทีละแผ่น และวัดค่าความต่างศักย์ไปด้วย เมื่อความหนา (จำนวน) ของแผ่น ลดทอนแสงเพื่อขึ้นถึงระดับหนึ่ง ความเข้มของแสงที่มาถึง LED ตัวรับแสงจะลดลงจน V_{OUT} ที่วัดได้มีขนาดพอๆ กับสัญญาณรบกวน (noise) กล่าวคือ เราไม่สามารถที่จะบอกด้วย multimeter แล้วว่า เรา ได้ใส่แผ่นลดทอนแสงเพิ่มขึ้นไปจากเดิม วาดกราฟระหว่าง V_{OUT} และจำนวนแผ่นลดทอน และให้บอกว่า จำนวนแผ่นลดทอนเป็นเท่าไร เราเริ่มจะแยกสัญญาณจาก multimeter ไม่ได้แล้ว

การวัดโดยใช้ Lock-In Amplifier

- ใช้ internal oscillator ของ SR830 DSP Lock-In Amplifier เป็นแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อ เพิ่ม V_{AC} เข้ากับ V_{DC} โดยใช้หม้อแปลงเพื่อมอดูเลตความต่างศักย์คร่อม LED ส่งผลให้แสงที่ออกมา จาก LED ถูกมอดูเลตด้วยความถี่เดียวกับ V_{ref} Lock-In Amplifier
- สำหรับ output ของวงจรวัดความเข้มแสง ให้เปลี่ยนจาก multimeter เป็น input ของ Lock-In Amplifier
- ใช้ V_{OUT} จากการมอดูเลตที่เหมาะสมเป็น input ของ Lock-In Amplifier จะได้ว่า output ของ Lock-In Amplifier (ตัวไหน? X, Y, R หรือ θ ?) จะประมาณได้ว่าแปรผันโดยตรงกับความเข้มของแสงที่มาถึง LED ตัวรับแสง
- ศึกษาว่า การมอดูเลตสัญญาณและการวัดด้วย Lock-In Detection Technique สามารถขยายขอบเขต ของการวัดสัญญาณซึ่งมีสัญญาณรบกวน

มาก ได้ดีเพียงพอโดยทำการทดลองที่คล้ายกับในตอนที่แล้วที่ใช้ multi-meter หลังจากวาดกราฟแล้ว ให้บอกว่า จำนวนแผ่นลวดทองเป็นเท่าไร เราเริ่มจะแยกสัญญาณ จาก Lock-In Amplifier ไม่ได้แล้ว

6 การเขียนรายงานผลการทดลอง

- ให้รายงานเฉพาะผลของการทำปฏิบัติการตอนที่ 2 และ ตอนที่ 3