

การออกแบบวงจรวัดความถี่กำลัง  
และความต้านทานของผลึกควอตซ์โดยวิธีกวาดความถี่

นายสายชล ส่องเจิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DESIGN OF CIRCUIT FOR MEASURING QUARTZ RESONANCE FREQUENCY  
AND RESISTANCE USING FREQUENCY SWEEPING TECHNIQUE

Mr. Saichon Songjerm

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบวงจรวัดความถี่กำลัง และความต้านทาน  
ของผลึกควอตซ์โดยวิธีกวาดความถี่

โดย

นายสายชล ส่งเจิม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์



คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์)

.....กรรมการนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ พรหมมี)

สายชล ส่งเจิม : การออกแบบวงจรวัดความถี่กำลัง และความต้านทานของผลึกควอตซ์โดยวิธีกวาดความถี่. (Design of Circuit for Measuring for Quartz Crystal Resonance Frequency and Resistance Using Frequency Sweeping Technique) อ.ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เอกชัย ลีลาวัศม์, 61 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอเทคนิคการวัดความถี่กำลังแบบอนุกรม และค่าความต้านทานของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ระดับ MHz ซึ่งอาศัยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ทุกๆความถี่ในช่วงของการกวาดความถี่จนกระทั่งวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดได้ ซึ่งเทคนิคนี้สามารถหาค่าความถี่กำลังที่มีความแม่นยำมากกว่าการใช้วงจรเกตออสซิลเลเตอร์ที่ให้กำเนิดความถี่กำลังแบบขนาน องค์ประกอบหลักของวงจรคือวงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์บริสุทธิ์ และมีความแม่นยำสูงถึง 1Hz โดยการใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่โดยตรง (Direct Digital Frequency Synthesizer) ซึ่งแต่ละความถี่จะวัดแรงดันตกคร่อม และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์ก่อนแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล และส่งให้คอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยการใช้วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลที่มีความเร็วต่ำทำการแซมปลิงสัญญาณแรงดัน และกระแสแบบ Under sample และนำข้อมูลที่ได้ไปทำการ Fitting Data แบบ Sinusoidal เพื่อหาค่ายอดของสัญญาณแรงดัน และกระแส เพื่อลดเวลาและจำนวนครั้งของการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด จึงใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากการกวาดความถี่จำนวน 4 ค่ามาทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) แบบ Cubic Spline เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และใช้วิธีเดียวกันนี้ในการหาค่าความถี่กำลังแบบอนุกรมของผลึกควอตซ์ การทดลองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถหาค่าความถี่กำลังแบบอนุกรมของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 5MHz ที่มีความแม่นยำถึง 1Hz ดังนั้นเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถนำมาใช้งานได้กับ Quartz Crystal Microbalance (QCM) สำหรับการวัดมวลขนาดเล็กที่อยู่บนผิวของผลึกควอตซ์ด้วยการวัดค่าความต่างของความถี่กำลังแบบอนุกรม

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556

# # 5470413821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: QUARTZ CRYSTAL, INTERPOLATION, MASS DETECTION SYSTEM, FREQUENCY SWEEPING

SAICHON SONGJERM : DESIGN OF CIRCUIT FOR MEASURING QUARTZ RESONANCE FREQUENCY AND RESISTANCE USING FREQUENCY SWEEPING TECHNIQUE

ADVISOR : ASSOC PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 61 pp.

This thesis presents a circuit technique for measuring the series resonance frequency in the order of a few MHz of a quartz crystal and its series resistance. It relies directly on measuring the quartz impedance at each frequency and sweeping the frequency until the minimum impedance is reached. This technique can determine the series resonance frequency with precision better than using the crystal in a gate oscillator which oscillates at the parallel resonance frequency. The main component of the developed circuit is a signal generator capable of producing a pure sinusoidal voltage with very high precision of 1 Hz using direct digital frequency synthesizer. At each frequency both voltage across and current through the quartz are digitized and the data sent to a personal computer for impedance calculation. Since only the amplitudes are needed, a low speed analog to digital converter is employed to under sample the two signals and sinusoidal data fitting scheme is used to calculate the amplitudes. To reduce the operation time, only a few frequencies are used in the impedance measurement. The minimum impedance can be calculated by applying 4 points cubic spline interpolation. Using the same measurement, the series resistance of the quartz can also be calculated. This experimental circuit is capable of finding the series resonance frequency of a 5MHz quartz with 1 Hz accuracy. Thus the presented technique can be used in a quartz crystal microbalance which measures small mass by putting it on its surface and measuring the change in its series resonance frequency.

Department : Electrical Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year : 2013.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดี ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศมี ที่ให้คำปรึกษา สนับสนุนและกระตุ้นให้เกิดแรงบันดาลใจในการทำงานวิจัย ตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการความรู้ ตลอดจนอบรมป้อนิษฐ์ มาทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้ความสามารถเพียงพอที่จะทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และประโยชน์อื่น แม้เพียงเล็กน้อยในสังคมได้

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้อง ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดี ทำให้การทำวิทยานิพนธ์เป็นไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณความไม่แน่นอน ที่บันดาลให้ทุกสิ่งทุกอย่างเกิดขึ้น

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ .....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6. ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย .....	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1. ผลึกควอทซ์ .....	5
2.1.1. โครงสร้างผลึกควอทซ์.....	5
2.1.2. ชนิดของผลึกควอทซ์.....	6
2.1.3. โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์.....	7
2.1.4. คุณสมบัติ .....	7
2.2. ผลึกควอทซ์ชนิด AT cut.....	8
2.2.1. วงจรสมมูลของผลึกควอทซ์ชนิด AT cut .....	9
2.3. ผลตอบสนองค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ต่อความถี่.....	10

2.4.	การใช้ผลึกควอทซ์เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดมวลที่มีขนาดเล็ก และของเหลวเหลว.....	12
2.4.1.	การใช้ผลึกควอทซ์ไปวัดน้ำหนักมวลขนาดเล็ก.....	12
2.4.2.	การหาค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวด้วยผลึกควอทซ์.....	13
2.4.3.	ผลของไหลดบนผิวของผลึกควอทซ์ที่มีผลต่อวงจรสมมูลของผลึกควอทซ์....	14
2.5.	ระบบการวัดความถี่กำลังที่ใช้ผลึกควอทซ์แบบต่างๆ.....	15
2.5.1.	ระบบวัดความถี่กำลังด้วยวิธีใช้ผลึกควอทซ์เป็นตัวกำเนิดความถี่.....	15
2.5.2.	ระบบวัดความถี่กำลังโดยการวัดผลต่างระหว่างเฟสของกระแส และเฟสของแรงดัน.....	16
2.5.3.	ระบบวัดความถี่กำลังโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอทซ์.....	17
2.6.	ผลการวัดความถี่กำลังของผลึกควอทซ์ด้วยระบบวัดแบบต่างๆ.....	18
2.6.1.	การหาค่าผลต่างของความถี่กำลัง ( $\Delta f$ ).....	18
2.6.2.	การใช้ค่า $\Delta f$ ไปคำนวณหาน้ำหนักของไหล.....	21
2.6.3.	การใช้ค่า $\Delta f$ ไปคำนวณหาความหนืดและความหนาแน่นของของเหลว.....	23
2.7.	วงจรกำเนิดสัญญาณกวาดความถี่ได้อย่างละเอียด.....	25
2.8.	การประมาณค่าในช่วง(Interpolation) แบบ Cubic Spline.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....		31
3.1.	โครงสร้างโดยรวมของระบบวัด.....	31
3.2.	วงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์.....	32
3.3.	การวัดกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์.....	34
3.4.	วิธีหาค่ายอดของสัญญาณ.....	37
3.4.1.	การ Fitting Curve ข้อมูลจากวงจร ADC เพื่อหาค่ายอดของสัญญาณแรงดันและกระแส.....	38
3.5.	การทำการประมาณค่าในช่วงสัญญาณเพื่อหาค่าความถี่กำลัง.....	39
บทที่ 4 การทดลอง.....		41
4.1.	การทดลองหาความถี่กำลังด้วยวิธีกวาดความถี่แบบตรง.....	41



4.2.	วิธีการทดลองแบบการประมาณค่าในช่วง.....	42
4.3.	วิธีการทดลองแบบการประมาณค่าในช่วงที่ขึ้นการกวาดความถี่ต่างกัน .....	43
4.4.	สรุปผลการทดลอง .....	50
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....		52
5.1.	สรุปผล.....	52
5.2.	ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อ .....	53
5.2.1.	การนำโครงสร้างวงจรไปพัฒนาต่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลของ ผลึกควอตซ์ .....	53
5.2.2.	ตัวอย่างการหาค่าพารามิเตอร์.....	56
รายการอ้างอิง.....		60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....		61

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ต่างๆ .....	10
ตารางที่ 2-2 ค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 10MHz .....	18
ตารางที่ 2-3 ค่าความถี่กําหนดแบบต่างๆที่ได้จากการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ L ในวงจรสมมูล.....	19
ตารางที่ 2-4 ผลการคํานวณค่า $\Delta m$ ที่ได้จากค่า $\Delta f$ ของความถี่กําหนดแบบต่างๆ.....	22
ตารางที่ 2-5 ผลการคํานวณค่า $(\rho_L \eta_L)^{1/2}$ ที่ได้จากค่า $\Delta f$ ของความถี่กําหนดแบบต่างๆ.....	23
ตารางที่ 4-1 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 1,000 Hz.....	44
ตารางที่ 4-2 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 500 Hz.....	45
ตารางที่ 4-3 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 100 Hz.....	46
ตารางที่ 4-4 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 10 Hz.....	48
ตารางที่ 4-5 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 5 Hz.....	49
ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบผลการทดลองหาค่าความถี่กําหนดด้วยวิธีกวาดความถี่แบบตรง และการ ประมาณค่าในช่วง .....	50
ตารางที่ 5-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลชนิด AT cut ความถี่ 10MHz .....	56
ตารางที่ 5-2 ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ที่วัดได้จากคสามถี่ต่างๆ 4 ความถี่ .....	56
ตารางที่ 5-3 คำตอบที่ได้จากการแก้สมการสองตัวแปร .....	58
ตารางที่ 5-4 ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ .....	59

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 ผลึกควอทซ์ ก). ผลึกควอทซ์ในธรรมชาติ และ ข). ผลึกควอทซ์ที่ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ .....	5
รูปที่ 2-2 ลักษณะการตัดแฉกของผลึกควอทซ์ .....	6
รูปที่ 2-3 โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์.....	7
รูปที่ 2-4 อุณหภูมิการใช้งานของผลึกควอทซ์แต่ละชนิด .....	8
รูปที่ 2-5 โครงสร้างผลึกควอทซ์ชนิด AT cut .....	9
รูปที่ 2-6 วงจรสมมูลของผลึกควอทซ์.....	9
รูปที่ 2-7 ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ต่างๆของความถี่ก้ำจร .....	11
รูปที่ 2-8 ผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์เมื่อไม่มีโหลด (Unloaded) และมีโหลด (Loaded) .....	12
รูปที่ 2-9 ผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์เมื่อมี และไม่มีของเหลวบนผิวผลึกควอทซ์ ...	13
รูปที่ 2-10 วงจรสมมูลของผลึกควอทซ์ที่รวมผลของโหลดประเภทต่างๆ .....	15
รูปที่ 2-11 วงจรเกตออสซิลเลเตอร์ .....	16
รูปที่ 2-12 การหาความถี่ก้ำจรด้วยการวัดเฟสของกระแส และแรงดันของผลึกควอทซ์ที่ 0°.....	17
รูปที่ 2-13 การหาความถี่ก้ำจรด้วยวิธีหาอิมพีแดนซ์ต่ำสุด .....	18
รูปที่ 2-14 การหาค่า $\Delta f$ ด้วยความถี่ก้ำจรแบบต่างๆ .....	20
รูปที่ 2-15 เปรียบเทียบค่า $\Delta f$ ด้วยความถี่ก้ำจรแบบต่างๆ .....	20
รูปที่ 2-16 เปรียบเทียบค่า $\Delta m$ ด้วยความถี่ก้ำจรแบบต่างๆ .....	23
รูปที่ 2-17 เปรียบเทียบค่า $(\rho_L \eta_L)^{1/2}$ ด้วยความถี่ก้ำจรแบบต่างๆ .....	24
รูปที่ 2-18 โครงสร้างวงจร DDS.....	25
รูปที่ 2-19 ลักษณะเอาต์พุตของ Phase Accumulator ที่มีค่า W=3.....	26
รูปที่ 2-20 การประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันด้วยพหุนามดีกรี 3 ในแต่ละช่วง.....	28
รูปที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัด.....	31
รูปที่ 3-2 โครงสร้างภายในของ AD9835 .....	33
รูปที่ 3-3 วงจรสำหรับวัดกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ด้วยการต่อ $R_L$ อนุกรมกับผลึกควอทซ์ ....	35

รูปที่ 3-4 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ค่าความต้านทานจริง (R) และค่าความต้านทานเชิงจินตภาพ (X) ที่ความถี่  $f_s$ ..... 36

รูปที่ 3-5 การใช้ความถี่ในการชักตัวอย่างของวงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ ..... 37

รูปที่ 3-6 การชักตัวอย่างสัญญาณของวงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ..... 38

รูปที่ 3-7 การทำการ Fitting Curve ข้อมูลดิจิตอลให้เป็นฟังก์ชันรูปไซน์ ..... 39

รูปที่ 3-8 การทำการประมาณค่าในช่วงหาค่าความถี่  $f_s$  โดยการหาจุดต่ำสุดของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ ด้วยข้อมูลกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์ ..... 40

รูปที่ 4-1 การทดลองทำการกวาดความถี่เพื่อหาค่าความถี่ก้ำกัร ..... 41

รูปที่ 4-2 โพลชาร์ตการทำงานของกรกวาดความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ..... 43

รูปที่ 4-3 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำกัรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 1,000 Hz ..... 44

รูปที่ 4-4 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำกัรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 500 Hz 45

รูปที่ 4-5 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำกัรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 100 Hz 47

รูปที่ 4-6 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำกัรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz.. 48

รูปที่ 4-7 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำกัรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 5 Hz.... 49

รูปที่ 5-1 วงจรสมมูลของผลึกควอตซ์..... 53

รูปที่ 5-2 ความถี่ก้ำกัรแบบอนุกรม และขนานของผลึกควอตซ์..... 55

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

ในงานด้านชีวะศาสตร์ หรือเคมีวิทยาศาสตร์ที่มีการทดลองเกี่ยวกับการวัดน้ำหนักของมวลที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งในการวัดน้ำหนักของมวลที่มีขนาดเล็กมากๆนั้น ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือแบบปกติทั่วๆไปได้ จึงได้มีการนำผลึกควอทซ์มาใช้สำหรับวัดค่าน้ำหนักของมวลด้วยวิธีการวัดความถี่ก่ารของผลึกควอทซ์ โดยที่ความถี่ก่ารของผลึกควอทซ์จะมีความสัมพันธ์กับมวลบนผิวของผลึกควอทซ์ และภายหลังก็ได้มีการพัฒนาระบบการวัดให้สามารถนำผลึกควอทซ์ไปใช้วัดไหลตบนผลึกควอทซ์ให้มีหลากหลายสถานะมากยิ่งขึ้นเช่น ไหลตที่เป็นสถานะของเหลว และก๊าซ เป็นต้น

ที่ผ่านมาได้มีการนำผลึกควอทซ์ไปใช้ในการวัดพารามิเตอร์ของไหลตบนผิวผลึกควอทซ์ด้วยกันหลายวิธีด้วยกันเช่น การวัดความถี่ของผลึกควอทซ์ด้วยการใช้ผลึกควอทซ์เป็นตัวกำเนิดความถี่ของวงจรถ่ายกำเนิดความถี่ การวัดความถี่ก่ารด้วยการวัดเฟส  $0^\circ$  ของแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ และสุดท้ายคือการวัดความถี่ก่ารด้วยการวัดคิอิมพิแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอทซ์ โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การวัดความถี่ของผลึกควอทซ์ด้วยการใช้ผลึกควอทซ์เป็นรีโซเนเตอร์ให้กับวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์ ซึ่งข้อดีของวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์สามารถออกแบบวงจรถ่ายได้ง่าย ความซับซ้อนของวงจรถ่ายน้อย และมีราคาถูก โดยสามารถวัดความถี่ของผลึกควอทซ์ได้โดยการนับความถี่เอาท์พุทของวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์ โดยใช้ความถี่เอาท์พุทของวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์เป็นความถี่ก่าร และใช้ความถี่ก่ารไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไหลตบนผิวผลึกควอทซ์ แต่วงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์มีข้อเสียคือ ความถี่เอาท์พุทของวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์ ไม่ตรงกับค่าความถี่ก่ารจริงของผลึกควอทซ์ ทำให้ความถี่ก่ารที่วัดได้จากวงจรถ่ายออกสซิลเลเตอร์มีความคลาดเคลื่อนไปจากความถี่ก่ารจริงของผลึกควอทซ์ สำหรับการวัดความถี่ก่ารของผลึกควอทซ์จากการวัดเฟส  $0^\circ$  ของแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงเพราะสามารถหาค่าความถี่ก่ารจริงของผลึกควอทซ์ได้ แต่มีปัญหาที่มีความซับซ้อนของวงจรถ่ายสูง และวัดเฟส  $0^\circ$  ของแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ได้ยาก ส่วนวิธีการวัดความถี่ก่ารด้วยการวัดค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ก็เป็นอีกวิธีที่มีความแม่นยำสูงเพราะสามารถหา

ค่าความถี่กำลังจริงของผลึกควอตซ์ได้ แต่มีปัญหาวัดวิธีนี้ต้องใช้วงจรกำเนิดความถี่ที่มีความละเอียดในการปรับความถี่สูง สำหรับการกวาดความถี่ให้ผลึกควอตซ์

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดความถี่กำลังด้วยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอตซ์ ด้วยการใช้วงจรออสซิลเลเตอร์กวาดความถี่ให้ผลึกควอตซ์ และหาค่าความถี่กำลังที่อยู่ในช่วงของการกวาดความถี่ และยังได้นำเสนอวิธีการหาค่าความถี่กำลังด้วยการกวาดความถี่วิธีใหม่เพื่อลดข้อด้อยของวิธีการวัดความถี่กำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่แบบเดิมอีกด้วย และด้วยโครงสร้างวงจรเดียวกันนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของผลึกควอตซ์อีกด้วย ซึ่งสามารถนำวิธีการวัดดังกล่าวไปใช้วัดของเหลว โดยสามารถนำค่าความถี่กำลัง และความต้านทานที่วัดได้ไป คำนวณหาความหนาแน่น และความหนืดของของเหลวได้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1. เพื่อพัฒนาระบบวัดความถี่กำลังที่แท้จริง และความต้านทานของผลึกควอตซ์ที่ 5 MHz

## 1.3. ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1. ออกแบบระบบกำเนิดความถี่เพื่อวัดความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ความถี่ 5 MHz

1.3.2. ความแม่นยำของความถี่ที่วัดได้  $\pm 1\text{Hz}$

1.3.3. หาค่าความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ด้วยการประมาณค่าในช่วงค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์

1.3.4. หาค่าของความต้านทานของผลึกควอตซ์ด้วยผลจากการประมาณค่าในช่วงความถี่กำลัง

1.3.5. สามารถวัดค่าความต้านทาน  $\Delta R$  ได้ 1-1k $\Omega$

1.3.6. ใช้โปรแกรม Matlab ในการประมาณค่าในช่วงข้อมูล

#### 1.4. วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1. ศึกษาข้อมูลของผลิตภัณฑ์

1.4.2. ศึกษารายละเอียดของระบบการวัดมวลในรูปแบบต่างๆที่นำผลิตภัณฑ์ไปใช้เป็นเซ็นเซอร์ในการวัดมวล

1.4.3. ศึกษาวงจรกำเนิดความถี่รูปไซน์ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ละเอียด

1.4.4. ออกแบบระบบวัดความถี่กำลัง และความต้านทานของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการวัดความถี่โดยวงจรถ่ายสัญญาณรูปไซน์

1.4.5. ศึกษาการประมาณค่าในช่วงข้อมูล

1.4.6. ทดสอบการทำงานของระบบ

1.4.7. สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1. พัฒนาเทคนิควัดค่าความถี่กำลัง และค่าความต้านทานโดยใช้จำนวนข้อมูลที่น้อยมาก

1.5.2. พัฒนาเทคนิคสำหรับวัดค่าความถี่กำลัง และค่าความต้านทานของผลิตภัณฑ์ที่มีความแม่นยำ

1.5.3. ลดจำนวนครั้งในการกวาดความถี่ของวงจรถ่ายสัญญาณ เพื่อหาค่าความถี่กำลัง

## 1.6. ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยบทที่ 2 จะกล่าวถึง ความรู้พื้นฐาน และหลักการที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย ผลึกควอทซ์ และ วงจรกำเนิดความถี่สำหรับกวาดความถี่ ให้ผลึกควอทซ์ บทที่ 3 จะกล่าวถึง โครงสร้างของระบบวัดความถี่กำลัง และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ วงจรสำหรับวัดกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ และการทำการประมาณค่าในช่วงของข้อมูล บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองวัดความถี่กำลัง และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ด้วยการกวาดความถี่ และนำเสนอวิธีการบทที่วัดความถี่กำลัง และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ด้วยการนำค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์มาทำการประมาณค่าในช่วงบทที่ 5 จะกล่าวถึงสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป



## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. ผลึกควอทซ์

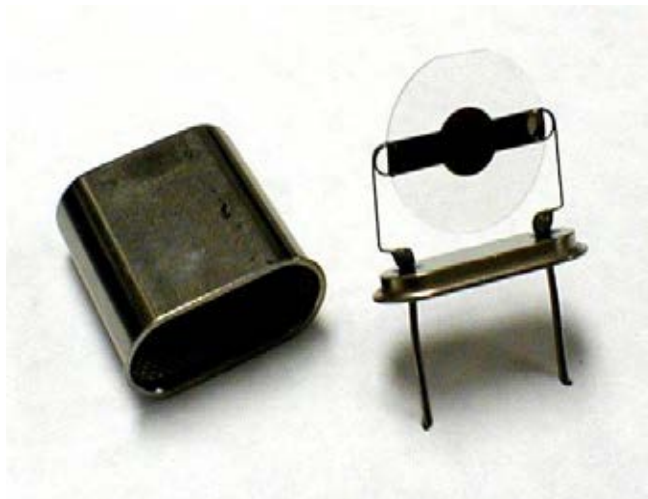
##### 2.1.1. โครงสร้างผลึกควอทซ์

ผลึกควอทซ์ (Quartz crystal)  $\text{SiO}_2$  อยู่ในรูปของผลึก ซึ่งในปัจจุบันจะไม่นิยมใช้ผลึกควอทซ์จากธรรมชาติ เพราะมักมีความไม่สมบูรณ์ในโครงผลึก (Crystal defects) มาก ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า Q ต่ำ แต่เราจะนิยมใช้ผลึกควอทซ์จากการสังเคราะห์แทน เพราะมีคุณภาพสูง ราคาถูก และใช้กับความถี่สูงได้ดี โดยนำผลึกควอทซ์มาใช้งานในรูปแบบตัวกำเนิดสัญญาณ (Resonator) เพื่อใช้ในการกำหนดความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่

โครงสร้างในการใช้ผลึกควอทซ์มาใช้งานเป็นรีโซเนเตอร์ ประกอบด้วยแผ่นผลึกควอทซ์ที่มีความหนาเท่ากับ  $d$  และมีโลหะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดประกบอยู่ทั้งสองด้าน ความหนา  $d$  ของแผ่นรีโซเนเตอร์จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการกำรกำรของคริสตัลโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความยาวคลื่นของคลื่นกลในแผ่นผลึกเท่ากับ  $\lambda_0 = 2d$  หรือ  $d = \lambda_0 / 2$  เราจะได้ความถี่  $f_0$  ซึ่งเป็นความถี่โหมดพื้นฐาน



ก).

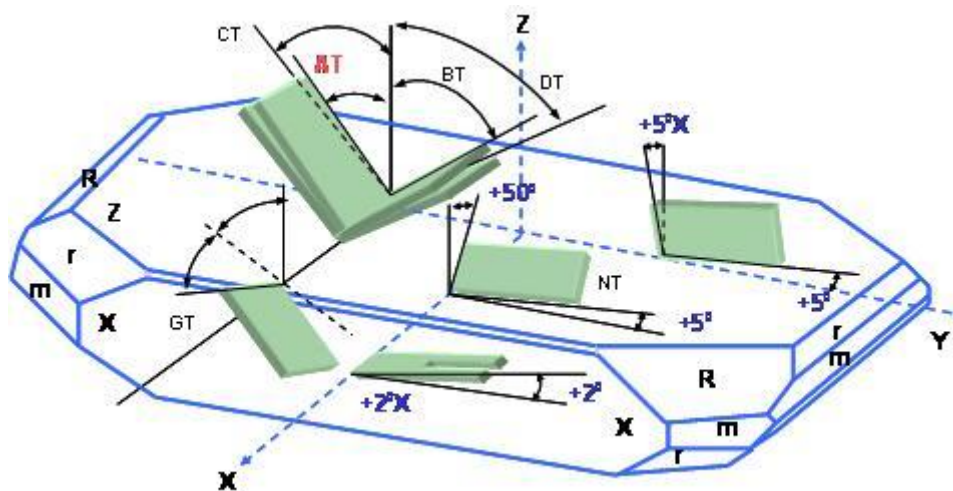


ข).

รูปที่ 2-1 ผลึกควอทซ์ ก). ผลึกควอทซ์ในธรรมชาติ และ ข). ผลึกควอทซ์ที่ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์

### 2.1.2. ชนิดของผลึกควอทซ์

ผลึกควอทซ์มีหลากหลายชนิด ซึ่งจะถูกแบ่งออกโดยลักษณะการตัดแว่นผลึกของผลึกควอทซ์ที่อ้างอิงด้วยองศาการตัดตัดแว่นผลึกในแกน  $x, y, z$



รูปที่ 2-2 ลักษณะการตัดแว่นผลึกของผลึกควอทซ์

#### - ผลึกควอทซ์ชนิด AT cut

เป็นผลึกควอทซ์ชนิดที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดเพราะ มีย่านอุณหภูมิการใช้งานที่อุณหภูมิห้องปกติที่  $25-35^{\circ}\text{C}$  มีช่วงความถี่การใช้งานที่  $0.5 - 300\text{ MHz}$  โดยมีความถี่การใช้งานโหมดพื้นฐานที่  $1 - 30\text{ MHz}$  ความถี่การใช้งานฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่  $30 - 90\text{ MHz}$  และความถี่การใช้งานความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 ที่  $90 - 150\text{ MHz}$  มีลักษณะโหมดการสั่นแบบ Thickness shear mode โดยมีมุมการตัดแว่นผลึก  $35^{\circ}15'$  ทำมุมกับแกน  $z$  สำหรับความถี่น้อยกว่า  $25\text{ MHz}$  และมีมุมการตัดแว่นผลึก  $35^{\circ}18'$  ทำมุมกับแกน  $z$  สำหรับความถี่  $10\text{ MHz}$  ขึ้นไป

#### - ผลึกควอทซ์ชนิด SC cut

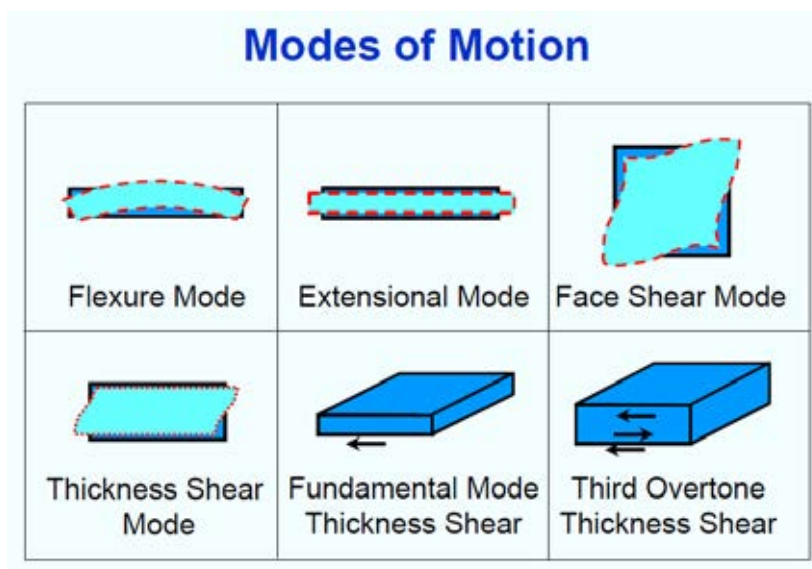
เป็นผลึกควอทซ์ที่ได้รับความนิยมอีกชนิดหนึ่ง มีความพิเศษที่แรงเครียดบริเวณผิวของคริสตัลส่งผลกับความถี่ แต่มีย่านอุณหภูมิการใช้งานที่  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นผลึกที่มีการตัดแว่นผลึกทำมุมกับทั้งแกน  $z$  และแกน  $x$  (double rotated) โดยทำมุมกับแกน  $z$   $35^{\circ}15'$  และทำมุมกับแกน  $x$   $21^{\circ}54'$  มีย่านความถี่การใช้งานที่  $0.5 - 200\text{ MHz}$  มีโหมดการสั่นแบบ Thickness shear mode

- ผลึกควอทซ์ชนิด BT cut

เป็นผลึกควอทซ์ที่มีย่านการใช้งานความถี่ที่ 0.5 – 200 MHz มีโหมดการสั่นแบบ Thickness shear mode มีลักษณะการตัดแฉกทำมุมกับแกน z  $49^{\circ}8'$

### 2.1.3. โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์

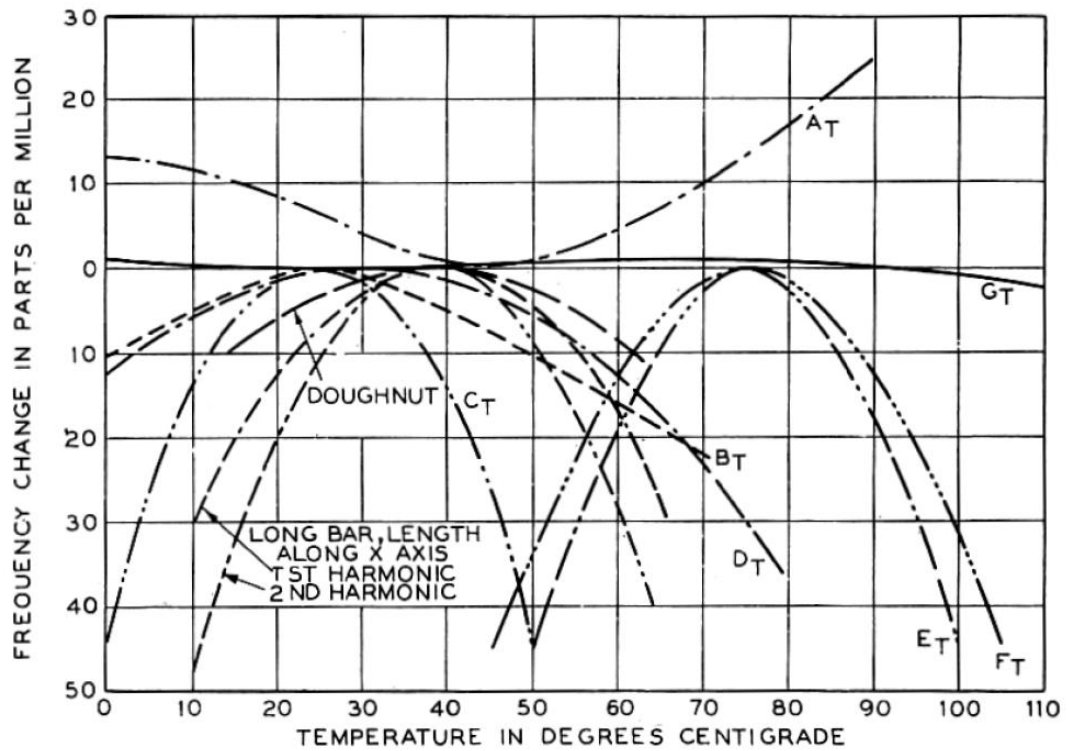
โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์ตามที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ นั้นถูกกำหนดจากลักษณะการตัดแฉกผลึก ซึ่งโหมดของการสั่นนั้นมีผลต่อความถี่ของผลึกควอทซ์ การประกบอิเล็กโทรดเข้ากับขั้วของผลึกควอทซ์ รูปแบบของการสร้างสัญญาณของผลึกควอทซ์



รูปที่ 2-3 โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์

### 2.1.4. คุณภูมิ

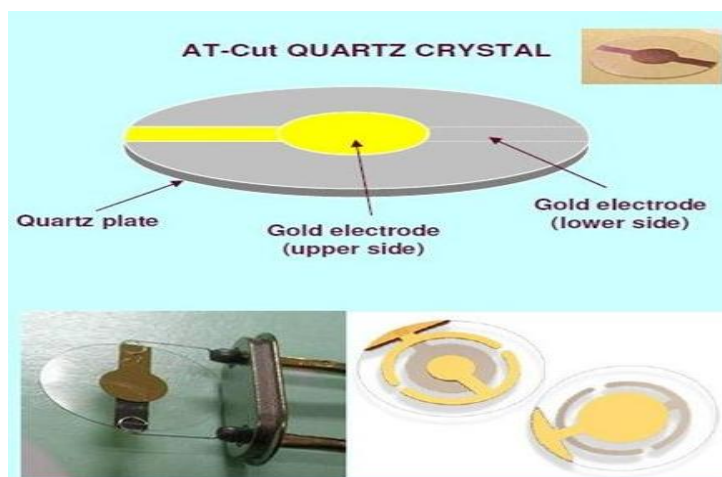
การใช้งานผลึกเป็นรีโซเนเตอร์ หรือแม้กระทั่งเป็นเซ็นเซอร์ควอเรียเลือกชนิดของผลึกให้เหมาะสมกับคุณภูมิที่จะใช้งาน ซึ่งผลึกควอทซ์แต่ละชนิดจะมีคุณภูมิของการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยได้แสดงดังรูปที่ 2-4 ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงคุณภูมิการใช้งานที่เหมาะสมของผลึกควอทซ์แต่ละชนิด ซึ่งหากนำผลึกควอทซ์ไปใช้งานที่คุณภูมิที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดความเพี้ยนของความถี่ของผลึกควอทซ์ได้



รูปที่ 2-4 อุณหภูมิการใช้งานของผลึกควอทซ์แต่ละชนิด

## 2.2. ผลึกควอทซ์ชนิด AT cut

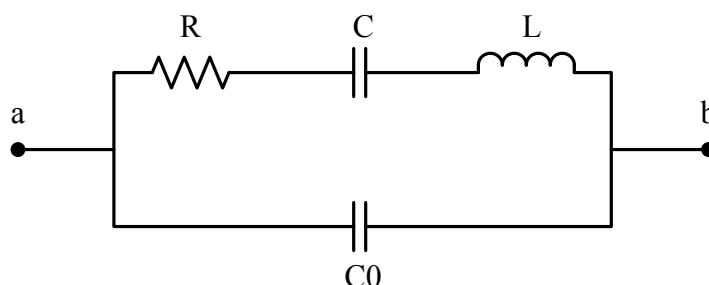
งานด้านการวัดมวลบนผิวของผลึกควอทซ์นิยมใช้ผลึกควอทซ์ชนิด AT cut โดยผลึกควอทซ์ชนิดนี้มีข้อดีหลายประการสำหรับการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์เช่น มีย่านอุณหภูมิการที่ 25-35 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องปกติ ทำให้ขณะทำการวัดไม่จำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิ โหมดการสั่นของผลึกควอทซ์ชนิด AT cut มีการสั่นแบบ Thickness shear mode ทำให้การสั่นของผลึกไม่มีผลต่อระนาบพื้นผิวที่สัมผัสกับมวลบนผิวของผลึก



รูปที่ 2-5 โครงสร้างผลึกควอตซ์ชนิด AT cut

### 2.2.1. วงจรสมมูลของผลึกควอตซ์ชนิด AT cut

ผลึกควอตซ์ที่ทำงานในช่วงความถี่โหมดพื้นฐาน จะมีวงจรสมมูลทางไฟฟ้า [4] ได้ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 วงจรสมมูลของผลึกควอตซ์

โดย  $C_0$  คือค่าความจุไฟฟ้าจริงของแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองซึ่งประกอบอยู่กับแผ่นผลึกทำหน้าที่เป็นสารไดอิเล็กตริกส่วนค่า  $R$ ,  $L$ ,  $C$  เป็นค่าสมมูลของปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่แบบแทรกสอดเชิงบวก (Constructive interferences) ของคลื่นกลในระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของแผ่นผลึก ปรากฏการณ์ทางกลนี้ถูกแปลงมาเป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าโดยคุณสมบัติทางพีโซอิเล็กตริกของแผ่นผลึก ดังนั้นค่า  $R$ ,  $L$ ,  $C$  จะขึ้นกับค่าคงตัวของความยืดหยุ่น (Elastic constants), ค่าคงตัวทางด้านพีโซอิเล็กตริก (Piezoelectric constants), ลักษณะการตัดแผ่นผลึก (Crystal cuts), ชนิดคลื่นกลที่เกิดขึ้นในแผ่นผลึก, ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวผลึก และความ

หน้า d ของแวนผลึก โดยความถี่ก้ำจรของผลึกจะตรงกับความถี่ก้ำจรแบบอนุกรม (Series Resonance Frequency) ของวงจรสมมูลนี้ดังสมการที่ (2-1)

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-1)$$

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	L (mH)	C (pF)	R ( $\Omega$ )	C <sub>0</sub> (pF)
20 kHz	4,000	0.005	40,000	7
200 kHz	27	0.024	2,000	10
450 kHz	8.5	0.015	1,050	5
1 MHz	3.16	0.008	400	3.2
2 MHz	0.528	0.012	100	4
4 MHz	0.21	0.007	22	2.4
5 MHz	0.03	0.033	10	5
8 MHz	0.014	0.027	8	5.6
10 MHz	0.0101	0.025	5	5.5
15 MHz	0.00417	0.028	5	4
30 MHz	0.0101	0.0027	45	6
150 MHz	0.002814	0.0004	70	6

### 2.3. ผลตอบสนองค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ต่อความถี่

วิธีหนึ่งที่สามารถวัดค่าความถี่ก้ำจรของผลึกควอทซ์ได้ คือการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ จากรูปที่ 2-7 เราสามารถวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ต่างๆได้ดังนี้ เมื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ L และ C ที่ต่ออนุกรมในวงจรสมมูลมีค่าเป็น

$$X_{LC} = -\frac{1}{\omega C} + \omega L \quad (2-2)$$

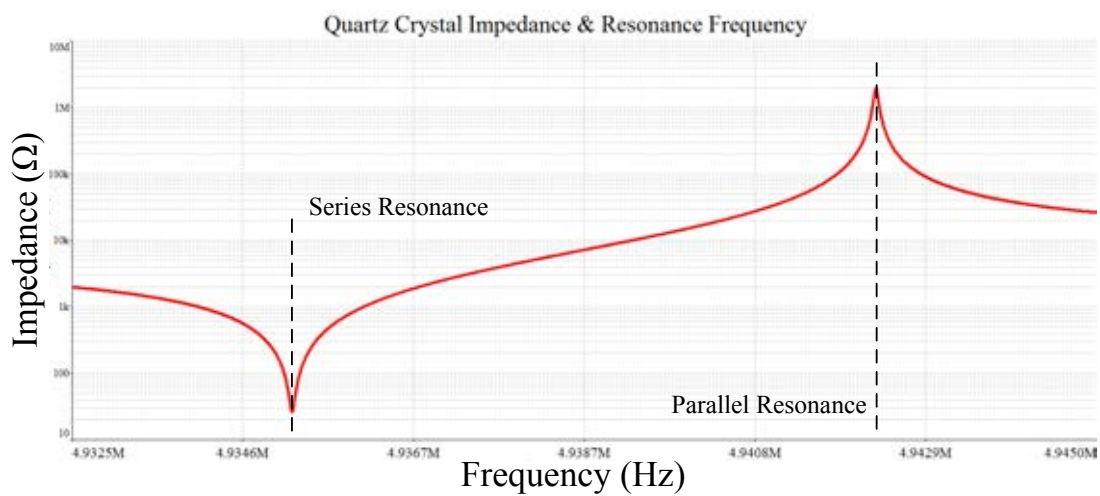
และค่าอิมพีแดนซ์ของ C<sub>0</sub> ที่ต่อขนานในวงจรสมมูลคือ

$$X_0 = -\frac{1}{\omega C_0} \quad (2-3)$$

และค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์

$$Z = \frac{-X_{LC}X_0 + jR \cdot X_0}{R + j(X_{LC} + X_0)} \quad (2-4)$$

การหาค่าความถี่ก่าทร ทำได้โดยใช้ค่าของ Z ในสมการที่ (2-4) โดย Z จะมีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ก่าทร



รูปที่ 2-7 ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ต่างๆของความถี่ก่าทร

จากรูปที่ 2-7 ความถี่จุดที่อิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์มีค่าต่ำที่สุด เรียกว่าความถี่ก่าทรของผลึกควอทซ์แบบอนุกรม ( $f_s$ ) และอิมพีแดนซ์มีค่าสูงสุดเรียกว่าความถี่ก่าทรของผลึกควอทซ์แบบขนาน ( $f_p$ ) ความถี่ทั้งสองมีค่าขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของผลึกควอทซ์ดังนี้

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-5)$$

และความถี่ก่าทรของผลึกควอทซ์แบบขนานมีค่าเท่ากับ

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left(1 + \frac{C}{C_0}\right)^{1/2} \quad (2-6)$$

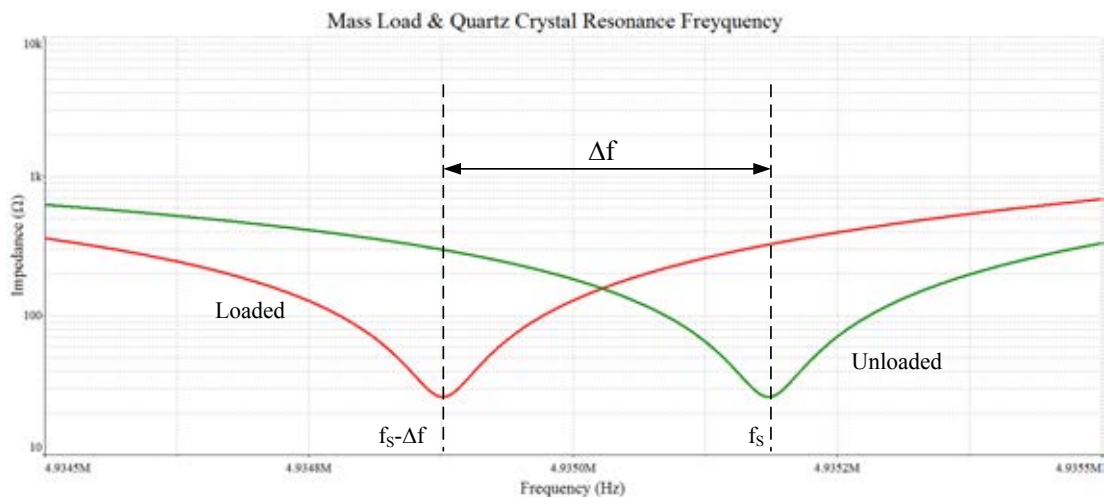
เนื่องจาก  $X_{LC}=0$  ที่ความถี่กำรแบบอนุกรม ( $f_s$ ) ค่าอิมพีแดนซ์จึงมีค่าต่ำสุดเท่ากับ

$$Z_{min} = \frac{jR \cdot X_0}{R + jX_0} \approx R \quad (2-7)$$

## 2.4. การใช้ผลึกควอทซ์เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดมวลที่มีขนาดเล็ก และของเหลวเหลว

### 2.4.1. การใช้ผลึกควอทซ์ไปวัดน้ำหนักมวลขนาดเล็ก

การนำผลึกควอทซ์ไปใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ หรือรีโซเนเตอร์ ณ ความถี่  $f_s$  ของผลึกควอทซ์พบว่าค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์จะมีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่  $f_s$  ในขณะที่เมื่อนำผลึกควอทซ์ไปใช้งานที่ความถี่อื่น ๆ ค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์จะมีค่าสูงกว่าที่ความถี่  $f_s$  มากดังในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ผลตอบสนองอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์เมื่อไม่มีโหลด (Unloaded) และมีโหลด (Loaded)

เราสามารถผลึกควอทซ์มาใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดค่าน้ำหนักของมวลบนผิวของผลึกควอทซ์ได้เพราะน้ำหนักของมวลบนผิวผลึกควอทซ์ทำให้ ความถี่  $f_s$  ของผลึกควอทซ์เปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2-8 ซึ่ง Sauerbrey [1] ได้เสนอความสัมพันธ์ของน้ำหนักของมวลที่เพิ่มขึ้นบนผิวผลึกควอทซ์ ( $\Delta m$ ) และความถี่  $f_s$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta f$ )



$$\Delta f = -\frac{2f_s^2 \Delta m}{A\sqrt{\rho \cdot \mu}} \quad (2-8)$$

เมื่อ  $f_s$  – ความถี่กำจรแบบอนุกรมของผลึกควอทซ์ ขณะไม่มีโหลดบนผิวผลึก

$\Delta m$  – น้ำหนักของมวลที่เป็นโหลดบนผิวผลึก

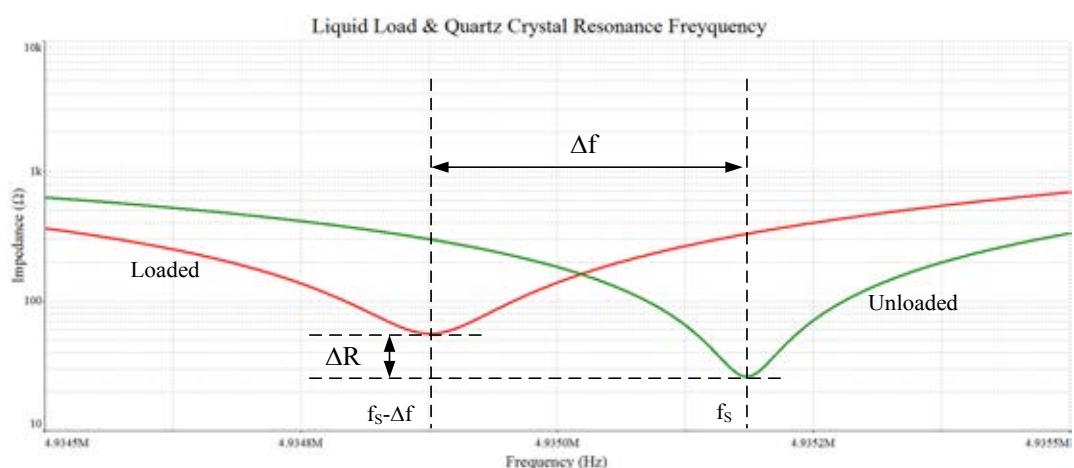
$\rho$  – ค่าคงที่ความหนาแน่นของผลึกควอทซ์ =  $2.648 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

$\mu$  – ค่าคงที่ shear modulus ของผลึกควอทซ์ =  $2.947 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\text{s}^{-2}$

$A$  – พื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของผลึกควอทซ์

#### 2.4.2. การหาค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวด้วยผลึกควอทซ์

เราสามารถนำผลึกควอทซ์มาวัดความหนืด และความหนาแน่นของของเหลว ได้ เพราะของเหลวบนผิวผลึกควอทซ์มีผลทำให้ความถี่  $f_s$  และความต้านทานของผลึกควอทซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปซึ่ง Kanazawa [5] ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวที่มีผลต่อความถี่  $f_s$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta f$ ) ในสมการที่ (2-9) เมื่อ  $\Delta f$  คือค่าความต่างของความถี่  $f_s$  เมื่อมีของเหลว และไม่มีบนผิวผลึกควอทซ์



รูปที่ 2-9 ผลตอบสนองของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์เมื่อมี และไม่มีของเหลวบนผิวผลึกควอทซ์

$$\Delta f = -f_s^{3/2} \sqrt{\frac{\rho_L \cdot \eta_L}{\pi \cdot \rho \cdot \mu}} \quad (2-9)$$

ในรูปที่ 2-9 Ralf Borngraeber และคณะ [6] ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าความหนืด และความหนาแน่นของของเหลวที่มีผลต่อค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\Delta R$ ) เมื่อ  $\Delta R$  คือค่าความต่างของความต้านทานของผลึกควอทซ์เมื่อมีของเหลว และไม่มีบนผิวผลึกควอทซ์

$$\Delta R = 4N \cdot L \sqrt{\frac{f_s^3 \cdot \pi \cdot \rho_L \cdot \eta_L}{\rho \cdot \mu}} \quad (2-10)$$

เมื่อ  $f_s$  - ความถี่กัมมาตรแบบอนุกรมของผลึกควอทซ์ ขณะไม่มีโหลดบนผิวผลึก

$\rho$  - ค่าคงที่ความหนาแน่นของผลึกควอทซ์ = 2.648 g·cm<sup>-3</sup>

$\mu$  - ค่าคงที่ shear modulus ของผลึกควอทซ์ = 2.947×10<sup>11</sup> g·cm<sup>-1</sup>·s<sup>-2</sup>

$\rho_L$  - ค่าความหนาแน่นของไหลชนิดของเหลวบนผิวของผลึกควอทซ์

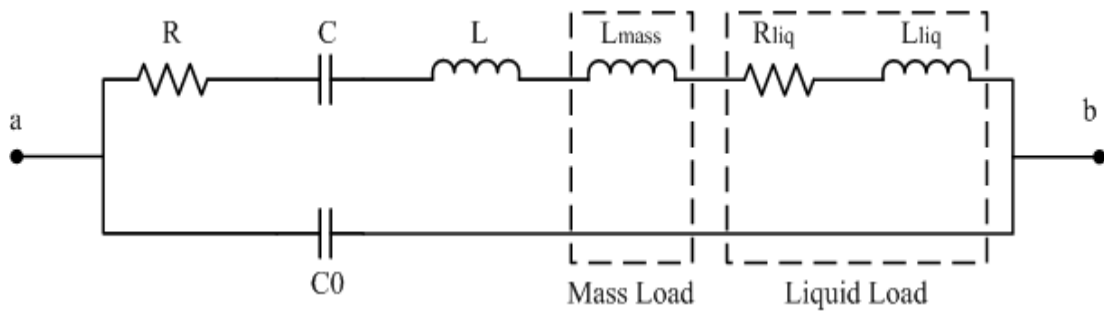
$\eta_L$  - ค่าความหนืดของไหลชนิดของเหลวบนผิวของผลึกควอทซ์

$N$  - จำนวนด้านผิวสัมผัสของผลึกควอทซ์ที่สัมผัสโหลด

$L$  - ค่าของตัวเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลของผลึกควอทซ์ ขณะไม่มีโหลดบนผิวผลึก

### 2.4.3. ผลของโหลดบนผิวของผลึกควอทซ์ที่มีผลต่อวงจรสมมูลของผลึกควอทซ์

ในหัวข้อ 2.4.1 และ 2.4.2 เราสามารถแสดงผลของมวล หรือของเหลวในรูปของวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2-10



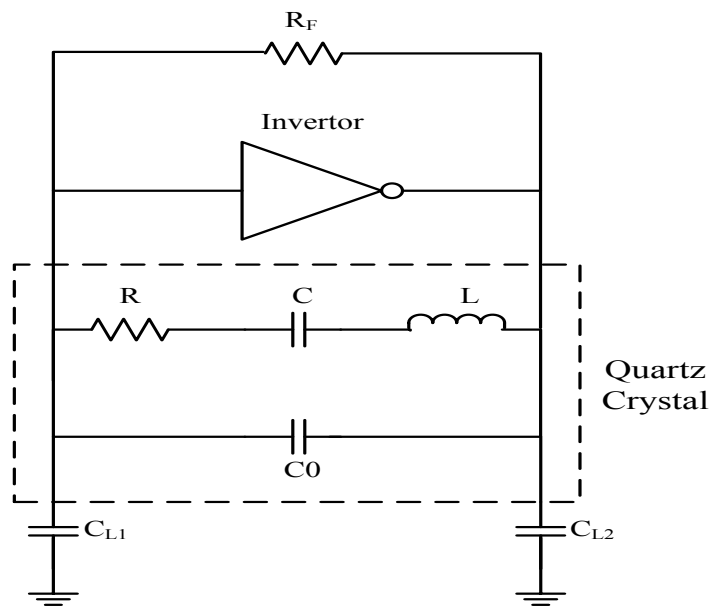
รูปที่ 2-10 วงจรสมมูลของผลึกควอตซ์ที่รวมผลของโหลดประเภทต่างๆ

รูปที่ 2-10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำใช้ผลึกควอตซ์ไปวัดน้ำหนักของมวล น้ำหนักของมวลจะมีผลเปรียบเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ ( $L_{mass}$ ) ถูกต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลใน Motion Arm ซึ่งทำให้ความถี่  $f_s$  ของผลึกควอตซ์มีค่าเปลี่ยนไป และหากนำผลึกควอตซ์ไปวัดของเหลวแล้วผลของโหลดที่เป็นของเหลวบนผิวผลึกควอตซ์จะเปรียบเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำ ( $L_{liq}$ ) และตัวต้านทาน ( $R_{liq}$ ) ถูกต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลใน Motion Arm ซึ่งทำให้ความถี่  $f_s$  และความต้านทานของผลึกเปลี่ยนแปลงไป

## 2.5. ระบบการวัดความถี่กําธรรที่ใช้ผลึกควอตซ์แบบต่างๆ

### 2.5.1. ระบบวัดความถี่กําธรรด้วยวิธีใช้ผลึกควอตซ์เป็นตัวกําเนิดความถี่

ระบบจะใช้ผลึกควอตซ์ทำหน้าที่เป็นตัวกําเนิดความถี่ในวงจรกําเนิดความถี่ที่เรียกว่าวงจรเกตออสซิลเลเตอร์ (Gate Oscillator) ดังรูปที่ 2-11 เป็นวงจรที่ออกแบบได้ง่าย มีความซับซ้อนน้อย และมีราคาถูก



รูปที่ 2-11 วงจรเกิดออสซิลเลเตอร์

ความถี่ของวงจรเกิดออสซิลเลเตอร์ ( $f_p$ ) ถูกกำหนดโดยความถี่ค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอตซ์ และตัวเก็บประจุ  $C_{L1}$  และ  $C_{L2}$  ดังนี้

$$f_p' = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left( 1 + \frac{C}{C_0 + C_L} \right)^{1/2} \quad (2-11)$$

โดยที่ตัวเก็บประจุ  $C_L$  มีค่าเท่ากับ

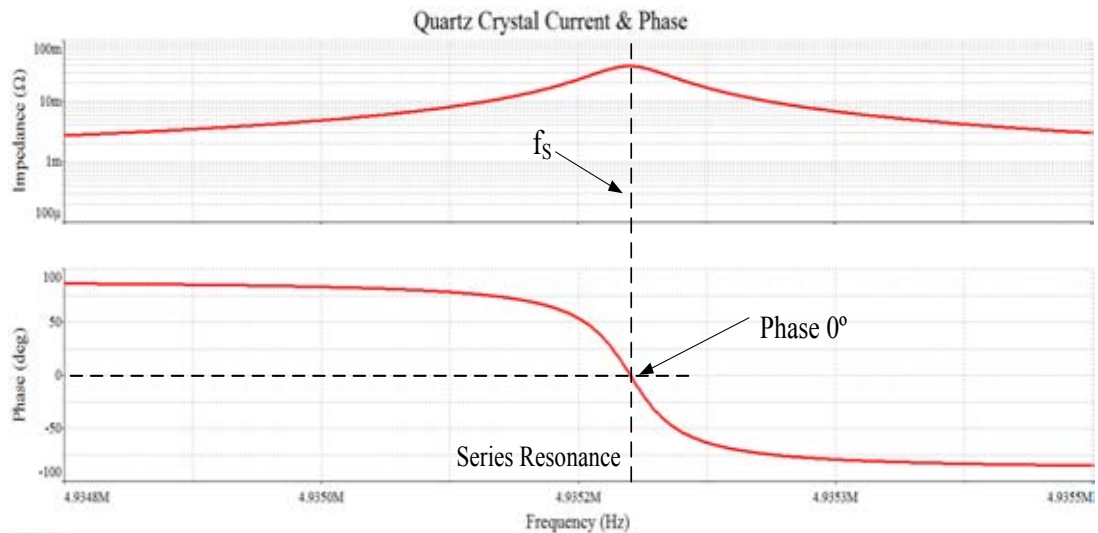
$$C_L = \frac{C_{L1} \cdot C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} \quad (2-12)$$

สมการที่ (2-12) แสดงว่าตัวเก็บประจุ  $C_L$  มีผลต่อความถี่สัญญาณเอาต์พุตของวงจร ดังนั้นความถี่ที่ได้จึงไม่ใช่ความถี่การจริงของผลึกควอตซ์

#### 2.5.2. ระบบวัดความถี่การวัดโดยการวัดผลต่างระหว่างเฟสของกระแส และเฟสของแรงดัน

การหาความถี่การวัดโดยใช้การวัดผลต่างของเฟสกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์ และแรงดันตกคร่อมผลึกควอตซ์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำสูง เพราะที่ความถี่  $f_s$  ผลต่างของเฟสดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $0^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 2-12 ทำให้ค่าความถี่การวัดที่มีความแม่นยำมากกว่าแบบการใช้วงจรเกิดออสซิลเลเตอร์ แต่การวัดเฟสของกระแส และแรงดันนั้นทำได้ยากทำ

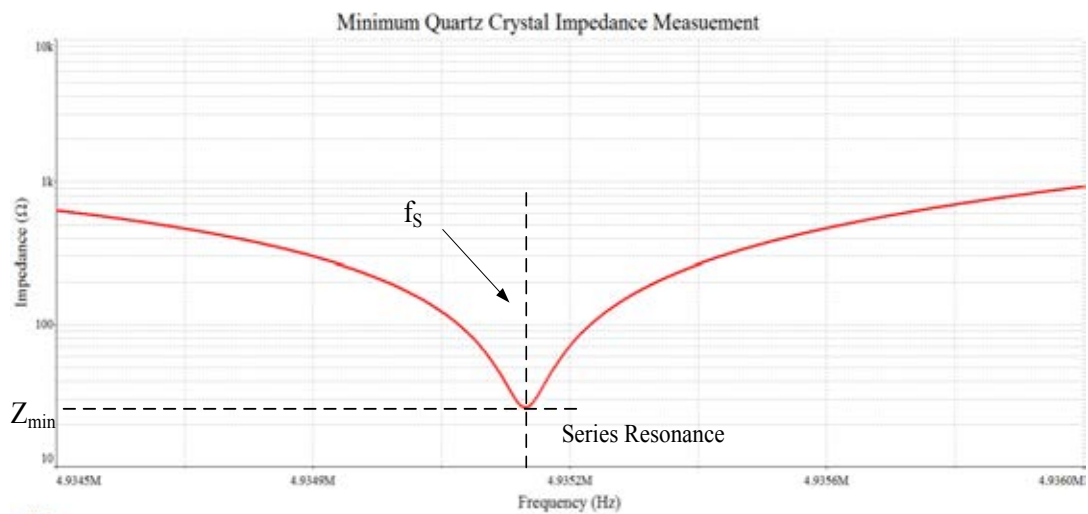
ให้ความซับซ้อนวงจรที่ใช้วัดความถี่กำรมีความซับซ้อน โดยที่ Ivan D. Avramov [3] ได้นำวิธีนี้ มาประยุกต์ใช้งานกับ Network Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาสูง



รูปที่ 2-12 การหาความถี่กำรด้วยการวัดเฟสของกระแส และแรงดันของผลึกควอทซ์ที่  $0^\circ$

### 2.5.3. ระบบวัดความถี่กำรโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอทซ์

การวัดความถี่กำรของผลึกควอทซ์โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมันนั้นให้ผลที่แม่นยำ แต่การออกแบบวงจรสำหรับวัดความถี่กำรด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีใช้วงจรเกตออสซิลเลเตอร์เพราะจำเป็นต้องใช้วงจรถ่ายสัญญาณแรงดันรูปไซน์ที่สามารถวัดความถี่ด้วยความละเอียดสูงมาก มาป้อนให้กับผลึกควอทซ์แล้ววัดกระแสที่ไหลผ่านมัน เมื่อเอาขนาดของสัญญาณแรงดันมาหารขนาดสัญญาณกระแส จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่นั้น และกวาดความถี่จนกระทั่งได้ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด



รูปที่ 2-13 การหาความถี่ก่าจรด้วยวิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอระบบวัดความถี่ก่าจรโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอทซ์ แต่ได้พัฒนาวิธีวัดให้มีความซับซ้อนลดน้อยลงด้วยการประมาณค่าใน (Interpolation) แบบ Cubic Spline ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 2.8

## 2.6. ผลการวัดความถี่ก่าจรของผลึกควอทซ์ด้วยระบบวัดแบบต่างๆ

### 2.6.1. การหาค่าผลต่างของความถี่ก่าจร ( $\Delta f$ )

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการคำนวณค่าความถี่ก่าจรแบบต่างๆของผลึกควอทซ์ และการวัดความถี่ก่าจรด้วยวิธีต่างๆ และจำลองการหาค่าน้ำหนักของมวล ( $\Delta m$ ) โดยให้พารามิเตอร์ L จากวงจรสมมูลทำหน้าที่เปรียบเสมือนผลของไหลที่ทำให้เกิดค่าความต่างของความถี่ก่าจร ( $\Delta f$ ) ของผลึกควอทซ์ ด้วยการใส่ค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ 10MHz โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองมีค่าดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ค่าพารามิเตอร์ของผลึกควอทซ์ที่ความถี่ 10MHz

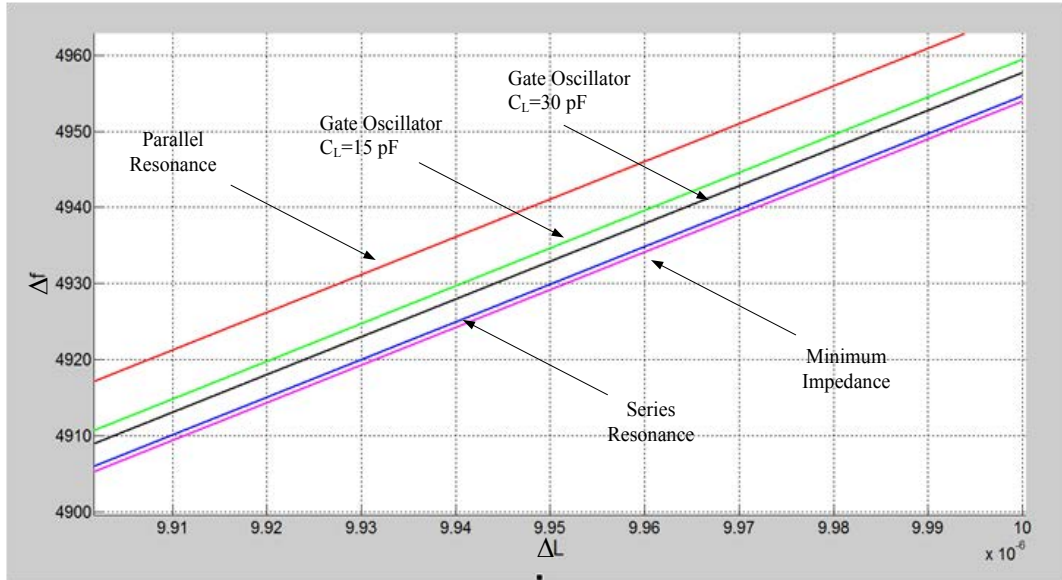
ความถี่ผลึกควอทซ์	R ( $\Omega$ )	L (mH)	C (pF)	$C_0$ (pF)
10 MHz	5	10.1	0.025	5.5

ในการจำลองนี้ได้จำลองโดยการหาค่า  $\Delta f$  จากการคำนวณความถี่กำรแบบอนุกรม ความถี่กำรแบบขนาน การหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และความถี่เอาต์พุตของวงจรถอดสซิลเลเตอร์ที่ใช้ค่า  $C_L$  เท่ากับ 15pF และ 30pF (สำหรับผลึกควอทซ์ 10MHz ค่า  $C_L$  มีค่าอยู่ในช่วง 15-30 pF) ด้วยการใช้ค่าพารามิเตอร์ L จำนวน 11 ค่าดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าความถี่กำรแบบต่างที่ได้จากการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ L ในวงจรสมมูล

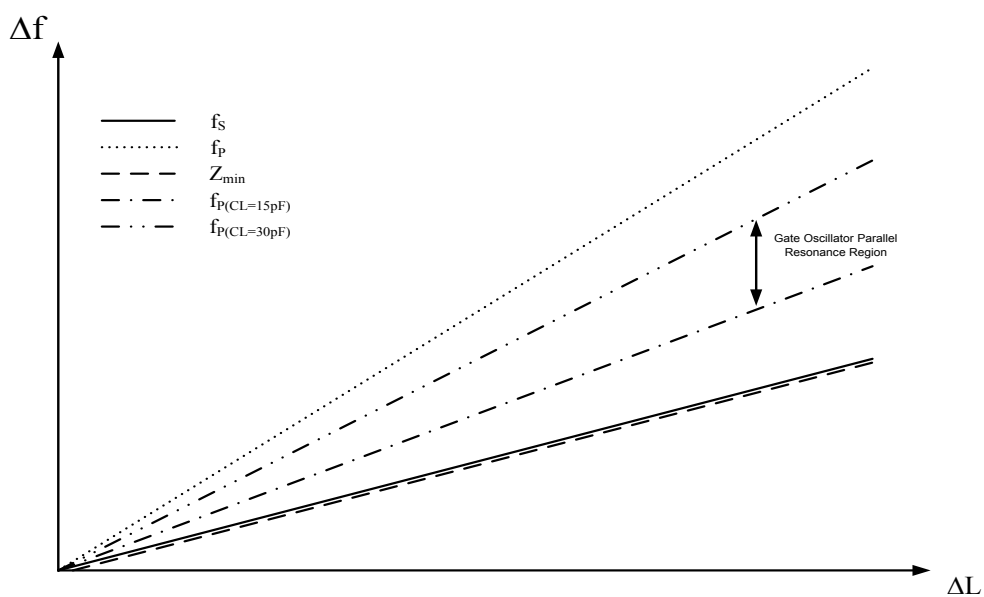
$\Delta L$ (uH)	$f_s$	$f_p$	$Z_{min}$	$f_{P(15pF)}$	$f_{P(30pF)}$
0	10015888	10038625	10015887	1.0025514	10021993
1	10015391	10038128	10015392	10025017	10021497
2	10014896	10037631	10014896	10024521	10021001
3	10014400	10037135	10014400	10024025	10020505
4	10013905	10036638	10013905	10023529	10020009
5	10013409	10036141	10013409	10023033	10019513
6	10012914	10035644	10012914	10022537	10019017
7	10012419	10035148	10012418	10022041	10018522
8	10011923	10034652	10011923	10021545	10018026
9	10011428	10034155	10011428	10021050	10017531
10	10010933	10033659	10010933	10020554	10017035

เมื่อนำค่าความถี่กําหนดแบบต่างๆจากตารางที่ 2-3 มาหาค่า  $\Delta f$  และเทียบกับค่า  $\Delta L$  จะได้ดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 การหาค่า  $\Delta f$  ด้วยความถี่กําหนดแบบต่างๆ

เพื่อชี้ให้เห็นว่าค่า  $\Delta f$  ที่ได้จากความถี่กําหนดแบบต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน จึงได้พลอตค่า  $\Delta f$  ที่ได้จากความถี่กําหนดแบบต่างๆเทียบกับค่า  $\Delta L$  ขึ้นใหม่ และพบว่าค่า  $\Delta f$  ที่ได้จากความถี่กําหนดแต่ละแบบจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันไม่เท่ากันดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 เปรียบเทียบค่า  $\Delta f$  ด้วยความถี่กําหนดแบบต่างๆ



จากสมการที่ (2-5) สามารถหาความสัมพันธ์ของ  $\Delta f_s$  และ  $\Delta L$  ได้ดังสมการที่ 2-12

$$\Delta f_s = -\frac{\Delta L}{4\pi\sqrt{L^3C}} \quad (2-13)$$

และจากสมการที่ (2-6) เมื่อ  $f_p = f_s\sqrt{1+\frac{C}{C_0}}$  จะได้

$$\Delta f_p = -\frac{\Delta L}{4\pi\sqrt{L^3C}} \times \sqrt{1+\frac{C}{C_0}} \quad (2-14)$$

และจากสมการที่ (2-11) เมื่อ  $f'_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\left(1+\frac{C}{C_0+C_L}\right)^{1/2}$  จะได้

$$\Delta f'_p = -\frac{\Delta L}{4\pi\sqrt{L^3C}} \times \sqrt{1+\frac{C}{C_0+C_L}} \quad (2-15)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า  $\Delta f_s$  และ  $\Delta f_p$  มีความชันต่างกันโดยขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $\sqrt{1+C/C_0}$  และค่า  $\Delta f_s$  และ  $\Delta f_p$  ที่ได้จากวงจรเกตออสซิลเลเตอร์ที่มีค่า  $C_L$  อยู่ในช่วง 15-30pF มีความชันต่างกันโดยขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $\sqrt{1+(C/C_0+C_L)}$  ซึ่งหากใช้ค่า  $C_L$  ที่มีค่าใกล้เคียงกับ 15pF ลักษณะของ  $\Delta f_p$  ที่ได้จะเข้าใกล้ค่าที่ได้จากของความถี่กำธรรเบบขนาน และหากค่า  $C_L$  ที่มีค่าใกล้เคียงกับ 30pF ลักษณะของ  $\Delta f_p$  ที่ได้จะเข้าใกล้ค่าที่ได้จากของความถี่กำธรรเบบอนุกรม ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าจริงๆแล้วค่า  $\Delta f_p$  ที่ได้จากวงจรเกตออสซิลเลเตอร์มีค่าไม่เท่ากับ  $\Delta f_s$  และ  $\Delta f_p$  ซึ่งหากนำค่า  $\Delta f_p$  ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโหลดจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ส่วนการหาค่า  $\Delta f_{zmin}$  จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดพบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกันกับค่า  $\Delta f_s$  ที่ได้จากการวัดความถี่กำธรรเบบอนุกรม ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการวัดความถี่กำธรรที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำในการวัดความถี่กำธรรสูง

## 2.6.2. การใช้ค่า $\Delta f$ ไปคำนวณหาหน้าหนักของโหลด

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการหาค่าน้ำหนักของโหลด ( $\Delta m$ ) ด้วยการใช้ค่า  $\Delta f$  และความถี่กำธรรที่ได้จากวิธีต่างๆ โดยใช้สมการที่ (2-8) ในการคำนวณ และให้พื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของผลึกควอตซ์มีค่าเท่ากับ  $1\text{cm}^2$

ตารางที่ 2-4 ผลการคำนวณค่า  $\Delta m$  ที่ได้จากค่า  $\Delta f$  ของความถี่ก้ำจรแบบต่างๆ

Resonance Frequency	Unloaded Resonance Frequency ( $\Delta L=0$ )	Loaded Resonance Frequency ( $\Delta L=10\mu H$ )	$\Delta f$ (Hz)	$\Delta m$ (ug)
$f_s$	10015888Hz	10010933Hz	4955	21.816435
$f_p$	10038625Hz	10033659Hz	4966	21.767020
$Z_{min}$	10015888Hz	10010933Hz	4955	21.816435
$f_{P(15pF)}$	10025514Hz	10020554Hz	4960	21.795487
$f_{P(30pF)}$	10021993Hz	10017035Hz	4958	21.803144

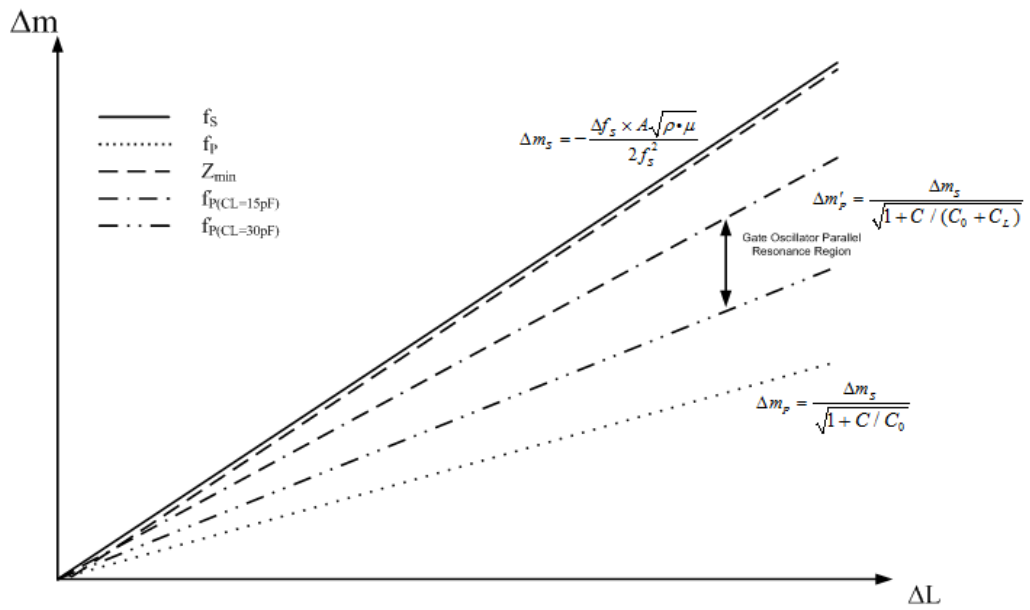
เมื่อค่า  $\Delta m$  ที่ความถี่ก้ำจรแบบต่างๆมีค่าเท่ากับ

$$\Delta m_s = -\frac{\Delta f_s \times A\sqrt{\rho \cdot \mu}}{2f_s^2} \quad (2-16)$$

$$\Delta m_p = -\frac{\Delta f_s \times A\sqrt{\rho \cdot \mu}}{2f_s^2 \times \sqrt{1+C/C_0}} \quad (2-17)$$

$$\Delta m'_p = -\frac{\Delta f_s \times A\sqrt{\rho \cdot \mu}}{2f_s^2 \times \sqrt{1+C/(C_0+C_L)}} \quad (2-18)$$

จากตารางที่ 2-4 ค่าน้ำหนักของโหนดมีค่าแตกต่างกันกับค่าความถี่ก้ำจรที่ใช้คำนวณ โดย  $\Delta m_s$  ที่ได้และค่า  $\Delta m_p$  จะมีค่าความต่างขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $\sqrt{1+C/C_0}$  และ  $\Delta m_s$  และ  $\Delta m_p$  จะมีค่าความต่างขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $\sqrt{1+C/(C_0+C_L)}$  ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 เปรียบเทียบค่า  $\Delta m$  ด้วยความถี่ก้ำกักรูปแบบต่างๆ

2.6.3. การใช้ค่า  $\Delta f$  ไปคำนวณหาความหนืดและความหนาแน่นของของเหลว

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการหาค่าน้ำหนักของไหล ( $\Delta m$ ) ด้วยการใช้นิพจน์  $\Delta f$  และความถี่ก้ำกักรูปแบบต่างๆ โดยใช้นิพจน์ (2-9) ในการคำนวณ

ตารางที่ 2-5 ผลการคำนวณค่า  $(\rho_L \eta_L)^{1/2}$  ที่ได้จากค่า  $\Delta f$  ของความถี่ก้ำกักรูปแบบต่างๆ

Resonance Frequency	Unloaded Resonance Frequency ( $\Delta L=0$ )	Loaded Resonance Frequency ( $\Delta L=100\text{nH}$ )	$\Delta f$ (Hz)	$\sqrt{\rho_L \eta_L}$ ( $\text{s}^{-1/2} \text{cm}^{-2} \text{g}$ )
$f_s$	10015888Hz	10010933Hz	4955	0.244756
$f_p$	10038625Hz	10033659Hz	4966	0.243648
$Z_{\min}$	10015888Hz	10010933Hz	4955	0.244756
$f_{P(15\text{pF})}$	10025514Hz	10020554Hz	4960	0.244286
$f_{P(30\text{pF})}$	10021993Hz	10017035Hz	4958	0.244457

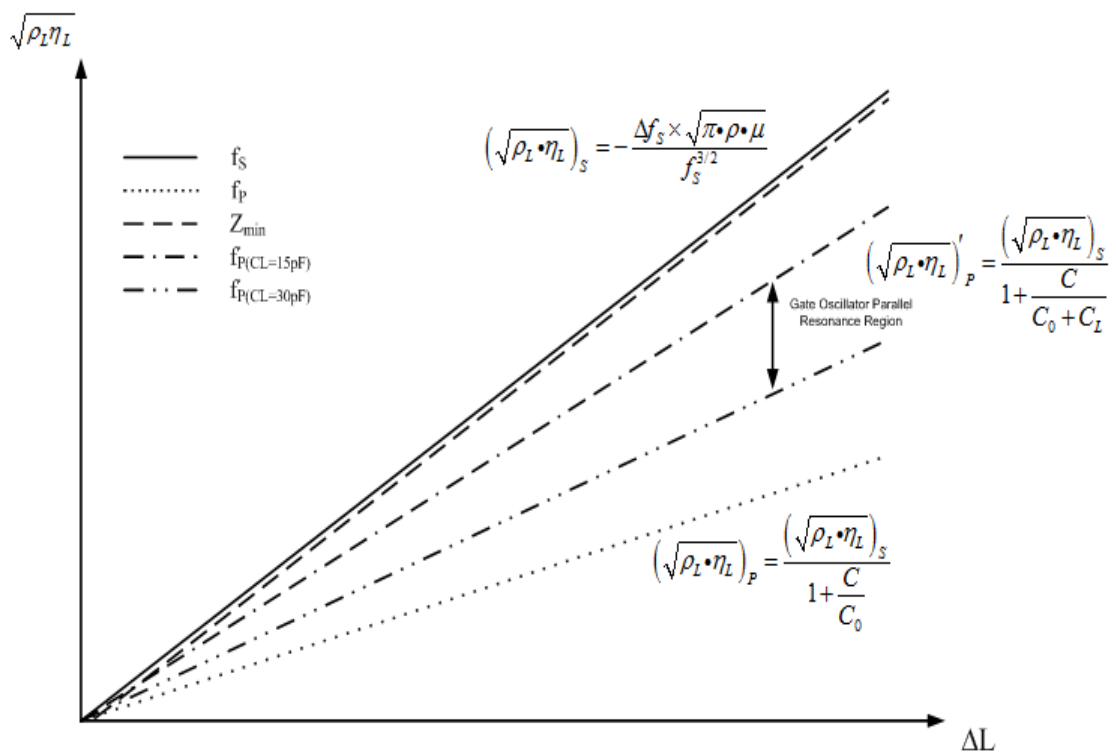
เมื่อค่า  $\sqrt{\rho_L \eta_L}$  ที่ความถี่ก้ำกักรูปแบบต่างๆมีค่าเท่ากับ

$$\left(\sqrt{\rho_L \eta_L}\right)_s = -\frac{\Delta f_s \times \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu}}{f_s^{3/2}} \tag{2-19}$$

$$(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})_P = -\frac{\Delta f_S \times \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu}}{f_S^{3/2} \times \sqrt{1 + C/C_0}} \quad (2-20)$$

$$(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})'_P = -\frac{\Delta f_S \times \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot \mu}}{f_S^{3/2} \times \sqrt{1 + C/(C_0 + C_L)}} \quad (2-21)$$

จากตารางที่ 2-4 ค่าน้ำหนักของโหลดมีค่าแตกต่างกันกับค่าความถี่กัการที่ใช้คำนวณ โดย  $(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})_S$  ที่ได้และค่า  $(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})_P$  จะมีค่าความต่างขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $1 + C/C_0$  และ  $(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})_S$  และ  $(\sqrt{\rho_L \cdot \eta_L})'_P$  จะมีค่าความต่างขึ้นอยู่กับเฟคเตอร์  $1 + C/(C_0 + C_L)$  ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2-16

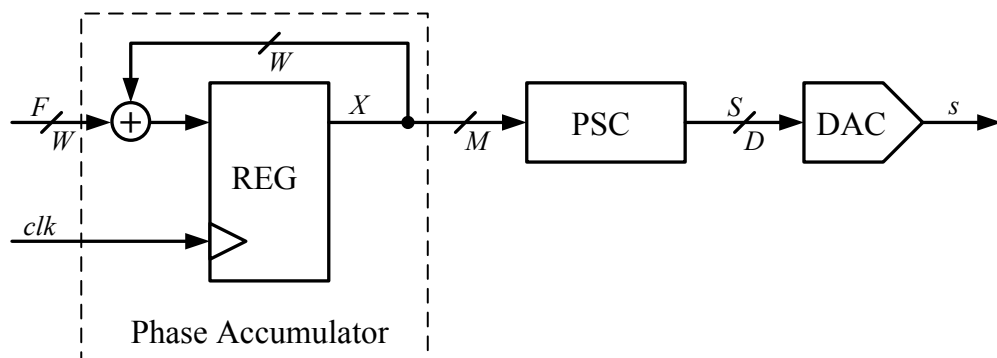


รูปที่ 2-17 เปรียบเทียบค่า  $(\rho_L \eta_L)^{1/2}$  ด้วยความถี่การแบบต่างๆ

## 2.7. วงจรกำเนิดสัญญาณกวาดความถี่ได้อย่างละเอียด

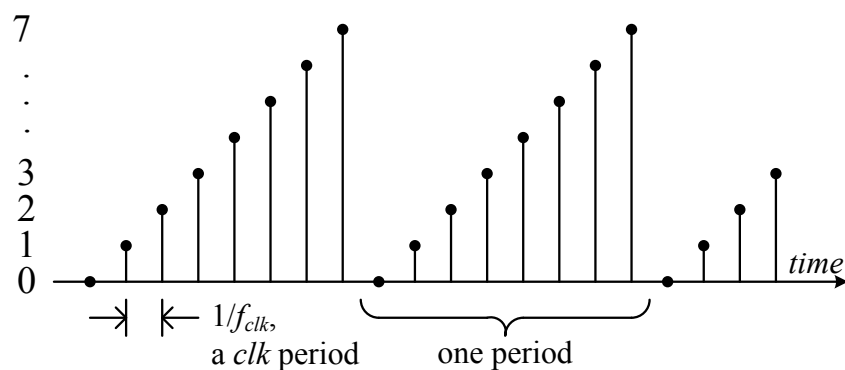
การวัดความถี่ทำรให้กับผลึกควอทซ์ จำเป็นต้องใช้วงจรถ่ายความถี่ชนิดรูปคลื่นไซน์ ซึ่งวงจรถ่ายความถี่รูปคลื่นไซน์มีหลากหลายรูปแบบ แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วงจรถ่ายความถี่ที่สร้างรูปคลื่นไซน์แบบวงจรถ่ายความถี่ดิจิทัลโดยตรง (Direct Digital Synthesizer หรือ DDS)

โครงสร้างของวงจรถ่าย DDS ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ Phase Accumulator, Phase to Sine และ Digital to Analog Converter ดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 โครงสร้างวงจรถ่าย DDS

โดยส่วนแรกของวงจรถ่าย DDS Phase Accumulator จะทำหน้าที่รับอินพุตที่มีค่าดิจิทัลเท่ากับ  $F$  มาบวกกับค่าที่เก็บไว้ในรีจิสเตอร์คือค่า  $X$  โดยมีวงจรถ่ายและรีจิสเตอร์ขนาด  $W$  บิตที่ใช้สำหรับการบวกข้อมูลและเก็บข้อมูล ค่าของรีจิสเตอร์  $X$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ  $F$  ทุกๆคาบของสัญญาณนาฬิกา และเมื่อค่าของ  $X$  ในรีจิสเตอร์มีค่ามากกว่า  $2^W - 1$  รีจิสเตอร์จะเก็บข้อมูลเฉพาะ  $W$  บิตล่างเท่านั้น และจะทิ้งบิตที่เกินช่วงไป ดังนั้นค่าของ  $X$  จึงกลับไปมีค่าต่ำเพื่อรอการเพิ่มค่าใหม่ในรอบต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2-19



### รูปที่ 2-19 ลักษณะเอาต์พุตของ Phase Accumulator ที่มีค่า $W=3$

ส่วนที่สองของวงจร DDS คือ Phase to Sine จะเป็นรวมที่ทำหน้าที่สำหรับคำนวณฟังก์ชัน Sine ด้วยการใส่เฟสเอาต์พุตจาก Phase Accumulator มาคำนวณ ในบางกรณีผู้ออกแบบสามารถทำการปัดทิ้งเพื่อลดขนาดรอมลง โดยใช้บิตนัยสูงของค่า  $X$  ที่เป็นเอาต์พุตของ Phase Accumulator ลดขนาดให้เหลือ  $M$  บิต โดยละเลยบิตนัยต่ำทิ้งไป และทำให้ค่าของ  $X$  ที่ใช้คำนวณฟังก์ชัน Sine หรือ Cosine อยู่ในช่วง  $[0, 2^M - 1]$  เมื่อ  $M < W$  ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณฟังก์ชัน Sine คือ

$$S = \left[ A \times \sin \left( 2\pi \frac{X}{2^M} \right) \right]_{\text{Round}} \quad (2-22)$$

เมื่อ  $A$  คือจำนวนเต็มที่ถูกคูณเข้ากับฟังก์ชัน Sine เพื่อทำหน้าที่เป็นขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ และขนาดของรอมที่ใช้สำหรับคำนวณฟังก์ชันมีค่าเท่ากับ

$$\text{ROM Size} = 2^M \times D \quad (2-23)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของรอมจะขึ้นกับความละเอียดของเฟส  $M$  และความละเอียดการควอนไทส์ของ  $D$

ส่วนที่สามของวงจร DDS คือวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก โดยสัญญาณเข้า  $S$  มีขนาด  $D$  บิต

สัญญาณเอาต์พุตของวงจร DDS อาจจะสรุปรวมได้ว่า ขึ้นอยู่กับค่าของอินพุต  $F$  ว่ามากหรือน้อย เพื่อที่จะทำการบวกให้เกิดโอเวอร์โฟลลวบ่อยแค่ไหน และสัญญาณนาฬิกาที่ง่ายให้วงจรบวก ซึ่งหากสัญญาณนาฬิกามีความถี่ที่สูงวงจรวกก็จะบวกให้เกิดโอเวอร์โฟลลวได้เร็วขึ้นเช่นกัน ดังนั้นความถี่เอาต์พุตของวงจรรอสซิโลเตอร์มีค่าเป็น

$$f_{OUT} = \frac{F}{2^W} \times f_{clk} \quad (2-24)$$

โดยมีความละเอียดในการปรับความถี่เป็นขั้นๆ ละ

$$\text{Frequency Step} = \frac{f_{clk}}{2^W} \quad (2-25)$$

ซึ่งในสมการ (2-24), (2-25) ซึ่งให้เห็นว่าความละเอียดของ  $W$  มีผลต่อความถี่ที่สังเคราะห์ได้ และการบิดค่า  $W$  ทั่วให้เหลือ  $M$  บิต ไม่ได้มีผลต่อความถี่เอาท์พุทที่สังเคราะห์ได้ แต่จะทำให้ขนาดเอาท์พุทที่สังเคราะห์ได้มีความเพี้ยนมากขึ้น

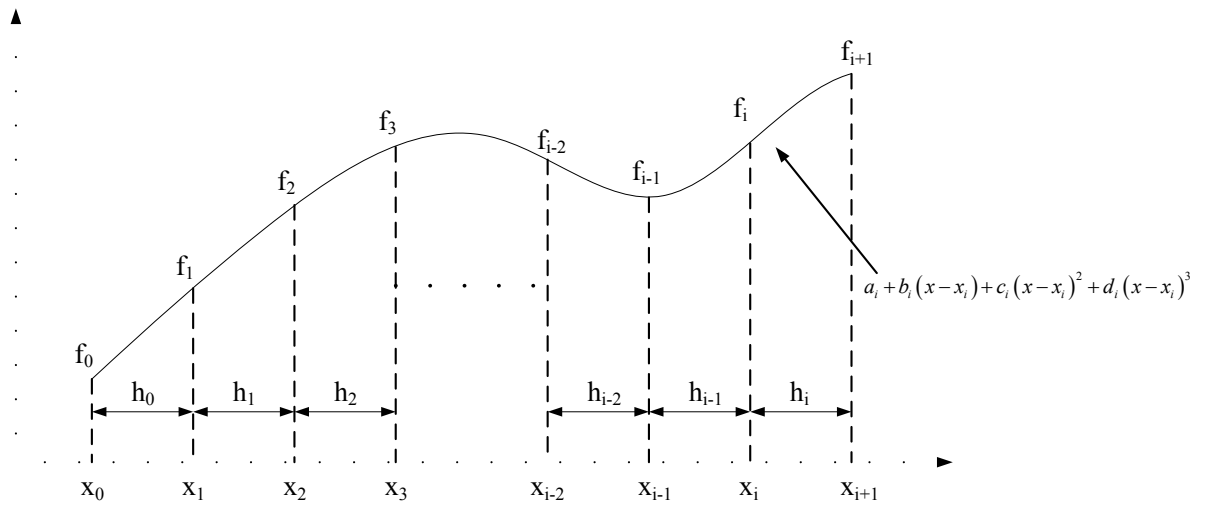
วงจร DDS มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีเสถียรภาพของความถี่สูง ความละเอียดการปรับสูง ขนาดสัญญาณไม่ขึ้นกับความถี่ ช่วงเวลาการเปลี่ยนความถี่สั้น เฟสต่อเนื่องขณะปรับความถี่ มีความยืดหยุ่นในการออกแบบให้เหมาะสมกับงาน อีกทั้งยังสามารถใช้ซอฟต์แวร์เข้าไปควบคุมการสังเคราะห์ความถี่ได้ด้วย ทั้งควบคุมความถี่ของสัญญาณ เฟสของสัญญาณ แม้กระทั่งขนาดของสัญญาณ

## 2.8. การประมาณค่าในช่วง(Interpolation) แบบ Cubic Spline

การประมาณค่าในช่วงคือการประมาณค่าของข้อมูลที่ไม่ทราบค่า ด้วยพฤติกรรมของข้อมูลที่มีอยู่ด้วยฟังก์ชันพหุนาม ซึ่งหากข้อมูลที่มีอยู่มีมากพอจะทำให้การประมาณค่าด้วยฟังก์ชันพหุนามมีความใกล้เคียงกับค่าของข้อมูลจริงมากยิ่งขึ้น

สำหรับการประมาณค่าในช่วงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การประมาณค่าในช่วงแบบ Spine ดีกรี 3 ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์จากการประมาณค่าที่มีความแม่นยำสูง ความซับซ้อนในการคำนวณน้อย และอีกทั้งใช้ได้ดีกับการประมาณค่าพื้นผิวที่มีลักษณะโค้งเว้า ซึ่งเหมาะสมกับลักษณะการประมาณค่าของข้อมูลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในการหาค่าประมาณในช่วง ถ้าข้อมูล  $n+1$  ชุดคือ  $x_0, x_1, \dots, x_n$  ค่า  $x$  จะต้องเรียงลำดับจากน้อยไปมาก จะได้ข้อมูล  $n$  ช่วง ให้พหุนาม  $(x_i, f_i)$  ถึง  $(x_{i+1}, f_{i+1})$  มีรูปสมการทั่วไปดังนี้



รูปที่ 2-20 การประมาณค่าในช่วงฟังก์ชันด้วยพหุนามดีกรี 3 ในแต่ละช่วง

$$S_i(x) = a_i + b_i(x-x_i) + c_i(x-x_i)^2 + d_i(x-x_i)^3 \quad (2-26)$$

เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, n$

$x_i$  คือ ข้อมูลที่  $i$

$x$  คือ จุดที่ต้องการหาค่าประมาณ  $f_x$

โดยที่  $x_i < x < x_{i+1}$

จากสมการที่ (2-26) จะเห็นว่าแต่ละช่วงมีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าคือ  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  และ  $d_i$  ช่วงละ 4 ค่า และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่วงคือ ( $h_i$ )

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (2-27)$$

การหาค่าพารามิเตอร์  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  และ  $d_i$  ทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ก.  $S_i(x)$  เป็นพหุนามดีกรี 3 ในช่วง  $[x_i, x_{i+1}]$  เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, n$

ข. เมื่อแทนค่า  $x_i$  ลงใน  $S_i(x)$  จะต้องได้ค่าเท่ากับ  $f(x_i)$  เสมอ

$$S_i(x) = f_i$$

$$f_i = a_i$$



ค. ตรงจุดที่บรรจบกันของข้อมูลพหุนามแต่ละช่วงที่พบกันจุดนี้ต้องเท่ากัน

$$S_{i+1}(x_{i+1}) = S_i(x_{i+1})$$

ง. อนุพันธ์อันดับหนึ่งที่เชื่อมต่อกภายในแต่ละช่วงจะต้องมีค่าเท่ากัน

$$S'_{i+1}(x_{i+1}) = S'_i(x_{i+1})$$

จ. อนุพันธ์อันดับสองที่เชื่อมต่อกภายในแต่ละช่วงจะต้องมีค่าเท่ากัน

$$S''_{i+1}(x_{i+1}) = S''_i(x_{i+1})$$

ฉ. อนุพันธ์ที่จุดเริ่มต้น อาจเป็นกรณีใดกรณีหนึ่งดังต่อไปนี้

1. Free boundary condition กำหนดให้อนุพันธ์อันดับที่สองที่จุดปลายทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์

$$S''(x_0) = S''(x_n) = 0$$

2. Clamped boundary condition กำหนดให้อนุพันธ์อันดับหนึ่งมีค่าดังนี้

$$S'(x_0) = f'_0$$

$$S'(x_n) = f'_n$$

กำหนดให้

$$f[x_i, x_j] = \frac{f_i - f_j}{x_i - x_j} \quad ; \quad i, j \in [0, n] \quad (2-28)$$

และใช้เงื่อนไข ๑.2 เพื่อทำ Cubic Spline แบบ Clamped boundary condition จะเขียนสมการหาค่า  $c_i$  ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 2h_0 & h_0 & & & & & \\ h_0 & 2(h_0 + h_1) & h_1 & & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & h_{i-2} & 2(h_{i-2} + h_{i-1}) & h_{i-1} & \\ & & & & h_{i-1} & 2h_{i-1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{i-1} \\ c_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3f[x_1, x_0] - 3f'_0 \\ 3(f[x_2, x_1] - f[x_1, x_0]) \\ \vdots \\ 3(f[x_i, x_{i-1}] - f[x_{i-1}, x_{i-2}]) \\ 3f'_i - 3f[x_i, x_{i-1}] \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

หลังจากใช้เมทริกซ์ในสมการที่ (2-29) คำนวณหาค่าพารามิเตอร์  $c_i$  แล้ว  
ค่าพารามิเตอร์  $b_i$ , และ  $d_i$  เมื่อ  $i = 0, 1, \dots, n$  จะหาได้จาก

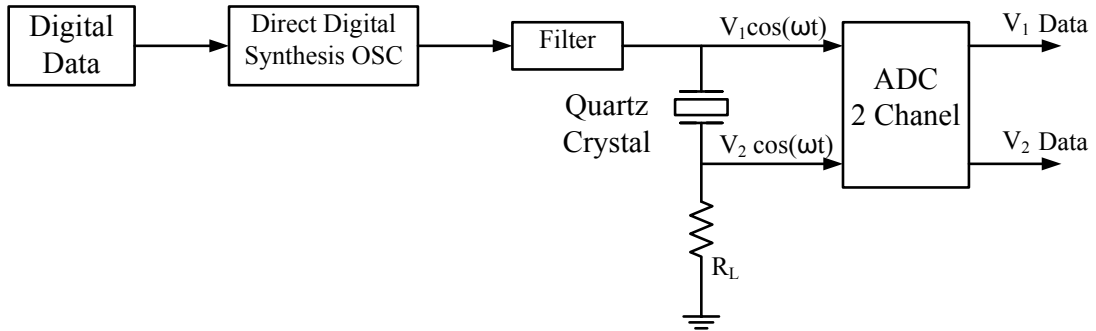
$$d_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{3h_i} \quad (2-30)$$

$$b_i = \frac{1}{h_i}(f_{i+1} - f_i) - \frac{h_i}{3}(2c_i + c_{i+1}) \quad (2-31)$$

หลังจากหาค่าพารามิเตอร์  $b_i$ ,  $c_i$  และ  $d_i$  ให้ใช้สมการที่ (2-26) คำนวณการประมาณค่าของ  
ฟังก์ชันที่ค่า  $x$  โดยที่  $x_i < x < x_{i+1}$

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1. โครงสร้างโดยรวมของระบบวัด



รูปที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของระบบวัด

ระบบวัดความถี่กำหนดแบบกวาดความถี่ จะมีอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3-1 แต่ละตัวมีหน้าที่โดยย่อดังนี้

วงจรร DDS เป็นวงจรถ่ายข้อมูลที่สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับความถี่ตามข้อมูลที่ตั้งไว้ใน Digital Data ได้ละเอียดมาก เพื่อจ่ายความถี่ให้กับผลึกควอทซ์

วงจรรกรองเป็นวงจรรกรองสัญญาณเอาที่พุดของวงจรร DDS เพื่อที่จะกำจัดความถี่ฮาร์โมนิกอื่น ๆ รวมถึงแรงดันไฟตรงทิ้งไป

วงจรรแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 2 ช่องสัญญาณเป็นวงจรรสำหรับชักตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณแต่ละชั่วของผลึกควอทซ์ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาค่าแรงดันตกคร่อมผลึก และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์

$$V_{crystal} = V_1 - V_2 \tag{3-1}$$

$$I_{crystal} = \frac{V_2}{R_L} \tag{3-2}$$

### 3.2. วงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์

วงจรถูกกำเนิดความถี่สำหรับใช้กวาดความถี่ให้กับผลึกควอตซ์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำเป็นต้องใช้วงจรถูกกำเนิดความถี่ที่สร้างสัญญาณรูปไซน์ได้ และสามารถปรับความถี่ได้โดยละเอียด ซึ่งวงจรถูกกำเนิดความถี่ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือวงจร DDS ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.6. และได้เลือกใช้ชิปเบอร์ AD9835 สำหรับใช้สร้างสัญญาณรูปไซน์สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

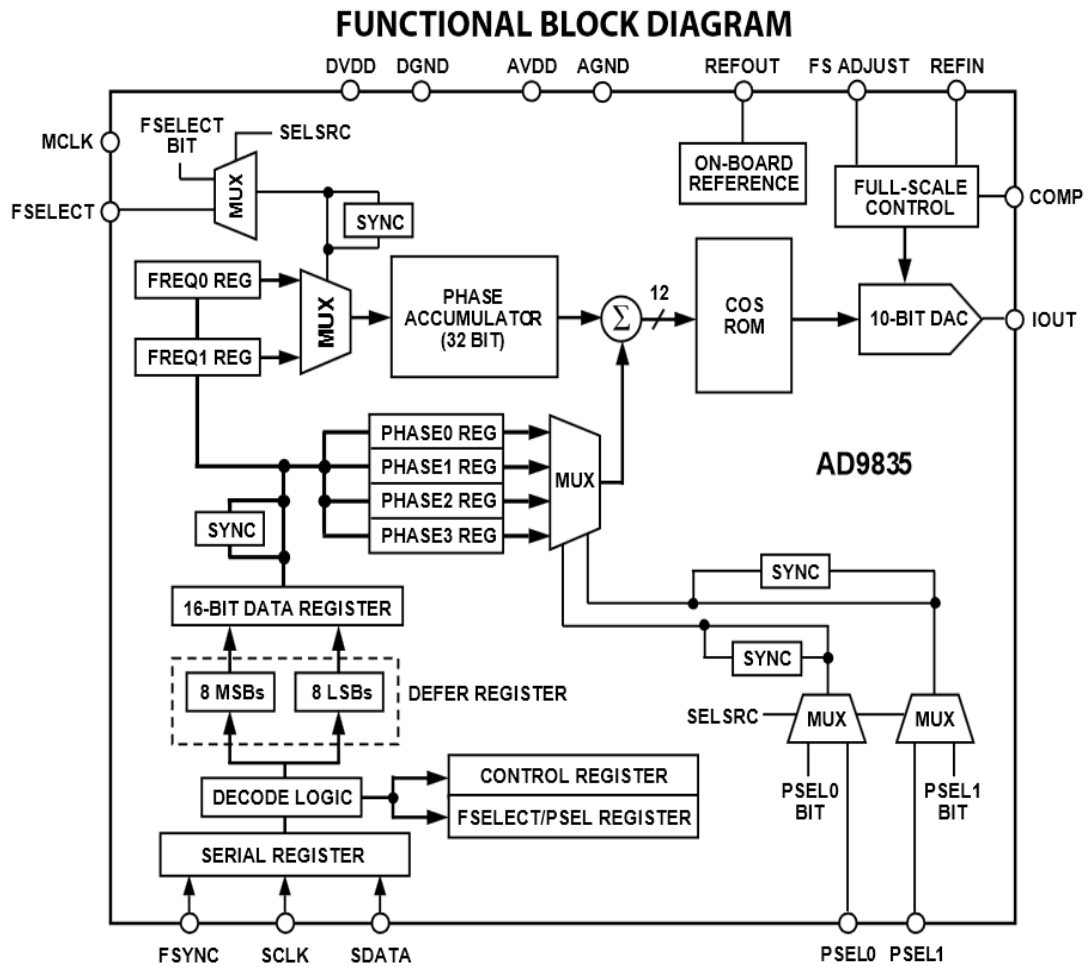
วงจรสร้างสัญญาณรูปไซน์เพื่อใช้สำหรับจ่ายสัญญาณให้กับผลึกควอตซ์ ใช้ชิป AD9835 ของ Analog device ซึ่งสร้างสัญญาณรูปไซน์ด้วยวิธีสังเคราะห์ความถี่ดิจิทัลโดยตรง ทำงานที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 50 MHz ชิปสามารถเลือกสร้างสัญญาณความถี่เอาต์พุตตั้งแต่ 1 Hz - 25 MHz สามารถป้อนอินพุตเป็นข้อมูลดิจิทัลได้ถึง 32 บิต มีความละเอียดสูงสุดเท่ากับ

$$\text{Frequency Step} = \frac{50 \times 10^6}{2^{32}} = 0.01164 \text{ Hz}$$

และสามารถปรับเฟสของสัญญาณเอาต์พุตด้วยข้อมูลดิจิทัลได้ 12 บิต ที่มีความละเอียดสูงสุดที่

$$\phi = \frac{360^\circ}{2^{12}} = 0.08789^\circ$$

ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ Numerical controlled oscillator and Phase accumulator, COS lookup table และ Digital to Analog Converter 10 bit โดยมี การรับส่งข้อมูลผ่าน SPI



รูปที่ 3-2 โครงสร้างภายในของ AD9835

Numerical controlled oscillator and Phase accumulator

วงจรรภายในของชิป AD9835 ประกอบด้วยวงจรวจร Phase Accumulator ขนาด 32 บิต ซึ่งคาบเวลาของสัญญาณรูปไซน์ 0 ถึง  $2\pi$  ถูกกำหนดด้วยความกว้างของเฟสเอาต์พุตของวงจรวจร Phase Accumulator ( $\Delta\text{Phase}$ ) ซึ่งการปรับจูนเฟสเอาต์พุตของวงจรวจร Phase Accumulator ทำได้ด้วยการป้อนข้อมูลดิจิทัลอินพุตขนาด 32 บิต โดยที่ขนาดความกว้างของเฟสเอาต์พุตต้องอยู่ในช่วง  $0 < \Delta\text{Phase} < 2^{32} - 1$  ซึ่งความถี่เอาต์พุตของชิป AD9835 เท่ากับ  $f = \Delta\text{Phase} \times f_{\text{clock}} / 2^{32}$  และเฟสของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ  $\phi = 360^\circ / 2^{12}$

COS lookup table

สำหรับการสร้างสัญญาณเอาต์พุตรูปไซน์จำเป็นต้องแปลงค่าความกว้างของเฟสจากวงจร Phase Accumulator ให้เป็นสัญญาณรูปไซน์ด้วย COS ROM LUT

Digital to Analog Converter 10 bit

ภายในชิป AD9835 มีวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกขนาด 10 บิต ที่มีแหล่งจ่ายกระแสอิมพีแดนซ์สูง ทำให้มีช่วงของการขับโหลดที่กว้างมากสำหรับการจ่ายกระแสให้โหลดที่มีการใช้งานความถี่ หรือความเร็วของสัญญาณเอาต์พุตที่แตกต่างกัน

### 3.3. การวัดกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์

ในการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ในสมการที่ (2-4) จำเป็นต้องใช้เป็นค่าขนาดของอิมพีแดนซ์ (Magnitude) ดังนั้นสมการที่ (2-4) จึงถูกแยกออกเป็นค่าความต้านทานจริง และค่าความต้านทานเชิงจินตภาพ

$$Z = \hat{R} + j\hat{X} \quad (3-3)$$

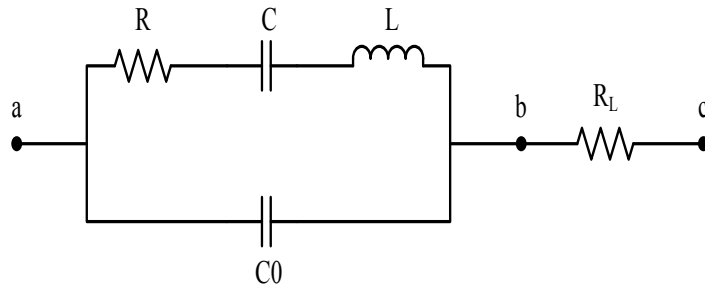
เมื่อค่าความต้านทานจริงเป็น

$$\hat{R} = \frac{R}{\left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC} + X_0}{X_0}\right)^2} \quad (3-4)$$

และค่าความต้านทานเชิงจินตภาพมีค่าเท่ากับ

$$\hat{X} = \frac{X_0 \left[ \left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC}}{X_0}\right)^2 + \frac{X_{LC}}{X_0} \right]}{\left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC} + X_0}{X_0}\right)^2} \quad (3-5)$$

ในการวัดค่ากระแสของผลึกควอทซ์จำเป็นต้องต่อ  $R_L$  อนุกรมกับผลึกควอทซ์ดังรูปที่ 3-3 เพื่อวัดแรงดันตกคร่อมของ  $R_L$  และนำค่าแรงดันไปหาค่ากระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์



รูปที่ 3-3 วงจรสำหรับวัดกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ด้วยการต่อ  $R_L$  อนุกรมกับผลึกควอทซ์

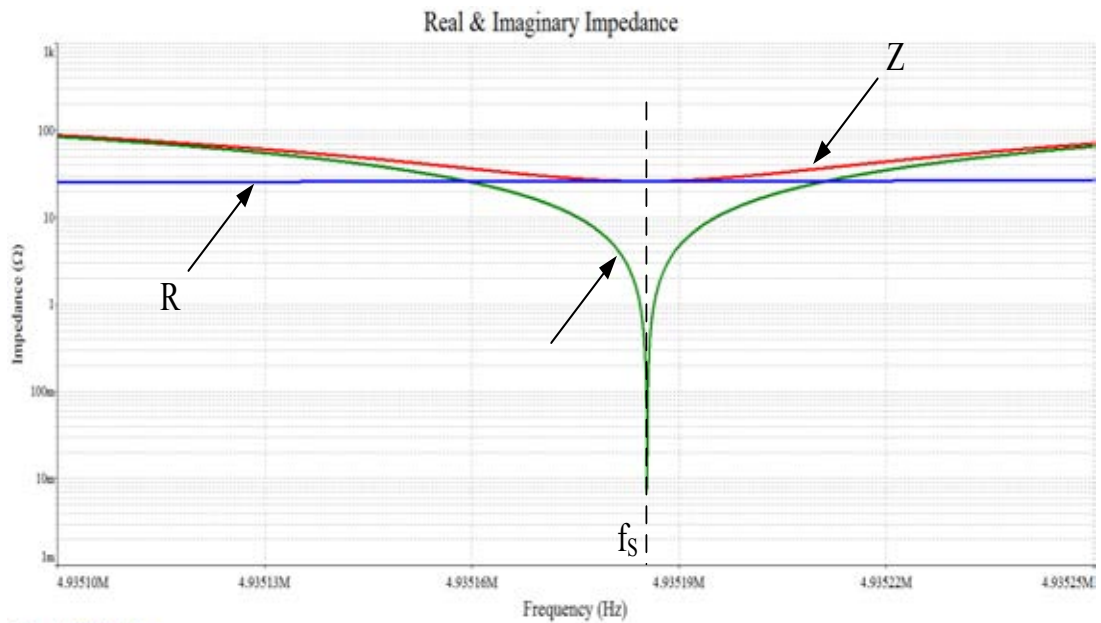
ดังนั้นขนาดของอิมพีแดนซ์รวมจึงมีค่าเป็น

$$|Z_T| = \sqrt{(\hat{R} + R_L)^2 + (\hat{X})^2} \quad (3-6)$$

จากแรงดันเอาต์พุตของวงจรกำเนิดความถี่ที่มีค่าเป็น  $V_m \cos(\omega t)$  และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์มีค่าเท่ากับ  $I_m \cos(\omega t + \phi)$  ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์รวมได้เท่ากับ

$$|Z_T| = \frac{V_m \cos(\omega t)}{I_m \cos(\omega t + \phi)} \quad (3-7)$$

ที่ความถี่  $f_s$  ค่าความต้านทานเชิงจินตภาพ ( $\hat{X}$ ) มีค่าประมาณศูนย์ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ของผลึกควอทซ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานจริง ( $\hat{R}$ ) ที่ความถี่  $f_s$  ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) ค่าความต้านทานจริง ( $R$ ) และค่าความต้านทานเชิงจินตภาพ ( $X$ ) ที่ความถี่  $f_s$

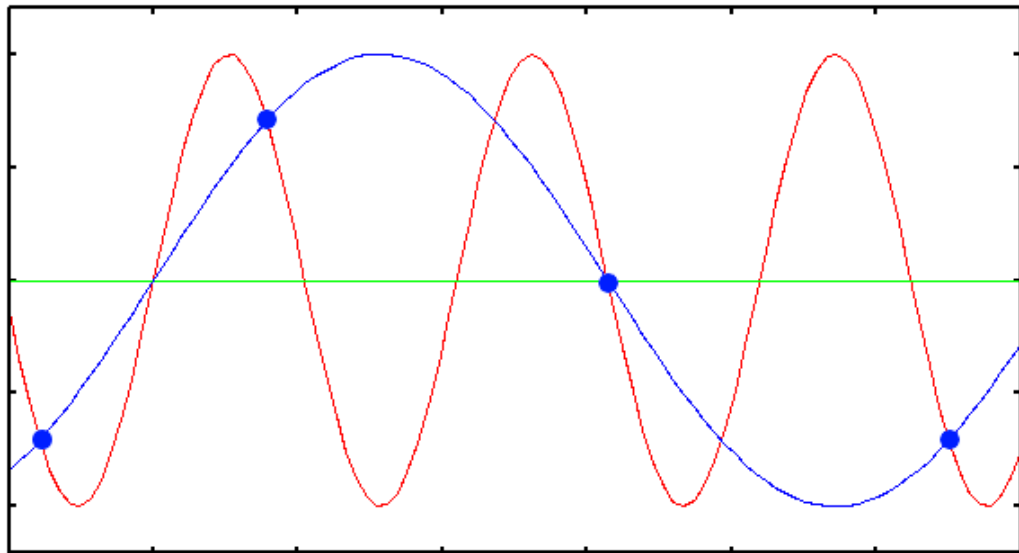
เมื่อค่าความต้านทานเชิงจินตภาพมีค่าประมาณศูนย์ที่ความถี่  $f_s$  ( $X=0$ ) ทำให้ที่ความถี่  $f_s$  ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์มีค่าเท่ากับ  $Z = R$  และที่ความถี่  $f_s$  ค่าอิมพีแดนซ์ของ  $L$  และ  $C$  ในวงจรสมมูลมีค่าเท่ากับศูนย์  $X_{LC} = -1/(\omega C) + \omega L = 0$  ดังนั้นค่า  $R = R \cdot X_0^2 / (R^2 + X_0^2)$  แต่ที่ความถี่  $f_s$ ,  $R \ll X_0$  จึงสามารถประมาณค่าของ  $Z \approx R$  จากรูปที่ 3-4 ค่ายอดของกระแสมีค่าสูงสุดที่ความถี่  $f_s$  โดยมีค่าอิมพีแดนซ์รวมมีค่าเท่ากับ  $|Z_T| = R + R_L$

$$R + R_L = \frac{V_m}{I_m} \quad (3-8)$$



### 3.4. วิธีหาค่ายอดของสัญญาณ

โดยปกติแล้วการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจำเป็นต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของไนควิสต์ (Nyquist) คือความถี่ในการซัดตัวอย่างต้องมากกว่าความถี่ของสัญญาณ 2 เท่าขึ้นไป แต่ในงานวิจัยนี้สัญญาณอนาลอกที่ต้องการทำการแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลเป็นสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีความแตกต่างของข้อมูลแค่ขนาดของสัญญาณ และข้อมูลที่ต้องการได้จากการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลคือค่าของขนาดสัญญาณ ซึ่งไม่ต้องการค่าความถี่หรือรูปร่างของสัญญาณ ดังนั้นจึงสามารถใช้ความถี่ในการซัดตัวอย่างที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า Undersampling

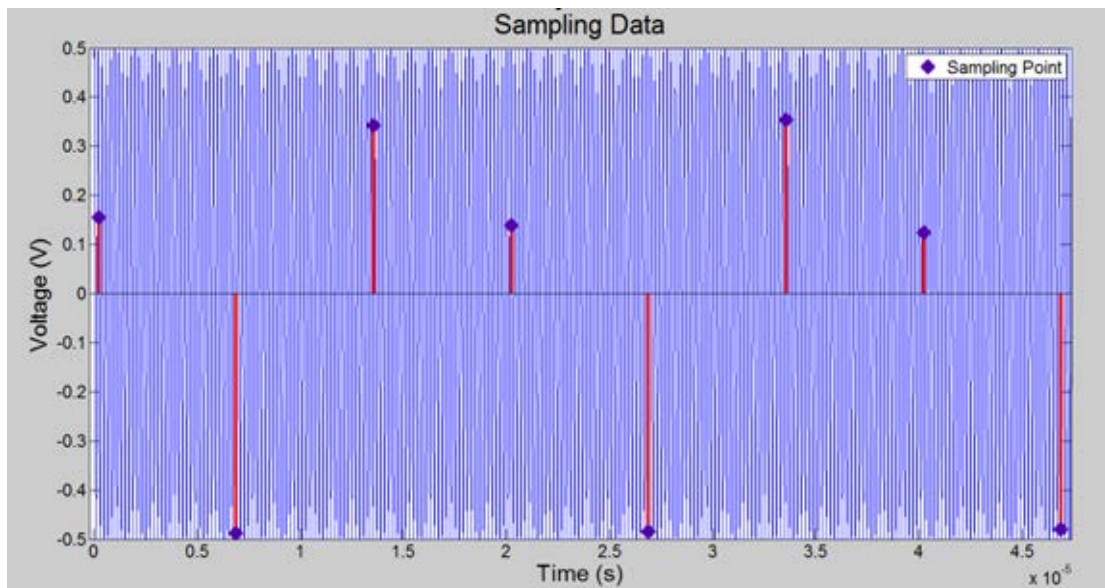


รูปที่ 3-5 การใช้ความถี่ในการซัดตัวอย่างของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของสัญญาณอินพุตได้

ซึ่งค่าดิจิตอลที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะไม่ได้ทำให้ทราบถึงค่าสูงสุดของข้อมูลที่ทำการซัดตัวอย่าง แต่ก็สามารถนำค่าดิจิตอลที่ได้ไปทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อทำการวาดรูปสัญญาณขึ้นใหม่ ถึงแม้รูปคลื่นสัญญาณที่วาดขึ้นใหม่จะมีค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ก็สามารถหาค่าสูงสุดของรูปคลื่นได้โดยมีค่าไม่ต่างจากเดิม

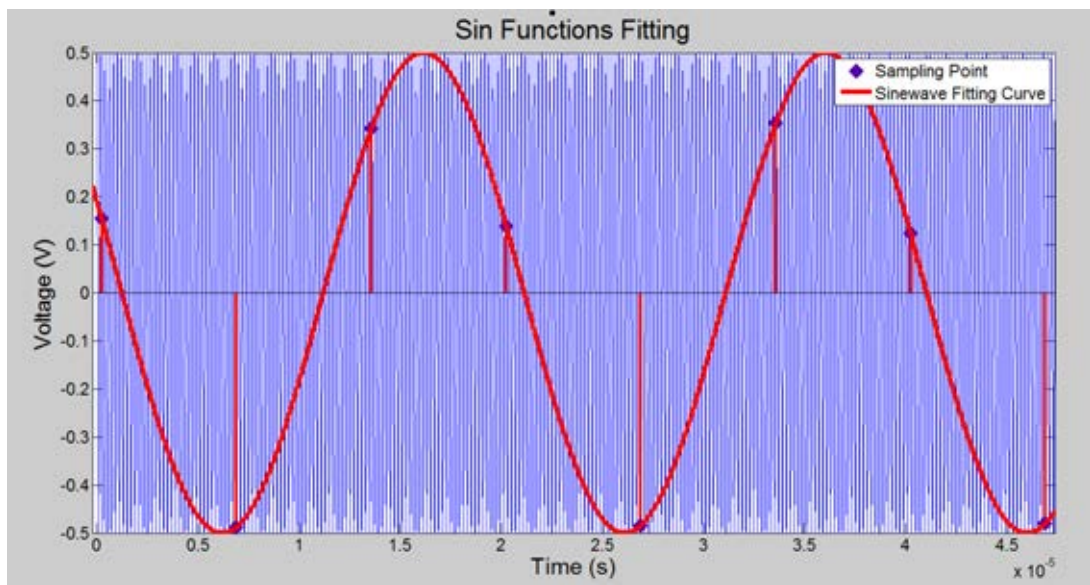
3.4.1. การ Fitting Curve ข้อมูลจากวงจร ADC เพื่อหาค่ายอดของสัญญาณแรงดัน และกระแส

เนื่องจากการวัดค่าสัญญาณแรงดัน และกระแสได้ใช้วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลที่มีความถี่ของการซั๊กตัวอย่างน้อยกว่าความถี่ของสัญญาณที่ต้องการซั๊กตัวอย่าง (Undersampling) ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 การซั๊กตัวอย่างสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่ายอดของแรงดัน และกระแสจึงได้ทำการนำค่าข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากการซั๊กตัวอย่างมาทำการ Fitting Curve ให้เป็นฟังก์ชันรูปไซน์ ผลของการทำ Fitting Curve สัญญาณทำให้สามารถหาค่ายอดของสัญญาณแรงดัน และกระแสได้ดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 การทำการ Fitting Curve ข้อมูลดิจิทัลให้เป็นฟังก์ชันรูปไซน์

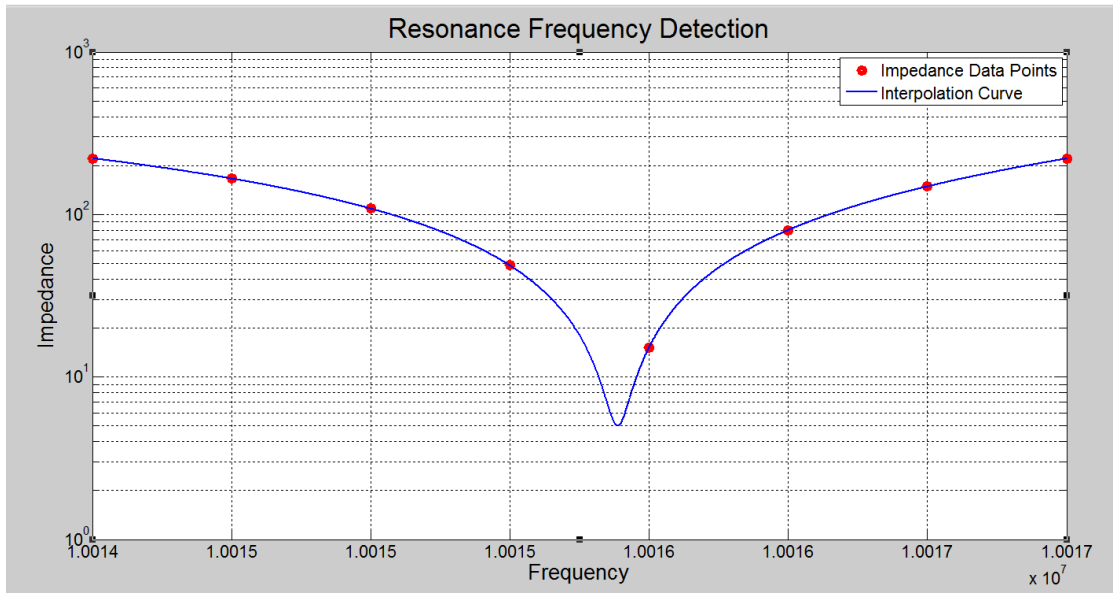
### 3.5. การทำการประมาณค่าในช่วงสัญญาณเพื่อหาค่าความถี่กำลัง

ข้อมูลค่ายอดของแรงดัน และกระแสที่ได้จากการ Fitting Curve จะถูกนำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ด้วยค่าของแอมพลิจูดของแรงดัน และกระแสที่วัดจากจุดความถี่เดียวกัน

$$Z_{fn} = \frac{V_{fn}}{I_{fn}} \quad (3-9)$$

เมื่อ  $V_{fn}$  คือค่าแอมพลิจูดของแรงดันที่ความถี่  $f_n$   
 $I_{fn}$  คือค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ความถี่  $f_n$   
 $Z_{fn}$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ที่ความถี่  $f_n$

ซึ่งข้อมูลอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ที่วัดจากความถี่ต่างๆจะถูกนำมาทำการประมาณค่าในช่วงแบบ Spline เพื่อหาค่าความถี่  $f_s$  โดยการหาจุดต่ำสุดของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์

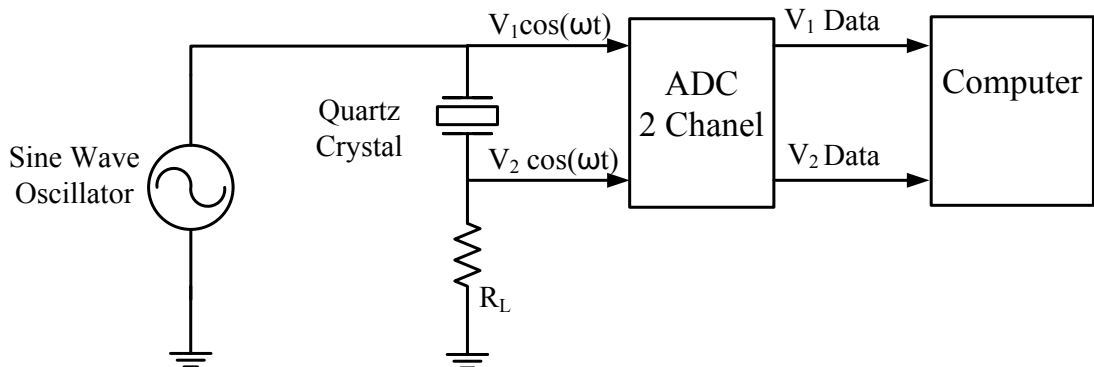


รูปที่ 3-8 การทำการประมาณค่าในช่วงหาค่าความถี่  $f_s$  โดยการหาจุดต่ำสุดของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ ด้วยข้อมูลกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์

## บทที่ 4 การทดลอง

### 4.1. การทดลองหาความถี่กำลังด้วยวิธีการวัดความถี่แบบตรง

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการหาค่าความถี่  $f_s$  ด้วยวิธีการวัดความถี่ โดยใช้วิธีเพิ่มความถี่จากต่ำไปสูงจนกระทั่งสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอตซ์ได้ ซึ่งความต้องการเบื้องต้นของการวัดความถี่เพื่อหาค่าความถี่  $f_s$  จำเป็นต้องใช้วงจรกำเนิดความถี่ที่สามารถปรับความถี่ได้ละเอียดมากๆ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ความละเอียดในการปรับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ขั้นละ 1 Hz หลังจากจ่ายความถี่ให้กับผลึกควอตซ์แล้วจะทำการวัดแรงดันตกคร่อมผลึกควอตซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอตซ์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ที่ทำการวัดความถี่ ซึ่ง ณ ความถี่ที่วัดค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ได้ค่าต่ำที่สุดจะเป็นความถี่  $f_s$  ของผลึกควอตซ์



รูปที่ 4-1 การทดลองทำการวัดความถี่เพื่อหาค่าความถี่กำลัง

จากการทดลองหาค่าความถี่  $f_s$  ด้วยวิธีการวัดความถี่แบบตรง จะใช้ตัวต้านทานโหลดขนาด  $5\Omega$  ต่ออนุกรมกับผลึกควอตซ์ และทำการวัดหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมค่าแรงดันตกคร่อมผลึกควอตซ์ ( $V_1-V_2$ ) และค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_L$  ( $V_2$ ) ใช้ค่าแรงดัน  $V_1$  และ  $V_2$  คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จากค่าแรงดัน ซึ่งปรากฏว่าสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดได้ที่ความถี่ 4,998,415 Hz

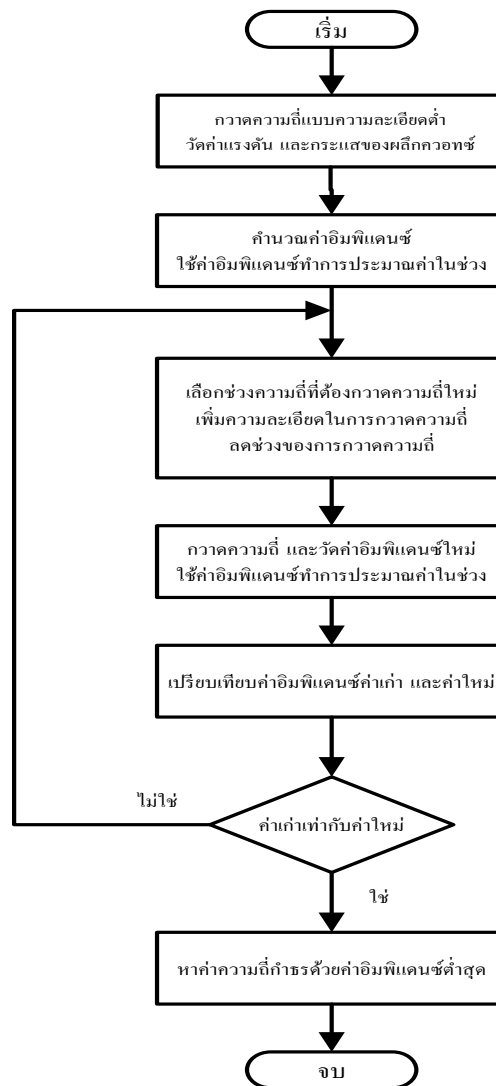
โดยมี	ค่าแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และตัวต้านทาน $R_L$ ( $V_1$ )	432 mV
	ค่าแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน $R_L$ ( $V_2$ )	86 mV
	กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน $R_L$ มีค่าเท่ากับ	$86 \text{ mV} / 5\Omega = 17.2 \text{ mA}$
จากสมการที่ (3-8)	$R + R_L = \frac{V_m}{I_m}$	

สามารถคำนวณค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์มีค่าเท่ากับ  $20.3333 \Omega$

ผลการทดลองหาค่าความถี่  $f_s$  ด้วยวิธีกวาดความถี่แบบตรง พบว่าใช้เวลาในการกวาดความถี่นาน เนื่องจากปรับความถี่หลายความถี่เพื่อจ่ายให้ผลึกควอทซ์ อีกทั้งต้องวัดค่าแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์หลายครั้งตามจำนวนความถี่ที่ใช้กวาดให้ผลึกควอทซ์

#### 4.2. วิธีการทดลองแบบการประมาณค่าในช่วง

จากหัวข้อ 4.1. พบว่าการหาค่าความถี่  $f_s$  ด้วยวิธีกวาดความถี่ใช้เวลานานในการกวาดหาความถี่  $f_s$  เนื่องจากเสียเวลาในการสร้างสัญญาณรูปไซน์ในแต่ละความถี่ อีกทั้งยังเสียเวลาให้กับการวัดแรงดัน และกระแสอีกด้วยเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอวิธีการหาความถี่  $f_s$  ด้วยการกวาดความถี่แบบหยาบๆ แล้ววัดค่าแรงดัน และกระแส หลังจากนั้นทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จากค่าแรงดัน และกระแสที่ความถี่ต่างๆ และสุดท้ายทำการนำข้อมูลอิมพีแดนซ์มาทำการการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาค่าความถี่  $f_s$  โดยมีขั้นตอนของการกวาดความถี่แบบหยาบๆดังนี้



รูปที่ 4-2 โฟลวชาร์ตการทำงานของวิธีการกวาดความถี่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

#### 4.3. วิธีการทดลองแบบการประมาณค่าในช่วงที่ขึ้นการกวาดความถี่ต่างกัน

ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำการทดลองโดยใช้โครงสร้างจากหัวข้อที่ 4.2. ที่ได้นำเสนอวิธีการกวาดความถี่แบบหยาบๆ เพื่อหาค่าความถี่  $f_s$  ของผลึกควอทซ์ และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ไปทำการประมาณค่าในช่วง เพื่อหาค่าความถี่  $f_s$  ของผลึกควอทซ์ และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการกวาดความถี่แบบตรงในหัวข้อที่ 4.1.

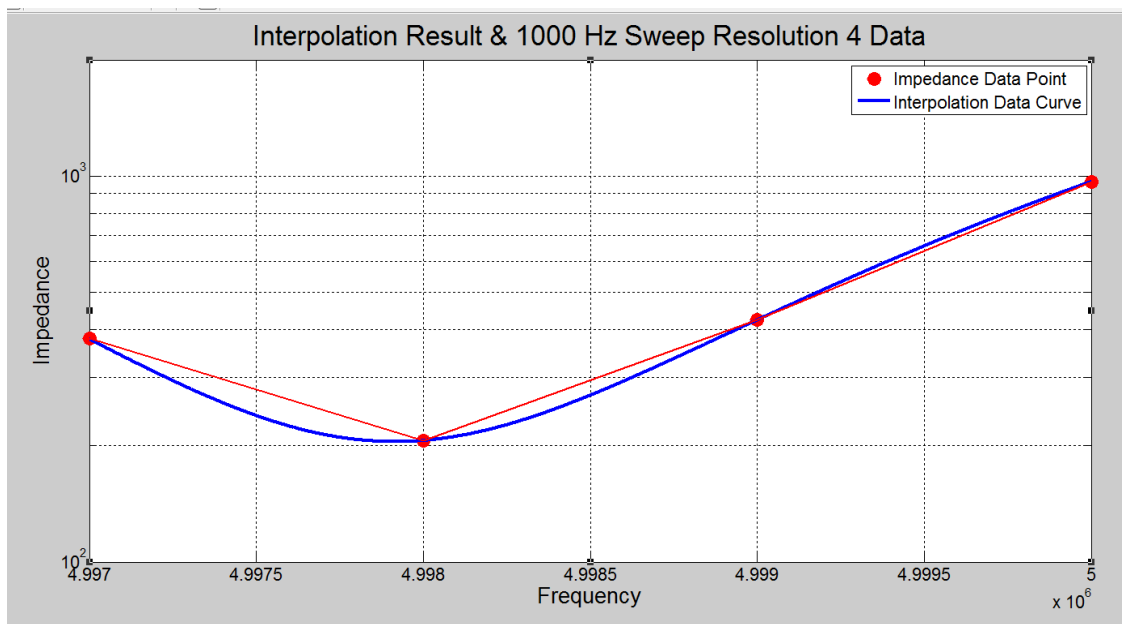
สำหรับการประมาณประมาณค่าในช่วงข้อมูลซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า ยิ่งข้อมูลที่น่าไปทำการประมาณค่าในช่วงมีข้อมูลมากเท่าไรค่าความแม่นยำยิ่งสูงมากขึ้นเท่านั้น

ซึ่งจำนวนข้อมูลที่น้อยที่สุดสำหรับการประมาณค่าในช่วงคือ จำนวน 3 ข้อมูล สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จำนวน 4 ค่าในการทดลองทุกๆขั้นของการกวาดความถี่ หลังจากนั้นจะทำการประมาณค่าในช่วงไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าที่ได้จากการประมาณค่าในช่วงค่าก่อนหน้าจะเท่ากับค่าล่าสุด หรือมีค่าใกล้เคียงกัน โดยใช้การประมาณค่าในช่วงแบบ Cubic Spline ด้วยโปรแกรม Matlab

การหาความถี่กัการด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 1,000 Hz

ตารางที่ 4-1 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จากกวาดความถี่ขั้นละ 1,000 Hz

ความถี่ที่จ่ายให้ ผลึกควอทซ์ (Hz)	ค่าแรงดันสูงสุดที่ตก คร่อมผลึกควอทซ์ (mV)	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหล ผ่านผลึกควอทซ์ (mA)	ค่าอิมพีแดนซ์ของ ผลึกควอทซ์ ( $\Omega$ )
4,997,000	568	1.48	383.7837
4,998,000	600	2.84	211.2676
4,999,000	528	1.232	428.5714
5,000,000	544	0.56	971.4285



รูปที่ 4-3 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่กัการด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 1,000 Hz



ผลของการประมาณค่าในช่วงที่มีขึ้นในการกวาดความถี่ 1,000 Hz สามารถหาค่า ความถี่ก้ำอรรถของผลึกควอทซ์ และความต้านทานของผลึกควอทซ์มีค่าดังนี้

ความถี่ก้ำอรรถของผลึกควอทซ์ 4,997,917 Hz

ความต้านทานของผลึกควอทซ์ 204.8684  $\Omega$

หลังจากนั้นให้ทำการเลือกช่วงสำหรับการกวาดความถี่ใหม่ เพื่อลดช่วงความถี่สำหรับการกวาดความถี่ลง และเพิ่มความละเอียดของการกวาดความถี่ขึ้นเป็น 500 Hz

การหาค่าความถี่ก้ำอรรถด้วยการกวาดความถี่ขึ้นละ 500 Hz

ตารางที่ 4-2 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 500 Hz

ความถี่ที่จ่ายให้ผลึกควอทซ์ (Hz)	ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมผลึกควอทซ์ (mV)	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ (mA)	ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ ( $\Omega$ )
4,997,500	576	2.08	276.9230
4,998,000	600	2.92	205.4794
4,998,500	440	6	73.3333
4,999,000	528	1.232	428.5714



รูปที่ 4-4 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ก้ำอรรถด้วยการกวาดความถี่ขึ้นละ 500 Hz

ผลของการประมาณค่าในช่วงที่มีด้วยการกวาดความถี่ขึ้นละ 500 Hz สามารถหาค่า ความถี่กำลังของผลึกควอทซ์ และความต้านทานของผลึกควอทซ์มีค่าดังนี้

ความถี่กำลังของผลึกควอทซ์ 4,998,480 Hz

ความต้านทานของผลึกควอทซ์ 67.9081  $\Omega$

มีค่าความต่างของความถี่กำลังของผลึกควอทซ์ที่ใช้การกวาดความถี่ขึ้นละ 1,000 Hz และ 500 Hz เท่ากับ

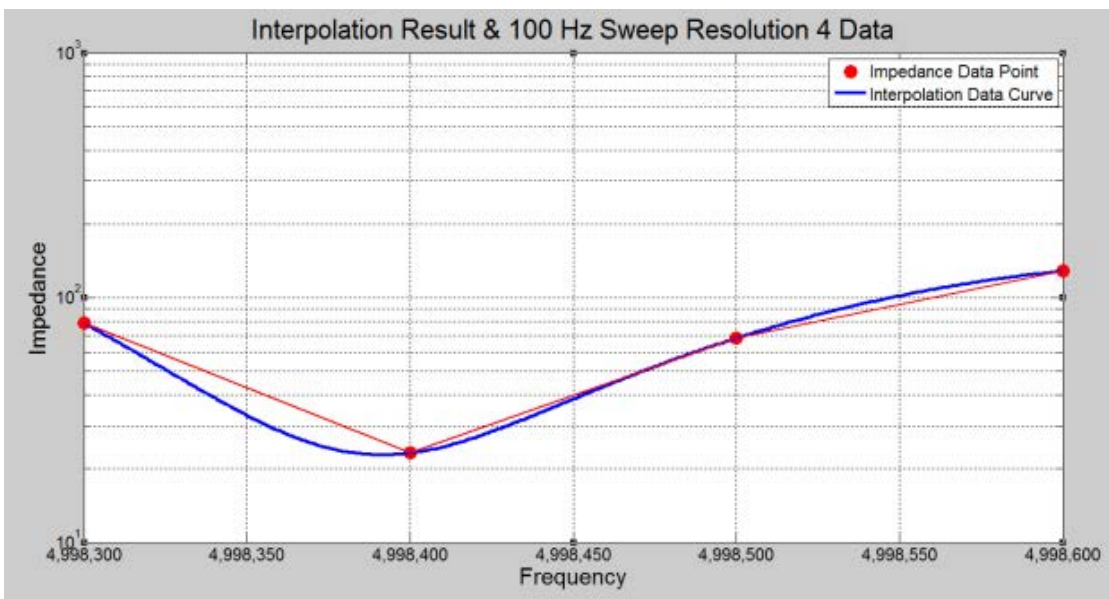
$$|f_{S_{1kHz\_sweep}} - f_{S_{500Hz\_sweep}}| = |4,997,917 - 4,998,480| \text{ Hz} = 563 \text{ Hz}$$

จากการกวาดความถี่ 1,000 Hz และ 500 Hz ค่าความถี่กำลังที่ได้ทั้งสองค่ามีค่าแตกต่างกันถึง 563 Hz ซึ่งเป้าหมายของการวัดคือหาค่าความต่างจากการประมาณค่าในช่วงค่าก่อนหน้า และค่าล่าสุดไปเรื่อยๆจนกว่าค่าจากการประมาณค่าในช่วงค่าก่อนหน้า และค่าล่าสุดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งค่าที่ได้ตอนนี้ยังมีค่าต่างจากศูนย์อยู่มาก ดังนั้นจึงทำการเลือกช่วงสำหรับการกวาดความถี่ใหม่อีกครั้ง และเพิ่มความละเอียดของการกวาดความถี่ขึ้นเป็น 100 Hz

การหาค่าความถี่กำลังด้วยการกวาดความถี่ขึ้นละ 100 Hz

ตารางที่ 4-3 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จากกวาดความถี่ขึ้นละ 100 Hz

ความถี่ที่จ่ายให้ผลึกควอทซ์ (Hz)	ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมผลึกควอทซ์ (mV)	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ (mA)	ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ ( $\Omega$ )
4,998,300	780	9.28	84.0517
4,998,400	620	22	28.1818
4,998,500	440	6	73.3333
4,998,600	480	3.6	133.3333



รูปที่ 4-5 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่กำธรรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 100 Hz

ผลของการประมาณค่าในช่วงด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 100 Hz สามารถหาค่าความถี่กำธรรของผลึกควอทซ์ และความต้านทานของผลึกควอทซ์มีค่าดังนี้

ความถี่กำธรรของผลึกควอทซ์ 4,998,392 Hz

ความต้านทานของผลึกควอทซ์ 22.7911 Ω

มีค่าความต่างของความถี่กำธรรของผลึกควอทซ์ที่ใช้การกวาดความถี่ขั้นละ 500 Hz และ 100 Hz เท่ากับ

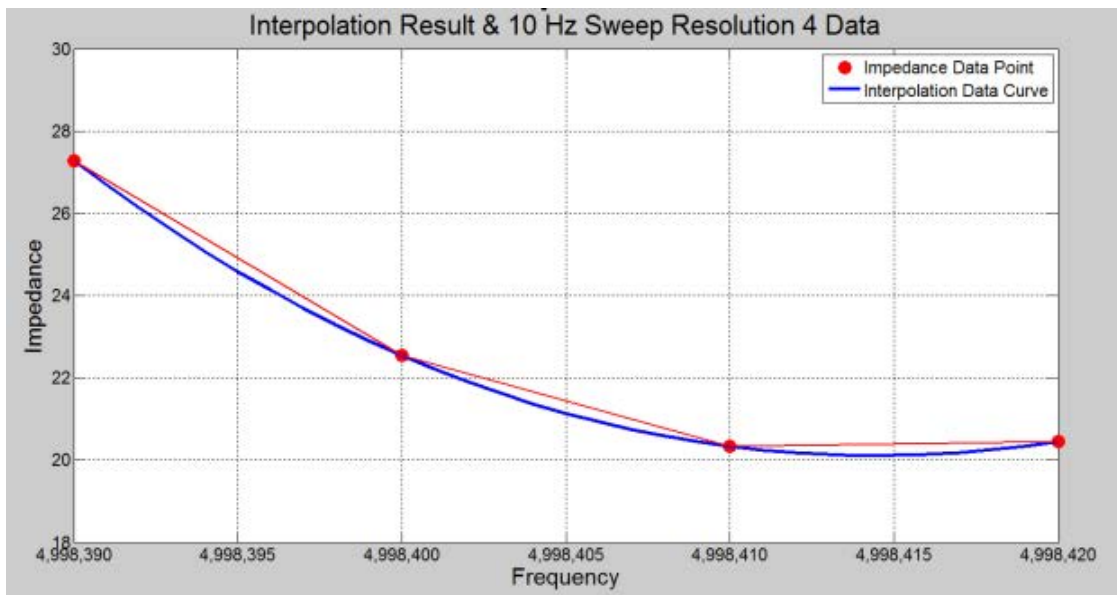
$$|f_{S\_500Hz\_sweep} - f_{S\_100Hz\_sweep}| = |4,998,480 - 4,998,392| Hz = 88 Hz$$

จากการกวาดความถี่ 500 Hz และ 100 Hz ค่าความถี่กำธรรที่ได้ทั้งสองค่ามีค่าแตกต่างกันถึง 88 Hz ซึ่งค่าความต่างที่ได้ตอนนี้ยังมีค่าต่างจากศูนย์อยู่มาก ดังนั้นจึงทำการเลือกช่วงสำหรับการกวาดความถี่ใหม่อีกครั้ง และเพิ่มความละเอียดของการกวาดความถี่ขั้นเป็น 10 Hz

การหาค่าความถี่กำรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz

ตารางที่ 4-4 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอท์ซ์จากกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz

ความถี่ที่จ่ายให้ผลึกควอท์ซ์ (Hz)	ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมผลึกควอท์ซ์ (mV)	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านผลึกควอท์ซ์ (mA)	ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอท์ซ์ ( $\Omega$ )
4,998,390	736	22.4	32.2807
4,998,400	584	21.2	27.5471
4,998,410	456	18	25.3333
4,998,420	392	15.4	25.4545



รูปที่ 4-6 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่กำรด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz

ผลของการประมาณค่าในช่วงด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz สามารถหาค่าความถี่กำรของผลึกควอท์ซ์ และความต้านทานของผลึกควอท์ซ์มีค่าดังนี้

ความถี่กำรของผลึกควอท์ซ์                      4,998,415 Hz

ความต้านทานของผลึกควอท์ซ์                      20.1480  $\Omega$

มีค่าความต่างของความถี่กำรของผลึกควอท์ซ์ที่ใช้การกวาดความถี่ขั้นละ 100 Hz และ 10 Hz เท่ากับ

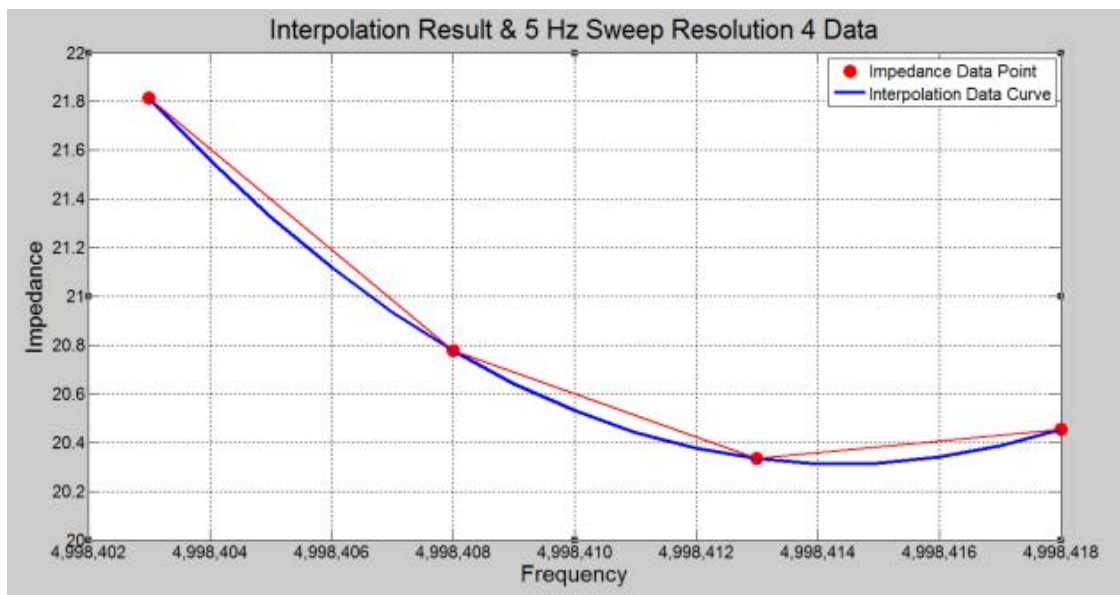
$$|f_{S_{100Hz\_sweep}} - f_{S_{10Hz\_sweep}}| = |4,998,392 - 4,998,415| Hz = 23 Hz$$

จากการกวาดความถี่ 100 Hz และ 10 Hz ค่าความถี่ที่กระทำที่ได้อัตโนมัติทั้งสองค่ามีค่าแตกต่างกันถึง 23 Hz ซึ่งค่าความถี่ที่ได้ตอนนี้ยังมีค่าต่างจากศูนย์อยู่มาก ดังนั้นจึงทำการเลือกช่วงสำหรับการกวาดความถี่ใหม่อีกครั้ง และเพิ่มความละเอียดของการกวาดความถี่ขึ้นเป็น 5 Hz

การหาค่าความถี่ที่กระทำด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 5 Hz

ตารางที่ 4-5 ค่าของอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์จากกวาดความถี่ขั้นละ 5 Hz

ความถี่ที่จ่ายให้ผลึกควอทซ์ (Hz)	ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมผลึกควอทซ์ (mV)	ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ (mA)	ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ ( $\Omega$ )
4,998,403	504	19.6	37.1428
4,998,408	456	18	32.2807
4,998,413	440	17.2	27.5471
4,998,418	392	15.4	25.3333



รูปที่ 4-7 การทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาความถี่ที่กระทำด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 5 Hz

ผลของการประมาณค่าในช่วงด้วยการกวาดความถี่ขั้นละ 5 Hz สามารถหาค่าความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ และความต้านทานของผลึกควอตซ์มีค่าดังนี้

ความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ 4,998,415 Hz

ความต้านทานของผลึกควอตซ์ 20.3131  $\Omega$

มีค่าความต่างของความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ที่ใช้การกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz และ 5 Hz เท่ากับ

$$|f_{S_{10Hz\_sweep}} - f_{S_{5Hz\_sweep}}| = |4,998,415 - 4,998,415| \text{ Hz} = 0 \text{ Hz}$$

จากการกวาดความถี่ขั้นละ 10 Hz และ 5 Hz ค่าความถี่กำลังที่ได้ทั้งสองค่ามีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงหยุดการกวาดความถี่ที่ 5 Hz

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบผลการทดลองหาค่าความถี่กำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่แบบตรง และการประมาณค่าในช่วง

Sweeping Step	$f_{\text{error}}$	$R_{\text{error}}$	$\%R_{\text{error}}$
1000 Hz	498	184.5351	907.5512
500 Hz	65	47.5748	233.974
100 Hz	23	2.4578	12.0875
10 Hz	0	0.1853	0.9113
5 Hz	0	0.0202	0.09934

#### 4.4. สรุปผลการทดลอง

แม้ว่าค่าความถี่กำลัง และค่าความต้านทานของผลึกควอตซ์ที่ได้จากการทำการประมาณค่าในช่วงค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ที่กวาดความถี่ด้วยความละเอียด 1,000 Hz จะมีค่าผิดพลาดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกวาดความถี่อย่างละเอียดที่ความละเอียด 1 Hz แต่ก็สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปทำนายช่วงของความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ได้ ซึ่งทำให้ขอบเขตที่จะทำให้อกวาดความถี่แล้วเจอความถี่กำลังแคบลง ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 5.2 สามารถทำนายช่วงของความถี่กำลังได้ที่ 4,997,500 Hz – 4,998,500 Hz ซึ่งจะได้ทำการการประมาณค่าในช่วงที่ระดับ

ความละเอียดมากขึ้น หลังจากได้ทำนายขอบเขตของความถี่กำลังด้วยผลจากการทำการประมาณค่าในช่วงของค่าอิมพีแดนซ์ด้วยความละเอียดในการกวาดความถี่ 1,000 Hz ทำให้ขอบเขตของการกวาดความถี่เพื่อหาความถี่กำลังแคบลงแล้ว ก็ทำการวัดอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ และทำการประมาณค่าในช่วงของค่าอิมพีแดนซ์ด้วยความละเอียดในการกวาดความถี่ 500 Hz พบว่ายังคงมีค่าความผิดพลาดที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การกวาดความถี่อย่างละเอียดที่ความละเอียด 1 Hz แต่สามารถนำผลจากการทำการประมาณค่าในช่วงของค่าอิมพีแดนซ์ด้วยความละเอียดในการกวาดความถี่ 500 Hz ไปทำนายค่าขอบเขตของความถี่กำลังของผลึกควอตซ์ได้สำหรับการกวาดที่ละเอียดมากขึ้น ทำให้ขอบเขตของการกวาดความถี่เพื่อหาความถี่กำลังแคบลงยิ่งขึ้น และต่อด้วยการทำการประมาณค่าในช่วงของค่าอิมพีแดนซ์ด้วยความละเอียดในการกวาดความถี่ 100 Hz พบว่ามีค่าความผิดพลาดที่ไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การกวาดความถี่อย่างละเอียดที่ความละเอียด 1 Hz เพื่อให้ได้ค่าของความถี่กำลัง และความต้านทานของผลึกที่แม่นยำขึ้นจึงทำการประมาณค่าในช่วงอีกครั้งด้วยความละเอียดในการกวาดความถี่ 10 Hz หลังจากทำการประมาณค่าในช่วงที่ความละเอียดในการกวาดความถี่ 10 Hz ให้ผลลัพธ์ที่ดีมาก พบว่าค่าความผิดพลาดของความถี่กำลังมีค่าเป็น 0% และความต้านทานของผลึกควอตซ์มีค่าความผิดพลาดไป 0.9113% และได้ทำการทดลองต่อที่ความละเอียดในการกวาดความถี่ 5 Hz เพื่อเพิ่มความแม่นยำของค่าที่วัดได้ให้เป็นไปดังโพลีกราฟการทำงานดังรูปที่ 4-2 โดยพบว่าที่ความละเอียดในการกวาดความถี่ 5 Hz มีค่าความถี่กำลังเท่ากับที่ความละเอียดในการกวาดความถี่ 10 Hz ดังนั้นจึงได้หยุดการกวาดความถี่ไว้ที่ 5 Hz ซึ่งที่ความละเอียดในการกวาดความถี่ 5 Hz ค่าความผิดพลาดของความถี่กำลังมีค่าเป็น 0% และความต้านทานของผลึกควอตซ์มีค่าความผิดพลาดไป 0.09934% ด้วยการวัดค่าอิมพีแดนซ์ทั้งหมด 20 ค่า

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1. สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาความถี่กำจร และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ด้วยวิธีการกวาดสัญญาณความถี่รูปไซน์ให้กับผลึกควอทซ์ ซึ่งจากที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ถึงวิธีต่างๆที่ใช้ในการหาค่าความถี่กำจรของผลึกควอทซ์ ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการวัดความถี่กำจรโดยใช้ผลึกควอทซ์เป็นรีโซเนเตอร์ของวงจรเกตออกสซิลเลเตอร์ เพราะวงจรง่ายต่อการออกแบบ มีราคาถูก ใช้ส่วนประกอบของวงจรง่าย และวัดความถี่ได้ง่าย แต่ความถี่กำจรที่ได้จากวงจรเกตออกสซิลเลเตอร์ไม่สะท้อนความถี่แท้จริงของผลึกควอทซ์ เนื่องจากโหลดตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับวงจร ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และการใช้วงจรเกตออกสซิลเลเตอร์ไปวัดหาค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ก็ทำได้ยากอีกด้วย ส่วนวิธีการใช้เฟส  $0^\circ$  ของแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์มาหาค่าความถี่กำจรก็เป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียที่การออกแบบวงจรสำหรับวัดเฟสของแรงดัน และกระแสนั้นทำได้ยาก ทำให้วงจรมีความซับซ้อนมาก ส่วนวิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ใช้การกวาดความถี่ให้ผลึกควอทซ์เพื่อหาค่าความถี่กำจร ก็เป็นอีกวิธีที่มีความแม่นยำสูงเช่นกัน แต่จำเป็นต้องใช้วงจรถ่ายทอดความถี่ที่มีความละเอียดในการปรับความถี่สูง ทำให้มีความซับซ้อนในการออกแบบวงจรถ่ายทอดความถี่ และเสียเวลาในการหาค่าความถี่กำจรเสียมาก เพราะใช้เวลานานสำหรับการสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่จะใช้กวาดความถี่ให้ผลึกควอทซ์ รวมไปถึงใช้เวลานานในการวัดค่าแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ด้วยเช่นกัน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีเพื่อลดข้อด้อยในจุดนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอให้มีการกวาดความถี่ของวงจรออกสซิลเลเตอร์ให้ผลึกควอทซ์แบบหยาบๆดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3 หลังจากนั้นจะวัดค่าแรงดันตกคร่อมผลึกควอทซ์ และกระแสที่ไหลผ่านผลึกควอทซ์ เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกที่ความถี่นั้นๆ หลังจากนั้นจะนำค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆมาทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดต่ำสุด ซึ่ง ณ จุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดต่ำสุดจะเป็นความถี่กำจรของผลึกควอทซ์

จากการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ด้วยการกวาดความถี่แบบหยาบๆให้ผลึกควอทซ์ และนำข้อมูลอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์มาทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของผลึกควอทซ์ เริ่มด้วยการกวาดความถี่ที่มีความละเอียด 1,000 Hz

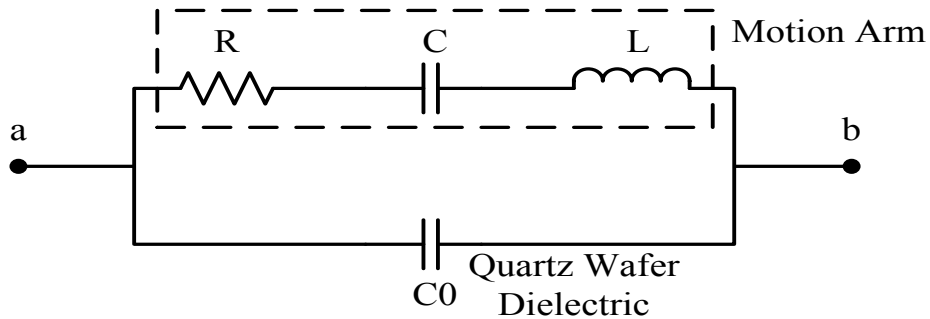


เพื่อหาขอบเขตของความถี่กำรเบื้องต้น หลังจากนั้นจะทำการกวาดความถี่ที่ความละเอียด 500 Hz, 100 Hz, 10 Hz และ 5 Hz ตามลำดับ ซึ่งจากการเก็บข้อมูลของค่าอิมพีแดนซ์เพื่อทำการประมาณค่าในช่วงสามารถหาค่าความถี่กำรได้โดยใช้ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์เพียง 20 ค่า ก็สามารถหาค่าความถี่กำร และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ได้เช่นเดียวกับการกวาดความถี่อย่างละเอียดด้วยความละเอียดที่ 1 Hz ได้ตั้งการทดลองในบทที่ 4 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ปรากฏว่าค่าความถี่กำรที่ได้จากการทำการประมาณค่าในช่วงมีค่าเท่ากับค่าความถี่กำรที่ได้จากการกวาดความถี่โดยละเอียด ( $f_{error} = 0\%$ ) และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ที่ได้จากการทำการประมาณค่าในช่วงมีค่าไม่ต่างจากค่าความต้านทานที่ได้จากการกวาดความถี่โดยละเอียดมากนัก ( $R_{error} = 0.09934\%$ )

5.2. ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาต่อ

5.2.1. การนำโครงสร้างวงจรไปพัฒนาต่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรสมมูลของผลึกควอทซ์

จากโครงสร้างวงจรที่ใช้สำหรับวัดค่าความถี่กำร และค่าความต้านทานของผลึกควอทซ์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถนำไปพัฒนาต่อสำหรับหาค่า พารามิเตอร์ต่างๆของผลึกควอทซ์ในวงจรสมมูลได้



รูปที่ 5-1 วงจรสมมูลของผลึกควอทซ์

จากการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ด้วยวงจรสมมูลดังรูปที่ 5-1 โดยใช้สมการของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ในการวิเคราะห์

$$Z = \frac{-X_{LC}X_0 + jR \cdot X_0}{R + j(X_{LC} + X_0)} \tag{5-1}$$

และแยกค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่าจริง และค่าเชิงจินตภาพ

$$Z = \hat{R} + j\hat{X} \quad (5-2)$$

ค่าจริงของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์มีค่าเท่ากับ

$$\hat{R} = \frac{R}{\left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC} + X_0}{X_0}\right)^2} \quad (5-3)$$

และค่าเชิงจินตภาพมีค่าเท่ากับ

$$\hat{X} = \frac{X_0 \left[ \left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC}}{X_0}\right)^2 + \frac{X_{LC}}{X_0} \right]}{\left(\frac{R}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{X_{LC} + X_0}{X_0}\right)^2} \quad (5-4)$$

หาค่าขนาดของค่าอิมพีแดนซ์จากค่าจริง และค่าเชิงจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์

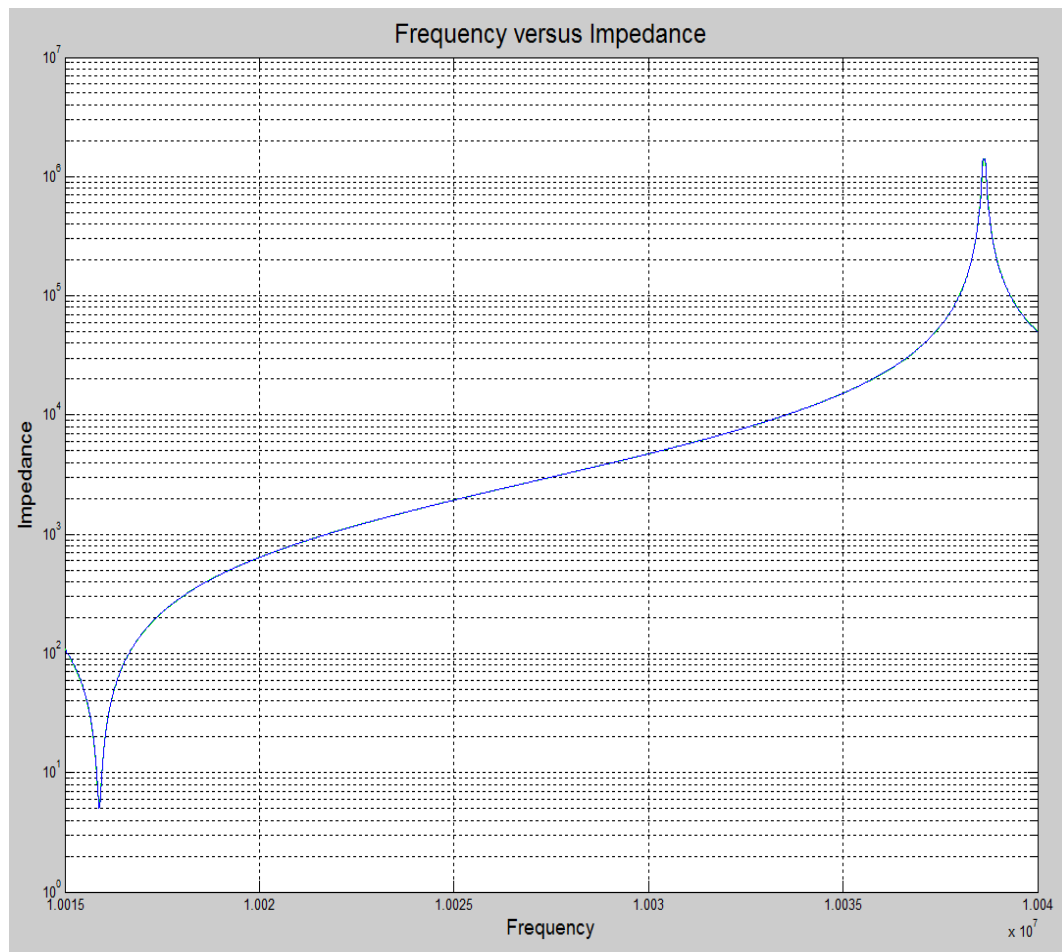
$$|Z| = \sqrt{(\hat{R})^2 + (\hat{X})^2}$$

$$|Z| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)^2 \left(R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L\right)^2\right)}{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L - \frac{1}{\omega C_0}\right)^2}} \quad (5.5)$$

ย้ายข้างสมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ R

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L\right)^2 \left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)^2 - \left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L - \frac{1}{\omega C_0}\right)^2 \cdot Z^2}{Z^2 - \left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)^2}} \quad (5-6)$$

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของผลึกควอทซ์ด้วยวิธีนี้ จำเป็นต้องหาค่าของความถี่ก้ำกรบแบบอนุกรม และความถี่ก้ำกรบแบบขนานของผลึกควอทซ์ก่อน



รูปที่ 5-2 ความถี่ก้ำกรบแบบอนุกรม และขนานของผลึกควอทซ์

เมื่อความถี่ก้ำกรบแบบอนุกรมมีค่าเป็น

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-7)$$

และความถี่ก้ำกรบแบบขนานมีค่าเป็น

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left(1 + \frac{C}{C_0}\right)^{1/2} \quad (5-8)$$

ในสมการที่ (5-8) ความถี่กำหนดแบบขนานพารามิเตอร์ C และพารามิเตอร์  $C_0$  มีค่าเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์ตรงนี้มาใช้เป็นให้ค่าพารามิเตอร์ C มีค่าเท่ากับค่าคงที่ a คูณกับพารามิเตอร์  $C_0$  ได้ดังสมการที่ (5-9)

$$\frac{C}{C_0} = a \quad (5-9)$$

และใช้สมการที่ (5-7) และ (5-8) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ a และความถี่กำหนดของผลึกควอตซ์ดังสมการที่ (5-10)

$$a = \left( \frac{f_p}{f_s} \right)^2 - 1 \quad (5-10)$$

ซึ่งสามารถนำสมการที่ (5-9) ไปแทนในสมการที่ (5-6) ได้

$$|R| = \sqrt{\frac{\left( -\frac{1}{\omega C} + \omega L \right)^2 \left( -\frac{a}{\omega C} \right)^2 - \left( -\frac{1+a}{\omega C} + \omega L \right)^2 \cdot Z^2}{Z^2 - \left( -\frac{a}{\omega C} \right)^2}} \quad (5-11)$$

### 5.2.2. ตัวอย่างการหาค่าพารามิเตอร์

วิธีนี้ได้ทำการทดลองด้วยวงจรสมมูลของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ 10MHz ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 5-1 และวัดค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ที่ความถี่ต่างๆจำนวน 4 ค่าดังตารางที่ 5-2 โดยที่มีค่าความถี่กำหนดแบบอนุกรมเท่ากับ 10,015,887Hz และค่าความถี่กำหนดแบบขนานเท่ากับ 10,038,625Hz

ตารางที่ 5-1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลชนิด AT cut ความถี่ 10MHz

ความถี่ผลึกควอตซ์	R ( $\Omega$ )	L (mH)	C (pF)	$C_0$ (pF)
10 MHz	5	10.1	0.025	5.5

ตารางที่ 5-2 ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอตซ์ที่วัดได้จากคสามถี่ต่างๆ 4 ความถี่

ความถี่ที่วัดค่าอิมพีแดนซ์	ค่าอิมพีแดนซ์
$\omega_1 = 10.012$ MHz	$Z_1 = 421.5535 \Omega$
$\omega_2 = 10.014$ MHz	$Z_2 = 221.30388 \Omega$
$\omega_3 = 10.016$ MHz	$Z_3 = 15.33553 \Omega$
$\omega_4 = 10.018$ MHz	$Z_4 = 295.56896 \Omega$

ก. การหาค่าพารามิเตอร์ L และ C

เริ่มด้วยคำนวณค่าคงที่ a ด้วยค่าค่าความถี่กัาจรแบบอนุกรม และค่าค่าความถี่กัาจรแบบขนาน หลังจากนั้นแทนค่าความถี่ที่วัดค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์ของผลึกควอทซ์ทั้ง 4 จุดที่ได้จากการวัด และค่าคงที่ a ลงในสมการที่ (5-11) ซึ่งค่าคงที่ a ที่คำนวณได้จากสมการที่ (5-10) มีค่าเท่ากับ 0.454545 ซึ่งจะได้

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega_1 C} + \omega_1 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_1 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_1 C} + \omega_1 L\right)^2 \cdot Z_1^2}{Z_1^2 - \left(-\frac{a}{\omega_1 C}\right)^2}} \quad (5-12)$$

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega_2 C} + \omega_2 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_2 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_2 C} + \omega_2 L\right)^2 \cdot Z_2^2}{Z_2^2 - \left(-\frac{a}{\omega_2 C}\right)^2}} \quad (5-13)$$

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega_3 C} + \omega_3 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_3 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_3 C} + \omega_3 L\right)^2 \cdot Z_3^2}{Z_3^2 - \left(-\frac{a}{\omega_3 C}\right)^2}} \quad (5-14)$$

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega_4 C} + \omega_4 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_4 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_4 C} + \omega_4 L\right)^2 \cdot Z_4^2}{Z_4^2 - \left(-\frac{a}{\omega_4 C}\right)^2}} \quad (5-15)$$

กำหนดให้สมการ (5-11) = (5-12) และ (5-13) = (5-14)

$$\frac{\left(-\frac{1}{\omega_1 C} + \omega_1 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_1 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_1 C} + \omega_1 L\right)^2 \cdot Z_1^2}{Z_1^2 - \left(-\frac{a}{\omega_1 C}\right)^2} = \frac{\left(-\frac{1}{\omega_2 C} + \omega_2 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_2 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_2 C} + \omega_2 L\right)^2 \cdot Z_2^2}{Z_2^2 - \left(-\frac{a}{\omega_2 C}\right)^2} \quad (5-16)$$

$$\frac{\left(-\frac{1}{\omega_3 C} + \omega_3 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_3 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_3 C} + \omega_3 L\right)^2 \cdot Z_3^2}{Z_3^2 - \left(-\frac{a}{\omega_3 C}\right)^2} = \frac{\left(-\frac{1}{\omega_4 C} + \omega_4 L\right)^2 \left(-\frac{a}{\omega_4 C}\right)^2 - \left(-\frac{1+a}{\omega_4 C} + \omega_4 L\right)^2 \cdot Z_4^2}{Z_4^2 - \left(-\frac{a}{\omega_4 C}\right)^2} \quad (5-17)$$

ใช้สมการที่ (5-16) และ (5-17) ในการแก้สมการสองตัวแปร หาค่าของพารามิเตอร์ L และ C และได้คำตอบจากการแก้สมการทั้งหมด 16 คำตอบ

ตารางที่ 5-3 คำตอบที่ได้จากการแก้สมการสองตัวแปร

คำตอบที่	ค่าพารามิเตอร์ L	ค่าพารามิเตอร์ C
1	4.0753	$1.2635 \times 10^{15}$
2	$6.7421 \times 10^{-6}$	$3.7694 \times 10^{-11}$
3	$1.0099 \times 10^{-2}$	$2.4999 \times 10^{-14}$
4	$5.3232 \times 10^{-4}$	$4.7669 \times 10^{-13}$

สำหรับคำตอบของค่าพารามิเตอร์ L และ C ที่ได้จากการแก้สมการ จะถูกนำไปคำนวณด้วยสมการที่ (5-7) ซึ่งเป็นสมการความถี่ก้ำกรบแบบอนุกรมของผลึกควอตซ์ และนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่ก้ำกรบแบบอนุกรมของผลึกควอตซ์ที่ 10MHz และคำตอบที่ถูกต้องคือ  $L = 1.0099 \times 10^{-2}$  และ  $C = 2.4999 \times 10^{-14}$

ข. การหาค่าพารามิเตอร์  $C_0$  และ R

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ C แล้วจะใช้สมการที่ 5-9 ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์  $C_0$  หลังจากนั้นใช้สมการที่ 5-6 ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ R

$$C_0 = \frac{C}{a} = \frac{2.5 \times 10^{-14}}{4.54545 \times 10^{-3}} = 5.4997 \times 10^{-12} F$$

$$|R| = \sqrt{\frac{\left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L\right)^2 \left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)^2 - \left(-\frac{1}{\omega C} + \omega L - \frac{1}{\omega C_0}\right)^2 \cdot Z^2}{Z^2 - \left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)^2}} = 5.41055 \Omega$$

ค. ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 5-4 ค่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าจริง	ค่าจากการทดลอง	ความคลาดเคลื่อน
R	5 $\Omega$	5.41005 $\Omega$	8.201 %
L	10.1 mH	10.0999 mH	0.00099 %
C	0.025 pF	0.024999 pF	0.004%
C <sub>0</sub>	5.5 pF	5.4997 pF	0.005454%

## รายการอ้างอิง

- [1] G. Sauerbrey, "Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung", *Zeitschrift für Physik*, Vol. 155, No. 2, 1959, pp. 206-222.
- [2] T. Nakamoto and T. Kobayashi, "Development of circuit for measuring both Q variation and resonant frequency shift of quartz crystal microbalance", *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 41, No. 6, 1994, pp. 806-811.
- [3] I. D. Avramov, "A 0-Phase Circuit for QCM-Based Measurements in Highly Viscous Liquid Environments", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 5, No. 3, 2005, pp. 425-432.
- [4] W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, New York: Van Nostrand, 1942, p.309.
- [5] K. K. Kanazawa and J. G. Gordon, "Frequency of a quartz microbalance in contact with liquid," *Anal. Chem.*, vol. 57, pp. 1770–1771, 1985.
- [6] R. Borngraeber, J. Schroeder, R. Lucklum, and P. Hauptmann, "Is an oscillator based measurement adequate in a liquid environment?," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 49, no. 9, pp. 199–206, Sep. 1991.



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสายชล ส่องเจิม เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง จากสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554