

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลออกดีโอ  
ต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์

QUALITY TESTING OF DIGITAL AUDIO FILTERS  
TO FINITE COEFFICIENT EFFECTS



T117546



ศักรินทร์ ปิ่นสุภาเกียรติ  
SAKKARIN PINSUPAKEAT

ประธาน ปุพพบุญ  
PRATHAN POOPABUN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 117546  
วัน,เดือน,ปี :- 5 ต.ค. 2554.

b. 12343110  
i. ....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**QUALITY TESTING OF DIGITAL AUDIO FILTERS  
TO FINITE COEFFICIENT EFFECTS**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อปริญญาโทภาษาไทย

การทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลออกดีโอ  
ต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์

ชื่อปริญญาโทภาษาอังกฤษ

QUALITY TESTING OF DIGITAL AUDIO FILTERS  
TO FINITE COEFFICIENT EFFECTS

ผู้ดำเนินโครงการ

นาย ศักรินทร์ ปิ่นสุภาเกียรติ รหัสนักศึกษา 50011554  
นาย ประธาน ปุพพญู รหัสนักศึกษา 50010906

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล

ปริญญาโทฉบับนี้ ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลโอดีโอ  
ต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์

ผู้ดำเนินโครงการ

นาย ศัคริน ปิ่นสุภาเกียรติ รหัสนักศึกษา 50011554  
นาย ประธาน ปุพบุญ รหัสนักศึกษา 50010906

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลโอดีโอต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์ ซึ่งใช้ตัวกรองความถี่ด้วยกันสามโครงสร้างหลัก ได้แก่ ตัวกรองความถี่เอฟไออาร์, ตัวกรองความถี่ไอโออาร์ และตัวกรองความถี่พาราเรลออกลาส โดยใช้วิธีคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เทอมเศษและเทอมส่วนของตัวกรองความถี่แต่ละแบบ และนำไปผ่านการควอนไทซ์เซชัน

หลังจากได้ค่าสัมประสิทธิ์เทอมเศษและเทอมส่วนที่ผ่านการควอนไทซ์เซชันที่มีความยาวต่างกันแล้ว ก็จะนำค่าที่ได้นี้ไปออกแบบในโปรแกรมซิมมูลิงค์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเสียงในย่านความถี่โอดีโอ ในส่วนของรูปแบบการนำเสนอผลงานนี้ได้ทำการสร้างจีโอไอหรือการใช้ภาพเป็นตัวประสานกับผู้ใช้งานมาใช้แทนโปรแกรมซิมมูลิงค์ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>THESIS TITLE</b>	QUALITY TESTING OF DIGITAL AUDIO FILTERS TO FINITE COEFFICIENT EFFECTS	
<b>STUDENT</b>	MR. SAKKARIN PINSUPAKEAT	STUDENT ID. 50011554
	MR. PRATHAN POOPABUN	STUDENT ID. 50010906
<b>DEGREE</b>	BACHELOR OF ENGINEERING	
<b>PROGRAM</b>	INFORMATION ENGINEERING	
<b>YEAR</b>	2010	
<b>THESIS ADVISOR</b>	ASST. PROF. DOLCHAI SOOKCHAROENPHOL	

### ABSTRACT

This thesis presents a quality testing of digital filter to finite coefficient effect in audio band, which consists of 3 types of filter structures, there are FIR filter, IIR filter and Parallel All-Pass filter. All coefficients of each filter structures can be calculated by using MATLAB program thus the transfer function of each filter structures are obtained and quantized.

Then, all coefficient quantized utilizes for program design based on a SIMULINK program for a quality testing of digital filter in audio band. The presentation was created GUI (Graphic User Interface) to implement easily and quickly more than using on the SIMULINK program.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ บรรลุผลสำเร็จลงได้ด้วยดี เป็นผลอันเนื่องมาจากความดูแลเอาใจใส่และให้คำแนะนำแก่นักศึกษาของคณาจารย์ทุกท่าน โดยเฉพาะผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดลชัย สุขเจริญผล อาจารย์ที่ปรึกษาของงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งมีส่วนช่วยผลักดันและให้การสนับสนุนสำหรับแนวทางทั้งด้านแหล่งข้อมูลทางทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานเชิงปฏิบัติ ตลอดจนให้คำปรึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยนี้ รวมทั้งยังคงแนะนำและถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์เสมอ ซึ่งถือว่าเป็นพ่อครูอย่างแท้จริง

ขอขอบพระคุณบิดามารดา และคนในครอบครัวทุกคน รวมทั้งญาติพี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา คอยสอนให้เป็นคนดีเสมอมา และคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จมาได้ก็เพราะได้กำลังใจดี

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานที่ช่วยกันทำ ช่วยกันคิด จนงานสำเร็จ ซึ่งแม้จะมีอุปสรรคในการทำงานอยู่บ้าง ในบางเรื่องความคิดเห็นไม่ตรงกันบ้าง แต่เพราะความร่วมมือกันจึงส่งผลให้งานลุล่วงผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ซึ่งงานวิจัยออกมาก็เป็นที่น่าพอใจ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศทุกท่าน รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่คอยดูแลและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบคุณ นาย ณัฐพล ปานผา ผู้ร่วมงานอีกคนหนึ่ง ที่เป็นผู้ร่วมงานในโปรเจกต์หนึ่ง ซึ่งแม้จะไม่ได้ร่วมงานกันในโปรเจกต์สอง ก็ยังเสียสละเวลาให้คำแนะนำการใช้งาน โปรแกรม Simulink Matlab เสมอ หากแต่ขาดเพื่อนผู้นี้ ไปนั้นงานวิจัยที่ออกมาจะมีอาจสมบูรณ์เช่นนี้ได้

นาย ศักริน ปิ่นสุภาเกียรติ

นาย ประธาน ปู่พญญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โครงสร้างของระบบประมวลสัญญาณดิจิทัล	3
2.2 พื้นฐานวงจรกรองความถี่ต้นแบบ	4
2.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter)	5
2.3.1 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น	5
2.3.2 ระบบแปรเปลี่ยนตามเวลาและระบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา	5
2.4 การสนองต่อความถี่ (Frequency Response)	6
2.4.1 ผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response)	6
2.4.2 ผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response)	6
2.5 การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล	7
2.5.1 วงจรกรองความถี่แบบเอฟไออาร์ (FIR Filter)	7
2.5.2 วงจรกรองความถี่แบบไอไออาร์ (IIR Filter)	8
2.6 ข้อเปรียบเทียบระหว่างวงจรกรองความถี่เอฟไออาร์ และไอไออาร์	10
2.6.1 เสถียรภาพของระบบ	10
2.6.2 ความผิดเพี้ยนเชิงเฟส	10
2.6.3 จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง	10
2.7 วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คจากวงจรกรองทุกความถี่ผ่านต่อขนาน 2 วงจร	11

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ	13
3.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบเอฟไออาร์	13
3.1.1 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น	13
3.2 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน, ช่วงความถี่ผ่าน, ช่วงความถี่หยุดแบบเอฟไออาร์	18
3.2.1 ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter)	18
3.2.2 ตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน (Bandpass Filter)	19
3.2.3 ตัวกรองความถี่หยุด (Bandstop Filter)	20
3.3 การออกแบบวงจรกรองครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค	21
3.4 การออกแบบวงจรกรองทุกความถี่ผ่านด้วยวิธี Pole Interacting Prototype	22
3.5 การใช้โปรแกรมซิมูลิงค์เพื่อจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่	29
3.5.1 การเชื่อมต่อบล็อก	30
3.5.2 การสร้างระบบย่อย	30
3.5.3 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา	31
3.6 ตัวอย่างการจำลองวงจรกรองความถี่ไอไออาร์ โดยใช้โปรแกรมซิมูลิงค์	31
3.7 การจำลองโครงสร้างของระบบโดยใช้โปรแกรมซิมูลิงค์	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง	35
4.1 ขั้นตอนการทดลอง	35
4.2 ผลการทดลอง	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	81
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	84
ภาคผนวก ก. การใช้งาน โปรแกรม Simulink	
ภาคผนวก ข. การใช้งาน GUI เบื้องต้น	

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	ไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน	3
2.2	ผลตอบสนองความถี่ต่อชนิดของวงจรรองความถี่ในอุดมคติแบบต่างๆ	4
2.3	ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรรอง FIR Filter และ IIR Filter	7
2.4	โครงสร้างของวงจรรองแบบเอฟไออาร์ (FIR Filter)	8
2.5	โครงสร้างของวงจรรองความถี่แบบ ไอ ไออาร์ (IIR Filter)	9
2.6	โครงสร้างของวงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค	11
3.1	ผลตอบสนองความถี่และผลตอบสนองอิมพัลส์ในทางอุดมคติ	13
3.2	ผลการตอบสนองความถี่แบบเอฟไออาร์	15
3.3	ผลการตอบสนองความถี่ด้วยฟังก์ชันของวินโดว์	16
3.4	กราฟตอบสนองความถี่ของออลพาสฟิลเตอร์, โลพาสฟิลเตอร์, ไฮพาสฟิลเตอร์	18
3.5	กราฟผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน 2 ความถี่และกราฟผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน	19
3.6	ผลการตอบสนองของตัวกรองออลพาส, ช่วงความถี่ผ่าน, และช่วงความถี่หยุด	20
3.7	ตำแหน่งของโพลและซีโรของวงจรรองความถี่ต่ำต้นแบบ	21
3.8	ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำต้นแบบ	22
3.9	ตำแหน่งของโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน $A_0(z)$	23
3.10	ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (บน) และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของฟังก์ชันถ่ายโอน $A_0(z)$	24
3.11	ตำแหน่งของโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน $A_1(z)$	24
3.12	ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอน $A_1(z)$	25
3.13	ตำแหน่งของโพลและซีโรของ $H_{LP}(z)$ และ $H_{HP}(z)$ ซึ่งตำแหน่งของโพลจะอยู่ตำแหน่งเดียวกัน	26
3.14	ผลการตอบสนองของขนาด และเฟสต่อความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำ	27
3.15	ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ของวงจรรองความถี่ต่ำ	27
3.16	ผลการตอบสนองของขนาดและเฟสต่อความถี่ของวงจรรองความถี่สูง	28
3.17	ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ของวงจรรองความถี่สูง	28
3.18	การเชื่อมต่อบล็อก	30
3.19	ระบบย่อยของโครงสร้าง	30
3.20	บล็อกไดอะแกรมของวงจรรองความถี่ในแซดโดเมน	31
3.21	ระบบย่อยของโครงสร้างวงจรรองความถี่ไอไออาร์	33

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

3.22 ระบบย่อยของโครงสร้างวงจรกรองความถี่ไอไออาร์แบบ Direct Form II	33
3.23 ระบบที่นำเสนอและการนำหลักการจำกัดความยาวของผลตอบสนองอนันต์	34
3.24 ระบบจำลองขึ้นบนซิมมูลิงค์และการนำหลักการจำกัดความยาวของผลตอบสนองอนันต์	34
3.25 การลดความซับซ้อนของวงจรโดยใช้ฟังก์ชันย่อย	34
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการรัน Matlab	36
4.2 ไคอะแกรมการเชื่อมต่อบล็อกของตัวกรองที่จำลองไว้ในซิมมูลิงค์	40
4.3 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Unquantized	41
4.4 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 4 bit	42
4.5 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 8 bit	42
4.6 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 12 bit	44
4.7 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 16 bit	45
4.8 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 18 bit	46
4.9 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 20 bit	47
4.10 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 24 bit	48
4.11 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Unquantized	49
4.12 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 4 bit	50
4.13 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 8 bit	51
4.14 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 12 bit	52
4.15 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 16 bit	53
4.16 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 18 bit	54
4.17 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 20 bit	55
4.18 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 24 bit	56
4.19 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Unquantized	57
4.20 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 4 bit	58
4.21 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 8 bit	59
4.22 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 12 bit	60
4.23 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 16 bit	61
4.24 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 18 bit	62
4.25 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 20 bit	63
4.26 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 24 bit	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

4.27 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter Unquantized	65
4.28 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 4 bit	66
4.29 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 8 bit	67
4.30 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 12 bit	68
4.31 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 16 bit	69
4.32 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 18 bit	70
4.33 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 20 bit	71
4.34 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Lowpass Filter 24 bit	72
4.35 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter Unquantized	73
4.36 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 4 bit	74
4.37 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 8 bit	75
4.38 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 12 bit	76
4.39 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 16 bit	77
4.40 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 18 bit	78
4.41 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 20 bit	79
4.42 ผลตอบสนองของตัวกรองความถี่	Parallel Highpass Filter 24 bit	80

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการทำโครงการ	2
2.1 ข้อดีและข้อเสียของวงจรรองความถี่แต่ละแบบ	10
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการจำลองซิมมูลิก	32
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง $\tilde{H}_L(z)$ อันดับที่ 2	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้ รวมถึงอุปกรณ์ทางการติดต่อสื่อสารหลายประเภท ล้วนแล้วแต่มีการนำเอาเทคนิคและความรู้เรื่องการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องและประยุกต์ใช้แทบทั้งสิ้น โดยเขียนออกมาในรูปของซอฟต์แวร์ เพื่อความสะดวกรวดเร็ว อีกทั้งต้นทุนที่ต่ำลงในทุกวัน

วงจรกรองความถี่ที่ออกแบบมาให้ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไป ส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแบบอนาล็อก ซึ่งมีข้อดีคือ ออกแบบได้ง่าย และต้นทุนการผลิตต่ำ แต่ข้อเสียของวงจรชนิดนี้คือ มีเสถียรภาพต่ำ การกรองความถี่มีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย การส่งผ่านสัญญาณของระบบอนาล็อก จึงมีการสูญเสียหรือถูกลดทอนสัญญาณ และสัญญาณที่ได้จากการสังเคราะห์จะหลีกเลี่ยงจากการผิดเพี้ยนได้ยาก ประกอบกับปัจจุบันการสื่อสารทางเสียงผ่านรูปแบบสัญญาณดิจิทัลนั้น ยังไม่มีผู้ที่ศึกษาและพัฒนาควบคู่กันไปอย่างจริงจัง

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงสนับสนุนให้มีการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลขึ้นมา ซึ่งข้อดีของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีอยู่เหนือวงจรแบบอนาล็อกคือ การมีเสถียรภาพที่สูงกว่า อันได้แก่ ความถี่ในช่วงที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไขหรือทดสอบ เพราะวงจรแบบดิจิทัลนั้นได้ออกแบบมาให้มีความสามารถในการโปรแกรมให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ แม้ว่าจะใช้ต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าก็ตาม

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนการทำงานของตัวกรองความถี่ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter ซึ่งให้ผลตอบสนองที่เป็นเฟสเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์
- 1.2.2 เพื่อทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลลออติโอ ต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบในด้านผลลัพธ์ต่อคุณภาพของเสียงที่ได้ หลังจากผ่านตัวกรองความถี่ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter ที่ออกแบบมา
- 1.2.4 เพื่อนำเทคนิคและความรู้ที่ได้จากการศึกษาเรื่องการประมวลผลผ่านตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะเป็นประโยชน์ต่องาน ในด้าน Digital Audio Process

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการสร้างดิจิตอลฟิลเตอร์ ที่มีการจำกัดค่าความยาวสัมประสิทธิ์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของเสียงในย่านออดิโอ
- 1.3.2 ทำการสร้างดิจิตอลฟิลเตอร์ทั้งในแบบ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter ที่มีคุณลักษณะต่างกัน เพื่อใช้ในการทดสอบด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์ ใน MATLAB
- 1.3.3 ทำการสร้าง GUI (Graphic User Interface) โดยใช้โปรแกรม Matlab เพื่อให้เกิดความสะดวกในการทดสอบคุณภาพเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ทั้ง FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter

### 1.4 ขั้นตอนการทำโครงการ

ขั้นตอนการทำโครงการ	ช่วงระยะเวลา									
	2553					2554				
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1.ศึกษาทฤษฎีและกำหนดขอบเขต	↔									
2.คำนวณในภาคทฤษฎี	↔	↔								
3.ออกแบบโปรแกรม Simulink		↔	↔							
4.ทดสอบฟิลเตอร์ใน Simulink				↔	↔	↔	↔			
5.ออกแบบและสร้าง GUI						↔	↔	↔		
6.สำรวจความคิดเห็น										↔
7.การทำปริญญานิพนธ์								↔	↔	↔
8.นำเสนอผลงาน										↔

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจในหลักการของ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter
- 1.5.2 มีความเข้าใจในทฤษฎีการควอนไทซ์
- 1.5.3 สามารถสร้างแบบจำลองการทำงานของตัวกรองความถี่ได้ โดยการใช้โปรแกรม Simulink ของ Matlab
- 1.5.4 สามารถเขียน GUI โดยใช้ Matlab เพื่อทดสอบสัญญาณเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โครงสร้างของระบบประมวลสัญญาณดิจิทัล

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลด้วยคอมพิวเตอร์นั้น สัญญาณไฟฟ้าที่จะถูกประมวลผลจะต้องถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเสียก่อน สามารถทำได้โดยการแซมปลิงสัญญาณหรือที่เรียกอีกอย่างว่าการทำ A/D (Analog to Digital) จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปประมวลผลที่เครื่องคอมพิวเตอร์ เมื่อประมวลผลเสร็จผลที่ได้จะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital to Analog) อีกครั้งเพื่อใช้งานต่อไปหรืออาจจะถูกเก็บไว้ที่หน่วยความจำ เพื่อใช้ในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงในอนาคตก็ได้

ในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่ามีอนาล็อกฟิลเตอร์อยู่สองส่วนด้วยกัน ส่วนหน้าเป็นอนาล็อกฟิลเตอร์ที่ทำหน้าที่จำกัดความถี่ให้อยู่ในช่วงที่ต้องการทำการประมวลผลเท่านั้น ผ่านเข้าสู่ A/D ส่วนฟิลเตอร์ที่ส่วนหลังจะเป็นอนาล็อกฟิลเตอร์ลดผลของ Sharp Transition ของส่วน D/A

ตัวกรองดิจิทัล (Digital Filters) เป็นตัวกรองรูปแบบหนึ่งที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยวงจรดิจิทัลมีไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 2.1 จากสัญญาณขาเข้าเมื่อผ่านอนาล็อกฟิลเตอร์แล้วจะได้  $X(t)$  เป็นสัญญาณขาเข้าของตัวกรองสัญญาณนี้ จะถูกส่งผ่านวงจรแปลงจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล  $x[n]$  และสัญญาณดิจิทัลนี้จะส่งเข้าไปคำนวณในหน่วยประมวลผล ผลที่ได้จากการคำนวณยังคงเป็นสัญญาณดิจิทัล  $y[n]$  จากนั้นจะถูกส่งผ่านมายังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลที่เป็นสัญญาณอนาล็อก  $Y(t)$  ได้เป็นสัญญาณขาออก



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน

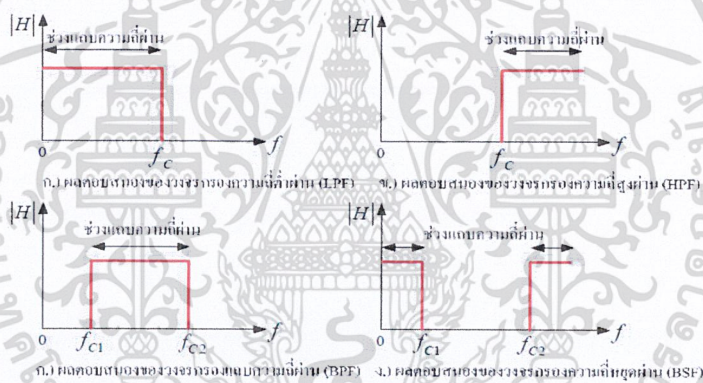
ตัวกรองดิจิทัลแบ่งออกได้ 2 ชนิดหลักๆ คือ

1. ตัวกรองความถี่แบบเฟอไออาร์ (Finite Impulse Response Filter: FIR Filter)
2. ตัวกรองความถี่แบบไอไออาร์ (Infinite Impulse Response Filter: IIR Filter)

## 2.2 พื้นฐานวงจรกรองความถี่ต้นแบบ

เนื่องจากว่า การออกแบบวงจรกรองความถี่นั้น มีการอาศัยวงจรกรองอนาล็อกต้นแบบ ดังนั้น ในการเริ่มต้นออกแบบวงจรกรองความถี่จึงควรทราบการคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอนาล็อกให้ได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการเสียก่อน จากนั้นจึงทำการเขียนให้อยู่ในรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์อนาล็อกขนาดต่างๆ หรืออาจแปลงสู่โดเมนดิจิทัลจากฟังก์ชันถ่ายโอนโดยตรง เพื่อสร้างวงจรกรองแบบต่างๆ ขึ้นมา

ส่วนหน้าที่ในการทำงานของวงจรกรองความถี่นั้น สามารถจำแนกความถี่ตามความต้องการของผู้ใช้ แบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ดังรูปที่ 2.4 ได้ 4 ชนิดด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter : LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter : HPF), วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass Filter : BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Bandstop Filter : BSF)



รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองความถี่ต่อชนิดของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติแบบต่างๆ

จากผลตอบสนองความถี่ในรูปที่ 2.4 เมื่อให้  $|H|$  คือ ขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่  $0$  Hz ถึงความถี่  $f_c$  ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่สูงกว่า  $f_c$  ความถี่จะไม่ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจร สำหรับวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่  $f_c$  ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่  $0$  Hz ถึงความถี่  $f_c$  จะไม่ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจร สำหรับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่  $f_{c1}$  ถึงความถี่  $f_{c2}$  ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่ตั้งแต่  $0$  Hz ถึงความถี่  $f_{c1}$  กับความถี่ที่สูงกว่า  $f_{c2}$  จะไม่ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจรและวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่านจะไม่ยอมให้ช่วงความถี่  $f_{c1}$  ถึงความถี่  $f_{c2}$  ผ่านไปยังเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่อื่นๆจะยอมให้ผ่านไปยังเอาต์พุตได้

## 2.3 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter)

### 2.3.1 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น

โดยนิยามแล้ว ระบบเชิงเส้น (Linear System) ซึ่งจะหมายถึง ระบบที่มีคุณสมบัติการทับซ้อน (Superposition) กล่าวคือถ้า  $y_1[n]$  และ  $y_2[n]$  เป็นผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณขาเข้า  $x_1[n]$  และ  $x_2[n]$  ตามลำดับ

$$y_1[n] = T\{x_1[n]\} \quad (2.1)$$

$$y_2[n] = T\{x_2[n]\} \quad (2.2)$$

แล้วระบบ  $T\{\cdot\}$  จะจัดเป็นระบบเชิงเส้นถ้าผลตอบสนองต่อสัญญาณขาเข้า  $ax_1[n] + bx_2[n]$  มีค่าเท่ากับ

$$T\{ax_1[n] + bx_2[n]\} = aT\{x_1[n]\} + bT\{x_2[n]\} \quad (2.3)$$

หรือจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$T\{ax_1[n] + bx_2[n]\} = ay_1[n] + by_2[n] \quad (2.4)$$

โดยที่  $a$  และ  $b$  เป็นค่าคงที่ใด ๆ

### 2.3.2 ระบบแปรเปลี่ยนตามเวลาและระบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา

ระบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time Invariant System) ซึ่งจะหมายถึง ระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้า และสัญญาณขาออก ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา นั่นคือถ้า  $y[n]$  จะเป็นผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณขาเข้า  $x[n]$  ระบบดังกล่าวนี้จะจัดเป็นระบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา หากผลตอบสนองสัญญาณของระบบที่มีต่อสัญญาณขาเข้าที่มีการเลื่อนเวลาออกไป  $x[n - k]$  มีค่าเท่ากับ  $y[n - k]$  โดย  $k$  เป็นค่าคงที่ใด ๆ ค่าหนึ่ง กล่าวคือ

$$y[n] = T\{x[n]\} \text{ แล้ว } y[n - k] = T\{x[n - k]\} \quad (2.5)$$

ความหมายของระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาคือ คุณสมบัติของระบบไม่เปลี่ยนแปลงไปหรือขึ้นกับเวลาที่มีการป้อนสัญญาณขาเข้า ดังนั้น ไม่ว่าเราจะป้อนสัญญาณเข้าสู่ระบบเวลาใดก็ตามจะได้ผลตอบสนองที่ขาออกของระบบเหมือนเดิม เพียงแต่ผลตอบสนองที่ได้จะมีการเลื่อนของเวลาออกไปและสอดคล้องตรงตามจังหวะเวลาที่ป้อนเท่านั้น

โดยนิยามแล้วระบบที่ไม่มีคุณสมบัติ ตามสมการที่ 2.5 จะจัดเป็นระบบแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time Variant System)

## 2.4 การสนองต่อความถี่ (Frequency Response)

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.6

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots} \quad (2.6)$$

ในการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบแบบใหม่ไม่ต่อเนื่องนั้นจะแทน  $z = e^{j\omega}$  ลงใน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.7

$$H(\omega) = \frac{b_0 + b_1 e^{j\omega} + b_2 e^{j2\omega} + \dots}{1 + a_1 e^{-j\omega} + a_2 e^{-j2\omega} + \dots} \quad (2.7)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 2.7 จะประกอบด้วยค่าที่เป็นจำนวนจริงและค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งในการหาผลตอบสนองทางความถี่จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ลักษณะคือ

### 2.4.1 ผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response)

คำนวณได้โดยการหาค่าสมบูรณ์ของสมการที่ 2.7 เขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$|H(\omega)| = \sqrt{H_R^2(\omega) + H_I^2(\omega)} \quad (2.8)$$

### 2.4.2 ผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response)

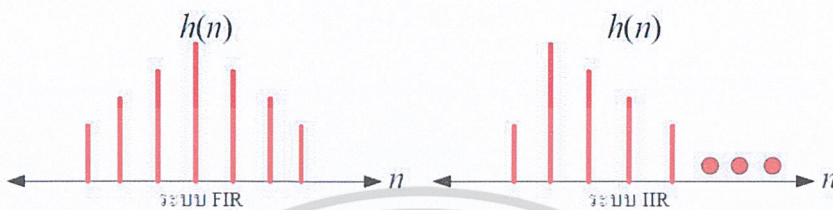
คำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ซึ่งผลตอบสนองทางเฟสจะถูกแทนด้วย  $\Theta(\omega)$  หรือ  $\angle H(\omega)$

$$\Theta(\omega) = \angle H(\omega) = \tan^{-1} \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล จะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response: FIR Filter) กับผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response: IIR Filter)



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีความสามารถสูงขึ้น ความละเอียดและความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น จึงเป็นที่นิยมการประมวลผลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลมากขึ้นซึ่งระบบดิจิทัลนั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าเพราะอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งสามารถปรับปรุงและแก้ไขได้ง่ายกว่า โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์โดยในขณะที่ในวงจรกรองความถี่ของอนาล็อกสามารถทำได้ซับซ้อนกว่า

### 2.5.1 วงจรกรองความถี่แบบเอฟไออาร์ (FIR Filter)

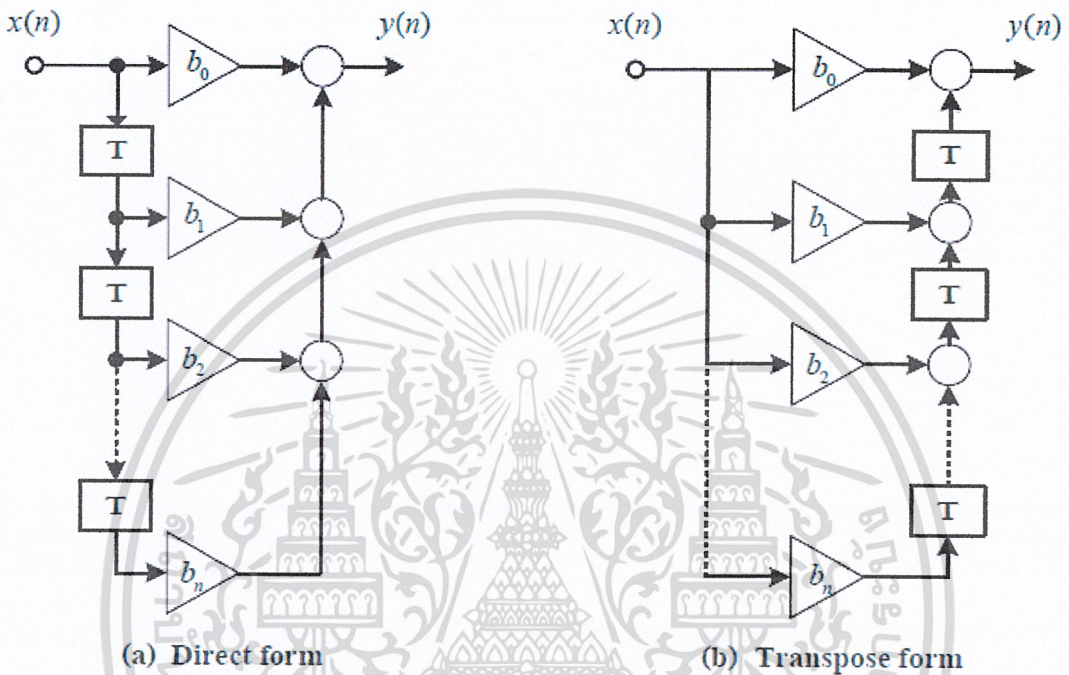
วงจรกรองความถี่แบบเอฟไออาร์หรือวงจรที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์มีความยาวจำกัด ซึ่งเป็นการนำเอาเฉพาะสัญญาณขาเข้าในแซมเปิ้ลปัจจุบันและแซมเปิ้ลที่ถูกหน่วงเวลามาทำการประมวลผลซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k \cdot x(n-k) \quad (2.10)$$

โดยที่  $b_k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่จะมีค่าจำนวนอยู่จำนวน  $M$  ค่าโดยที่จำนวนของค่าสัมประสิทธิ์นั้นจะอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนของ  $Z$  ได้ดังนี้

$$H(z) = \sum_{k=0}^M b_k \cdot z^{-k} \quad (2.11)$$

ซึ่งในการออกแบบจะพยายามลดค่าจำนวนสัมประสิทธิ์ให้มีจำนวนน้อยที่สุด ในขณะที่ยังคงรักษาคุณสมบัติที่ต้องการไว้ได้อยู่ โดยปกติแล้วในการออกแบบใช้งานทั่วไปจะมีจำนวนสัมประสิทธิ์ตั้งแต่ไม่กี่ตัวไปจนถึงร้อยตัว ซึ่งทำให้มีโครงสร้างและวงจรที่มีขนาดใหญ่มาก แต่วงจรกรองดังกล่าวนี้จะให้การตอบสนองทางเฟสที่เป็นเชิงเส้น โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของวงจรกรองแบบเฟอไออาร์ (FIR Filter)

2.5.2 วงจรกรองความถี่แบบไออาร์ (IIR Filter)

วงจรกรองความถี่แบบไออาร์ หรือวงจรที่มีการตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์มีความยาวไม่จำกัด ซึ่งเป็นการนำเอาสัญญาณเข้าในแชนเนลปัจจุบันและแชนเนลที่ถูกหน่วงเวลาและเอาต์พุตแชนเนลที่ถูกหน่วงเวลาและเอาต์พุตแชนเนลที่ถูกหน่วงเวลามาทำการประมวลผล ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\sum_{k=0}^N a_k \cdot y(n-k) = \sum_{k=0}^N b_k \cdot x(n-k) \tag{2.12}$$

โดยที่  $b_k$  และ  $a_k$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่จะมีค่าจำนวนอยู่จำนวน  $N$  และ  $M$  ตามลำดับ โดยจำนวนของค่าสัมประสิทธิ์นั้นจะมีจำนวนน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองแบบเฟอไออาร์ ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบเดียวกัน ซึ่งเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนของ  $Z$  ได้

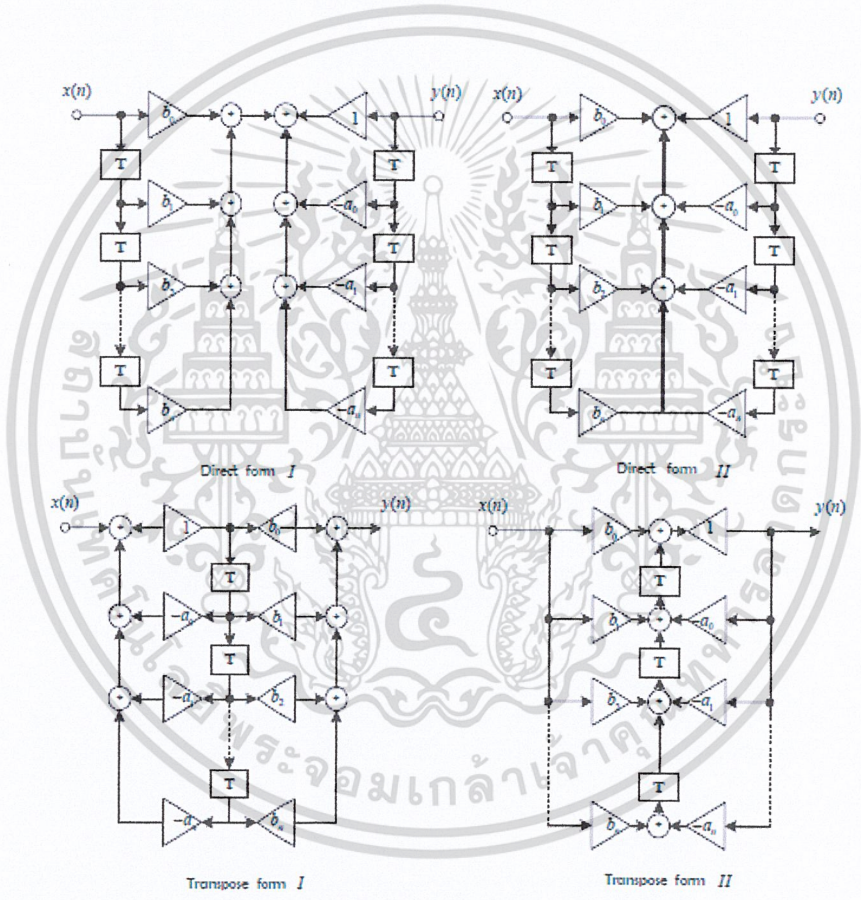
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 8 ะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k \cdot z^{-k}}{\sum_{k=0}^N a_k \cdot z^{-k}} \quad (2.13)$$

วงจรกรองความถี่ไอไออาร์นี้จะมีข้อดีก็คือ มีจำนวนของสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่าวงจรกรองความถี่เอฟไออาร์ ทำให้ลดเวลาในการประมวลผลลงอย่างมากแต่มีข้อเสียเช่นกัน คือในการออกแบบระบบนี้จะมีความไวในเรื่องของการปัดเศษค่าสัมประสิทธิ์ เพราะผลจากการปัดเศษค่าสัมประสิทธิ์อาจจะให้เกิดการ ไม่เสถียรภาพของวงจรได้ และมีการตอบสนองทางเฟสที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งข้อดีข้อเสียของวงจรกรองความถี่ทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แบบไอไออาร์ (IIR Filter)

โครงสร้างของวงจรกรองแบบไอไออาร์ จากสมการที่ 2.12 มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังรูปที่ 2.5 ได้แก่โครงสร้างแบบตรง (Direct Form) และแบบกลับ (Transpose Form) ซึ่งจะมีความซับซ้อนของวงจรที่น้อยกว่า

## 2.6 ข้อเปรียบเทียบระหว่างวงจรกรองความถี่เอ็ฟไออาร์ และไอไออาร์

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของวงจรกรองความถี่แต่ละแบบ

ไอไออาร์ (IIR)	เอ็ฟไออาร์ (FIR)
1. วงจรอาจไม่เสถียรได้	1. วงจรเสถียรเสมอ
2. ให้ช่วงทรานซิชันแบนด์ที่แคบกว่า	2. ให้ช่วงทรานซิชันแบนด์ที่กว้างกว่า
3. มีการหน่วงสัญญาณที่เอาต์พุตน้อยกว่า	3. มีการหน่วงสัญญาณมากกว่า
4. มีความเพี้ยนของผลตอบสนองทางเฟสสูง	4. มีผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น
5. มีสัญญาณรบกวนจากการบิดเบือนมาก	5. มีสัญญาณรบกวนจากการบิดเบือนน้อย
6. สามารถออกแบบได้จากวงจรมัลติเพล็กซ์แบบ	6. การออกแบบทำได้โดยวิธีการประมาณค่า

จากความแตกต่างของโครงสร้างวงจรกรองความถี่เอ็ฟไออาร์ และไอไออาร์ ทำให้วงจรกรองความถี่ มีคุณสมบัติที่แตกต่างออกจกกันไป มีทั้งจุดดี และจุดด้อย ไปในแต่ละสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงจำแนกข้อดีข้อเสียของวงจรกรองความถี่ทั้งสองแบบได้ดังนี้

### 2.6.1 เสถียรภาพของระบบ

พิจารณาจากสมการผลต่างสืบเนื่องของวงจรกรองความถี่เอ็ฟไออาร์ ในสมการที่ 2.10 จะเห็นว่า การประมวลผลสัญญาณจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณขาเข้าเท่านั้น ไม่ได้นำสัญญาณขาออกในอดีตมาเกี่ยวข้องแต่อย่างใด จึงทำให้มั่นใจได้ว่าวงจรกรองความถี่เอ็ฟไออาร์ จะเป็นระบบที่มีเสถียรภาพเสมอ ในขณะที่วงจรกรองความถี่ไอ ไออาร์อาจมีปัญหาของความไม่เสถียรภาพได้ เพราะมีการนำสัญญาณขาออกในอดีตมาคำนวณ ซึ่งเทียบได้กับกลไกการป้อนกลับของระบบ

### 2.6.2 ความผิดเพี้ยนเชิงเฟส

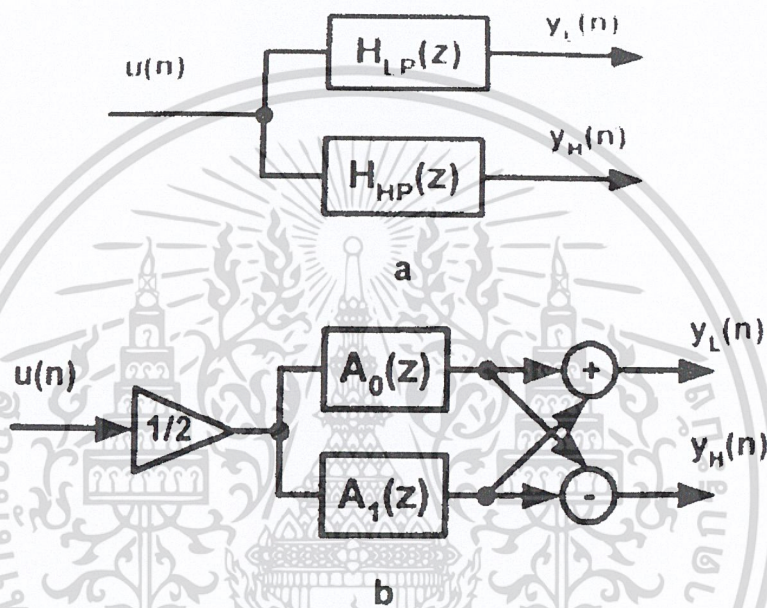
ในกรณีวงจรกรองความถี่ไอ ไออาร์ สามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองเชิงเส้น (Linear Phase Response) ได้อย่างสมบูรณ์แบบทำให้เรามั่นใจได้ว่าสัญญาณขาออกที่ผ่านวงจรกรองจะไม่มีปัญหาผิดเพี้ยนทางเฟส

### 2.6.3 จำนวนสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง

โดยทั่วไปการออกแบบโดยใช้วงจรกรองความถี่เอ็ฟไออาร์ เพื่อให้ได้ระบบที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น วงจรที่มีความคมมากๆ มักจะต้องใช้สัมประสิทธิ์จำนวนมากกว่าในกรณีของการใช้วงจรกรอง การใช้สัมประสิทธิ์ที่มากขึ้นส่งผลให้วงจรที่สร้างขึ้นมีความต้องการหน่วยความจำ และหน่วยประมวลผลมากขึ้นตามไปด้วย

## 2.7 วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คจากวงจรรองทุกความถี่ผ่านต่อขนาน 2 วงจร

วงจรรองความถี่จาก โครงสร้างของวงจรรองทุกความถี่ต่อขนานกันได้นำเสนอโดย Mitra ซึ่งออกแบบจากวงจรรองความถี่ต้นแบบไม่ว่าจะเป็นแบบ Elliptic Chebbychev หรือ Butterworth สามารถนำมาแยกส่วนประกอบออกมาเป็น 2 ฟังก์ชันโดยใช้วิธี Pole Interacting Prototype ซึ่งฟังก์ชันที่ได้เป็น All-Pass ฟังก์ชัน ยังคงมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวงจรรองความถี่ต้นแบบทุกประการ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

จากรูปที่ 2.6 ในการออกแบบดิจิทัลครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบสองทางโดยทั่วไปนั้นจะใช้ วงจรรองความถี่สองชุด ได้แก่ วงจรรองความถี่สูงและวงจรรองความถี่สูงและวงจรรองความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีข้อด้อยในเรื่องของความซับซ้อนและในการคำนวณจุดตัด ความถี่ของวงจร เป็นเหตุผลหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ รวมไปถึงการสร้างจริง ซึ่งจากที่ได้ กล่าวมาแล้วนั้น ไม่ว่าจะเป็นวจรรองความถี่แบบ FIR และ IIR ต่างก็มีข้อเสียที่แตกต่างกันไป เช่น จำนวนของสัมประสิทธิ์ หรือความไววงจรในการบิดเบือนสัมประสิทธิ์ เป็นต้น ซึ่ง Mitra ได้กล่าวถึง โครงสร้างของวงจรรองความถี่ที่สร้างขึ้นจากวงจรรองความถี่ผ่านตลอดต่อขนาน 2 วงจร (Two Parallel All-Pass Filter) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้จะมีผลต่อการบิดเบือนของค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่ำและมี โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากดังแสดงในรูปที่ 2.6

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ด้านเอาต์พุตของทั้งวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองความถี่สูง จะเกิดจากผลรวมและผลต่างของวงจรถอง  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ดังสมการที่ 2.14 และสมการที่ 2.15 ต่อไปนี้

$$H_{\text{LPF}} = \frac{1}{2}(A_0(z)+A_1(z)) \quad (2.14)$$

$$H_{\text{HPF}} = \frac{1}{2}(A_0(z)-A_1(z)) \quad (2.15)$$

ข้อดีอีกประการหนึ่งของโครงสร้างดังกล่าวคือมีคุณสมบัติของผลตอบสนองความถี่ตลอดย่านมีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติประการแรกในการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์เน็ตเวิร์คที่

ด



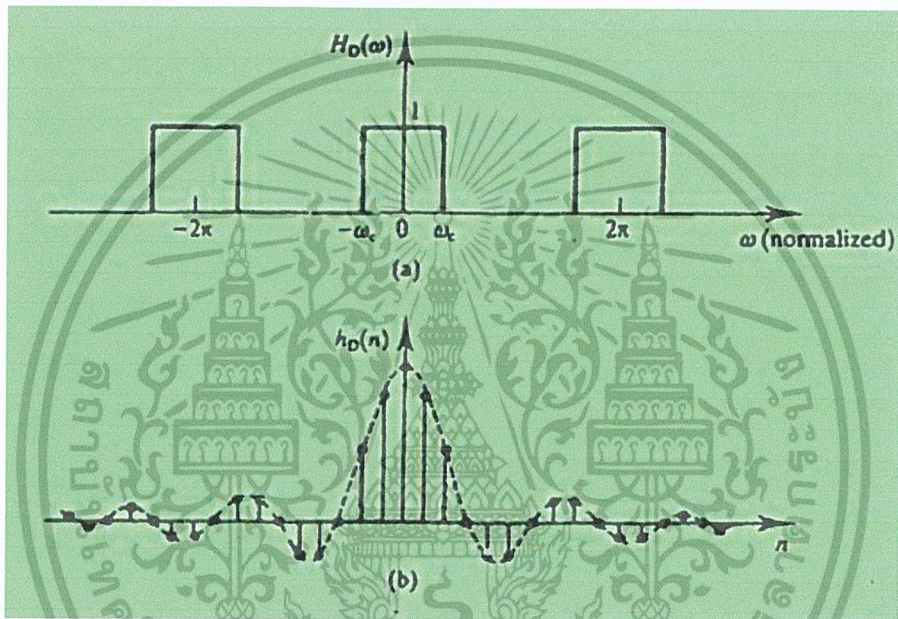
## บทที่ 3

### การออกแบบ

#### 3.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ดิจิทัลแบบเอฟไออาร์

##### 3.1.1 การออกแบบตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์

ใช้วิธีอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) มาทำการออกแบบพิจารณาดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงผลตอบสนองความถี่และผลตอบสนองอิมพัลส์ในทางอุดมคติ

- (a) แสดงการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ
- (b) แสดงการตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ

ตัวกรองที่มีผลตอบสนองทางความถี่  $H_D(\omega)$  สามารถหาค่าผลตอบสนองอิมพัลส์  $h(n)$  ได้จากความสัมพันธ์ของการแปลงกลับของฟูรีเยร์ ดังสมการ

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_D(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (3.1)$$

พิจารณาจากรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำ ซึ่งมีความถี่คัทออฟ (Frequency cutoff) คือ  $\omega_c$  โดยที่  $\omega_c$  นี้จะเป็นความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized frequency) ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$f = \frac{f_c}{f_s} \quad (3.2)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่คัทออฟนอร์มอลไลซ์ (Normalized Cut off frequency)

$f_c$  คือ ความถี่คัทออฟ (Cut off frequency (Hz))

$f_s$  คือ ความถี่แซมปลิง (Sampling frequency (Hz))

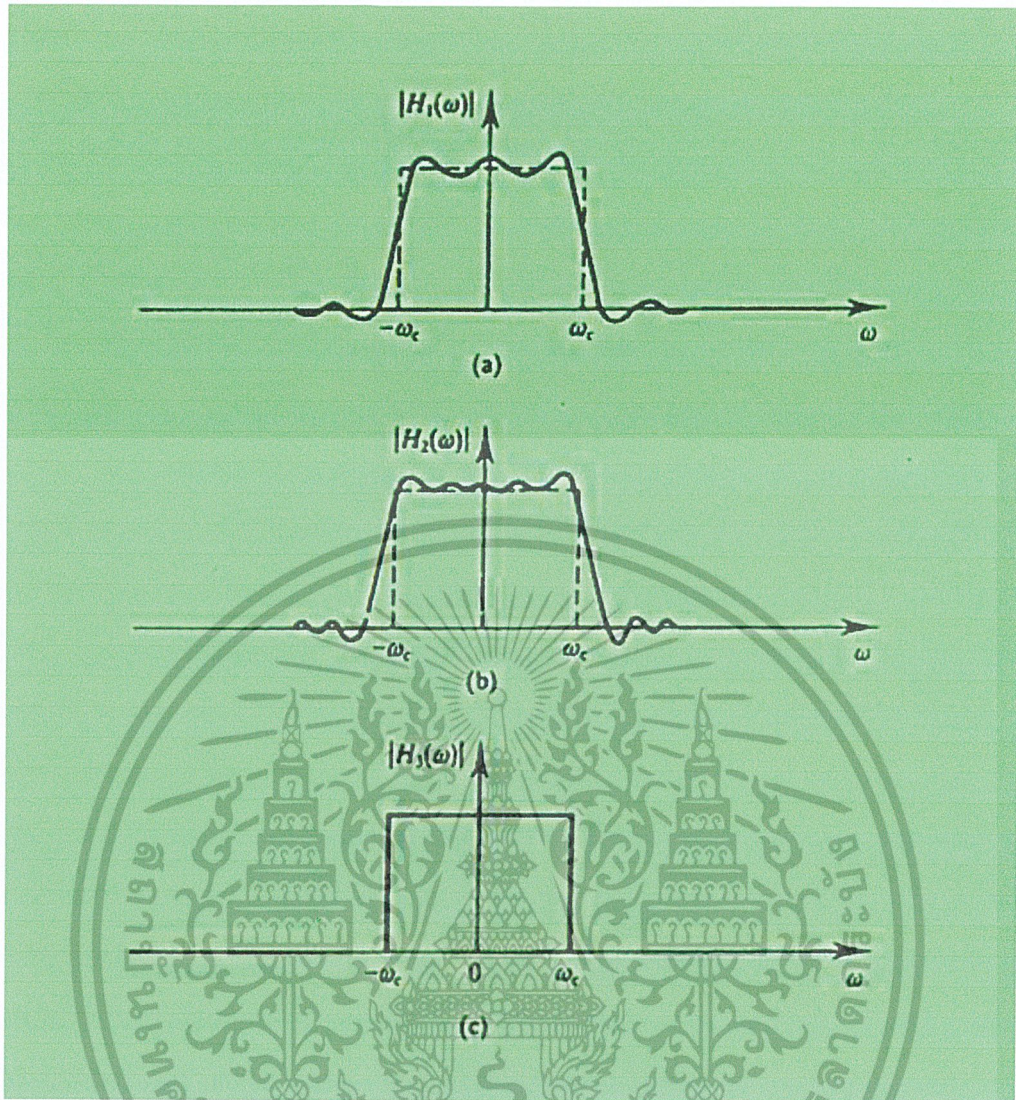
จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า  $H(\omega)$  จะมีค่าเท่ากับ 1 ในช่วงตั้งแต่  $-\omega_c$  ดังนั้นค่าของผลตอบสนองอิมพัลส์จากรูปที่ 3.1 (a) จะหาได้จากสมการ

$$h_D(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 1 \times e^{j\omega n} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{j\omega n} d\omega \quad (3.3)$$

$$h_D(n) = \frac{\sin(2\pi f n)}{n\pi} \quad (3.4)$$

เนื่องจากค่าผลตอบสนองอิมพัลส์นั้นมีความสมมาตรกัน ดังนั้นในการหาค่าจะทำการหาเพียงครึ่งหนึ่งก็พอ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการหาผลตอบสนองอิมพัลส์  $n = 53$  จะทำการหาค่า  $n$  ตั้งแต่ 0 จนถึง 26 ส่วนค่า -1 จนถึง -26 นั้นไม่จำเป็นต้องหา เนื่องจากความเป็นสมมาตรนั่นเอง

ตัวกรองความถี่แบบโอไออาร์จะมีผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบอุดมคติก็ต่อเมื่อ มีการใช้สัมประสิทธิ์เป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติเป็นผลตอบสนองทางความถี่ของจำนวนตัวกรองแบบเอฟไออาร์ จะมีการกระเพื่อม (Ripple) เกิดขึ้น ถ้าจำนวนสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยก็จะทำให้เกิดการกระเพื่อมมาก แต่ถ้าสัมประสิทธิ์มีจำนวนมากขึ้นก็จะทำให้ค่าการกระเพื่อมน้อยลง ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับผลการตอบสนองความถี่ในทางอุดมคติมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงผลการตอบสนองความถี่แบบแอมพลิจูด

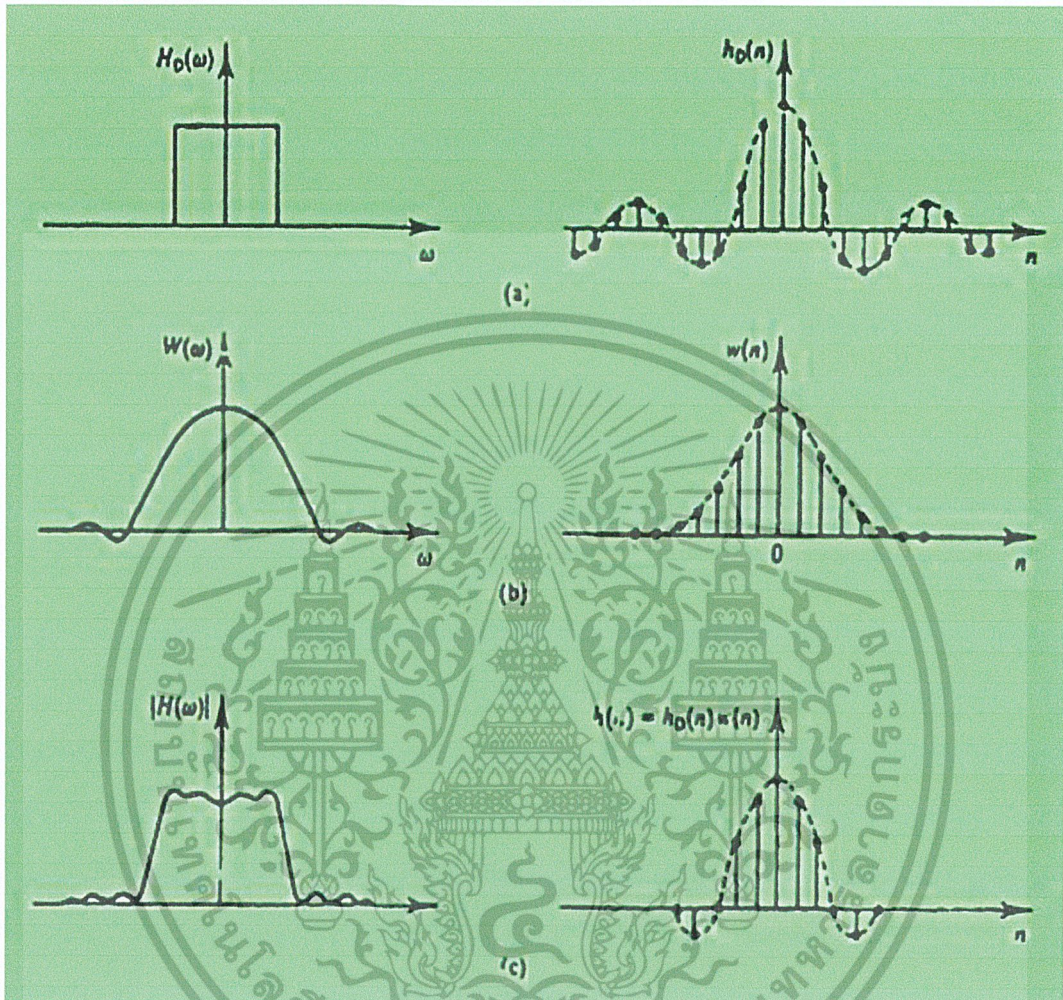
- (a) สัมประสิทธิ์ 13 ตัว
- (b) สัมประสิทธิ์ 25 ตัว
- (c) สัมประสิทธิ์เป็นอนันต์

เพื่อให้ผลการตอบสนองความถี่มีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ในทางอุดมคติ จึงได้มีการคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาโดยการนำสัมประสิทธิ์  $H_p(n)$  มาคูณกับสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่ง สัมประสิทธิ์ตัวนี้ก็คือ  $\omega(n)$  ผลที่ได้จากการคูณจะเป็นสัมประสิทธิ์ตัวใหม่หรือ  $h(n)$  ซึ่งการหาสัมประสิทธิ์  $h(n)$  นี้เรียกว่า การหาโดยใช้ฟังก์ชันของวินโดว์ (Window) สมการของ  $h(n)$  แสดงได้ดังสมการ

$$h(n) = h_p(n) \cdot \omega(n) \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 15 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ  $\omega(n)$  สามารถหาได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ซึ่งแต่ละวิธีให้ผลการตอบสนองความถี่ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงผลการตอบสนองความถี่ด้วยฟังก์ชันของวินโดว์

นอกจากนี้สมการที่ใช้หาค่า  $\omega(n)$  ของแต่ละวิธียังแตกต่างกันไปดังต่อไปนี้

เรคแทนกูลาร์วินโดว์ (Rectangular window)

$$\omega(n) = 1 \quad (3.6)$$

ฮานนิงวินโดว์ (Hanning window)

$$\omega(n) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 16 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แฮมมิงวินโดว์ (Hamming window)

$$\omega(n) = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (3.8)$$

แบลคแมนวินโดว์ (Blackman window)

$$\omega(n) = 0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.008 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (3.9)$$

ไคเซอร์วินโดว์ (Kaiser Window)

$$\omega(n) = \frac{I_0\left[\beta \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2n}{N-1}\right)^2}\right]}{I_0[\beta]} \quad (3.10)$$

$I_0$  เป็นค่าจากฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) อันดับที่ 0

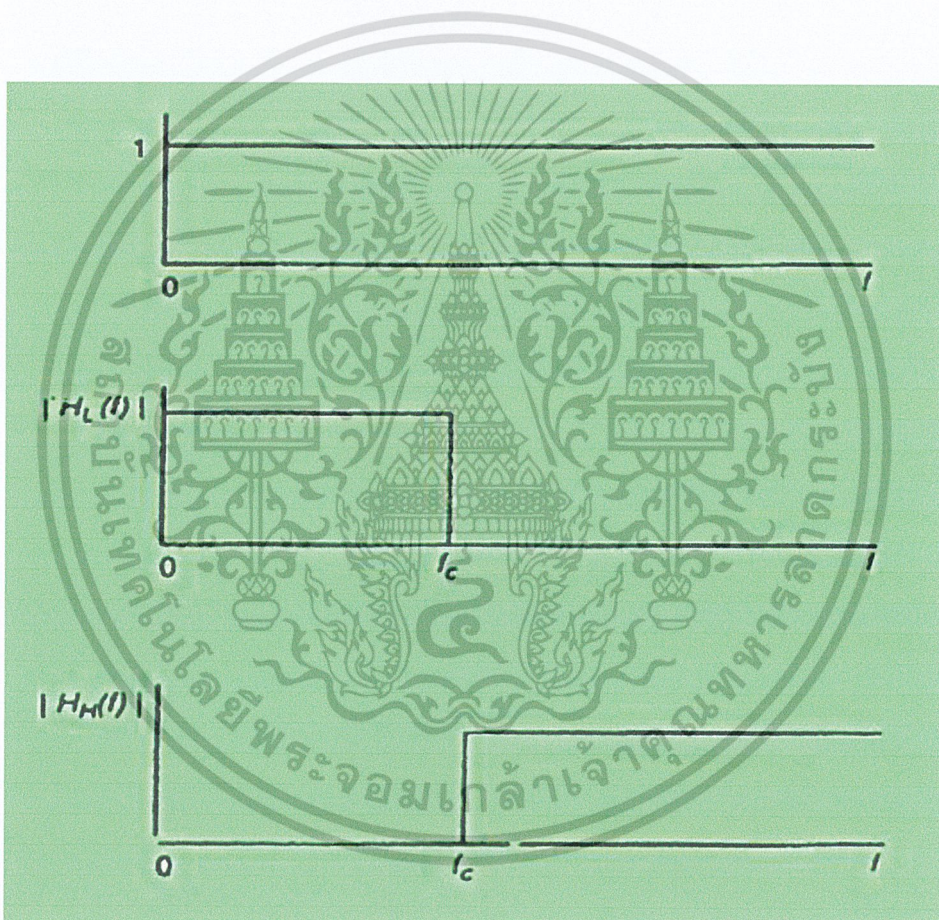
117546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 17 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน, ช่วงความถี่ผ่าน, ช่วงความถี่หยุด แบบเฟิไออาร์

#### 3.2.1 ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter)

ในการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน จะทำโดยการนำผลการตอบสนองความถี่ของตัวกรอง  
ออลพาส (All-Pass Filter) ลบด้วยผลการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูป  
ที่ 2.4



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟตอบสนองความถี่ของออลพาสฟิลเตอร์, โลพาสฟิลเตอร์, ไฮพาสฟิลเตอร์

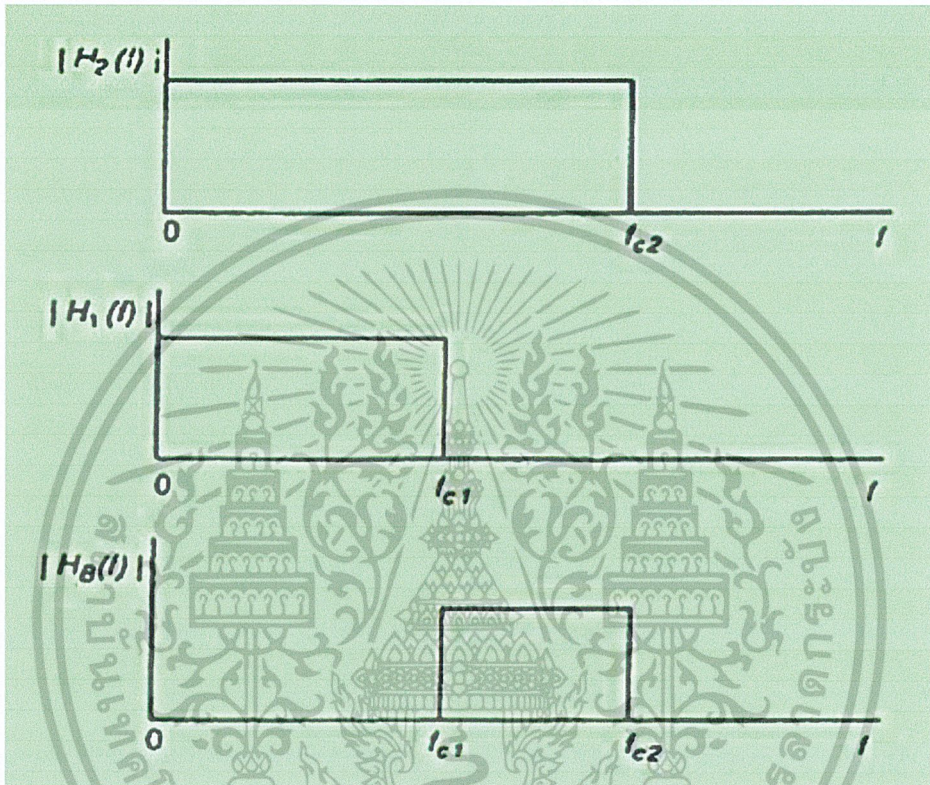
และในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่สูงสามารถหาได้จากสมการ

$$h_D(n)_{\text{high}} = d(n) - h_D(n)_{\text{low}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 18 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน (Bandpass Filter)

ในการออกแบบตัวกรองช่วงความถี่ผ่านแบบเอฟไออาร์ จะทำโดยการนำเอาผลการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน 2 ความถี่มาลบกันดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงกราฟผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน 2 ความถี่ และกราฟผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองช่วงความถี่ผ่าน

และในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองช่วงความถี่ผ่านสามารถหาได้จากสมการ

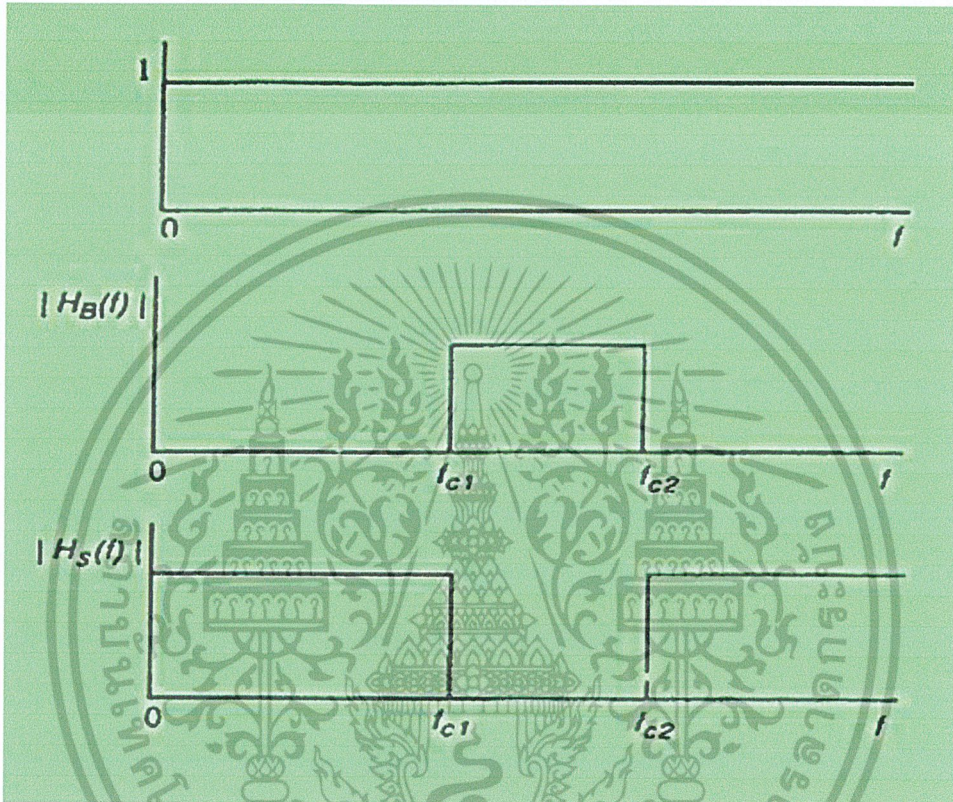
$$h_D(n)_{\text{Band}} = h_D(n)_{fc2} - h_D(n)_{fc1} \quad (3.12)$$

$$h_D(n)_{\text{Band}} = \frac{\sin(2\pi f_{c2} n)}{n\pi} - \frac{\sin(2\pi f_{c1} n)}{n\pi} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 19 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 ตัวกรองความถี่หยุด (Bandstop Filter)

สามารถกระทำได้โดยการนำผล ตอบสนองความถี่ของตัวกรองออลพาสลับด้วยผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองช่วงความถี่ผ่านดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงผลการตอบสนองของตัวกรองออลพาส, ช่วงความถี่ผ่านและช่วงความถี่หยุด

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองช่วงความถี่หยุดสามารถหาได้จากสมการ

$$h_D(n) = \delta(n) - [h_D(n)_{fc2} - h_D(n)_{fc1}] \quad (3.14)$$

$$h_D(n) = \delta(n) - \left[ \frac{\sin(n \times 2\pi f_2)}{n\pi} - \frac{\sin(n \times 2\pi f_1)}{n\pi} \right] \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 20 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรกรองครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงทราบถึงเหตุผลและคุณสมบัติโครงสร้างของวงจรกรองทุกความถี่ต่อขนานกันแล้ว ต่อไปเป็นการออกแบบวงจรดังกล่าว โดยในการออกแบบจะกำหนดคุณลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำเป็นต้นแบบขึ้นมาก่อน โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ชนิดของโพลีโนเมียลอันดับของวงจรกรองความถี่ (Orders) จุดตัดความถี่ (Cutoff Frequency) ขนาดของลูกคลื่นในช่วงความถี่ (Passband Ripple) และค่าลดทอนในช่วงความถี่หยุด (Stopband Attenuation) โดยในตัวอย่างการจำลองด้วยโปรแกรมได้กำหนดค่าต่างๆไว้ดังนี้คือ

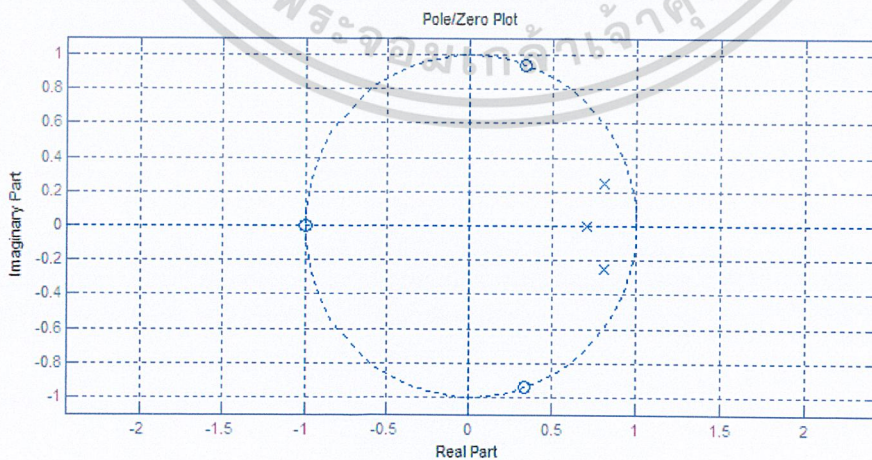
- วงจรกรองต้นแบบเป็น 3<sup>rd</sup> Butterworth Lowpass Filter
- จุดตัดความถี่  $\omega_c = 3$  kHz
- ริปลีลในย่านความถี่ผ่านเท่ากับ 0 เดซิเบล
- ค่าลดทอนในช่วงความถี่หยุดเท่ากับ 30 เดซิเบล

และจากข้อกำหนดทางความถี่จากพารามิเตอร์ด้านบน เราสามารถเขียนสมการฟังก์ชัน

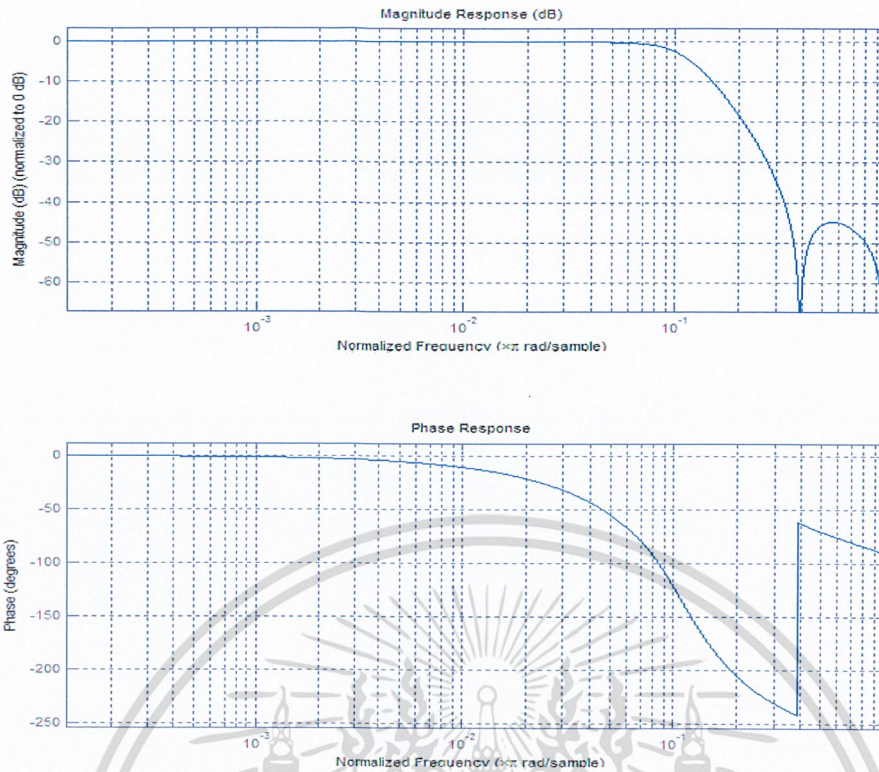
ถ่ายโอนในโดเมน z ดังนี้

$$H(z) = \frac{0.0038 + 0.0113z^{-1} + 0.0113z^{-2} + 0.0038z^{-3}}{1 - 2.3120z^{-1} + 1.8413z^{-2} - 0.4992z^{-3}} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.16) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำที่ได้จากการกำหนดคุณสมบัติข้างต้นเมื่อนำไปหาตำแหน่งโพล ซีโร ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของโพลและซีโรของวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบ



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (บน) และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบ

### 3.4 การออกแบบวงจรกรองทุกความถี่ผ่านด้วยวิธี Pole Interacting Prototype

การออกแบบวงจรกรองครอสโอเวอร์จากวงจรกรองทุกความถี่ผ่านขนานกันด้วยวิธีการใช้ Pole Interacting Prototype วิธีการแยกค่าจากฟังก์ชันถ่ายโอนต้นแบบให้อยู่ในรูปของผลรวมของสองฟังก์ชัน โดยสองฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่จะมีคุณสมบัติเป็น All-Pass ฟังก์ชัน โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

เมื่อนำเอาเทอมส่วนจากสมการที่ (3.16) โดยนำเอาเทอมเศษมาทำการแยกหาค่าราก ซึ่งจากสมการดังกล่าวมีอันดับ 3 จะได้ค่ารากที่เป็นค่าจริง 1 ค่าและค่ารากที่เป็นคู่จำนวนเชิงซ้อน 1 คู่ ดังสมการที่ (3.17)

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 0.8046 + j0.2508 \\ \delta_2 &= 0.8046 - j0.2508 \\ \delta_3 &= 0.7041 \end{aligned} \quad (3.17)$$

จากนั้นทำการนำค่ารากที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอน  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ได้จากสมการ

$$A_0(z) = \frac{-\delta_3 + z^{-1}}{1 - \delta_3 z^{-1}} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 22 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1(z) = \frac{\delta_1 \cdot \delta_2 - (\delta_1 + \delta_2)z^{-1} + z^{-2}}{1 - (\delta_1 + \delta_2)z^{-1} + (\delta_1 \cdot \delta_2)z^{-2}} \quad (3.19)$$

เมื่อนำสมการ (3.17) แทนลงในสมการ (3.18) และ (3.19) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ตามสมการที่ (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ

$$A_0(z) = \frac{-0.7041 + z^{-1}}{1 - 0.7041z^{-1}} \quad (3.20)$$

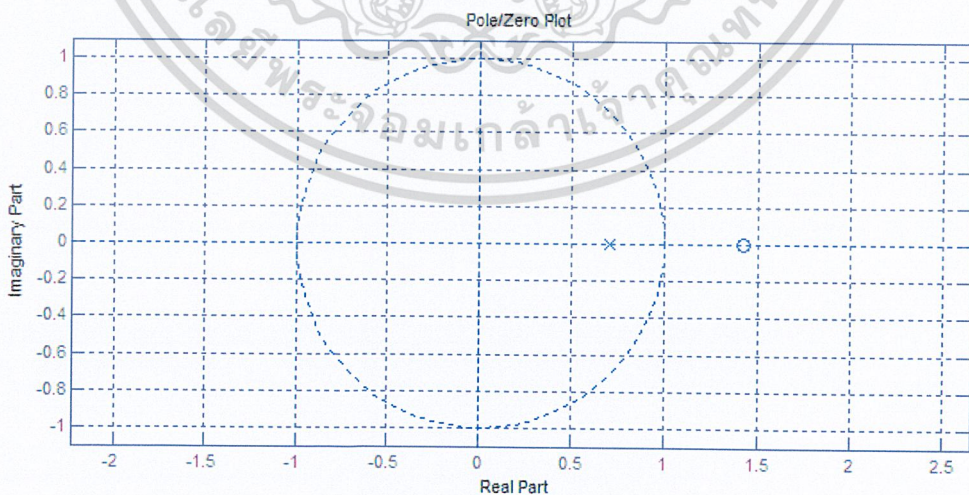
$$A_1(z) = \frac{0.7102 - 1.6092z^{-1} + z^{-2}}{1 - 1.6092z^{-1} + 0.7102z^{-2}} \quad (3.21)$$

และสัญญาณที่ด้านเอาต์พุตของทั้งวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองความถี่สูงจะเกิดจากผลรวมและผลต่างของวงจรกรอง  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ดังสมการที่ (3.22) และสมการที่ (3.23) ต่อไปนี้

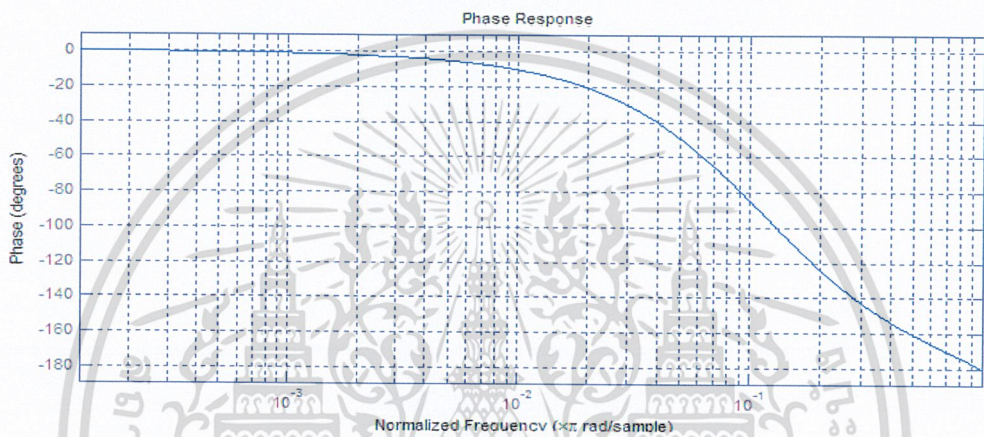
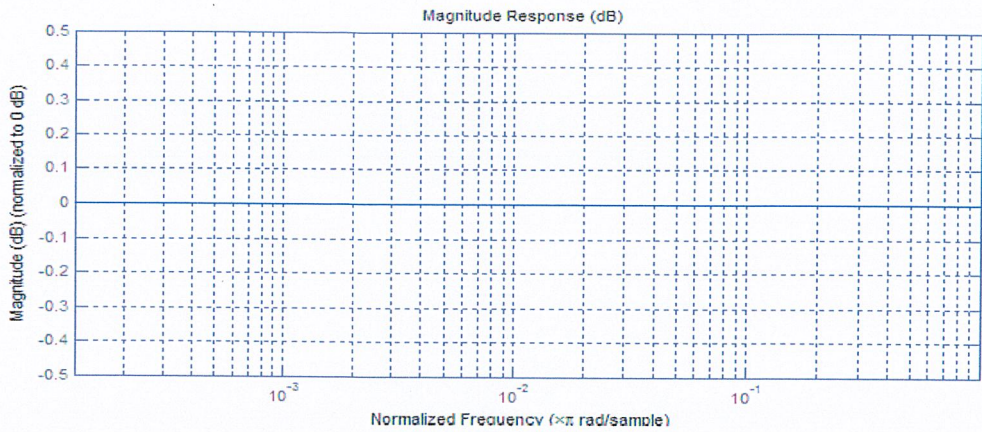
$$H_{\text{LPF}} = 1/2(A_0(z) + A_1(z)) \quad (3.22)$$

$$H_{\text{HPF}} = 1/2(A_0(z) - A_1(z)) \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.20) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองทุกความถี่ผ่านอันดับหนึ่ง โดยมีตำแหน่งของโพล ซีโรดังรูปที่ 3.9 และผลตอบสนองทางขนาดและเฟสดังรูปที่ 3.10

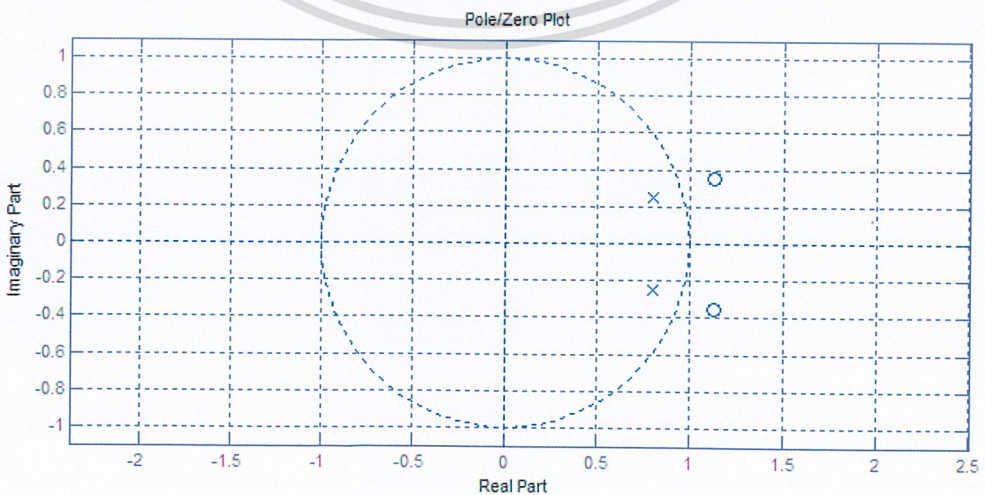


รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน  $A_0(z)$

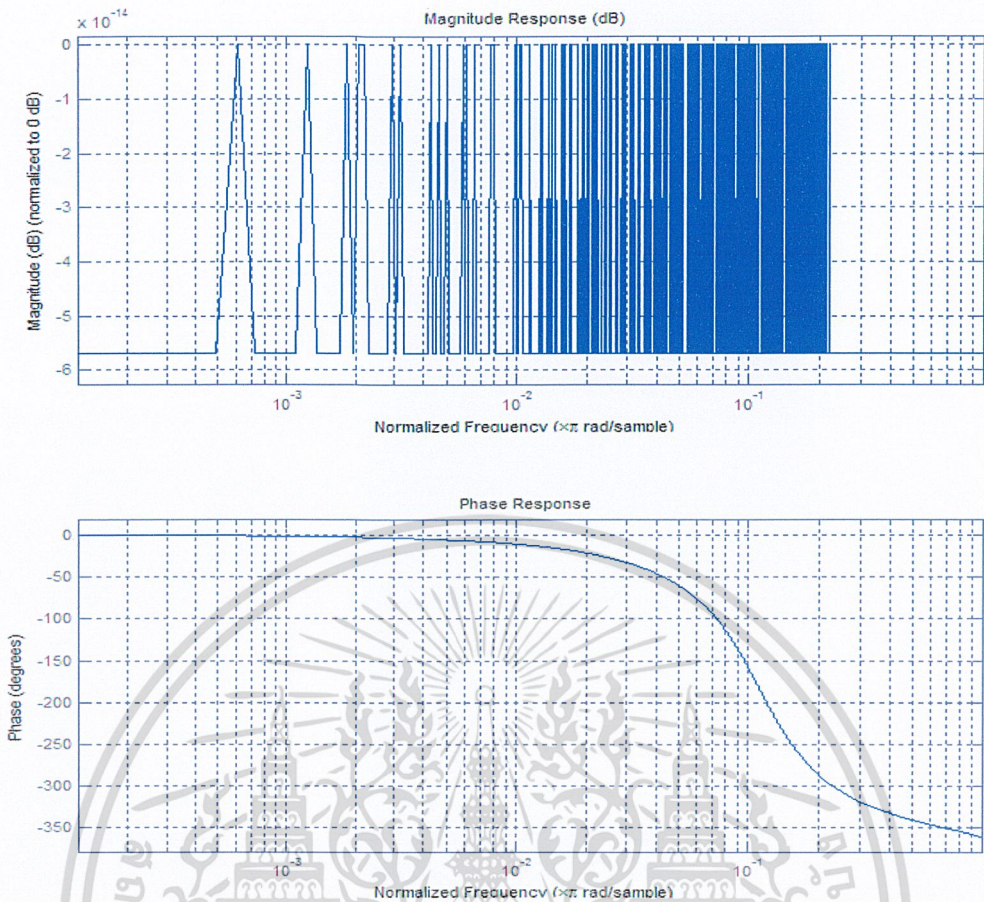


รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (บน) และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของฟังก์ชันถ่ายโอน  $A_0(z)$

จากสมการที่ (3.21) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองทุกความถี่ผ่านอันดับหนึ่งโดยมีตำแหน่งของโพล ซีโรดังรูปที่ 3.11 และผลตอบสนองทางขนาดและเฟสดังรูปที่ 3.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของโพลและซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอน  $A_1(z)$  ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 24 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (บน) และผลตอบสนองเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของฟังก์ชันถ่ายโอน  $A_1(z)$

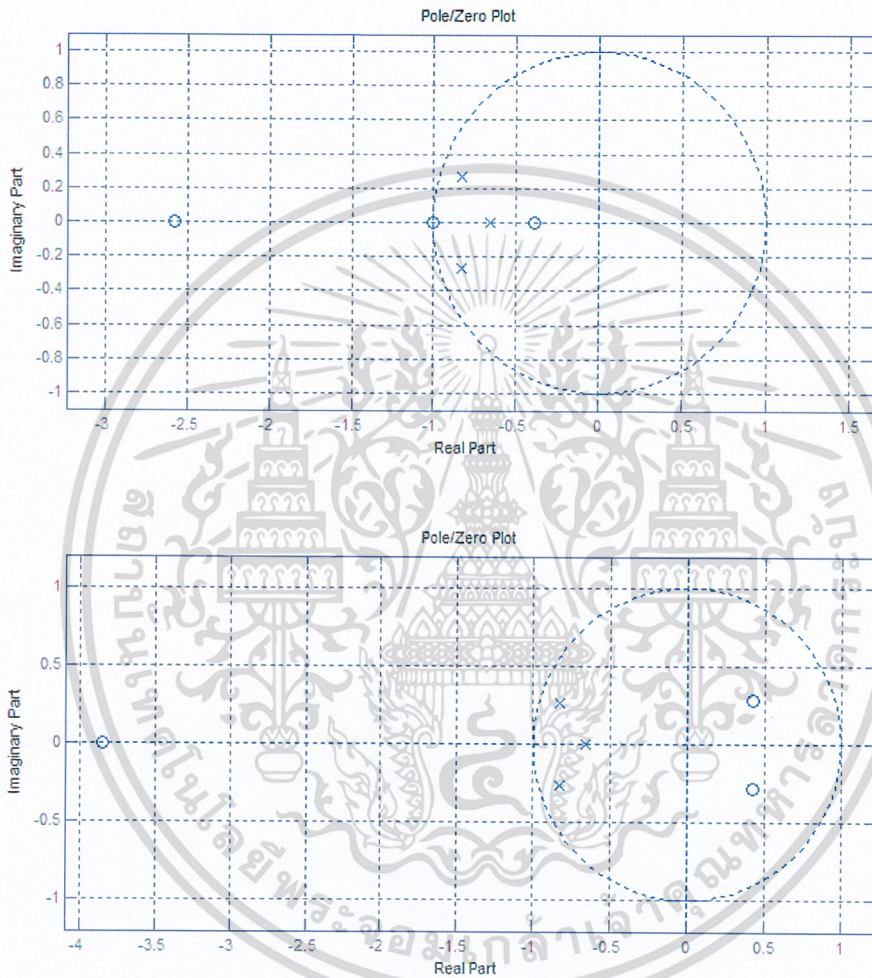
เมื่อแทนสมการที่ (3.20) และ (3.21) ลงในสมการ (3.22) จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนของ  $z$  ซึ่งตรงกับวงจรรองความถี่ต่ำดังนี้

$$H_{LP}(z) = \frac{0.0030 + 0.0119z^{-1} + 0.0119z^{-2} + 0.0030z^{-3}}{1 - 2.31331z^{-1} + 1.8432z^{-2} - 0.4957z^{-3}} \quad (3.24)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.20) และ (3.21) ลงในสมการ (3.23) จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนของ  $z$  ซึ่งตรงกับวงจรรองความถี่สูงดังนี้

$$H_{HP}(z) = \frac{0.7071 + 2.1211z^{-1} + 2.1211z^{-2} + 0.7071z^{-3}}{1 - 2.31331z^{-1} + 1.8432z^{-2} - 0.4957z^{-3}} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) จะเห็นได้ว่าค่าของเทอมส่วนของทั้งสองสมการมีค่าเท่ากัน ซึ่งเมื่อนำไปพล็อตตำแหน่งของโพลและซีโรของทั้งสองสมการจะเห็นได้ว่า ตำแหน่งของโพลนั้นมีตำแหน่งเดียวกัน (Double) และตำแหน่งของซีโรของทั้งสองสมการจะอยู่ตรงกันข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งเรียกว่า Mirror Image Polynomial โดยวงจรรองความถี่สูงที่ได้จะมีคุณสมบัติตรงข้ามกับวงจรรองความถี่ต่ำต้นแบบ

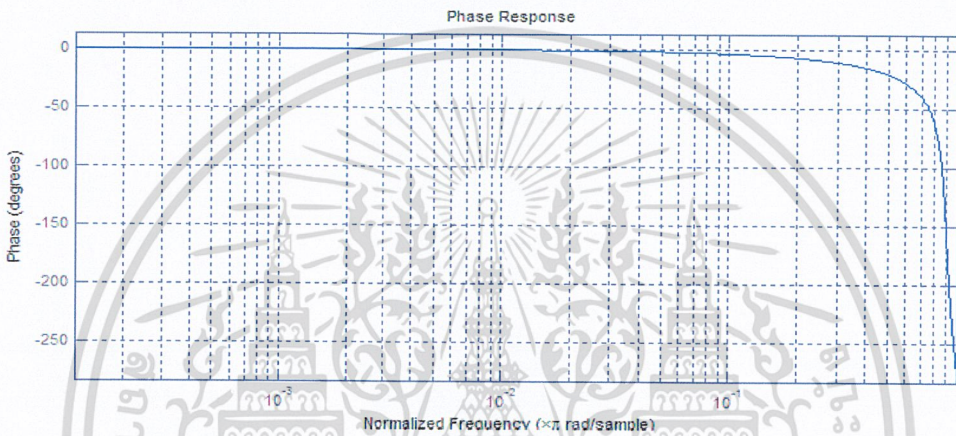
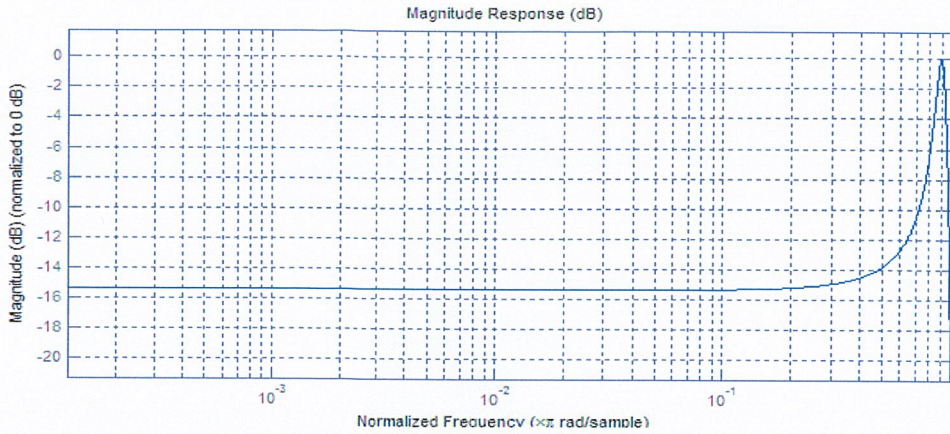


รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของโพลและซีโรของ  $H_{LP}(z)$  (บน) และ  $H_{HP}(z)$  (ล่าง) ซึ่งตำแหน่งของโพลจะอยู่ตำแหน่งเดียวกัน

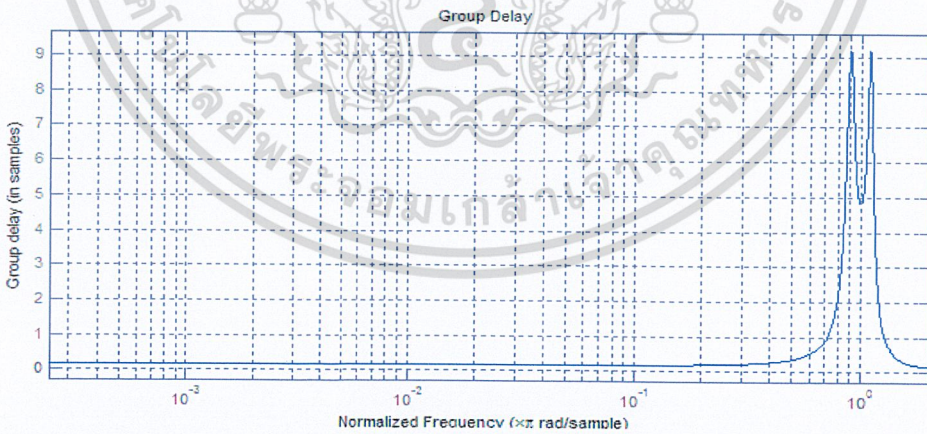
จากการออกแบบวงจรรองความถี่สูงที่ใช้วงจรรองความถี่ต่ำที่ต่อแบบขนาน จะเห็นได้ว่ามีข้อดีในเรื่องของความซับซ้อนที่ลดลง และผลตอบแทนทางขนาดต่อความถี่ราบเรียบตลอดย่านความถี่ แต่เมื่อนำสมการที่ไปหาผลตอบแทนทางขนาด, ทางเฟสต่อความถี่และผลตอบแทนกรุปดีเลย์ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้นและกรุปดีเลย์ไม่ราบเรียบ ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของวงจรรองแบบ IIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 26 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



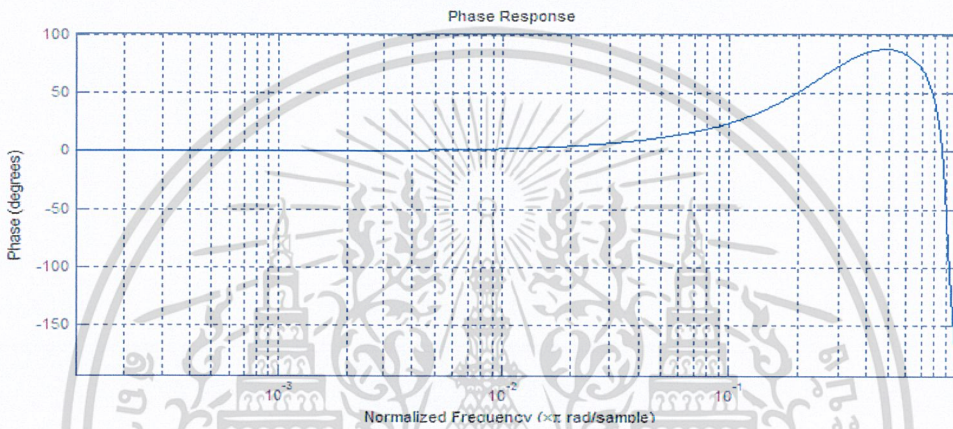
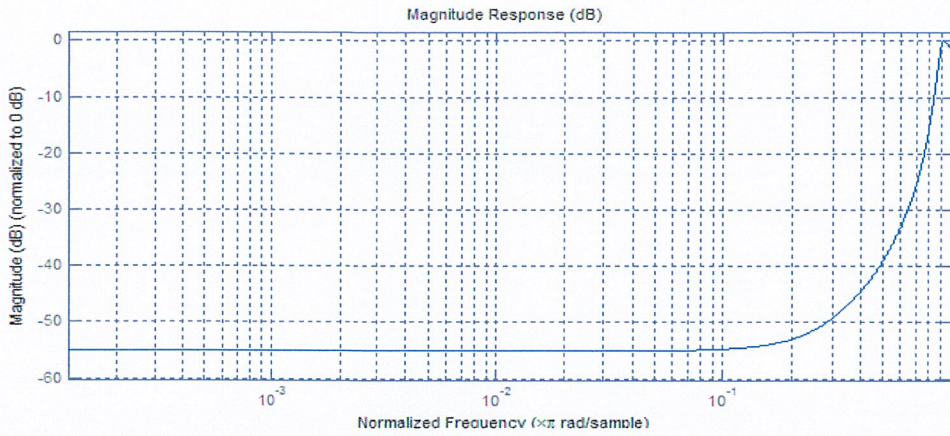
รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของขนาด (บน) และเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของวงจรกรองความถี่ต่ำ



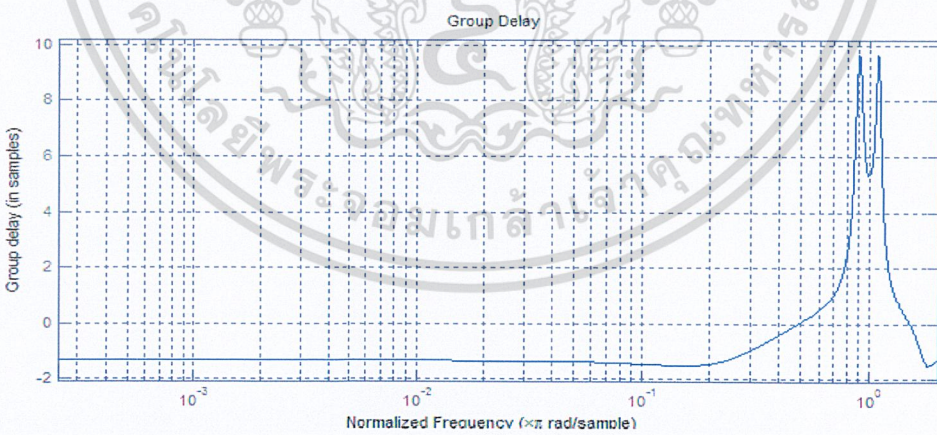
รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ของวงจรกรองความถี่ต่ำ

เมื่อนำสมการที่ (3.25) ไปหาผลการตอบสนองทางขนาดทางเฟสต่อความถี่และผลตอบสนองกรุปดีเลย์ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้นและกรุปดีเลย์ไม่ราบเรียบเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 27 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนองของขนาด (บน) และเฟสต่อความถี่ (ล่าง) ของวงจกรองความถี่สูง



รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ของวงจกรองความถี่สูง

จะเห็นได้ว่า วงจรครอสโอเวอร์เนตเวิร์คที่สร้างจากวงจกรองความถี่ผ่านต่อขนานกันนั้น มีคุณสมบัติแต่ไม่ครบทั้งหมด เนื่องจากผลการตอบสนองทางเฟสยังไม่เป็นเชิงเส้น และกรุปดีเลย์ไม่ราบเรียบตามเงื่อนไขในการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เนตเวิร์ค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 28 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การใช้โปรแกรมซิมมูลิงค์เพื่อจำลองการทำงานของวงจรความถี่

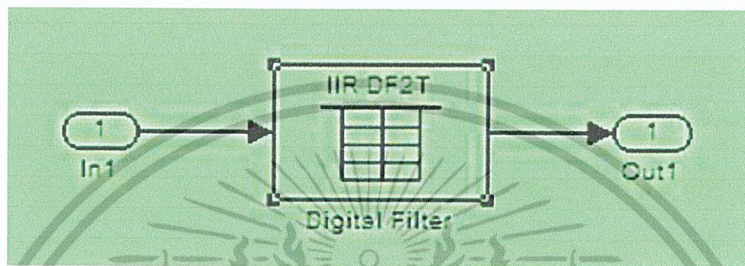
โปรแกรมซิมมูลิงค์ เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนหนึ่งที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Mathworks โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของซิมมูลิงค์ นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ลักษณะการโปรแกรมในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหา Closed Form Solution หรือการหาคำตอบเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาใด ๆ ดังนั้น ซิมมูลิงค์จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น ไม่ว่าจะเป็นวนจรทางตรรกศาสตร์ ไปจนถึงระบบควบคุมสำหรับระบบพลศาสตร์ที่ซับซ้อน จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยเพียง Building Blocks พื้นฐานที่มีมาให้จากซิมมูลิงค์ Libraries นอกเหนือจากนั้นยังมีเครื่องมือในส่วนอื่นๆที่ในปัจจุบันได้เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Digital Signal Processing (DSP) Toolbox หรือ อื่นๆซึ่งในปัจจุบันพบว่าเครื่องมือต่างๆที่มีให้ สามารถทำให้การจำลองหรือวิเคราะห์การทำงานของระบบสามารถทำได้ตั้งแต่ระบบที่มีความง่าย จนถึงระบบที่มีความซับซ้อนอย่างมากโดยไม่ต้องมีการเขียน โปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

ในโปรแกรมซิมมูลิงค์นั้น จะทำการจำลองปัญหา อาศัยการสร้างแผนภูมิ เพื่อการกำเนิด การรับ หรือส่งผ่านสัญญาณ หรือข้อมูลที่ต้องการทราบในแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้น ข้อมูลจากบล็อกประเภทต่างๆจะถูกส่งผ่านไปสู่อบล็อกอื่นๆโดยเส้นสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างบล็อก นั้นๆ สัญญาณสามารถที่จะถูกสร้างและส่งไปสู่อบล็อกอื่นๆทั้งแบบสถิตย์และแบบแปรผัน ข้อมูลสามารถป้อนให้แก่ฟังก์ชันเพื่อการกระทำทางตรรกศาสตร์หรือทางคณิตศาสตร์ข้อมูลสามารถที่จะถูกส่งไปสู่อปลายทาง (Sink) ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นในลักษณะของ Oscilloscope หรือ Display หรือแม้กระทั่งเก็บในรูปแบบของไฟล์คอมพิวเตอร์ (Save to Files) สิ่งที่ต้องพึงระวังในการจำลองปัญหานั้น ข้อมูลต่างๆจะถูกดำเนินการ รับ และส่ง ในลักษณะเป็นช่วงเวลา (Discrete Times) เท่านั้น ดังนั้น Step Time หรือ Simulation Time Step หรือ Integration Time Step ที่กำหนดเพื่อการจำลองปัญหานั้นจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยการเลือกใช้ Step Time ที่เหมาะสม

### 3.5.1 การเชื่อมต่อบล็อก

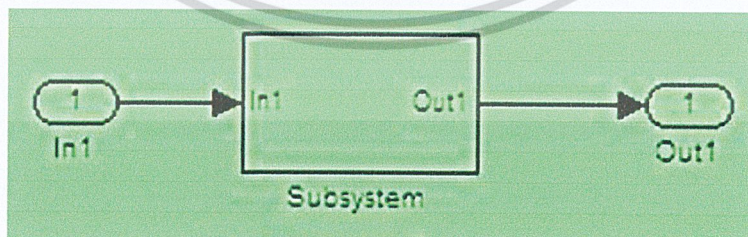
ในการเชื่อมต่อบล็อกบนโปรแกรมซิมมูลิงค์นั้น ให้กดเมาส์ปุ่มซ้ายที่ เอาท์พุทของบล็อกหนึ่ง แล้วค้างปุ่มเอาไว้ โดยเคอร์เซอร์ของเมาส์จะเปลี่ยนรูปเป็นเครื่องหมายบวก หลังจากนั้นลากเมาส์ (จะเห็นเส้นประเกิดขึ้นและวิ่งตามเครื่องหมายบวกดังกล่าว) จากบล็อกหนึ่งไปสู่อินพุท ของบล็อกที่ต้องการจะเชื่อมต่อ เมื่อคลายเมาส์ปุ่มซ้ายที่อินพุท ของอีกบล็อกหนึ่งแล้วเส้นประ จะเปลี่ยนเป็นเส้นทึบแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของบล็อกทั้งสอง



รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อบล็อก

### 3.5.2 การสร้างระบบย่อย

ในการเชื่อมต่อระบบซึ่งมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นนั้น จะมีการนำบล็อกต่างๆที่เชื่อมต่อภายในระบบที่กระบวนการใดกระบวนการหนึ่งมารวมไว้ด้วยกันเป็นหนึ่ง ระบบย่อยที่มีพอร์ตอินพุท 1 เป็นอินพุท และพอร์ตเอาท์พุท 1 เป็นเอาท์พุท ซึ่งสามารถสร้างระบบย่อยของระบบที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งสามารถทำให้เป็นระบบย่อย (Subsystem) ได้โดยลากที่วงจรถัดทั้งหมดแล้วคลิกขวาแล้วเลือกสร้างระบบย่อย



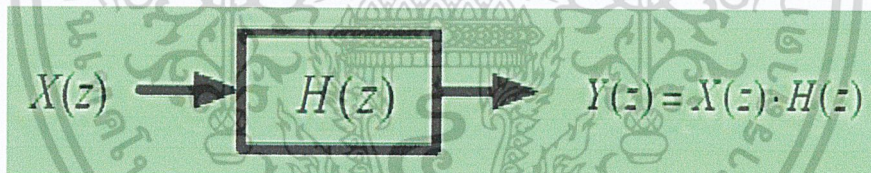
รูปที่ 3.19 ระบบย่อยของโครงสร้าง

### 3.5.3 การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา

การจำลองปัญหาบน โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น เราจะต้องอาศัยเทคนิคของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับโปรแกรม ซิมมูลิงค์ นั้น ระบบในรูปแบบต่างๆ สามารถที่จะจำลองทั้งในแบบของระบบต่อเนื่อง(Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อยการจำลองสามารถที่จะถูกกำหนดให้เริ่ม หรือหยุดที่ช่วงเวลา หรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนด ข้อสังเกตที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหากับระยะเวลาที่ใช้ในการจำลองปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่น คอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจเพียง 1 วินาที เป็นต้น

### 3.6 ตัวอย่างการจำลองวงจรกรองความถี่ไอโออาร์ โดยใช้โปรแกรมซิมมูลิงค์

พิจารณาจากโครงสร้างจะเห็นว่าโดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่ต้องคำนวณในการออกแบบคือค่าสัมประสิทธิ์การคูณที่มีทั้งหมด  $M$  ตัว ถ้านำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออกจะ ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดง  $z$  - Domain ของวงจรกรองจาก  $H(z)$  โดยที่มีสัญญาณ อินพุตเป็น  $X(z)$  และสัญญาณเอาต์พุตที่มีกระทบเป็น  $Y(z)$



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองความถี่ในแซดโดเมน

กำหนดพารามิเตอร์ซึ่งจะทำการสร้างวงจรกรองความถี่ขึ้นมา ต้นแบบนั้นกำหนดได้ดังนี้ ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต้นแบบ โดยมีข้อกำหนดของตัวแปรต่างๆ ไว้ดังต่อไปนี้

- |                     |               |
|---------------------|---------------|
| 1. Pass Band Ripple | 0.005 dB      |
| 2. Pass Band Edge   | 0.300 rad/sec |
| 3. Stop Band Edge   | 0.325 rad/sec |
| 4. Stop Band Ripple | 35 dB         |

โดยวงจรรองความถี่ไอไออาร์ (IIR Filter) ต้นแบบตามข้อกำหนดที่กล่าวมาจะตรงกับอันดับ 7 (Seventh-Order) โดยนำค่ากำหนดตัวกรองความถี่ต้นแบบ หาค่าสัมประสิทธิ์วงจรรองความถี่ขึ้นมา โดยจะได้สมการที่ 3.27

$$X_z(n) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5} + a_6 z^{-6} + a_7 z^{-7}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5} + b_6 z^{-6}} \quad (3.26)$$

กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ที่จะนำมาสร้างวงจรรองความถี่  $H(z)$  และ  $\tilde{H}_L(z)$  ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการจำลองซิมมูลิงค์

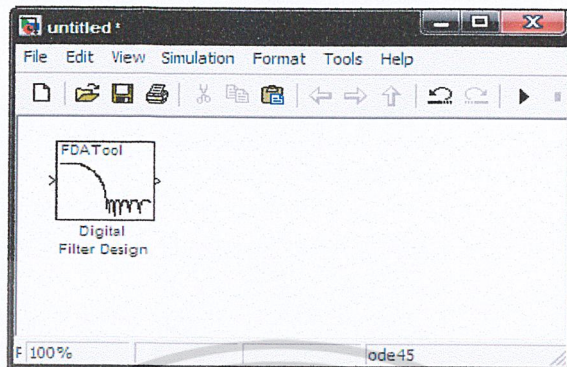
$a_0 = 0.179561$	$b_0 = 1.859965$
$a_1 = 0.824803$	$b_1 = 3.091875$
$a_2 = 1.935034$	$b_2 = 2.642433$
$a_3 = 2.864739$	$b_3 = 0.947720$
$a_4 = 2.864739$	$b_4 = 0.783404$
$a_5 = 1.935034$	$b_5 = 0.257630$
$a_6 = 0.824803$	$b_6 = 0.025247$
$a_7 = 0.179561$	

$$\tilde{H}_L(z) = \frac{e_0 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2}}{1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}} \quad (3.27)$$

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง  $\tilde{H}_L(z)$  อันดับที่ 2

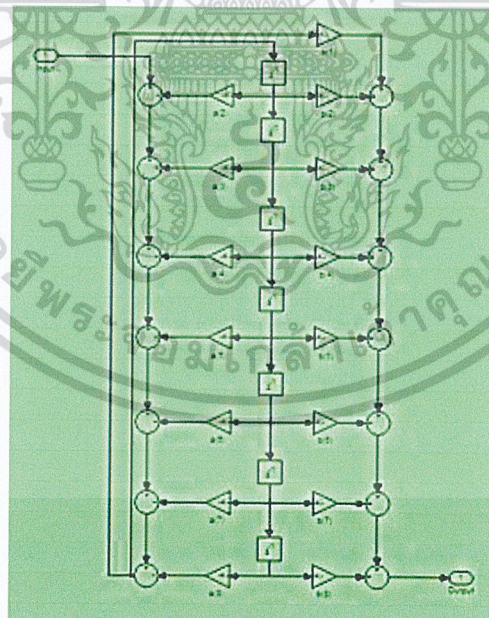
$e_0 = 0.00001825246$
$e_1 = 0.00000388695$
$e_2 = 0$
$f_1 = 0.7085589$
$f_2 = 0.9175521$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องการแล้ว จึงทำการจำลองการสร้างระบบย่อยของวงจรกรองความถี่ไอโออาร์โดยใช้ FDA Tools > Signal Processing Block set > Filtering > Filter Design



รูปที่ 3.21 ระบบย่อยของโครงสร้างวงจรกรองความถี่ไอโออาร์

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ไอโออาร์ (IIR Filter) ที่มีความยาว  $M$  ประกอบด้วยวงจรหน่วยเวลาจำนวน  $M-1$  ตัว วงจรคูณ  $M$  ชุด และวงจรบวกอีก  $M-1$  ชุด และทำการสร้างเป็นบล็อกของวงจรกรองความถี่ไอโออาร์ โครงสร้าง Direct Form II ขึ้นมาดังรูป

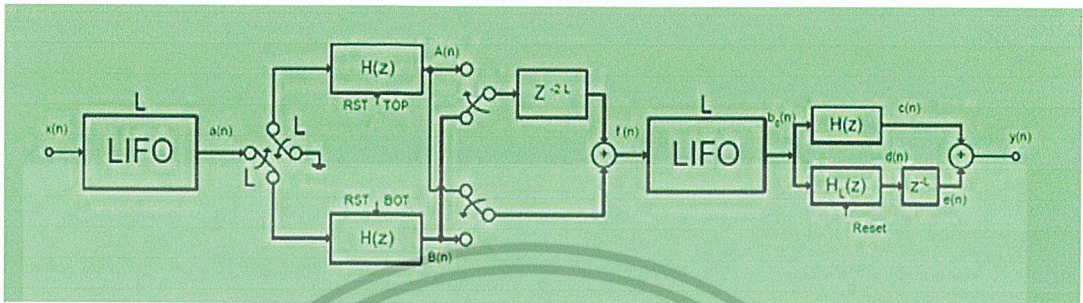


รูปที่ 3.22 ระบบย่อยของโครงสร้างวงจรกรองความถี่ไอโออาร์แบบ Direct form II

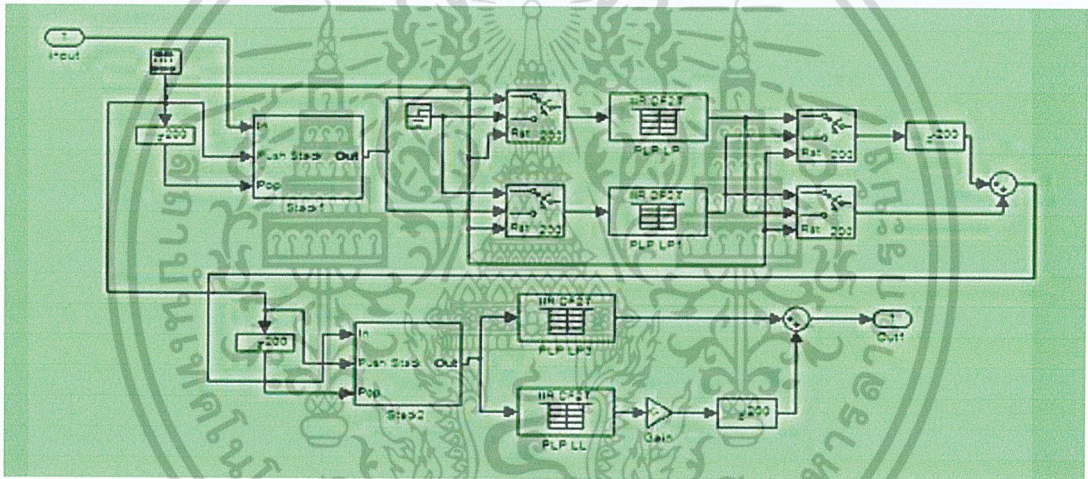
โดยทำการสร้างวงจรกรองความถี่มาจาก Tool Box FDA Tool ที่จะสามารถสร้างวงจรกรองความถี่ขึ้นมาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ออกแบบไว้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 33 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การจำลองโครงสร้างของระบบโดยใช้โปรแกรมซิมมูลิงค์

ในการออกแบบสร้างวงจรบนซิมมูลิงค์ เพื่อจำลองระบบนั้น ดังแสดงบล็อกไดอะแกรม ต้นแบบที่จะนำมาใช้สร้าง ในรูปที่ 3.23 และที่สร้างบน โปรแกรมซิมมูลิงค์ ในรูปที่ 3.24

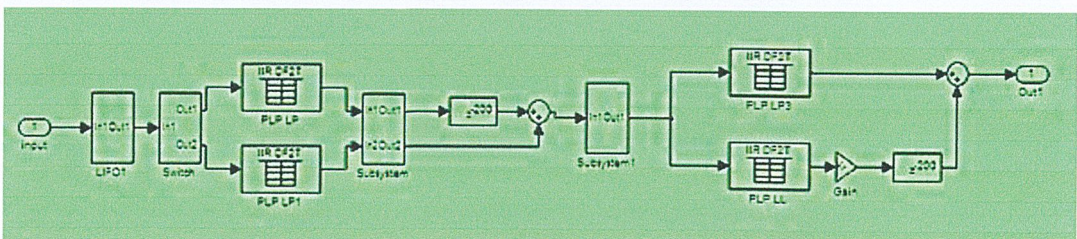


รูปที่ 3.23 ระบบที่นำเสนอและการนำหลักการจำกัดความยาวของผลตอบสนองอนันต์



รูปที่ 3.24 ระบบจำลองขึ้นบนซิมมูลิงค์และการนำหลักการจำกัดความยาวของผลตอบสนองอนันต์

จากรูปที่ 3.24 แสดงให้เห็นการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมซิมมูลิงค์ และทำการสร้าง โดย จะแสดงให้เห็นความซับซ้อนของโปรแกรม จึงทำการลดความซับซ้อนของโปรแกรมลงโดยการ ใช้ ฟังก์ชันย่อย เพื่อลดจำนวนบล็อกให้น้อยลงและง่ายต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.25 การลดความซับซ้อนของวงจรโดยใช้ฟังก์ชันย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 34 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลออดิโอ 3 ชนิด มีดังนี้

##### 4.1.1 ตัวกรองความถี่ชนิด FIR (Finite Impulse Response Filter)

- IIR Direct Form

##### 4.1.2 ตัวกรองความถี่ชนิด IIR (Infinite Impulse Response Filter)

- IIR Direct Form I
- IIR Direct Form II

##### 4.1.3 ตัวกรองความถี่ชนิด PAPF (Parallel All-Pass Filter)

- Parallel Lowpass Filter
- Parallel Highpass Filter

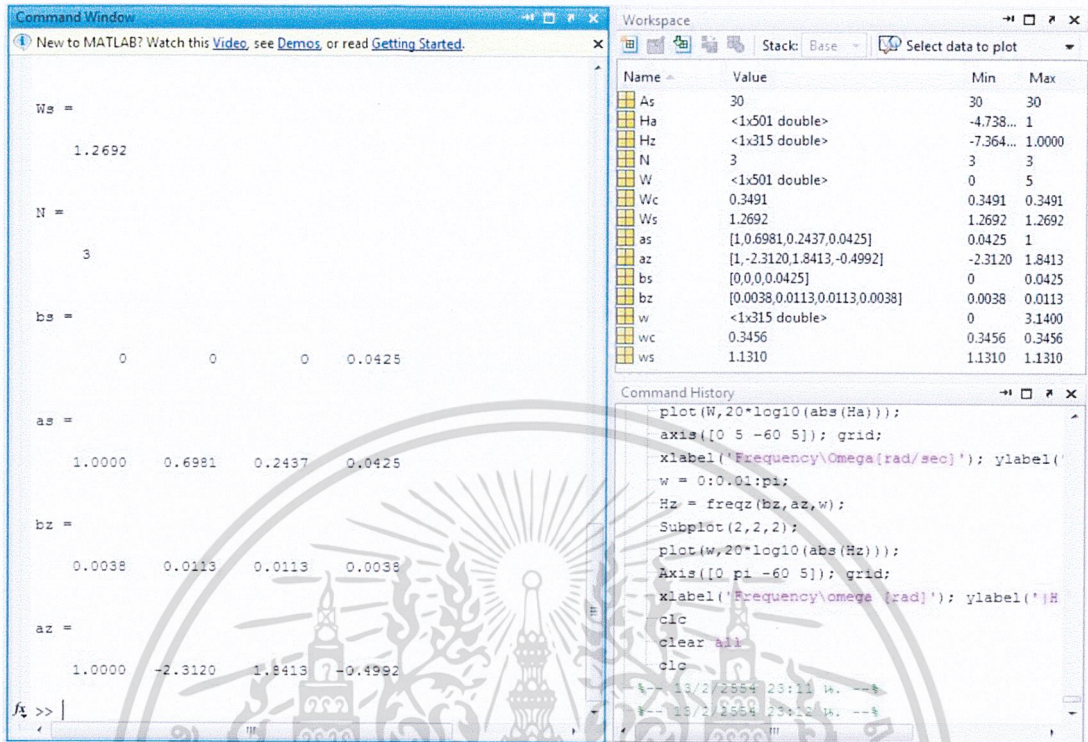
โดยการทดลองจะใช้คำสั่งบนหน้าต่าง Command ของโปรแกรม MATLAB ออกแบบกำหนดค่าพารามิเตอร์เดียวกันสำหรับตัวกรองความถี่ทั้ง 3 ชนิด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของ ตัวกรองความถี่ ดังนี้

```
wc = 0.1*pi;
ws = 0.36*pi;
As = 30;
Wc = 2*tan(wc/2)
Ws = 2*tan(ws/2)
[N] = buttord(Wc,Ws,3,As,'s')
[bs,as] = butter(N,Wc,'s')
[bz,az] = bilinear(bs,as,1)
W = 0:0.01:5;
Ha = freqs(bs,as,W);
Subplot(2,2,1);
plot(W,20*log10(abs(Ha)));
axis([0 5 -60 5]); grid;
xlabel('Frequency(\Omega)rad/sec');
ylabel('|H_a(j\Omega)| [db]');
w = 0:0.01:pi;
Hz = freqz(bz,az,w);
Subplot(2,2,2);
plot(w,20*log10(abs(Hz)));
Axis([0 pi -60 5]); grid;
xlabel('Frequency(\Omega)rad');
ylabel('|H(e^j\omega)| [db]');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... หากพบเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 35 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการ Run ด้วยโปรแกรม MATLAB จากคำสั่งข้างต้น ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการรัน Matlab

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการ Run ด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ คือ

$$\begin{aligned}
 b &= [0.0038 \quad 0.0113 \quad 0.0113 \quad 0.0038] \\
 a &= [1.0000 \quad -2.3120 \quad 1.8413 \quad -0.4992] \\
 N &= 3
 \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ในโดเมน z ได้ดังนี้

$$H(z) = \frac{0.0038 + 0.0113z^{-1} + 0.0113z^{-2} + 0.0038z^{-3}}{1 - 2.3120z^{-1} + 1.8413z^{-2} - 0.4992z^{-3}}$$

จะเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่ต้นแบบที่ออกแบบมาเป็นวงจรกรองแบบ 3<sup>rd</sup> Order Butterworth Lowpass Filter หรือวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ทที่มีอันดับเป็น 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 36 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรวงจรกรองต้นแบบมาทำการควอนไทซ์เซชัน คือการนำค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองต้นแบบมาคำนวณเพื่อลดหรือเพิ่มจำนวนบิตของค่าสัมประสิทธิ์ ในการเปรียบเทียบตัวกรองที่ทำการควอนไทซ์ค่าสัมประสิทธิ์ด้วยจำนวนบิตที่ต่างกันนั้น จะให้ผลลัพธ์ทางด้านคุณภาพของเสียงต่างกันอย่างไร ทั้งนี้ในการทดลอง จะทำควอนไทซ์เซชันด้วยจำนวนบิต 4, 8, 12, 16, 18, 20 และ 24 บิต ตามลำดับ

สำหรับการทำควอนไทซ์เซชันของ FIR Filter และ IIR Filter มีวิธีการคำนวณคล้ายกัน ต่างกันที่ FIR Filter จะเอาเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์เทอมเศษไปคำนวณ

- นำค่าสัมประสิทธิ์แต่ละค่าที่ต้องการทำการควอนไทซ์เซชันมาทำการคูณกับ  $2^{n-1}$  ( n คือ จำนวนบิตที่ต้องการนำมาควอนไทซ์เซชัน) ยกตัวอย่าง หากทำการควอนไทซ์เซชันที่จำนวนบิต 16 บิต นำค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวมาคูณกับ  $2^{16}$  จะได้

$$0.0038(2^{16}) \text{ จะได้ } 0.0038(2^{16-1}) = 0.0038(32,768) = 124.5184$$

- นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการปัดจุดหลังทศนิยมให้เป็น 0 ทั้งหมดโดยผลลัพธ์จากขั้นตอนที่ 1 เท่ากับ 124.5184 เมื่อทำการปัดจุดหลังทศนิยมให้เป็น 0 ทั้งหมดจะได้เท่ากับ 124
- นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นจำนวนเต็มหลังจากปัดจุดทศนิยมแล้ว มาทำการหารด้วย  $2^{n-1}$  อีกครั้งหนึ่ง จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำผ่านการควอนไทซ์เซชันโดยผลลัพธ์จากขั้นตอนที่ 2 เท่ากับ 124 นำมาหารกับ  $2^{n-1}$  จะได้

$$124/(2^{16-1}) = 124(32,768) = 0.00372$$

- หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์แต่ละค่ามาคำนวณด้วยวิธีเดียวกันตามขั้นตอนที่ 1-3 ทุกประการ เพียงแต่เปลี่ยนค่า n ตามจำนวนบิตที่ต้องทำการควอนไทซ์เป็น 4, 8, 12, 16, 18, 20 และ 24 บิต ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ควอนไทซ์แล้วดังนี้

Unquantized ;  $b = [0.0038 \quad 0.0113 \quad 0.0113 \quad 0.0038]$

$$a = [1.0000 \quad -2.3120 \quad 1.8413 \quad -0.4992]$$

Quantized 4 bit;  $b = [ \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 ]$

$$a = [1.0000 \quad -2.2500 \quad 1.7500 \quad -0.3750]$$

Quantized 8 bit;  $b = [ \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 ]$

$$a = [1.0000 \quad -2.3046 \quad 1.8359 \quad -0.4921]$$

Quantized 12 bit;       $b = [0.00341 \ 0.00097 \ 0.00097 \ 0.00341]$   
 $a = [1.0000 \ -2.3115 \ 1.8408 \ -0.4991]$

Quantized 16 bit;       $b = [0.00372 \ 0.00122 \ 0.00122 \ 0.00372]$   
 $a = [1.0000 \ -2.3118 \ 1.8408 \ -0.4990]$

Quantized 18 bit;       $b = [0.00374 \ 0.00124 \ 0.00124 \ 0.00374]$   
 $a = [1.0000 \ -2.3118 \ 1.8408 \ -0.4990]$

Quantized 20 bit;       $b = [0.00374 \ 0.00124 \ 0.00124 \ 0.00374]$   
 $a = [1.0000 \ -2.3118 \ 1.8408 \ -0.4990]$

Quantized 24 bit;       $b = [0.00374 \ 0.00124 \ 0.00124 \ 0.00374]$   
 $a = [1.0000 \ -2.3118 \ 1.8408 \ -0.4990]$

สำหรับขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คหรือ Parallel All-Pass Filter นั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ของปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนการทำควอนไทเซชันสำหรับ Parallel All-Pass Filter นั้นก็มีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกับ FIR Filter และ IIR Filter ทุกประการ โดยจากการออกแบบมานั้น หาค่าสัมประสิทธิ์ของ Parallel All-Pass Filter ได้ดังนี้

LPF;       $b = [0.0030 \ 0.0119 \ 0.0119 \ 0.0030]$   
 $a = [1.0000 \ -2.31331 \ 1.8432 \ -0.4957]$

HPF;       $b = [0.7071 \ 2.1211 \ -2.1211 \ 0.7071]$   
 $a = [1.0000 \ -2.31331 \ 1.8432 \ -0.4957]$

โดยที่  $b$  เป็นสัมประสิทธิ์เทอมเศษ และ  $a$  เป็นสัมประสิทธิ์เทอมส่วน

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ในโดเมน  $Z$  ได้ดังนี้

$$H_{LP}(z) = \frac{0.0030 + 0.0119z^{-1} + 0.0119z^{-1} + 0.0030z^{-3}}{1 - 2.3133z^{-1} + 1.8432z^{-2} - 0.44957z^{-3}}$$

$$H_{HP}(z) = \frac{0.7071 + 2.1211z^{-1} + 2.1211z^{-1} + 0.7071z^{-3}}{1 - 2.3133z^{-1} + 1.8432z^{-2} - 0.44957z^{-3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 38 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำควอนไทซ์แล้วด้วยจำนวนบิต 4, 8, 12, 16, 18, 20 และ 24 บิตตามลำดับของ Parallel All-Pass Filter ดังนี้

Unquantized LPF;  $b = [0.0030 \quad 0.0119 \quad 0.0119 \quad 0.0030]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3133 \quad 1.8432 \quad 0.4957]$   
 HPF;  $b = [0.7071 \quad 2.1211 \quad -2.1211 \quad 0.7071]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3133 \quad 1.8432 \quad 0.4957]$

Quantized 4 bit LPF;  $b = [ \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 0 \quad ]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.2500 \quad 1.7500 \quad 0.3750]$   
 HPF;  $b = [0.6250 \quad 2.0000 \quad -2.0000 \quad 0.6250]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.2500 \quad 1.7500 \quad 0.3750]$

Quantized 8 bit LPF;  $b = [ \quad 0 \quad 0.0078 \quad 0.0078 \quad \quad 0 \quad ]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3125 \quad 1.8359 \quad 0.4921]$   
 HPF;  $b = [0.7031 \quad 2.1171 \quad -2.1171 \quad 0.7031]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3125 \quad 1.8359 \quad 0.4921]$

Quantized 12 bit LPF;  $b = [0.0029 \quad 0.0117 \quad 0.0117 \quad 0.0029]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3110 \quad 1.8427 \quad 0.4956]$   
 HPF;  $b = [0.7070 \quad 2.1210 \quad -2.1210 \quad 0.7070]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3110 \quad 1.8427 \quad 0.4956]$

Quantized 16 bit LPF;  $b = [0.0029 \quad 0.0118 \quad 0.0118 \quad 0.0029]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3132 \quad 1.8431 \quad 0.4956]$   
 HPF;  $b = [0.7070 \quad 2.1210 \quad -2.1210 \quad 0.7070]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3132 \quad 1.8431 \quad 0.4956]$

Quantized 18 bit LPF;  $b = [0.0029 \quad 0.0118 \quad 0.0118 \quad 0.0029]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3132 \quad 1.8431 \quad 0.4956]$   
 HPF;  $b = [0.7070 \quad 2.1210 \quad -2.1210 \quad 0.7070]$   
 $a = [1.0000 \quad 2.3132 \quad 1.8431 \quad 0.4956]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 39 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantized 20 bit LPF;  $b = [0.0029 \ 0.0118 \ 0.0118 \ 0.0029]$

$a = [1.0000 \ 2.3132 \ 1.8431 \ 0.4956]$

HPF;  $b = [0.7070 \ 2.1210 \ -2.1210 \ 0.7070]$

$a = [1.0000 \ 2.3132 \ 1.8431 \ 0.4956]$

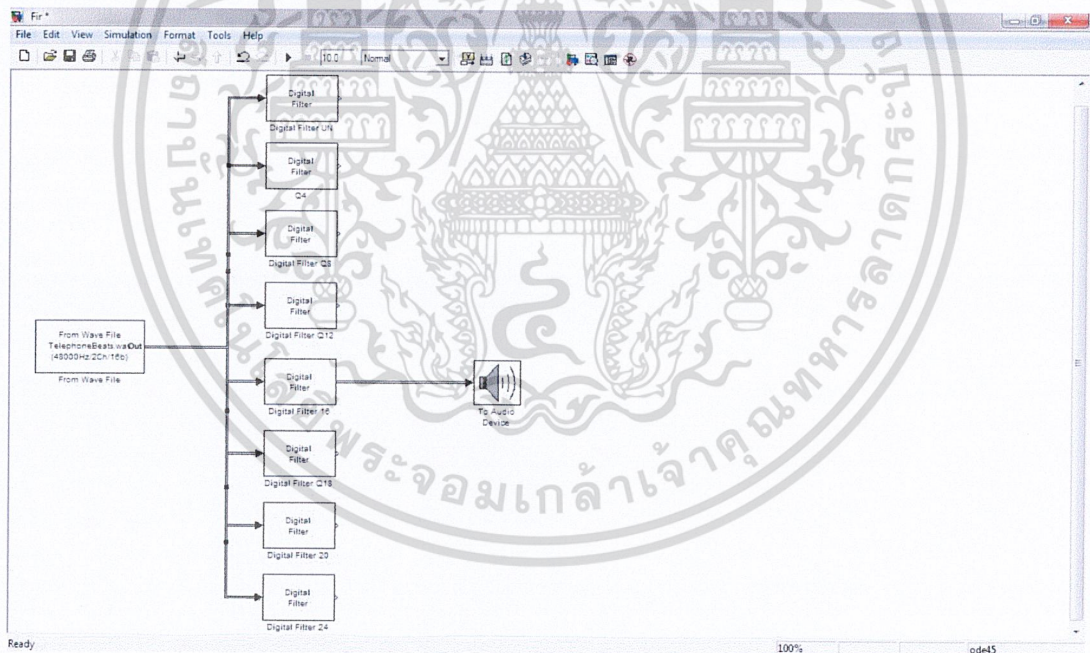
Quantized 24 bit LPF;  $b = [0.0029 \ 0.0118 \ 0.0118 \ 0.0029]$

$a = [1.0000 \ 2.3132 \ 1.8431 \ 0.4956]$

HPF;  $b = [0.7070 \ 2.1210 \ -2.1210 \ 0.7070]$

$a = [1.0000 \ 2.3132 \ 1.8431 \ 0.4956]$

หลังจากที่ทำการควอนไทซ์เซชันค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ทั้ง 3 แบบเสร็จ ก็จะนำไปป้อนให้กับตัวกรองที่จำลองไว้ในซิมมูลิงค์ ซึ่งเชื่อมต่อกับตัวรับสัญญาณเสียงอินพุทไว้แล้ว ตามไดอะแกรมดังรูป

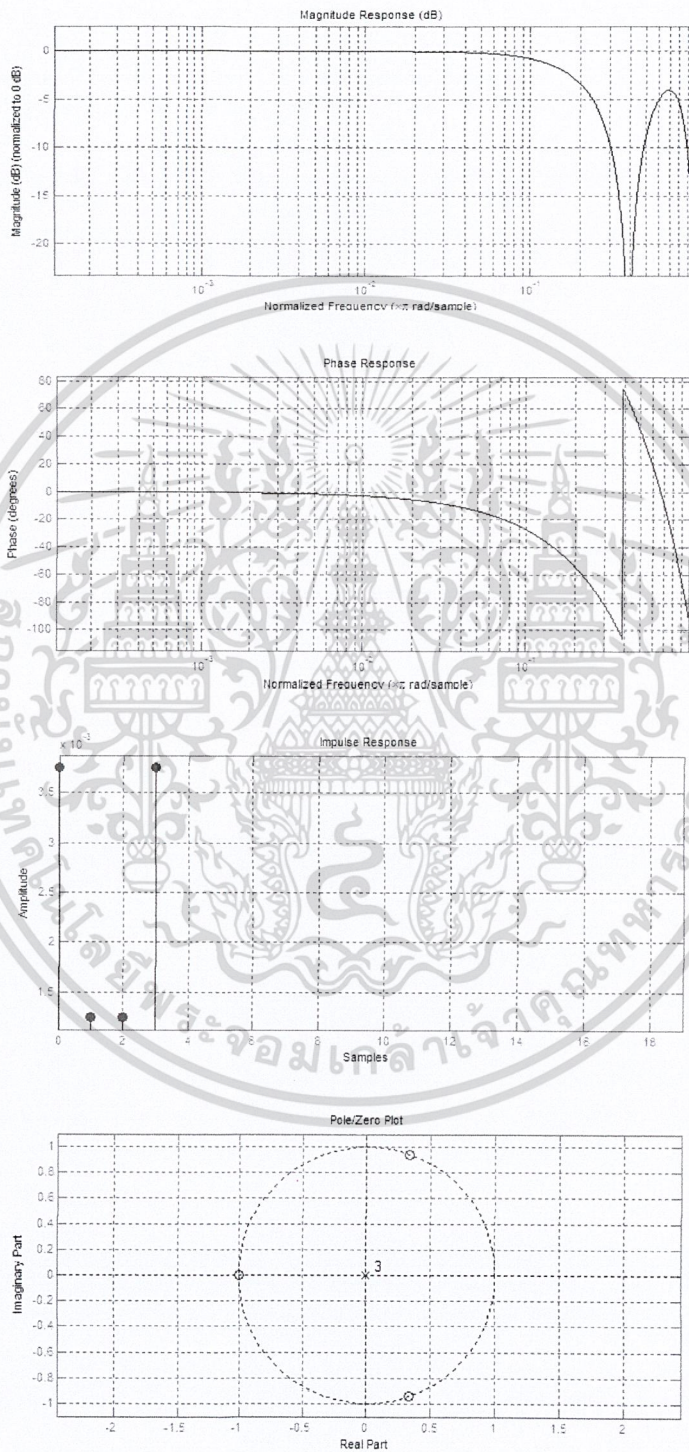


รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อบล็อกของตัวกรองที่จำลองไว้ในซิมมูลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 40 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองทั้งหมดในรูปแบบของกราฟผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร แสดงได้ดังนี้

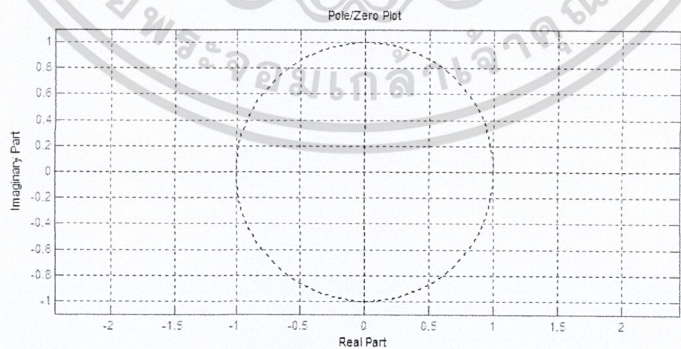
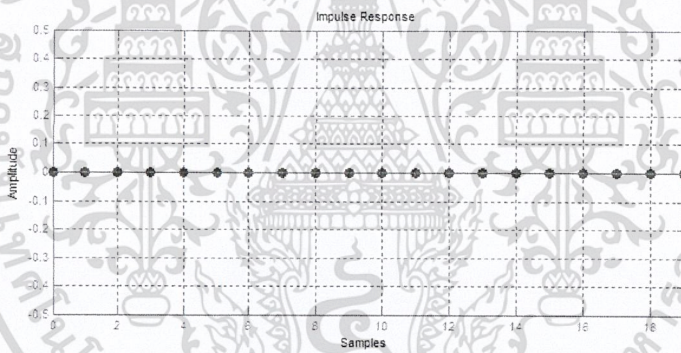
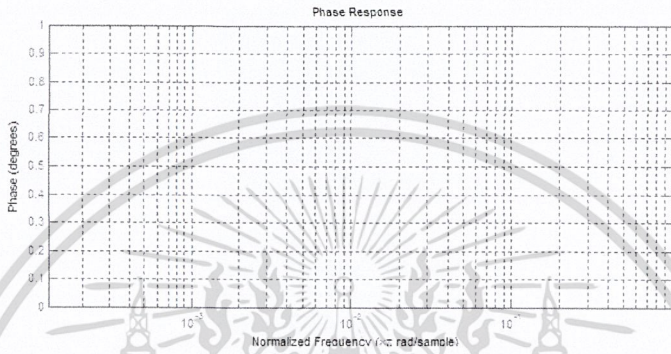
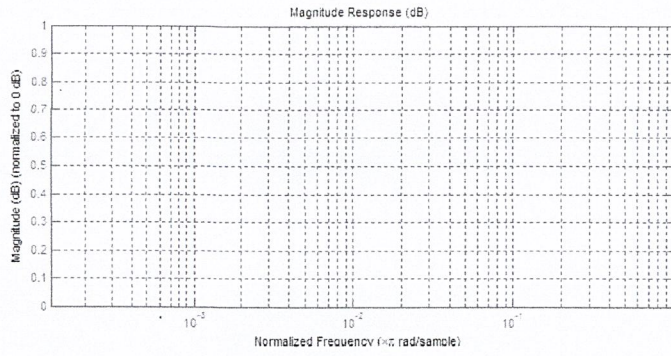


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์

และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Unquantized

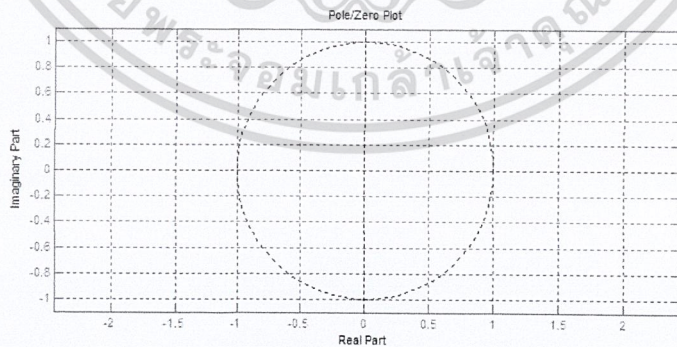
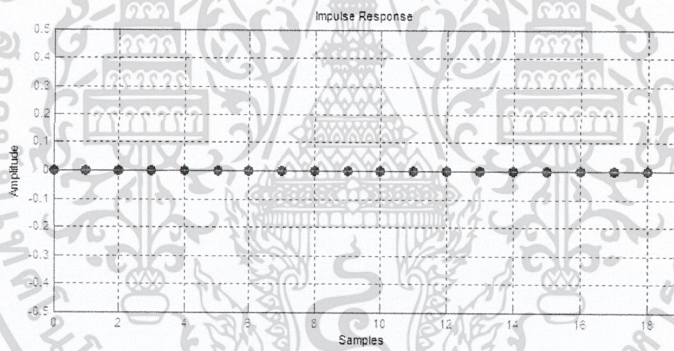
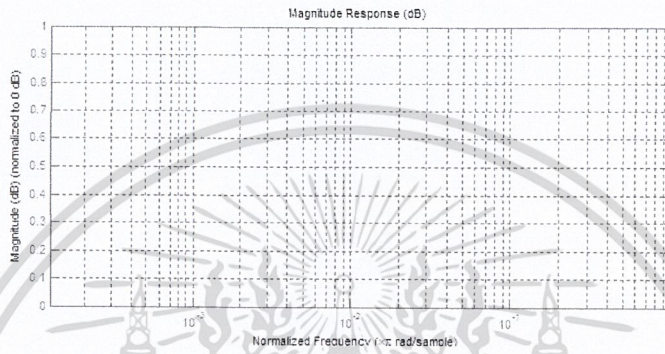
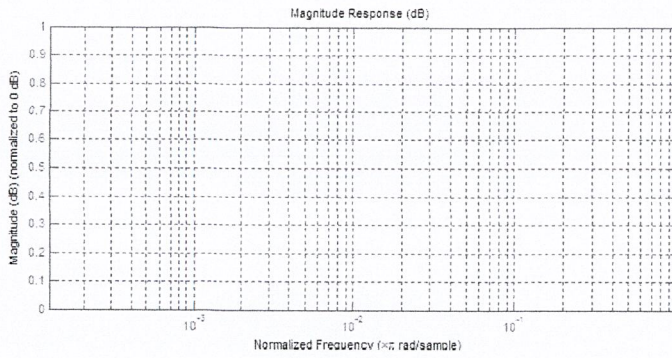
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 41จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



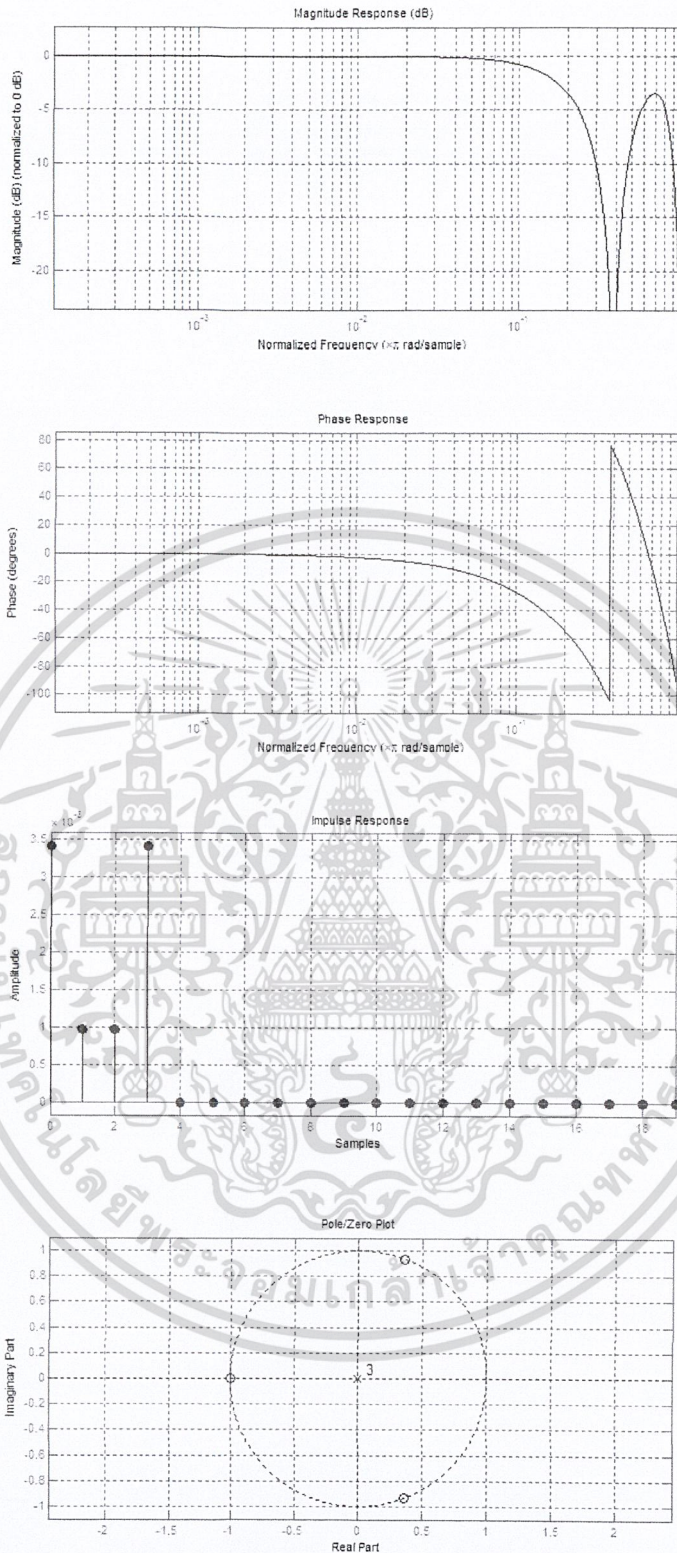
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 4 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 42 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



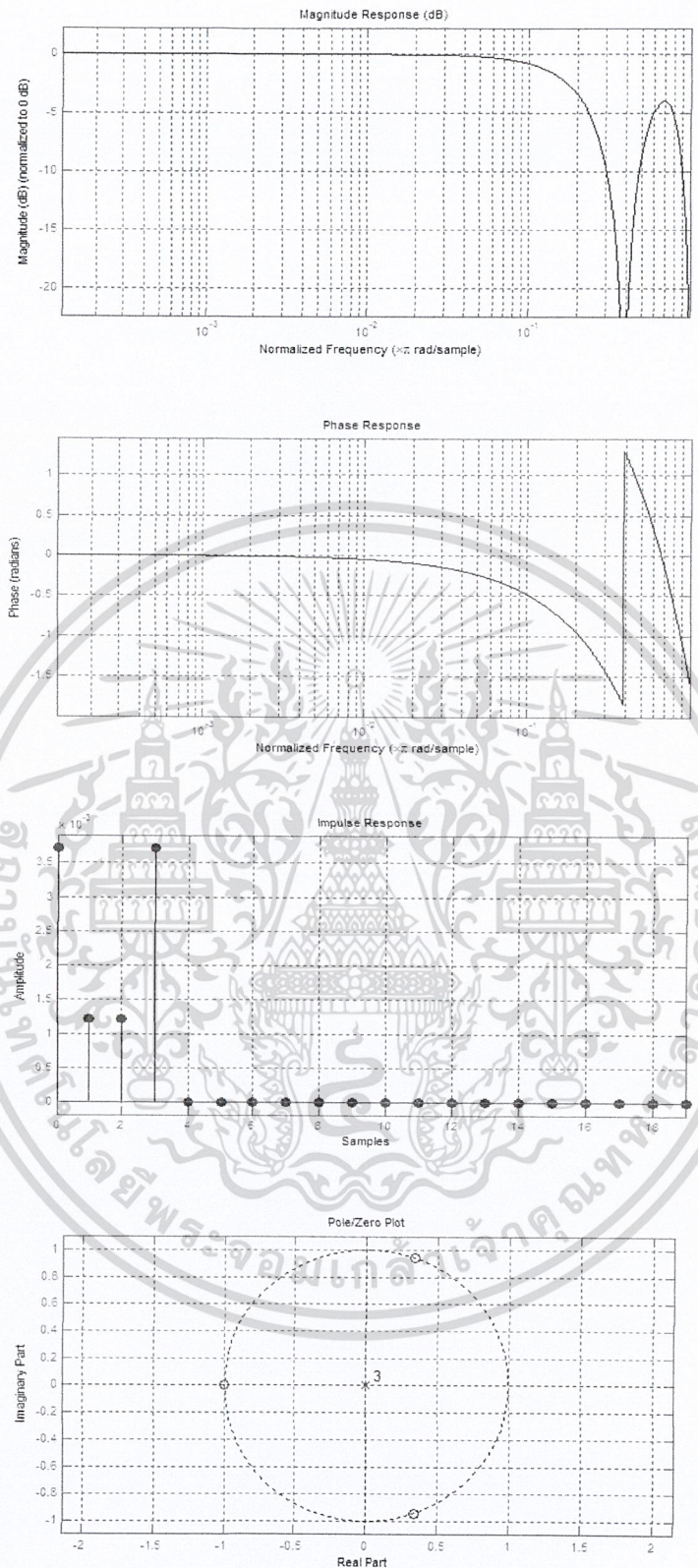
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 8 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 43 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



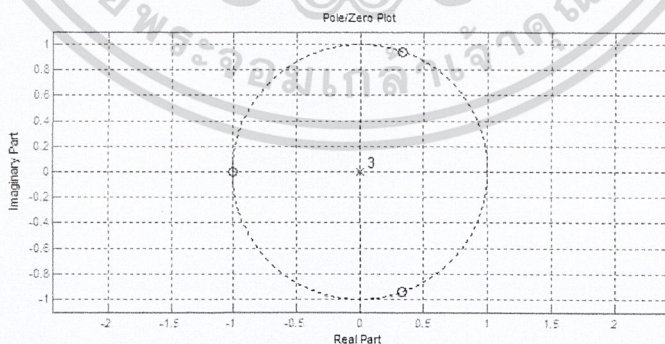
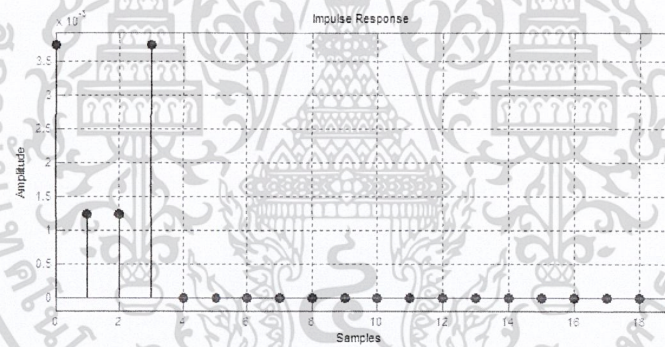
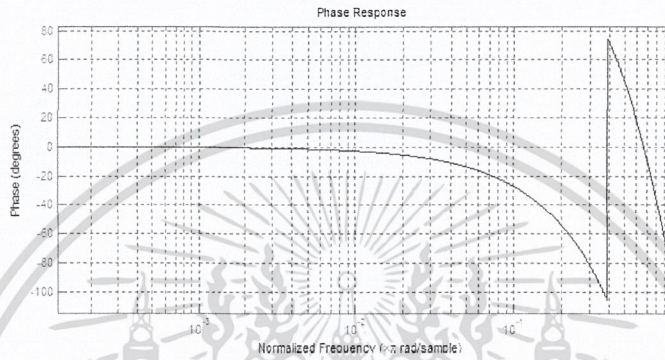
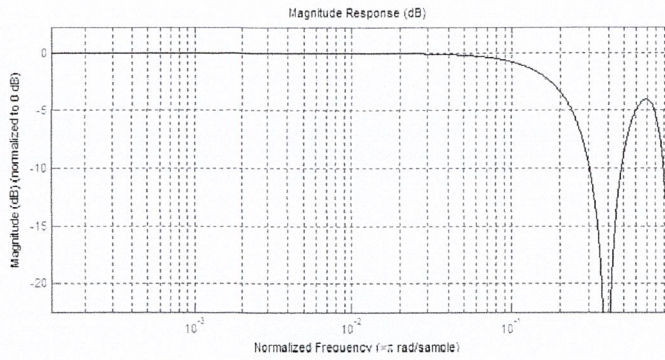
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 12 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 44 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



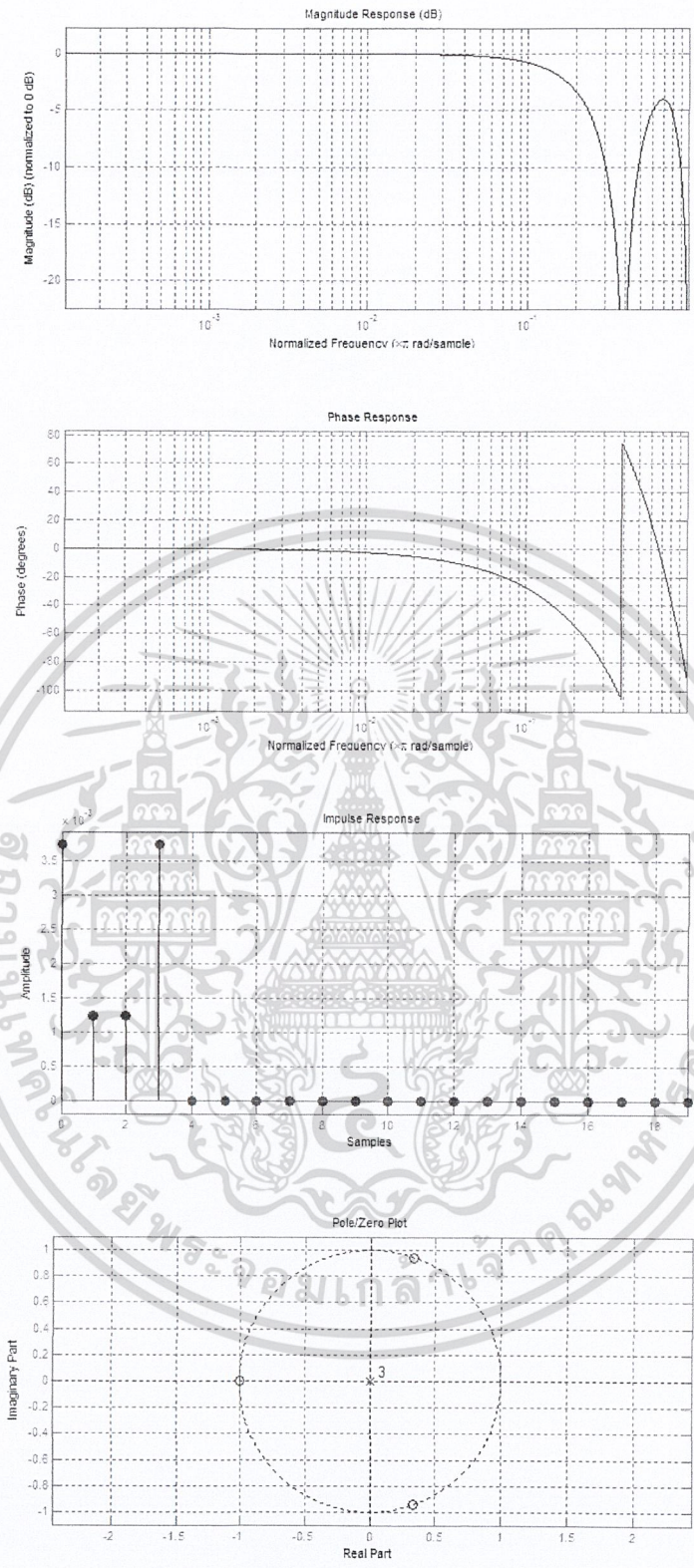
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 45 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



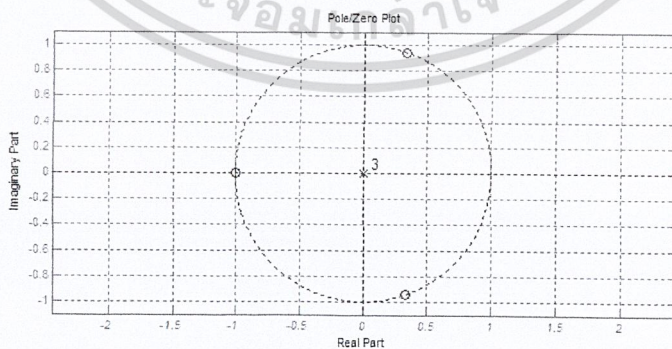
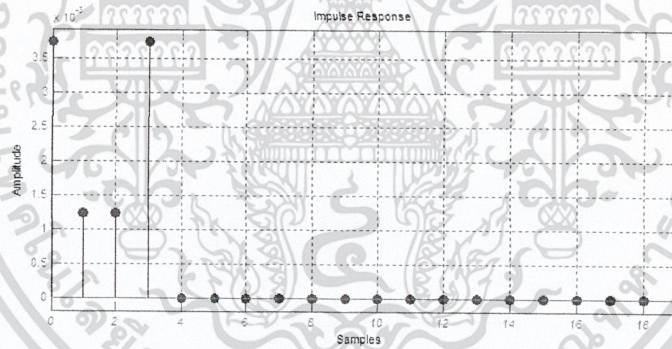
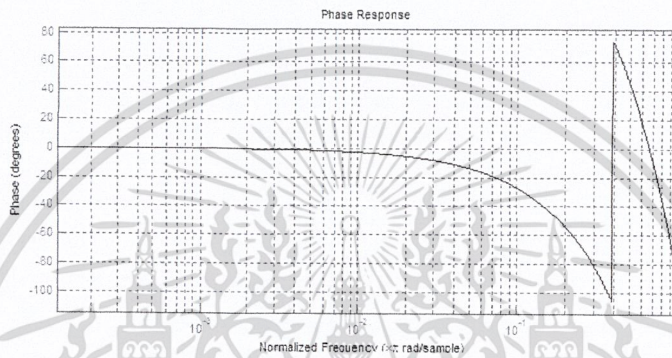
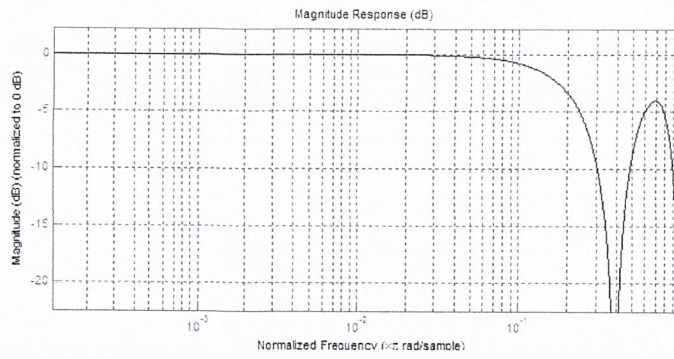
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 18 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 46 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



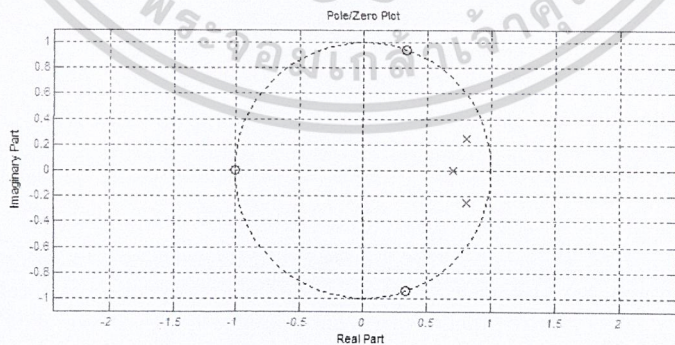
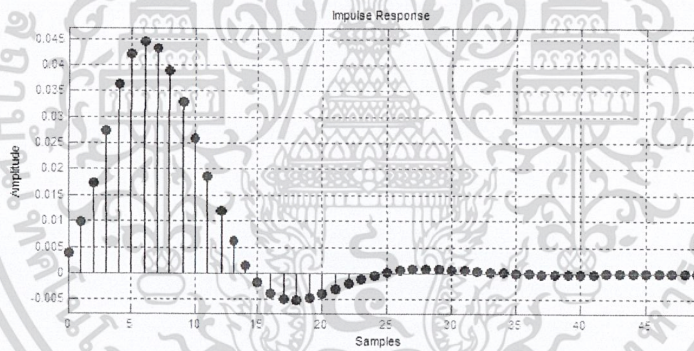
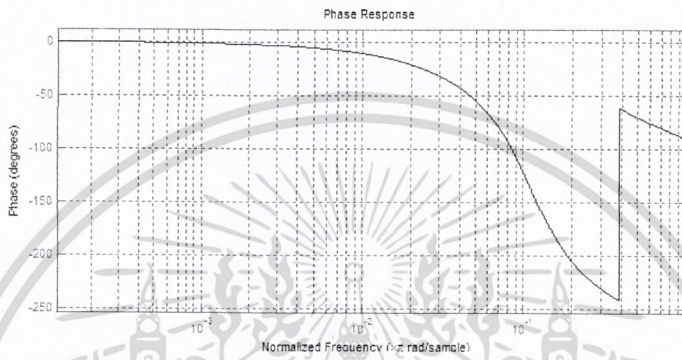
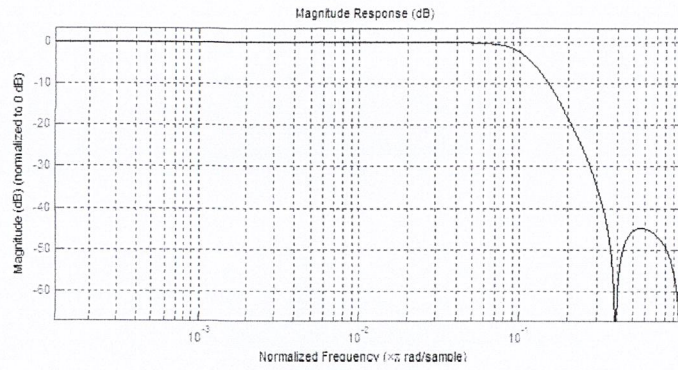
**รูปที่ 4.9** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 20 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 47จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



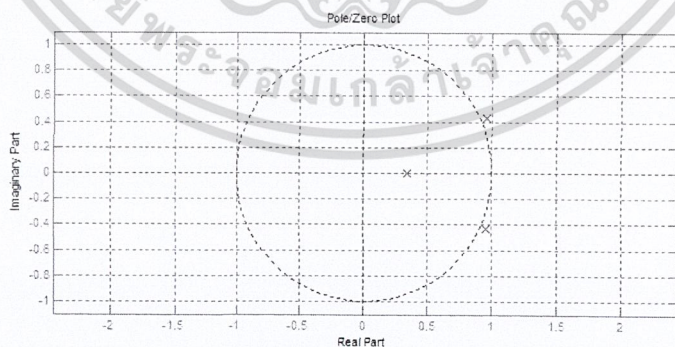
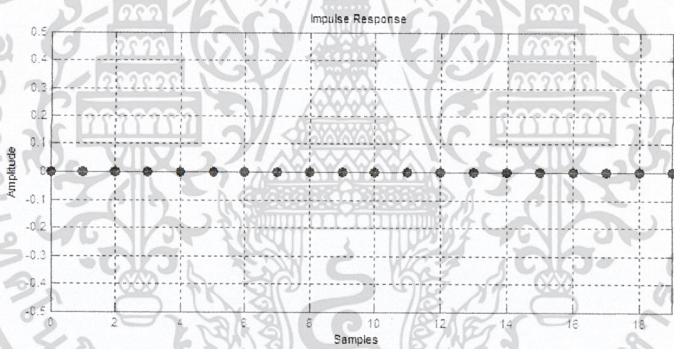
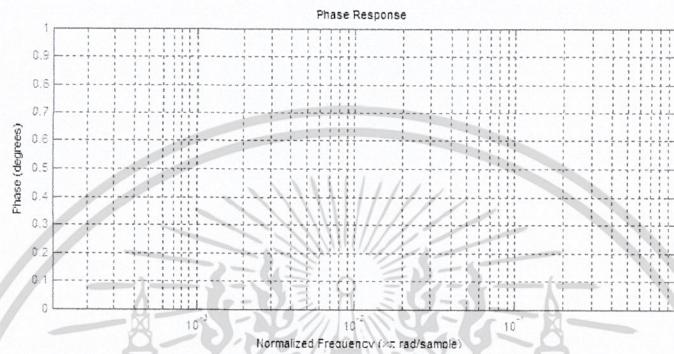
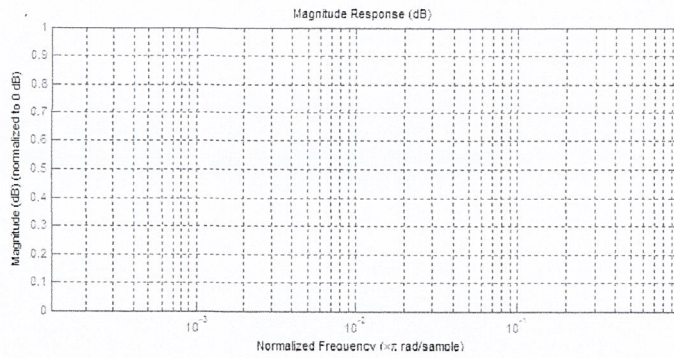
**รูปที่ 4.10** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ FIR Quantized 24 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 48 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



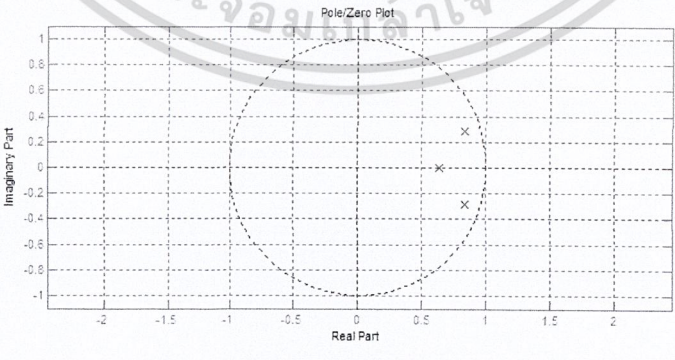
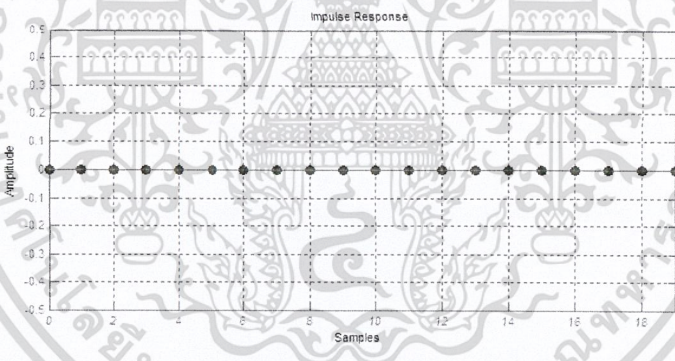
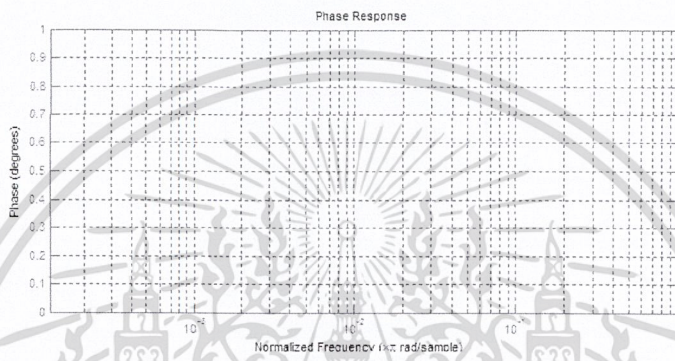
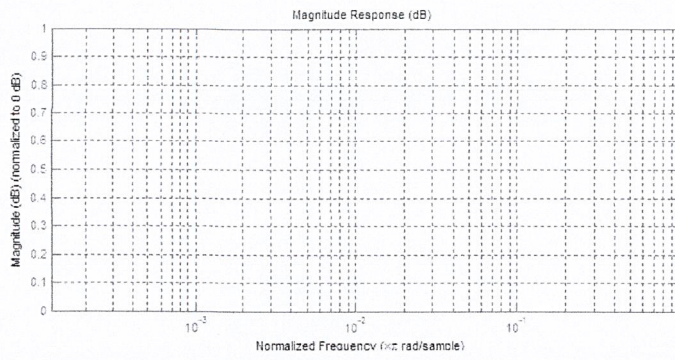
**รูปที่ 4.11** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Unquantized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 49 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.12** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 4 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 50% ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

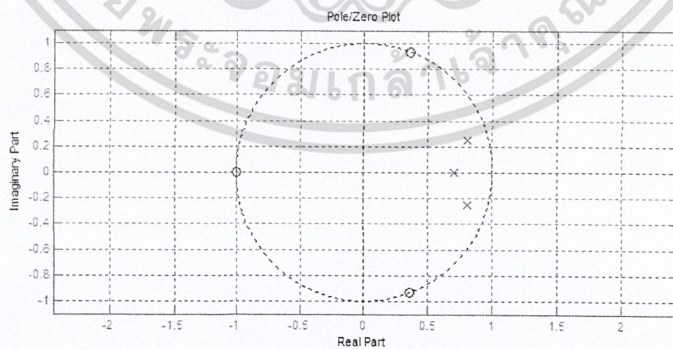
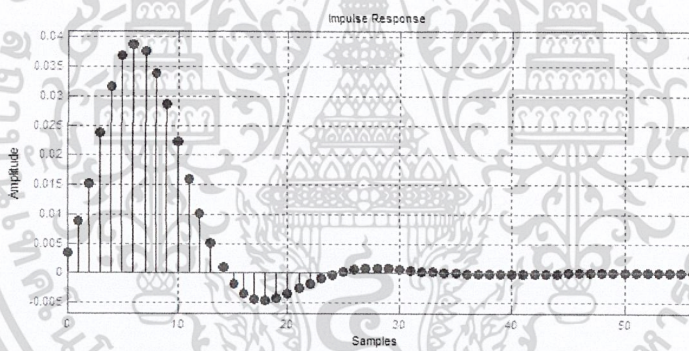
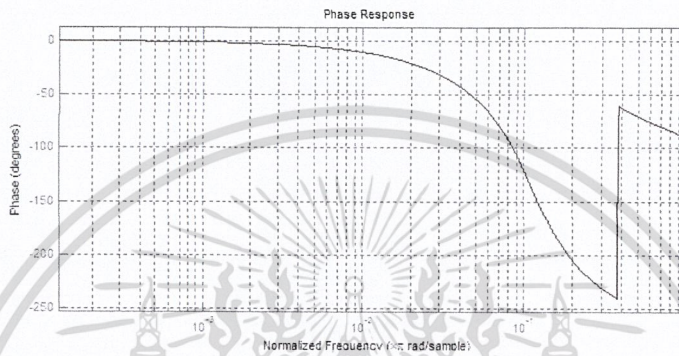
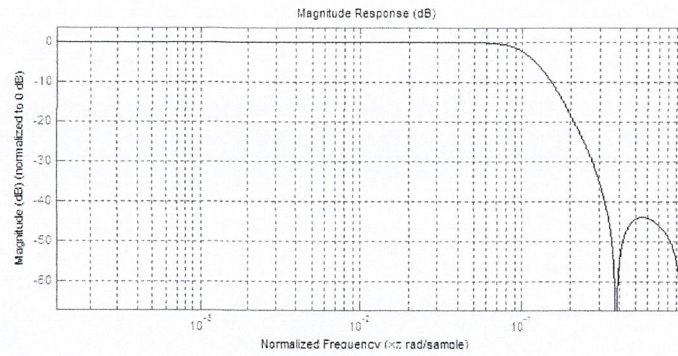


รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์

และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I

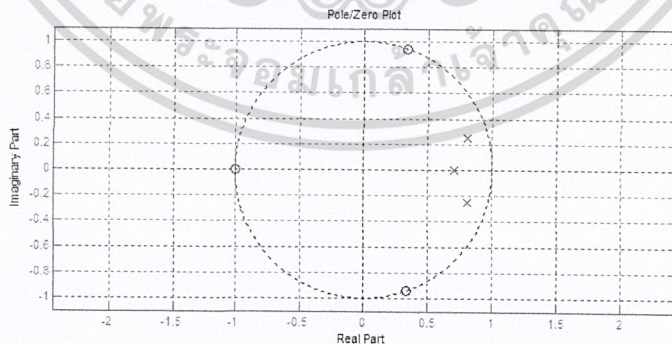
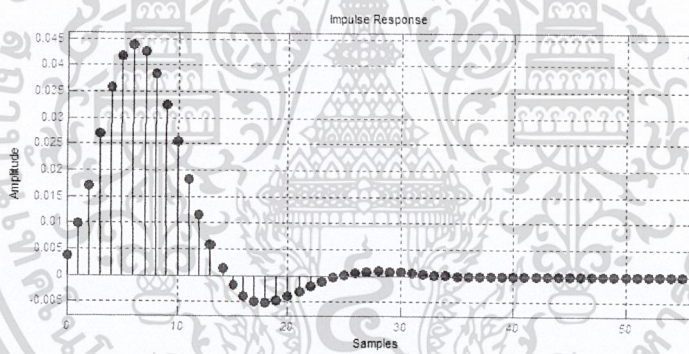
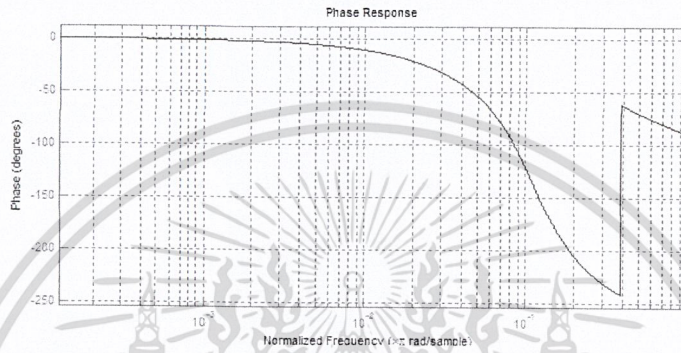
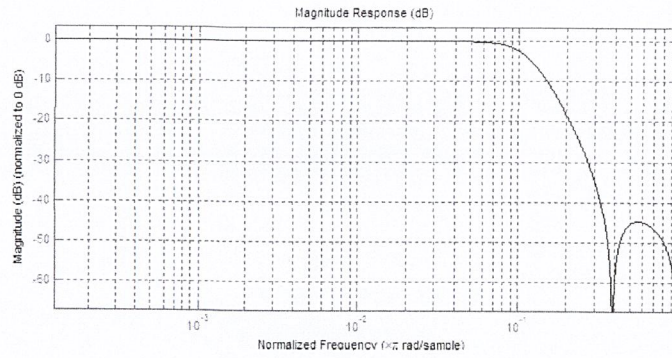
Quantized 8 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 51จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



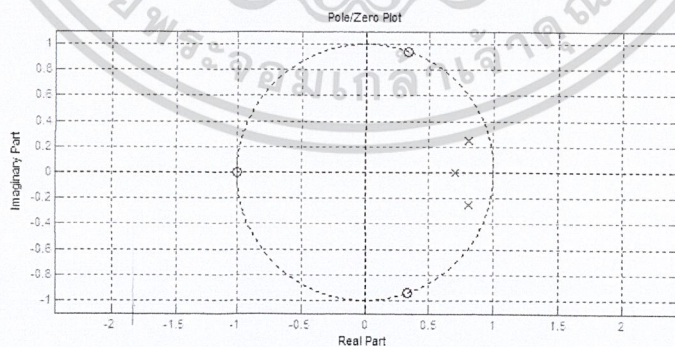
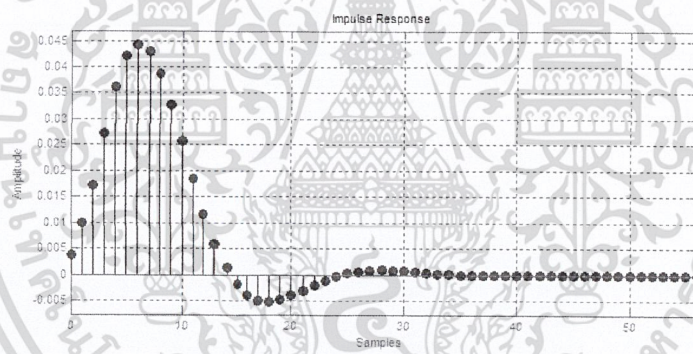
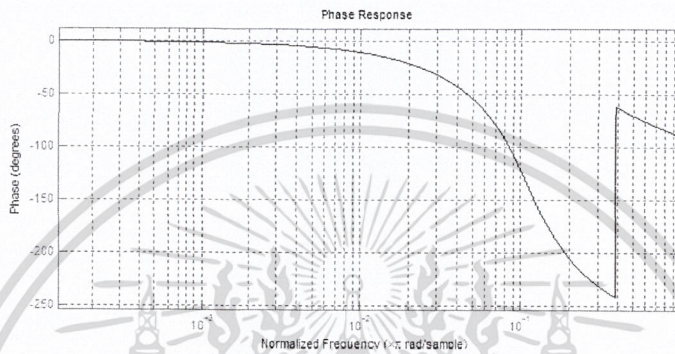
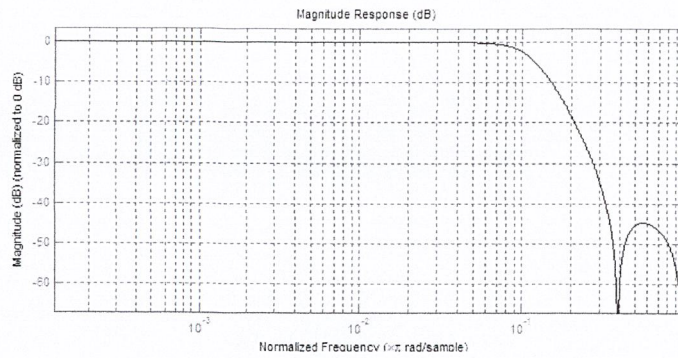
รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 12 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 52 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



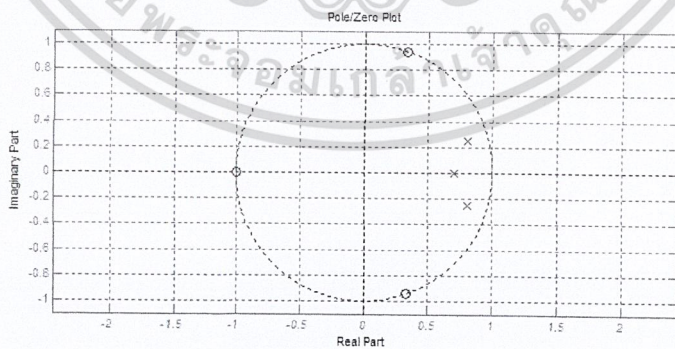
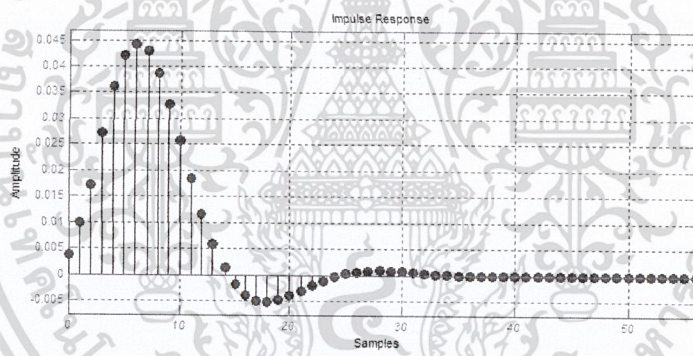
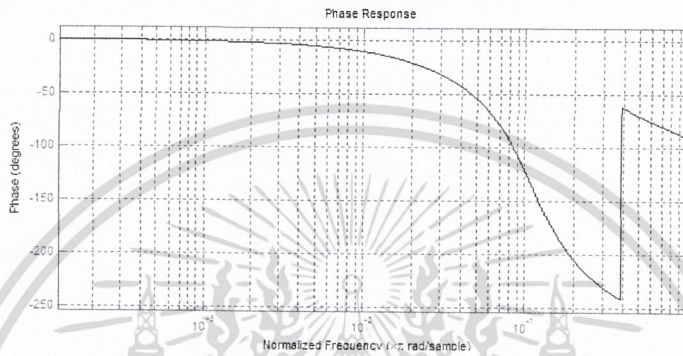
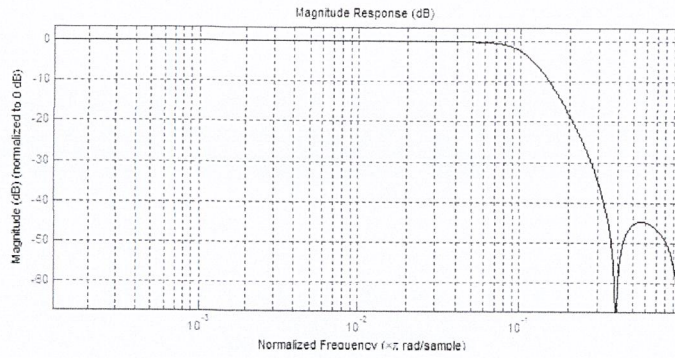
**รูปที่ 4.15** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 53 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



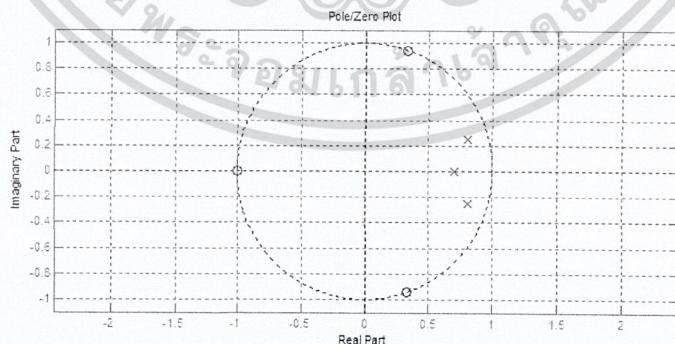
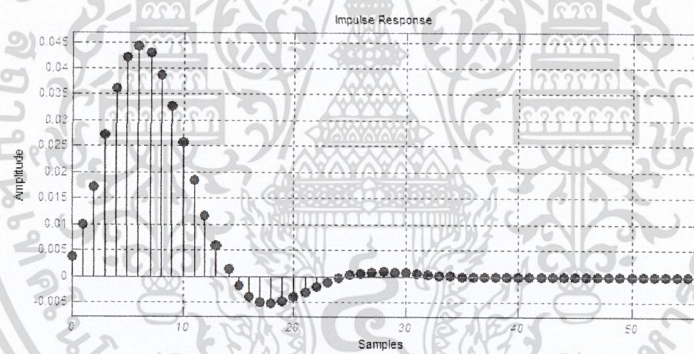
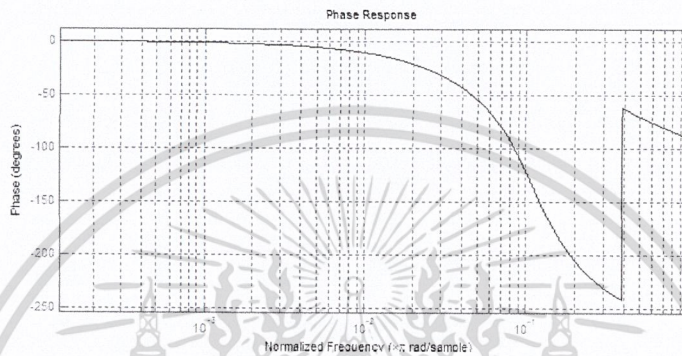
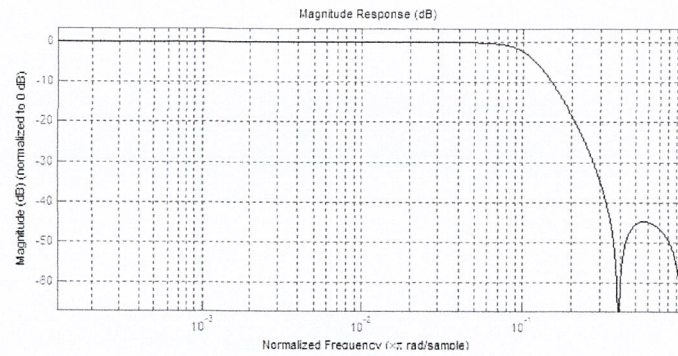
**รูปที่ 4.16** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 18 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 54 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



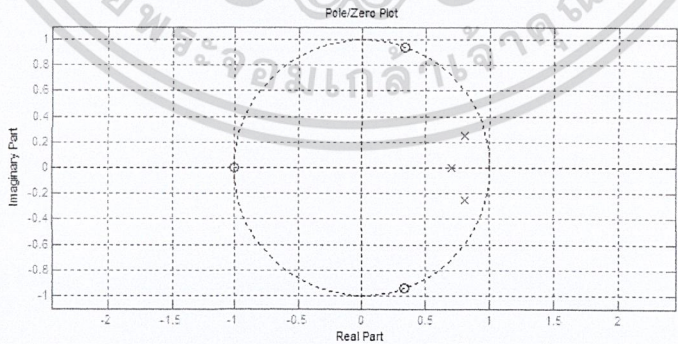
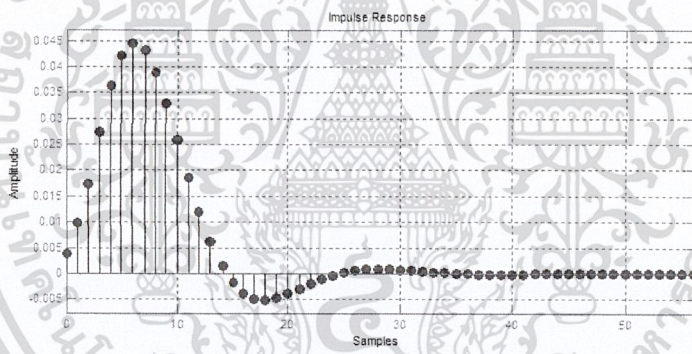
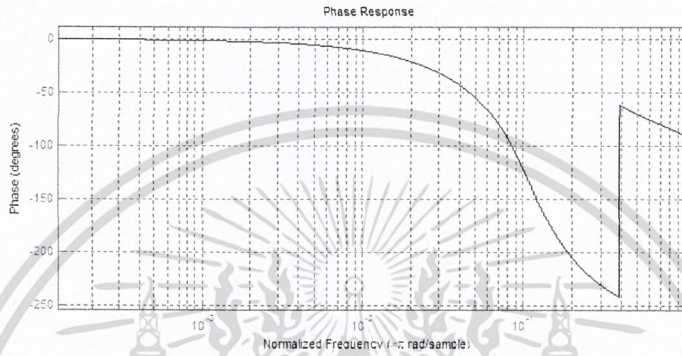
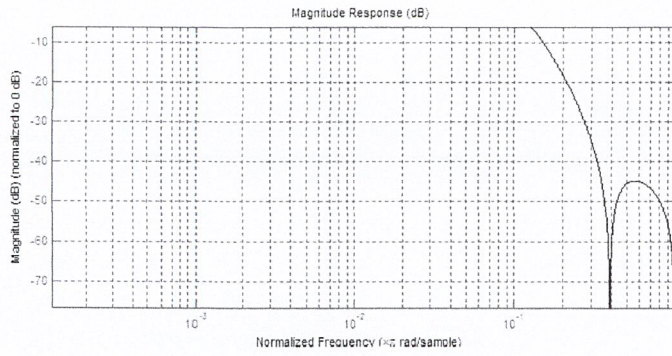
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 20 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 55๕๕ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



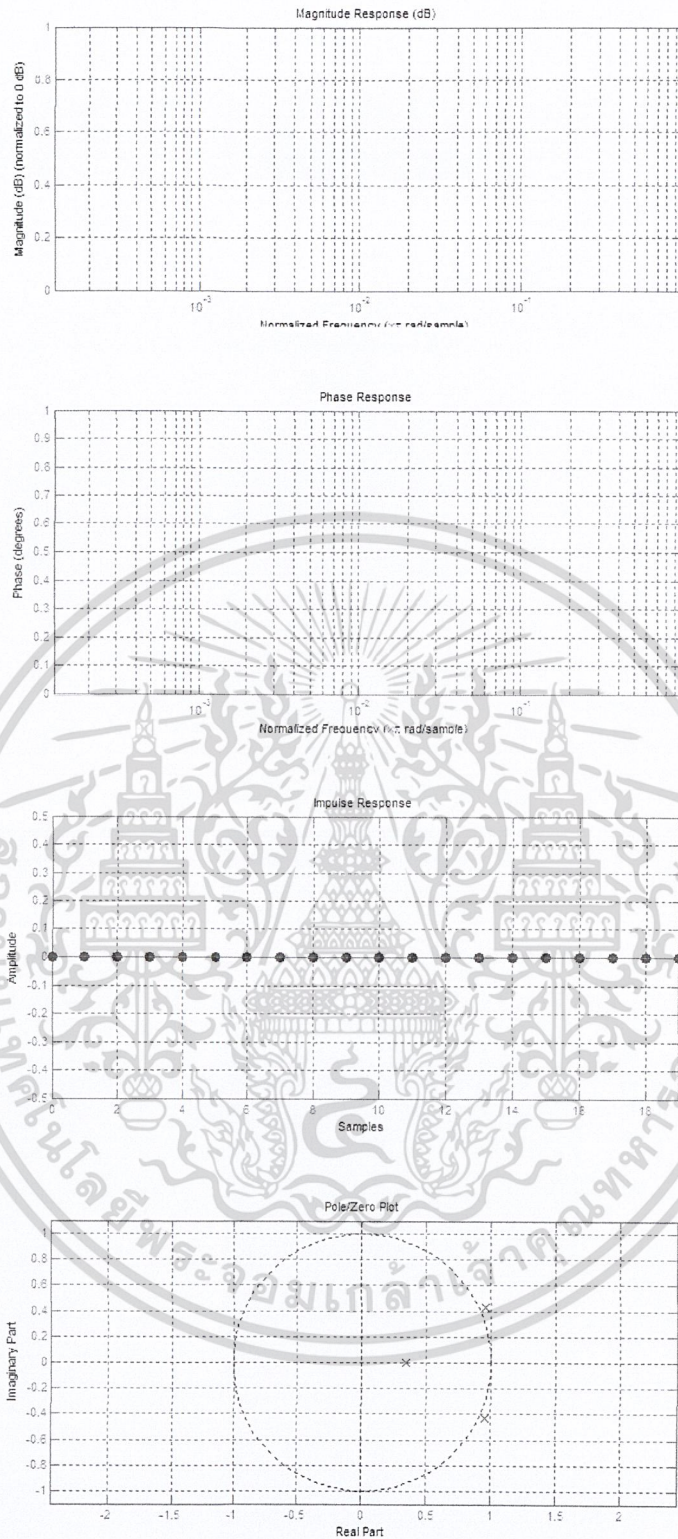
**รูปที่ 4.18** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form I Quantized 24 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 56 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



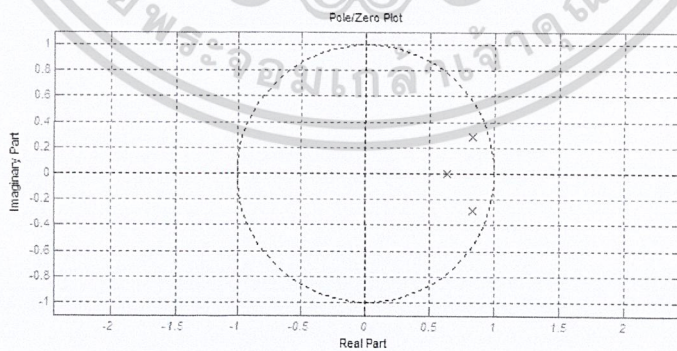
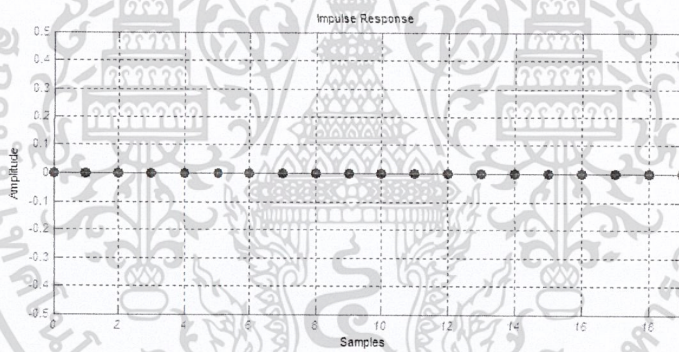
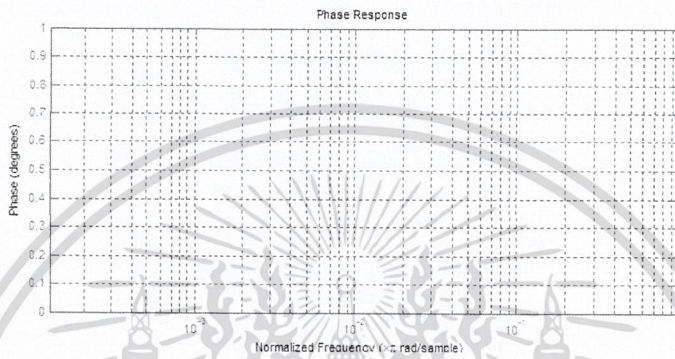
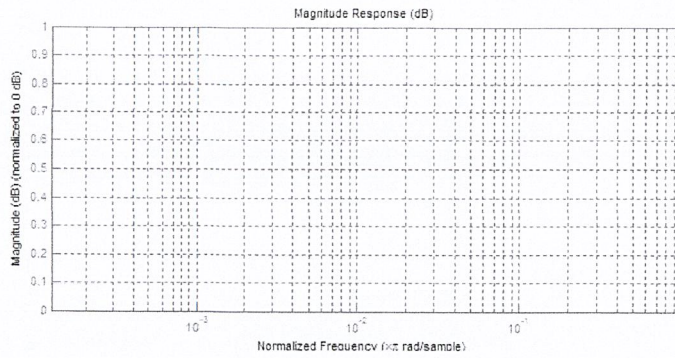
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Unquantized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 57 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



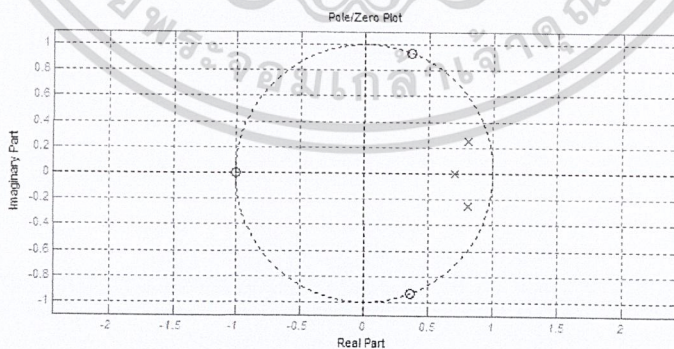
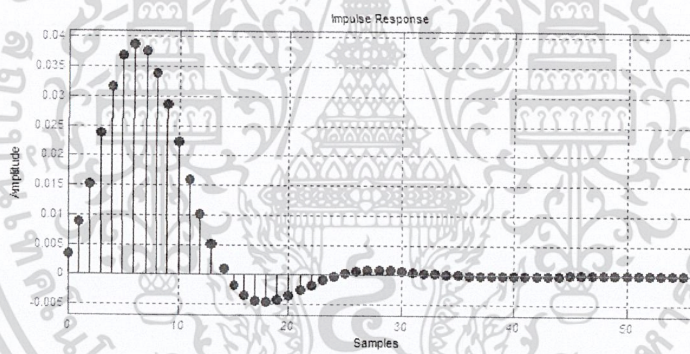
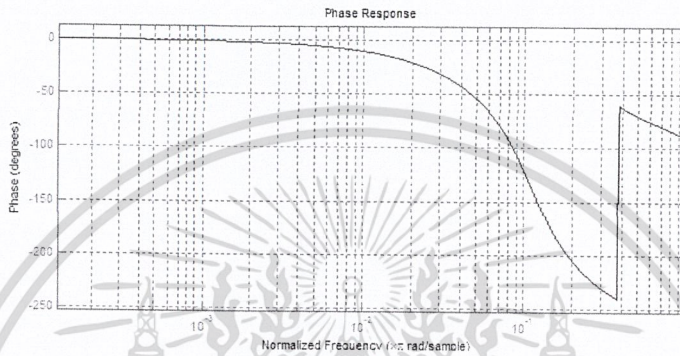
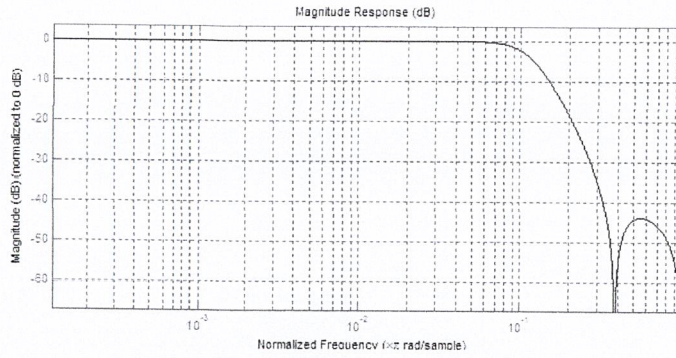
**รูปที่ 4.20** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 4 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 58 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



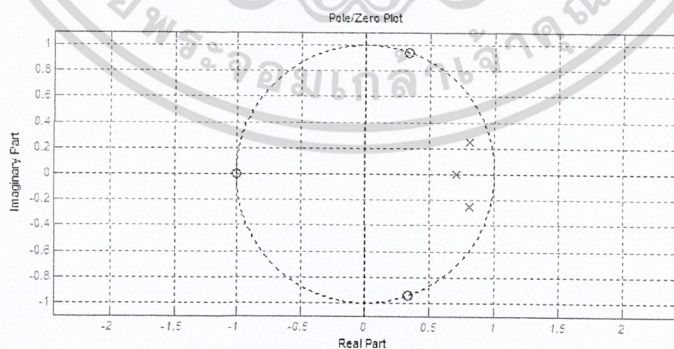
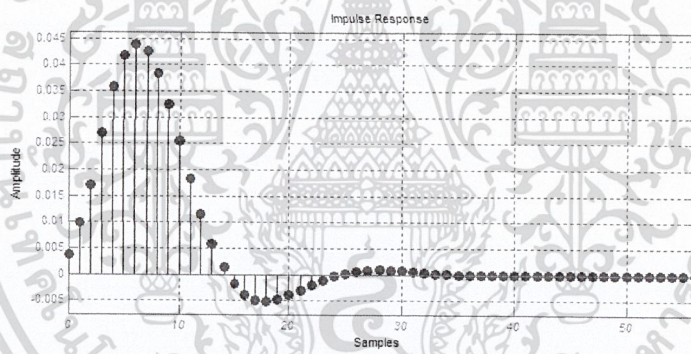
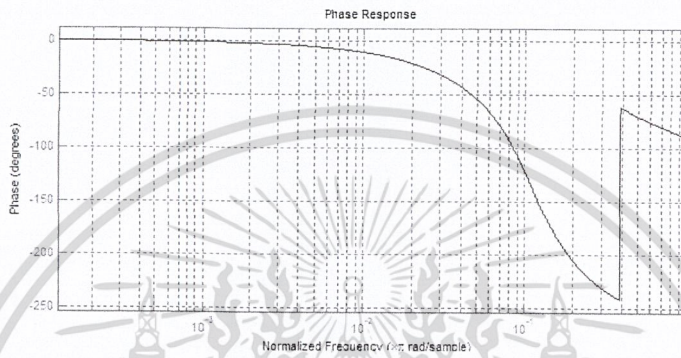
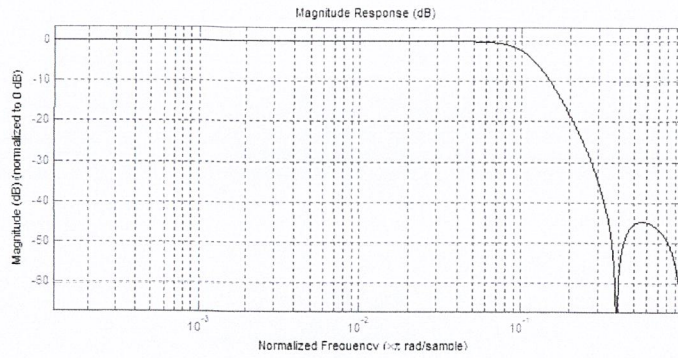
**รูปที่ 4.20** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 8 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 59 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



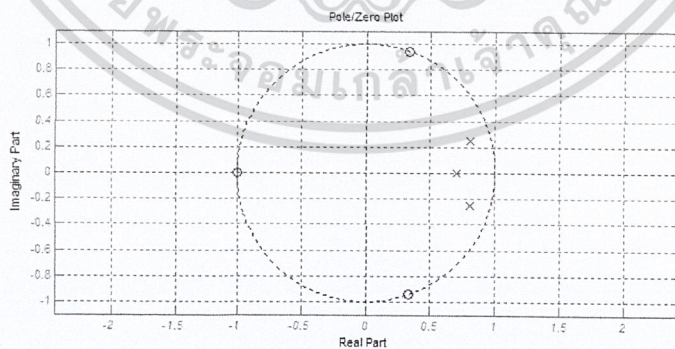
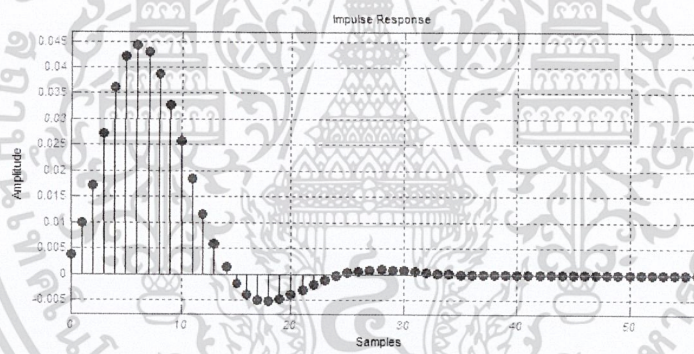
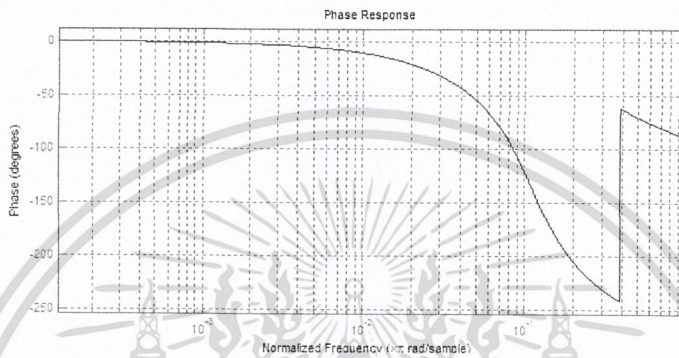
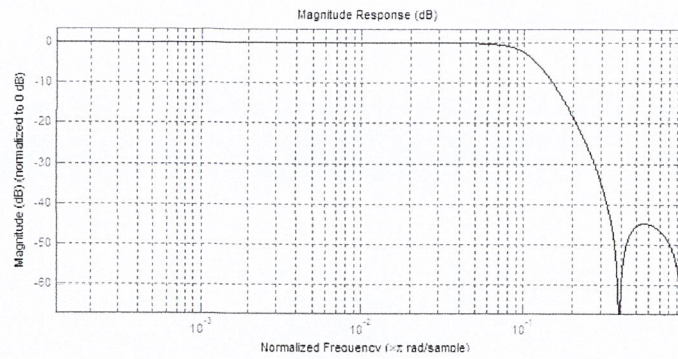
**รูปที่ 4.22** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 12 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



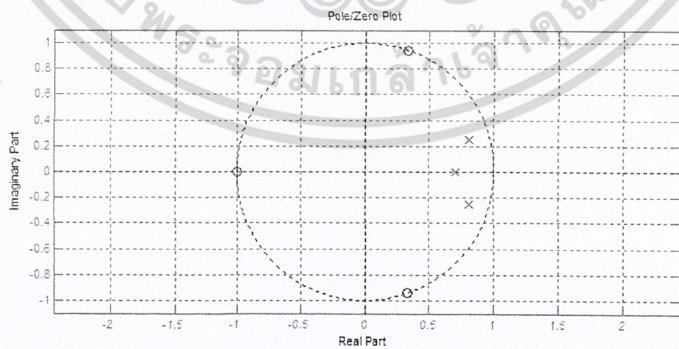
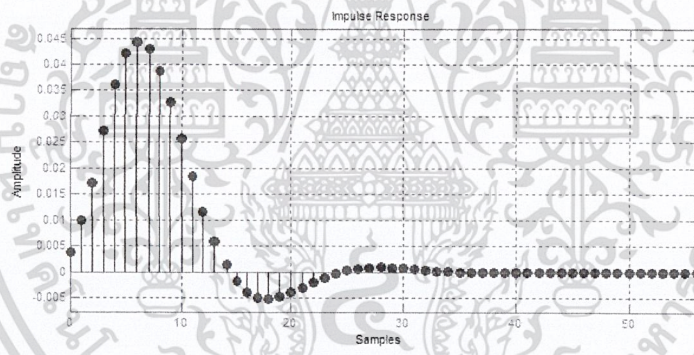
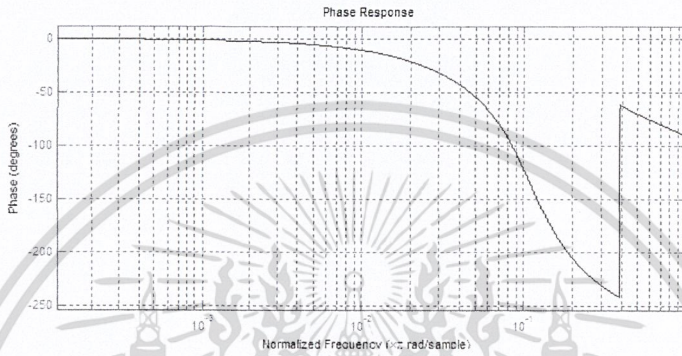
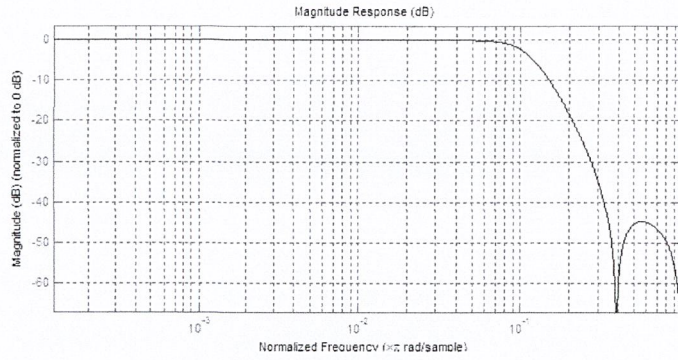
**รูปที่ 4.23** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 61จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



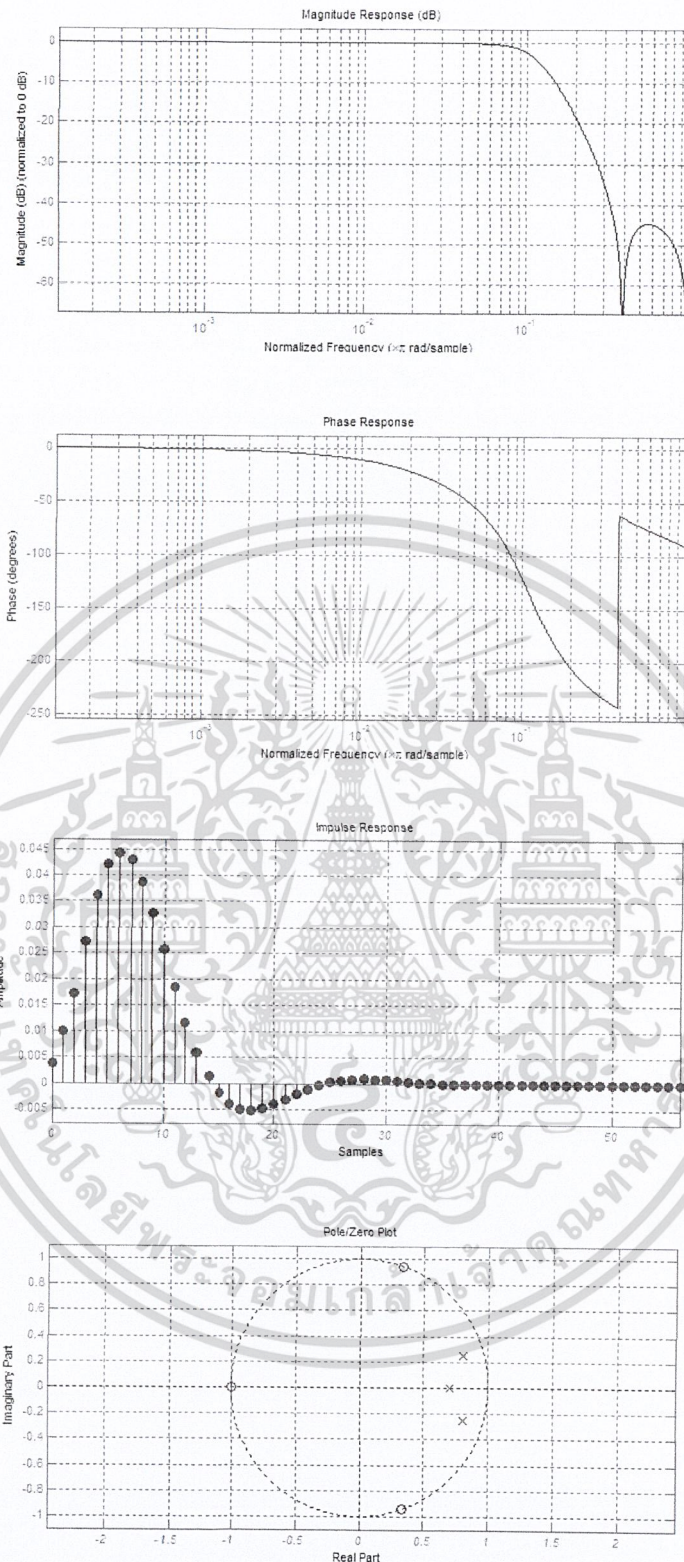
**รูปที่ 4.24** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 18 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 62 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



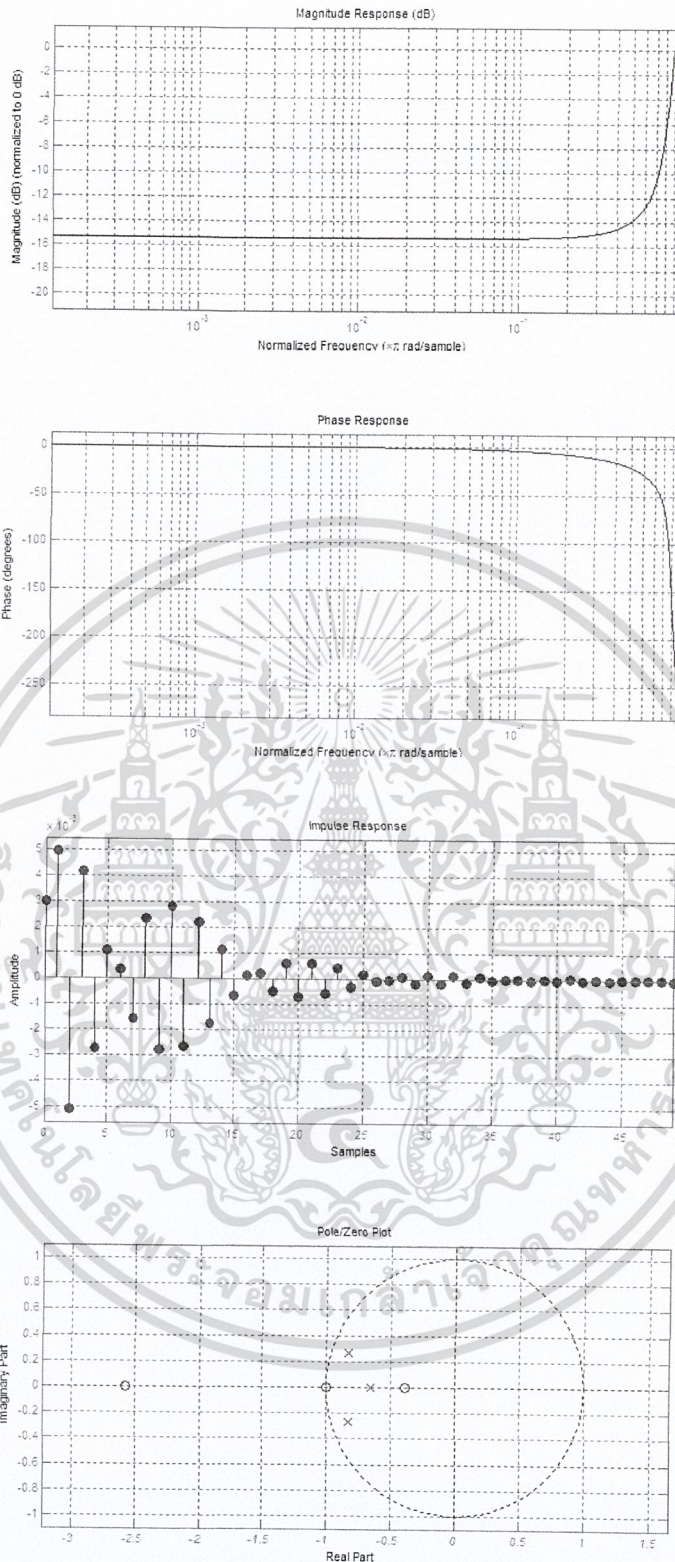
รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 20 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 63๖ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



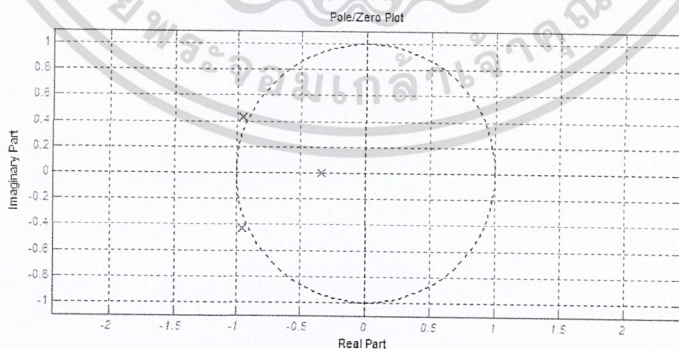
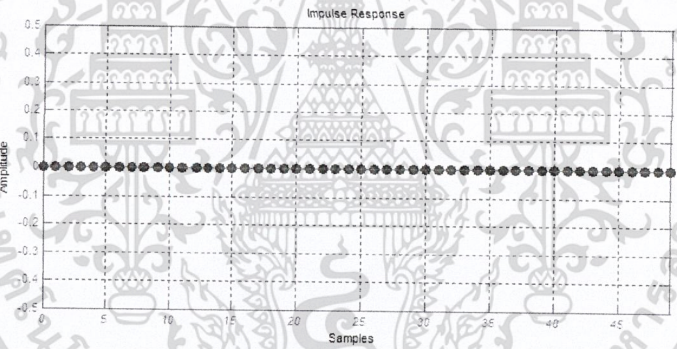
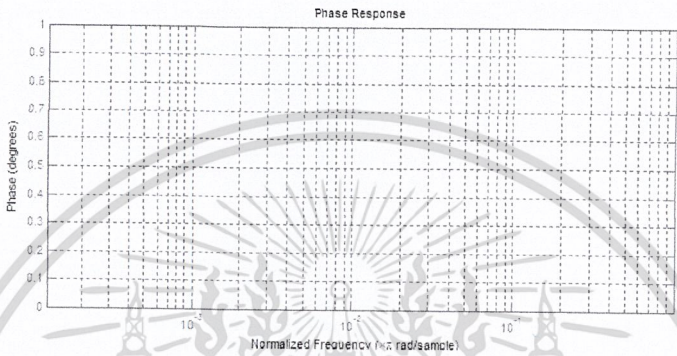
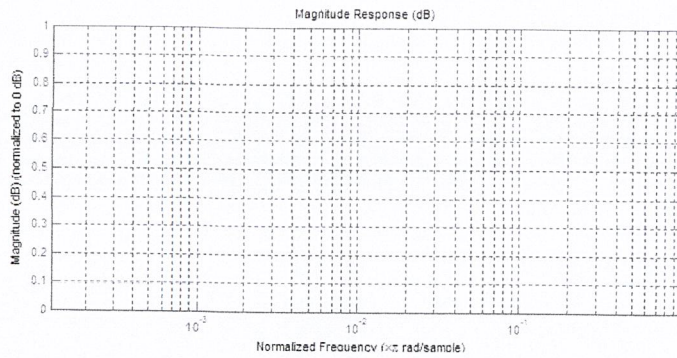
**รูปที่ 4.26** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form II Quantized 24 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 64 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



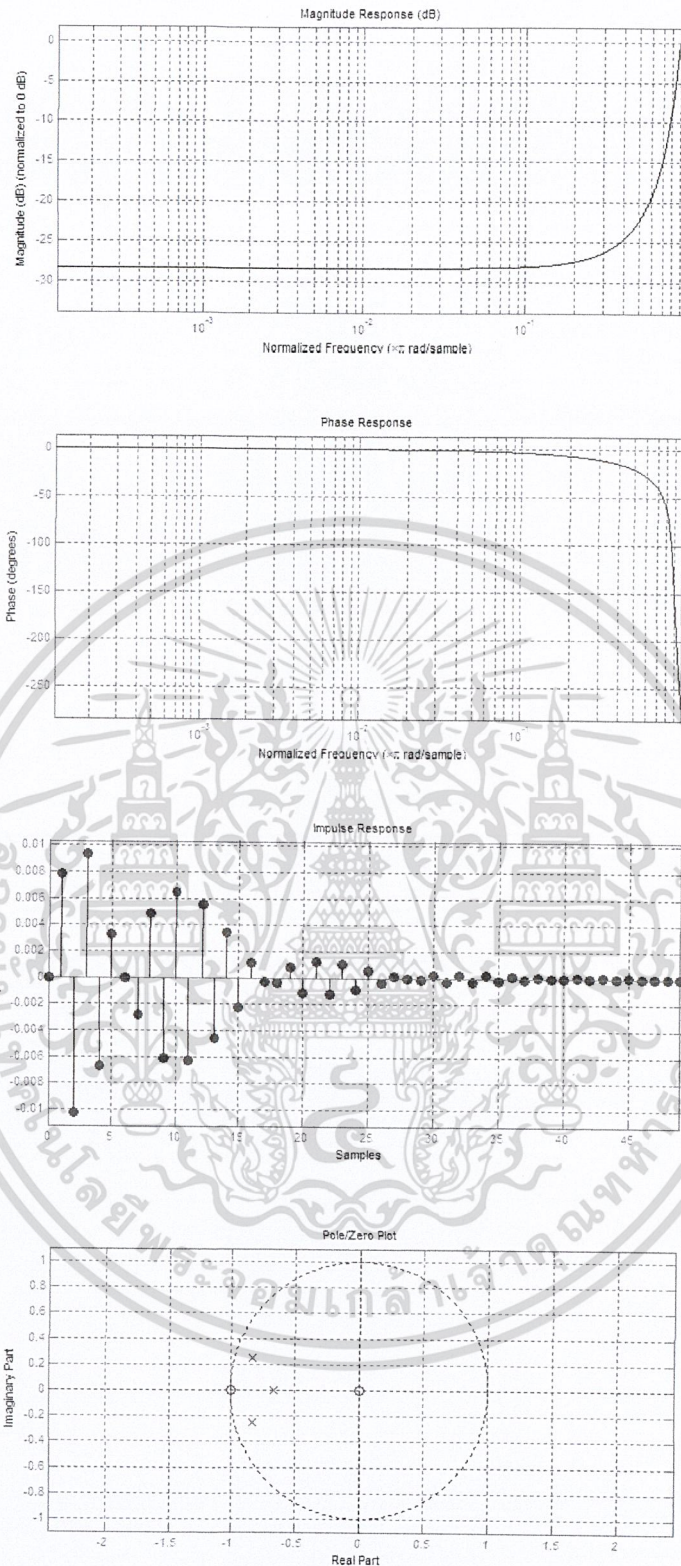
**รูปที่ 4.27** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Unquantized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 65 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



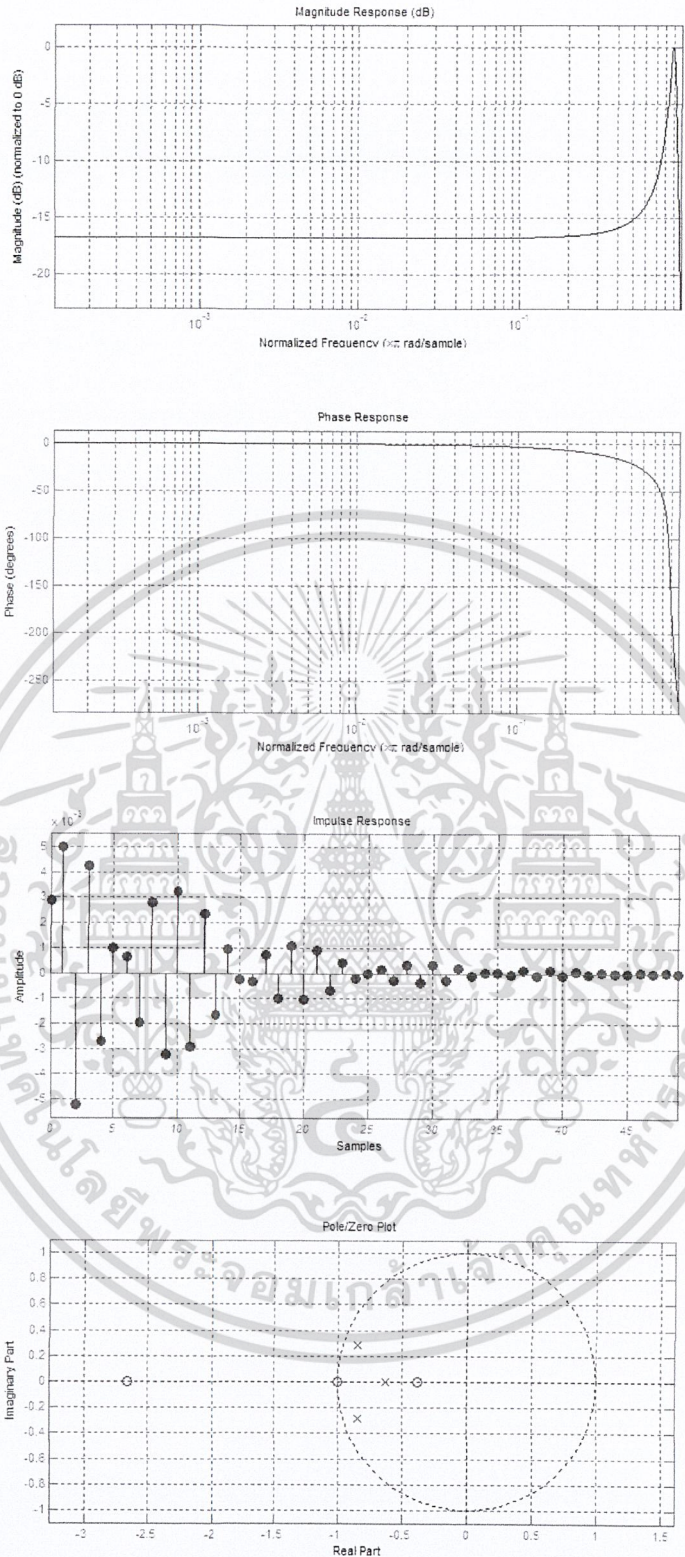
**รูปที่ 4.28** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 4 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 66 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



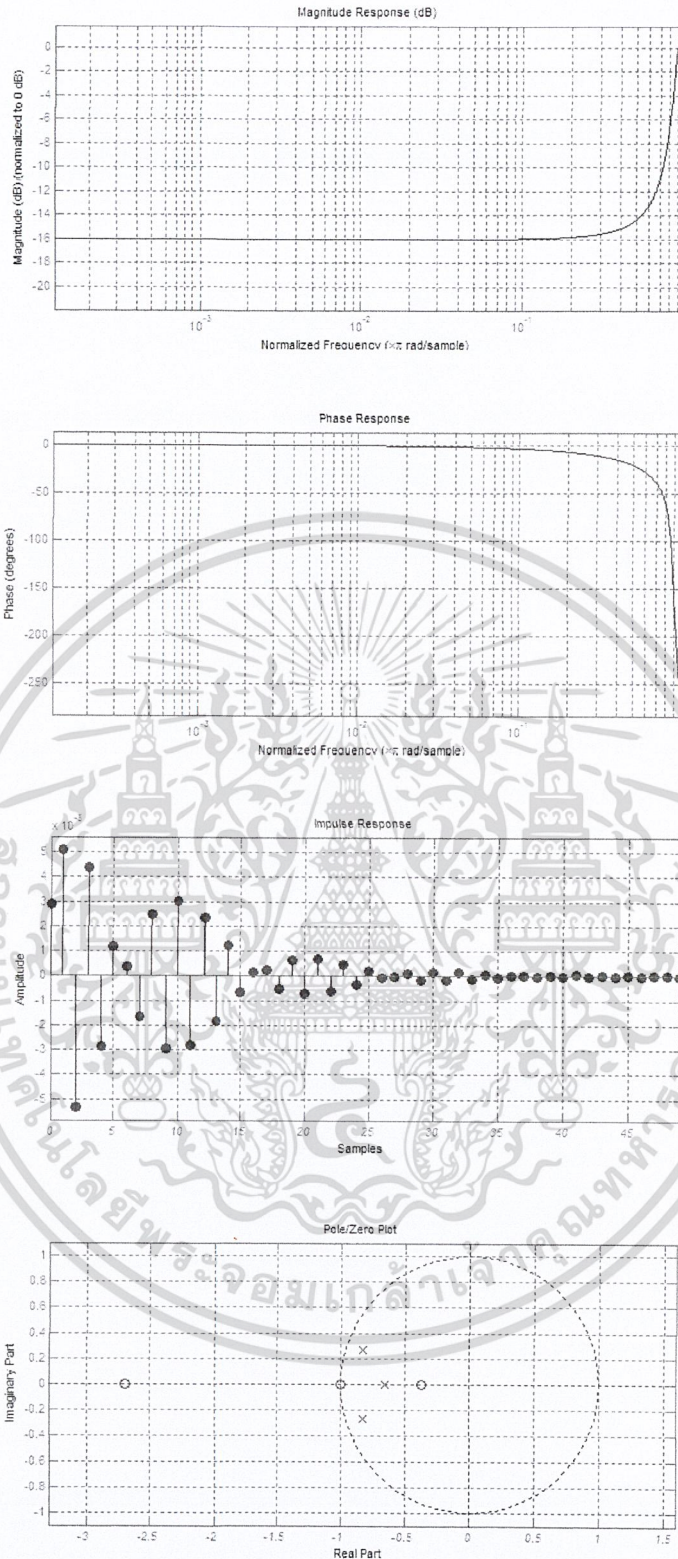
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 8 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 67 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



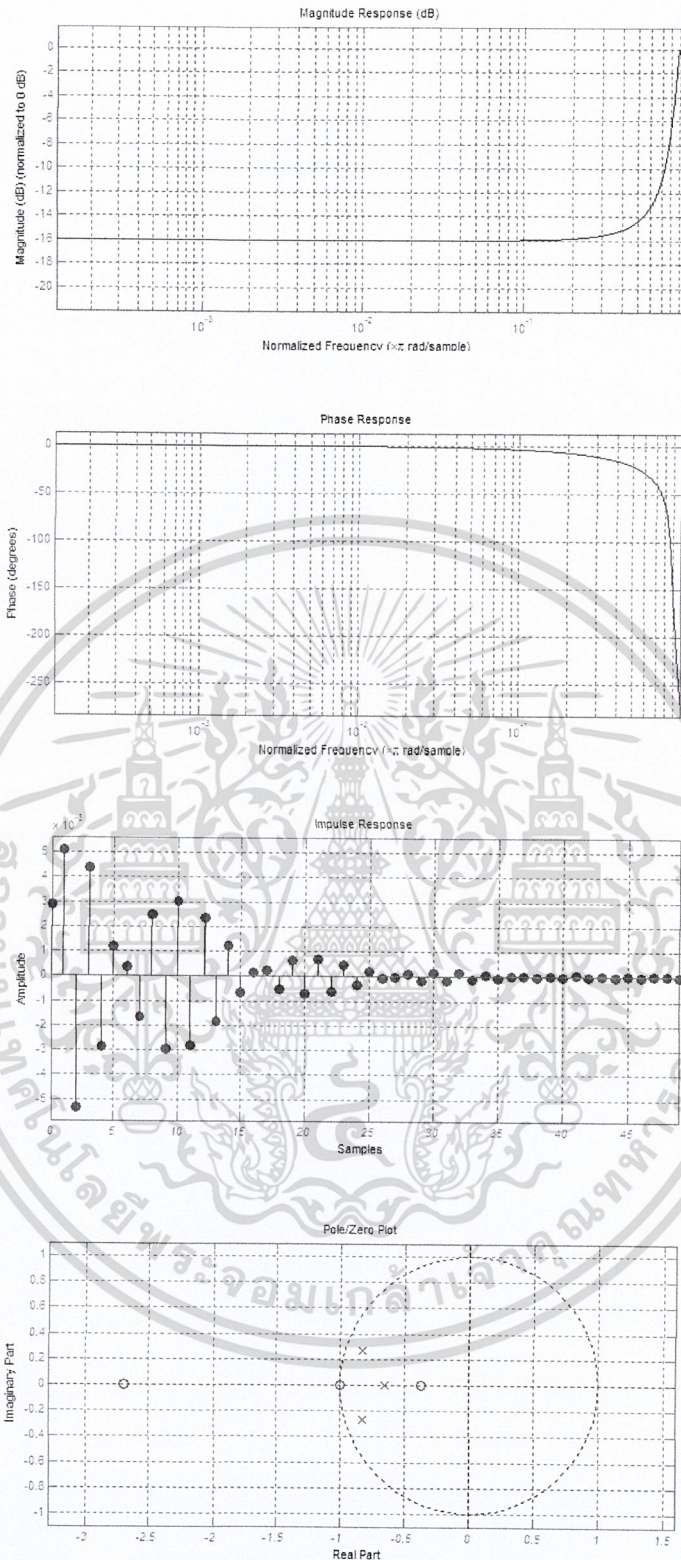
**รูปที่ 4.30** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 12 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 68 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



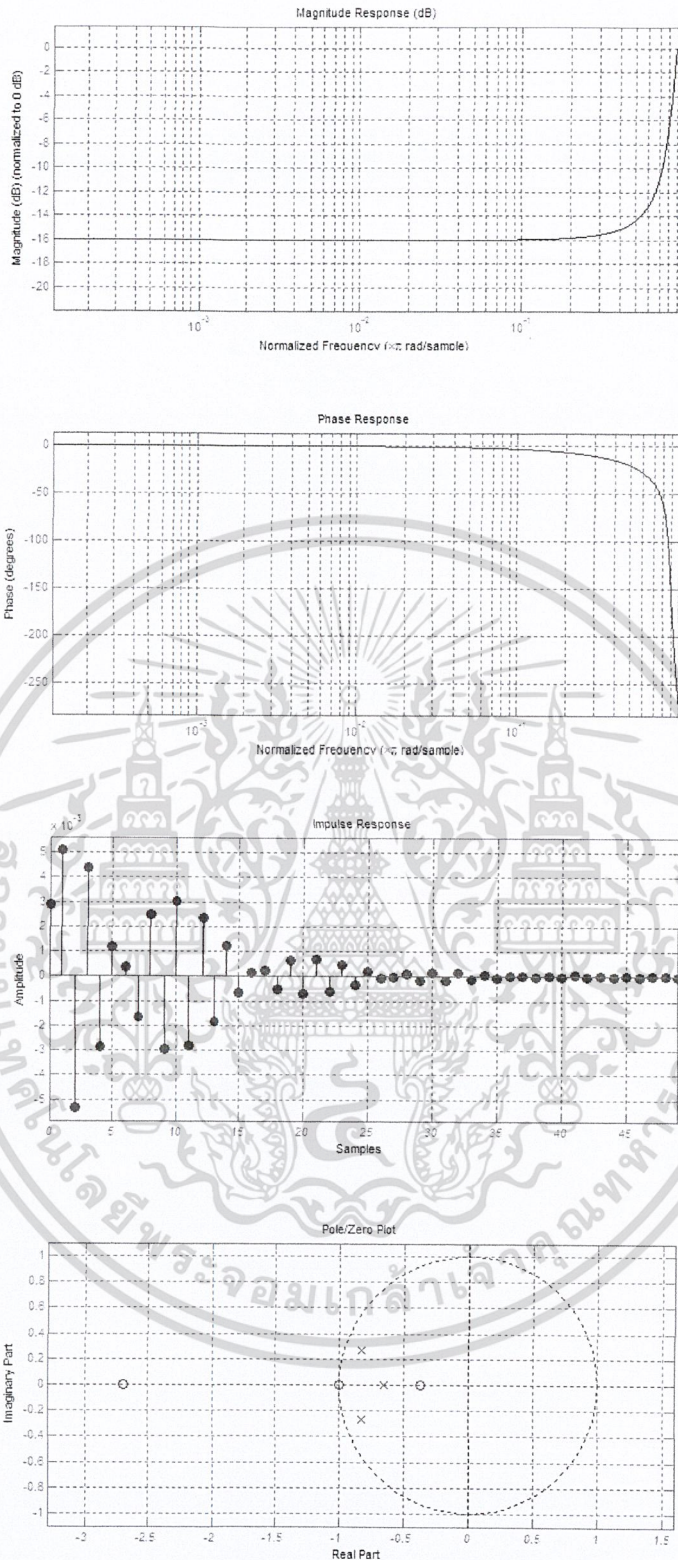
**รูปที่ 4.31** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 69 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



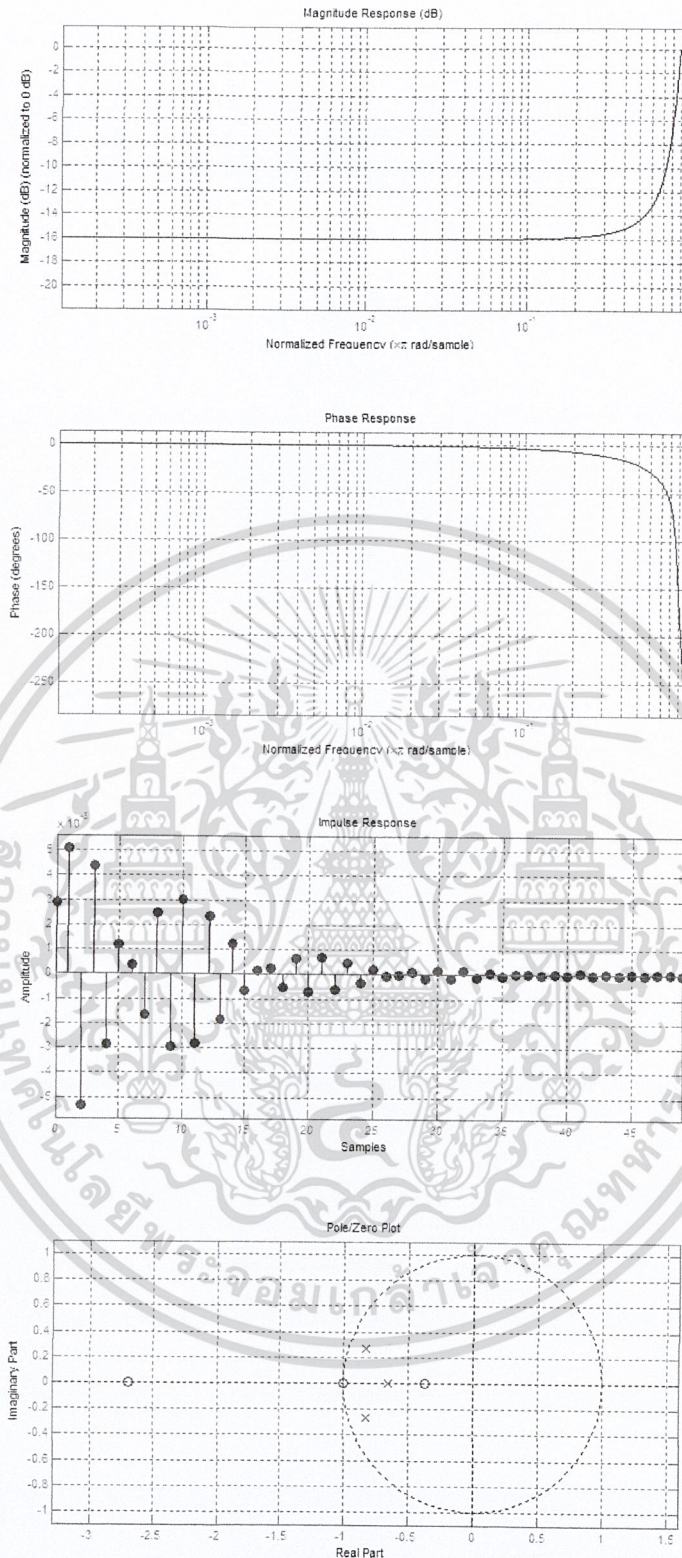
รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 18 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 70% ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



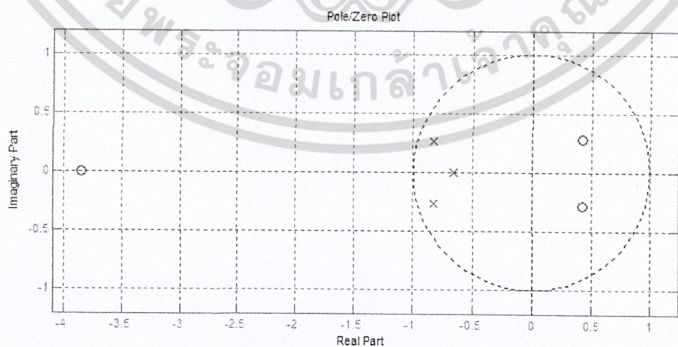
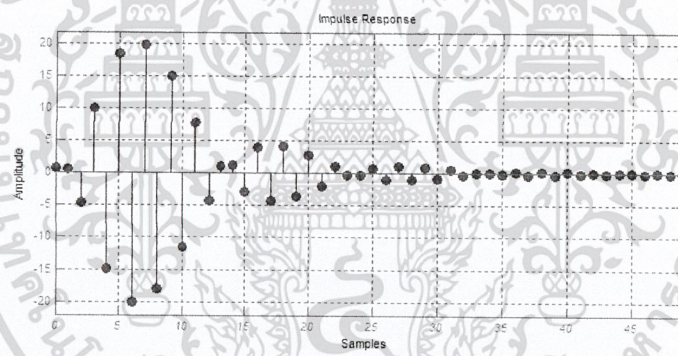
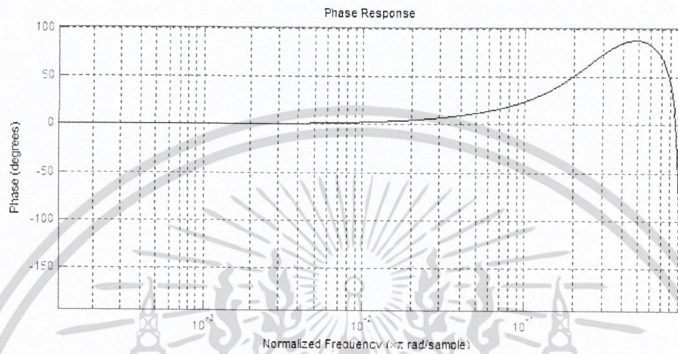
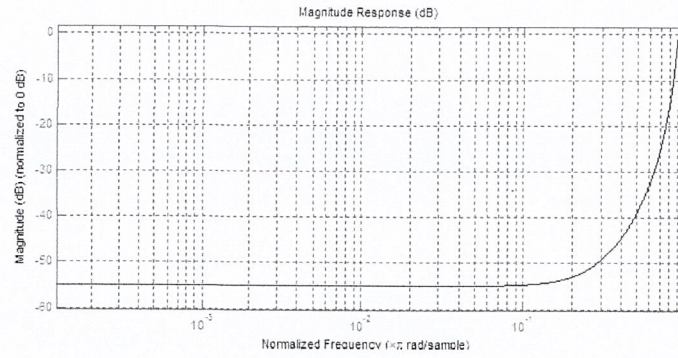
รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 20 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 71 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



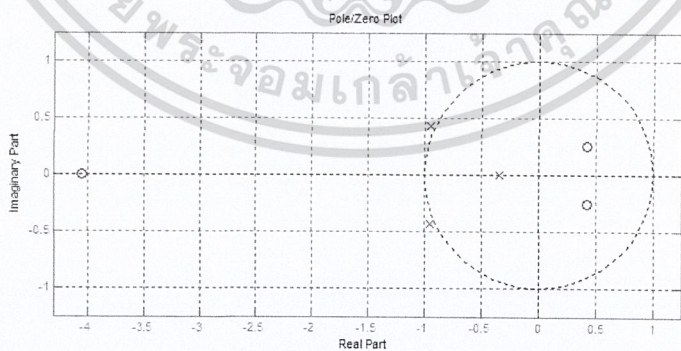
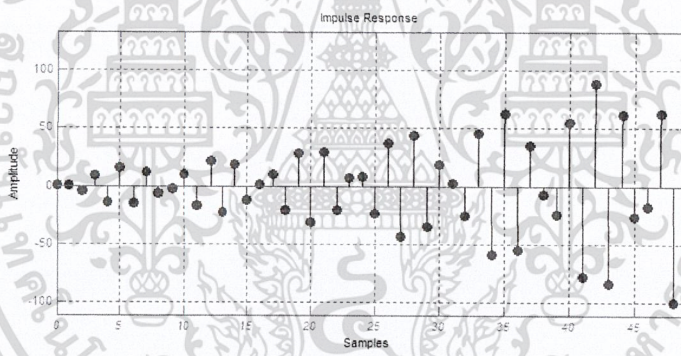
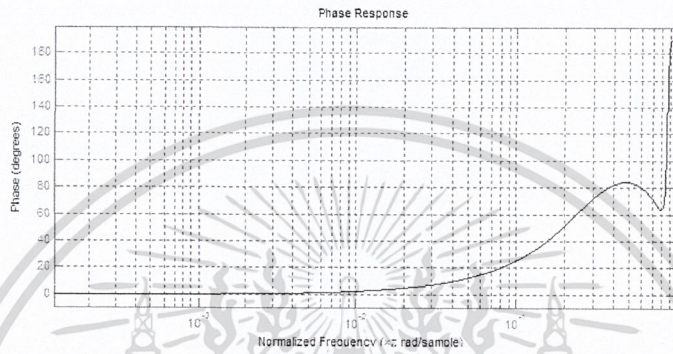
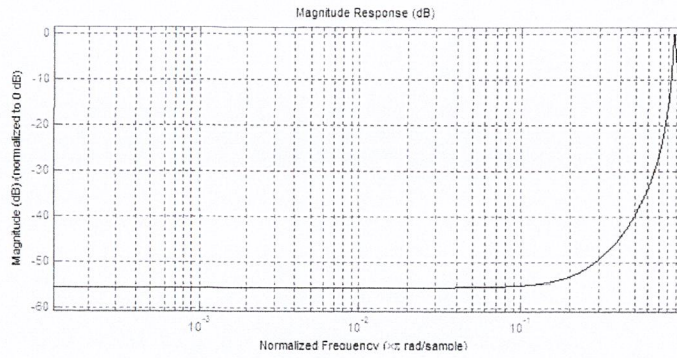
**รูปที่ 4.34** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่ง โพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass Filter Quantized 24 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 72 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



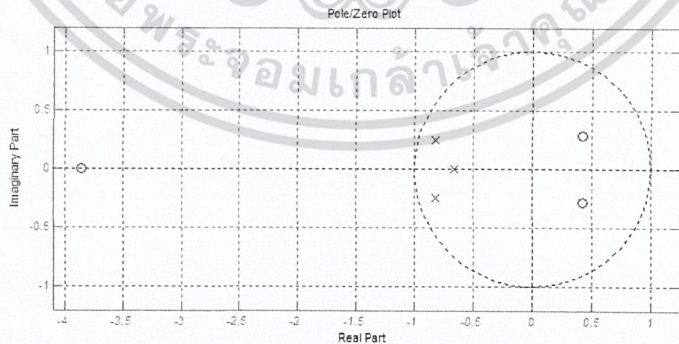
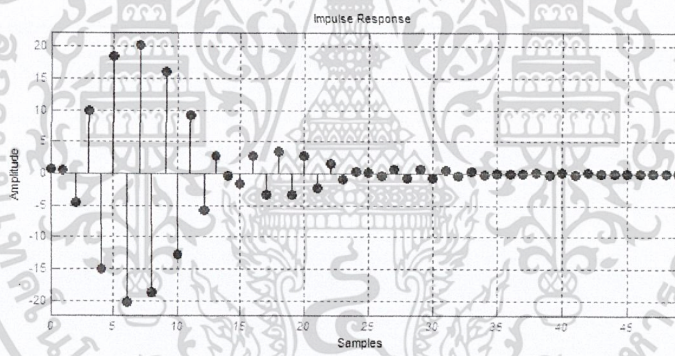
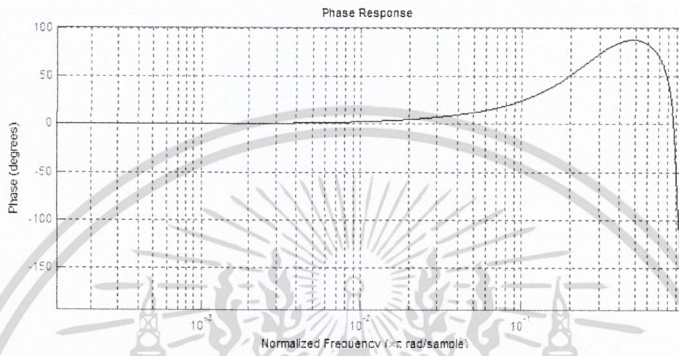
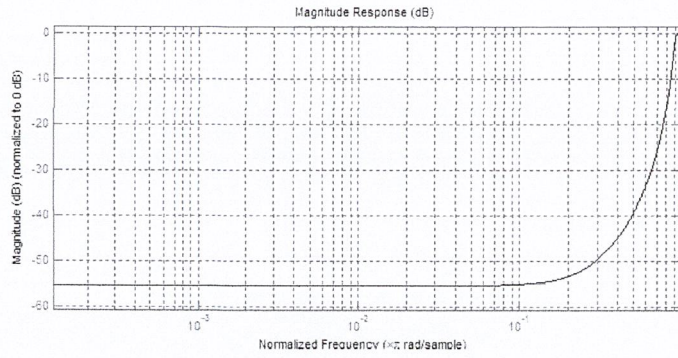
**รูปที่ 4.35** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Unquantized

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 73 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



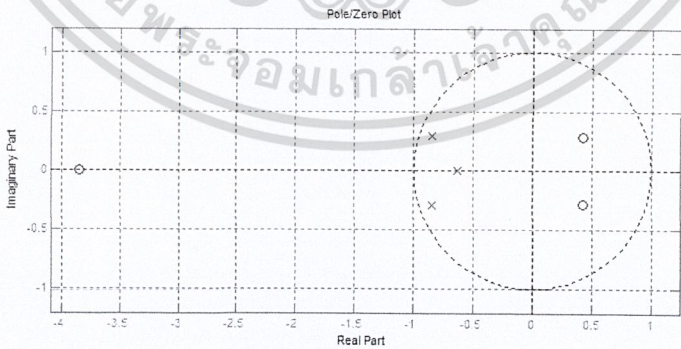
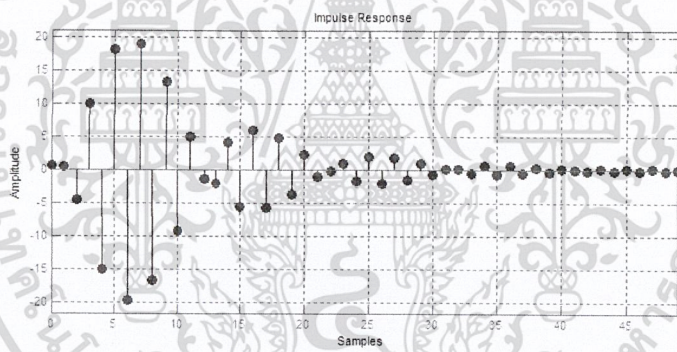
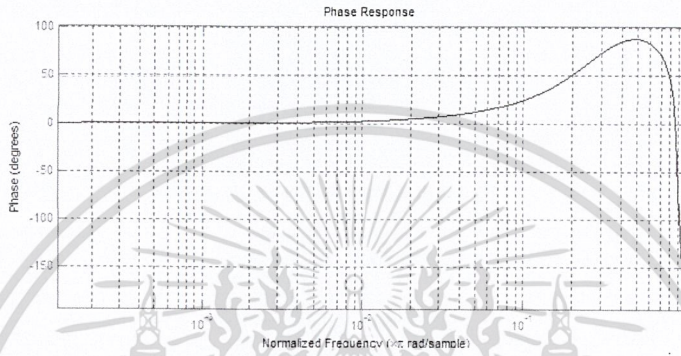
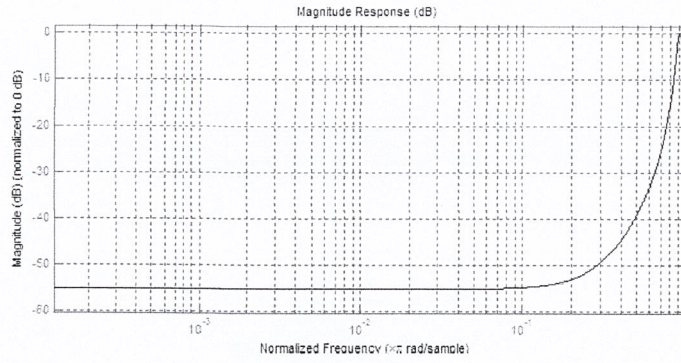
รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 4 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 74๕ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



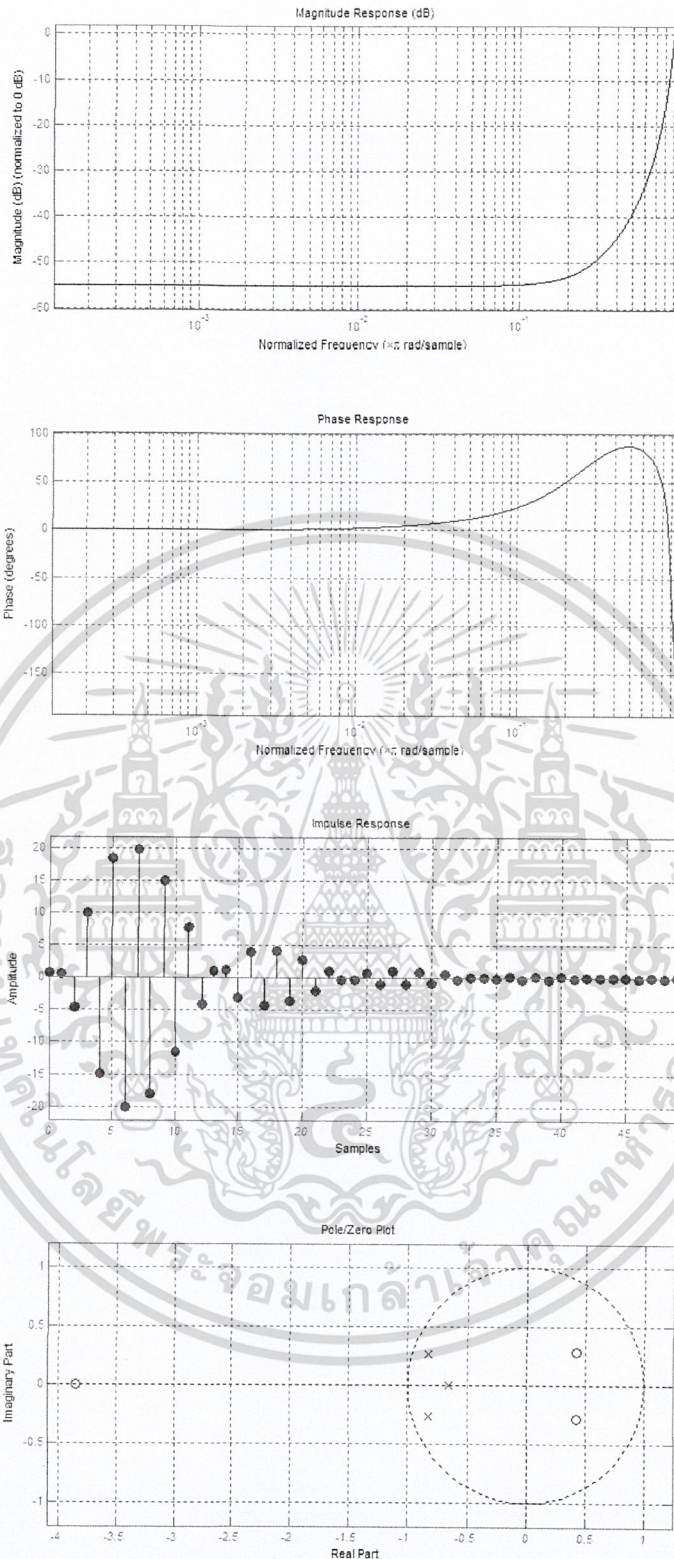
รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 8 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 75% ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



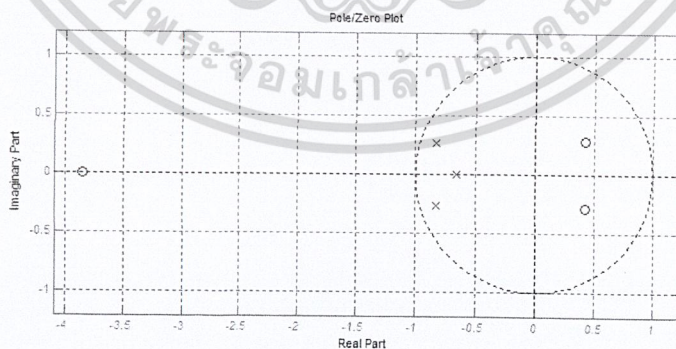
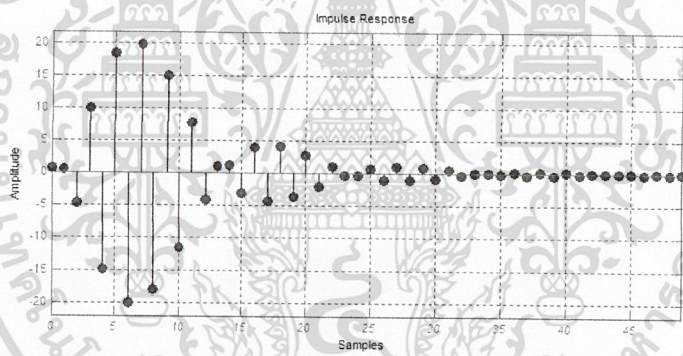
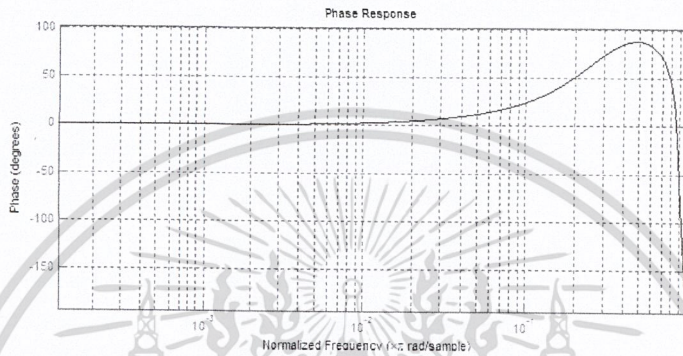
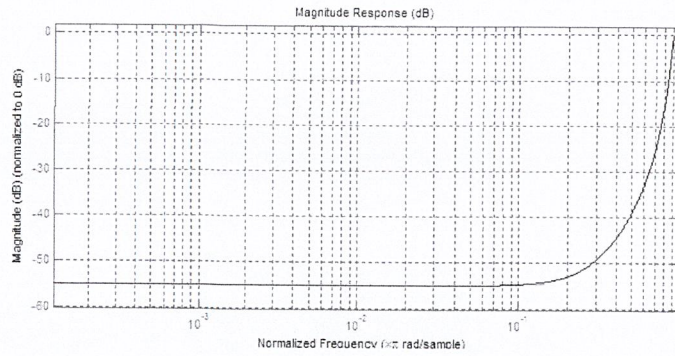
**รูปที่ 4.38** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 12 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 76 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



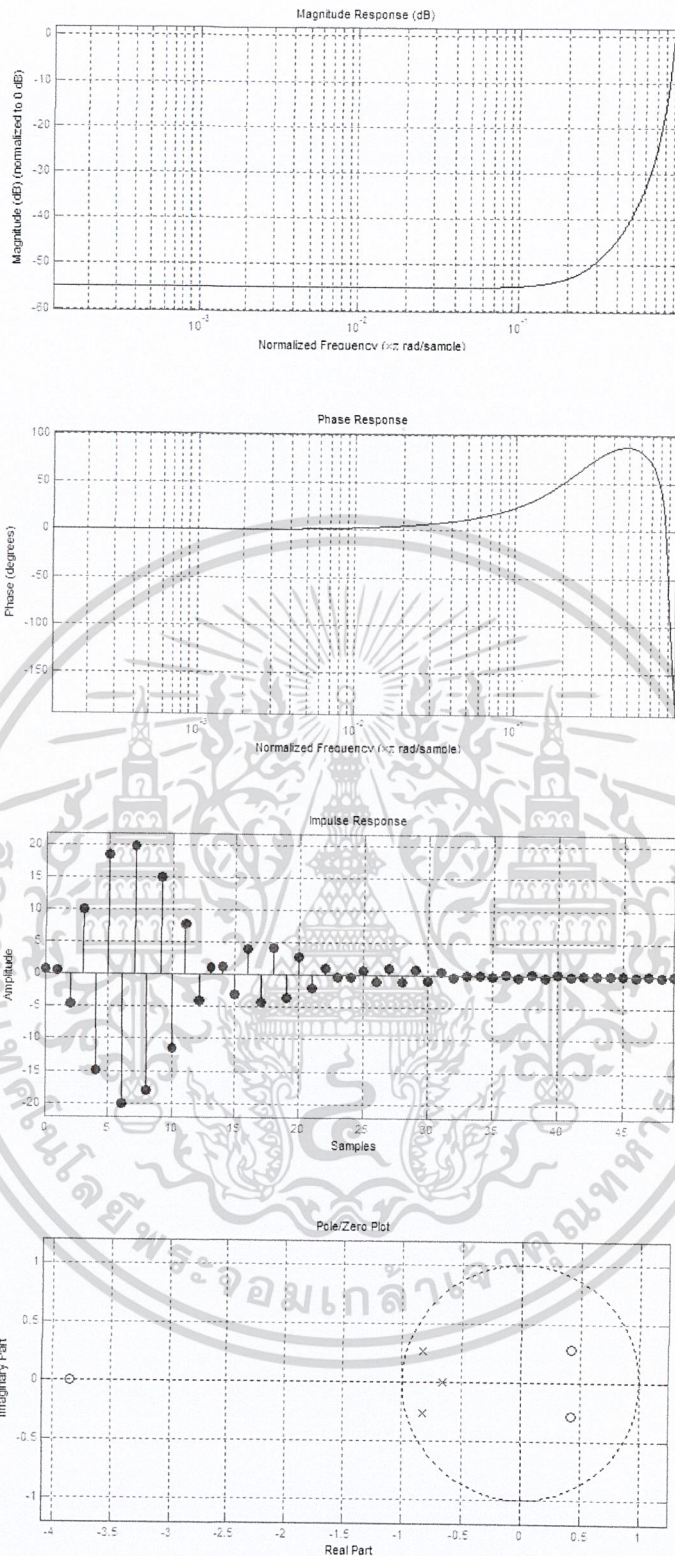
**รูปที่ 4.39** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 77๗ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



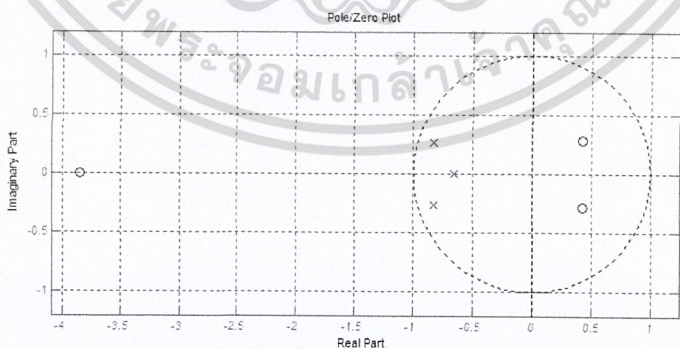
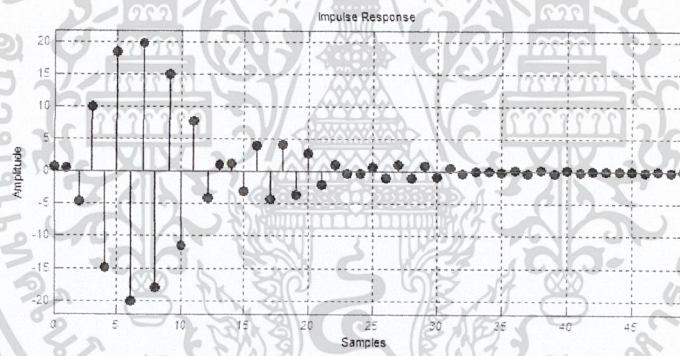
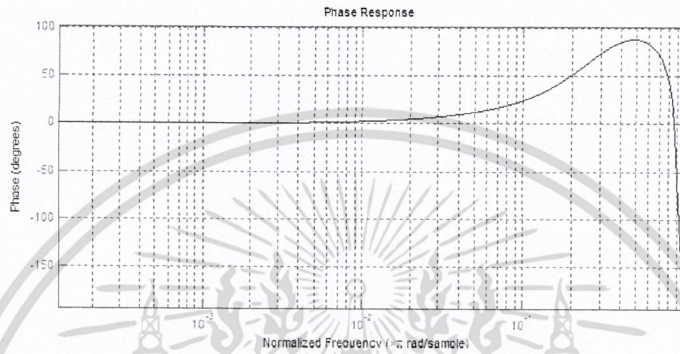
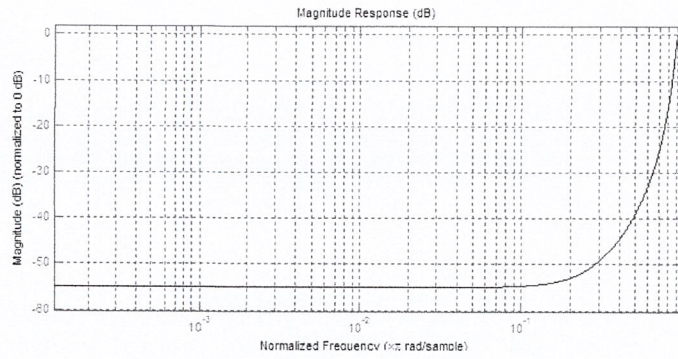
**รูปที่ 4.40** ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 18 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 78 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 20 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 79 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 ผลตอบสนองเชิงขนาดต่อความถี่, เชิงเฟสต่อความถี่, ผลการตอบสนองอิมพัลส์ และตำแหน่งโพลซีโร ตามลำดับ ของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass Filter Quantized 24 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 80 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทำโครงการ การทดสอบวัดคุณภาพของตัวกรองความถี่ดิจิทัลออดิโอ ต่อการกำจัดความยาวสัมประสิทธิ์ นี้พบว่าเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์เซชัน ( Unquantized, Quantized 4 bit, Quantized 8 bit, Quantized 12 bit, Quantized 16 bit, Quantized 18 bit, Quantized 20 bit, Quantized 24 bit ) ของตัวกรองความถี่แต่ละโครงสร้างมีความคล้ายกันมาก แยกความแตกต่างจากการฟังได้ยากมาก ซึ่งจะเห็นความแตกต่างได้ก็ต่อจากผลตอบสนองของตัวกรองความถี่

ในส่วนของเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่แต่ละโครงสร้างหลัก ได้แก่ FIR Filter, IIR Filter และ Parallel All-Pass Filter มีคุณภาพเสียงที่ต่างกัน แต่ก็ไม่สามารถบอกได้ว่าเสียงไหนดีที่สุด เพราะจากการสำรวจความคิดเห็นเกี่ยวกับความชอบมา พบว่าผู้ฟังแต่ละคนมีความชอบที่ต่างกัน สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเพลง เช่น งานอัดเสียงในสตูดิโอ เพื่อให้ได้คุณภาพเสียงที่ต้องการ หรือเสียงที่ดีที่สุด เป็นต้น

จากการได้ทดลองออกแบบตัวกรองความถี่ทุกโครงสร้างสามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. Parallel All-Pass Filter มีความไวต่อการจำกัดค่าสัมประสิทธิ์ต่ำที่สุดซึ่งแสดง ว่าตัวกรองความถี่เกิดการ Distortion (ความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด)
2. IIR Direct I & IIR Direct II จะมีความไวต่อการจำกัดค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่า Parallel All-Pass Filter และจะเกิด Distortion ในตัวกรองความถี่มาก มีผลต่อการรับฟังเสียงที่ได้นั้นมีความไม่ชัดเจนเท่ากับ Parallel All-Pass Filter และ FIR Filter
3. ในโครงสร้างของ Parallel All-Pass Filter พบว่าเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพเสียงจากการรับฟังจะเห็นว่าผลลัพธ์ของเสียงที่ออกมา มีความใกล้เคียงกันมาก นั้นแสดงว่าโครงสร้าง Parallel All-Pass Filter ที่มีการควอนไทซ์เพียงแค่จำนวนบิตต่ำๆนั้น ก็สามารถให้คุณภาพเสียงใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับ Unquantized ได้ ข้อดีตรงจุดนี้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านการออกแบบ Hardware ที่รองรับจำนวนบิตต่ำ ๆ เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน

## 5.2 ปัญหาที่พบ

- 5.2.1 เอกสาร Matlab ที่อธิบายการเขียน GUI ยังมีไม่มาก ถึงมีก็มีเฉพาะการเขียนเบื้องต้นเท่านั้น
- 5.2.2 จากการสำรวจกลุ่มตัวอย่างมา พบว่าผู้สูงอายุและเด็กจะมีปัญหาในการแยกแยะเสียงไม่ค่อยออก ส่วนวัยรุ่นและผู้ใหญ่มีความสามารถในการแยกแยะเสียงได้ดีกว่า
- 5.2.3 ลำโพงที่ใช้ทดสอบเสียงมีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้การขับเสียงออกมาไม่สามารถให้เสียงที่แสดงถึงความแตกต่างของเสียงได้มากนัก

## 5.3 แนวทางในการแก้ปัญหา

ในการทดสอบคุณภาพเสียง ควรใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น High-end Headphone, High-end Speaker เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 82 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บรรณานุกรม

## ภาษาไทย

1. ปริญญา สงวนศักดิ์. **คู่มือ Matlab ฉบับสมบูรณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ไอดีซี พรีเมียร์. กรุงเทพมหานคร, มีนาคม 2553.
2. พิสิฐ วนิชชานันท์. **MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร, 2551.
3. มนัส สังวรณเศิลป์. **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส. กรุงเทพมหานคร, เมษายน 2543.
4. สุธรรม ศรีเกษม. **MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยรังสิต
5. วัลลภ สุระคำพลธรรม. **การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533
6. อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล. **Digital signal processing Fundamentals**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
7. วรวิทย์ สมหา. **การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (Digital Signal Processing)**. 124 หน้า ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.

## ภาษาอังกฤษ

1. L.R. Rabiner and B. Gold. **Theory and Application of Digital Signal Processing**. Prentice-Hall, New Jersey, 1975.
2. S.R. Powell and P.M. Chau. **A technique for realizing linear phase IIR filters**. IEEE Trans. Signal Processing, vol. 39, no.11, pp. 2425-2435, Nov. 1991
3. David J. DeFatta. **Digital Signal Processing A System Design Approach**. 1988

## เว็บไซต์

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 83 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

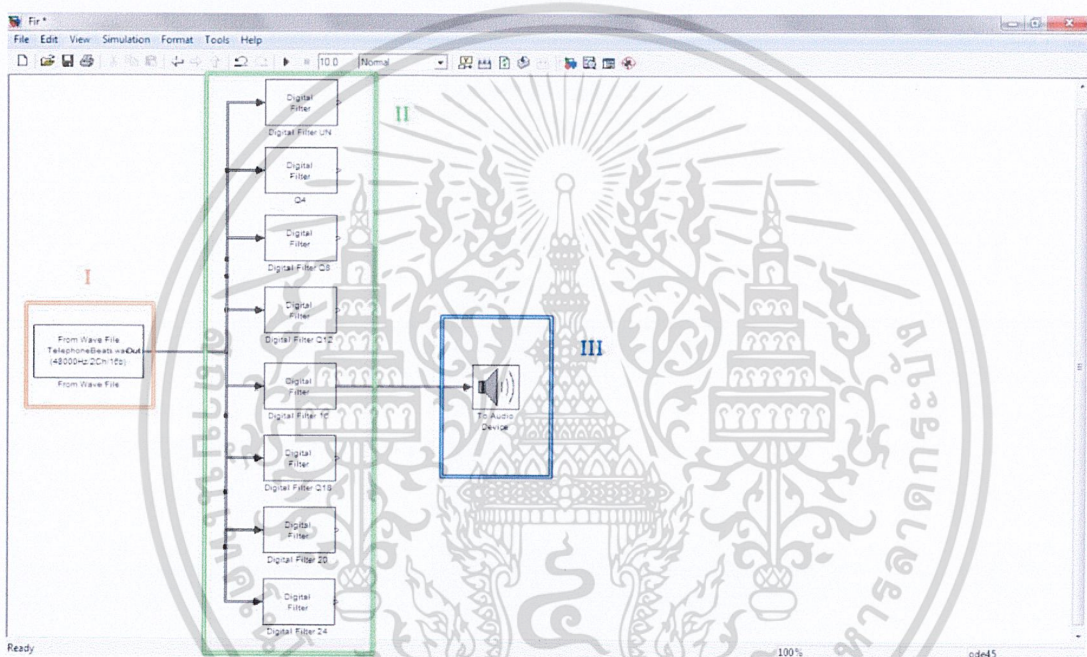
# ภาคผนวก (Appendix)

## ภาคผนวก ก.

### การใช้งานโปรแกรม Simulink

ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการใช้งาน โปรแกรม Simulink ของ FIR Filter ซึ่งมีรายละเอียดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม Simulink ขึ้นมาจะปรากฏหน้าจอเบื้องต้นดังรูปข้างล่างนี้



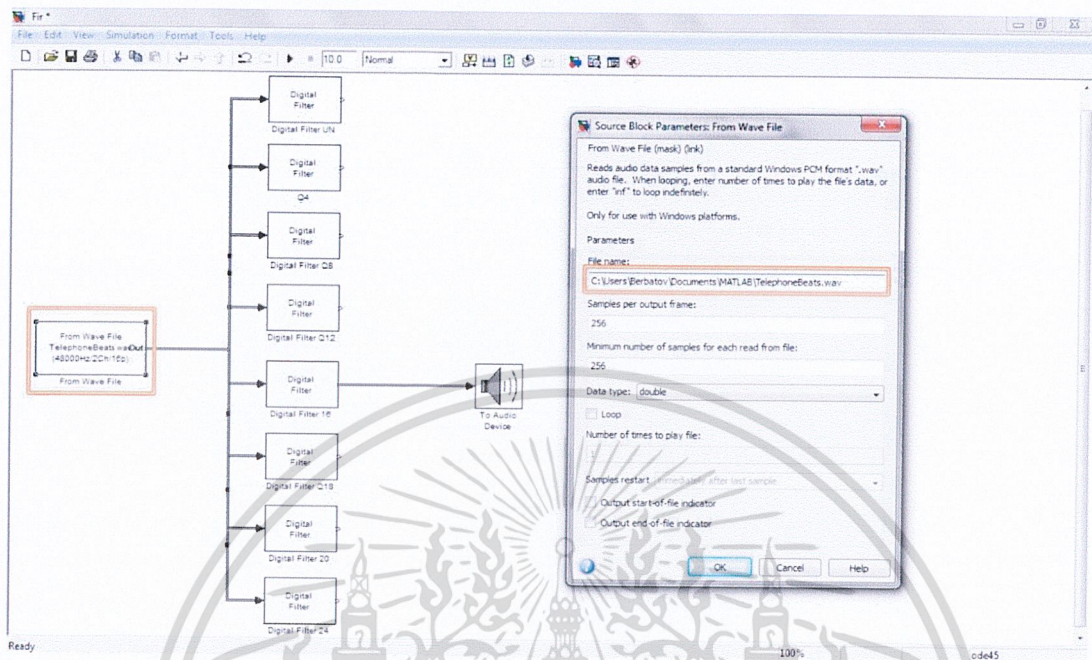
- I. ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของไฟล์เสียง (.wav) ที่นำมาใช้ในการทดสอบ
- II. ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของฟิลเตอร์แต่ละควอนไทซ์ ซึ่งมีด้วยกัน 8 บล็อก ได้แก่

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Unquantized      | <input type="checkbox"/> Quantized 4 bit  |
| <input type="checkbox"/> Quantized 8 bit  | <input type="checkbox"/> Quantized 12 bit |
| <input type="checkbox"/> Quantized 16 bit | <input type="checkbox"/> Quantized 18 bit |
| <input type="checkbox"/> Quantized 20 bit | <input type="checkbox"/> Quantized 24 bit |

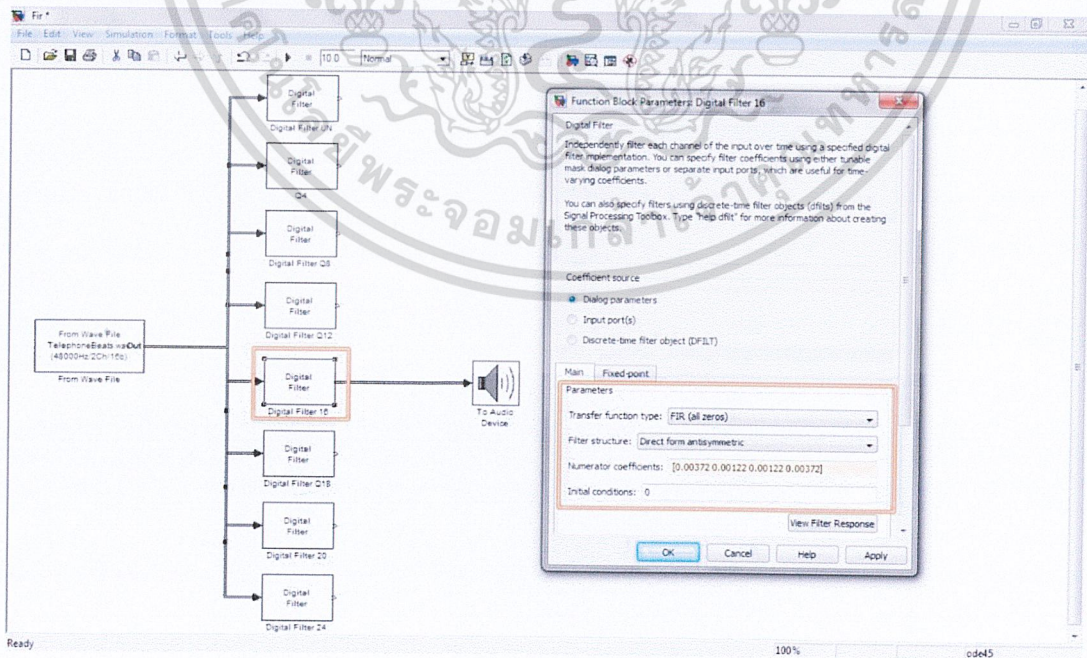
- III. ส่วนที่ 3 เป็นส่วนของเครื่องมือที่ใช้ในการฟังเสียงที่ผ่านฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อต้องการเปลี่ยนไฟล์เสียง (.wav) ที่ใช้ในการทดสอบ ให้ดับเบิลคลิกในส่วนที่ 1 จากนั้นให้ใส่ Directory ของไฟล์เสียง ดังรูปที่แสดงข้างล่างนี้

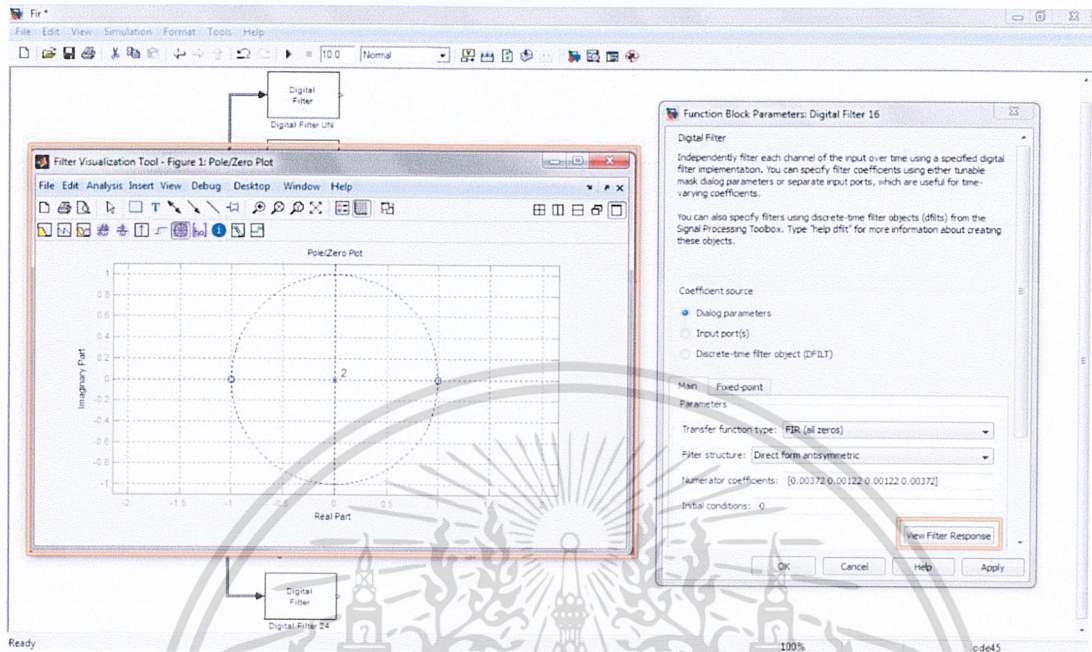


3. การใส่ค่าสัมประสิทธิ์ทอมเคซ ในบล็อกฟิลเตอร์ (ส่วนที่ 2) ทำได้โดยการดับเบิลคลิกที่บล็อกฟิลเตอร์ แล้วใส่ค่าตามรูปที่แสดงข้างล่าง

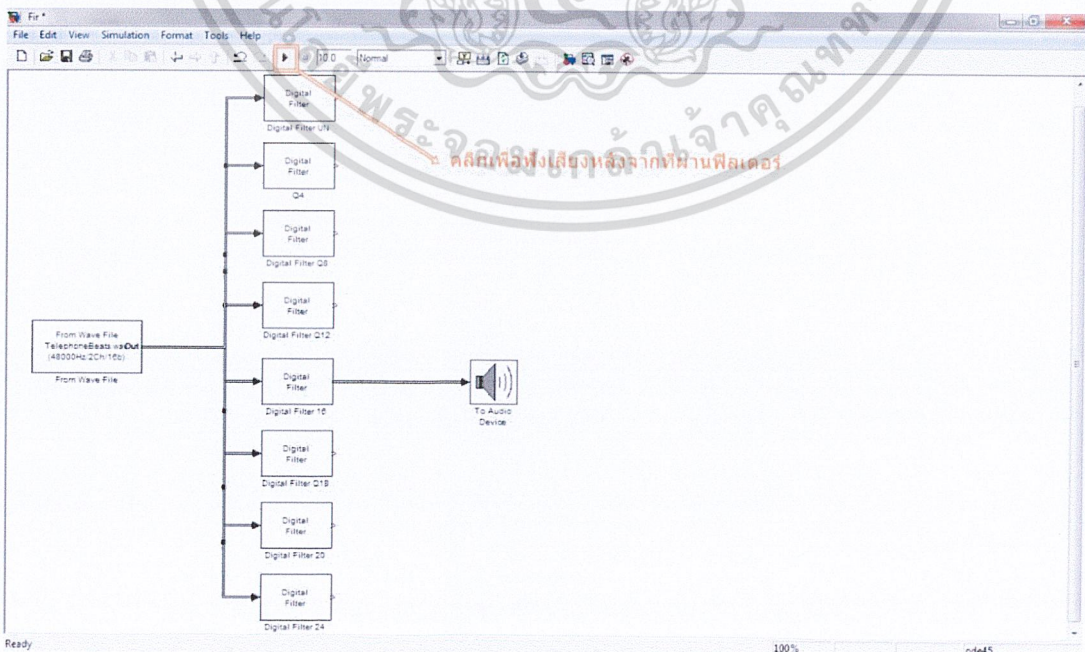


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต่อจากข้อสาม ในการดูผลตอบสนองของฟิลเตอร์จากคลิกที่ปุ่ม View Filter Response จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา ตามรูปที่แสดงข้างล่างดังนี้

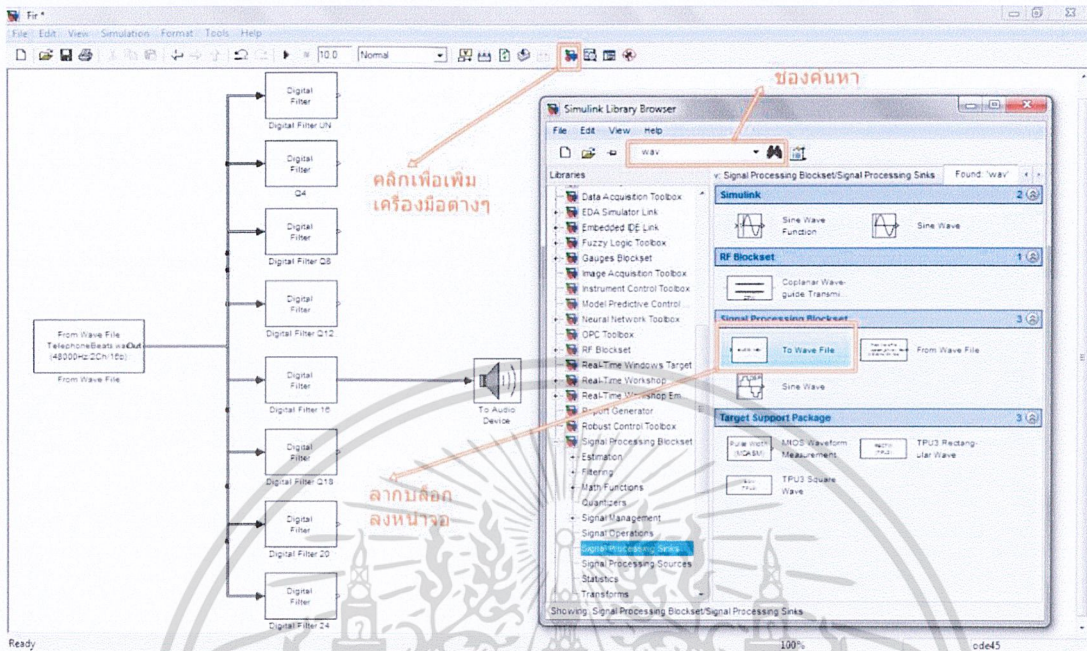


5. เมื่อต้องการฟังเสียง (หลังจากผ่านฟิลเตอร์) ก็สามารถฟังได้โดยการต่อบล็อก To Audio Device (ส่วนที่ 3) เข้ากับบล็อกฟิลเตอร์ (ส่วนที่ 2) จากนั้นคลิกปุ่ม Play ดังรูปที่แสดงข้างล่าง

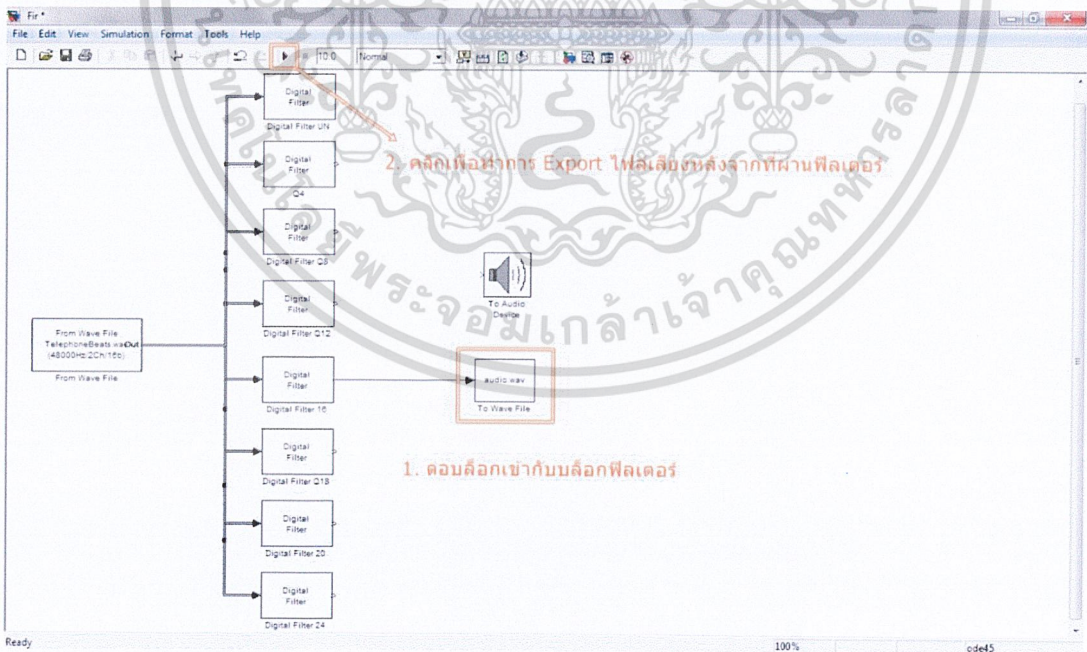


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่อต้องการ Export ไฟล์เสียงที่ผ่านฟิลเตอร์ ทำได้โดยการเพิ่มบล็อก To Wave File ดังรูปที่แสดงข้างล่าง



จากนั้นก็ทำตามขั้นตอนที่แสดงตามรูปข้างล่าง



หมายเหตุ : โปรแกรม Simulink จะเก็บไฟล์เสียงที่ Export เสร็จ ไว้ใน Directory เดียวกับ

ไฟล์เสียงต้นฉบับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข. การใช้งาน GUI เบื้องต้น

### 1. องค์ประกอบ GUI ในกลุ่มของ UICONTROL

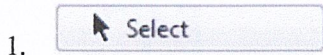
การใช้งานโปรแกรม MATLAB เขียนโปรแกรมกราฟฟิกที่ใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้ หรือที่เรียกว่าโปรแกรม Graphical User Interface (GUI) ที่ผ่านมารับค่าจากผู้ใช้จะเป็นแบบง่ายๆ คือเป็นการรับค่าจากผู้ใช้โดยผ่านทางคีย์บอร์ดและฟังก์ชันที่ใช้คือ Input อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน โปรแกรมประยุกต์สามารถติดต่อกับผู้ใช้ได้หลายช่องทางในหน้าตาเดียวกัน โดยใช้ทั้งคีย์บอร์ดและเมาส์ ตัวอย่างของการที่ผู้ใช้ป้อนค่าให้กับโปรแกรม GUI ที่เรารู้จักกัน ได้แก่ การคลิกเมาส์บนปุ่มกด (Pushbutton) การป้อนข้อความลงในช่องแก้ไขข้อความ (Edit box) และการคลิกบนปุ่มวิทยุ (Radio button) เป็นต้น ดังนั้น การทำงานของโปรแกรมจะขึ้นอยู่กับว่ามีกรป้อนข้อมูลหรือสั่งการกับองค์ประกอบ GUI หรือไม่ โดยทั่วไปเราจะเรียกสิ่งที่คุณป้อนเข้าผ่านทางองค์ประกอบ GUI ว่าเป็นเหตุการณ์ (Event) เมื่อใดมีเหตุการณ์เกิดขึ้น เช่น ผู้ใช้กดปุ่ม หรือป้อนข้อมูลในช่องแก้ไขข้อมูล โปรแกรมก็จะทำงานตามชุดคำสั่งที่เราเขียนไว้ล่วงหน้าเพื่อตอบสนองกับเหตุการณ์นั้น เราเรียกโปรแกรมที่ทำงานตามเหตุการณ์ในลักษณะนี้ว่า การขับเคลื่อนด้วยเหตุการณ์ (Event driven)

การสร้างโปรแกรม GUI ใน MATLAB มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนที่ต้องพิจารณาดังนี้

1. องค์ประกอบของ GUI บนหน้าต่างที่ใช้ติดต่อโต้ตอบกับผู้ใช้ เช่น ปุ่มกด ช่องแก้ไขข้อความ แถว หรือปุ่มวิทยุ ทั้งนี้ องค์ประกอบ GUI เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ให้พิจารณาว่าเป็นออบเจกต์ (Object) ชนิดหนึ่งในโปรแกรม MATLAB ทั้งสิ้น

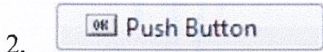
2. ฟังก์ชันที่ทำงานเพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์ตามที่ผู้ใช้โต้ตอบกับองค์ประกอบแต่ละชิ้นของโปรแกรม GUI โดยฟังก์ชันเหล่านี้มีชื่อเฉพาะว่า Callback (Callback function)

ดังนั้นในการจะเขียน GUI ต้องทราบ องค์ประกอบของ UICONTROL ก่อน ซึ่งมีดังนี้



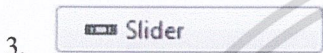
1.

ปุ่ม Select เป็นปุ่มที่ใช้สำหรับเลือกออปเจกต์ ในหน้าต่างที่เราออกแบบ GUI โดยจะใช้เมาส์คลิกเลือกทีละออปเจกต์ หรือใช้เมาส์คลอบทีละหลาย ๆ ออปเจกต์



2.

ปุ่มกด เมื่อผู้ใช้คลิกเมาส์บนปุ่มกดนี้จะทำให้ฟังก์ชัน Callback ของมันทำงาน เหมาะสำหรับผู้ใช้งานที่ต้องการเป็นการตอบตกลง ยกเลิก หรือใช้ในการบอกให้เริ่มต้นหรือสิ้นสุดเหตุการณ์ใดๆ



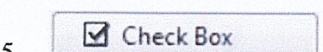
3.

สไลเดอร์ เป็นปุ่มที่เลื่อนอยู่บนแถบในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ ผู้ใช้สามารถใช้เมาส์คลิกบนปุ่มและลาก ไปมาเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของปุ่มได้อย่างต่อเนื่อง ฟังก์ชัน Callback จะทำงานเมื่อมีการคลิกเลื่อนปุ่ม เหมาะสำหรับผู้ใช้งานปรับค่าเพิ่มหรือลด




4.

ปุ่มวิทยุ มีคุณสมบัติเหมือนกันกับปุ่มเปิดปิดทุกประการ เพียงแต่มีหน้าตาต่างกันคือ เป็นรูปร่างกลม และเมื่อคลิกเมาส์บนปุ่มจะปรากฏมีจุดดำอยู่ตรงกลางเพื่อแสดงว่าได้เปลี่ยนสถานะจากการไม่เลือกไปเป็นถูกเลือก เมื่อคลิกอีกครั้งจุดดำจะหายไปและเปลี่ยนกลับไปอยู่ในสถานะไม่ถูกเลือก ในการใช้งานจริงมักจะนำปุ่มวิทยุหลายปุ่มมารวมเป็นกลุ่ม โดยที่ในขณะใดขณะหนึ่งจะมีเพียงปุ่มเดียวเท่านั้นที่อยู่ในสถานะถูกเลือก การคลิกเมาส์แต่ละครั้งบนปุ่มวิทยุจะทำให้ฟังก์ชัน Callback ของมันทำงาน การตรวจสอบสถานะของปุ่มให้อ่านจากคุณสมบัติ 'Value' โดยนิยมบรรจุ Radio Button ที่ต้องการให้เลือกไว้ภายใน Panel เดียวกัน




5.


ช่องเลือก มีคุณสมบัติเหมือนกันกับปุ่มเปิดปิดทุกประการ เพียงแต่มีหน้าตาเป็นรูปสี่เหลี่ยม และจะมีเครื่องหมายถูกเมื่ออยู่ในสถานะถูกเลือก การคลิกเมาส์แต่ละครั้งบนช่องเลือกจะทำให้ฟังก์ชัน Callback ของมันทำงาน เหมาะสำหรับผู้ใช้งานเพื่อเปิดหรือปิดไฟหรือไม่ เป็นต้น

6.  Edit Text


ช่องแก้ไขข้อความ มีไว้สำหรับแสดงข้อความในรูปแบบของสตริง โดยที่ผู้ใช้สามารถแก้ไขข้อความในช่องได้ ฟังก์ชัน Callback ของมันจะทำงานเมื่อผู้ใช้มีการกดปุ่ม Enter บนคีย์บอร์ด ในกรณีที่ช่องแก้ไขข้อความมีหลายบรรทัด ฟังก์ชัน Callback จะทำงานเมื่อกดปุ่ม Ctrl+Enter พร้อมกัน เหมาะสำหรับให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูล

7.  Static Text


ข้อความนิ่งมีไว้แสดงข้อความในรูปแบบของสตริง ข้อแตกต่างของออบเจกต์ชนิดนี้กับชนิดอื่น คือ ออบเจกต์ชนิดนี้ไม่มีฟังก์ชัน Callback เหมาะสำหรับแสดงเป็นข้อความอธิบาย หรือชื่อ ในลักษณะถาวร โดยผู้ใช้งานไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

8.  Pop-up Menu


เมนูป๊อป-อัพ เป็นเมนูที่ตอบสนองต่อการคลิกเมาส์ เมื่อมีเมาส์มาคลิก เมนูป๊อป-อัพจะแสดงข้อความหลายข้อความในแนวตั้ง ให้ผู้ใช้เลือกข้อความใดข้อความหนึ่งออกมา ในสภาวะปกติเมนูป๊อป-อัพจะแสดงเพียงข้อความเดียวที่ถูกเลือก ฟังก์ชัน Callback จะทำงานเมื่อมีการคลิกเลือกข้อความ

9.  Listbox

ช่องรายการ เป็นกรอบสี่เหลี่ยมที่แสดงข้อความได้หลายข้อความในแนวตั้ง ผู้ใช้สามารถเลือกข้อความใดข้อความหนึ่งได้โดยการคลิกเมาส์บนข้อความ

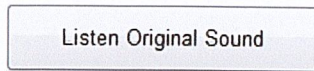
10.  Toggle Button

ปุ่มเปิดปิด เป็นปุ่มที่มีสองสถานะ คือ เปิดและปิด การคลิกเมาส์บนปุ่มแต่ละครั้งจะทำให้สถานะของมันเปลี่ยนสลับไปสลับมาระหว่างสถานะเปิดและสถานะปิด การคลิกเมาส์บนปุ่มเปิดปิดแต่ละครั้งจะทำให้ฟังก์ชัน Callback ของมันทำงาน

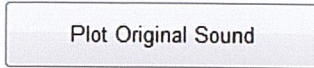
11.  Axes

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวาดกราฟต่างๆ โดยที่ผู้ใช้ต้องกำหนดค่าพิกัด หรือกำหนดสมการ ซึ่งมีรูปแบบกราฟมากมาย เช่น กราฟแท่ง กราฟเส้น กราฟ 3 มิติ เป็นต้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Manual GUI



= คลิกเพื่อฟังเสียงออกซิ โอต้นฉบับ



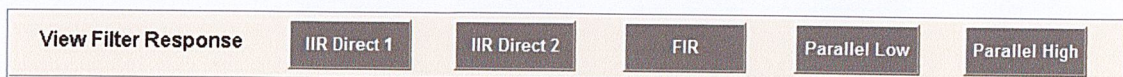
= คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ต้นฉบับ



= คลิกเพื่อออกจาก GUI



- Listen Direct1** = คลิกเพื่อฟังเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ IIR Direct Form1
- Plot Direct 1** = คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ของเสียงที่ผ่าน IIR Direct Form1
- Listen Direct2** = คลิกเพื่อฟังเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ IIR Direct Form2
- Plot Direct 2** = คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ของเสียงที่ผ่าน IIR Direct Form2
- Listen FIR** = คลิกเพื่อฟังเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ FIR
- Plot FIR** = คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ของเสียงที่ผ่าน FIR
- Listen Low** = คลิกเพื่อฟังเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass
- Plot Low** = คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ของเสียงที่ผ่าน Parallel Lowpass
- Listen High** = คลิกเพื่อฟังเสียงที่ผ่านตัวกรองความถี่ Parallel Highpass
- Plot High** = คลิกเพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและ Spectrogram ของเสียงที่ผ่าน Parallel Highpass

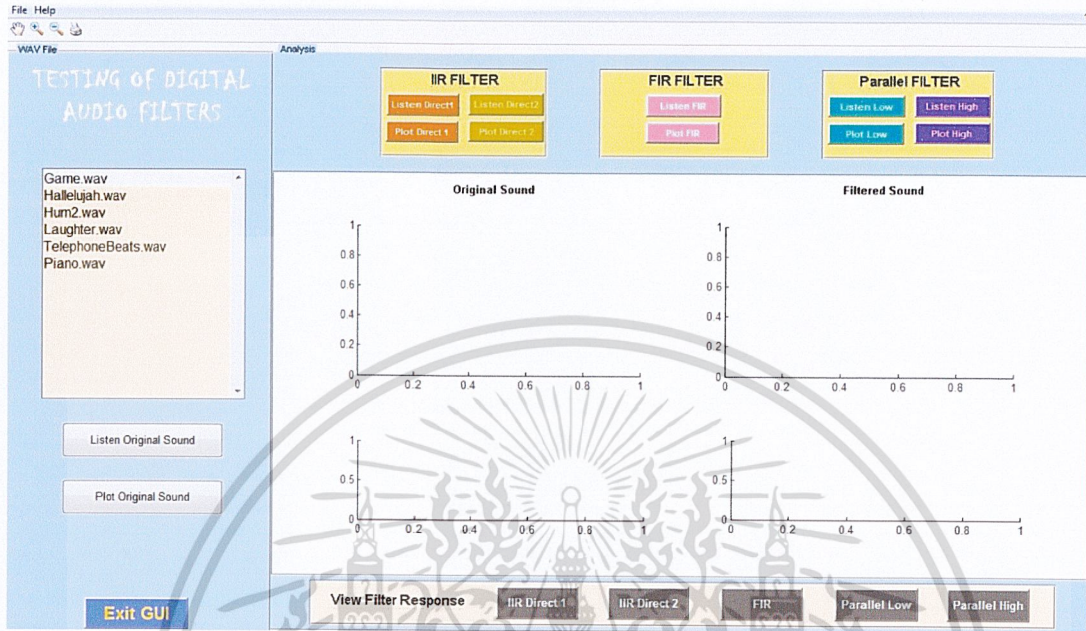


- IIR Direct 1** = คลิกเพื่อดูผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form 1
- IIR Direct 2** = คลิกเพื่อดูผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ IIR Direct Form 2
- FIR** = คลิกเพื่อดูผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ FIR
- Parallel Low** = คลิกเพื่อดูผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ Parallel Lowpass
- Parallel High** = คลิกเพื่อดูผลตอบสนองของตัวกรองความถี่ Parallel Highpass

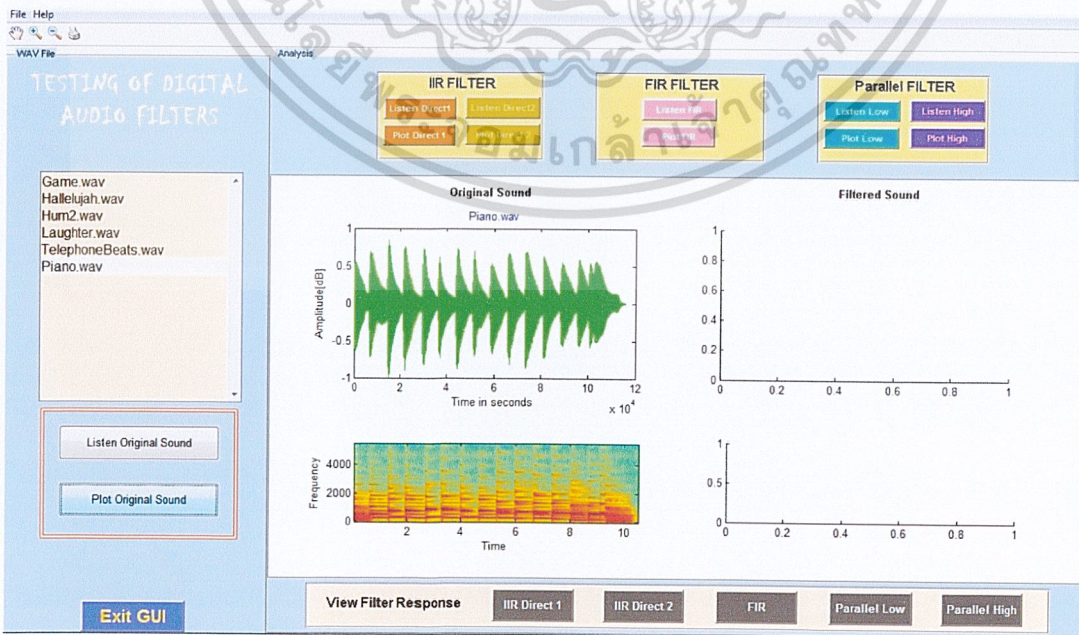
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การใช้งาน GUI เบื้องต้น

3.1 เมื่อรันเข้าสู่ GUI จะปรากฏหน้าจอเบื้องต้นดังรูปข้างล่างนี้

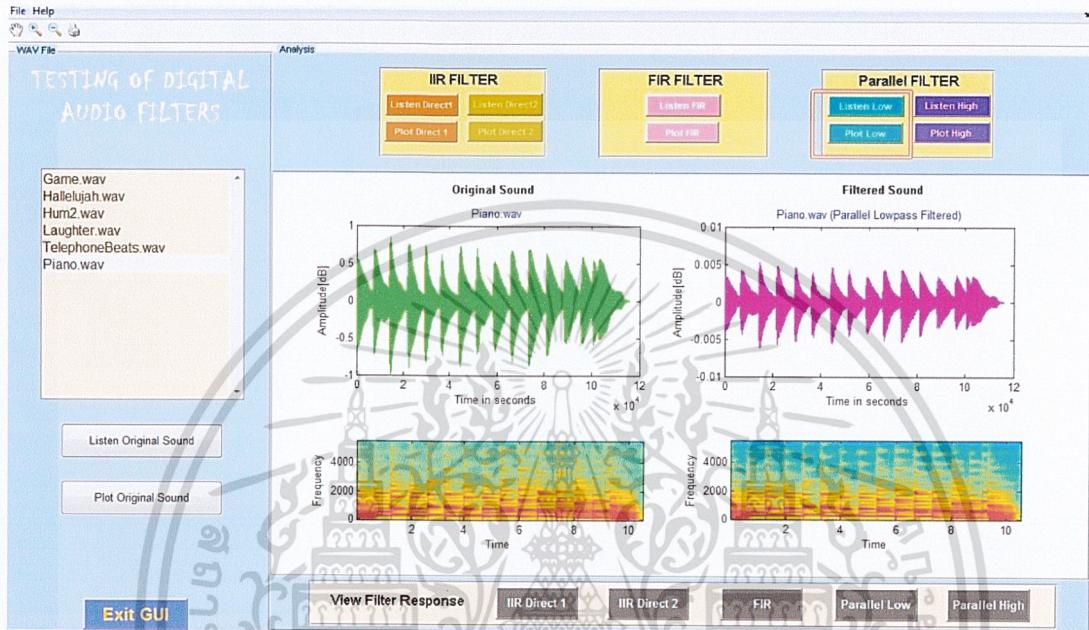


3.2 เลือกเสียงออดิโอ (.wav) ใน List box จากนั้นคลิกปุ่ม Listen Original Sound เพื่อฟังเสียงต้นฉบับ และคลิกปุ่ม Plot Original Sound เพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและสเปกโตรแกรมของเสียงต้นฉบับ จะปรากฏตามรูปข้างล่างดังนี้

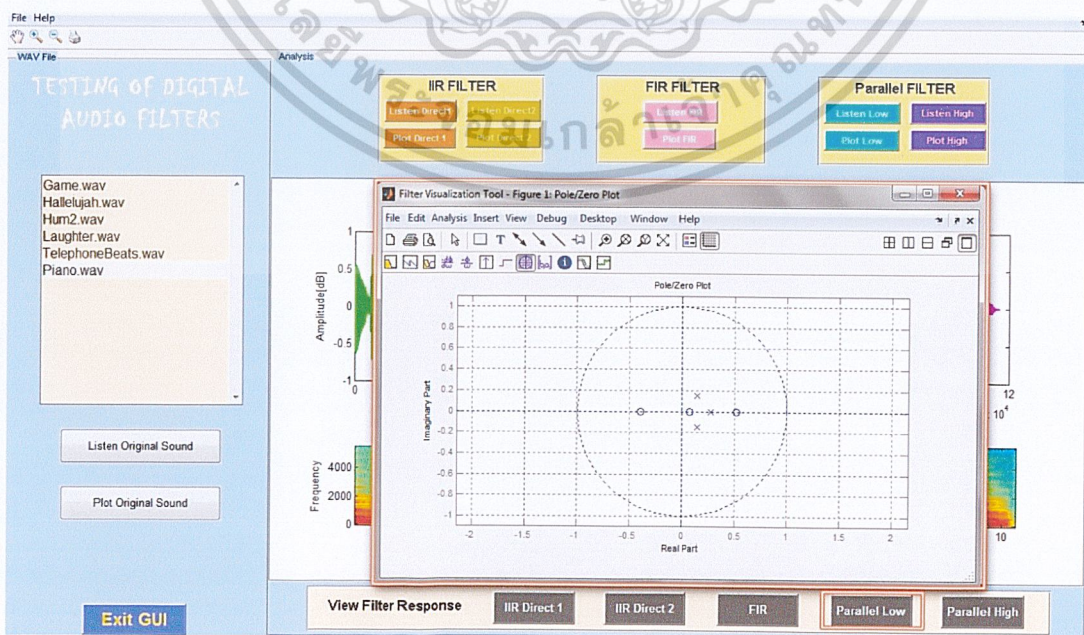


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เลือกฟิลเตอร์ที่ต้องการทดสอบ ในตัวอย่างนี้จะเลือกเป็นแบบ Parallel Filter ที่เป็นแบบ Lowpass โดยคลิกปุ่ม **Listen Low** เพื่อฟังเสียงที่ผ่านการประมวลผล และคลิกปุ่ม **Plot Low** เพื่อดูรูปสัญญาณเสียงและสเปกโตรแกรมของเสียงที่ผ่านการประมวลผล จะปรากฏตามรูปข้างล่างดังนี้



3.4 จากนั้นเมื่อผู้ใช้ต้องการดูผลตอบสนองอื่นๆของฟิลเตอร์ ก็คลิกปุ่ม **Parallel Low** จะแสดงผลตามรูปข้างล่างดังนี้

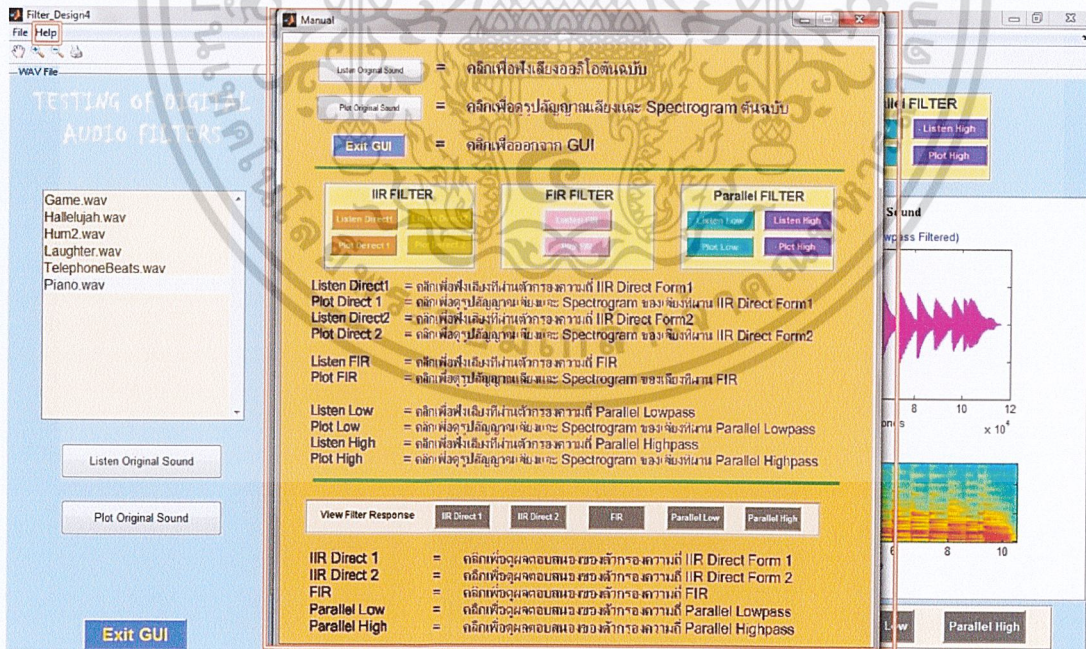


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ในข้อนี้จะยกตัวอย่างการใช้งานแถบเมนู โดยผู้คลิกที่คำว่า **Help** แล้วเลือก **About**



กรณีที่ผู้ใช้งานยังสงสัยในการใช้งาน GUI ก็สามารถเข้าไปดู Manual ได้ที่เมนู **Help** แล้วเลือก **Manual** ก็จะแสดงออกมาดังรูปข้างล่าง



3.6 เมื่อต้องการออกจาก GUI สามารถทำได้ 2 วิธีคือคลิกที่ปุ่ม **Exit GUI** แล้วคลิก **Yes**

หรือไปที่เมนู **File** แล้วเลือก **Exit**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้