



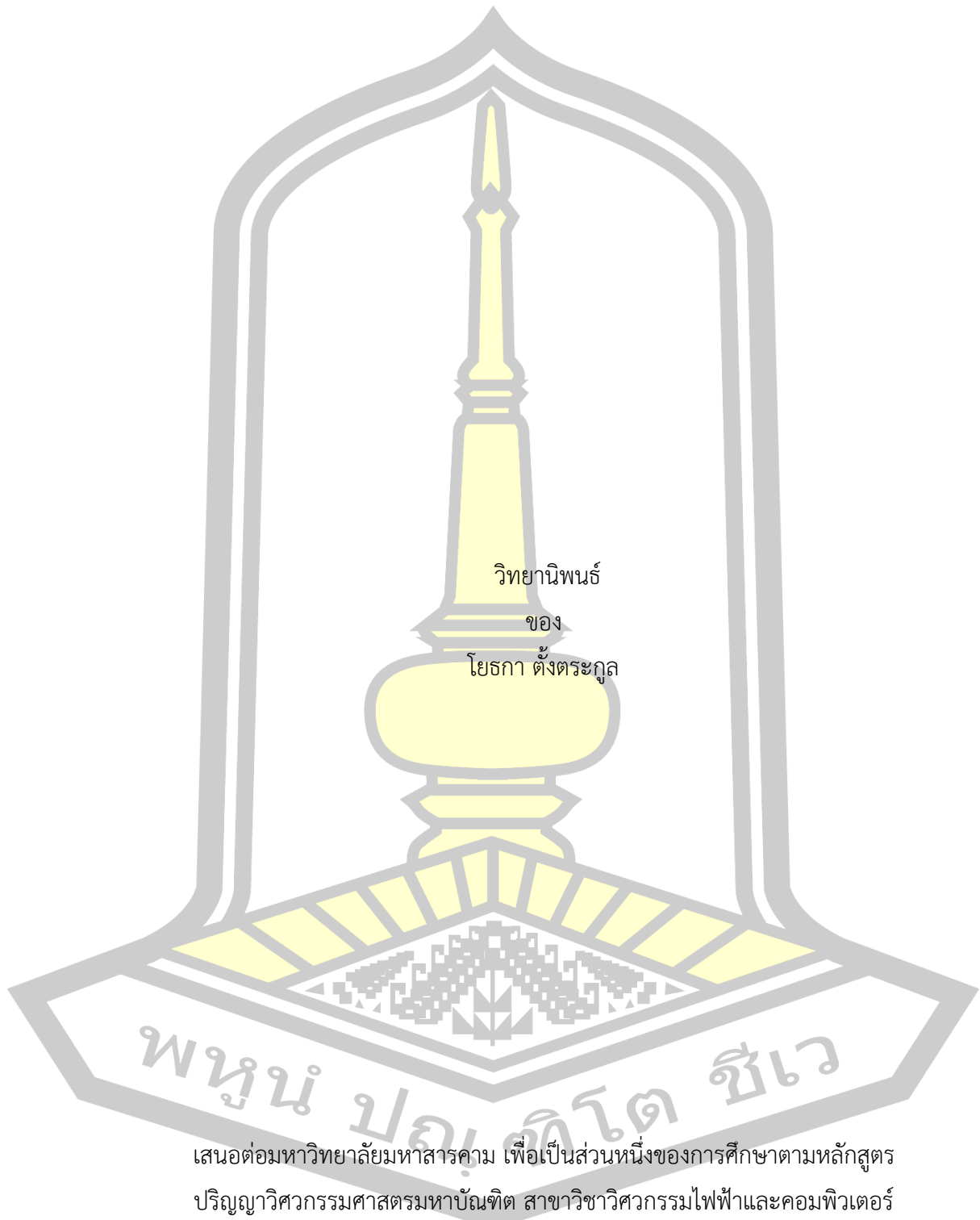
การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร

วิทยานิพนธ์
ของ
โยธกา ตั้งตระกูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร



วิทยานิพนธ์
ของ
โยธกา ตั้งตระกูล

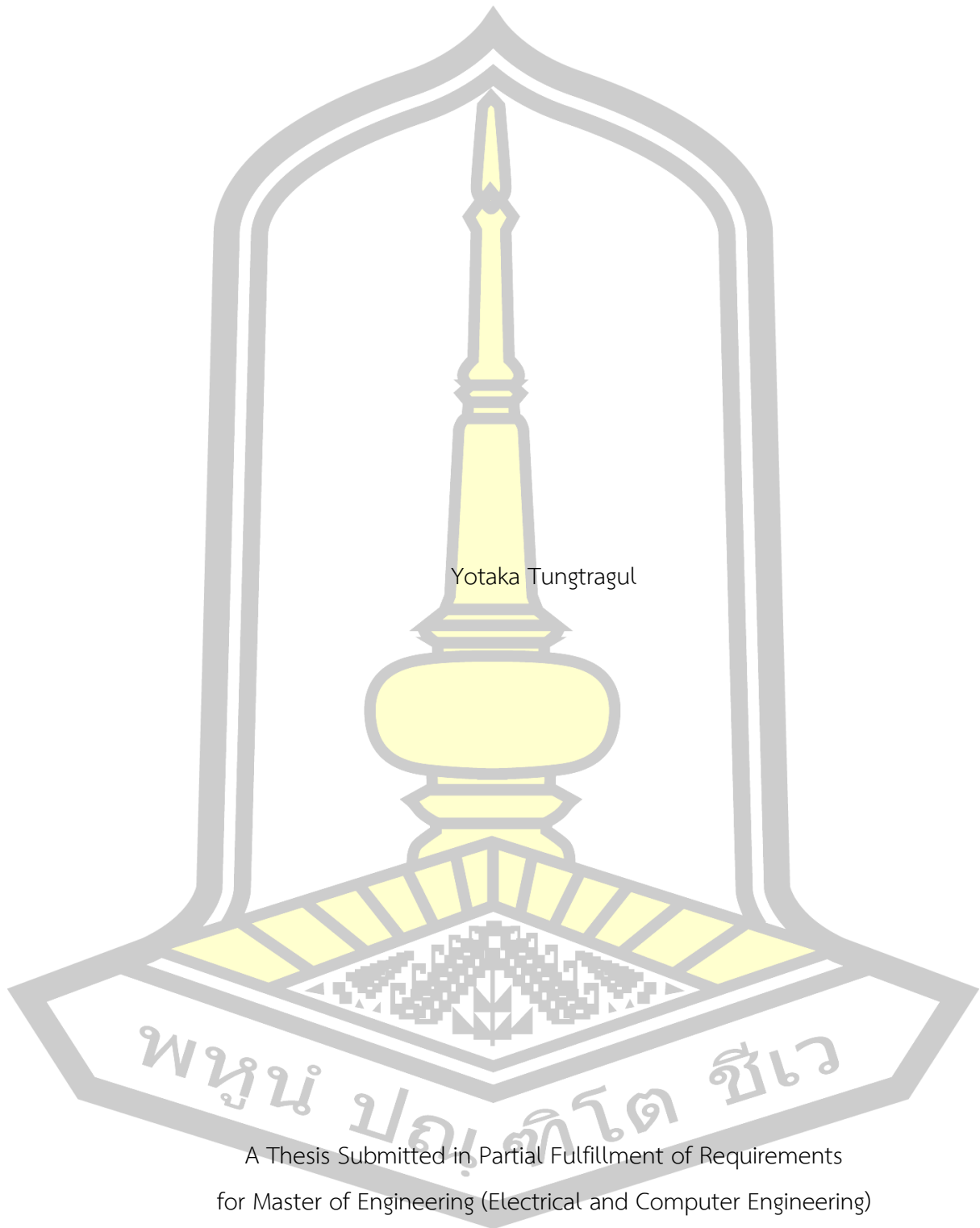
พูน บุญเกิด ชีวะ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design of High pass FIR Filters with variable parameter



Yotaka Tungtragul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

June 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวโยธกา ตั้งตระกูล
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉิ สุวรรณทา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร
ผู้วิจัย โยธกา ตั้งตระกูล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้จะเกี่ยวข้องกับผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดแบบวงจรรวมความถี่สูงผ่าน โดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์พร้อมตัวแปรพารามิเตอร์เบต้า การจำลองการออกแบบจะจำลองโดยการใช้โปรแกรมแมทแลบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ โดยการจำลองพร้อมตัวแปรเบต้าระหว่าง 0-4 และวงจรรวมความถี่ลำดับที่ 38 และ 48 ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมตามลำดับตัวกรองที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โปรแกรมแมทแลบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ถูกนำมาใช้เนื่องจากมีพารามิเตอร์ที่ปรับความกว้างของกลีบหลักและสามารถควบคุมการลดทอนแถบหยุดของตัวกรองที่ออกแบบไว้ได้

คำสำคัญ : ผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด วงจรรวมความถี่สูงผ่าน ฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

TITLE Design of High pass FIR Filters with variable parameter
AUTHOR Yotaka Tungtragul
ADVISORS Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2021

ABSTRACT

This paper is about the study of a finite number of impulse responses in a high pass filter circuit using the Kaiser window function with beta parameter interpreter. The design simulation is simulated using the Kaiser window function with MATLAB program by simulating with beta variables between 0-4 and 38th and 48th filter circuits. Then, further comparisons of different filters were performed respectively to control the variation of the signals. The Kaiser window function with MATLAB program was used because it provided parameters that adjust the width of the parent inversion and could control the reduction of the filter stop bar designed.

Keyword : a finite number of impulse responses. a high pass filter. Kaiser window function



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์และเอาใจใส่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดียิ่งจาก รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่อง รวมทั้งให้คำแนะนำองค์ความรู้แนวทางการศึกษาค้นคว้ามาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ สุวรรณทา และผศ.ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะทีกรุณาเป็นเกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวถึงและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ได้มีส่วนช่วยเหลือในการสนับสนุนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ด้วยความจริงใจ และขอมอบคุณประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นกตเวทิตาคุณแต่ บิดามารดา ครูอาจารย์ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอน้อมคารวะแต่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและใช้อ้างอิงทุกท่าน

โยธกา ตั้งตระกูล

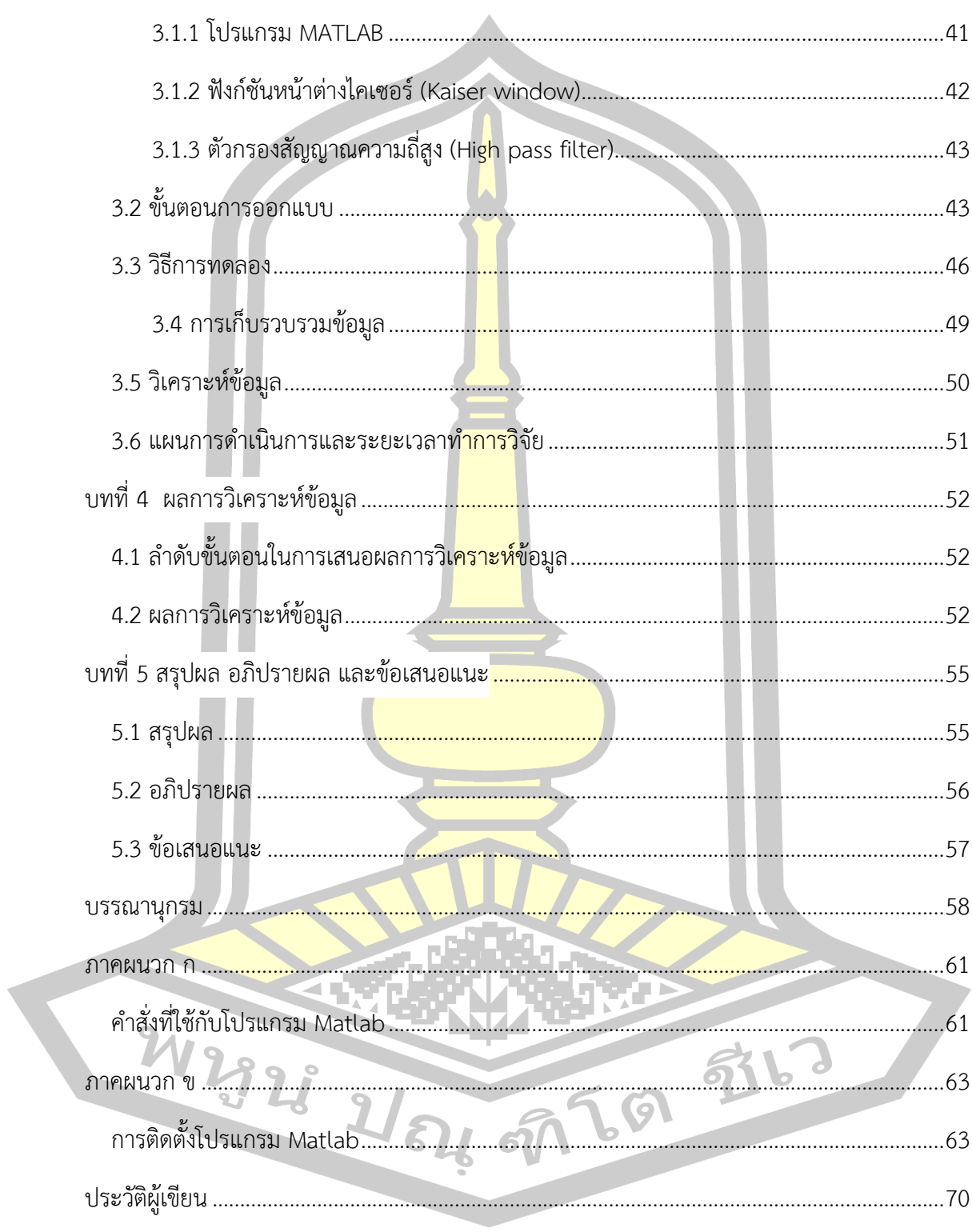


สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	3
2.1 การประมวลผลสัญญาณ.....	3
2.2 ส่วนประกอบในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล.....	4
2.3 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล.....	5
2.4 โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล.....	6
2.5 โครงสร้างของดิจิทัลฟิลเตอร์ (Digital filter structures).....	7
2.6 ข้อดีและข้อเสียของดิจิทัลฟิลเตอร์.....	8
2.6.1 ข้อดีของดิจิทัลฟิลเตอร์.....	8
2.6.2 ข้อเสียของดิจิทัลฟิลเตอร์.....	9
2.7 ประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล.....	9

2.7.1 วงจรกรองเอฟไออาร์ (FIR Filter).....	9
2.7.2 วงจรกรองไอไออาร์ (IIR Filter).....	10
2.8 ข้อแตกต่างระหว่าง IIR Filter กับ FIR Filter.....	11
2.9 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่.....	12
2.9.1 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF).....	14
2.9.2 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (High-pass filter Circuit, HPF).....	16
2.9.3 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter Circuit, BPF).....	17
2.9.4 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band pass filter circuit).....	18
2.9.5 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide Band Pass Filter Circuit).....	19
2.9.6 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF).....	20
2.9.7 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด (Band-stop filter).....	21
2.10 ความหมายของวงจรกรองความถี่.....	22
2.10.1 การแบ่งประเภทของความถี่ดิจิทัล.....	24
2.10.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง(window method).....	24
2.11 กล้องเครื่องมือประมวลผลสัญญาณ.....	28
2.11.1 หน้าต่างสี่เหลี่ยม (rectangular).....	28
2.11.2 หน้าต่างฮานนิงและแฮมมิง (Hanning and Hamming).....	29
2.11.3 หน้าต่างแบล็กแมน (Blackman).....	31
2.11.4 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window).....	31
2.11.5 Kaiser Windows ในการออกแบบ FIR.....	34
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.12.1 งานวิจัยภายในประเทศ.....	35
2.12.2 งานวิจัยนอกประเทศ.....	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41

3.1 เครื่องมือ และโปรแกรมในการวิจัย	41
3.1.1 โปรแกรม MATLAB	41
3.1.2 ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window).....	42
3.1.3 ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High pass filter).....	43
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ	43
3.3 วิธีการทดลอง.....	46
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	49
3.5 วิเคราะห์ข้อมูล.....	50
3.6 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย	51
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	52
4.1 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผล	55
5.2 อภิปรายผล	56
5.3 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	58
ภาคผนวก ก	61
คำสั่งที่ใช้กับโปรแกรม Matlab.....	61
ภาคผนวก ข	63
การติดตั้งโปรแกรม Matlab.....	63
ประวัติผู้เขียน	70



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 2.1 ส่วนประกอบในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	4
ภาพประกอบที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองเชิงเลข	6
ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้งสามที่ใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองดิจิทัล	7
ภาพประกอบที่ 2.4 แสดง Diagram ของตัวกระทำพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของดิจิทัลฟิลเตอร์	8
ภาพประกอบที่ 2.5 Impulse response ของดิจิทัลฟิลเตอร์ทั้งสองชนิด	9
ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรกรองเอฟไออาร์เป็นแบบป้อนไปข้างหน้าเท่านั้น	10
ภาพประกอบที่ 2.7 โครงสร้างของวงจรกรองไอโออาร์มีทั้งส่วนป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ	11
ภาพประกอบที่ 2.8 ระบบของวงจรกรองความถี่	12
ภาพประกอบที่ 2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	14
ภาพประกอบที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	15
ภาพประกอบที่ 2.11 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน	16
ภาพประกอบที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน	16
ภาพประกอบที่ 2.13 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่	17
ภาพประกอบที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่	17
ภาพประกอบที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงแคบ	19
ภาพประกอบที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงกว้าง	20

ภาพประกอบที่ 2.17 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่	20
ภาพประกอบที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่	21
ภาพประกอบที่ 2.19 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในทางอุดมคติ	22
ภาพประกอบที่ 2.20 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ	23
ภาพประกอบที่ 2.21 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR	24
ภาพประกอบที่ 2.22 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ	25
ภาพประกอบที่ 2.23 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR	27
ภาพประกอบที่ 2.24 Rectangular window	29
ภาพประกอบที่ 2.25 Hanning window	30
ภาพประกอบที่ 2.26 Hamming window $\alpha_0=0.53836$ และ $\alpha_1=0.46164$	30
ภาพประกอบที่ 2.27 Blackman window $\alpha=0.16$	31
ภาพประกอบที่ 2.28 ตัวอย่างหน้าต่างKaiserที่มีความยาว50และพารามิเตอร์ of 1, 4 และ 9	32
ภาพประกอบที่ 2.29 ตัวอย่างหน้าต่างKaiserที่มีความยาว50และพารามิเตอร์ 101, 20 และ 50	33

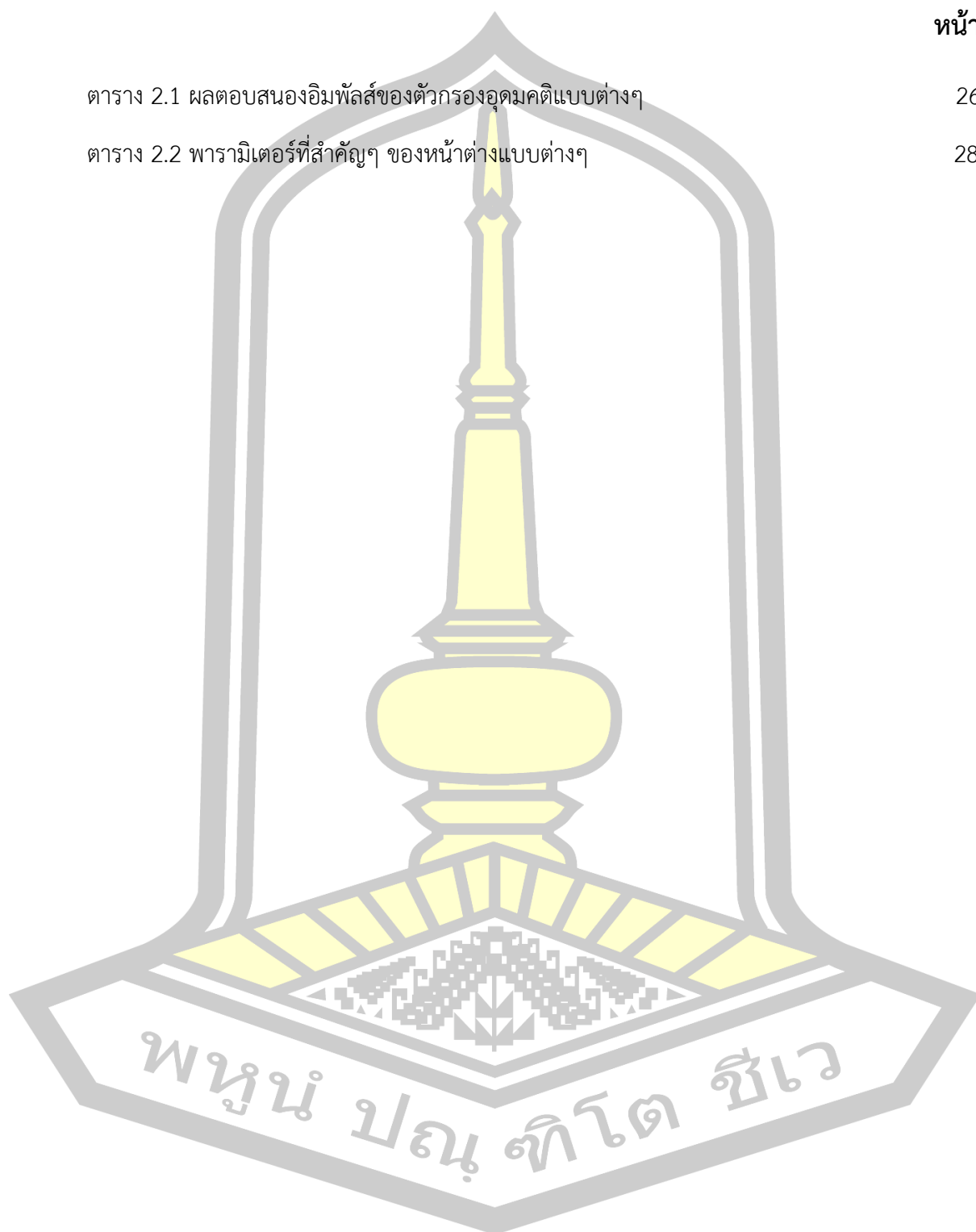


สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ 26

ตาราง 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ 28



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันวงจรกรองสัญญาณหรือวงจรกรองความถี่ (Filter) [8] เป็นวงจรพื้นฐานด้านโทรคมนาคม ระบบเครื่องมือวัด และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมาย ซึ่งวงจรเหล่านี้มักได้รับการคิดค้นและพัฒนาวงจรใหม่อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่มีประโยชน์มากในงานอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคมทั่วไป ในด้านการกรองสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณรบกวนออก การกรองสัญญาณฮาร์โมนิคต่างๆ ของคลื่นที่มีส่วนสำคัญมากมาย ดังเช่น คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นสามเหลี่ยม หรือใช้งานด้านสื่อสารเฉพาะกิจ สามารถกรองสัญญาณพาหะที่ต้องการได้ สำหรับวงจรกรองความถี่ถือว่าเป็นวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญอย่างมาก ด้วยคุณสมบัติในการทำงานหรือผลตอบสนองในการทำงานทางด้านความถี่จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆเช่นทางด้านระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบสื่อสาร ระบบควบคุม โดยในปัจจุบันวงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบคือวงจรกรองความถี่แบบแอนาลอกและวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล [13] ส่วนหน้าที่ในการทำงานของวงจรกรองความถี่สามารถจะทำการจำแนกตามความต้องการของผู้ใช้ โดยจะแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ได้สี่ประเภทคือ[4] 1.วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน[11] 2.วงจรกรองความถี่สูงผ่าน[3][9] 3.วงจรกรองความถี่ผ่าน[6] 4.วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน[5] วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป มักนิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบแอนาลอกเนื่องจากออกแบบได้ง่าย ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือวงจรขาดเสถียรภาพ ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ในปัจจุบันได้หันมานิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอลกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีเสถียรภาพที่ดีกว่า ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือการออกแบบทำได้ยาก และมีราคาสูง การแบ่งวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล จะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด และ ผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด แต่ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอลที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดเนื่องจากมีลักษณะเด่นคือมีผลตอบสนองทางเฟสแบบเชิงเส้น ทำให้สัญญาณของความถี่ทั้งหมดจะล่าช้าตามระยะเวลาที่เท่ากันจึงช่วยลดความเป็นไปได้ของการบิดเบือนเฟสและมีความเสถียรสำหรับอินพุตจำกัด เอาท์พุตจำกัด เหมาะสำหรับการพัฒนางจรกรองความถี่และงานที่เกี่ยวข้อง

การเลือกหน้าที่ที่เหมาะสมในการออกแบบตัวกรองดิจิตอลแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หน้าที่ที่น่าสนใจมาพิจารณาคือหน้าต่างไกเซอร์[7][12] โดยพิจารณาจากผลตอบสนองทาง

ความถี่ สิ่งที่พิจารณาในการเลือกหน้าต่างคือ ช่วงความกว้างของแถบเปลี่ยนต้องแคบพอและสามารถปรับรูปร่างพารามิเตอร์ได้ จากการทดลองพบว่าหน้าต่างไกเซอร์ให้ผลที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าการลดทอนที่ความถี่คัตออฟดีกว่าแบบอื่น

โดยผู้วิจัยต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยปรับค่าตัวแปรพารามิเตอร์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีเพื่อให้ ให้มีผลตอบสนองตามระยะ เวลาที่แน่นอนและถูกต้อง และเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพ และทดสอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการทำงานของตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่าน
- 1.2.2 ออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านด้วยหน้าต่างไกเซอร์
- 1.2.3 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบวิธีหน้าต่าง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภทผลตอบสนองจำนวนจำกัด (Finite Impulse Response)
- 1.3.2 ใช้ตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่าน (High pass filter)
- 1.3.3 ใช้การออกแบบตัวกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง (Window Method)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจการทำงานของตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่าน
- 1.4.2 ออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้กับตัวกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่างไกเซอร์ (Kaiser Window)
- 1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านด้วยวิธีหน้าต่างไกเซอร์

พูน ปณ ทิโต ชีเว

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณ คือ การนำเอาสัญญาณมาเข้าระบบการประมวลผลที่ข้างใน ประกอบขึ้นด้วย ระบบอุปกรณ์ที่ทำการปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ เช่น การบวกสัญญาณ การคูณ การหาร การถอดรากที่สอง หรือการอินทิเกรตสัญญาณ แต่เดิมนั้นเรานิยมใช้ระบบการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบระบบการประมวลผลสัญญาณเชิงอุปมาน ซึ่งสัญญาณเข้าและออกจะเป็นสัญญาณต่อเนื่องหรือเชิงอุปมาน ข้อดีของระบบการประมวลผลแบบนี้ก็คือ ราคาถูก การออกแบบทำได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของระบบการประมวลผลสัญญาณเชิงอุปมานก็คือประสิทธิภาพและความแม่นยำในการประมวลผล คุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ก็ยังแปรค่าตามสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ อายุการใช้งาน ความชื้น ทำให้ความเชื่อถือของระบบมีได้แคในระดับหนึ่งเท่านั้น

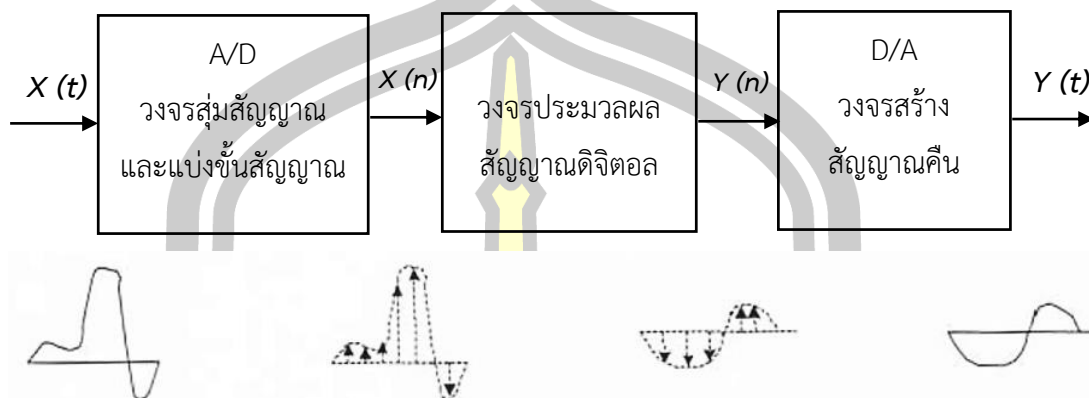
ผลจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตวงจรรวม ทำให้กลอุปกรณ์ดิจิทัล เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ลอจิก เกต หรืออุปกรณ์สนับสนุนต่างๆมีราคาถูกลง และมีประสิทธิภาพดีขึ้นมาก ทำให้ความสนใจในการนำเอาระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีเพิ่มมากขึ้น ข้อดีของระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล คือระบบมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูง สามารถออกแบบและแก้ไขได้โดยง่าย โดยทั่วไปการศึกษา ออกแบบและพัฒนาระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะแบ่งเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆคือ

2.1.1 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลมีหลายประเภทด้วยกัน แต่มีวงจรกรองอยู่ 2 ชนิด ซึ่งเป็นวงจรกรองเชิงเส้นที่เป็นพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลแบบอื่นๆ คือ วงจรกรองความถี่แบบไม่มีการป้อนกลับ (non-recursive filter) และวงจรกรองความถี่แบบป้อนกลับ (recursive filter)

2.1.2 การแปลงเชิงเลข (Digital transform) การแปลงเชิงเลขโดยเฉพาะการแปลงฟูรีเยอร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform หรือ DFT) ที่ทำการประมวลผลโดยใช้ขั้นตอนที่เรียกว่าการแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ (Fast Fourier Transform หรือ FFT) มีส่วนทำให้การประมวลผลสัญญาณเชิงเลขได้รับความนิยมมากขึ้น

2.2 ส่วนประกอบในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ระบบประมวลผลสัญญาณโดยส่วนใหญ่ แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 ส่วนประกอบในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ส่วนประกอบต่างๆของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มีดังนี้

2.2.1 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการย่อย ดังนี้

2.2.1.1 วงจรสุ่มสัญญาณ (Sampler) สัญญาณขาเข้าของวงจรนี้เป็นสัญญาณแบบอนาล็อก $x(t)$ ส่วนสัญญาณออกเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $x(n)$ พารามิเตอร์วงจรสุ่มสัญญาณนี้ก็คือ ค่าอัตราการสุ่ม (Sampling Rate) หรือ ความถี่ในการสุ่ม ใช้สัญลักษณ์แทนว่า f_s ค่านี้เป็นตัวกำหนดว่า วงจรสุ่มจะสุ่มสัญญาณด้วยอัตราที่ครั้งต่อวินาที หรือกิโลเฮิร์ต (Hz)

2.2.1.2 วงจรแบ่งขั้นสัญญาณ (Quantizer) สัญญาณ $x(n)$ ที่ได้จากวงจรสุ่มสัญญาณถือว่ามีค่าต่อเนื่องเต็มทีในทางขนาน ซึ่งในทางปฏิบัติเมื่อนำไปใช้งานจะต้องลดค่าความละเอียดของ $x(n)$ ลง ให้สามารถแทนได้ด้วยสัญญาณดิจิทัลที่มีบิตจำกัด กระบวนการลดความละเอียดนี้เรียกว่า การแบ่งขั้นของสัญญาณ (Quantization) ความละเอียดที่ได้จากการแบ่งขั้นสัญญาณขึ้นกับจำนวนบิตที่จะใช้

วงจรสุ่มสัญญาณรวมกับวงจรแบ่งขั้นสัญญาณในทางปฏิบัติก็คือ ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) นั่นเอง ซึ่งจะรวมสองกระบวนการนี้อยู่ในวงจรเดียวกันและโดยทั่วไปเราจะใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในรูปของวงจรรวมสำเร็จรูป (IC)

2.2.2 วงจรประมวลผลสัญญาณ ส่วนนี้เป็นหัวใจหลัก ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ $x(n)$ เพื่อกระทำผลบางอย่างกับสัญญาณ เช่น เป็นวงจรกรองความถี่บางย่านออก และให้ผลลัพธ์ของการประมวลผลเป็นสัญญาณขาออก $y(n)$ วงจรประมวลผลสัญญาณนี้ ถ้าจะพิจารณากันอย่างง่าย ๆ ก็คือตัวคำนวณ กล่าวได้ว่า มันกระทำการคำนวณหาสัญญาณขาออกจากสัญญาณขาเข้า โดยมองเห็นสัญญาณขาเข้าในลักษณะลำดับของค่า

2.2.3 วงจรสร้างสัญญาณคืน (Signal reconstruction) ใช้ในระบบที่สัญญาณขาออกสุดท้ายเป็นสัญญาณต่อเนื่อง (การประมวลผลสัญญาณบางอย่าง ต้องการสัญญาณขาออกเป็นไม่ต่อเนื่อง ก็ไม่จำเป็นต้องมีส่วนที่ 3) โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $y(n)$ ให้กลับเป็นสัญญาณต่อเนื่อง $y(t)$ ซึ่งจะเป็นสัญญาณขาออกสุดท้ายของระบบ วงจรประเภทนี้ก็คือ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (D/A converter) นั่นเอง ซึ่งก็มีอยู่ในรูปแบบของวงจรรวมสำเร็จรูปเช่นกัน

2.3 วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล คือ กระบวนการที่ไปตัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ให้มีสเปกตรัมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนดให้ หรือทำการตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการในช่วงความถี่ที่กำหนดออกไป ซึ่งทำให้สามารถแยกสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการได้ ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรมัน ต้องใช้เครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย ดังนั้นเราจึงนิยมเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงเลข

การที่วงจรกรองความถี่เชิงเลขมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวางนั้น อาจมาจากข้อได้เปรียบหลายประการดังนี้

2.3.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ สามารถออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ที่กำหนดให้ หรือผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ นอกจากนี้การออกแบบวงจรกรองความถี่ให้มผลตอบสนองเชิงเส้นทำได้ง่าย

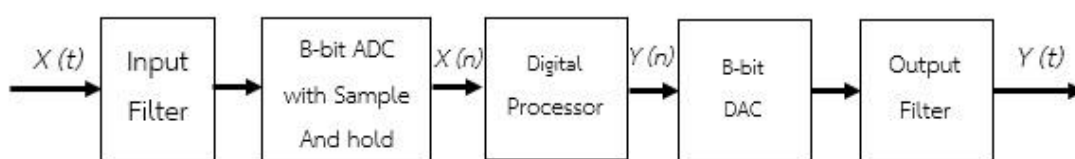
2.3.2 คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบและสร้างแล้วจะไม่ขยับเลื่อนไปตามสภาพแวดล้อม หรือตามอุณหภูมิ หรือระยะเวลาในการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในย่านความถี่ต่ำได้เป็นอย่างดี

2.3.3 การประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรรองความถี่แบบปรับความถี่ได้ (Adaptive Filter) ทำได้ง่าย

2.3.4 ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงความยาวของคำ (Word length) ของตัวเลขฐานสองที่ต้องการใช้ และยังสามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้

2.3.5 ในปัจจุบัน ถ้าพิจารณาในแง่ของเสถียรภาพของวงจรรองความถี่ ความเชื่อถือได้ ราคา หรือขนาดของวงจรรองความถี่เชิงเลข สิ่งเหล่านี้กำลังได้รับการพัฒนา และปรับปรุง ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าของวงจรรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter) หรือเรียกว่าวงจรรองความถี่แบบอุปมาน

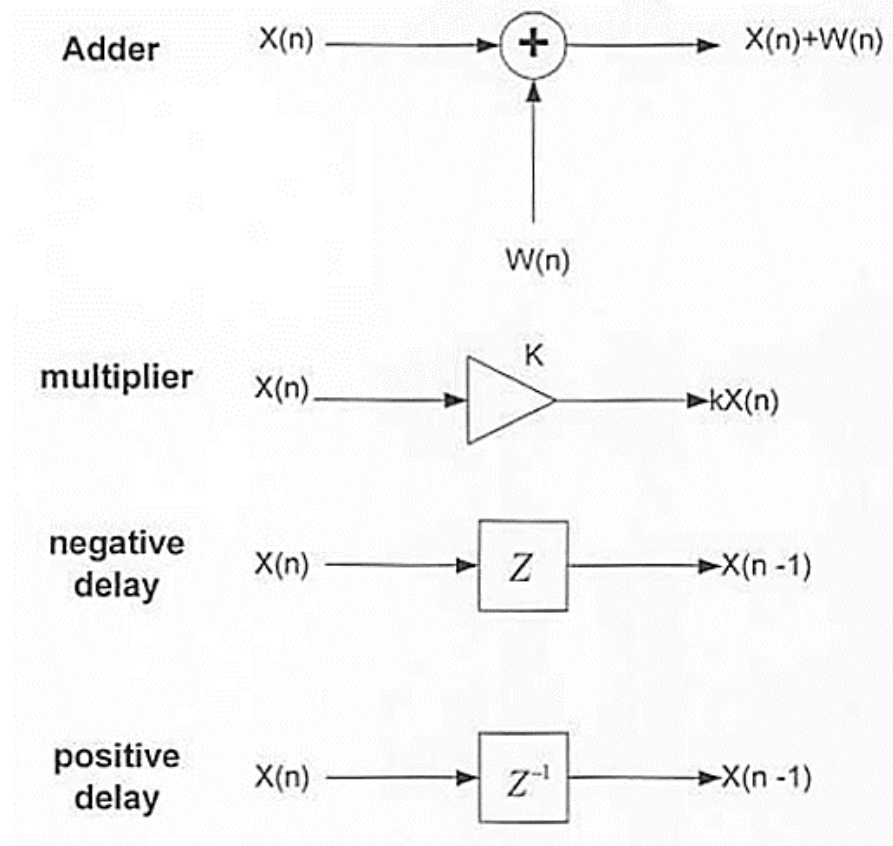
วงจรรองความถี่เชิงเลขสามารถเขียนอธิบายในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบที่ 2 โดยสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกสุ่ม (Sampled) ด้วยช่วงเวลาที่ยกที่ค่าหนึ่ง และสัญญาณที่ถูกสุ่มนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเลขฐานสอง โดยการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณเชิงเลข (analog to digital converter) หลังจากนั้นเลขฐานสองที่แทนสัญญาณอนาล็อกที่เข้ามาทางอินพุตจะถูกกรองโดยวงจรรองความถี่เชิงเลข การกรองจะเป็นการคำนวณทางตัวเลข ซึ่งจะอาศัยวงจรที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ ได้แก่ ตัวบวก ตัวคูณ รีจิสเตอร์ และอุปกรณ์หน่วยความจำต่างๆ ต่อมาค่าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรรองความถี่เชิงเลขนี้จะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณอนาล็อกอีกทีหนึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่จะนำไปใช้งานได้



ภาพประกอบที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรองเชิงเลข

2.4 โครงสร้างของวงจรรองความถี่แบบดิจิทัล

วงจรรองความถี่ดิจิทัล ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ การบวก (Adder) การคูณ (Multiplier) และการหน่วง (Unit Delay) เวลาที่แสดงในภาพประกอบที่ 3 การบวกและการคูณ จะใช้แนวความคิดมาจากตัวเลขในหน่วยคอมพิวเตอร์ ส่วนการหน่วงจะทำให้การถึงข้อมูลในอนาคตมีค่าอย่างต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้งสามที่ใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองดิจิทัล

การหน่วงเวลานั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ บวก (Positive) และลบ (Negative) โดยการหน่วงแบบบวกนี้เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่บันทึกความจำของรีจิสเตอร์ (Register) จะเก็บค่าได้ตามระยะเวลาที่กำหนดสำหรับการคำนวณครั้งต่อไป การหน่วงแบบบวกจะแทนค่าด้วย Z^{-1} และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ด้วยการแปลงแซด การหน่วงแบบลบใช้แทนค่าต่อไปในระดับสัญญาณ แทนค่าด้วย Z จะมีชนิดและการใช้งานที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการใช้งานไม่สามารถใช้งานได้เสมอไป

2.5 โครงสร้างของดิจิทัลฟิลเตอร์ (Digital filter structures)

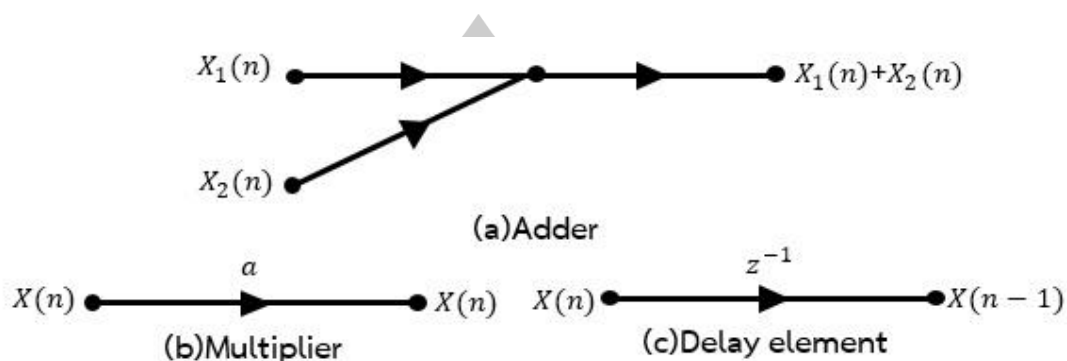
ดิจิทัลฟิลเตอร์ประกอบด้วยตัวกระทำพื้นฐาน 3 ตัวคือ

2.5.1 ตัวบวก (Adder)

2.5.2 ตัวคูณ (Multiplier)

2.5.3 ตัวหน่วงเวลา (Delay)

สามารถเขียนเป็น Diagram ได้ดังภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดง Diagram ของตัวกระทำพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของดิจิตอลฟิลเตอร์

2.6 ข้อดีและข้อเสียของดิจิตอลฟิลเตอร์

ดิจิตอลฟิลเตอร์มีข้อดีข้อเสียอยู่ด้วยกันหลายประการ

2.6.1 ข้อดีของดิจิตอลฟิลเตอร์

2.6.1.1 ดิจิตอลฟิลเตอร์มีความเที่ยงตรงสูงโดยเฉพาะการใช้งานที่ความถี่ต่ำ

2.6.1.2 ดิจิตอลฟิลเตอร์แบบ FIR มีผลการตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น

(Linear phase response)

2.6.1.3 ผลการตอบสนองความถี่ (Frequency response) ของดิจิตอลฟิลเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วย software โดยไม่มีการแก้ไข hardware ใดๆทั้งสิ้น

2.6.1.4 ในปัจจุบันเทคโนโลยีของ VLSI ก้าวหน้ามากขึ้นและได้มีการนำมาสร้างดิจิตอลฟิลเตอร์ ทำให้ขนาดของวงจรเล็กลงและมีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น

2.6.1.5 สภาวะแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ มีผลต่อการทำงานของดิจิตอลฟิลเตอร์น้อยมาก

2.6.1.6 ดิจิตอลฟิลเตอร์ เป็นการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิตอลดังนั้นในการเก็บหรือบันทึกข้อมูลสามารถทำได้ง่าย

2.6.1.7 ดิจิตอลฟิลเตอร์สามารถออกแบบให้มีจำนวน order สูงๆได้

2.6.2 ข้อเสียของดิจิตอลฟิลเตอร์

2.6.2.1 ดิจิตอลฟิลเตอร์ทำงานที่ความถี่สูงได้ไม่ดี

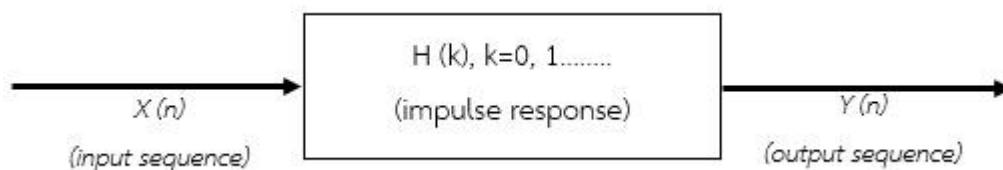
2.6.2.2 ออกแบบยากเพราะต้องใช้คณิตศาสตร์ชั้นสูงเป็นส่วนร่วมในการออกแบบ

2.6.2.3 ต้องใช้เวลาพอสมควรในการสร้าง hardware ของดิจิตอลฟิลเตอร์

ปัจจุบันได้มีการนำดิจิตอลฟิลเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ดังตัวอย่างเช่นการสื่อสารข้อมูล ,ทางด้านการแพทย์ ,การวิเคราะห์ข้อมูลภาพ ,การวิเคราะห์ข้อมูลเสียง และ เครื่องเสียงแบบดิจิตอล เป็นต้น

2.7 ประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล

ดิจิตอลฟิลเตอร์แบ่งได้ 2 ชนิดคือ Finite impulse response filter (FIR Filter) และ Infinite impulse response filter (IIR Filter) ดิจิตอลฟิลเตอร์ทั้งสองชนิดสามารถแสดงให้เห็นในลักษณะของ Impulse response ได้ดังภาพประกอบที่ 2.5

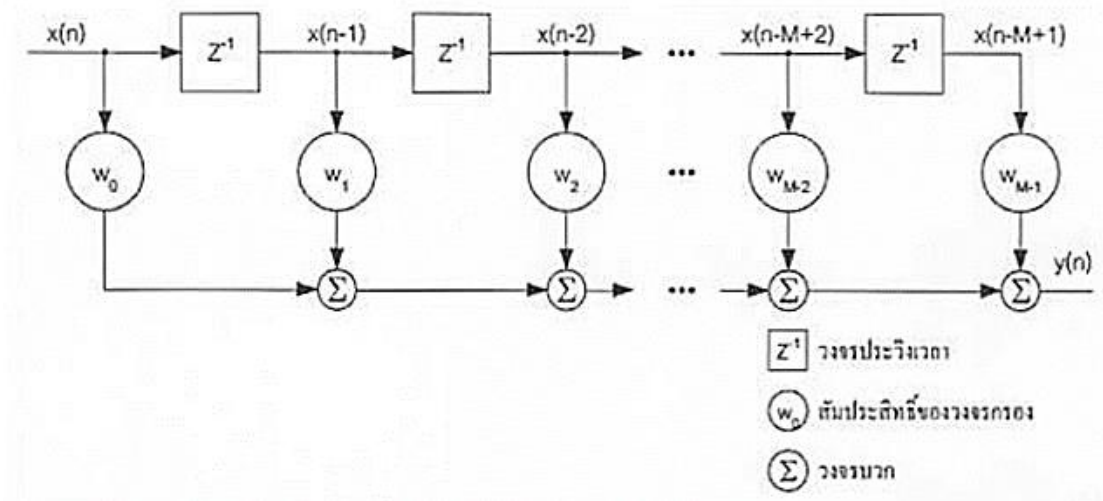


ภาพประกอบที่ 2.5 Impulse response ของดิจิตอลฟิลเตอร์ทั้งสองชนิด

2.7.1 วงจรกรองเอฟไออาร์ (FIR Filter)

วงจรกรองเอฟไออาร์เป็นวงจรกรองที่ผลลัพธ์ของวงจร $y(n)$ ขึ้นกับข้อมูลขาเข้า $x(n)$ และอดีตของมันในช่วงเวลาจำกัด m เท่านั้นข้อมูลในอดีตที่นานกว่านั้นจะไม่มีผลใดๆต่อผลลัพธ์เลย ผลตอบสนองของวงจรเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{i=0}^{M-1} W_i X(n-i) \quad (2.1)$$



ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรวงเอพีไออาร์เป็นแบบป้อนไปข้างหน้าเท่านั้น

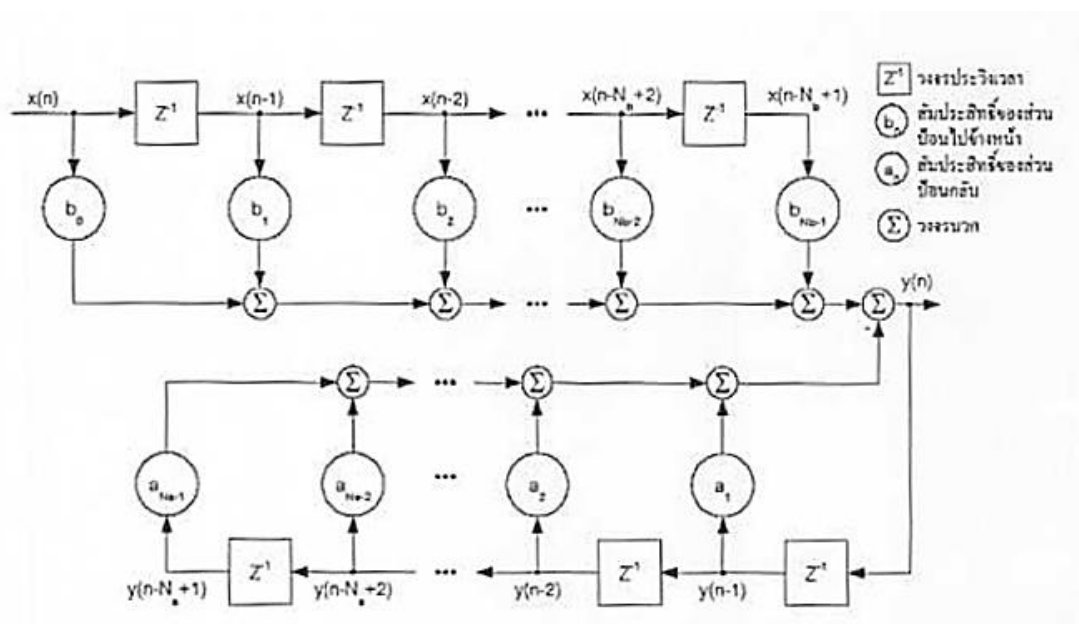
จากสมการที่ 2.6 และโครงสร้างของวงจรวงเอพีไออาร์ดังภาพประกอบที่ 2.6 จะเห็นว่าผลลัพธ์ของวงจรวงเกิดจากผลรวมของผลคูณระหว่างข้อมูลขาเข้าในอดีต $X(n-i)$ กับค่าสัมประสิทธิ์ \square โดยที่ $i=0, \dots, M-1$ และวงจรวงมีโครงสร้างป้อนไปข้างหน้าอย่างเดียวนั้น

2.7.2 วงจรวงไอไออาร์ (IIR Filter)

วงจรวงไอไออาร์ เป็นวงจรวงที่ข้อมูลขาออกของวงจรวงขึ้นกับทั้งข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกในอดีตทำให้เสมือนหนึ่งว่าผลตอบสนองของวงจรวงขึ้นกับข้อมูลขาเข้าในอดีตทั้งหมด วงจรวงประเภทนี้จะมีโครงสร้างทั้งแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับดังแสดงภาพประกอบที่ 2.7 ผลตอบสนองของวงจรวงเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N_b-1} b_i x(n-i) - \sum_{j=1}^{N_a-1} a_j y(n-j) \quad (2.2)$$

พหุนาม โปโล ทิศ มเว



ภาพประกอบที่ 2.7 โครงสร้างของวงจรกรองไอโออาร์มีทั้งส่วนป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

วงจรกรองไอโออาร์มีข้อดีคือมีผลตอบอิมพัลส์ที่นานกว่าวงจรกรองเอฟไออาร์หากมีจำนวนพารามิเตอร์เท่ากัน แต่วงจรกรองไอโออาร์มีเสถียรภาพด้อยกว่าและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่าวงจรกรองเอฟไออาร์

2.8 ข้อแตกต่างระหว่าง IIR Filter กับ FIR Filter

สามารถสรุปได้เป็นข้อๆได้ดังนี้

2.8.1 FIR Filter มีผลตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้น (Linear phase response) ซึ่งเป็นข้อดีของ Filter ชนิดนี้เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางเช่น Data Transmission, biomedicine, digital audio และ processing ส่วน IIR Filter ให้ผลตอบสนองทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear phase response)

2.8.2 FIR Filter จะ stable เนื่องจากไม่มีโครงสร้างเป็นแบบ Non recursively หรือ ถ้านำ Transfer Function $H(z)$ ของ FIR Filter ไป plot ลงใน Z-plane จะพบว่าบน Z-plane จะพบว่า FIR จะมี Pole อยู่ที่ Origin

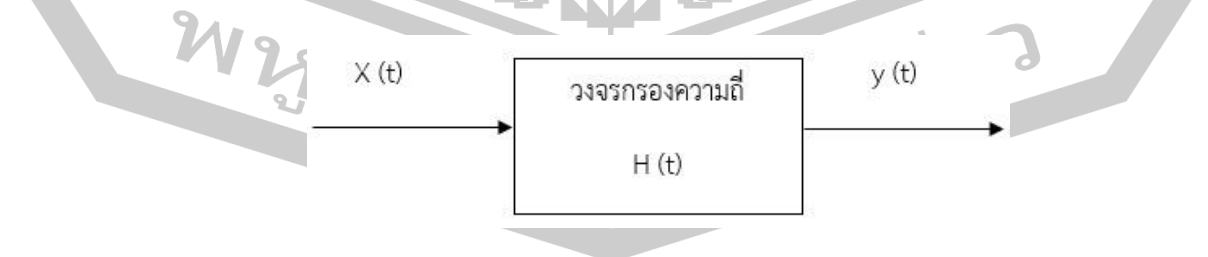
2.8.3 ในการ Implement IIR Filter มีโอกาสที่จะเกิด Round-off noise และ Coefficient quantization error มากกว่า FIR Filter

2.8.4 FIR Filter จะทำงานได้อย่างเที่ยงตรงไม่ว่าจะใช้ตัวประมวลผลแบบ Fix-point หรือ Floating-point ส่วน IIR Filter จะทำงานได้อย่างเที่ยงตรงถ้าใช้ตัวประมวลผลแบบ Floating-point แต่ถ้าใช้ตัวประมวลผลแบบ Fix-point IIR Filter ก็ยังสามารถทำงานได้แต่จะไม่เที่ยงตรงนัก

2.9 หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญวงจรหนึ่งในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในสาขาต่างๆ มากมายและเป็นวงจรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมต่างๆ เช่น ในระบบการกระจายเสียง (broadcasting systems) ,ระบบดาวเทียมสื่อสาร (satellite systems) เป็นต้น วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital signals) หรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signals) และวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (analog filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time signals) โดยวงจรกรองแบบแอนะล็อกนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ ได้อีก 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ประเภทพาสซีฟ (passive filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ขดลวดตัวนำและตัวต้านทานหรือสร้างมาจากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุและวงจรกรองความถี่อีกประเภทหนึ่งคือ วงจรกรองความถี่ประเภทแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ OTA วงจรสายพานกระแส ฯลฯ ต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เป็นต้น

รายละเอียดของวงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงเพื่อเป็นพื้นฐานเบื้องต้นในบทนี้นั้น จะเป็นหลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่และจะเป็นการกล่าวถึงรูปแบบโดยทั่วไปของสมการการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกที่มีรูปแบบของสมการการถ่ายโอนของวงจรเป็นแบบไบควอด (biquadratic function) เป็นหลัก ระบบของวงจรกรองความถี่สามารถเขียนแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.8 ระบบของวงจรกรองความถี่

เมื่อ $x(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาเข้า

$y(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาออก

และ $h(t)$ คือ สัญญาณตอบสนองต่อสัญญาณแบบอิมพัลส์ (impulse response)

ของระบบซึ่งถ้าให้วงจรกรองความถี่ภายใต้การพิจารณาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคอซอล (casual) เป็นแบบเชิงเส้น (linear) และเป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant) แล้ว $y(t)$ จะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(t-r)x(r)dr \quad (2.3)$$

หรือเมื่อทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.3) จะได้ผลการแปลงลาปลาซคือ

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (2.4)$$

โดย $Y(s)$, $X(s)$ และ $H(s)$ คือผลการแปลงลาปลาซของ $y(t)$, $x(t)$ และ $h(t)$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาบนแกนความถี่ $s = j\omega$ สมการที่ (2.4) สามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้ คือ

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)||X(j\omega)| \quad (2.5)$$

$$\text{และ } \angle Y(j\omega) = \angle H(j\omega) + \angle X(j\omega) \quad (2.6)$$

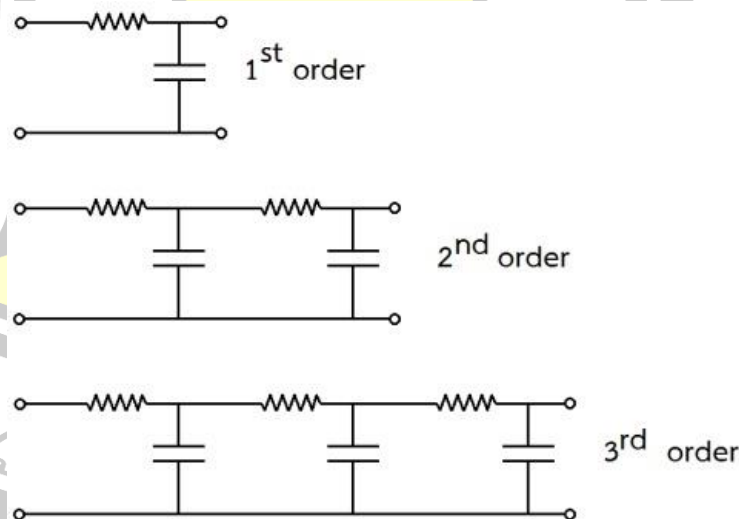
โดย $\angle Y(j\omega)$ คือค่าเฟสของ $Y(j\omega)$, $\angle H(j\omega)$ คือค่าเฟสของ $H(j\omega)$ และ $\angle X(j\omega)$ คือค่าเฟสของ $X(j\omega)$

หลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่นั้นก็คือ ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดก็เช่น ในการสัญญาณวิทยุซึ่งสัญญาณที่ส่งมาจากทางด้านสถานีส่งนั้นจะเป็นสัญญาณที่มาจากทุกๆสถานีที่ทำการกระจายเสียงรวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะทำการกระจายเสียง การปรับค่าความถี่เพื่อรับฟังรายการจากสถานีใดๆสถานีหนึ่งนั้นจะทำได้โดยการกรองเอาสัญญาณของสถานีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการฟังรวมทั้งสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเพียงสัญญาณของสถานีที่ต้องการจะรับฟังเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.28) จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณทางด้านขาออกนั้นเป็นผลคูณของค่าขนาดของสัญญาณขาเข้ากับค่าขนาดของฟังก์ชันของการตอบสนองในเชิงความถี่ (frequency response function) ของวงจรกรองความถี่ ถ้าหากค่าฟังก์ชันขนาด (magnitude function) ของ $H(j\omega)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง

w_{s1} และ w_{s2} ก็แสดงว่าสัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเท่ากับศูนย์ ไม่ว่าจะสัญญาณทางด้านขาเข้านั้นจะมีค่าเท่าไรอยู่ในช่วง (w_{s1} , w_{s2}) ซึ่งโดยทั่วไปช่วงความถี่ (w_{s1} , w_{s2}) จะเรียกว่าแถบหยุด (Stopband) ของวงจร $H(jw)$ นั้น ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าฟังก์ชันของขนาดของ $H(jw)$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง w_{p1} และ w_{p2} ก็จะทำให้สัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเป็นไปตามสมการที่ (2.29) ในช่วงความถี่ (w_{p1} , w_{p2}) ซึ่งช่วงความถี่นี้มีชื่อเรียกว่าแถบผ่าน (Passband) ของวงจร $H(jw)$ จากธรรมชาติการตอบสนองของฟังก์ชันขนาดของ $H(jw)$ ในช่วงของแถบความถี่ที่แตกต่างกันของวงจร ทำให้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นแบบย่อยๆ ได้อีก 4 แบบตามคุณลักษณะของแถบหยุดและแถบผ่านของวงจร ซึ่งเพื่อให้สะดวกในการอธิบายจึงขอสมมติให้วงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรกรองความถี่ในเชิงอุดมคติ นั่นคือ การตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าการสูญเสียทางขนาดเป็นศูนย์ช่วงแถบผ่านของวงจรและให้การสูญเสียในแถบหยุดของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ($|H(jw)|=0$)

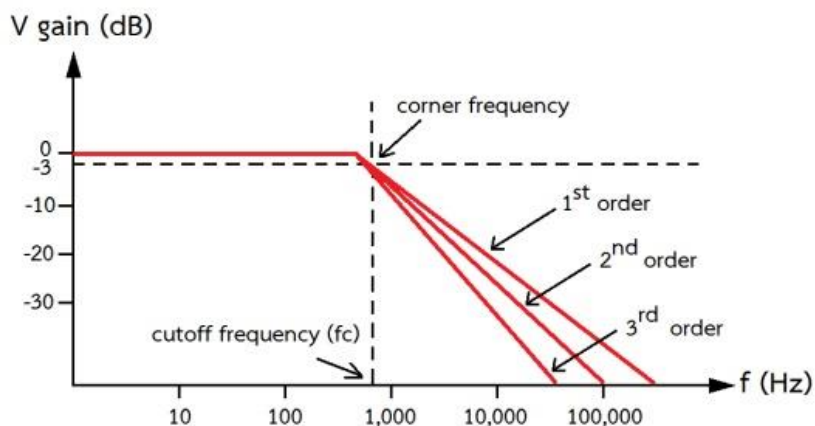
2.9.1 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter Circuit, LPF)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่สูงกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบที่ 2.9



ภาพประกอบที่ 2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากภาพประกอบที่ 2.9 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบที่ 2.10



ภาพประกอบที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การคำนวณหาความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter, LPF) สามารถทำได้โดยใช้สมการที่

$$W_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.7)$$

โดย W_c คือ ความถี่ตัดเชิงมุม มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที (rad/s)

f_c คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

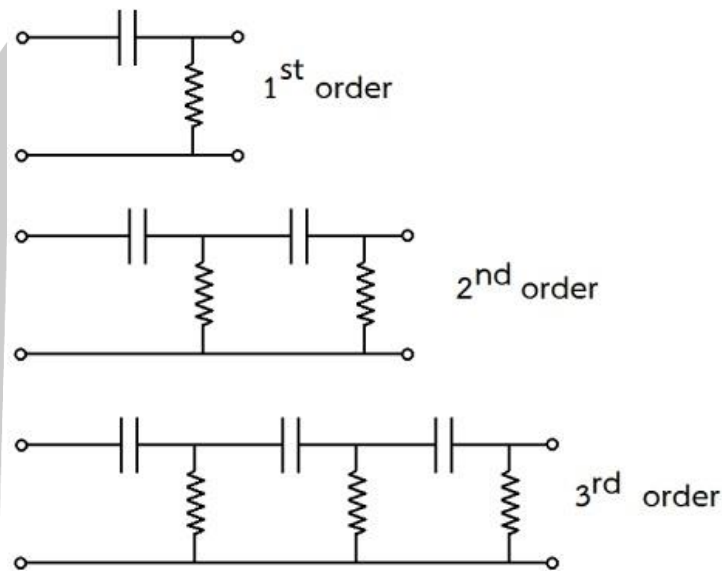
R คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึงความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) f_c ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟจะเป็นช่วงความถี่แถบหยุดของวงจร ในกรณีเช่นนี้ค่าแบนด์วิธ (Bandwidth) ของวงจรมีค่าเท่ากับ f_c เราจะพบว่า การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคติ

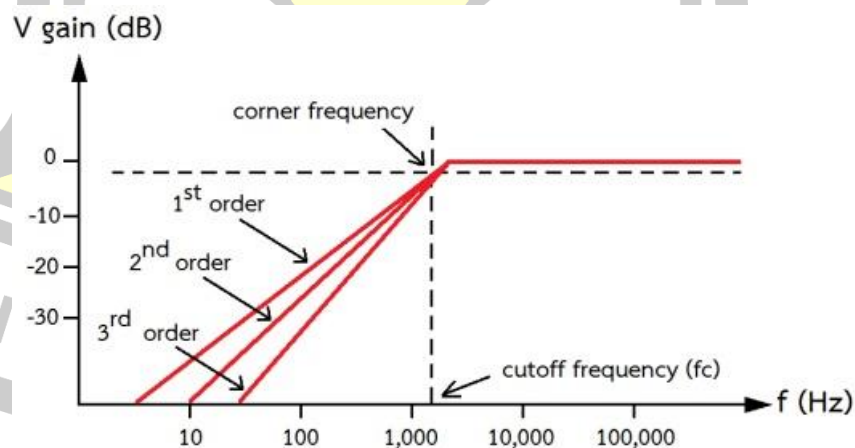
2.9.2 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (High-pass filter Circuit, HPF)

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่ต่ำกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบที่ 2.11



ภาพประกอบที่ 2.11 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

จากภาพประกอบ 2.11 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบที่ 2.12



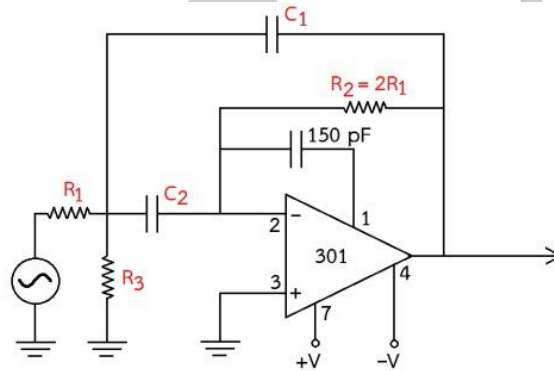
ภาพประกอบที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับลำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter, HPF) สามารถทำได้โดยใช้หลักการเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นั่นคือคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.7

วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 0 และความถี่คัทออฟ ω_c ในขณะที่วงจรจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟผ่านวงจรไปได้ ซึ่งการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคติ

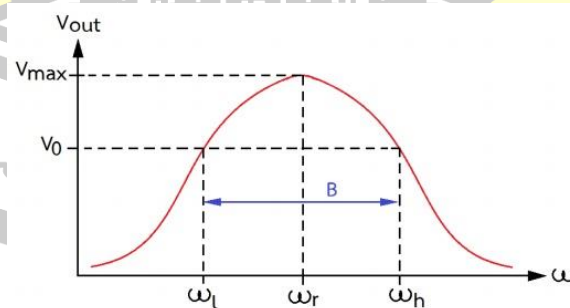
2.9.3 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter Circuit, BPF)

วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงสัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยความถี่ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงกำหนดจะถูกลดทอนจนหมดไป ซึ่งเสมือนกับการนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และ วงจรกรองความถี่สูงผ่านมาต่อร่วมกันดังภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากภาพประกอบที่ 2.13 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบที่ 2.14



ภาพประกอบที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากภาพประกอบ 2.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงความถี่เท่านั้น เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency, W_r) ส่วนตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าลดลง (V_0) มี 2 ความถี่ คือ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เรียกว่า higher cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์ W_h และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เรียกว่า lower cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์ W_l ซึ่งช่วงผลต่างระหว่าง W_h และ W_l เรียกว่า แบนวิธ (bandwidth, B) โดย $B = W_h - W_l$

นอกจากนั้นอัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนวิธ เรียกว่า ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor, Q) บางครั้งนิยมเรียกสั้นๆว่า Q factor ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ไม่มีหน่วย โดยยิ่งค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูง วงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมากยิ่งขึ้น ดังนี้

ความถี่ช่วงแคบ (narrow band) จะมีค่า $B < 0.01$ และ $Q > 10$

ความถี่ช่วงกว้าง (wide band) จะมีค่า $B > 0.01$ และ $Q < 10$

ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ของวงจรได้จากค่าแบนวิธของวงจรมานั้นๆ ดังสมการดังนี้

$$Q = \frac{W_r}{B} \quad (2.8)$$

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านของวงจรอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟของความถี่ คือ W_l ในขณะที่แถบหยุดของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ W_l และในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ W_h สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ

2.9.4 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band pass filter circuit)

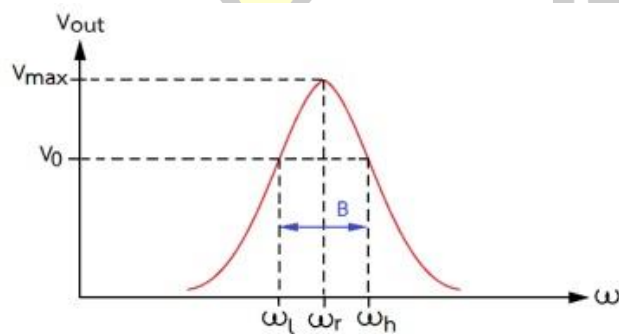
การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามภาพประกอบ 2.15 แต่จะต้องกำหนดค่าแบนวิธ (B) ที่ต้องการ รวมถึงค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) จากสมการที่ 2.8 จากนั้นคำนวณหาค่าอุปกรณ์อื่นๆ โดยเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ ให้มีค่าที่เหมาะสม และคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆในวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \quad (2.9)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} \quad (2.10)$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} \quad (2.11)$$

สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังภาพประกอบที่ 2.15

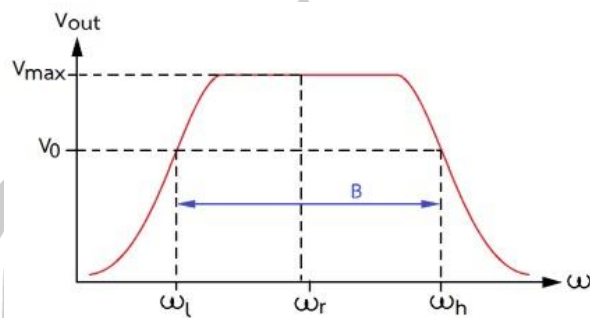


ภาพประกอบที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงแคบ

2.9.5 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide Band Pass Filter Circuit)

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide Band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามภาพประกอบที่ 2.15 เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงแคบ แต่จะเลือกให้ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) มีค่าน้อยกว่า 10 โดยการออกแบบนอกจากนั้น จะเหมือนกับวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบทุกประการ

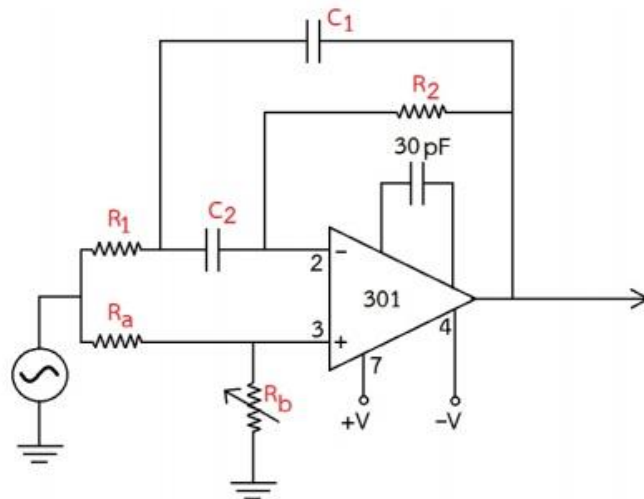
สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้างนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังภาพประกอบที่ 2.16



ภาพประกอบที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงกว้าง

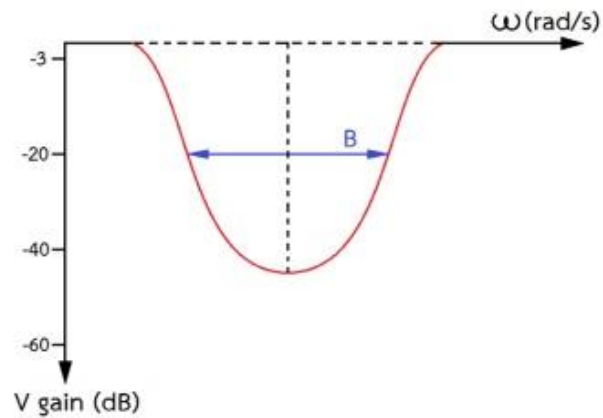
2.9.6 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF)

วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ เป็นวงจรที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการบางช่วงออกไป สามารถทำได้โดยการต่อวงจรดังภาพประกอบที่ 2.17



ภาพประกอบที่ 2.17 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

จากภาพประกอบที่ 2.17 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่างกับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 2.18



ภาพประกอบที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ในวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

ในขั้นตอนการออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่นั้น ทำคล้ายกับวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยเพื่อความสะดวกจะกำหนดให้ $C_1=C_2=C$ อยู่ช่วงระหว่าง 100 pF - 0.1 μ F โดยสามารถคำนวณหาความต้านทานต่างๆได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \quad (2.12)$$

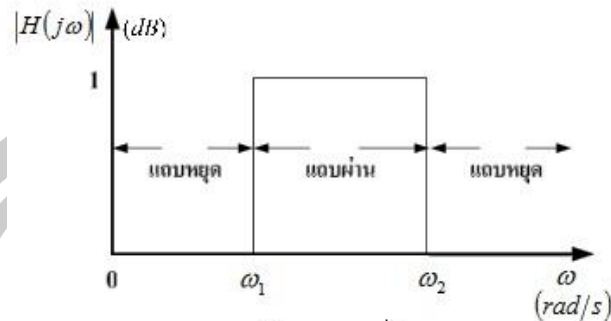
$$R_1 = \frac{R_2}{4Q^2} \quad (2.13)$$

$$R_a \approx 1k\Omega \quad (2.14)$$

$$R_b = 2Q^2R_a \quad (2.15)$$

2.9.7 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด (Band-stop filter)

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟสองความถี่คือ ω_1 และ $\omega_u (\omega_u > \omega_1)$ ในขณะที่แถบความถี่ผ่านของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ ω_1 และในช่วงของความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ ω_u สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบอุดมคติแสดงดังภาพประกอบที่ 2.19



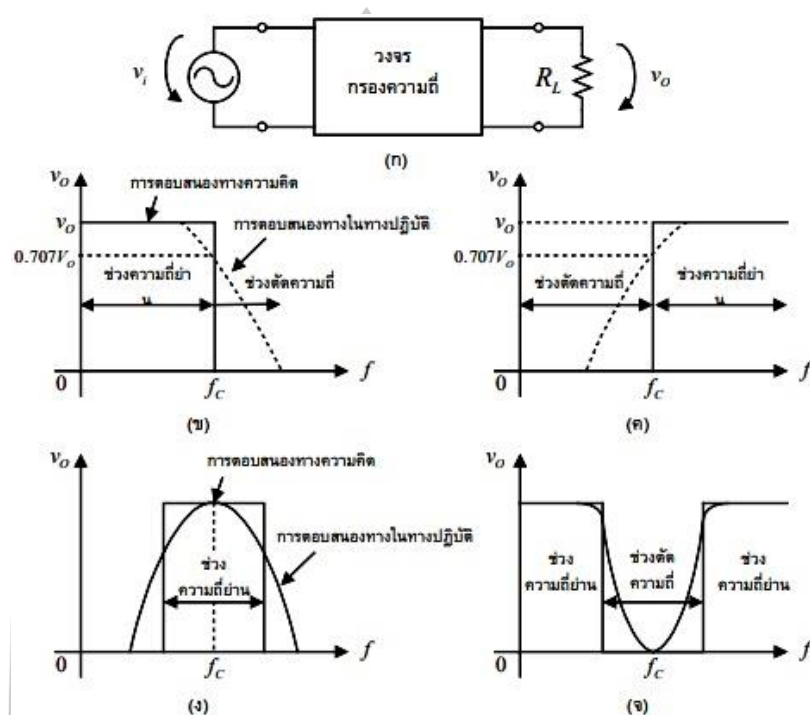
ภาพประกอบที่ 2.19 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในทางอุดมคติ

วงจรกรองความถี่ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ตามอุดมคตินั้นไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริงซึ่งในทางปฏิบัตินั้นคงใช้วงจรที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ประมาณคล้ายกับผลตอบสนองในอุดมคติมาปฏิบัติการต่างๆ เท่านั้น วงจรทางปฏิบัติเบื้องต้นแบบง่ายๆ คือ วงจรกรองความถี่ชนิดที่เรียกว่าวงจรกรองความถี่แบบไบควอดซึ่งคุณสมบัติของวงจรไบควอดนั้นจะมีดังต่อไปนี้

2.10 ความหมายของวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่นั้นถ้าพิจารณาแล้ว สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกันนั้น ก็คือวงจรกรองความถี่แบบแอนาลอก (analog filter) กับวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล (digital filter) ส่วนหน้าที่ในการทำงานของวงจรกรองความถี่นั้นก็สามารถที่จะทำการจำแนกตามความต้องการของผู้ใช้ได้ โดยจะแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (frequency response) ดังภาพประกอบที่ 1 ได้ 4 ชนิดด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter ; LPF) , วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass filter ; HPF) , วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter ; BPF) และวงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (band-stop filter ; BSF)

พูนุ ปณุกิตโต ชิว



ภาพประกอบที่ 2.20 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

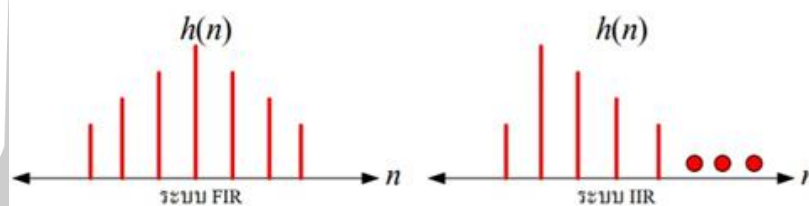
จากภาพประกอบที่ 2.20 (ข) ซึ่งเป็นผลการตอบสนองความถี่ของวงจร LPF จะพบว่าในทางความคิดหรืออุดมคติถ้าความถี่ของอินพุตมีค่ามากกว่า ความถี่ตัดที่ต้องการ (Cut off frequency, f_c) แล้ววงจรจะตัดสัญญาณความถี่นั้น ไม่ให้ออกไปที่เอาต์พุตเลย แต่ในทางปฏิบัติวงจรไม่สามารถตอบสนองความถี่เช่นนั้นได้ วงจรจะค่อยๆลดการตอบสนองความถี่ของช่วงที่ไม่ต้องการลง ส่วนผลการตอบสนองความถี่ของวงจร HPF ดังภาพประกอบที่ 2.20(ค) มีลักษณะตรงกันข้ามกับวงจร LPF ส่วนในภาพประกอบที่ 2.20(ง) เป็นผลการตอบสนองความถี่ของวงจร BPF คือ วงจรจะยอมให้ความถี่เฉพาะแถบหรือช่วงที่ต้องการเท่านั้นออกไปที่เอาต์พุต สำหรับผลของวงจร BEF ดังภาพประกอบที่ 2.20(จ) ก็จะมีลักษณะตรงข้ามกับวงจร BPF

จากผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในทางอุดมคติ ในภาพประกอบ (ข) เมื่อให้ V_0 คือขนาด ของแรงดันทางด้านเอาต์พุต วงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ที่สูงกว่า f_c ความถี่จะไม่ผ่านไปยังขั้วของเอาต์พุต วงจร สำหรับวงจรกรองความถี่สูงจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0Hz ถึงความถี่ f_c จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรสำหรับวงจร กรอง

แถบความถี่ผ่านจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ fc_1 ถึงความถี่ fc_2 ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรส่วนความถี่ ตั้งแต่ 0Hz ถึงความถี่ fc_1 กับความถี่ที่สูงกว่า fc_2 จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรและวงจรกรอง แถบความถี่หยุดผ่านจะไม่ยอมให้ช่วงความถี่ fc_1 ถึงความถี่ fc_2 ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่อื่นๆ วงจรยอมให้ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตได้ วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานทั่วไป มักนิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อก ซึ่ง ประกอบไปด้วย ตัวความต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และ อุปกรณ์กึ่งตัวนำ เช่น ออป แอมป์ ข้อดีคือออกแบบได้ง่าย ราคาถูก แต่มีข้อเสียที่วงจรขาดเสถียรภาพ (stability) ความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ในปัจจุบันได้หันมานิยมใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลกันมาก เพราะมีเสถียรภาพที่ดีกว่าความถี่ที่ต้องการมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแต่มีข้อเสีย คือ การออกแบบทำได้ยากกว่าและมีราคาสูงกว่า

2.10.1 การแบ่งประเภทของความถี่ดิจิทัล

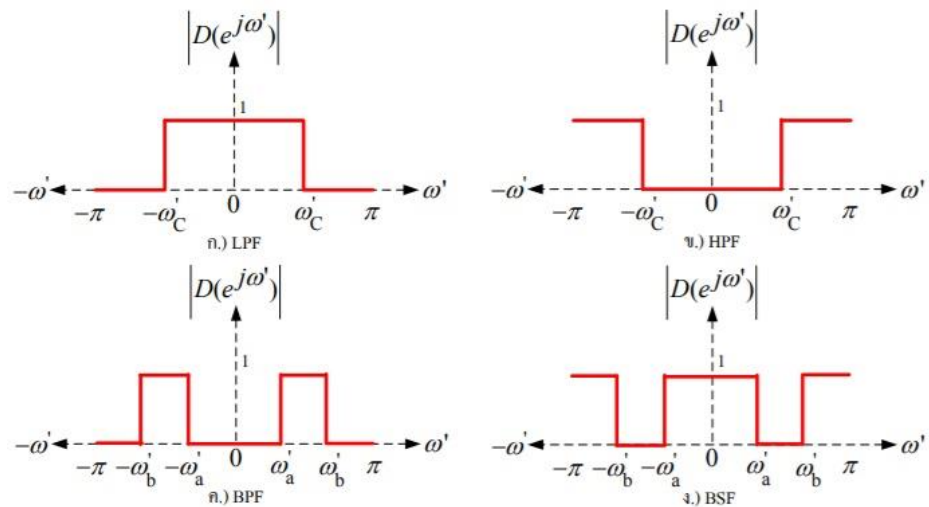
การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล จะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของ ระบบดัง แสดงในภาพประกอบ 2 คือผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) กับผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response : IIR) แต่ในที่นี้ขอยกตัวอย่าง การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หรือ FIR เพราะ มีลักษณะเด่นคือ มีผลตอบสนองทางเฟสแบบเชิงเส้น (linear phase) เหมาะสำหรับการพัฒนา เครื่องมือวัดทางการแพทย์และในงานที่เกี่ยวข้อง



ภาพประกอบที่ 2.21 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR

2.10.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง(window method)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้วิธีหน้าต่างนั้นซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานโดยมีสิ่งที่สำคัญคือการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต้นแบบจากผลตอบสนองของความถี่ ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติดังแสดงใน ภาพประกอบที่ 2.22



ภาพประกอบที่ 2.22 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

จากภาพประกอบ 2.22 จะสมมติให้ $d(n)$ แทนเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์และกำหนดให้ $D(e^{j\omega'})$ แทนผลตอบสนองเชิงความถี่สำหรับตัวกรองความถี่ในอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังที่ได้แสดงภาพประกอบที่ 2.22 (ก) เราจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติได้โดยใช้เทคนิคของการแปลงฟูริเยร์แบบเวลาไม่ต่อเนื่องชนิดผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDTFT) ตัวอย่างเช่นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านดังนี้

$$d(n) = IDTFT\{D\} \tag{2.16}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D(e^{j\omega'}) e^{j\omega' n} d\omega' = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (1) e^{j\omega' n} d\omega' \tag{2.17}$$

$$= \left[\frac{e^{j\omega' n}}{2\pi j n} \right]_{-\omega_c}^{\omega_c} = \frac{e^{j\omega_c n} - e^{-j\omega_c n}}{2\pi j n} \tag{2.18}$$

$$= \frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}; -\infty < n < \infty \tag{2.19}$$

ในสมการที่ 2.19 จะพบปัญหาที่ $n = 0$ เพราะผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ มีค่าเป็นเศษ ศูนย์ส่วน ด้วยศูนย์วิธีแก้ไขปัญหามาเราสามารถหาค่า $d(0)$ ได้โดยใช้ทฤษฎีของโลปีตลจะได้ว่า

$$d(0) = \frac{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\sin(w_c n))}{d(n)}}{\lim_{n \rightarrow 0} \frac{d(\pi n)}{dn}} = \frac{w_c}{\pi} \quad (2.20)$$

สำหรับวงจรรองความถี่แบบอื่นๆ เราสามารถหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ได้โดยการแปลง IDTFT เพื่อหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองนั้นๆ ได้ดังตาราง 2.1 เพื่อใช้ในการออกแบบต่อไป ตาราง 2.1 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ

ชนิดของตัวกรอง	$D(n), -\infty < n < \infty$	$D(n), n = 0$
วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	$\frac{\sin(w_c n)}{\pi n}$	$\frac{w_c}{\pi}$
วงจรรองความถี่สูงผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(w_c n)}{\pi n}$	$1 - \frac{w_c}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่ผ่าน	$\frac{\sin(w_b n) - \sin(w_a n)}{\pi n}$	$\frac{w_b}{\pi} - \frac{w_a}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่หยุดผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(w_b n) - \sin(w_a n)}{\pi n}$	$1 - \left(\frac{w_b}{\pi} + \frac{w_a}{\pi}\right)$

จากที่ได้แสดงในตารางข้างต้นเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรรองความถี่ แบบต่างๆ โดยวิธีการแปลง IDTFT ผู้ที่ต้องการออกแบบวงจรรองความถี่แบบดิจิทัลในที่นี่ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางคณิตศาสตร์มากนัก เพราะการออกแบบวงจรรองความถี่แบบต่างๆ เราจะใช้ผลตอบสนองอิมพัลส์ใน ตารางที่ 2.1 ได้โดยตรงที่ได้แสดงในสมการที่ 1 กับ 2 เป็นเพียงตัวอย่างการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านโดยวิธีการแปลงจาก IDTFT ที่ n มีค่า $-\infty < n < \infty$ กับที่ $n=0$ ตามลำดับ

ก่อนที่จะทำการออกแบบนี้จะต้องทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ตามลักษณะเฉพาะของวิธีหน้าต่าง ต่อการออกแบบวงจรรองความถี่ เช่น ความถี่ตัด, อัตราการลดทอน, ความปรี่วหรือริบเปิลของแถบผ่านและความกว้างของแถบเปลี่ยน โดยพิจารณาตามภาพประกอบ 2.20 ดังนี้

2.10.2.1 ความถี่ตัด (cutoff frequency ; f_c) หมายถึงจุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่านไปยังขั้วออกของวงจรรองความถี่สำหรับวงจรรองความถี่ของ FIR กำหนด

ค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 นิยามนี้แตกต่างกับแบบ IIR ที่ใช้นิยามเดียวกันกับวงจรกรองแบบแอนาล็อกคือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707

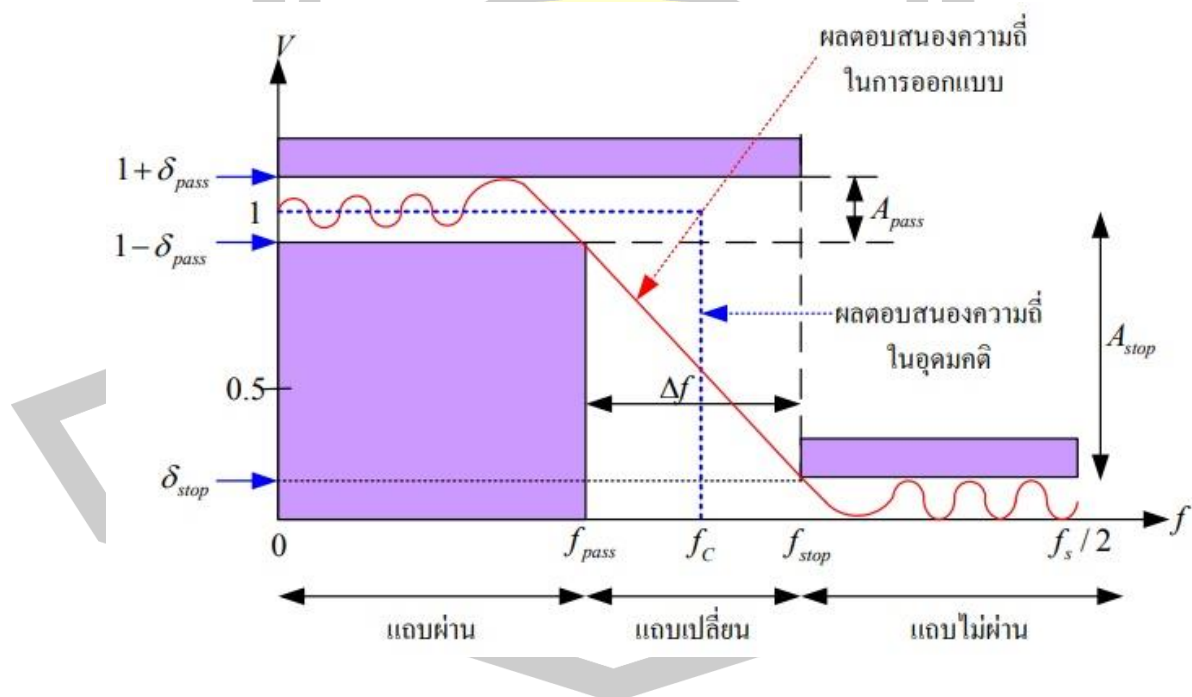
2.10.2.2 การลดทอนของแถบหยุด (stop-band attenuation ; A_{stop}) คือจำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลงวัดค่าเป็น dB โดยการลดทอนของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพริ้วของแถบหยุดแสดงดังสมการ 2.21

$$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop} \quad (2.21)$$

2.10.2.3 ความพริ้วหรือริบเปิลของแถบผ่าน (pass-band ripple ; δ_{pass}) หมายถึงค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่านแกว่งออกห่างจากค่า 1 ตามภาพประกอบที่ 2.23 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A_{pass} = 20 \log \left(\frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \right) \quad (2.22)$$

2.10.2.4 ความกว้างของแถบเปลี่ยน (transition band width ; Δf) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเทียบกับช่วงความถี่



ภาพประกอบที่ 2.23 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR

ตาราง 2.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ

หน้าต่าง	δ_{pass}	$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop}$	Δf	$W(n), n = 0, 1, \dots, N-1$ $\left(M = \frac{N-1}{2}\right)$
สี่เหลี่ยม (rectangular)	8.9%	21	$\frac{2}{N}$	1
ฮานนิง (Hanning)	0.63%	44	$\frac{4}{N}$	$0.5 - 0.5 \cos \frac{(2\pi n)}{N-1}$
แฮมมิง (Hamming)	0.22%	53	$\frac{4}{N}$	$0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{N-1}$
แบล็กแมน (Blackman)	0.02%	74	$\frac{6}{N}$	$0.42 - 0.5 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) - 0.8 \cos \left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$
ไคเซอร์ (Kaiser)	ปรับได้	ปรับได้	$\frac{A - 7.95}{14.36(N-1)}$	$\frac{I_0 \sqrt{\frac{\alpha^2 - (n - M)^2}{M^2}}}{I_0(\alpha)}$

2.11 กล้องเครื่องมือประมวลผลสัญญาณ

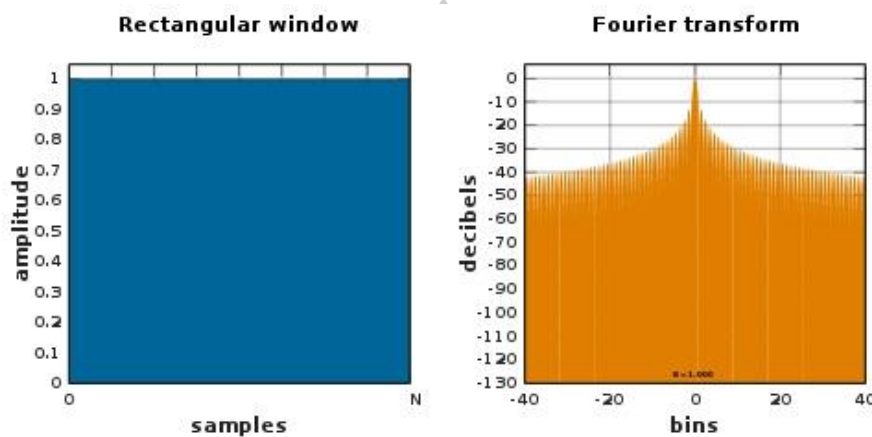
2.11.1 หน้าต่างสี่เหลี่ยม (rectangular)

หน้าต่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (บางครั้งรู้จักกันในชื่อ boxcar หรือหน้าต่าง Dirichlet) เป็นหน้าต่างที่ง่ายที่สุดเทียบเท่ากับการแทนที่ค่า N ทั้งหมดของลำดับข้อมูลโดยเลขศูนย์ทำให้ปรากฏเป็นรูปคลื่นในทันที:

$$w[n] = 1. \quad (2.23)$$

หน้าต่างอื่น ๆ ได้รับการออกแบบมาเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงฉับพลันเหล่านี้ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียของสเกลลอปและปรับปรุงช่วงไดนามิกตั้งที่อธิบายไว้ข้างต้น (analysis การวิเคราะห์สเปกตรัม)

หน้าต่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นหน้าต่าง B-spline เช่นเดียวกับหน้าต่าง Power-of-sine



ภาพประกอบที่ 2.24 Rectangular window

2.11.2 หน้าต่างฮานนิงและแฮมมิง (Hanning and Hamming)

ตามธรรมเนียม cosine-sum windows สำหรับกรณี $K=1$ มีรูปแบบ:

$$w[n] = \alpha_0 - (1 - \alpha_0) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), 0 \leq n \leq N, \quad (2.24)$$

ซึ่งง่ายและบ่อยครั้งที่สับสนกับ zero-phase version:

$$w_0(n) = w\left[n + \frac{N}{2}\right] \quad (2.25)$$

$$= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), -\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2} \quad (2.26)$$

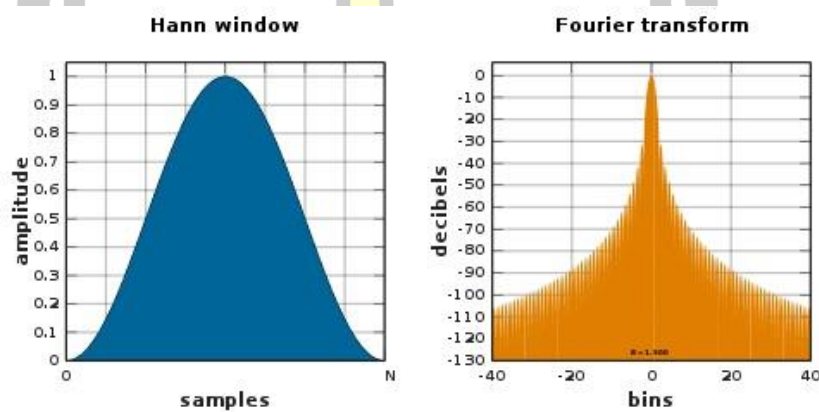
กำหนดค่า $\alpha_0 = 0.5$ สร้างหน้าต่าง Hanning:

$$w[n] = 0.5 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right] = \sin^2\left(\frac{\pi n}{N}\right), \quad (2.27)$$

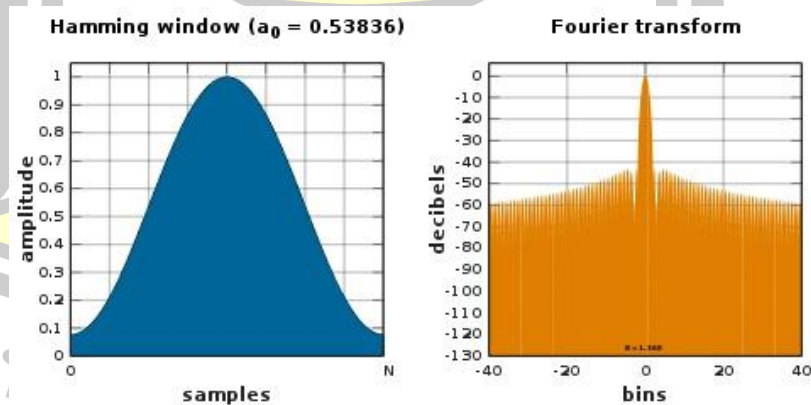
แฮนนิง (Hanning) สันนิษฐานว่าเป็นเพราะความคล้ายคลึงกันทางภาษาและสูตรที่หน้าต่างแฮมมิง มันเป็นที่รู้จักกันในชื่อ raised cosine เพราะ zero-phase version, $w_0(n)$ เป็นหนึ่งในการยกระดับ cosine function

ฟังก์ชันสมาชิกทั้งสอง cosine-sum และ power-of-sine ไม่เหมือนกับหน้าต่าง Hamming จุดสิ้นสุดของหน้าต่าง Hanning เพียงแค่ตะกั่วที่ศูนย์ side-lobes ด้านข้างที่เกิดจะหมุนออกที่

ประมาณ 18 เดซิเบลต่อคู่ การตั้งค่า α_0 ถึงประมาณ 0.54 หรือแม่นยำกว่า $25/46$ สร้างหน้าต่างแอมมิงซึ่งเสนอโดย Richard W. Hamming ตัวเลือกนั้นวางศูนย์ข้ามที่ความถี่ $5\pi/(N - 1)$ ซึ่งยกเลิก Sidelobe แบบแรกของหน้าต่าง Hanning ทำให้ความสูงประมาณหนึ่งในห้าของหน้าต่าง Hanning หน้าต่าง Hamming มักเรียกว่า Hamming blip เมื่อใช้สำหรับการปรับรูปร่างของสัญญาณ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของทศนิยมสองตำแหน่งลดระดับของ Sidelobes ลงอย่างมาก ไปจนถึงสภาพที่เกือบจะเท่ากับ Equiripple ในความหมายของ equiripple คือค่าที่ดีที่สุดสำหรับสัมประสิทธิ์คือ $\alpha_0=0.53836$ และ $\alpha_1=0.46164$



ภาพประกอบที่ 2.25 Hanning window



ภาพประกอบที่ 2.26 Hamming window $\alpha_0=0.53836$ และ $\alpha_1=0.46164$

2.11.3 หน้าต่างแบล็กแมน (Blackman)

หน้าต่างแบล็กแมน ถูกกำหนดเป็น :

$$w[n] = \alpha_0 - \alpha_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \alpha_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) \quad (2.28)$$

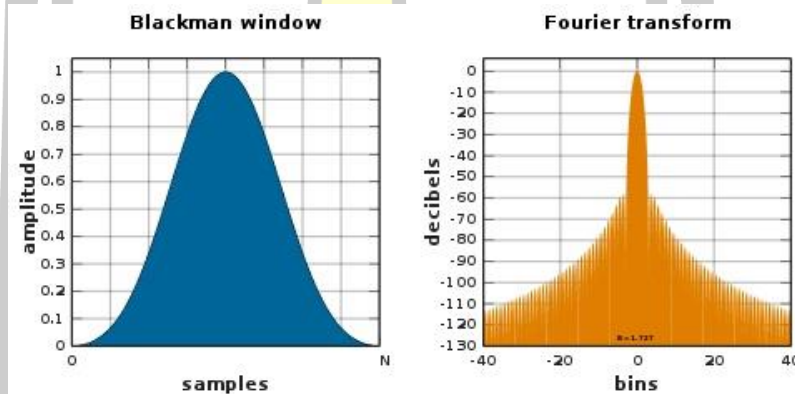
$$\alpha_0 = \frac{1-\alpha}{2}; \alpha_1 = \frac{1}{2}; \alpha_2 = \frac{\alpha}{2} \quad (2.29)$$

ตามแบบแผนทั่วไปเงื่อนไขหน้าต่างแบล็กแมนหมายถึง "ข้อเสนอที่ไม่ร้ายแรง" ของ $\alpha=0.16$,

$$\alpha_0=0.42, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.08 \text{ ซึ่งใกล้เคียงกับแบล็กแมนที่แน่นอน } \alpha_0 = \frac{7938}{18608} \approx 0.42659, \alpha_1$$

$$= \frac{9240}{18608} \approx 0.49656 \text{ และ } \alpha_2 = 1430/18608 \approx 0.76849 \text{ ค่าที่แน่นอนเหล่านี้วางศูนย์ไว้ที่}$$

Sidelobe ที่ 3 และ 4 แต่ส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องที่ขอบและการลดลง 6dB/oct ค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกตัดทอนนั้นไม่เป็นโมฆะเช่นกัน แต่มีการลดลง 18dB/oct



ภาพประกอบที่ 2.27 Blackman window $\alpha=0.16$

2.11.4 หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

Jim Kaiser ค้นพบการประมาณค่าแบบง่ายไปยังหน้าต่าง DPSS ตามฟังก์ชัน Bessel หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นหน้าต่าง Kaiser (หรือหน้าต่าง Kaiser-Bessel)

Definition:

$$w_k(n) \triangleq \begin{cases} \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\frac{n}{M/2})^2})}{I_0(\beta)}, & -\frac{M-1}{2} \leq n \leq \frac{M-1}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.30)$$

Window transform:

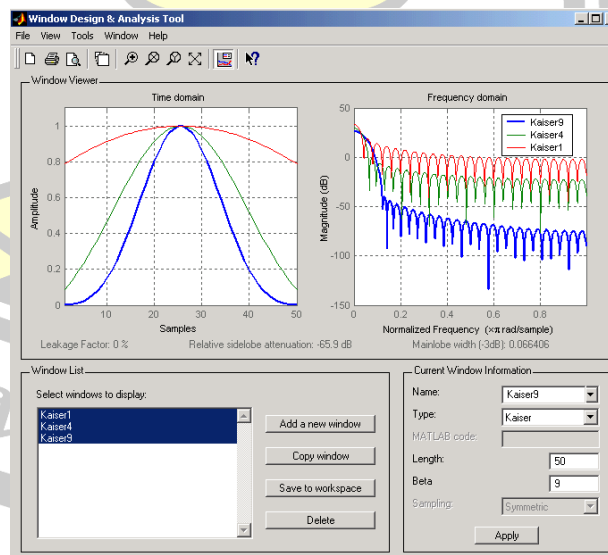
การ แปลง Fourier ของหน้าต่าง Kaiser (ในกรณีนี้ ถือว่าเป็นแบบต่อเนื่อง) โดย

$$W(w) = \frac{M}{I_0(\beta)} \frac{\sinh(\sqrt{\beta^2 - (\frac{Mw}{2})^2})}{\sqrt{\beta^2 - (\frac{Mw}{2})^2}} = \frac{M}{I_0(\beta)} \frac{\sin(\sqrt{(\frac{Mw}{2})^2 - \beta^2})}{\sqrt{(\frac{Mw}{2})^2 - \beta^2}} \quad (2.31)$$

I_0 เป็นฟังก์ชัน Bessel ที่ปรับเปลี่ยนแบบไม่มีค่าสั่งในประเภทแรก

$$I_0(x) \triangleq \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(\frac{x}{2})^k}{k!} \right]^2 \quad (2.32)$$

หน้าต่าง Kaiser เป็นการประมาณ หน้าต่าง prolate-spheroidal ซึ่งอัตราส่วนของพลังงาน mainlobe ต่อพลังงาน sidelobe จะถูกขยายให้ใหญ่สุด สำหรับหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาวเฉพาะพารามิเตอร์ ควบคุมความสูง sidelobe สำหรับที่ ได้รับ ความสูง sidelobe ได้รับการแก้ไขตามความยาวของหน้าต่าง ค่าสั่งไกเซอร์ (n,beta) คำนวณความยาว n หน้าต่างไกเซอร์พร้อมพารามิเตอร์ beta ตัวอย่างของหน้าต่าง Kaiser ที่มีพารามิเตอร์ความยาว 50 และ beta 1, 4 และ 9 แสดงอยู่ในตัวอย่าง wintool นี้ พล็อตโดเมนและความถี่ของหน้าต่างความยาว 50 Kaiser พร้อม beta ที่แตกต่างกันอยู่ในภาพประกอบนี้ หน้าต่างที่มีเบต้า 1 นั้นกว้างที่สุดในโดเมนเวลาตามด้วยเบต้า 4 และเบต้า 9 ว่าแคบที่สุด ตามที่คาดไว้ในโดเมนความถี่ mainlobe ของ beta 9 นั้นกว้างที่สุดตามด้วย beta 1 ที่แคบลงและในที่สุดก็เป็น beta 1 ที่มี mainlobe ที่แคบที่สุด



ภาพประกอบที่ 2.28 ตัวอย่างของหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์ of 1, 4 และ 9

ในการสร้างหน้าต่าง Kaiser เหล่านี้โดยใช้บรรทัดคำสั่ง MATLAB

```
n = 50;
```

```
w1 = kaiser(n,1);
```

```
w2 = kaiser(n,4);
```

```
w3 = kaiser(n,9);
```

```
[W1,f] = freqz(w1/sum(w1),1,512,2);
```

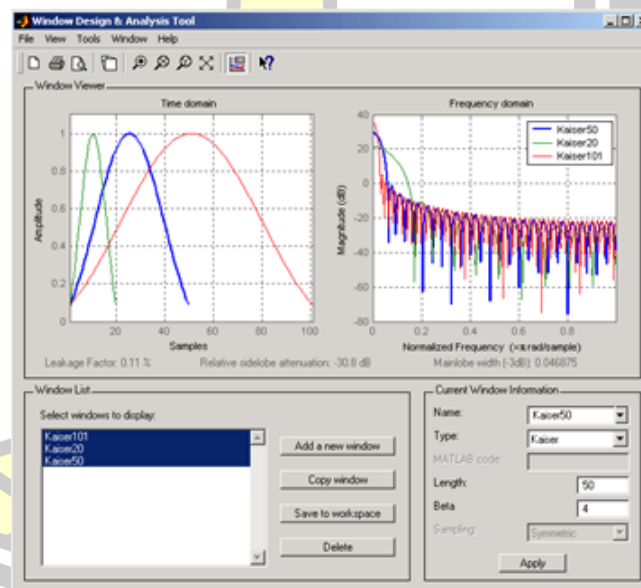
```
[W2,f] = freqz(w2/sum(w2),1,512,2);
```

```
[W3,f] = freqz(w3/sum(w3),1,512,2);
```

```
plot(f,20*log10(abs([W1 W2 W3]))); grid;
```

```
legend('beta = 1','beta = 4','beta = 9',3)
```

เช่น β เพิ่มความสูง sidelobe ลดลงและความกว้าง mainlobe เพิ่มขึ้น wintool นี้แสดงให้เห็นว่า ความสูง sidelobe ยังคงเหมือนเดิมสำหรับการแก้ไขอย่างไร β พารามิเตอร์เป็นความยาวที่แตกต่าง กันไป



ภาพประกอบที่ 2.29 ตัวอย่างของหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์ 101, 20 และ

ในการสร้างหน้าต่าง Kaiser เหล่านี้โดยใช้บรรทัดคำสั่ง MATLAB:

```
w1 = kaiser(50,4);
w2 = kaiser(20,4);
w3 = kaiser(101,4);
[W1,f] = freqz(w1/sum(w1),1,512,2);
[W2,f] = freqz(w2/sum(w2),1,512,2);
[W3,f] = freqz(w3/sum(w3),1,512,2);
plot(f,20*log10(abs([W1 W2 W3]))); grid;
legend('length = 50','length = 20','length = 101')
```

2.11.5 Kaiser Windows ในการออกแบบ FIR

มีสองสูตรการออกแบบที่สามารถช่วยคุณในการออกแบบตัวกรอง FIR เพื่อให้ตรงกับชุดของข้อกำหนดตัวกรองโดยใช้หน้าต่าง Kaiser เพื่อให้ได้ระดับความสูงของ α เดซิเบล พารามิเตอร์ β คือ

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha - 8.7), & \alpha > 50 \\ 0.5842(\alpha - 21)^{0.4} + 0.07886(\alpha - 21), & 50 \geq \alpha \geq 21 \\ 0, & \alpha < 21 \end{cases} \quad (2.33)$$

สำหรับความกว้างช่วงการเปลี่ยนภาพของ $\Delta\omega$ rad / s ใช้ความยาว

$$n = \frac{\alpha - 8}{2.285\Delta\omega} + 1 \quad (2.34)$$

พูนุ ปณ ทิโต ชีเว

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นอย่างละเอียดไปแล้ว ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรกรองความถี่ที่ได้มีนำเสนอทั้งงานวิจัยภายในประเทศและต่างประเทศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.12.1 งานวิจัยภายในประเทศ

เปาโล มงกุฎวิสุทธิ (2549) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบเชิงเลขไอโออาร์แบบนอตซ์ที่ปรับปรุงผลตอบสนองทางความถี่เพื่อแก้ไขความไม่สมมาตรกันโดยการเพิ่มโพล-ซีโร (Pole-Zero) เข้าไป ในวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยอีกหนึ่งคู่ด้วยวิธีการวางโพล (Pole Placement) ผลจากการวิจัยจำนวนออร์เตอร์ที่เพิ่มขึ้นสามารถปรับปรุงให้ผลตอบสนองทางความถี่ดีขึ้น ได้ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB กับการทำงานจริง บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ได้ผลใกล้เคียงกัน

วินัย ใจกล้า (2550) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดกระแสหลายหน้าที่ที่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้ด้วยระบบดิจิทัลโดยใช้วงจรสายพานกระแส ซึ่งวงจรสามารถให้รูปแบบการตอบสนองได้ครบทุกฟังก์ชันได้แก่ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน กรองแถบความถี่ผ่าน วงจรกรองผ่านทุกความถี่ผ่านและวงจรหยุดแถบความถี่ นอกเหนือจากนี้ ลักษณะเด่นของวงจรที่ออกแบบคือ สามารถควบคุมค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้อย่างอิสระจากค่าความถี่ตัด โดยใช้กระแสที่ไบอัสวงจรถ่ายสายพานกระแส ซึ่งวงจรที่ออกแบบเหมาะที่จะนำไปพัฒนาเป็นวงจรรวมเพื่อใช้กับอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายและระบบควบคุมอัตโนมัติที่ต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน

พยุง เดชอยู่ (2548) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบและสร้างตัวกรองดิจิทัลแบบ FIR ที่สามารถกำหนดชนิดของตัวกรอง จำนวน Order และ Cutoff frequency ได้ การกำหนดค่าคงที่ ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะกระทำการผ่านทาง keyboard เข้าสู่ไมโครคอนโทรเลอร์ 8031 เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์จะถูกส่งให้กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C26 เพื่อทำการประมวลต่อไป ตัวกรอง FIR แบบโปรแกรม ได้สร้างขึ้นนี้ สามารถกระทำได้ ทั้ง Low pass ,High pass ,Band pass และ Band stop จำนวน Order สูงสุด 251 ผลการสร้างพบว่าตัวกรองที่สร้างขึ้นมีความเที่ยงตรงสูงมาก

ภูษิต บุญโท (2560) ได้ศึกษาเรื่อง การประกอบสร้างวงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมระหว่างแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าที่ทับซ้อนอยู่บนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านและ

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบตามลำดับ โดยทำการจำลองวิเคราะห์วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมก่อนทำการประกอบสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งภายหลังการประกอบสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้าแรงสูงพบว่า วงจรสร้างแรงดันรูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่วัสดุทดสอบได้ อีกทั้งวงจรกรองความถี่สูงผ่านสามารถกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้องกันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถกรองแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าทดสอบได้เป็นอย่างดีและให้ผลเช่นเดียวกับผลการจำลองวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมย์ ชานตา มู (2560) ได้ศึกษาเรื่อง การพัฒนาชุดการเรียนการสอนที่เกี่ยวกับวงจรตัวกรองความถี่ย่านคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Filters) และสายอากาศ (Antennas) สำหรับหลักสูตรวิศวกรรมไมโครเวฟในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีแห่ง DAWEI ประเทศพม่า วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาชุดการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ โดยใช้ชุดทดลองที่มีต้นทุนต่ำและออกแบบขึ้นเอง การวิจัยประกอบด้วยสองส่วนหลักประกอบด้วย เอกสารใบทดลอง (Laboratory Documents) และชุดทดลองที่มีต้นทุนต่ำ (Low-cost Experimental set) เนื้อหาในเอกสารใบทดลองประกอบด้วย รายละเอียดทางทฤษฎีที่จำเป็น ขั้นตอนการทดลอง การใช้โปรแกรมจำลอง AWR และการใช้ชุดทดลองที่นำเสนอ และเอกสารประกอบการสอนในรูปแบบโปรแกรมนำเสนอในคอมพิวเตอร์ ชุดทดลองที่มีต้นทุนต่ำและออกแบบขึ้นเอง ประกอบด้วย ชุดทดสอบวงจรตัวกรองความถี่ย่านคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Filters) และสายอากาศ (Antennas) ควบคุมและแสดงผลผ่านทางส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้งานด้วยภาพ (Graphic User Interface: GUI) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ผลงานวิจัยถูกประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทางด้าน วิศวกรรมไมโครเวฟสามท่าน และทดสอบใช้งานจากกลุ่มนักเรียนทดสอบสามกลุ่มโดยกลุ่มละสามท่าน ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่ามีคะแนนความพึงพอใจทางด้านประสิทธิภาพและด้านการใช้งานเท่ากับ 4.27 คะแนน เต็ม 5 คะแนน ดังนั้นชุดการเรียนการสอนสำหรับหลักสูตรวิศวกรรมไมโครเวฟ ที่พัฒนาขึ้นจะช่วยเพิ่มการเรียนรู้ของนักศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมไมโครเวฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประภาภรณ์ เพชรสม (2548) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบเอฟไออาร์ (FIR Filter) ที่สามารถให้ผลตอบสนองความถี่ได้ 4 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ ความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass) ,ความถี่สูงผ่าน (High pass) ,ช่วงความถี่ผ่าน (Band pass) และช่วงความถี่หยุด (Band stop) โดยทำการปรับปรุงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์ การออกแบบเริ่มจากการออกแบบตัวกรอง

เอฟไออาร์ความถี่ต่ำผ่านทั้งสอง โดยใช้ตัวหน่วง (Delay Element) ร่วมกันแต่เพิ่มตัวคูณ (Multiplier Element) และตัวบวก (Adder Element) เพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถให้ผลตอบสนองความถี่สี่แบบในเวลาเดียวกัน และมีผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear Phase Response) และนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มจำนวนออเดอร์ (Order) ของตัวกรองอย่างไม่จำกัดทั้งนี้ขึ้นกับความสามารถของตัวประมวลผล

รวีวรร มะหะสิทธิ์ (2546) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบทศนิยมคงที่ 16 บิต ที่มีตัวกรองเอฟไออาร์ภายใน และอุปกรณ์บริวารอื่นๆ เช่น ตัวตั้งเวลา วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์มาตรฐาน I2S ดีเอ็มเอ และพอร์ตอินพุต-เอาต์พุต โครงสร้างของหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีโครงสร้างแบบไปป์ไลน์ 5 ขั้นตอน และมีลักษณะของชุดคำสั่งแบบรีซิสต์ ตัวกรองเอฟไออาร์ที่ออกแบบสามารถทำงานได้สองลักษณะ โดยสามารถทำงานขนานอย่างอิสระจากการทำงานของหน่วยประมวลผล หรือทำงานเป็นหน่วยคูณและสะสมที่เรียกใช้โดยตรงได้จากหน่วยประมวลผลกลาง เมื่อหน่วยประมวลผล กลางทำงานร่วมกับตัวกรองจะสามารถคำนวณตัวกรองเอฟไออาร์แบบปรับตัวแบบกำลังสองน้อยที่สุดได้ภายใน $1.5N+26$ วงรอบคำสั่ง เมื่อ N เป็นความยาวของตัวกรอง หน่วยประมวลผลที่ออกแบบถูกนำมาจำลองการทำงานและสร้างตัวต้นแบบบนเอฟพีจีเอ แล้วจึงนำมาสร้างลายวงจรรวมบนเทคโนโลยีซีมอส 0.35 ไมครอน ผลการทดสอบคุณสมบัติของลายวงจรรวมก่อนนำไปเจือสาร ลายวงจรรวมใช้พื้นที่ประมาณ 5.23 ตารางมิลลิเมตร สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุด 120 MHz และกินกำลังไฟประมาณ 5.7 mW/MHz ที่แรงดันไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์

2.12.2 งานวิจัยนอกประเทศ

Miao Zhang (2019) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบตัวกรองดิจิทัลโดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนการสอนที่ปรับปรุงแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีการเสนอการปรับปรุงที่สำคัญสองประการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม TLBO มาตรฐาน การปรับปรุงครั้งแรกคือการใช้การเรียนรู้แบบไล่ระดับเพื่อแทนที่เฟสผู้เรียน TLBO เพื่อลดข้อผิดพลาดการประมาณและเวลา CPU โดยไม่ต้องเสียสละความแม่นยำในการออกแบบสำหรับการออกแบบตัวกรองดิจิทัล FIR เชิงเส้นเฟส การปรับปรุงครั้งที่สองคือการรวมระยะทางแมนฮัตตันเพื่อลดความซับซ้อนของขั้นตอนวิธีอัลกอริทึม TLBO (MOTLBO) แบบหลายจุดที่ไม่ได้ถูกรอรับสำหรับการออกแบบตัวกรองดิจิทัล FIR ทั่วไป ผลการออกแบบที่ได้รับการสนับสนุนจากการปรับปรุงทั้งสองได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและประสิทธิผล

Liang Chen (2008) ได้ศึกษาเรื่อง The design and implementation of fir digital filter based on FPGA หลักการได้เสนอวิธีการในการออกแบบและติดตั้งตัวกรอง FIR สำหรับการประมวลผลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ พื้นฐานของตัวกรอง FIR วิธีการออกแบบที่เหมาะสมของตัวกรองดิจิทัล FIR สำหรับสัญญาณไฟฟ้ากำลังถูกค้นหา บนพื้นฐานของการแสดงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ระบบตัวกรองนี้จะถูกนำไปใช้โดยใช้การคำนวณแบบกระจาย ประการที่สองระบบของตัวกรองดิจิทัล FIR ได้รับการออกแบบโดยใช้วิธีการออกแบบลำดับชั้นและโมดูลโครงสร้างการรวมอนุกรมและขนานและ VHDL (วงจรรวมฮาร์ดแวร์วงจรรวมความเร็วสูงมากคำอธิบายภาษา) และวิธีการผสมวงจร ประการที่สามการจำลองจะดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ผลการทดลองตรวจสอบความถูกต้องของระบบ ในที่สุดการรวบรวมข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าสองกลุ่มจากท่าทางที่แตกต่างกันเป็นอินพุตระบบ จะดำเนินการฟังก์ชันการประมวลผล ผ่านการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของระบบตัวกรองผลการใช้งาน FPGA แสดงให้เห็นว่าตัวกรองดิจิทัล FIR บรรลุเป้าหมาย

Xu Dexiang (1994) ได้ศึกษาเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวกรองดิจิทัล FIR โดยใช้ อัลกอริทึมทางพันธุกรรมแบบขนานและการใช้งานจริง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการออกแบบตัวกรองดิจิทัลแบบจำกัดความยาวแบบไฟไนต์อิมพัลส์ตอบสนอง (FIR) โดยใช้อัลกอริทึมแบบขนานพารามิเตอร์ทางพันธุกรรมจริง (RPPGA) อัลกอริทึมนี้ได้มาจากอัลกอริทึมพันธุกรรมขั้นพื้นฐานซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากหลักการพันธุศาสตร์ธรรมชาติ ทั้งผลการทดลองและการศึกษาเชิงทฤษฎีในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า RPPGA เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ความยาวค่าที่เหมาะสมหรือใกล้เคียงที่สุดของฟิลเตอร์ดิจิทัล FIR ประสิทธิภาพของ RPPGA ถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบข้อกำหนดของตัวกรองที่ออกแบบโดยวิธีอื่นกับตัวกรองที่ออกแบบโดย RPPGA โครงสร้างแบบขนานและเชิงพื้นที่ของอัลกอริทึมส่งผลให้การปรับให้เหมาะสมเร็วขึ้นและแข็งแกร่งยิ่งขึ้นกว่าอัลกอริทึมพื้นฐานทางพันธุกรรม ตัวกรองที่ออกแบบโดย RPPGA ถูกนำมาใช้ในฮาร์ดแวร์เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนความถี่สูงในระบบเก็บข้อมูลเพื่อรวบรวมสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน การศึกษาเหล่านี้ก็นำไปสู่การใช้งานมากขึ้นของอัลกอริทึมทางพันธุกรรมแบบขนานพารามิเตอร์จริงในวิศวกรรมไฟฟ้า

Michael Zacharia Komodromos (1993) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบตัวกรอง FIR ที่เหมาะสมที่สุด การออกแบบตัวกรองดิจิทัล Finite Impulse Response (FIR) ที่พิจารณาทั้งข้อกำหนดเฟสและขนาดกำลังถูกตรวจสอบ วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนที่นำเสนอการดำเนินงานของอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบขั้นต่ำฟิลเตอร์ ในส่วนที่สองตรวจสอบการออกแบบตัว

กรอง FIR ในโดเมนที่ซับซ้อนและพัฒนาวิธีการออกแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสำหรับตัวกรอง FIR ดิจิตอลที่มีข้อกำหนดขนาดและเฟสโดยพลการส่วนที่พิจารณาการออกแบบของตัวกรองขั้นต่ำ วิธีการที่นำเสนอใช้การแยกตัวประกอบโดยตรงของฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวกรอง Parks-McClellan linear-phase filter สองเท่าของความยาวของตัวกรองเฟสต่ำสุดที่ต้องการ ตัวกรองขั้นต่ำได้รับมาด้วยการตัดออกครึ่งหนึ่งของตัวกรองเชิงเส้นเฟสตัวช่วย เลขศูนย์ของพหุคูณตัวกรองต้นแบบโดยใช้วิธีการของ Laguerre จะนำเสนอการดำเนินการ วิธีการออกแบบและอธิบายด้านการปฏิบัติและปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวกรองขั้นต่ำ

Wang Xin Zhi (2006) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบ FIR Low pass ออกแบบและวิเคราะห์ตัวกรองดิจิทัลเช่นวิธีการวิเคราะห์ลักษณะของตัวกรองวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ที่ระบุของตัวกรองวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ของตัวกรอง ตัวคูณเป็นเซลล์ปกติในตัวกรองดิจิทัล วิทยานิพนธ์นี้ได้แนะนำทฤษฎีของตัวคูณพหุพจน์ ทำโค้ด VHDL ของตัวกรอง FIR เสร็จแล้วผลการจำลองโดยใช้ MaxplusII แสดงให้เห็นว่ารหัส VHDL ถูกต้อง รหัส VerilogHDL ก็ทำเช่นกัน รหัสถูกจำลอง, สังเคราะห์และวิเคราะห์โดยใช้ QuartusII วิทยานิพนธ์นี้ยังกล่าวถึงวิธีการปรับปรุงความเร็วและวิธีการลดทรัพยากรฮาร์ดแวร์ของตัวกรอง FIR สำหรับตัวกรองปกติวิทยานิพนธ์นี้จัดทำซอฟต์แวร์ที่สามารถเขียนโค้ด VerilogHDL ได้โดยอัตโนมัติ ซอฟต์แวร์นี้มีประโยชน์มากและสามารถทำให้ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองง่ายขึ้น เพื่อให้ได้ตัวกรองต้นทุ่นที่ต่ำลงจะมีการแนะนำรหัส SD ของตัวกรอง FIR ที่มีโครงสร้างย้อนกลับ

Thomas R. Gardos (1993) ได้ศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรอง FIR แบบหลายส่วน วัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชุดฟิลเตอร์ FIR แบบหลายมิติและแบนด์แบบไม่สม่ำเสมอที่เกือบจะสร้างใหม่ได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับความรู้ของผู้เขียนนี้เป็นความพยายามครั้งแรกในการนำเสนอวิธีการออกแบบสำหรับตัวกรองธนาคารในวงกว้าง นอกเหนือจากวัตถุประสงค์หลักจะแสดงให้เห็นว่าการออกแบบธนาคารตัวกรองแบบหนึ่งมิติในโดเมนเวลาสามารถปรับปรุงให้แตกต่างกันได้ สูตรวัตถุประสงค์และข้อ จำกัด ในที่สุดเทคนิคการวิเคราะห์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นกรอบความสะดวกในการรวมวิธีการวิเคราะห์ตัวกรองธนาคารที่เป็นที่นิยม

Xiaojuan Hu (2005) ได้ศึกษาเรื่อง การออกแบบตัวกรองสำหรับการใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพ อัลกอริทึมความแม่นยำตัวแปรตามการวิเคราะห์ความไวคือเสนอให้ลดความยาวของค่าสัมประสิทธิ์และ / หรือจำนวนที่ไม่ใช่ศูนย์บิตของค่าสัมประสิทธิ์เพื่อลดความซับซ้อนที่จำเป็นในการ

ใช้งานต่อ ประหยัดพื้นที่เป็นไปได้อีกหากอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความเกี่ยวข้องกับที่ดีที่สุดโครงสร้างและขั้นตอนวิธีการปรับขนาดที่ได้รับ ยังเสนอโครงสร้างเพื่อสังเคราะห์ FIR ตัวกรองโดยใช้โครงสร้างอีควอไลเซอร์ prefilter ที่ปรับปรุงแล้วพร้อมแบนด์วิดท์โดยพลการและโครงสร้างตัวกรองที่เสนอลดพื้นที่ที่ต้องการ การออกแบบที่ได้รับการปรับปรุงมีเป้าหมายที่ปรับปรุง prefilters โดยใช้ตัวกรอง FIR แบบสอดแทรกและการปิดบังความถี่และมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงวงดนตรีที่คมชัดเช่นเดียวกับการเพิ่ม Stopband การรบกวน เราใช้อีควอไลเซอร์ที่ออกแบบมาเพื่อชดเชยประสิทธิภาพการทำงานของ prefilter ในวิทยานิพนธ์นี้เราเสนอขั้นตอนที่เป็นระบบสำหรับการออกแบบตัวกรอง FIR ใช้งาน วิธีการของเราให้การออกแบบที่ดีโดยมีค่าความไวต่ำและคำสั่งขนาดเล็กในขณะที่ข้อกำหนดการออกแบบที่น่าพอใจ ฮาร์ดแวร์ที่เกิดขึ้นการใช้งานเหมาะสมสำหรับใช้ในฮาร์ดแวร์ที่กำหนดเองเช่น VLSI และ Field อะเรย์เกตที่ตั้งโปรแกรมได้ (FPGAs)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยซึ่งหลังจากที่ได้ศึกษาจากเนื้อหาในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย และบทที่ 2 เป็นทฤษฎีและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาออกแบบ High pass FIR Filters โดยหน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์ตัวแปร Beta ในบทนี้จะนำเสนอเนื้อหาในส่วนของงานการวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือ และโปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย
2. ขั้นตอนการออกแบบ
3. วิธีการทดลอง
4. การเก็บรวบรวมข้อมูล
5. วิเคราะห์ข้อมูล
6. แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย

3.1 เครื่องมือ และโปรแกรมในการวิจัย

3.1.1 โปรแกรม MATLAB

เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่มาพร้อมด้วยสภาพแวดล้อมการทำงานเชิงโต้ตอบ ซึ่งสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วมากกว่าภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น ภาษา C (ซี) , ภาษาC++ (ซีplusplus)หรือภาษาFortran (โฟแทน) Matlab (แมตแล็บ) เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข Numerical Computing (นัมริคอล คอมพิวเตอร์) แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอปพลิเคชัน ทำให้เราสามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง และแอปพลิเคชันได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในตัว Matlab ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Toolbox (ทูลบ็อกซ์) กลุ่มฟังก์ชันสำเร็จรูปในแต่ละสาขาวิชา และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี พร้อมกับคำตอบที่รวดเร็ว เราสามารถนำ Matlab (แมตแล็บ) ไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขา ทั้ง การประมวลผลสัญญาณ Signal Processing (ซิกแนล โพรเซสซิ่ง) การสื่อสาร Communication (คอมมูนิเคชัน) การประมวลผลภาพและวิดีโอ Image and Video Processing (อิมเมจ แอน วิดีโอ โพรเซสซิ่ง) ระบบควบคุม Control System (คอนโทรล ซิสเต็มส์)

การวัดและควบคุม Instruments and Control (อินสแต๊กเมนต์ แอน คอนโทรล) การคำนวณทาง เศรษฐศาสตร์ Economic (เอ็กโคโนมิคส์) การคำนวณทางชีววิทยา Biology (ไบโอลลี) และอื่น ๆ

การทำงาน แมตแล็บสามารถทำงานได้ทั้งในลักษณะของการติดต่อโดยตรง คือการเขียน คำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้แมตแล็บประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถที่จะรวบรวม ชุดคำสั่งเรานั้น เป็นโปรแกรมก็ได้ ข้อสำคัญอย่างหนึ่งของแมตแล็บก็คือข้อมูลทุกตัวจะถูกเก็บใน ลักษณะของแถว ลำดับ คือ ในแต่ละตัวแปรจะได้รับการแบ่งเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ ขึ้น ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็นแถวลำดับ ในแมตแล็บเราไม่จำเป็นที่จะต้องจองมิติเหมือนกับการเขียนโปรแกรมในภาษาอื่นต่ำทั่วไป ซึ่งทำให้ เราสามารถที่จะแก้ปัญหาของตัวแปรที่อยู่ในลักษณะ ของเมทริกซ์และเวกเตอร์ได้โดยง่าย ซึ่งทำให้เรา ลดเวลาการทำงานลงได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการเขียน โปรแกรมโดยภาษาซีหรือภาษาฟอร์แทรน ความสามารถหลักของ MATLAB ที่เหมาะสมกับการทำงานทางด้านวิศวกรรม

1. MATLAB เป็นโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพซึ่งมีประสิทธิภาพสูง
2. MATLAB จะควบคุมการทำงานด้วยชุดคำสั่งและยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรมได้อีก ด้วย
3. MATLAB มี function (ฟังก์ชัน) ที่เหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมพื้นฐานมากมาย นอกจากนั้นผู้ใช้ ยังสามารถเขียน function ขึ้นมาใหม่โดยสามารถใช้ประโยชน์จาก function ที่มีอยู่แล้วเพื่อให้ เหมาะสมกับงานของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม
4. ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน MATLAB จะใกล้เคียงการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ที่เราคุ้นเคย จึงง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาอื่นสูงเช่น C, FORTRAN หรืออื่น ๆ
5. MATLAB มีความสามารถในการเขียนกราฟและรูปภาพทั้ง 2 มิติและ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. MATLAB สามารถทำ Dynamic Link (ไดนามิกส์ ลิงก์) กับโปรแกรมอื่น ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็น Word (เวิร์ด), Excel (เอ็กเซล) หรืออื่น ๆ ที่รวมทำงานอยู่บน windows (วินโดว)
7. MATLAB มี toolbox (ทุบ็อกส์) หรือชุด function พิเศษสำหรับผู้ที่ใช้ที่ต้องการใช้งานเฉพาะทาง หรืองานด้านวิศวกรรมขั้นสูงอื่น ๆ

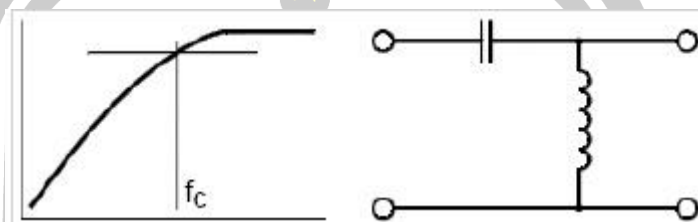
3.1.2 ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)

หน้าต่าง Kaiser เป็นการประมาณ หน้าต่าง prolate-spheroidal ซึ่งอัตราส่วนของพลังงาน mainlobe ต่อพลังงาน sidelobe จะถูกขยายให้ใหญ่ที่สุด สำหรับหน้าต่าง Kaiser ที่มีความยาวเฉพาะ พารามิเตอร์ β ควบคุมความสูง sidelobe สำหรับที่ได้รับ β ความสูง sidelobe ได้รับการแก้ไขตาม ความยาวของหน้าต่าง คำสั่งไคเซอร์ (n,beta) คำนวณความยาว n หน้าต่างไคเซอร์พร้อม พารามิเตอร์ beta ตัวอย่างของหน้าต่าง Kaiser ที่มีพารามิเตอร์ความยาว 50 และ beta 1, 4 และ 9 แสดงอยู่ในตัวอย่าง wintool นี้ พล็อตโดเมนและความถี่ของหน้าต่างความยาว 50 Kaiser พร้อม beta ที่แตกต่างกันอยู่ในภาพประกอบนี้ หน้าต่างที่มีเบต้า 1 นั้นกว้างที่สุดในโดเมนเวลาตามด้วย

เบต้า 4 และเบต้า 9 ว่าแคบที่สุด ตามที่คาดไว้ในโดเมนความถี่ mainlobe ของ beta 9 นั้นกว้างที่สุดตามด้วย beta 9 ที่แคบลงและในที่สุดก็เป็น beta 1 ที่มี mainlobe ที่แคบที่สุด

3.1.3 ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High pass filter)

high pass filter (ความถี่สูงกว่าผ่านได้) บางครั้งอาจจะเรียกว่าวงจร Low-cut filter สำหรับความถี่วิทยุ และ bass-cut filter สำหรับวงจรรายเสียง



ภาพประกอบ 3.1 วงจรกรองความถี่แบบสูงผ่าน

วงจรมีความถี่สูงที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะโดนจับลง กราวด์ จากรูปจะเห็นว่า C ต่ออนุกรมกับวงจร ส่วน L ต่อขนานกับวงจร เมื่อป้อนความถี่ต่ำกว่าเข้ามา C จะมีค่า X_C สูง ทำให้สัญญาณผ่านไปได้น้อย ส่วน L จะมีค่า X_L น้อย ทำให้สัญญาณที่ผ่านมาจาก C ลงกราวด์ได้หมด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น C จะมีค่า X_C ลดลง สัญญาณจะผ่านได้มากขึ้น ส่วน L จะมีค่า X_L มากขึ้น สัญญาณก็จะลงกราวด์น้อยลง สัญญาณที่ออกไปยัง Output ก็มากขึ้น จนถึงระดับความแรงของสัญญาณประมาณ 70.7 % ของความแรงสูงสุด ระดับนี้เองที่เราเรียกว่า ช่วงความถี่ Cut off เมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่ นี้ C จะยอมให้สัญญาณผ่านได้สะดวกและค่า X_L จะต้านสัญญาณไม่ให้ลงกราวด์ ความถี่จึงผ่านไปที่จุด Output ได้ทั้งหมด

3.2 ขั้นตอนการออกแบบ

สำหรับการออกแบบควมคำนึงถึงคุณสมบัติของความสมมาตร ซึ่งมี 4 ชนิดด้วยกันคือ

3.2.1 สมมาตรปกติ N เป็นเลขคี่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่ในทุกรูปแบบ

3.2.2 สมมาตรปกติ N เป็นเลขคู่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่ต่ำ (LPF) กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)

3.2.3 สมมาตรตรงข้าม N เป็นเลขคี่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)

3.2.4 สมมาตรตรงข้าม N เป็นเลขคู่ ดังนั้นจะใช้ได้กับวงจรกรองความถี่สูง (HPF) กับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)

ดังนั้น N ในที่นี้เรากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 38 และ 48 หรือใช้คุณสมบัติของสมมาตรชนิดที่ 4 ถ้ากำหนดให้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ จะทำให้ความกว้างของแถบเปลี่ยนมีความกว้างมากขึ้น

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบ โดยวิธีการศึกษา จะศึกษาข้อมูลจากบทความ วิทยานิพนธ์ งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานออกแบบตัวกรองความถี่ชนิดเอพไออาร์ แล้วนำมาประยุกต์และออกแบบ โดยทำตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 กำหนดค่า

Beta (β)	0,1,2,3,4
Filter order	38 or 48
Cutoff frequency	20 Hz
Sampling frequency	100 Hz
Transition frequency	20 Hz

3.2.2 นำค่า Beta (β) และค่า Filter order (N) ที่กำหนดไว้มาทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)

```

Editor - C:\Users\Mechok\Desktop\ป.โท\Thesis\KScore.m*
KScore.m* x +
1 %w=kaiser(N,beta); N=38,48 beta=[0,1,2,3,4]
2 - w0=kaiser(38,0);
3 - wvtool(w0)
4
5 %////////

```

3.2.3 สร้างตารางบันทึกผลเพื่อบันทึกข้อมูลข้างต้น

Variable para Meter beta	Length of Window function	Time Domain		Frequency Domain	
		Max. Amp	Min. Amp	Main lobe width	Relative sidelobe Attenuation dB
0	38				
	48				
1	38				
	48				
2	38				
	48				
3	38				
	48				
4	38				
	48				

3.2.4 นำข้อมูลที่รวบรวมได้ข้างต้นไปทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)

```

Editor - C:\Users\Mechok\Desktop\1.11\Thesis\Untitled.m
KScore.m x Untitled.m x +
1 - beta=0; N=38;
2 - fc=20; fstop=100;
3
4 - wc=fc/(fs/2);
5
6 - h=fir1(N,wc,'High',kaiser(N+1,beta),'noscale');
7
8 - fvtool(h,1)

```

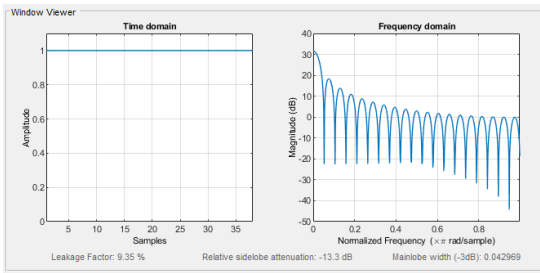
3.2.5 สร้างตารางบันทึกผลการทดสอบการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่าง โปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) และโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) โดยข้อมูลที่นำมาบันทึก จะวิเคราะห์ผลจากรูปกราฟที่ได้

Variable parameter (β)	Order of filter	Transition bandwidth	Sidelobe attenuation (dB)		No. Of side lobes
			max	min	
0	38				
	48				
1	38				
	48				
2	38				
	48				
3	38				
	48				
4	38				
	48				

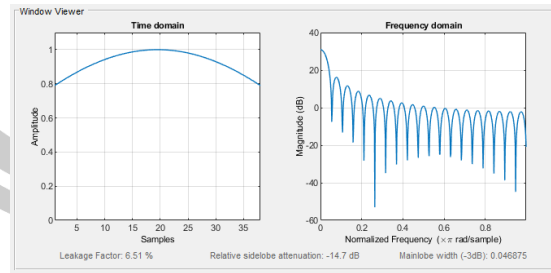
3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอพไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร ได้ทำการทดลอง โดยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

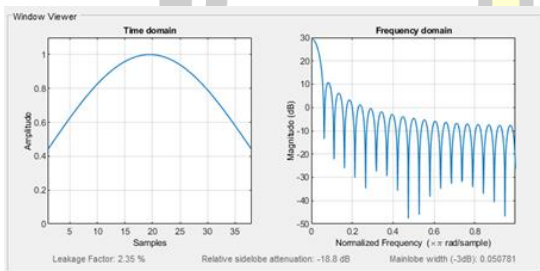
3.3.1 การจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) โดยการจำลองนำค่าที่ออกแบบไว้คือค่า Beta (β)= 0,1,2,3,4 , Filter order (N)=38,48 , Cutoff frequency=20Hz. , Sampling frequency=100Hz. และ Transition frequency=20Hz. นำมาสร้างในโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) เพื่อจำลองหาความกว้างของกิลบหลักและการลดทอนของแถบความถี่



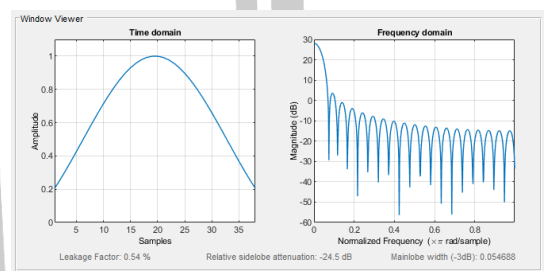
ภาพประกอบ 3.2 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=0$ และ $N=38$



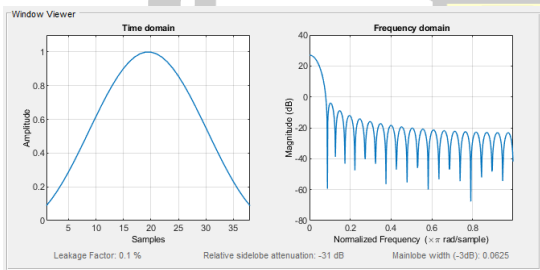
ภาพประกอบ 3.3 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=1$ และ $N=38$



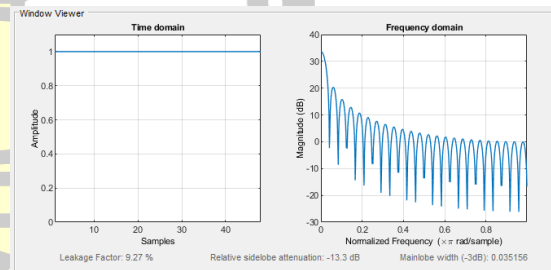
ภาพประกอบ 3.4 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=2$ และ $N=38$



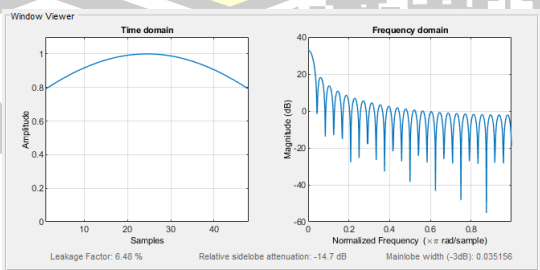
ภาพประกอบ 3.5 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=3$ และ $N=38$



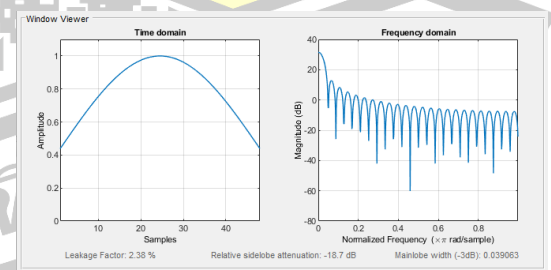
ภาพประกอบ 3.6 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=4$ และ $N=38$



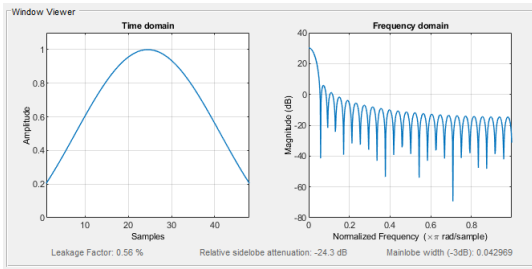
ภาพประกอบ 3.7 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=0$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.8 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=1$ และ $N=48$

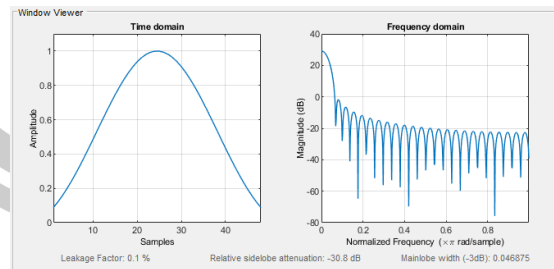


ภาพประกอบ 3.9 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
โคเชอร์ที่ $\beta=2$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.10 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

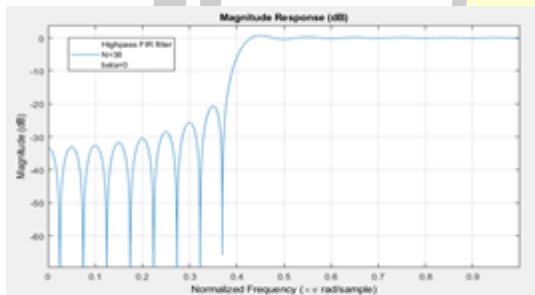
โคเซอร์ที่ $\beta=3$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.11 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

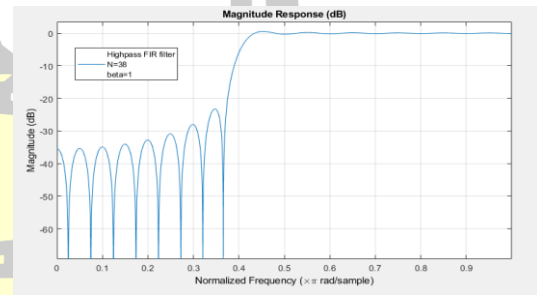
โคเซอร์ที่ $\beta=4$ และ $N=48$

3.3.2 การจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) โดยการจำลองนำค่าที่ออกแบบไว้คือค่า Beta (β)= 0,1,2,3,4 , Filter order (N)= 38,48 , Cutoff frequency= 20Hz. , Sampling frequency= 100Hz. และ Transition frequency=20Hz. นำมาสร้างในโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter) เพื่อจำลองหาความกว้างของกลีบหลักและการลดทอนของแถบความถี่



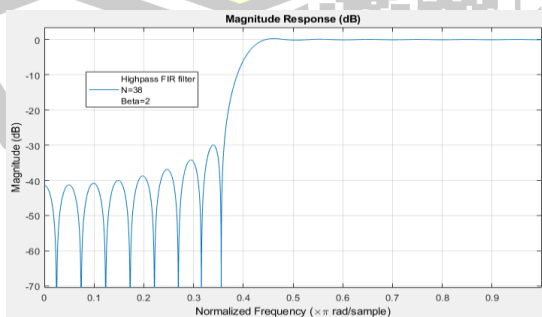
ภาพประกอบ 3.12 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=0$ และ $N=38$



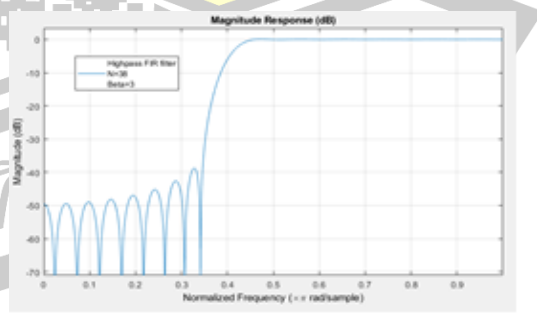
ภาพประกอบ 3.13 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=1$ และ $N=38$



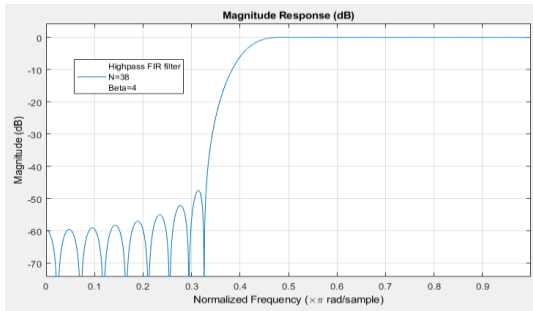
ภาพประกอบ 3.14 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=2$ และ $N=38$

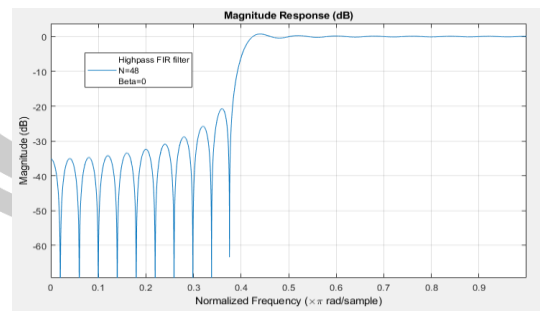


ภาพประกอบ 3.15 ผลการตอบสนองหน้าต่าง

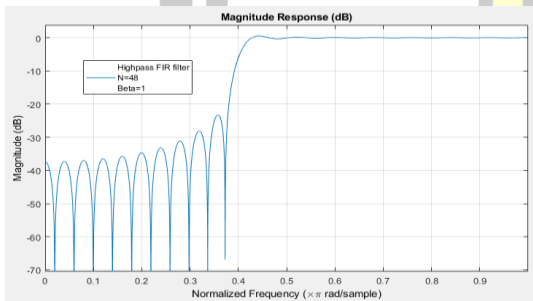
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=3$ และ $N=38$



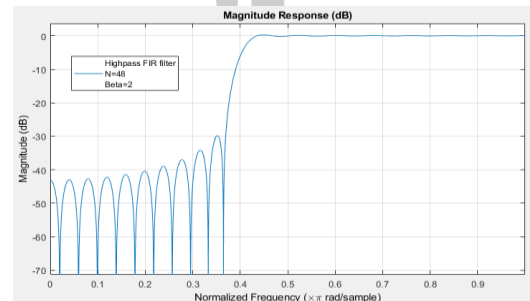
ภาพประกอบ 3.16 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=4$ และ $N=38$



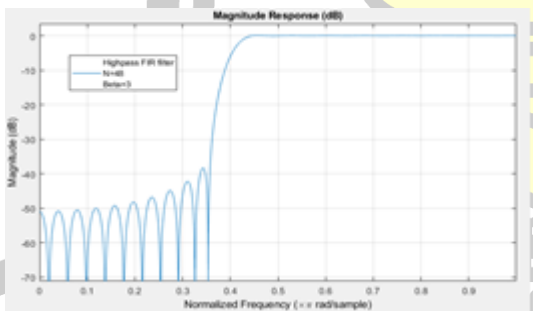
ภาพประกอบ 3.17 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=0$ และ $N=48$



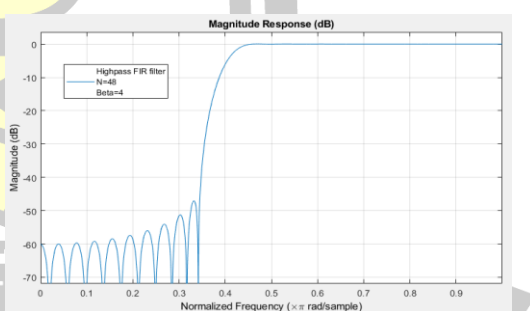
ภาพประกอบ 3.18 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=1$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.19 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=2$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.20 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=3$ และ $N=48$



ภาพประกอบ 3.21 ผลการตอบสนองหน้าต่าง
ตัวกรองความถี่สูงที่ $\beta=4$ และ $N=48$

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

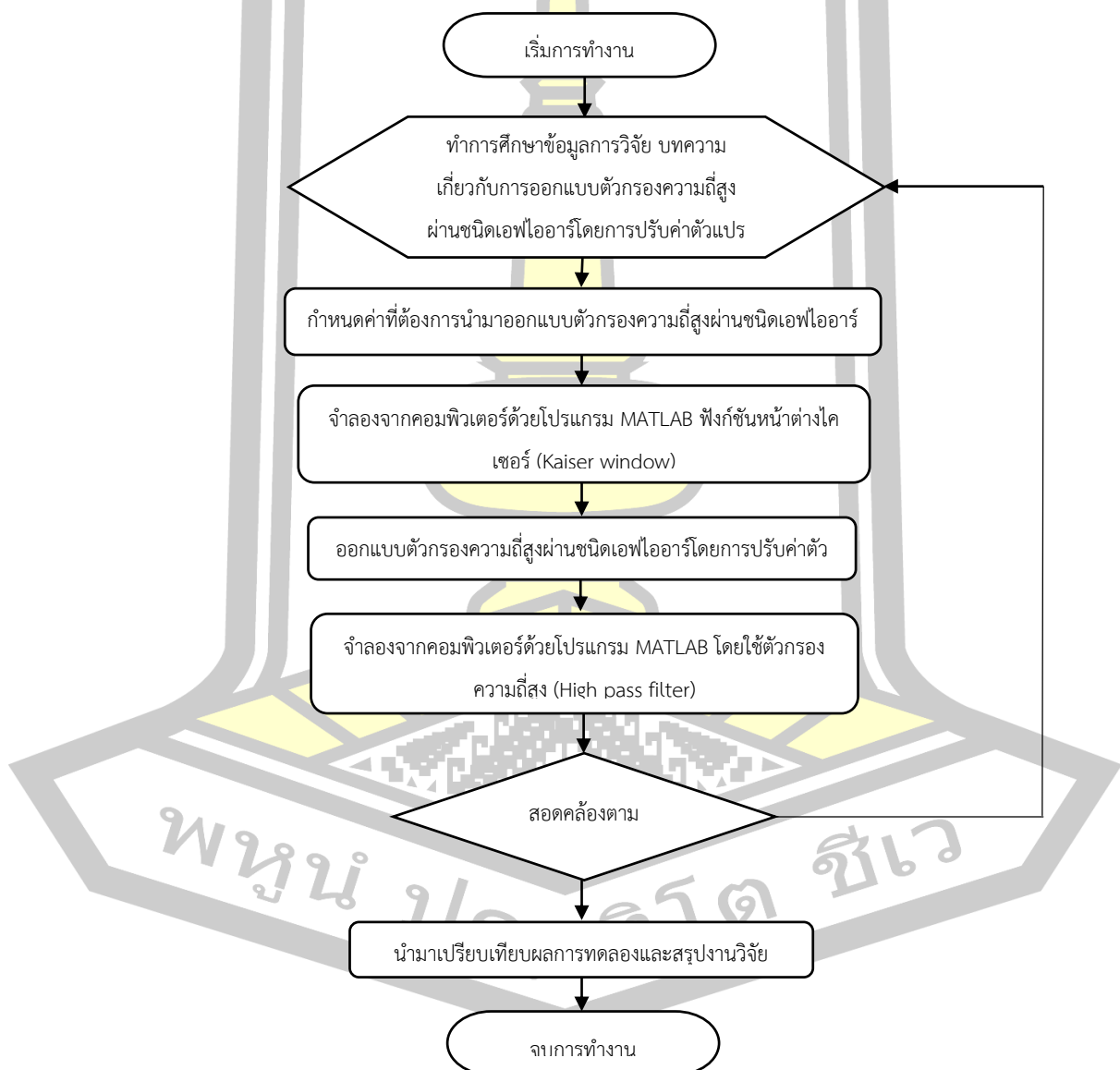
ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล โดยนำมาออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร ดังต่อไปนี้

3.4.1. ผู้วิจัยทำการหาข้อมูลงานวิจัย บทความ วิทยานิพนธ์ ในเรื่องการออกแบบตัวกรองความถี่สูงจากฐานข้อมูลออนไลน์ ห้องสมุด ฐานข้อมูลมหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยมุ่งเน้นในเรื่องการออกแบบตัวกรอง และ ตัวกรองความถี่ชนิดเอฟไออาร์

3.4.2. ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ตรวจสอบความถูกต้องของงานทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลองต่อไป

3.5 วิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลโดยมีขั้นตอนในการดำเนินการตามแผนผัง ดังนี้



ภาพประกอบ 3.22 ภาพแผนภูมิการดำเนินงาน

3.5.1. นำข้อมูลงานวิจัย บทความ วิทยานิพนธ์ ในเรื่องการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน ชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร จากฐานข้อมูลออนไลน์ ฐานข้อมูลมหาวิทยาลัย ห้องสมุด ดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)

3.5.2. ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) ทำการวิเคราะห์เพื่อหาความกว้างของกิลิปหลักและการลดทอนของแถบความถี่ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กำหนดไว้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.5.3. ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter) การวิเคราะห์เพื่อหาความกว้างของกิลิปหลักและการลดทอนของแถบความถี่ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กำหนดไว้ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.5.4. นำข้อมูลจากการวิเคราะห์ข้อมูล ทั้งแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window) และตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter) นำมาเปรียบเทียบกันและวิเคราะห์เพื่อหาความกว้างของกิลิปหลักและการลดทอนของแถบความถี่ที่เหมาะสม

3.6 แผนการดำเนินการและระยะเวลาทำการวิจัย

วัตถุประสงค์	แผนงานวิจัย	เทอมที่ 1 / 2562		เทอมที่ 2 / 2562			
		กค.-สค.	กย.-ตค.	พย.-ธค.	มค.-กพ.		
1. เพื่อศึกษางานวิจัยภาพรวมของการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิดเอฟไออาร์โดยการปรับค่าตัวแปร	1. ทำการศึกษาทฤษฎีการออกแบบตัวกรองความถี่ชนิดต่างๆ						
	2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)						
	3. ศึกษาและทำการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน						
	4. เสนอหัวข้องานวิจัยที่ได้ศึกษามา						
2. ทำการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยการจำลองจากโปรแกรม	1. ออกแบบและจำลองโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser window)						
	2. ออกแบบและจำลองโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter)						
3. สรุปผลการทดลอง	1. ทำการสรุปผลการทดลอง						
	2. จัดทำรายงานผลการวิจัย						

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับรายละเอียดในบทนี้จะแสดงถึงลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากที่ได้วิธีดำเนินการวิจัยแล้วนำไปออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านชนิดเฟอไออาร์ (High Pass FIR Filters) โดยการปรับค่าตัวแปรพารามิเตอร์ ตามขั้นตอนที่สร้างขึ้นเป็นลำดับจนได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกมา ซึ่งต้องเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ซึ่งขั้นตอนที่ทำให้เกิดผลการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

1. ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1.1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) เพื่อจำลองหาความกว้างของกลีบหลักและการลดทอนของแถบความถี่

4.1.2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) เพื่อจำลองหาความกว้างของกลีบหลักและการลดทอนของแถบความถี่

4.1.3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการเปรียบเทียบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) และ โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter)

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) จากผลการทดลองโดยการจำลองจากโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ตามการออกแบบในบทที่ 3 จากตารางที่ 4.1 จะปรากฏให้เห็นว่าเมื่อกำหนดค่า β ให้เพิ่มขึ้น ความกว้างของกลีบหลัก (Main lobe) จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะปรากฏให้เห็นว่าค่า การลดทอนกลีบด้านข้าง (Side lobe) จะมีค่าลดลง เช่น $\beta=0$ และค่า $N=38$ จะมีค่า Main lobe=0.042969 และจะมีค่า Side lobe=-13.3 , $\beta=0$ และค่า $N=48$ จะมีค่า Main lobe=0.035156 และจะมีค่า Side lobe=-13.3 กับ $\beta=4$ และค่า $N=38$ จะมีค่า Main lobe=0.625000 และจะมีค่า Side lobe=-31.0, $\beta=4$ และค่า $N=48$ จะมีค่า Main lobe=0.046875 และจะมีค่า Side lobe=-30.8 ดังตารางที่ 4.1

Variable parameter beta	Length of Window function	Time Domain		Frequency Domain	
		Max. Amp	Min. Amp	Main lobe width	Relative side lobe Attenuation dB
0	38	1	1	0.042969	-13.3
	48			0.035156	-13.3
1	38	1	.08	0.046875	-14.7
	48			0.035156	-18.7
2	38	1	.04	0.050781	-18.8
	48			0.039063	-18.7
3	38	1	.02	0.054688	-24.5
	48			0.042969	-24.3
4	38	1	.01	0.625000	-31.0
	48			0.046875	-30.8

ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบฟังก์ชัน Kaiser Window ที่ค่า β และ N ที่แตกต่างกัน

4.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)

จากผลการทดลองโดยการจำลองจากโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) ที่ Different β และ N ที่แตกต่างกันจะปรากฏให้เห็นว่าเมื่อกำหนดค่า beta เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ Transition Bandwidth เพิ่มขึ้นและค่าการลดทอนก้นด้านข้าง (Side lobe) ลดลงดังนี้ กำหนดให้ค่า Beta=0 ค่า N=38 จะมีผลทำให้ค่า Transition Bandwidth =0.05112 และค่า Sidelobe Max=-20.685 กับ Sidelobe Min=-33.066 จำนวน Sidelobe=8, Beta=0 ค่า N=48 จะมีผลทำให้ค่า Transition Bandwidth =0.04248 และค่า Sidelobe Max=-20.736 กับ Sidelobe Min=-35.048 จำนวน Sidelobe=10, Beta=4 และค่า N=38 จะมีผลทำให้ค่า Transition Bandwidth =0.07531 และค่า Sidelobe Max=-47.464 กับ Sidelobe Min=-59.510 จำนวน Sidelobe=8, Beta=4 และค่า N=48 จะมีผลทำให้ค่า Transition

Bandwidth =0.07250 และค่า Sidelobe Max=-47.074 กับ Sidelobe Min=-59.985 จำนวน Sidelobe=10 ดังตารางที่ 4.2

Variable parameter (β)	Order of filter	Transition bandwidth	Sidelobe attenuation (dB)		No.Of side lobes
			max	min	
0	38	0.05112	-20.685	-33.066	8
	48	0.04248	-20.736	-35.048	10
1	38	0.05444	-23.262	-35.365	8
	48	0.04260	-23.273	-37.290	10
2	38	0.06091	-29.972	-41.275	8
	48	0.06091	-29.806	-43.009	10
3	38	0.06127	-38.790	-49.426	8
	48	0.06115	-38.342	-50.764	10
4	38	0.07531	-47.464	-59.510	8
	48	0.07250	-47.074	-59.985	10

ตาราง 4.2 การเปรียบเทียบตัวกรอง High pass FIR ที่ค่า β และ N ที่แตกต่างกัน

4.2.3. การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการเปรียบเทียบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window) โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter)

การเปรียบเทียบหน้าต่าง Kaiser กับ High Pass Finite Impulse Response (FIR) โดยใช้ข้อมูลฟิลเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ Beta (β) และ N จากตารางที่ 4.1 และ 4, จากการจำลองพบว่าเมื่อ β เพิ่มขึ้น ความกว้างของกลีบหลัก (Main Lobe) จะเพิ่มขึ้น แต่กลีบด้านข้าง (Side Lobe) จะลดลง ในเวลาเดียวกันความยาวหน้าต่างด้านล่างจะต่ำกว่า แต่เมื่อใช้ตัวกรอง High Pass Finite Impulse Response ตัวกรองจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวแปลงสัญญาณ ลดลงตามลำดับตัวกรองที่เพิ่มขึ้นตัวลวดทอนด้านข้างจะลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบ High Pass FIR Filters โดยฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ Kaiser (Kaiser Window) พร้อมตัวแปรพารามิเตอร์เบต้า จากการศึกษาเปรียบเทียบหน้าต่างโคเชอร์ด้วยตัวแปรพารามิเตอร์ β และ N ที่ต่างกัน นอกจากนี้ตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิด FIR ได้รับการออกแบบโดยใช้หน้าต่างเดียวกันกับฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อ β เพิ่มขึ้น ความกว้างของกลีบหลัก (Mainlobe) หน้าต่างโคเชอร์เพิ่มขึ้นแต่การลดทอนของกลีบด้านข้าง (Sidelobe) ลดลงในเวลาเดียวกัน ซึ่งทำให้ความยาวของหน้าต่าง (N) ขั้นต่ำให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า แต่สำหรับตัวกรองเดียวกันที่ใช้ตัวกรองความถี่สูงผ่านชนิด FIR (High pass FIR) ความยาวของหน้าต่าง (N) ขั้นสูงกว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อความกว้างของการเปลี่ยนแปลงลดความลำดับตัวกรองที่เพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นกลีบด้านข้าง (Sidelobe) การลดทอนจะลดลงเมื่อลำดับตัวกรองและ β เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองโดยการทดลองการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ (Kaiser Window) ตามการออกแบบในบทที่ 3 ที่กำหนดค่า $N=38$ ปรากฏว่า $\beta=0$ จะมีค่า Main lobe=0.042969 ค่า Side lobe=-13.3 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=1Amp , $\beta=1$ จะมีค่า Main lobe=0.046875 ค่า Side lobe=-14.7 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.08Amp , $\beta=2$ จะมีค่า Main lobe=0.050781 ค่า Side lobe=-18.8 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.04Amp, $\beta=3$ จะมีค่า Main lobe=0.054688 ค่า Side lobe=-24.5 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.02Amp , $\beta=4$ จะมีค่า Main lobe=0.625000 ค่า Side lobe=-31.0 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.01Amp ในส่วนของค่า $N=48$ ปรากฏว่า $\beta=0$ จะมีค่า Main lobe=0.035156 ค่า Side lobe=-13.3 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=1Amp , $\beta=1$ จะมีค่า Main lobe=0.035156 ค่า Side lobe=-18.7 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.08Amp , $\beta=2$ จะมีค่า Main lobe=0.039063 ค่า Side lobe=-18.7 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.04Amp , $\beta=3$ จะมีค่า Main lobe=0.042969 ค่า Side lobe=-24.3 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain

Min= .02Amp ,Beta=4 จะมีค่า Main lobe=0.046875 ค่า Side lobe=-30.8 และค่า Time Domain Max=1Amp กับ Time Domain Min=.01Amp

จากผลการทดลองโดยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter) ตามการออกแบบในบทที่ 3 ในส่วนของค่า N=38 ปรากฏว่า Beta=0 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.05112 ค่า Side lobe max=-20.685dB และ Side lobe min=-33.066dB จำนวน Side lobe=8 , Beta=1 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.05444 ค่า Side lobe max=-23.262dB และ Side lobe min=-35.365dB จำนวน Side lobe=8 , Beta=2 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.06091 ค่า Side lobe max=-29.972dB และ Side lobe min=-41.275dB จำนวน Side lobe=8 , Beta=3 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.06127 ค่า Side lobe max=-38.790dB และ Side lobe min=-49.426dB จำนวน Side lobe=8 , Beta=4 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.07531 ค่า Side lobe max=-47.464dB และ Side lobe min=-59.510dB จำนวน Side lobe=8 ในส่วนของค่า N=48 ปรากฏว่า Beta=0 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.04248 ค่า Side lobe max=-20.736dB และ Side lobe min=-35.048dB จำนวน Side lobe=10 , Beta=1 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.04260 ค่า Side lobe max=-23.273dB และ Side lobe min=-37.290dB จำนวน Side lobe=10 , Beta=2 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.06091 ค่า Side lobe max=-29.806dB และ Side lobe min=-43.009dB จำนวน Side lobe=10 , Beta=3 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.06115 ค่า Side lobe max=-38.342dB และ Side lobe min=-50.764dB จำนวน Side lobe=10 , Beta=4 จะมีค่า Transition Bandwidth=0.07250 ค่า Side lobe max=-47.074dB และ Side lobe min=-59.985dB จำนวน Side lobe=10

5.2 อภิปรายผล

ค่าสัมประสิทธิ์จากการออกแบบ High pass FIR Filters โดยหน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์ตัวแปร Beta หลังจากการปรับค่า Beta(β) และ N เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม ปรากฏว่าเกิดความถี่ที่เหมาะสมทำงานอยู่ห้าแถบความถี่ ได้แก่ ความถี่ที่ Beta(β) 0,1,2,3,4 และค่าสัมประสิทธิ์ N ที่เหมาะสมอยู่สองค่าได้แก่ 38,48 การศึกษาที่แตกต่างกันแสดงว่าเมื่อ β เพิ่มขึ้น ความกว้างของกลีบหลัก (Main Lobe) จะเพิ่มขึ้น แต่กลีบด้านข้าง (Side Lobe) จะลดลง ในเวลา

เดียวกันความยาวหน้าต่างด้านล่างจะต่ำกว่า แต่เมื่อใช้ตัวกรอง High Pass Finite Impulse Response ตัวกรองจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวแปลงสัญญาณลดลงตามลำดับตัวกรองที่เพิ่มขึ้นตัวลวดทอนด้านข้างจะลดลงเมื่อ β เพิ่มขึ้น สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) และ โปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)

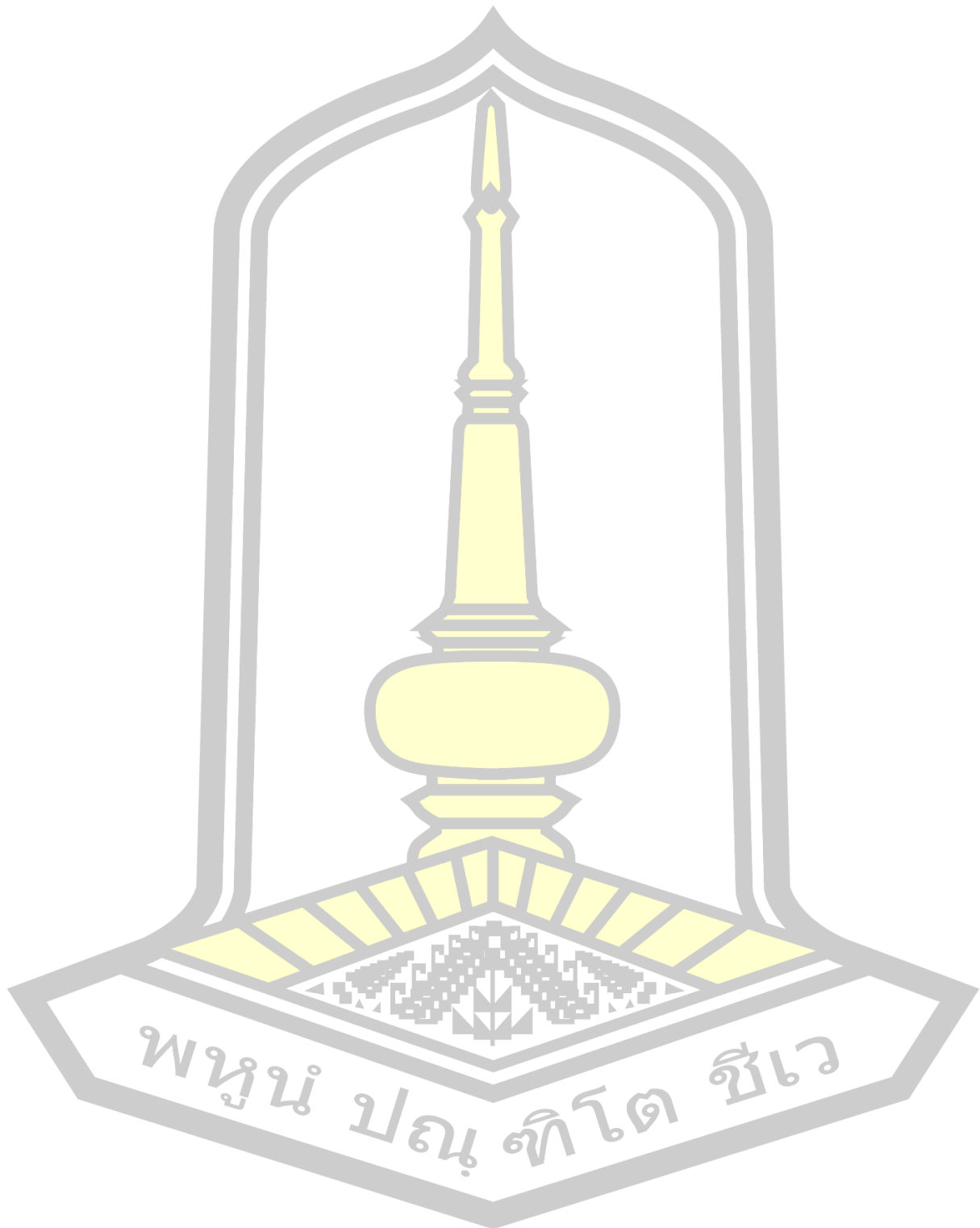
เราสามารถประยุกต์นำทฤษฎีวิธีการการออกแบบ High pass FIR Filters โดยหน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์ตัวแปร Beta สามารถนำมาใช้ออกแบบการเป็นต้นแบบในการพัฒนางจรกรองความถี่ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้เช่น ระบบอิเล็กทรอนิกส์, ระบบสื่อสาร, ระบบควบคุม และทางด้านเครื่องมือวัดทางการแพทย์เช่น เครื่องตรวจหัวใจที่ใช้ความถี่สูง, เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์, เครื่องสลายนิวตริยด้วยคลื่นความถี่สูง ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของระบบสื่อสารเพื่อความสะดวกในการใช้งานต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยครั้งนี้สิ่งที่เกิดปัญหา อันดับแรกคือการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม Beta (β) และ N ถ้าเลือกไม่ดี เช่น ค่าค่าสัมประสิทธิ์มีค่าไม่เหมาะสม จะทำให้คลื่นความถี่เกิดความไม่เสถียร และความถี่ก็จะมีค่าความผิดพลาดสูง ทั้งผลการทดลองโดยการทดลองโดยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) และ ผลการทดลองโดยการทดลองโดยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass filter)

ในอนาคตการออกแบบ High pass FIR Filters โดยหน้าต่าง Kaiser พร้อมพารามิเตอร์ตัวแปร Beta จะมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถทำงานได้หลายความถี่ โดยการพัฒนาในครั้งนี้ถ้าสามารถทำได้ก็จะ เป็นผลต่อการการออกแบบ High pass FIR Filters ที่สามารถใช้งานได้หลายความถี่ ซึ่งงานวิจัย จะต้องทำการศึกษาวิธีเทคโนโลยีใหม่ๆของการออกแบบ High pass FIR Filters ต่อไป

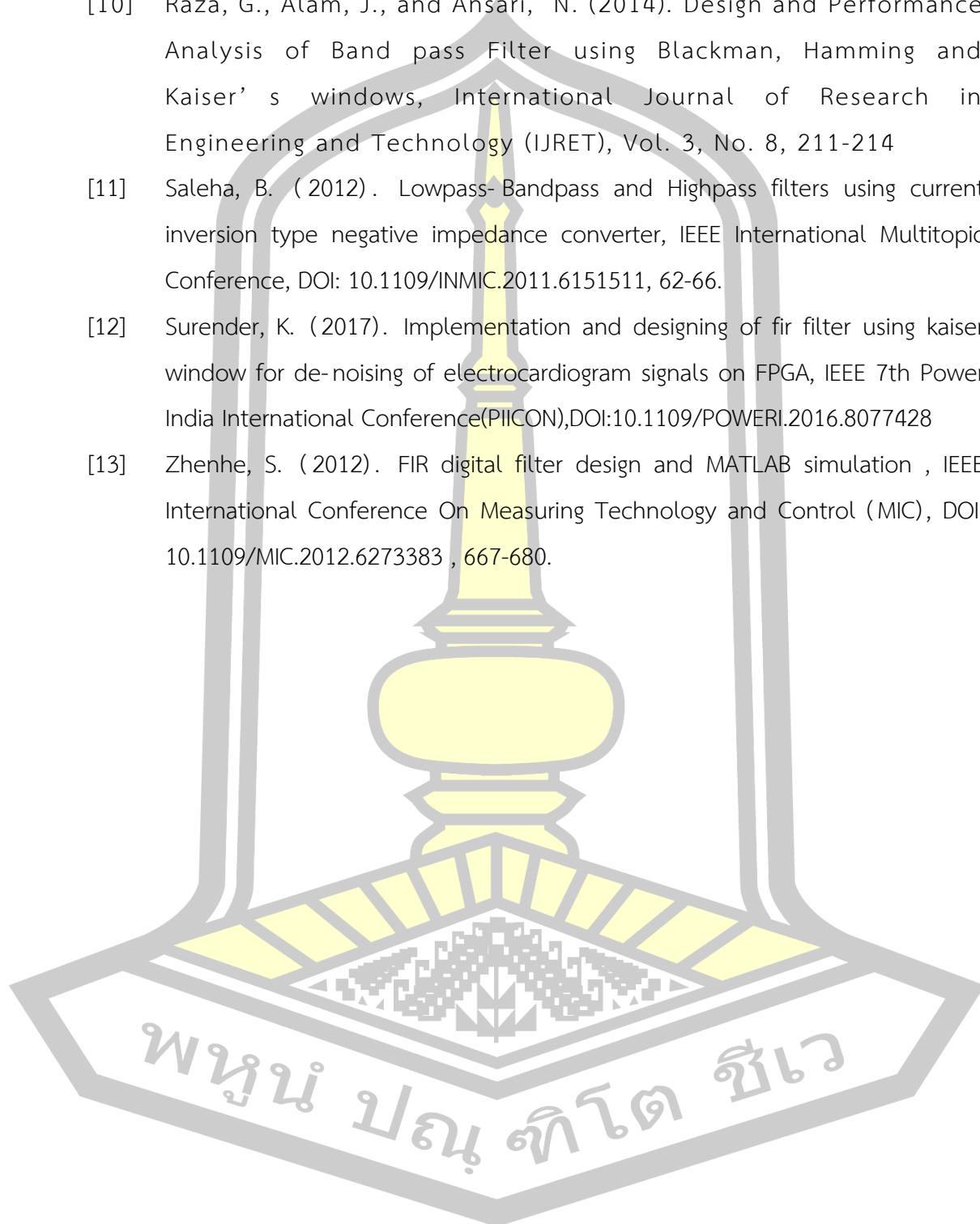
บรรณานุกรม

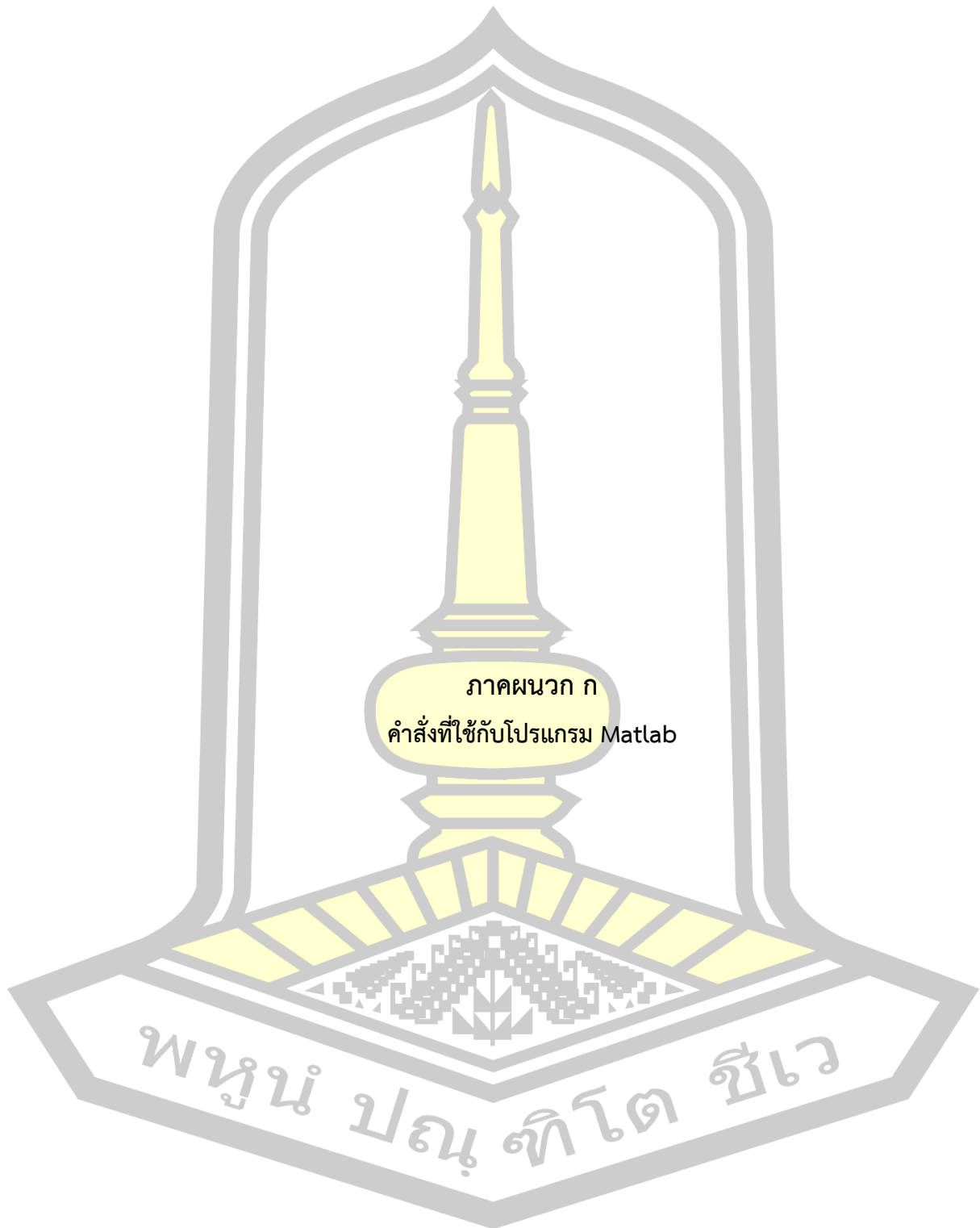


- [1] Arya, R. and Jaiswal, S. (2015). Design of Low pass FIR Filters using Kaiser's window Function with variable parameter Beta, International Journal of Multidisciplinary and Current Research, Vol. 3, 220-224
- [2] Dogra, S. and Sharma, N. (2014). Comparison of Different Techniques to Design of Filter, Inter. Journal of Computer Applications, Vol.97, No. 1, 25-29
- [3] Gopalakrishna, S. (2013). Design of passive high pass filter for shunt active power filter application, IEEE International Conference on circuits, Power and computer technologies (ICCPCT), DOI: 10.1109/ICCPCT.2013.6528947, 17-21.
- [4] Hormatollah, F. (2010). High voltage laboratory, Iran transfo Corp, Zanjan, Iran., Frequency Response Analysis – Low Frequency Characteristics and Fault Diagnosis on power transformers, IEEE International conference on solid dielectrics, Potsdam, Germany, 1-4.
- [5] Jie-Ming, Q. (2013). Design of Dual-band Bandstop Filter with Low Frequency Ratio, IEEE International Wireless Symposium (IWS), DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2013.6616754.
- [6] Jijesh, J.J. (2018). Design and Development of Band Pass Filter for X-Band RADAR Receiver System, IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Infor. and Communication Technology (RTEICT) , DOI: 10.1109/RTEICT.2017.8256963, 2065-2070.
- [7] Kaiser, J., Schafer, W. (1980). On the use of the I_0 -sinh window for spectrum analysis. IEEE Tran. on Acoustics, Speech, and Sig. Proc. , Doi:10.1109/TASSP.1980.1163349, 105–107.
- [8] Manish, B., Skncoe, S. (2018). FIR Filter Implementation, IEEE International Conference On Recent Trends In Electronics Information & Communication Technology, DOI: 10.1109/RTEICT.2017.8256573, 137-141.
- [9] Ming-cui, T. (2019). Design of a miniature High-pass filter using LTCC technology, IEEE International Applied Computational Electromagnetics

Society Symposium - China (ACES), DOI: 10.23919/ACCESS.2018.8669116

- [10] Raza, G., Alam, J., and Ansari, N. (2014). Design and Performance Analysis of Band pass Filter using Blackman, Hamming and Kaiser' s windows, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Vol. 3, No. 8, 211-214
- [11] Saleha, B. (2012). Lowpass- Bandpass and Highpass filters using current inversion type negative impedance converter, IEEE International Multitopic Conference, DOI: 10.1109/INMIC.2011.6151511, 62-66.
- [12] Surender, K. (2017). Implementation and designing of fir filter using kaiser window for de-noising of electrocardiogram signals on FPGA, IEEE 7th Power India International Conference(PIICON),DOI:10.1109/POWERI.2016.8077428
- [13] Zhenhe, S. (2012). FIR digital filter design and MATLAB simulation , IEEE International Conference On Measuring Technology and Control (MIC), DOI: 10.1109/MIC.2012.6273383 , 667-680.





คำสั่งที่ใช้กับโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

```
%w=kaiser(N,beta); N=38,48 beta=[0,1,2,3,4]
w0=kaiser(48,4);
wvtool(w0)

%////////
```

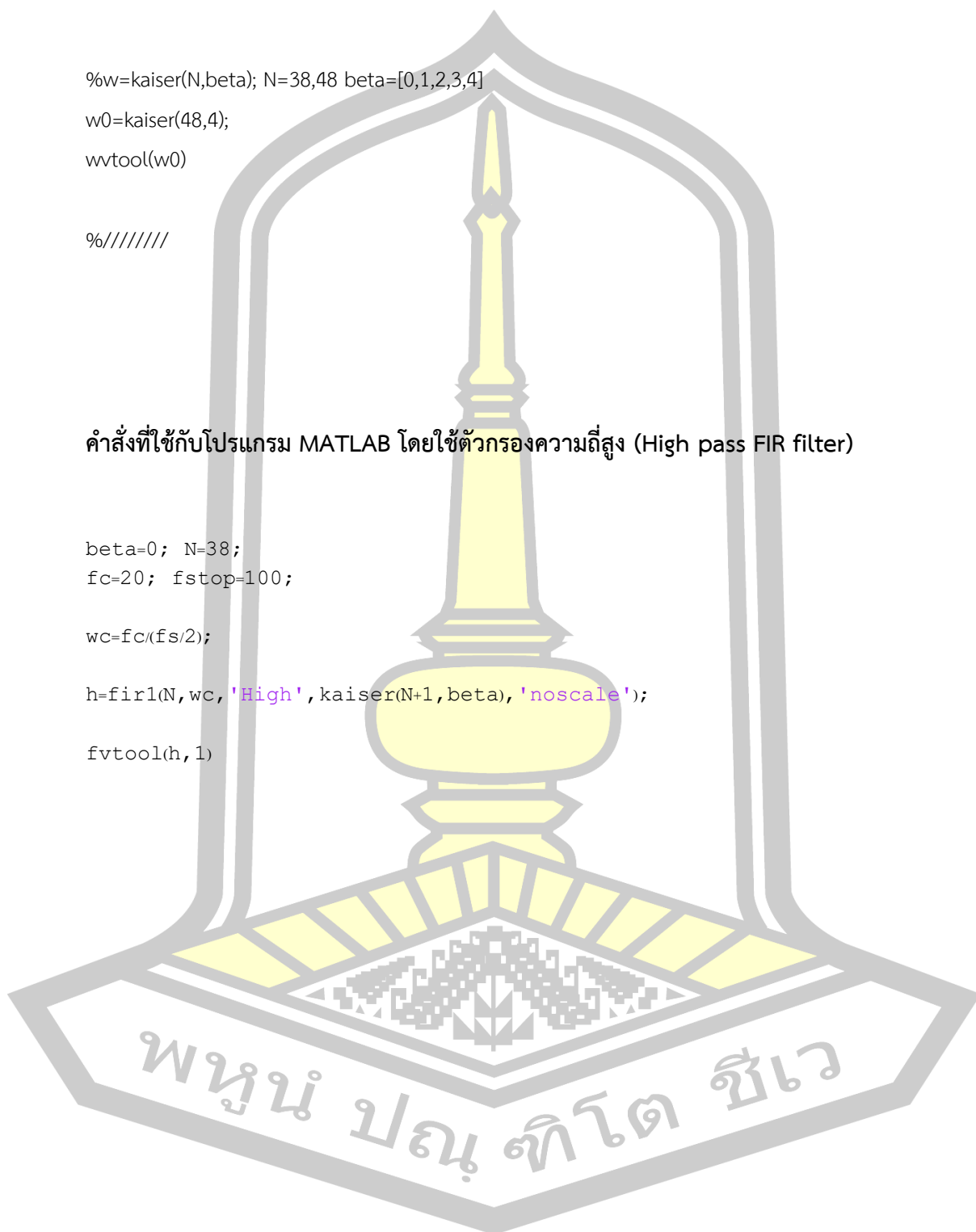
คำสั่งที่ใช้กับโปรแกรม MATLAB โดยใช้ตัวกรองความถี่สูง (High pass FIR filter)

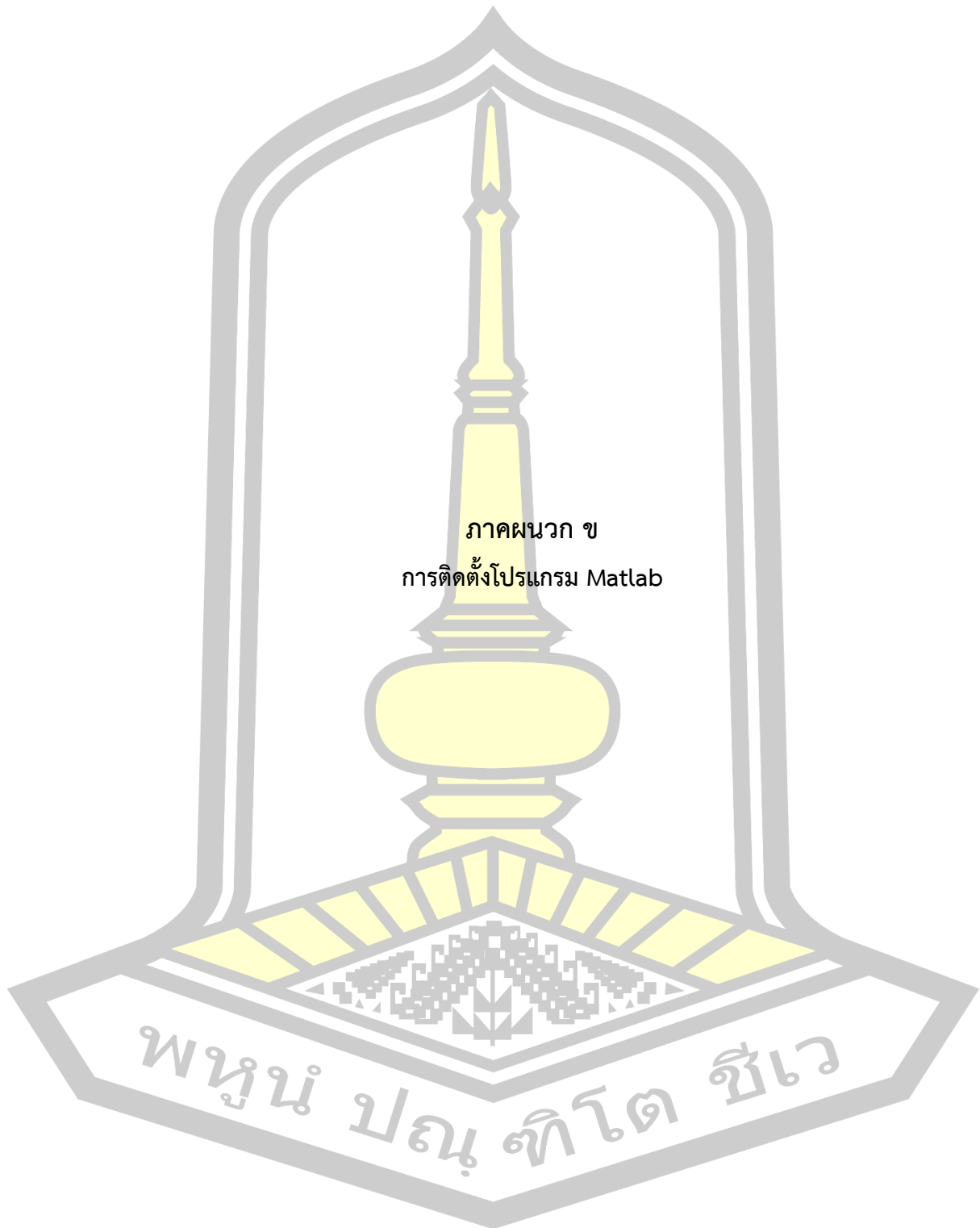
```
beta=0; N=38;
fc=20; fstop=100;

wc=fc/(fs/2);

h=fir1(N,wc, 'High', kaiser(N+1,beta), 'noscale');

fvtool(h,1)
```

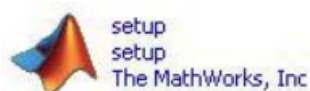




การติดตั้งโปรแกรม MATLAB

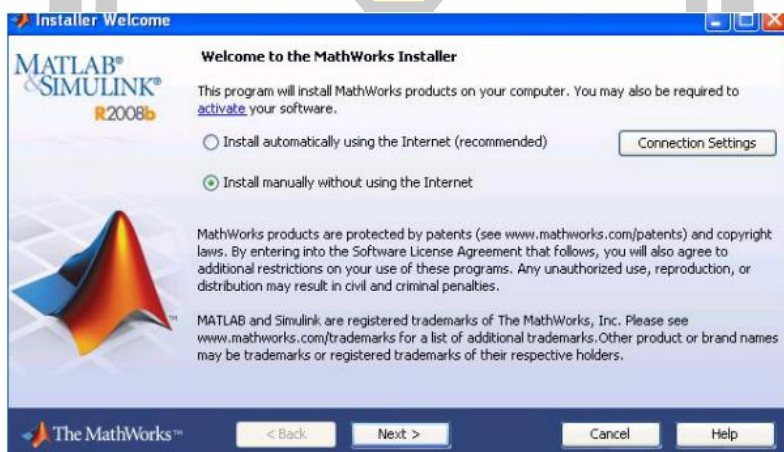
การติดตั้งโปรแกรม MATLAB ต้องมี File Installation Key และ License File ซึ่งในที่นี่จะแสดงวิธีการติดตั้งโปรแกรม MATLAB แบบ Off-Network

1. Double Click ที่ ICON สำหรับติดตั้ง ดังรูป ข.1



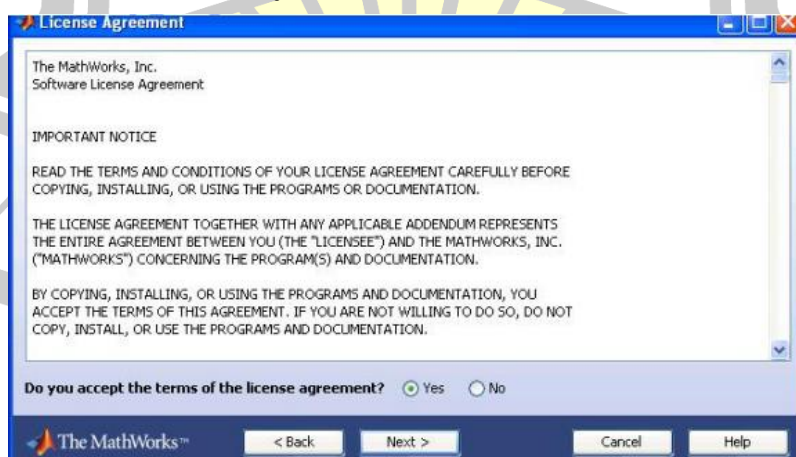
รูปที่ ข.1 สำหรับติดตั้ง โปรแกรม MATLAB

2. เลือก Install manually without using the Internet แล้วกด Next > ดังรูปที่ ข.2



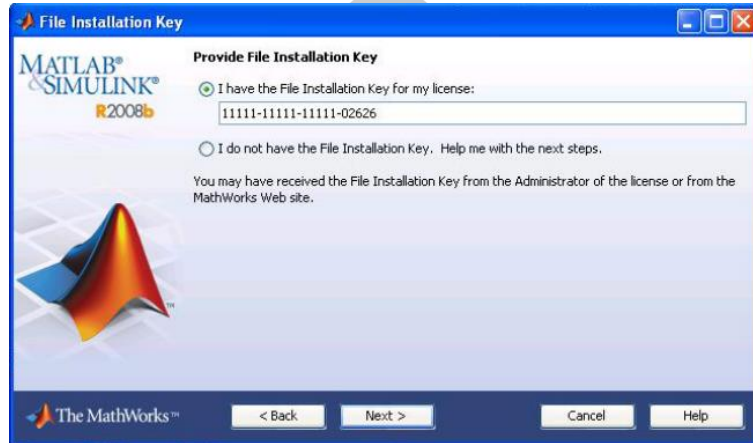
รูปที่ ข.2 เลือกการติดตั้งแบบไม่ใช้อินเทอร์เน็ต

3. เลือก Yes แล้วกด Next > ดังรูปที่ ข.3



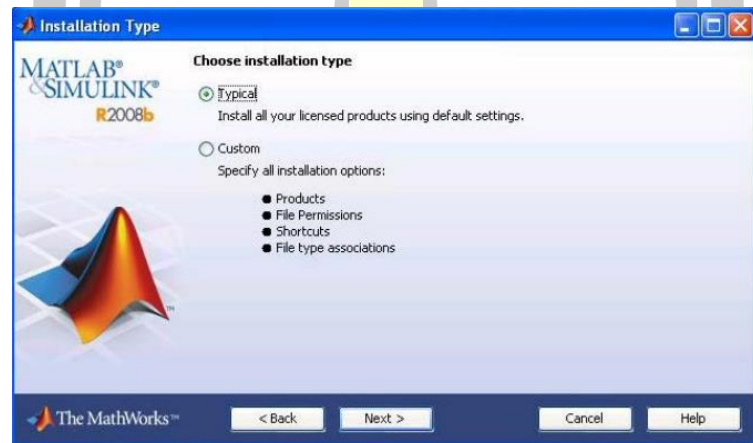
รูปที่ ข.3 การยืนยัน license

4. เลือก I have the File Installation Key for my license: แล้วใส่ Key จากนั้น กด Next >



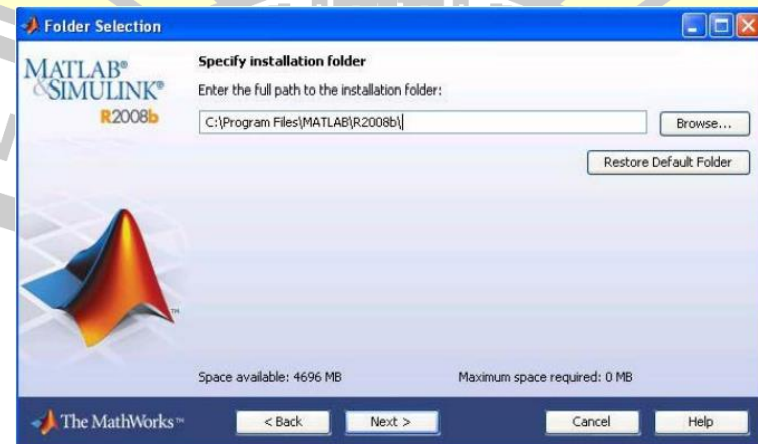
รูปที่ ข.4 การใส่ Key

5. เลือก Typical แล้ว กด Next > ดังรูป ข.5



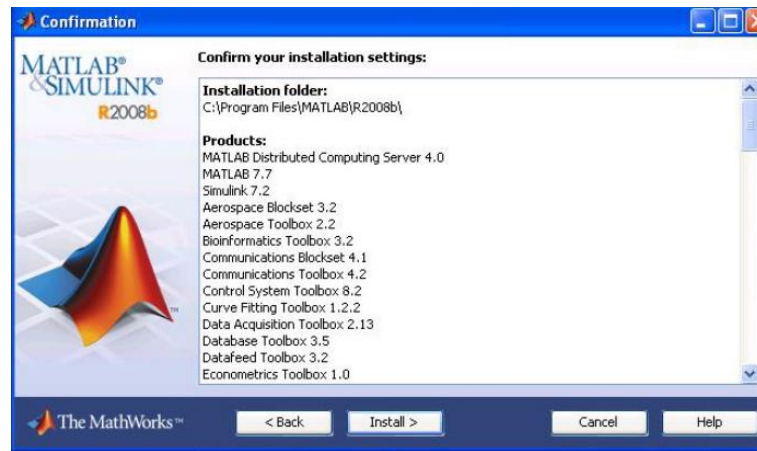
รูปที่ ข.5 เลือกการติดตั้งแบบ Typical

6. สามารถเลือก Folder ที่จะทำการติดตั้งได้โดย กด Browse... แล้วกด Next > ดังรูป ข.6



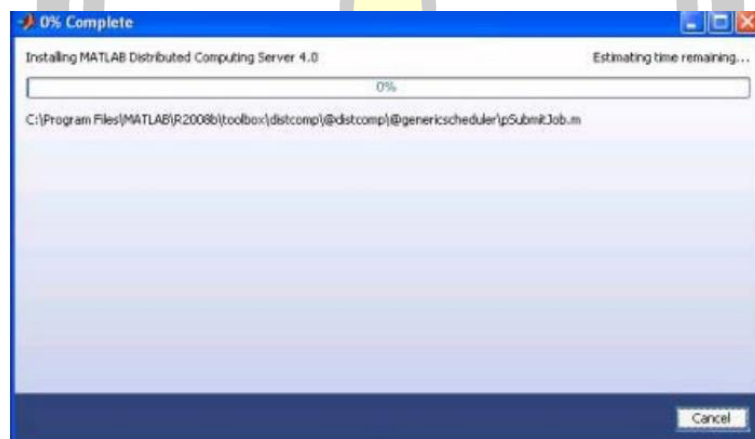
รูปที่ ข.6 เลือก Folder สำหรับติดตั้งโปรแกรม

7. กด Install > เพื่อเริ่มการติดตั้งโปรแกรม ดังรูป ข.7



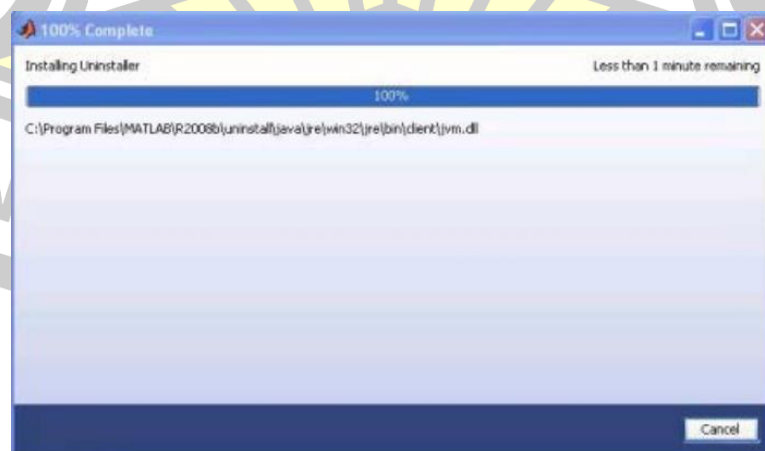
รูปที่ ข.7 กำลังติดตั้งโปรแกรม

8. รอการติดตั้งโปรแกรม



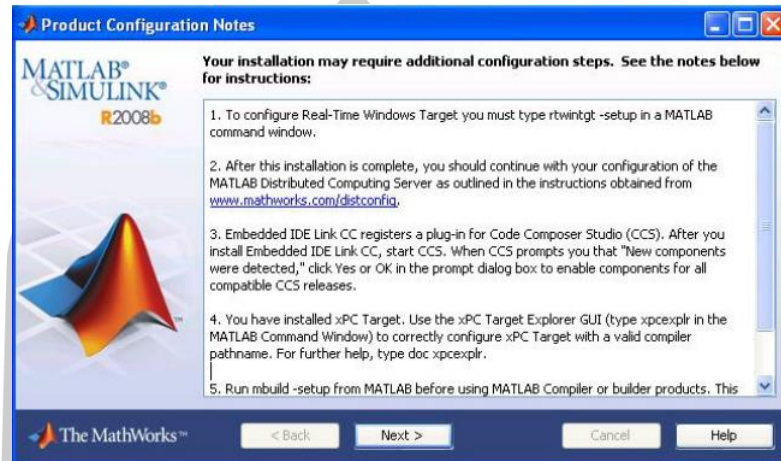
รูปที่ ข.8 รอการติดตั้งโปรแกรม

9. รอการติดตั้งโปรแกรม 100%



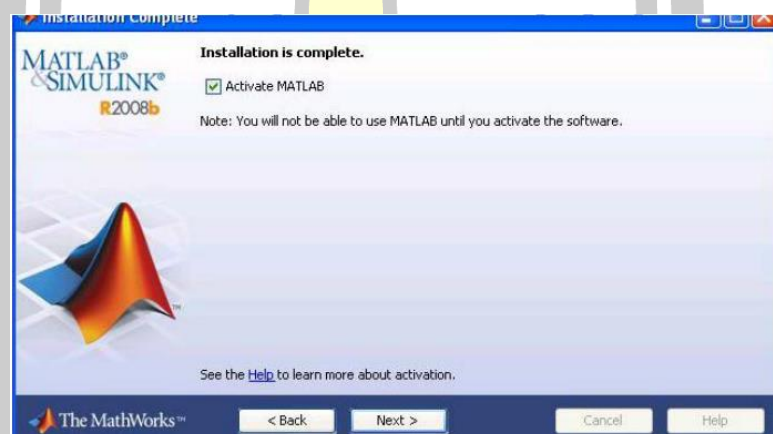
รูปที่ ข.9 รอการติดตั้งโปรแกรม 100%

10. เมื่อทำการติดตั้ง Complete 100% แล้ว ให้กด Next > เลือก Activate MATLAB แล้วกด Next >



รูปที่ ข.10 ทำการยืนยันลิขสิทธิ์

11. เมื่อทำการติดตั้ง กด Next > เลือก Activate MATLAB แล้วกด Next >



รูปที่ ข.11 ทำการยืนยันอีกครั้ง

12. เลือก Activate manually without the Internet แล้วกด Next >



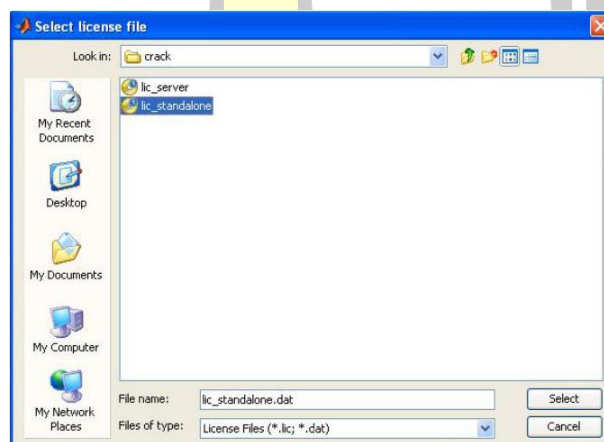
รูปที่ ข.12 การยืนยันลิขสิทธิ์โดยไม่ใช้อินเทอร์เน็ต 60

13. เลือก Enter the path to the license file: แล้วกด Browse... เพื่อเลือก license file ดังรูปที่ ข.13



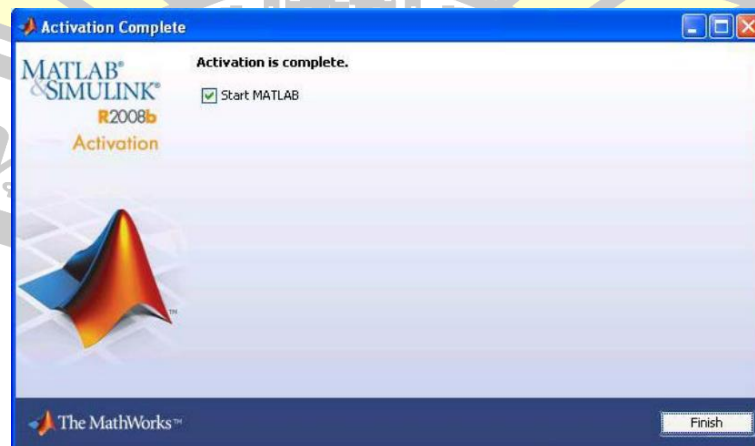
รูปที่ ข.13 การเลือก License File

14. เมื่อทำการเลือก file license แล้ว ให้กด Select

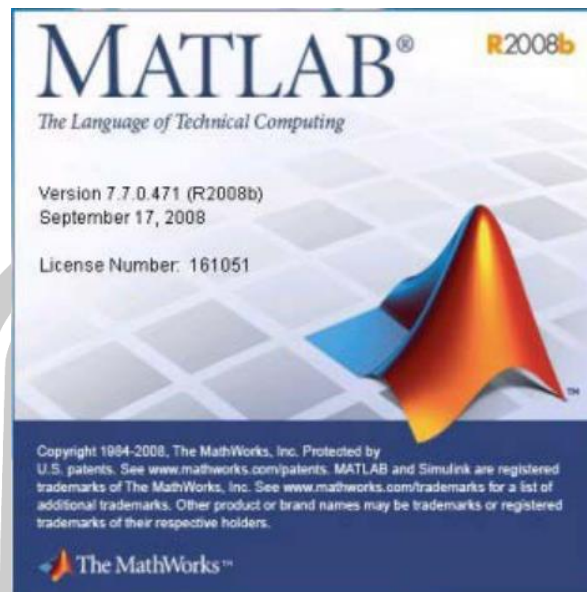


รูปที่ ข.14 License file

15. เสร็จสิ้นการขบวนการยืนยันลิขสิทธิ์โปรแกรม MATLAB กด Finish เพื่อเปิดโปรแกรม



รูปที่ ข.15 เสร็จสิ้นการยืนยันลิขสิทธิ์



รูปที่ ข.16 โปรแกรม MATLAB



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวโยธกา ตั้งตระกูล
วันเกิด	วันที่ 19 เมษายน.2538
สถานที่เกิด	อำเภอ เมือง จังหวัด ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	150/65 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2552 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
	พ.ศ. 2556 ระดับปริญญาตรี ปริญญาครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
	พ.ศ. 2560 ระดับบัณฑิตศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทีโตะ ชีเว