



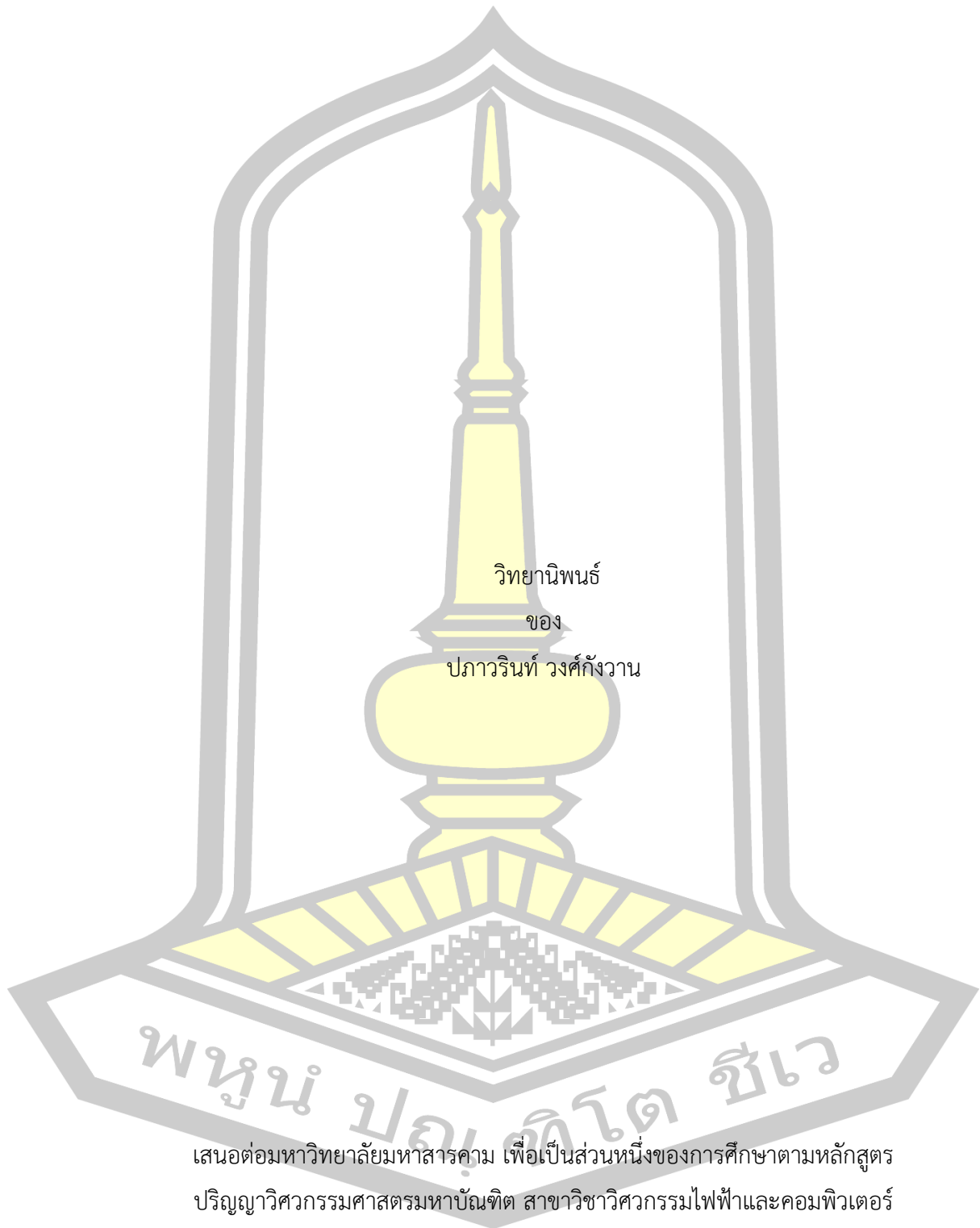
การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์

วิทยานิพนธ์
ของ
ปภาวรินทร์ วงศ์กังวาน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์

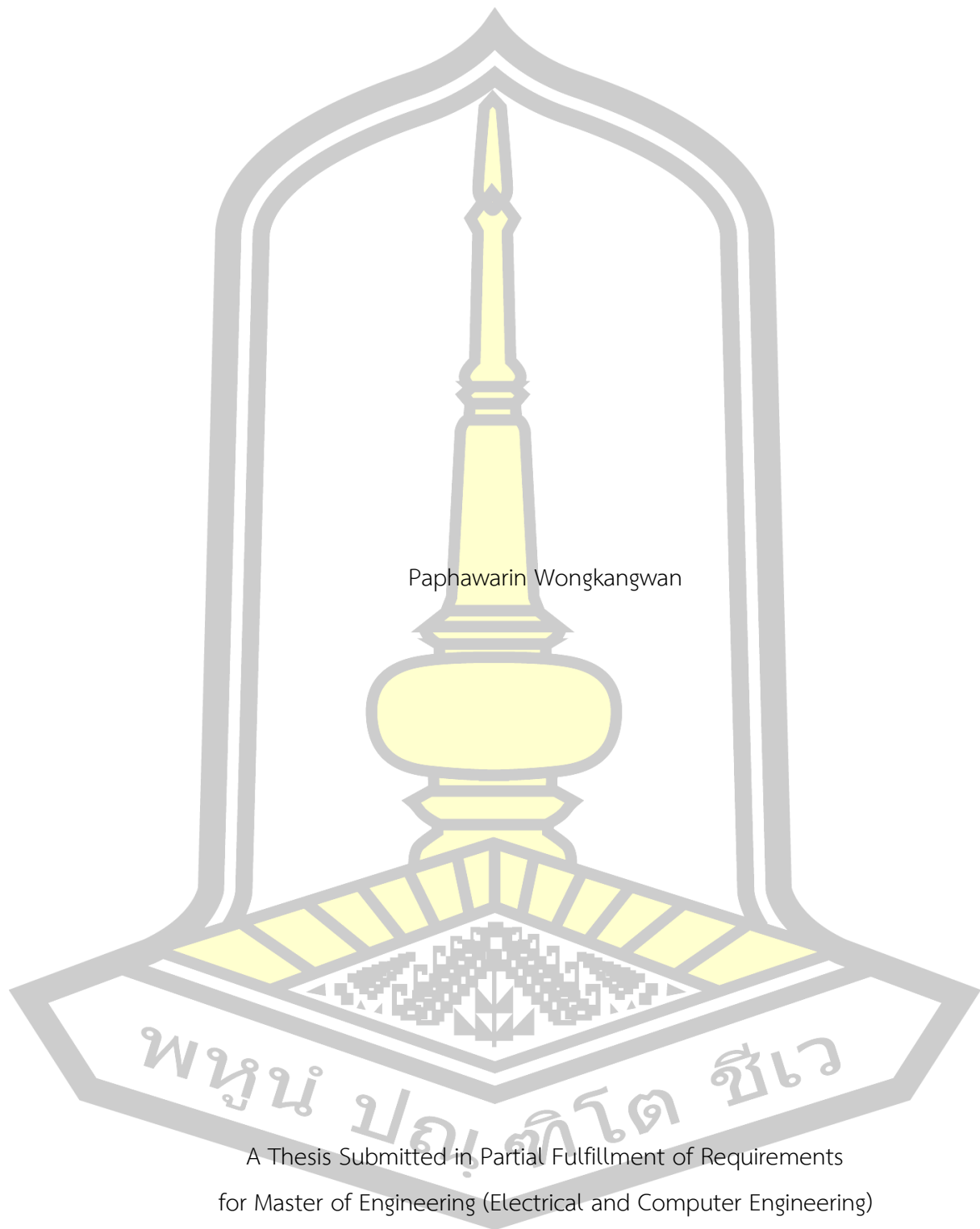


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design of Band pass FIR Filters using Kaiser Window



Paphawarin Wongkangwan

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

May 2021

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวภาวรินทร์ วงศ์
กังวาน แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนชะ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์		
ผู้วิจัย	ปภาวรินทร์ วงศ์กังวาน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบนด์พาสเอฟไออาร์ฟิลเตอร์ซึ่งออกแบบโดยฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ โดยมีพารามิเตอร์ข้อมูลจำเพาะของการออกแบบ ได้แก่ ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง ความถี่คัตออฟ ลำดับของตัวกรองหรือความยาวของหน้าต่าง โดยมีพารามิเตอร์การลดทอนหรือพารามิเตอร์เบต้าเป็นพารามิเตอร์ตัวแปร จากการสุ่มความถี่ตัวอย่างที่ 100 เฮิรตซ์ ความถี่คัตออฟแรกที่ 20 เฮิรตซ์ ความถี่คัตออฟสองที่ 30 เฮิรตซ์ และความยาวของหน้าต่าง 38 และ 48 ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงกิลบกว้างของพารามิเตอร์การลดทอนสูง คือ เบต้า 4 เป็น 0.062500 และ การลดทอนของกิลบข้างสัมพันธ์ เป็น -31.00 เดซิเบล โดยพารามิเตอร์การลดทอนสูงไม่เป็นที่พึงปรารถนาสำหรับความกว้างการเปลี่ยนที่แคบของแบนด์พาสเอฟไออาร์ฟิลเตอร์

คำสำคัญ : แบนด์พาสเอฟไออาร์ฟิลเตอร์ / ฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์

พหุจน์ ปณฺ ทิโต ชีเว

TITLE Design of Band pass FIR Filters using Kaiser Window
AUTHOR Paphawarin Wongkangwan
ADVISORS Associate Professor Worawat Sa-Ngiamvibool , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2021

ABSTRACT

The paper presents the band pass FIR filter which is designed by Kaiser's window function. The specification parameters of this design are sampling frequency, cutoff frequency, filter's order and window length. While the attenuation parameter (β) is the variable parameter. The Kaiser's function is used as a type of window function. As a simple example at sampling frequency of 100Hz, first cutoff frequency of 20Hz, second cutoff frequency of 30Hz and window length of 38 and 48. The simulation demonstrates the wide lobe of 0.062500 and relative side lobe attenuation of -31.00 dB at high attenuation parameter (β) of 4. But high attenuation parameter (β) is undesirable for narrow transition width of the band pass FIR filter.

Keyword : Band pass FIR filter / Kaiser window function

พหุ ประถมศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร ผศ. ดร. นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ และ ผศ. ดร. สุพรรณนิภา วัฒนะ ที่กรุณาเป็นเกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวถึงและผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ได้มีส่วนช่วยเหลือในการสนับสนุนให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน ด้วยความจริงใจ และขอขอบคุณประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นกตเวทิตาคุณแต่ บิดามารดา ครู อาจารย์ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอน้อมคารวะแต่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ศึกษาค้นคว้าและใช้อ้างอิงทุกท่าน

ปภาวรินทร์ วงศ์กังวาน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ตัวกรองดิจิทัล.....	4
2.2 ประเภทของวงจรรองความถี่แบบดิจิทัล.....	6
2.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Response).....	8
2.4 วงจรรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (Finite Impulse Response).....	9
2.5 การออกแบบตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์.....	12
2.6 ตัวกรองความถี่แบบไอไออาร์ (Infinite Impulse Response).....	18
2.7 การออกแบบตัวกรองความถี่.....	22
2.8 การออกแบบตัวกรอง FIR ตอบสนองชุดของตัวกรองที่ใช้หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Windows in FIR Design).....	30

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 แผนผังดำเนินการวิจัย.....	40
3.2 เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ	41
3.3 ขั้นตอนการออกแบบและดำเนินงานวิจัย.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	48
4.1 การออกแบบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window).....	48
4.2 การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิด กรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter).....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
บรรณานุกรม.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	69



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 พารามิเตอร์ที่สำคัญ ของหน้าต่างแบบต่างๆ	17
ตาราง 2 ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ	30
ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ	45
ตาราง 4 สำหรับบันทึกผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)	46
ตาราง 5 สำหรับบันทึกผลการทดสอบ การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter)	47
ตาราง 6 แสดงข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ บนโปรแกรม MATLAB	48
ตาราง 7 แสดง Time domain and Frequency domain of Kaiser's window function (Window length $N = 38$)	51
ตาราง 8 แสดง Time domain and Frequency domain of Kaiser's window function (Window length $N = 48$)	55
ตาราง 9 แสดงผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) สำหรับ $N = 38$ และ 48	56
ตาราง 10 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบบนโปรแกรม MATLAB สำหรับ Parameters of Band pass FIR filter using Kaiser's window function	56
ตาราง 11 แสดง Transition width, Side lobe attenuation (dB) and Number of side lobe of Band pass FIR Filter using Kaiser's window function (Window length $N = 38$)	59
ตาราง 12 แสดง Transition width, Side lobe attenuation (dB) และ Number of side lobe of Band pass FIR Filter using Kaiser's window function (Window length $N = 48$)	61
ตาราง 13 แสดงผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) สำหรับ $N = 38$ และ 48	62

สารบัญรูปภาพ

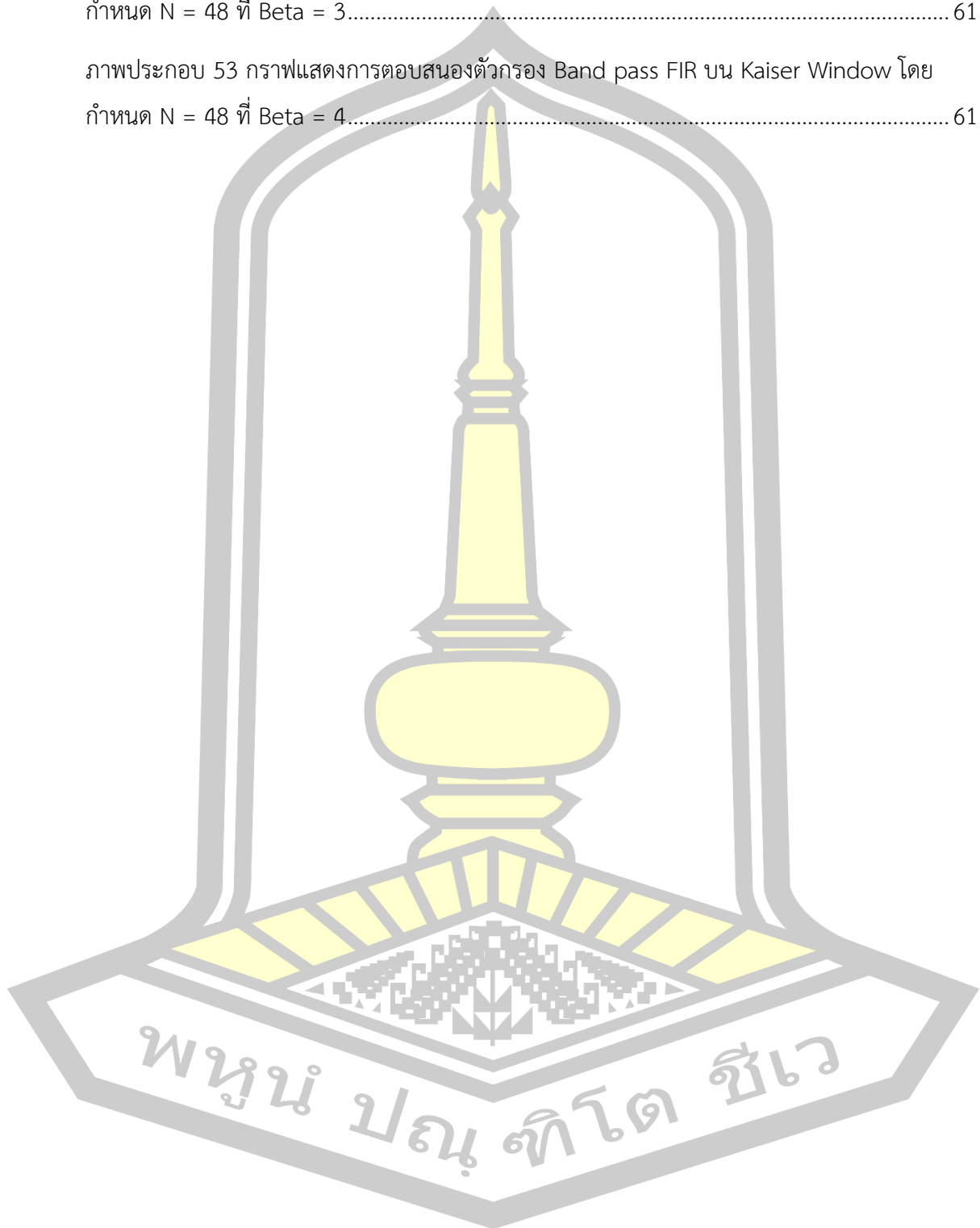
	หน้า
ภาพประกอบ 1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน	5
ภาพประกอบ 2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจกรอง FIR และ IIR.....	7
ภาพประกอบ 3 ตัวกรองดิจิทัล	8
ภาพประกอบ 4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์	8
ภาพประกอบ 5 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัว ที่ใช้เป็นองค์ประกอบของตัวกรองดิจิทัล.....	9
ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเอฟไออาร์.....	10
ภาพประกอบ 7 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ของเฟสเชิงเส้นของตัวกรอง 4 ชนิด.....	12
ภาพประกอบ 8 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ในทางอุดมคติ.....	12
ภาพประกอบ 9 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ.....	13
ภาพประกอบ 10 แสดงผลตอบสนองความถี่.....	15
ภาพประกอบ 11 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR.....	16
ภาพประกอบ 12 โครงสร้างแบบแลตทิซ.....	22
ภาพประกอบ 13 ผลตอบสนองความถี่ของวงจกรองความถี่ในอุดมคติ	23
ภาพประกอบ 14 แสดงผลตอบสนองกรณีกกรองเฉพาะแถบความถี่	24
ภาพประกอบ 15 แสดงผลตอบสนองกรณีกกรองความถี่ต่ำ	26
ภาพประกอบ 16 แสดงผลตอบสนองกรณีกกรองความถี่สูง.....	27
ภาพประกอบ 17 แสดงผลตอบสนองของวงจรถัดเฉพาะแถบความถี่	28
ภาพประกอบ 18 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจกรองแบบต่างๆ	29
ภาพประกอบ 19 ตัวอย่าง WinTool หน้าต่าง Kaiser	31
ภาพประกอบ 20 แสดง Kaiser window and transform for $\alpha = 1,2,3$	32

ภาพประกอบ 21 แสดงให้เห็นการพล็อตของหน้าต่างโคเชอร์ สำหรับค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ Beta = 0, 2, 4, 6, 8, 10.....	32
ภาพประกอบ 22 แสดง Kaiser window transform magnitude for various Beta.....	33
ภาพประกอบ 23 Kaiser window transform magnitudes for various window lengths.....	34
ภาพประกอบ 24 Flowchart ของการดำเนินการวิจัย	40
ภาพประกอบ 25 Flowchart ของการดำเนินการวิจัย (ต่อ).....	41
ภาพประกอบ 26 การตอบสนองความถี่ของวงจร Band Pass Filter	42
ภาพประกอบ 27 ตัวอย่าง WinTool แสดงการออกแบบวิธีหน้าต่าง (1).....	43
ภาพประกอบ 28 ตัวอย่าง WinTool แสดงการออกแบบวิธีหน้าต่าง (2).....	44
ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 0.....	48
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 1	49
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 2	49
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 3	49
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 4	50
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงการตอบสนอง Amplitude Time Domain ของ Kaiser Window..	50
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude Frequency Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 38 ที่ Beta = 0, 1, 2, 3, 4.....	51
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window	52
ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด N = 48 ที่ Beta = 1	52

ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 2$	53
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 3$	53
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 4$	53
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงการตอบสนอง Amplitude Time Domain ของ Kaiser Window..	54
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude Frequency Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 0, 1, 2, 3, 4$	54
ภาพประกอบ 43 แสดงฟังก์ชัน FDATool ที่ใช้ออกแบบฟังก์ชันหน้าต่าง	57
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 0$	57
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 1$	58
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 2$	58
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 3$	58
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 4$	59
ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 0$	60
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 1$	60
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 2$	60

ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดย
กำหนด $N = 48$ ที่ $\text{Beta} = 3$ 61

ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดย
กำหนด $N = 48$ ที่ $\text{Beta} = 4$ 61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันได้มีการนำเอาวงจรดิจิทัลมาใช้ในการคำนวณและสร้างเป็นตัวกรองแบบอนเนกประสงค์ และปรับค่าได้ง่ายขึ้น ตัวกรองความถี่นับเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ด้านระบบการสื่อสาร ระบบการควบคุม รวมไปถึงทางด้านเครื่องมือแพทย์ โดยในปัจจุบันนี้ตัวกรองความถี่แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ ตัวกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog filter) และ ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) [1]

ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ ได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หรือ FIR (Finite Impulse Response) และ ประเภทปัจจุบันได้มีการนำเอาวงจรดิจิทัลมาใช้ในการคำนวณและสร้างเป็นตัวกรองแบบอนเนกประสงค์ และปรับค่าได้ง่ายขึ้น ตัวกรองความถี่นับเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ด้านระบบการสื่อสาร ระบบการควบคุม รวมไปถึงทางด้านเครื่องมือแพทย์ โดยในปัจจุบันนี้ตัวกรองความถี่แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ ตัวกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog filter) และ ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) [1]

ผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด หรือ IIR (Infinite Impulse Response) [2] โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแล้วตัวกรองความถี่ดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response) มีข้อดีมากกว่าตัวกรองความถี่ดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response) และนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการออกแบบมากกว่าและมีเสถียรภาพดีกว่า [3]

ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลยังสามารถแบ่งตามตามคุณลักษณะของผลตอบสนองของความถี่ (Frequency response) ได้ อีกเป็น 4 ประเภท คือ ตัวกรองความถี่แบบสูงผ่าน (High pass filter : HPF) ซึ่งเป็นตัวกรองความถี่ที่จะส่งผ่านสัญญาณความถี่สูงกว่าค่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้, ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter : LPF) เป็นตัวกรองความถี่ที่จะส่งผ่านสัญญาณความถี่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่สูงกว่าค่าที่เลือกไว้, ตัวกรองความถี่แบบหยุดแถบ (Band stop filter : BSF) เป็นตัวกรองความถี่ที่จะยอมให้สัญญาณความถี่ลอดผ่านไปได้หมด

ยกเว้นแถบความถี่ช่วงหนึ่งที่จะไม่ยอมให้ผ่านไป และ ตัวกรองความถี่แบบผ่านแถบ (Band pass filter : BPF) เป็นตัวกรองความถี่แบบหนึ่งที่จะยอมให้แถบความถี่ช่วงหนึ่งที่เลือกไว้ผ่านไปเท่านั้น โดยจะลดทอนความถี่อื่นได้นอกเหนือจากช่วงกว้างของแถบความถี่ที่ได้เลือกไว้ [4] วิธีพื้นฐานในการออกแบบตัวกรองความถี่ โดยมีสิ่งสำคัญในการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต้นแบบจากผลตอบสนองของความถี่ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติ ซึ่งวิธีหน้าต่าง (Window Method) เป็นวิธีที่สามารถออกแบบตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ง่าย โดยวิธีหน้าต่าง (Window Method) แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ หน้าต่างสี่เหลี่ยม (Rectangular Window), หน้าต่างฮานนิง (Hanning Window), หน้าต่างแฮมมิง (Hamming Window), หน้าต่างแบล็กแมน (Blackman Window) และ หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) [5]

หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) เป็นหน้าต่างประเภทเดียวที่สามารถปรับค่าความพลัวหรือริบเปิลของแถบผ่าน (Pass-band ripple) และ อัตราการลดทอนของแถบหยุด (Stop-band attenuation) ให้เป็นไปตามความต้องการได้ [6] จากงานวิจัยการออกแบบวิธีหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ได้มีการนำตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter : LPF) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับหน้าต่างดังกล่าว [7] โดยเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม อาทิ ค่าเบต้า ค่าความถี่ตัด ค่าความถี่สุม เป็นต้น โดยงานวิจัยข้างต้นวิเคราะห์เพียงช่วงความถี่ต่ำซึ่งยังไม่สามารถเลือกปรับค่าได้ในช่วงย่านความถี่ที่ต้องการอย่างเช่นความถี่แบบผ่านแถบ (Band pass filter)

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวกรองประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response) โดยเลือกใช้ตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ด้วยวิธีหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ซึ่งพิจารณาผลการออกแบบจากรูปกราฟที่ปรากฏ ความกว้างของกลีบหลัก (Mainlobe width) การลดทอนของกลีบข้างสัมพัทธ์ (Relative sidelobe attenuation) ซึ่งทำการทดสอบบนโปรแกรม MATLAB

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

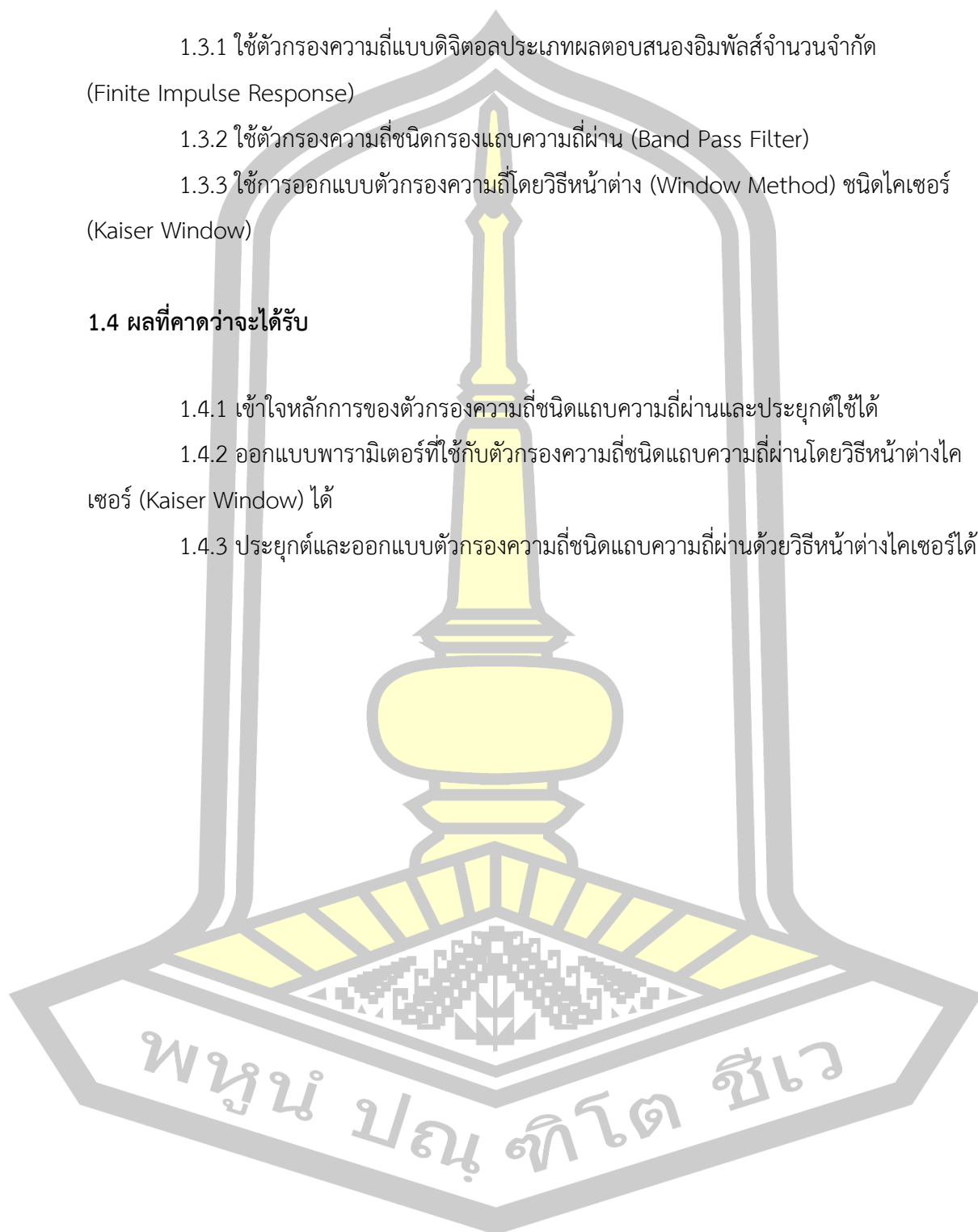
- 1.2.1 เพื่อศึกษาตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่าน
- 1.2.2 เพื่อออกแบบตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่านด้วยฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response)
- 1.3.2 ใช้ตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)
- 1.3.3 ใช้การออกแบบตัวกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง (Window Method) ชนิดไคเซอร์ (Kaiser Window)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจหลักการของตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่านและประยุกต์ใช้ได้
- 1.4.2 ออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่านโดยวิธีหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ได้
- 1.4.3 ประยุกต์และออกแบบตัวกรองความถี่ชนิดแถบความถี่ผ่านด้วยวิธีหน้าต่างไคเซอร์ได้



บทที่ 2

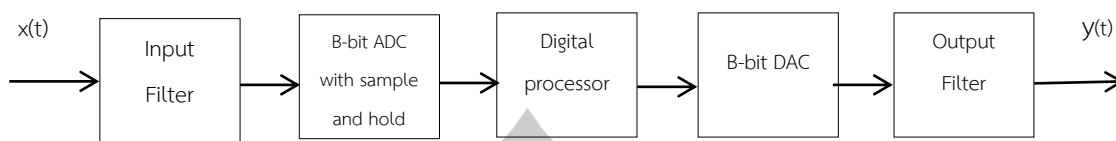
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวกรองดิจิทัล

คำว่าตัวกรอง หรือ วงจรกรอง (Filters) บ่อยครั้งใช้ในการอธิบายรูปแบบของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และถูกใช้กับกลุ่มของข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนมาก เพื่อจะดึงข้อมูลของกลุ่มที่สนใจในช่วงหนึ่งออกมา อาจกล่าวได้ว่าตัวกรองใช้เพื่อปฏิบัติในกระบวนการเกี่ยวกับข่าวสารพื้นฐานสามอย่าง คือ การกรอง (Filtering) ซึ่งหมายถึงการนำเฉพาะข่าวสารข้อมูลที่น่าสนใจช่วงเวลาหนึ่งออกมา โดยการใช้ข้อมูลซึ่งรับได้ในเวลานั้น การทำให้เรียบ (Soothing) ต่างจากการกรอง โดยที่กลุ่มข่าวสารที่สนใจไม่จำเป็นต้องมีอยู่ในช่วงเวลา t และข้อมูลที่ถูกวัดหลังช่วงเวลา t สามารถถูกใช้เพื่อให้ได้ข่าวสารนี้มาได้ หมายความว่าในกรณีของการทำให้เรียบจะมีการหน่วงเวลาการคัดผลที่น่าสนใจ และใช้ข้อมูลที่ได้มาในช่วงเวลา t และได้มาหลังช่วงเวลา t ควบคู่กัน ทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากกว่าการกรอง และการทำนาย (Prediction) เป็นการทำนายล่วงหน้าของค่าประมาณนั้นๆ สามารถทำนายถึงข้อมูลที่น่าสนใจในอนาคตได้ โดยใช้ข้อมูลก่อนหน้าและข้อมูลปัจจุบัน[8]

ตัวกรองความถี่ นับเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมาก ไม่ว่าจะทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และด้านการสื่อสาร การควบคุม และทางด้านเครื่องมือแพทย์ ในปัจจุบันนี้ตัวกรองความถี่แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือตัวกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog filter) และ ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital filter) นอกจากนั้นแล้ว ยังสามารถแบ่งตัวกรองความถี่ตามคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่ (Frequency response) ได้อีกคือ ตัวกรองความถี่แบบต่ำผ่าน ตัวกรองความถี่แบบสูงผ่าน ตัวกรองความถี่แบบผ่านแถบ ตัวกรองความถี่หยุดแถบ หรือ Notch filter และตัวกรองความถี่แบบผ่านทุกความถี่ (All-pass filter)[9]

ตัวกรองดิจิทัล (Digital Filter) เป็นตัวกรองรูปแบบหนึ่งที่ถูกสร้างและออกแบบโดยวงจรดิจิทัล มีไดอะแกรมของการทำงานดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน

จากภาพประกอบ 1 สัญญาณแอนะล็อก $x(t)$ คือ สัญญาณอินพุตของตัวกรองสัญญาณ จะถูกส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล $x(n)$ และ สัญญาณดิจิทัลนี้จะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผล ผลที่ได้จากการคำนวณยังคงเป็นสัญญาณดิจิทัล $y(n)$ จากนั้นจะถูกส่งผ่านมายังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก ได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกรองเป็นสัญญาณแอนะล็อก $y(t)$

ระบบประมวลผลสัญญาณโดยส่วนใหญ่ แสดงในภาพประกอบ 1 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ วงจรสุ่มสัญญาณ (Sample) สัญญาณขาเข้าของวงจรนี้เป็นสัญญาณแบบอนาล็อก $x(t)$ ส่วนสัญญาณขาออกเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง $x(n)$ พารามิเตอร์วงจรสุ่มสัญญาณนี้ คือ ค่าอัตราการสุ่ม (Sampling rate) หรือ ความถี่ในการสุ่ม ใช้สัญลักษณ์ แทนว่า f_s ค่านี้ จะเป็นตัวที่กำหนดว่าวงจรสุ่มจะสุ่มด้วยอัตรากี่ครั้งต่อวินาที หรือ เฮิร์ตซ์ (Hz)

วงจรแบ่งขั้นสัญญาณ (Quantizer) สัญญาณ $x(n)$ ที่ได้จากวงจรสุ่มสัญญาณถือว่ามีค่าความละเอียดเต็มที่ในทางขนาด ซึ่งในส่วนของการทำงานเมื่อนำไปใช้งานจะต้องลดความละเอียดของ $x(n)$ ลงให้สามารถแทนได้ด้วยสัญญาณดิจิทัลที่มีจำนวนบิตจำกัด กระบวนการลดความละเอียดนี้ เรียกว่า การแบ่งขั้นของสัญญาณ (Quantization) ความละเอียดนี้ที่ได้จากการแบ่งขั้นสัญญาณขึ้นกับจำนวนบิตที่ใช้ การแบ่งขั้นสัญญาณทำให้ค่าสัญญาณที่ได้คลาดเคลื่อนไปจาก $x(n)$ ซึ่งจะส่งผลเหมือนมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

2. วงจรประมวลผลสัญญาณ ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ $x(n)$ เพื่อกระทำผลบางอย่างกับสัญญาณ เช่น เป็นวงจรกรองความถี่บางย่านออกและให้ผลลัพธ์ของการประมวลผลเป็นสัญญาณขาออก $y(n)$ วงจรประมวลผลสัญญาณนี้แท้จริงก็คือตัวคำนวณนั่นเอง กล่าวได้ว่า มันกระทำการคำนวณหาสัญญาณขาออกจากสัญญาณขาเข้า

3. วงจรสร้างสัญญาณคืน (Signal Reconstruction) ใช้ในระบบที่มีสัญญาณขาออกสุดท้ายเป็นสัญญาณต่อเนื่อง โดยทำหน้าที่แปลงสัญญาณไม่ต่อเนื่อง $y(n)$ ให้กลับเป็นสัญญาณต่อเนื่อง $y(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณขาออกสุดท้ายของระบบ วงจรประเภทนี้คือ ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A Converter)

2.2 ประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล

การแบ่งประเภทของวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล จะแบ่งตามผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบได้เป็น 2 ชนิด ดังแสดงในภาพประกอบ 2 คือ ตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หรือ ตัวกรองแบบ FIR (Finite Impulse Response) และ ตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด หรือตัวกรองแบบ IIR (Infinite Impulse Response) โดยตัวกรองความถี่แบบ FIR นั้น ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จะมีเฉพาะซีโร่ (Zero) ไม่มีโพล (Pole) ทำให้ระบบมีความเสถียรภาพแน่นอน และมีผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear phase) แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้จำนวนอันดับ (Order) สูงจึงจะทำให้ตัวกรองทำงานได้ดี ส่วนตัวกรองความถี่แบบ IIR นั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนจะประกอบด้วย ซีโร่ (Zero) และโพล (Pole) ทำให้มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพที่ไม่แน่นอน แต่ถ้ามีการออกแบบที่ดีจะทำให้ปัญหาดังกล่าวลดลงหรือไม่เกิดขึ้นเลย ข้อดีของตัวกรองความถี่แบบ IIR จะใช้จำนวนอันดับน้อยกว่า ซึ่งทำให้การคำนวณน้อยกว่าด้วย [10] การเลือกใช้งานระหว่าง FIR และ IIR สามารถเลือกให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้

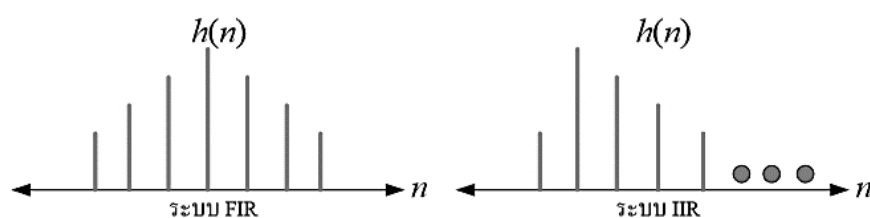
การเลือกใช้งานระหว่าง FIR และ IIR สามารถสรุปได้ ดังนี้ [11]

1. การประยุกต์ใช้งานทางการส่งข้อมูล (Data transmission) เครื่องมือทางการแพทย์ (Biomedicine) การประมวลผลภาพ (Image processing) จำเป็นต้องใช้ตัวกรองความถี่ที่ให้ผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น ดังนั้นตัวกรองความถี่แบบ FIR จึงเหมาะสมกว่าแบบ IIR
2. สำหรับการใช้งานที่เวลาจริงซึ่งต้องมีการจำกัดจำนวนบิตนั้น การคำนวณสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะต้องทำการปัดเศษ (Round-off) ซึ่งจะทำให้เกิด round-off noise ขึ้น ซึ่ง round-off noise นี้จะเกิดขึ้นในตัวกรองแบบ FIR น้อยกว่าที่เกิดขึ้นในตัวกรองแบบ IIR

3. ในกรณีที่มีความต้องการความชันในช่วงแถบความถี่ตัด (Cut off frequency) สูงนั้น ตัวกรองแบบ FIR ต้องใช้จำนวนอันดับสูงกว่า ทำให้มีสัมประสิทธิ์จำนวนมากกว่าและมีความยุ่งยากกว่าตัวกรองแบบ IIR เนื่องจากตัวกรองแบบ IIR มีผลตอบสนองทางแอมพลิจูดดีกว่าตัวกรองแบบ FIR
4. ตัวกรองความถี่แบบ IIR สามารถออกแบบได้โดยตรงจากตัวกรองที่เป็นแบบแอนะล็อก แต่ตัวกรองความถี่แบบ FIR ไม่สามารถทำได้
5. ตัวกรองความถี่แบบ FIR จะสังเคราะห์ที่ได้ค่อนข้างยาก ถ้าหากไม่ใช้คอมพิวเตอร์ (CAD) ช่วยในการออกแบบ

จากทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแนวทางสำหรับการใช้งาน ได้ดังนี้[12]

1. ในงานที่มีความต้องการความชันในช่วงแถบความถี่ตัดสูง ตัวกรองแบบ IIR จะใช้จำนวนอันดับที่น้อยกว่า ทำให้ตัวหน่วง และความยุ่งยากของตัวกรองน้อยกว่าตัวกรองความถี่แบบ FIR
2. ตัวกรองความถี่แบบ FIR จะเหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยำทางเฟส เช่น เครื่องมือทางการแพทย์ หรือ การประมวลผลภาพ



ภาพประกอบ 2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรอง FIR และ IIR

ในที่นี้จะขอก้าวถึง การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด หรือ FIR เนื่องจากมีลักษณะเด่น คือ มีผลตอบสนองทางเฟสแบบเชิงเส้น (Linear phase) เหมาะสำหรับการพัฒนา เครื่องมือวัดทางด้านการแพทย์ และในงานที่เกี่ยวข้อง[13]



ภาพประกอบ 3 ตัวกรองดิจิทัล

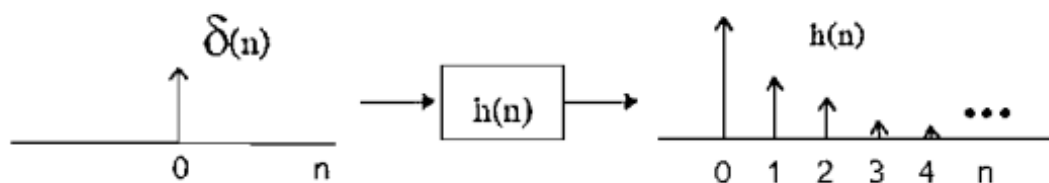
เนื่องจาก FIR ที่เราพิจารณานั้นให้ผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear phase) ดังนั้นการออกแบบจึงกระทำโดยใช้การพิจารณาทางขนาด (Magnitude) เท่านั้น

วิธีที่นิยมใช้ในการออกแบบมี 2 วิธี ดังนี้

- 1) การออกแบบโดยใช้หน้าต่าง (Window Method)
- 2) การออกแบบ FIR โดยเทคนิคสุ่มความถี่ (Frequency Sampling Method)

2.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse Response)

ระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่แปรตามเวลามีคุณลักษณะพิเศษ คือ สามารถระบุคุณลักษณะของระบบได้โดยสมบูรณ์ด้วยผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนว่า $h(n)$ คือ สัญญาณขาออกของระบบเมื่อมีสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณอิมพัลส์ ดังภาพประกอบ 4[14]



ภาพประกอบ 4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์

ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์สามารถเป็นตัวแทนของระบบได้ เนื่องจากเมื่อทราบผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ เราจะสามารถหาผลตอบสนองของระบบเมื่อสัญญาณขาเข้าเป็นสัญญาณใดๆได้ พิสูจน์โดยสมมติว่า $x(n)$ เป็นสัญญาณขาเข้าที่เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องใดๆ เพื่อให้

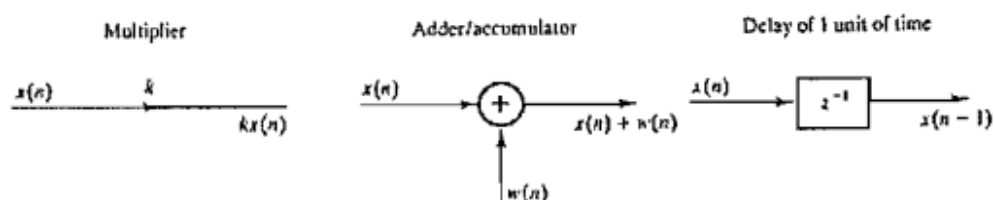
ง่ายต่อการวิเคราะห์ สมมติว่า $x(n]$ เริ่มมีค่าที่ $n=0$ สามารถเขียน $x(n]$ กระจายเป็นผลบวกของสัญญาณอิมพัลส์ที่ค่าเวลา $n= 0,1,2,3, \dots$

2.4 วงจรกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (Finite Impulse Response)

ตัวกรองดิจิทัลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (FIR : Finite Impulse Response Filter)
- 2) ตัวกรองดิจิทัลแบบไอไออาร์ (IIR : Infinite Impulse Response Filter)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (Finite Impulse Response) ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐาน ประกอบด้วย ตัวบวก (Adder) ตัวคูณ (Multiplier) ตัวหน่วง (Delay) สัญลักษณ์ขององค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัว สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 5 [15]

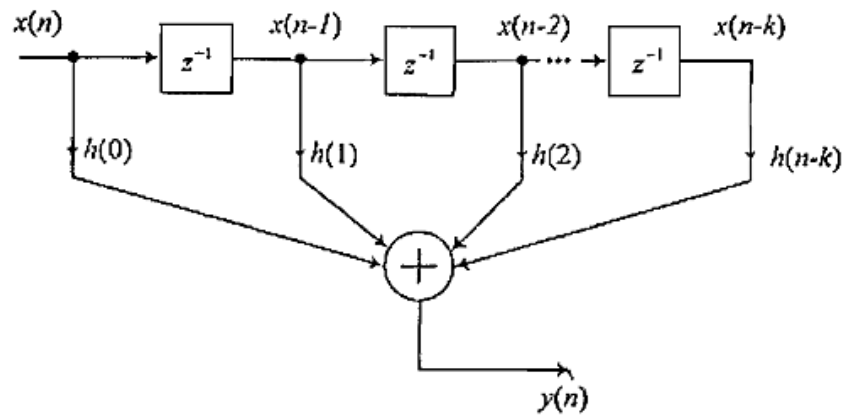


ภาพประกอบ 5 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัว ที่ใช้เป็นองค์ประกอบของตัวกรองดิจิทัล

ตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์มีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการที่ 2-18 และมีสมการเอาต์พุตดังสมการที่ 2-19 และจากสมการที่ 2-19 สามารถนำมาจัดเป็นโครงสร้างได้เป็นแบบตรง (Direct Form) ดังภาพประกอบที่ 5

$$H(z) = \sum_{k=0}^{n-1} h(k)Z^{-k} \quad 2.18$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n-1} h(k)x(n-k) \quad 2.19$$



ภาพประกอบ 6 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเฟสโออาร์

พิจารณาสมการ

$$y(n) = x(n - k) \quad 2.20$$

เมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ในสมการที่ 2.20 จะได้

$$Y(j\omega) = e^{-i\omega k/T} X(j\omega) \quad 2.21$$

ย้ายข้างจะได้

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = H(j\omega) = e^{-i\omega kT} \quad 2.22$$

จากสมการจะมีขนาด (Magnitude) เท่ากับ 1 และมีเฟสดังสมการ 2.23

$$\theta(\omega) = -\alpha\omega \quad 2.23$$

จากสมการ 2.23 ซึ่งเป็นสมการของเฟสสามารถนำไปหาค่าห้วงกลุ่มได้โดยการหาอนุพันธ์สมการที่ 2.23 เทียบกับ ω จะได้สมการค่าห้วงกลุ่ม ดังสมการ 2.24

$$d\theta = \frac{d(-\omega kT)}{d\omega} \quad 2.24$$

$$\theta = -kT \quad 2.25$$

จากสมการ 2.26 จะเห็นว่าตัวกรองแบบเฟอไออาร์ มีผลตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้น ถ้ากำหนดสมการผลตอบสนองทางเฟสใหม่ โดยกำหนด

$$kT = \alpha \quad 2.26$$

จะได้ $\theta(\omega) = -\alpha\omega$

หรือ ถ้าค่าของผลตอบสนองทางเฟสเท่ากับ $\theta(\omega) = \beta - \alpha\omega$ โดย β เป็นค่าคงที่

ถ้าตัวกรองมีผลตอบสนองทางเฟสและค่าหน่วงกลุ่มเป็นแบบเชิงเส้น ตามสมการ 2.26 จะให้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองเป็นแบบสมมาตรบวก ดังสมการที่ (2-29a) และ (2.29b) ซึ่งผลตอบสนองทางเฟสจะเป็นฟังก์ชันของความยาวของตัวกรอง (Filter Length)

$$h(n) = h(N - n - 1) \quad \text{ที่ } n = 0, 1, \dots, (N-1)/2 \text{ และ } n \text{ เป็นคี่ (2.29a)}$$

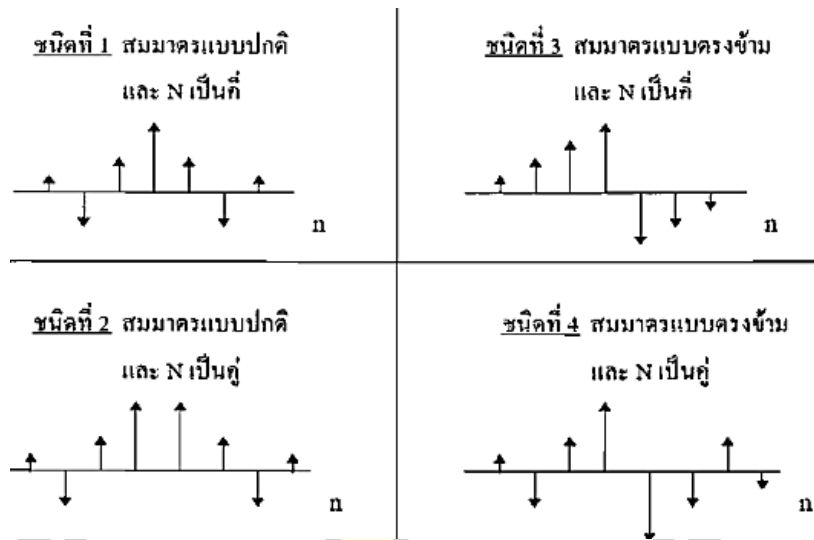
$$\alpha = \frac{N-1}{2} \quad \text{ที่ } n = 0, 1, \dots, (N-2)-1 \text{ และ } n \text{ เป็นคู่ (2.29b)}$$

และถ้าฟิลเตอร์มีผลการตอบสนองทางเฟสดังสมการที่ 2-26 จะได้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองเป็นแบบสมมาตรลบ ดังสมการ

$$h(n) = -h(N - n - 1) \quad (2.30a)$$

$$\alpha = \frac{N-1}{2} \quad (2.30b)$$

โดยที่ ในสมการ (2.29a) และ (2.30a) เป็นจำนวนลำดับของตัวกรอง และ $0 \leq n \leq N - 1$ และจากสมการ (2.29) และ (2.30) สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ ดังภาพประกอบ 7

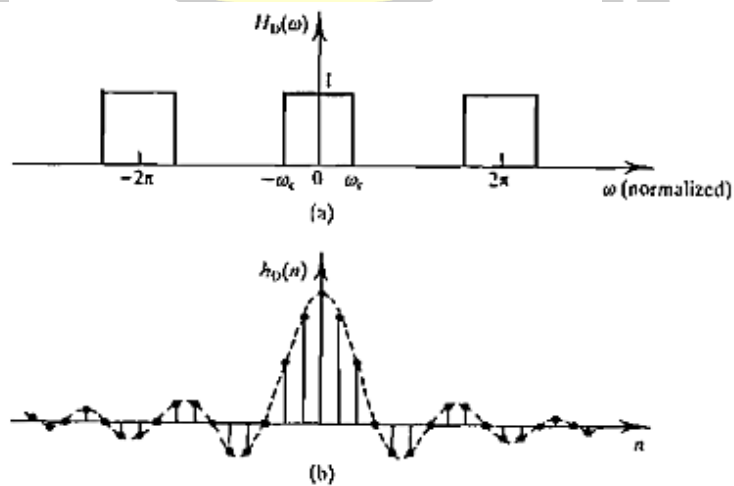


ภาพประกอบ 7 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ของเฟสเชิงเส้นของตัวกรอง 4 ชนิด

2.5 การออกแบบตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์

2.5.1 การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง (Window method)

การออกแบบตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์จะใช้วิธีฟูเรียร์ซีรีส์มาทำการออกแบบ พิจารณาจากภาพประกอบ 8[16]

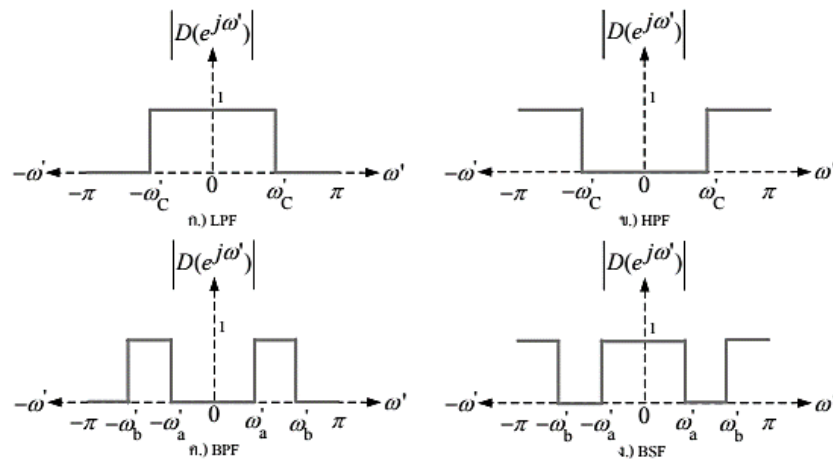


ภาพประกอบ 8 แสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ในทางอุดมคติ

(a) แสดงการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ

(b) แสดงการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ

การออกแบบวงจรกรองความถี่โดยวิธีหน้าต่าง (window method) ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ โดยใช้วิธีหน้าต่างนั้น ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐาน โดยมีสิ่งที่สำคัญคือการหาผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรอง ความถี่ต้นแบบจากผลตอบสนองของความถี่ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติ ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองอุดมคติ

จากภาพประกอบ 9 จะสมมติให้ $d(n)$ แทนเป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ และกำหนดให้ $D(e^{j\omega'})$ แทน ผลตอบสนองเชิงความถี่ สำหรับตัวกรองความถี่ในอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังที่ได้แสดงใน ภาพประกอบ 10 (ก) เราจะหาผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ในอุดมคติได้ โดยใช้เทคนิคของการ แปลงฟูรีเยอร์แบบเวลาไม่ต่อเนื่องชนิดผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDTFT) เช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นต้น

ตัวกรองที่มีผลตอบสนองทางความถี่ $H_D(\omega)$ สามารถหาค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ $h_d(n)$ ได้ จากความสัมพันธ์ของการแปลงกลับของฟูรีเยอร์ดังสมการ 2.31

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int H_D(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad 2.31$$

พิจารณาจากภาพ ซึ่งเป็นกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งมีค่าความถี่คัทออฟ คือ ω_c โดยที่ ω_c นี้จะเป็นความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalize frequency) ซึ่งมีค่าดังสมการ 2-32

$$f = \frac{f_c}{f_s} \quad 2.32$$

โดยที่ f คือ ความถี่คัทออฟนอร์มอลไลซ์ (Normalize Cut-off Frequency)

f_c คือ ความถี่คัทออฟ (Cut-off Frequency)

f_s คือ ความถี่สุ่ม (Sampling Frequency)

จากกราฟจะเห็นได้ว่า $H_D(\omega)$ จะมีค่าเท่ากับ 1 ในช่วงตั้งแต่ $-\omega_c$ ถึง $+\omega_c$ ดังนั้นค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ จะหาได้จากสมการที่ 2-32

$$h_D(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 1 \cdot e^{-i\omega n} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{-i\omega n} d\omega \quad 2.33$$

$$h_D(n) = \frac{\sin(\omega_c n)}{n\pi} \quad 2.34$$

$$n = \frac{M-1}{2} \quad 2.35$$

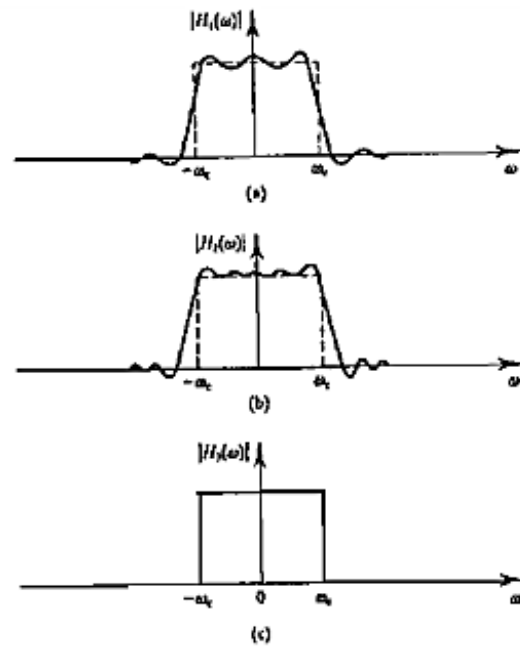
$$\omega_c = 2\pi f \quad 2.36$$

โดยที่ ω_c คือ ความถี่คัทออฟนอร์มอลไลซ์ (Normalize Cut-off Frequency) (Rad/sec)

M คือ จำนวนอันดับ (Order)

เนื่องจากค่าผลตอบสนองอิมพัลส์นั้นมีความสมมาตรกัน ดังนั้นในการหาค่าจะทำการหาเพียงครึ่งหนึ่งก็เพียงพอ

ตัวกรองแบบเอฟโออาร์จะมีผลตอบสนองทางความถี่เป็นแบบอูทมคติก็ต่อเมื่อ มีการใช้สัมประสิทธิ์เป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟโออาร์ มีการกระเพื่อม หรือ Ripple เกิดขึ้น ถ้าจำนวนสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยก็จะทำให้เกิดการกระเพื่อมมาก แต่ถ้าสัมประสิทธิ์จำนวนมากขึ้นก็จะทำให้ค่าการกระเพื่อมน้อยลง ซึ่งจะมีผลใกล้เคียงกับผลตอบสนองทางอูทมคติมากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงผลตอบสนองความถี่

(a) สัมประสิทธิ์ 13 ตัว (b) สัมประสิทธิ์ 15 ตัว (c) สัมประสิทธิ์เป็นอนันต์

เพื่อให้ผลตอบสนองความถี่มีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ในทางอุดมคติ จึงได้มีการคิดค้นเพื่อหาวิธีการแก้ปัญหา โดยการนำสัมประสิทธิ์ $h_D(n)$ คูณกับสัมประสิทธิ์อีกตัวหนึ่ง สัมประสิทธิ์ตัวนี้ก็คือ $w(n)$ ผลที่ได้จากการคูณจะเป็นสัมประสิทธิ์ตัวใหม่หรือ $h(n)$ ซึ่งการหาสัมประสิทธิ์ $h(n)$ นี้เรียกว่า การหาฟังก์ชันของวินโดว์ (Window Function) สมการของ $h(n)$ แสดงดังสมการที่ 2.37

$$h(n) = h_D(n) \cdot w(n) \quad (2.37)$$

ก่อนที่จะทำการออกแบบนั้นจะต้องทำความเข้าใจ เพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่สำคัญๆตามลักษณะ เฉพาะของวิธีหน้าต่าง ต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่ เช่น ความถี่ตัด, อัตราการลดทอน, ความพลัวหรือริบเปิ้ลของแถบผ่าน และความกว้างของแถบเปลี่ยนดังนี้

1. ความพลั้วหรือริบเปิดของแถบผ่าน (Pass-band Ripple ; δ_{pass}) คือ ค่าสูงสุดที่ขนาดแถบผ่านแกว่งออกห่างจากค่า 1 บางครั้งวัดเป็น dB โดยใช้ตามสมการที่ (2.38)

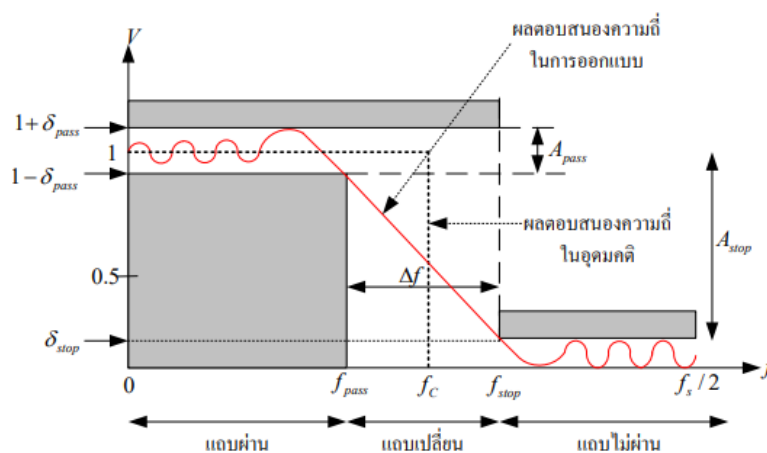
$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \quad (\text{dB}) \quad (2.38)$$

2. การลดทอนของแถบหยุด (Stop-band Attenuation ; A_{stop}) คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลงจาก 1 วัดค่าเป็น dB โดยการลดทอนของแถบหยุดมีความสัมพันธ์กับความพลั้วของแถบหยุด แสดงดังสมการที่ (2.39)

$$A_{stop} = 20 \log \delta_{stop} \quad (\text{dB}) \quad (2.39)$$

3. ความกว้างของแถบเปลี่ยน (Transition band width ; Δf) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเทียบกับช่วงความถี่

4. ความถี่ตัด (Cutoff Frequency ; f_c) คือ จุดตัดของความถี่ที่ให้สัญญาณผ่านหรือไม่ผ่านไป ยังหัวออกของวงจรรอง สำหรับวงจรรองความถี่ของ FIR กำหนดค่าความถี่ที่ขนาด ลดลงประมาณ 0.5 หรืออยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของแถบเปลี่ยน นิยามนี้แตกต่างกับแบบ IIR ที่ใช้นิยามเดียวกันกับวงจรรองแบบแอนาล็อกคือที่ขนาดลดลงประมาณ 0.707



ภาพประกอบ 11 คุณลักษณะเฉพาะของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแบบ FIR

การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆได้ดังนี้

1. ใช้ค่าความพลัวหรือริบเปิดของแถบผ่าน หรือการลดทอนของแถบหยุด อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อเลือกชนิดของหน้าต่างที่สามารถใช้ได้ ถ้ามีข้อกำหนดทั้งสองอย่างให้เปลี่ยน A_{stop} เป็น δ_{stop} ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน ถ้า δ_{pass} น้อยกว่าให้ใช้ δ_{pass} เป็นตัวเลือกหน้าต่าง โดยมีหลักการว่า δ_{pass} ในตารางต้องน้อยกว่าที่ต้องการ และ A_{stop} ในตารางต้องมากกว่าที่ต้องการ

2. ใช้ค่าความกว้างของแถบเปลี่ยนหาค่าอันดับของตัวกรองที่ต้องใช้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง Δf กับ N ที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 จากนั้นคำนวณฟังก์ชันหน้าต่างที่ต้องใช้ จะได้

$$w(n) \text{ ที่ } n = 0, 1, \dots, N-1 \quad 2.40$$

3. ใช้ชนิดของตัวกรองและความถี่คutoffที่ต้องการเลือกผลตอบสนองอิมพัลส์ $d(n)$ ที่ถูกต้อง

ตาราง 1 พารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ของหน้าต่างแบบต่างๆ

หน้าต่าง	δ_{pass} (%)	A_{stop} $= 20 \log \delta_{\text{stop}}$	Δf	$W(n), n = 0, 1, \dots, N-1$
สี่เหลี่ยม (rectangular)	8.9	21	$2/N$	1
ฮานนิง (Hanning)	0.63	44	$4/N$	$0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{N-1}$
แฮมมิง (Hamming)	0.22	53	$4/N$	$0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{N-1}$
แบล็กแมน (Blackman)	0.02	74	$6/N$	$0.42 - 0.5 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) - 0.08 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right)$
ไคเซอร์ (Kaiser)	ปรับได้	ปรับได้	$\frac{A - 7.95}{14.36(N-1)}$	$\frac{I_0 \left(\alpha \sqrt{1 - \left(n - \frac{N-1}{2} \right)^2 / \left(\frac{N-1}{2} \right)^2} \right)}{I_0(\alpha)}$

4. เลื่อน $d(n)$ ให้ล้าหลังลง จะได้สัญญาณเป็น $d(n-M)$ จากนั้นคูณเข้ากับฟังก์ชันหน้าต่าง $w(n)$ ที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งจะได้เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ที่มีความยาว N จุด

2.5.1 การออกแบบโดยวิธีสุ่มความถี่ (Frequency Sampling Method)

วิธีสุ่มความถี่เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวกรองที่มีรูปร่างของผลตอบสนองเชิงความถี่แปลกไปจากปกติ โดยวิธีนี้จะระบุจุดตัวอย่างของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ต้องการเป็นข้อกำหนดเริ่มต้นของการออกแบบ หลักการของการหาสัมประสิทธิ์สำหรับตัวกรองที่มีเฟสเชิงเส้นที่สมมาตรชนิดที่ 1 (N เป็นคี่) เป็นดังนี้

สมมติว่า $|D(e^{j\omega})|$ คือผลตอบสนองทางขนาดที่ต้องการซึ่งอาจจะมีรูปร่างใดๆก็ได้ และเป็นฟังก์ชันของ ω การที่จะได้ตัวกรองสุดท้ายมีเฟสเชิงเส้น จะได้ว่าเฟสระบบจะต้องเท่ากับ $-\omega M$ โดยที่ $M = \frac{N-1}{2}$ จะได้ผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการ คือ

$$D(e^{j\omega}) = e^{-j\omega M} |D(e^{j\omega})| \quad 2.41$$

2.6 ตัวกรองความถี่แบบไอโออาร์ (Infinite Impulse Response)

ตัวกรองความถี่แบบ IIR เป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้ที่สำคัญของระบบการประมวลผลแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-time processing) มีข้อดีหลายๆข้อที่เหนือกว่าตัวกรองแบบ FIR โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านผลตอบสนองทางแอมพลิจูด เช่น เมื่อมีความต้องการให้ช่วงแถบเปลี่ยน (Transition band) ของช่วงแถบความถี่ผ่าน (Pass band) หรือแถบความถี่หยุด (Stop band) มีความชันมากๆ โดยที่ตัวกรองแบบ IIR จะใช้จำนวนอันดับน้อยกว่าตัวกรองแบบ FIR ยังมีความยุ่งยากในการคำนวณน้อยกว่าอีกด้วย

ตัวกรองความถี่แบบ IIR จะมีสมการของสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณอินพุต ปัจจุบัน อินพุตในอดีต และสัญญาณเอาต์พุตในอดีต ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงผลต่าง (Difference equation) ได้ดังนี้[17]

$$y(n) = \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad 2.42$$

เมื่อ $x(n)$ คือ ลำดับของสัญญาณอินพุต

$y(n)$ คือ ลำดับของสัญญาณเอาต์พุต

N คือ จำนวนตัวอย่าง (Samples) ทั้งหมดของสัญญาณเอาต์พุตและอินพุตที่ทราบค่า

สมการ 2.42 สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาสัญญาณเอาต์พุตต่อกันไปได้ รูปแบบของการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตก่อนหน้ามาใช้สำหรับคำนวณหาสัญญาณเอาต์พุตต่อกันไปจะเรียกว่า recursive โดยทั่วไป ตัวกรองความถี่แบบ IIR และ ตัวกรองแบบ recursive มักจะนำมาใช้ในความหมายเดียวกัน ทั้งนี้เพราะสมการที่ 2.42 สามารถนำไปใช้สร้างตัวกรองความถี่ทั้งสองแบบได้เหมือนกัน คำว่า IIR จะหมายถึงรูปแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของตัวกรองความถี่แบบ FIR ก็สามารถสร้างรูปแบบ recursive หมายถึง ตัวกรองความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นมาอย่างไร ตัวกรองความถี่แบบ IIR ก็สามารถสร้างในรูปแบบ non-recursive ได้เหมือนกัน เพื่อความสะดวกจะนิยามตัวกรองความถี่แบบรีเคอร์ซีฟด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ ฟังก์ชันของระบบ (System function) โดยฟังก์ชันของระบบคือการแปลง z (Z-transform) ของผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ซึ่งจะอยู่ในรูปเศษส่วน (Rational function) ในตัวแปร z^{-1} ตามระบบสมการ 2.42 จะมีฟังก์ชันของระบบเป็นไปตามสมการ คือ

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad 2.43$$

จากสมการที่ 2.43 ถ้ากำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ จะสามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$H(z) = G \frac{\prod_{k=0}^M (1 - \beta_k z^{-1})}{\prod_{k=1}^N (1 - \alpha_k z^{-1})} \quad 2.44$$

ราก (Root) ของพหุนามตัวเศษ β_k เรียกว่าซีโร่ (Zeros) ของตัวกรองความถี่ และรากของตัวส่วน α_k เรียกว่าโพล (Poles) และ G เป็นอัตราขยายซึ่งมีค่าคงที่ โดยทั่วไปจำนวนของซีโร่และโพลจะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งานในการออกแบบ จำนวนอันดับ (Order) ของตัวกรองความถี่

แบบ IIR จะหาได้จากจำนวนรากของโพลที่อยู่ในระนาบ z ที่มีค่าจำกัด (Finite z -plane) ตัวกรองความถี่ที่มีความเป็นเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา (Linear time-invariant; LTI) จะมีคุณสมบัติเป็น causal ถ้าผลตอบสนองอิมพัลส์มีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $n < 0$ ตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตของตัวกรองความถี่เป็น causal จะขึ้นกับตัวอย่างสัญญาณอินพุตปัจจุบัน และในอดีตเท่านั้น ถ้าจำกัดสัญญาณอินพุตให้มีค่าเป็นศูนย์ $x(n) = 0$ สำหรับ $n < 0$ และค่าเริ่มต้นของ $y(-1) = y(-2) = \dots = y(-N) = 0$ จะทำให้ตัวกรองความถี่แบบ recursive ตามสมการ 2.42 มีคุณสมบัติเป็น causal ความเป็น causal ของตัวกรองความถี่ มีความสำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานเวลาจริง (Real time) เมื่อมีการ tick ของสัญญาณนาฬิกาจะได้ตัวอย่างอินพุต 1 ตัวอย่างจากนั้นตัวกรองความถี่จะต้องสร้างตัวอย่างของเอาต์พุตออกมาด้วย

ข้อควรคำนึงอีกข้อหนึ่งของตัวกรองความถี่แบบ IIR คือความเสถียร (Stable) ถ้าตัวกรองความถี่ไม่เสถียร (Unstable) จะทำให้ลำดับของสัญญาณเอาต์พุต เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขอบเขต ถ้าสัญญาณอินพุตยังคงป้อนให้อยู่ ซึ่งเสถียรภาพของตัวกรองความถี่แบบ IIR จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งโพลของฟังก์ชันระบบในระนาบ z ตัวกรองความถี่แบบ IIR ที่มีคุณสมบัติเป็น causal LTI จะมีความเสถียร ถ้าค่าโพลเป็นไปตามเงื่อนไข $|\alpha_k| < 1$ ซึ่งหมายความว่าตำแหน่งโพลทุกตัวจะต้องอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit circle) บนระนาบนั้นเอง

2.6.1 โครงสร้างของตัวกรองความถี่แบบ IIR

โครงสร้างของตัวกรองความถี่แบบ IIR มีหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบโดยตรง 1 และ 2 (Direct Forms I และ II), Transpose Form, Parallel Form, and Cascade Form ข้อสำคัญในการเลือกรูปแบบของโครงสร้างของตัวกรองนั้น พิจารณาจากความยุ่งยากในการคำนวณ เช่น จำนวนการคูณ (Multiplication) และ การหน่วง (Delay) ซึ่งการคูณนอกจากจะมีราคาแพงเมื่อนำไปทำฮาร์ดแวร์ แล้วยังสิ้นเปลืองเวลา (Time-consuming) ในการทำงานของตัวกรอง เมื่อสามารถลดหน่วยความจำที่ใช้ได้

2.6.1.1 รูปแบบตัวกรองโครงสร้างรูปแบบโดยตรง

สมการที่ 2.43 และ 2.44 ประกอบไปด้วยการบวกจำนวน $M+1$ ครั้ง สำหรับพจน์อินพุต $x(n), x(n-1), \dots, x(n-M)$ และ N ครั้งสำหรับพจน์เอาต์พุต $y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-N)$ และแต่ละพจน์จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ จากสมการ 2.42 สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

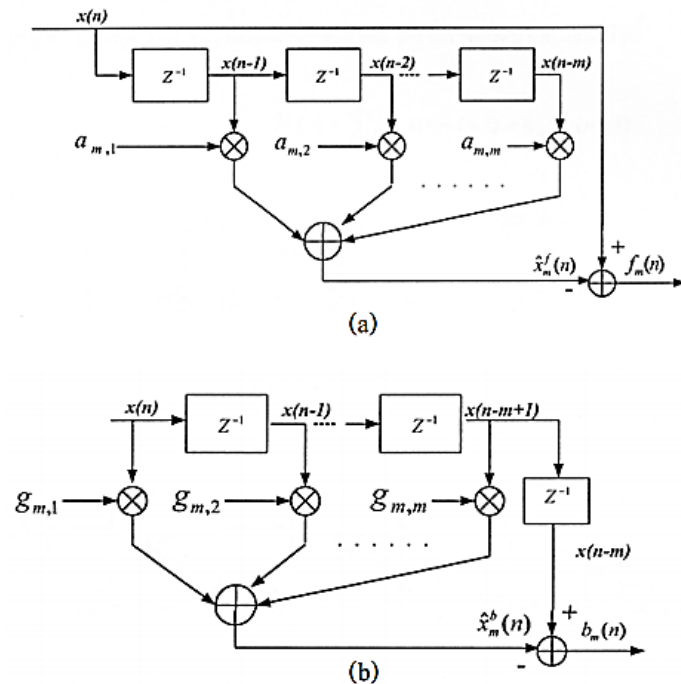
$$u(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) \quad 2.45$$

$$y(n) = -a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_Ny(n-N) + u(n) \quad 2.46$$

จากสมการ 2.45 และ 2.46 จะเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่แบบ IIR จะประกอบด้วยระบบย่อย (Subsystem) สองระบบต่อกันเป็นชั้น (Cascade) กัน กล่าวคือ ชั้นที่หนึ่งเป็นชั้นของฟังก์ชันเศษในสมการที่ 2.45 และชั้นที่สองเป็นชั้นของฟังก์ชันส่วนในสมการที่ 2.46 เมื่อนำสองส่วนนี้มารวมกันจะได้โครงสร้างรูปแบบโดยตรง 1 (Direct form 1) จะมีจำนวนพจน์ทั้งหมด $M+N+1$ พจน์ คือ $x(n), x(n-1), \dots, x(n-M), y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-N)$ แต่ละพจน์จะถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์ และนำมาบวกกัน ซึ่งจำนวนของการคูณสำหรับตัวอย่างเอาต์พุตแต่ละค่าจะเท่ากับจำนวนสัมประสิทธิ์ที่เป็น nontrivial เท่านั้น

2.6.1.2 ตัวกรองโครงสร้างรูปแบบแลตทิซ

ตัวกรองโครงสร้างรูปแบบแลตทิซเป็นโครงสร้างตัวกรองแบบ predictor-error หรือ PEF (predictor-error filter) ซึ่งประกอบด้วยการคูณสัญญาณด้วยสัมประสิทธิ์หลายครั้ง เพื่อให้กำลังงานเอาต์พุต (predictor-error) ของตัวกรองถูกทำให้น้อยที่สุด PEF ที่มีอยู่สองรูปแบบ แบ่งตามลำดับของอินพุต คือ forward PEF เป็นรูปแบบซึ่งออกแบบให้ลดค่า mean-square ของ forward predictor-error คือ ค่าความต่างของค่าที่ประมาณได้ในอนาคตและค่าที่แท้จริงของมัน ในขณะที่ backward PEF ได้ออกแบบให้ลดค่า mean-square ของ backward prediction-error ของค่าที่ประมาณได้ในอดีต และค่าที่แท้จริง จำนวนอันดับ (Order) ของตัวกรองคือจำนวนชั้นของโครงสร้างแบบแลตทิซนั่นเอง



ภาพประกอบ 12 โครงสร้างแบบแลตทิซ

- (a) โครงสร้างตัวกรองแบบ predictor-error (b) โครงสร้างตัวกรองแบบ forward PEF
(c) โครงสร้างตัวกรองแบบ backward PEF

โครงสร้างแบบแลตทิซมีข้อดีที่น่าสนใจ เช่น เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ละชั้นของตัวกรองเป็นอิสระต่อกัน โดยที่ backward prediction error ของเอาท์พุตแต่ละชั้นนั้น ตั้งฉากต่อกันเมื่อมีสัญญาณอินพุตแบบ WSS (Wide sense stationary) เมื่อต้องการเพิ่มอันดับของตัวกรองสามารถเพิ่มขึ้น (stage) ของตัวกรองได้เลย โดยไม่มีผลต่อ stage ก่อนหน้าของตัวกรอง และทุกชั้นของตัวกรองมีโครงสร้างเหมือน เหมาะสำหรับการสร้างตัวกรองบน VLSI (Very large scale integration)

2.7 การออกแบบตัวกรองความถี่

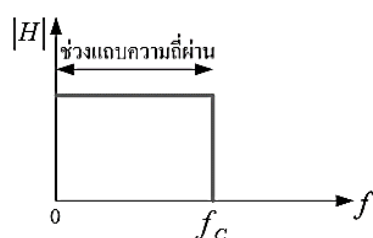
วงจรรองความถี่ (Filter) คือ วงจรเลือกความถี่ ซึ่งยอมให้สัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านได้ และลดทอนสัญญาณนอกเหนือจากความถี่ที่กำหนดซึ่งปกติสัญญาณดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของแรงดัน และสามารถแบ่งประเภทของวงจรรองความถี่ได้เป็น 2 ประเภท คือวงจรรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์

พาสซีฟ เช่น ตัวเก็บประจุตัวนำและตัวต้านทาน เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) ส่วนวงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์ออปแอมป์ที่ต่อรวมกับตัวเก็บประจุตัวต้านทาน เรียกว่าวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) หรืออาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งคือวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog filter)

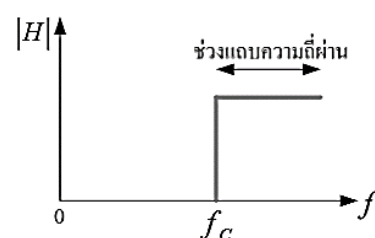
โดยทั่วไปแล้ววงจรกรองความถี่มีประโยชน์มากในงานอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ทั้งไปในการกรองสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณรบกวน (Noise) ออก การกรองสัญญาณฮาร์โมนิก (Harmonics) ต่างๆของคลื่นที่มีส่วนสำคัญออกมา เช่น คลื่นสี่เหลี่ยม คลื่น สามเหลี่ยม หรือใช้ในงานด้านสื่อสารเฉพาะกิจ สามารถกรองสัญญาณพาหะ (Carrier) ที่ต้องการได้

ส่วนหน้าที่ในการทำงานของวงจรกรองความถี่นั้นก็สามารถที่จะทำการจำแนกตามความต้องการของผู้ใช้ โดยแบ่งตามคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ดังภาพประกอบ 13 ได้ 4 ชนิด ดังนี้

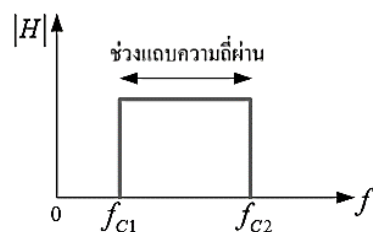
- 1) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass Filter : LPF) ,
- 2) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High pass Filter : HPF) ,
- 3) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass Filter : BPF)
- 4) วงจรกรองก้ำจัดแถบความถี่ (Band-Reject Filter)



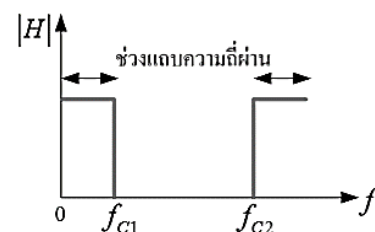
ก.) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF)



ข.) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (HPF)



ค.) ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (BPF)



ง.) ผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ก้ำจัดผ่าน (BSF)

ภาพประกอบ 13 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในอุดมคติ

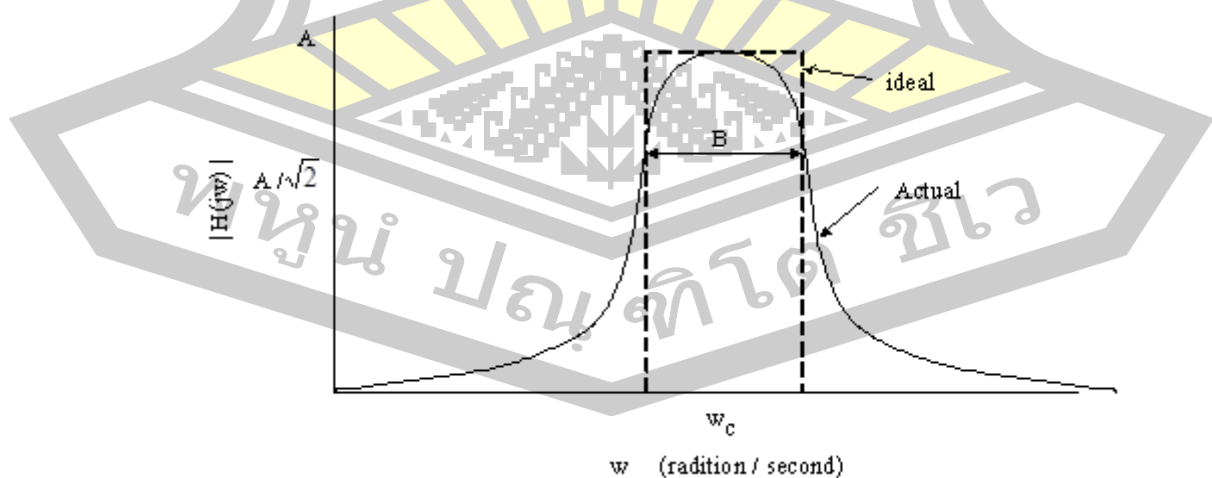
จากผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ในทางอุดมคติ[18] ดังภาพประกอบ 13 เมื่อให้ $|H|$ คือ ขนาดของแรงดันทางด้านเอาต์พุต

- วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ที่สูงกว่า f_c ความถี่จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร
- วงจรกรองความถี่สูงผ่าน จะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่ f_c ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจรได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_c จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร
- วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน จะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ f_{c1} ถึงความถี่ f_{c2} ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ f_{c1} กับความถี่ที่สูงกว่า f_{c2} จะไม่ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร
- วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน จะไม่ยอมให้ช่วงความถี่ f_{c1} ถึงความถี่ f_{c2} ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตของวงจร ส่วนความถี่อื่นๆ วงจรยอมให้ผ่านไปยังขั้วเอาต์พุตได้

2.6.2 ชนิดของวงจรกรองความถี่

2.6.2.1 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter : BPF)

วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่ง ซึ่งจะยอมให้แถบความถี่ช่วงหนึ่ง que เลือกไว้ผ่านวงจรชนิดนี้ไปได้เท่านั้น โดยจะลดทอนความถี่อื่นใดนอกเหนือจากช่วงกว้างของแถบความถี่ที่เลือกไว้แล้ว



ภาพประกอบ 14 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองเฉพาะแถบความถี่

ในที่นี้ตามภาพประกอบ 14 สมมติให้มีความกว้างเท่ากับ B และมีค่าความถี่ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่เป็น ω_0 สำหรับค่า B และ ω_0 กำหนดให้อยู่ในหน่วย เรเดียน/วินาที หรือ B อาจกำหนดในหน่วย Hz และมีความถี่กึ่งกลางเป็น $f_0 = \omega_0/2$ (Hz) คุณสมบัติตามที่กล่าวมาของวงจร แสดงให้เห็นตามรูปกราฟแสดงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณดังภาพประกอบ 14 โดยเส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในการใช้งานจริง

สมการโพลีโนเมียลอันดับที่สองสามารถเทียบเคียงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ทางอุดมคติได้ โดยกำหนดค่า B และ ω_0^2 ให้เหมาะสม ซึ่งจะได้ออกมาในรูปสมการทรานเฟอร์ ฟังก์ชัน ดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{Ks}{s^2 + Bs + \omega_0^2}$$

มีค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ควรสนใจอยู่ค่าหนึ่งในการออกแบบวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่นี้ คือ ค่า Q หรือ ควอลิตี้ แฟคเตอร์ (Quality factor) ซึ่งหาได้จาก

$$Q = \omega_0 / B$$

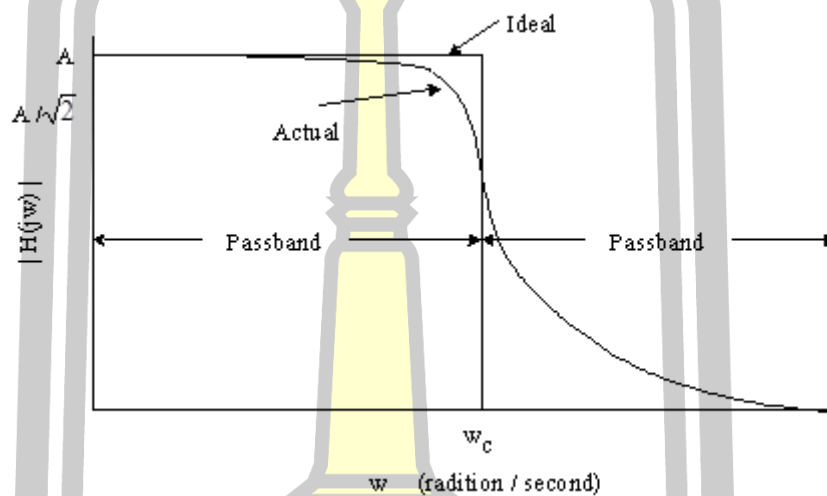
หรือ
$$Q = f_0 / B$$

เมื่อกำหนด B ในหน่วย HZ

โดยค่า Q จะบ่งบอกให้ทราบถึงความกว้างของช่วงความถี่ที่จะยอมให้ผ่าน ถ้า Q ยิ่งมีค่ามาก วงจรที่ออกแบบนั้นจะทำการกรองแถบความถี่ให้ผ่านไปได้ในช่วงแคบมากขึ้น นั่นคือ จะผ่านแถบความถี่ไปได้น้อยลง มีความชัน หรือ Sharpness มากขึ้น เมื่อเทียบกับความถี่กึ่งกลาง ω_0 (หรือ f_0) โดยที่ค่า Gain ของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่นี้กำหนดได้จากค่าแอมพลิจูดของ $H(s)$ ที่จุดกึ่งกลางของแถบความถี่ (ω_0 หรือ f_0) ซึ่งจะได้ค่า $\text{Gain} = K/B$

2.7.1.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter : LPF)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งซึ่งจะส่งผ่านสัญญาณความถี่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่สูงกว่าค่าที่เลือกไว้



ภาพประกอบ 15 แสดงผลตอบสนองกรณีกองความถี่ต่ำ

คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจรแสดงให้เห็นดังกราฟการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ (Amplitude response) ซึ่งเป็นการพล็อตระหว่างขนาด $|H(j\omega)|$ ของสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) $H(s)$ กับความถี่ ω (เรเดียน/วินาที) หรือความถี่ f (HZ) $= 2\pi f$ และที่ทุกความถี่จะได้ว่า

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)}$$

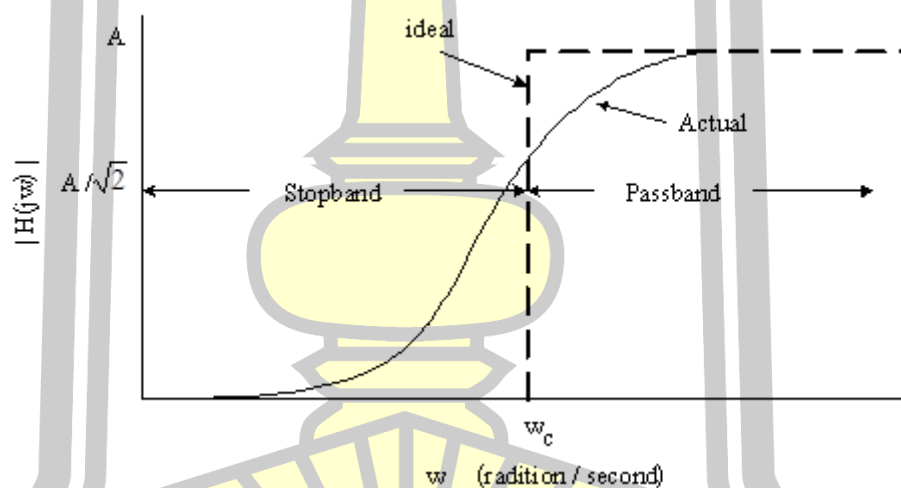
โดยที่ V_2 เป็นแรงดันเอาต์พุท และ V_1 เป็นแรงดันอินพุท

สำหรับเส้นกราฟที่แสดงดังภาพประกอบ 15 นั้น เส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบที่เหลือแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในการใช้งานจริง ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะเฉพาะได้ใกล้เคียงผลตอบสนองทางอุดมคติมากที่สุด ค่า ω_c (แปลงเป็น f_c ในหน่วย HZ ได้โดยใช้ $f_c = \omega_c / 2\pi$ เป็นความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency))

กำหนดที่จุด $|H(j\omega)|$ มีค่า $1/\sqrt{2}$ หรือ 0.707 เท่าของค่าแอมพลิจูดสูงสุด ในที่นี้แสดงด้วยค่า A ความถี่ในช่วงย่านที่สามารถผ่านได้อยู่ในช่วง $0 \leq \omega \leq \omega_c$ และความถี่ที่เกินจาก ω_c ($\omega > \omega_c$) จะไม่สามารถผ่านไปได้

2.7.1.3 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter : HPF)

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High pass filter) เป็นวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งที่จะส่งผ่านสัญญาณความถี่สูงกว่าค่าที่เลือกไว้ผ่านไปได้ทั้งหมด ในขณะที่จะกำจัดหรือลดทอนความถี่ที่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้ คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจรแสดงให้เห็นดังกราฟการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในภาพประกอบ 16 โดยเส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบนั้นแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางปฏิบัติ



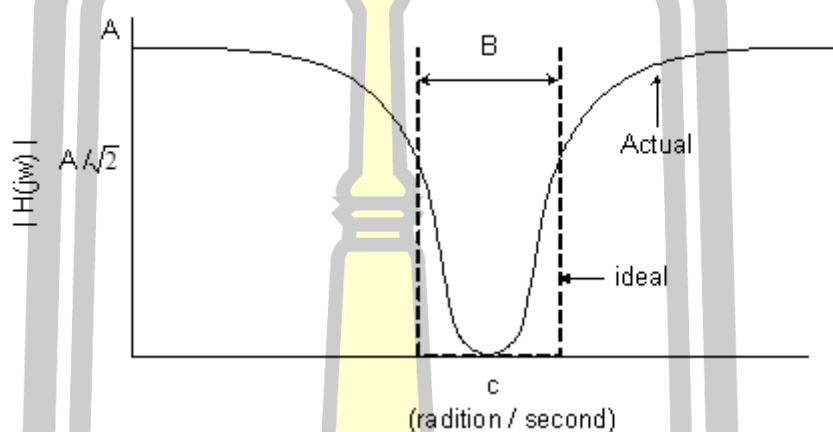
ภาพประกอบ 16 แสดงผลตอบสนองกรณีกรองความถี่สูง

สมการโพลีโนเมียลอันดับที่สองสามารถเทียบเคียงกับคุณลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงทางอุดมคติ โดยการหาออกมาในรูปสมการทรานเฟอร์ ฟังก์ชัน ดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{Ks^2}{s^2 + as + b}$$

2.7.1.4 วงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่ (Band Reject filter)

วงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่ (Band Reject filter เรียกว่า BAND-ELIMINATION หรือ NOTCH FILTER) เป็นวงจรกรองความถี่อีกแบบหนึ่ง ซึ่งจะยอมให้สัญญาณความถี่ตลอดย่านไปได้หมด ยกเว้นแถบความถี่ช่วงหนึ่งที่จะไม่ยอมให้ผ่านไป



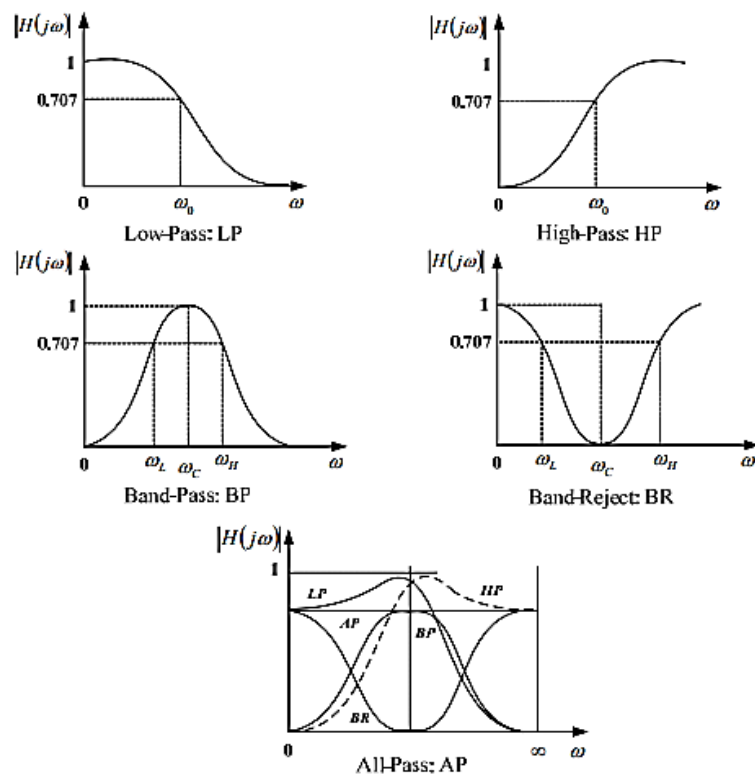
ภาพประกอบ 17 แสดงผลตอบสนองของวงจรขจัดเฉพาะแถบความถี่

คุณสมบัติของวงจรแสดงให้เห็นตามรูปกราฟการตอบสนองเชิงขนาด ภาพประกอบ 17 เส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบที่เหลือนแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในการใช้งานจริง แถบความถี่ซึ่งถูกลดทอนหรือขจัดทิ้งนี้มีจุดกึ่งกลางอยู่ที่ ω_0 โดยประมาณ และมีความกว้างของแถบความถี่เป็น B ซึ่งอยู่ในเทอมหรือหน่วยงาน Hz ความถี่กึ่งกลางนี้มาจาก $f_0 = \omega_0/2\pi$ ในกรณีกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่นี้ก็เช่นเดียวกับกรณีกรองเฉพาะแถบความถี่ที่จะต้องกำหนดค่าควอลิตี้แฟคเตอร์ หรือ ค่า Q ซึ่งเท่ากับ ω_0/B (หรือ f_0/B โดยที่ B มีหน่วยเป็น Hz) ซึ่งค่า Q เป็นตัวชี้ความกว้าง หรือ แแคบของแถบความถี่ ที่จะถูกลดทอนหรือขจัดทิ้ง โดย Q มาก แถบความถี่จะยิ่งแคบ Q น้อย แถบความถี่จะกว้างขึ้น

สมการโพลีโนเมียลอันดับที่สองสามารถเทียบเคียงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่อยู่ในรูปสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ดังนี้

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K(s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + Bs + \omega_0^2}$$

โดยที่ ω_0 เป็นความถี่กึ่งกลางในหน่วยเรเดียน/วินาที และ $B = \omega_0/Q$ จะเป็นค่าความกว้างของแถบความถี่ที่ถูกลบทิ้ง ค่าอัตราขยายของวงจรกรองขจัดเฉพาะแถบความถี่ได้จาก $H(s)$ ที่ s มีค่าเป็นศูนย์หรือมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) จะได้ผลออกมาที่มีค่าเท่ากับ K



ภาพประกอบ 18 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแบบต่างๆ

พหุ ประถม ๓๖๓ ชีวะ

ตาราง 2 ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติแบบต่างๆ

ชนิดของตัวกรอง	$D(n); -\infty < n < \infty$	$D(n), n = 0$
วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	$\frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_c}{\pi}$
วงจรรองความถี่สูงผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$	$1 - \frac{\omega'_c}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่ผ่าน	$\frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$	$\frac{\omega'_b}{\pi} - \frac{\omega'_a}{\pi}$
วงจรรองแถบความถี่หยุดผ่าน	$\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$	$1 - \left(\frac{\omega'_b}{\pi} - \frac{\omega'_a}{\pi} \right)$

จากที่ได้แสดงในตารางข้างต้น[19] เป็นผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรรองความถี่แบบต่างๆ โดยวิธีการแปลง IDTFT ผู้ที่ต้องการออกแบบวงจรรองความถี่แบบดิจิทัลในที่นี่ ไม่จำเป็นต้องมี ความรู้ทางคณิตศาสตร์มากนัก เพราะการออกแบบวงจรรองความถี่แบบต่างๆ เราจะใช้ผลตอบสนอง อิมพัลส์ $d(n)$ ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยวิธีการแปลงจาก IDTFT ที่ n มีค่า $-\infty < n < \infty$ กับที่ $n = 0$ ตามลำดับ

2.8 การออกแบบตัวกรอง FIR ตอบสนองชุดของตัวกรองที่ใช้หน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Windows in FIR Design)

สำหรับการออกแบบประกอบไปด้วย 2 สูตร ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยให้การออกแบบตัวกรอง FIR ตอบสนองชุดของตัวกรองที่ใช้หน้าต่างไคเซอร์ ดังนี้[20]

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha - 8.7), & \alpha > 50 \\ 0.5842(\alpha - 21)^{0.4} + 0.7886(\alpha - 21), & 50 \geq \alpha \geq 21 \\ 0, & \alpha < 21 \end{cases}$$

สำหรับ Transition width ($\Delta\omega$) (rad/s)

$$n = \frac{\alpha - 8}{2.285\Delta\omega} + 1$$

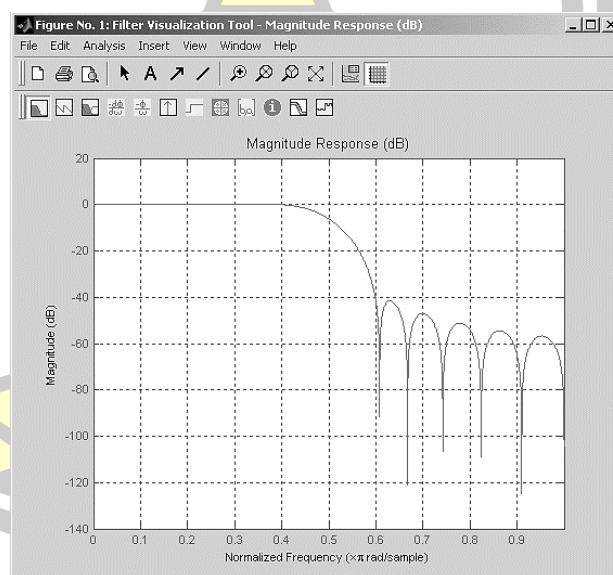
ตัวกรองที่ได้รับการออกแบบโดยใช้การวิเคราะห์จะเป็นไปตามข้อกำหนดโดยประมาณ แต่ควรตรวจสอบนี้ การออกแบบตัวกรอง low pass มีความถี่ตัด 0.5π rad/s, เปลี่ยนความกว้าง 0.2π rad/s, และ 40dB ของการลดทอนใน stop band

```
[n,wn,Beta] = kaiserord([0.4 0.6]*pi,[1 0],[0.01 0.01],2*pi);
```

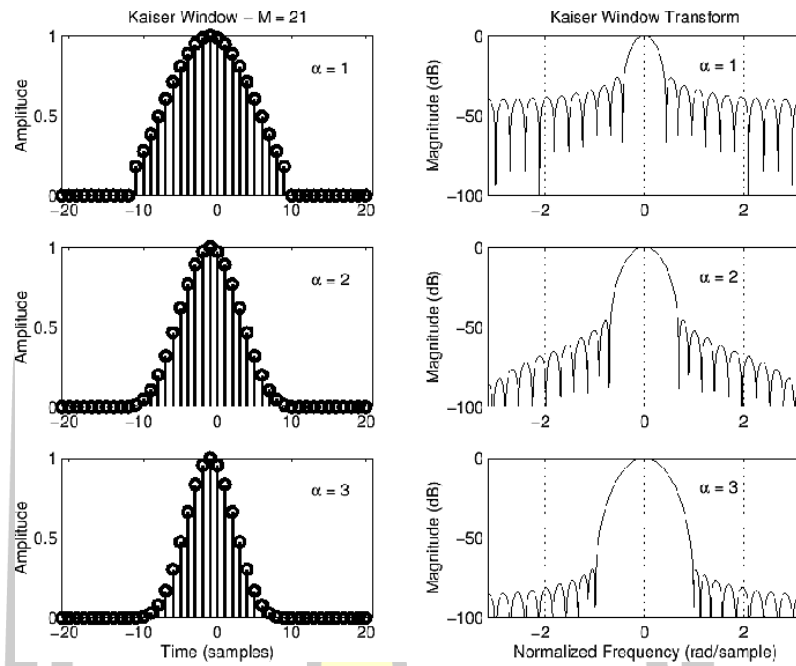
```
h = fir1(n,wn,kaiser(n+1,Beta),'noscale');
```

ฟังก์ชัน kaiserord ประมาณลำดับตัวกรอง ความถี่ตัด และ หน้าต่างไคเซอร์ ค่าเบต้า ที่จำเป็นในการตอบสนองต่อชุดที่กำหนดของข้อกำหนดโดเมนความถี่ การกระเพื่อมใน Pass band จะประมาณเช่นเดียวกับระลอกใน Stop band จากการตอบสนองความถี่จะเห็นว่าตัวกรองนี้เกือบจะตรงกับคุณสมบัติดังต่อไปนี้[7]

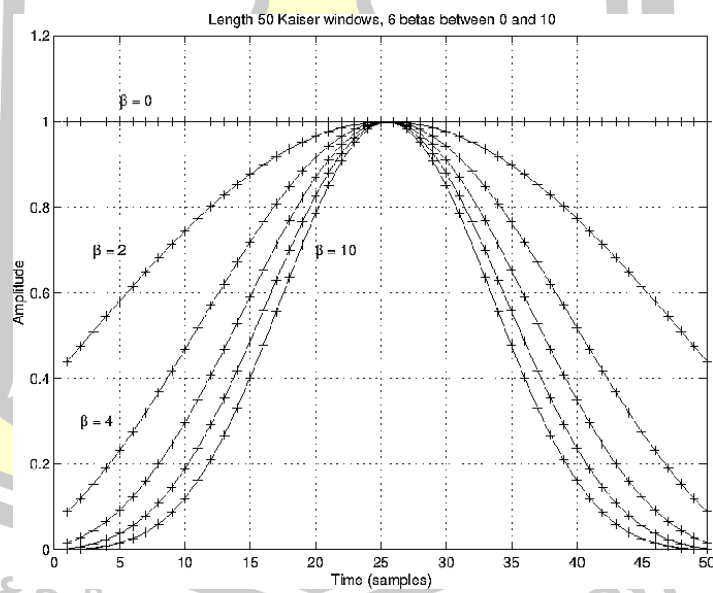
Fvtool (h,1)



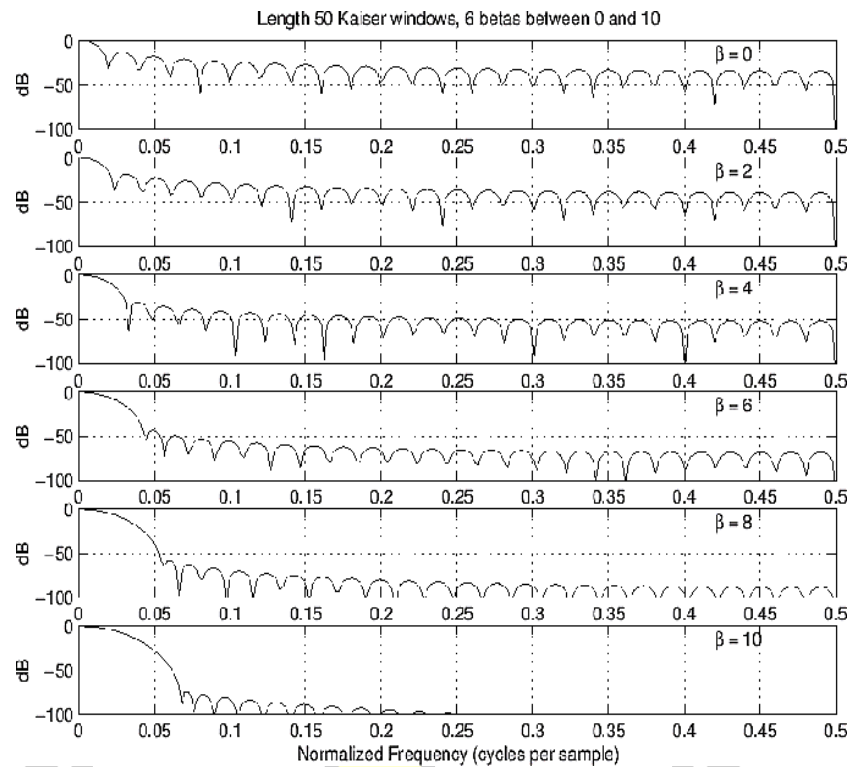
ภาพประกอบ 19 ตัวอย่าง WinTool หน้าต่าง Kaiser



ภาพประกอบ 20 แสดง Kaiser window and transform for $\alpha = 1, 2, 3$

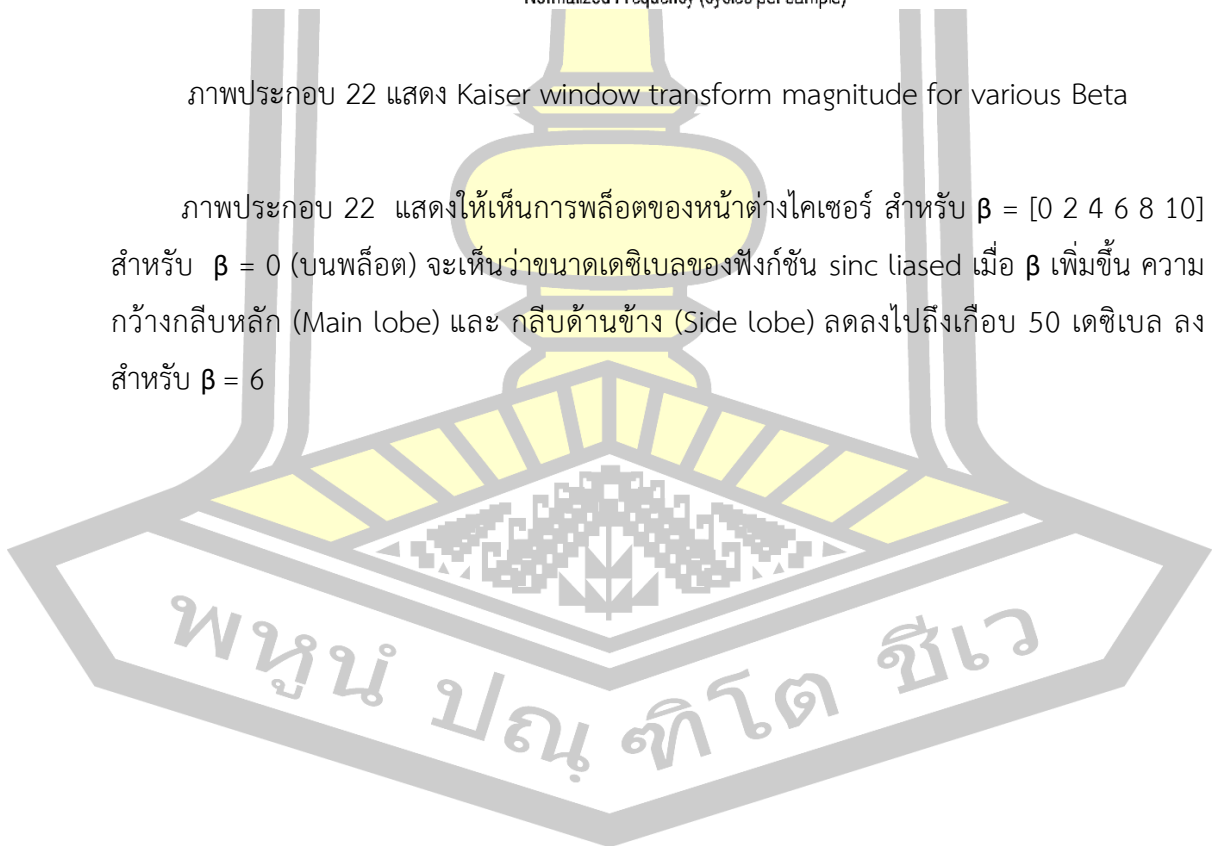


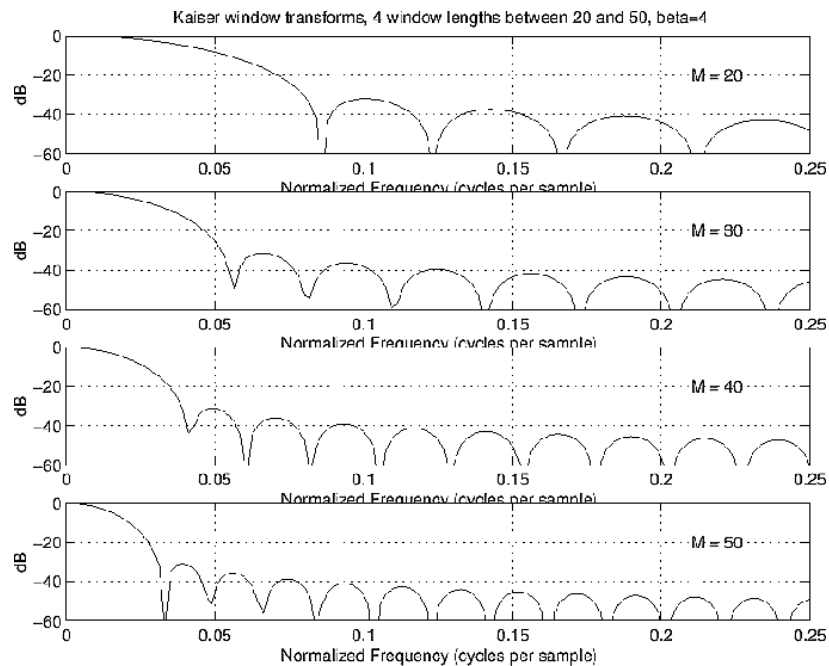
ภาพประกอบ 21 แสดงให้เห็นการพล็อตของหน้าต่างโคเชอร์ สำหรับค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ Beta = 0, 2, 4, 6, 8, 10



ภาพประกอบ 22 แสดง Kaiser window transform magnitude for various Beta

ภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นการพล็อตของหน้าต่างโคเซอร์ สำหรับ $\beta = [0 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10]$ สำหรับ $\beta = 0$ (บวมพล็อต) จะเห็นว่าขนาดเดซิเบลของฟังก์ชัน sinc liased เมื่อ β เพิ่มขึ้น ความกว้างกลีบหลัก (Main lobe) และ กลีบด้านข้าง (Side lobe) ลดลงไปถึงเกือบ 50 เดซิเบล ลง สำหรับ $\beta = 6$





ภาพประกอบ 23 Kaiser window transform magnitudes for various window lengths

ภาพประกอบ 23 แสดงผลของความยาวของหน้าต่างที่เพิ่มขึ้นสำหรับหน้าต่าง Kaiser ความยาวของหน้าต่างคือ $M = [20 \ 30 \ 40 \ 50]$ จากด้านบนไปยังพล็อตด้านล่างเช่นเดียวกับหน้าต่างอื่นๆ จะเห็นว่า การเพิ่มความยาวจะลดความกว้างของกลีบหลัก (Main lobe) ในขณะที่ระดับด้านข้าง (Side lobe) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง A Design Method of Low Delay FIR Band-pass Filter เป็นการออกแบบตัวกรองดิจิทัลจำกัด ชนิดแถบความถี่ผ่าน โดยที่ตัวกรองชนิดนี้เปรียบเทียบกับจำนวนออร์เดอร์ (N) เท่ากัน แต่จะเกิดความล่าช้าของสัญญาณเสียงที่น้อยกว่า จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบจำนวนออร์เดอร์แล้วมีความล่าช้าต่ำกว่า แต่สัญญาณเสียงจะถูกบีบอัดจนทำให้สัญญาณเสียงเกิดความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณเสียงต้นฉบับ

งานวิจัยเรื่อง Equiripple Band-pass FIR Filter Design for Speech Signals Order Optimization for Frequency range of 300 Hz to 4000 Hz การออกแบบตัวกรองดิจิทัลจำกัด ชนิดแถบความถี่ผ่าน เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเสียงพูด โดยกรองความถี่ที่ 300 เฮิรตซ์ ถึง 4000

เอิร์ตซ์ ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้จำนวน $N=405$ ทำให้เกิดความล่าช้าและเกิดการสูญเสียของสัญญาณเสียง

งานวิจัยเรื่อง FIR Digital Filter Banks for Speech Analysis ได้ทำการออกแบบตัวกรองแบบแบนด์วิดท์ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของหน้าต่างตัวกรอง โดยพิจารณาจากความยืดหยุ่นของความถี่และแบนด์วิดท์ของของตัวกรองแต่ละชนิด จากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวกรองชนิด Kaiser window และ Filter-bank สามารถตอบสนองความถี่ได้ดีในจำนวน $N=101$

งานวิจัยเรื่อง Finite Impulse Response Filter for Speech Analysis and Synthesis การใช้งาน FIR Filter สำหรับการวิเคราะห์คำพูดและสังเคราะห์โดยใช้ตัวจำลองคลื่น A และ B ใน FIR Filter เพื่อวิเคราะห์สัญญาณเสียงพูดและทำการสังเคราะห์จากนั้นมีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่า การใช้ตัวกรองการสังเคราะห์เสียงพูดด้วย FIR filter เชิงเฟสที่ต่ำมีค่าความชัดเจนและตอบสนองสัญญาณเสียงมากกว่า FIR filter เชิงเส้น และสำหรับค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์โคไซน์ที่ไม่ต่อเนื่องทำให้คุณภาพเสียงพูดดีขึ้นเมื่อเทียบกับสเปกตรัมในการพูดในรูปแบบของการจำลองที่ใช้เพื่อแก้ไขความถี่แบบเส้นตรง (Linear scale)

งานวิจัยเรื่อง An FIR Implementation of Zero Frequency Filtering of Speech Signals เป็นการระบุถึงข้อดีของ FIR Filter เพื่อใช้ประโยชน์ในการกรองสัญญาณเสียง โดยมีความแม่นยำและมีความเสถียรภาพของสัญญาณเสียงสูง ในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบตัวกรอง FIR Filter กับตัวกรอง IIR จากผลการทดลองบ่งบอกถึงความแม่นยำของตัวกรอง FIR Filter ที่มีผลการตอบสนองดีกว่าตัวกรอง IIR

งานวิจัยเรื่อง Improving the Quality of Speech Signal using a FIR Band pass Filter with Fast Fourier Transform เป็นการสร้างตัวกรองดิจิทัลจำกัดชนิดแถบความถี่ผ่านเพื่อกรองความถี่ที่คลาดเคลื่อนของสัญญาณเสียงภายในห้องประชุม เป็นการศึกษาและปรับปรุงสัญญาณเสียงในช่วงความถี่ที่ 500 Hz – 2.5 kHz รวมไปถึงการสุ่มและเปรียบเทียบจำนวน N ของตัวกรองดิจิทัลจำกัด ชนิดแถบความถี่ผ่าน เพื่อหาค่า N ที่เหมาะสมสำหรับห้องประชุม จากผลการทดลองพบว่า ค่า N ที่เหมาะสมคือ $N=80$ โดยที่ตัวกรองดิจิทัลจำกัดจะกรองสัญญาณเสียงได้ดี โดยมีความถี่อื่นๆ ที่กรองไม่หมดและความถี่ที่รบกวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

งานวิจัยเรื่อง การระบุตัวบุคคลด้วย FIR System นำเสนอการระบุตัวบุคคลด้วย FIR System (Finite Impulse Response System) ภาพมือที่ถูกถ่ายด้วยอุปกรณ์ถ่ายภาพถูกเปลี่ยนเป็นเส้นรูปร่างของมือด้วยการหาขอบภาพและการทำให้บาง จากนั้นนิ้วมือแต่ละนิ้วถูกแยกออกจากเส้นรูปร่างของมือ พิกัดจุดบนเส้นรูปร่างของแต่ละนิ้วมือถูกหาและทำการ Normalization เพื่อหมุนเส้นรูปร่างของนิ้วมือให้อยู่ในทิศทางเดียวกัน จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ DCT ในแต่ละแนวแกนของพิกัดจุดและนำมาใช้เป็นอินพุตและเอาต์พุตของ FIR System การตอบสนองอิมพัลส์ของ FIR System ถูกคำนวณ และถูกใช้แทนลักษณะเด่นของนิ้วมือ การเปรียบเทียบการตอบสนองอิมพัลส์ของนิ้วมือแต่ละนิ้วของภาพมือปัจจุบันกับฐานข้อมูล ทำได้ด้วยการคำนวณความผิดพลาดผลรวม ซึ่งอยู่ในรูปของรากที่สองของความผิดพลาดแต่ละนิ้วมียกกำลังสอง ถ้าค่าความผิดพลาดผลรวมน้อยกว่าค่าระดับที่กำหนดไว้ (Threshold value) โปรแกรมจะตัดสินใจว่าภาพมือที่กำลังพิจารณาเป็นของบุคคลที่อยู่ในฐานข้อมูล สำหรับผลการทดลอง วิธีที่นำเสนอถูกทดสอบกับฐานข้อมูลภาพมือ 2 ชุด คือฐานข้อมูลภาพมือของ KMITL และของ CASIA ผลลัพธ์ของการบ่งชี้ตัวบุคคลแสดงว่าวิธีการที่นำเสนอให้ความถูกต้อง 99.50% สำหรับฐานข้อมูลภาพมือของ KMITL และ 98.60% สำหรับฐานข้อมูลภาพมือของ CASIA

งานวิจัยเรื่อง ตัวกรองความถี่ FIR แบบโปรแกรมได้ (The programmable FIR filter) กล่าวถึงการออกแบบและสร้างตัวกรองดิจิทัลแบบ FIR ที่สามารถกำหนดชนิดของตัวกรอง จำนวน order และ cutoff frequency ได้ การกำหนดค่าคงที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะทำผ่านทาง keyboard เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031 เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์จะถูกส่งให้กับตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320c26 เพื่อทำการประมวลผลต่อไป ตัวกรอง FIR แบบโปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นนี้สามารถกระทำได้ทั้ง Lowpass, Highpass, Bandpass และ Bandstop จำนวน order สูงสุด 251 ผลการสร้างพบว่าตัวกรองที่สร้างขึ้นมีความเที่ยงตรงสูงมาก

งานวิจัยเรื่อง การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองเอ็ฟไออาร์ กรณีศึกษาสัญญาณรบกวนแบบ GWN (Performance evaluation of FIR filter on GWN-corrupted speech) นำเสนอการกรองเสียงพูดด้วยตัวกรองเอ็ฟไออาร์ โดยการใช้วิธีสัมประสิทธิ์ เซปสตรัมบนสเกลเมล (Mel frequency cepstral coefficients: MFCC) ในการสกัดค่าลักษณะสำคัญของเสียงและใช้หลักการวิธีองค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) ในการลดขนาดของ ตัวแปรสำหรับการฝึก (training) และ ทดสอบ (training) ตัวคัดกรองแบบเอ็มแอล (Maximum Likelihood Classifier : ML) ผลการสกัดกรองตัวแปรทางเสียง MFCC ในกรณี ผู้วิจัยจึงสนใจหา วิธีการที่จะจัด

สัญญาณรบกวนจากเสียงที่ได้บันทึกสัญญาณเสียงไว้ให้มีประสิทธิภาพที่ดี โดยใช้วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (digital filter) ประเภท (FIR) ฟิเตอร์ให้ผลตอบสนองตาม ระยะเวลาที่แน่นอน หรืออาจกล่าวได้ว่าผลตอบสนองเกิดขึ้นได้

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบ FIR ให้มีการตอบสนองผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) (A study of noise reduction in speech signal using FIR filtering) ทำการออกแบบที่จุดตัดออฟความถี่ 0.75 KHz, 1KHz ,1.25 KHz และ 1.5 KHz โดยที่นำสัญญาณเสียงพูดว่า (MFCC) เข้ามาร่วมกับสัญญาณรบกวนที่ถูกสร้างโดย โปรแกรม MATLAB แล้วนำไปผ่านวงจรกรองความถี่แบบ FIR ที่ทำการออกแบบที่จุดตัดออฟความถี่ ที่ 0.75 KHz, 1 KHz ,1.25 KHz และ 1.5 KHz แล้วนำสัญญาณที่ออกเอาต์พุตมาทำการเปรียบเทียบ ระหว่างสัญญาณเสียงพูดที่ถูกกรองและสัญญาณเสียงพูดเดิมแสดงให้เห็นว่าค่า MSE ประเมินในทุก ความถี่ตัดจะลดลงในทำนองเดียวกันแบบวงจรกรองความถี่แบบ FIR มีประสิทธิภาพสามารถดึงสัญญาณเสียงเดิมที่ถูกสัญญาณรบกวน

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบตัวกรองเชิงเลข Band-pass ให้สมมาตร โดยใช้ตัวกรองเชิงเลขแบบ All-pass (Symmetric Band-pass filter design Using All-pass filter) นำเสนอ การออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบ Band-pass โดยใช้ตัวกรองเชิงเลข แบบ All-pass และตัวกรองเชิงเลขแบบ Notch การออกแบบเริ่มจากการออกแบบตัวกรองเชิงเลข แบบ Notch ชนิด Two pole โดยใช้การวาง Pole-zero แล้วทำการเพิ่ม Pole-zero อีก 1 คู่ เพื่อควบคุมอัตราขยายในช่วงความถี่ผ่าน และช่วงความถี่เปลี่ยนแปลงให้สมมาตรโดยสามารถกำหนดอัตราขยายตามต้องการได้ หลังจากนั้นทำการหาฟังก์ชันระบบของตัวกรองเชิงเลขแบบ Band-pass ที่สมมาตรโดยทำการหาผลต่างของฟังก์ชันระบบของตัวกรองเชิงเลขแบบ All-pass กับ ตัวกรองเชิงเลขแบบ Notch ซึ่งผลจากการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงให้เห็นว่าตัวกรองเชิงเลขแบบ Band-pass ด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นมีความถูกต้องและช่วงความถี่เปลี่ยนแปลงมีความสมมาตร

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณเสียงในห้องประชุมโดยใช้ตัวกรองดิจิทัล ผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด การปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณเสียงในห้องประชุมโดยใช้ตัวกรองดิจิทัลผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดร่วมกับการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ในการทดลองสัญญาณเสียงจะถูกบันทึกจาก 54 ตำแหน่งในห้องประชุมซึ่งเสียงเหล่านี้มาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ซึ่งเทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความถี่ที่คลาดเคลื่อนของเสียงเหล่านั้น จากนั้นทำการสร้างตัวกรองดิจิทัลจำกัด ชนิดแถบความถี่ผ่านเพื่อทำการกรองความถี่ของสัญญาณเสียงที่

คลาดเคลื่อนและนำสัญญาณเสียงที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงตำแหน่งอ้างอิง จากผลการทดลองพบว่า การวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของความถี่ในสัญญาณเสียงโดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถแสดงให้เห็นว่าการเทียบแบบเฟรมต่อเฟรมให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องกว่า ทั้งนี้พบว่าค่าความถี่ที่คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 500 เฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2.5 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อนำสัญญาณเสียงที่กรองผ่านตัวกรองดิจิทัลมาเปรียบเทียบกับสัญญาณเสียงตำแหน่งอ้างอิงจะได้ค่าเฉลี่ย 70.77 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยเรื่อง A comparison of FIR Filter Bank Design Methods with Applications to Intelligibility Enhancement of Noise-Corrupted Speech Signals เป็นการเปรียบเทียบการออกแบบของตัวกรอง เพื่อนำมาพัฒนาสัญญาณเสียงร่วมกับการประมวลผลสัญญาณรบกวนที่ไม่เสถียร จากผลการทดลองพบว่า ตัวกรอง FIR เชิงเส้นที่มีการตอบสนองต่อความถี่ที่ดีคือลักษณะแบบ Hanning ร่วมกับ ตัวกรองชนิด Band pass filter โดยใช้ Filter length = 175 ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างตัวกรองที่ดีขึ้น

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์แบบตอบสนองความถี่หลายรูปแบบ นำเสนอการออกแบบตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์ (FIR Filter) ที่สามารถให้ผลตอบสนองความถี่ได้สี่รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ ความถี่ต่ำผ่าน (Low pass) ความถี่สูงผ่าน (High pass) ช่วงความถี่ผ่าน (Band pass) และ ช่วงความถี่หยุด (Band stop) โดยทำการปรับปรุงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์ โดยเริ่มจากออกแบบตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์ความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่คutoff ต่างกัน 2 ความถี่ จากนั้นจัดโครงสร้างโดยใช้ตัวหน่วงร่วมกันแต่เพิ่มตัวคูณ และตัวบวก เพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่สามารถให้ผลตอบสนองความถี่สี่แบบในเวลาเดียวกัน และมีผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear Phase Response) และนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มจำนวนออร์เดอร์ (Order) ของตัวกรองอย่างไม่จำกัดโดยขึ้นกับความสามารถของตัวประมวลผล

งานวิจัยเรื่อง Use of Kaiser window for ECG processing เกี่ยวข้องกับการออกแบบและใช้งานตัวกรองดิจิทัล FIR ที่ออกแบบโดยใช้ Kaiser Window เพื่อลดสัญญาณรบกวนในสัญญาณ ECG แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยความช่วยเหลือของ MATLAB และนำไปใช้ ประการแรกตัวกรอง FIR สามแบบที่แตกต่างกันโดยใช้ Kaiser Window คือ low pass high pass และ notch filter ได้รับการออกแบบและนำไปใช้ในสัญญาณ ECG วงจรการปรับสัญญาณที่เหมาะสมนั้นถูกใช้เพื่อเข้าถึงสัญญาณ 12 ECG lead แบบจำลองการจำลองที่จำเป็นถูกสร้างขึ้นใน MATLAB ตัวกรอง

ทั้งหมดได้รับการออกแบบด้วยความช่วยเหลือของกล่องเครื่องมือ FDA MATLAB ตัวกรองดิจิทัลมีบทบาทสำคัญมากในการประมวลผลสัญญาณความถี่ต่ำ จำนวนสัญญาณชีวการแพทย์มีความถี่ต่ำ สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยทั่วไปหมายถึงสภาพของหัวใจ มันมีรูปแบบช่วงความถี่ 0.5 Hz ถึง 100 Hz สิ่งประดิษฐ์มีบทบาทสำคัญในการประมวลผลสัญญาณ ECG การทำงานเป็นขั้นตอนในทิศทางในการลดสิ่งประดิษฐ์โดยใช้ตัวกรองดิจิทัลที่ออกแบบด้วยความช่วยเหลือของ Kaiser Window พบว่าตัวกรองที่แนะนำทำงานได้อย่างน่าพอใจ



บทที่ 3

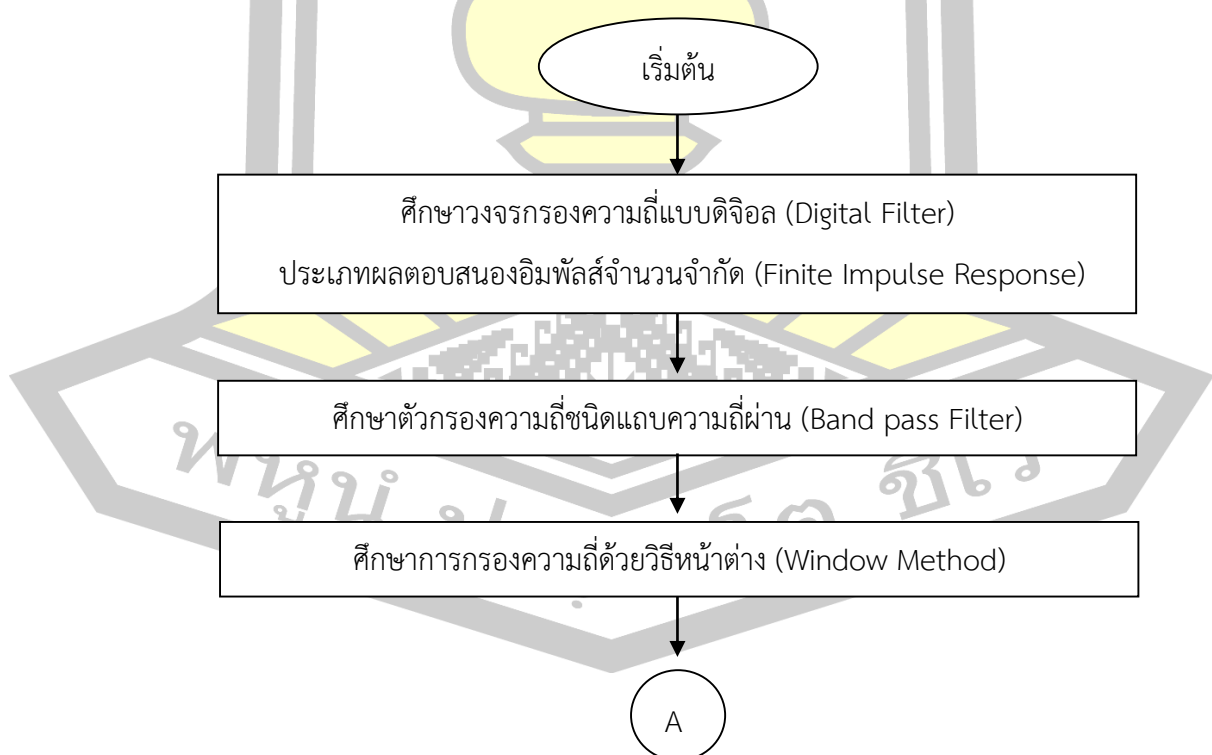
วิธีดำเนินการวิจัย

จากเนื้อหาในบทที่ 2 ที่มาจากการรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่องการออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์บนโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) โดยในบทนี้จะนำเสนอเนื้อหาในส่วนของการทำงานวิจัย ดังต่อไปนี้

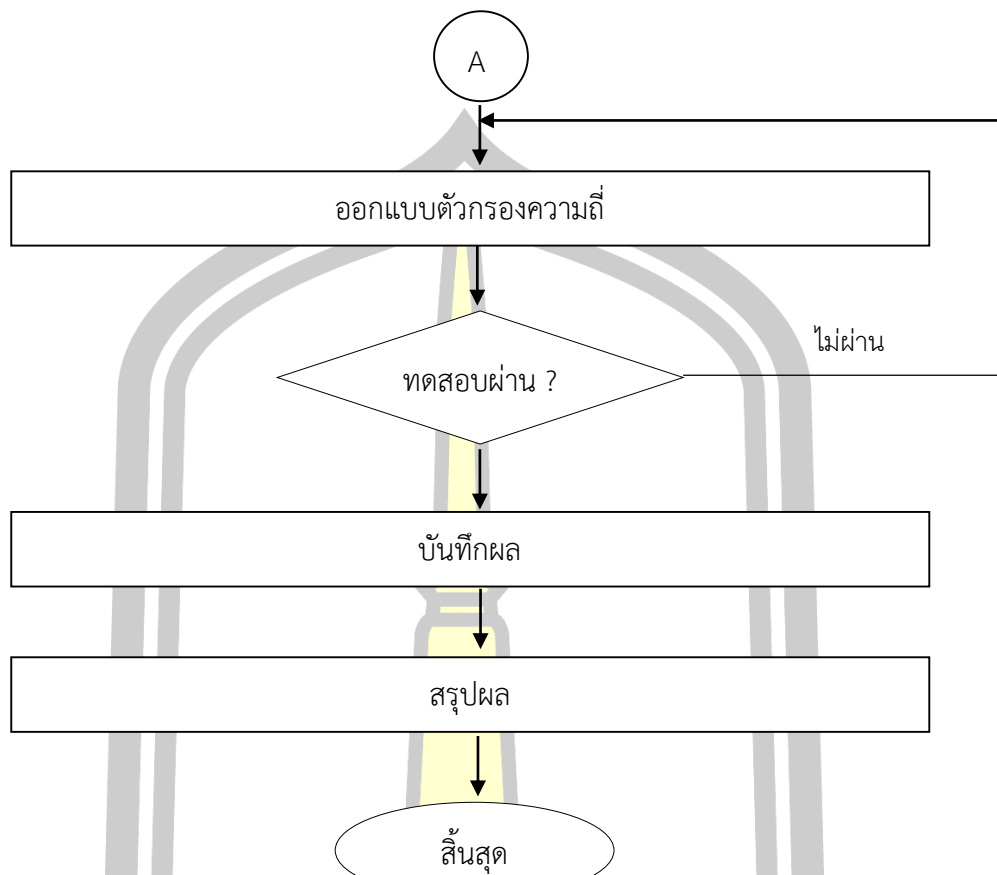
- 1) แผนผังดำเนินการวิจัย
- 2) เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ
- 3) ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนผังดำเนินการวิจัย

มีการออกแบบแผนผังดำเนินการวิจัยดังนี้



ภาพประกอบ 24 Flowchart ของการดำเนินการวิจัย



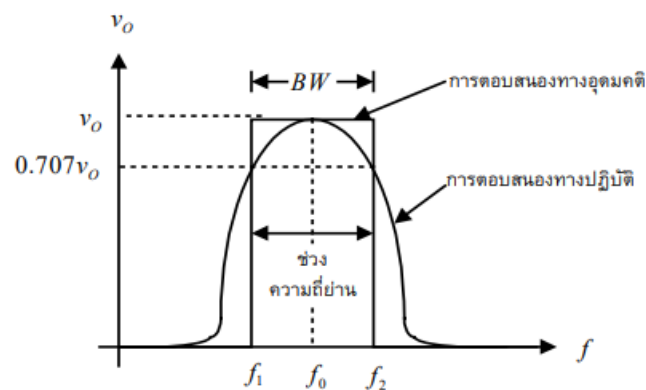
ภาพประกอบ 25 Flowchart ของการดำเนินการวิจัย (ต่อ)

3.2 เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ

3.2.1 ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) ประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response)

3.2.2 ตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

วงจรกรองแถบความถี่ (Band Pass Filter, BPF) หรือ วงจร BPF เป็นวงจรที่กรองเอาเฉพาะ ความถี่ช่วงที่ต้องการออกมาเท่านั้น ดังนั้นการตอบสนองของความถี่ของวงจร BPF นี้จะเป็นดังภาพประกอบ 26



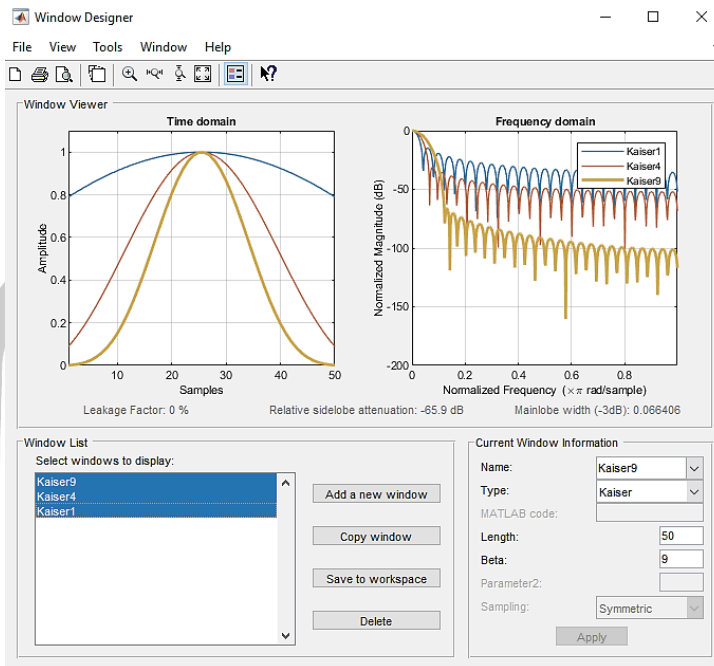
ภาพประกอบ 26 การตอบสนองความถี่ของวงจร Band Pass Filter

3.2.3 ฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window Function) บนโปรแกรมแมทแลป

หน้าต่าง Kaiser หรือ Kaiser-Bessel ได้รับการพัฒนาโดย James Kaiser ที่ Bell Laboratories เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ของฟังก์ชันหน้าต่างที่ใช้ในการออกแบบฟิลเตอร์ตัวตอบสนองจำกัดและการวิเคราะห์สเปกตรัม หน้าต่างโคเซอร์จะประมาณหน้าต่าง DPSS ซึ่งจะเพิ่มความเข้มข้นของพลังงานในกลีบหลัก (Main lobe) แต่จะคำนวณได้ยาก หน้าต่างโคเซอร์เป็นหน้าต่างที่คล้ายกับหน้าต่างทรงรียาวที่มีอัตราส่วนสูงสุดของ Main lobe และ Side lobe สำหรับหน้าต่างโคเซอร์ของความยาวเฉพาะพารามิเตอร์จะควบคุมความยาว Side lobe สำหรับที่กำหนดความสูง Side lobe ได้รับการแก้ไขโดยเกี่ยวข้องกับความยาวของหน้าต่าง

คำสั่ง Kaiser (n, Beta) ใช้คำนวณหน้าต่างความยาว n Kaiser กับพารามิเตอร์เบต้า ตัวอย่างของหน้าต่างโคเซอร์ที่มีความยาว 50 และพารามิเตอร์เบต้าของ 1, 4 และ 9 จะแสดงในตัวอย่างคำสั่ง WinTool ดังภาพประกอบ 27[8]

พหุ ประถมศึกษา

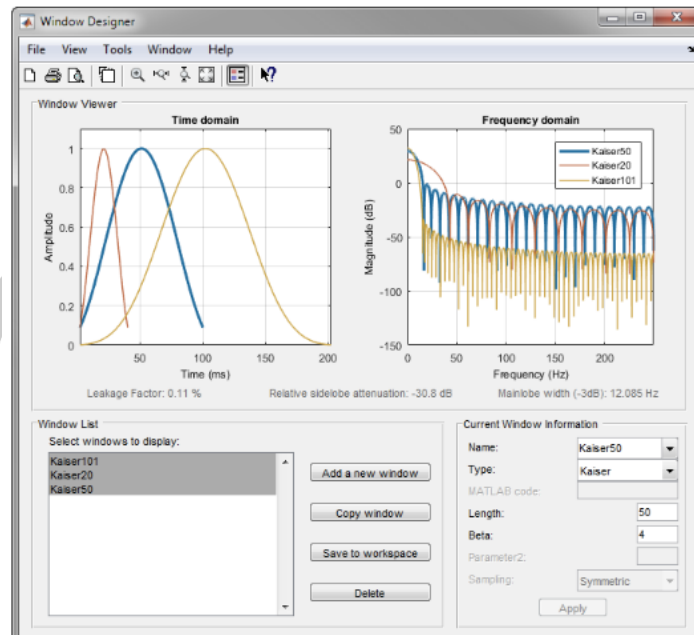


ภาพประกอบ 27 ตัวอย่าง WinTool แสดงการออกแบบวิธีหน้าต่าง (1)

โดเมนเวลาและโดเมนความถี่แปลงความยาว 50 หน้าต่าง Kaiser ด้วยเบต้าที่แตกต่างกันในภาพนี้ หน้าต่างที่มีเบต้า 1 เป็นที่กว้างที่สุดในโดเมนเวลาตามด้วยเบต้า 4 และ เบต้า 9 เป็นที่แคบที่สุด ตามลำดับ ในโดเมนความถี่ Main lobe ของเบต้า 9 เป็นที่กว้างที่สุดตามด้วยแคบเบต้า 4 และในที่สุดก็เบต้า 1 กับ Main lobe แคบที่สุด ตามลำดับ

เมื่อต้องการสร้าง Kaiser Window ใช้ บรรทัดคำสั่ง ดังนี้

```
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)
```



ภาพประกอบ 28 ตัวอย่าง WinTool แสดงการออกแบบวิธีหน้าต่าง (2)

ขณะที่การเพิ่มขึ้นของเบต้ามีผลทำให้ Side lobe ลดลง และ Main lobe ความกว้างเพิ่มขึ้น WinTool นี้แสดงให้เห็นว่าความสูงของ Side lobe คงที่ และ พารามิเตอร์เบต้ายังคงไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อความยาวเปลี่ยนไป

เมื่อต้องการสร้าง Kaiser window ใช้ บรรทัดคำสั่ง ดังนี้

```
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')
```

3.3 ขั้นตอนการออกแบบและดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้ พารามิเตอร์เบต้า (Attenuation Parameter), อันดับตัวกรอง (Filter Order), ความถี่ตัด (Cutoff frequency) และ ความถี่สุ่ม (Sampling frequency) เพื่อนำไปทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB ดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

Parameter	Values
Sampling Frequency (Hz)	
First cutoff frequency (Hz)	
Second cutoff frequency (Hz)	
Filter Order or Window Length	
β (Attenuation Parameter)	

3.3.2 นำค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนด เข้าทดสอบบนโปรแกรม MATLAB โดยป้อนค่าที่ได้ กำหนดไว้เข้าสู่ฟังก์ชันภายในตัวโปรแกรมที่มีชื่อเรียกว่า ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) เพื่อให้ได้มาซึ่งผลของค่าความกว้างของกลีบหลัก (Main lobe width) และ กลีบด้านข้าง (Side lobe attenuation)

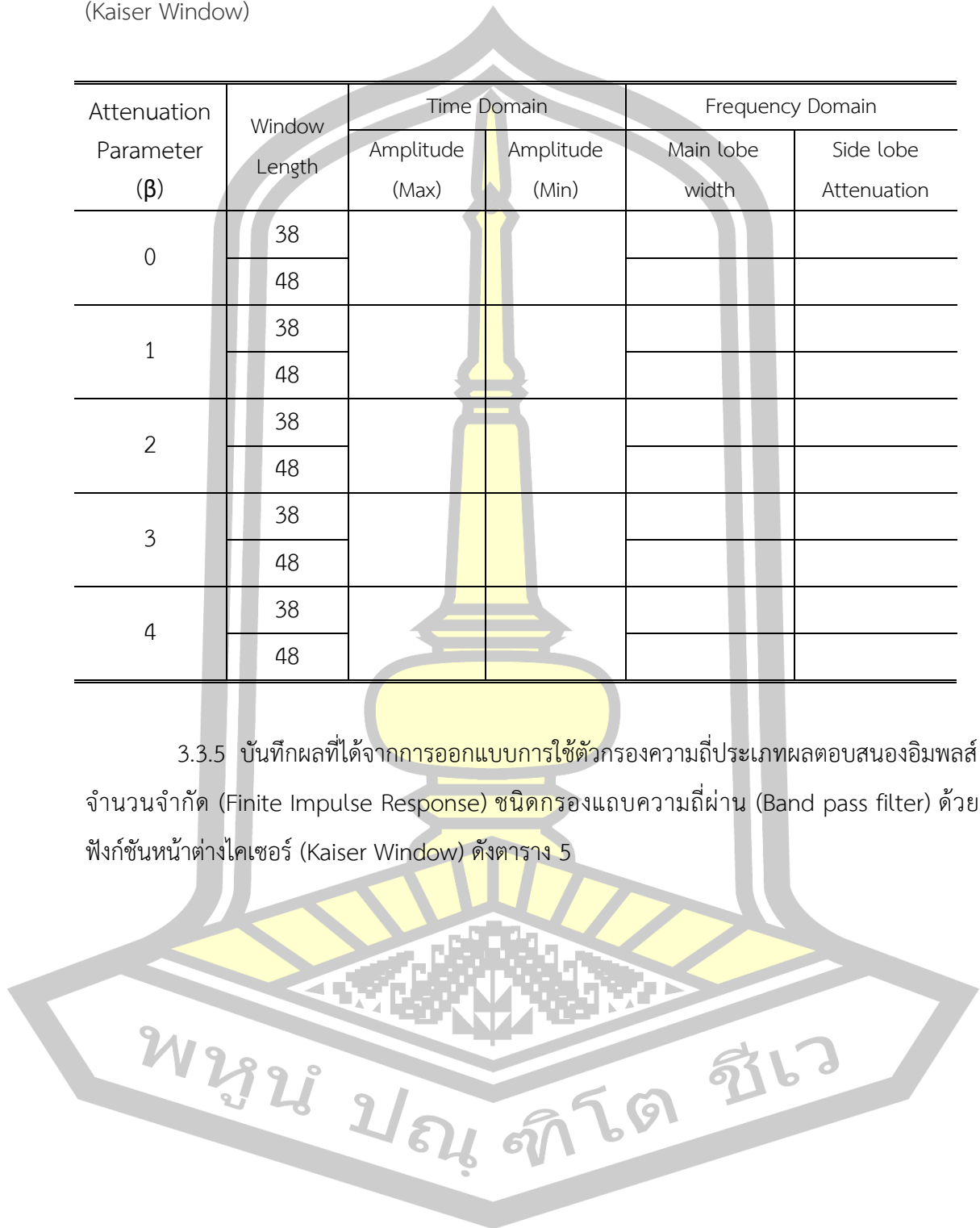
3.3.3 นำค่าของพารามิเตอร์ที่กำหนด เข้าทดสอบบนโปรแกรม MATLAB โดยมีการเพิ่มเติมในส่วนของตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) มาใช้ร่วมกับ ฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

3.3.4 บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบสำหรับการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ดังตาราง 4

ตาราง 4 สำหรับบันทึกผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window)

Attenuation Parameter (β)	Window Length	Time Domain		Frequency Domain	
		Amplitude (Max)	Amplitude (Min)	Main lobe width	Side lobe Attenuation
0	38				
	48				
1	38				
	48				
2	38				
	48				
3	38				
	48				
4	38				
	48				

3.3.5 บันทึกผลที่ได้จากการออกแบบการใช้ตัวกรองความถี่ประเภทผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response) ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ดังตาราง 5



ตาราง 5 สำหรับบันทึกผลการทดสอบ การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter)

Attenuation Parameter (β)	Filter order (N)	Transition Width	Side lobe Attenuation (dB)		No. of side lobe
			Max	Min	
0	38				
	48				
1	38				
	48				
2	38				
	48				
3	38				
	48				
4	38				
	48				

3.3.6 วิเคราะห์และบันทึกผลสรุปที่ได้ของการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) และ การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) โดยพิจารณาแนวโน้มที่ได้จากการออกแบบพารามิเตอร์เบต้า, อันดับของตัวกรอง, ความถี่ตัด และ ความถี่สุม โดยพิจารณาลักษณะของรูปกราฟ, ค่าความกว้างของกลีบหลัก (Mainlobe width) และ กลีบด้านข้าง (Side lobe attenuation)

บทที่ 4

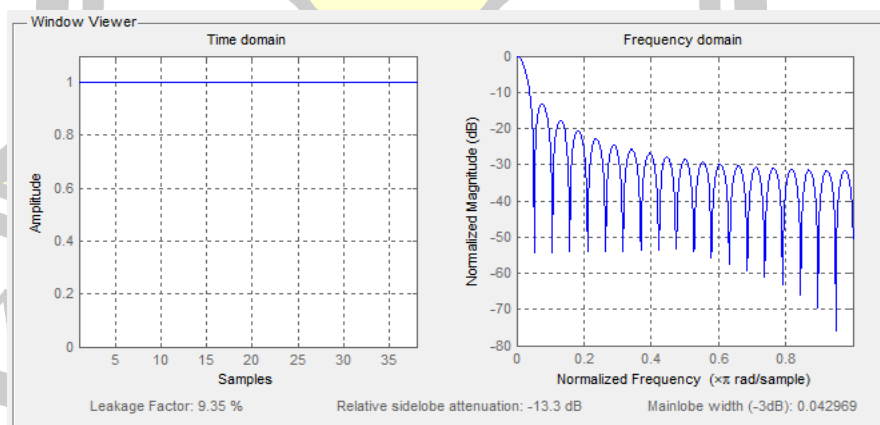
ผลการวิจัย

หลังจากผ่านขั้นตอนของการวิเคราะห์และออกแบบข้อมูลเพื่อนำไปทดสอบบนโปรแกรม MATLAB สามารถแบ่งผลการวิจัยออกได้เป็น การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window) และ การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับ ตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ให้ผลดังนี้

4.1 การออกแบบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window)

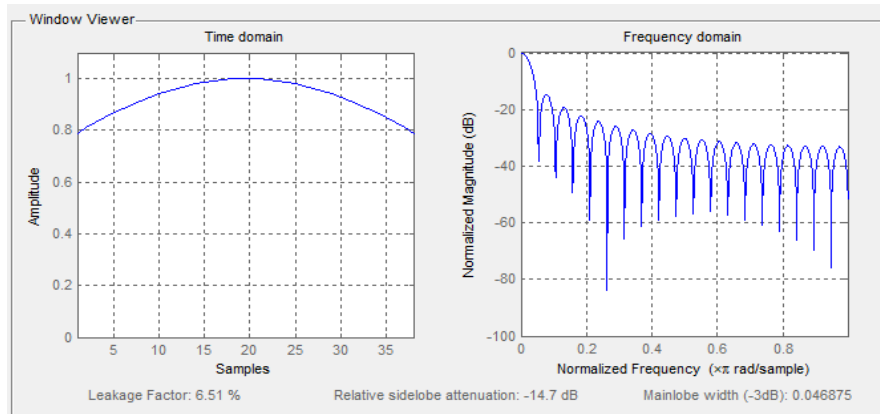
ตาราง 6 แสดงข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ บน โปรแกรม MATLAB

Parameter	Values
Length	38, 48
Beta	0 - 4

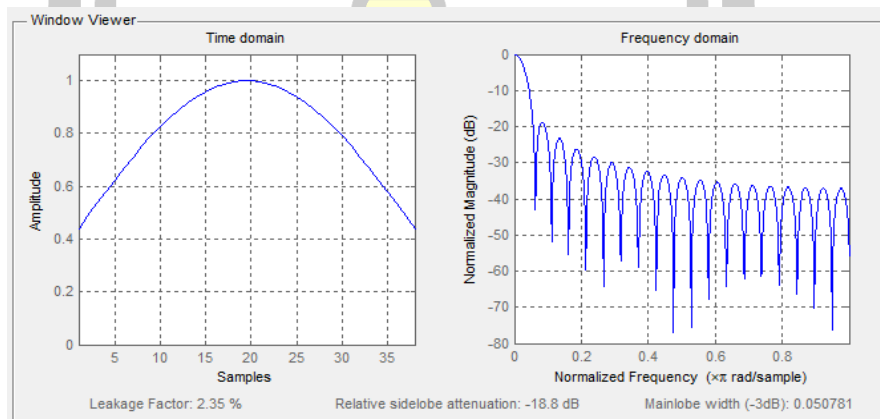


ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window

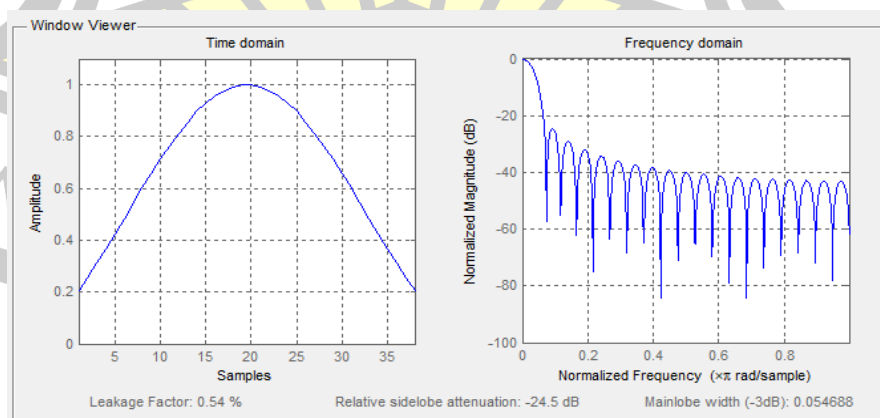
โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 0$



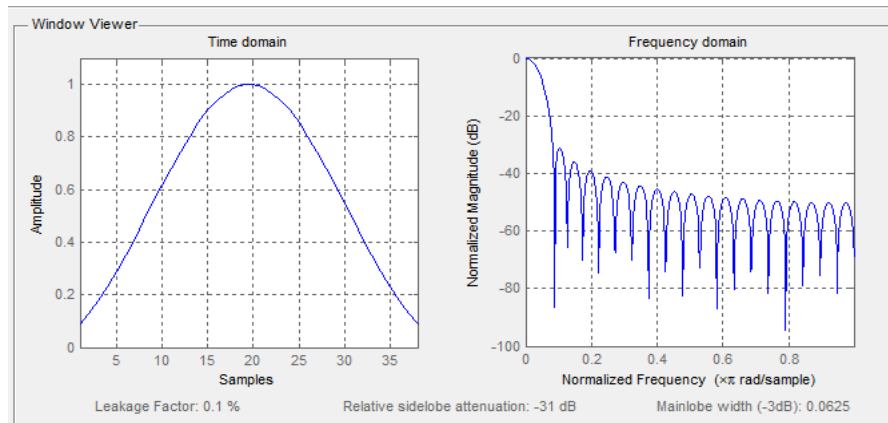
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $Beta = 1$



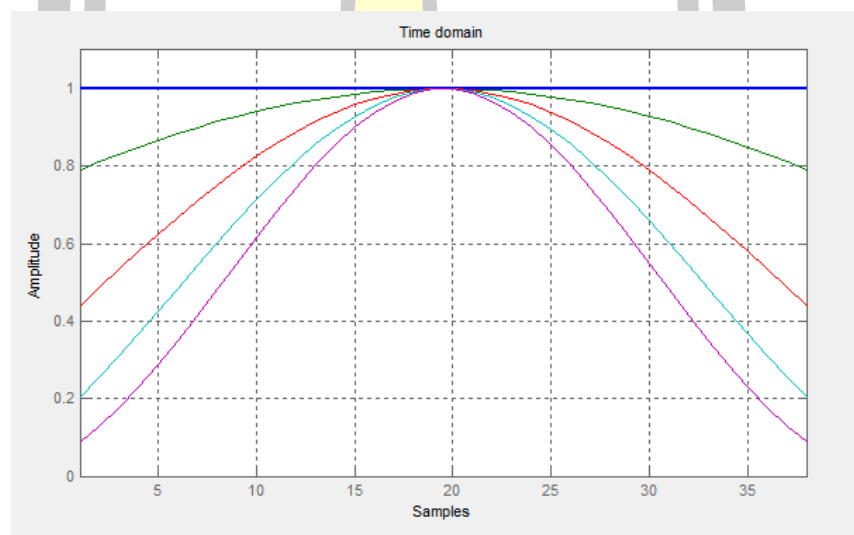
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $Beta = 2$



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $Beta = 3$

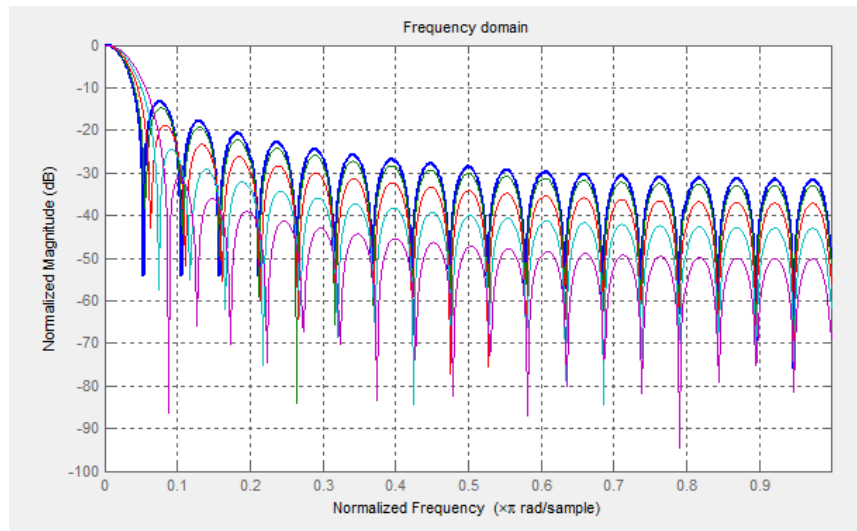


ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 4$



ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงการตอบสนอง Amplitude Time Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 0, 1, 2, 3, 4$

พหุ ประถม ๓๖



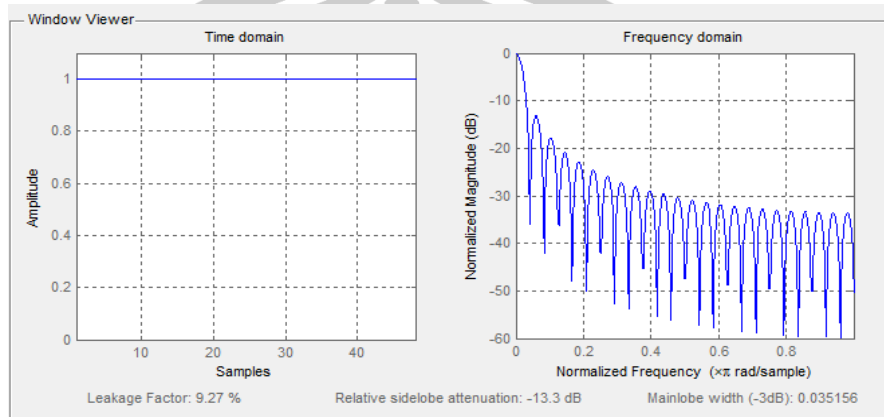
ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude Frequency Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 0, 1, 2, 3, 4$

ตาราง 7 แสดง Time domain and Frequency domain of Kaiser's window function (Window length $N = 38$)

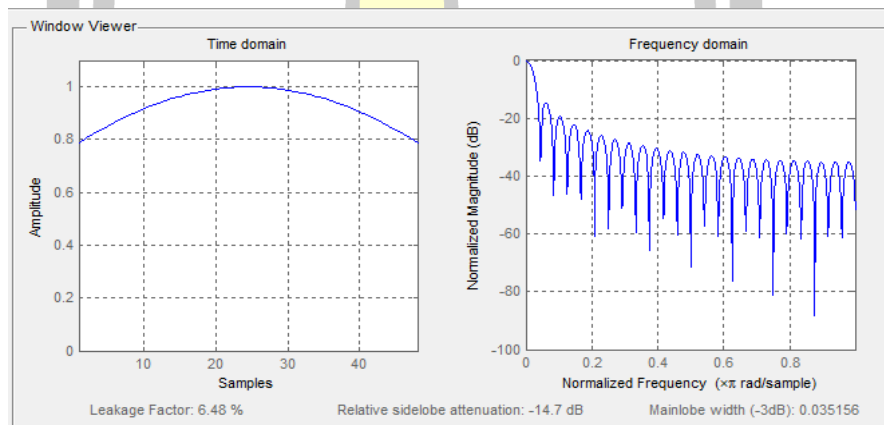
Attenuation Parameter (β)	Time domain		Frequency domain	
	Maximum Amplitude	Minimum Amplitude	Main lobe width	Relative side lobe attenuation (dB)
0	1.00	1.00	0.042969	-13.30
1	1.00	0.08	0.046875	-14.70
2	1.00	0.04	0.050781	-18.80
3	1.00	0.02	0.054688	-24.50
4	1.00	0.01	0.062500	-31.00

ผลการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเซอร์ (Kaiser Window) แสดงในภาพประกอบ 29 – 35 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 7 สำหรับ $N = 38$ ที่ Attenuation Parameter $\beta = 0, 1, 2, 3$ และ 4 จากการทดสอบพบว่า เมื่อค่า β สูงขึ้น Mainlobe width เพิ่มขึ้นจาก 0.042969 ที่ $\beta = 0$

เป็น 0.062500 ที่ Beta = 4 และ Side lobe Attenuation ลดลงจาก -13.30 dB ที่ Beta = 0
 ลดลงเป็น -31.00 dB ที่ Beta = 4

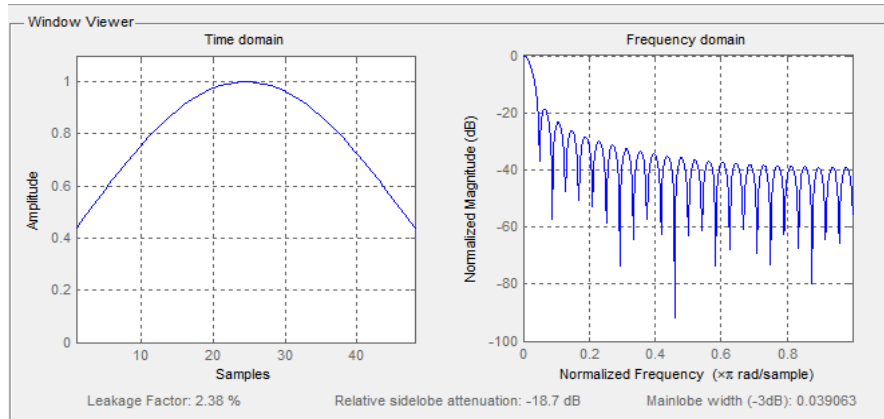


ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window
 โดยกำหนด $N = 48$ ที่ Beta = 0

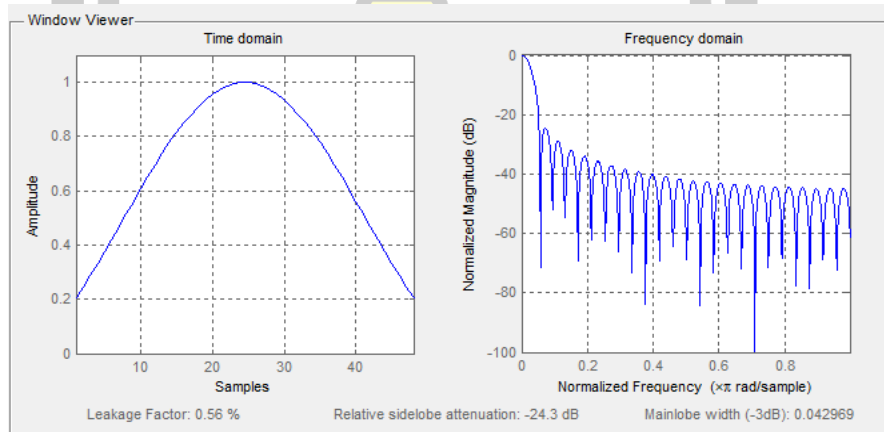


ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window
 โดยกำหนด $N = 48$ ที่ Beta = 1

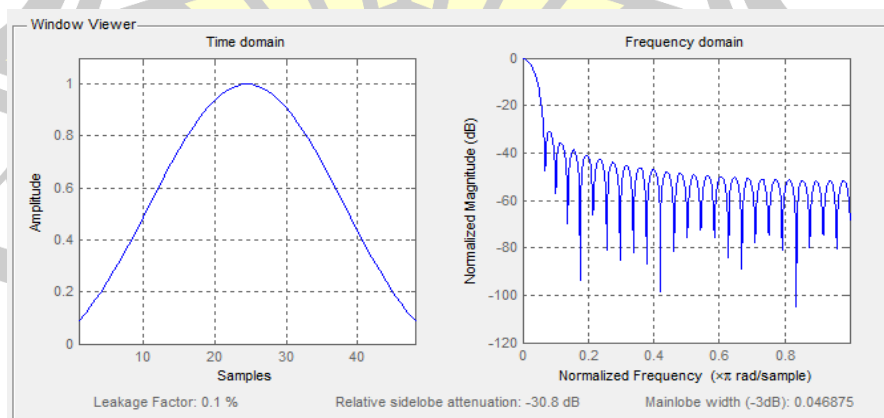
พหุ ประถม ๓๖



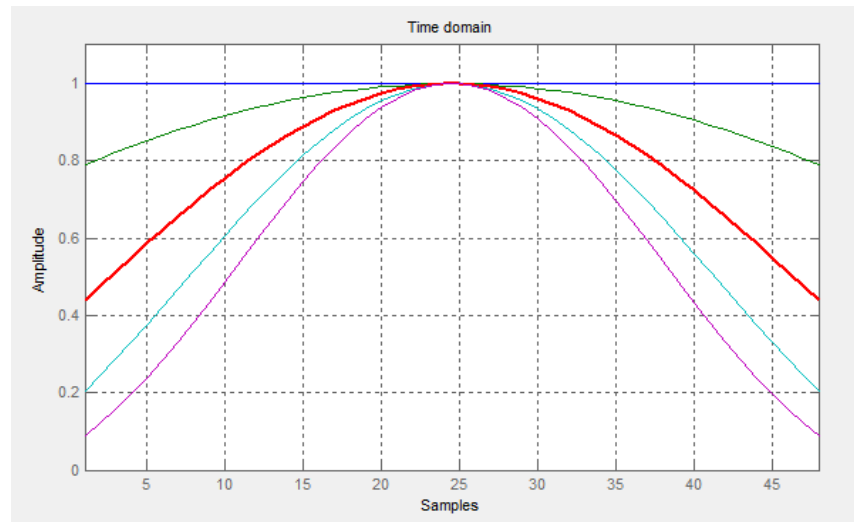
ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 2$



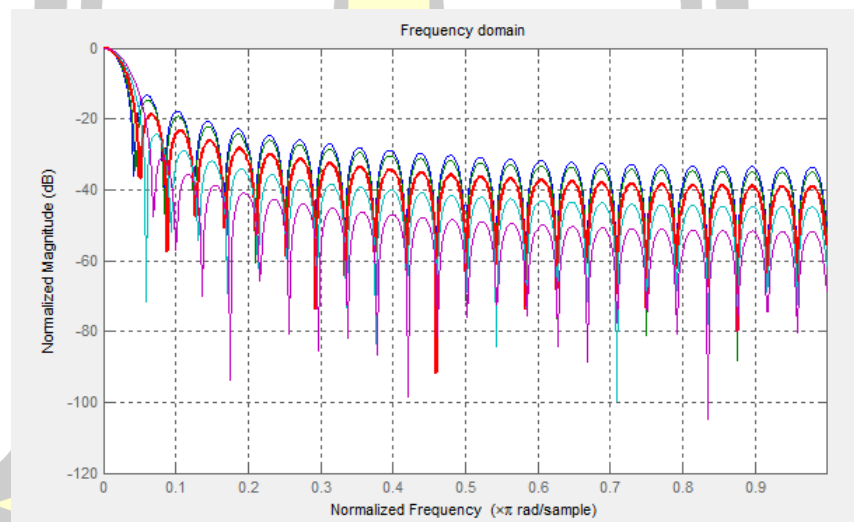
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 3$



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 4$



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงการตอบสนอง Amplitude Time Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\text{Beta} = 0, 1, 2, 3, 4$



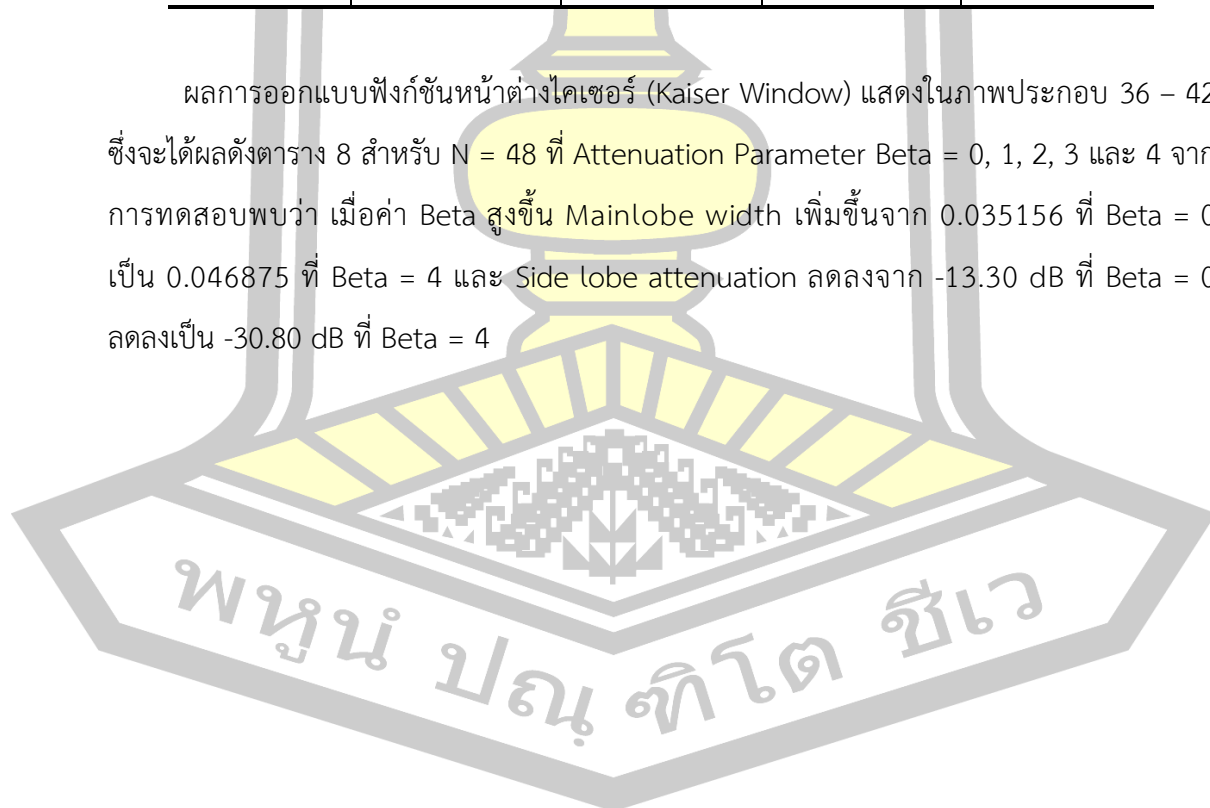
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงการตอบสนอง Magnitude Frequency Domain ของ Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\text{Beta} = 0, 1, 2, 3, 4$

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 8 แสดง Time domain and Frequency domain of Kaiser's window function
(Window length $N = 48$)

Attenuation Parameter (β)	Time domain		Frequency domain	
	Maximum Amplitude	Minimum Amplitude	Mainlobe width	Relative sidelobe attenuation (dB)
0	1.00	1.00	0.035156	-13.30
1	1.00	0.08	0.035156	-14.70
2	1.00	0.04	0.039063	-18.70
3	1.00	0.02	0.042969	-24.30
4	1.00	0.01	0.046875	-30.80

ผลการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) แสดงในภาพประกอบ 36 – 42 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 8 สำหรับ $N = 48$ ที่ Attenuation Parameter Beta = 0, 1, 2, 3 และ 4 จากการทดสอบพบว่า เมื่อค่า Beta สูงขึ้น Mainlobe width เพิ่มขึ้นจาก 0.035156 ที่ Beta = 0 เป็น 0.046875 ที่ Beta = 4 และ Side lobe attenuation ลดลงจาก -13.30 dB ที่ Beta = 0 ลดลงเป็น -30.80 dB ที่ Beta = 4



ตาราง 9 แสดงผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) สำหรับ $N = 38$ และ 48

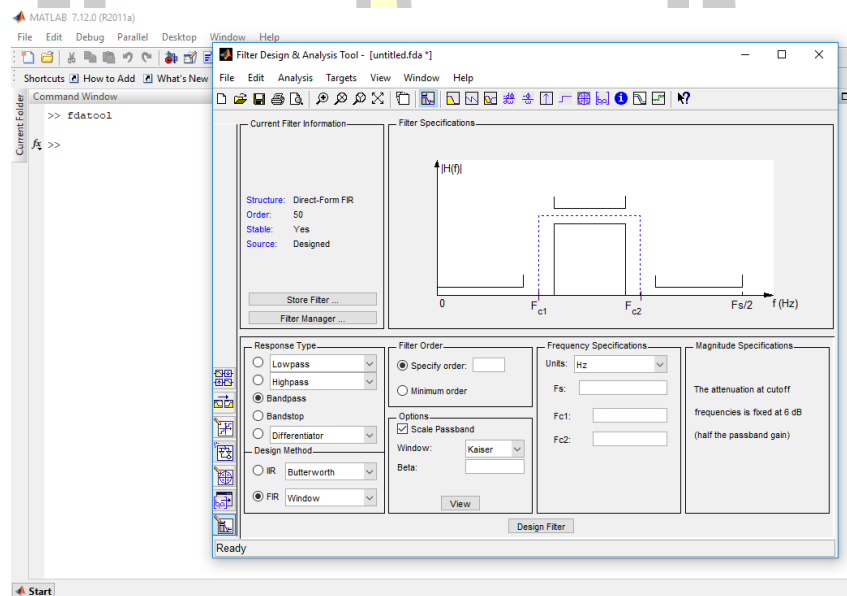
Attenuation Parameter (β)	Window Length (N)	Time Domain		Frequency Domain	
		Maximum Amplitude	Minimum Amplitude	Mainlobe Width	Sidelobe Attenuation
0	38	1.00	1.00	0.042969	-13.3
	48			0.035156	-13.3
1	38	1.00	0.08	0.046875	-14.7
	48			0.035156	-14.7
2	38	1.00	0.04	0.050781	-18.8
	48			0.039063	-18.7
3	38	1.00	0.02	0.054688	-24.5
	48			0.042969	-24.3
4	38	100	0.01	0.062500	-31.0
	48			0.046875	-30.8

ผลการทดสอบวิธีหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ด้วยฟังก์ชัน ให้การตอบสนองของ Magnitude แสดงในภาพประกอบ 29 – 42 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 9 คือ ค่า $N = 38$ และ $N = 48$ โดยที่ค่า $\beta = 0, 1, 2, 3$ และ 4 เพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อค่า β สูงขึ้น Mainlobe Width เพิ่มขึ้น และ Side lobe attenuation ลดลง

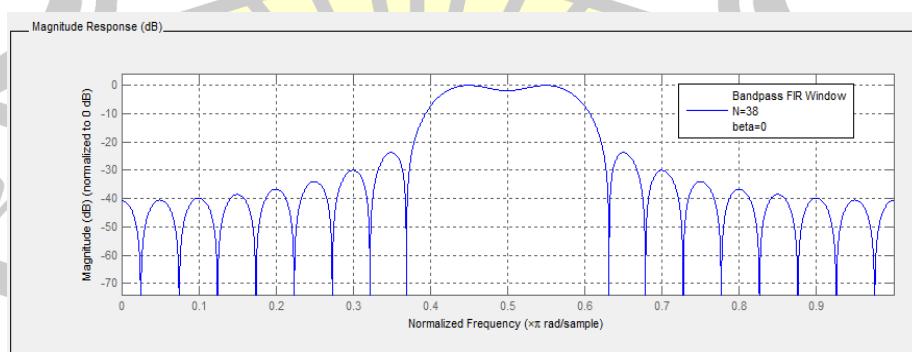
4.2 การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter)

ตาราง 10 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรม MATLAB สำหรับ Parameters of Band pass FIR filter using Kaiser's window function

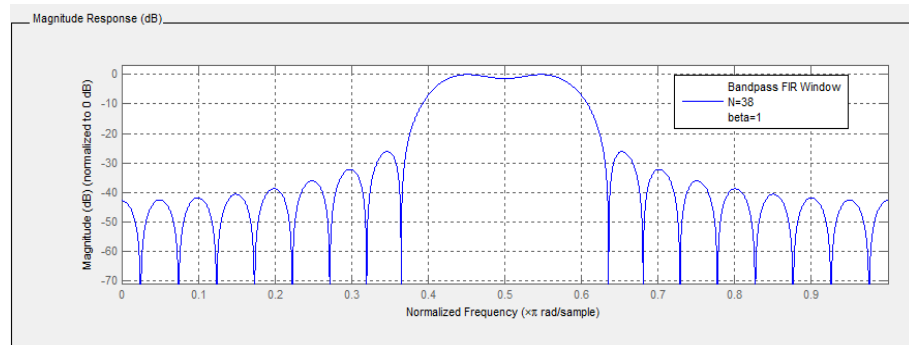
Parameter	Values
Sampling Frequency	100Hz
First cut-off frequency	20Hz
Second cut-off frequency	30Hz
Filter Order or Window Length	38, 48
β (Attenuation Parameter)	0 to 4



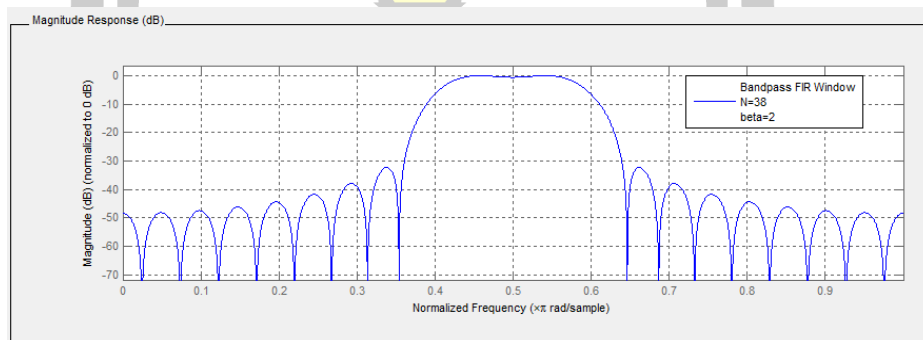
ภาพประกอบ 43 แสดงฟังก์ชัน FDATool ที่ใช้ออกแบบฟังก์ชันหน้าต่าง



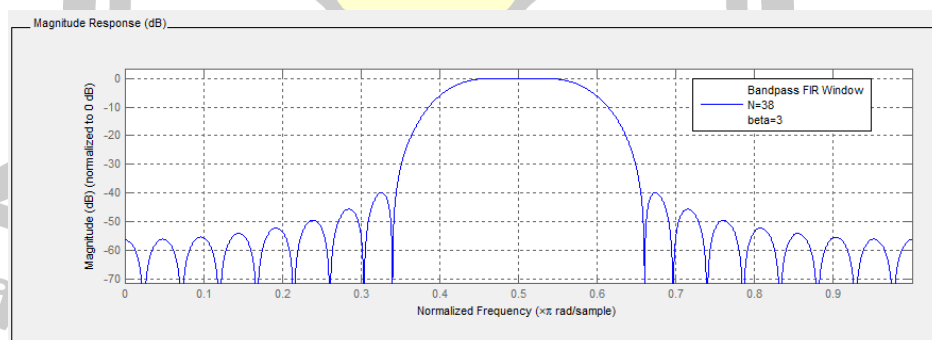
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 0$



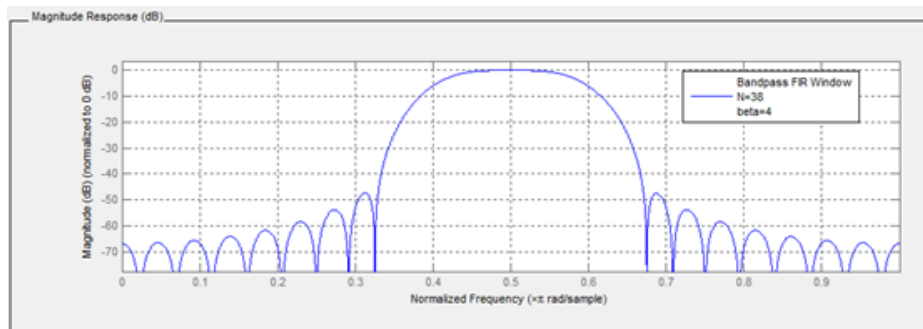
ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 1$



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 2$



ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\text{Beta} = 3$

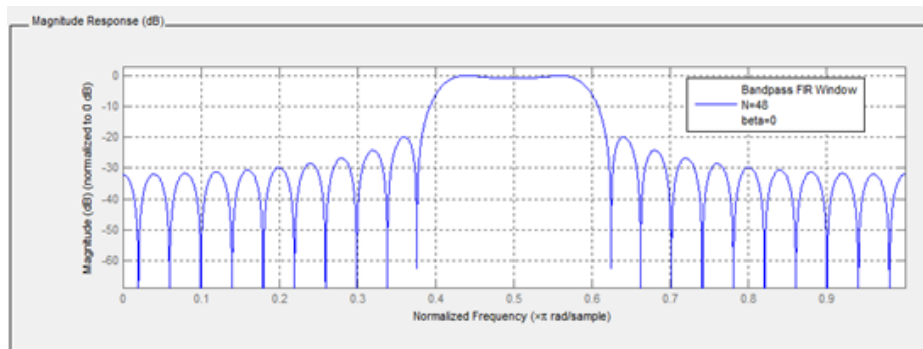


ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 38$ ที่ $\beta = 4$

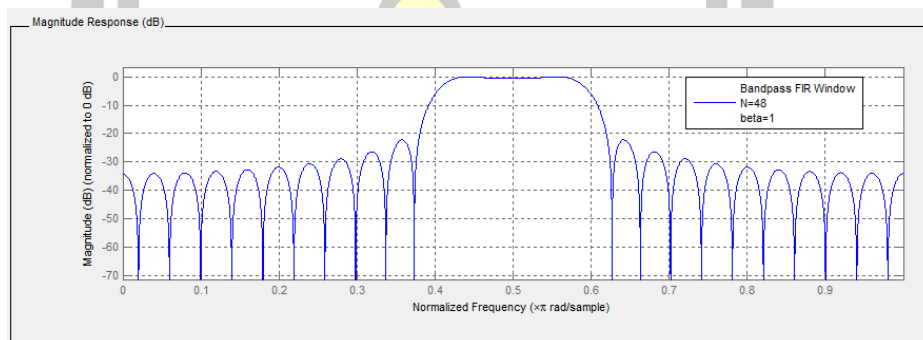
ตาราง 11 แสดง Transition width, Side lobe attenuation (dB) and Number of side lobe of Band pass FIR Filter using Kaiser's window function (Window length $N = 38$)

Attenuation Parameter (β)	Transition width	Side lobe attenuation (dB)		No. of side lobe
		Max	Min	
0	0.0373535	-23.73	-40.73	16
1	0.0423584	-26.13	-42.79	16
2	0.0516357	-32.28	-48.32	16
3	0.0736084	-39.93	-56.36	16
4	0.0855713	-47.31	-66.88	16

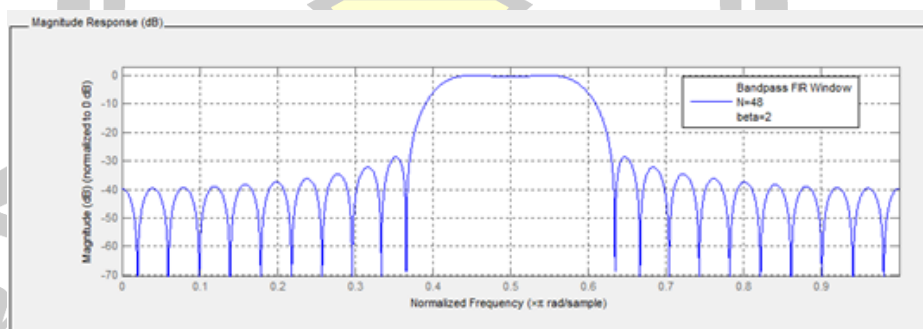
ผลการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ให้การตอบสนองของ Magnitude แสดงในภาพประกอบ 44 – 48 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 11 สำหรับ $N = 38$ ที่ Attenuation Parameter $\beta = 0, 1, 2, 3$ และ 4 เพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อค่า β สูงขึ้น Transition width เพิ่มขึ้นจาก 0.0373535 ที่ $\beta = 0$ เป็น 0.0855713 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe Attenuation ลดลงจาก -23.73 ที่ $\beta = 0$ ลดลงเป็น -47.31 ที่ $\beta = 4$ โดยมีจำนวน Side lobe จำนวน 16 โลป



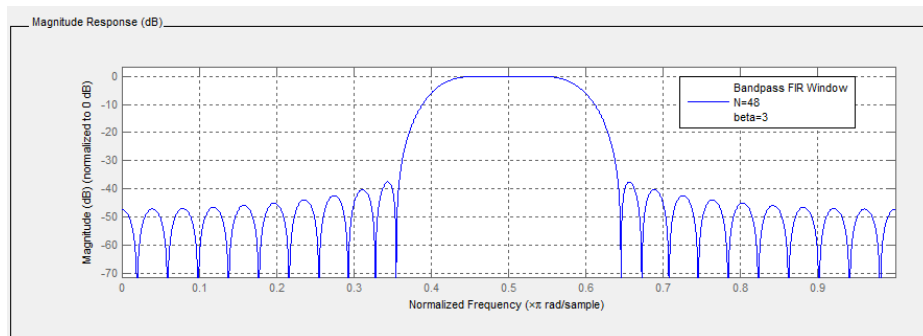
ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 0$



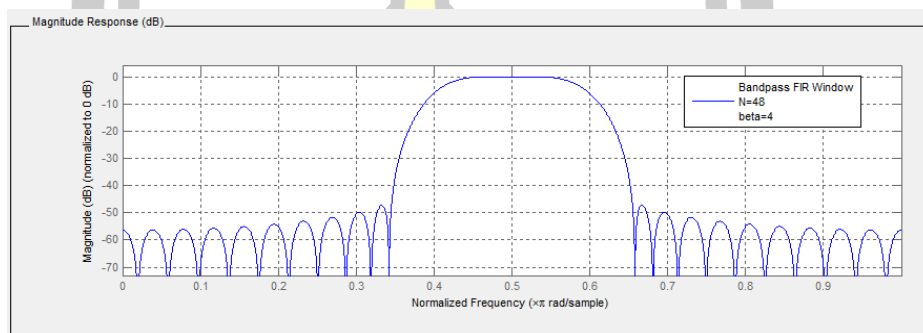
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 1$



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $Beta = 2$



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 3$



ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงการตอบสนองตัวกรอง Band pass FIR บน Kaiser Window โดยกำหนด $N = 48$ ที่ $\beta = 4$

ตาราง 12 แสดง Transition width, Side lobe attenuation (dB) และ Number of side lobe of Band pass FIR Filter using Kaiser's window function (Window length $N = 48$)

Attenuation Parameter (β)	Transition width	Side lobe attenuation (dB)		No. of side lobe
		Max	Min	
0	0.033447	-18.85	-32.00	20
1	0.035278	-22.22	-34.11	20
2	0.043335	-28.59	-39.64	20
3	0.060547	-37.54	-47.26	20
4	0.072388	-47.23	-56.35	20

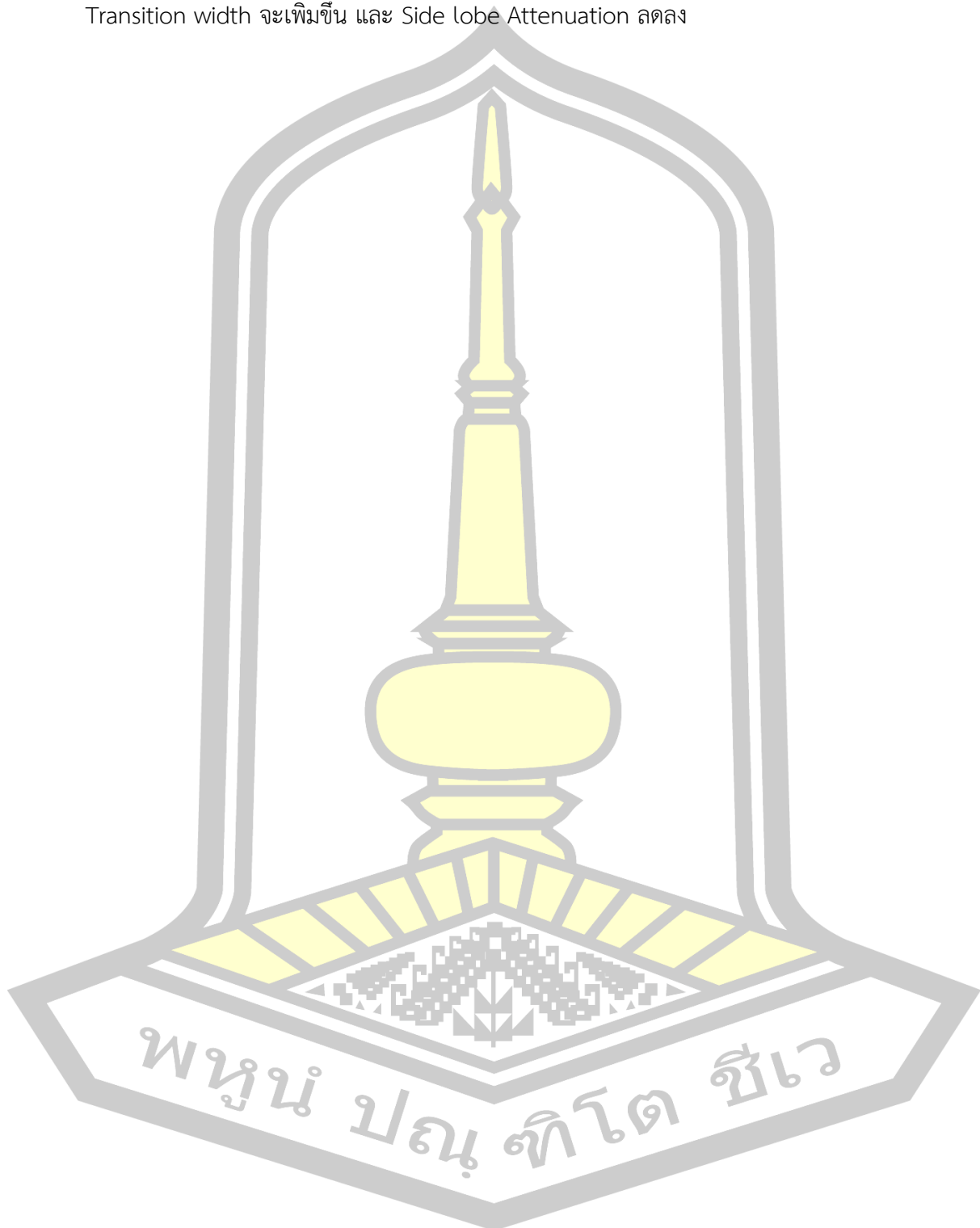
ผลการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ให้การตอบสนองของ Magnitude แสดงในภาพประกอบ 49 – 53 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 12 สำหรับ $N = 48$ ที่ Attenuation Parameter $\beta = 0, 1, 2, 3$ และ 4 เพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อค่า β สูงขึ้น Transition width เพิ่มขึ้นจาก 0.033447 ที่ $\beta = 0$ เป็น 0.072388 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe Attenuation ลดลงจาก -18.85 ที่ $\beta = 0$ ลดลงเป็น -47.23 ที่ $\beta = 4$ โดยมีจำนวน Side lobe จำนวน 20 โลบ

ตาราง 13 แสดงผลการทดสอบการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) สำหรับ $N = 38$ และ 48

Attenuation Parameter (β)	Filter order (N)	Transition width	Side lobe Attenuation (dB)		No. of Side lobe
			Max	Min	
0	38	0.037354	-23.73	-40.73	16
	48	0.033447	-18.85	-32.00	20
1	38	0.042358	-26.13	-42.79	16
	48	0.035278	-22.22	-34.11	20
2	38	0.051636	-32.28	-48.32	16
	48	0.043335	-28.59	-39.64	20
3	38	0.073608	-39.93	-56.36	16
	48	0.060547	-37.54	-47.26	20
4	38	0.085571	-47.31	-66.88	16
	48	0.072388	-47.23	-56.35	20

ผลการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างไคเซอร์ (Kaiser Window) ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) ให้การตอบสนองของ Magnitude แสดงในภาพประกอบ 44 – 53 ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 13 สำหรับ $N = 38$ และ $N = 48$ ที่ Attenuation

Parameter Beta = 0, 1, 2, 3 และ 4 เพิ่มขึ้นตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อ Beta สูงขึ้น Transition width จะเพิ่มขึ้น และ Side lobe Attenuation ลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

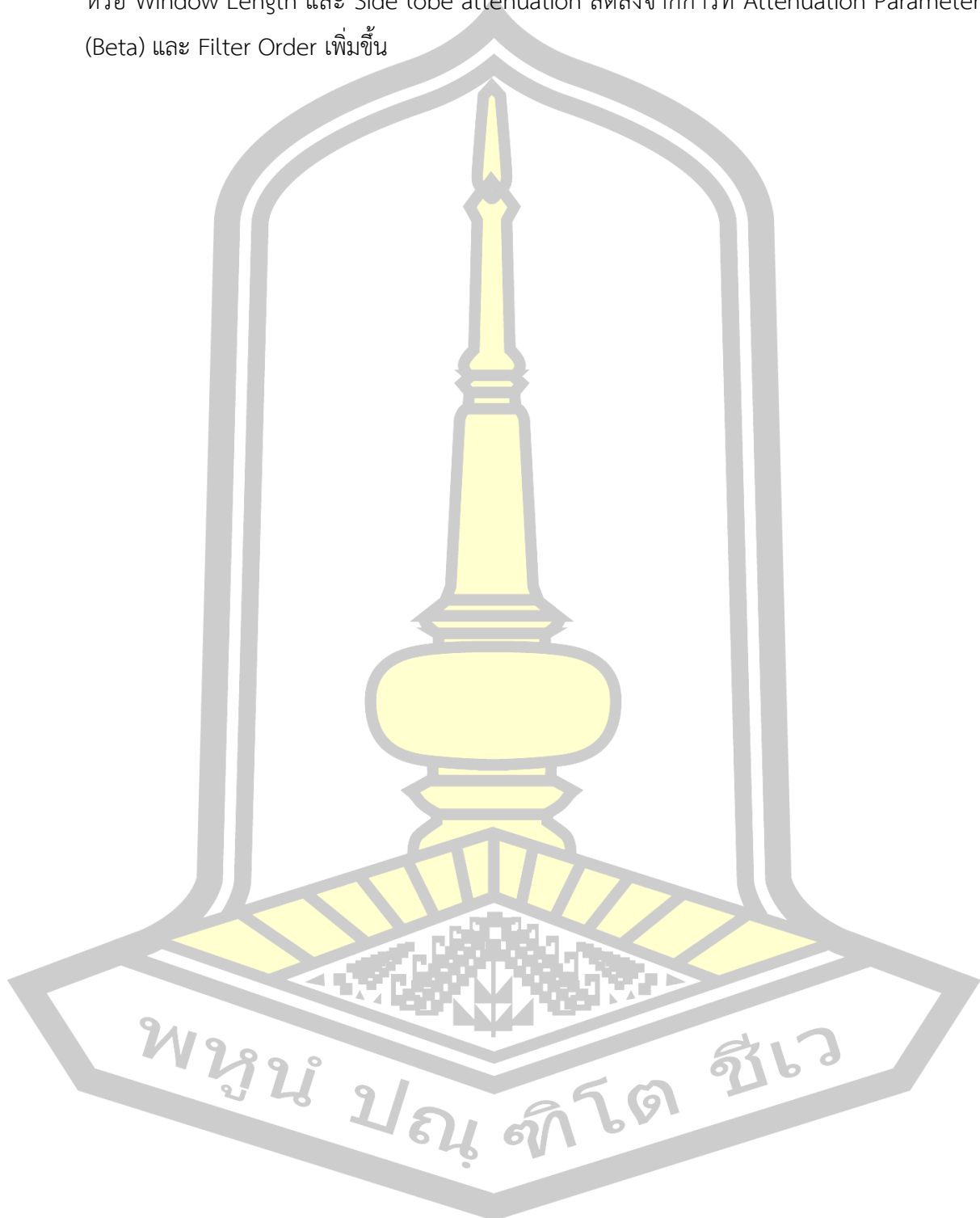
งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ด้วยฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ ซึ่งกำหนดให้ Sampling frequency (F_s) = 100 Hz, Cut-off frequency (F_c) = 20 Hz และ 30 Hz โดยมี Filter Order หรือ Window Length = 38 และ 48 ที่ Attenuation Parameter (β) = 0, 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ แบ่งการวิเคราะห์การทดสอบเป็น การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ และการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์

สำหรับการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ เมื่อ Window length = 38 มีผลให้ Mainlobe width มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.042969 ที่ $\beta = 0$ จนถึง 0.062500 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe attenuation ลดลง จาก -13.3 dB ที่ $\beta = 0$ จนถึง -31.0 dB ที่ $\beta = 4$ โดยเมื่อ Window length = 48 มีผลให้ Mainlobe width มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.035156 ที่ $\beta = 0$ จนถึง 0.046875 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe attenuation ลดลง จาก -13.3 dB ที่ $\beta = 0$ จนถึง -30.8 dB ที่ $\beta = 4$

สำหรับการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ซึ่งเป็นการออกแบบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกัน เมื่อ Filter order = 38 มีผลให้ Transition width มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.037354 ที่ $\beta = 0$ จนถึง 0.085571 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe attenuation ลดลง จาก -23.7 dB ที่ $\beta = 0$ จนถึง -47.3 dB ที่ $\beta = 4$ โดยเมื่อ Filter order = 48 มีผลให้ Transition width มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.033447 ที่ $\beta = 0$ จนถึง 0.072388 ที่ $\beta = 4$ และ Side lobe attenuation ลดลง จาก -18.9 dB ที่ $\beta = 0$ จนถึง -47.2 dB ที่ $\beta = 4$

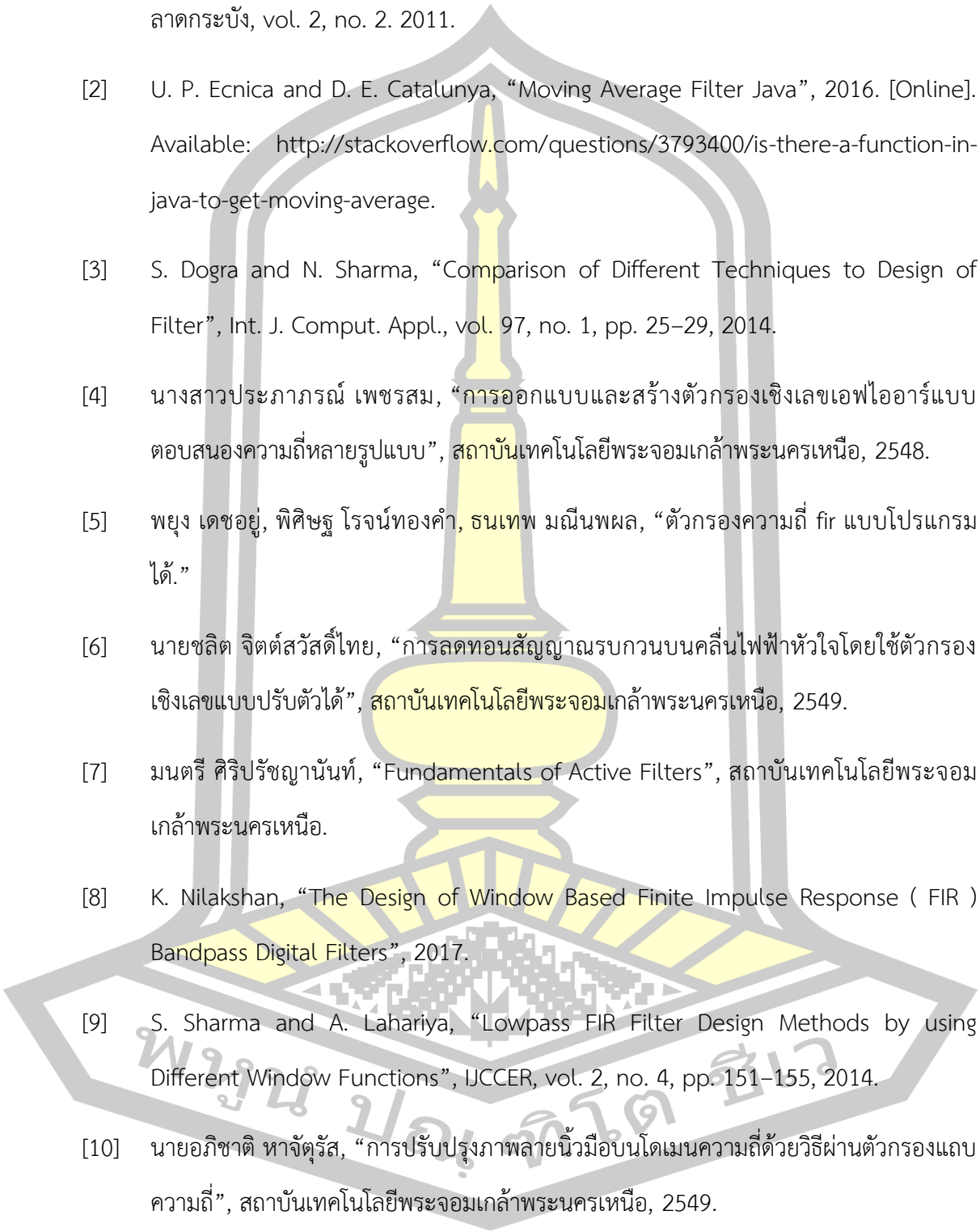
จากการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ การออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ และการออกแบบฟังก์ชันหน้าต่างโคเชอร์ประยุกต์ใช้กับตัวกรองความถี่ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านชนิดเอฟไออาร์ โดยทดลองปรับ Attenuation Parameter (β) ที่ Filter Order หรือ Window Length = 38 และ 48 สรุปได้ว่า β และ N มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Width of Mainlobe และ Side lobe attenuation กล่าวคือ Mainlobe Width เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ β ส่งผลให้

Side lobe attenuation ลดลง และ Transition width ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Filter Order หรือ Window Length และ Side lobe attenuation ลดลงจากการที่ Attenuation Parameter (Beta) และ Filter Order เพิ่มขึ้น



บรรณานุกรม



- 
- [1] S. Figure, “ตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, vol. 2, no. 2. 2011.
- [2] U. P. Ecnica and D. E. Catalunya, “Moving Average Filter Java”, 2016. [Online]. Available: <http://stackoverflow.com/questions/3793400/is-there-a-function-in-java-to-get-moving-average>.
- [3] S. Dogra and N. Sharma, “Comparison of Different Techniques to Design of Filter”, Int. J. Comput. Appl., vol. 97, no. 1, pp. 25–29, 2014.
- [4] นางสาวประภาภรณ์ เพชรสม, “การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขเอฟไออาร์แบบตอบสนองความถี่หลายรูปแบบ”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2548.
- [5] พยุง เดชอยู่, พิศิษฐ ไรจน์ทองคำ, ชนเทพ มณีนพผล, “ตัวกรองความถี่ fir แบบโปรแกรมได้.”
- [6] นายชลิต จิตต์สวัสดิ์ไทย, “การลดทอนสัญญาณรบกวนบนคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้ตัวกรองเชิงเลขแบบปรับตัวได้”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [7] มนตรี ศิริปรัชญานันท์, “Fundamentals of Active Filters”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [8] K. Nilakshan, “The Design of Window Based Finite Impulse Response (FIR) Bandpass Digital Filters”, 2017.
- [9] S. Sharma and A. Lahariya, “Lowpass FIR Filter Design Methods by using Different Window Functions”, IJCCER, vol. 2, no. 4, pp. 151–155, 2014.
- [10] นายอภิชาติ หาจตุรัส, “การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือบนโดเมนความถี่ด้วยวิธีผ่านตัวกรองแถบความถี่”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [11] นายสุประวิทย์ เมืองเจริญ, “การศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวนในสัญญาณเสียงโดยใช้การกรองความถี่แบบเอฟไออาร์”, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.

- [12] นางสาวสุกัญญา แพรสมบุญ, “การออกแบบตัวกรองเชิงเลข FIR หลายเอาต์พุตแบบเวลาจริง”, 2549.
- [13] เอกรัตน์ สุขสุคนธ์, “การศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณเสียงในห้องประชุม โดยใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วร่วมกับตัวกรองดิจิทัลจำกัด STUDYING”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560.
- [14] A. Suksukont and J. Srinonchat, “การปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณเสียงในห้องประชุม โดยใช้ตัวกรองดิจิทัล ผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด”, vol. 18, no. 4, pp. 27–38, 2018.
- [15] R. P. Narwaria and M. Kumar, “Comparison of FIR Filter Using Different Window Functions”, vol. 05, no. 10, pp. 634–637, 2018
- [16] นายศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์, “การศึกษาและออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์แบบคัปเปิ้ล สำหรับระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.
- [17] นายบัณฑิตย์ สุขกล้า, “การออกแบบตัวกรองเชิงเลข Band-pass ให้สมมาตร โดยใช้ตัวกรองเชิงเลขแบบ All-pass”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.
- [18] หอมจันทร์, สายน้ำฝน, สุรพันธ์ ยี่มมัน, พยุง เดชอู, กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบ หลายแถบความถี่ผ่าน”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [19] Ghulam Ahmad Raza, Md. Jafir Alam, Md. Nasim Ansari, “Design and Performance Analysis of Band Pass Filter Using Blackman, Hamming and Kaiser Windows”, Int. J. Res. Eng. Technol., vol. 03, no. 08, pp. 211–214, 2014.
- [20] Pramod Yadav, Shankarlal Sahu, Pranay Kumar Rahi, “Design of Low Pass Fir Filter Using Rectangular, Hanning And Kaiser Window Techniques”, Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol., vol. V, no. II, pp. 326–340, 2017.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวปภาวรินทร์ วงศ์กังวาน
วันเกิด	วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2539
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	199/196 ถนนมิตรภาพ-โกทา ตำบลศิลา อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น รหัสไปรษณีย์ 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 ระดับปริญญาตรี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2560 ระดับบัณฑิตศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ์ ปณุ์ ทิโต ชีเว