การออกแบบระบบลำโพงคู่สมมาตรและผลการวัดการแผ่กระจายของเสียง

Active 2 band Pair-Wise Loudspeakers System Design And their Radiation Polar Pattern

ณรงค์พัฒน์ สุคนธนาวิไล
NARONGPAT SUKHONTANAWILAI
ณัฐพงษ์ สว่างแข
NATTAPONG SAWANGKHAE
ภานุวัฒน์ ฉิมปี่
PANUWAT CHMPEE

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

หอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบลำโพงคู่สมมาตรและผลการวัดการแผ่กระจายของเสียง

Active 2 band Pair-Wise Loudspeakers System Design And their Radiation Polar Pattern

T144390

ณรงค์พัฒน์ สุคนธนาวิไล
NARONGPAT SUKHONTANAWILAI
ณัฐพงษ์ สว่างแข
NATTAPONG SAWANGKHAE
ภานุวัฒน์ ฉิมปี่
PANUWAT CHMPEE

สจหมู่ 144390
เลขทะเบียน
วัน เดือน ปี 24 พ.ย. 2559

b 12819682
i

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

Active 2 band Pair-Wise Loudspeakers System Design And their Radiation Polar Pattern

NARONGPAT SUKHONTANAWILAI
NATTAPONG SAWANGKHAE
PANUWAT CHMPEE

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONFKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบระบบลำโพงคู่สมมาตรและผลการวัดการแผ่กระจายของเสียง
Thesis Title	Active 2 band Pair-Wise Loudspeakers System Design And their Radiation Polar Pattern
ชื่อนักศึกษา	นายณรงค์พัฒน์ สุคนธนาวิไล นายณัฐพงษ์ สว่างแข นายภานุวัฒน์ ฉิมปี่
ระดับปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา	2558

(.....)

ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบระบบลำโพงคู่สมมาตรและผลการวัดการแผ่กระจายของเสียง		
รายชื่อนักศึกษา	นายณรงค์พัฒน์	สุคนธนาวิไล	รหัสนักศึกษา 55010326
	นายณัฐพงษ์	สว่างแข	รหัสนักศึกษา 55010376
	นายภานุวัฒน์	ฉิมปี่	รหัสนักศึกษา 55010942
ระดับปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดลชัย สุขเจริญผล		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอหลักการออกแบบระบบลำโพงคู่สมมาตรและการวัดผลการแผ่กระจายของเสียงจากระบบลำโพงโดยทดสอบการแผ่กระจายของเสียงในลักษณะต่างๆ แล้วนำมาศึกษาและเปรียบเทียบผลการแผ่กระจายของเสียงด้วยค่าของโพลีโนเมียลที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จะนำมาพิจารณาประสิทธิภาพของการแผ่กระจายเสียงของลำโพง แล้วเปรียบเทียบองค์ประกอบต่างๆ ของวงจรกรองความถี่เพื่อการออกแบบลำโพงที่เหมาะสม

Thesis Title	ACTIVE 2 BAND PAIR-WISE LOUDSPEAKERS SYSTEM DESIGN AND THIRE RADIATION POLAR PATTERN			
Student	Mr.Narongpat	Sukhontanawilai	Student ID.	55010326
	Mr.Nattapong	Sawangkhae	Student ID.	55010376
	Mr.Panuwat	Chimpee	Student ID.	55010942
Degree	Bachelor of Engineering			
Program	Information Engineering			
Year	2015			
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dolchai Sookcharoenphol			

ABSTRACT

This thesis presents an implemented of active two-band pair-wise loudspeaker system and measured their radiation polar patterns. The frequency responses of crossover networks with different types of polynomial are compared. The simulation results shown that the main beam of polar pattern deviated from the listening point axis due to phase responses between the low-pass and high-pass filters of the crossover network does not in-phase each other.

Therefore, the proposed crossover network in this project met the in-phase condition, so that the main beam of the polar pattern lie on the listening axis or on axis. The two-band active filter circuit for suitable designed of the loudspeaker system is presented.

กิตติกรรมประกาศ

การทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนจากหลายส่วน ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดลชัย สุขเจริญผล ที่คอยให้คำปรึกษาด้านการจัดทำปริญญานิพนธ์และการจัดการปัญหาระหว่างดำเนินโครงงาน ทำให้การทำโครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิศวกรรมสารสนเทศทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการและปฏิบัติ นอกจากนี้ยังคอยให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำโครงงานในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งเป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดและคอยให้การสนับสนุนการจัดทำโครงงานครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสมาชิกภายในกลุ่มที่ร่วมจัดทำโครงงานด้วยความสามัคคีและเสียสละจนกระทั่งโครงงานนี้สัมฤทธิ์ผลดังจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

ณรงค์พัฒน์ สุคนธนาวิไล
ณัฐพงษ์ สว่างแข
ภานุวัฒน์ ฉิมปี๋

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษบทนำ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา 1

1.2 จุดประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน 1

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ 2

1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware) 2

1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software) 2

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ 4

2.1 ระบบเสียงในรูปแบบต่างๆ 4

2.1.1 ระบบเสียงแบบสเตอริโอ (Stereo) 4

2.1.2 ระบบเสียงแบบรอบทิศทาง (Surround) 4

2.1.2.1 ระบบเสียงรอบทิศทางแบบ 4.0 และ 4.1 ช่อง 4

2.1.2.2 ระบบเสียงรอบทิศทาง 5.1 ช่อง 5

2.1.2.3 ระบบ เสียงรอบทิศทาง แบบ 7.1 ช่อง 5

2.2 คลื่นเสียง 6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ลำโพง 6

2.3.1 ส่วนประกอบของลำโพง 7

2.3.2 ประเภทของลำโพง 8

2.4 ตู้ลำโพง 10

2.4.1 ตู้ปิด (Closed Boxes) 10

2.4.2 ตู้เปิด (Vented Boxes) 11

2.4.3 ตู้แบนพาส (Bandpass Boxes) 12

2.4.4 ตู้ไอโซบาริค (ISOBARIC) 13

2.5 วงจรกรองความถี่ (Filter) 14

2.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter) 15

2.6.1 ขนาดแรงดันของเกนขยาย (Voltage Gain) 15

2.6.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ (Filter Design) 16

2.7 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter) 17

2.7.1 ขนาดแรงดันของเกนขยาย (Voltage Gain) 17

2.7.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ (Filter Design) 17

2.8 วงจรกรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิทธ์ (Butterworth) 18

2.9 ลำดับของวงจรกรองความถี่ (Order of Filter) 21

2.9.1 1^{st} Order Filter 21

2.9.2 2^{nd} Order Filter 22

2.9.3 4^{th} Order Filter 23

2.9.4 การกำหนดและการประมาณค่าของตัวกรอง 25

2.9.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนและการประมาณค่าของ Pole ทั้งหมด 26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีและการจำลองของฟังก์ชันถ่ายโอน 28

3.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนเสียง 29

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB 32

3.2.1 สัญญาณจากฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth 32

3.2.2 สัญญาณจากฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley 36

3.2.3 สัญญาณจากฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel 39

3.2.4 สัญญาณจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Quasi In Phase 43

บทที่ 4 การจำลองและการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ 47

4.1 การปรับค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ 47

4.1.1 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε 47

4.1.2 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า α 49

4.1.3 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า Q 50

4.2 Pole-Zero 52

4.3 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทาง (Two-Band Crossover) 53

4.3.1 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทาง อันดับที่ 2 53

4.3.2 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทางอันดับที่ 4 58

4.4 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทาง (Three-Band Crossover) 62

4.4.1 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทางอันดับที่ 2 62

4.4.2 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทางอันดับที่ 4 67

4.5 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอน Q-เบิร์นสไตน์กับ Butterworth และ Linkwitz-Riley 74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ลักษณะการแพร่กระจายของเสียง 76

5.1 การต่อระบบลำโพงร่วมกับพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (PassiveCrossover Network) 76

5.2 การต่อระบบลำโพงร่วมกับแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Active-Crossover Network) 77

5.4 การแพร่กระจายเสียงของลำโพง 78

5.4.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตระหว่างลำโพงกับผู้ฟัง 78

5.4.2 สูตรที่ใช้ในการหากำลังของการแพร่กระจายเสียงของลำโพง 80

5.4.3 ผลการแพร่กระจายของเสียง 80

5.4.4 การเปรียบสัญญาณเสียงในครอสโอเน็ตเวิร์ค 88

บรรณานุกรม 91

ภาคผนวก ก Poster 92

ภาคผนวก ข การติดตั้งโปรแกรม MATLAB และ Altium Designer 93

ภาคผนวก ค การคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ และการหาค่าของตัวต้านทานกับค่าของตัวเก็บประจุ 105

ภาคผนวก ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 109

ภาคผนวก จ ประวัติคณะผู้จัดทำ 113

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุทและขนาดของเกนการขยาย 16
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุทและขนาดของเกนการขยาย 18
ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 30
ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 4 30
ตารางที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่อันดับที่ 2 31
ตารางที่ 4.1 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q 71
ตารางที่ 4.2 LPF ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์อันดับที่ 4 โดยแทนค่า ε, α และ Q 71
ตารางที่ 4.3 HPF ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์อันดับที่ 4 โดยแทนค่า ε, α และ Q 72
ตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน LPF อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q 72
ตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันถ่ายโอน HPF อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q 72
ตารางที่ 4.6 ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์ 73
ตารางที่ 4.7 ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ของ Q-เบิร์นสไตน์ 73
ตารางที่ 4.8 ขนาดและจุดตัดความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ 73
ตารางที่ 4.9 ค่า R, C สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ 73

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบเสียงรอบทิศทาง 4.0 ช่อง 4

รูปที่ 2.2 ระบบเสียงรอบทิศทาง 4.0 ช่อง 5

รูปที่ 2.3 ระบบเสียงรอบทิศทาง 5.1 ช่อง 5

รูปที่ 2.4 ระบบเสียงรอบทิศทาง 7.1 ช่อง 6

รูปที่ 2.5 คลื่นเสียง 6

รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของลำโพง 7

รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของลำโพง (แบบแยกชิ้นส่วน) 8

รูปที่ 2.8 ลำโพงทวีเตอร์ (Tweeter) 8

รูปที่ 2.9 ลำโพงมิดเรนจ์ 9

รูปที่ 2.10 ลำโพงมิดเบส 9

รูปที่ 2.11 ลำโพงวูเฟอร์ 10

รูปที่ 2.12 ลำโพงซับวูเฟอร์ (Subwoofer) 10

รูปที่ 2.13 ตู้ลำโพงแบบปิด 11

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบปิด 11

รูปที่ 2.15 ภาพตู้ลำโพงแบบเปิด 12

รูปที่ 2.16 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบเปิด 12

รูปที่ 2.17 ภาพตู้ลำโพงแบบแบนพาส 13

รูปที่ 2.18 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบแบนพาส 13

รูปที่ 2.19 ภาพตู้ลำโพงแบบไอโซบาริค 13

รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบระหว่าง Spectrum ของสัญญาณ Original (ซ้าย) Spectrum ของสัญญาณที่บันทึกจากลำโพงโน้ตบุ๊ค (ขวา) 14

รูปที่ 2.21 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (อันดับที่ 2 Low-Pass Filter) 15

รูปที่ 2.22 สัญญาณทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 16

รูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสอง (อันดับที่ 2 High-Pass Filter) 17

รูปที่ 2.24 สัญญาณทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน 18

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.25 ค่าของอุปกรณ์ของแต่ละอันดับแบบทัทเทอร์เวิทธ์ 19

รูปที่ 2.26 กราฟการตอบสนองแบบแมคลอเรนซีรีย์ (Maclaurin Series)..... 20

รูปที่ 2.27 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่แบบบัทเทอร์เวิธท์กับเช็บบิเชฟแบบที่หนึ่ง (Chebyshev 1) และ เช็บบิเชฟแบบที่สอง (Chebyshev 2) และ อีลิปติก (Elliptic)..... 20

รูปที่ 2.28 กราฟแสดง Frequency Respond ในแต่ละ Order 21

รูปที่ 2.29 วงจรกรองความถี่อันดับที่ 1 แบบต่ำผ่าน 22

รูปที่ 2.30 กราฟแสดง Frequency Response ของ First Order..... 22

รูปที่ 2.31 วงจรกรองความถี่ อันดับที่ 2 แบบต่ำผ่าน..... 23

รูปที่ 2.32 กราฟแสดง Frequency Response ของ อันดับที่ 2..... 23

รูปที่ 2.33 วงจรกรองความถี่อันดับที่ 4 แบบต่ำผ่าน 24

รูปที่ 2.34 กราฟแสดง Frequency Response ของ Forth Order 24

รูปที่ 2.35 การประมาณค่าของ Butterworth และ Chebyshev..... 25

รูปที่ 2.36 การระบุช่วงความถี่ต่ำผ่านในรูปแบบ ω และในรูปแบบ Ω..... 25

รูปที่ 3.1 การออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน 28

รูปที่ 3.2 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth 32

รูปที่ 3.5 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2 33

ที่ ω_C=1 rad/s 33

รูปที่ 3.6 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4

ω_c=1 rad/s 33

รูปที่ 3.7 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2

ที่ ω_C=1 rad/s 34

รูปที่ 3.8 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4

ที่ ω_c=1 rad/s 34

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 35

รูปที่ 3.10 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4 ที่ ωC=1 rad/s 35

รูปที่ 3.11 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley 36

รูปที่ 3.12 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 37

รูปที่ 3.13 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ωC=1 rad/s 37

รูปที่ 3.14 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 38

รูปที่ 3.15 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ωC=1 rad/s 38

รูปที่ 3.16 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 38

รูปที่ 3.17 Group Delay ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ωC=1 rad/s 39

รูปที่ 3.18 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel 39

รูปที่ 3.19 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ที่ ωC=1 rad/s 40

รูปที่ 3.20 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ที่ ωC=1 rad/s 40

รูปที่ 3.21 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 41

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.22 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ที่ ωC=1 rad/s. 41

รูปที่ 3.23 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ωC=1 rad/s 42

รูปที่ 3.24 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ωC=1 rad/s 42

รูปที่ 3.25 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Quasi In Phase 43

รูปที่ 3.26 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase ที่ ωC=1 rad/s 44

รูปที่ 3.27 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ωC=1 rad/s 44

รูปที่ 3.28 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase 45

รูปที่ 3.28 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ωC=1 rad/s 45

รูปที่ 3.30 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase ที่ ωC=1 rad/s 45

รูปที่ 3.31 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ωC=1 rad/s 46

รูปที่ 4.1 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , α=0.55 และ Q=0.9 47

รูปที่ 4.2 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , α=0.55 และ Q=0.9 48

รูปที่ 4.3 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , α=0.55 และ Q=0.9 48

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9 49

รูปที่ 4.5 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9 49

รูปที่ 4.6 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9 50

รูปที่ 4.7 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20} 50

รูปที่ 4.8 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20} 51

รูปที่ 4.9 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20} 51

รูปที่ 4.10 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 52

รูปที่ 4.11 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 52

รูปที่ 4.12 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 53

รูปที่ 4.13 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 53

รูปที่ 4.14 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 54

รูปที่ 4.16 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 55

รูปที่ 4.17 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 55

รูปที่ 4.18 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 56

รูปที่ 4.19 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 56

รูปที่ 4.20 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 57

รูปที่ 4.21 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 57

รูปที่ 4.22 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 58

รูปที่ 4.23 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 58

รูปที่ 4.24 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 59

รูปที่ 4.25 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 59

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.26 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 60

รูปที่ 4.27 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 60

รูปที่ 4.28 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 61

รูปที่ 4.29 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 61

รูปที่ 4.30 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 62

รูปที่ 4.31 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 62

รูปที่ 4.32 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 63

รูปที่ 4.33 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 63

รูปที่ 4.34 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 64

รูปที่ 4.35 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 64

รูปที่ 4.36 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2
ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 65

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.37 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 65

รูปที่ 4.38 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 66

รูปที่ 4.39 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 66

รูปที่ 4.40 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 67

รูปที่ 4.41 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 67

รูปที่ 4.42 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5 68

รูปที่ 4.43 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 68

รูปที่ 4.44 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 69

รูปที่ 4.45 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1 69

รูปที่ 4.46 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 70

รูปที่ 4.47 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 70

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9 71

รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=1 , α=2 , Q=0.5 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley 74

รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 , Q=0.1 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley 74

รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 , Q=0.9 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley 75

รูปที่ 5.1 การต่อระบบลำโพงร่วมกับพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค 76

รูปที่ 5.2 การต่อระบบลำโพงร่วมกับแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค 77

รูปที่ 5.3 ระบบลำโพงแบบคู่สมมาตร ชนิด 2 ทาง 3 ไดร์ฟเวอร์ ที่ใช้ทดลอง 78

รูปที่ 5.4 รูปแบบโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของการแพร่กระจายเสียง 78

รูปที่ 5.5 การเดินทางของเสียงจากวูฟเฟอร์ 1 ตัวกับทวีตเตอร์ 1 ตัวไปยังผู้ฟัง 79

รูปที่ 5.6 การเดินทางของเสียงจากวูฟเฟอร์ 2 ตัวกับทวีตเตอร์ 1 ตัวไปยังผู้ฟัง 79

รูปที่ 5.7 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ไม่ผ่านครอสโอเวอร์ 81

รูปที่ 5.8 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของบัทเทอร์เวิธท์ 81

รูปที่ 5.9 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ รูปแบบ Constant Voltage 82

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.10 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของ Linkwitz-Riley....82

รูปที่ 5.11 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=1, α=2, Q=0.5 83

รูปที่ 5.12 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.01, α=0.74, Q=0.1 83

รูปที่ 5.13 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.5, α=0.74, Q=0.9..... 84

รูปที่ 5.14 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ไม่ผ่านครอสโอเวอร์..... 84

รูปที่ 5.15 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของบัทเทอร์เวิธท์..... 84

รูปที่ 5.16 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัวผ่านครอสโอเวอ รูปแบบ Constant Voltage 84

รูปที่ 5.17 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Linkwitz-Riley 86

รูปที่ 5.18 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=1, α=2, Q=0.5..... 86

รูปที่ 5.19 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.01, α=0.74, Q=0.1 87

รูปที่ 5.19 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.5, α=0.74, Q=0.9 87

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.20 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.5, α=0.74, Q=0.9 87

รูปที่ 5.21 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =1 , α =2 และ Q=0.5 88

รูปที่ 5.22 Magnitude Response สัญญาณที่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =1 , α =2 และ Q=0.5 88

รูปที่ 5.23 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =1 , α =2 และ Q=0.1 89

รูปที่ 5.24 Magnitude Response สัญญาณที่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =1 , α =2 และ Q=0.1 89

รูปที่ 5.25 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =0.5 , α =0.75 และ Q=0.5 90

รูปที่ 5.26 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε =0.5 , α =0.75 และ Q=0.5 90

รูปที่ ข.1 หน้าโฟลเดอร์ติดตั้ง MATLAB 95

รูปที่ ข.2 หน้าต่างเลือกวิธีการติดตั้งโปรแกรม MATLAB 95

รูปที่ ข.3 รายละเอียดเงื่อนไขการติดตั้งโปรแกรม MATLAB แบบมีลิขสิทธิ์ 96

รูปที่ ข.4 หน้าต่างเลือกการใส่รหัสกุญแจของโปรแกรมลิขสิทธิ์ 96

รูปที่ ข.5 หน้าต่างเลือกการใส่รหัสกุญแจของโปรแกรมลิขสิทธิ์ 97

รูปที่ ข.6 หน้าต่างเลือก Path ที่จะติดตั้งโปรแกรม 97

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ข.7 หน้าต่างเลือกโปรแกรมที่จะติดตั้ง 98

รูปที่ ข.8 หน้าต่างเลือก Path ของไฟล์ลิขสิทธิ์ 98

รูปที่ ข.9 หน้าต่าง Configure License Manager 99

รูปที่ ข.10 หน้าต่างตัวเลือกสร้าง Shortcuts เข้าโปรแกรม MATLAB 99

รูปที่ ข.11 หน้าต่างยืนยันที่จะลงโปรแกรม MATLAB 100

รูปที่ ข.12 หน้าต่างรายละเอียดโปรแกรม MATLAB 100

รูปที่ ข.13 หน้าต่างเสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม MATLAB 101

รูปที่ ข.14 หน้าแรกของการติดตั้ง Altium Designerr 101

รูปที่ ข.15 เลือกรูปแบบของโปรแกรม Altium Designer 102

รูปที่ ข.16 หน้าต่างแสดงเงื่อนไขของโปรแกรม Altium Designer 102

รูปที่ ข.17 หน้าต่างสำหรับเลือก Path ในการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer 103

รูปที่ ข.18 หน้าต่างยืนยันการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer 103

รูปที่ ข.19 หน้าต่างแสดงการติดตั้งของโปรแกรม Altium Designer 104

รูปที่ ข.20 หน้าต่างแสดงสถานะเสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer 104

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

เสียง เป็นคลื่นกลที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุสั่นสะเทือน ก็จะทำให้เกิดการอัดตัวและขยายตัวของคลื่นเสียง และถูกส่งผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ ไปยังหู เมื่อการสั่นสะเทือนนั้นมาถึงหูจะถูกแปลงเป็นพัลส์ประสาท ซึ่งจะถูกส่งไปยังสมอง ทำให้เรารับรู้และจำแนกเสียงต่างๆ ได้ เสียงแต่ละเสียงมีความแตกต่างกัน เสียงสูง-เสียงต่ำ, เสียงดัง-เสียงเบา, หรือคุณภาพของเสียงลักษณะต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดเสียง และจำนวนรอบต่อวินาทีของการสั่นสะเทือน

นอกจากเสียงที่เกิดตามธรรมชาติแล้วเสียงยังอยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่เกิดจากการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นระบบเสียง ข้อมูลที่เป็นรูปแบบเสียงจะต้องอาศัยอุปกรณ์แสดงผลเฉพาะที่เรียกว่า ตัวขับเสียง (Driver) หรือทั่วไปเราเรียกกันติดปากว่าลำโพง (Speaker) เพื่อช่วยแสดงเสียงออกมา เป็นที่นิยมใช้สำหรับการแสดงผลในรูปของเสียงเพลงหรือเสียงประกอบในภาพยนตร์รวมถึงเสียงที่ได้จากการพูดผ่านไมโครโฟน ซึ่งถือได้ว่า ลำโพง ได้กลายมาเป็นส่วนหนึ่งในการทำงานและในชีวิตประจำวันของคนเราไปแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้ลำโพงจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ซึ่งลำโพงนั้นก็มีการแบ่งประเภทเพื่อตอบสนองต่อเสียงช่วงความถี่ต่างๆที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันอยู่อย่างชัดเจน และลำโพงทั่วๆไปส่วนใหญ่นั้นมักจะตอบสนองต่อเสียงในช่วงเสียงกลางและเสียงสูงเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ช่วงเสียงเบสหรือเสียงความถี่ต่ำนั้นหายไปหรือมีอยู่เพียงเล็กน้อยจนบางครั้งไม่รู้สึกถึงเสียงในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งเกิดจากขนาดของลำโพงที่เล็กซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างอะคูสติค (Acoustic structure) ของลำโพง ทำให้ความดังของย่านเสียงความถี่ต่ำลดลง ทำให้ขาดอรรถรสในการรับฟัง เป็นผลให้เสียงในช่วงความถี่ต่ำที่ออกมาไม่ชัดเจนและมีคุณภาพในการรับฟังลดลง

ดังนั้นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีเป้าหมายเพื่อศึกษาลักษณะของการแผ่กระจายเสียงที่มาจากระบบลำโพงเพื่อใช้แก้ปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้นและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเสียงที่ผู้ฟังจะได้รับ

1.2 จุดประสงค์

- ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบลำโพง
- ศึกษาเกี่ยวกับการแผ่กระจายของเสียงจากระบบลำโพง
- ศึกษาเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่แบบต่างๆ
- เปรียบเทียบผลการทดสอบการแผ่กระจายเสียงของระบบลำโพงทั้งแบบที่ผ่านวงจรกรองความถี่แบบต่างๆและแบบไม่ผ่านวงจรกรองความถี่

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

- ศึกษาออกแบบและสร้างตัวกรองความถี่แต่ละแบบ
- ศึกษาลักษณะการแผ่กระจายของเสียงจากระบบลำโพง
- ทดสอบการแผ่กระจายของเสียง

- วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการแผ่กระจายของเสียง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ทำให้ทราบความแตกต่างของการแผ่กระจายเสียงจากระบบลำโพงที่ต่างกัน
- สามารถเลือกใช้งานตัวกรองความถี่ที่มีลักษณะเหมาะสมกับระบบลำโพง
- สามารถปรับปรุงคุณภาพในการรับฟังเสียงจารระบบลำโพงให้ดีขึ้นได้

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

- อุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรกรองความถี่ จำนวน 1 ชุด
- ออสซิโลสโคปและอุปกรณ์ต่องพ่วง จำนวน 1 ชุด
- เครื่องกำเนิดความถี่ (Function Generator) และอุปกรณ์ตัวพ่วง จำนวน 1 ชุด
- เครื่องความดังของเสียง (SPL Meter) จำนวน 1 เครื่อง
- เครื่องขยายสัญญาณเสียง (Power Amplifier) จำนวน 1 เครื่อง

1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

- โปรแกรม MATLAB 7.1
- โปรแกรม Altium Designer

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอน	2558							2559			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
วางแผนการทำโครงงาน	←	→									
ศึกษาการแผ่กระจายของเสียงและโครงสร้างระบบลำโพง	←									→	
ศึกษาเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่							←			→	
ทำการวิเคราะห์การแผ่กระจายของเสียงโปรแกรม MATLAB			←								→
สร้างวงจรกรองความถี่									←		→
ทดลอง							←				→
จัดทำเอกสาร							←				→

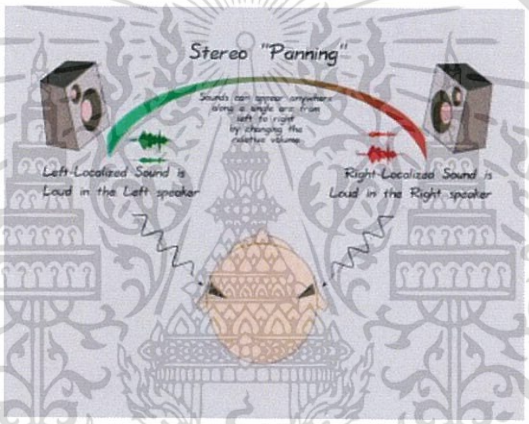
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้

2.1 ระบบเสียงในรูปแบบต่างๆ

2.1.1 ระบบเสียงแบบสเตอริโอ (Stereo)

ระบบเสียงแบบสเตอริโอ นี้จะมีรูปแบบการวางลำโพงสองด้าน คือ ด้านซ้ายและด้านขวา ทำให้เสียงที่ออกมานั้นมีมิติ เช่นเมื่อฟังเพลง อาจจะได้ยินเสียงนักร้อง เสียงกลอง อยู่ตรงกลาง และเสียงกีตาร์ เสียงเบส หรือเสียงเปียโน จะอยู่ทางด้านซ้ายหรือด้านขวา ตามที่ผู้บันทึกเสียงกำหนดจึงทำให้เสียงดนตรี มีมิติ และไพเราะมากขึ้น จึงถือว่าเป็นระบบเสียงที่ดีในระดับหนึ่งและใช้กันแพร่หลาย ในหมู่นักฟังเพลง แต่ไม่ได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเสียงในปัจจุบัน



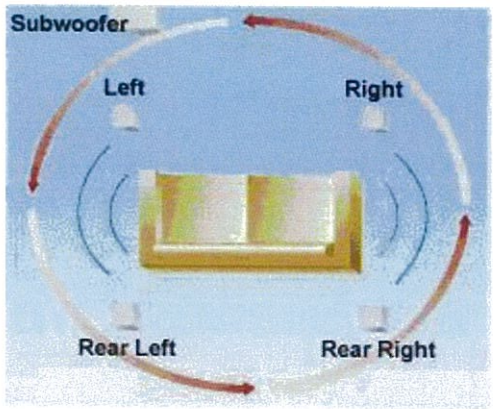
รูปที่ 2.1 ระบบเสียงรอบทิศทาง 4.0 ช่อง

2.1.2 ระบบเสียงแบบรอบทิศทาง (Surround)

ระบบเสียงแบบรอบทิศทาง เป็นระบบการใช้ช่องสัญญาณเสียงประกอบกันเป็นสัญญาณแผ่กระจาย รอบตัวผู้ฟังทำให้สามารถรับถึงมิติของเสียงได้ทุกทิศทางรอบตัวทำให้มีความสมจริงมากขึ้น ซึ่งเป็นที่นิยมมากในหมู่ผู้ชอบชมภาพยนตร์ ระบบเสียงแบบรอบทิศทาง นั้นมีหลายรูปแบบต่างๆกัน ดังนี้

2.1.2.1 ระบบเสียงรอบทิศทางแบบ 4.0 และ 4.1 ช่อง

โดยระบบลำโพงแบบนี้จะประกอบไปด้วยลำโพง 4 ตัว ในแบบ 4.0 ส่วนในแบบ 4.1 นั้นจะเพิ่ม ซับวูฟเฟอร์ ไปอีกหนึ่งตัว ซึ่งเสียงที่ออกมาจะมีสี่มิติ โดยที่ลำโพง 4 ตัวนี้จะวางในตำแหน่งที่ต่างกันคือ หน้าซ้าย หน้าขวา หลังซ้าย และหลังขวา ส่วน ซับวูฟเฟอร์ นั้นจะไม่นับเป็นลำโพงที่ 5 เพราะเป็นลำโพงที่ขับในช่วงความถี่ต่ำโดยอาศัยสัญญาณจากลำโพงสี่ตัว จึงออกมาในลักษณะการสั่นสะเทือนมากกว่า ส่วนลำโพงทั้งสี่ตัวที่เหลือจะออกเสียงในจุดของตัวเองตามที่ได้รับสัญญาณเข้ามา



รูปที่ 2.2 ระบบเสียงรอบทิศทาง 4.0 ช่อง

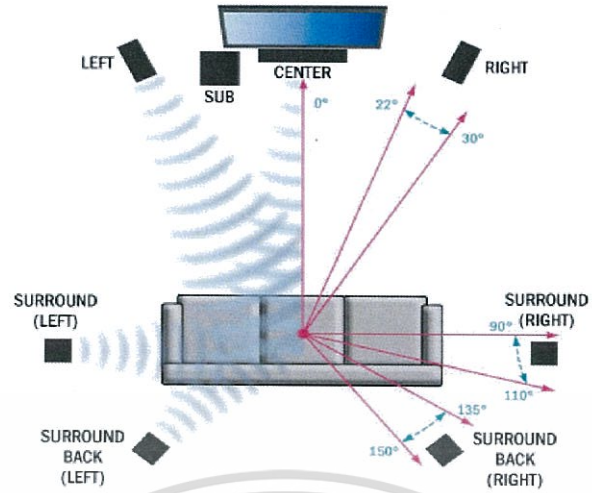
2.1.2.2 ระบบเสียงรอบทิศทาง 5.1 ช่อง

ลำโพงในรูปแบบ 5.1 นี้ แตกต่างจากระบบเสียงรอบทิศทาง 4.1 ช่องคือ จะเพิ่มช่องสัญญาณขึ้นมาอีก 2 ช่อง ให้กับลำโพงตัวกลาง และ ซับวูฟเฟอร์ ซึ่งในรูปแบบนี้ ซับวูฟเฟอร์ จะมีช่องสัญญาณเป็นของตัวเองแล้ว แต่ก็ยังนับเป็น x.1 อยู่เนื่องจาก ซับวูฟเฟอร์ ยังขับเสียงในช่วงความถี่ต่ำเช่นเดิมเสียงที่ออกมาจะเป็นในรูปแบบคลื่นสั่นสะเทือน จึงไม่สามารถให้มิติของเสียงได้ โดยในรูปแบบ 5.1 **ช่อง** สามารถรองรับระบบดอลบี้ดิจิตอล (Dolby Digital) พบได้ในโรงภาพยนตร์ทั่วไป

รูปที่ 2.3 ระบบเสียงรอบทิศทาง **5.1** ช่อง

2.1.2.3 ระบบ เสียงรอบทิศทาง แบบ 7.1 ช่อง

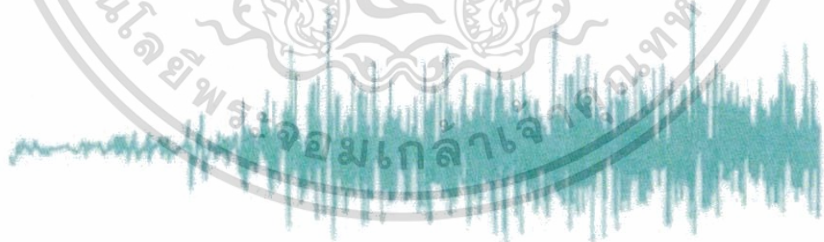
ลำโพงในรูปแบบนี้นับว่าเป็นลำโพงที่มีความละเอียดของมิติที่สุดในรูปแบบ เสียงรอบทิศทางและเป็นรูปแบบที่กำลังนิยมในปัจจุบัน มีความแตกต่างจากระบบเสียงรอบทิศทาง**แบบ** 5.1 ช่อง คือจะเพิ่มลำโพงตรงกลางซ้ายและกลางขวาขึ้นมา อีกสองตัว ซึ่งจะช่วยเพิ่มความละเอียดของทิศทางเสียงมายิ่งขึ้น จนนับได้ว่ารูปแบบทิศทางเสียงเกือบจะมีลักษณะเป็นวงรอบตัวผู้ฟัง ซึ่งทำให้ได้อรรถรสในการรับฟังไม่แพ้กับโรงภาพยนตร์ในระดับดีเลยทีเดียว



รูปที่ 2.4 ระบบเสียงรอบทิศทาง 7.1 ช่อง

2.2 คลื่นเสียง

คลื่นเสียงนั้นเกิดจากการสั่นสะเทือนของแหล่งกำเนิดเสียงแล้วใช้อากาศเป็นตัวกลางในการเดินทางของคลื่น ซึ่งมีความถี่ความถี่ต่างๆ กันออกไป เมื่อคลื่นนั้นมากระทบกับเยื่อแก้วหูคนเราแล้วคนเราจะแปลงคลื่นนี้ออกมาเป็นสัญญาณเสียง โดยเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้นจะมีความถี่อยู่ในช่วง 20-20,000 Hz สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงความถี่คือ ช่วงความถี่ต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 20-500 Hz ความถี่ปานกลางอยู่ในช่วงประมาณ 500-5,000 Hz และช่วงความถี่สูง อยู่ในช่วงประมาณ 5,000-20,000 Hz



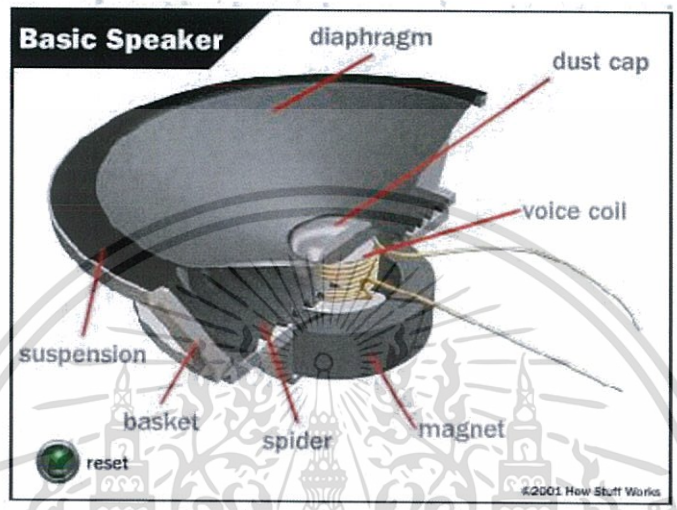
รูปที่ 2.5 คลื่นเสียง

2.3 ลำโพง

ตัวขับเสียงหรือเรียกทั่วไปว่าลำโพงถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งของระบบเล่นกลับ(Audio reproduction system) หรือเรียกทั่วไปว่า playback system โดยตัวลำโพงมีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้มาจากเครื่องขยายสัญญาณเสียงให้เป็นการสั่นสะเทือนของอนุภาคในอากาศหรือเสียงอะคูสติค (Acoustic) ลำโพงที่ดีจะต้องสร้างเสียงให้เหมือนกับต้นฉบับเดิมมากที่สุด

โดยมีการผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ลำโพงมักจะถูกเรียกรวมๆกัน ทั้งดอกลำโพง หรือตัวขับ (driver) และลำโพงทั้งตู้ว่าระบบลำโพง (speaker system) ที่จะประกอบด้วยลำโพงและ วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คสำหรับแบ่งย่านความถี่เสียงออกเป็นช่วงความถี่ย่อยให้เหมาะสมกับตัวขับเสียงแต่ละช่วงความถี่

2.3.1 ส่วนประกอบของลำโพง



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของลำโพง

1. ดัสแค๊บ (Dust cap)

   คือ ส่วนที่ป้องกันเศษวัสดุเข้าไปในวอยส์คอยล์

2. ขอบกรวย (Suspension หรือ Surround)

   คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ยึดกรวยกับโครงลำโพงและทำให้กรวยเคลื่อนที่ขึ้นลงได้

3. กรวย (Diaphragm)

   คือ ส่วนที่ทำหน้าที่รับพลังงานเสียงจากวอยส์คอยล์

4. สไปเดอร์ (Spider)

   คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ยึดกรวยและวอยส์คอยล์ให้อยู่ในศูนย์กลางของช่องแม่เหล็กและสามารถยืดหยุ่นแบบเป็นสปริงให้กรวยเคลื่อนที่ได้ตามกำลังขับของวอยส์คอยล์

5. โครง (Basket หรือ Frame)

   คือ ส่วนที่มีหน้าที่ยึดติดกับแผ่นหน้าของแม่เหล็ก โดยมีกรวยยึดติดด้านบน และ สไปเดอร์ยึดติดด้านล่าง

6. วอยส์คอยล์ (Voice Coil)

   คือ ส่วนที่เป็นขดลวด จะทำหน้าที่รับกระแสไฟจากแอมพลิฟลายสู่สนามแม่เหล็ก

7. แผ่นหน้า (Top Plate)

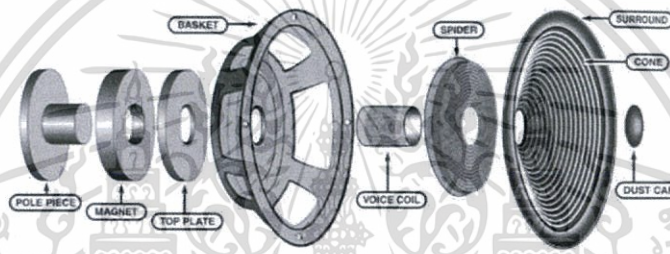
คือ ส่วนที่มีลักษณะเป็นวงแหวนตามขนาดที่กำหนด โดยด้านบนของแผ่นหน้ายึดติดกับโครง และด้านล่างติดกับแม่เหล็กถาวร

8. แม่เหล็กถาวร (magnet)

คือ ส่วนที่มีลักษณะเป็น รูปวงแหวน มีหน้าที่ให้พลังงานแม่เหล็กถาวรไปยังแผ่นหลังและแผ่นหน้า และแผ่นหลังนำพลังแม่เหล็กถาวรไปสู่แกนกลาง เพื่อสร้างพลังแม่เหล็กที่เข้มระหว่างแกนกลางและแผ่นหน้า

9. แผ่นหลัง (pole piece)

คือ ส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมและมีแกนอยู่ตรงกลาง ทำหน้าที่รับพลังแม่เหล็กจากอีกด้านหนึ่งของแม่เหล็กถาวร และแกนอยู่ตรงกลางของวงในแผ่นหน้า เพื่อเป็นช่องให้วอยส์คอยล์นำกระแสไฟจากแอมพลิฟลายผ่านสนาม แม่เหล็กที่กำหนดและเปลี่ยนเป็นพลังเสียง



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของลำโพง (แบบแยกชิ้นส่วน)

2.3.2 ประเภทของลำโพง

ความถี่ถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญของเสียงดนตรี ดังนั้นการตอบสนองความถี่ของลำโพงจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่เราควรพิจารณา ให้เหมาะสมกับลำโพงแต่ละประเภท เพื่อให้ได้เสียงที่ครบถ้วนและสมบูรณ์ที่สุด

1. ทวีตเตอร์ (Tweeter)

คือตัวขับสำหรับช่วงความถี่สูงหรือเรียกสั้นๆว่าลำโพงเสียงแหลม มีขนาด 3/4"-2" ออกแบบมาให้ตอบสนองความถี่สูงได้ถึง 20,000 Hz

รูปที่ 2.8 ลำโพงทวีตเตอร์ (Tweeter)

2. มิดเรนจ์ (Mid-Range)

คือตัวขับสำหรับช่วงความถี่กลางหรือเรียกสั้นๆว่าลำโพงเสียงกลาง มีขนาด 3"-4" ออกแบบมาให้ตอบสนองความถี่กลาง อีกทั้งขึ้นได้ในความถี่เสียงแหลม แต่รายละเอียดของเสียงน้อยกว่าทวีเตอร์ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 500-10,000 **Hz**

รูปที่ 2.9 ลำโพงมิดเรนจ์

3. มิดเบส (Mid-Bass)

คือ ตัวขับสำหรับช่วงความถี่ช่องระหว่างเสียงเบสและเสียงช่วงความถี่กลางหรือเรียกสั้นๆ ว่า ลำโพงเสียงกลาง/เบส 4"-6 1/2" ตอบสนองความถี่ในช่วงเสียงเบสสูงถึงเสียงกลาง โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-8,000 Hz ซึ่งโดยมากใช้ในระบบลำโพงแบบ 2 ทาง ขนาดเล็กหรือวางหิ้ง

รูปที่ 2.10 ลำโพงมิดเบส

4. วูฟเฟอร์ (Woofer)

คือ ลำโพงเสียงกลาง/เบส 5"-8" ตอบสนองความถี่ในช่วงเดียวกับลำโพงมิดเบสแต่สามารถลงได้ลึกกว่า โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 50-5,000 Hz

รูปที่ 2.11 ลำโพงวูฟเฟอร์

5. ซับวูฟเฟอร์ (Subwoofer)

คือ ลำโพงสำหรับเสียงเบสโดยเฉพาะ มีขนาด 8"-15" สามารถลงได้ลึกที่ความถี่ต่ำๆ 20-2,000 Hz ทนวัตต์ได้สูง และควรติดตั้งในตู้

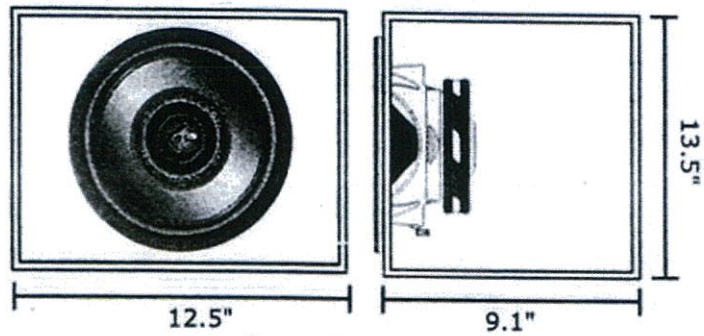
รูปที่ 2.12 ลำโพงซับวูเฟอร์ (Subwoofer)

2.4 ตู้ลำโพง

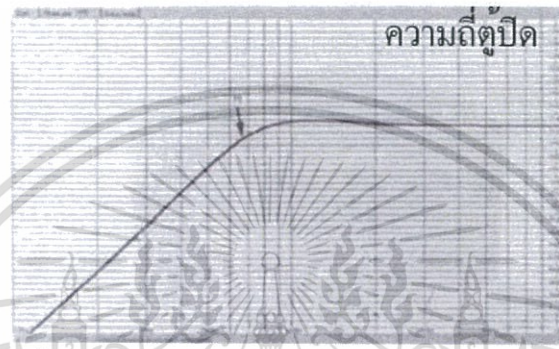
ลำโพงที่ติดตั้งแบบ FREE AIR ที่ขับความถี่ต่ำ จะผลิตเสียงได้เพียงเล็กน้อย และไม่มีเสียงเบส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตู้ เพื่อทำให้ลำโพงสามารถขับความถี่ต่ำมากขึ้น และมีเสียงเบสที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

2.4.1 ตู้ปิด (Closed Boxes)

ตู้ซับเบส"แบบปิด" มีลักษณะเป็นตู้ปิดทึบแบบสมบูรณ์ มีห้องกักอากาศเพียงห้องเดียวและไม่มีท่อระบายหรือกรวยช่วยกระจายเสียงเบส เป็นตู้ซับเบสที่ง่ายต่อการจัดสร้างและมีขนาดหรือสัดส่วนของตู้เล็กกว่าตู้ แบบอื่นๆ เป็นตู้ซับเบสที่สามารถละเลยความแปรปรวนทางค่าปัจจัยของซับวูฟเฟอร์ จึงเป็นทางเลือกที่ดีเมื่อต้องจัดสร้างตู้ซับเบสสำหรับซับวูฟเฟอร์ (Subwoofer) ที่ไม่รู้ ค่าปัจจัยที่แน่นอน



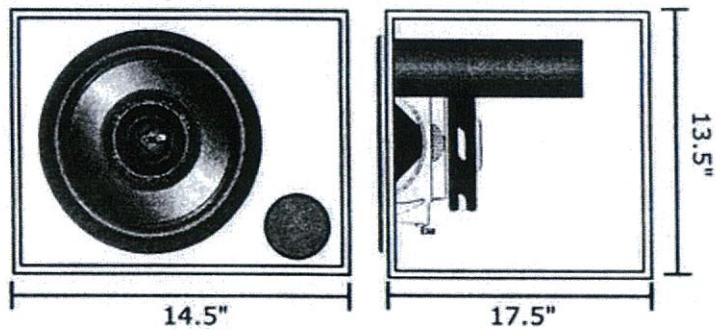
รูปที่ 2.13 ตู้ลำโพงแบบปิด



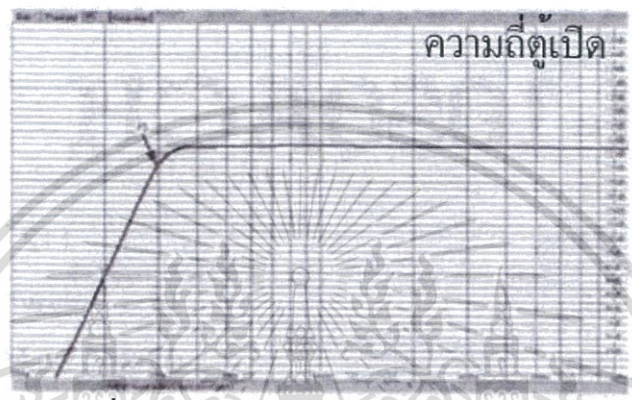
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบปิด

2.4.2 ตู้เปิด (Vented Boxes)

สำหรับ ตู้ซับเบสแบบเปิดหรือแบบมีช่องระบายคลื่นเบสนั้น เราสามารถเปิดช่องระบายคลื่นเบสออกไปภายนอกตู้ได้มากกว่า 1 ช่อง ในปริมาตรห้องอากาศเดียวกัน ซึ่งการเปิดระบายคลื่นเบสเช่นนี้เองที่ทำให้เราเรียกกันสั้นๆ ว่า “ตู้เปิด” ขนาดของช่องระบายคลื่นเบสจะต้องสัมพันธ์กับปริมาตรอากาศรวมของตู้ จึงจะไม่ทำให้เกิดผลกระทบกับประสิทธิภาพของตัวตู้เอง โดยจำกัดความถี่ของคลื่นเบสด้านหลังกรวยที่ระบายออกทางช่องระบายเอาไว้ที่ ค่าเฉพาะหนึ่ง เพื่อไม่ให้เกิดการหักล้างซึ่งกันและกันกับคลื่นอากาศภายในตู้ ช่องระบายเบสนั้นเปรียบได้กับท่อเสียง(บางครั้งอาจเรียก”ปล่องเสียง” ที่ติดตั้งเข้าไปในช่องกลม(หรือเหลี่ยม)ของตัวตู้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเสียงนี้จะคำนวณตามอัตราก้องสะท้อนของตู้เพื่อ ให้ได้ความถี่ตามต้องการและช่องระบายเบสก็จะทำให้เกิดคลื่นเสียงที่ความถี่นั้นๆออกมา ข้อได้เปรียบหลักสองประการของตู้ซับเบสแบบเปิดก็คือสามารถขยายขอบเขตเสียงเบสทางความถี่ต่ำให้ลึกขึ้น



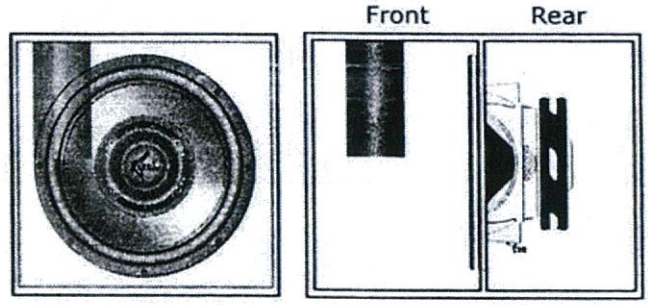
รูปที่ 2.15 ภาพตู้ลำโพงแบบเปิด



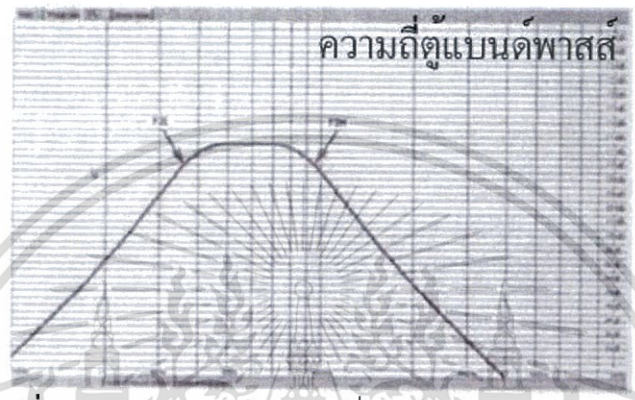
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบเปิด

2.4.3 ตู้แบนพาส (Bandpass Boxes)

ตู้แบนพาส หรือ ตู้ซับเบสแบบกำหนดช่วงความถี่นั้น ถือได้ว่าเป็นตู้ซับเบสแบบเปิดระดับมืออาชีพ มันเป็นตู้ซับเบสที่มีความยุ่งยากซับซ้อนทางโครงสร้างมากที่สุด ด้วยว่ามันติดตั้งซับวูฟเฟอร์เอาไว้ในห้องอากาศมากกว่าหนึ่งห้อง ดังนั้นคลื่นเสียงจะต้องสามารถส่งผ่านจากห้องอากาศหนึ่งไปยังห้องอื่นๆ ตู้ซับเบสแบบกำหนดช่วงความถี่นั้นมักจะมีปัญหาความคลาดเคลื่อนทางเสียงที่ ช่องระบายเบส การรับภาระเกินของซับวูฟเฟอร์ และอุณหภูมิของวอยส์คอยล์ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับตู้ซับเบสแบบปิด ความคลาดเคลื่อนของช่องระบายเบสที่ว่านี้จะถูกเน้นย้ำให้เป็นจริงได้จาก คลื่นเสียงที่สร้างขึ้นในตู้ที่ส่งผ่านมาทางช่องระบาย ตู้ซับเบสแบบกำหนดช่วงความถี่ส่วนมากจะมีห้องอากาศสองห้อง แต่ในตู้บางแบบอาจใช้มากกว่าสองห้องโดยใช้ห้องอากาศได้ถึงสามห้อง ห้องอากาศสองห้องด้านนอกของตู้ซับเบสแบบสามห้องจะเป็นเสมือนตู้ด้านความถี่ ต่ำของตู้ซับเบสแบบสองห้อง ในการออกแบบช่วงความถี่ ที่เป็นการกำหนดช่วงความถี่นั้น จะเป็นการเอาช่วงความถี่สูงผ่านกับช่วงความถี่ต่ำผ่านมาทำงานร่วมกัน ซึ่งนี่คือนิยามของตู้ซับเบสแบบผ่านเฉพาะช่วงความถี่หรือแบบกำหนดช่วง ความถี่ห้องอากาศห้องหนึ่งจะทำหน้าที่ผ่านสภาพเสียงย่านสูงของคลื่นเบสเพื่อกำหนด ความถี่ตอบสนองช่วงล่าง ซึ่งก็มักจะเป็นห้องอากาศที่เป็นห้องปิด(ตู้ปิด) ห้องอากาศห้องที่สองจะทำหน้าที่ผ่านสภาพเสียงย่านต่ำของคลื่นเบสเพื่อกำหนด ความถี่ตอบสนองช่วงบน ซึ่งก็คือห้องอากาศที่เป็นห้องเปิด(ตู้เปิด)



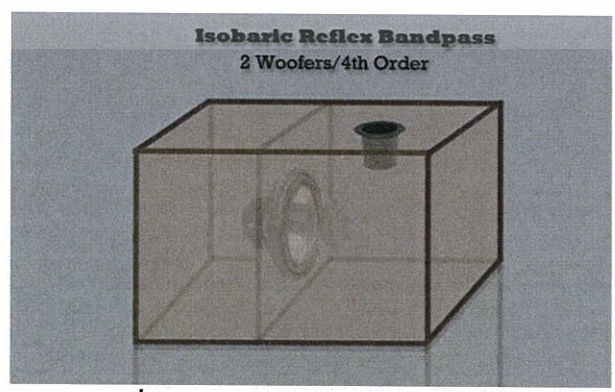
รูปที่ 2.17 ภาพตู้ลำโพงแบบแบนพาส



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงช่วงความถี่ของตู้ลำโพงแบบแบนพาส

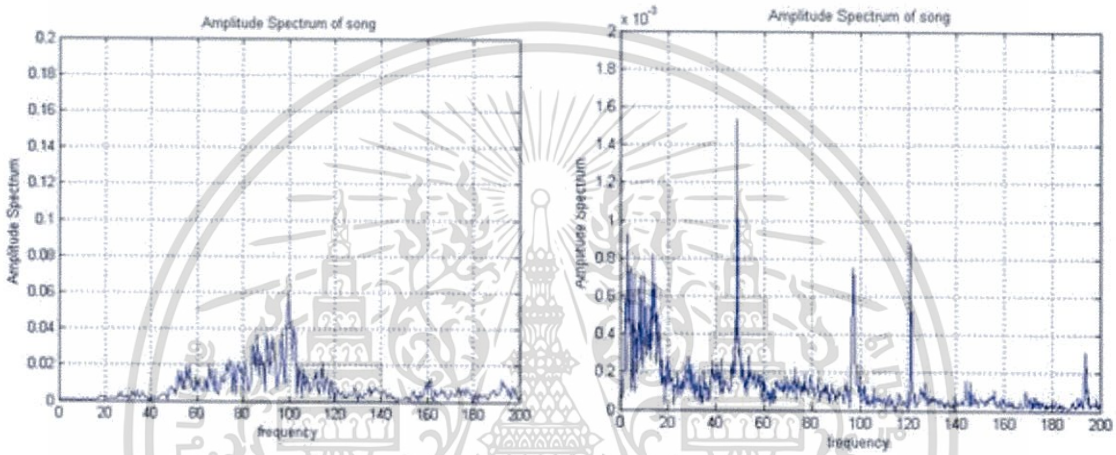
2.4.4 ตู้ไอโซบาริค (ISOBARIC)

ตู้ไอโซบาริค เป็นตู้ที่ต้องใช้ลำโพงซับวูเฟอร์ 2 ดอก โดยต่อหันหน้าเข้าหากัน ส่วนปริมาตรตู้จะใช้เพียงครึ่งหนึ่งของตู้ปิด และตู้เปิด โครงสร้างของตู้ประเภทนี้ จะทำงานเหมือนกับตู้ปิด และ ตู้เปิด โดยหลักการทำงานของลำโพงซับวูเฟอร์ จะใช้วิธีต่อเข้ากับซับวูเฟอร์ดอกที่ 1 ในลักษณะ ถูกเฟส และดอกที่ 2 ต่อต่างเฟสกัน การทำงานจึงเป็นในลักษณะ PUSH-PULL หรือผลัก และ ดัน แต่ก็มีทั้งข้อดี และเสีย คือ ตู้มีขนาดเล็กเพียงครึ่งหนึ่ง เมื่อเทียบกับตู้ปิด และเปิด สามารถ ติดตั้งในรถที่มีเนื้อที่จำกัดได้เป็นอย่างดี ส่วนข้อเสีย คือ การทำงานเหมือนใช้ซับวูเฟอร์เพียงดอกเดียว ทำให้ตู้ประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้งานกันสักเท่าไร



รูปที่ 2.19 ภาพตู้ลำโพงแบบไอโซบาริค

จากประเภทลำโพงที่ได้กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าลำโพงนั้นมีหลากหลายรูปแบบและลักษณะประเภทตามการใช้งานแต่ลำโพงที่จะสามารถตอบสนองต่อเสียงที่มีความถี่ต่ำได้นั้นมักจะมีขนาดที่ใหญ่และลำโพงขนาดเล็ก(2.5-3.5 นิ้ว) ที่อยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคต่างๆเช่นโน้ตบุ๊ค ทีวี โทรศัพท์มือถือ ไม่สามารถให้เสียงความถี่ที่ต่ำมากได้เพราะขนาดที่จำกัด ทำให้มีการตอบสนองต่อเสียงความถี่ต่ำมากมีความดังน้อยมาก ดังนั้น การผลิตเสียงของอุปกรณ์เหล่านี้จึงมีอยู่อย่างจำกัด โดยปกติแล้วเสียงความถี่ต่ำอยู่ภายใต้ 250 (Hz) และลำโพงขนาดเล็กจะมีความถี่คัทออฟสูงกว่า 150 Hz เสียงความถี่ที่อยู่ภายใต้ความถี่คัทออฟนี้จะถูกลดทอนลงมากเนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพทำให้มีความดังต่ำ



รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบระหว่าง Spectrum ของสัญญาณ Original (ซ้าย) Spectrum ของสัญญาณที่บันทึกจากลำโพงโน้ตบุ๊ค (ขวา)

จะเห็นได้ว่า Spectrum ที่ความถี่ต่ำกว่า 200 Hz จะถูกลดทอนลงไปเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อทำให้สัญญาณที่ถูกลดทอนไปกลับมาจึงจำเป็นจะต้องมีกระบวนการเพื่อเพิ่ม ความถี่ต่ำนี้โดยการใช้หลักการการสร้างเบสเสมือน(Virtual bass) ซึ่งอาศัยสมการของระบบไม่เป็นเชิงเส้น(Nonlinear) เพิ่มร่วมกับการออกแบบลำโพงที่ออกแบบสำหรับช่วงความถี่ต่ำ(compact size subwoofer loudspeaker system) (ความถี่ต่ำกว่า 50 Hz) โดยมีขนาดปริมาตรของอากาศภายในตู้ไม่เกิน 12 ลิตร

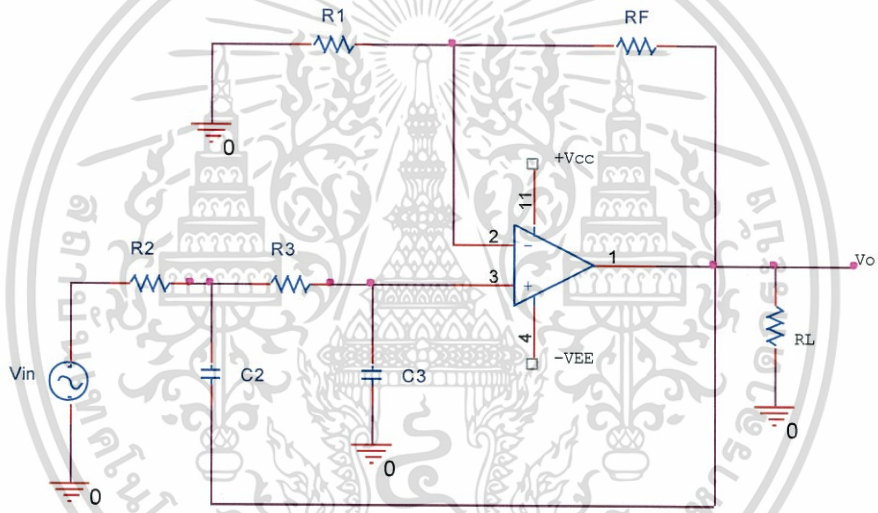
2.5 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่ได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และทางด้านการสื่อสารอย่างกว้างขวาง โดยที่วงจรกรองความถี่จะยอมให้สัญญาณที่มีย่านความถี่ที่กำหนดผ่านระบบไปได้ขณะเดียวกันก็ลดทอนสัญญาณที่เป็นความถี่ที่ไม่ใช้งานออกไป อุปกรณ์ที่จะนำมาใช้กับวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟนั่นก็คือ ออปแอมป์ (Operational Amplifier) หรือ IC Op-Amp ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟและมีขนาดตัวถังที่เล็กทำให้ง่ายต่อการนำมาใช้และสามารถนำไปใช้งานได้

เป็นอย่างดี ข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) เมื่อเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) คือไม่ต้องใช้ RLC Network ซึ่งมีขนาดใหญ่ แต่สามารถแทนที่ด้วย IC Op-Amp และวงจร RC Network ที่มีขนาดเล็กแทนในระบบเครื่องมือวัด สัญญาณที่ได้จากการวัดส่วนมากจะเป็นสัญญาณขนาดเล็ก เช่น มีขนาดเป็นมิลลิโวลต์ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการขยายสัญญาณนั้นเพื่อที่จะให้สัญญาณมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ได้ ซึ่งสามารถทำได้นั่นก็คือ การขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยใช้วงจรขยายสัญญาณ (Instrumentation Amplifier)

2.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter)

เป็นวงจรที่จะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงความถี่คัทออฟ (Cut-Off Frequency) ความถี่คัทออฟคือ ความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (-3 dB) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกินความถี่คัทออฟผ่านวงจรจะลดทอนขนาดของความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมากๆ



รูปที่ 2.21 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (อันดับที่ 2 Low-Pass Filter)

2.6.1 ขนาดแรงดันของเกนขยาย (Voltage Gain)

$$\left|\frac{V_0}{V_{in}}\right| = \frac{A_F}{\sqrt{1+(\frac{f_c}{f})^4}} \qquad (2.1)$$

$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$

f = ความถี่ของสัญญาณอินพุท (Hz)

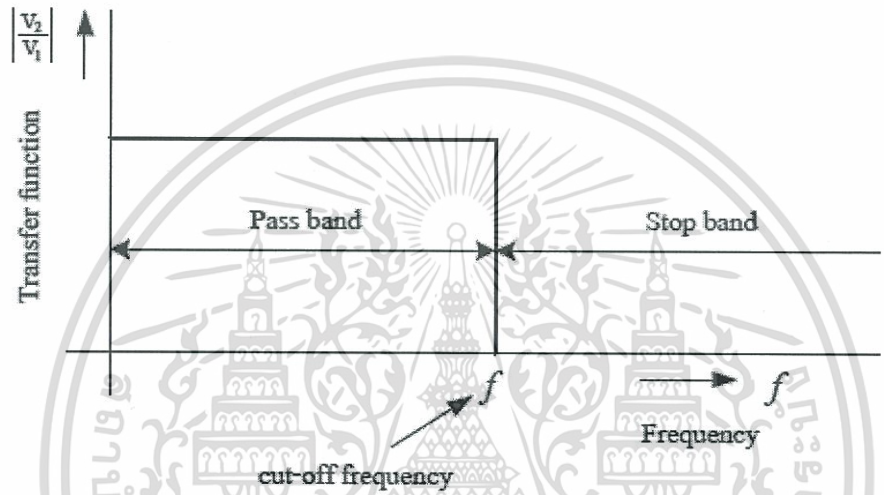
f_c = Cut-Off Frequency (Hz)

A_F = gain ขยายสูงสุดมี ค่าเท่ากับ

$$A_F = (1 + \frac{R_F}{R_1}) \quad (2.2)$$

2.6.2 **การออกแบบวงจรกรองความถี่ (Filter Design)**

1. เลือกความถี่คัทออฟ (Cut-Off Frequency)
2. กำหนดค่า $R_1 = R_2 = R$ และค่า $C_1 = C_3 = c$
3. จะได้สมการ $R = \frac{1}{2\pi f_c . C}$ (2.3)
4. ในส่วนของ gain การขยาย $A_F = (1 + \frac{R_F}{R_1})$



รูปที่ 2.22 สัญญาณทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

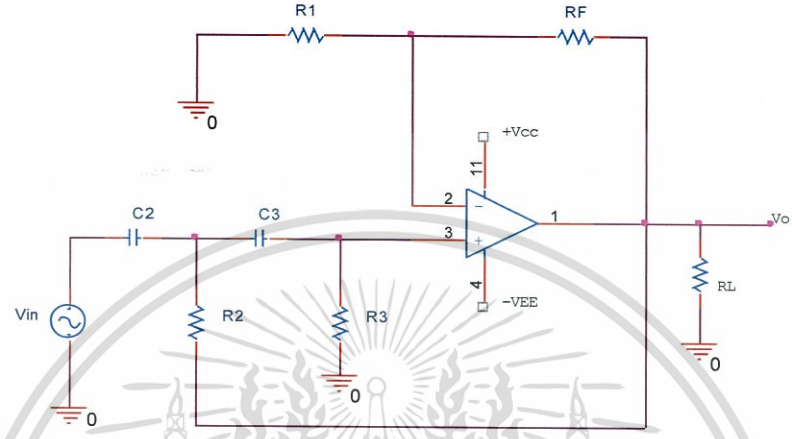
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุทและขนาดของเกนการขยาย

Input Frequency f (Hz)	Gain Magnitude $\left\|\frac{V_o}{V_{in}}\right\|$	Magnitude $(dB) = 20\log\left\|\frac{V_o}{V_{in}}\right\|$
10	2	6.02
100	1.99	5.98
200	1.96	5.85
700	1.64	4.29
1,000	1.41	3.01
3,000	0.63	-3.98
7,000	0.28	-10.97
10,000	0.20	-14.02
30,000	0.20	-23.53
100,000	0.20	-33.98

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.7 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter)

เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ในช่วงความถี่สูงผ่านไปได้ ส่วนในช่วงความถี่ต่ำนั้นวงจรจะลดทอนสัญญาณลงไป เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจนถึงในช่วงความถี่คัทออฟขึ้นไปคือ ตั้งแต่ในช่วง 0.707 เท่าของอัตราขยาย วงจรจะยอมให้สัญญาณผ่านไปได้



รูปที่ 2.23 วงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับสอง (อันดับที่ 2 High-Pass Filter)

2.7.1 ขนาดแรงดันของเกนขยาย (Voltage Gain)

$$\left|\frac{V_o}{V_{in}}\right| = \frac{A_F}{\sqrt{1+(\frac{f_c}{f})^4}} \qquad (2.4)$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_3C_2C_3}}$$

f = ความถี่ของสัญญาณอินพุท (Hz)

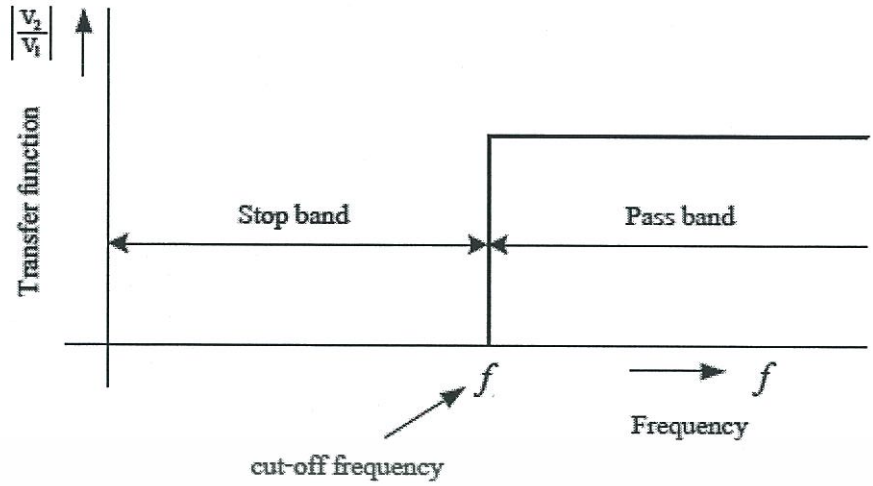
$\mathbf{f_c}$ = Cut-Off Frequency (Hz)

$\mathbf{A_F}$ = gain ขยายสูงสุดมี ค่าเท่ากับ $(\mathbf{1+\frac{R_F}{R_1}})$

2.7.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่(Filter Design)

1. เลือกความถี่คัทออฟ (Cut-Off Frequency)
2. กำหนดค่า $\mathbf{R_2 = R_3}$ และค่า $\mathbf{C_2 = C_3}$
3. จะได้สมการ $\mathbf{R = \frac{1}{2\pi f_c C}}$
4. ในส่วนของ gain การขยาย $\mathbf{A_F = (1+\frac{R_F}{R_1})}$

144390



รูปที่ 2.24 สัญญาณทางอุดมคติของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่อินพุทและขนาดของเกนการขยาย

Input Frequency f (Hz)	Gain Magnitude $\left\|\frac{V_o}{V_{in}}\right\|$	Magnitude $(\mathbf{dB}) = \mathbf{20log}\left\|\frac{V_o}{V_{in}}\right\|$
100	0.01586	-35.99
200	0.0634	-23.96
700	0.6979	-3.124
1,000	1.1215	0.9960
3,000	1.5763	3.953
7,000	1.5857	4.004
10,000	1.5859	4.006
30,000	1.5860	4.006
100,000	1.5860	4.006

2.8 วงจรกรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิทธ์ (Butterworth)

วงจรกรองกรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิทธ์(Butterworth)เป็นวงจรกรองความถี่ ชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้อุปกรณ์ทั้ง พาสซีฟ และ แอคทีฟ เป็นส่วนประกอบ ซึ่ง ผลตอบสนองทางความถี่(Frequency Response) ที่ได้แม้จะมีความชันของกราฟในช่วงคัทออฟน้อย(Attenuation) แต่ว่าจะมีความราบเรียบของแอมพลิจูดในช่วง Pass Band มาก คือไม่มี การกระเพื่อม(Ripple) อยู่เลย ดังนั้นผลของความถี่ที่ได้ จึงมีความถี่ ที่เป็นส่วนเกินน้อยมาก

สมการตอบสนองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{A_F{}^2}{1+\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (2.5)$$

หรือที่รู้จักคือ "N-Order Butterworth" โดยที่ $G^2(0) = A_F$ เป็นขนาดฟังก์ชั่นถ่ายโอน ณ ความถี่เท่ากับ 0 เมื่อทำการดิฟเฟอร์เรนเชียลด้วยจำนวน 2n-1 ครั้ง ของสมการที่ 2.5 จะเท่ากับ 0 ที่ความถี่ ω = 0 หรือเขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{d^n|H_{(j\omega)}|^2}{d\omega^n} = 0 \quad (2.6)$$

สมการทั่วไปของสมการที่ 2.5 สามารถเขียนความสัมพันธ์เทอมของส่วนในรูปของสมการ Polynomial ได้ดังนี้

$$H(s) = \frac{Vo(s)}{Vi(s)} = \frac{1}{a+bs+cs^2+\cdots+s^n} \quad (2.7)$$

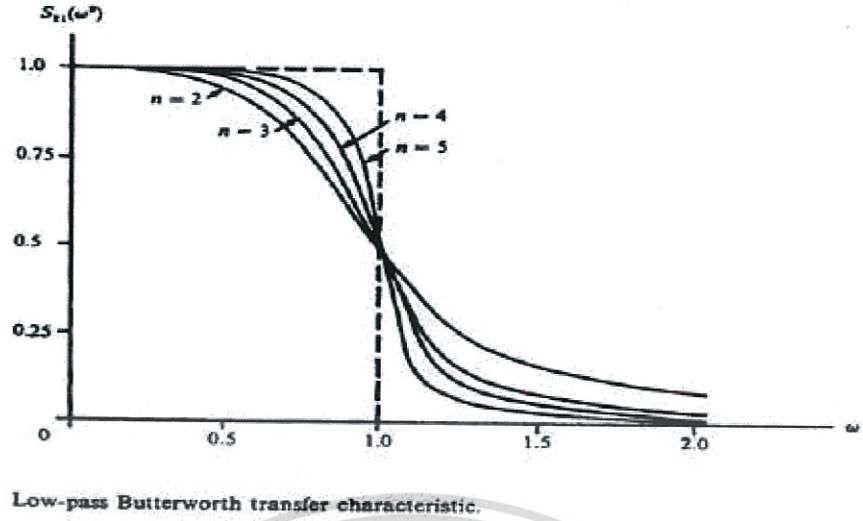
การคำนวณหาค่าอุปกรณ์ต่างๆของวงจร สามารถหาได้จากการคำนวณโดยวิธี Cauer Ladder Network หรือหาค่าได้โดยตรงจากการใช้ตารางของ Butterworth ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าของ Normalization เทียบกับความถี่อ้างอิงที่ ω = 1 rad/sec และ ω = 1 Ω จะได้ความถี่ 1 KHz

Element values of Butterworth filters for $g_0 = g_{n+1} = 1\ \Omega$ and $\omega_0 = 1$ rad/s

Value of n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	2.0000									
2	1.4142	1.4142								
3	1.0000	2.0000	1.0000							
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654						
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180					
6	0.5176	1.4142	1.9319	1.9319	1.4142	0.5176				
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450			
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.1111	0.3902			
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	
10	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129

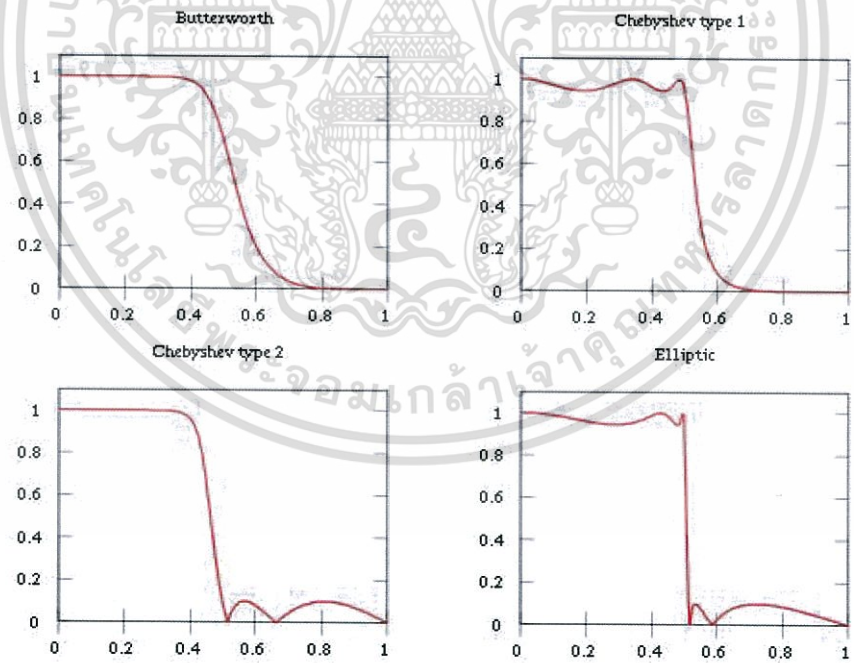
Source: as Table 10-1.

รูปที่ 2.25 ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่แบบบัทเตอร์เวิทธ์



รูปที่ 2.26 กราฟการตอบสนองแบบแมคลอรินซีรีย์ (Maclaurin Series)

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของวงจรกรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิธท์(ของสมการหลายๆ อันดับ (order) ซึ่งจะเห็นว่า ถ้ากำหนดให้ลำดับ n เข้าใกล้อินฟินิตี้ จะทำให้การตอบสนองสัญญาณเหมือนจริงมาก



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่แบบบัทเทอร์เวิธท์กับเช็บบิเชฟแบบที่หนึ่ง(Chebyshev 1) และ เช็บบิเชฟแบบที่สอง(Chebyshev 2) และ อีลิปติก(Elliptic)

2.9 ลำดับของวงจรกรองความถี่ (Order of Filter)

เป็นลำดับที่เป็นอันดับสูงสุดของ โพลิโนเมียล(Polynomial) ของสมการถ่ายโอนความถี่ (ถ่ายโอนความถี่) ดังแสดงในสมการที่ 2.8 ซึ่งจะสามารถบ่งบอก Magnitude of Frequency Response (Gain) ดังสมการที่ **2.13** ของ วงจรกรองความถี่ ในแต่ละ Order ดังรูปที่ 2.8

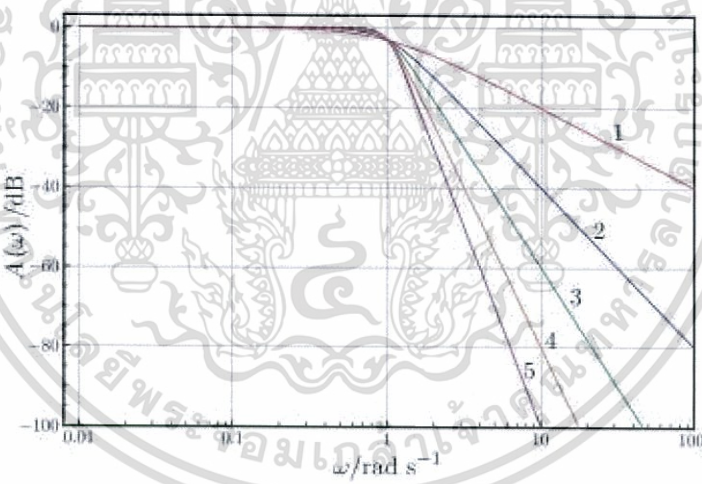
สมการ Generalize ถ่ายโอนความถี่

$$\boldsymbol{H(s) = \frac{1}{a+bs+cs^2+\cdots+s^n}} \tag{2.8}$$

สมการ Magnitude of Frequency Response (Gain)

$$\boldsymbol{G^2(\omega) = |H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1+\omega^{2n}}} \tag{2.9}$$

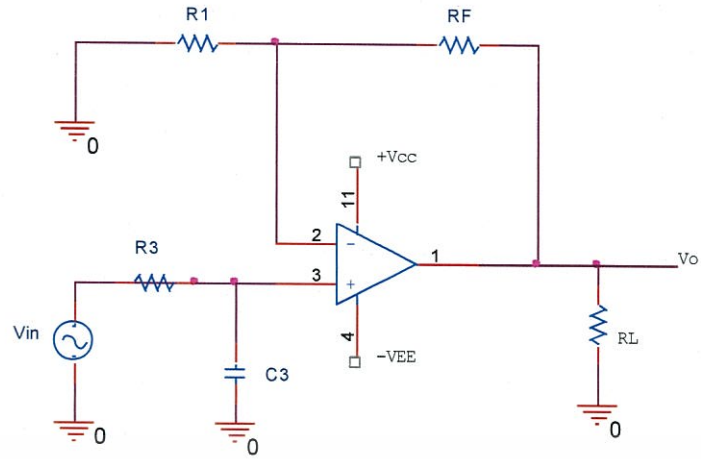
วงจรกรองความถี่ในแต่ละแบบจะใช้สมการถ่ายโอนความถี่ที่เหมือนกัน แต่จะต่างกันที่สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร ซึ่งในแต่ละแบบนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งวงจรกรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิทธ์เนื่องจากมีความราบเรียบของแอมปลิจูดมากที่สุด



รูปที่ 2.28 กราฟแสดง Frequency Respond ในแต่ละ Order

2.9.1 1st Order Filter

เป็นลำดับแรกของ Filter ซึ่งจะมีคู่ของ R C ที่เป็นวงจรคัทออฟเพียงคู่เดียว อันดับสูงสุดของ Polynomial = 1 จึงเขียน H(S) ได้ ดังสมการที่ 2.10 และ Magnitude of Frequency Response (Gain) เขียนได้ดังสมการที่ **2.9** ที่ได้กราฟจะมีความชัน -20 dB/decade



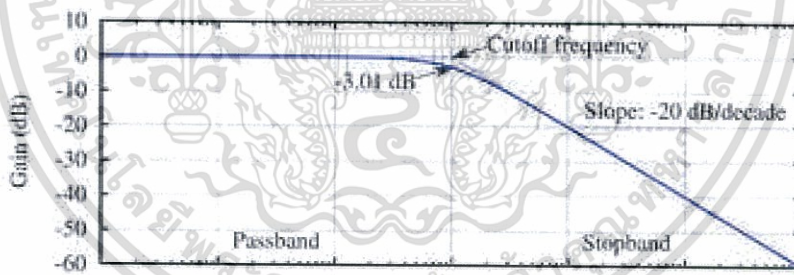
รูปที่ 2.29 วงจรกรองความถี่อันดับที่ 1 แบบต่ำผ่าน

สมการ **ถ่ายโอนความถี่**

$$H(S) = \frac{1}{1+S} \tag{2.10}$$

Magnitude of Frequency Response (Gain)

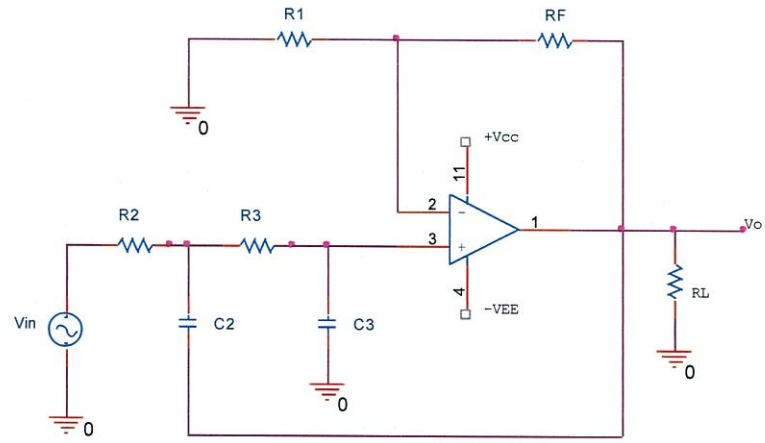
$$G^2(\omega) = \frac{1}{1+\omega^2} \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.30 กราฟแสดง Frequency Response ของ First Order

2.9.2 2nd Order Filter

เป็นออเดอร์ที่สองของวงจรกรองความถี่ ซึ่งจะมีคู่ของ R C ที่เป็นวงจรคัทออฟสองคู่ อันดับสูงสุดของ Polynomial = 2 จึงเขียน H(S) ได้ ดังสมการที่ 2.13 และ Magnitude of Frequency Response (Gain) เขียนได้ดังสมการที่ 2.14 ที่ได้กราฟจะมีความชัน -40 dB/decade



รูปที่ 2.31 วงจรกรองความถี่ อันดับที่ 2 แบบต่ำผ่าน

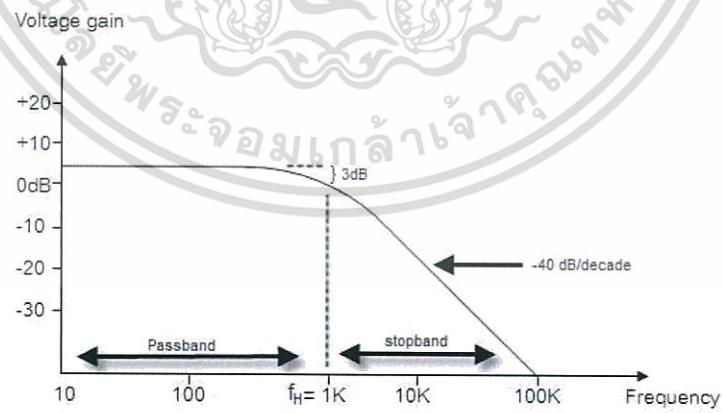
สมการ ถ่ายโอนความถี่

$$H(S) = \frac{1}{a + bS + S^2} \qquad (2.12)$$

$$H(S) = \frac{1}{1 + 1.414S + S^2} \qquad (2.13)$$

Magnitude of Frequency Response (Gain)

$$G^2(\omega) = \frac{1}{1 + \omega^4} \qquad (2.14)$$

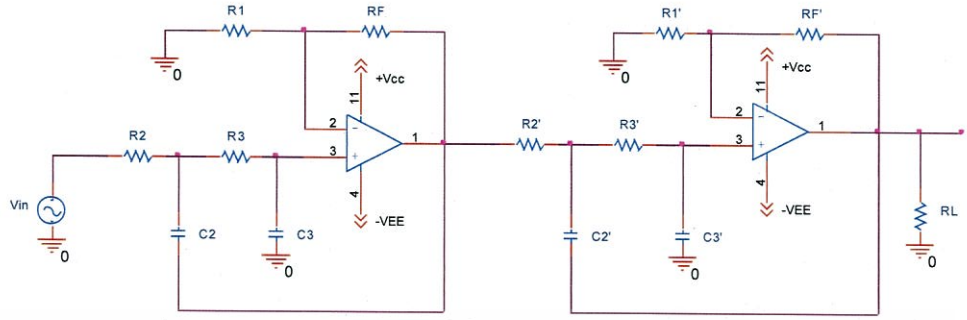


รูปที่ 2.32 กราฟแสดง Frequency Response ของ อันดับที่ 2

2.9.3 4th Order Filter

เป็นออเดอร์ที่สองของ Filter ซึ่งจะมีคู่ของ RC ที่เป็นวงจรคัทออฟ สี่คู่ ซึ่งเกิดจากการนำFilter แบบ อันดับที่ 2 มาต่อแบบ คาสเคด กัน อันดับสูงสุดของ Polynomial = 4

จึงเขียน H(S) ได้ ดังสมการที่ 2.15 และ Magnitude of Frequency Response (Gain) เขียนได้ดังสมการที่ 2.17 ที่ได้กราฟจะมีความชัน -80 dB/decade



รูปที่ 2.33 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 แบบบัทเตอร์เวิธท์

สมการ ถ่ายโอนความถี่

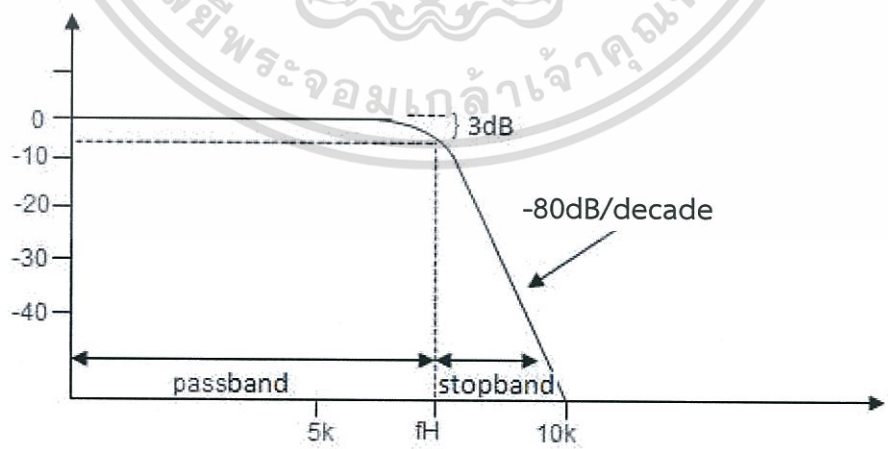
$$H(S) = \frac{1}{a + bS + cS^2 + dS^3 + S^4} \qquad (2.15)$$

แยกตัวประกอบของสมการ จะได้

$$H(S) = \frac{1}{(S^2 + 0.7654S + 1)(S^2 + 1.8478S + 1)} \qquad (2.16)$$

Magnitude of Frequency Response (Gain)

$$G^2(\omega) = \frac{1}{1 + \omega^8} \qquad (2.17)$$



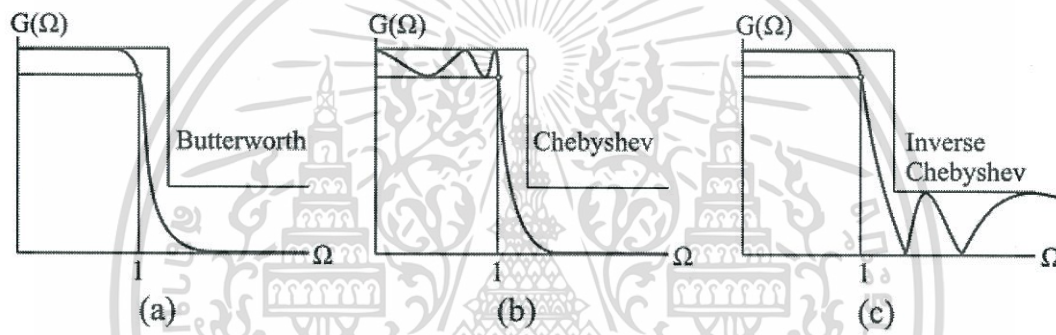
รูปที่ 2.34 กราฟแสดง Frequency Response ของ Fourth Order

2.9.3 การกำหนดและการประมาณค่าของตัวกรอง

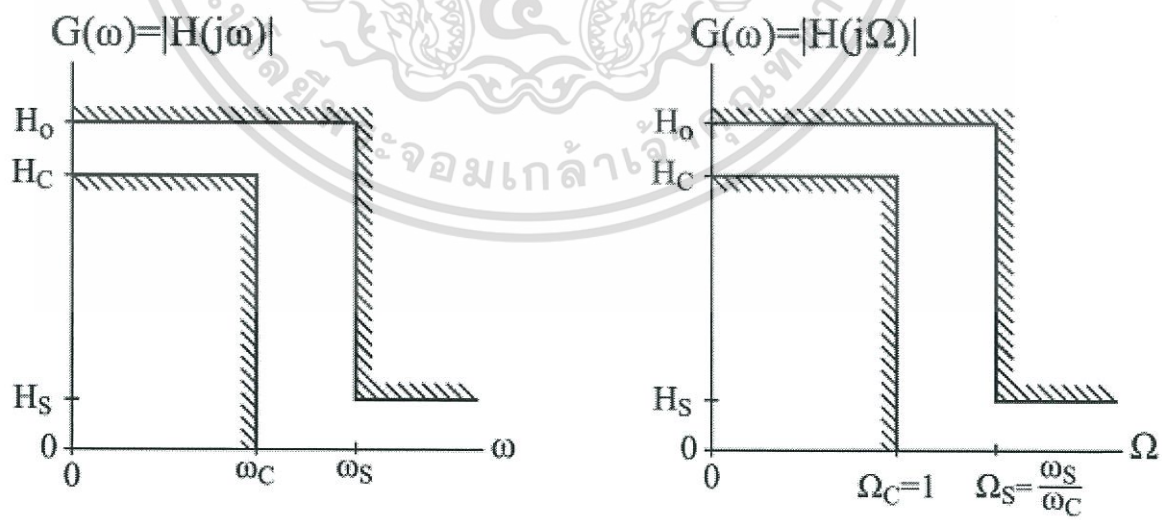
การออกแบบ Cross Over Network Filter ก่อนอื่นต้องคำนวณค่าในฟังก์ชันถ่ายโอนในเทอมส่วนเพื่อหาค่ารากของฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งก็คือคู่ของค่า Pole-Zero แล้วทำการกลับเครื่องหมายที่เทอมเศษจะได้รูปแบบสมการดัง (2.1) เพื่อที่จะทำ conjugate เทอมเศษดัง (2.2) ให้โพลีโนเมียลเทอมเศษมีเพียงแค่ 3 ค่า เพื่อสามารถแยกหา Low-Pass Filter, Band-Pass Filterและ High-Pass Filter ได้

$$\boldsymbol{H_{(s)} = \frac{X_{out(s)}}{X_{in(s)}}} \tag{2.18}$$

$$\boldsymbol{H_{(s)}H_{(-s)} = |H(j\omega)|^2{}_{\omega=-js} = |H(j\omega)|^2{}_{\omega^2=-s^2}} \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.35 การประมาณค่าของ Butterworth และ Chebyshev



รูปที่ 2.36 การระบุช่วงความถี่ต่ำผ่านในรูปแบบ$\boldsymbol{\omega}$ และในรูปแบบ Ω

2.9.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนและการประมาณค่าของPoleทั้งหมด

การหาค่าของฟังก์ชันถ่ายโอน เริ่มจากหาลำดับของวงจรกรองความถี่ในสมการดัง (2.3) ซึ่งค่ารากของ Pole ทั้งหมดจะอยู่ทางด้านซ้ายของ halfs-plane โดยค่า pole จะมีค่าเป็นลบแต่จะไม่เท่ากับ 0 เนื่องจาก Pole อยู่บนแกน $\boldsymbol{j\omega}$ และจะมี

$$\boldsymbol{s_p = -a \pm jb} \tag{2.20}$$

ค่าจินตภาพรวมคือเป็นค่า complex เพื่อทำการ Conjugate ได้ค่าผลต่างทั้งหมดยกกำลังสอง

$$\boldsymbol{H(s) = \frac{A_F}{D(s)} = \frac{A_F}{s^N + B_{N-1}s^{N-1} + \cdots + B_1 s + B_0}} \tag{2.21}$$

จากสมการ (2.22) แทนค่า $\mathbf{s = j\Omega}$ และจัดรูปแบบของD(s) ให้อยู่ในรูปแบบ และแทน $\mathbf{1 + [|D(j\Omega)|^2 - 1]}$ ค่าผลต่างนี้เป็น $\mathbf{Q(\Omega)}$ ดัง (2.21)

$$\mathbf{|H(j\Omega)| = \frac{|A_F|}{\sqrt{1 + [|D(j\Omega)|^2 - 1]}} = \frac{|A_F|}{\sqrt{1 + Q(\Omega)}}} \tag{2.22}$$

สำหรับค่าโพลีโนเมียลที่มีกำลังเป็นคู่จะแทนค่า $\mathbf{Q(\Omega)}$ ดังสมการ (2.21)

$$\mathbf{Q(\Omega) = \Omega^{2N} + b_{2N-2}\Omega^{2N-2} + b_{wN-4}\Omega^{2N-4} + \cdots + b_2\Omega^2 + b_0} \tag{2.23}$$

สำหรับค่าโพลีโนเมียลที่มีกำลังเป็นคี่จะเอาค่าโพโลโนเมียลที่มีกำลังเป็นคู่มาทำ differ ค่า Ω จะได้ค่าโพลีโนเมียลดัง (2.23) ซึ่งใช้ได้กับวงจรกรองความถี่ทุกลำดับและค่า Coefficient ทั้งหมดจะไม่เท่ากับ 0 เรียกสมการ (2.24) ว่าการประมาณค่าของ Pole ทั้งหมด (All-Pole Approximation)

$$\mathbf{Q(\Omega) = Q(\Omega_{sq}) = \Omega_{sq}^N + b_{2N-2}\Omega_{sq}^{N-1} + \cdots + b_2\Omega_{sq} + b_0} \tag{2.24}$$

แทนค่า Q(Ω) ในรูปแบบโพลีโนเมียลใดๆหรือ$\mathbf{P_a(\Omega)}$ จะได้สมการ (2.25) ซึ่งจะให้ค่าต่ำที่ช่วง Pass-Band และให้ค่าสูงที่ช่วง Stop-Band

$$\boldsymbol{G(\Omega) = |H(j\Omega)| = \frac{A_F}{\sqrt{1 + P_a(\Omega)}}} \tag{2.25}$$

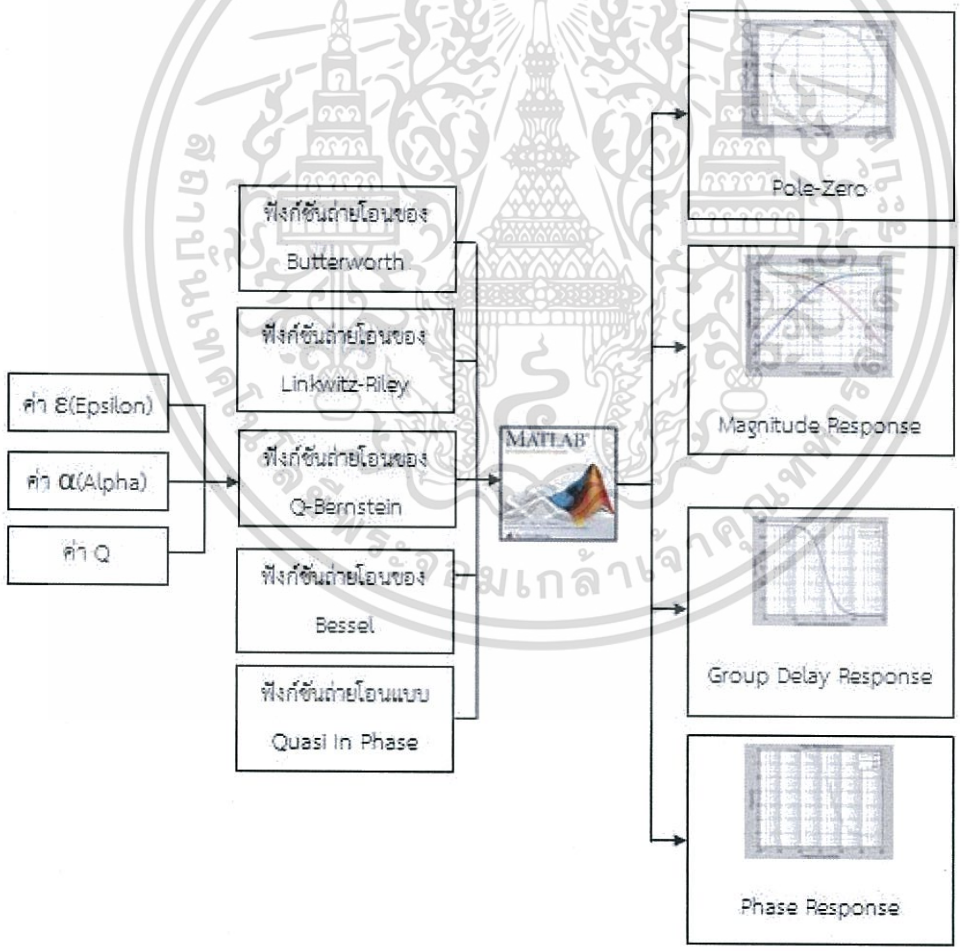
จากสมการ (2.26) $\mathbf{P_a(\Omega) = \gamma^2 P_N^2(\Omega)}$ เมื่อแทนค่าจะได้ดัง (2.25) ซึ่ง $P_n(\Omega)$ เป็นการประมาณค่าโพลีโนเมียลและเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ

$$\mathbf{G(\Omega) = \frac{A_F}{\sqrt{1+\gamma^2 P_N^2(\Omega)}}} \qquad (2.26)$$

สำหรับคุณสมบัติของ gain ของ Low-Pass ค่า $P_n(\Omega)$ จะต้องมีค่าที่ต่ำสำหรับ $0 \leq \Omega \leq 1$ และมีค่าที่สูงสำหรับ $\Omega > 1$

บทที่ 3
ทฤษฎีและการจำลองของฟังก์ชันถ่ายโอน

บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน(Low Pass Filter: LPF) กับสัญญาณวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter: HPF) ผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนของเบิร์นสไตน์เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley, Bessel และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Quasi In Phase เพื่อเลือกผลลัพธ์ของสัญญาณที่เฟสตรงกัน ที่ทำให้เสียงออกมาดีที่สุดและลำเสียงมีความสมมาตร โดยสัญญาณรวมจะต้องใกล้เคียงกับเส้นตรงให้มากที่สุด ซึ่งในการวิเคราะห์สัญญาณจะสังเกตจุดของ Pole-Zero, Magnitude Response, Group Delay Response และ Phase Response



รูปที่ 3.1 การออกแบบขั้นตอนการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน

3.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนเสียง

การออกแบบทดลองนั้นจะเริ่มจากการเปรียบเทียบค่าจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการแทนค่า ε (Epsilon), α (Alpha) และค่า Q ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของเบิร์นสไตน์ รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 โดยทั่วไปคือ

$$\mathbf{H_{LPF}(s)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c{}^2}s^2+\frac{1}{\omega_c Q}s+1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c{}^2}s^2+\frac{2\alpha}{\omega_c{}^2}s+1} \tag{3.1}$$

$$\mathbf{H_{HPF}(s)} = \frac{s^2}{s^2+\frac{\omega_c}{Q}s+\omega_c{}^2} = \frac{s^2}{s^2+2\alpha s+\omega_c{}^2} \tag{3.2}$$

ซึ่งในการออกแบบวงจรอันดับ 2 สามารถหาค่าตัวต้านทาน กับค่าตัวเก็บประจุ ได้จาก

$$\mathbf{H_{LPF}(s)} = \frac{1}{C_1C_2R_1R_2\,s^2+C_2(R_1+R_2)s+1} \tag{3.3}$$

$$\mathbf{H_{HPF}(s)} = \frac{s^2}{s^2+\frac{(C_1+C_2)}{R_2C_1C_2}s+\frac{1}{C_1C_2R_1R_2}} \tag{3.4}$$

โดย

$$2\alpha = \frac{\omega_c}{q} \tag{3.5}$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_1C_2R_1R_2}} \tag{3.6}$$

สมการของ Phase Response ของ LPF กับ HPF คือ

$$\varphi_L(\omega) = -\tan^{-1}\left(\frac{1}{\alpha}\left(2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)-\sqrt{4-\alpha^2}\right)\right)-\tan^{-1}\left(\frac{1}{\alpha}\left(2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)-\sqrt{4+\alpha^2}\right)\right) \tag{3.7}$$

$$\varphi_H(\omega) = \pi-\tan^{-1}\left(\frac{1}{\alpha}\left(2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)-\sqrt{4-\alpha^2}\right)\right)-\tan^{-1}\left(\frac{1}{\alpha}\left(2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)-\sqrt{4+\alpha^2}\right)\right) \tag{3.8}$$

สมการของ Group Delay Response คือ

$$T(\omega) = -\frac{d}{d\omega}\varphi(\omega) \tag{3.9}$$

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4

ฟังก์ชันถ่ายโอน	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
Butterworth	$\frac{1}{s^4 + 2.6132s^3 + 3.4143s^2 + 2.6132s + 1}$
Linkwitz - Riley	$\frac{1}{s^4 + 2\sqrt{2}s^3 + 4s^2 + 2\sqrt{2}s + 1}$
Bessel	$\frac{1}{\frac{1}{105}s^4 + \frac{2}{21}s^3 + \frac{3}{7}s^2 + s + 1}$
Quasi in phase	$\frac{1}{s^4 + 2s^3 + 3s^2 + 2s + 1}$
Q - Bernstein	$\frac{1}{\frac{A}{2}s^4 + \frac{B}{2}s^2 + 1}$

ตารางที่ 3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 4

ฟังก์ชันถ่ายโอน	วงจรกรองความถี่สูงผ่าน
Butterworth	$\frac{s^4}{s^4 + 2.6132s^3 + 3.4143s^2 + 2.6132s + 1}$
Linkwitz - Riley	$\frac{s^4}{s^4 + 2\sqrt{2}s^3 + 4s^2 + 2\sqrt{2}s + 1}$
Bessel	$\frac{s^4}{s^4 + s^3 + \frac{3}{7}s^2 + \frac{2}{21}s + \frac{1}{105}}$
Quasi in phase	$\frac{s^4}{s^4 + 2s^3 + 3s^2 + 2s + 1}$
Q - Bernstein	$\frac{s^4}{s^4 + \frac{B}{2}s^2 + \frac{A}{2}}$

ตารางที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่อันดับที่ 2

ฟังก์ชันถ่ายโอน	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	วงจรกรองความถี่สูงผ่าน
Butterworth	$\frac{1}{s^2+\sqrt{2}s+1}$	$\frac{s^2}{s^2+\sqrt{2}s+1}$
Linkwitz - Riley	$\frac{1}{s^2+2s+1}$	$\frac{s^2}{s^2+2s+1}$
Bessel	$\frac{1}{\frac{1}{3}s^2+s+1}$	$\frac{s^2}{s^2+s+\frac{1}{3}}$
Quasi in phase	$\frac{1}{s^2+s+1}$	$\frac{s^2}{s^2+s+1}$
Q - Bernstein	$\frac{1}{\frac{1}{2}s^2+\frac{B}{2A}s+1}$	$\frac{s^2}{s^2+\frac{B}{2A}s+\frac{1}{2}}$

โดย $$A = 1+\varepsilon^2\left(\frac{1}{1-\frac{1}{\alpha^2}}+2(1+q)\left(\frac{1}{1-\frac{1}{4\alpha^2}}\right)-1\right) \quad (3.10)$$

$$A = 1+\varepsilon^2\left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2-1}+2(1+q)\left(\frac{4\alpha^2}{4\alpha^2-1}\right)-1\right) \quad (3.11)$$

$$B = -\varepsilon^2(1+q)\left(\frac{1}{1-\frac{1}{4\alpha^2}}-1\right)-2 \quad (3.12)$$

$$B = -\varepsilon^2(1+q)\left(\frac{4\alpha^2}{4\alpha^2-1}-1\right)-2 \quad (3.13)$$

$$B = -\varepsilon^2(1+q)\left(\frac{1}{4\alpha^2-1}\right)-2 \quad (3.14)$$

$$B = -\varepsilon^2\left(\frac{1+q}{4\alpha^2-1}\right)-2 \quad (3.15)$$

วิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค

การหา Pole - Zero ต้องหาค่ารากจาก

$$\mathbf{s} = \frac{-\mathbf{b} \pm \sqrt{\mathbf{b^2 - 4ac}}}{\mathbf{2}} \tag{3.16}$$

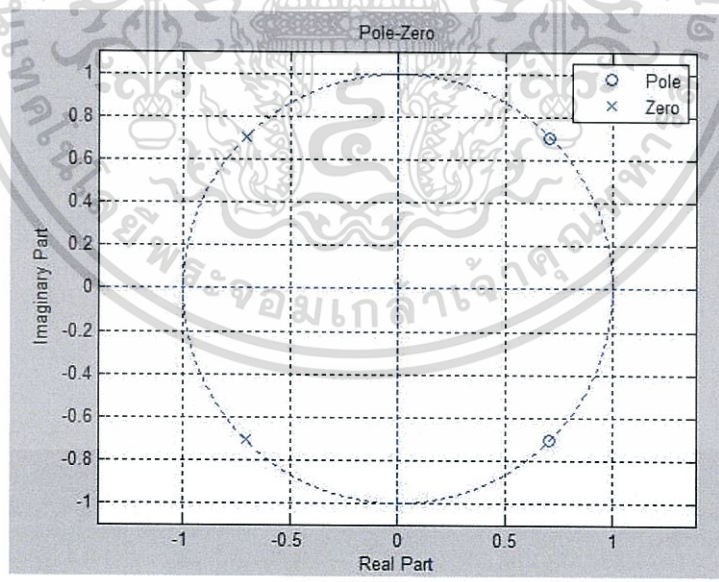
เมื่อรูปแบบฟังก์ชันคือ

$$\mathbf{as^2 + bs + c = 0} \tag{3.17}$$

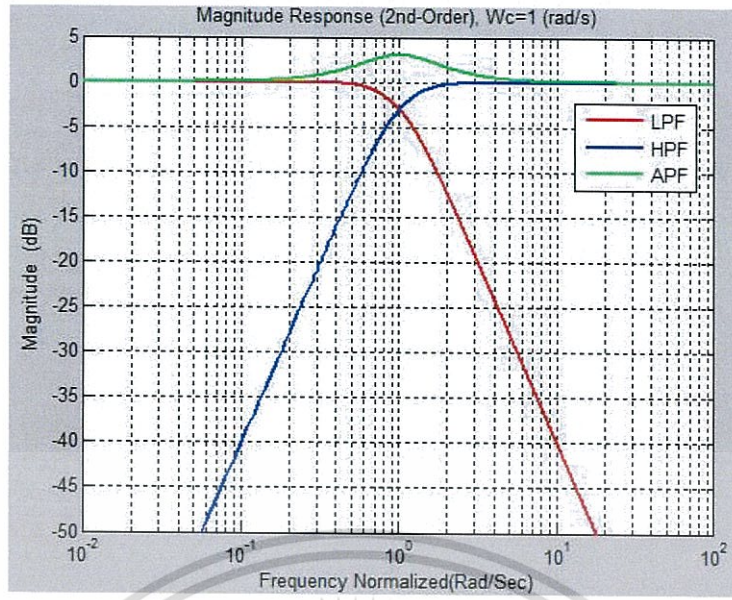
3.2 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB

ในการวิเคราะห์สัญญาณจากฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่อันดับที่ 4 จะพิจารณาตำแหน่งของ Pole-Zero และพิจารณาลักษณะสัญญาณของ Magnitude Response, Group Delay Response และ Phase Response ในวงจรกรองความถี่อันดับที่ 2 กับวงจรกรองความถี่อันดับที่ 4 โดย

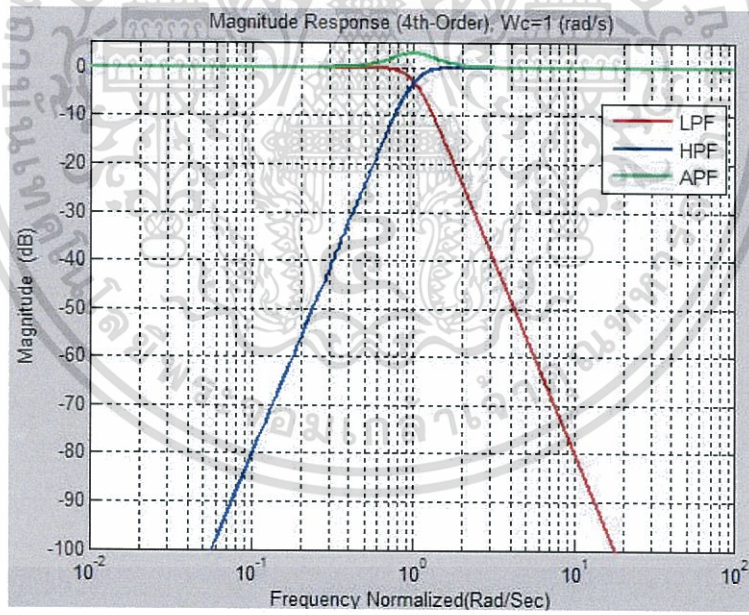
3.2.1 ผลตอบสนองของโครงข่ายแบ่งความถี่แบบบัทเทอร์เวิธท์



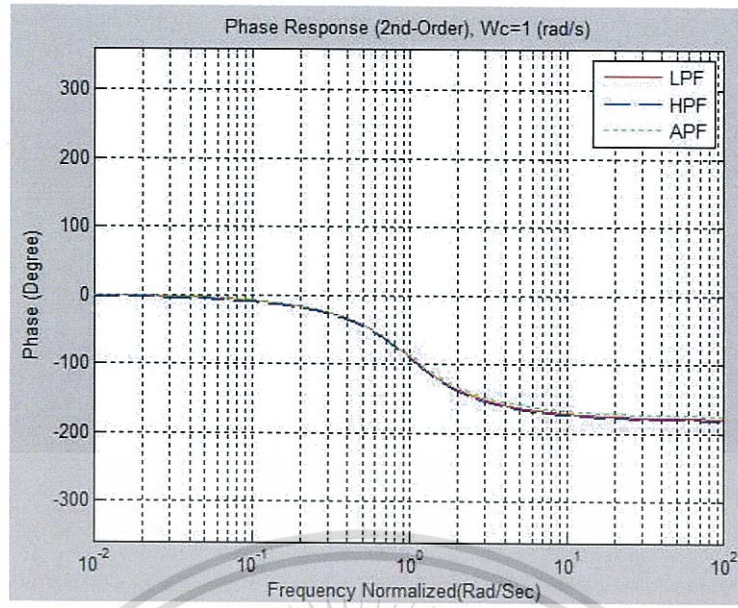
รูปที่ 3.4 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth



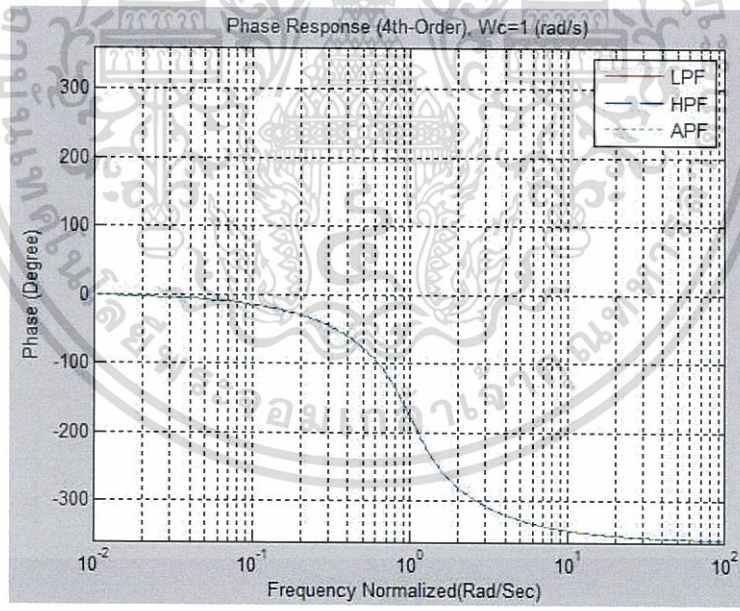
รูปที่ 3.5 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s



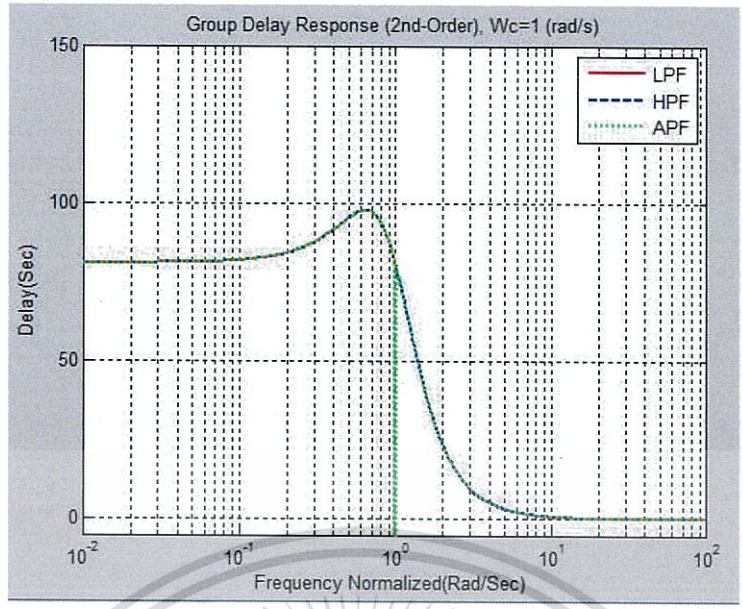
รูปที่ 3.6 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s



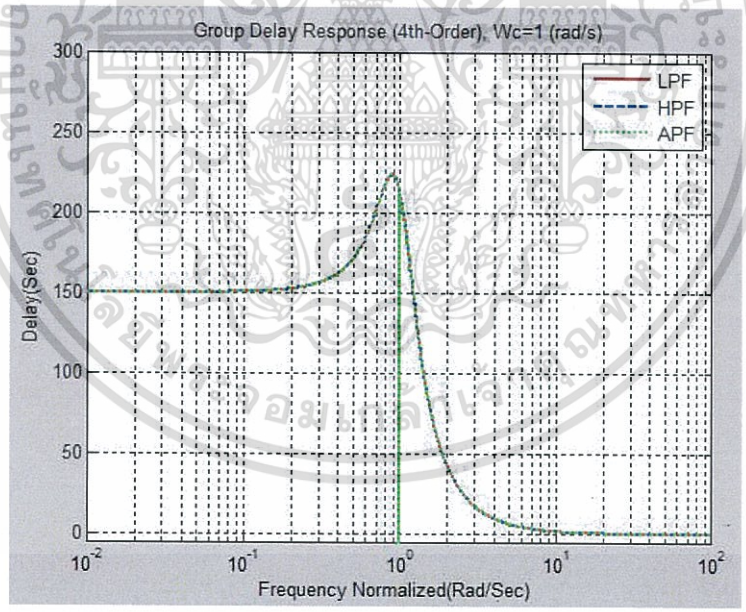
รูปที่ 3.7 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.8 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s

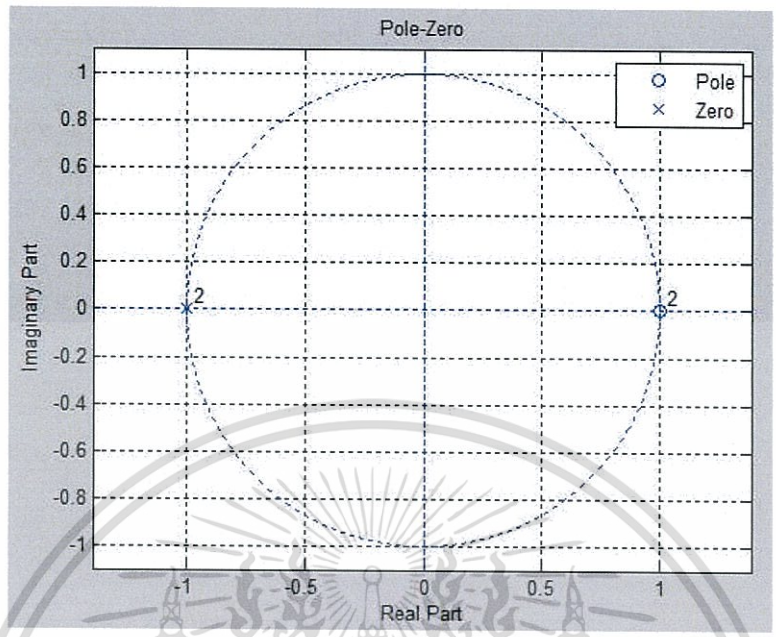


รูปที่ 3.9 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s

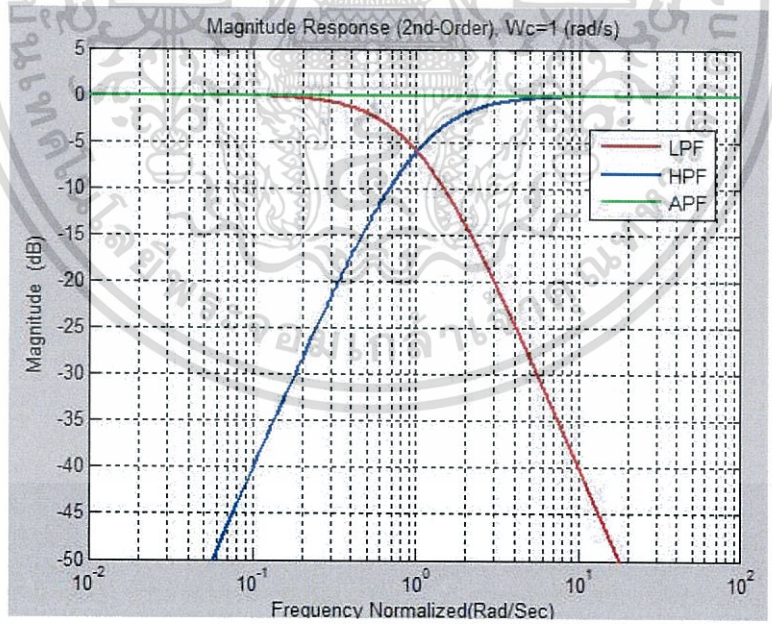


รูปที่ 3.10 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s

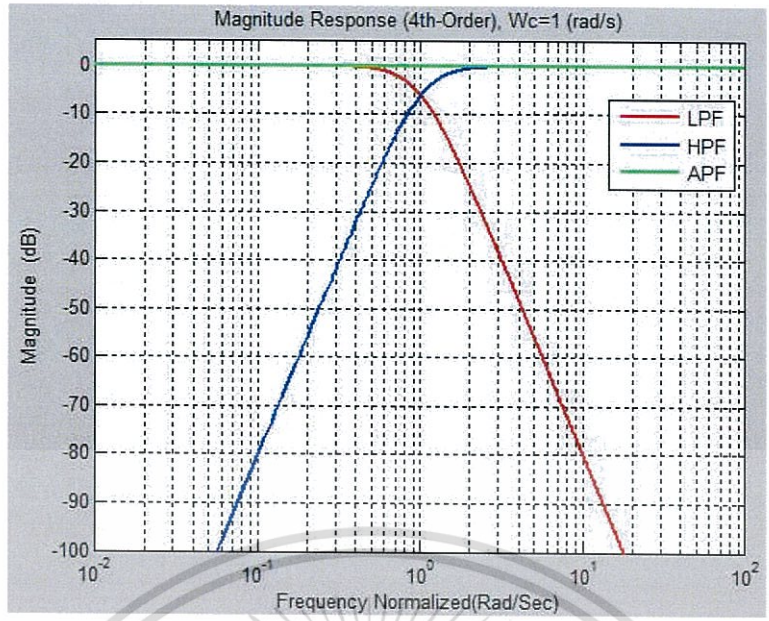
3.2.2 ผลตอบสนองของโครงข่ายแบ่งความถี่แบบ Linkwitz-Riley



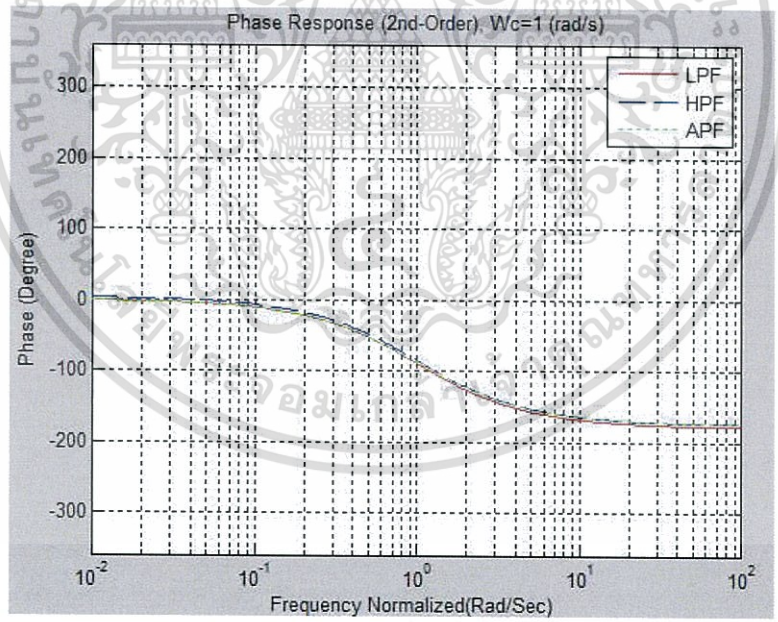
รูปที่ 3.11 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley



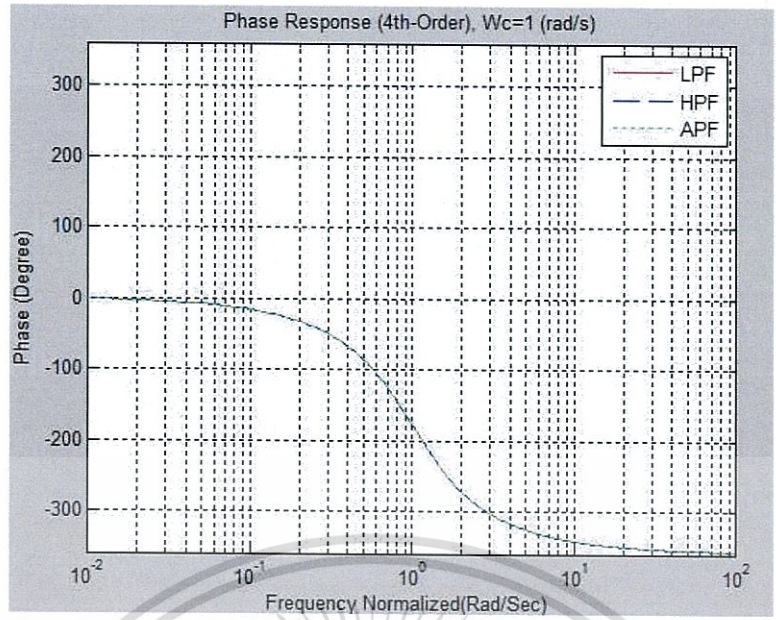
รูปที่ 3.12 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s



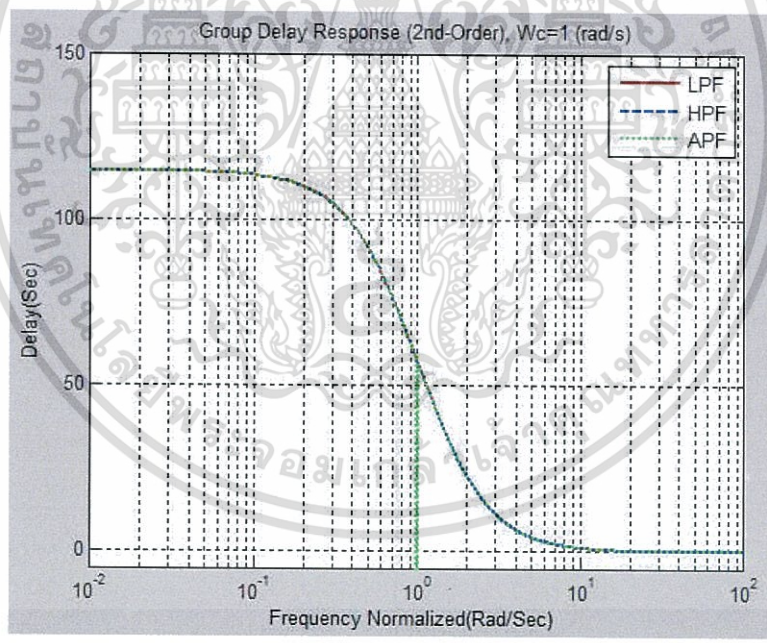
รูปที่ 3.13 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s



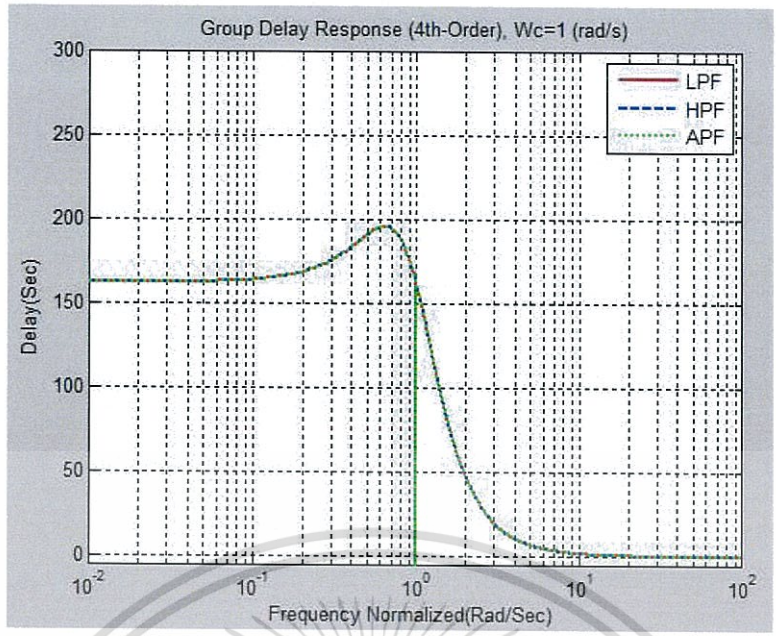
รูปที่ 3.14 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.15 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s

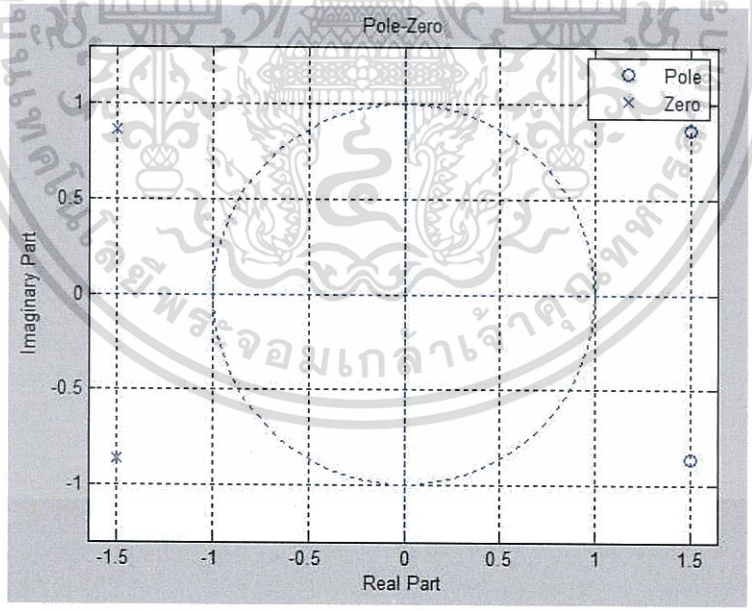


รูปที่ 3.16 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s

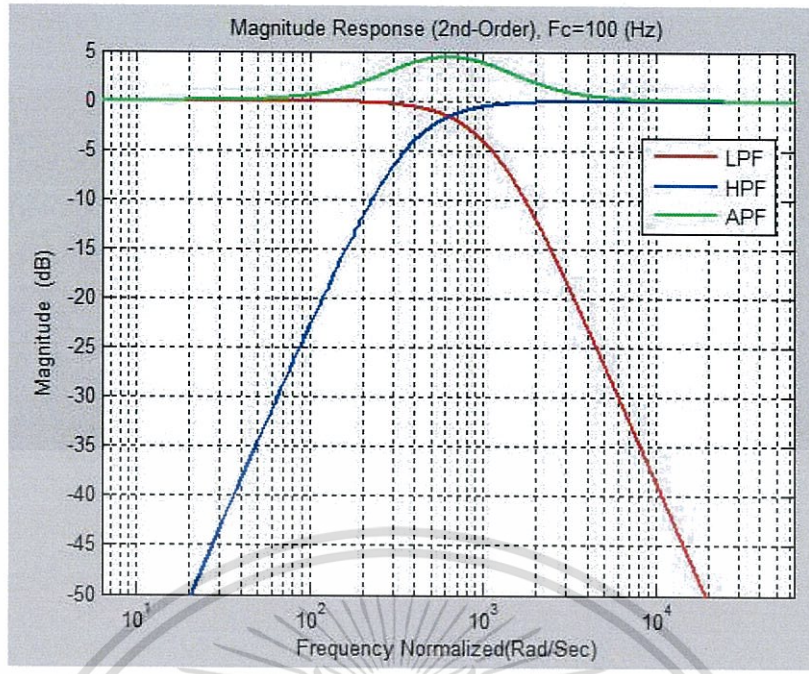


รูปที่ 3.17 Group Delay ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s

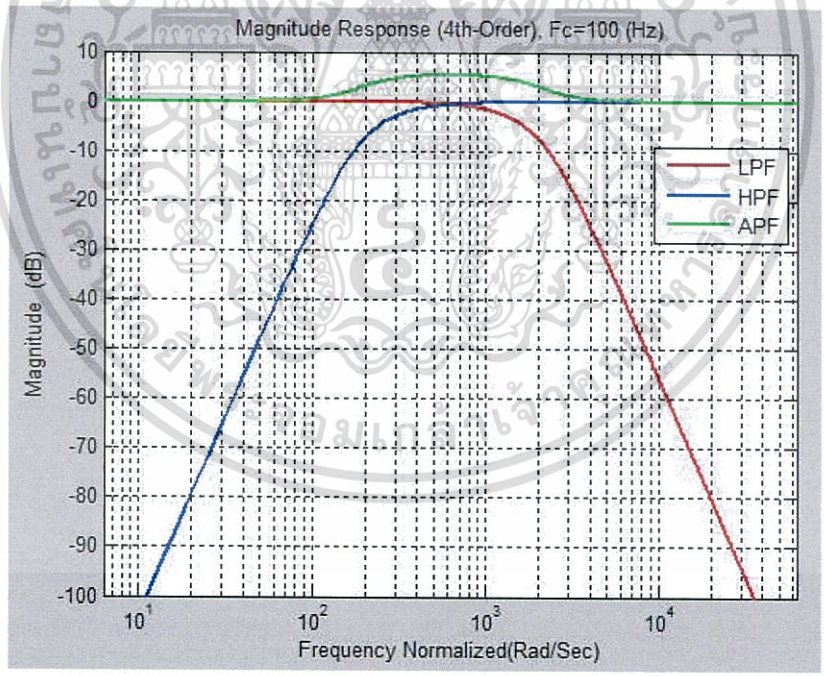
3.2.3 ผลตอบสนองของโครงข่ายแบ่งความถี่แบบ Bessel



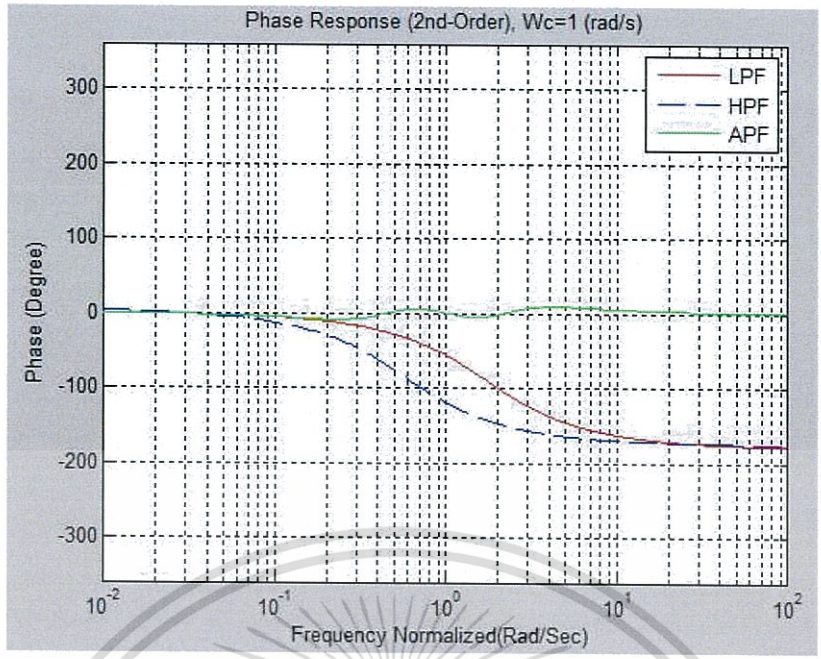
รูปที่ 3.18 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel



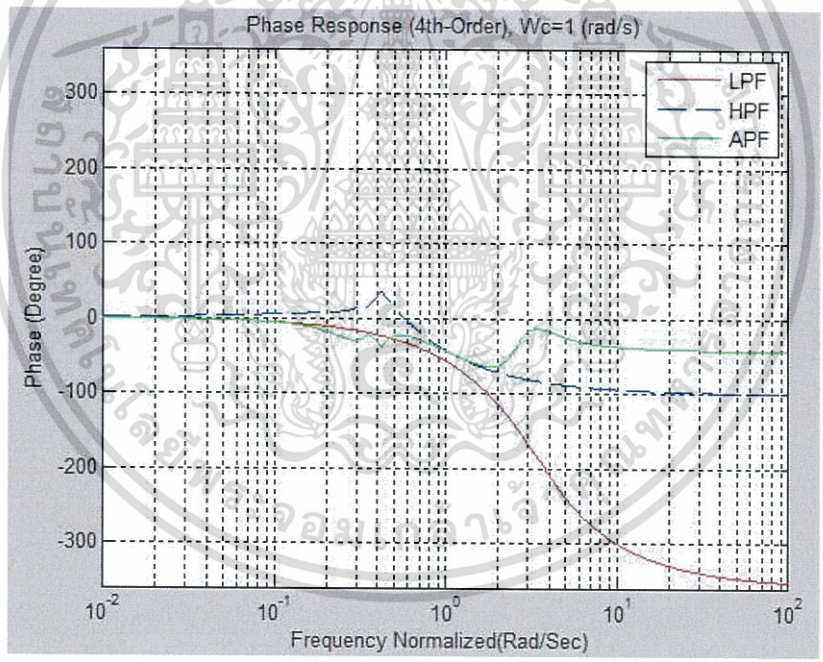
รูปที่ 3.19 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ที่ ω_c=1 rad/s



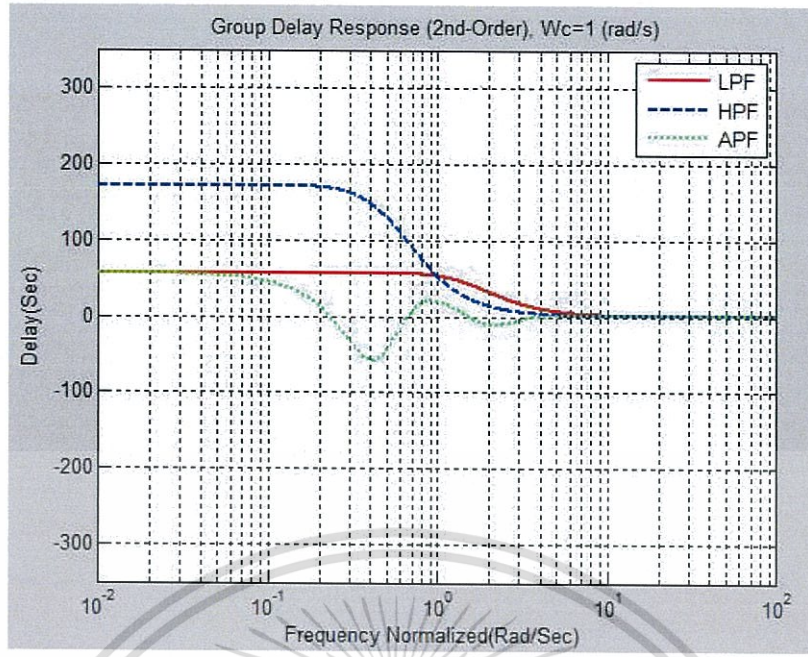
รูปที่ 3.20 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ที่ ω_c=1 rad/s



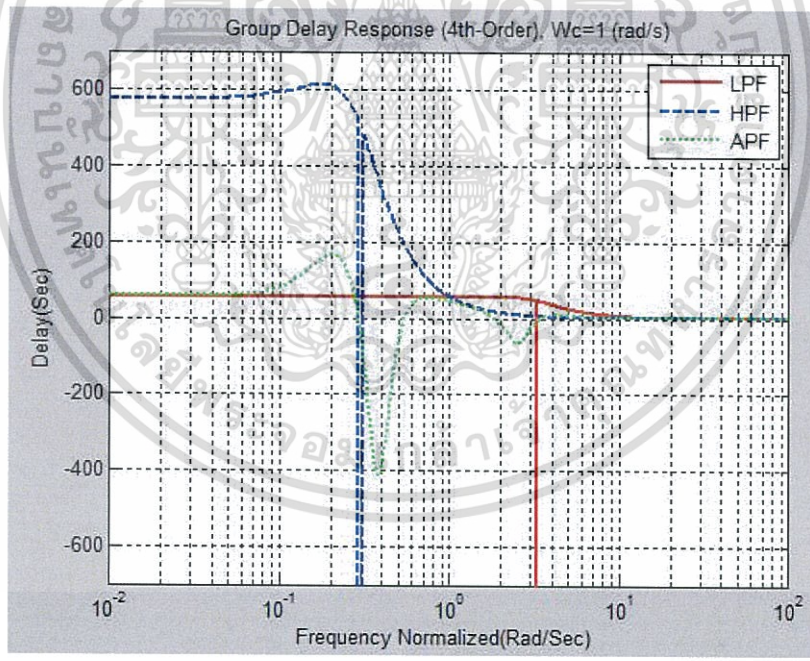
รูปที่ 3.21 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.22 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ที่ ω_c=1 rad/s

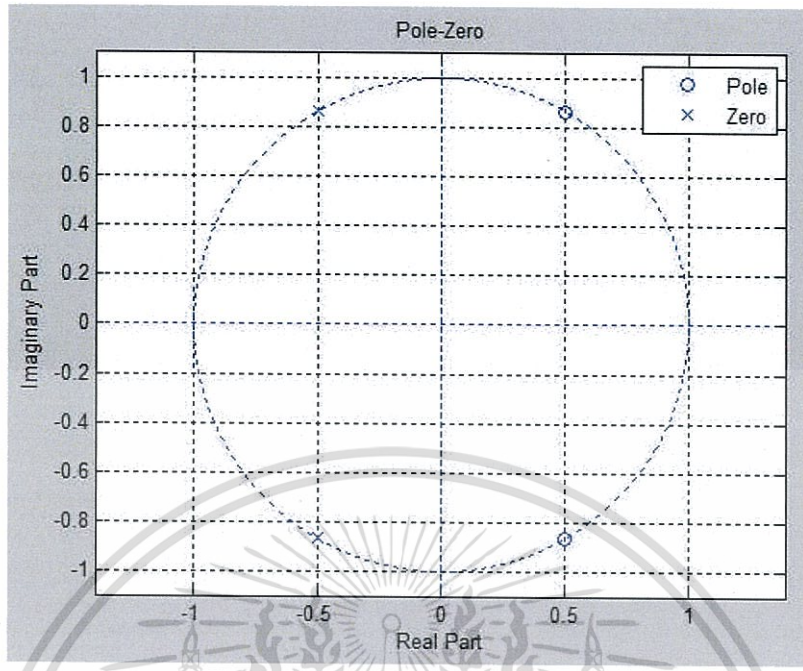


รูปที่ 3.23 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 2 ที่ ω_c=1 rad/s

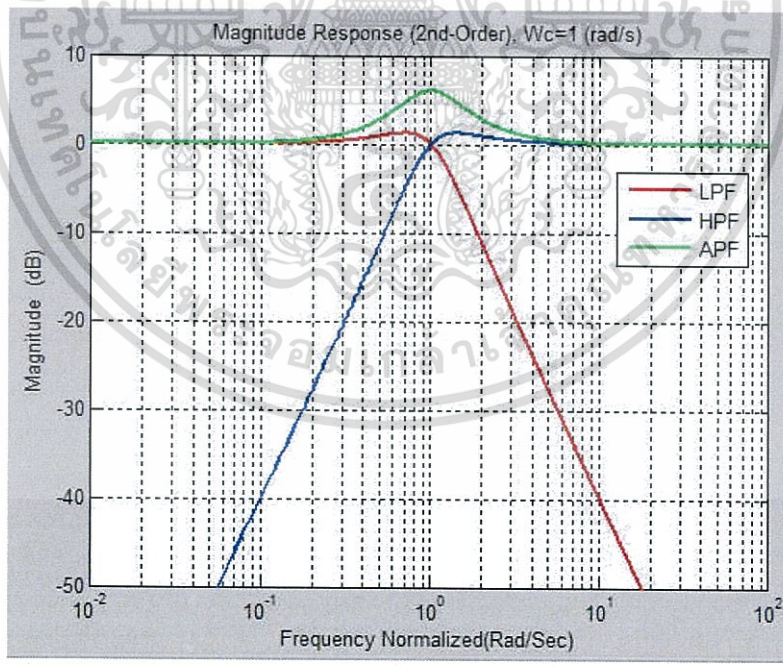


รูปที่ 3.24 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel อันดับที่ 4 ที่ ω_c=1 rad/s

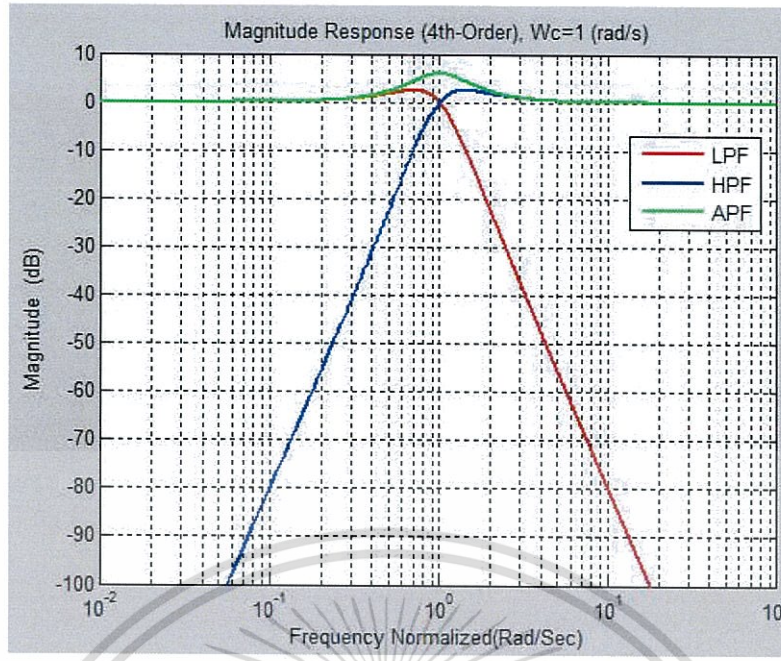
3.2.4 ผลตอบสนองของโครงข่ายแบ่งความถี่แบบ Quasi In Phase



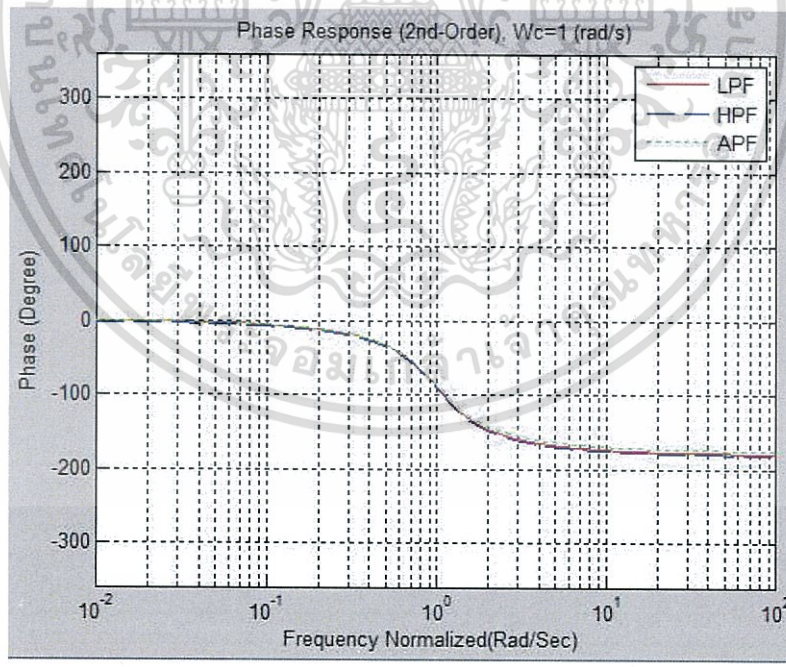
รูปที่ 3.25 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ Quasi In Phase



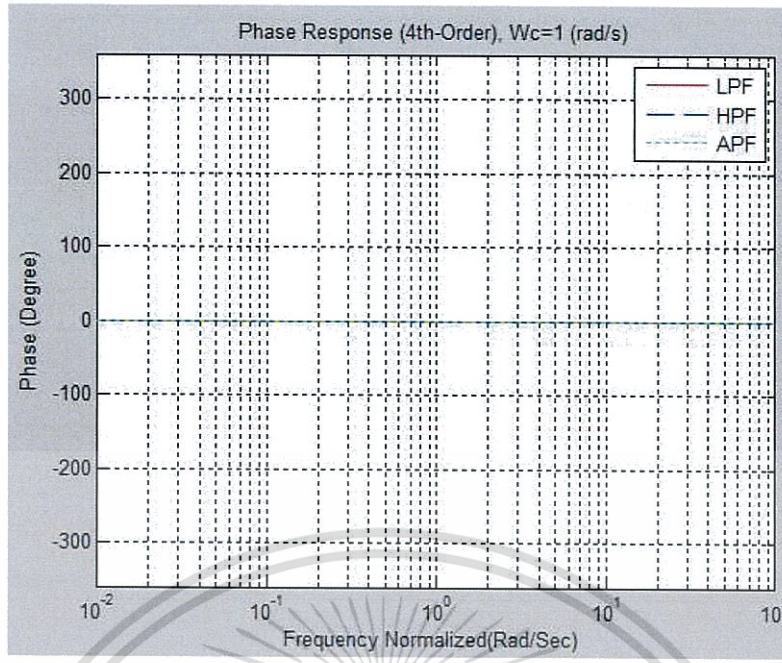
รูปที่ 3.26 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s



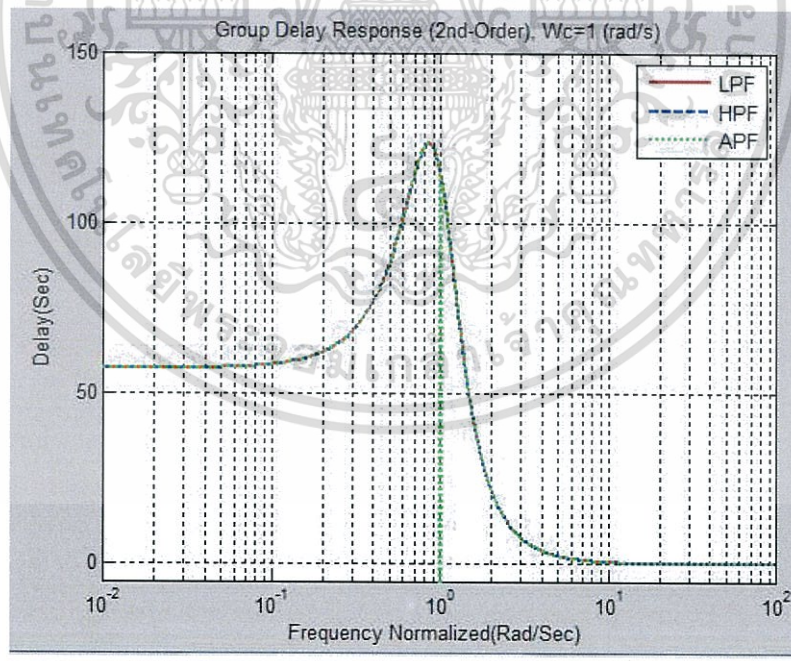
รูปที่ 3.27 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s



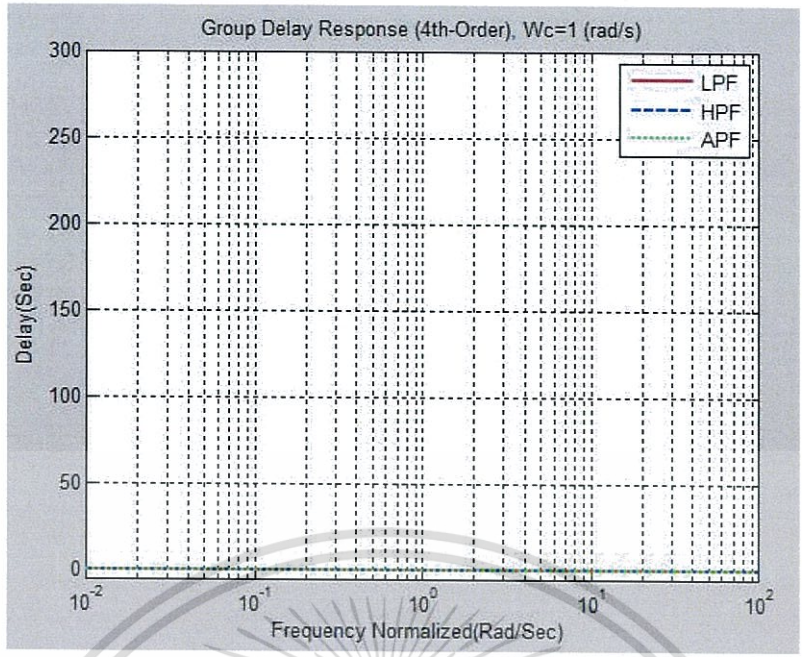
รูปที่ 3.28 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.29 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.30 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s



รูปที่ 3.31 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 แบบ Quasi In Phase ที่ ω_c=1 rad/s

จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth ผลรวมสัญญาณจะเกิด Boost ขึ้นประมาณ 3dB ระดับเสียงที่ออกมาจะมีค่ามากกว่าปกติ แต่เฟสของสัญญาณของวงจรกรองความถี่ต่ำกับวงจรกรองความถี่สูงตรงกัน ทำให้ทิศทางของลำเสียงไปที่ผู้ฟังโดยตรง ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนของ Linkwitz-Riley ผลรวมสัญญาณจะเป็นเส้นตรง เสียงที่ออกมาจะมีระดับที่ปกติ เฟสของสัญญาณวงจรกรองความถี่ต่ำกับเฟสของสัญญาณวงจรกรองความถี่สูงจะตรงกัน ทำให้ทิศทางของลำเสียงไปที่ผู้ฟังโดยตรง ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนของ Bessel ผลรวมของสัญญาณจะเกิด Boost ขึ้น เฟสของสัญญาณวงจรกรองความถี่ต่ำและสัญญาณวงจรกรองความถี่สูงจะไม่ตรงกัน

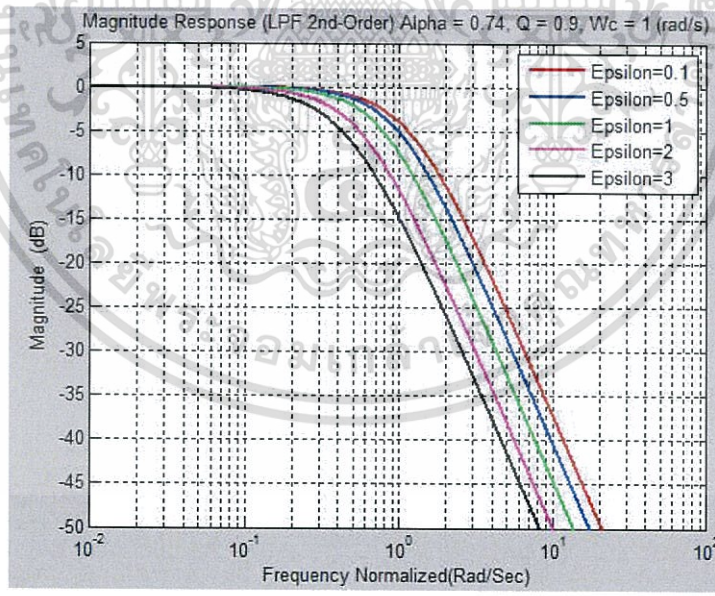
บทที่ 4
การจำลองและการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์

บทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สัญญาณวงจรกรองความถี่โดยการแทนค่า α (Alpha), ε (Epsilon) และค่า Q ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ เพื่อเลือกค่าที่เหมาะสมที่ให้ผลลัพธ์ของสัญญาณเสียงออกมามีความสมมาตร โดยพิจารณาตำแหน่งของ Pole-Zero, ผลตอบสนองต่อขนาด, ผลตอบสนองต่อเฟสและ ผลตอบสนองต่อการหน่วงของสัญญาณในครอสโอเวอร์แบบสองทาง (Two-Band Crossover) กับในครอสโอเวอร์แบบสามทาง (Three-Band Crossover)

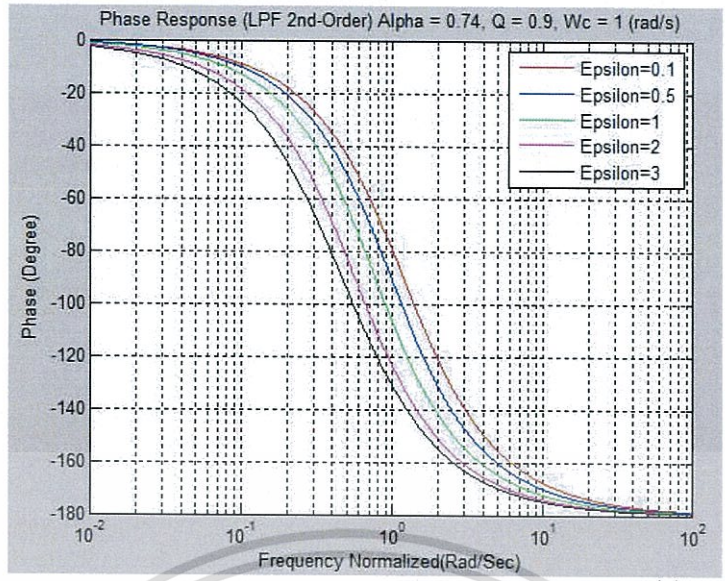
4.1 การปรับค่าพารามิเตอร์และการเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์

ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของ ε (Epsilon), α (Alpha) และค่า Q ควรเลือกปรับค่าที่ตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งและให้อีก 2 ตัวแปรมีค่าคงที่เพื่อเอามาเปรียบเทียบความชันของกราฟ ซึ่งจะเน้นสังเกตความชันของ LPF ลำดับที่ 2 เป็นหลัก ซึ่งกราฟในที่นี้กำหนดค่า ω_c ที่ 1 rad/s.

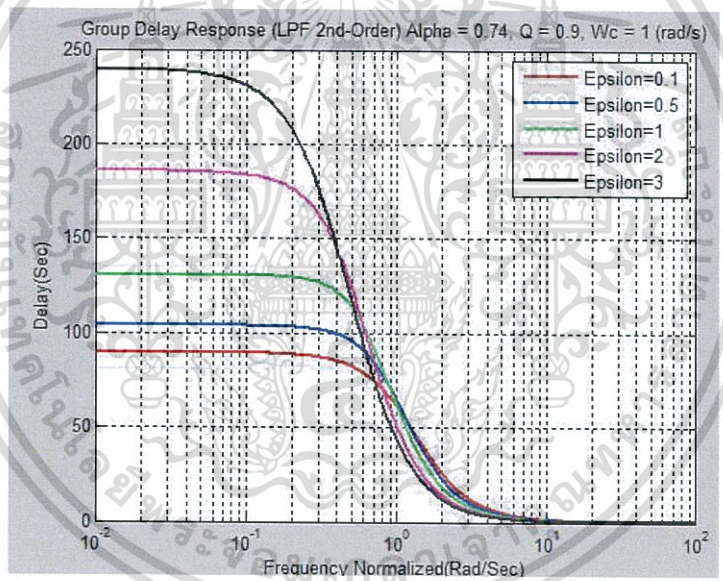
4.1.1 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε



รูปที่ 4.1 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , α=0.55 และ Q=0.9



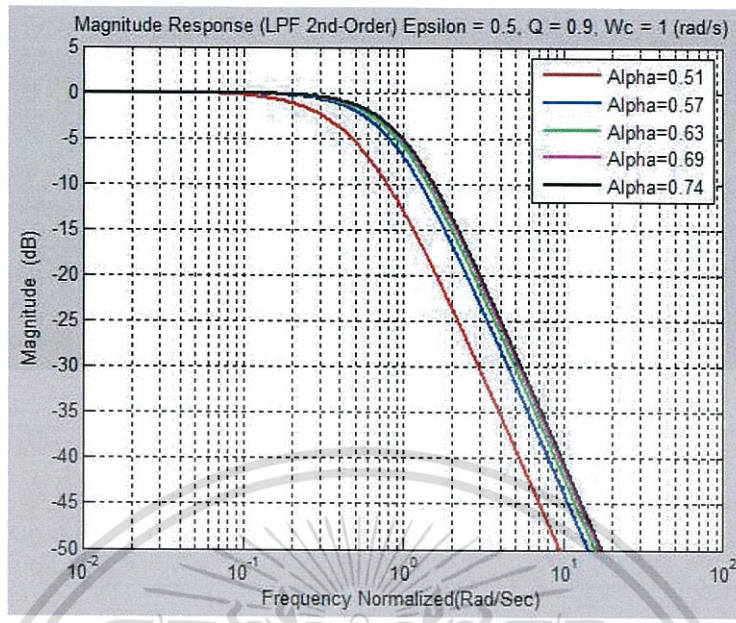
รูปที่ 4.2 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , $\boldsymbol{\alpha}$=0.55 และ Q=0.9



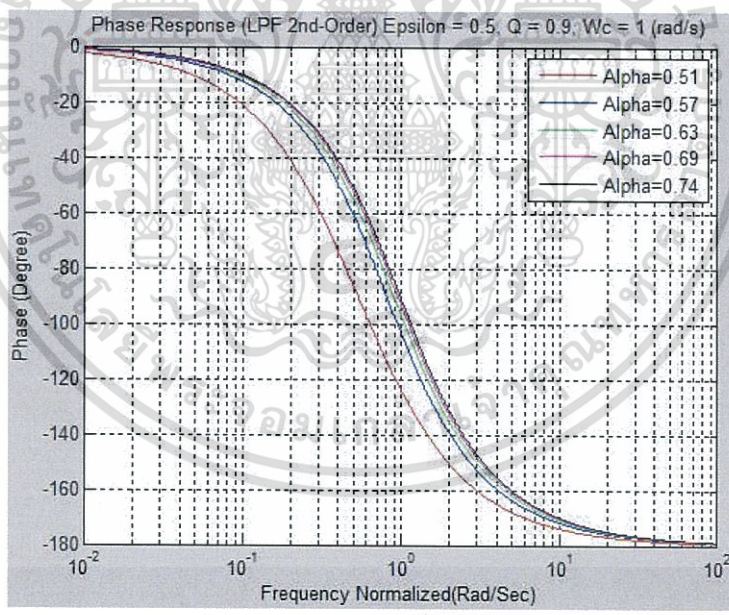
รูปที่ 4.3 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$={0.1 ,0.5 ,1 ,2 ,3} , $\boldsymbol{\alpha}$=0.55 และ Q=0.9

จะเห็นว่าค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$ ยิ่งมากขึ้นจะทำให้กราฟมีความชันมากขึ้น

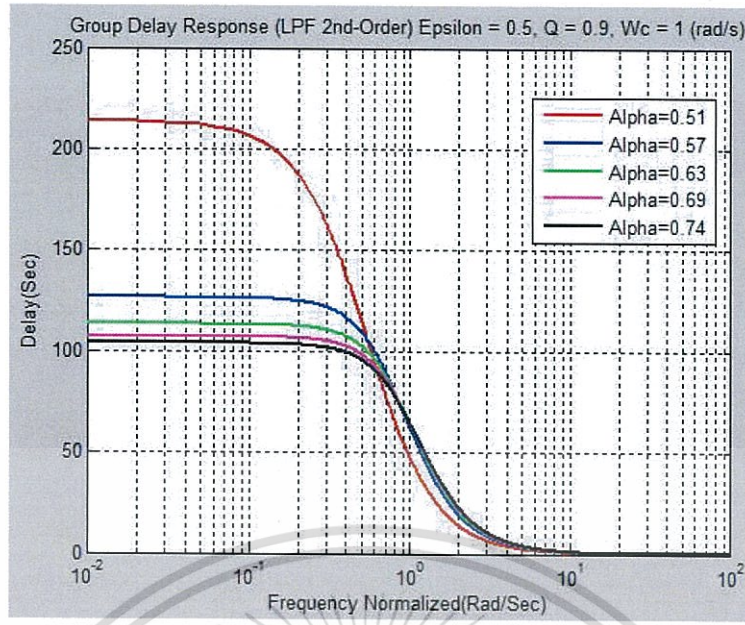
4.1.2 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า α



รูปที่ 4.4 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9



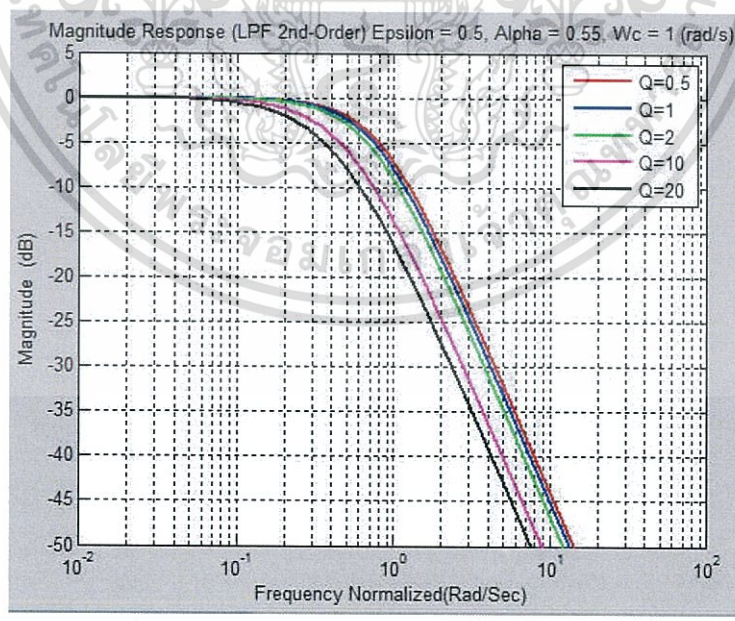
รูปที่ 4.5 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9



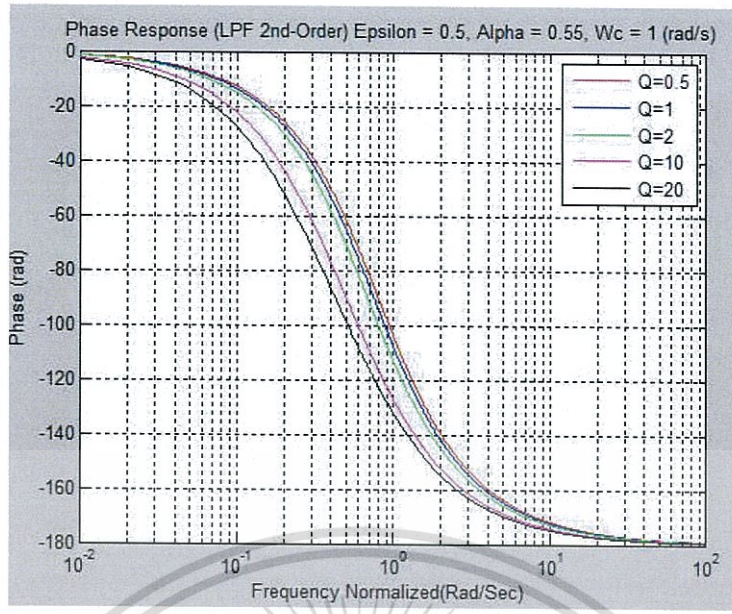
รูปที่ 4.6 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α={0.51 ,0.57 ,0.63 ,0.69 ,0.74} และ Q=0.9

จะเห็นว่าค่า α ที่มากขึ้นจะทำให้กราฟมีความชันน้อยลง

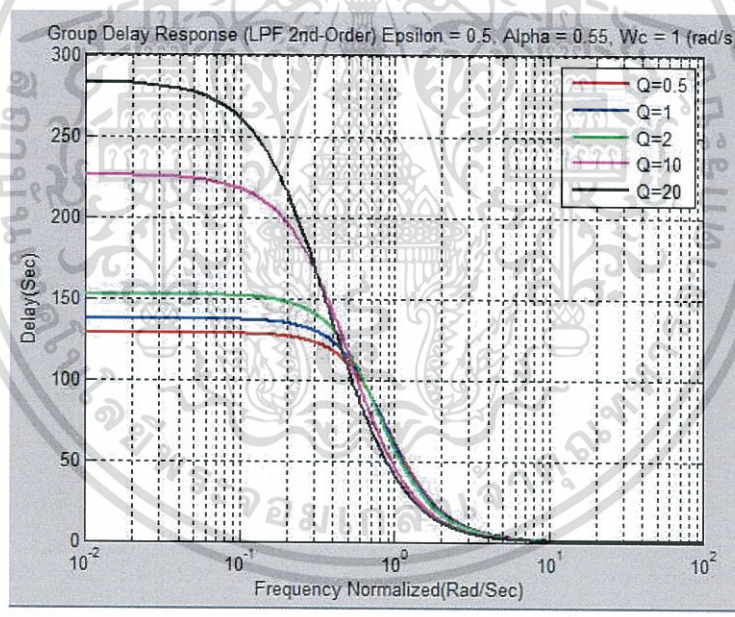
4.1.3 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า Q



รูปที่ 4.7 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20}



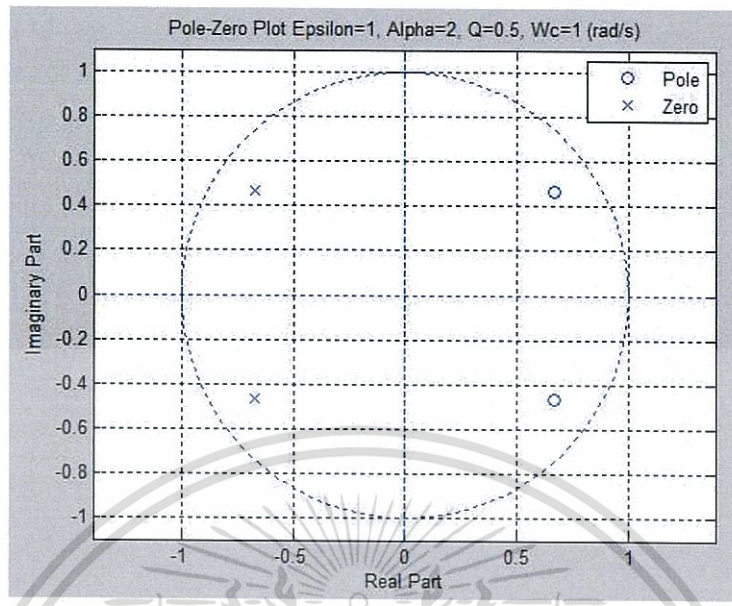
รูปที่ 4.8 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$=0.5 , $\boldsymbol{\alpha}$=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20}



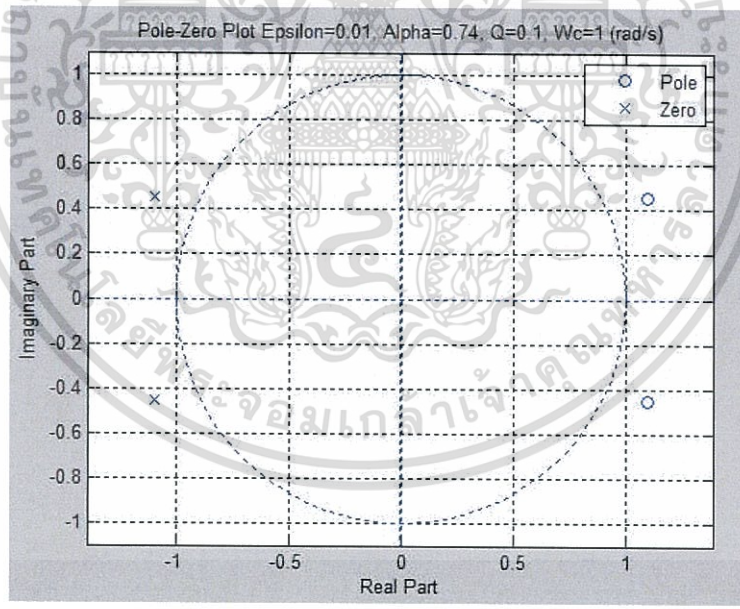
รูปที่ 4.9 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 ที่ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$=0.5 , $\boldsymbol{\alpha}$=0.55 และ Q={0.5 ,1 ,2 ,10 ,20}

จะเห็นว่าค่า Q ยิ่งมากขึ้นจะทำให้กราฟมีความชันมากขึ้น ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$ มีผลต่อความชันของกราฟมากที่สุด รองลงมาคือค่า $\boldsymbol{\alpha}$ และค่า Q

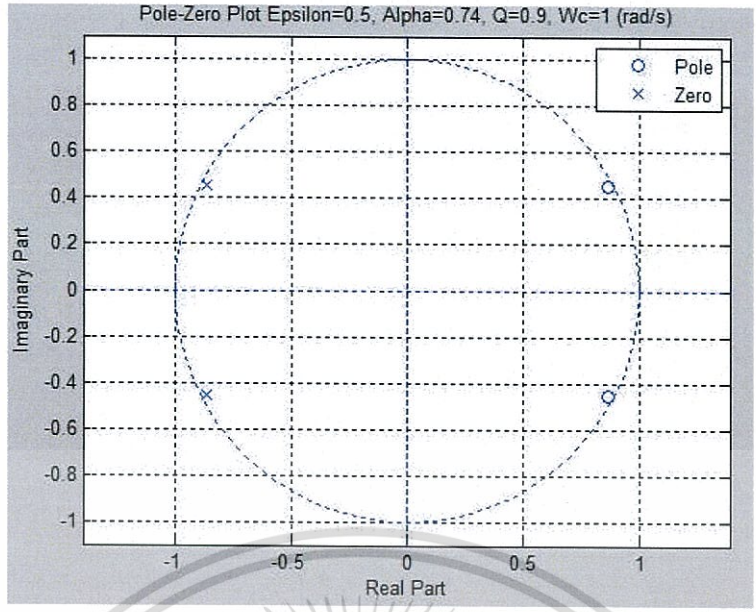
4.2 Pole-Zero



รูปที่ 4.10 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



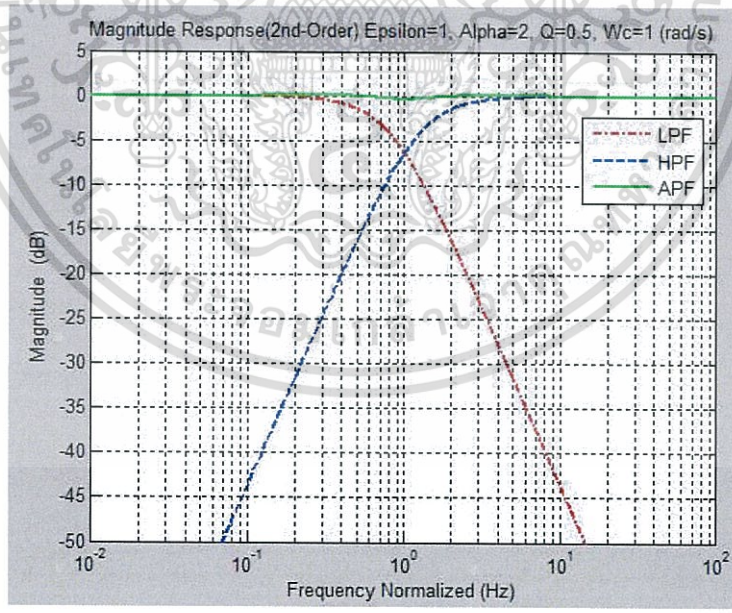
รูปที่ 4.11 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



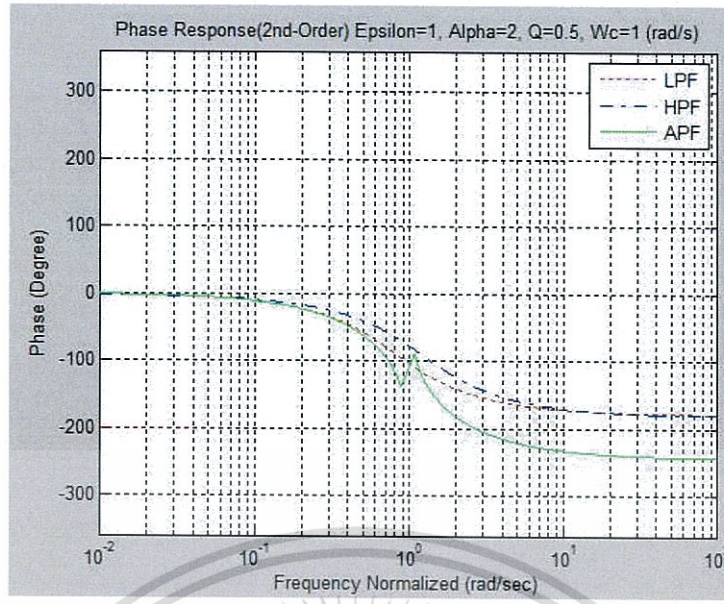
รูปที่ 4.12 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

4.3 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทาง(Two-Band Crossover)

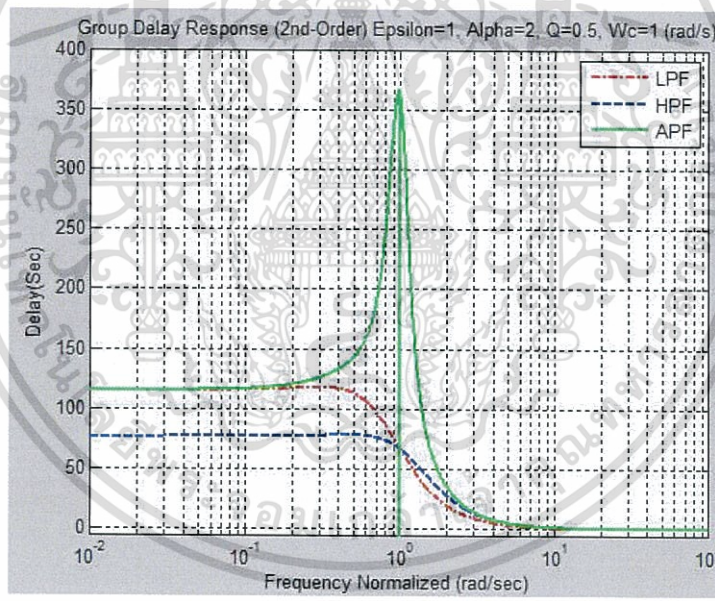
4.3.1 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทาง อันดับที่ 2



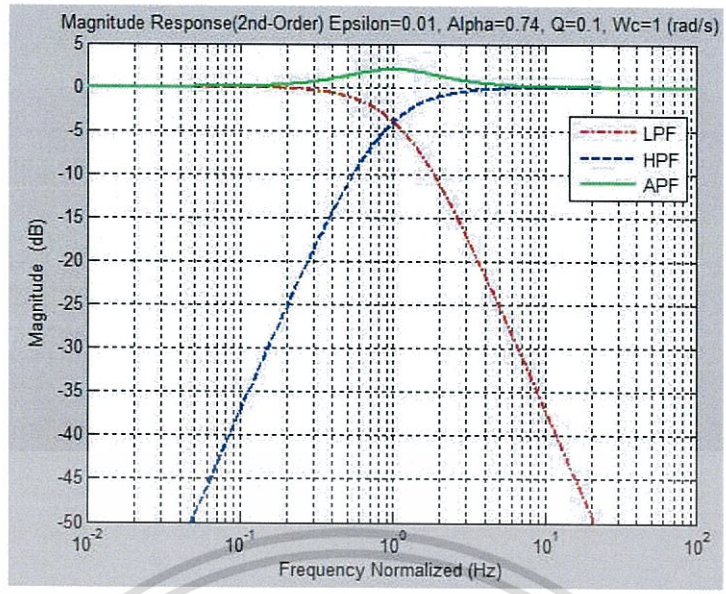
รูปที่ 4.13 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



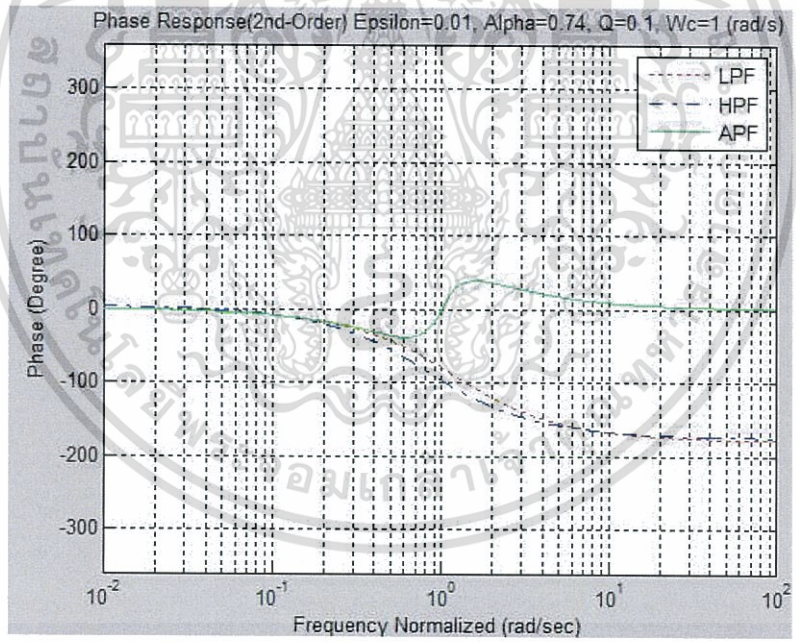
รูปที่ 4.14 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



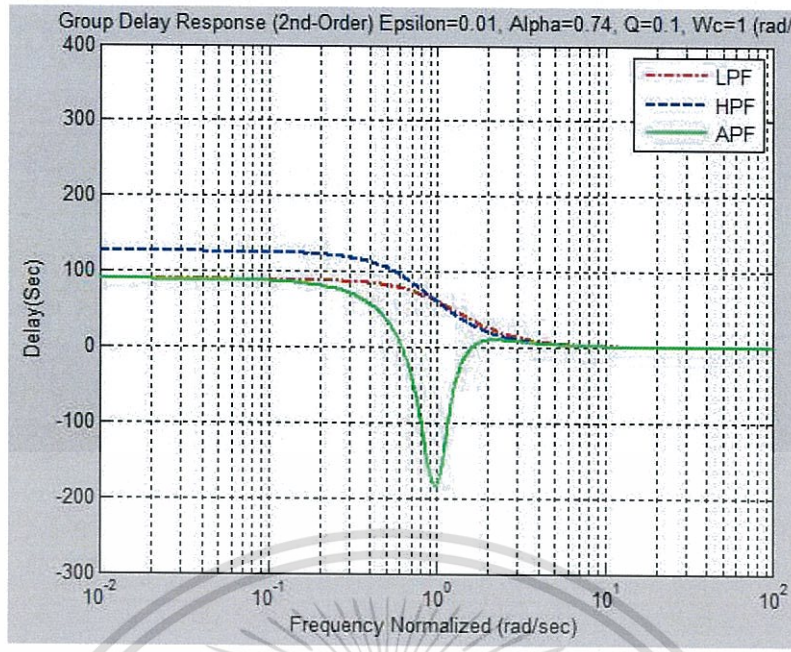
รูปที่ 4.15 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



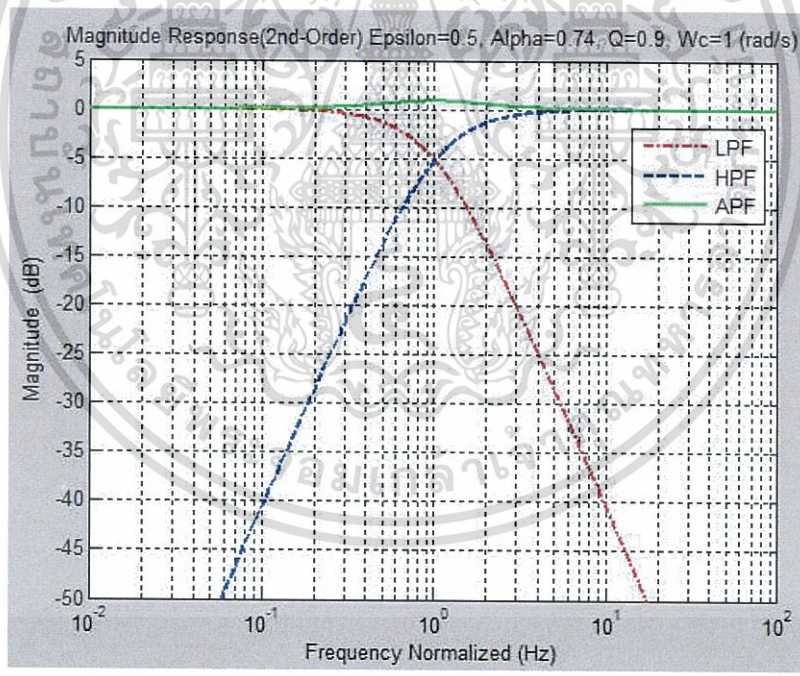
รูปที่ 4.16 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



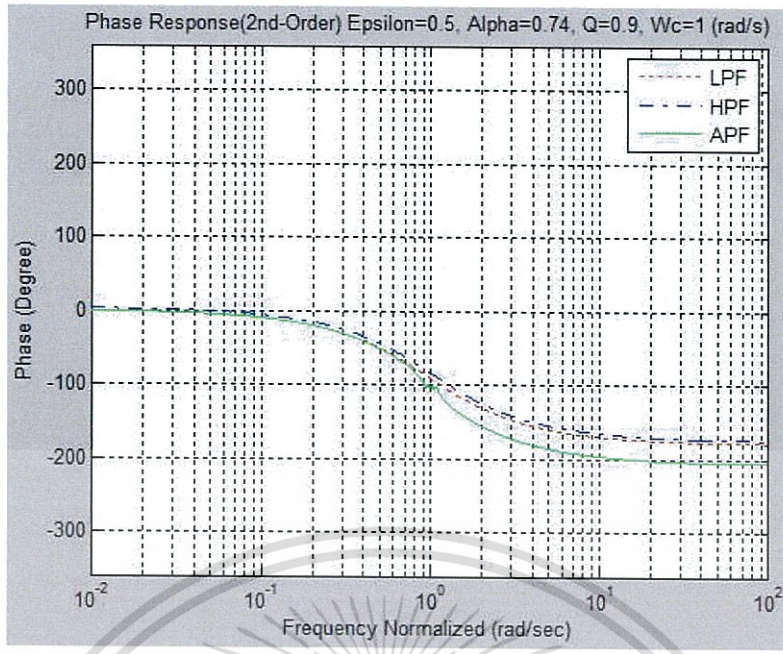
รูปที่ 4.17 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



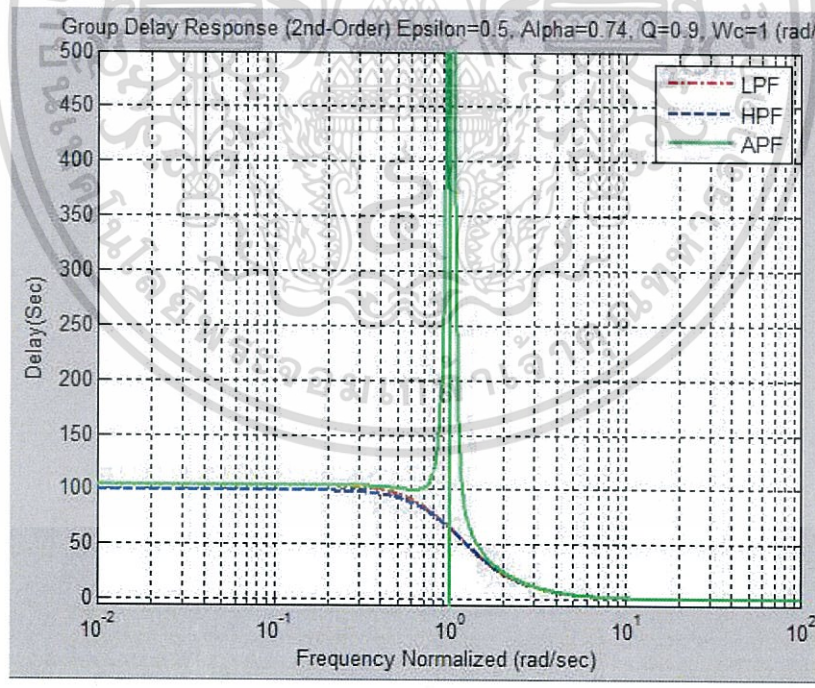
รูปที่ 4.18 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



รูปที่ 4.19 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

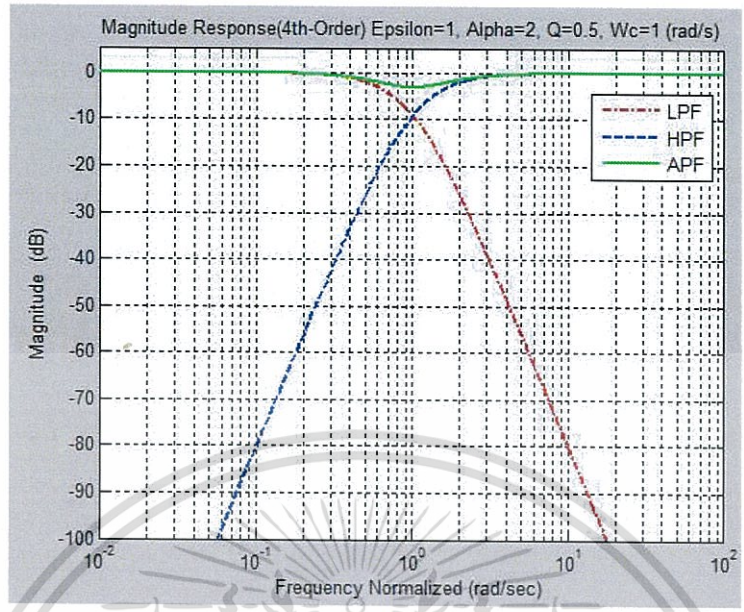


รูปที่ 4.20 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

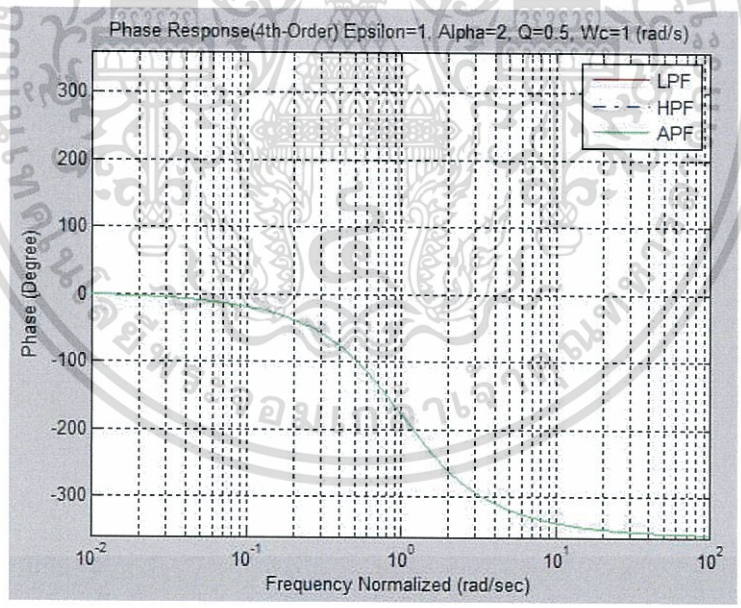


รูปที่ 4.21 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

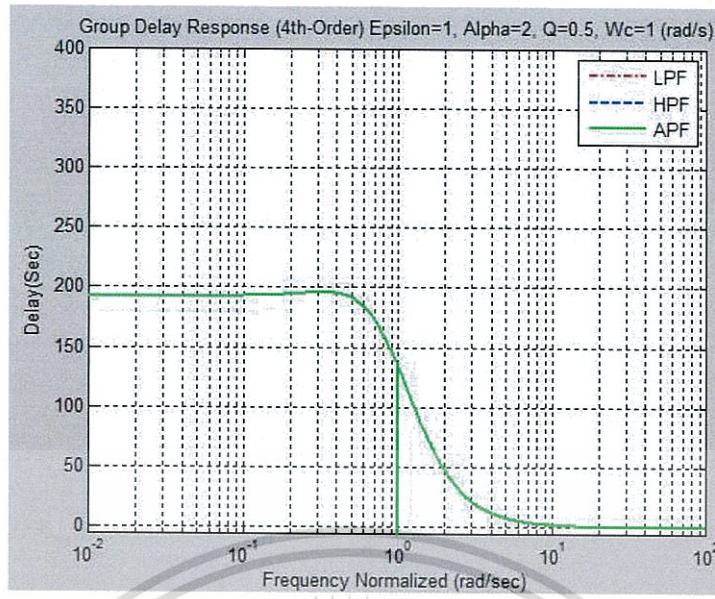
4.3.2 ครอสโอเวอร์แบบ 2 ทางอันดับที่ 4



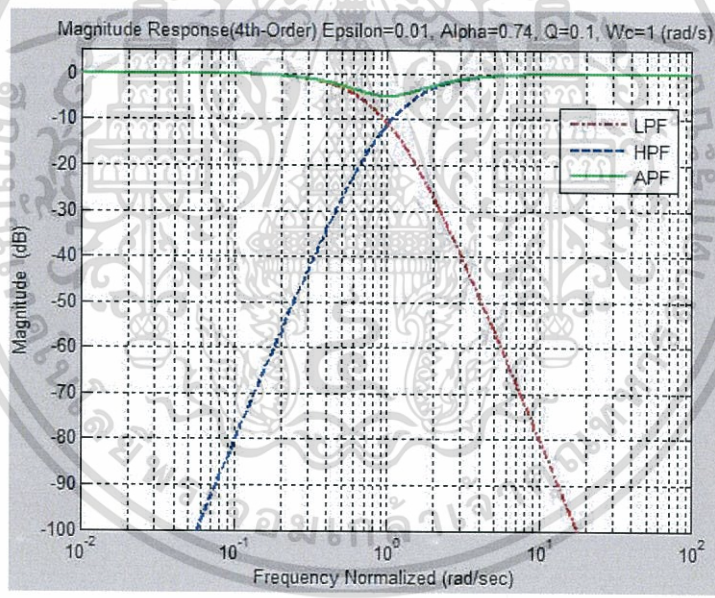
รูปที่ 4.22 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



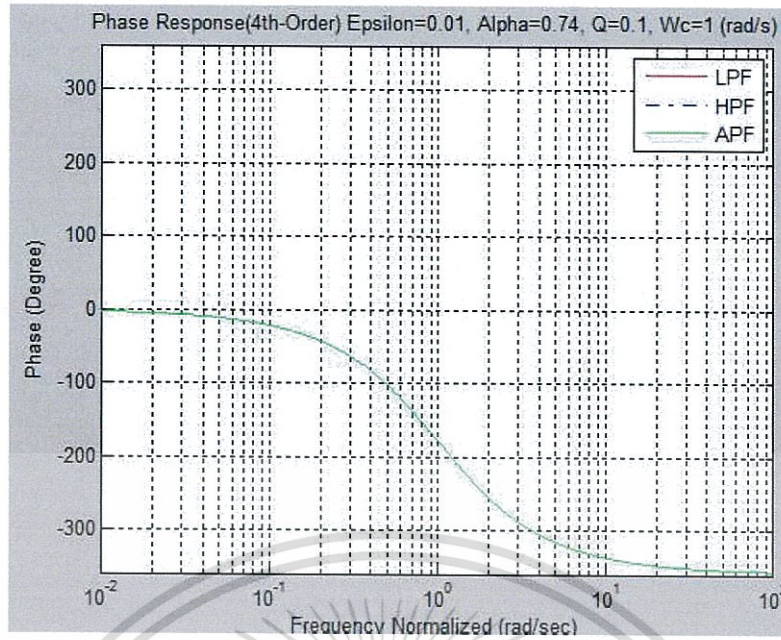
รูปที่ 4.23 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



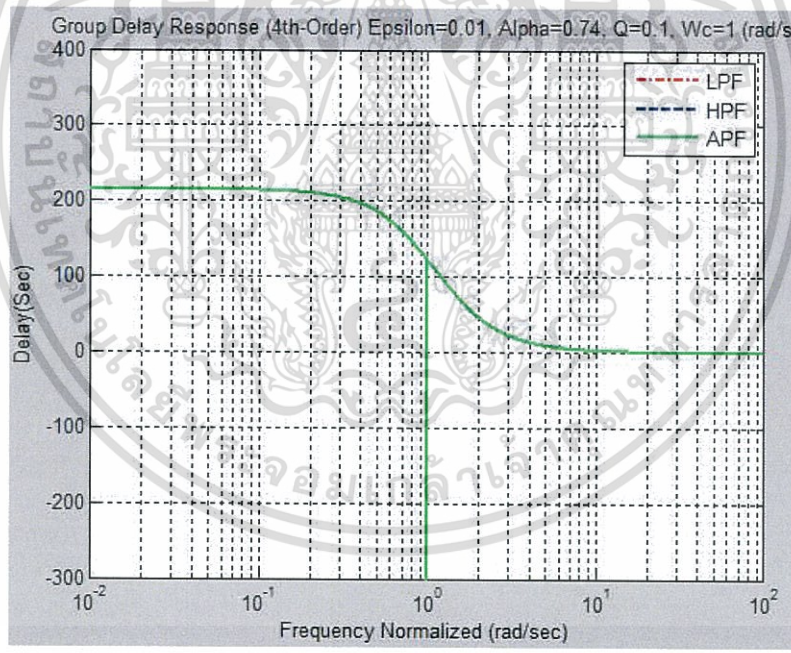
รูปที่ 4.24 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



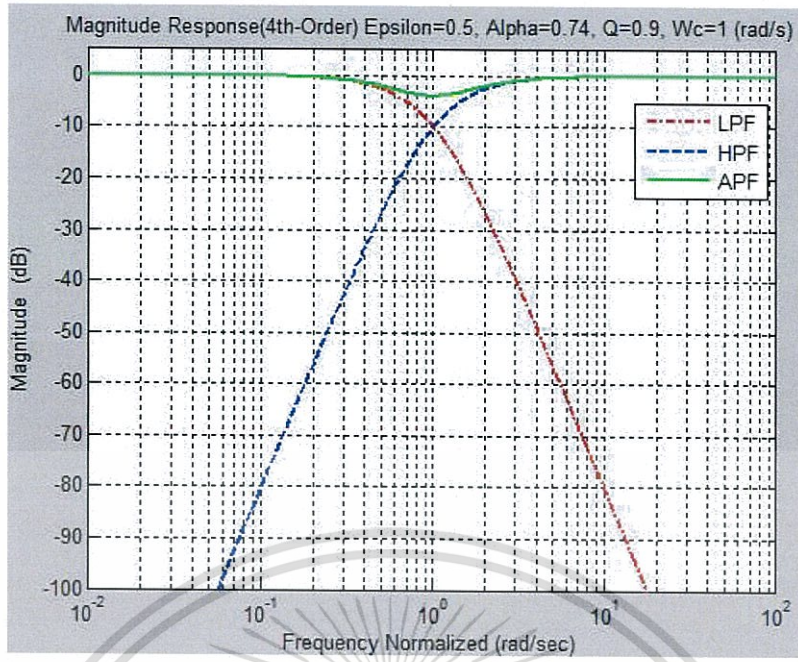
รูปที่ 4.25 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



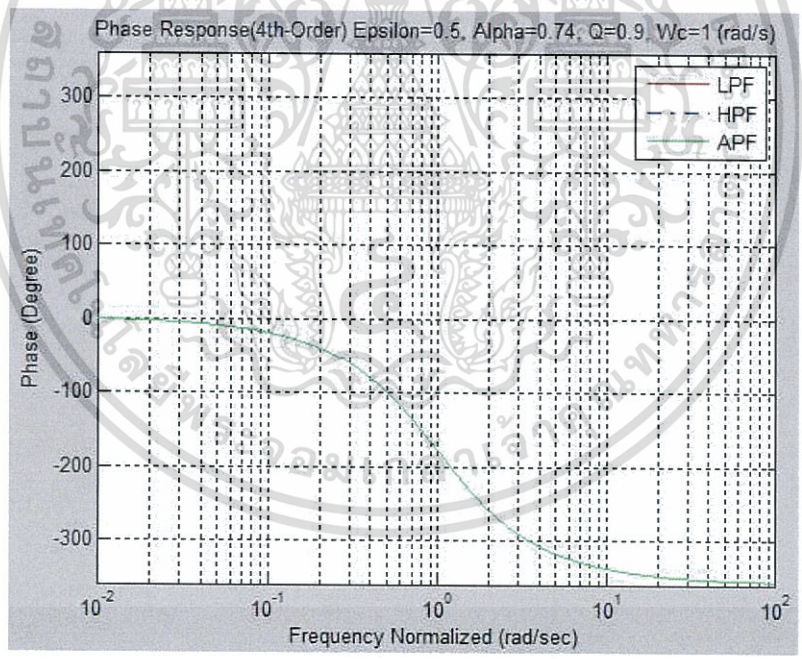
รูปที่ 4.26 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



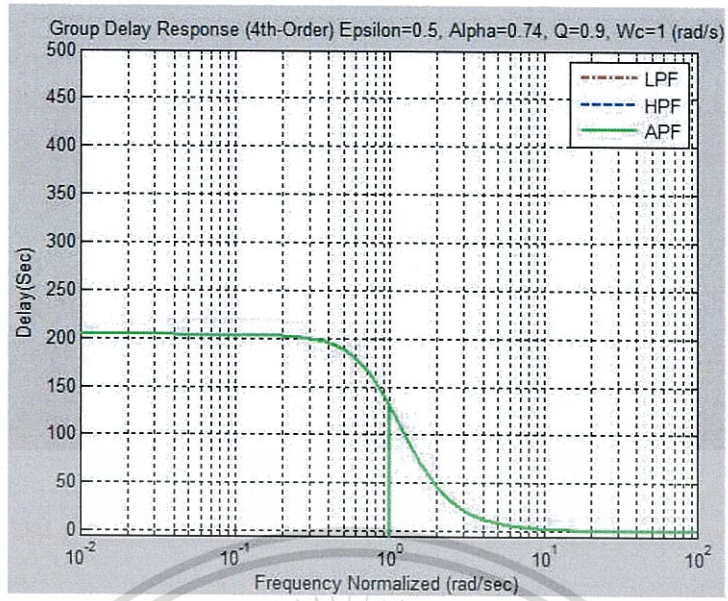
รูปที่ 4.27 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



รูปที่ 4.28 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9



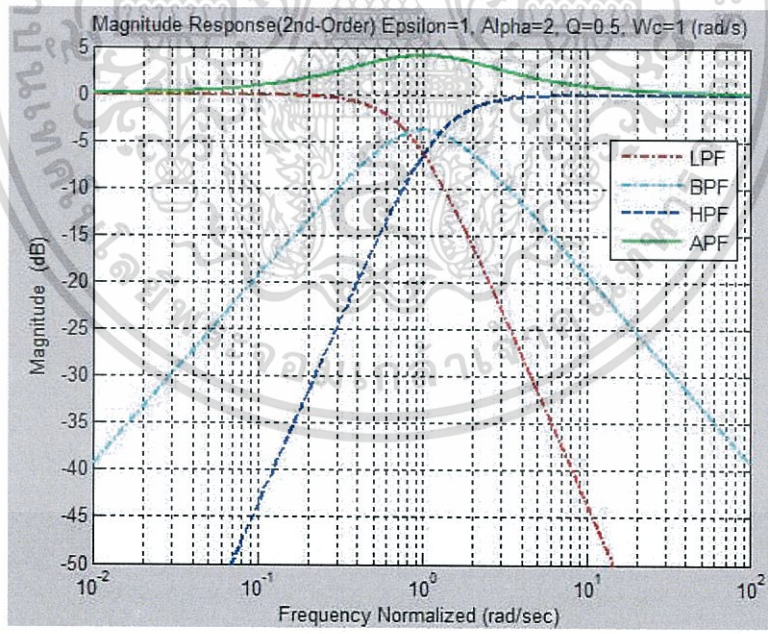
รูปที่ 4.29 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9



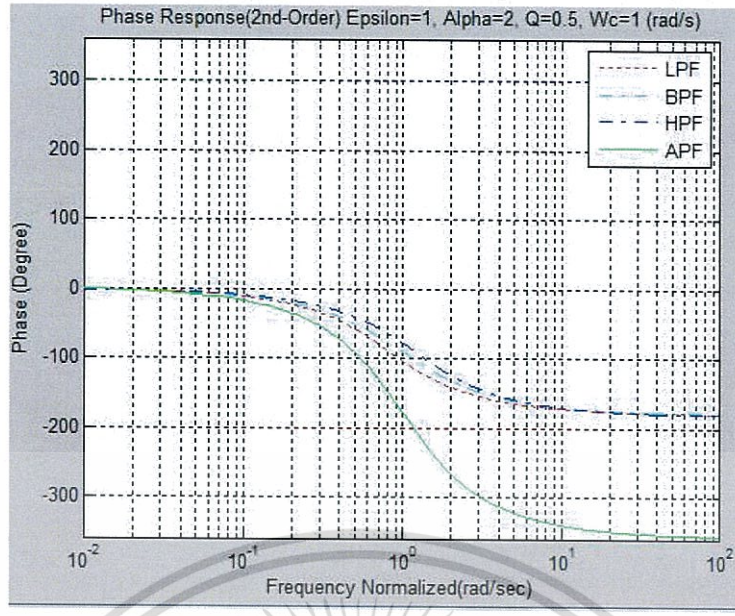
รูปที่ 4.30 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

4.4 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทาง (Three-Band Crossover)

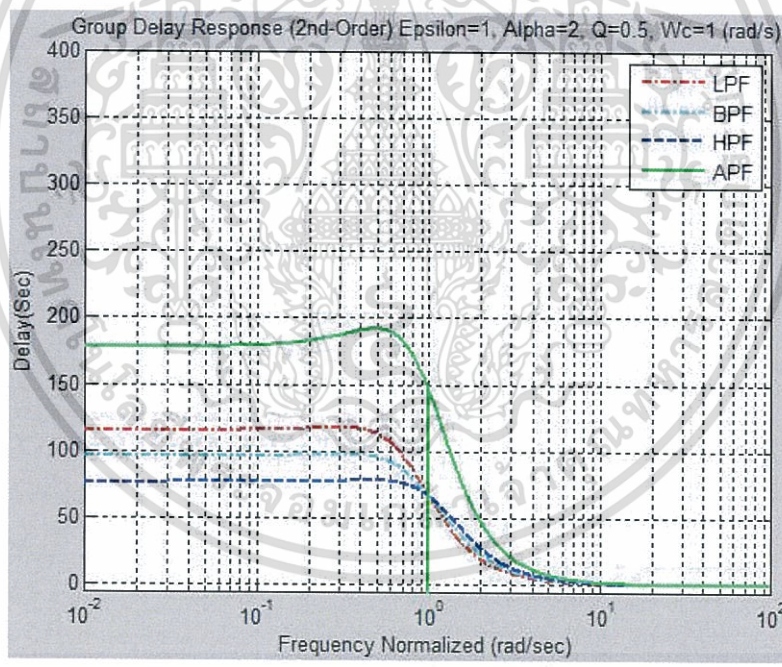
4.4.1 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทางอันดับที่ 2



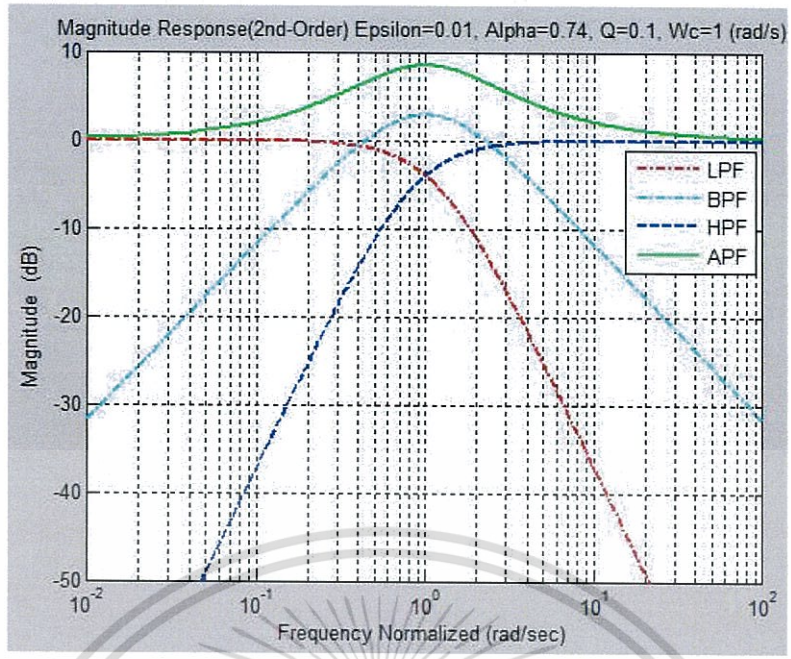
รูปที่ 4.31 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



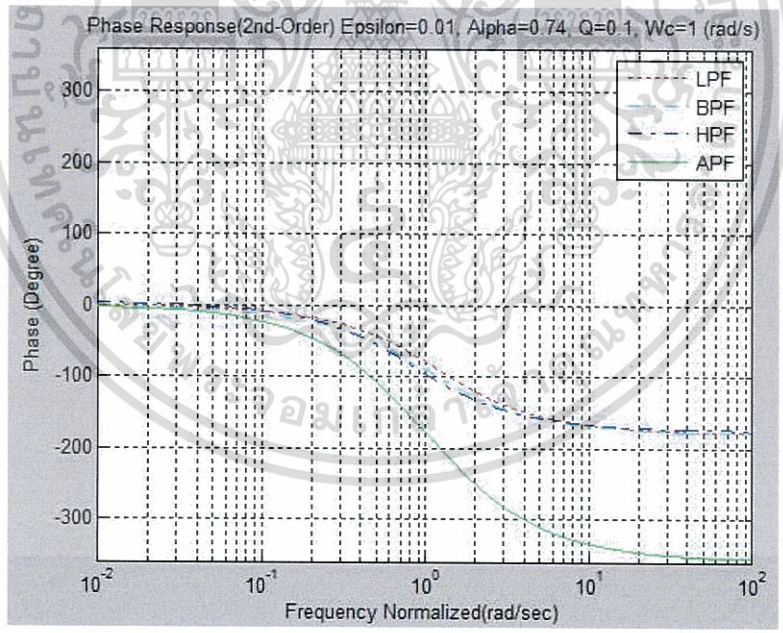
รูปที่ 4.32 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



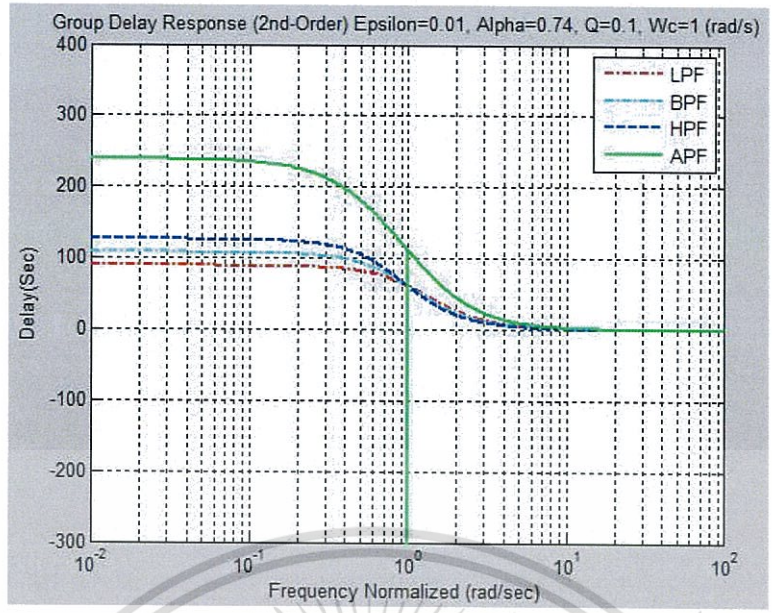
รูปที่ 4.33 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



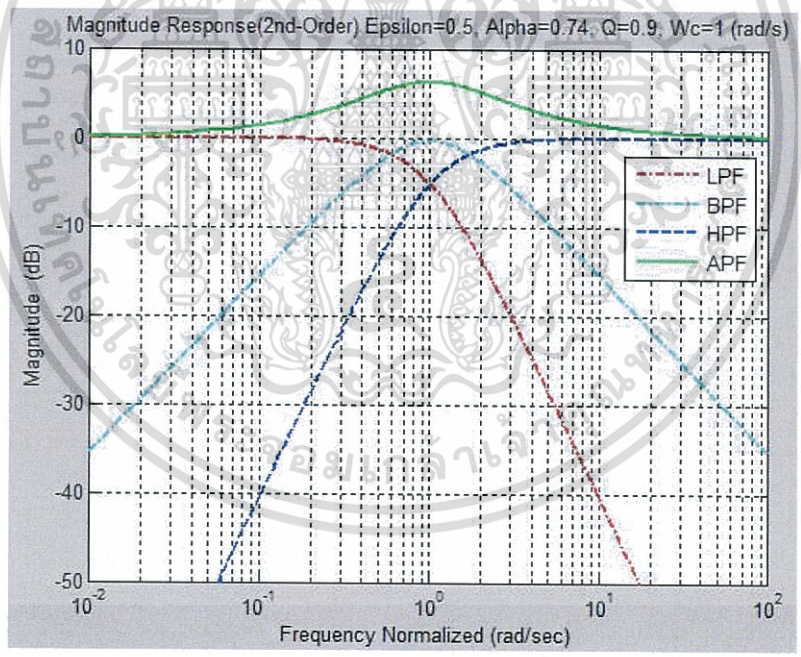
รูปที่ 4.34 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



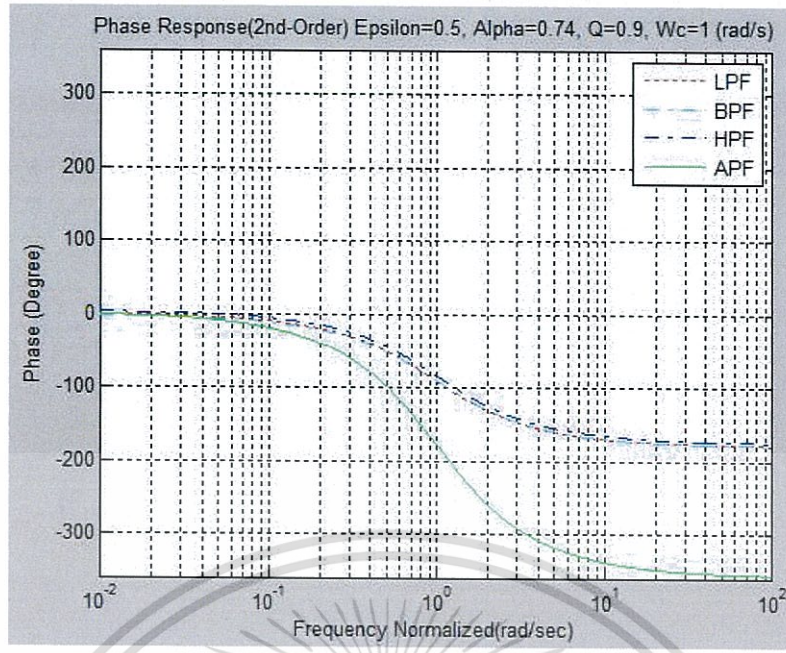
รูปที่ 4.35 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



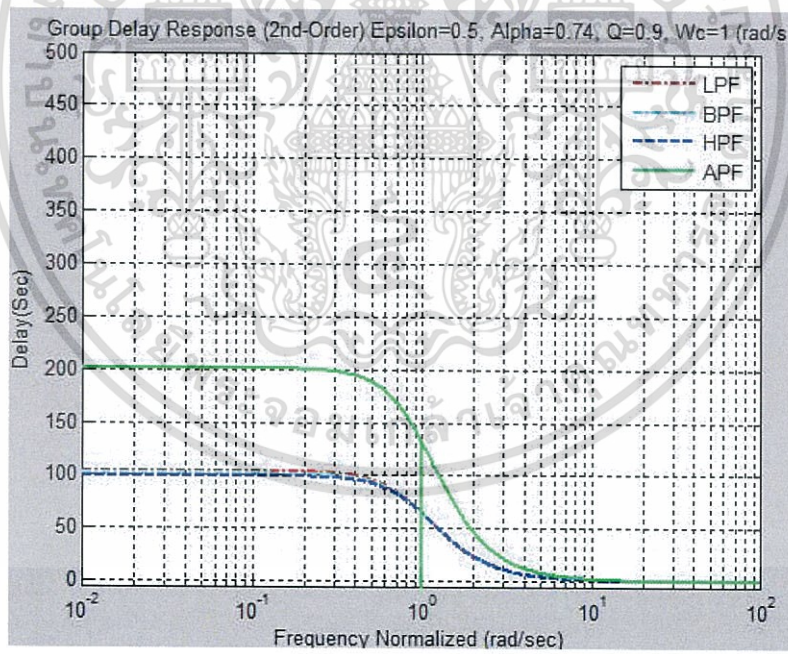
รูปที่ 4.36 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



รูปที่ 4.37 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

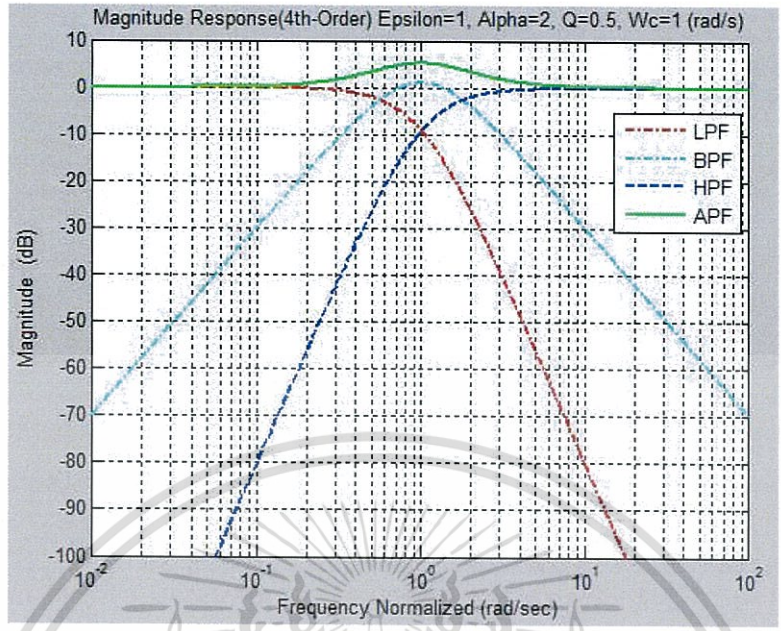


รูปที่ 4.38 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

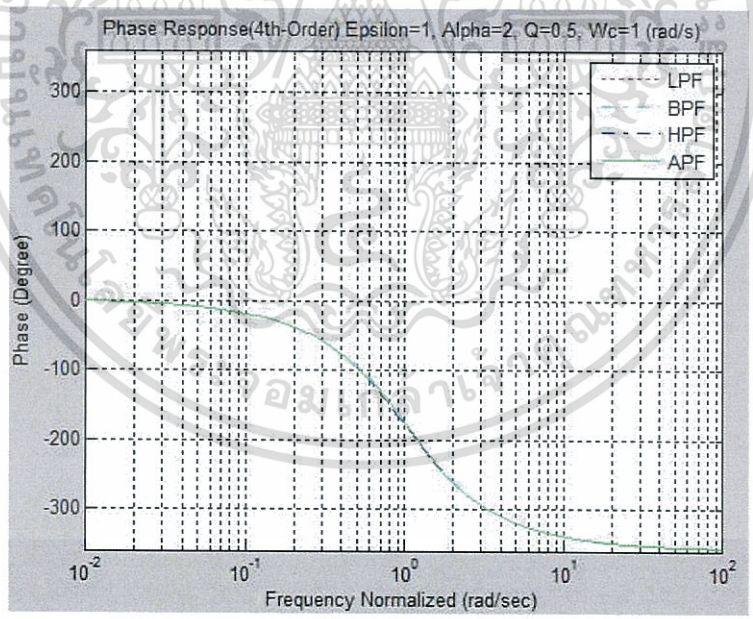


รูปที่ 4.39 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

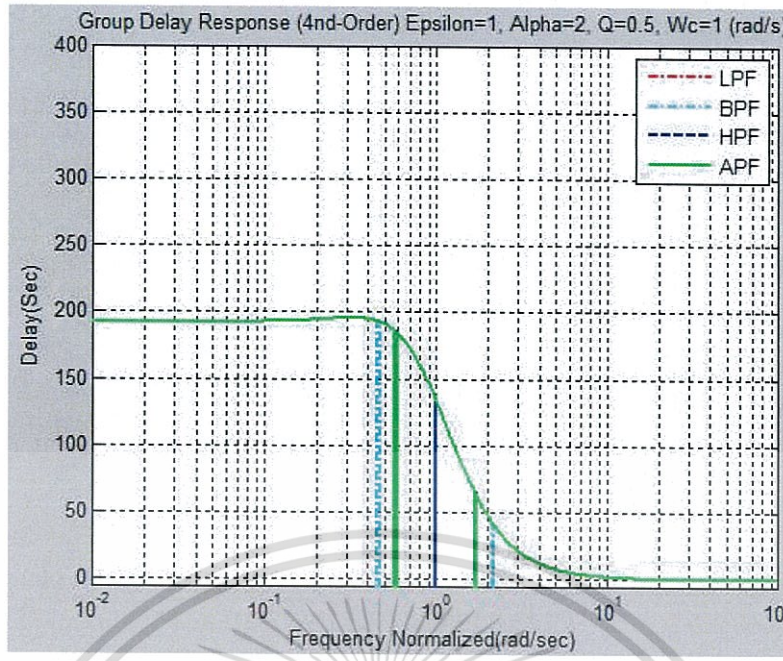
4.4.2 ครอสโอเวอร์แบบ 3 ทางอันดับที่ 4



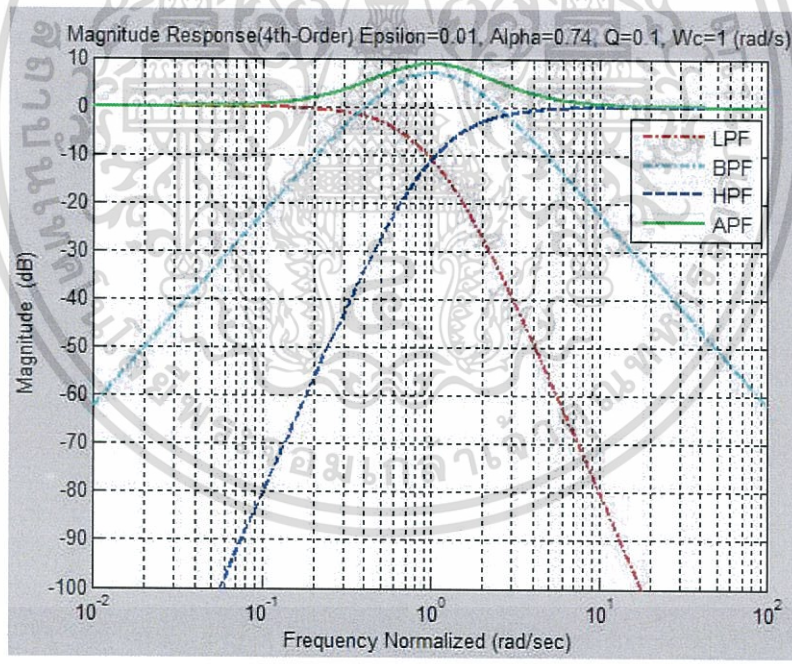
รูปที่ 4.40 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



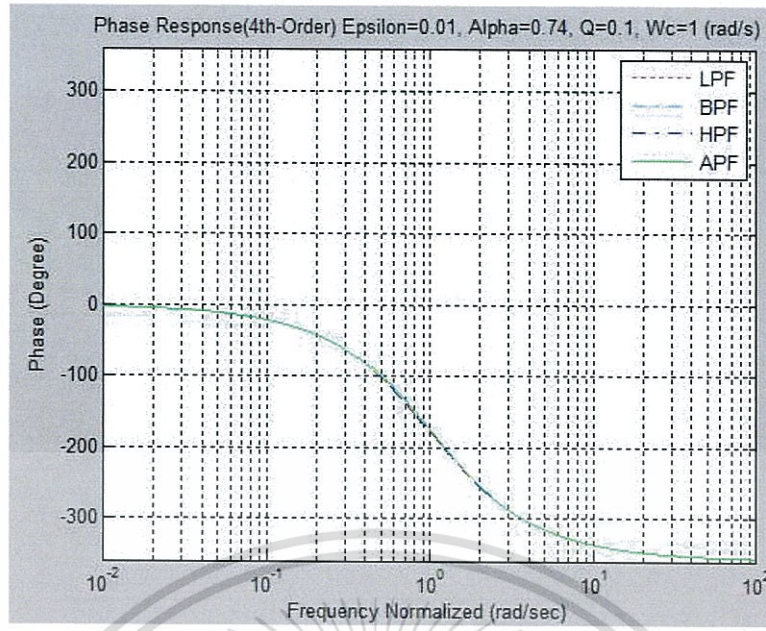
รูปที่ 4.41 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



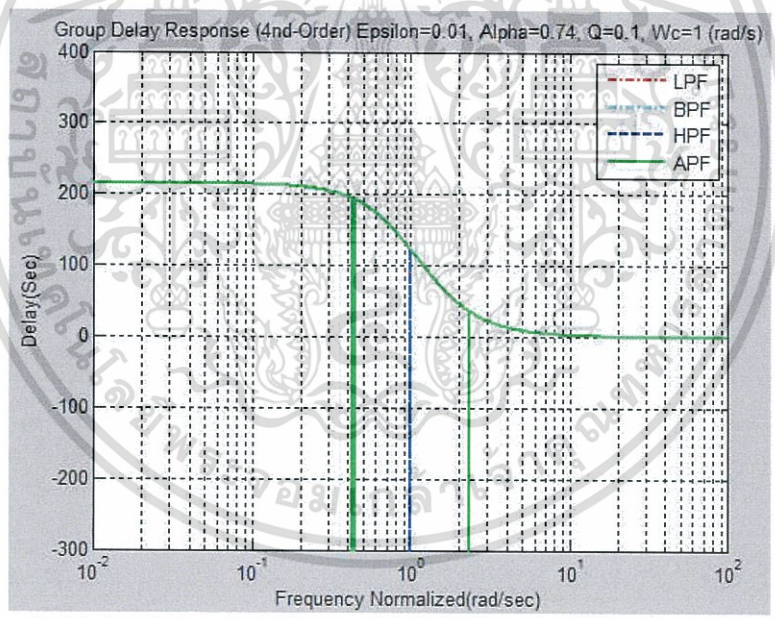
รูปที่ 4.42 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=1 , α=2 และ Q=0.5



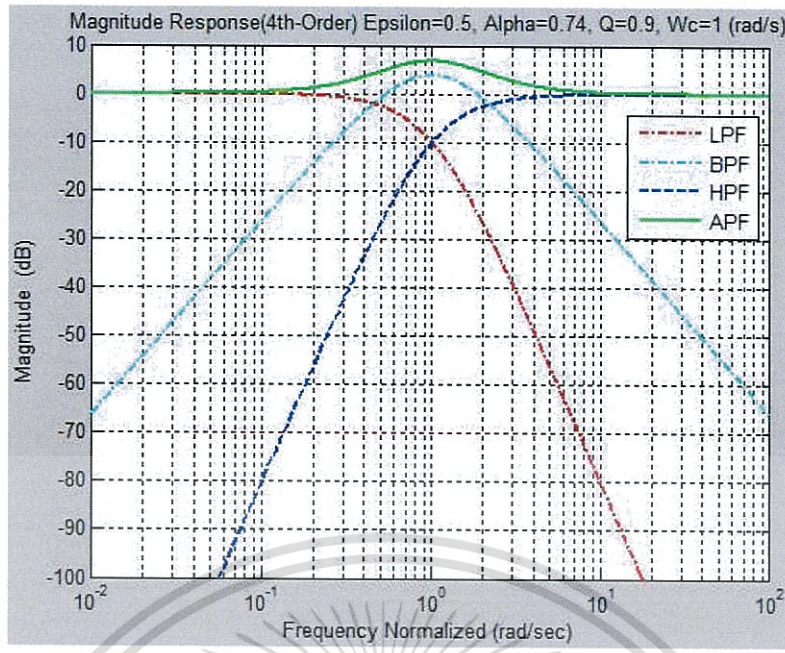
รูปที่ 4.43 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



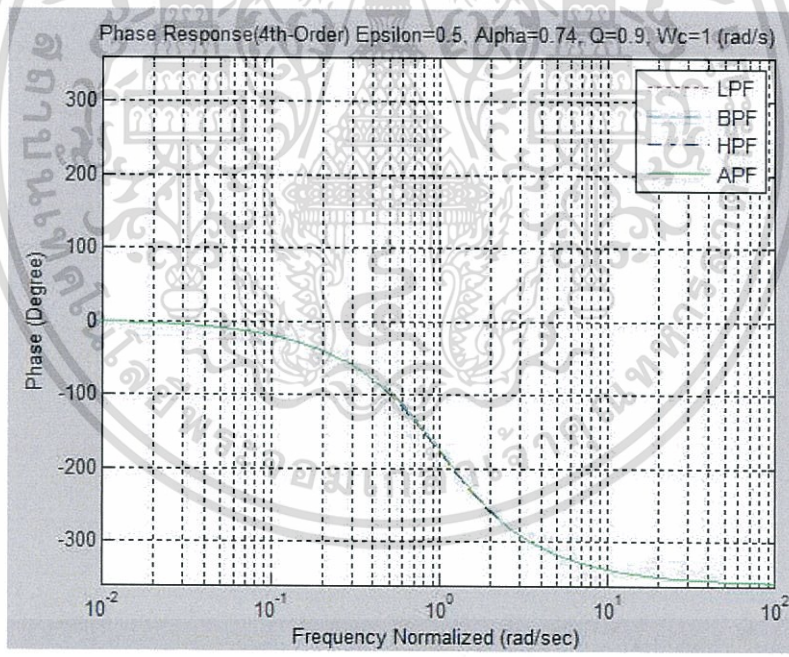
รูปที่ 4.44 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



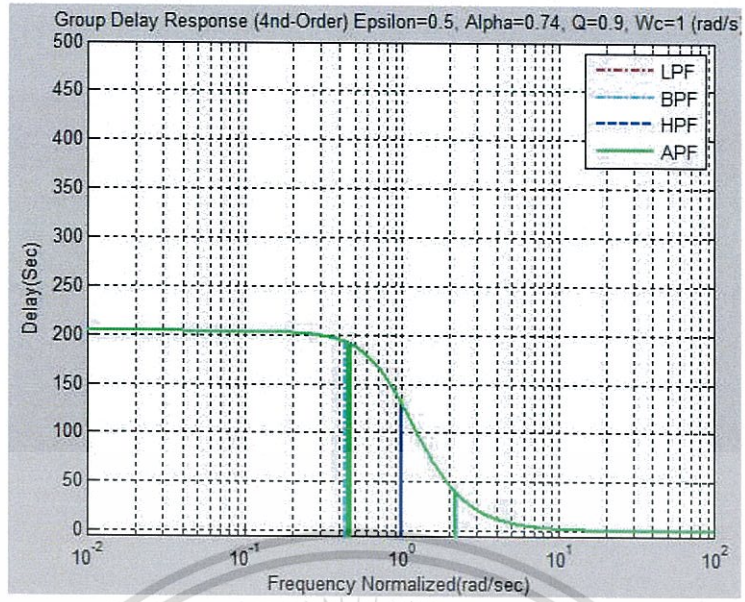
รูปที่ 4.45 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 และ Q=0.1



รูปที่ 4.46 Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9



รูปที่ 4.47 Phase Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9



รูปที่ 4.48 Group Delay Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

ตารางที่ 4.1 Pole-Zero ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q

ค่าพารามิเตอร์	ค่ารากของ Pole-Zero
ε=1, α=2, Q=0.5	0.6693 ± 0.4651i
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	-1.0986 ± 0.4551i
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	-0.8663 ± 0.4517i

ตารางที่ 4.2 LPF ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์อันดับที่ 4 โดยแทนค่า ε, α และ Q

ค่าพารามิเตอร์	ฟังก์ชันถ่ายโอน LPF ของ Q-เบิร์นสไตน์ อันดับที่ 4
ε=1, α=2, Q=0.5	$\frac{1}{1.6666667S^4 - 1.05S^2 + 1}$
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	$\frac{1}{0.50092s^4 - 1.000046s^2 + 1}$
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	$\frac{1}{1.0977215s^4 - 1.199513s^2 + 1}$

ตารางที่ 4.3 HPF ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์อันดับที่ 4 โดยแทนค่า ε, α และ Q

ค่าพารามิเตอร์	ฟังก์ชันถ่ายโอน LPF ของ Q-เบิร์นสไตน์ อันดับที่ 4
ε=1, α=2, Q=0.5	$\frac{s^4}{s^4 - 1.05s + 1.6666667}$
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	$\frac{s^4}{s^4 - 1.000046s + 0.50092}$
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	$\frac{s^4}{s^4 - 1.199513s + 1.0977215}$

ตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันถ่ายโอน LPF อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q

ค่าพารามิเตอร์	ฟังก์ชันถ่ายโอน LPF ของ Q-เบิร์นสไตน์ อันดับที่ 2
ε=1, α=2, Q=0.5	$\frac{1}{1.290989s^2 + 1.905771s + 1}$
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	$\frac{1}{0.707172s^2 + 1.553831s + 1}$
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	$\frac{1}{1.047722s^2 + 1.815201s + 1}$

ตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันถ่ายโอน HPF อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์โดยแทนค่า ε, α และ Q

ค่าพารามิเตอร์	ฟังก์ชันถ่ายโอน HPF ของ Q-เบิร์นสไตน์ อันดับที่ 2
ε=1, α=2, Q=0.5	$\frac{s^2}{s^2 + 1.905771s + 1.290989}$
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	$\frac{s^2}{s^2 + 1.553831s + 0.707172}$
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	$\frac{s^2}{s^2 + 1.815201s + 1.047722}$

ตารางที่ 4.6 ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับที่ 2 ของ Q-เบิร์นสไตน์

ค่าพารามิเตอร์	ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response (dB/Octave)	
	LPF อันดับที่ 2	HPF อันดับที่ 2
ε=1, α=2, Q=0.5	-11.27	11.25
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	-9.663	11.38
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	-10.55	11.66

ตารางที่ 4.7 ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4 ของ Q-เบิร์นสไตน์

ค่าพารามิเตอร์	ค่าความชันของกราฟ Magnitude Response (dB/Octave)	
	LPF อันดับที่ 4	HPF อันดับที่ 4
ε=1, α=2, Q=0.5	-21.35	23.5
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	-20.45	23.08
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	-20.95	23.3

ตารางที่ 4.8 ขนาดและจุดตัดความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์

ค่าพารามิเตอร์	Gain ที่จุดตัด Cut-Off (dB)	
	ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2	ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 4
ε=1, α=2, Q=0.5	-6.351	-9.149
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	-3.98	-10.97
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	-5.181	-9.958

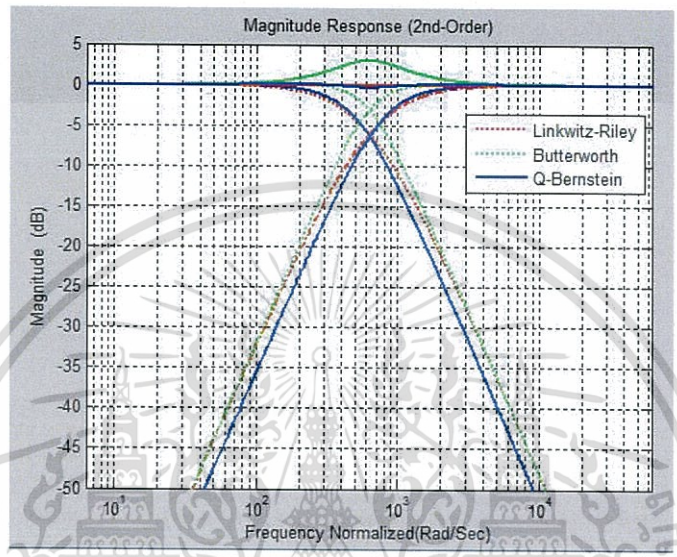
ตารางที่ 4.9 ค่า R, C สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์

ค่าพารามิเตอร์	ค่า C (F)	ค่า R (Ω)	ค่า C (F)	ค่า R (Ω)
ε=1, α=2, Q=0.5	2.2×10^{-7}	485.955	4.7×10^{-7}	227.468
ε=0.01, α=0.74, Q=0.1	2.2×10^{-7}	374.697	4.7×10^{-7}	175.39
ε=0.5, α=0.74, Q=0.9	2.2×10^{-7}	437.725	4.7×10^{-7}	204.892

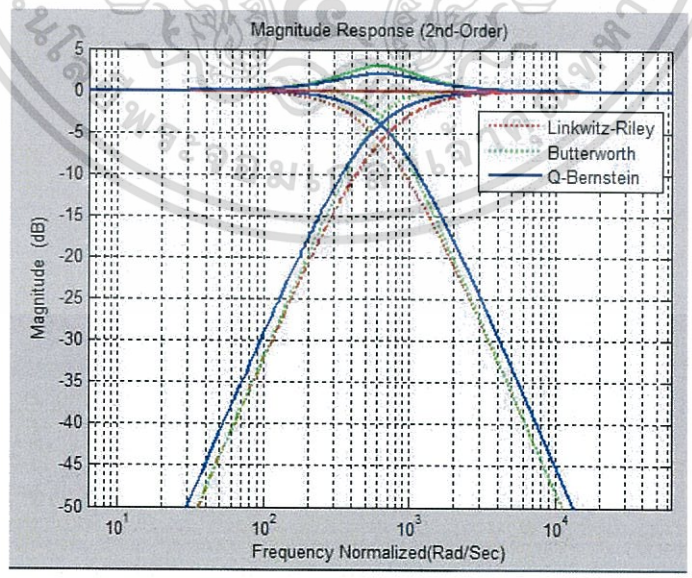
จะเห็นว่ากราฟ Magnitude Response ของลำดับที่ 4 จะมีความชันของกราฟเป็น 2 เท่าของกราฟMagnitude Response ของอันดับที่ 2 และผลรวมสัญญาณของวงจรกรองความถี่อันดับที่

2 แบบรวม 2 ทาง ที่ได้ใกล้เคียงกับเส้นตรงมากที่สุดคือที่ค่า ε=1, α=2, Q=0.5 แต่ผลรวมสัญญาณของวงจรกรองความถี่อันดับที่ 4 แบบรวม 2 ทาง จะมี Notch เกิดขึ้นประมาณ -3.128 dB ส่วนวิธีการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนกับการหาค่า R กับ C สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค

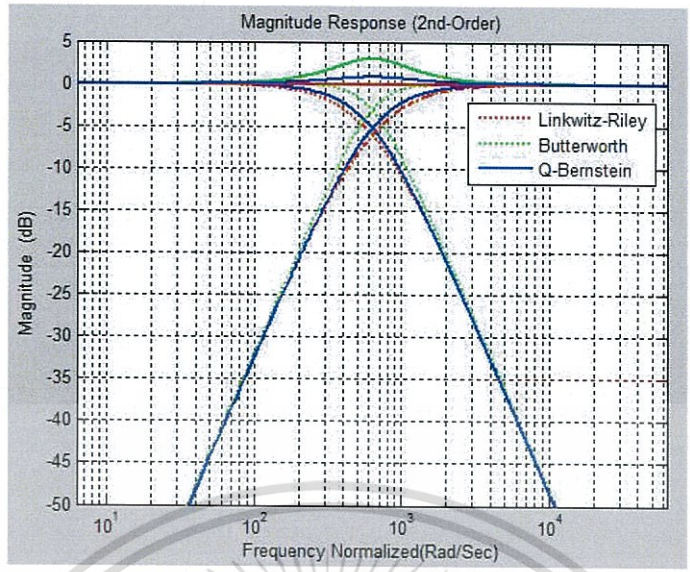
4.5 การเปรียบเทียบฟังก์ชันถ่ายโอน Q-เบิร์นสไตน์กับ Butterworth และ Linkwitz-Riley



รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=1 , α=2 , Q=0.5 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley



รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=0.01 , α=0.74 , Q=0.1 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley



รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบ Magnitude Response ของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ระหว่างของ Q-เบิร์นสไตน์ ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 , Q=0.9 กับของ Butterworth และ Linkwitz-Riley

จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์อันดับที่ 2 มีค่าพารามิเตอร์บางค่าที่ให้ผลรวมสัญญาณใกล้เคียงเส้นตรงคล้าย Linkwitz-Riley แต่ Linkwitz-Riley มีข้อจำกัดตรงค่าพารามิเตอร์เป็นค่าคงตัว ขณะที่ Q-เบิร์นสไตน์ สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ได้

บทที่ 5

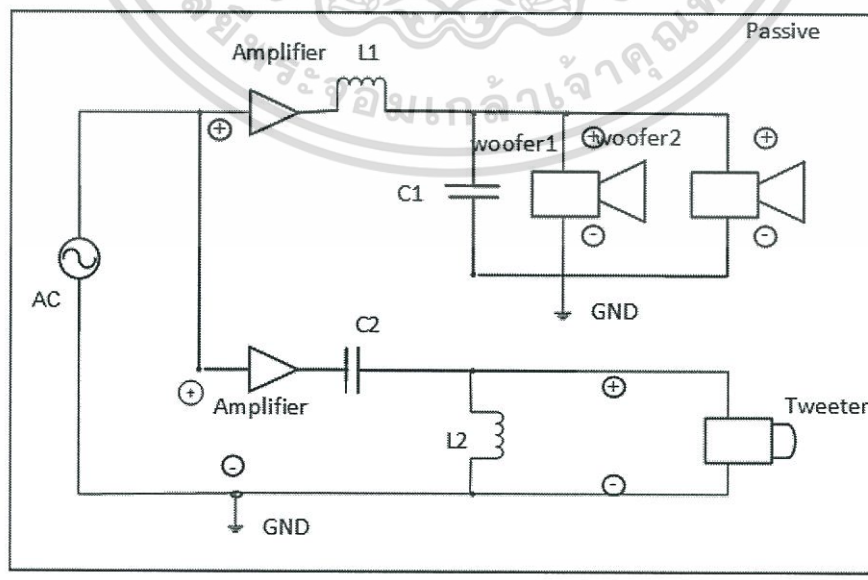
ลักษณะการแพร่กระจายของเสียง

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะการแพร่กระจายของเสียง โดยจะนำครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Crossover Network) ไปใช้ในการทำลำโพงแบบแอคทีฟ (Active) 2 ทาง 3 ไดร์ฟเวอร์ (Driver) การแพร่กระจายของเสียงเอามาจากการแทนค่าในฟังก์ชันถ่ายโอนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของลำเสียง โดยพิจารณาจากสัญญาณของตัวกรองความถี่ต่ำกับสัญญาณของตัวกรองความถี่สูงที่รวมกัน

5.1 การต่อระบบลำโพงร่วมกับพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (PassiveCrossover Network)

ในการทดลองได้นำพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คมาต่อเข้ากับระบบลำโพงสมมาตรซึ่งประกอบไปด้วยลำโพงที่ใช้สำหรับขับเสียงที่มีความถี่ต่ำหรือที่เรียกว่า วูฟเฟอร์จำนวนสองตัวและลำโพงที่ใช้สำหรับขับเสียงที่มีความถี่สูงหรือที่เรียกว่า ทวีตเตอร์จำนวนหนึ่งตัว จัดวางในระยะที่การเดินทางของเสียงมีความสมมาตรกัน นั่นจะทำให้คุณภาพของเสียงที่เดินทางออกมาจากลำโพงมาถึงผู้ฟังหรือจุดนั่งฟังได้ดีที่สุด

ในส่วนของวงจรพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค นั้นประกอบไปด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductor : L) และ ตัวเก็บประจุ ซึ่งการนำวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบพาสซีฟ มาต่อร่วมกับลำโพงซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.1

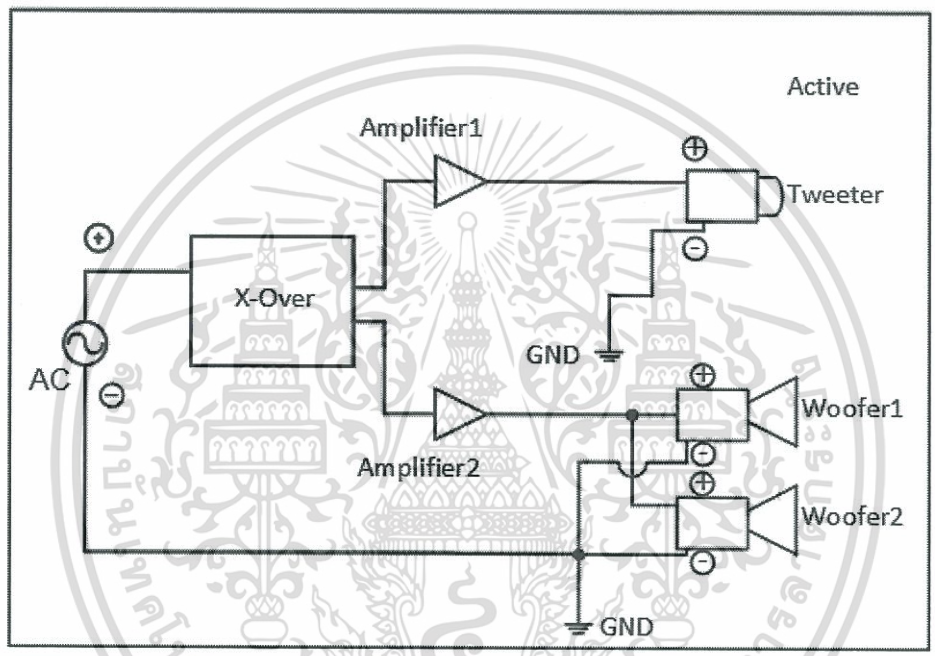


รูปที่ 5.1 การต่อระบบลำโพงร่วมกับพาสซีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

5.2 การต่อระบบลำโพงร่วมกับแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Active-Crossover Network)

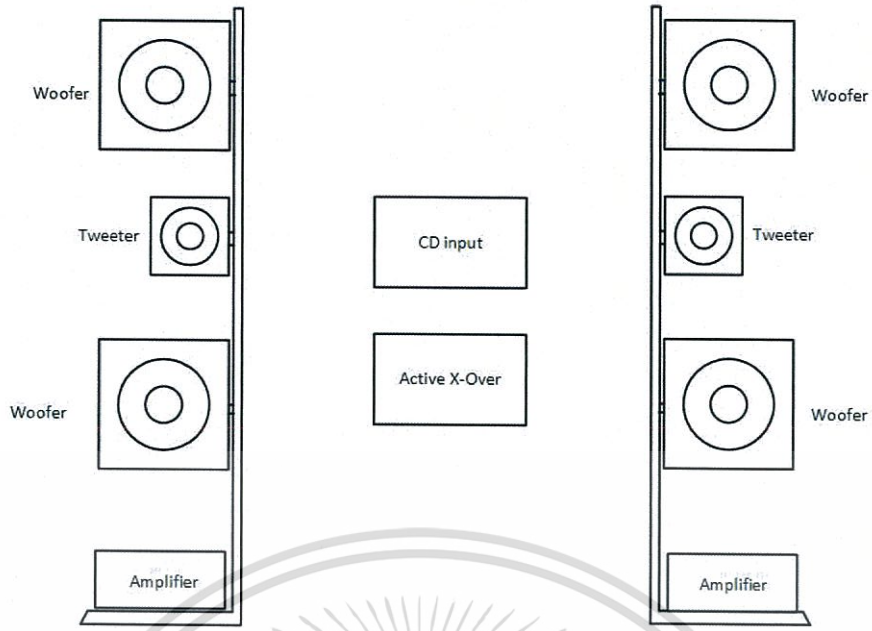
ในการทดลองได้ทำการนำแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค มาต่อเข้ากับระบบลำโพงสมมาตร เช่นเดียวกันกับในข้อ 5.2

แต่เนื่องจากวงจรแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค เป็นวงจรที่มีไฟเลี้ยงภายในวงจรนั่นทำให้การวางตำแหน่งในการเชื่อมต่อกับระบบลำโพงสมมาตรนั้นจะแตกต่างกันระหว่างรูปที่ 5.1 กับรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การต่อระบบลำโพงร่วมกับแอคทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

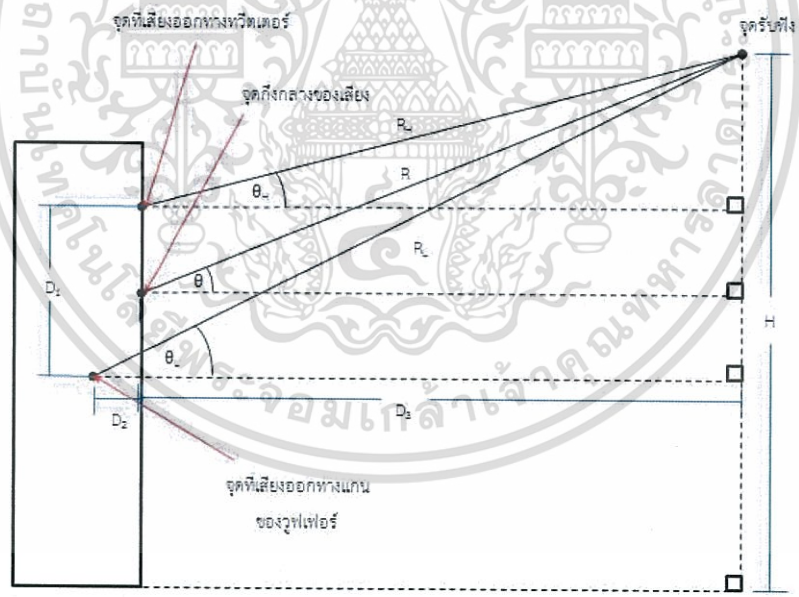
โดยในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการใช้ระบบลำโพงแบบคู่สมมาตร (Pair-wise Symmatry) ชนิด 2 ทาง 3 ไดร์ฟเวอร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวขับเสียงที่มีความถี่ต่ำ หรือที่เรียกว่า วูฟเฟอร์ 2 ตัว และ ตัวขับเสียงที่มีความถี่สูง หรือที่เรียกว่า ทวีตเตอร์ มาวางตามตำแหน่งดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ระบบลำโพงแบบคู่สมมาตร ชนิด 2 ทาง 3 ไดร์ฟเวอร์ ที่ใช้ทดลอง

5.4 การแพร่กระจายเสียงของลำโพง

5.4.1 รูปแบบเชิงเรขาคณิตระหว่างลำโพงกับผู้ฟัง



รูปที่ 5.4 รูปแบบโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของการแพร่กระจายเสียง

โดย D_1 คือ ระยะห่างของดอกลำโพงตัวบนสุดกับตัวล่างสุด

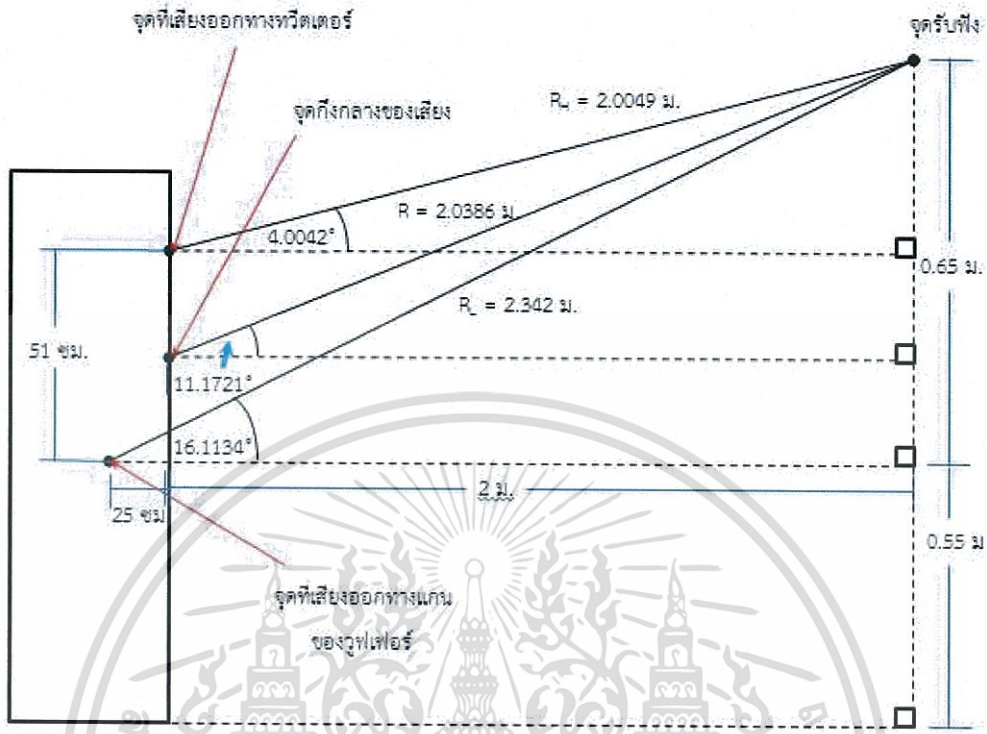
D_2 คือ ระยะการหดตัวของวูฟเฟอร์

D_3 คือ ระยะห่างระหว่างลำโพงกับผู้ฟัง

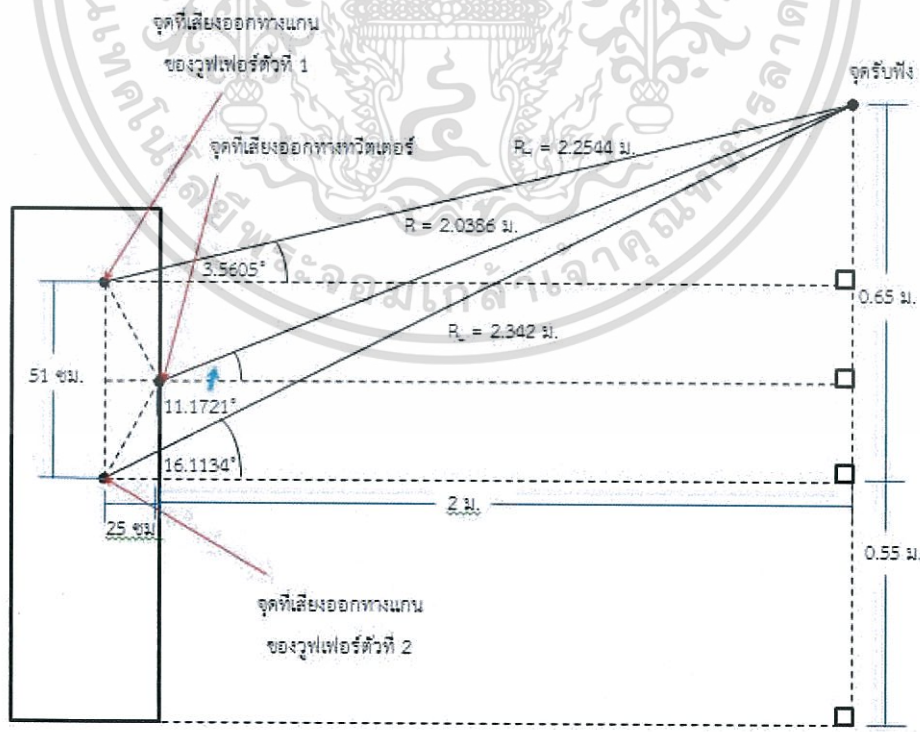
H คือ ความสูงจากพื้นถึงหูของผู้ฟัง

R คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแหล่งกำเนิดเสียงกับหูของผู้ฟัง

ในการกระจายของเสียงจะเปรียบเทียบระหว่างลำโพงแบบ 2 ไดร์ฟเวอร์ คือ วูฟเฟอร์ 1 ตัว และทวีตเตอร์ 1 ตัว กับลำโพงแบบ 3 ไดร์ฟเวอร์



รูปที่ 5.5 การเดินทางของเสียงจากวูฟเฟอร์ 1 ตัวกับทวีตเตอร์ 1 ตัวไปยังผู้ฟัง



รูปที่ 5.6 การเดินทางของเสียงจากวูฟเฟอร์ 2 ตัวกับทวีตเตอร์ 1 ตัวไปยังผู้ฟัง

5.4.2 สูตรที่ใช้ในการหากำลังของการแพร่กระจายเสียงของลำโพง

$$\mathbf{P(\theta)} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{A_i C_i} e^{-\mathbf{st}} \left| \frac{\sin\left(\mathbf{n\pi}\left(\frac{\mathbf{D}}{\boldsymbol{\lambda}}\right)\sin\boldsymbol{\theta}\right)}{\mathbf{n}\sin\left(\boldsymbol{\pi}\left(\frac{\mathbf{D}}{\boldsymbol{\lambda}}\right)\sin\boldsymbol{\theta}\right)} \right| \quad (5.1)$$

โดย $\mathbf{P(\theta)}$ คือ กำลังของการแพร่กระจายของเสียงของลำโพงที่ทิศทางทำมุม θ ระหว่างทิศทางเสียงที่ออกมากับทิศทางไปยังผู้ฟัง

$\mathbf{n}$ คือ จำนวนแหล่งกำเนิดเสียง

$\mathbf{A_i}$ คือ Amplitude สำหรับไดร์ฟเวอร์ของลำโพง

$\mathbf{C_i}$ คือ แรงดันเกนขยายในครอสโอเวอร์ของลำโพง

$\mathbf{T}$ คือ อัตราส่วนเวลาที่เสียงเดินทางต่อเวลาที่จุดตัดความถี่

$\mathbf{D}$ คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดเสียงกับจุดกึ่งกลางของเสียง

$\boldsymbol{\lambda}$ คือ ความยาวคลื่น

5.4.3 ผลการแพร่กระจายของเสียง

ในการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายสัญญาณเสียง จะใช้ที่จุดตัดความถี่ที่ 2.5 kHz โดยผ่านครอสโอเวอร์ ของ Constant Voltage, Butterworth, Linkwitz-Riley, Q-เบิร์นสไตน์ ซึ่งโพลีโนเมียลในฟังก์ชันของ Constant Voltage คือ

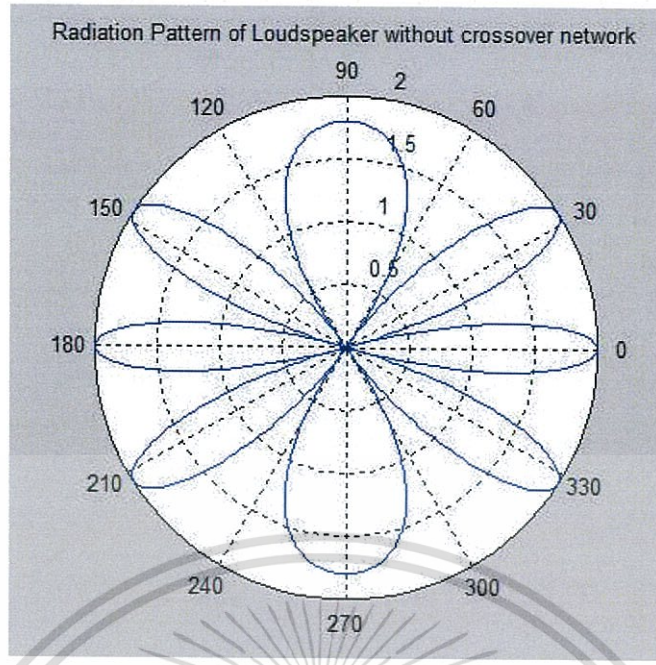
$$\mathbf{H}(s) = s^3 + 3.7s^2 + 3.7s + 1 \quad (5.2)$$

ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำกับวงจรกรองความถี่สูงคือ

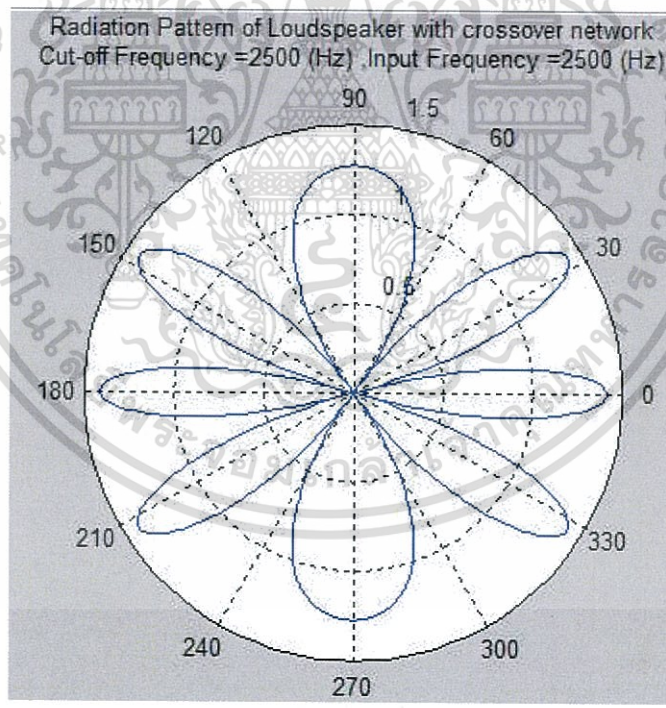
$$\mathbf{H_{LPF}}(s) = 3.7s + 1 \quad (5.3)$$

$$\mathbf{H_{HPF}}(s) = s^3 + 3.7s^2 \quad (5.4)$$

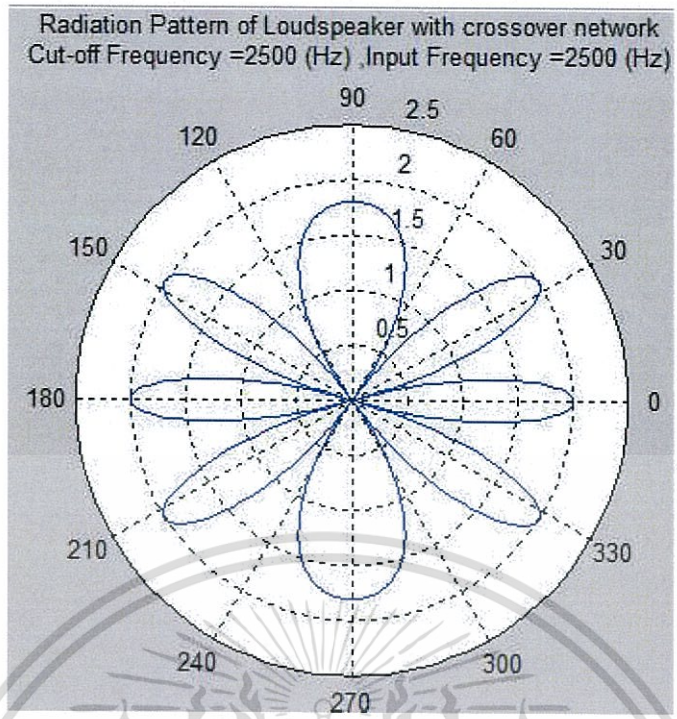
ในการพล็อตรูปผลการแพร่กระจายเสียงจะกำหนดให้ทิศทางของเสียงไปยังจุดรับฟังโดยตรงที่มุม 0 องศา ซึ่งจะพล็อตรูปเชิงแกนแนวตั้ง



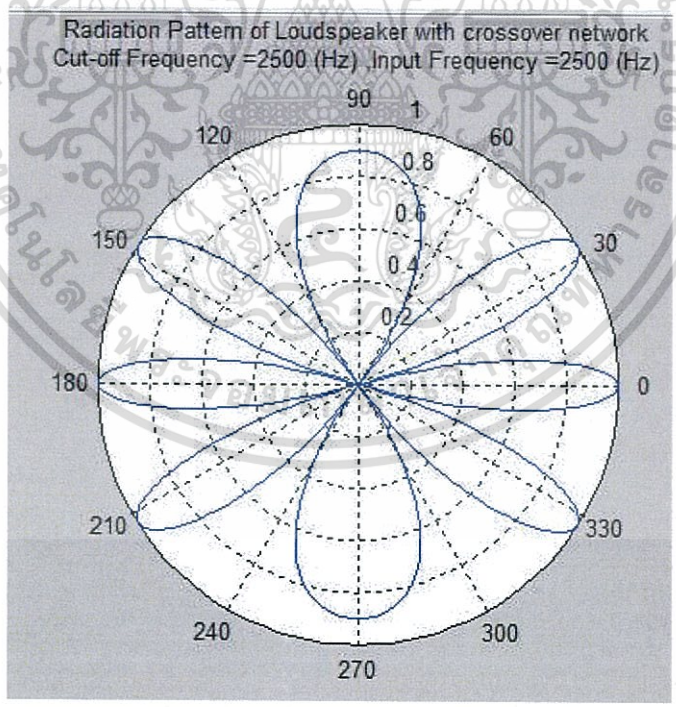
รูปที่ 5.7 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ไม่ผ่านครอสโอเวอร์



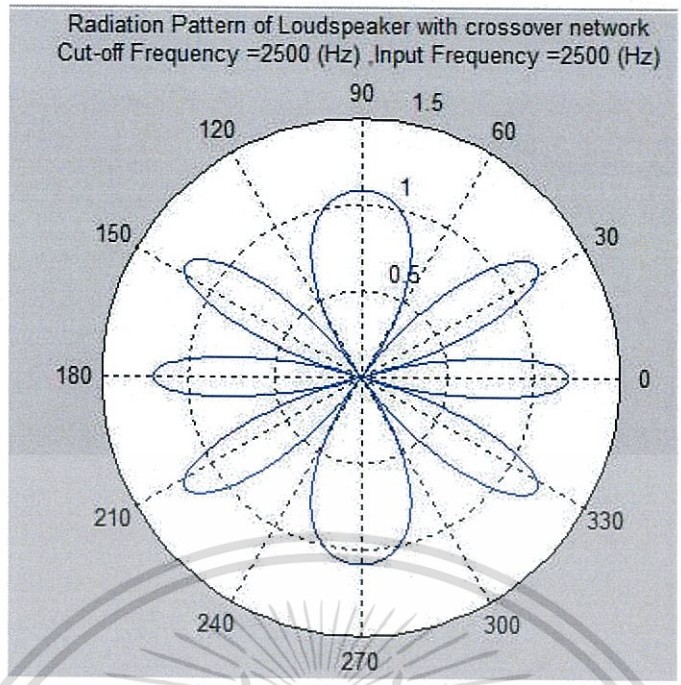
รูปที่ 5.8 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของบัทเทอร์เวิธท์



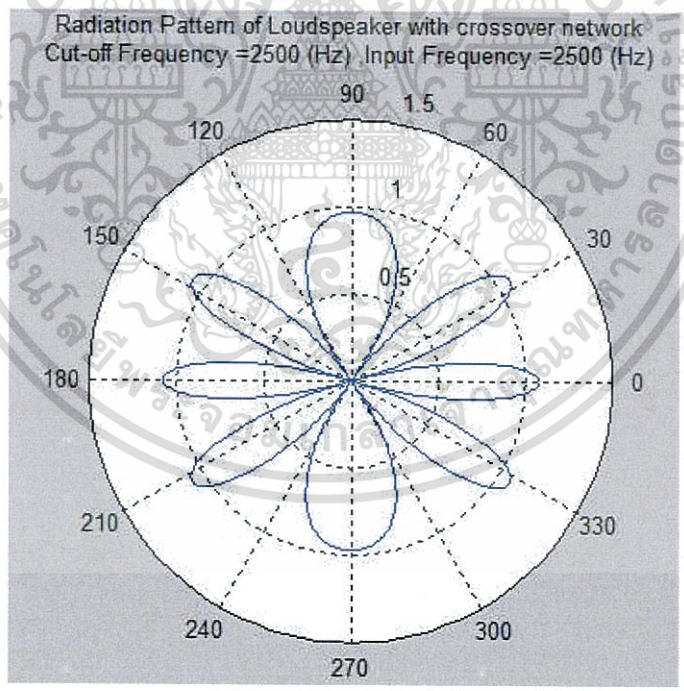
รูปที่ 5.9 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ รูปแบบ Constant Voltage



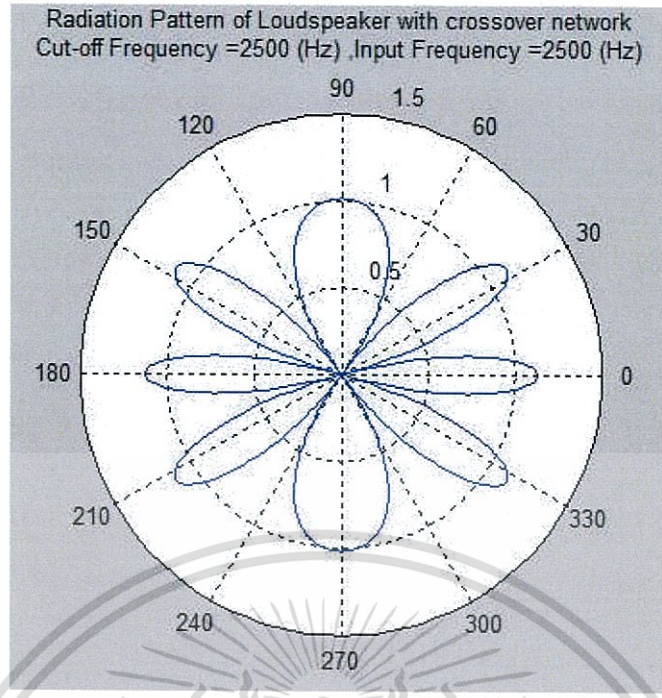
รูปที่ 5.10 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Linkwitz-Riley



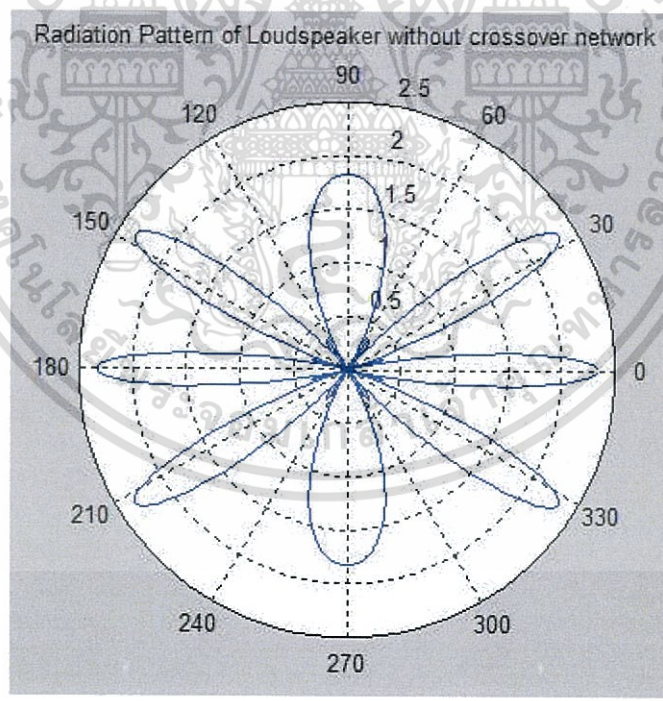
รูปที่ 5.11 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=1, α=2, Q=0.5



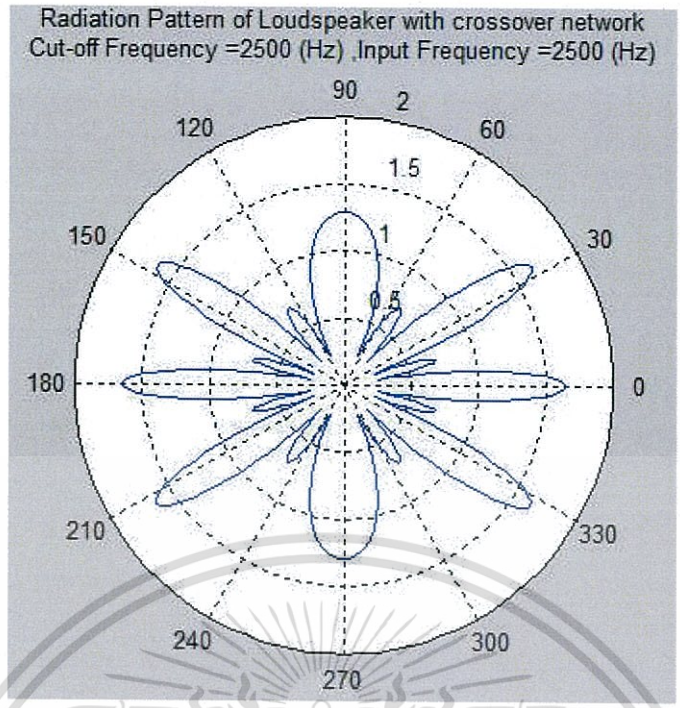
รูปที่ 5.12 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่าน Crossover ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.01, α=0.74, Q=0.1



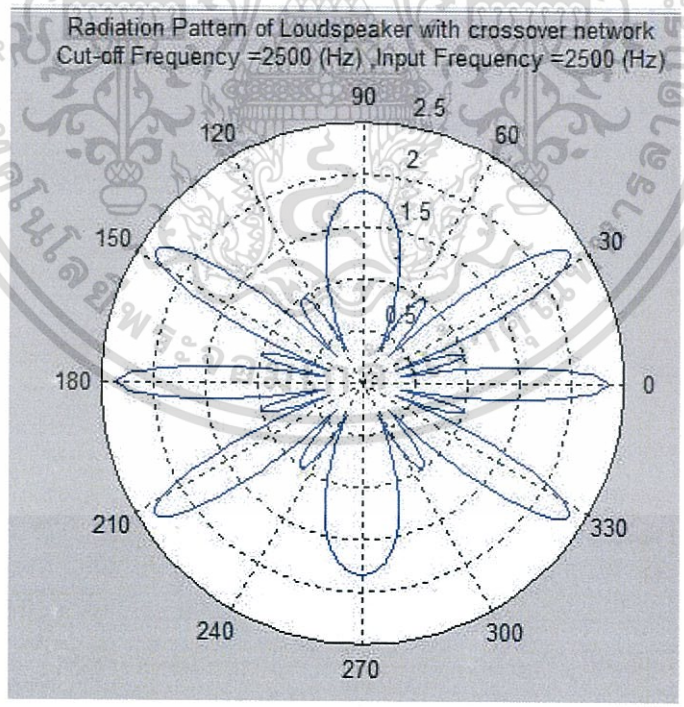
รูปที่ 5.13 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 1 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่าน Crossover ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.5, α=0.74, Q=0.9



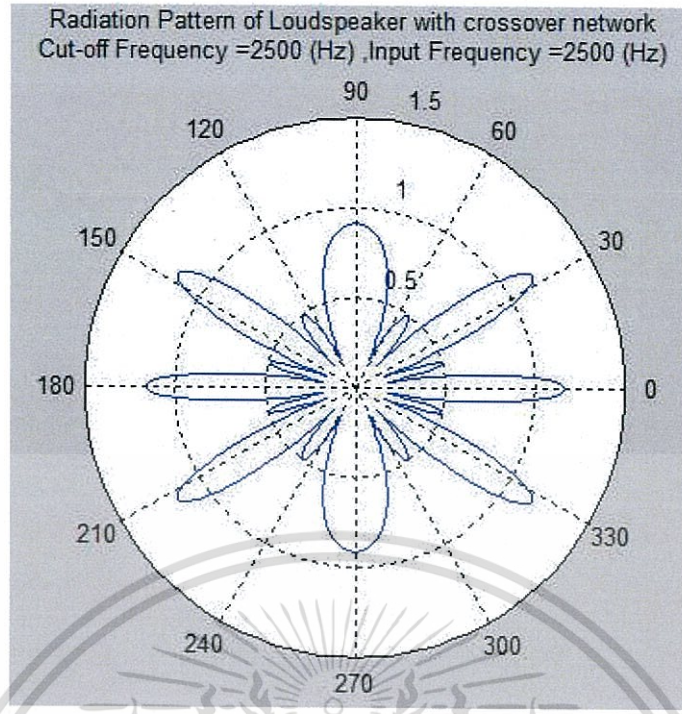
รูปที่ 5.14 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ไม่ผ่านครอสโอเวอร์



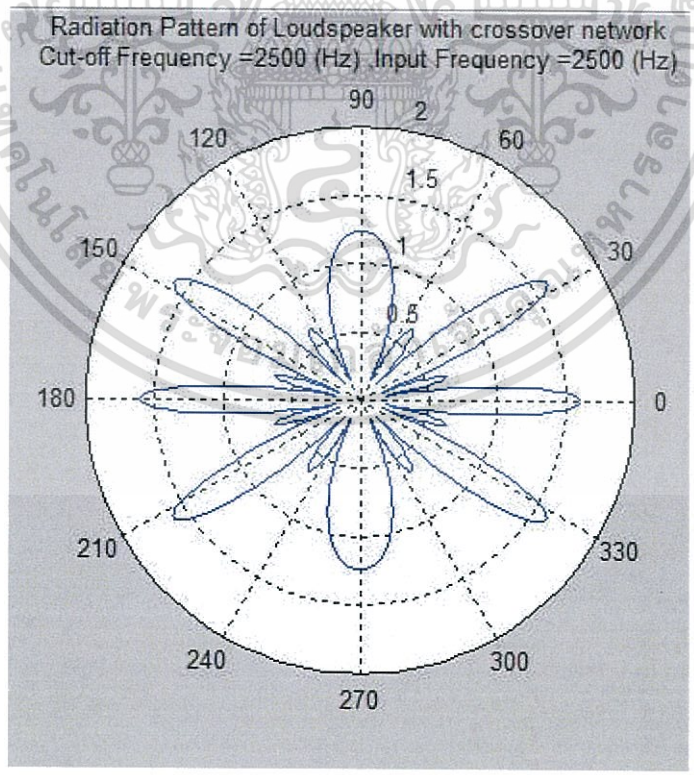
รูปที่ 5.15 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของบัทเทอร์เวิธท์



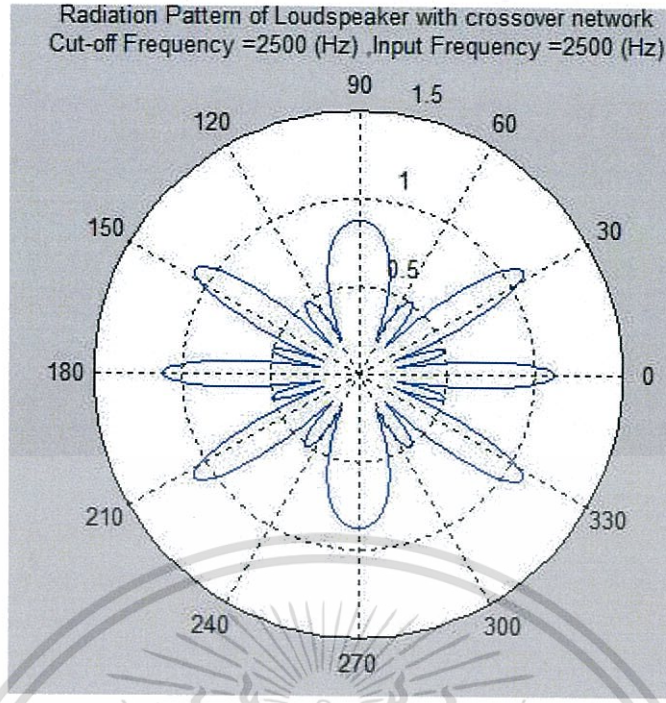
รูปที่ 5.16 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัวผ่านครอสโอเวอ รูปแบบ Constant Voltage



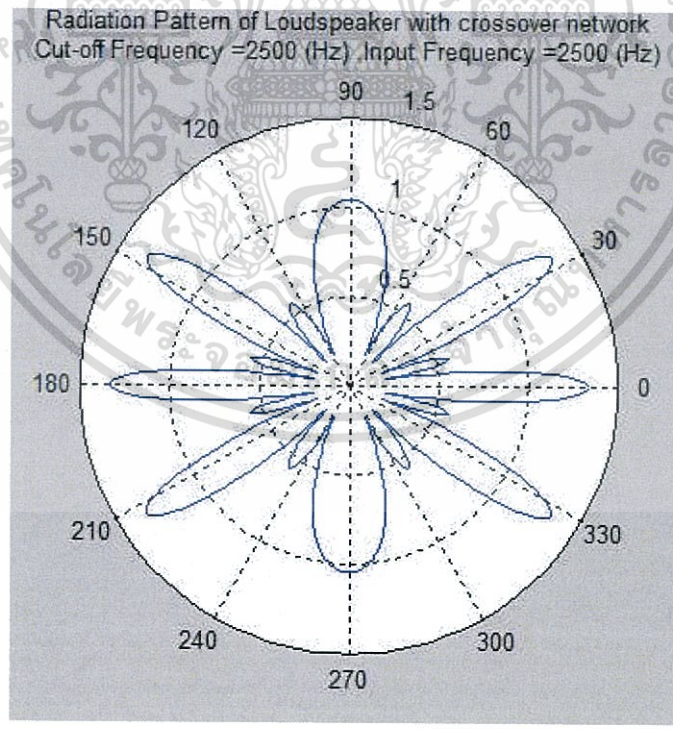
รูปที่ 5.17 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Linkwitz-Riley



รูปที่ 5.18 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า $\boldsymbol{\varepsilon}$=1, $\boldsymbol{\alpha}$=2, Q=0.5

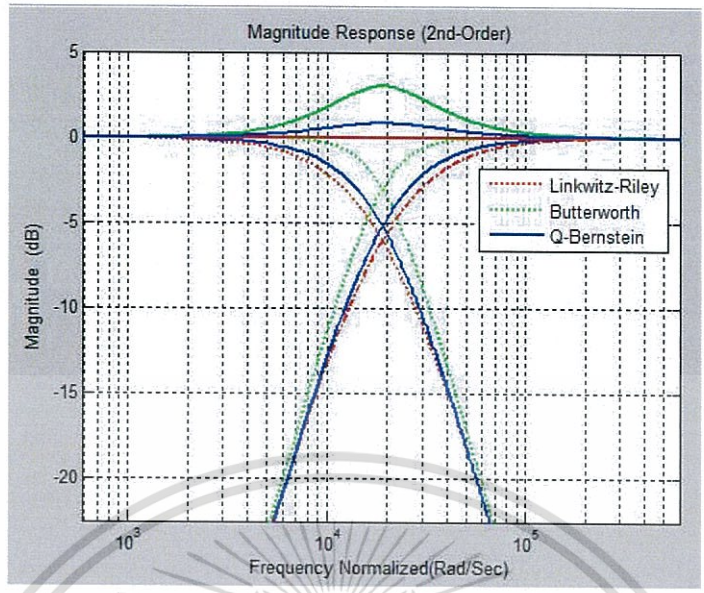


รูปที่ 5.19 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.01, α=0.74, Q=0.1

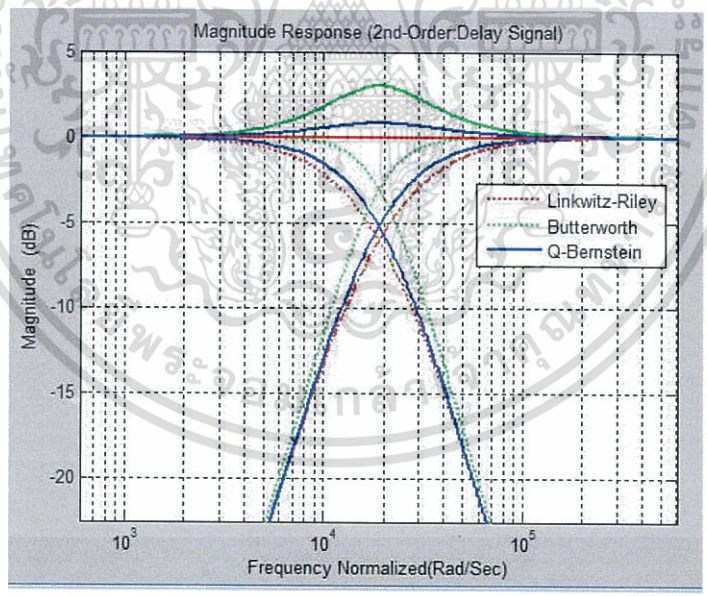


รูปที่ 5.20 การแพร่กระจายเสียงของลำโพงแบบวูฟเฟอร์ 2 ตัว ทวีตเตอร์ 1 ตัว ผ่านครอสโอเวอร์ ของ Q-เบิร์นสไตน์ที่ค่า ε=0.5, α=0.74, Q=0.9

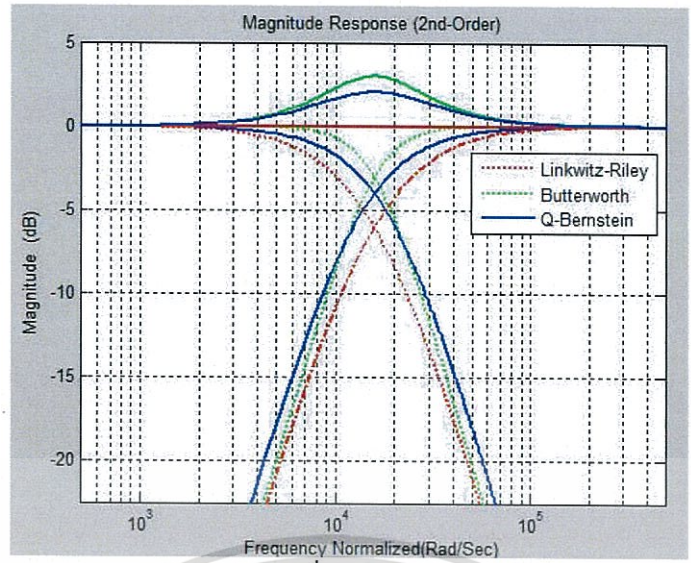
5.4.4 การเปรียบสัญญาณเสียงในครอสโอเน็ตเวิร์ค



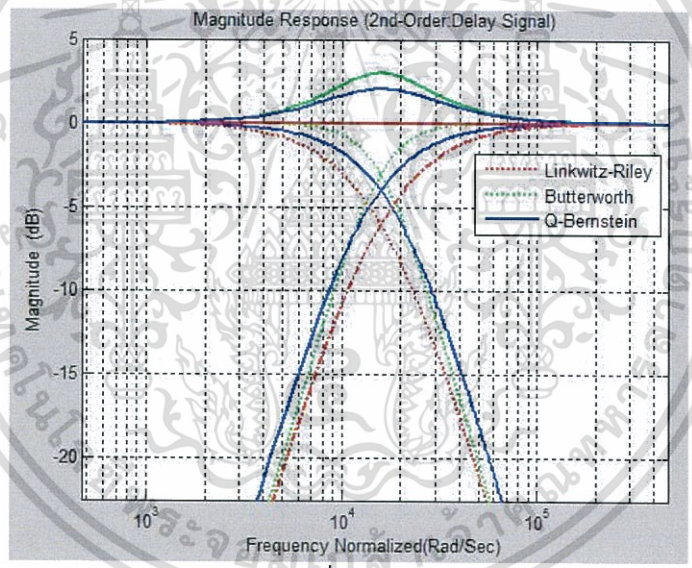
รูปที่ 5.21 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า **ε=1 , α=2** และ Q=0.5



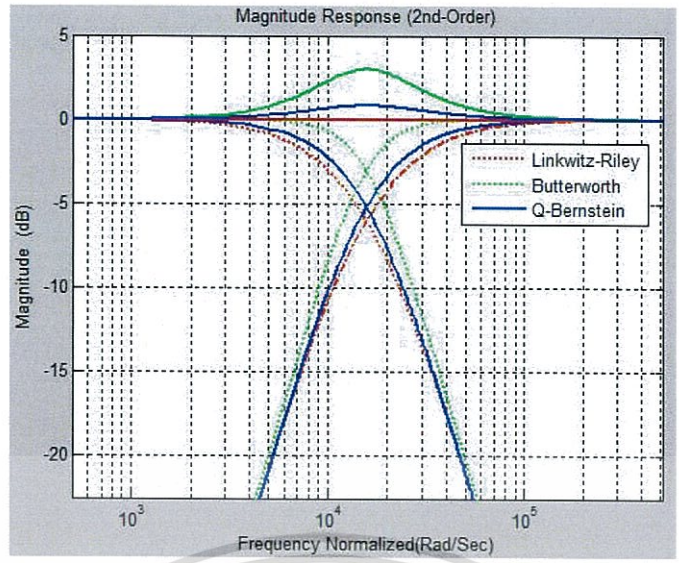
รูปที่ 5.22 Magnitude Response สัญญาณที่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า **ε=1 , α=2** และ Q=0.5



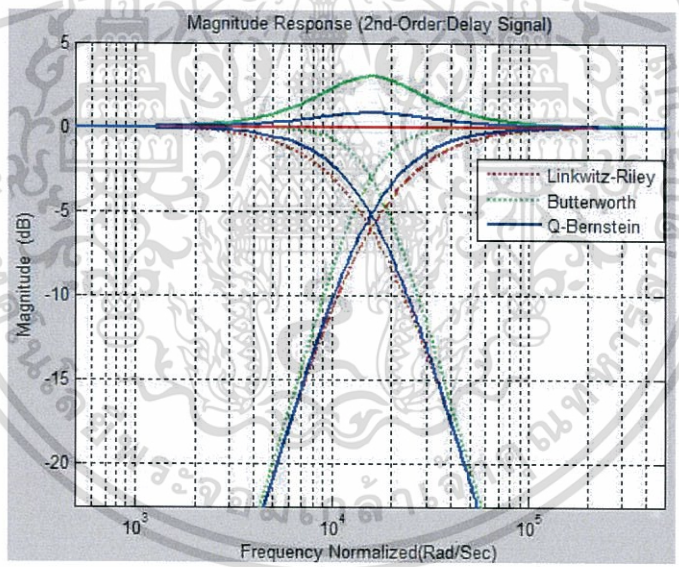
รูปที่ 5.23 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า **ε=0.01 , α=0.74** และ **Q=0.1**



รูปที่ 5.24 Magnitude Response สัญญาณที่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า **ε=0.01 , α=0.74** และ **Q=0.1**



รูปที่ 5.25 Magnitude Response สัญญาณที่ไม่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9



รูปที่ 5.26 Magnitude Response สัญญาณที่เกิด Delay ของครอสโอเวอร์ ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของ Butterworth, Linkwitz-Riley และของ Q-Bernstein ที่ค่า ε=0.5 , α=0.74 และ Q=0.9

จะเห็นว่า Delay ของสัญญาณเสียงจะไม่ค่อยมีผลมากกับผลรวมสัญญาณ เพราะระยะทางที่เสียงเดินทางจากวูฟเฟอร์ไปยังผู้ฟังกับระยะทางที่เสียงเดินทางจากทวีตเตอร์ไปยังผู้ฟังต่างกันน้อย

บรรณานุกรม

[1] Stanley P.Lipshitz and John Vanderkooy, "**In-Phase Crossover Network Design**", Audio Research Group, University of Waterloo, Ont. N2L 3G1, Canada.

[2] Siegried H. Linkwitz, "**Active Crossover Networks for Noncoindent Drivers**", Hewlett-Packard Company, Santa Rosa, California.

[3] Ulrich Horbach, "**Application of linear-Phase Digital Crossover Filters to Pair-Wise Symmetic Multi-Way Loudspeaker Part1: Control of Off-Axis Frequency Response**", Harman Consumer Group, Northride, California, USA.

[4] D.B.(Don) Keele,JR., "**Application of linear-Phase Digital Crossover Filters to Pair-Wise Symmetic Multi-Way Loudspeaker Part1: Control of Off-Axis Frequency Response**", Harman/Becker Automotive Systems, Martinsville, Indiana, USA

[5] Leo L. Beranek, "**Acoustics**", Massachusetts Institude of Technology; Bolt, Beranek and Newman, Inc., Cambridge, Massachusetts

[6] Rene Christensen, "**Active All-Pass Crossover Networks with Equal Resistors and Equal Capacitors**", Acoustics & Electronics, DELTA, DK-8653 Them, Denmark

[7] Robert M. Bullock, III, "**Loudspeaker-Crossover System: An Optimal Crossover Choice**", Miami University, Department of Mathematics and Statistics, Oxford, OH 45056, USA

[8] Heping Wang, "**Shape-preserving properties of ω, Q-Bernstein polynomials**", Department of Mathematics, Capital Normal University, Beijing 100037, People's Republic of China

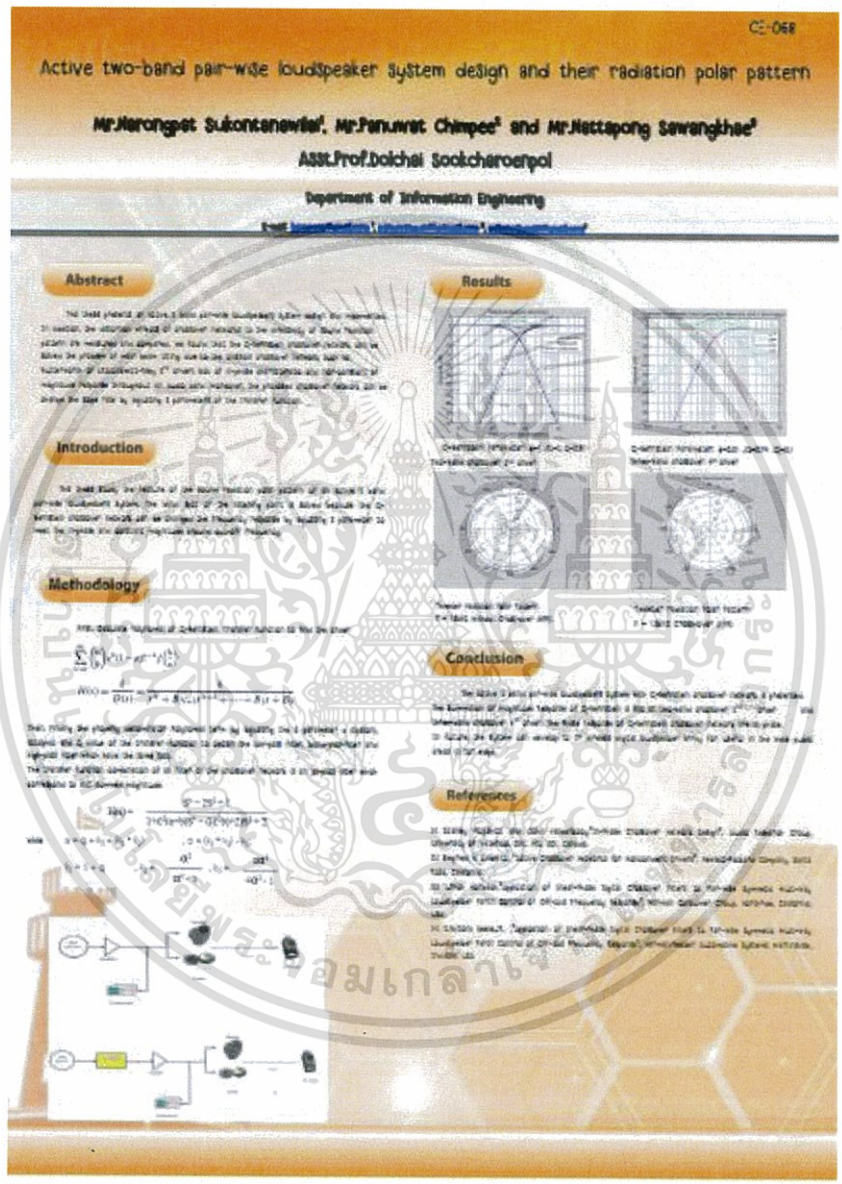
ภาคผนวก ก

Poster

ภาคผนวก ก

Poster

โปสเตอร์โครงงาน



ภาคผนวก ข

การติดตั้งโปรแกรม MATLAB และ Altium Designer

ภาคผนวก ข

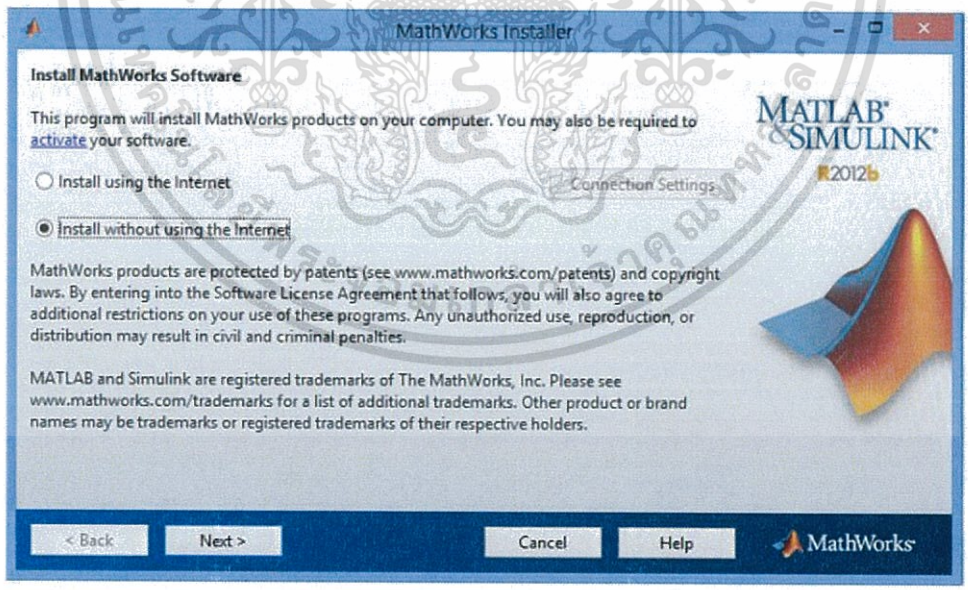
การติดตั้งโปรแกรม MATLAB และ Altium Designer

1.การติดตั้งโปรแกรม MATLAB

1. ให้ Double Click file setup.exe

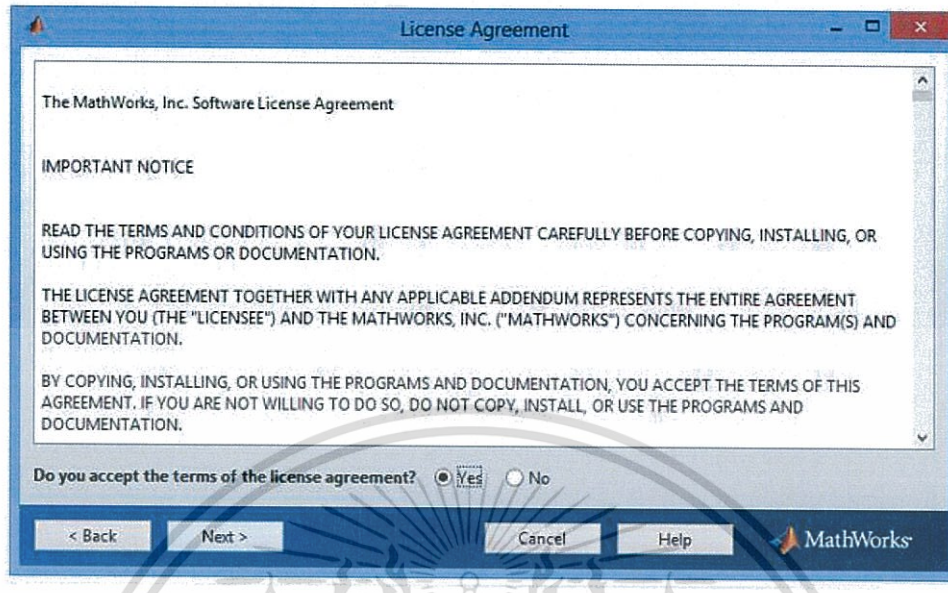
รูปที่ ข.1 หน้าโฟลเดอร์ติดตั้ง MATLAB

2. หลังจากนั้นให้เลือก Install manually without using the Internet หลังจากนั้นให้กด Next



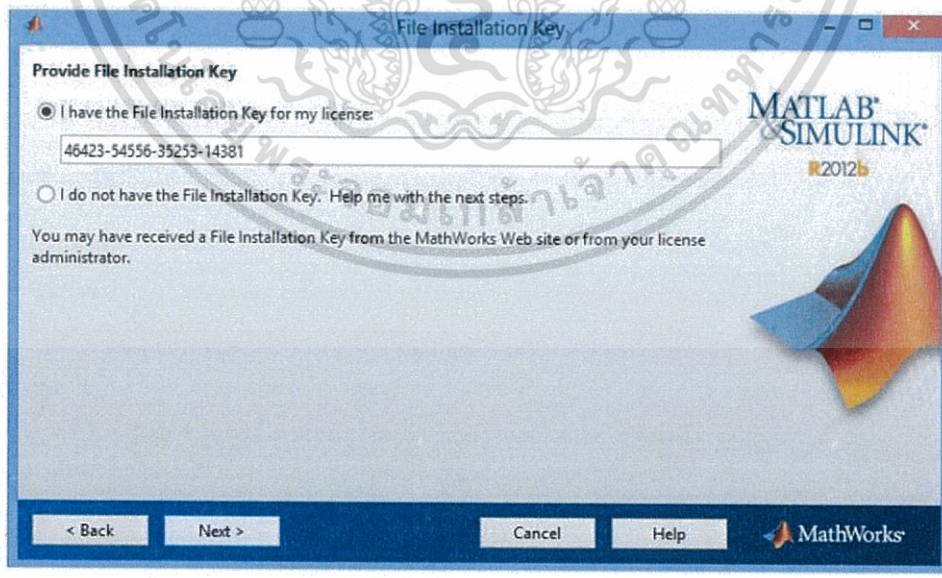
รูปที่ ข.2 หน้าต่างเลือกวิธีการติดตั้งโปรแกรม MATLAB

3. ให้ ตอบ Yes ใน หน้าต่าง License Agreement หลังจากนั้นให้กด next



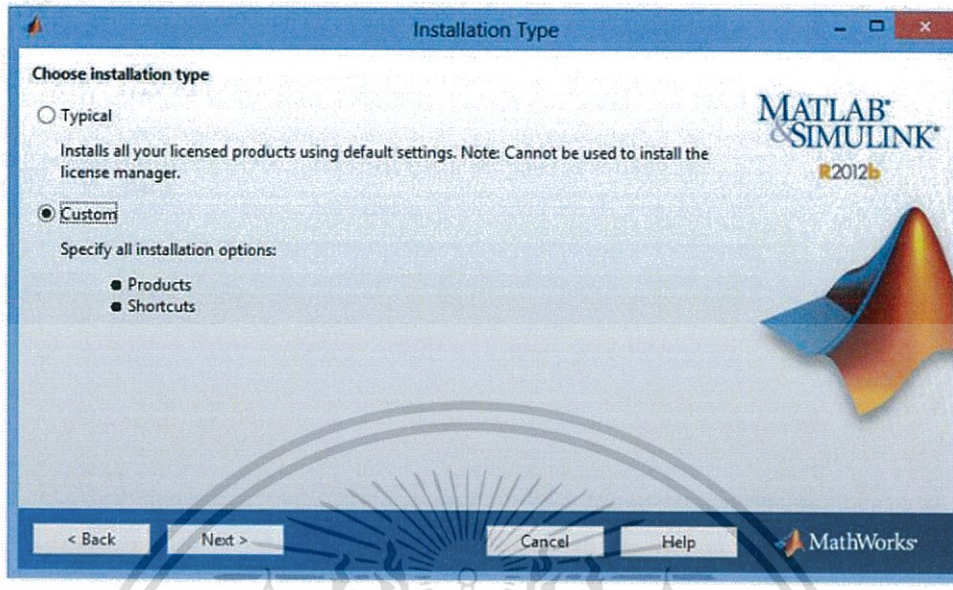
รูปที่ ข.3 รายละเอียดเงื่อนไขการติดตั้งโปรแกรม MATLAB แบบมีลิขสิทธิ์

4. หลังจากนั้น เลือก I have the File Installation Key for my license แล้วก็ป้อนตัวเลขที่ใน ไฟล์ FIK.txt ที่ได้รับทาง email ใส่ในช่องว่าง ดังรูป หลังจากนั้นให้กด Next



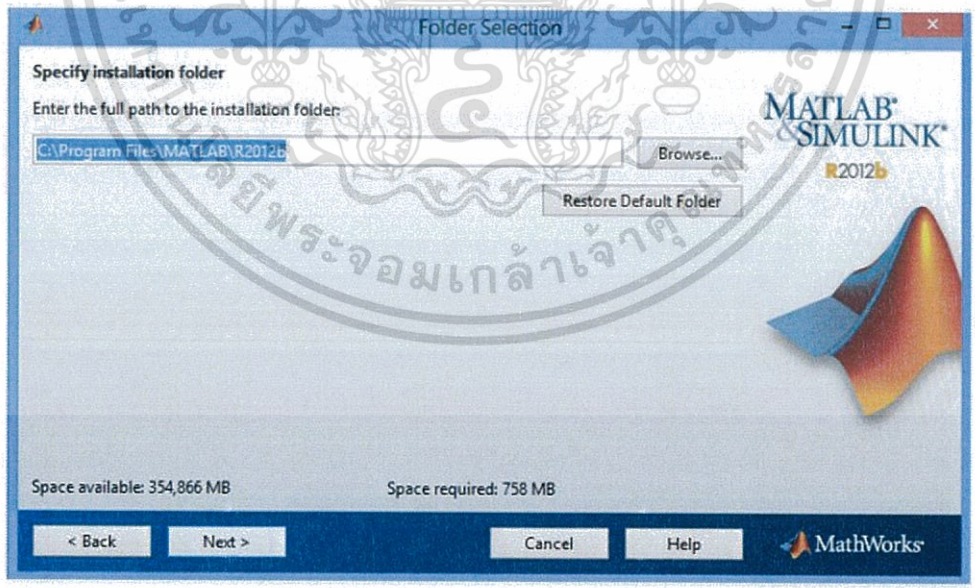
รูปที่ ข.4 หน้าต่างเลือกการใส่รหัสกุญแจของโปรแกรมลิขสิทธิ์

5. หลังจากนั้นให้ กดเลือกการติดตั้งแบบ Custom แล้วทำการกด Next



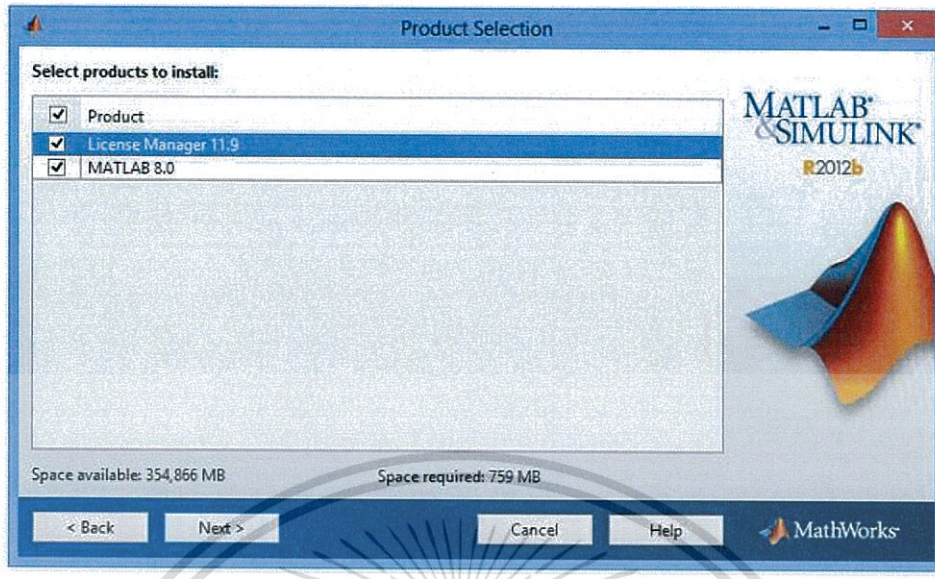
รูปที่ ข.5 หน้าต่างเลือกการใส่รหัสกุญแจของโปรแกรมลิขสิทธิ์

6. ให้ทำการเลือก Folder เพื่อติดตั้งโปรแกรม ดังรูป แล้วทำการกด Next



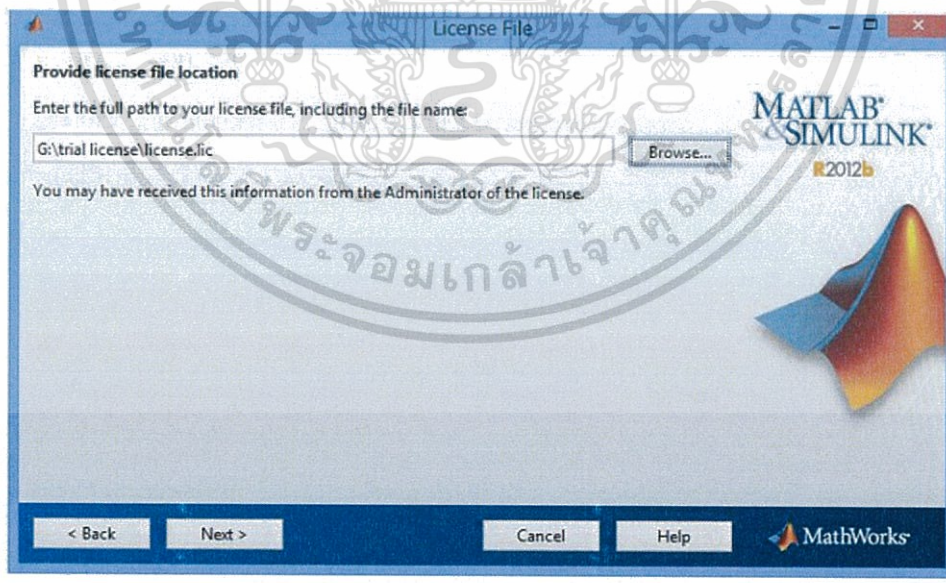
รูปที่ ข.6 หน้าต่างเลือก Path ที่จะติดตั้งโปรแกรม

7. ให้ทำการเลือกติดตั้ง License Manager และ MATLAB ดังรูป หลังจากนั้นกดปุ่ม Next



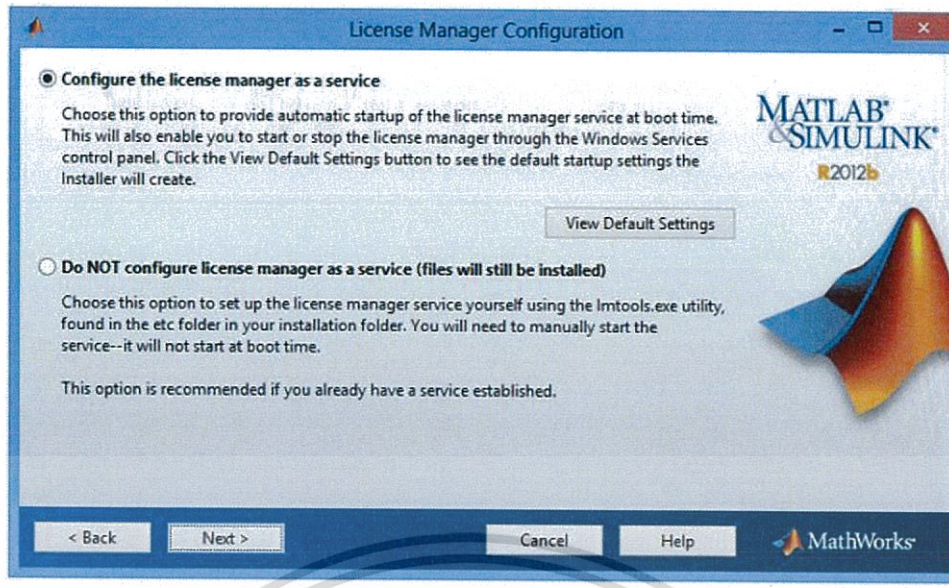
รูปที่ ข.7 หน้าต่างเลือกโปรแกรมที่จะติดตั้ง

8. หลังจากนั้นให้ทำการเลือก Path ที่อยู่ของไฟล์ License.lic ที่ได้รับทาง email หลังจากนั้นให้ทำการกด Next



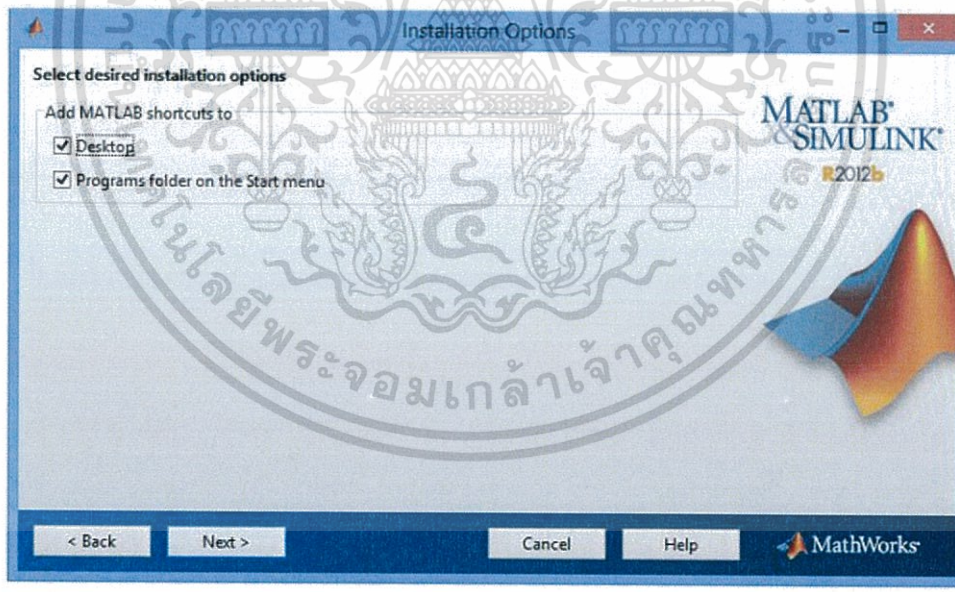
รูปที่ ข.8 หน้าต่างเลือก Path ของไฟล์ลิขสิทธิ์

9. ให้ทำการเลือก Configure license manager service



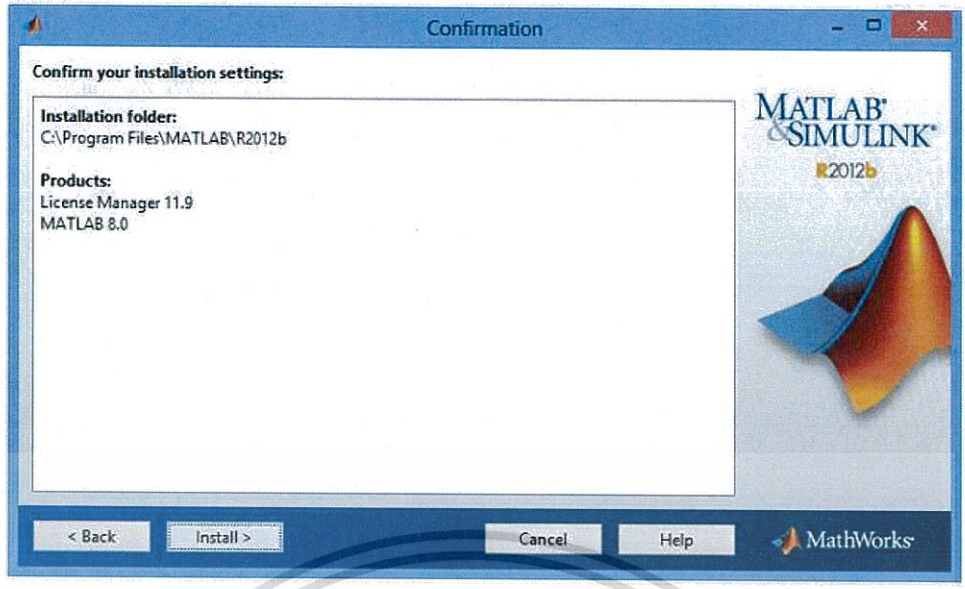
รูปที่ ข.9 หน้าต่าง Configure License Manager

10. ให้ทำการเลือก tick option ตามรูป



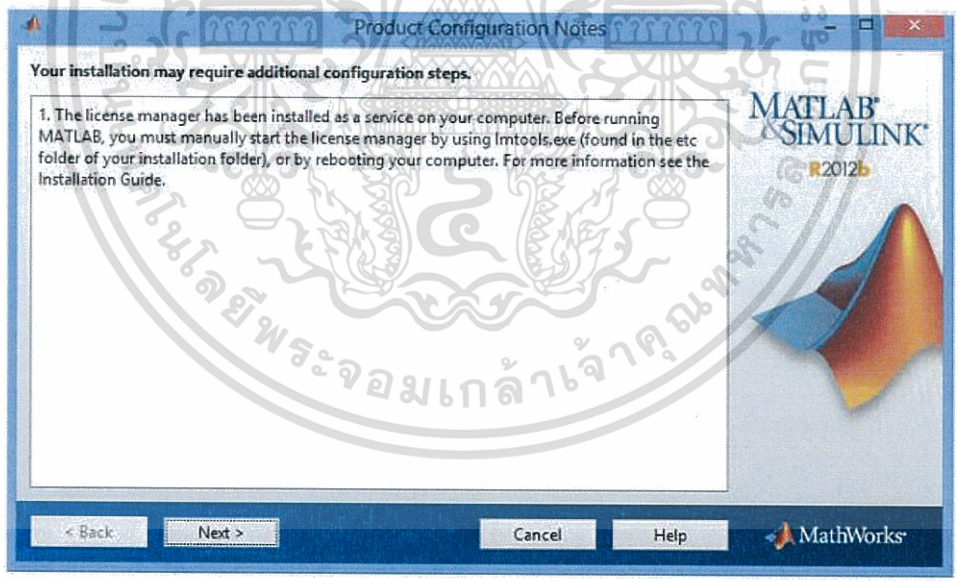
รูปที่ ข.10 หน้าต่างตัวเลือกสร้าง Shortcuts เข้าโปรแกรม MATLAB

11. ให้กด Install เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรม

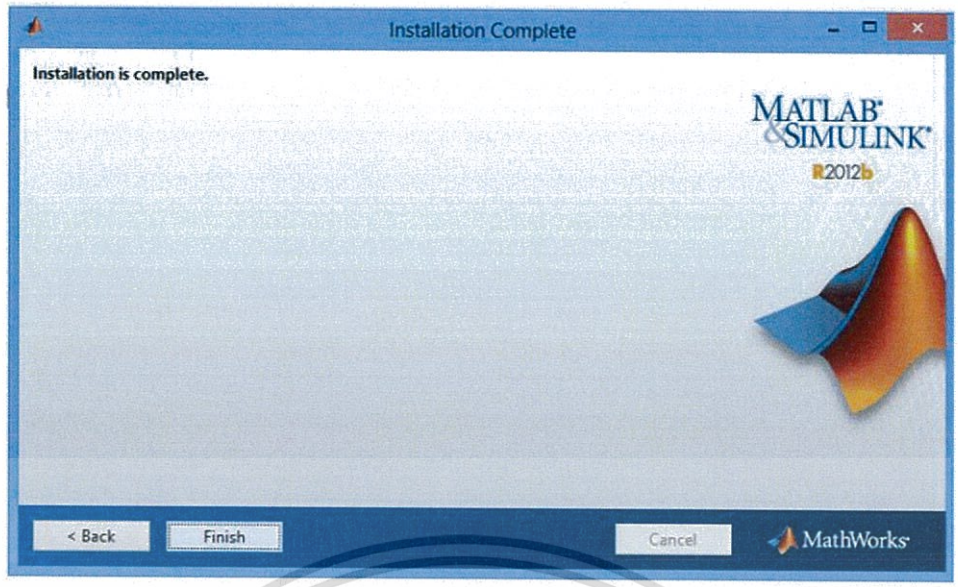


รูปที่ ข.11 หน้าต่างยืนยันที่จะลงโปรแกรม MATLAB

12. เมื่อทำการติดตั้งเสร็จสิ้น ให้กดปุ่ม Next และ Finish ตามลำดับ



รูปที่ ข.12 หน้าต่างรายละเอียดโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ข.13 หน้าต่างเสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม MATLAB

2. การติดตั้งโปรแกรม Altium Designer

1. เมื่อคลิกเข้าไปที่ Setup จะปรากฏหน้าต่างดังภาพ ให้คลิกที่ปุ่ม Next

รูปที่ ข.14 หน้าแรกของการติดตั้ง Altium Designerr

2. จากนั้นให้ทำการคลิกเลือกที่ PCB and Soft Design ดังภาพ

รูปที่ ข.15 เลือกรูปแบบของโปรแกรม Altium Designer

3. จากนั้นทำการเลือกภาษาตามที่ต้องการ และถัดมาให้ คลิกเลือก I accept the agreement ดังภาพ

รูปที่ ข.16 หน้าต่างแสดงเงื่อนไขของโปรแกรม Altium Designer

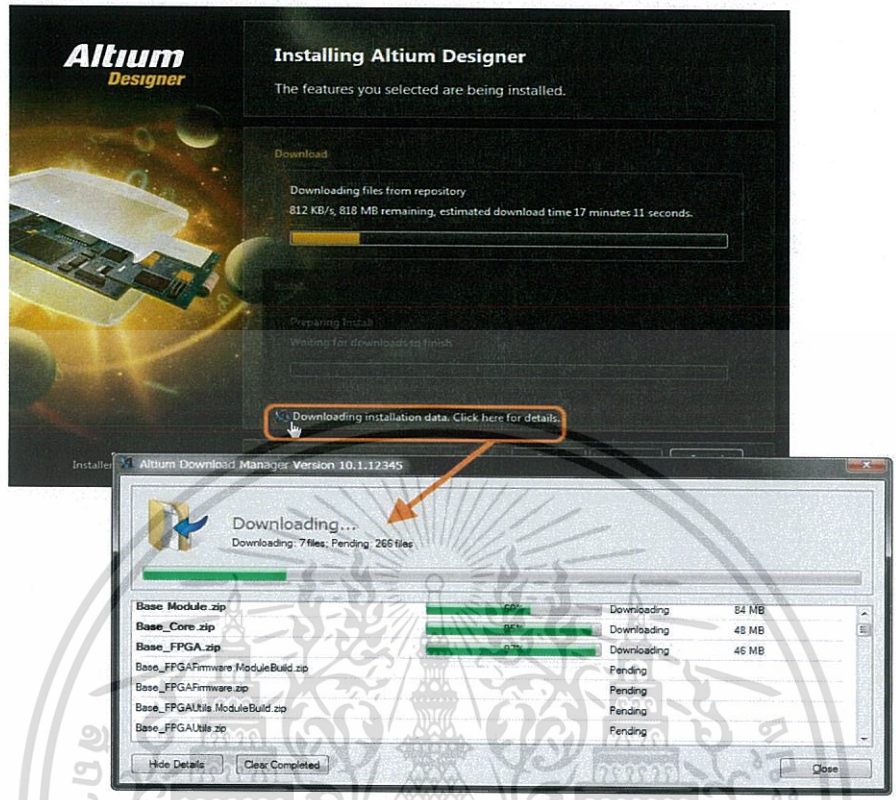
4. จากนั้นทำการเลือก Path ของไฟล์ที่จะทำติดตั้งไว้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ตามต้องการ

รูปที่ ข.17 หน้าต่างสำหรับเลือก Path ในการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer

5. เมื่อผ่านขั้นตอนการเลือก Path ของไฟล์แล้วจะปรากฏหน้าดังภาพเพื่อแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมพร้อมติดตั้ง

รูปที่ ข.18 หน้าต่างยืนยันการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer

6. หน้าต่างนี้แสดงการติดตั้งของโปรแกรม สามารถคลิกดูรายละเอียดของการติดตั้งได้ดังภาพ



รูปที่ ข.19 หน้าต่างแสดงการติดตั้งของโปรแกรม Altium Designer

7. การติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ คลิกที่ปุ่ม Finish เพื่อเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม

รูปที่ ข.20 หน้าต่างแสดงสถานะเสร็จสิ้นการติดตั้งโปรแกรม Altium Designer

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ และการหาค่าของตัวต้านทานกับค่าของตัวเก็บประจุ

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์ และ การหาค่าของตัวต้านทานกับค่าของตัวเก็บประจุ

1. การคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Q-เบิร์นสไตน์

จากตารางที่ 3.1 กับสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.15 โพลีโนเมียลของ Q-เบิร์นสไตน์ คือ

$$\mathbf{H(s)} = \left[1 + \varepsilon^2\left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2-1} + \left(\frac{8(1+q)\alpha^2}{4\alpha^2-1}\right) - 1\right)\right]S^4 + \left[-\varepsilon^2\left(\frac{1+q}{4\alpha^2-1}\right) - 2\right]S^2 + 2 \qquad (ค.1)$$

กำหนดให้ค่า ε=1, α=2 และ q=0.5 จะได้

$$\mathbf{H(s)} = \left[1 + 1^2\left(\frac{(2)^2}{(2)^2-1} + \left(\frac{8(1+0.5)(2)^2}{4(2)^2-1}\right) - 1\right)\right]S^4 - \left[1^2\left(\frac{1+0.5}{4(2)^2-1}\right) + 2\right]S^2 + 2 \qquad (ค.2)$$

$$\mathbf{H(s)} = \left[1 + \left(\frac{4}{4-1} + \left(\frac{(1.5)32}{16-1}\right) - 1\right)\right]S^4 - \left[\left(\frac{1.5}{16-1}\right) + 2\right]S^2 + 2 \qquad (ค.3)$$

$$\mathbf{H(s)} = \left[1 + \left(\frac{4}{3} + \left(\frac{48}{15}\right) - 1\right)\right]S^4 - \left[\left(\frac{1.5}{15}\right) + 2\right]S^2 + 2 \qquad (ค.4)$$

$$\mathbf{H(s)} = [1 + (0.1333 + 3.2 - 1)]S^4 - (0.1 + 2)S^2 + 2 \qquad (ค.5)$$

$$\mathbf{H(s)} = 3.3333S^4 - 2.1S^2 + 2 \qquad (ค.6)$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำคือ

$$\mathbf{H_{LPF}(s)} = \frac{2}{3.3333S^4 - 2.1S^2 + 2} \qquad (ค.7)$$

ทำการดีนอร์มอลไลซ์ (Denormalized) ให้เทอมเศษเป็น 1 จะได้

$$\mathbf{H_{LPF}(s)} = \frac{1}{1.6667S^4 - 1.05S^2 + 1} \qquad (ค.8)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับวงจรกรองความถี่สูงหาได้จาก

$$\mathbf{H_{HPF}(s) = H_{LPF}\left(\frac{1}{s}\right)} \quad \text{(ค.9)}$$

เนื่องจากรูปแบบวงจรกรองความถี่สูงต่างจากวงจรกรองความถี่ต่ำโดยสลับการต่อ R กับ C ดังนั้น

$$\mathbf{H_{HPF}(s) = \frac{1}{1.6667\left(\frac{1}{s}\right)^4 - 1.05\left(\frac{1}{s}\right)^2 + 1}} \quad \text{(ค.10)}$$

ทำการคูณด้วย $\mathbf{s^4}$ ทั้งเศษและส่วนจะได้

$$\mathbf{H_{HPF}(s) = \frac{s^4}{1.6667 - 1.05s^2 + s^4}} \quad \text{(ค.11)}$$

จากสมการที่ ค.6 ทำการแยกตัวประกอบเพื่อหาคู่ Pole-Zero จากสมการที่ 3.16 กับ 3.17 จะได้

$$\mathbf{H(s) = \left(s^2 - \frac{2.1 - \sqrt{(2.1)^2 - 4(3.3333)(2)}}{2(3.3333)}\right)\left(s^2 - \frac{2.1 + \sqrt{(2.1)^2 - 4(3.3333)(2)}}{2(3.3333)}\right)} \quad \text{(ค.12)}$$

$$\mathbf{H(s) = (s^2 - 0.315003 + 0.707657\,i)(s^2 - 0.315003 - 0.707657\,i)} \quad \text{(ค.13)}$$

ทำการแยกตัวประกอบในแต่ละเทอมโดย

$$\mathbf{H(s) = H_1(s)H_2(s)} \quad \text{(ค.14)}$$

จะได้

$$\mathbf{H_1(s) = \left(s - \frac{\sqrt{-4(1)(-0.315003 + 0.707657\,i)}}{2}\right)\left(s + \frac{\sqrt{-4(1)(-0.315003 + 0.707657\,i)}}{2}\right)} \quad \text{(ค.15)}$$

$$\mathbf{H_1(s) = (s - 0.738107 + 0.479373\,i)(s + 0.738107 - 0.479373\,i)} \quad \text{(ค.16)}$$

และ

$$\mathbf{H_2(s) = \left(s - \frac{\sqrt{-4(1)(-0.315003 - 0.707657\,i)}}{2}\right)\left(s + \frac{\sqrt{-4(1)(-0.315003 - 0.707657\,i)}}{2}\right)} \quad \text{(ค.17)}$$

$$\mathbf{H_2(s) = (s - 0.738107 - 0.479373\,i)(s + 0.738107 + 0.479373\,i)} \quad \text{(ค.18)}$$

ทำการเลือกคู่ Pole-Zero โดยเลือกที่ค่าจริงเป็นบวก เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 จะได้

$$\mathbf{h(s) = (s + 0.738107 - 0.479373\,i)(s + 0.738107 + 0.479373\,i)} \quad \text{(ค.19)}$$

$$\mathbf{h(s) = s^2 + 1.47621s + 0.7746} \quad \text{(ค.20)}$$

จะได้

$$\mathbf{h_{LPF}(s)} = \frac{1}{1.290989s^2+1.905771s+1} \quad \text{(ค.21)}$$

$$\mathbf{h_{HPF}(s)} = \frac{s^2}{s^2+1.905771s+1.290989} \quad \text{(ค.22)}$$

2. การคำนวณหาค่าของตัวต้านทานกับค่าของตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ ค.21 เปรียบเทียบกับสมการที่ 3.3 จะได้

$$\mathbf{C_1C_2R_1R_2}=\mathbf{1.290989} \quad \text{(ค.23)}$$

$$\mathbf{C_2(R_1+R_2)}=\mathbf{1.905771} \quad \text{(ค.24)}$$

กำหนดให้ $\mathbf{R_1 = R_2 = 10k}$ โอห์ม(Ohm) จะได้

$$\mathbf{C_2(20000)}=\mathbf{1.905771} \quad \text{(ค.25)}$$

$$\mathbf{C_2}=\mathbf{95.28855\ \mu F}$$

แทนค่า $\mathbf{C_2, R_1, R_2}$ ลงในสมการที่ ค.23 จะได้

$$\mathbf{C_1(95.28855)(10^{-6})(10^{6})}=\mathbf{1.290989} \quad \text{(ค.26)}$$

$$\mathbf{C_1 = 952.8855\ \mu F} \quad \text{(ค.27)}$$

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาคผนวก ง.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ลำโพงวูฟเฟอร์ (Woofer)

Vifa-Speak A/S
DK-6920 Videbæk
Denmark

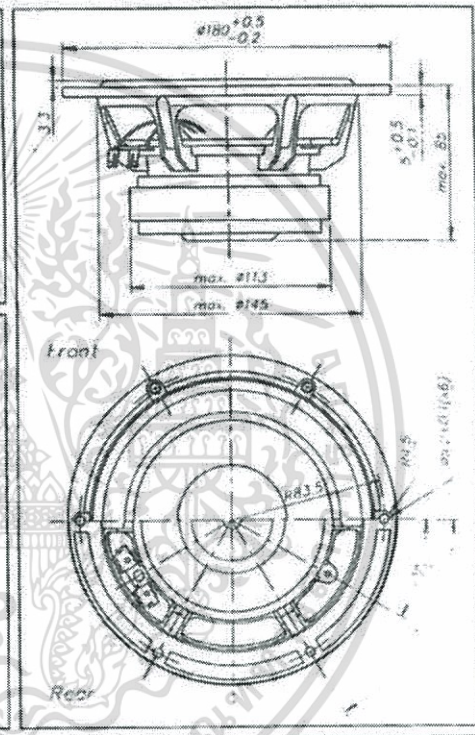
Fabrikation af kvalitetshøjttalere
Production of Quality Loudspeakers

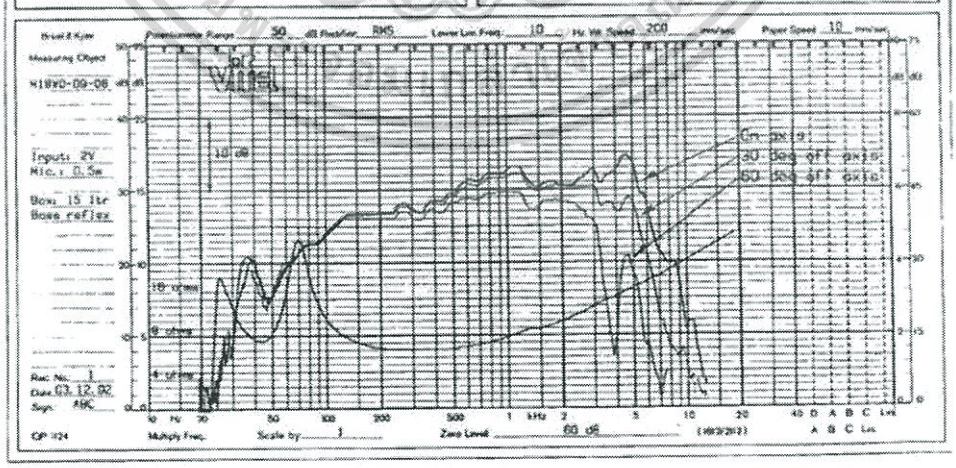
6½" WOOFER — M18WO-09-08

SPECIAL FEATURES:

- NEW LONG STROKE, LOW REFLEXION, MAGNESIUM BASKET
- STIFF AIRDRIED PAPER CONE
- LOW DAMPING RUBBER SURROUND
- KAPTON® V. C. FORMER
- LONG THROW MAGNET SYSTEM
- OPTIMIZED FOR BASS REFLEX

NOMINAL IMPEDANCE	8	Ω
NOMINAL POWER (IEC 268-5)	70	W
MUSIC POWER (DIN 45500)	90	W
FREQUENCY RANGE	35-4000	Hz
SENSITIVITY (1 W, 1 m)	87.5	dB
EFFECTIVE CONE AREA	132	cm²
VOICE COIL RESISTANCE	5.7	Ω
VOICE COIL INDUCTANCE	0.90	mH
OPERATING POWER	7.1	W
VOICE COIL DIAMETER	40	mm
VOICE COIL HEIGHT	14	mm
AIR GAP HEIGHT	6	mm
FREE AIR RESONANCE	35	Hz
MOVING MASS (incl. air)	17.5	g
FORCE FACTOR, Bxl	7.5	Txm
MAGNET WEIGHT (24.6 oz)	698	g
Qms	6.70	
Qes	0.39	
Qts	0.37	
Vas	26.5	ltr





Stationsvej 5 • Postbox 39 • DK-6920 Videbæk • Tlf. +45 97 17 17 22 • Telefax: +45 97 17 16 96
Akts. reg.nr.: 209648 • Bank: Unibank A/S, Herning afd. • SWIFT UNIB DK KK

December, 1992

M18WO-09-08 Applications

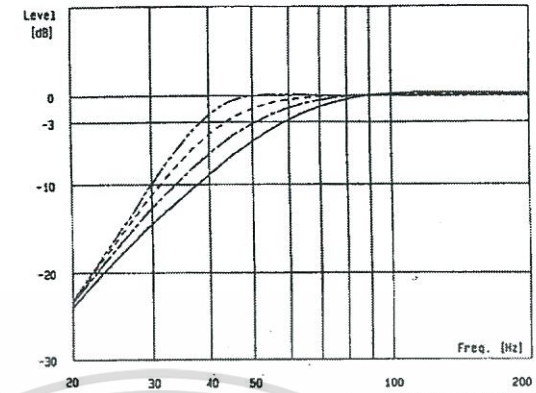
BASS REFLEX SYNTHESIS

Moderate Damping of Box

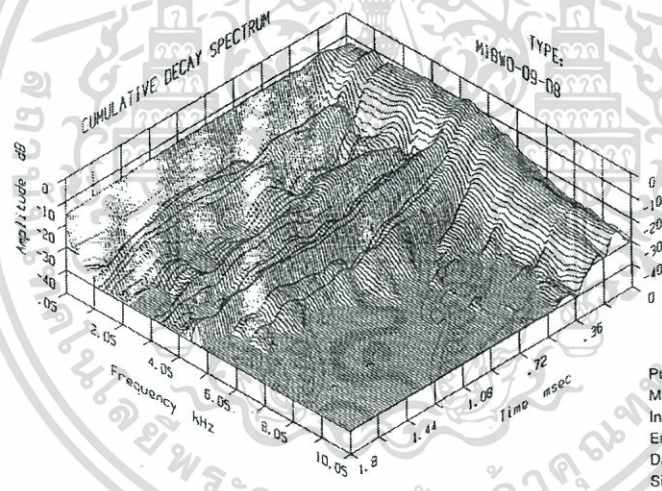
No Deliberate Damping of Port

	Vb [Ltrs]	Fb [Hz]	Dp [cm]	Lp [cm]
1 ———	10	40	3.0	11.0
2 ———	14	40	3.0	7.2
3 - - - -	20	40	5.0	14.5
4 ———	30	40	5.0	8.5

Vb: Box volume
Fb: Tuning Frequency
Dp: Port Diameter
Lp: Port Length



The M18WO-09-08 is designed for bass reflex enclosures of 10-30 litre.
The bass reflex synthesises are calculated with 0.5 Ω series resistance.



Pulse: 10 V/50 µS
Mic.: 0.15 m
Infinite baffle
Enclosure: 320 l
Date: 02.12.92
Sign.: ABC

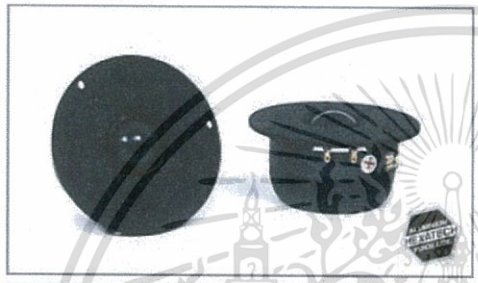
DK 6920 Videbæk • Postbox 39 • Denmark • Tlf. 97 17 17 22 • Int. tlf. +45 97 17 17 22 • Telefax 97 17 16 96
Tlg.adr. Vifaspeak • Postgiro 9 03 79 50 • Akts.reg.nr. 30 670 • Bank: A/S Ringkjøbing Bank, Videbæk afd.

ลำโพงทวีตเตอร์ (Tweeter)

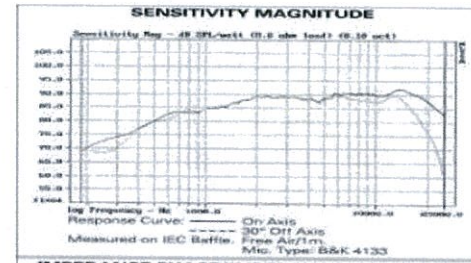
MDT 30S

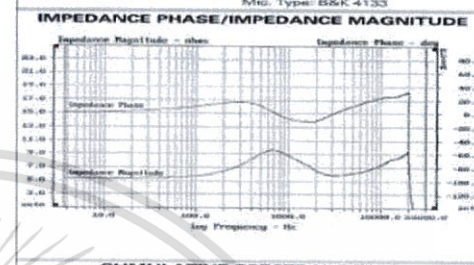
Soft Dome Tweeter

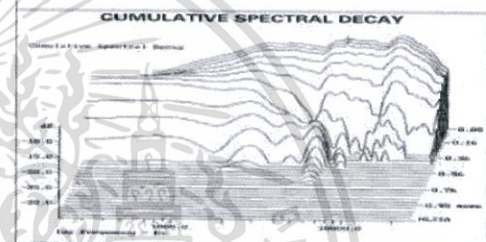
- Large diameter voice coil
- Ferrofluid cooled
- High power handling
- Replaceable dome/coil assembly
- Sturdy gold-plated input tags
- Injected polymer faceplate

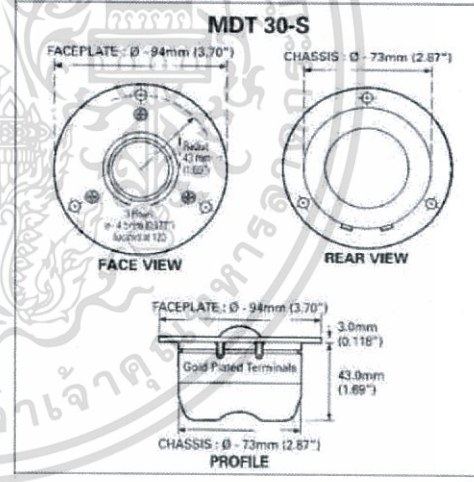


SPECIFICATIONS		
Overall Dimensions		OD 94mm (4.33") x 46mm (1.81")
Nominal Power Handling (DIN)	P	200 W
Transient Power 10ms		1000 W
Nominal Impedance	Z	8 Ohms
Sensitivity 1W/1M		90 dB
Frequency Response		1600 - 25000 Hz
Resonant Frequency	FS	650 Hz
VOICE COIL		
Voice Coil Diameter	fi	28mm (1.125")
Voice Coil Height		2.7mm (0.106")
Voice Coil Former		Aluminium
Voice Coil Wire		Hexatech Aluminium
Number of Layers		2
DC Resistance	RE	5.2 Ohms
Voice Coil Inductance @ 1KHz	LBM	0.09 mh
MAGNET SYSTEM		
Magnet System Type		Ferrite Vented Pole
HE - Magnetic Gap Height	HE	2.5mm (0.098")
B Flux density	B	1.5T
BL Product	BXL	3.5 N.A
Max. Linear Excursion	X	
OPERATIONAL PARAMETERS		
Moving Mass	MMS	0.44 gm.
Cone / Dome Material		Hand Treated Selected Fabric
Effective Piston Area	S	6.0 cm²
Net Weight	Kg.	0.56 Kg.









This tweeter is one of the worldwide favourite MOREL drivers . It only differs from the MDT-32S by the size of the faceplate. The hand treated cloth softdome has great consistency. The large volume, damped rear chamber is shaped to minimise vibrations and internal reflections. A very smooth impedance curve and a low resonance point is the result. A 28mm aluminium Hexatech voice coil and ferro fluid cooling let this tweeter handle a tremendous power. It exhibits a clear and detailed sound with a fast transient response and excellent dynamics. The small faceplate allows better use in d'Appolito systems, even with larger size woofers in 2- or multiway systems of very high quality.

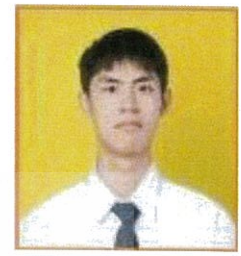
ภาคผนวก จ

ประวัติคณะผู้จัดทำ

ภาคผนวก จ

ประวัติคณะผู้จัดทำ

ประวัติคณะผู้จัดทำโครงงานคนที่ 1



ชื่อผู้จัดทำ นายณรงค์พัฒน์ สุคนธนาวิไล

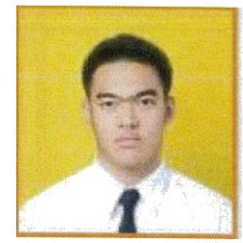
ที่อยู่ 18/121 ม.เดอะเมโทรมาสเตอร์พีช พระรามเก้า
ถ.คู่ขนานมอเตอร์เวย์ เขต ประเวศ แขวง ประเวศ
กรุงเทพฯ 12110
โทร 021861567
Email: bomocop@gmail.com

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ตำแหน่ง/สถานที่ทำงาน (ถ้ามีกรุณาระบุ) -

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติคณะผู้จัดทำโครงงานคนที่ 2



ชื่อผู้จัดทำ นายณัฐพงษ์ สว่างแข

ที่อยู่ อาคารพักอาศัย 12
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทร 084-1569940
Email: palmnoisyman@gmail.com

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ตำแหน่ง/สถานที่ทำงาน (ถ้ามีกรุณาระบุ) -

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติคณะผู้จัดทำโครงงานคนที่ 3

ชื่อผู้จัดทำ นายภานุวัฒน์ ฉิมปี่
ที่อยู่ 40/832 เค.ซี.รามอินทรา 8 ซ.8 แขวงสามวาตะวันตก
เขตคลองสามวา กรุงเทพฯ 10510
โทร 080-7704807
Email: iteproject201x@gmail.com

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ตำแหน่ง/สถานที่ทำงาน (ถ้ามีกรุณาระบุ) -