

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIQUAD DIGITAL FILTER



ชูลิทธิ ประดับเพชร  
CHUSIT PRADABPET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-232-5

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 49550  
วัน, เดือน, ปี 24 ก.พ. 2547

.b.....  
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BIQUAD DIGITAL FILTER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-232-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปคอด
นักศึกษา	นายชุตินันท์ ประดับเพ็ชร์
รหัสประจำตัว	44061729
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปคอด โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ซึ่งผลที่ได้สามารถให้ผลตอบสนองทางความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือกรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน ในการออกแบบและจำลองการทำงานใช้โปรแกรม MATLAB ส่วนการสร้างจริงใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก มีผลตอบสนองทางขนาดและความถี่เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้

<b>Thesis Title</b>	Design and Implementation of Biquad Digital Filter
<b>Student</b>	Mr. Chusit Pradabpet
<b>Student ID.</b>	44061729
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan

## ABSTRACT

The design and implementation of biquad digital filter using poles and zeros placement on the unit circle of z-plane is presented. The proposed digital filter has 3 results in frequency domain such as low pass filter (LPF), high pass filter (HPF) and band pass filter (BPF). The results have been carried out by simulating based on MATLAB while the implementation of the actual digital filters is done on TMS320C31 DSP board. The experimental results are measured from the dynamic signal analyzer and it is shown that the digital filters have the accurated frequency responses when compared with the theoretical results.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาแนะนำและให้คำปรึกษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และให้ความเมตตาแก่ศิษย์ ด้วยดีเสมอมา ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สุรพันธ์ ยิ้มมั่น ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งเป็นอีกท่านหนึ่งที่แนะนำ และให้คำปรึกษา รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่รู้จัก สำหรับความเป็นมิตรและความช่วยเหลือต่างๆ ที่มีให้กันระหว่างศึกษาอยู่

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา สำหรับความช่วยเหลือในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาของลูกและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกำลังใจอันยิ่งใหญ่อย่างหาที่เปรียบมิได้ ประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชุตินันท์ ประดับเพ็ชร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	2
บทที่ 2. ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข.....	3
2.1 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง.....	3
2.2 สมการผลต่างสืบเนื่อง.....	6
2.3 การแปลงแซด.....	7
2.3.1 คุณสมบัติการแปลงแซด.....	7
2.3.2 รูปเศษส่วนของการแปลงแซด.....	10
2.4 การแปลงแซดผกผัน.....	11
บทที่ 3. การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข.....	14
3.1 การออกแบบตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมาน.....	14
3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข.....	18
3.2.1 สมการและโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข.....	19
3.2.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขด้วยวิธี การแปลงเชิงเส้นคู่.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4. การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด.....	28
4.1 ทฤษฎีการออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด.....	28
4.1.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	28
4.1.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	29
4.1.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	31
4.2 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 2.....	32
4.2.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	32
4.2.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	33
4.1.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	34
4.2.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 2.....	35
4.2.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	35
4.3 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่สูงขึ้น.....	38
4.4 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4.....	39
4.4.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	39
4.4.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	40
4.4.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	41
4.4.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4.....	42
4.4.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	43
4.5 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 6.....	44
4.5.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	44
4.5.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	46
4.5.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	47
4.5.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 6.....	48
4.5.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	48
4.6 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 8.....	50
4.6.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	50
4.6.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	51
4.6.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8.....	53
4.6.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	54
4.7 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10.....	56
4.7.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	56
4.7.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	57
4.7.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	58
4.7.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10.....	59
4.7.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	60
4.8 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12.....	62
4.8.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	62
4.8.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	63
4.8.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน.....	64
4.8.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12.....	65
4.8.5 การทดลองและผลการทดลอง.....	66
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก ก. บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 DSP Starter Kit.....	71
ภาคผนวก ข. การเผยแพร่งานวิจัย.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงผลของการแปลงแซด.....	9
ตารางภาคผนวกที่	
1. แสดงค่ารีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่า.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการสุมตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน.....	3
2.2 แสดงสัญญาณสุมตัวอย่าง.....	4
2.3 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณการสุมตัวอย่าง.....	5
2.4 แสดงตำแหน่งการวางโพลและซีโรดังสมการที่ (2.28).....	11
3.1 แสดงผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	15
3.2 แสดงผลตอบสนองความถี่ของขนาดกำลังสองของตัวกรองสัญญาณ แบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีอันดับต่างกัน.....	15
3.3 แสดงตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านตามสมการที่ (3.6) และ (3.7).....	17
3.4 แสดงตำแหน่งโพลของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 2.....	18
3.5 แสดงไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองเชิงเลขพื้นฐาน.....	18
3.6 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัวที่ใช้เป็นส่วนประกอบของ ตัวกรองเชิงเลข.....	19
3.7 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบตรง I.....	20
3.8 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบตรง II.....	21
3.9 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข ที่มีโครงสร้างในแบบขนาน.....	21
3.10 แสดงโครงสร้างย่อยของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบขนาน.....	22
3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อยู่บนระนาบเอสกับค่าที่อยู่บนระนาบแซด.....	24
3.12 แสดงปรากฏการณ์หาค่าที่มีผลต่อผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองเชิงเลข.....	26
4.1 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด.....	29
4.2 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรเพื่อหาค่าเบนคี่วัดของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน.....	30
4.3 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.18).....	33
4.4 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.20).....	34
4.5 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.22).....	34
4.6 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2.....	35
4.7 แสดงฮาร์ดแวร์ทั้งหมดที่สร้างขึ้นและบอร์ดประมวลผลสัญญาณ ดิจิทัล TMS320C31.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงฮาร์ดแวร์ของการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ที่ต่อกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก.....	36
4.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง.....	37
4.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองแถบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง.....	37
4.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง.....	37
4.12 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดที่มีโครงสร้าง แบบเรียงกัน.....	38
4.13 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดที่มีโครงสร้าง แบบขนาน.....	38
4.14 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.29).....	40
4.15 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.31).....	41
4.16 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.34).....	42
4.17 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4.....	43
4.18 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง.....	43
4.19 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองแถบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง.....	44
4.20 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง.....	44
4.21 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.47).....	45
4.22 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.49).....	46
4.23 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.52).....	47
4.24 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 6.....	48
4.25 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง.....	49
4.27 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง.....	49
4.28 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.57).....	51
4.29 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.59).....	52
4.30 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.62).....	53
4.31 แสดง โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8.....	54
4.32 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง.....	55
4.33 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง.....	55
4.34 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง.....	55
4.35 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.67).....	57
4.36 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.69).....	58
4.37 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.72).....	59
4.38 แสดง โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10.....	60
4.39 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง.....	61
4.40 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง.....	61
4.41 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง.....	61
4.42 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.77).....	63
4.43 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.79).....	64
4.44 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซกดังสมการที่ (4.82).....	65
4.45 แสดง โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง.....	67
4.47 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง.....	67
4.48 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอด ชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง.....	67
รูปภาคผนวกที่	
1. แสดงฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit .....	72
2. แสดงบล็อกไดอะแกรมของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit.....	73
3. แสดงการจัดแบ่งหน่วยความจำในโหมด Microcomputer/Boot Loader ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit.....	74
4. แสดงฟังก์ชันไดอะแกรมของชิป TLC32040.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหาและที่มาของการศึกษาวิจัย

โดยทั่วไปตัวกรองความถี่ที่สามารถให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน เรียกว่า ตัวกรองความถี่แบบไบควอดซึ่งสามารถออกแบบและสร้างได้ในเชิงอุปมานเท่านั้น ปัจจุบันได้มีการนำเสนอไว้หลายแบบด้วยกัน เช่น วงจรแอกทีฟไบควอดแบบ Tow-Thomas หรือ แบบ KHN [1] เป็นต้น ส่วนตัวกรองสัญญาณเชิงเลข (Digital Filter) ปัจจุบันมีโครงสร้างที่สามารถออกแบบให้ทำงานได้เฉพาะอย่างคือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน กรองแถบความถี่ผ่านอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถออกแบบให้โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขหนึ่งโครงสร้างมีผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกันได้ คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยวิธีการออกแบบใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโร (Pole and Zero) ลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ซึ่งผลที่ได้สามารถให้ผลตอบสนองทางความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน และกรองแถบความถี่ผ่าน และมีการออกแบบและสร้างให้มีอันดับ (Order) ของตัวกรองสัญญาณเชิงเลขที่สูงขึ้น เพื่อให้มีผลตอบสนองความถี่ใกล้เคียงกับอุดมคติ โดยการจัดโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขใหม่ในการออกแบบและจำลองการทำงานใช้โปรแกรม MATLAB ส่วนการสร้างจริงใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 DSP Starter Kit (DSK)

### 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

นำเสนอการออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค โดยกำหนดให้ความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่สูงผ่านและตัวกรองความถี่ต่ำผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรอง

แถบความถี่ผ่าน ซึ่งทำให้การกำหนดตำแหน่งโพลบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซคของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ส่วนการกำหนดตำแหน่งซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซคจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกรองความถี่แต่ละแบบ ซึ่งจะทำได้สมการในรูปแซคโดเมน (Z-Domain) ของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 รูปแบบโดยสมการเทอมส่วน (Denominator) เป็นสมการที่บ่งบอกถึงตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 รูปแบบมีค่าเท่ากัน ส่วนสมการเทอมเศษ (Numerator) เป็นสมการที่บ่งบอกถึงตำแหน่งซีโรของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 รูปแบบมีค่าต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติตัวกรองความถี่แต่ละแบบ ดังนั้นการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไคควอดท์ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน จึงต้องจัดรูปสมการใหม่แล้วนำมาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขที่ต่อแบบเรียงกัน (Cascade) หรือต่อแบบขนาน (Parallel) แล้วนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

#### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

- 1.4.1 ออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบไคควอดท์ โดยในการออกแบบกำหนดให้ความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่สูงผ่านและตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน มีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน
- 1.4.2 ออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข โดยทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมาก่อน จากนั้นทำการแปลงให้เป็นตัวกรองเชิงเลข โดยใช้วิธีการแปลงเชิงเส้นคู่
- 1.4.3 ออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านโดยการกำหนดตำแหน่งโพลบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ให้ตรงกับตำแหน่งโพล ของตัวกรองความถี่ต่ำที่ได้จากการออกแบบในข้อ 1.4.2 ส่วนการกำหนดตำแหน่งซีโรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกรองแต่ละแบบ
- 1.4.4 ออกแบบโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไคควอดท์ โดยนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบที่ได้จากการออกแบบในข้อ 1.4.2 และ ข้อ 1.4.3 มาจัดรูปสมการใหม่แล้วเขียนเป็น โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไคควอดท์
- 1.4.5 สร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไคควอดท์ จากโครงสร้างที่ออกแบบไว้ในข้อ 1.4.4 โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31
- 1.4.6 ทดสอบการทำงานและบันทึกผลการทดลอง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก (Dynamic Signal Analyzer)
- 1.4.7 สรุปผลการทดลองรวมทั้งข้อเสนอนแนะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

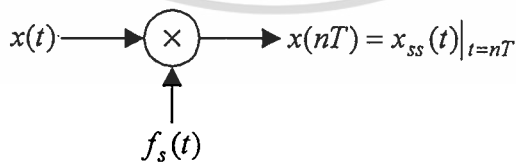
# ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข

### 2.1 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง

ในการเปลี่ยนสัญญาณเชิงอุปมานไปเป็นสัญญาณเชิงเลขนั้น จำเป็นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งความถี่ในการสุ่มตัวอย่างโดยที่ไม่ทำให้สัญญาณสูญเสียข้อมูลที่สำคัญไปนั้นต้องเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง [2-4] (Sampling Theory) ของเชนนอน (Shannon) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ถ้าสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$  ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ  $f_0$  แล้ว จะสามารถทำการสุ่มตัวอย่างโดยสัญญาณที่ได้ไม่สูญเสียข้อมูลที่สำคัญก็ต่อเมื่อความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง  $f_s$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่  $f_0$

$$f_s \geq 2f_0 \quad (2.1)$$

โดยทั่วไปอาจทำการสุ่มตัวอย่างด้วยความถี่  $f_{sn} = 2f_0$  พอดี ซึ่งค่าความถี่นี้เรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency) และคาบเวลา  $T_n = 1/2f_0$  นี้ เรียกว่า ช่วงเวลาสุ่มตัวอย่างไนควิสต์ (Nyquist Interval) แต่ในทางปฏิบัติเพื่อหลีกเลี่ยงผลของปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) ที่อาจเกิดจากการสุ่มตัวอย่าง จึงมักใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง  $f_s$  มากกว่าค่าความถี่ไนควิสต์  $f_{sn}$  ขึ้นไป ส่วนจะมีค่ามากกว่าเท่าใดนั้นขึ้นกับลักษณะงานไม่ได้มีการกำหนดค่าที่แน่นอน

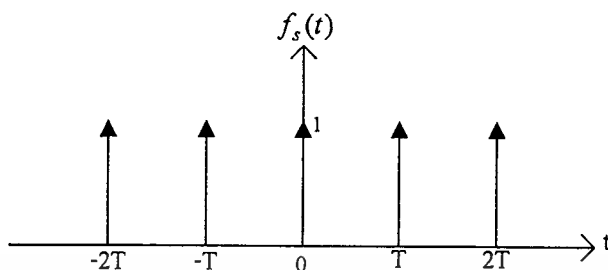


รูปที่ 2.1 แสดงการสุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน

รูปที่ 2.1 แสดงการสุ่มตัวอย่างในโดเมนเวลาซึ่งก็คือการคูณสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$  กับลำดับของอิมพัลส์หนึ่งหน่วย  $f_s(t)$  โดยที่อิมพัลส์แต่ละตัวสมมุติให้มีความห่างเท่ากับ  $T$  วินาที ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2.2)$$

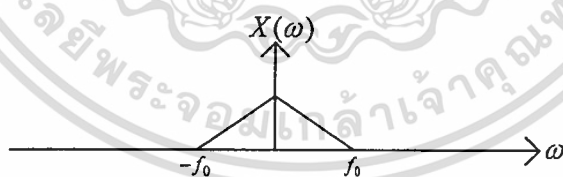


รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณสุ่มตัวอย่าง

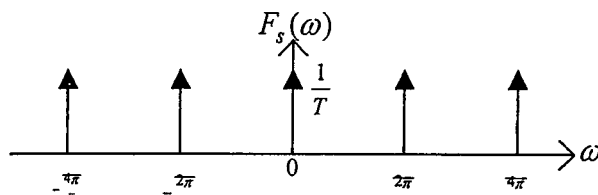
และเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ เพื่อทำการหาค่าสเปกตรัมความถี่ของ  $f_s(t)$  จะได้

$$F_s(\omega) = \mathcal{F}\{f_s(t)\} = \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2.3)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ  $f_s(t)$  เป็นอิมพัลส์ที่วางตัวห่างเท่าๆ กัน ไปบนแกนความถี่เช่นกัน ดังรูปที่ 2.3 (b)

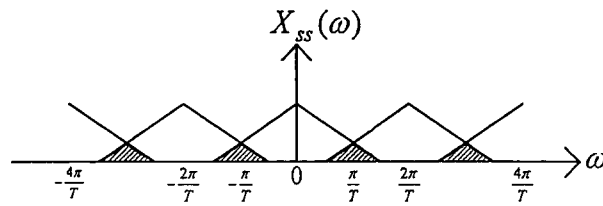


(a) สเปกตรัมของสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$



(b) สเปกตรัมของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง  $f_s(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง  $x_{ss}(t)$

### รูปที่ 2.3 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง

ถ้าให้  $x_{ss}(t)$  เป็นสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้น

$$x_{ss}(t) = f_s(t) \cdot x(t) \quad (2.4)$$

และถ้าให้  $X(\omega)$  เป็นสเปกตรัมความถี่ของ  $x(t)$  เนื่องจากในโดเมนเวลาสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างเป็นการคูณกันของสองสัญญาณ ดังนั้นในโดเมนความถี่จึงเป็นการทำคอนโวลูชัน (Convolution) ของสเปกตรัมของ  $f_s(t)$  และ  $x(t)$

$$X_{ss}(\omega) = F_s(\omega) * X(\omega) \quad (2.5)$$

การคอนโวลูชันนี้แสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.3 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง  $X_{ss}(\omega)$  เป็นการนำสเปกตรัมของ  $X(\omega)$  มาวางเรียงห่างเท่าๆ กันไปตลอดบนแกนความถี่  $\omega$  ซึ่งจากรูปที่ 2.3 (c) จะเห็นว่า ถ้าความถี่ของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง  $f_s(t)$  มีค่าน้อยกว่าความถี่ในควิสด์จะทำให้ช่วงห่างของแต่ละกลุ่มของสเปกตรัมเข้ามาเกทับกัน ผลนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนไปของสเปกตรัมของสัญญาณเดิมซึ่งผลนี้มีชื่อเรียกว่า ผลการเอเลตซิง (Aliasing Effect) นอกจากนี้ รูปที่ 2.3 ยังแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขจะมีผลตอบสนองความถี่ที่มีลักษณะเป็นคาบ คือ เริ่มซ้ำค่าเดิมที่จุดที่มีความถี่เป็น  $2\pi/T$  หรือ  $f_s/2$  ซึ่งความถี่นี้เรียกว่า ความถี่พับ ซึ่งการที่ผลตอบสนองความถี่มีลักษณะเป็นคาบก็เนื่องมาจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนั่นเอง

## 2.2 สมการผลต่างสลับเนื่อง

ในการวิเคราะห์ระบบเชิงอุปมาน คุณสมบัติของระบบในโดเมนเวลา จะสามารถเขียนอธิบายโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) เช่นเดียวกันในระบบเชิงเลขก็จะมีสมการผลต่างสลับเนื่อง (Difference Equation) ไว้ใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของระบบในโดเมนเวลา ซึ่งสมการผลต่างสลับเนื่องอันดับที่  $n$  สามารถเขียนได้เป็น

$$y(n) = \sum_{k=0}^n a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^m b_k y(n-k) \quad (2.6)$$

โดยที่  $x(n)$  เป็นลำดับสัญญาณขาเข้า  $y(n)$  เป็นลำดับสัญญาณขาออกและ  $a_k, b_k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์สมการผลต่างสามารถแสดงในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คุณสมบัติการห่วงเวลาของการแปลงแซด คือ

$$a_k x(n) \leftrightarrow a_k X(z) \quad (2.7)$$

$$a_k x(n-k) \leftrightarrow a_k z^{-k} X(z) \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$Y(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^{-k} X(z) - \sum_{k=1}^m b_k z^{-k} Y(z) \quad (2.9)$$

จัดรูปสมการเพื่อเขียนให้อยู่ในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^n a_k z^{-k}}{\left(1 + \sum_{k=1}^m b_k z^{-k}\right)} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การแปลงแซด

การแปลงแซด (Z-Transform) [5-7] ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถนิยามอยู่ในรูปของอนุกรมอนันต์ (Power Series) ดังสมการที่ (2.11) เรียกสมการที่ (2.11) นี้ว่า การแปลงแซดแบบตรง (Direct Z-Transform)

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $z$  เป็นตัวแปรเชิงซ้อน (Complex Variable)

$x(n)$  เป็นลำดับสัญญาณ (Sequence Signal)

แต่สำหรับระบบแบบคอกซอล การแปลงแซดของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.12) เรียกสมการที่ (2.12) นี้ว่า การแปลงแซดด้านเดียว (One-Side Z-Transform)

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.12)$$

การแปลงแซดของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องเขียนแทนได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังสมการที่ (2.13)

$$X(z) = Z\{x(n)\} \quad (2.13)$$

และจากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะเห็นได้ว่าผลการแปลงแซด ก็คือ อนุกรมอนันต์ ดังนั้นจะมีค่าแซด ที่ทำให้  $X(z)$  หาค่าตอบได้เรียกค่าแซดนี้ว่า ขอบเขตการลู่เข้า (Region of Convergence) โดยค่าแซดนี้จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน

### 2.3.1 คุณสมบัติของการแปลงแซด

1. คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity Property) ดังสมการที่ (2.14)

$$Z[ax_1(n) + bx_2(n)] = aX_1(z) + bX_2(z) \quad (2.14)$$

2. คุณสมบัติการเลื่อน (Shift Property)

$$\text{กำหนดให้ } y(n) = x(n - m) \quad m \geq 0$$

การแปลงแซดของ  $y(n) = Y(z)$  เขียนแทนได้ ดังสมการที่ (2.15) และ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)z^{-n} \quad (2.15)$$

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.16)$$

กำหนดให้ระบบที่กำลังพิจารณาเป็นระบบแบบคอคชอล ดังนั้นสมการที่ (2.16) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (2.17) - (2.20)

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.17)$$

$$Y(z) = z^{-m} [x(0) + x(1)z^{-1} + x(2)z^{-2} + \dots + x(n)z^{-n}] \quad (2.18)$$

$$Y(z) = z^{-m} \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.19)$$

$$Y(z) = z^{-m} X(z) \quad (2.20)$$

### 3. คุณสมบัติการประสาน (Convolution Property)

จากสมการผลการประสาน

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \quad (2.21)$$

$$y(n) = h(n) \otimes x(n) \quad (2.22)$$

ทำการแปลงแซด  $x(n), h(n)$  ให้เป็น  $X(z), H(z)$  จะได้การประสาน ดังสมการที่ (2.23)

$$Y(z) = H(z).X(z) \quad (2.23)$$

ซึ่งผลการแปลงแซดของฟังก์ชันสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของการแปลงแซค

Entry number	Discrete – time Sequence $x(n), n \geq 0$	$z$ -transform $X(z)$	Region of convergence of $X(z)$
1	$k\delta(n)$	$k$	everywhere
2	$k$	$\frac{kz}{z-1}$	$ z  > 1$
3	$kn$	$\frac{kz}{(z-1)^2}$	$ z  > 1$
4	$kn^2$	$\frac{kz(z+1)}{(z-1)^3}$	$ z  > 1$
5	$ke^{-\alpha n}$	$\frac{kz}{z-e^{-\alpha}}$	$ z  > e^{-\alpha}$
6	$kne^{-\alpha n}$	$\frac{kze^{-\alpha}}{(z-e^{-\alpha})^2}$	$ z  > e^{-\alpha}$
7	$1-e^{-\alpha n}$	$\frac{z(1-e^{-\alpha})}{z^2-z(1+e^{-\alpha})+e^{-\alpha}}$	$ z  > e^{-\alpha}$
8	$\cos(\alpha n)$	$\frac{z^2-z \cosh \alpha}{z^2-2z \cosh \alpha+1}$	$ z  > 1$
9	$\sin(\alpha n)$	$\frac{z \sin \alpha}{z^2-2z \cos \alpha+1}$	$ z  > 1$
10	$e^{-\alpha n} \sin(\alpha n)$	$\frac{ze^{-\alpha} \sin \alpha}{z^2-2ze^{-\alpha} z \cos \alpha+e^{-2\alpha}}$	$ z  > e^{-\alpha}$
11	$e^{-\alpha n} \cos(\alpha n)$	$\frac{ze^{-\alpha}(ze^{\alpha}-\cos \alpha)}{z^2-2ze^{-\alpha} \cos \alpha+e^{-2\alpha}}$	$ z  > e^{-\alpha}$
12	$\cosh(\alpha n)$	$\frac{z^2-z \cosh \alpha}{z^2-2z \cosh \alpha+1}$	$ z  > \cosh \alpha$
13	$\sinh(\alpha n)$	$\frac{z \sinh \alpha}{z^2-2z \cosh \alpha+1}$	$ z  > \sinh \alpha$
14	$k\alpha^n$	$\frac{kz}{(z-\alpha)^2}$	$ z  > \alpha$
15	$kn\alpha^n$	$\frac{k\alpha z}{(z-\alpha)^2}$	$ z  > \alpha$
16	$2 c  p ^n \cos(n\angle p + \angle c)$	$\frac{cz}{z-p} + \frac{c^*z}{z-p^*}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 รูปเศษส่วนของการแปลงแซด

สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  หรือระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  $y(n)$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ได้โดยการแปลงแซดค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  นี้เมื่อจัดให้อยู่ในรูปเศษส่วน สามารถบอกรายละเอียดคุณลักษณะของสัญญาณและระบบได้ เช่น ทราบถึงตำแหน่งของโพลและซีโร บนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด โดยการนำค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ไปแก้สมการหาค่า  $z$  และนำคำตอบของ  $z$  ไปเขียนลงในระนาบแซดเชิงซ้อน (Complex Z-Plane) ค่า  $z$  เป็นคำตอบของเศษ เรียกว่า ซีโร แทนด้วยสัญลักษณ์  $\circ$  ค่า  $z$  ที่เป็นคำตอบของส่วน เรียกว่า โพล แทนด้วยสัญลักษณ์  $\times$  ตัวอย่าง หาค่าตำแหน่งโพลและซีโรของสัญญาณ

$$x(n) = \begin{cases} a^n & \text{for } 0 \leq n \leq M-1 \\ 0 & \text{for elsewhere} \end{cases}$$

จากที่โจทย์กำหนดพบว่า  $n$  เริ่มต้นจาก 0 ถึง  $M-1$  จะได้สมการของการแปลงแซด ดังสมการที่ (2.24)

$$X(z) = \sum_{n=0}^{M-1} a^n z^{-n} \quad (2.24)$$

$$X(z) = \sum_{n=0}^{M-1} (az^{-1})^n \quad (2.25)$$

$$X(z) = 1 + \frac{a}{z} + \left(\frac{a}{z}\right)^2 + \left(\frac{a}{z}\right)^3 + \dots + \left(\frac{a}{z}\right)^{M-1} \quad (2.26)$$

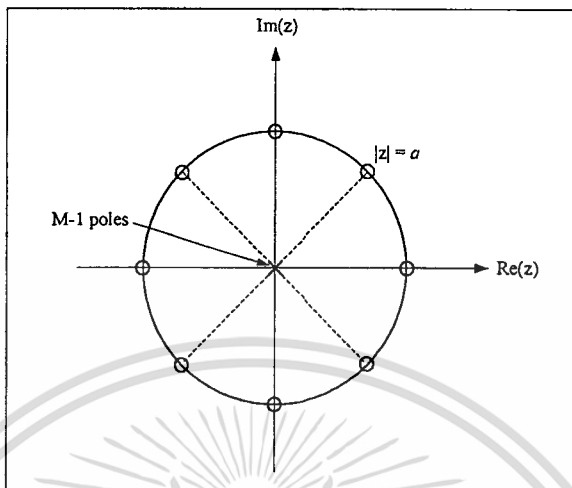
จัดสมการที่ (2.26) ได้ใหม่ [2,5] ดังสมการที่ (2.27)

$$X(z) = \frac{1 - (az^{-1})^M}{1 - az^{-1}} \quad (2.27)$$

นำ  $z^M$  คูณตลอดทั้งเศษและส่วน

$$X(z) = \frac{z^M - a^M}{z^M - az^{M-1}} = \frac{z^M - a^M}{z^{M-1}(z - a)} \quad (2.28)$$

นำสมการที่ (2.28) เฉพาะเศษมาเขียนเป็นตำแหน่งซีโร และเฉพาะส่วนมาเขียนเป็นตำแหน่งโพลดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งการวางโพลและซีโรดังสมการที่ (2.28)

### 2.4 การแปลงแซดผกผัน

เป็นการแปลง  $X(z)$  กลับเป็น  $x(n)$  ทำได้ 3 วิธี สามารถหาศึกษาได้จาก [5-8] ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้นำเสนอการแปลงแซดผกผันด้วยวิธีแยกเศษส่วนย่อย (Partial Fraction Expansion) ซึ่งทำได้โดยจัดสมการ  $X(z)$  ให้อยู่ในรูปเศษส่วนย่อย จากนั้นนำสมการที่จัดรูปได้แปลงให้เป็น  $x(n)$  โดยใช้ตารางที่ 2.1

พิจารณาสมการที่ (2.29)

$$X(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}} \tag{2.29}$$

การจัดรูปสมการจะเป็นไปตามตำแหน่งของโพลในระนาบแซดซึ่งแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

1. กรณีโพลมีตำแหน่งไม่ซ้ำกัน สมการที่ (2.29) สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ (2.30)

$$X(z) = B_0 + \frac{C_1}{1 - p_1 z^{-1}} + \frac{C_2}{1 - p_2 z^{-1}} + \dots + \frac{C_M}{1 - p_M z^{-1}} \tag{2.30}$$

$$X(z) = B_0 + \frac{C_1 z}{z - p_1} + \frac{C_2 z}{z - p_2} + \dots + \frac{C_M z}{z - p_M} \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(z) = B_0 + \sum_{k=1}^M \frac{C_k z}{z - p_k} \quad (2.32)$$

2. กรณีโพลอยู่มากกว่าหนึ่งตัวอยู่ตำแหน่งซ้ำกัน สมการที่ (2.29) สามารถจัดรูปดังสมการที่ (2.33)

$$X(z) = \sum_{i=1}^m \frac{D_i}{(z - p_k)^i} \quad (2.33)$$

และค่า  $D_i$  หาได้จากสมการที่ (2.34)

$$D_i = \frac{1}{(m-i)!} \frac{d^{m-i}}{dz^{m-i}} [(z - p_k)^m X(z)]_{z=p_k} \quad (2.34)$$

แต่ถ้าระบบหรือลำดับสัญญาณมีโพลมากกว่า 1 ตัว และตำแหน่งของโพลอยู่ในตำแหน่งที่ซ้ำกันและไม่ซ้ำกัน ตัวอย่างเช่น ระบบมีโพลทั้งหมด 3 ตัว มีโพล 2 ตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกันส่วนอีก 1 ตัวอยู่คนละตำแหน่งการจัดสมการในรูปเศษส่วนย่อยก็จะใช้สมการที่ (2.32) และ (2.33) รวมกัน ตัวอย่าง จงแปลงแซดพหุคูณของสัญญาณดังสมการที่ (2.35) โดยใช้วิธีแยกเศษส่วนย่อย

$$X(z) = \frac{z^{-1}}{1 - 0.25z^{-1} - 0.375z^{-2}} \quad (2.35)$$

ทำกำลังของ  $z$  ในสมการที่ (2.35) ให้เป็นบวกโดยนำ  $z^2$  คูณตลอด

$$X(z) = \frac{z}{z^2 - 0.25z - 0.375} \quad (2.36)$$

ทำการแยกเศษส่วนย่อยได้ดังสมการที่ (2.37)

$$\frac{X(z)}{z} = \frac{1}{(z - 0.75)(z + 0.5)} = \frac{C_1}{z - 0.75} + \frac{C_2}{z + 0.5} \quad (2.37)$$

กำหนดให้สมการที่ (2.37) มีค่าเท่ากับ  $F(z)$  ดังสมการที่ (2.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(z) = \frac{1}{(z-0.75)(z+0.5)} = \frac{C_1}{z-0.75} + \frac{C_2}{z+0.5} \quad (2.38)$$

หา  $C_1$  นำ  $(z-0.75)$  คูณตลอดในสมการที่ (2.38) จะได้

$$\frac{1}{z+0.5} = C_1 + \frac{C_2(z-0.75)}{(z+0.5)} \quad (2.39)$$

แทนค่า  $z$  เท่ากับ  $0.75$  ลงในสมการที่ (2.39) ได้ค่า  $C_1$  ดังสมการที่ (2.40)

$$C_1 = \frac{1}{0.75+0.5} = \frac{4}{5} = 0.8 \quad (2.40)$$

ส่วนค่า  $C_2$  สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกับการหาค่า  $C_1$  ได้ค่า  $C_2$  ดังสมการที่ (2.41)

$$C_2 = \frac{1}{-0.5-0.75} = -\frac{4}{5} = -0.8 \quad (2.41)$$

แทนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ลงในสมการที่ (2.37) จะได้

$$X(z) = \frac{0.8z}{z-0.75} - \frac{0.8z}{z+0.5} \quad (2.42)$$

ใช้ตารางที่ 2.1 แปลง  $X(z)$  ในสมการที่ (2.42) กลับเป็น  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ (2.43) และ (2.44)

$$x(n) = Z^{-1} \left[ \frac{0.8z}{z-0.75} - \frac{0.8z}{z+0.5} \right] \quad (2.43)$$

$$x(n) = 0.8 \left( (0.75)^n - (-0.5)^n \right) \quad \text{เมื่อ } n > 0 \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

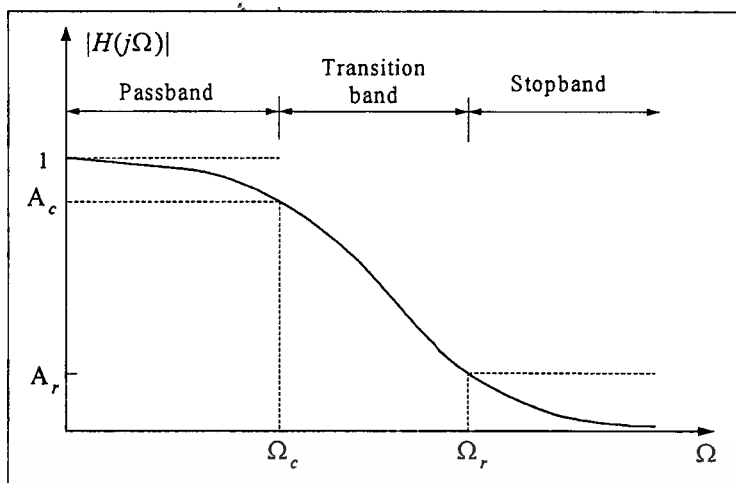
## บทที่ 3

### การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขนั้น โดยทั่วไปมีวิธีการออกแบบที่สำคัญอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการแรกออกแบบในโดเมนของแซคโดยตรง และวิธีการที่สองออกแบบโดยอิงตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมาน โดยทำการแปลงจากฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเชิงอุปมานที่มีเสถียรภาพดี วิธีการนี้หากใช้การแปลงที่ดี การออกแบบก็ไม่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของวงจรกรองอีก และได้ผลตอบสนองแอมพลิจูดตามที่ต้องการ ดังนั้นสิ่งสำคัญก็คือ การแปลงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานให้กลายเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข ปกติวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเอส ขณะที่วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขจะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรแซค ส่วนวิธีการออกแบบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการที่สอง ดังนั้นขั้นตอนในการออกแบบจึงแบ่งได้เป็นสองขั้นตอน คือ ออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานให้มีเสถียรภาพที่ดี จากนั้นจึงแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานที่ได้ไปเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการแปลงเชิงเส้นคู่ (Bilinear Transform)

#### 3.1 การออกแบบตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมาน

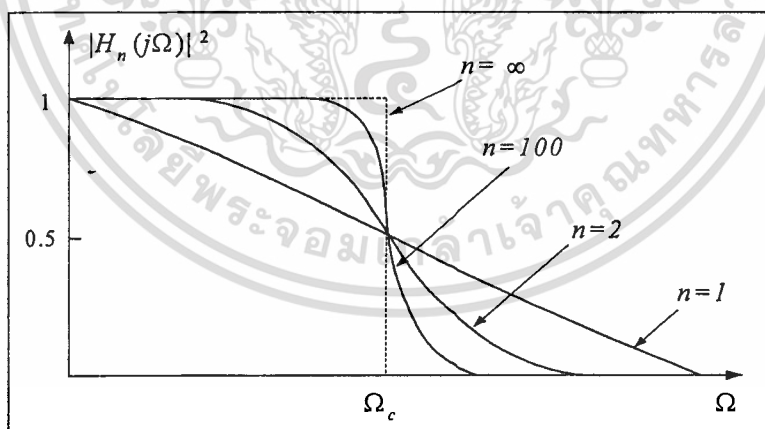
การออกแบบตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมานซึ่งเป็นการประมาณการเพื่อหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรอง 3 รูปแบบ [7-9] คือ แบบบัตเตอร์เวิร์ท แบบเชบีเชฟและแบบเอลลิปติก ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้การออกแบบตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมานแบบบัตเตอร์เวิร์ท ซึ่งในการออกแบบตัวกรองสัญญาณให้มีคุณสมบัติตามต้องการนั้น จะทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนซึ่งมีผลตอบสนองความถี่แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยช่วงความถี่  $0 - \Omega_c$  เรียกช่วงความถี่นี้ว่า แถบผ่าน (Pass-band) ช่วงความถี่  $\Omega_c - \Omega_p$  เรียกช่วงความถี่นี้ว่า แถบเปลี่ยน (Transition-band) ช่วงความถี่  $\Omega_p - \alpha$  เรียกช่วงความถี่นี้ว่า แถบหยุด (Stop-band) จากนั้นจึงทำการแปลงคุณสมบัติให้เป็นตัวกรองที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 แสดงผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ขนาดกำลังสองของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีอันดับ (Order)  $n$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.1) และรูปแสดงผลตอบสนองความถี่ของขนาดกำลังสองที่มีอันดับต่างกันดังรูปที่ 3.2

$$|H_n(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2n}} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 แสดงผลตอบสนองความถี่ของขนาดกำลังสองของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีอันดับต่างกัน

จากสมการที่ (3.1) และรูปที่ 3.2 สามารถอธิบายถึงคุณสมบัติของตัวกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท [9] ได้ดังนี้

1. ค่า  $|H_n(j\Omega)|^2_{\Omega=0} = 1$  สำหรับทุกค่าของ  $n$

เอกสารนี้เป็น 2. ค่า  $|H_n(j\Omega)|^2_{\Omega=\Omega_c} = 0.5$  สำหรับทุกค่าของ  $n$  นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่า  $|H_n(j\Omega)|^2$  จะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ (Monotonically Decreasing) และมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่อนันต์
4. จำนวนอันดับ (Order)  $n$  มีค่าสูงขึ้นผลตอบสนองความถี่จะเหมือนกับผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ
5. ผลตอบสนองความถี่ของขนาดจะราบเรียบที่สุด (Maximally Flat) ที่รอบจุด  $\Omega = 0$  กล่าวในเชิงคณิตศาสตร์คือ ค่าอนุพันธ์ทุกอันดับ จนถึงอันดับที่  $n$  จะมีค่าเป็นศูนย์ที่  $\Omega = 0$  จากสมการที่ (3.1) จะได้

$$|H_n(j\Omega)|^2 = H_n(j\Omega) \cdot H_n(-j\Omega) = \frac{1}{1 + \Omega^{2n}} \quad (3.2)$$

กำหนดให้  $s = j\Omega$  จะได้

$$H_n(s) \cdot H_n(-s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{j}\right)^{2n}} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) หาค่าแห่งโพลได้โดยการหาราก (Roots) ของเทอมส่วนจะได้

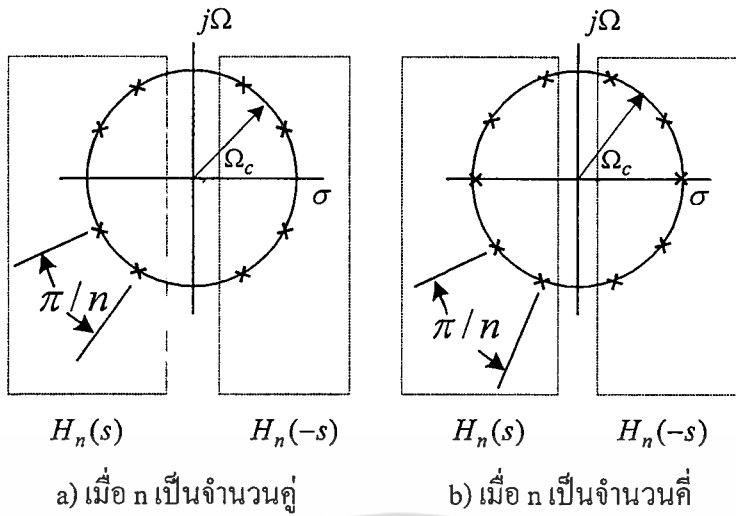
$$1 + \left(\frac{s}{j}\right)^{2n} = 0 \quad (3.4)$$

หรือ 
$$s^{2n} = -1(j)^{2n} = (-1)^{n+1} \quad (3.5)$$

จากสมการที่ (3.5) สามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี คือ เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนคี่ (Odd) และ  $n$  เป็นจำนวนคู่ (Even) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) และดังรูปที่ 3.3

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนคี่ :  $s_k = 1 \angle k\pi/n$  เมื่อ  $k = 0, 1, 2, \dots, 2n-1$  (3.6)

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนคู่ :  $s_k = 1 \angle \pi/2n + k\pi/n$  เมื่อ  $k=0, 1, 2, \dots, 2n-1$  (3.7)



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านตามสมการที่ (3.6) และ (3.7)

จากสมการที่ (3.3) และรูปที่ 3.3 ตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่สามารถนำไปสร้างจริงได้ ตำแหน่งของโพลจะต้องอยู่ด้านซ้ายมือของระนาบเอส (S-Plane) เท่านั้น ดังนั้นจะได้

$$H_n(s) = \frac{1}{\prod_{Lp(Pole)} (s - s_k)} = \frac{1}{B_n(s)} \tag{3.8}$$

ตัวอย่าง หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 2 หาตำแหน่งโพลได้จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$s_k = 1 \angle \pi/2n + k\pi/n \quad \text{เมื่อ } k = 0, 1, 2, 3$$

เมื่อ  $k = 0$

$$s_k = 1 \angle \pi/4$$

เมื่อ  $k = 1$

$$s_k = 1 \angle 3\pi/4$$

เมื่อ  $k = 2$

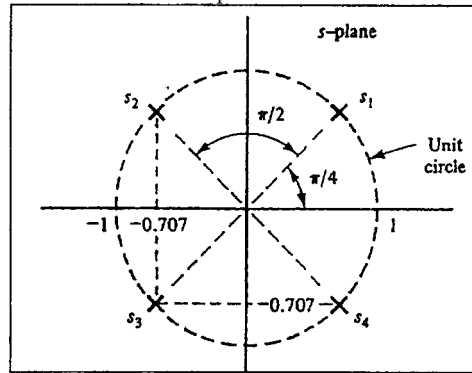
$$s_k = 1 \angle 5\pi/4$$

เมื่อ  $k = 3$

$$s_k = 1 \angle 7\pi/4$$

จะได้ตำแหน่งโพลของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถนำไปสร้างจริงได้ตำแหน่งโพลจะต้องอยู่ด้านซ้ายมือของระนาบเอสเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งโพลของตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ธอันดับที่ 2

จากสมการที่ (3.8) จะได้

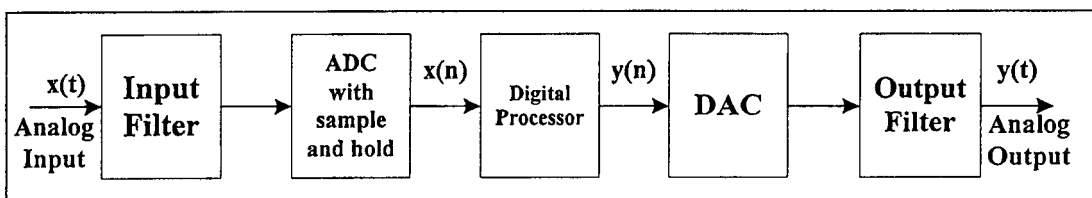
$$H_2(s) = \frac{1}{(s-s_2)(s-s_3)} \quad (3.9)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{[s - (-0.707 - j0.707)][s - (-0.707 + j0.707)]} \quad (3.10)$$

$$H_2(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (3.11)$$

### 3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข

ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข เป็นตัวกรองรูปแบบหนึ่งที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้น โดยวงจรดิจิทัล มีไดอะแกรมการทำงาน ดังรูปที่ 3.5 จากรูปสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$  เป็นสัญญาณอินพุทของตัวกรอง สัญญาณนี้จะถูกส่งผ่านวงจรแปลงสัญญาณเชิงอุปมานให้เป็นสัญญาณเชิงเลข  $x(n)$  และสัญญาณเชิงเลขนี้จะถูกส่งเข้าไปคำนวณในหน่วยประมวลผล ผลที่ได้จากการคำนวณยังคงเป็นสัญญาณเชิงเลข  $y(n)$  จากนั้นจะถูกส่งผ่านมายังวงจรแปลงสัญญาณเชิงเลขให้เป็นสัญญาณเชิงอุปมาน ได้สัญญาณเอาต์พุทของตัวกรองเป็นสัญญาณเชิงอุปมาน  $y(t)$

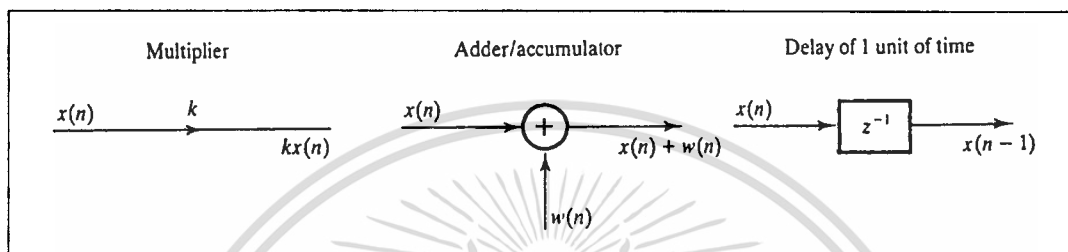


รูปที่ 3.5 แสดงไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองเชิงเลขพื้นฐาน

ตัวกรองเชิงเลขจะประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน (Basic Elements) ดังต่อไปนี้

- ตัวบวก (Adder)
- ตัวคูณ (Multiplier)
- ตัวหน่วง (Delay)

สัญลักษณ์ขององค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัว ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้ง 3 ตัวที่ใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองเชิงเลข

### 3.2.1 สมการและโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข

สมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข สามารถเขียนเป็นสมการ [6-8] ได้ดังต่อไปนี้

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^M a_k z^{-k}} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) สามารถนำไปเขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ (3.13)

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}} \quad (3.13)$$

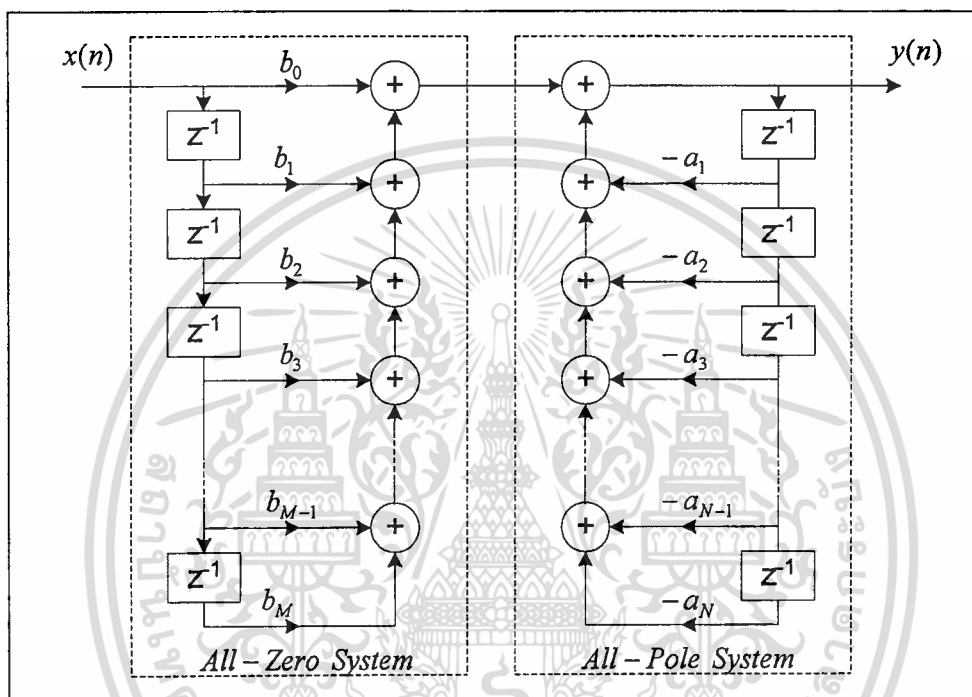
จากสมการที่ (3.13) นำไปจัดเทอมต่างๆ ใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างได้ ดังสมการที่ (3.16)

$$Y(z) = \sum_{K=0}^N b_K X(z) z^{-K} - \sum_{K=1}^M a_K Y(z) z^{-K} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการสื่อสารและโทรคมนาคมของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (ICTE) ภายใต้การสนับสนุนของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

$$y(n) = \sum_{k=0}^N b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M a_k y(n-k) \tag{3.16}$$

จากสมการที่ (3.16) สามารถนำมาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขใหม่เรียกว่า โครงสร้างแบบตรง I (Direct Form I) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบตรง I

นำ  $\frac{W(z)}{W(z)}$  คูณตลอดในสมการที่ (3.13) จะได้

$$H(z) = \frac{W(z)}{W(z)} \times \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}} \tag{3.17}$$

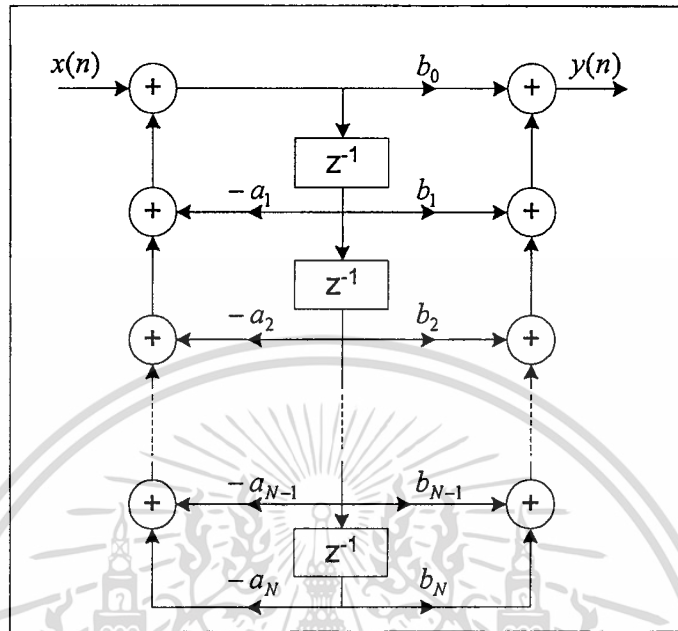
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{W(z)}{W(z)} \times \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}} \tag{3.18}$$

$$X(z) = W(z) + a_1 W(z)z^{-1} + \dots + a_M W(z)z^{-M} \tag{3.19}$$

$$W(z) = X(z) - a_1 W(z)z^{-1} - \dots - a_M W(z)z^{-M} \tag{3.20}$$

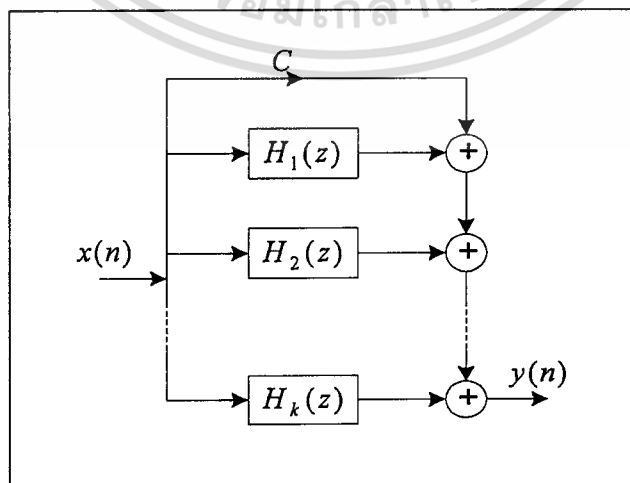
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $Y(z) = b_0 W(z) + b_1 W(z)z^{-1} + \dots + b_N W(z)z^{-N}$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.21) การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.20) และสมการที่ (3.21) สามารถนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลข เรียกว่า โครงสร้างแบบตรง II (Direct Form II) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบตรง II

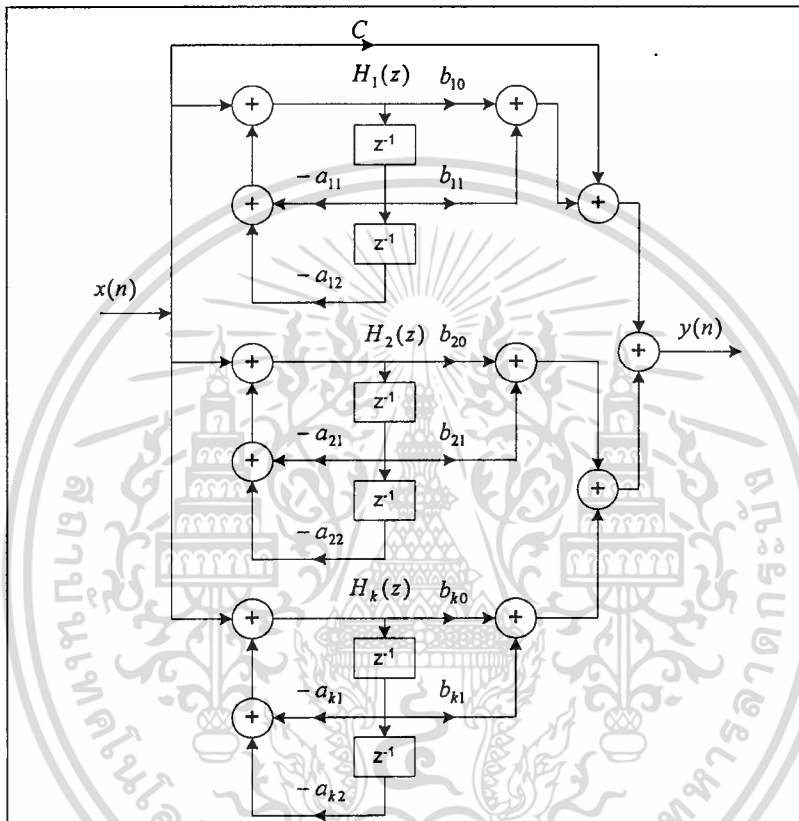
แต่เนื่องจากตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข ที่มีโครงสร้างแบบตรง I เมื่อมีจำนวนลำดับเพิ่มขึ้นจะมีค่าช่วงไดนามิก (Dynamic Range) ของสัมประสิทธิ์มากขึ้น กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ในเทอม a จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์ในเทอม b จะมีค่าน้อยทำให้เป็นปัญหาอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการประมวลผล ดังนั้นในการทดลองจึงได้มีการปรับโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขใหม่โดยจัดให้มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขที่มีโครงสร้างในแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนานนี้จะประกอบด้วย  $H_1(z), H_2(z), \dots, H_k(z)$  และภายใน  $H(z)$  แต่ละตัวนี้จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.10 ในการจัดโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขให้มีโครงสร้างเป็นแบบขนานนี้จะให้ผลดี คือย่านไดนามิกของสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยทำให้ไม่เป็นปัญหาเมื่อใช้กับทั้งตัวประมวลผลแบบจุดทศนิยมคงที่ (Fixed Point) หรือแบบจุดทศนิยมลอย (Floating Point)



รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างย่อยของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขแบบขนาน

### 3.2.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขด้วยวิธีการแปลงเชิงเส้นคู่

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานต้นแบบ เพื่อที่จะทำให้เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเชิงเลขมีวิธีการทำได้หลายวิธีสามารถศึกษาได้จาก [5-8] ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการแปลงเชิงเส้นคู่ ในการแปลงฟังก์ชันในเฮสโดเมนไปสู่แซดโดเมน สามารถกระทำได้โดยใช้กฎของแท็ปปีซอยด์คอลล (Trapezoidal) พิจารณาตัวกรองเชิงอุปมานที่มีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(s)$  ดังสมการที่ (3.22)

$$H(s) = \frac{b}{s+a} \quad (3.22)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ (3.22) นี้สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังสมการที่ (3.23)

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = bx(t) \quad (3.23)$$

แทนอนุพันธ์ในสมการที่ (3.23) และประมาณค่าด้วยแท่งสี่เหลี่ยมคี่คอด ดังสมการที่ (3.24)

$$y(t) = \int_{t_0}^t y'(\tau) d\tau + y(t_0) \quad (3.24)$$

เมื่อ  $y(t)$  แทนอนุพันธ์ของ  $y(t)$  การประมาณค่าของการอินทิเกรต ในสมการที่ (3.23) ด้วยกฎของแท่งสี่เหลี่ยมคี่คอดที่  $t = nT$  และ  $t_0 = nT - T$  จะได้

$$y(nT) = \frac{T}{2} \times [y'(nT) + y'(nT - T)] + y(nT - T) \quad (3.25)$$

ดังนั้นถ้าแทน  $t = nT$  ในสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (3.23) จะได้

$$y'(nT) = -ay(nT) + bx(nT) \quad (3.26)$$

นำสมการที่ (3.26) แทนลงในสมการที่ (3.25) และแทน  $y(n) = y(nT)$ ,  $x(n) = x(nT)$  จะได้

$$\left(1 + \frac{aT}{2}\right)y(n) - \left(1 - \frac{aT}{2}\right)y(n-1) = \frac{bT}{2}[x(n) + x(n-1)] \quad (3.27)$$

ใช้การแปลงแซดเปลี่ยนสมการผลต่างในสมการที่ (3.27) จะได้

$$\left(1 + \frac{aT}{2}\right)Y(z) - \left(1 - \frac{aT}{2}\right)z^{-1}Y(z) = \frac{bT}{2}(1 + z^{-1})X(z) \quad (3.28)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(bT/2)(1 + z^{-1})}{1 + (aT/2) - (1 - aT/2)z^{-1}} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = \frac{b}{\frac{2}{T} \times \frac{(1-z^{-1})}{(1+z^{-1})} + a} \quad (3.30)$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ (3.22) กับสมการที่ (3.30) จะได้

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \quad (3.31)$$

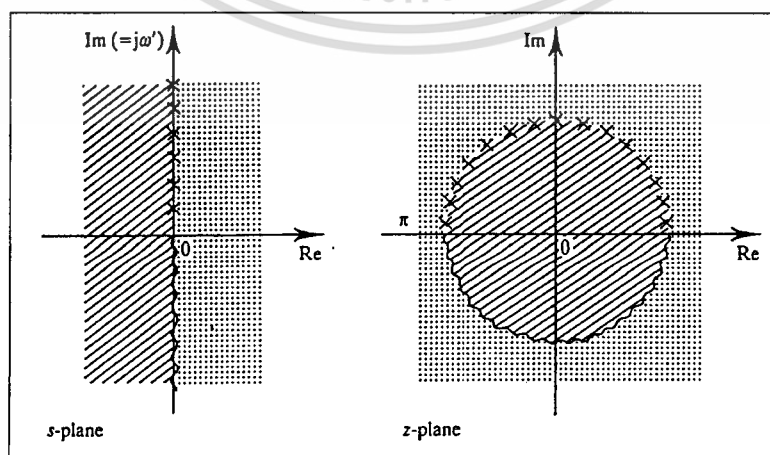
ในทางกลับกัน

$$z = \frac{2+sT}{2-sT} \quad (3.32)$$

โดย  $T$  คือ คาบของการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ

จากสมการที่ (3.31) และ (3.32) จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรเอสและแซด มีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น ทั้งในการแปลงจากตัวแปรเอสไปเป็นตัวแปรแซดและในทางกลับกันจากตัวแปรแซดไปเป็นตัวแปรเอส ด้วยเหตุนี้จึงเรียกการแปลงตัวแปรลักษณะนี้ว่า การแปลงเชิงเส้นคู่ โดยการแมป (Mapping) จากระนาบเอสไปสู่ระนาบแซด จะเป็นไปในลักษณะหนึ่งต่อหนึ่ง (One-to-One Mapping) และมีความสัมพันธ์ที่สำคัญ 3 ข้อคือ

1. ค่าบนครึ่งด้านบนขวาของระนาบเอสจะถูกส่งไปบนบริเวณภายนอกวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยบนระนาบแซด
2. ค่าบนแกน  $j\omega$  ของระนาบเอสจะถูกส่งไปบนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยบนระนาบแซด
3. ค่าบนครึ่งด้านซ้ายของระนาบเอส จะถูกส่งไปภายในวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อยู่บนระนาบเอสกับค่าที่อยู่บนระนาบแซด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ

$$z = re^{j\omega T} \quad (3.33)$$

$$s = \sigma + j\Omega \quad (3.34)$$

$$s = \frac{2}{T} \times \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + z^{-1})} \quad (3.35)$$

หรือ

$$s = \frac{2}{T} \times \frac{(z - 1)}{(z + 1)} \quad (3.36)$$

$$s = \frac{2}{T} \times \frac{(re^{j\omega T} - 1)}{(re^{j\omega T} + 1)} \quad (3.37)$$

$$s = \frac{2}{T} \times \left( \frac{r^2 - 1}{1 + r^2 + 2r \cos \omega T} + j \frac{2r \sin \omega T}{1 + r^2 + 2r \cos \omega T} \right) \quad (3.38)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ (3.34) กับสมการที่ (3.38) จะได้

$$\sigma = \frac{2}{T} \times \frac{r^2 - 1}{1 + r^2 + 2r \cos \omega T} \quad (3.39)$$

$$\Omega = \frac{2}{T} \times \frac{2r \sin \omega T}{1 + r^2 + 2r \cos \omega T} \quad (3.40)$$

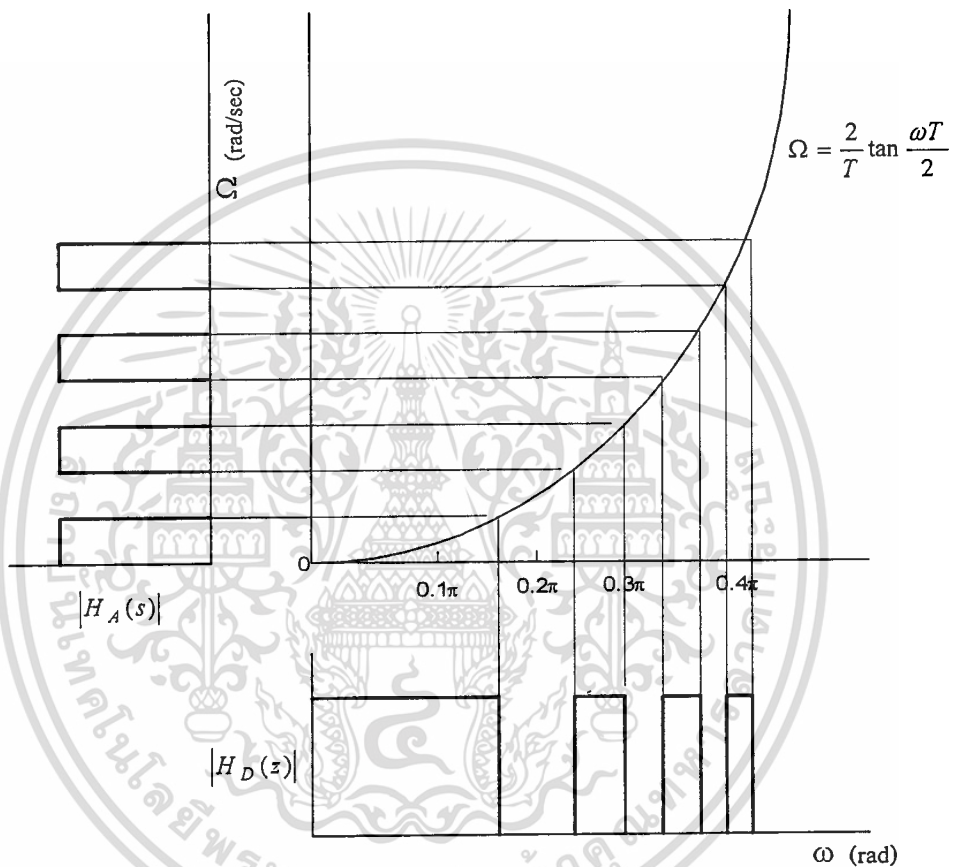
จากสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.40) จะพบว่า ถ้า  $r < 1$ ,  $\sigma < 0$  และถ้า  $r > 1$ ,  $\sigma > 0$  นั่นก็หมายความว่า ค่าที่อยู่ทางซ้ายของระนาบเอสจะไปยังภายในวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด และค่าที่อยู่ทางขวาของระนาบเอสจะอยู่นอกวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด และถ้า  $r = 1$ ,  $\sigma = 0$  ค่าที่อยู่บนแกนจินตภาพบนระนาบเอสจะไปยังบนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด และเมื่อ  $r = 1$  สมการที่ (3.40) จะได้  $\Omega$  มีค่าดังสมการที่ (3.41) และ (3.42)

$$\Omega = \frac{2}{T} \times \frac{\sin \omega T}{1 + \cos \omega T} \quad (3.41)$$

$$\Omega = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.42) นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่เชิงมุมเชิงอุปมาน ( $\Omega$ ) กับความถี่เชิงมุมเชิงเลข ( $\omega$ ) ที่ผ่านการแปลงเชิงเส้นคู่ โดยความสัมพันธ์ที่ได้เป็นฟังก์ชันแบบแทนเจนต์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยช่วงความถี่สูงที่ได้จากการแปลงจะหดแคบลงไป ยิ่งความถี่สูงมากก็ยิ่งหดแคบมาก เรียกว่า ปรากฏการณ์หดแคบ (Wrapping Effect) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงปรากฏการณ์หดแคบที่มีผลต่อผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองเชิงเลข

ดังนั้น ในการออกแบบจึงต้องมีการชดเชยผลของปรากฏการณ์หดแคบนี้ (Prewrapping) โดยสมการที่ (3.42) ก่อนที่จะทำการแปลงตัวแปร โดยสามารถที่จะสรุปขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขโดยการแปลงเชิงเส้นคู่ ได้ดังนี้

1. ออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมานต้นแบบ โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(s)$
2. กำหนดค่าความถี่ตัดหรือความถี่ขอบแถบผ่าน รวมทั้งความถี่ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง

สัญญาณของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข

เอกสารนี้เป็น 3. การทำการชดเชยผลของปรากฏการณ์หดแคบ โดยการหาค่า  $\Omega = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2}$  ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การสเกลความถี่ (Frequency Scaling) ของ  $H(s)$  โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$

5. หาค่า  $H(z)$  โดยแทนค่า  $S = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$

ตัวอย่าง การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 แบบบัตเตอร์เวิร์ท โดยกำหนดให้ความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) มีค่า 50 Hz และความถี่การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ( $f_s$ ) มีค่า 250 Hz โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมาความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 2 คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c = 100\pi; T = \frac{1}{250} = 4 \text{ ms}$$

ทำการชดเชยผลของปรากฏการณ์หอคอยโดย

$$\Omega = \Omega_c = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega_c T}{2}\right) = \frac{2}{4 \times 10^{-3}} \tan(50\pi \times 4 \times 10^{-3}) = 363.27$$

ทำการสเกลความถี่ โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมา

$$H(S) = \frac{1}{\frac{S^2}{131965} + \frac{\sqrt{2}S}{363.27} + 1}$$

แทนค่า  $S = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}$  จะได้

$$H(z) = \frac{0.2066 + 0.4131z^{-1} + 0.2066z^{-2}}{1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด

การออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด [10-16] ที่สามารถให้ผลตอบสนองทางความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่าน และกรองแถบความถี่ผ่าน โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ในการออกแบบและจำลองการทำงานใช้โปรแกรม MATLAB [17-18] ส่วนการสร้างจริงใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 มีวิธีการออกแบบซึ่งกล่าวเป็นทฤษฎีได้ดังนี้

#### 4.1 ทฤษฎีการออกแบบตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด

##### 4.1.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่ โดยมีวิธีการดังนี้ คือ ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับสอง โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (4.1)

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (4.1)$$

จากนั้นหาค่าความถี่คัทออฟ หรือความถี่ขอบแถบผ่านของตัวกรองความถี่แบบดิจิทัล ดังสมการที่ (4.2)

$$\Omega = \tan\left(\frac{\omega T}{2}\right) \quad (4.2)$$

เมื่อ

$$\omega = 2\pi f_c$$

แล้วทำการสเกลความถี่ โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.1) จะได้ผลดังสมการที่ (4.3)

$$H(S) = \frac{\Omega^2}{S^2 + \sqrt{2}\Omega S + \Omega^2} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นให้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.3) ก็จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านดังสมการที่ (4.4) โดย  $G_L$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน และตำแหน่งโพลจะถูกวางอยู่ 2 ตัวในลักษณะสังยุค (Conjugate) กันอยู่ในวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ส่วนตำแหน่งซีโรทั้งสองตัวจะถูกวางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุด  $\pi$  จำนวน 2 ตัวเสมอ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน [5-7]

$$H(z) = G_L \frac{(1+2z^{-1}+z^{-2})}{(1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2})} \quad (4.4)$$

กำหนดให้  $a_1 = -2r \cos \omega_0$  และ  $a_2 = r^2$

เมื่อ  $\omega_0$  คือ มุมของโพลบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด

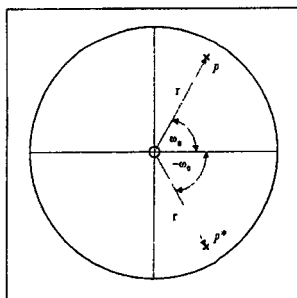
$r$  คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงตำแหน่งของโพลบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบ

#### 4.1.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่าน

การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด โดยกำหนดให้ความถี่ศูนย์กลาง ตรงกับมุมของโพลที่ได้จากการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งของซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์ 1 ตัวและที่จุด  $\pi$  1 ตัว ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่าน [5-7] โดย  $G_B$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่าน สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (4.5) โดย  $a_1$  และ  $a_2$  มีค่า ดังสมการที่ (4.4)

$$H(z) = G_B \frac{(1-z^{-2})}{(1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2})} \quad (4.5)$$

สามารถหาค่า  $G_B$  โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.1 และสมการที่ (4.6) ดังนี้



เอกสารที่ 4.1 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซดไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

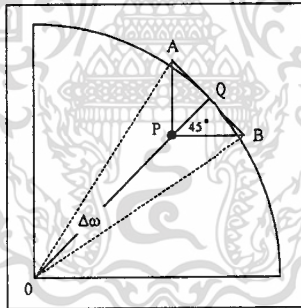
$$H(z) = \frac{G_B}{1 - (2r \cos \omega_0)z^{-1} + r^2 z^{-2}} \quad (4.6)$$

ที่ความถี่ศูนย์กลาง  $|H(\omega_0)| = 1$  จากสมการที่ (4.6) จะได้

$$|H(\omega_0)| = \frac{G_B}{(1-r)\sqrt{1+r^2-2r\cos 2\omega_0}} = 1 \quad (4.7)$$

ดังนั้น 
$$G_B = (1-r)\sqrt{1+r^2-2r\cos 2\omega_0} \quad (4.8)$$

การหาค่าแบนด์วิดธ์ ( $\Delta\omega$ ) ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน [6] ที่ค่าลดทอน 3 dB ของผลตอบสนองความถี่สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2 เมื่อจุด P คือ ตำแหน่งของโพลซึ่งนิยามให้อยู่ใกล้กับเส้นรอบวงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ส่วน  $r$  คือ รัศมีจากจุดศูนย์กลางถึงตำแหน่งของโพล และ  $Z_A$  กับ  $Z_Q$  เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่แทนค่าที่จุด A และจุด Q สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (4.9) และ (4.10)



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรเพื่อหาค่าแบนด์วิดธ์ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

$$|H(Z_A)| = \frac{G_B}{|Z_A - P||Z_A - P^*|} \quad (4.9)$$

$$|H(Z_Q)| = \frac{G_B}{|Z_Q - P||Z_Q - P^*|} \quad (4.10)$$

นิยามให้  $|Z_A - P^*| \cong |Z_Q - P^*|$  จะได้อัตราส่วน

$$\frac{|H(Z_A)|}{|H(Z_Q)|} = \frac{|Z_Q - P|}{|Z_A - P|} = \frac{|PQ|}{|PA|} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.11) ที่เงื่อนไขค่าลดทอน 3 dB จะมีค่า 0.707 ซึ่งจากรูปมีค่าเท่ากับขนาดของเวกเตอร์ PQ/PA ดังนั้นจะได้ขนาดของเวกเตอร์ PA มีค่า 1.414 เท่าของเวกเตอร์ PQ ทำให้เกิดสามเหลี่ยมด้านเท่า PQA มีมุมและขนาดเท่ากับสามเหลี่ยมด้านเท่า PQB เมื่อพิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าทั้งสอง พบว่าขนาดของเวกเตอร์ AB มีค่าเป็น 2 เท่าของเวกเตอร์ QA และมีค่าเป็นสองเท่าของเวกเตอร์ PQ โดยเมื่อประมาณให้ค่าแบนด์วิดธ์มีค่าเท่ากับขนาดของเวกเตอร์ AB จะได้ค่าแบนด์วิดธ์ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.12)

$$\Delta\omega = 2(1-r) \quad (4.12)$$

#### 4.1.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 2 ใช้วิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซคเหมือนกัน โดยกำหนดให้ความถี่คัทออฟตรงกับมุมของโพลที่ได้จากการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์ 2 ตัวเสมอซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกรองความถี่สูงผ่าน [5-7] สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (4.13) เมื่อ  $G_H$  คือ ค่าอัตราขยายของตัวกรองความถี่สูงผ่าน โดย  $a_1$  และ  $a_2$  มีค่า ดังสมการที่ (4.4)

$$H(z) = G_H \frac{(1 - 2z^{-1} + z^{-2})}{(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2})} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $G_H = \frac{G_L}{\Omega^2} \quad (4.14)$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.4) , (4.5) และ (4.13) ซึ่งเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ตัวกรองแถบความถี่ผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่าน ตามลำดับ ซึ่งพบว่าตำแหน่งซีโรจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติตัวกรองความถี่แต่ละแบบ ส่วนตำแหน่งโพลนั้นอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดซึ่งให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกันได้

## 4.2 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควดอันดับที่ 2

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควดอันดับที่ 2 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 4.2.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับที่ 2 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (4.15)$$

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

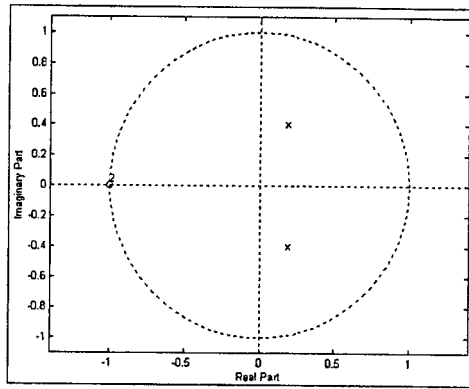
$$\Omega = \tan\left(\frac{2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4}}{2}\right) = 0.7265 \quad (4.16)$$

แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.15) จะได้ผล ดังสมการที่ (4.17)

$$H(S) = \frac{0.5278}{S^2 + 1.0274S + 0.5278} \quad (4.17)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.17) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแบบแซคโดเมนดังสมการที่ (4.18) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.3

$$H(z) = 0.2066 \frac{(1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} \quad (4.18)$$



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบเชิงซ้อนสมการที่ (4.18)

จากสมการที่ (4.18) และรูปที่ 3 จะได้ตำแหน่งของโพลและซีโร ดังนี้

$$z_{1,2} = -1 \quad \text{และ} \quad p_{1,2} = 0.18 \pm j0.40$$

ส่วนค่า  $r, \omega_0, G_L$  สามารถหาโดยใช้สมการที่ (4.4) ได้ค่าดังนี้

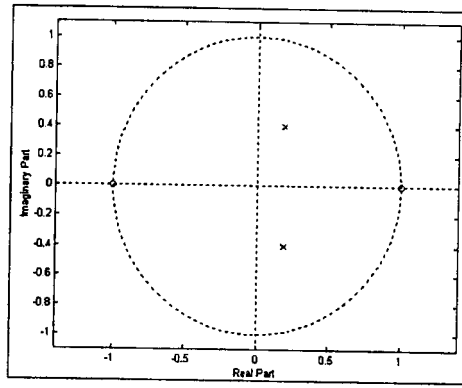
$$r = 0.4425, \omega_0 = 65.32^\circ, G_L = 0.2066$$

#### 4.2.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบเชิงซ้อน เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คutoff ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์ 1 ตัว และจุด  $\pi$  1 ตัว และสามารถหาค่า  $G_B$  โดยใช้สมการที่ (4.8) ซึ่งได้ค่าดังสมการที่ (4.19) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.20) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบเชิงซ้อน ดังรูปที่ 4.4

$$G_B = (1 - 0.4425) \sqrt{1 + 0.4425^2 - (2 * 0.4425 * \cos(2 * 65.32))} = 0.4387 \quad (4.19)$$

$$H(z) = 0.4387 \frac{(1 - z^{-2})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} \quad (4.20)$$



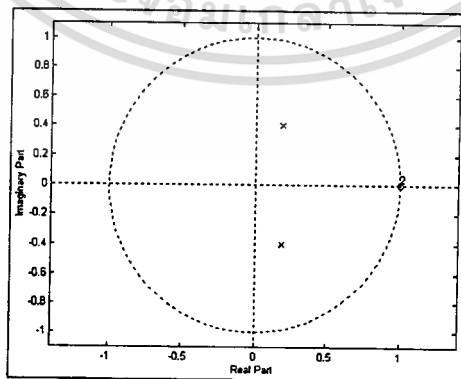
รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดิงสมการที่ (4.20)

### 4.2.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์ 2 ตัวเสมอ และสามารถหาค่า  $G_H$  โดยใช้สมการที่ (4.14) และ (4.16) ซึ่งได้ค่าดังสมการที่ (4.21) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.22) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.5

$$G_H = \frac{0.2066}{0.7265^2} = 0.3914 \quad (4.21)$$

$$H(z) = 0.3914 \frac{(1 - 2z^{-1} + z^{-2})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} \quad (4.22)$$



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดิงสมการที่ (4.22)

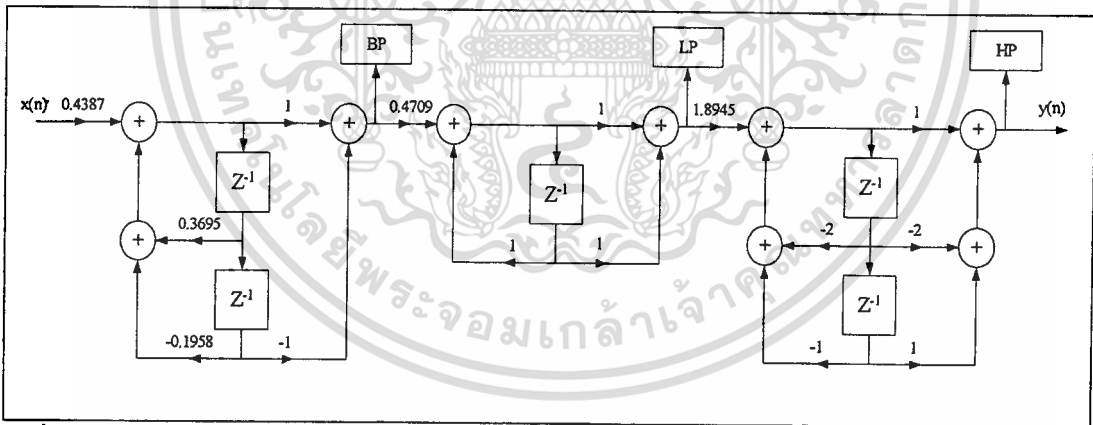
#### 4.2.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2

จากสมการที่ (4.18) , (4.20) และ (4.22) จะพบว่า สมการเทอมส่วนซึ่งเป็นสมการที่บ่งบอกถึงตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 รูปแบบมีค่าเท่ากัน ส่วนสมการเทอมเศษซึ่งเป็นสมการที่บ่งบอกถึงตำแหน่งของซีโรของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 รูปแบบมีค่าต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติตัวกรองความถี่แต่ละแบบ ดังนั้นการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดคที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน จึงต้องจัดรูปสมการใหม่แล้วนำมาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขที่ต่อเรียงกัน ดังรูปที่ 4.6 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อเรียงกันไปทำการแปลงแซดพคผัน แล้วเขียนเป็นสมการผลต่างได้ดัง สมการที่(4.23),(4.24) และ (4.25) จากนั้นนำสมการดังกล่าวไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 [19-20] ต่อไป

$$y(n_1) = 0.4387x(n) - 0.4387x(n-2) + 0.3695y(n-1) - 0.1958y(n-2) \quad (4.23)$$

$$y(n_2) = 0.4709x(n) + 0.4709x(n-1) + y(n-1) \quad (4.24)$$

$$y(n_3) = 1.8945x(n) - 3.7890x(n-1) + 1.8945x(n-2) - 2y(n-1) - y(n-2) \quad (4.25)$$

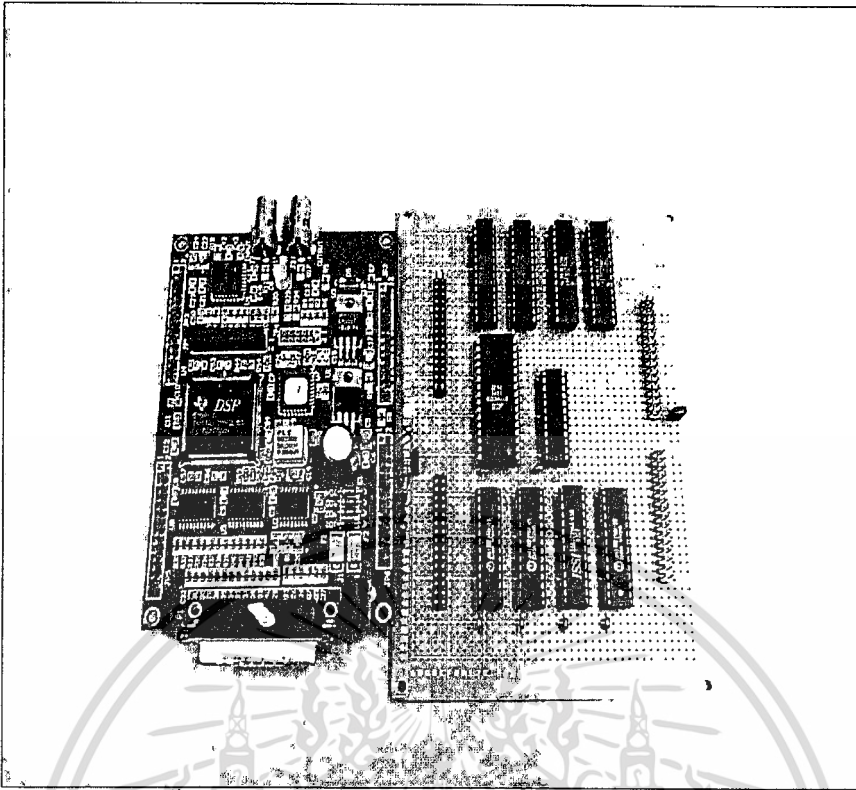


รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2

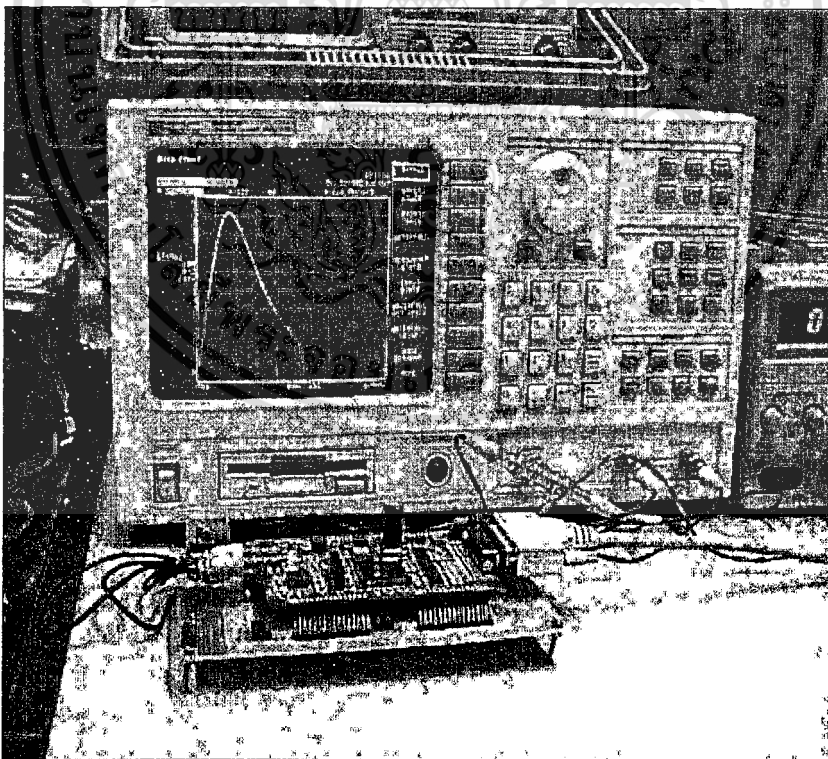
#### 4.2.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 มีอัลกอริทึมที่ซับซ้อนขึ้น ทำให้โปรแกรมการทำงานเพื่อสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดนั้นมีขนาดใหญ่ จึงต้องมีการออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์เพื่อขยายหน่วยความจำ [21] เพื่อรองรับการพัฒนาโปรแกรมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.7-4.8 และผลการทดลองของการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2 ดังรูปที่ 4.9 – 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

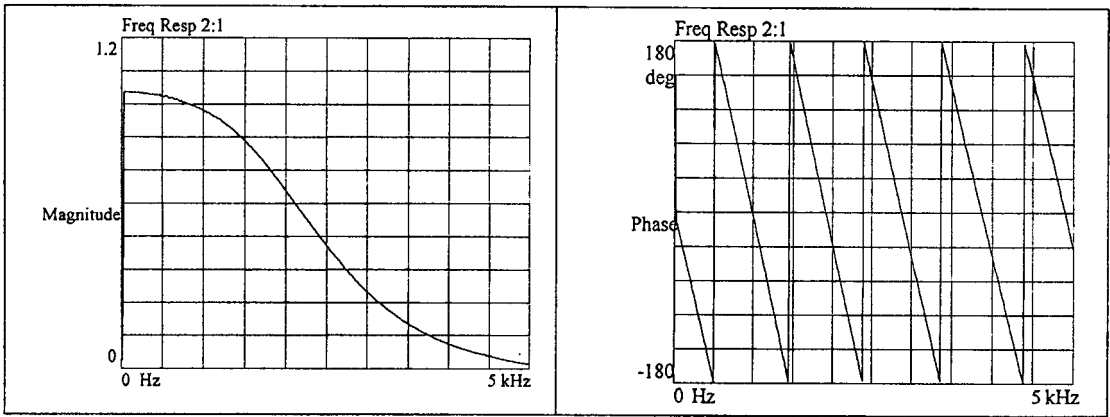


รูปที่ 4.7 แสดงฮาร์ดแวร์ทั้งหมดที่สร้างขึ้นและบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31



รูปที่ 4.8 แสดงฮาร์ดแวร์ของการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดที่ต่อกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก

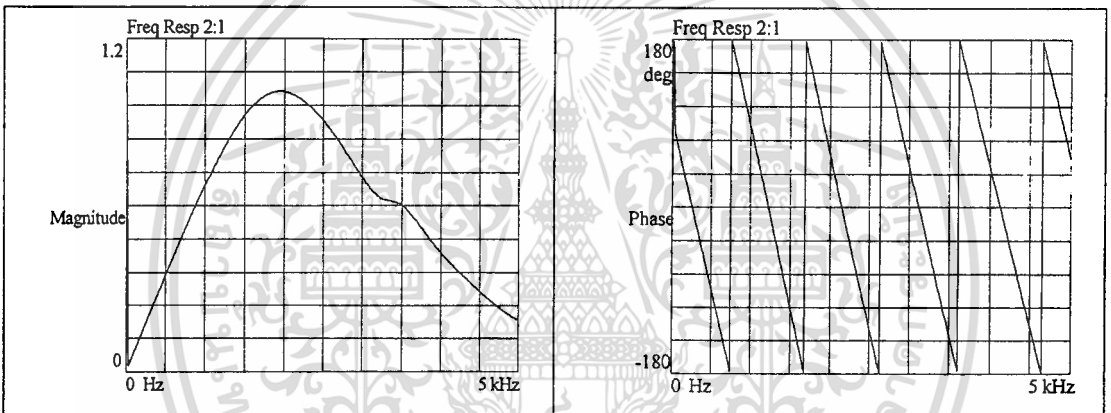
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

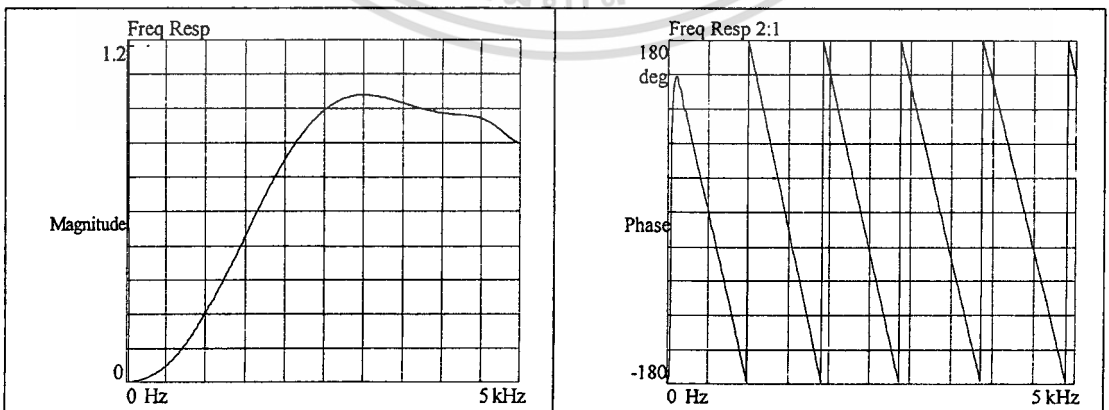
รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

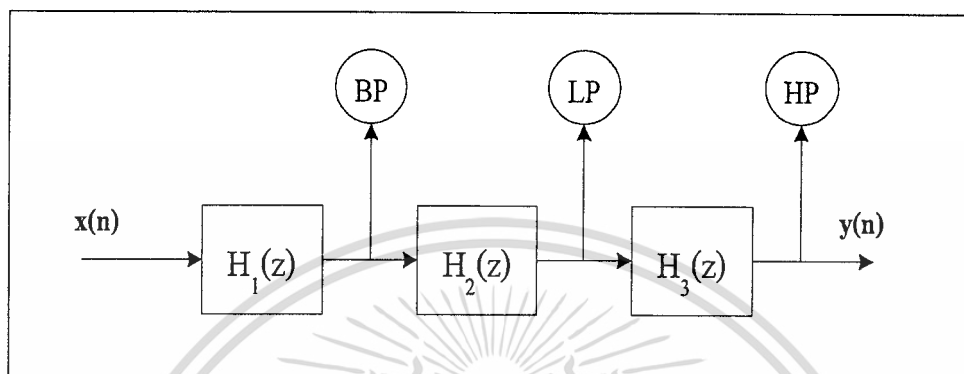
รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารความถี่สูงผ่านอันดับที่ 2 จากการวัดจริง วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

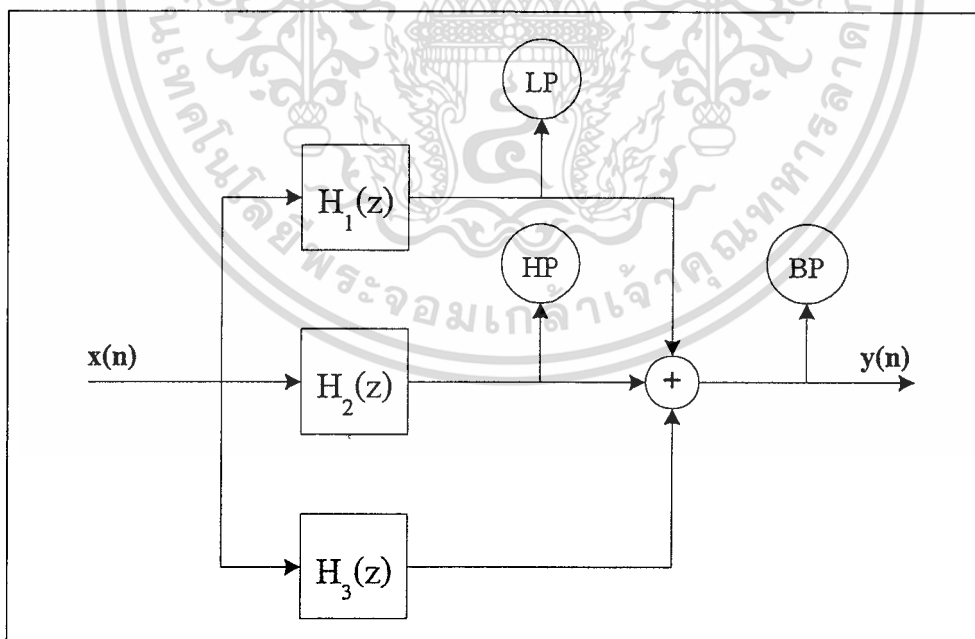
### 4.3 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบนารีควอดอันดับที่สูงขึ้น

ในการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบนารีควอดให้มีจำนวนอันดับที่สูงขึ้น การใช้โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบเรียงกัน ดังรูปที่ 4.12 นั้นจะเกิดความผิดพลาดขึ้น (Error) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Round Off Error และ Coefficient Quantization Error [5] เนื่องจากมีลำดับ (State) ในการคำนวณมาก



รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบนารีควอดที่มีโครงสร้างแบบเรียงกัน

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดลำดับการคำนวณให้สั้นลง จึงมีการจัดโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบนารีควอดใหม่ เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบนารีควอดที่มีโครงสร้างแบบขนาน

#### 4.4 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 4

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 4 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือกรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมาอันดับที่ 4 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^4 + 2.613s^3 + 3.414s^2 + 2.613s + 1} \quad (4.26)$$

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

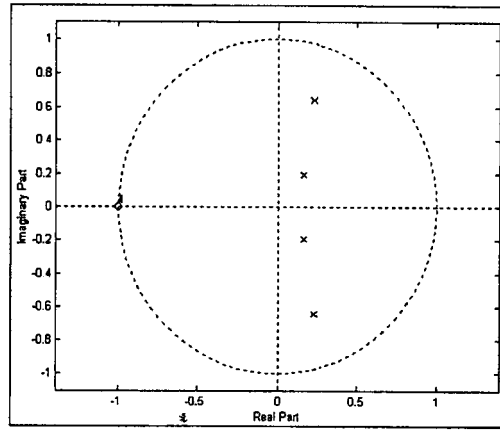
$$\Omega = \tan \left( \frac{2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4}}{2} \right) = 0.7265 \quad (4.27)$$

แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.26) จะได้ผลดังสมการที่ (4.28)

$$H(s) = \frac{0.2786}{S^4 + 1.8985S^3 + 1.8021S^2 + 1.0021S + 0.2786} \quad (4.28)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.28) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแซดโดเมน ดังสมการที่ (4.29) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.14

$$H(z) = 0.0466 \frac{(1 + 4z^{-1} + 6z^{-2} + 4z^{-3} + z^{-4})}{(1 - 0.7821z^{-1} + 0.6800z^{-2} - 0.1827z^{-3} + 0.0301z^{-4})} \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.29)

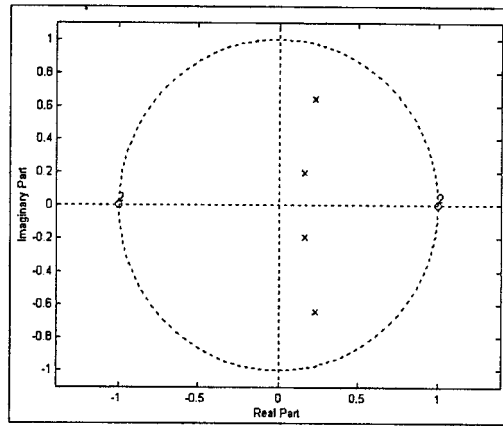
ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย [5-7] เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านดังสมการที่ (4.29) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.30)

$$H(z) = 1.5466 + \frac{(-0.6922 + 1.0358z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(-0.8078 - 0.2193z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} \quad (4.30)$$

#### 4.4.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 2 ตัว และที่จุด  $\pi$  จำนวน 2 ตัว แล้วทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalize) ค่าอัตราขยายให้เป็นหนึ่ง สามารถนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่านดังสมการที่ (4.31) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.15

$$H(z) = 0.1250 \frac{(1 - 2z^{-2} + z^{-4})}{(1 - 0.7821z^{-1} + 0.6800z^{-2} - 0.1827z^{-3} + 0.0301z^{-4})} \quad (4.31)$$



รูปที่ 4.15 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดั่งสมการที่ (4.31)

เพื่อให้การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4 มีผลตอบสนองขนาดและความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.31) จึงต้องจัดสมการใหม่เพื่อนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขต่อไป โดยจัดสมการเป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.32)

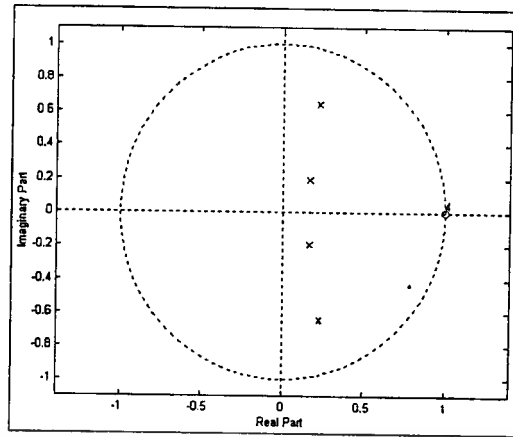
$$H(z) = \frac{(-3.8857 + 1.2007z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(3.8857 - 1.2007z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} \quad (4.32)$$

#### 4.4.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 4 ตัว และสามารถหาค่าอัตราขยาย ดังสมการที่ (4.33) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.34) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.16

$$G_H = \frac{G_L}{\Omega^4} = \frac{0.0466}{0.7265^4} = 0.1672 \quad (4.33)$$

$$H(z) = 0.1672 \frac{(1 - 4z^{-1} + 6z^{-2} - 4z^{-3} + z^{-4})}{(1 - 0.7821z^{-1} + 0.6800z^{-2} - 0.1827z^{-3} + 0.0301z^{-4})} \quad (4.34)$$



รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.34)

ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.34) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.35)

$$H(z) = 5.5506 + \frac{(-4.7590 + 0.6487z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(-0.6245 + 0.6619z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} \quad (4.35)$$

#### 4.4.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4

นำสมการที่ (4.30), (4.32) และ (4.35) มาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4 ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.17 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อขนานกันไปทำการแปลงแซดผกผันแล้วเขียนเป็นสมการผลต่าง ดังสมการที่ (4.36)-(4.43) เพื่อนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

$$y(n_{11}) = 1.5466x(n) \quad (4.36)$$

$$y(n_{12}) = -0.6922x(n) + 1.0358x(n-1) + 0.3290y(n-1) - 0.0646y(n-2) \quad (4.37)$$

$$y(n_{13}) = -0.8078x(n) - 0.2193x(n-1) + 0.4531y(n-1) - 0.4663y(n-2) \quad (4.38)$$

$$y(n_{21}) = -3.8857x(n) + 1.2007x(n-1) + 0.3290y(n-1) - 0.0646y(n-2) \quad (4.39)$$

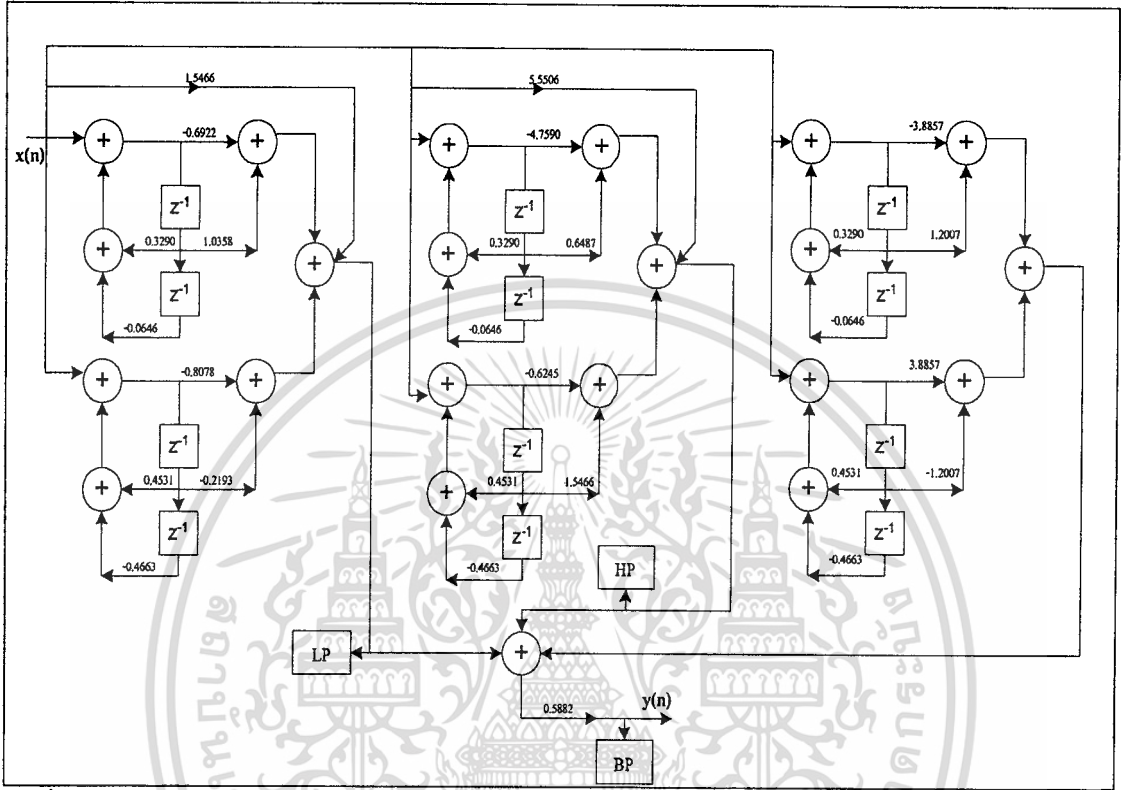
$$y(n_{22}) = 3.8857x(n) - 1.2007x(n-1) + 0.4531y(n-1) - 0.4663y(n-2) \quad (4.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (4.41)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(n_{32}) = -4.7590x(n) + 0.6487x(n-1) + 0.3290y(n-1) - 0.0646y(n-2) \tag{4.42}$$

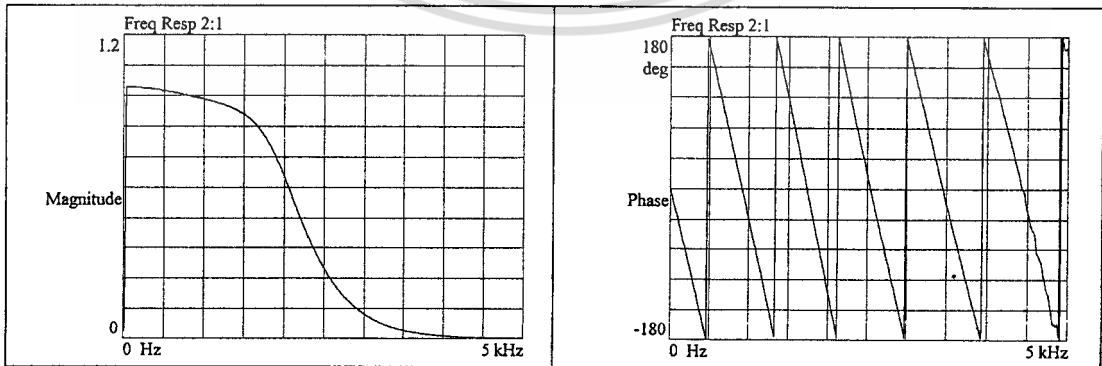
$$y(n_{33}) = -0.6245x(n) + 0.6619x(n-1) + 0.4531y(n-1) - 0.4663y(n-2) \tag{4.43}$$



รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4

#### 4.4.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 4 ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.18 – 4.20



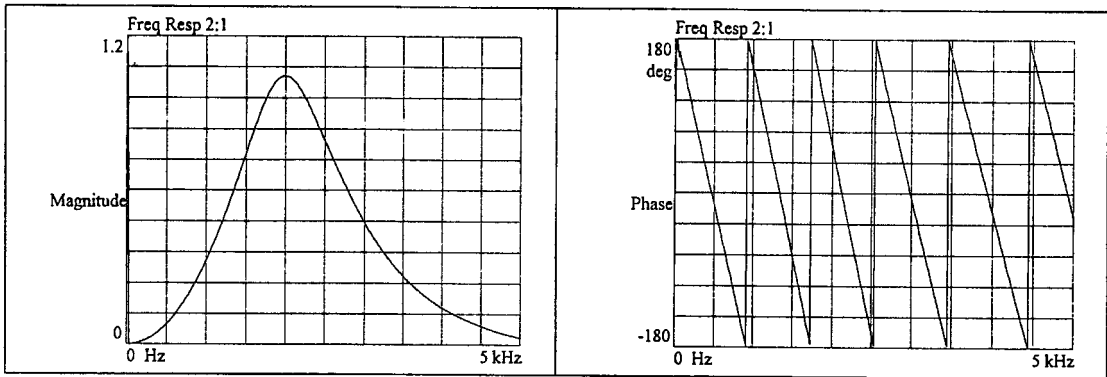
a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.18 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดชนิดกรอง

ความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง

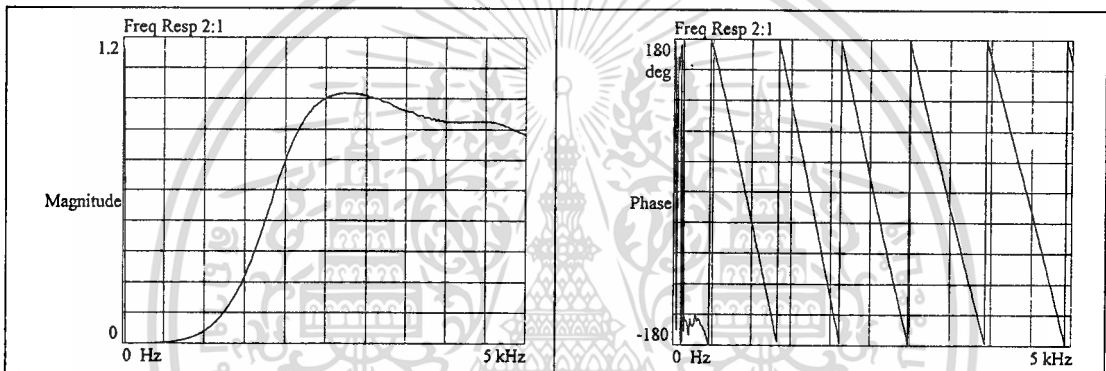
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.19 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.20 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 4 จากการวัดจริง

#### 4.5 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สูง 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับที่ 6 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^6 + 3.864s^5 + 7.464s^4 + 9.141s^3 + 7.464s^2 + 3.864s + 1} \quad (4.44)$$

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

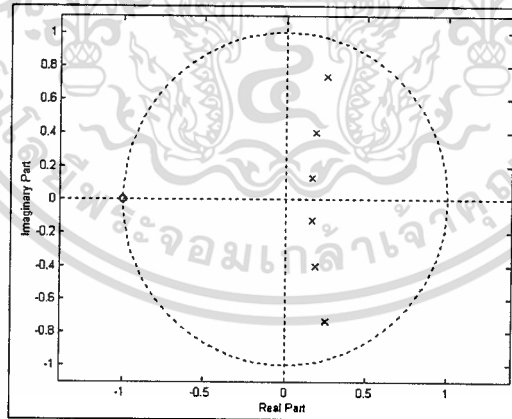
$$\dot{\Omega} = \tan \frac{(2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4})}{2} = 0.7265 \quad (4.45)$$

แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.44) จะได้ผลดังสมการที่ (4.46)

$$H(S) = \frac{0.1471}{S^6 + 2.8074S^5 + 3.9400S^4 + 3.5057S^3 + 2.0798S^2 + 0.7822S + 0.1471} \quad (4.46)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.46) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแซดโดเมน ดังสมการที่ (4.47) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.21

$$H(z) = 0.0103 \frac{(1 + 6z^{-1} + 15z^{-2} + 20z^{-3} + 15z^{-4} + 6z^{-5} + z^{-6})}{(1 - 1.1876z^{-1} + 1.3052z^{-2} - 0.6743z^{-3} + 0.2635z^{-4} - 0.0518z^{-5} + 0.005z^{-6})} \quad (4.47)$$



รูปที่ 4.21 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.47)

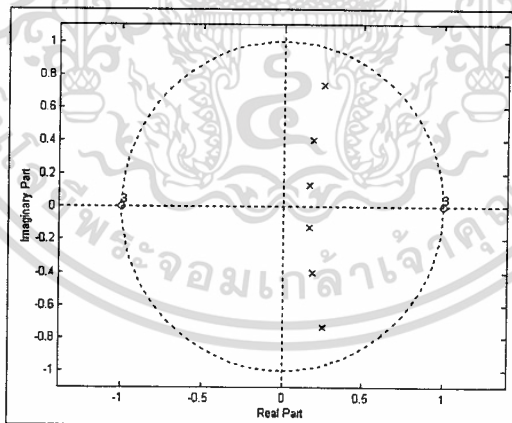
ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังสมการที่ (4.47) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.48)

$$H(z) = 2.0533 + \frac{(0.9021 + 1.4806z^{-1})}{(1 - 0.3221z^{-1} + 0.0424z^{-2})} + \frac{(-3.4629 - 0.0952z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(0.5178 - 0.5791z^{-1})}{(1 - 0.4960z^{-1} + 0.6049z^{-2})} \quad (4.48)$$

#### 4.5.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คutoff ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 3 ตัว และที่จุด  $\pi$  จำนวน 3 ตัว แล้วทำการนอร์มัลไลซ์ค่าอัตรายายให้เป็นหนึ่ง สามารถนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.49) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.22

$$H(z) = 0.0385 \frac{(1 - 3z^{-2} + 3z^{-4} - z^{-6})}{(1 - 1.1876z^{-1} + 1.3052z^{-2} - 0.6743z^{-3} + 0.2635z^{-4} - 0.0518z^{-5} + 0.005z^{-6})} \quad (4.49)$$



รูปที่ 4.22 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.49)

เพื่อให้การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6 มีผลตอบสนองขนาดและความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.49) จึงต้องจัดสมการใหม่เพื่อนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขต่อไป โดยจัดสมการเป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.50)

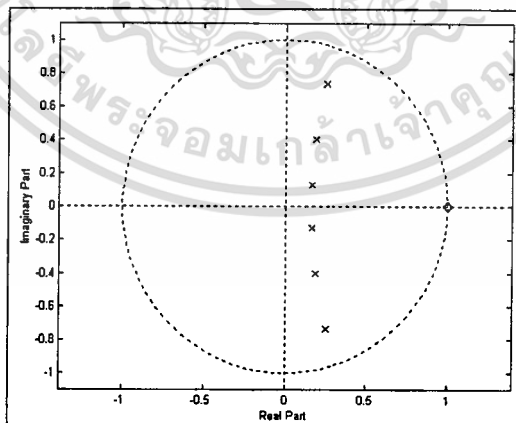
$$H(z) = -32.0270 + \frac{(36.6671 - 11.3307z^{-1})}{(1 - 0.3221z^{-1} + 0.0424z^{-2})} + \frac{(-5.8990 + 1.8229z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(1.2590 - 0.3890z^{-1})}{(1 - 0.4960z^{-1} + 0.6049z^{-2})} \quad (4.50)$$

### 4.5.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 6 ตัว และสามารถหาค่าอัตราขยาย ดังสมการที่ (4.51) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.52) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.23

$$G_H = \frac{G_L}{\Omega^6} = \frac{0.0103}{0.7265^6} = 0.0701 \quad (4.51)$$

$$H(z) = 0.0701 \frac{(1 - 6z^{-1} + 15z^{-2} - 20z^{-3} + 15z^{-4} - 6z^{-5} + z^{-6})}{(1 - 1.1876z^{-1} + 1.3052z^{-2} - 0.6743z^{-3} + 0.2635z^{-4} - 0.0518z^{-5} + 0.005z^{-6})} \quad (4.52)$$



รูปที่ 4.23 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.52)

ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.52) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.53)

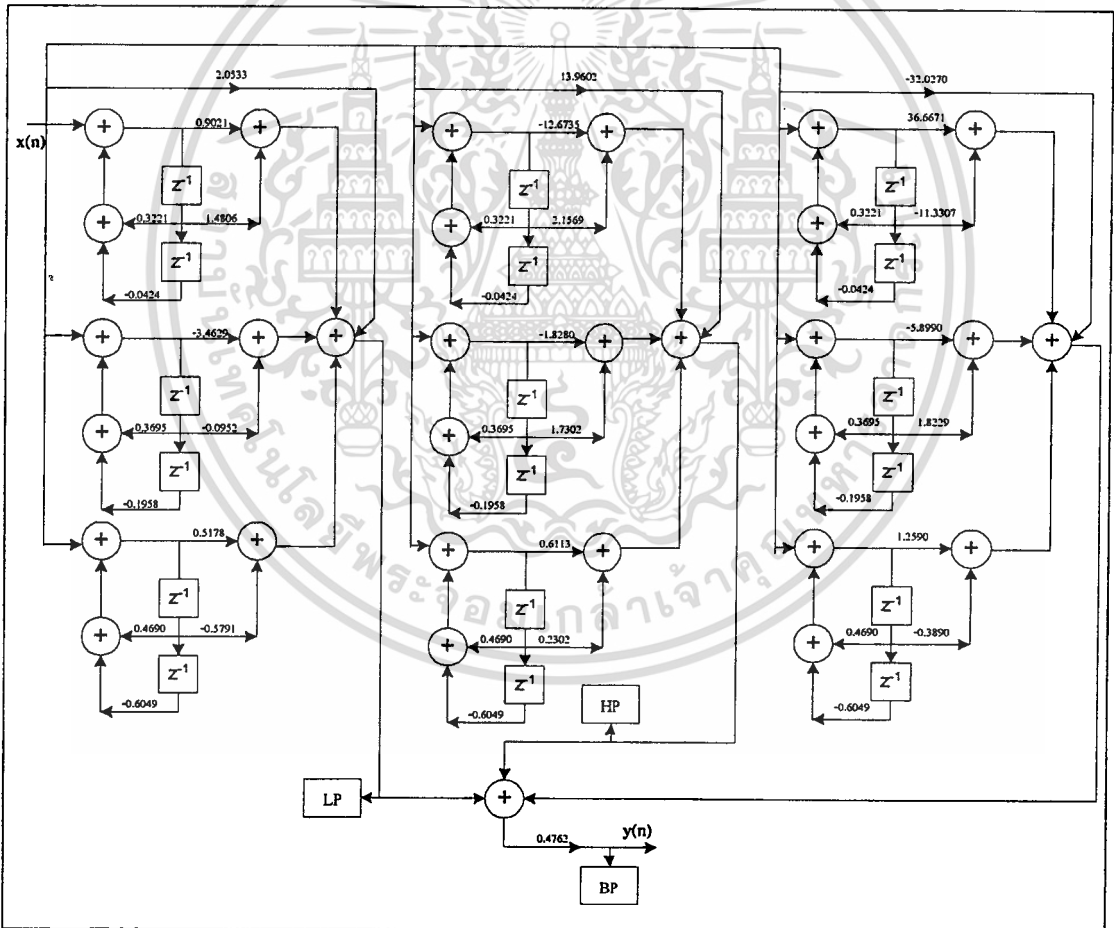
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = 13.9602 + \frac{(-12.6735 + 2.1569z^{-1})}{(1 - 0.3221z^{-1} + 0.0424z^{-2})} + \frac{(-1.8280 + 1.7302z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(0.6113 + 0.2302z^{-1})}{(1 - 0.4960z^{-1} + 0.6049z^{-2})}$$

(4.53)

#### 4.5.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6

นำสมการที่ (4.48), (4.50) และ (4.53) มาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6 ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.24 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อขนานกันไปทำการแปลงแซคคกอฟฟ์ แล้วเขียนเป็นสมการผลต่างเพื่อนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

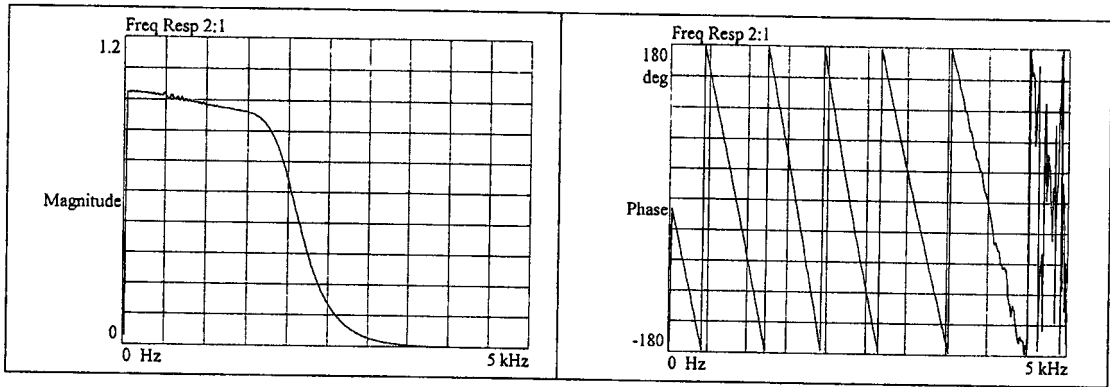


รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6

#### 4.5.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 6 ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.25 – 4.27

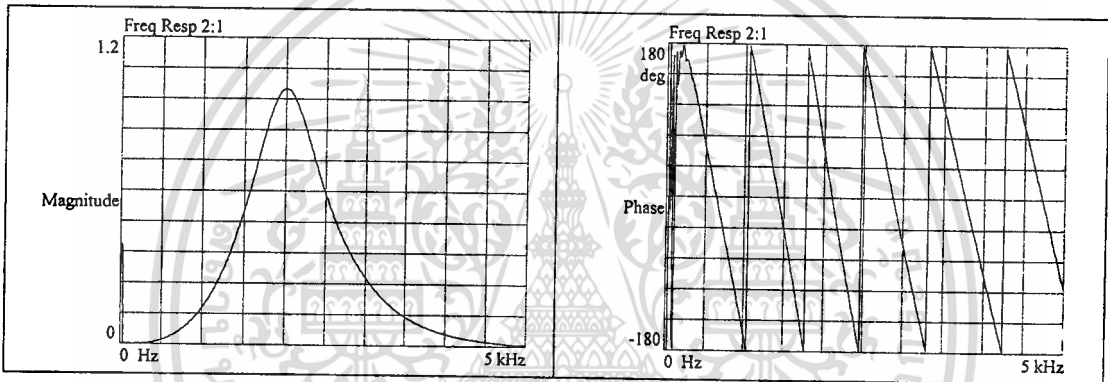
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

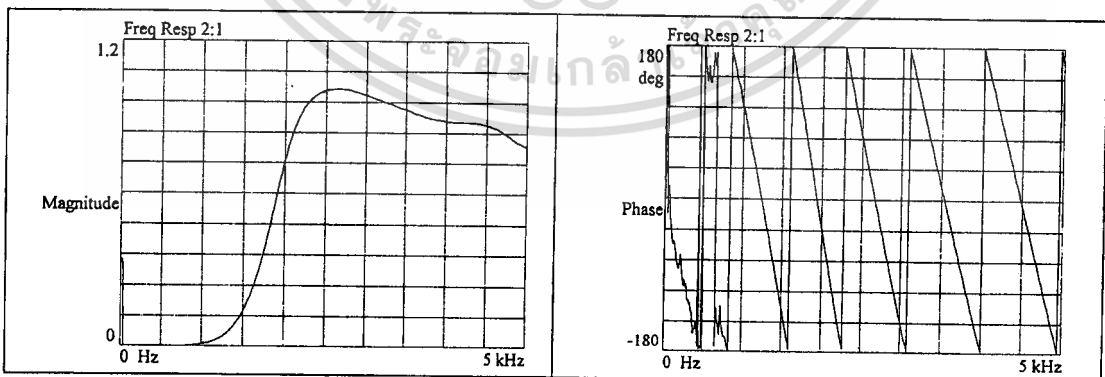
รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดรอนิกกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดรอนิกกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.27 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดรอนิกกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 6 จากการวัดจริง

#### 4.6 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 8

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 8 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.6.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับที่ 8 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^8 + 5.126s^7 + 13.138s^6 + 21.848s^5 + 25.691s^4 + 21.848s^3 + 13.138s^2 + 5.126s + 1} \quad (4.54)$$

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

$$\Omega = \tan \frac{(2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4})}{2} = 0.7265 \quad (4.55)$$

แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.54) จะได้ผล ดังสมการที่ (4.56)

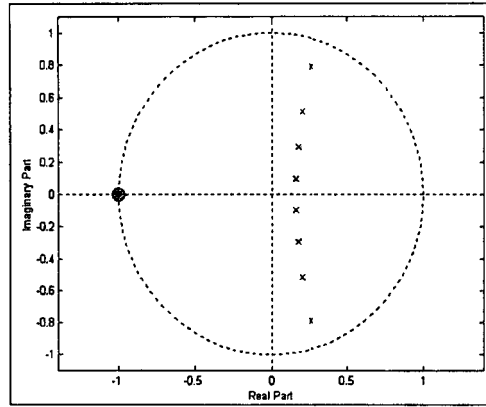
$$H(S) = \frac{0.0776}{S^8 + 3.7243S^7 + 6.9351S^6 + 8.3791S^5 + 7.1586S^4 + 4.4230S^3 + 1.9324S^2 + 0.5478S + 0.0776} \quad (4.56)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.56) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

ในรูปแซดโดเมน ดังสมการที่ (4.57) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.28

$$H(z) = 0.0023 \frac{(1 + 8z^{-1} + 28z^{-2} + 56z^{-3} + 70z^{-4} + 56z^{-5} + 28z^{-6} + 8z^{-7} + z^{-8})}{(1 - 1.5906z^{-1} + 2.0838z^{-2} - 1.5326z^{-3} + 0.8694z^{-4} - 0.3192z^{-5} + 0.0821z^{-6} - 0.0122z^{-7} + 0.0009z^{-8})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (4.57) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดังสมการที่ (4.57)

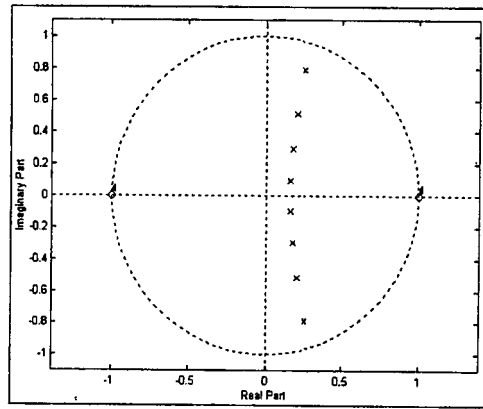
ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังสมการที่ (4.57) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.58)

$$H(z) = 2.6375 + \frac{(7.1798 + 2.0316z^{-1})}{(1 - 0.3198z^{-1} + 0.0348z^{-2})} + \frac{(-12.5159 + 0.8025z^{-1})}{(1 - 0.3451z^{-1} + 0.1168z^{-2})} + \frac{(0.1882 - 2.1638z^{-1})}{(1 - 0.4044z^{-1} + 0.3086z^{-2})} + \frac{(0.5127 + 0.2230z^{-1})}{(1 - 0.5213z^{-1} + 0.6870z^{-2})} \quad (4.58)$$

#### 4.6.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 4 ตัว และที่จุด  $\pi$  จำนวน 4 ตัว แล้วทำการนอร์มัลไลซ์ค่าอัตราขยายให้เป็นหนึ่ง สามารถนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.59) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.29

$$H(z) = 0.0115 \frac{(1 - 4z^{-2} + 6z^{-4} - 4z^{-6} + z^{-8})}{(1 - 1.5906z^{-1} + 2.0838z^{-2} - 1.5326z^{-3} + 0.8694z^{-4} - 0.3192z^{-5} + 0.0821z^{-6} - 0.0122z^{-7} + 0.0009z^{-8})} \quad (4.59)$$



รูปที่ 4.29 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบเซตดังสมการที่ (4.59)

เพื่อให้การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8 มีผลตอบสนองขนาดและความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.59) จึงต้องจัดสมการใหม่เพื่อนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขต่อไป โดยจัดสมการเป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.60)

$$H(z) = \frac{(-45.0017 + 13.9063z^{-1})}{(1 - 0.3198z^{-1} + 0.0348z^{-2})} + \frac{(63.9239 - 19.7536z^{-1})}{(1 - 0.3451z^{-1} + 0.1168z^{-2})} + \frac{(-20.5980 + 6.3651z^{-1})}{(1 - 0.4044z^{-1} + 0.3086z^{-2})} + \frac{(1.6758 - 0.5179z^{-1})}{(1 - 0.5213z^{-1} + 0.6870z^{-2})} \quad (4.60)$$

#### 4.6.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

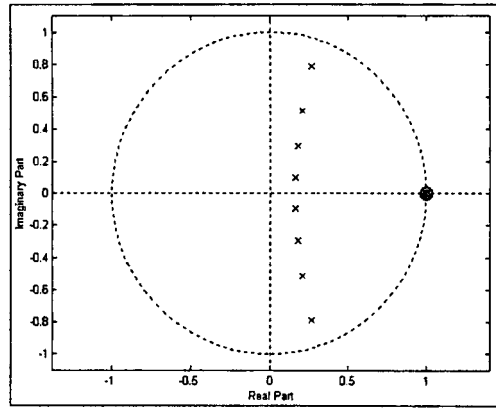
การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบเซต เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์กลางจำนวน 8 ตัว และสามารถหาค่าอัตราขยายดังสมการที่ (4.61) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.62) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบเซต ดังรูปที่ 4.30

$$G_H = \frac{G_L}{\Omega^8} = \frac{0.0023}{0.7265^8} = 0.0293 \quad (4.61)$$

$$H(z) = 0.0293 \frac{(1 - 8z^{-1} + 28z^{-2} - 56z^{-3} + 70z^{-4} - 56z^{-5} + 28z^{-6} - 8z^{-7} + z^{-8})}{(1 - 1.5906z^{-1} + 2.0838z^{-2} - 1.5326z^{-3} + 0.8694z^{-4} - 0.3192z^{-5} + 0.0821z^{-6} - 0.0122z^{-7} + 0.0009z^{-8})}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (4.62)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



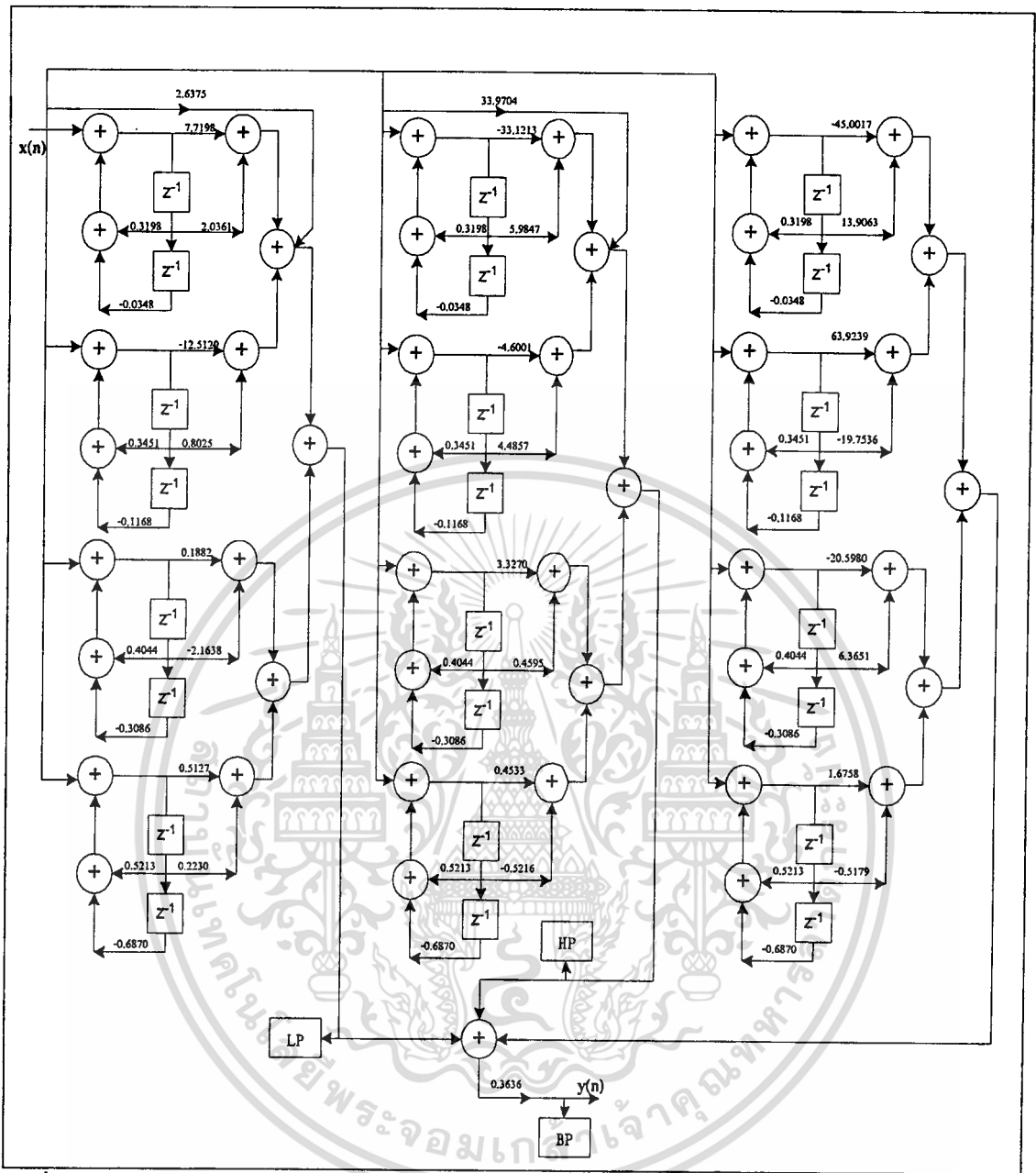
รูปที่ 4.30 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.62)

ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.62) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.63)

$$H(z) = 33.9704 + \frac{(-33.1213 + 5.9847z^{-1})}{(1 - 0.3198z^{-1} + 0.0348z^{-2})} + \frac{(-4.6001 + 4.4867z^{-1})}{(1 - 0.3451z^{-1} + 0.1168z^{-2})} + \frac{(3.3270 + 0.4595z^{-1})}{(1 - 0.4044z^{-1} + 0.3086z^{-2})} + \frac{(0.4553 - 0.5216z^{-1})}{(1 - 0.5213z^{-1} + 0.6870z^{-2})} \quad (4.63)$$

#### 4.6.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8

นำสมการที่ (4.58), (4.60) และ (4.63) มาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8 ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.31 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อขนานกัน ไปทำการแปลงแซดผกผันแล้วเขียนเป็นสมการผลต่าง เพื่อนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

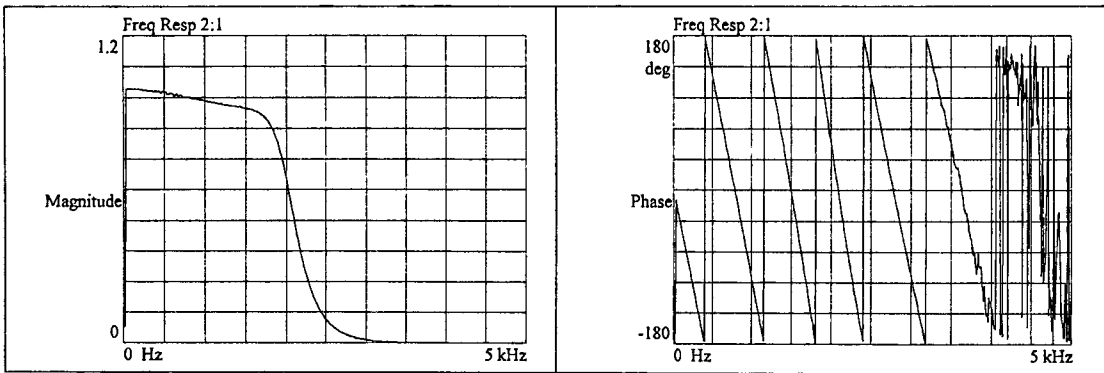


รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8

#### 4.6.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 8 ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.32 – 4.34

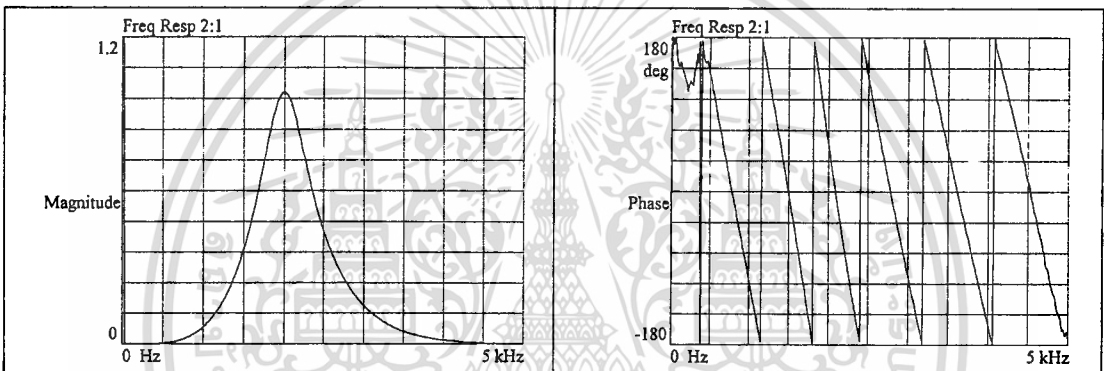
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

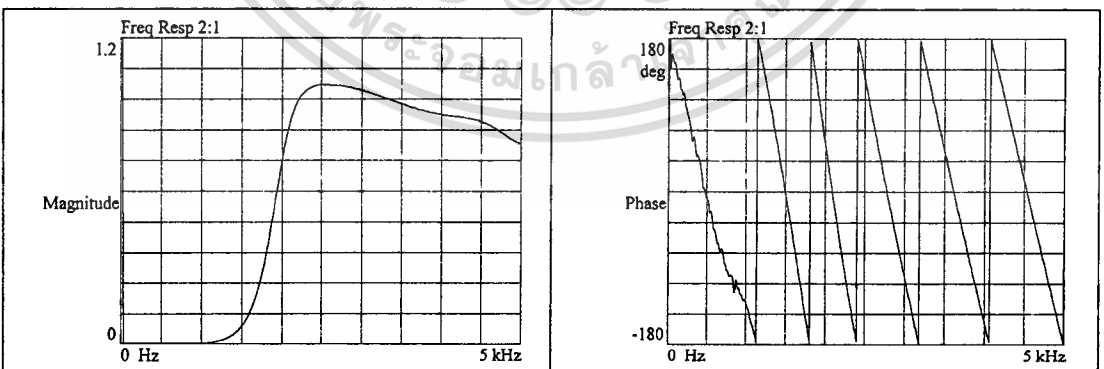
รูปที่ 4.32 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 8 จากการวัดจริง

#### 4.7 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 10

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 10 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.7.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับที่ 10 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^{10} + 6.3924s^9 + 20.4314s^8 + 42.8011s^7 + 64.8806s^6 + 74.2312s^5 + 64.8806s^4 + 42.8011s^3 + 20.4314s^2 + 6.3924s + 1} \quad (4.64)$$

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

$$\Omega = \tan \frac{(2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4})}{2} = 0.7265 \quad (4.65)$$

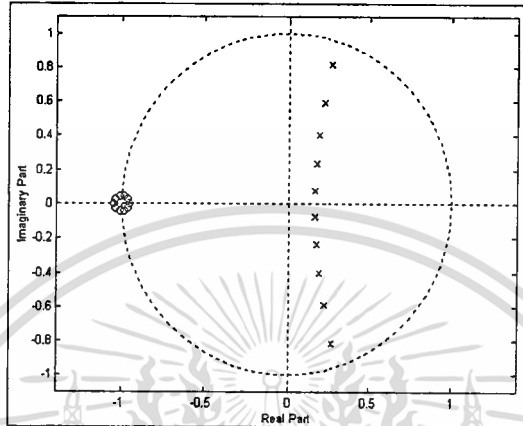
แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.64) จะได้ผลดังสมการที่ (4.66)

$$H(S) = \frac{0.0410}{S^{10} + 4.6444S^9 + 10.7850S^8 + 16.4149S^7 + 18.0784S^6 + 15.0277S^5 + 9.5429S^4 + 4.5739S^3 + 1.5863S^2 + 0.3606S + 0.0410} \quad (4.66)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.66) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

ในรูปแซดโดเมน ดังสมการที่ (4.67) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.35

$$H(z) = 0.0005 \frac{(1 + 10z^{-1} + 45z^{-2} + 120z^{-3} + 210z^{-4} + 252z^{-5} + 210z^{-6} + 120z^{-7} + 45z^{-8} + 10z^{-9} + z^{-10})}{(1 - 1.9924z^{-1} + 3.0195z^{-2} - 2.8185z^{-3} + 2.0387z^{-4} - 1.0545z^{-5} + 0.4144z^{-6} - 0.1157z^{-7} + 0.0225z^{-8} - 0.0027z^{-9} + 0.0001z^{-10})} \quad (4.67)$$



รูปที่ 4.35 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซดดังสมการที่ (4.67)

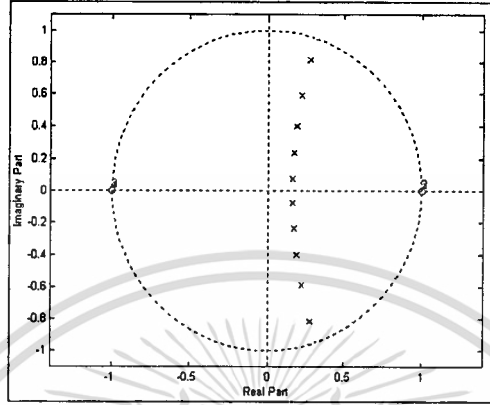
ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังสมการที่ (4.67) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.68)

$$H(z) = 3.3573 + \frac{(28.2384 + 2.2224z^{-1})}{(1 - 0.3187z^{-1} + 0.0313z^{-2})} + \frac{(-41.9631 + 4.6168z^{-1})}{(1 - 0.3345z^{-1} + 0.0826z^{-2})} + \frac{(7.3724 - 6.9779z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(3.4040 + 0.7319z^{-1})}{(1 - 0.4317z^{-1} + 0.3696z^{-2})} + \frac{(-0.4086 + 0.4784z^{-1})}{(1 - 0.5380z^{-1} + 0.7410z^{-2})} \quad (4.68)$$

#### 4.7.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 5 ตัว และที่จุด  $\pi$  จำนวน 5 ตัว แล้วทำการนอร์มัลไลซ์ค่าอัตราขยายให้เป็นหนึ่ง สามารถนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.69) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ดังรูปที่ 4.36 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = 0.0035 \frac{(1 - 5z^{-2} + 10z^{-4} - 10z^{-6} + 5z^{-8} - 1z^{-10})}{(1 - 1.9924z^{-1} + 3.0195z^{-2} - 2.8185z^{-3} + 2.0387z^{-4} - 1.0545z^{-5} + 0.4144z^{-6} - 0.1157z^{-7} + 0.0225z^{-8} - 0.0027z^{-9} + 0.0001z^{-10})} \quad (4.69)$$



รูปที่ 4.36 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดั่งสมการที่ (4.69)

เพื่อให้การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 10 มีผลตอบสนองขนาดและความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.69) จึงต้องจัดสมการใหม่เพื่อนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขต่อไป โดยจัดสมการเป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.70)

$$H(z) = -170.5532 + \frac{(275.3004 - 85.0725z^{-1})}{(1 - 0.3187z^{-1} + 0.0313z^{-2})} + \frac{(-137.7105 + 42.5549z^{-1})}{(1 - 0.3345z^{-1} + 0.0826z^{-2})} + \frac{(56.2489 - 17.3819z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(-27.2688 + 8.4265z^{-1})}{(1 - 0.4317z^{-1} + 0.3696z^{-2})} + \frac{(3.9832 - 1.2309z^{-1})}{(1 - 0.5380z^{-1} + 0.7410z^{-2})} \quad (4.70)$$

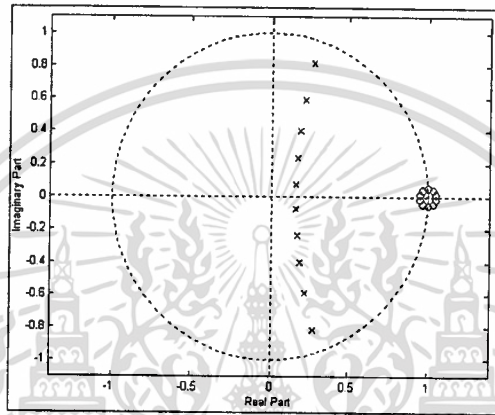
### 4.7.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 10 ตัว และสามารถหาค่าอัตราขยาย ดังสมการที่ (4.71) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.72) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_H = \frac{G_L}{\Omega^{10}} = \frac{0.0005}{0.7265^{10}} = 0.0122 \quad (4.71)$$

$$H(z) = 0.0122 \frac{(1-10z^{-1} + 45z^{-2} - 120z^{-3} + 210z^{-4} - 252z^{-5} + 210z^{-6} - 120z^{-7} + 45z^{-8} - 10z^{-9} + z^{-10})}{(1-1.9924z^{-1} + 3.0195z^{-2} - 2.8185z^{-3} + 2.0387z^{-4} - 1.0545z^{-5} + 0.4144z^{-6} - 0.1157z^{-7} + 0.0225z^{-8} - 0.0027z^{-9} + 0.0001z^{-10})} \quad (4.72)$$



รูปที่ 4.37 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคตามสมการที่ (4.72)

ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.72) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.73)

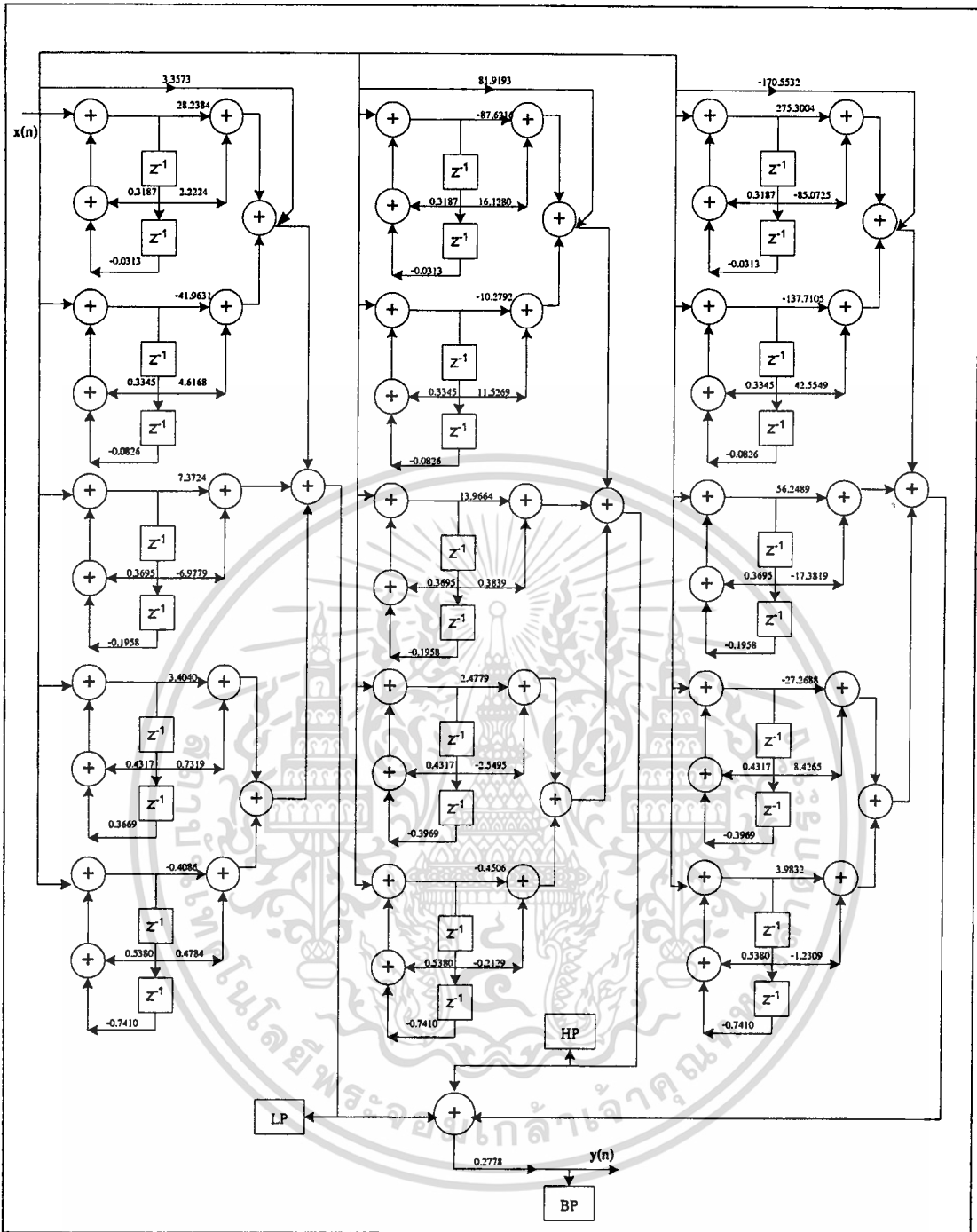
$$H(z) = 81.9193 + \frac{(-87.6216 + 16.1280z^{-1})}{(1 - 0.3187z^{-1} + 0.0313z^{-2})} + \frac{(-10.2792 + 11.5269z^{-1})}{(1 - 0.3345z^{-1} + 0.0826z^{-2})} + \frac{(13.9664 + 0.3839z^{-1})}{(1 - 0.3695z^{-1} + 0.1958z^{-2})} + \frac{(2.4779 - 2.5495z^{-1})}{(1 - 0.4317z^{-1} + 0.3696z^{-2})} + \frac{(-0.4506 - 0.2129z^{-1})}{(1 - 0.5380z^{-1} + 0.7410z^{-2})} \quad (4.73)$$

#### 4.7.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10

นำสมการที่ (4.68), (4.70) และ (4.73) มาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10 ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.38 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อขนานกันไปทำการแปลงแซคคคคคค แล้วเขียนเป็นสมการผลต่างเพื่อนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

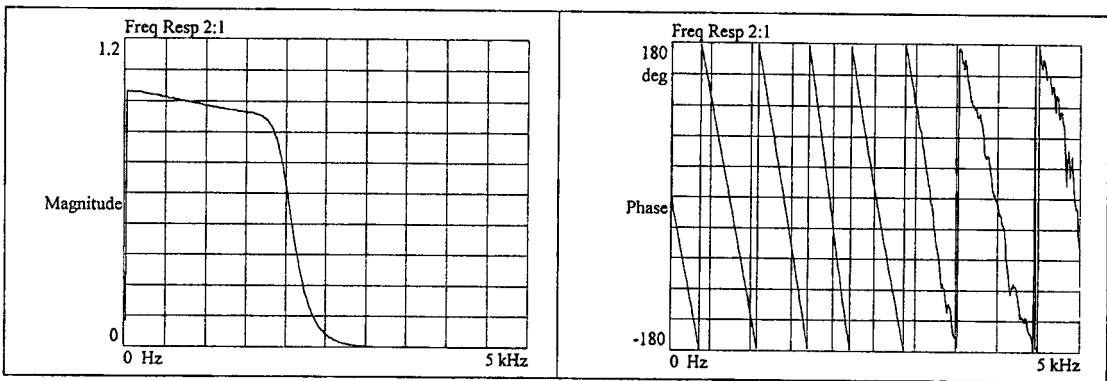


รูปที่ 4.38 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10

#### 4.7.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 10 ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.39 – 4.41

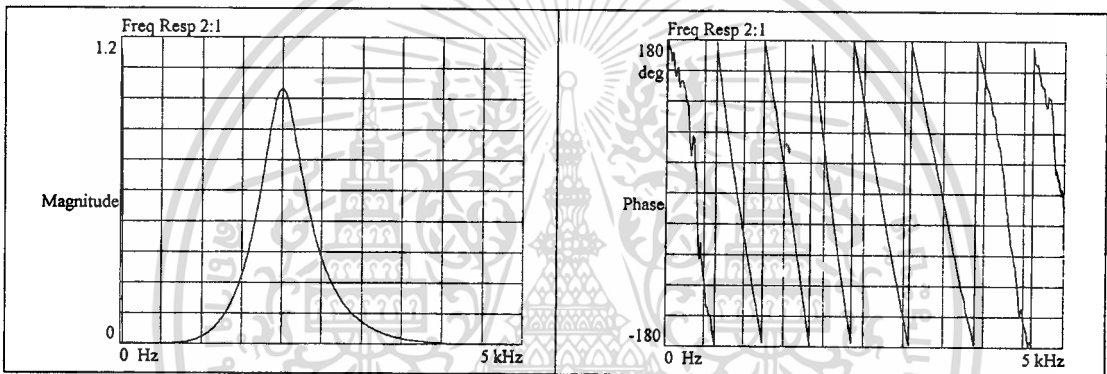
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

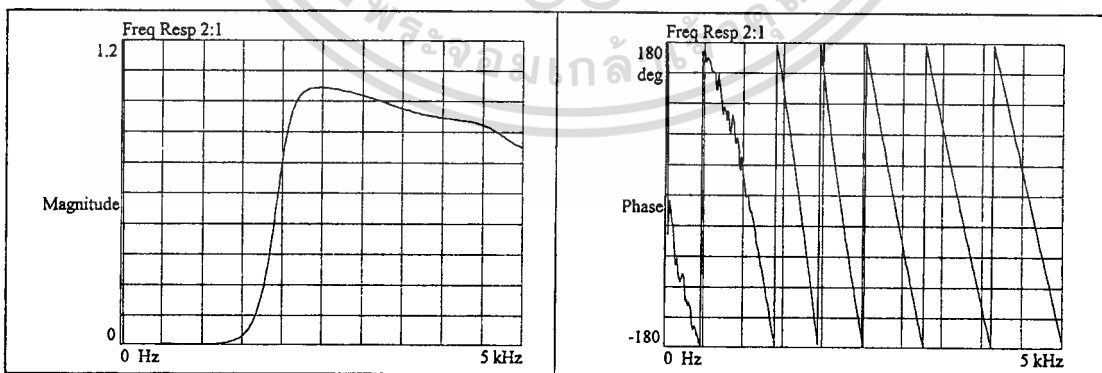
รูปที่ 4.39 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบ ไบควอดชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.40 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบ ไบควอดชนิดกรองแถบความถี่ผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.41 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบ ไบควอดชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 10 จากการวัดจริง

#### 4.8 การออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12

การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12 ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน โดยกำหนดความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่านมีค่าเท่ากับความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบความถี่ผ่านที่ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม 10 kHz ซึ่งวิธีการออกแบบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

##### 4.8.1 การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเชิงอุปมานอันดับที่ 12 โดยมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$H(s) = \frac{1}{s^{12} + 7.661s^{11} + 29.348s^{10} + 74.078s^9 + 136.878s^8 + 194.724s^7 + 218.474s^6 + 194.724s^5 + 136.879s^4 + 74.078s^3 + 29.348s^2 + 7.661s + 1} \quad (4.74)$$

ทำการหาค่า  $\Omega$  จากสมการที่ (4.2) จะได้

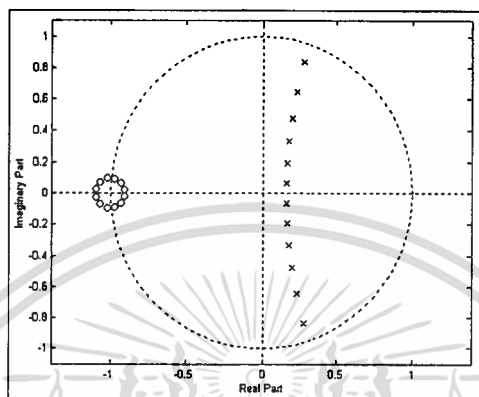
$$\Omega = \tan \frac{(2\pi * 2000 * 1 * 10^{-4})}{2} = 0.7265 \quad (4.75)$$

แล้วทำการสเกลความถี่โดยแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการที่ (4.74) จะได้ผล ดังสมการที่ (4.76)

$$H(S) = \frac{0.0216}{S^{12} + 5.5300S^{11} + 15.4920S^{10} + 28.4101S^9 + 38.1399S^8 + 39.4208S^7 + 32.1342S^6 + 20.8088S^5 + 10.6273S^4 + 4.1787S^3 + 1.2028S^2 + 0.2281S + 0.0216} \quad (4.76)$$

ใช้ทฤษฎีการแปลงเชิงเส้นคู่โดยแทน  $S = \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  ลงในสมการที่ (4.76) เพื่อหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแซคโดเมน ดังสมการที่ (4.77) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.42

$$H(z) = 0.0001 \frac{(1 + 12z^{-1} + 66z^{-2} + 220z^{-3} + 495z^{-4} + 792z^{-5} + 924z^{-6} + 792z^{-7} + 495z^{-8} + 220z^{-9} + 66z^{-10} + 12z^{-11} + z^{-12})}{(1 - 2.393z^{-1} + 4.113z^{-2} - 4.594z^{-3} + 3.9875z^{-4} - 2.6044z^{-5} + 1.3408z^{-6} - 0.5301z^{-7} + 0.1611z^{-8} - 0.0360z^{-9} + 0.0057z^{-10} - 0.0006z^{-11} + 0.0001z^{-12})} \quad (4.77)$$



รูปที่ 4.42 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดิ่งสมการที่ (4.77)

ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังสมการที่ (4.77) ให้เป็น โครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.78)

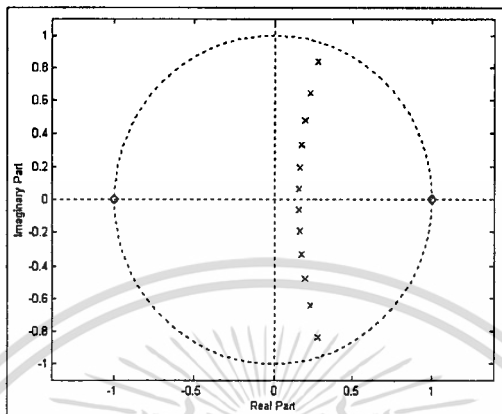
$$H(z) = 4.2647 + \frac{(95.1047 - 0.0290z^{-1})}{(1 - 0.3181z^{-1} + 0.0294z^{-2})} + \frac{(-134.9059 + 18.3889z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(22.4327 - 21.3357z^{-1})}{(1 - 0.3523z^{-1} + 0.1399z^{-2})} + \frac{(16.2494 + 1.6082z^{-1})}{(1 - 0.3914z^{-1} + 0.2667z^{-2})} + \frac{(-2.7387 + 2.9027z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} + \frac{(-0.4069 - 0.2028z^{-1})}{(1 - 0.5498z^{-1} + 0.7791z^{-2})} \quad (4.78)$$

#### 4.8.2 การออกแบบตัวกรองแถบความถี่ผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับความถี่คัตออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองแถบความถี่ผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์กลางจำนวน 6 ตัว และจุด  $\pi$  จำนวน 6 ตัว แล้วทำการนอร์มัลไลซ์ค่าอัตราขยายให้เป็นหนึ่ง สามารถนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.79) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = 0.0011 \frac{(1 - 6z^{-2} + 15z^{-4} - 20z^{-6} + 15z^{-8} - 6z^{-10} + z^{-12})}{(1 - 2.393z^{-1} + 4.113z^{-2} - 4.594z^{-3} + 3.9875z^{-4} - 2.6044z^{-5} + 1.3408z^{-6} - 0.5301z^{-7} + 0.1611z^{-8} - 0.0360z^{-9} + 0.0057z^{-10} - 0.0006z^{-11} + 0.0001z^{-12})} \quad (4.79)$$



รูปที่ 4.43 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคดิงสมการที่ (4.79)

เพื่อให้การออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไปควอดอันดับที่ 12 มีผลตอบสนองขนาดและความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ดังสมการที่ (4.79) จึงต้องจัดสมการใหม่เพื่อนำไปเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขต่อไป โดยจัดสมการเป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.80)

$$H(z) = \frac{(-552.2524 + 170.6554z^{-1})}{(1 - 0.3181z^{-1} + 0.0294z^{-2})} + \frac{(913.4947 - 282.2854z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(-444.0491 + 137.2187z^{-1})}{(1 - 0.3523z^{-1} + 0.1399z^{-2})} + \frac{(102.7542 - 31.7528z^{-1})}{(1 - 0.3914z^{-1} + 0.2667z^{-2})} + \frac{(24.5698 + 7.5925z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} + \frac{(4.6224 - 1.4284z^{-1})}{(1 - 0.5498z^{-1} + 0.7791z^{-2})} \quad (4.80)$$

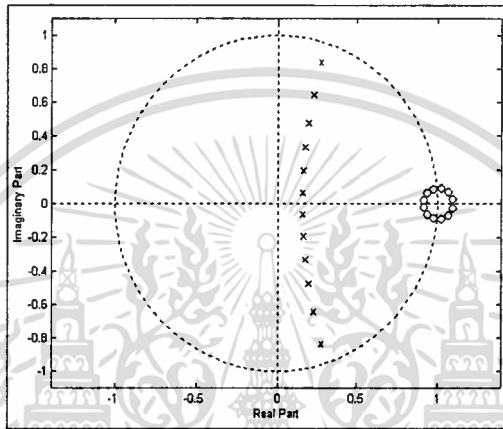
#### 4.8.3 การออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่าน

การกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค เนื่องจากความถี่คัทออฟมีค่าเท่ากับความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน จึงกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่สูงผ่านตรงกับตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนตำแหน่งซีโรกำหนดให้วางอยู่บนเส้นรอบวงที่จุดศูนย์จำนวน 12 ตัว และสามารถหาค่าอัตราขยาย ดังสมการที่ (4.81) จึงนำไปเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่สูงผ่าน ดังสมการที่ (4.82) และตำแหน่งของโพลและซีโรบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซค ดังรูปที่ 4.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_H = \frac{G_L}{\Omega^{12}} = \frac{0.0001}{0.7265^{12}} = 0.0051 \quad (4.81)$$

$$H(z) = 0.0051 \frac{(1 - 12z^{-1} + 66z^{-2} - 220z^{-3} + 495z^{-4} - 792z^{-5} + 924z^{-6} - 792z^{-7} + 495z^{-8} - 220z^{-9} + 66z^{-10} - 12z^{-11} + z^{-12})}{(1 - 2.393z^{-1} + 4.1136z^{-2} - 4.5947z^{-3} + 3.9875z^{-4} - 2.6044z^{-5} + 1.3408z^{-6} - 0.5301z^{-7} + 0.1611z^{-8} - 0.0360z^{-9} + 0.0057z^{-10} - 0.0006z^{-11} + 0.0001z^{-12})} \quad (4.82)$$



รูปที่ 4.44 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโรในระนาบแซคตามสมการที่ (4.82)

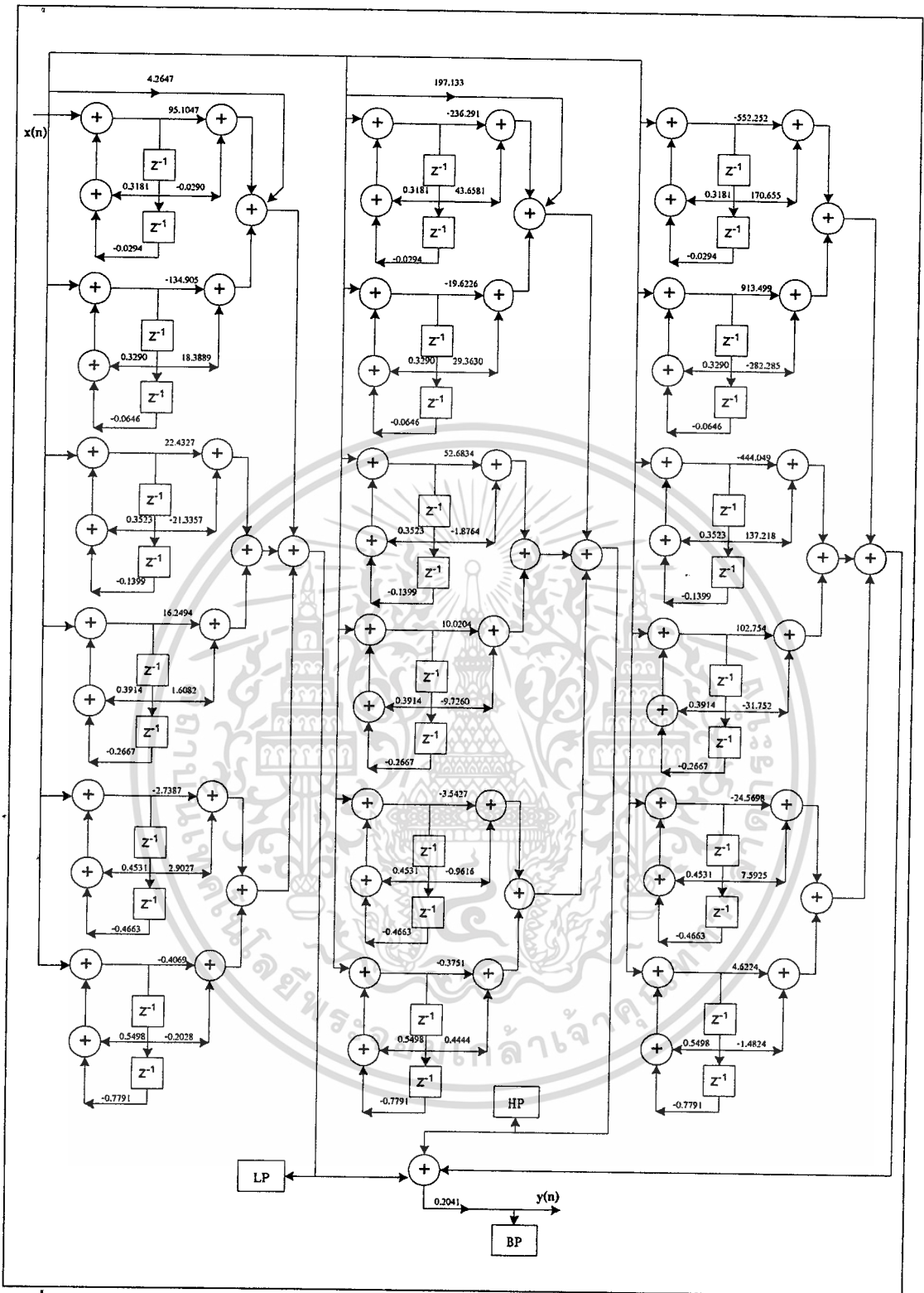
ใช้ทฤษฎีการแยกสมการเป็นเศษส่วนย่อย เพื่อจัดโครงสร้างของตัวกรองความถี่สูงผ่านดังสมการที่ (4.82) ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน ดังสมการที่ (4.83)

$$H(z) = 197.1333 + \frac{(-236.2916 + 43.6581z^{-1})}{(1 - 0.3181z^{-1} + 0.0294z^{-2})} + \frac{(-19.6226 + 29.3630z^{-1})}{(1 - 0.3290z^{-1} + 0.0646z^{-2})} + \frac{(52.6834 - 1.8764z^{-1})}{(1 - 0.3523z^{-1} + 0.1399z^{-2})} + \frac{(10.0204 - 9.7260z^{-1})}{(1 - 0.3914z^{-1} + 0.2667z^{-2})} + \frac{(-3.5427 - 0.9616z^{-1})}{(1 - 0.4531z^{-1} + 0.4663z^{-2})} + \frac{(-0.3751 + 0.4444z^{-1})}{(1 - 0.5498z^{-1} + 0.7791z^{-2})} \quad (4.83)$$

#### 4.8.4 การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12

นำสมการที่ (4.78), (4.80) และ (4.83) มาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12 ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ดังรูปที่ 4.45 และนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงสร้างแต่ละแบบที่ต่อขนานกันไปทำการแปลงแซคคคคค แล้วเขียนเป็นสมการผลต่างเพื่อนำไปสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

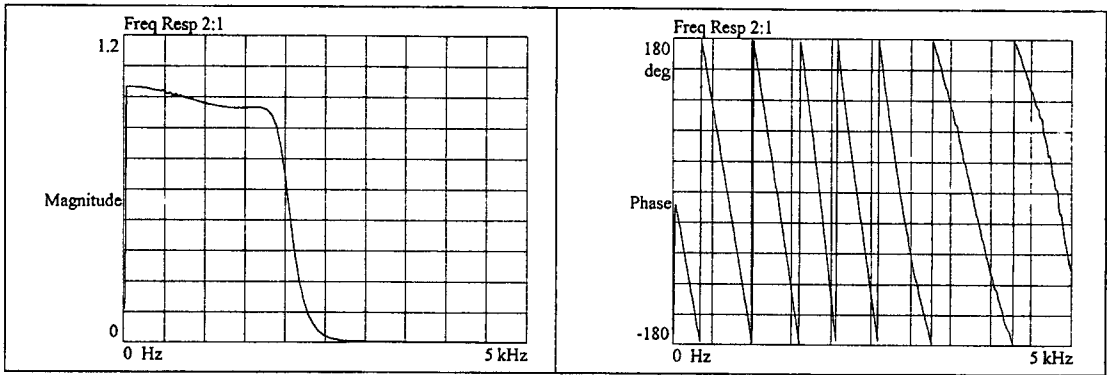


รูปที่ 4.45 แสดงโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12

4.8.5 การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 12 ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.46 – 4.48

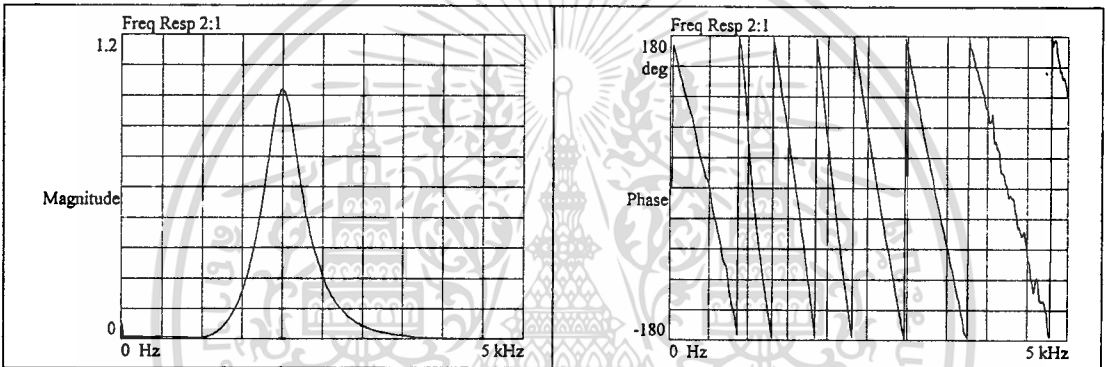
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

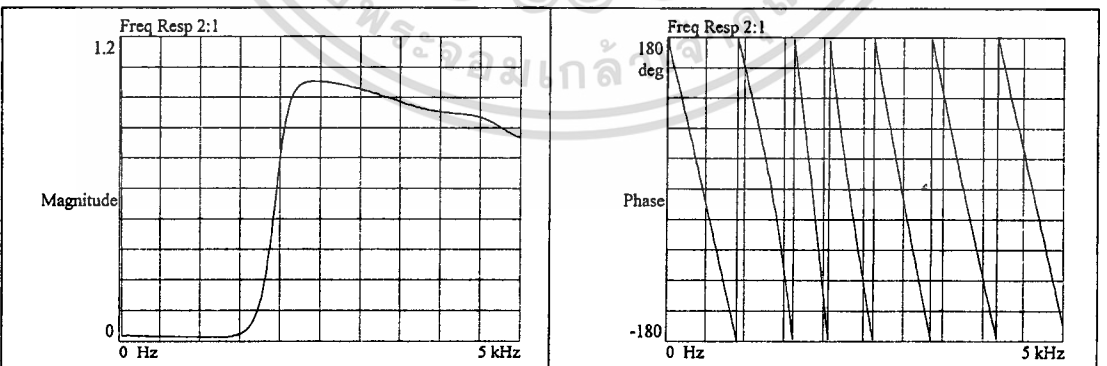
รูปที่ 4.46 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.47 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองแถบความถี่ผ่านผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง



a) ผลตอบสนองทางขนาด

b) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 4.48 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดชนิดกรองความถี่สูงผ่านอันดับที่ 12 จากการวัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดที่ให้ผลตอบสนองความถี่ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกัน คือ กรองความถี่ต่ำผ่าน กรองความถี่สูงผ่านและกรองแถบความถี่ผ่าน สามารถออกแบบและสร้างได้โดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรลงบนวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วยในระนาบแซด ซึ่งการกำหนดตำแหน่งโพลของตัวกรองความถี่แต่ละแบบกำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ส่วนการกำหนดตำแหน่งซีโรขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกรองความถี่แต่ละแบบ แล้วนำสมการในรูปแซดโดเมนที่ได้จากการออกแบบมาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลข โดยสามารถเขียนได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบเรียงกันและโครงสร้างแบบขนาน แล้วนำมาสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ซึ่งจากการทดลองแรกได้ออกแบบและสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2 โดยนำสมการที่ได้จากการออกแบบมาเขียนเป็นโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบเรียงกัน จากผลการทดลองพบว่า ตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบทำงานได้อย่างถูกต้อง คือ ผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและตัวกรองความถี่สูงผ่าน มีค่าความถี่คัทออฟตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน มีค่าความถี่ศูนย์กลางและแบนด์วิดตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบจะผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากผลของตัวกรองรีคอนสตรัคชัน [22] (Reconstruction Filter) ของตัวแปลงสัญญาณเชิงเลขเป็นเชิงอุปมาน (Digital to Analog Conversion)

ในส่วนของการออกแบบและการสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่สูงกว่าอันดับที่ 2 สามารถออกแบบและสร้างได้จนถึงอันดับที่ 12 ซึ่งจากการทดลองพบว่าการสร้างโดยใช้โครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบเรียงกันนั้นจะเกิดความผิดพลาดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Round Off Error และ Coefficient Quantization Error เนื่องจากมีลำดับในการคำนวณมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดลำดับการคำนวณให้สั้นลงจึงมีการจัดโครงสร้างของตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดใหม่ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน โดยจากผลการทดลองพบว่าตัวกรองความถี่ทั้ง 3 แบบทำงานได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกับตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดอันดับที่ 2

ในส่วนของการสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 นั้น การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอดที่มีอันดับที่สูงกว่าอันดับที่ 2 ทำให้โปรแกรมการทำงานมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงต้องมีการออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์ขยายหน่วยความจำเพื่อรองรับการพัฒนา โปรแกรมที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้พื้นที่ว่างสำหรับต่อหน่วยความจำเพิ่ม เพื่อออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์ได้ 2 ช่วง คือ External User\_RAM มีพื้นที่ประมาณ 4M x 32 และ External User\_Boot มีพื้นที่ประมาณ 8M x 32 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Daryanani, Principles of Active Network Synthesis and Design, John Wiley and Sons Inc., New York, 1976.
- [2] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Application, Prentice Hall, 1996.
- [3] วัลลภ สุระกำพลธร, การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.
- [4] เอก ไชยสวัสดิ์, สัญญาณและระบบ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- [5] E. C. Ifeachor, and B. W. Jervis, Digital Signal Processing A Practical Approach, Addison Wesley., 1993.
- [6] S. J. Orfanidis, Introduction to Signal Processing, Prentice Hall., 1996.
- [7] L. C. Ludeman, Fundamentals of Digital Signal Processing, Harper and Row Publisher., 1986.
- [8] G. Zelniker and F. J. Taylor, Advanced Digital Signal Processing Theory and Application, Marcel Dekker Inc., 1996.
- [9] ไพรัช รัชชพงษ์, การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ตอนการออกแบบวงจรกรองดิจิทัล, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2535.
- [10] H. Nielinger, "Digital (IIR) Filter Biquad Section Simulated with PSPICE," IEEE Trans. Education, Vol. 36, No. 2, pp. 383 – 385, Nov., 1993.
- [11] D. J. Shpak, "The Analytical Design of Biquadratic Parametric Filters," IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing, pp. 649 – 652, May., 1991.
- [12] P. K. Sim, "Design of Orthogonal Biquad Digital Filters," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 37, No. 8, pp. 1043 - 1048, Aug., 1990.
- [13] Y. V. Ramana Rao, and C. Eswaran, "Constant – Input Stability of Some Known Digital Biquads," Electronics Letters, Vol. 25, No. 12, pp. 762 – 763, Jun., 1989.
- [14] C. Eswaran, K. Manivannan, and A. Antoniou, "An Alternative Sensitivity Measure for Designing Low – Sensitivity Digital Biquads," IEEE Trans. Circuits and System, Vol. 38, No. 2, pp. 218 - 221, Feb., 1991.

- [15] K. S. Prasad, and C. Eswaran, "Limit – Cycle Free Complex Biquad Recursive Digital Filters," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. 36, No. 2, pp. 280 - 285, Feb., 1989.
- [16] R. H. Brackert, H. J. Orchard and A. N. Willson, "A Theorem Providing Bounds on Digital Filter Scaling Factors," IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 39, No. 4, pp. 956 - 958, Apr., 1991.
- [17] S. D. Stearns and R. A. David, Signal Processing Algorithms in Matlab, Prentice Hall Inc., 1996.
- [18] S. K. Mitra, Digital Signal Processing A Computer Based Approach," McGraw Hill Company 2001
- [19] R. Chassaing, Digital Signal Processing Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31 DSK, John Wiley and Sons Inc., New York, 1999.
- [20] TMS320C3X User's Guide, Texas Instruments Inc., Dallas, Tx., 1997.
- [21] ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, มณฑล ทีลาจินดาไกรฤกษ์ และ สุรพันธ์ ชีมมัน, "การเพิ่มประสิทธิภาพบอร์ดประมวลผลสัญญาณ TMS320C3x DSP Starter Kit," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 1- 6, มีนาคม 2544.
- [22] TLC32040 Analog Interface Circuit, Texas Instruments Inc., Dallas, Tx., 1997.

ภาคผนวก ก.

# บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31

## DSP Starter Kit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

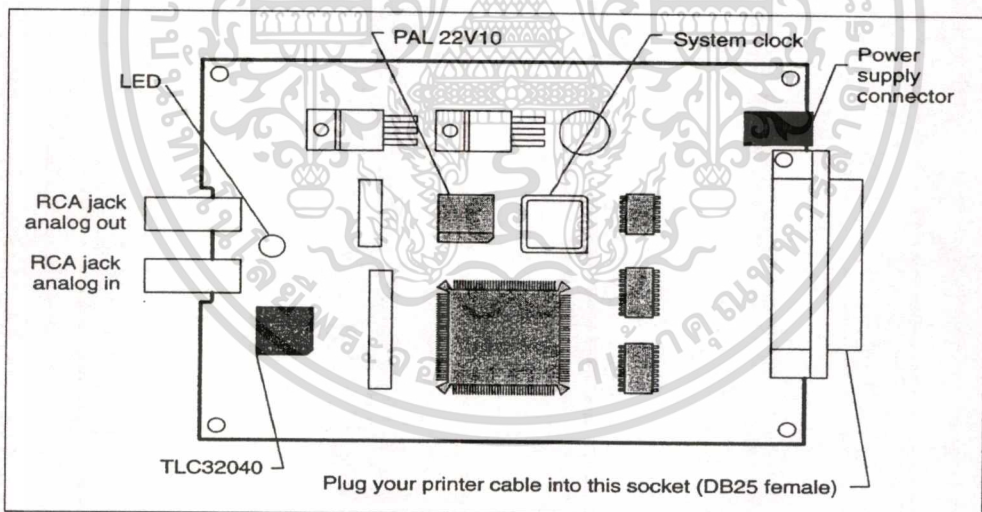
## บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 DSP Starter Kit

บอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit (DSK) เป็นบอร์ดพัฒนาโปรแกรมแบบ Stand – Alone สามารถประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time) ได้โดยเราสามารถที่จะสั่งให้โปรแกรมทำงาน หรือหยุดทำงานได้โดยผ่านพอร์ตของคอมพิวเตอร์และสามารถต่อบอร์ดอินเตอร์เฟสแบบต่าง ๆ เข้ากับบอร์ด DSK ได้

### 1. ลักษณะของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit (DSK)

ฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSK มีส่วนประกอบพื้นฐานที่ประกอบด้วย

- ชิป DSP TMS320C31
- ชิป A/D - D/A TLC32040
- พอร์ต Input/Output
- พอร์ตขนานของพริ้นเตอร์
- LED แบบ 3 สี



รูปภาคผนวกที่ 1 แสดงฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

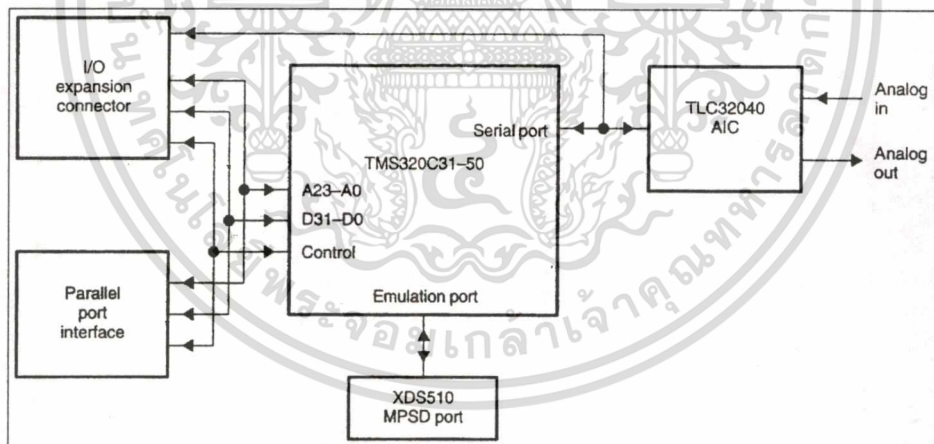
จากรูปภาคผนวกที่ 1 จะเห็นว่าอุปกรณ์บนบอร์ด DSK จะประกอบด้วย

- Header ขนาด 32 pin จำนวน 4 แถว สัญญาณทุกเส้นของ TM320C31 DSK ที่ ส่งออกไปภายนอกบอร์ดจะต้องผ่าน Header ชุดนี้ซึ่งประกอบด้วย JP2 JP3 JP5 JP6
- Jumper block header ขนาด 11 pin (JP4) จะทำหน้าที่ควบคุมการส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรมของวงจรมัลติเพลกซ์อินเตอร์เฟส TLC32040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Host Interface Logic จะใช้ PLA 22V10Z และ 74ACT245 ควบคุมการสื่อสารระหว่างบอร์ด DSK กับ Host ของคอมพิวเตอร์
- ออสซิลเลเตอร์ บนบอร์ด TMS320C31 DSK จะใช้สัญญาณนาฬิกาขนาด 50 MHz เพื่อป้อนให้ชิป TMS320C31
- RCA Jack จะทำหน้าที่รับสัญญาณ Analog Input และส่งสัญญาณ Analog Output ของบอร์ด TMS320C31 DSK โดยจะต่ออยู่กับขา I/O ของชิป TLC32040
- ชิป TLC32040 จะทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A ของบอร์ด TMS320C31 DSK
- ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบจุดทศนิยมลอย (Floating Point)
- Voltage Regulators ของบอร์ด DSK สามารถใช้ไฟ 7-12 Vdc หรือ 6-9 Vac โดยไฟ DC และ AC จะต้องผ่าน IC Regulator เบอร์ LM7805 และ LM7905 ซึ่งจะได้ไฟ DC +5V และ -5V ตามลำดับ ไฟ DC ที่ได้จะใช้เลี้ยงอุปกรณ์ต่างๆภายในบอร์ดตลอดเวลาที่บอร์ดยังทำงานอยู่
- XDS Emulator Port เป็น Header ขนาด 12 Pin (JP1) ใช้สำหรับการ Upgrade โปรแกรม XDS debugger ในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงเป็นรูปบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปภาคผนวกที่ 2



รูปภาคผนวกที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

## 2. คุณสมบัติของบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

- ใช้ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบ Floating-Point
- ใช้เวลาในการประมวลผลคำสั่ง 40ns ต่อ 1 คำสั่ง หรือ 50 MFLOP และ 25 MIPS

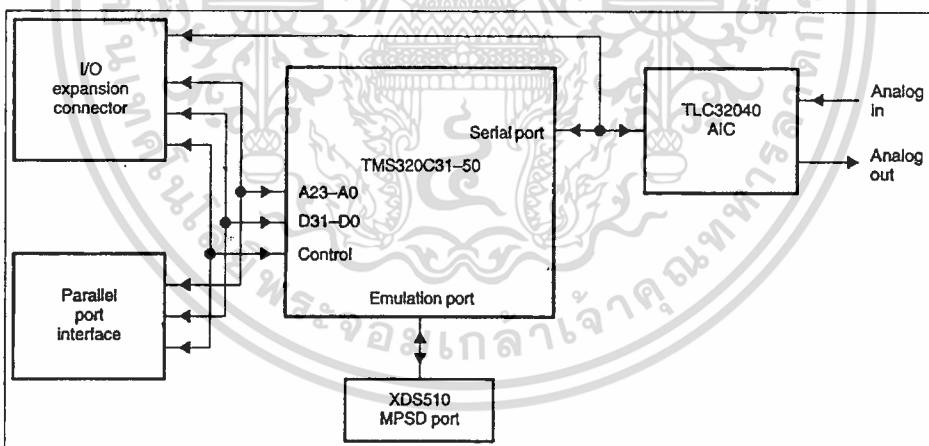
MFLOP : Million Floating-point Intention Per Second

MIPS : Million Intention Per Second

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Host Interface Logic จะใช้ PLA 22V10Z และ 74ACT245 ควบคุมการสื่อสารระหว่างบอร์ด DSK กับ Host ของคอมพิวเตอร์
- ออสซิลเลเตอร์ บนบอร์ด TMS320C31 DSK จะใช้สัญญาณนาฬิกาขนาด 50 MHz เพื่อป้อนให้ชิป TMS320C31
- RCA Jack จะทำหน้าที่รับสัญญาณ Analog Input และส่งสัญญาณ Analog Output ของบอร์ด TMS320C31 DSK โดยจะต่ออยู่กับขา I/O ของชิป TLC32040
- ชิป TLC32040 จะทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A ของบอร์ด TMS320C31 DSK
- ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบจุดทศนิยมลอย (Floating Point)
- Voltage Regulators ของบอร์ด DSK สามารถใช้ไฟ 7-12 Vdc หรือ 6-9 Vac โดยไฟ DC และ AC จะต้องผ่าน IC Regulator เบอร์ LM7805 และ LM7905 ซึ่งจะได้อไฟ DC +5V และ -5V ตามลำดับ ไฟ DC ที่ได้จะใช้เลี้ยงอุปกรณ์ต่างๆภายในบอร์ดตลอดเวลาที่บอร์ดยังทำงานอยู่
- XDS Emulator Port เป็น Header ขนาด 12 Pin (JP1) ใช้สำหรับการ Upgrade โปรแกรม XDS debugger ในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงเป็นรูปบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปภาคผนวกที่ 2



รูปภาคผนวกที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

## 2. คุณสมบัติของบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

- ใช้ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบ Floating-Point
- ใช้เวลาในการประมวลผลคำสั่ง 40ns ต่อ 1 คำสั่ง หรือ 50 MFLOP และ 25 MIPS

MFLOP : Million Floating-point Intention Per Second

MIPS : Million Intention Per Second

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

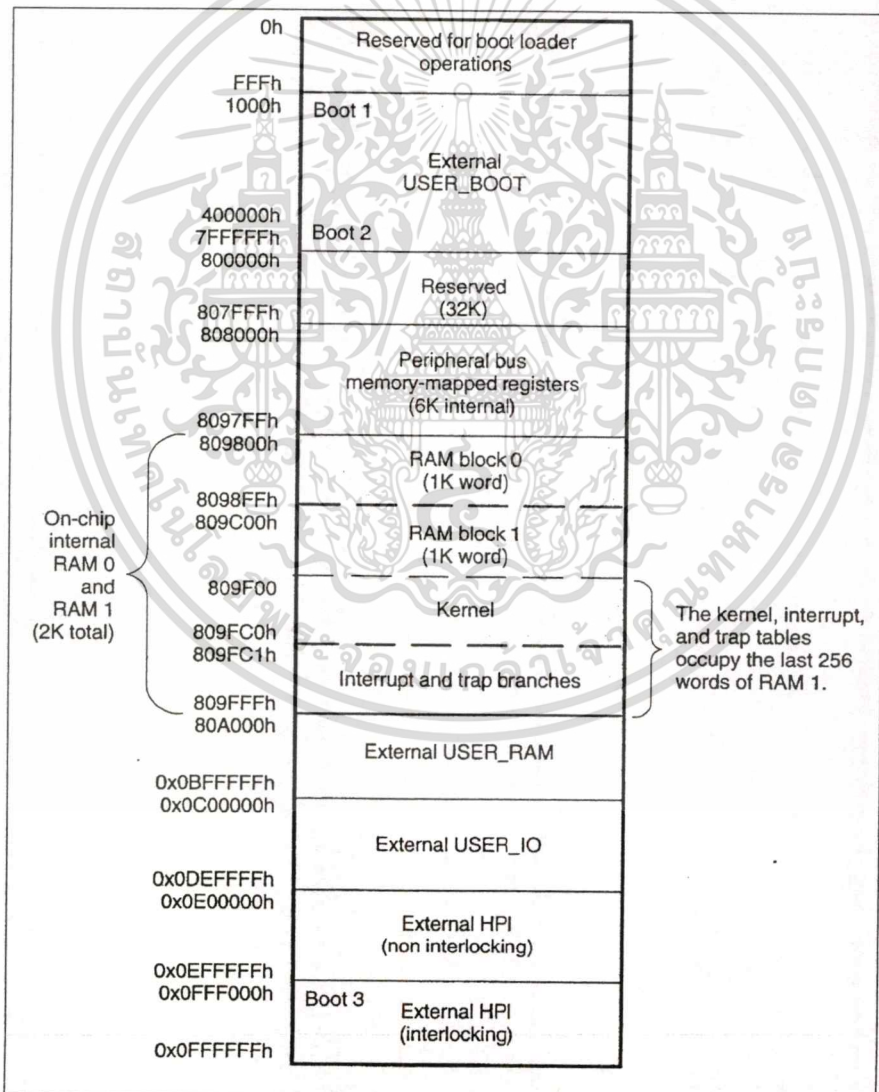
-บอร์ด TMS320C31 DSK สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ได้โดยใช้พอร์ตขนานของ  
พริ้นเตอร์หรือใช้ Host ของคอมพิวเตอร์

-ใช้ชิป TLC32040 ขนาด 14 บิต อัตราการสุ่มสัญญาณ 20,000 ครั้งต่อวินาที

-ใช้ RCA Jack เป็น Jack มาตรฐานสำหรับการต่อสายสัญญาณ Analog Input และ Analog  
Output

### 3. การจัดหน่วยความจำบนบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

บอร์ด TMS320C31 DSK ได้จัดแบ่งหน่วยความจำให้อยู่ในโหมด Microcomputer/Boot  
Loader ดังรูปภาคผนวกที่ 3



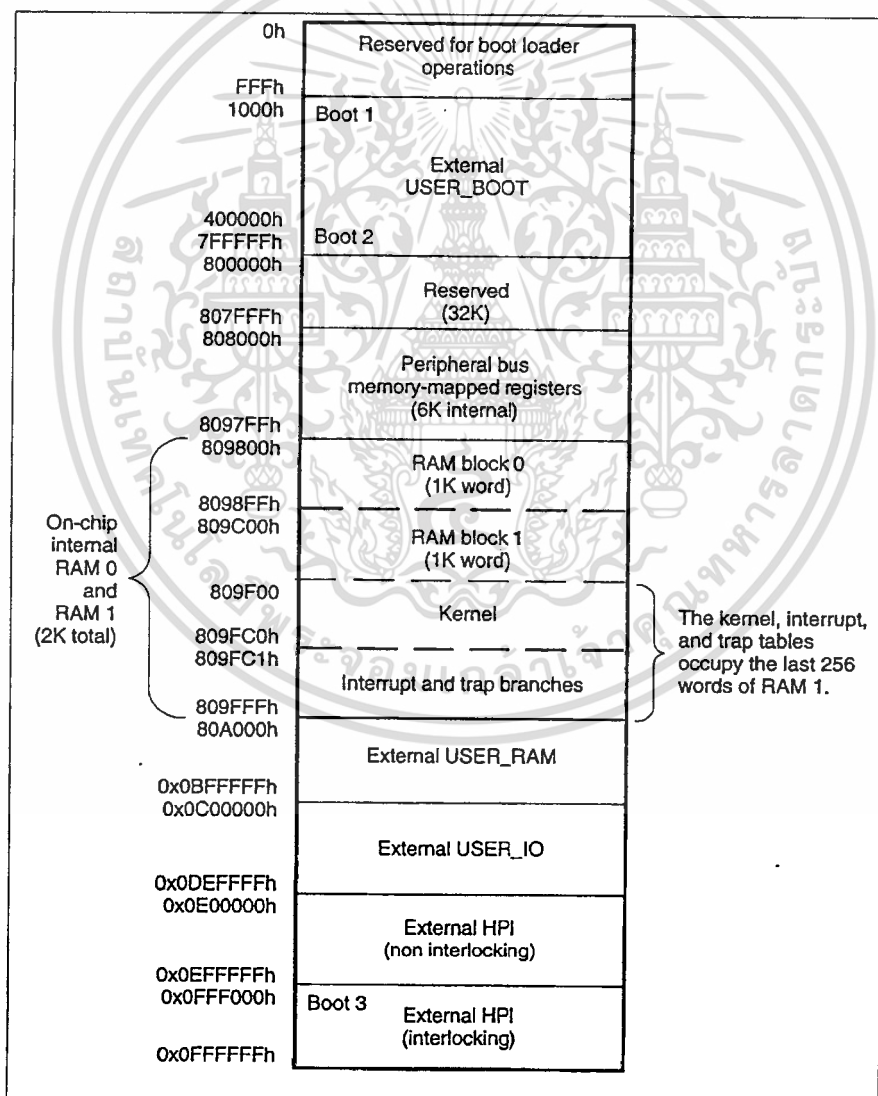
รูปภาคผนวกที่ 3 แสดงการจัดแบ่งหน่วยความจำในโหมด Microcomputer/Boot Loader ของ  
บอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บอร์ด TMS320C31 DSK สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ได้โดยใช้พอร์ตขนานของพรินเตอร์หรือใช้ Host ของคอมพิวเตอร์
- ใช้ชิป TLC32040 ขนาด 14 บิต อัตราการสุ่มสัญญาณ 20,000 ครั้งต่อวินาที
- ใช้ RCA Jack เป็น Jack มาตรฐานสำหรับการต่อสายสัญญาณ Analog Input และ Analog Output

### 3. การจัดหน่วยความจำบนบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

บอร์ด TMS320C31 DSK ได้จัดแบ่งหน่วยความจำให้อยู่ในโหมด Microcomputer/Boot Loader ดังรูปภาคผนวกที่ 3



รูปภาคผนวกที่ 3 แสดงการจัดแบ่งหน่วยความจำในโหมด Microcomputer/Boot Loader ของ

บอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

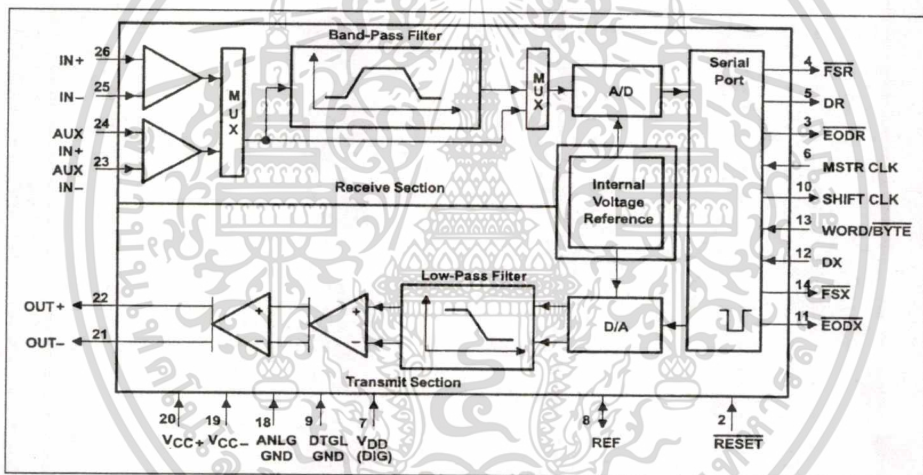
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. วงจรอินเทอร์เฟซสัญญาณอนาล็อก TLC32040

TLC32040 เป็นชิป Analog Interface Circuit (AIC) ที่ใช้เชื่อมต่อกับชิป TMS320C31 ในการทำงานประมวลผลด้าน DSP โดยมีลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เทคโนโลยีการผลิต Advanced LinCMOS
- ความละเอียดของ ADC และ DAC เป็น 14 บิต
- สามารถเปลี่ยนอัตราการสุ่มสัญญาณของ ADC และ DAC ได้ถึง 20,000 ครั้ง/วินาที
- มี Switched Capacitor Antialiasing Input Filter และ Output Reconstruction Filter
- มีพอร์ตอนุกรมสำหรับติดต่อโดยตรงกับ TMS320C11, TMS320C17, TMS320C20, TMS320C25 Digital Signal Processing
- สามารถปรับอัตราการแปลงของ ADC และ DAC ได้โดยใช้โปรแกรมควบคุม

ฟังก์ชันไออะแกรม ดังรูปภาคผนวกที่ 4



รูปภาคผนวกที่ 4 แสดงฟังก์ชันไออะแกรมของชิป TLC32040

#### 5. การควบคุมวงจรถอนาล็อกอินเทอร์เฟซ

การส่งผ่านข้อมูลในวงจรถอนาล็อกอินเทอร์เฟซ (AIC) จะกระทำกันในรีจิสเตอร์สำหรับการรับข้อมูล (Data Receive: DR) และรีจิสเตอร์สำหรับการส่งข้อมูล (Data Transmit: DX) รีจิสเตอร์ทั้ง 2 จะทำการส่งข้อมูลในแบบอนุกรม ในการควบคุมรีจิสเตอร์การส่งผ่านข้อมูลของ AIC จะใช้บิตล่าง 2 บิต (LSBs) เป็นตัวกำหนดการติดต่อเมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 0 จะเป็นการส่งผ่านแบบปกติ เมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 1 จะเป็นการติดต่อระดับ 2 การควบคุมการติดต่อระดับ 2 นี้ AIC จะยอมให้ส่งผ่านข้อมูลครั้งแรกก่อน

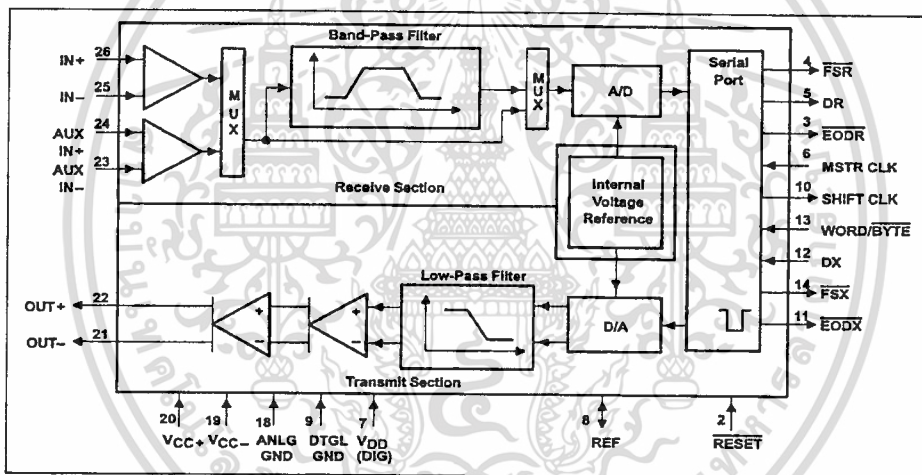
รีจิสเตอร์ A และ B บน AIC จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของ AIC โดยรีจิสเตอร์ A ประกอบด้วย TA, RA และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุมตัวกรอง (Represent Filter Control) รีจิสเตอร์ B เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. วงจรอินเทอร์เฟซสัญญาณอนาล็อก TLC32040

TLC32040 เป็นชิป Analog Interface Circuit (AIC) ที่ใช้เชื่อมต่อกับชิป TMS320C31 ในการทำงานประมวลผลด้าน DSP โดยมีลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เทคโนโลยีการผลิต Advanced LinCMOS
- ความละเอียดของ ADC และ DAC เป็น 14 บิต
- สามารถเปลี่ยนอัตราการสุ่มสัญญาณของ ADC และ DAC ได้ถึง 20,000 ครั้ง/วินาที
- มี Switched Capacitor Antialiasing Input Filter และ Output Reconstruction Filter
- มีพอร์ทอนุกรมสำหรับติดต่อโดยตรงกับ TMS320C11, TMS320C17, TMS320C20, TMS320C25 Digital Signal Processing
- สามารถปรับอัตราการแปลงของ ADC และ DAC ได้โดยใช้โปรแกรมควบคุม

ฟังก์ชันไดอะแกรม ดังรูปภาคผนวกที่ 4



รูปภาคผนวกที่ 4 แสดงฟังก์ชันไดอะแกรมของชิป TLC32040

#### 5. การควบคุมวงจรถอนาล็อกอินเทอร์เฟซ

การส่งผ่านข้อมูลในวงจรถอนาล็อกอินเทอร์เฟซ (AIC) จะกระทำกันในรีจิสเตอร์สำหรับการรับข้อมูล (Data Receive: DR) และรีจิสเตอร์สำหรับการส่งข้อมูล (Data Transmit: DX) รีจิสเตอร์ทั้ง 2 จะทำการส่งข้อมูลในแบบอนุกรม ในการควบคุมรีจิสเตอร์การส่งผ่านข้อมูลของ AIC จะใช้บิตล่าง 2 บิต (LSBs) เป็นตัวกำหนดการติดต่อเมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 0 จะเป็นการส่งผ่านแบบปกติ เมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 1 จะเป็นการติดต่อระดับ 2 การควบคุมการติดต่อระดับ 2 นี้ AIC จะยอมให้ส่งผ่านข้อมูลครั้งแรกก่อน

รีจิสเตอร์ A และ B บน AIC จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของ AIC โดยรีจิสเตอร์ A ประกอบด้วย TA, RA และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุมตัวกรอง (Represent Filter Control) รีจิสเตอร์ B เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะประกอบด้วย TB, RB และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุม A/D และ D/A รีจิสเตอร์เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการตั้งค่าเวลาภายใน

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TA และ RA เป็น

บิต 0-1	→	0, 0
บิต 2-6	→	RA
บิต 7-8	→	don't care (x)
บิต 9-13	→	TA
บิต 14-15	→	don't care (x)

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TB และ RB เป็น

บิต 0-1	→	0, 1
บิต 2-7	→	RB
บิต 8	→	don't care (x)
บิต 9-14	→	TB
บิต 15	→	don't care (x)

AIC สามารถกำหนดค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด โดยการให้การติดต่อระดับ 2 โดยให้ตั้งค่าเป็น 1 ใน 2 บิตแรก (LSBs) ทำให้การติดต่อระดับ 2 มีค่าเหมือนการติดต่อระดับ 1 ถ้าดับข้อมูลจะถูกโหลดจากรีจิสเตอร์ส่งข้อมูลพอร์ตอนุกรม และเซต LSBs ทั้ง 2 เป็น 1 สำหรับการติดต่อระดับ 2 ในแต่ละครั้งมีดังนี้

1. 0x3 (3h) ใช้เรียกการติดต่อระดับ 2
2. ค่าที่รีจิสเตอร์ A
3. 0x3 เรียกการติดต่อระดับ 2 ครั้งที่ 2
4. ค่าที่รีจิสเตอร์ B
5. 0x3 เรียกการติดต่อระดับ 2 ครั้งที่ 3
6. ค่าที่เซตรีจิสเตอร์ควบคุม

สามารถหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด (BW)

## 6. การคำนวณหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด

บอร์ด TMS320C31 DSK มี Input Clock (CLKIN) เป็น 50 MHz สามารถกำเนิดความถี่

สัญญาณนาฬิกาสูงสุด (Timer Frequency) เป็น  $MCLK = (CLKIN/4) = 12.5 \text{ MHz}$  ซึ่งสูงกว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะประกอบด้วย TB, RB และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุม A/D และ D/A รีจิสเตอร์เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการตั้งค่าเวลาภายใน

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TA และ RA เป็น

บิต 0-1	→	0, 0
บิต 2-6	→	RA
บิต 7-8	→	don't care (x)
บิต 9-13	→	TA
บิต 14-15	→	don't care (x)

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TB และ RB เป็น

บิต 0-1	→	0, 1
บิต 2-7	→	RB
บิต 8	→	don't care (x)
บิต 9-14	→	TB
บิต 15	→	don't care (x)

AIC สามารถกำหนดค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด โดยการใช้การติดต่อดระดับ 2 โดยให้ตั้งค่าเป็น 1 ใน 2 บิตแรก (LSBs) ทำให้การติดต่อดระดับ 2 มีค่าเหมือนการติดต่อดระดับ 1 ถ้าดับข้อมูลจะถูกโหลดจากรีจิสเตอร์ส่งข้อมูลพอร์ตอนุกรม และเซต LSBs ทั้ง 2 เป็น 1 สำหรับการติดต่อดระดับ 2 ในแต่ละครั้งมีดังนี้

1. 0x3 (3h) ใช้เรียกการติดต่อดระดับ 2
2. ค่าที่รีจิสเตอร์ A
3. 0x3 เรียกการติดต่อดระดับ 2 ครั้งที่ 2
4. ค่าที่รีจิสเตอร์ B
5. 0x3 เรียกการติดต่อดระดับ 2 ครั้งที่ 3
6. ค่าที่เซตรีจิสเตอร์ควบคุม

สามารถหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด (BW)

## 6. การคำนวณหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าแบนด์วิด

บอร์ด TMS320C31 DSK มี Input Clock (CLKIN) เป็น 50 MHz สามารถกำเนิดความถี่

สัญญาณนาฬิกาสูงสุด (Timer Frequenct) เป็น  $MCLK = (CLKIN/4) = 12.5 \text{ MHz}$  ซึ่งสูงกว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Master Clock Frequency ของ AIC ที่มีค่าเท่ากับ 10 MHz AIC Master Clock (MCLK) ที่เข้ามาสามารถวัดสัญญาณได้จากขา 8 ใน JP1 สัญญาณสูงสุดที่ได้จาก AIC สามารถหาได้จาก Input Clockหารด้วย 8 หรือ

$$MCLK = CLKIN/8 = (50 \text{ MHz} / 8) = 6.25 \text{ MHz}$$

Switched – Capacitor Filter Frequency (SCF) เป็นความสัมพันธ์จากรีจิสเตอร์การส่งของ A

$$SCF = MCLK / (2 \times TA) \quad (1)$$

และความถี่สุ่มเป็นความสัมพันธ์จาก การส่งค่าในรีจิสเตอร์ของ A และ B

$$Fs = MCLK / (2 \times TA \times TB) \quad (2)$$

Input Filter Bandwidth หรือ Cutoff Frequency ตั้งค่าที่ 3600 MHz สำหรับ SCF ที่ 288 kHz ค่า SCF ใหม่จะได้ค่า BW นำไปคำนวณในตัวอย่าง และหาค่า A และ B เพื่อไปตั้งค่า AIC

### 6.1 ออกแบบ $F_s = 8 \text{ kHz}$

การออกแบบ Cutoff Frequency ของ Input Antialiasing filter เป็น 3600 Hz ที่ SCF 288 kHz จากสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} TA &= MCLK / (2 \times SCF) = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 288 \text{ kHz}) \\ &= 10.85 \approx 11 = (01011)_2 \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} TB &= MCLK / (2 \times TA \times Fs) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 8000) \\ &= 35.51 \approx 36 = (100100)_2 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับกรณีสืบค้นเอกสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**SCF**  $6.25 \text{ MHz} / (2 \times TA)$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Master Clock Frequency ของ AIC ที่มีค่าเท่ากับ 10 MHz AIC Master Clock (MCLK) ที่เข้ามาสามารถวัดสัญญาณได้จากขา 8 ใน JP1 สัญญาณสูงสุดที่ได้จาก AIC สามารถหาได้จาก Input Clockหารด้วย 8 หรือ

$$MCLK = CLKIN/8 = (50 \text{ MHz} / 8) = 6.25 \text{ MHz}$$

Switched – Capacitor Filter Frequency (SCF) เป็นความสัมพันธ์จากรีจิสเตอร์การส่งของ A

$$SCF = MCLK / (2 \times TA) \quad (1)$$

และความถี่สุ่มเป็นความสัมพันธ์จาก การส่งค่าในรีจิสเตอร์ของ A และ B

$$Fs = MCLK / (2 \times TA \times TB) \quad (2)$$

Input Filter Bandwidth หรือ Cutoff Frequency ตั้งค่าที่ 3600 MHz สำหรับ SCF ที่ 288 kHz ค่า SCF ใหม่จะได้ค่า BW นำไปคำนวณในตัวอย่าง และหาค่า A และ B เพื่อไปตั้งค่า AIC

### 6.1 ออกแบบ $F_s = 8 \text{ kHz}$

การออกแบบ Cutoff Frequency ของ Input Antialiasing filter เป็น 3600 Hz ที่ SCF 288 kHz จากสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} TA &= MCLK / (2 \times SCF) = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 288 \text{ kHz}) \\ &= 10.85 \approx 11 = (01011)_2 \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} TB &= MCLK / (2 \times TA \times Fs) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 8000) \\ &= 35.51 \approx 36 = (100100)_2 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

$$= 284.09 \text{ kHz}$$

Cutoff Frequency หรือ Input Filter Bandwidth

$$\begin{aligned} \text{BW} &= 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)} \\ &= 3600(284.09 \text{ KHz} / 288 \text{ KHz}) \\ &= 3551.14 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จะได้ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times T_A \times T_B) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 36) \\ &= 7891.41 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ตำแหน่งบิตที่ใช้ ในการรีจิสเตอร์ควบคุม และตั้งค่า  $T_A = R_A$  ซึ่ง  $T_A$  มี 5 บิต,  $T_B$  มี 6 บิต และ  $xx$  จะไม่สนใจ (don't care) เช่น

$$\begin{array}{cccc|c} 00 & 01011 & 00 & 01011 & 00 & \longrightarrow & 162\text{Ch} \\ xx & T_A & xx & R_A & & & \end{array}$$

แยกบิตที่จะนำไปใช้เป็น 4 กลุ่ม โดยค่า  $A = 162\text{Ch}$   $T_B = R_B$  ก็เช่นเดียวกัน

$$\begin{array}{cc|cc|cc|c} 0 & 100100 & 0 & 100100 & 10 & \longrightarrow & 4892\text{h} \\ x & T_B & x & R_B & & & \end{array}$$

## 6.2 ออกแบบ $F_s = 10 \text{ kHz}$

ใช้ Cutoff frequency หรือ BW สำหรับ Input Antialiasing Filter เหมือนกับ  $F_s = 8 \text{ kHz}$ ,

$T_A = 11$  จะได้

$$\begin{aligned} T_B &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 10000) \\ &= 28.41 \approx 28 = (011100)_2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 284.09 \text{ kHz}$$

Cutoff Frequency หรือ Input Filter Bandwidth

$$\begin{aligned} \text{BW} &= 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)} \\ &= 3600(284.09 \text{ KHz} / 288 \text{ KHz}) \\ &= 3551.14 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จะได้ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times T_A \times T_B) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 36) \\ &= 7891.41 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ตำแหน่งบิตที่ใช้ ในการรีจิสเตอร์ควบคุม และตั้งค่า  $T_A = R_A$  ซึ่ง  $T_A$  มี 5 บิต,  $T_B$  มี 6 บิต และ  $xx$  จะไม่สนใจ (don't care) เช่น

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} 00 & 01011 & 00 & 01011 & 00 & \\ \hline xx & T_A & xx & R_A & & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 162\text{Ch}$$

แยกบิตที่จะนำไปใช้เป็น 4 กลุ่ม โดยค่า  $A = 162\text{Ch}$   $T_B = R_B$  ก็เช่นเดียวกัน

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} 0 & 100100 & 0 & 100100 & 10 & \\ \hline x & T_B & x & R_B & & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 4892\text{h}$$

## 6.2 ออกแบบ $F_s = 10 \text{ kHz}$

ใช้ Cutoff frequency หรือ BW สำหรับ Input Antialiasing Filter เหมือนกับ  $F_s = 8 \text{ kHz}$ ,  $T_A = 11$  จะได้

$$\begin{aligned} T_B &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 10000) \\ &= 28.41 \approx 28 = (011100)_2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times T_A \times T_B) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 28) \\ &= 10146 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่า B ได้

$$\begin{array}{c|c|c|c} 0 & 011100 & 0 & 011100 & 10 \\ x & TB & x & RB & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 3872h$$

หรือ B = 3872h

### 6.3 ออกแบบ $F_s = 20 \text{ kHz}$

ออกแบบ BW = 8000 Hz จาก

$$BW = 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)}$$

ค่า Switched – Capacitor Filter Frequency ค่าใหม่ เป็น

$$SCF = 8000(288 \text{ K}) / 3600 = 640 \text{ KHz}$$

ค่า  $T_A$  และ  $T_B$  เป็น

$$\begin{aligned} T_A &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 640 \text{ k}) \\ &= 4.88 \approx 5 = (00101)_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_B &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 20000) \\ &= 31.25 \approx 31 = (011111)_2 \end{aligned}$$

ได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

$$SCF = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5) = 625 \text{ kHz}$$

ได้ Bandwidth (ปฏิบัติ) เป็น

$$\begin{aligned} BW &= 3600(625 \text{ k} / 288 \text{ k}) \\ &= 7812.5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times T_A \times T_B) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 28) \\ &= 10146 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่า B ได้

$$0 \mid 011100 \mid 0 \mid 011100 \mid 10 \quad \longrightarrow \quad 3872h$$

$x \mid TB \mid x \mid RB \mid$

หรือ  $B = 3872h$

### 6.3 ออกแบบ $F_s = 20 \text{ kHz}$

ออกแบบ  $BW = 8000 \text{ Hz}$  จาก

$$BW = 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)}$$

ค่า Switched – Capacitor Filter Frequency ค่าใหม่ เป็น

$$SCF = 8000(288 \text{ K}) / 3600 = 640 \text{ KHz}$$

ค่า  $T_A$  และ  $T_B$  เป็น

$$\begin{aligned} T_A &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 640 \text{ k}) \\ &= 4.88 \approx 5 = (00101)_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_B &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 20000) \\ &= 31.25 \approx 31 = (011111)_2 \end{aligned}$$

ได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

$$SCF = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5) = 625 \text{ kHz}$$

ได้ Bandwidth (ปฏิบัติ) เป็น

$$\begin{aligned} BW &= 3600(625 \text{ k} / 288 \text{ k}) \\ &= 7812.5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ความถี่สุ่ม (ปฏิบัติ) เป็น

$$F_s = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 31) = 20161.29 \text{ Hz}$$

ค่า A จะได้

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 00 & 00101 & 00 & 00101 & 00 \\ \hline xx & TA & xx & RA & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 0A14h$$

หรือ  $A = 0A14h$

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 0 & 011111 & 0 & 011111 & 10 \\ \hline x & TB & x & RB & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 3E7Eh$$

หรือ  $B = 3E7Eh$

ดังนั้นสามารถสรุปค่าของรีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่าดังตารางภาคผนวกที่ 1

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงค่ารีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่า

Fs (ออกแบบ), Hz	Fs (ปฏิบัติ)	A	B
8000	7891.41	0x162C	0x4892
10000	10146	0x162C	0x3872
16000	15943	0x0E1C	0x3872
20000	20161.29	0x0A14	0x3E4E

ความถี่สุ่ม (ปฏิบัติ) เป็น

$$F_s = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 31) = 20161.29 \text{ Hz}$$

ค่า A จะได้

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 00 & 00101 & 00 & 00101 & 00 \\ \hline xx & TA & xx & RA & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 0A14h$$

หรือ  $A = 0A14h$

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 0 & 011111 & 0 & 011111 & 10 \\ \hline x & TB & x & RB & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 3E7Eh$$

หรือ  $B = 3E7Eh$

ดังนั้นสามารถสรุปค่าของรีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่าดังตารางภาคผนวกที่ 1

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงค่ารีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่า

Fs (ออกแบบ), Hz	Fs (ปฏิบัติ)	A	B
8000	7891.41	0x162C	0x4892
10000	10146	0x162C	0x3872
16000	15943	0x0E1C	0x3872
20000	20161.29	0x0A14	0x3E4E

ภาคผนวก ข.

## การเผยแพร่งานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

## การเผยแพร่งานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ และ สุรพันธ์ ยิ้มมัน, “การเพิ่มประสิทธิภาพบอร์ดประมวลผลสัญญาณ TMS320C3x DSP Starter Kit,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 1- 6, มีนาคม 2544.
2. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, วัชรพงศ์ หินจิตร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 93 – 98, มิถุนายน 2545.
3. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, วัชรพงศ์ หินจิตร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบ FIR ชนิดหลายแถบความถี่ผ่าน,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, หน้า 13 – 18, ธันวาคม 2545.
4. วัชรพงศ์ หินจิตร, ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขชนิดแบนด์แคบแบบหลายแถบความถี่,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, หน้า 7 – 12, ธันวาคม 2545.



1. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, มณฑล ตีลาจินดาไกรฤกษ์ และ สุรพันธ์ ยิ้มมัน, “การเพิ่มประสิทธิภาพบอร์ดประมวลผลสัญญาณ TMS320C3x DSP Starter Kit,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 1- 6, มีนาคม 2544.
2. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, วัชรพงศ์ หินจิตร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบไบควอด,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 93 – 98, มิถุนายน 2545.
3. ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, วัชรพงศ์ หินจิตร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบ FIR ชนิดหลายแถบความถี่ผ่าน,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, หน้า 13 – 18, ธันวาคม 2545.
4. วัชรพงศ์ หินจิตร, ชูสิทธิ์ ประดับเพชร, สุรพันธ์ ยิ้มมัน และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขชนิดแบนด์แคปแบบหลายแถบความถี่,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 19, ฉบับที่ 4, หน้า 7 – 12, ธันวาคม 2545.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายสุทธิ์ ประดับเพ็ชร์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษา  
 อดศาตรศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
 ปีการศึกษา 2539

ปี พ.ศ. 2536 เริ่มทำงานครั้งแรกที่บริษัทปูนซิเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) โรงงานเขาวง  
 ค. เขาวง อ. พระพุทธบาท จ.สระบุรี จนถึงปี พ.ศ. 2542 ได้รับการบรรจุแต่งตั้งเข้ารับราชการ  
 ที่สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำโปรแกรมวิชา  
 เทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายชูลิทธิ์ ประดับเพ็ชร เกิดเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษา  
 อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
 ปีการศึกษา 2539

ปี พ.ศ. 2536 เริ่มทำงานครั้งแรกที่บริษัทปูนซิเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) โรงงานเขาวง  
 ต. เขาวง อ. พระพุทธบาท จ. สระบุรี จนถึงปี พ.ศ. 2542 ได้รับการบรรจุแต่งตั้งเข้ารับราชการ  
 ที่สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำโปรแกรมวิชา  
 เทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้