



การสร้างตัวประมวลผลสัญญาณของตัวกรองสัญญาณดิจิทัลแบบปรับค่าได้  
**SIGNAL PROCESSOR IMPLEMENTATION OF VARIABLE DIGITAL FILTERS**



ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 54993  
วัน,เดือน,ปี - 4 เม.ย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้  
เผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง



การสร้างตัวประมวลผลสัญญาณของตัวกรองสัญญาณดิจิทัลแบบปรับค่าได้

## SIGNAL PROCESSOR IMPLEMENTATION OF VARIABLE DIGITAL FILTERS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างตัวประมวลผลสัญญาณของตัวกรองสัญญาณดิจิทัลแบบปรับค่าได้

## Digital Signal Processor Implementation of Variable Digital Filters

ผู้จัดทำ

1. นายปกรณ์ ศุภศักดิ์สุทัศน์ 43010232
2. นายปรัชญ์ ชคทานนท์ 43010255
3. นายพรชนะ เจียรวนิช 43010286

.....*อติพงษ์ ตริรัตน์*.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ อัครพล ตริรัตน์ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวประมวลผลสัญญาณของตัวกรองสัญญาณดิจิทัลแบบปรับค่าได้  
Signal Processor Implementation of Variable Digital Filters

โดย นายปรกรณ์ สุขศักดิ์สุทัศน์ 43010232  
นายปรัชญ์ ชคทานนท์ 43010255  
นายพรชนะ เจียรวนิช 43010286

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อัครพล ตรีรัตน์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณตระกูล TMS320 และศึกษาเพื่อพัฒนาคุณภาพของตัวกรอง เอฟไออาร์ และตัวกรองไอไออาร์ คุณสมบัติเบื้องต้น ซึ่งก็คือความถี่คutoffสามารถถูกควบคุมโดยตัวแปรตัวเดียว และศึกษาหลักการสำหรับการปรับค่าความถี่คutoff นำผลตอบสนองความถี่ที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับทฤษฎี โดยผลการซิมูเลชันจากโปรแกรมแมทแล็บ

ABSTRACT

This project presents design and implementation variable digital filter schemes using a TMS320 series board digital signal processor and study for updating the coefficients of an FIR filter and IIR filter in a simple manner such that the cut-off frequency can be controlled by a single parameter and study a method for tuning the cut-off frequency. The measured frequency responses compare with the theory by Matlab simulation result

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

### บทที่ 1 บทนำ

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1.1 ความเป็นมาของหัวข้อปริญญาโท | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท     | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท           | 1 |
| 1.4 เนื้อหาของปริญญาโท          | 2 |

### บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

|  |    |
|--|----|
| 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล               | 3  |
| 2.1.1 สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง                                     | 3  |
| 2.1.2 ชนิดของสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง                              | 4  |
| 2.1.3 การกระทำพื้นฐานของลำดับ  | 5  |
| 2.1.4 ลำดับพื้นฐานในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล                         | 6  |
| 2.1.5 ระบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง                                       | 8  |
| 2.1.6 ผลตอบสนองอิมพัลส์และผลตอบสนองต่อสเตป                           | 9  |
| 2.1.7 คุณลักษณะของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา                  | 9  |
| 2.1.8 การต่อเชื่อมพื้นฐานเพื่อสร้างระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา | 10 |
| 2.1.9 การแบ่งชนิดของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา                | 10 |
| 2.1.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ   | 11 |
| 2.1.11 คุณสมบัติของลำดับครอสคอร์รีเลชันและลำดับออโตคอร์รีเลชัน       | 12 |
| 2.1.12 รูปแบบนอร์มอลไลซ์ของคอร์รีเลชัน                               | 13 |
| 2.2 ทฤษฎีตัวกรองดิจิทัล  | 14 |
| 2.2.1 องค์ประกอบของตัวกรองดิจิทัล                                    | 14 |
| 2.2.2 โครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบไอโอ                              | 14 |
| 2.2.3 โครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์                         | 21 |
| 2.3 ตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์(IIR)                                | 29 |
| 2.3.1 ทฤษฎีฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส                                     | 29 |
| 2.3.2 โครงสร้างตัวกรองออลพาส   | 31 |
| 2.3.3 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ออลพาส-คอมพลิเมนต์รี               | 34 |
| 2.3.4 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เพาเวอร์-คอมพลิเมนต์รี             | 35 |
| 2.3.5 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดับเบิล-คอมพลิเมนต์รี              | 35 |
| 2.3.6 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมาต่อขนานเพื่อใช้งานจริง      | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| 2.3.7           | วิธีการปรับความถี่ทอพอด้วยวิธีสเปคตรัลทรานฟอร์มเมชัน                  | 41  |
| 2.4             | หลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบไอไออาร์(IIR)                        | 44  |
| 2.5             | ตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์ (FIR)                                   | 48  |
| 2.5.1           | การออกแบบตัวกรองเอฟไออาร์โดยใช้อัลกอริทึมของ Park-McClellan           | 48  |
| 2.6             | หลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์(FIR)                       | 50  |
| บทที่ 3         | การคำนวณและการสร้าง   | 53  |
| 3.1             | การสร้างตัวกรองปรับค่าได้แบบ ไอ ไออาร์                                | 53  |
| 3.1.1           | การสร้างการสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1           | 53  |
| 3.1.2           | การสร้างการสร้างตัวกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1           | 56  |
| 3.1.3           | โครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและความถี่สูงผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1 | 57  |
| 3.1.4           | การสร้างการสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 3           | 61  |
| 3.2             | การสร้างตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์                                 | 62  |
| 3.2.1           | การสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้                               | 62  |
| บทที่ 4         | การทดลองและผลการทดลอง   | 66  |
| 4.1             | ผลการทดลองของตัวกรองปรับค่าได้แบบ ไอ ไออาร์                           | 68  |
| 4.1.1           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1จากการซิมูเลชัน          | 68  |
| 4.1.2           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1จากการวัดจริง            | 70  |
| 4.1.3           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3จากการซิมูเลชัน          | 86  |
| 4.1.4           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3จากการวัดจริง            | 88  |
| 4.2             | ผลการทดลองของตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์                            | 104 |
| 4.2.1           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41จากการซิมูเลชัน         | 104 |
| 4.2.2           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41จากการวัดจริง           | 105 |
| 4.2.3           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51จากการซิมูเลชัน         | 117 |
| 4.2.4           | ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51จากการวัดจริง           | 118 |
| บทที่ 5         | บทวิจารณ์และบทสรุป  | 130 |
| ภาคผนวก         |   |     |
| กิตติกรรมประกาศ |   |     |
| หนังสืออ้างอิง  |   |     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 2.1 แสดงระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล   | 3  |
| รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณ $x[n]$   | 4  |
| รูปที่ 2.3 แสดงการกระทำพื้นฐานของลำดับ   | 6  |
| รูปที่ 2.4ก แสดงยูนิตอิมพัลส์ $\delta[n]$  | 6  |
| รูปที่ 2.4ข แสดงยูนิตอิมพัลส์ $\delta[n-2]$  | 6  |
| รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณ $y[n]$ ซึ่งเป็นผลรวมของยูนิตอิมพัลส์ที่เลื่อนเวลา                              | 7  |
| รูปที่ 2.6ก แสดงยูนิตสเตป $\delta[n]$  | 7  |
| รูปที่ 2.6ข แสดงยูนิตสเตป $\delta[n-2]$  | 7  |
| รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน  | 14 |
| รูปที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้งสามที่ใช้เป็นตัวแทนประกอบของตัวกรองดิจิทัล                       | 14 |
| รูปที่ 2.9ก เขียนแยกตัวบอกสัญญาณ   | 15 |
| รูปที่ 2.9ข เขียนรวมตัวบอกสัญญาณ   | 15 |
| รูปที่ 2.9ค เขียนแยกอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ   | 17 |
| รูปที่ 2.9ง เขียนรวมอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ   | 17 |
| รูปที่ 2.9จ แสดง โครงสร้างแบบอนุกรม  | 18 |
| รูปที่ 2.9ฉ แสดง โครงสร้างตัวกรองแบบดิจิทัลแบบ ไอ ไออาร์ ที่มีโครงสร้างแบบขนาน                       | 19 |
| รูปที่ 2.10ก แสดง โครงสร้างแบบตรง  | 21 |
| รูปที่ 2.10ข แสดง โครงสร้างแบบตรง  | 21 |
| รูปที่ 2.11 แสดง โครงสร้างแบบอนุกรม  | 22 |
| รูปที่ 2.12 แสดงถึง โครงสร้างแบบ โพลีเฟส เรียลไทม์   | 24 |
| รูปที่ 2.13 แสดงถึง Canonic Polyphase Realization ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 9 โดยการใช้ Delay | 24 |
| รูปที่ 2.14ก โครงสร้างแบบลิเนียร์เฟสชนิดที่ 1  | 25 |
| รูปที่ 2.14ข โครงสร้างแบบลิเนียร์เฟสชนิดที่ 2  | 25 |
| รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโร   | 30 |
| รูปที่ 2.16 แสดง โครงสร้างออลพาสอันดับที่ 1 ชนิดที่ 1 ได้รับการพัฒนา                                 | 32 |
| รูปที่ 2.17 แสดง โครงสร้างออลพาสอันดับที่ 1 ชนิด 1   | 32 |
| รูปที่ 2.18 แสดง โครงสร้างออลพาสอันดับที่ 2 ชนิด 2   | 33 |
| รูปที่ 2.19 แสดง โครงสร้างออลพาสอันดับที่ 2 ชนิด 3   | 34 |
| รูปที่ 2.20 แสดงการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมาต่อแบบขนาน  | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 2.21 แสดงการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดับลิ-คอมพลิเมนท์รี มาใช้ในโครงสร้างแบบขนานของตัวกรองฮอปทาส                             | 36 |
| รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งความสัมพันธ์ของโพลทั้ง 7 ตำแหน่ง  | 40 |
| รูปที่ 2.23 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของ $G(z)$ และ $H(z)$  | 40 |
| รูปที่ 2.24 แสดงตัวคูณที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ในตัวกรองฮอปทาสอันดับ 1 ชนิด 1                                   | 46 |
| รูปที่ 2.25 แสดงตัวคูณที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ในตัวกรองฮอปทาส อันดับ 2 ชนิด 3                                  | 47 |
| รูปที่ 2.26 แสดงโปรแกรมประมาณค่าอันดับของตัวกรองแบบเอฟไออาร์   | 48 |
| รูปที่ 3.1 โครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1  | 56 |
| รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 3  | 61 |
| รูปที่ 4.1 แสดงฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31  | 67 |
| รูปที่ 4.2 แสดงการวัดผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองปรับค่าได้บนเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก                                      | 67 |
| รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการซิมูเลชัน   | 68 |
| รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการซิมูเลชัน  | 69 |
| รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก       | 70 |
| รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                         | 70 |
| รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz   | 72 |
| รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2 kHz  | 72 |
| รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz  | 73 |
| รูปที่ 4.10 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0$  | 73 |
| รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก | 74 |
| รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                   | 74 |
| รูปที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz  | 76 |
| รูปที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.5 kHz   | 76 |
| รูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz   | 77 |
| รูปที่ 4.16 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$                                     | 77 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก  | 78 |
| รูปที่ 4.18 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                    | 78 |
| รูปที่ 4.19 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz   | 80 |
| รูปที่ 4.20 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.75 kHz   | 80 |
| รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz  | 81 |
| รูปที่ 4.22 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$                                      | 81 |
| รูปที่ 4.23 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก | 82 |
| รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                   | 82 |
| รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 300 Hz   | 84 |
| รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.25 kHz   | 84 |
| รูปที่ 4.27 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz  | 85 |
| รูปที่ 4.28 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$                                     | 85 |
| รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการซิมูเลชัน   | 86 |
| รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการซิมูเลชัน  | 87 |
| รูปที่ 4.31 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก       | 88 |
| รูปที่ 4.32 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                         | 88 |
| รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz   | 90 |
| รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2 kHz  | 90 |
| รูปที่ 4.35 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz  | 91 |
| รูปที่ 4.36 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0$   | 91 |
| รูปที่ 4.37 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก  | 92 |
| รูปที่ 4.38 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                    | 92 |
| รูปที่ 4.39 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz   | 94 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |     |
|--|-----|
| รูปที่ 4.40 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.5 kHz   | 94  |
| รูปที่ 4.41 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.5 kHz   | 95  |
| รูปที่ 4.42 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.1755$   | 95  |
| รูปที่ 4.43 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก     | 96  |
| รูปที่ 4.44 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                       | 96  |
| รูปที่ 4.45 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz  | 98  |
| รูปที่ 4.46 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.75 kHz  | 98  |
| รูปที่ 4.47 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3 kHz   | 99  |
| รูปที่ 4.48 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = 0.0843$   | 99  |
| รูปที่ 4.49 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$ จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก    | 100 |
| รูปที่ 4.50 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$ จากโปรแกรมแมทแล็บ                      | 100 |
| รูปที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz  | 102 |
| รูปที่ 4.52 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.25 kHz  | 102 |
| รูปที่ 4.53 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.6 kHz   | 103 |
| รูปที่ 4.54 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า $\alpha = -0.0799$  | 103 |
| รูปที่ 4.55 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการ์ตูนเลขฐาน  | 104 |
| รูปที่ 4.56 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการ์ตูนเลขฐาน   | 104 |
| รูปที่ 4.57 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก   | 105 |
| รูปที่ 4.58 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ                     | 105 |
| รูปที่ 4.59 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 107 |
| รูปที่ 4.60 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 107 |
| รูปที่ 4.61 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 108 |
| รูปที่ 4.62 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz                                       | 108 |
| รูปที่ 4.63 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก | 109 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |     |
|--|-----|
| รูปที่ 4.64 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ                   | 109 |
| รูปที่ 4.65 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 111 |
| รูปที่ 4.66 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 111 |
| รูปที่ 4.67 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 112 |
| รูปที่ 4.68 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz                                     | 112 |
| รูปที่ 4.69 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก   | 113 |
| รูปที่ 4.70 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ                     | 113 |
| รูปที่ 4.71 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 115 |
| รูปที่ 4.72 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 115 |
| รูปที่ 4.73 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 116 |
| รูปที่ 4.74 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz                                       | 116 |
| รูปที่ 4.75 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการซิมูเลชัน   | 117 |
| รูปที่ 4.76 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการซิมูเลชัน  | 117 |
| รูปที่ 4.77 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก   | 118 |
| รูปที่ 4.78 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ                     | 118 |
| รูปที่ 4.79 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 120 |
| รูปที่ 4.80 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 120 |
| รูปที่ 4.81 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 121 |
| รูปที่ 4.82 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz                                       | 121 |
| รูปที่ 4.83 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก | 122 |
| รูปที่ 4.84 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ                   | 122 |
| รูปที่ 4.85 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 124 |
| รูปที่ 4.86 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 124 |
| รูปที่ 4.87 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 125 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  |     |
|--|-----|
| รูปที่ 4.88 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz                                   | 125 |
| รูปที่ 4.89 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก | 126 |
| รูปที่ 4.90 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากโปรแกรมแมทแลบ                    | 126 |
| รูปที่ 4.91 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz  | 128 |
| รูปที่ 4.92 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz  | 128 |
| รูปที่ 4.93 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz   | 129 |
| รูปที่ 4.94 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz                                     | 129 |
| รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 3.6 kHz                                     | 130 |
| รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz   | 132 |
| รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ที่ 2 kHz   | 132 |
| รูปที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.6 kHz  | 133 |
| รูปที่ 5.5 แสดงผลการ Sweep ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 3.6 kHz   | 133 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติต่างๆ   | 26 |
| ตารางที่ 2.2 การออกแบบตัวกรองแบบเอฟไออาร์ โดยวิธีหน้าต่าง | 28 |
| ตารางที่ 2.3 การแปลงสเปกตรัลทราเนอฟอร์มเมชัน              | 43 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของหัวข้อของปริญญาโท

ในปัจจุบันการสื่อสารเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การส่งสัญญาณไปยังปลายทางนั้นจะต้องผ่านส่วนประกอบต่างๆของระบบสื่อสาร ซึ่งโดยทั่วไปสัญญาณที่ทำการส่งเมื่อไปถึงยังปลายทางแล้วนั้นพบว่ามักถูกรบกวนที่แฝงเข้ามาทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลง การจะนำไปใช้นั้นจำเป็นต้องทำการกรองสัญญาณรบกวนทิ้งเสียก่อน แต่สัญญาณรบกวนนั้น โดยทั่วไปมักมีขนาดและความถี่ไม่แน่นอน ทำให้การใช้ตัวกรองความถี่ธรรมดาไม่สามารถกรองได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างตัวกรองความถี่ที่ปรับค่าได้ ซึ่งมีความสามารถที่จะกำหนดค่าความถี่ที่ตัดออกได้ในการที่จะกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการให้ได้มากที่สุดขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

ปริญญาโทนี้จึงนำเสนอการออกแบบและสร้างตัวกรองความถี่ที่ปรับค่าได้มีข้อดีเราสามารถเลือกปรับค่าความถี่ที่ตัดออกของฟิลเตอร์ได้ จากนั้นนำไปหาหาคอริทึมและทำการซิมูเลชัน (Simulation) ด้วยโปรแกรมเมทแล็บ (MATLAB) ก่อนนำไปทดลองใช้จริงในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการกรองสัญญาณ โดยใช้ตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ที่ตัดออกได้
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการปรับค่าของอัลกอริทึมที่ใช้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้งานภาษาซีในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้งานระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล
- 1.2.5 เพื่อสร้างตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าได้โดยใช้ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลบนบอร์ดตระกูล TMS 320

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นการศึกษา ออกแบบและสร้างตัวกรองสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ที่ตัดออกได้ โดยเน้นการนำไปใช้งานบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลบนบอร์ดตระกูล TMS 320 ซึ่งใช้การประมวลผลแบบจุดทศนิยม (Floating Point) โดยในขั้นตอนการออกแบบจะทำการซิมูเลชันด้วยโปรแกรมเมทแล็บและการสร้างจะทำการเขียนโครงสร้างอัลกอริทึมด้วยภาษาซีแล้วทำการแปลงเป็นภาษาแอสเซมบลีป้อนให้แก่ตัวประมวลผล นอกจากนี้จะทำการวัดคุณสมบัติต่างๆของกรองและผลที่ได้ จะทำการเปรียบเทียบกับผลจากการซิมูเลชันอีกทีหนึ่ง

#### 1.4 เนื้อหาของปฏิญยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวทฤษฎีที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างตัวกรองปรับค่าได้ซึ่งประกอบด้วย พื้นฐานระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล, พื้นฐานตัวกรองแบบ เอฟไออาร์ และตัวกรองแบบ ไอไออาร์, พื้นฐานตัวกรองปรับค่าได้แบบ เอฟไออาร์ และตัวกรองปรับค่าได้แบบ ไอไออาร์ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึง วิธีวัดคุณสมบัติของตัวกรองปรับค่าได้, ตัวอย่างการนำไปใช้งานตลอดจนบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณที่จะนำมาสร้าง

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้างตัวกรองปรับค่าได้

บทที่ 4 ผลการทดลองของตัวกรองปรับค่าได้

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป



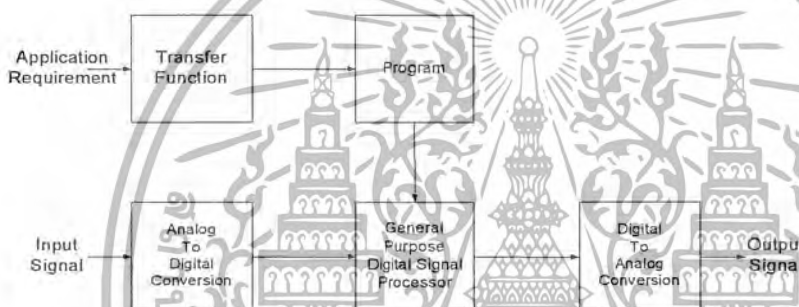
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

สัญญาณในปัจจุบันจะอยู่ในรูปของสัญญาณที่ต่อเนื่อง (Analog Signal) การประมวลผลสัญญาณโดยทั่วไปจึงมักทำในแกนเวลาที่ต่อเนื่อง แต่เนื่องจากผลเสียจากความไม่แน่นอนของระบบประมวลผลสัญญาณจึงมีการนำระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเข้ามาใช้งาน สำหรับระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้นจะมีส่วนประกอบเพิ่มเติมจากระบบประมวลผลสัญญาณทั่วไป 2 ส่วน คือ ส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Conversion) และส่วนแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Conversion)



รูปที่ 2.1 แสดงระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

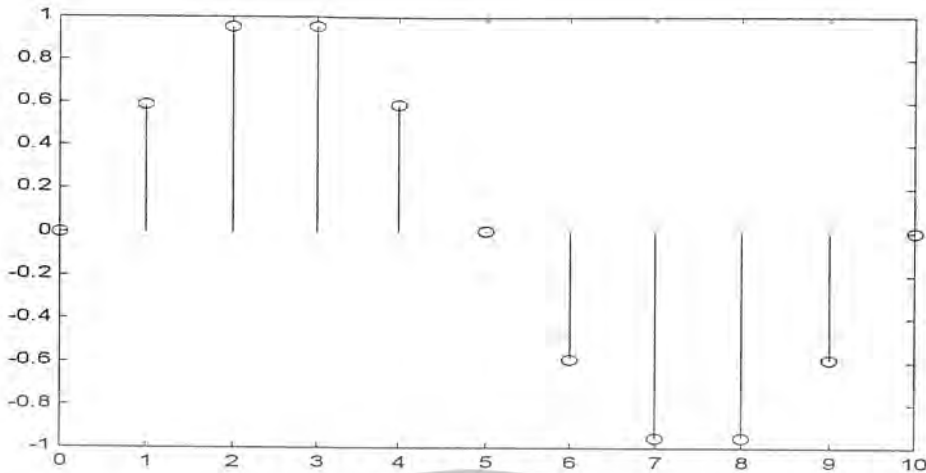
จากรูปที่ 2.1 สัญญาณอินพุตจะถูกแปลงไปอยู่ในรูปแบบสัญญาณไม่ต่อเนื่องหรือสัญญาณดิจิทัล และถูกส่งเข้าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจะทำงานตามโปรแกรมที่ได้ถูกตั้งไว้และผลที่ได้จากการประมวลผลก็จะถูกแปลงเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ต่อเนื่องซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

##### 2.1.1 สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete – Time Signal)

เนื่องจากสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องมักจะถูกแสดงในรูปของลำดับ (Sequence) ดังนั้นการอธิบายคุณลักษณะของสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องนับจากนี้อาจใช้คำว่าลำดับแทนสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องและจากที่ได้ทราบมาแล้วว่าระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะทำการประมวลผลสัญญาณในแกนเวลาที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นค่าสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่าง (Sampling Signal) แต่ละค่าจะถูกแสดงโดยลำดับ  $x[n]$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเต็ม เนื่องจากการซักรตัวอย่างจะกระทำที่เต็มหน่วยเวลาและค่า  $n$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  โดยทั่วไปหากค่าตัวอย่างถูกซักรตัวอย่างที่เวลา  $n = 0$  แล้วก็จะมีการใช้ลูกศร  $\uparrow$  แสดงไว้ ตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากการซักรตัวอย่างแสดงในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$x[n] = \{0, 0.5878, 0.9511, 0.9511, 0.5878, 0, -0.5878, -0.9511, -0.9511, -0.5878, 0\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.2 แสดงสัญญาณ  $x[n]$ 

ในบางครั้งสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องจะถูกสร้างโดยการซักรัดตัวอย่างจากสัญญาณที่ต่อเนื่อง  $x_a(t)$  โดยมีคาบเวลาของการซักรัดตัวอย่างคงที่เท่ากับ  $T$  ค่าของ  $x[n]$  จึงมีค่าเท่ากับค่าของสัญญาณที่ต่อเนื่องที่เวลา  $t$  ใดๆ และ  $t = nT$  ดังนั้น

$$x[n] = x_a(t)|_{t=nT} = x_a(nT), \quad n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$$

จากค่าคาบเวลาในการซักรัดตัวอย่าง  $T$  เราสามารถหาค่าความถี่ในการซักรัดตัวอย่างได้เป็น  $F_s = \frac{1}{T}$

### 2.1.2 ชนิดของสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง

สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดแล้วแต่วิธีการแบ่ง

I. กรณีแบ่งโดยจำนวนลำดับตัวอย่างหรือความยาวคือสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวจำกัด (Finite Length) และสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวไม่จำกัด (Infinite Length) นิยามโดย

- สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวจำกัด เป็นสัญญาณเชิงเวลาที่มีค่า

$$N_1 \leq n \leq N_2 \quad \text{โดย } -\infty < N_1 \text{ และ } N_2 < \infty$$

และจะสามารถหาความยาวของสัญญาณนี้ได้โดย  $N = N_2 - N_1 + 1$

- สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวไม่จำกัด เป็นสัญญาณเชิงเวลาที่มีค่าความยาวไม่จำกัดแต่สามารถทำให้เป็นสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวจำกัดได้โดยกำหนดค่าศูนย์ให้แก่ลำดับตัวอย่างอื่นๆที่อยู่นอกระยะซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า “Zero Padding” สัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวไม่จำกัดแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

1. ลำดับด้านขวา (Right Handed Sequence) เป็นลำดับที่มีค่าตัวอย่างเป็นศูนย์สำหรับทุกค่าที่  $n < N_1$  กล่าวคือ

$$x[n] = 0 \quad ; \quad n < N_1$$

ถ้า  $N_1 \geq 0$  ลำดับด้านขวานี้จะเรียกว่าลำดับคอซอล (Causal Sequence)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ลำดับด้านซ้าย (Left Handed Sequence) เป็นลำดับที่มีค่าตัวอย่างเป็นศูนย์สำหรับทุกค่าที่  $n > N_2$  กล่าวคือ

$$x[n] = 0 \quad ; \quad n > N_2$$

ถ้า  $N_2 \leq 0$  ลำดับด้านขวานี้จะเรียกว่าลำดับแอนติคอสอล (anticausal Sequence)

3. ลำดับ 2 ข้าง (Two Sided Sequence) เป็นลำดับที่มีค่า  $n$  อยู่ในช่วง  $-\infty$  ถึง  $\infty$  กล่าวคือ

$$x[n] = 0 \quad ; \quad -\infty < n < \infty$$

2. กรณีแบ่งชนิดตามการสมมาตรแบ่งได้เป็น

- ลำดับคู่ คือลำดับที่  $x[n] = x^*[-n]$
- ลำดับคี่ คือลำดับที่  $x[n] = -x^*[-n]$

3. กรณีแบ่งชนิดตามการเป็นคาบแบ่งได้เป็น

- สัญญาณที่เป็นคาบ คือสัญญาณที่ลำดับ  $\tilde{x}[n] = x[n + kN]$  เมื่อ  $k, N$  เป็นจำนวนเต็มบวก
- สัญญาณที่เป็นไม่คาบ คือสัญญาณที่ลำดับ  $\tilde{x}[n] \neq x[n + kN]$  เมื่อ  $k, N$  เป็นจำนวนเต็มบวก

โดยทั่วไปแล้วสำหรับสัญญาณเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องความยาวจำกัดที่มีค่าเวลาเริ่มต้นที่ศูนย์นั้นค่าตัวอย่างตัวแรกจะถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง

### 2.1.3 การกระทำพื้นฐานของลำดับ (Basic Operation on Sequence)

ให้  $x[n]$  และ  $y[n]$  เป็นลำดับที่ทราบค่าการกระทำพื้นฐานระหว่าง  $x[n]$  และ  $y[n]$  คือ

1. การคูณ (Production) โดยการคูณกันระหว่างค่าตัวอย่างของสองลำดับนี้จะได้ลำดับ  $w_1[n]$  คือ

$$w_1[n] = x[n] \cdot y[n]$$

การประยุกต์ใช้งานของการคูณคือการสร้างลำดับที่มีความยาวจำกัดจากลำดับที่มีความยาวไม่จำกัดโดยการคูณด้วยลำดับที่มีความยาวจำกัด ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า “Windowing” ซึ่งมีประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้ในตัวกรองความถี่ดิจิทัล (Digital Filter)

2. การบวก (Addition) โดยการคูณกันระหว่างค่าตัวอย่างของสองลำดับนี้จะได้ลำดับ  $w_2[n]$  คือ

$$w_2[n] = x[n] + y[n]$$

3. การคูณด้วยจำนวน (Scalar Multiplication) โดยการคูณลำดับ  $x[n]$  ด้วยค่า  $A$  จะได้ลำดับ  $w_3[n]$  คือ

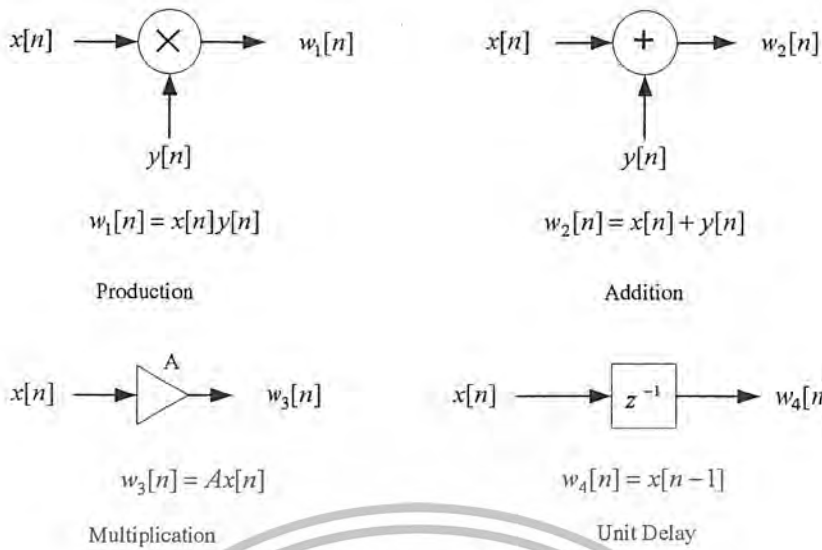
$$w_3[n] = Ax[n]$$

4. การเลื่อนเวลา (Time Shifting) โดยการเลื่อนเวลาไปเท่ากับ  $N$  ของลำดับ  $x[n]$  จะได้ลำดับ  $w_4[n]$  คือ

$$w_4[n] = x[n - N]$$

5. การกลับเวลา (Time Reversal) โดยการสร้างลำดับ  $w_5[n]$  ขึ้นจากลำดับ  $x[n]$  โดยการกลับเวลาจะได้

$$w_5[n] = x[-n]$$



รูปที่ 2.3 แสดงการกระทำพื้นฐานของลำดับ

### 2.1.4 ลำดับพื้นฐานในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีลำดับพื้นฐานที่สำคัญคือ

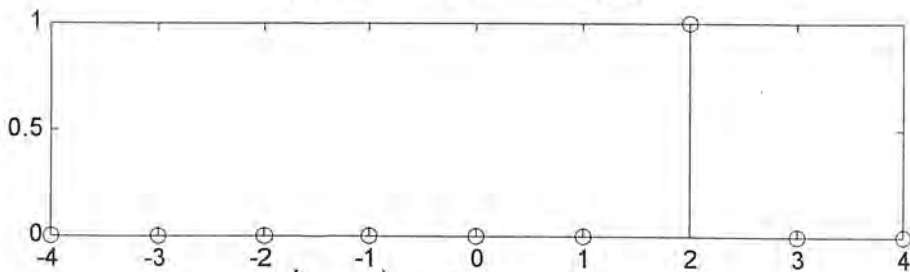
#### 1. ลำดับยูนิตแซมเปิล (Unit Sample Sequence)

อาจเรียกว่าลำดับยูนิตอิมพัลส์ (Unit Impulse Sequence) นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์  $\delta[n]$  โดยมีนิยามเป็น

$$\delta[n] = \begin{cases} 1, n = 0 \\ 0, n \neq 0 \end{cases}$$

หากมีการเลื่อนเวลาไป จะมีนิยามเป็น

$$\delta[n-k] = \begin{cases} 1, n = k \\ 0, n \neq k \end{cases}$$

รูปที่ 2.4ก แสดงยูนิตอิมพัลส์  $\delta[n]$ รูปที่ 2.4ข แสดงยูนิตอิมพัลส์  $\delta[n-2]$ 

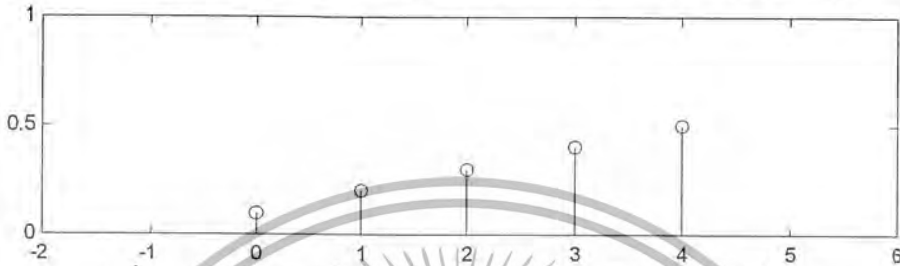
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนิยามดังกล่าวจะพบว่าสัญญาณใดๆจะสามารถแสดงได้ในรูปของผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของยูนิตอิมพัลส์ที่เลื่อนเวลา สมมติให้สัญญาณ

$$y[n] = \{ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \}$$

↑

จะสามารถแสดงได้ในรูปของผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของยูนิตอิมพัลส์ที่เลื่อนเวลา  
ได้เป็น  $y[n] = 0.1\delta[n] + 0.2\delta[n-1] + 0.3\delta[n-2] + 0.4\delta[n-3] + 0.5\delta[n-4]$



รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณ  $y[n]$  ซึ่งเป็นผลรวมของยูนิตอิมพัลส์ที่เลื่อนเวลา

## 2. ลำดับยูนิตสเตป (Unit Step Sequence)

ลำดับยูนิตสเตปจะแทนด้วย  $\mu[n]$  และมีนิยามเป็น

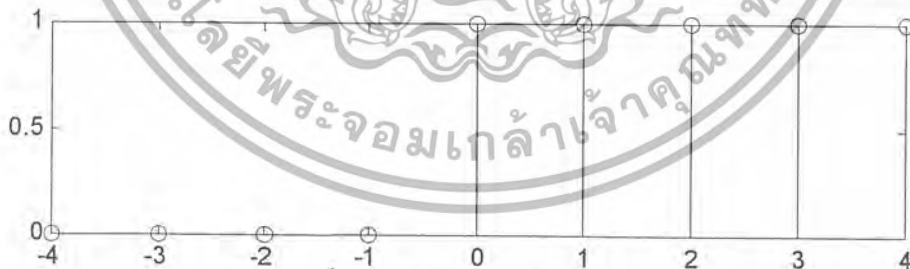
$$\mu[n] = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}$$

ส่วนยูนิตสเตปที่มีการเลื่อนเวลาไปเท่ากับ  $k$  จะมีนิยามเป็น

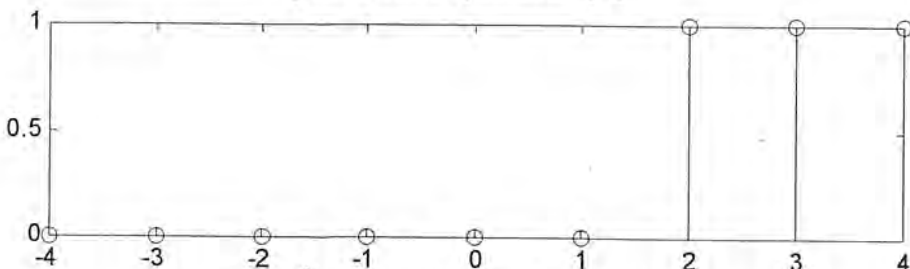
$$\mu[n+k] = \begin{cases} 1, & n \geq k \\ 0, & n < k \end{cases}$$

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างยูนิตสเตปและยูนิตอิมพัลส์สามารถแสดงได้เป็น

$$\mu[n] \equiv \sum_{k=-\infty}^n \delta[k] \quad \text{และ} \quad \delta[n] = \mu[n] - \mu[n-1]$$



รูปที่ 2.6ก แสดงยูนิตสเตป  $\delta[n]$



รูปที่ 2.6ข แสดงยูนิตสเตป  $\delta[n-2]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ลำดับรูปไซน์และลำดับเอ็กซ์โพเนนเชียล

สัญญาณโดยทั่วไปมักจะอยู่ในรูปของลำดับสัญญาณจริงรูปไซน์ (Real Sinusoidal Sequence) ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดคงที่ซึ่งเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$x[n] = A \cos(\omega_0 n + \phi) \quad , \quad -\infty < n < \infty$$

เมื่อ  $A, \omega_0$  และ  $\phi$  เป็นจำนวนเต็ม โดย  $A$  คือแอมพลิจูด,  $\omega_0$  คือค่าความเร็วเชิงมุมและ  $\phi$  เป็นเฟสของสัญญาณ จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนในอีกรูปแบบได้เป็น

$$x[n] = x_i[n] + x_q[n]$$

โดย  $x_i[n] = A \cos \phi \cdot \cos(\omega_0 n)$

$$x_q[n] = -A \sin \phi \cdot \sin(\omega_0 n)$$

นอกจากนี้ยังมีสัญญาณเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งสามารถนิยามได้โดย

$$x[n] = A \alpha^n \quad , \quad -\infty < n < \infty$$

#### 2.1.5 ระบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time System)

ระบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องโดยทั่วไปจะทำการประมวลผลลำดับอินพุตและให้ลำดับเอาต์พุตออกมา โดยในการใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่มีอินพุตเดียวและให้เอาต์พุตเพียงหนึ่งเอาต์พุต โดยทั่วไปแล้วระบบเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องจะแบ่งโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบ กล่าวคือ

- ระบบเชิงเส้น (Linear System)

เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากระบบเชิงเส้นนี้เป็นระบบที่สามารถใช้ทฤษฎีการซ้อนทับ (Superposition Theorem) ในการอธิบายคุณลักษณะ กล่าวคือ หาก  $y_1[n]$  และ  $y_2[n]$  เป็นผลตอบสนองของลำดับ  $x_1[n]$  และ  $x_2[n]$  ดังนั้นหากอินพุต

$$x[n] = \alpha x_1[n] + \beta x_2[n] \text{ แล้วระบบจะให้ผลตอบสนอง } y[n] = \alpha y_1[n] + \beta y_2[n]$$

- ระบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time Invariant System)

เป็นระบบที่มีการตอบสนองต่ออินพุตไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลากล่าวคือ สำหรับอินพุต  $x[n]$  ตัวใดๆ จะมีเอาต์พุต  $y[n]$  ของอินพุตตัวนั้นมีค่าเท่ากันไม่ว่าที่เวลาใดๆ กล่าวคือ หาก  $y_1[n]$  เป็นผลตอบสนองของลำดับ  $x_1[n]$  แล้วผลตอบสนองของอินพุต  $x[n] = x_1[n - n_0]$  จะมีค่าเป็น  $y[n] = y_1[n - n_0]$  เมื่อ  $n_0$  เป็นจำนวนเต็ม

- ระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Linear Time Invariant System)

เป็นระบบที่มีคุณสมบัติทั้งการไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและการเป็นเชิงเส้น ระบบนี้จะมีความง่ายต่อการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และง่ายต่อการออกแบบ ดังนั้นระบบส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันคือระบบนี้

- ระบบคอซอล (Causal System)

ในระบบคอซอลนั้นผลตอบสนองตัวที่  $n_0$  หรือ  $y[n_0]$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าตัวอย่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุต  $x[n]$  เมื่อ  $n \leq n_0$  และไม่ขึ้นกับค่าตัวอย่างอินพุตที่  $n > n_0$  หรือจะกล่าวได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงที่เอาต์พุตจะไม่เกิดขึ้นก่อนการเปลี่ยนแปลงที่อินพุต

### 2.1.6 ผลตอบสนองอิมพัลส์และผลตอบสนองต่อสเตป

ผลตอบสนองของระบบต่ออิมพัลส์เรสปอนส์เรียกว่า “ผลตอบสนองอิมพัลส์” แทนด้วย  $h[n]$  ในขณะที่ผลตอบสนองต่อสเตปฟังก์ชันเรียกว่า “ผลตอบสนองสเตป” ซึ่งหลังจากนี้จะแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะสามารถหาได้จากผลตอบสนองอิมพัลส์หรือผลตอบสนองสเตปของมัน

### 2.1.7 คุณสมบัติของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากที่ได้ทราบมาแล้วว่าระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะสามารถหาคุณสมบัติได้จากผลตอบสนองอิมพัลส์ของมัน ดังนั้นหากเราทราบผลตอบสนองอิมพัลส์แล้วก็จะสามารถคำนวณหาผลตอบสนองของระบบที่อินพุตใดๆ ได้ ต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของระบบสามารถหาได้จากผลตอบสนองอิมพัลส์

สมมติให้  $h[n]$  เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ เนื่องจากระบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้ผลตอบสนองต่อ  $\delta[n-1]$  มีค่าเป็น  $h[n-1]$  และเช่นกันผลตอบสนองต่อ  $\delta[n-2], \delta[n-3], \dots, \delta[n-k]$  มีค่าเป็น  $h[n-2], h[n-3], \dots, h[n-k]$  ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วเนื่องจากระบบเป็นระบบเชิงเส้นดังนั้นผลตอบสนองต่ออินพุต  $x[n] = 0.5\delta[n+2] + 1.5\delta[n-1] - \delta[n-2] + \delta[n+4] + 0.75\delta[n-6]$  จะมีค่าเป็น  $y[n] = 0.5h[n+2] + 1.5h[n-1] - h[n-2] + h[n+4] + 0.75h[n-6]$  จากตัวอย่างจะเห็นว่าเราสามารถเขียนลำดับอินพุต  $x[n]$  ในลักษณะของผลรวมของค่าต่างน้ำหนักของผลตอบสนองอิมพัลส์ที่เวลาต่างๆ ได้เป็น

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]\delta[n-k]$$

โดย  $x[k]$  คือค่าตัวอย่างที่  $k$  ของลำดับ  $x[n]$  และเนื่องจากผลตอบสนองต่อลำดับ  $x[k]\delta[n-k]$  จะมีค่าเป็น  $x[k]h[n-k]$  ดังนั้นผลตอบสนองของระบบจะหาได้เป็น

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k]$$

หรืออาจเขียนได้เป็น

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n-k]h[k]$$

ซึ่งสมการนี้มักเรียกว่า ผลบวกคอนโวลูชัน (Convolution Sum) ของลำดับ  $x[n]$  และ  $h[n]$  ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$y[n] = x[n] * h[n]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณสมบัติของผลบวกคอนโวลูชัน

ให้  $x_1[n], x_2[n], x_3[n]$  เป็นลำดับใดๆ คุณสมบัติของผลบวกคอนโวลูชันแสดงได้ดังนี้

1. คุณสมบัติการจับกลุ่ม (Associative) คือ

$$(x_1[n] * x_2[n]) * x_3[n] = x_1[n] * (x_2[n] * x_3[n])$$

2. คุณสมบัติการสลับที่ (Commutative) คือ

$$x_1[n] * x_2[n] = x_2[n] * x_1[n]$$

3. คุณสมบัติการกระจาย (Distributive) คือ

$$x_1[n] * (x_2[n] + x_3[n]) = x_1[n] * x_2[n] + x_1[n] * x_3[n]$$

### 2.1.8 การต่อเชื่อมพื้นฐานเพื่อสร้างระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

วิธีการที่นิยมมี 2 รูปแบบคือ

1. การต่อแบบอนุกรม (Cascade Connection)

ในการต่อแบบอนุกรม ผลตอบสนองของระบบแรกจะถูกป้อนให้เป็นอินพุตแก่ระบบที่สองและผลตอบสนองของระบบที่สอง จะเป็นผลตอบสนองรวมของระบบ ดังนั้นผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ  $h_1[n]$  หากจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบแรก  $h_1[n]$  และผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบที่สอง  $h_2[n]$  คือ

$$h_1[n] = h_1[n] * h_2[n]$$

2. การต่อเชื่อมแบบขนาน (Parallel Connection)

ในการต่อเชื่อมแบบขนานนั้นผลตอบสนองของระบบทั้งสองจะถูกนำมารวมกันโดยตรง จะได้ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ  $h_1[n]$  หากจากผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบแรก  $h_1[n]$  และผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบที่สอง  $h_2[n]$  คือ

$$h_1[n] = h_1[n] + h_2[n]$$

### 2.1.9 การแบ่งชนิดของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

การแบ่งชนิดของระบบเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลานิยมแบ่งโดยลักษณะความยาวของผลตอบสนองอิมพัลส์หรือ โดยลักษณะวิธีการคำนวณหาเอาท์พุทของระบบกล่าวคือ

- การแบ่งโดยลักษณะของความยาวผลตอบสนองอิมพัลส์ สามารถแบ่งออกเป็น

1. ระบบที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ยาวจำกัด (Finite Impulse Response : FIR)

คือระบบที่ผลบวกคอนโวลูชันสามารถเขียนในได้รูป

$$y[n] = \sum_{k=N_1}^{N_2} h[k]x[n-k]$$

เมื่อ  $h[n] = 0$ ,  $N_2 > N_1$ ,  $n < N_1$ ,  $n > N_2$

โดยผลบวกคอนโวลูชันดังกล่าวจะเป็นผลบวกจำกัดและสามารถคำนวณหาค่า  $y[n]$  ได้

2. ระบบที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ยาวไม่จำกัด (Infinite Impulse Response : IIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือระบบที่ผลบวกคอนโวลูชันสามารถเขียนในได้รูป

$$y[n] = \sum_{k=0}^n x[k]h[n-k]$$

โดย  $x[n]$  เป็นค่าอินพุทของระบบที่เป็นคอซอล

- การแบ่งโดยลักษณะของการคำนวณหาเอาต์พุทของระบบ สามารถแบ่งออกเป็น
  1. ระบบป้อนกลับ (Recursive) เป็นระบบที่มีการคำนวณค่าเอาต์พุทจากค่าตัวอย่างในปัจจุบัน, ค่าตัวอย่างในอดีตและค่าเอาต์พุทในอดีต
  2. ระบบไม่ป้อนกลับ (Non-Recursive) เป็นระบบที่มีการคำนวณค่าเอาต์พุทจากค่าตัวอย่างในปัจจุบันและในอดีตเท่านั้น

### 2.1.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ (Correlation of Signal)

ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้น ในบางครั้งมีความจำเป็นจะต้องทำการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ต้องการประมวลผลเพื่อทำการหาความเหมือนหรือความแตกต่าง ตลอดจนข้อมูลอื่นๆที่รวมอยู่ในสัญญาณ จึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของสัญญาณเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยความสัมพันธ์ของสัญญาณนั้น จะทำการเปรียบเทียบในสองลักษณะคือ การหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณอื่น (Cross Correlation) และการหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับตัวสัญญาณเอง (Auto Correlation) นั่นก็คือ

- การหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับสัญญาณอื่น (Cross Correlation)

การวัดความเหมือนหรือความแตกต่างของสัญญาณพลังงาน (Energy Signal)  $x[n]$  และ  $y[n]$  สามารถหาได้โดยการหาค่าคอสโคร์เรชัน  $r_{xy}[\ell]$  ซึ่งนิยามโดย

$$r_{xy}[\ell] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-\ell], \quad \ell \cong 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

โดย  $\ell$  คือตัวแปรล่าช้า (Lag Parameter) ซึ่งก็คือค่าความแตกต่างทางเวลาของสัญญาณทั้งสอง ด้วยย่อ  $xy$  หมายความว่า  $x[n]$  เป็นค่าตัวอย่างซึ่งมีค่าเวลาที่และ  $y[n]$  จะมีการเลื่อนเวลาโดยเทียบกับ  $x[n]$  ต่อไปจะแสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $r_{xy}$  และ  $r_{yx}$

จากนิยาม 
$$r_{xy}[\ell] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-\ell]$$

ทำการแทนค่า 
$$n = m + \ell$$

จะได้สมการ 
$$r_{xy}[\ell] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m+\ell]y[m]$$

จัดรูปใหม่ได้ 
$$r_{xy}[\ell] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[m+\ell]$$

ซึ่งก็คือ 
$$r_{xy}[\ell] = r_{yx}[-\ell]$$

จะเห็นว่า  $r_{xy}$  เป็นการกลับเวลา (Time Reversing) ของ  $r_{yx}$  นั่นเอง

- การหาความสัมพันธ์ของสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับตัวสัญญาณเอง (Auto Correlation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับบอโตคอร์รีเลชันของสัญญาณพลังงาน  $x[n]$  นิยามโดย

$$r_{xx}[\ell] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]x[n-\ell]$$

จากนิยามหากให้  $\ell = 0$  จะได้สมการเป็น

$$r_{xx}[0] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n] = \varepsilon_x$$

ซึ่ง  $\varepsilon_x$  ก็คือพลังงานของสัญญาณ  $x[n]$  นั่นเอง

### 2.1.11 คุณสมบัติของลำดับครอสคอร์รีเลชันและลำดับบอโตคอร์รีเลชัน

การหาคุณสมบัติพื้นฐานของลำดับครอสคอร์รีเลชันและลำดับบอโตคอร์รีเลชันนั้น เราจะสมมติสัญญาณพลังงานจำกัด (Finite Energy Signal)  $x[n]$  และ  $y[n]$  ดังนั้นพลังงานทั้งหมดของสัญญาณรวม  $ax[n] + y[n-\ell]$  ก็มีค่าจำกัดด้วยและไม่เป็นลบหาจาก

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} (ax[n] + y[n-\ell])^2 = a^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n] + 2a \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n-\ell] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} y^2[n-\ell]$$

ซึ่งจะพบว่าเท่ากับ  $a^2 r_{xx}[0] + 2a r_{xy}[\ell] + r_{yy}[0] \geq 0$

โดย  $r_{xx}[0] = \varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_x$  คือพลังงานของ  $x[n]$

$r_{yy}[0] = \varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_y$  คือพลังงานของ  $y[n]$

จัดสมการในรูป

$$\begin{bmatrix} a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{xx}[0] & r_{xy}[\ell] \\ r_{xy}[\ell] & r_{yy}[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ 1 \end{bmatrix} \geq 0$$

สำหรับค่า  $a$  จำกัดใดๆจะได้เมตริกซ์  $\begin{bmatrix} r_{xx}[0] & r_{xy}[\ell] \\ r_{xy}[\ell] & r_{yy}[0] \end{bmatrix}$  เป็นบวกด้วยและจะได้ว่า

$$r_{xx}[0]r_{yy}[0] - r_{xy}^2[\ell] \geq 0$$

หรือจะได้ว่า

$$|r_{xy}[\ell]| \leq \sqrt{r_{xx}[0]r_{yy}[0]} = \sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y}$$

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นค่าสูงของลำดับครอสคอร์รีเลชัน

หากเราให้  $x[n] = y[n]$  จะได้ว่า

$$|r_{xx}[\ell]| \leq r_{xx}[0] = \varepsilon_x$$

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นค่าสูงของลำดับบอโตคอร์รีเลชัน

นอกจากนี้ในการหาคุณสมบัติของของครอสคอร์รีเลชัน สมมติให้

$$y[n] = \pm bx[n-N]$$

เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนเต็มและ  $b > 0$  ในกรณีนี้จะได้  $\varepsilon_y = b^2 \varepsilon_x$  ซึ่งทำให้

$$\sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y} = \sqrt{b^2 \varepsilon_x^2} = b \varepsilon_x$$

จากผลข้างต้นจะได้

$$-b r_{xx}[0] \leq r_{xy}[\ell] \leq b r_{xx}[0]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.12 รูปแบบนอร์มอลไลซ์ของของคอร์ดรีเลชั่น

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสามารถเขียนลำดับของคอร์ดรีเลชั่นและลำดับของคอร์ดรีเลชั่นในรูปแบบนอร์มอลไลซ์ได้เป็น

$$\rho_{xx}[l] = \frac{r_{xx}[l]}{r_{xx}[0]}$$

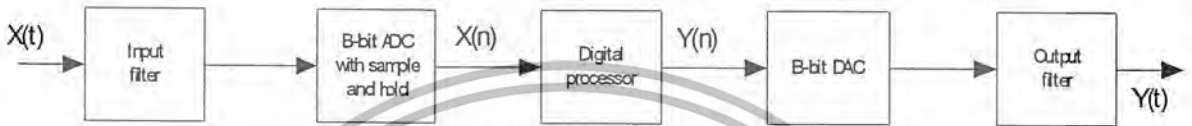
$$\rho_{xy}[l] = \frac{r_{xy}[l]}{\sqrt{r_{xx}[0]r_{yy}[0]}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีตัวกรองดิจิทัล

ตัวกรองดิจิทัลเป็นตัวอย่างของสัญญาณแบบหนึ่ง ที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้วงจรดิจิทัล มีโคอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 2.7 จากรูปสัญญาณอนาล็อก  $x(t)$  เป็นสัญญาณอินพุทของตัวกรอง สัญญาณนี้จะถูกส่งผ่านวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล  $x(n)$  และสัญญาณดิจิทัลนี้จะถูกส่งเข้าไปคำนวณในหน่วยประมวลผล ผลที่ได้จากการคำนวณยังคงเป็นสัญญาณดิจิทัล  $y(n)$  จากนั้นจะถูกส่งผ่านมายังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก ได้สัญญาณเอาต์พุทของตัวกรองเป็นสัญญาณอนาล็อก  $y(t)$



รูปที่ 2.7 แสดงโคอะแกรมการทำงานของตัวกรองดิจิทัลพื้นฐาน

### 2.2.1 องค์ประกอบของตัวกรองดิจิทัล

ตัวกรองดิจิทัลจะประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานดังต่อไปนี้

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

สัญลักษณ์ขององค์ประกอบพื้นฐานทั้งสามสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานทั้งสามที่ใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองดิจิทัล

### 2.2.2 โครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบไอโออาร์ (IIR Digital Filter Structure)

ตัวกรองดิจิทัลแบบไอโออาร์สามารถเขียนอธิบายการทำงานได้ด้วยสมการผลต่างสืบเนื่องดังนี้

$$y(n) = \sum_{i=0}^M a_i x(n-i) + \sum_{i=1}^N b_i y(n-i) \tag{2.1}$$

โดยที่  $x(n)$ ,  $y(n)$  เป็นลำดับสัญญาณเข้าและออกตามลำดับ

$a_i, b_i$  เป็นสัมประสิทธิ์ของลำดับสัญญาณเข้าและออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปลง  $z$  ทั้งสองข้าง ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

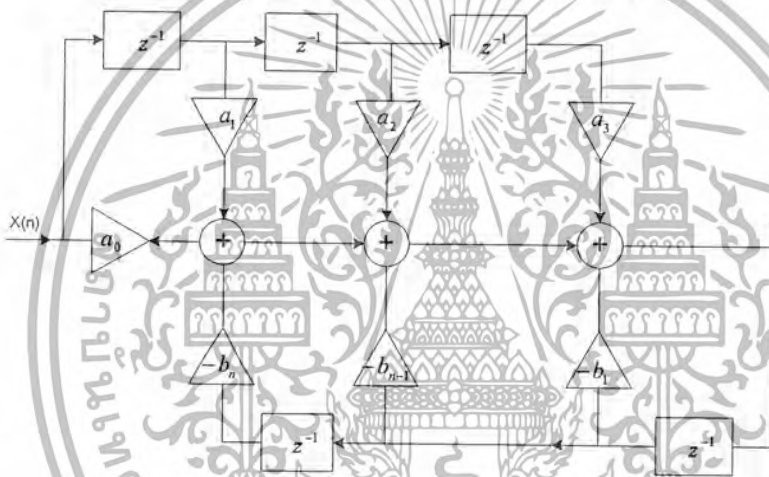
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^M a_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}} \quad (2.2)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถจัดเป็นโครงสร้างต่างๆได้หลายรูปแบบคือ

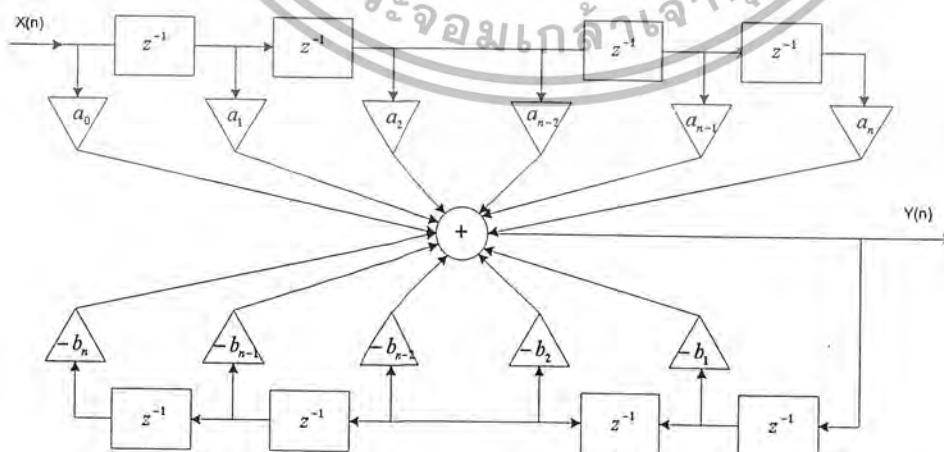
- 1 โครงสร้างแบบโดยตรง 1 (Direct Form I)
- 2 โครงสร้างแบบโดยตรง 2 (Direct Form II)
- 3 โครงสร้างแบบค่ออนุกรม (Cascade Form)
- 4 โครงสร้างแบบต่อขนาน (Parallel Form)

### 2.2.2.1 โครงสร้างแบบโดยตรง 1 (Direct Form I) หรือ DF1

จากสมการที่ (2.1) ให้  $b_0 = 1$  จากนั้นนำมาสร้างเป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9ก แสดงการเขียนแยกตัวบวกสัญญาณ



รูปที่ 2.9ข เขียนรวมตัวบวกสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบนี้ใช้อุปกรณ์หน่วยสัญญาณหรือชิปรีจิสเตอร์ถึงสองชุด โดยชุดหนึ่งสำหรับบรรจุลำดับสัญญาณเข้า  $x(n-i)$  อีกชุดหนึ่งจะไว้ใช้สำหรับบรรจุลำดับสัญญาณออก  $y(n-i)$  โดยที่  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  โครงสร้างของตัวกรองแบบนี้ไม่เหมาะสำหรับตัวกรองที่มีโพลวางตัวอยู่ใกล้เส้นรอบวงกลมรัศมีหน่วย ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น เช่น สิ่งรบกวนที่เกิดจากผลการคูณ (Product Quantization Noise) และสภาพความไวของสัมประสิทธิ์ (Coefficient Sensitivity) ของวงจรสูง นิยมสร้างเฉพาะกับวงจรที่มีอันดับต่ำ เช่น อันดับที่ 1 หรืออันดับที่ 2

### 2.2.2.2 โครงสร้างแบบโดยตรง 2 (Direct Form II) หรือ DF2

โครงสร้างแบบนี้เริ่มด้วยการแยกฟังก์ชันถ่ายโอน หรือ  $H(z)$  ออกเป็น 2 วงจรคูณแล้วต่ออนุกรมกันดังนี้

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}} \left[ \sum_{i=0}^M a_i z^{-i} \right]$$

$$= H_1(z) \cdot H_2(z) \quad (2.3)$$

โดยที่  $H_1(z)$  เป็นวงจรกรองเชิงเลขที่มีโพลเดียว

$H_2(z)$  เป็นวงจรกรองเชิงเลขที่มีซีโรเพียงอย่างเดียว

ให้

$$H_1(z) = \frac{W(z)}{X(z)} = \frac{1}{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}} \quad (2.4)$$

และ

$$H_2(z) = \frac{Y(z)}{W(z)} = \sum_{i=0}^M a_i z^{-i} \quad (2.5)$$

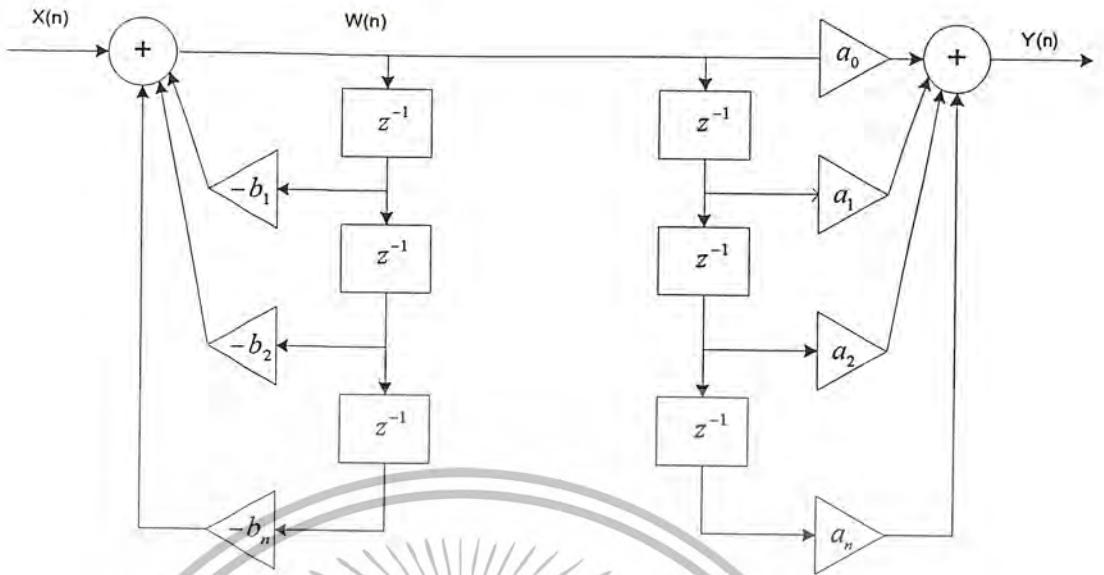
นำสมการที่ (2.4) และ (2.5) มาเขียนในรูปสมการผลต่างสืบเนื่องได้ดังนี้

$$w(n) = x(n) - \sum_{i=1}^N b_i w(n-i) \quad (2.6)$$

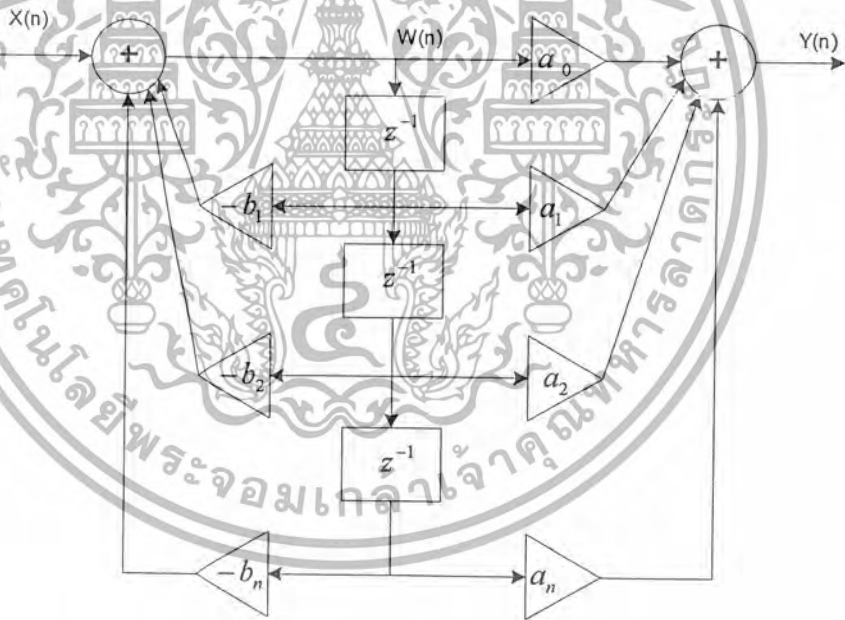
และ

$$y(n) = \sum_{i=0}^M a_i w(n-i) \quad (2.7)$$

นำสมการที่ (2.6) และ (2.7) นำไปเขียนเป็นภาพได้ดังรูปที่ 2.10 โดยให้  $b_0 = 1$



รูปที่ 2.9ค แสดงการเขียนแยกอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ



รูปที่ 2.9ง แสดงการเขียนรวมอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ

จากรูปที่ 2.10 การคำนวณสัญญาณออก  $y(n)$  ในครั้งแรกต้องคำนวณหาคำดับสัญญาณ  $w(n)$  ก่อน ซึ่งเป็นสัญญาณกลาง (Intermediate Signal) ตามสมการที่(2.6)แล้วจึงใช้ผลลัพธ์นี้ไปแทนในสมการที่(2.7) เพื่อคำนวณหา  $y(n)$  ซึ่งเป็นลำดับสัญญาณออกตามต้องการโครงสร้างแบบโดยตรง 2 มีข้อเสีย คือ ให้อุณหภูมิความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น สิ่งรบกวนจากผลการคูณ หรือสภาพความไวของตัวประสัทธิ์ เหมือนกับโครงสร้างแบบโดยตรงและมีโอกาสเกิดการล้น (Overflow) ได้มากกว่าแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตรง 1 ส่วนข้อดีของโครงสร้างแบบโดยตรง 1 และโดยตรง 2 นิยมนำไปสร้างตัวกรองกันมาก ตั้งแต่จากลำดับสัญญาณเข้าของตัวคูณทุกตัวดังแสดงผังรูปที่ 2.9 และ 2.10 ลำดับสัญญาณเข้านี้ไม่ได้ขึ้นกับสัญญาณที่

เพิ่งคำนวณไปเลยด้วยเหตุนี้ ทำให้เราสามารถสร้างวงจรที่สามารถทำการคูณพร้อม ๆ กันได้เลย อันเป็นผลให้การประมวลผลหรือการคำนวณของวงจรมีความเร็วสูง ทำให้แถบความถี่ปฏิบัติงาน (Bandwidth) ของวงจรสูงขึ้น

**2.2.2.3 โครงสร้างแบบต่ออนุกรมและโครงสร้างแบบต่อขนาน**

โครงสร้างตัวกรองเชิงเลขที่กล่าวมาข้างต้นคือแบบโดยตรง 1 และแบบโดยตรง 2 นั้นจะมีปัญหาในการควบคุมปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นได้ยาก เมื่อค่าของ  $M$  และ  $N$  มีค่ามาก ๆ (นั่นคืออันดับสูง ๆ) ดังนั้นจึงนิยมนำข้อย่อยตัวกรองเชิงเลขออกเป็นส่วนย่อย ๆ อันดับต่ำมาต่ออนุกรมกัน (Cascade Form) หรือต่อขนานกัน วิธีการก็คือ นำฟังก์ชันถ่ายโอนมาเขียนในรูปผลคูณย่อย ๆ ดังแสดงในสมการที่(2.8)

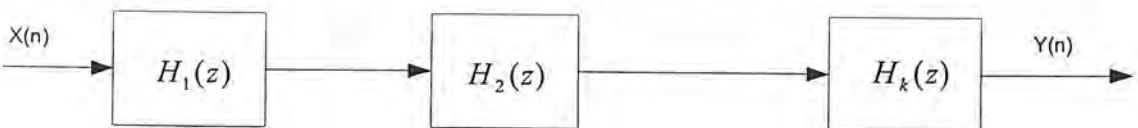
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = a_0 \sum_{i=0}^K H_i(z) \tag{2.8}$$

โดยที่  $H_i(z)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเชิงเลข อันดับที่ 1 หรืออันดับที่ 2 ตามลำดับ ดังนี้

$$H_1(z) = \frac{1 + a_{11}z^{-1}}{1 + b_{11}z^{-1}}$$

$$H_2(z) = \frac{1 + a_{21}z^{-1} + a_{22}z^{-2}}{1 + b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}$$
(2.9)

ภาพของวงจรกรองเชิงเลขแบบต่ออนุกรมเขียนได้ดังรูปที่ 2.11 โดยที่  $H_i(z)$  อาจสร้างได้ โดยใช้โครงสร้างแบบโดยตรง 1 หรือแบบโดยตรง 2 โครงสร้างแบบนี้ทำให้สภาพความไวต่อสัมประสิทธิ์ต่ำกว่าแบบโดยตรง 1 และโดยตรง 2 มาก สำหรับสิ่งรับกวนนั้น ถ้าวกหากการสเกด ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละภาคให้ดีแล้วก็สามารถกำจัดสิ่งรับกวนออกไปได้



รูปที่ 2.9จ แสดงโครงสร้างแบบต่ออนุกรม

สำหรับโครงสร้างแบบต่อขนาน (Parallel Form) หาได้จากการนำฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  มาแยกเป็นเศษส่วนย่อย ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = C + \sum_{i=0}^K H_i(z) \quad (2.10)$$

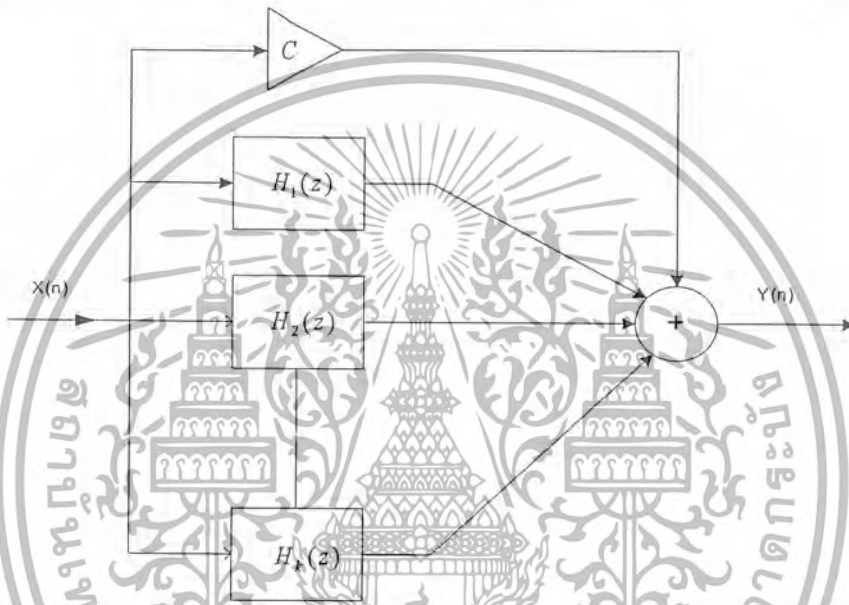
โดยที่  $H_i(z)$  อาจอยู่ในรูปตัวกรองเชิงเลข อันดับที่ 1 หรืออันดับที่ 2 ดังนั้น

$$H_i(z) = \frac{a_{0i}}{1 + b_{1i}z^{-1}} \quad (2.11)$$

หรือ

$$H_i(z) = \frac{a_{0i} + a_{1i}z^{-1}}{1 + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}$$

โครงสร้างแบบต่อขนาน โดยทั่วไปแล้วให้ระดับของสิ่งรบกวนน้อยกว่าแบบต่ออนุกรม  $H_i(z)$  สามารถนำโครงสร้างแบบโดยตรง 1 หรือแบบโดยตรง 2 มาสร้างแบบขนานแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างตัวกรองดิจิทัลแบบโอไออาร์ ที่มีโครงสร้างแบบต่อขนาน

ในการจัดโครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบโอไออาร์ ให้มีโครงสร้างเป็นแบบขนานนี้จะให้ผลดีคือ เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้กับระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบขนานซึ่งจะสามารถทำงานได้เร็ว

#### 2.2.2.4 การออกแบบตัวกรองโอไออาร์โดยวิธีการแปลงเชิงเส้นคู่

เราอาจจะสรุปการออกแบบตัวกรอง โอ ไอ อาร์ โดยวิธีการแปลงเชิงเส้นคู่เป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

1. การออกแบบตัวกรองกรองเชิงอุปมานต้นแบบ เช่น อนุาล็อก บัตเตอร์เวิร์ธ, เชบีเชฟ, เอลลิปติก เป็นต้น โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอน
2. กำหนดค่าความถี่ตัดหรือขอบแถบผ่าน รวมทั้งความถี่ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณของตัวกรองเชิงเลข (Digital Filter)
3. ทำการชดเชยผลของปรากฏการณ์หาคค่า โดยการทำค่า  $\Omega = \frac{2}{T} \tan \frac{\omega T}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

**ตัวอย่าง** การออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 2 แบบบัตเตอร์เวิร์ท โดยกำหนดให้ความถี่คัตออฟ ( $f_c$ ) มีค่า 50 Hz และความถี่การสุ่มสัญญาณ ( $f_s$ ) มีค่า 250 Hz โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมาความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 2 คือ

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

ทำการชดเชยผลของปรากฏการณ์เหดแคบโดย

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

ทำการสเกลความถี่โดยการแทนค่า  $s = \frac{S}{\Omega}$  ลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองสัญญาณเชิงอุปมา

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.3 โครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (FIR Digital Filter Structure)

ตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์สามารถเขียนอธิบายการทำงานได้ด้วยสมการผลต่างสลับเนื่องดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^N h[k]x[n-k] \quad (2.12)$$

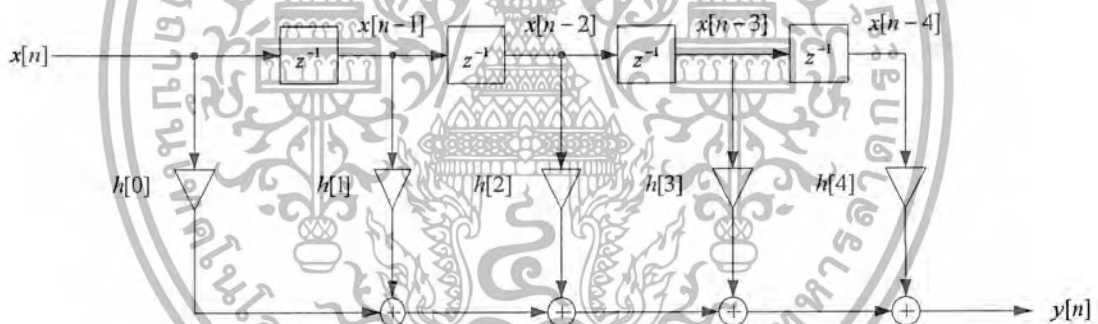
จากสมการดังกล่าวสามารถจัดเป็นโครงสร้างต่างๆได้หลายรูปแบบคือ

1. โครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form) หรือ DF
2. โครงสร้างแบบค่ออนุกรม (Cascade Form)
3. โครงสร้างแบบโพลีเฟส เรียล ไทเซชั่น (Polyphase Realization)
4. โครงสร้างแบบลิเนียร์เฟส (Linear-Phase)

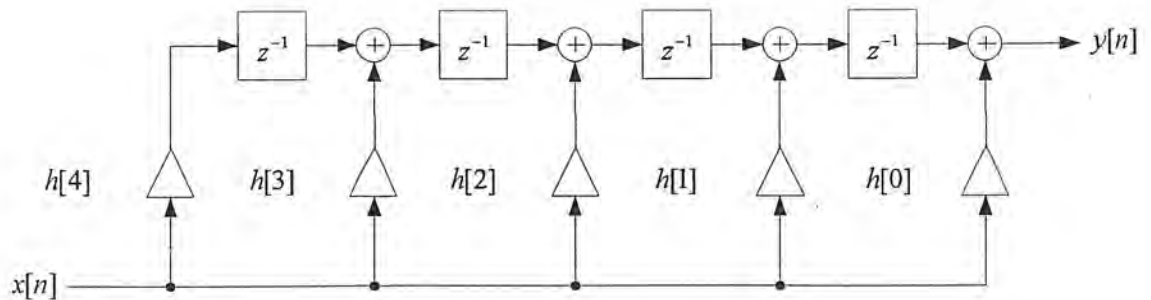
### 2.2.3.1 โครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form) หรือ DF

โครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form) ถ้าเราเลือกอันดับของตัวกรองแบบ เอฟ ไอ อาร์ เป็นค่า  $N$  แต่ภายในโครงสร้างต้องการ ตัวยูนิตดีเลย์ จำนวน  $N + 1$  ตัว จำนวนตัวคูณจำนวน  $N + 1$  ตัว และต้องการตัวบวกสัญญาณเข้าจำนวน  $N$  ตัว โดยพิจารณาจาก สมการ

$$y(n) = h[0]x[n] + h[1]x[n-1] + h[2]x[n-2] + h[3]x[n-3] + h[4]x[n-4] \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.10ก แสดงโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form)



รูปที่ 2.10ข แสดงโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form)

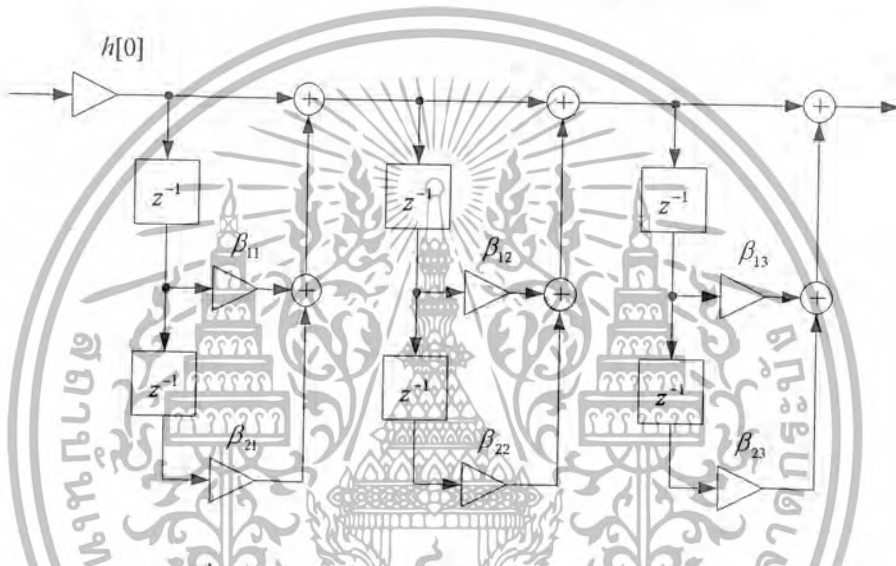
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.2 โครงสร้างแบบต่ออนุกรม (Cascade Form)

ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีอันดับสูงๆ ในแต่ละส่วนจะประกอบด้วย สมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่อันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 นำมาต่ออนุกรมกัน เราทราบได้โดยพิจารณาจาก สมการ

$$H(z) = h(0) \prod_{k=1}^K (1 + \beta_{1k} z^{-1} + \beta_{2k} z^{-2}) \quad (2.14)$$

โดยค่า  $K$  เป็นจำนวนกลุ่ม (section) มีเงื่อนไข คือ  $K = N/2$  ถ้าจำนวนกลุ่มเป็นเลขคู่  
 $K = (N+1)/2$  ถ้าจำนวนกลุ่มเป็นเลขคี่



รูปที่ 2.11 แสดง โครงสร้างแบบอนุกรม (Direct Form)

### 2.2.3.3 โครงสร้างแบบโพลีเฟส เรียลไลเซชัน (Polyphase Realization)

พิจารณาจากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เอฟ ไอ อาร์ ในระบบคอสซอล จากสมการที่มีอันดับที่ 9

$$H(z) = h[0] + h[1]z^{-1} + h[2]z^{-2} + h[3]z^{-3} + h[4]z^{-4} + h[5]z^{-5} + h[6]z^{-6} + h[7]z^{-7} + h[8]z^{-8} \quad (2.15)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า มีผลบวกอยู่ 2 เทอม ประกอบด้วยเทอมที่มีสัมประสิทธิ์ของเลขยกกำลังเป็นเลขคี่และสัมประสิทธิ์ของเลขยกกำลังเป็นเลขคู่

$$\begin{aligned} H(z) &= (h[0] + h[2]z^{-2} + h[4]z^{-4} + h[6]z^{-6} + h[8]z^{-8}) + (h[1]z^{-1} + h[3]z^{-3} + h[5]z^{-5} + h[7]z^{-7}) \\ &= (h[0] + h[2]z^{-2} + h[4]z^{-4} + h[6]z^{-6} + h[8]z^{-8}) \\ &\quad + z^{-1}(h[1] + h[3]z^{-2} + h[5]z^{-4} + h[7]z^{-6}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

หมายเหตุ

$$\begin{aligned} \text{ให้} \quad E_0(z) &= h[0] + h[2]z^{-1} + h[4]z^{-2} + h[6]z^{-3} + h[8]z^{-4} \\ E_1(z) &= h[1] + h[3]z^{-1} + h[5]z^{-2} + h[7]z^{-3} \end{aligned} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถเขียนแทนสมการที่ (2.16) ได้ดังนี้

$$H(z) = E_0(z^2) + z^{-1}E_1(z^2) \quad (2.18)$$

จากคุณลักษณะที่เหมือนกัน เราสามารถกล่าวซ้ำและจัดให้อยู่ในรูป

$$H(z) = E_0(z^3) + z^{-1}E_1(z^3) + z^{-2}E_2(z^3) \quad (2.19)$$

ค่าตอนนี้

$$\begin{aligned} E_0(z) &= h[0] + h[3]z^{-1} + h[6]z^{-2} \\ E_1(z) &= h[1] + h[4]z^{-1} + h[7]z^{-2} \\ E_2(z) &= h[2] + h[5]z^{-1} + h[8]z^{-2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

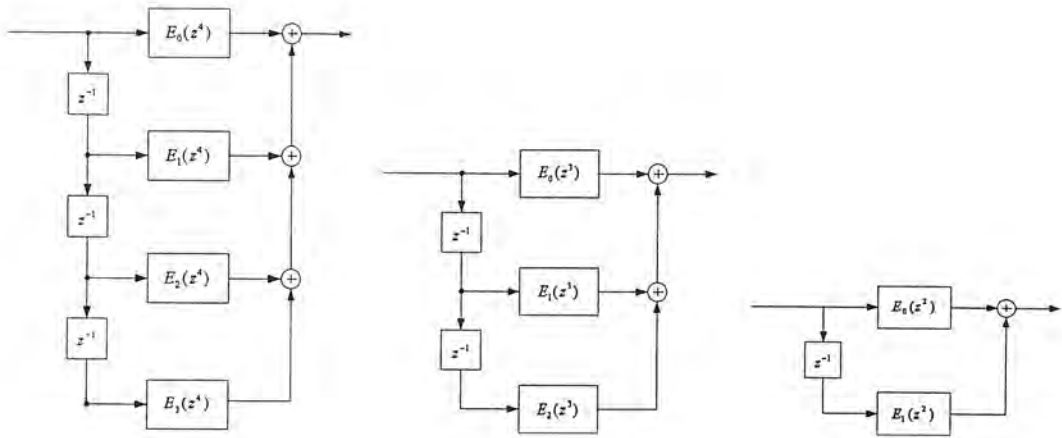
จำแนก  $H(z)$  ในรูปของสมการที่ (2.18) และ (2.19) จำแนก L-Branch ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ(2.12) อันดับที่  $N$  ออกเป็น

$$H(z) = \sum_{m=0}^{L-1} z^{-m} E_m(z^L) \quad (2.21)$$

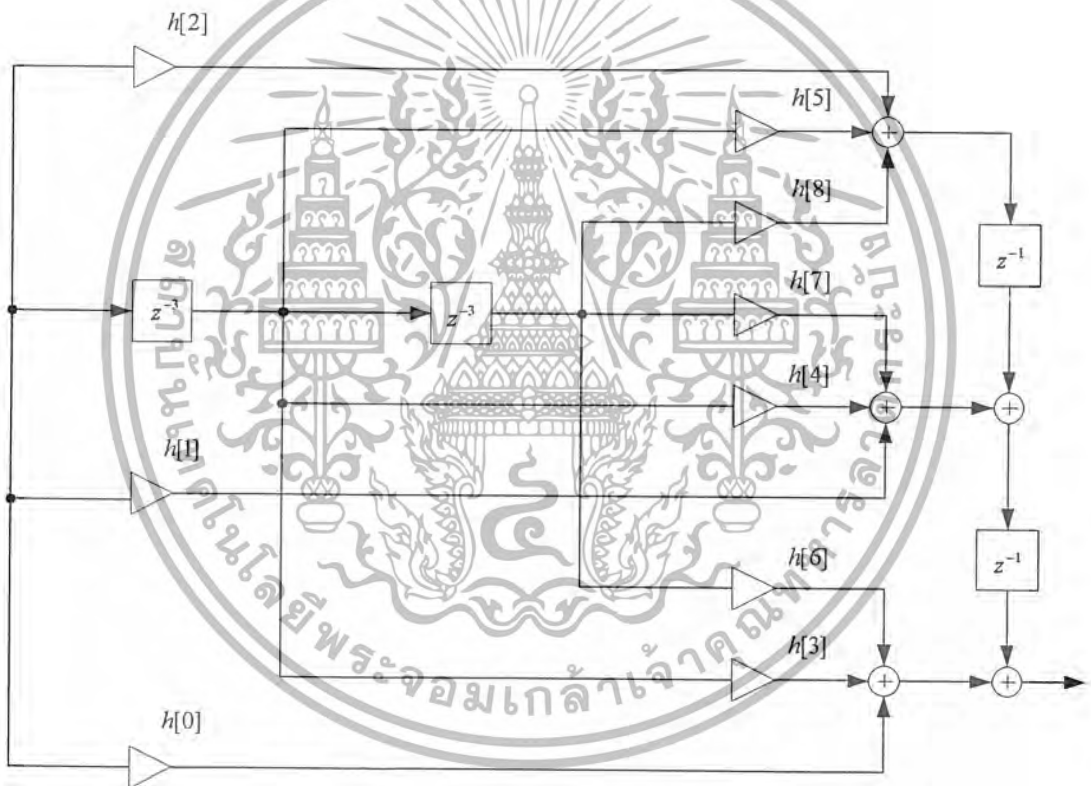
ซึ่ง

$$E_m(z) = \sum_{n=0}^{\lfloor (N+1)/L \rfloor} h[Ln+m]z^{-n} \quad 0 \leq m \leq L-1 \quad (2.22)$$

ค่า  $h[n] = 0$  สำหรับค่า  $n > N$  การนำไปประยุกต์งานใช้จริง  $H(z)$  มาจากการจำแนกสมการที่ (2.21) และถูกเรียกว่า โพลีเฟส เรียลไจเซชัน (Polyphase Realization) รูปที่ 2.8 แสดงโพลีเฟส เรียลไจเซชัน (Polyphase Realization) ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน 4-branch, 3-branch และ 2-branch เหมือนกับที่แสดงในสมการที่(2.17)และ (2.20)  $E_m(z^L)$  คือ Subfilters ใน โพลีเฟส เรียลไจเซชัน (Polyphase Realization) ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างแบบโพลีเฟส เรียลไคเซชัน (Polyphase Realization)



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้าง Canonic Polyphase Realization ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 9 โดยการใช้ Delay

โครงสร้างแบบโพลีเฟส เรียลไคเซชัน (Polyphase Realization) มักใช้บ่อยๆ ใน Multirate Digital Signal Processing

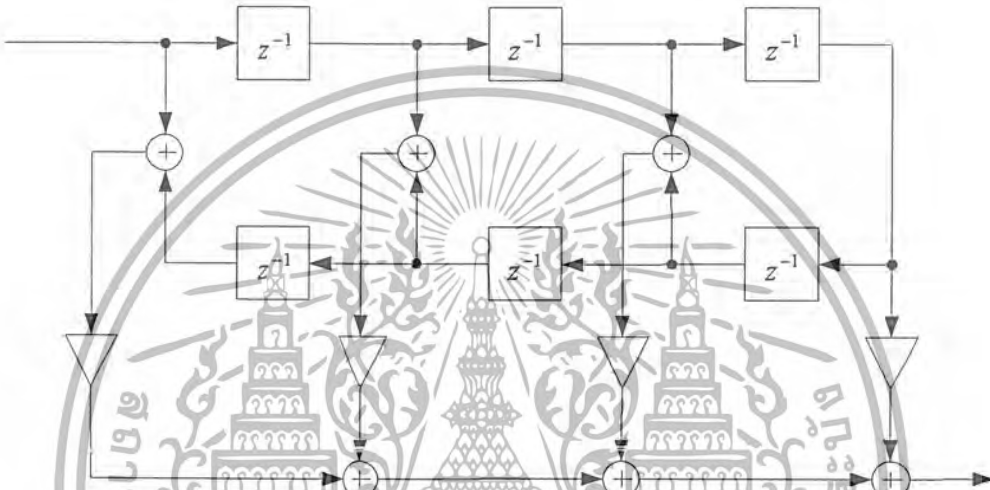
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.4 โครงสร้างแบบลิเนียร์เฟส (Linear-Phase)

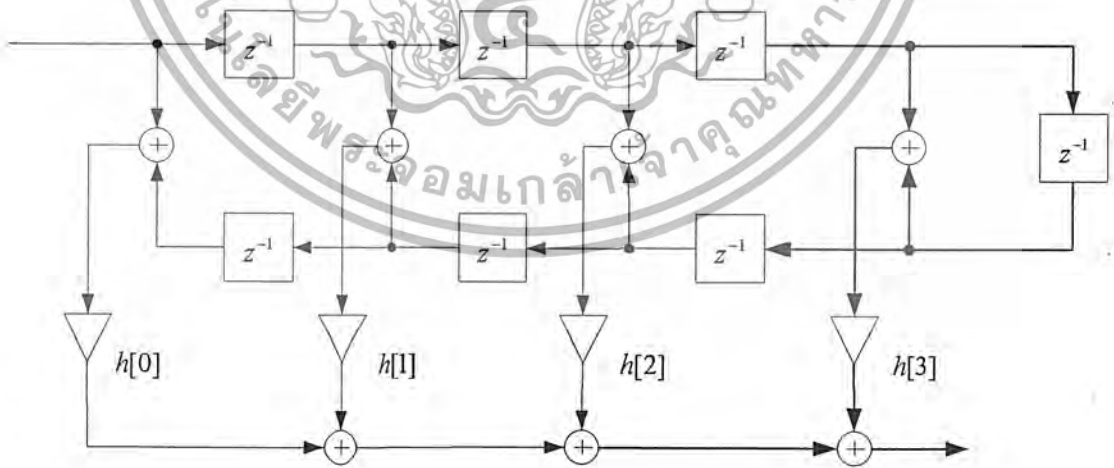
คุณสมบัติของลิเนียร์เฟส (Linear-Phase) ของตัวกรองเอพ็ออาร์ทั้งสมมาตรและไม่สมมาตรของผลตอบสนองเชิงอิมพัลส์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ลดจำนวนตัวคูณทั้งหมด เหลือเกือบๆ ครึ่งหนึ่งของโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct Form)

พิจารณาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เอพ็ออาร์ อันดับที่ 7 ด้วยความสมมาตรของผลตอบสนองเชิงอิมพัลส์

$$H(z) = h[0] + h[1]z^{-1} + h[2]z^{-2} + h[3]z^{-3} + h[2]z^{-4} + h[1]z^{-5} + h[0]z^{-6} \tag{2.23}$$



รูปที่ 2.14ก แสดงโครงสร้างแบบลิเนียร์เฟสชนิดที่ 1



รูปที่ 2.14ข แสดงโครงสร้างแบบลิเนียร์เฟสชนิดที่ 2

ซึ่งสามารถเขียนใหม่แทนได้

$$H(z) = h[0](1 + z^{-6}) + h[1](z^{-1} + z^{-5}) + h[2](z^{-2} + z^{-4}) + h[3]z^{-3} \tag{2.24}$$

การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงมาจากการจำแนกสมการที่ (2.23) แสดงในรูปที่ 2.14ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง เช่น ในการจำแนก สมการฟังก์ชันถ่ายโอน เอฟไออาร์ อันดับที่ 8 ชนิด 2 ก็เหมือนกันกับ การก การจำแนกสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เอฟไออาร์ อันดับที่ 7 ชนิด 1 เราจำแนกได้จาก

$$H(z) = h[0](1 + z^{-7}) + h[1](z^{-1} + z^{-6}) + h[2](z^{-2} + z^{-5}) + h[3](z^{-3} + z^{-4}) \quad (2.25)$$

ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.14x จากรูปที่ 2.14ก วิธีโครงสร้างแบบลิเนียร์เฟส ต้องใช้ตัวคูณ 4 ตัว เนื่องจาก โครงสร้างแบบโดยตรง สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนอันดับที่ 7 ต้องการตัวคูณ 7 ตัว เช่นเดียวกับรูปที่ 2.14x ต้องใช้ตัวคูณ 4 ตัว

สรุป คือ วิธีโครงสร้างแบบลิเนียร์เฟสทำให้ลดจำนวนตัวคูณ ลงไปได้เกือบครึ่งหนึ่งของ โครงสร้างแบบโดยตรง

### 2.2.3.5 การออกแบบตัวกรองเอฟไออาร์โดยวิธีหน้าต่าง(Window Method)

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง การหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองเอฟไออาร์ เมื่อกำหนดคุณลักษณะ เฉพาะของตัวกรองมา ซึ่งคุณสมบัตินี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการกำหนดลักษณะของผลตอบสนองเชิง ความถี่ที่ต้องการ ได้แก่ ความถี่ตัด, ความคมของตัวกรอง, การลดทอนในแถบหยุด และอื่นๆ เราจะทำการ ออกแบบโดยคำนึงถึงความถี่จัตตอล ( $\omega'_b$ ) ที่มีย่านความถี่ที่สนใจในช่วง  $-\pi$  ถึง  $\pi$  หรือ  $f'$  ใน ช่วง-1 ถึง 1 ดังที่เรารู้ได้ศึกษา

วิธีหน้าต่างเป็นวิธีพื้นฐานที่สุดวิธีหนึ่งที่จะใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง เป็นวิธีที่ง่ายต่อการ ออกแบบ และสามารถใช้ออกแบบตัวกรองแบบต่างๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นตัวกรองแบบแถบความถี่ต่ำผ่าน, แถบความถี่สูงผ่าน, แถบความถี่ผ่านหรือแถบความถี่ตัด ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองอุดมคติต่างๆ

|                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| ชนิดของตัวกรอง  | $d(n), -\infty < n < \infty$                                      | $d(0)$  |
| Low Pass Filter | $\frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$                                 | $\frac{\omega'_c}{\pi}$                             |
| Highpass Filter | $\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_c n)}{\pi n}$                     | $1 - \frac{\omega'_c}{\pi}$                         |
| Bandpass Filter | $\frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$             | $\frac{\omega'_b}{\pi} - \frac{\omega'_a}{\pi}$     |
| Bandstop Filter | $\delta(n) - \frac{\sin(\omega'_b n) - \sin(\omega'_a n)}{\pi n}$ | $1 - \frac{\omega'_b}{\pi} + \frac{\omega'_a}{\pi}$ |

หมายเหตุ  $d(n)$  แทนผลตอบสนองอิมพัลส์

$D(e^{j\omega})$  แทนผลตอบสนองเชิงความถี่

$\omega'_b, \omega'_a$  แทนความถี่สูงตัดและความถี่ต่ำตัด

ก่อนอื่นขอให้ทำความเข้าใจกับผลตอบสนองเชิงความถี่ที่เราจะออกแบบได้ก่อน ซึ่งค่าที่จะใช้

กำหนดเป็นคุณลักษณะของวิธีหน้าต่างได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความพลีของแถบผ่าน ( $\delta_{pass}$ ) คือ ค่าสูงสุดที่ขนาดของแถบผ่านแกว่งออกห่างจากค่าหนึ่ง บางครั้งวัดเป็น dB โดยใช่

$$A_{pass} = 20 \log \frac{1 + \delta_{pass}}{1 - \delta_{pass}} \quad (\text{dB}) \quad (2.26)$$

2. การลดทอนของแถบหยุด ( $A_{stop}$ ) คือ จำนวนเท่าที่แถบหยุดลดทอนลงจากค่า 1 วัดเป็น dB โดยที่ความสัมพันธ์กับความพลีของแถบหยุด คือ

$$A_{stop} = -20 \log \delta_{stop} \quad (\text{dB}) \quad (2.27)$$

3. ความถี่คัทออฟ คือ ค่าความถี่ที่ขนาดลดลงประมาณ 0.5 หรืออยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของแถบเปลี่ยน

การออกแบบโดยวิธีหน้าต่าง สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยได้ดังนี้

1. ใช้ค่าความพลีของแถบผ่าน หรือการลดทอนของแถบหยุดอย่างใดอย่างหนึ่งเพื่อเลือกชนิดของหน้าต่างที่สามารถใช้ได้จากตาราง 2.2 ถ้ามีข้อกำหนดทั้งหมดทั้ง 2 อย่าง ให้เปลี่ยน  $A_{stop}$  เป็น  $\delta_{stop}$  ก่อนแล้วเปรียบเทียบ  $\delta_{pass}$  กับ  $\delta_{stop}$  ว่าค่าใดน้อยกว่ากัน ถ้า  $\delta_{pass}$  น้อยกว่าให้ใช้  $\delta_{pass}$  เป็นตัวเลือกหน้าต่าง แต่ถ้า  $\delta_{stop}$  น้อยกว่าให้ใช้  $A_{stop}$  เป็นตัวเลือกหน้าต่าง โดยมีหลักการว่า  $\delta_{pass}$  ในตารางต้องน้อยกว่าที่ต้องการ และ  $A_{stop}$  ในตารางต้องมากกว่าที่ต้องการ

2. ใช้ค่าความกว้างของแถบเปลี่ยนหาอันดับของตัวกรองที่ต้องใช้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta f'$  กับ  $N$  ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 จากนั้น คำนวณฟังก์ชันหน้าต่างที่ต้องใช้ จะได้

$$w(n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

จากตารางจะสังเกตได้ว่า อันดับของตัวกรองจะเป็นสัดส่วนผกผันกับ  $\Delta f'$  นั่นคือ เราสามารถปรับปรุง  $\Delta f'$  ให้แคบลง (ตัวกรองคมขึ้น) โดยการเพิ่มค่า  $N$  แต่เราไม่สามารถปรับปรุงค่า  $\delta_{stop}$  และ  $A_{pass}$  ให้ดีขึ้นได้ เพราะค่า  $\delta_{stop}$  และ  $A_{pass}$  จะมีขนาดคงที่สำหรับหน้าต่างแบบหนึ่งๆ ยกเว้นหน้าต่างแบบ Kaiser

3. ใช้ชนิดของตัวกรอง (ความถี่ต่ำผ่าน, ความถี่สูงผ่าน, ความถี่ผ่าน หรือ ความถี่ตัด) และความถี่ตัดที่ต้องการเลือกผลตอบสนองต่ออิมพัลส์  $d(n)$  ที่ถูกต้องจากตารางที่ 2.1

4. เลื่อน  $d(n)$  ให้ล้าหลังลง  $M$  ตำแหน่ง โดย  $M = (N-1)/2$  จะได้สัญญาณเป็น  $d(n-M)$

จากนั้นคูณเข้ากับฟังก์ชันหน้าต่าง  $w(n)$  ที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งจะได้ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ที่มีความยาว  $N$  จุด และเป็นแบบคอซอล ดังนี้

$$h(n) = d(n-M), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.28)$$

การออกแบบนี้จะต้องใช้  $N$  เป็นจำนวนคู่ ซึ่งจะได้เป็นตัวกรองเอฟโฟอาร์ที่มีเฟสเชิงเส้น และมีสมมาตรชนิดที่ 1 เพราะทั้ง  $d(n)$  และ  $w(n)$  มีสมมาตรรอบจุดกึ่งกลางทั้งคู่ สำหรับการออกแบบโดยที่  $N$  เป็นจำนวนคู่ก็ทำได้เช่นกัน แต่ขอละไว้ไม่กล่าวถึงในที่นี้

ตารางที่ 2.2 การออกแบบตัวกรองเอฟโฟอาร์โดยใช้วิธีหน้าต่าง

| หน้าต่าง                    | $\delta_{pass}$ | $A_{stop}$ | $\Delta f'$                   | $w(n), n = 0, 1, \dots, N-1$  |
|-----------------------------|-----------------|------------|-------------------------------|---|
|                             |                 |            |                               | $M = \frac{N-1}{2}$   |
| สี่เหลี่ยม<br>(rectangular) | 8.9%            | 21         | $2/N$                         | 1   |
| ฮานนิง<br>(Hanning)         | 0.63%           | 44         | $4/N$                         | $0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$   |
| แฮมมิง<br>(Hamming)         | 0.22%           | 53         | $4/N$                         | $0.5 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$  |
| แบล็กแมน<br>(Blackman)      | 0.02%           | 74         | $6/N$                         | $0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$ |
| ไคเซอร์<br>(Kaiser)         | ปรับได้         | ปรับได้    | $\frac{A - 7.95}{14.36(N-1)}$ | $I_0\left(\frac{\alpha \sqrt{1 - (n-m)^2 / M^2}}{I_0(\alpha)}\right)$                       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ตัวกรองปรับค่าได้แบบโอไออาร์ (IIR)

ในการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบโอไออาร์ นั้นจะต้องอาศัยทฤษฎีและหลักการ ในหัวข้อนี้ไปทำการออกแบบ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการต่างๆของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสและหลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบโอไออาร์ด้วยวิธีการแปลงสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.3.1 ทฤษฎีสมาการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส (Allpass Transfer Functions)

ถ้ากล่าวถึงคุณสมบัติพิเศษของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนแบบโอไออาร์ ที่มีลักษณะค่าของผลตอบสนองของขนาดมีค่าเดียวกันตลอดทั้งความถี่ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนนั้นคือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้มากมาย ซึ่งเราสามารถให้คำนิยามของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส ได้ดังนี้

ผลตอบสนองของขนาดมีค่าเดียวกันตลอดทุกค่าความถี่

$$|A(e^{j\omega})|^2 = 1; \omega \in R \quad (2.29)$$

สามารถเขียนแสดงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส ในระบบคอสซอลได้คือ

$$A_M(z) = \pm \frac{d_M + d_{M+1}z^{-1} + \dots + d_1z^{-M+1} + z^{-M}}{1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{M-1}z^{-M+1} + d_Mz^{-M}} \quad (2.30)$$

โดย  $M$  แสดงถึงอันดับของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส ของ  $A_M(z)$  มาเขียนให้อยู่ในรูป  $D_M(z)$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$D_M(z) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_{M-1}z^{-M+1} + d_Mz^{-M} \quad (2.31)$$

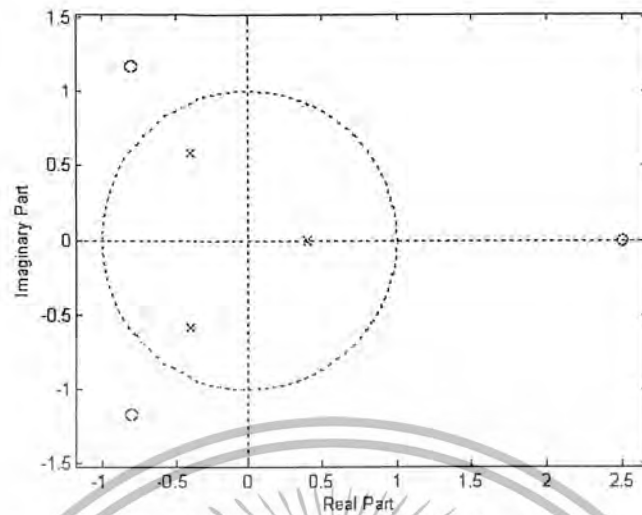
ทำให้เราสามารถเขียนสมการ  $A_m(z)$  ใหม่ได้เป็น

$$A_M(z) = \pm \frac{z^{-M} D_M(z^{-1})}{D_M(z)} \quad (2.32)$$

จากสมการข้างบน ถ้า  $z = re^{j\phi}$  เป็นค่าโพล ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส แล้วค่าซีโรก็จะมีค่าเท่ากับ  $z = (1/r)e^{-j\phi}$  โดยสมการพิเศษในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส จะมีลักษณะเป็น มิเรอร์-อิมเมจ (mirror-image) ของสมการตัวส่วน ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าตำแหน่งของ โพลและซีโร มีความสมมาตรแบบ มิเรอร์-อิมเมจ (mirror-image) ในระนาบ  $z$  โดยได้ทำการยกตัวอย่างสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส อันดับที่ 3

$$A_3(z) = \frac{-0.2 + 0.18z^{-1} + 0.4z^{-2} + z^{-3}}{1 + 0.4z^{-1} + 0.18z^{-2} - 0.2z^{-3}} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งของโพลและซีโร

เราสามารถแสดงให้เห็นว่า ขนาดของ  $A_M(e^{j\omega})$  มีค่าเท่ากับ 1 ตลอดทุกความถี่  $\omega$  ได้จากสมการที่ (2.32) คือ

$$A_M(z) = \frac{z^{-M} D_M(z^{-1})}{D_M(z)} \quad (2.34)$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$A_M(z) A_M(z^{-1}) = \frac{z^{-M} D_M(z^{-1}) z^{-M} D_M(z)}{D_M(z) D_M(z^{-1})} = 1$$

ดังนั้น

$$|A_M(e^{j\omega})|^2 = A_M(z) A_M(z^{-1}) \Big|_{z=e^{j\omega}} = 1 \quad (2.35)$$

ลักษณะบางประการที่สำคัญของฟังก์ชันออลพาส

เราสามารถแบ่งลักษณะที่สำคัญของฟังก์ชันออลพาสได้ 3 ประการดังนี้

1. สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสในระบบคอกซอลจะมี ความสูญเสียค่า ดังนั้นเมื่อนำไปสร้างตัวกรองความถี่จะทำให้โครงสร้างของมันมีความสูญเสียค่า
2. เพื่อเป็นการยืนยันว่า  $A(z)$  นั้นมีขนาดที่เสถียรในฟังก์ชันออลพาส เพราะฉะนั้น  $A(z)$  จึงแสดงได้ดังนี้

$$|A(z)| \begin{cases} < 1 & \text{ถ้า } |z| < 1 \\ = 1 & \text{ถ้า } |z| = 1 \\ > 1 & \text{ถ้า } |z| > 1 \end{cases} \quad (2.36)$$

3. เป็นความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเฟสของฟังก์ชันออลพาสที่อยู่เหนือช่วงความถี่  $\omega = 0$  ถึง

$\omega = \pi$  โดยกำหนดให้  $\tau(\omega)$  เป็นฟังก์ชันกรุปดีเลย์ของตัวกรองออลพาส  $A(z)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau(\omega) = -\frac{d[\theta_c(\omega)]}{d\omega}$$

เมื่อ  $\theta_c(\omega)$  เป็นอันแรพ (unwrap) ที่ได้มาจากฟังก์ชันเฟส  $\theta(\omega) = \arg\{A(e^{j\omega})\}$  ซึ่งมาจากการแทน  $\theta_c(\omega)$  เข้าไปในสมการข้างบนมีผลทำให้กรุปดีเลย์  $\tau(\omega)$  มีค่าดีขึ้น ถ้า  $\theta_c(\omega)$  เป็นฟังก์ชันเฟสของฟังก์ชันออลพาสที่เสถียร  $A(z)$  และเนื่องจากค่า  $\omega$  เป็นฟังก์ชันลด จึงมีผลทำให้ค่ากรุปดีเลย์  $\tau(\omega)$  มีค่าเป็นบวกทุกๆจุดในช่วง  $0 < \omega < \pi$  ดังนั้นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสที่เสถียรอันดับที่  $M$  จะทำให้มีคุณสมบัติที่พอดีดังสมการ

$$\int_0^\pi \tau(\omega) d\omega = M\pi \quad (2.37)$$

การเปลี่ยนเฟสของฟังก์ชันออลพาสอันดับที่  $M$  ก็เหมือนกับการเปลี่ยนค่า  $\omega$  จาก 0 ถึง  $\omega$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $M\pi$  เรเดียน

### 2.3.2 โครงสร้างของตัวกรองออลพาส (Allpass Filter Structure)

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 มาทำให้เป็นจริงได้โดยใช้กระบวนการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจะพัฒนาโครงสร้างที่ยังคงสภาพของออลพาสต่อไปได้แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงในสัมประสิทธิ์หลายๆตัวซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบเกี่ยวเนื่องไปยังสัมประสิทธิ์การควอนไทซ์ขึ้น

กำหนดให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับ 1 เป็นดังนี้

$$A_1(z) = \frac{d_1 + z^{-1}}{1 + d_1 z^{-1}} \quad (2.38)$$

จะเห็นว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสข้างบนนี้มีคุณลักษณะเฉพาะที่มีค่าคงที่เพียง 1 ตัวคือ  $d_1$  ซึ่งทำให้สามารถอธิบายสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสเข้าได้โดยให้  $A_1(z) = Y_1/X_1$  อยู่ในเทอมตัวแปรของคู่สมการดังนี้

$$A_1(z) = t_{11} + \frac{t_{12}t_{21}d_1}{1 - d_1 t_{22}} = \frac{t_{11} - d_1(t_{11}t_{22} - t_{12}t_{21})}{t - d_1 t_{22}} \quad (2.39)$$

แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ (2.38) และ (2.39)

$$t_{11} = z^{-1}, t_{22} = -z^{-1} \quad (2.40)$$

$$t_{11}t_{22} - t_{12}t_{21} = -1 \quad (2.41)$$

แทนสมการที่ (2.38) ลงในสมการที่ (2.39) เราจะได้

$$t_{12}t_{21} = 1 - z^{-2} \quad (2.42)$$

ซึ่งนำไปสู่ผลที่เป็นไปได้ 4 กรณี

ชนิด 1A :  $t_{11} = z^{-1}, t_{22} = -z^{-1}, t_{12} = 1 - z^{-2}, t_{21} = 1;$  (2.43a)

ชนิด 1B :  $t_{11} = z^{-1}, t_{22} = -z^{-1}, t_{12} = 1 + z^{-1}, t_{21} = 1 - z^{-1};$  (2.43b)

ชนิด 1A :  $t_{11} = z^{-1}, t_{22} = -z^{-1}, t_{12} = 1, t_{21} = 1 - z^{-1};$  (2.43c)

ชนิด 1B :  $t_{11} = z^{-1}, t_{22} = -z^{-1}, t_{12} = 1 - z^{-1}, t_{21} = 1 + z^{-1};$  (2.43d)

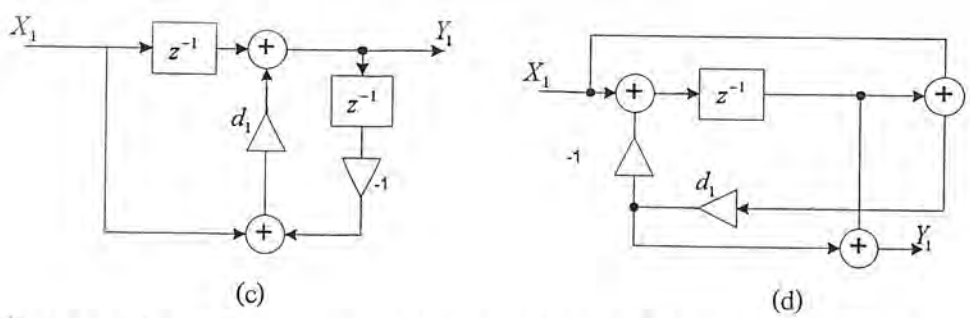
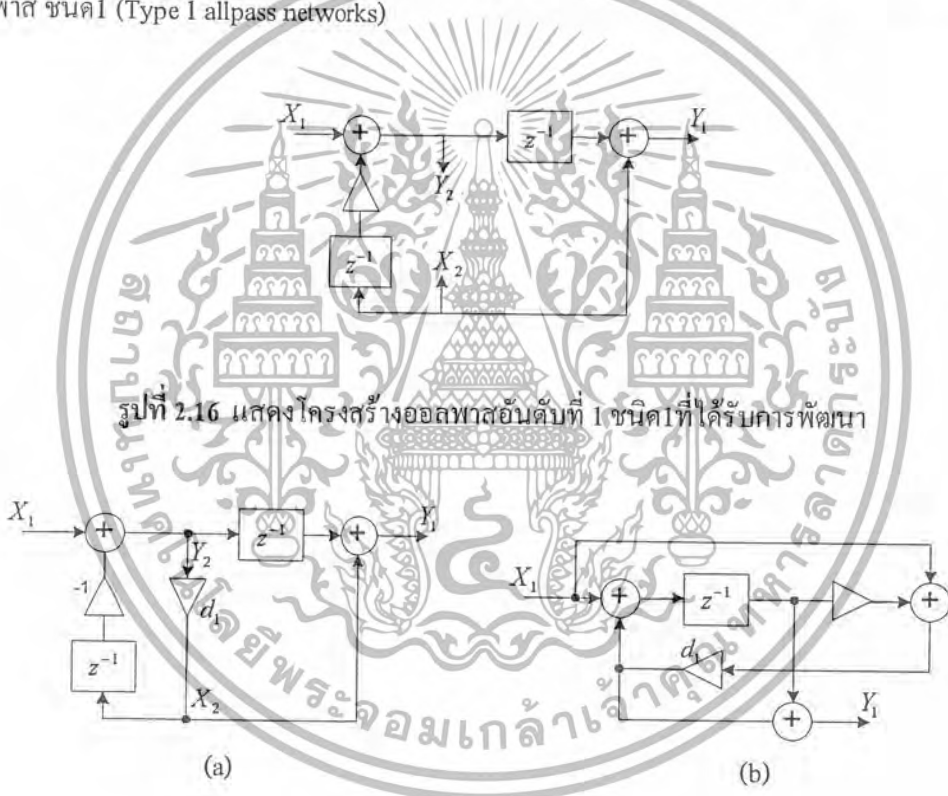
ให้เราสมการที่ (2.43a) ไปจัดให้อยู่ในโครงสร้างทวิ-แพร์ที่จะนำไปใช้สร้างจริง

$$Y_2 = X_1 - z^{-1}X_2$$

$$X_1 = z^{-1}X_2 + Y_2$$

โดยโครงสร้างทวิ-แพร์แสดงอยู่ในรูปที่ 2.16 โดยกำหนดขั้ว  $X_2$  และ  $Y_2$  เป็นขั้วของตัวคูณ  $d_1$  เราก็จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสอันดับที่ 1 ที่มีตัวคูณเพียงตัวเดียว แสดงในรูปที่ 2.16 ส่วนสมการที่ (2.43b), (2.43c) และ (2.43d) แสดงในรูปที่ 2.17 โดยรูปแบบโครงสร้างทั้งหมดนี้มีชื่อเรียกว่า โครงข่ายออกพาส ชนิด 1 (Type 1 allpass networks)

รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างออกพาสอันดับที่ 1 ชนิด 1 ที่ได้รับการพัฒนา



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างออกพาสอันดับที่ 1 ชนิด 1 โดย (a) ชนิด 1A, (b) ชนิด 1B, (c) ชนิด 1A<sub>i</sub>, (d) ชนิด 1B<sub>i</sub>

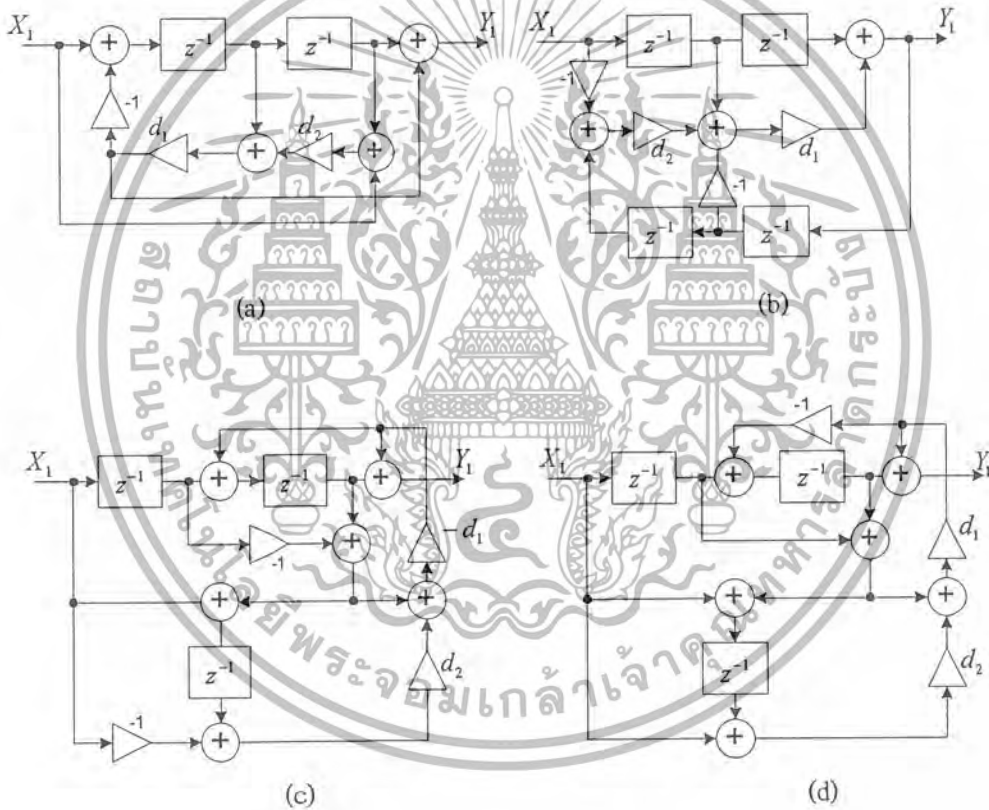
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลำดับต่อไปเรานำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 2 มาสร้างใช้งานจริง โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 2 มีคุณลักษณะคือ มีค่าสัมประสิทธิ์ 2 ตัว ดังนั้นจึงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสต้องมีตัวคูณ 2 ตัวคือ  $d_1$  และ  $d_2$  ซึ่งจะช่วยให้เวลานำไปสร้างใช้งานจริงนั้นมีรูปแบบโครงสร้างได้หลายแบบ

กำหนดให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 2 เป็นดังนี้

$$A_2(z) = \frac{d_1 d_2 + d_1 z^{-1} + z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_1 d_2 z^{-2}} \quad (2.44)$$

เมื่อเรานำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสข้างบนไปสร้างใช้งานจริงจะได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งมีชื่อเรียกว่า โครงข่ายออลพาส ชนิด 2 (Type 2 allpass networks)



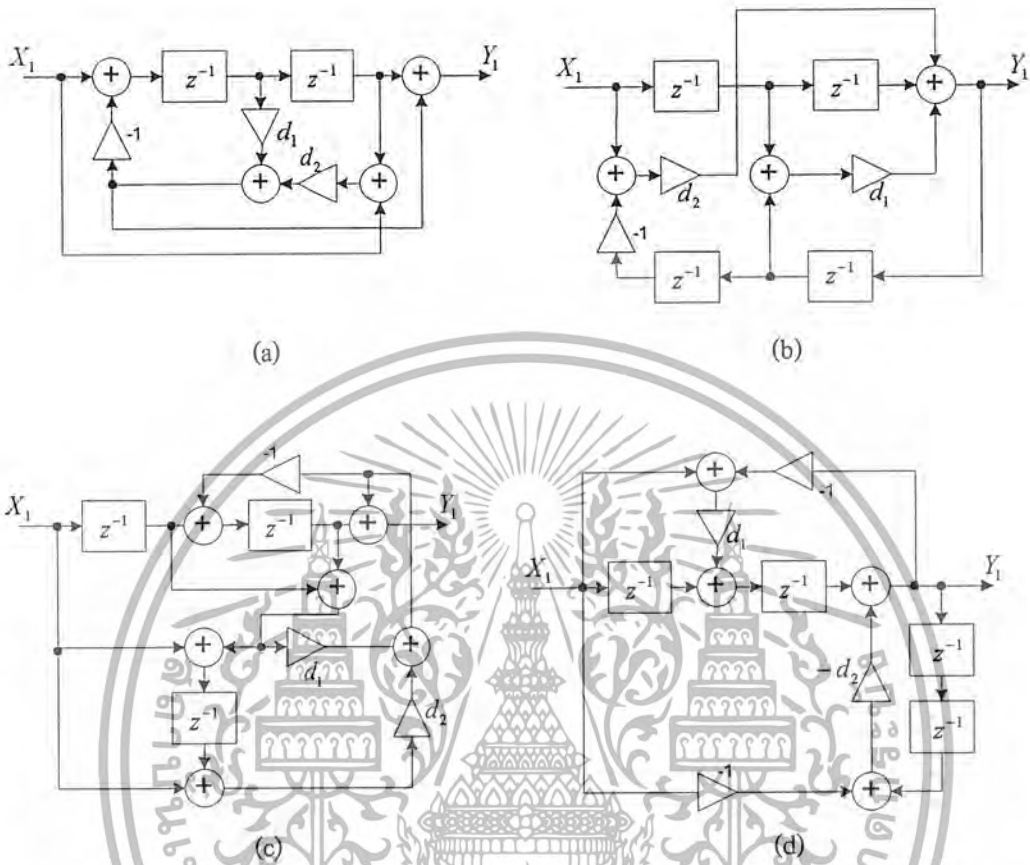
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างออลพาสอันดับที่ 2 ชนิด 2 โดย (a) ชนิด 2A, (b) ชนิด 2D, (c) ชนิด 2C, (d) ชนิด 2B

นอกจากโครงสร้างออลพาสอันดับที่ 2 ชนิด 2 แล้วยังมีโครงสร้างออลพาสอันดับที่ 2 อีกแบบ ซึ่งมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$A_2(z) = \frac{d_2 + d_1 z^{-1} + z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสข้างบนไปสร้างใช้งานจริงจะได้ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งมีชื่อเรียกว่า โครงข่ายออสพาส ชนิด 3 (Type 3 allpass networks)



รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างออสพาสอันดับที่ 2 ชนิด 3 โดย (a) ชนิด 3A, (b) ชนิด 3D, (c) ชนิด 3C, (d) ชนิด 3B

### 2.3.3 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออสพาส-คอมพลิเมนทารี (Allpass-Complementary Transfer Functions)

ให้ค่า  $M$  เป็นชุดของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออสพาส  $\{H_i(z)\}, 0 \leq i \leq M-1$ , ซึ่งเราสามารถอธิบายถึง สมการฟังก์ชันถ่ายโอน ออสพาส-คอมพลิเมนทารี (allpass-complementary) ได้คือ ให้ผลรวมของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเท่ากับฟังก์ชันออสพาส  $A(z)$  ดังสมการ

$$\sum_{i=0}^{M-1} H_i(z) = A(z) \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เพาเวอร์-คอมพลิเมนทารี (power-Complementary Transfer Functions)

ให้ค่า  $M$  เป็นชุดของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดิจิทัล  $\{H_i(z)\}, 0 \leq i \leq M-1$ , ซึ่งเราสามารถอธิบายถึงสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เพาเวอร์-คอมพลิเมนทารี (power-Complementary)

ได้คือ ให้ผลรวมของผลตอบสนองทางขนาดยกกำลังสองมีค่าเท่ากับค่าคงที่  $K$  สำหรับทุกค่าของ  $\omega$

$$\sum_{i=0}^{M-1} |H_i(e^{j\omega})|^2 = K \quad , \text{สำหรับทุกค่า } \omega \quad (2.47)$$

ที่  $K > 0$  โดยวิเคราะห์ถึงความต่อเนื่อง จากคุณลักษณะความเท่ากันของสมการข้างบน

$$\sum_{i=0}^{M-1} H_i(z^{-1})H_i(z) = K \quad , \forall z \quad (2.48)$$

สำหรับสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นคู่  $H_0(z)$  และ  $H_1(z)$  ถ้าความถี่  $\omega$  ที่ทำให้

$$|H_0(e^{j\omega_0})|^2 = |H_1(e^{j\omega_0})|^2 = \frac{1}{2} \text{ จะเรียกว่า ครอสโอเวอร์ ฟริควเ็นซี (crossover frequency) ที่ความถี่}$$

ที่ให้ผลตอบสนองอัตราขยายของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $H_0(z)$  และ  $H_1(z)$  มีค่าลดลงมา 3 dB จะเรียกค่าความถี่นั้นว่า ค่าความถี่ตัดออฟ  $\omega_c$  สามารถบรรยายถึงสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $H_0(z)$  และ  $H_1(z)$  ได้คือ

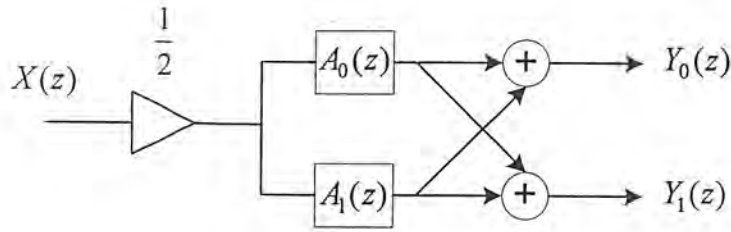
$$H_0(z) = \frac{1}{2}[A_0(z) + A_1(z)] \quad (2.49)$$

$$H_1(z) = \frac{1}{2}[A_0(z) - A_1(z)] \quad (2.50)$$

โดย  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  จะเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส โดยผลรวมของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสใน  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ในสมการที่ (2.49) และ (2.50) นั่นคือ ออลพาส-คอมพลิเมนทารี (allpass-complementary) ส่วนทั้งสมการที่ (2.49) และ (2.50) นั่นคือ เพาเวอร์-คอมพลิเมนทารี (power-complementary)

### 2.3.5 หลักการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดับเบิล-คอมพลิเมนทารี (Doubly-Complementary Transfer Functions)

จะต้องทำให้ค่า  $M$  ซึ่งเป็นชุดของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (2.46) และ (2.49) มีค่าที่เหมาะสมสมกันถึงจะเรียกได้ว่าเป็น ดับเบิล-คอมพลิเมนทารี (doubly-complementary) โดยหลักการทำ ดับเบิล-คอมพลิเมนทารี (doubly-complementary) จะนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $H_0(z)$  และ  $H_1(z)$  ที่เป็นส่วนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมาสร้างให้เป็นแบบขนานดังรูป



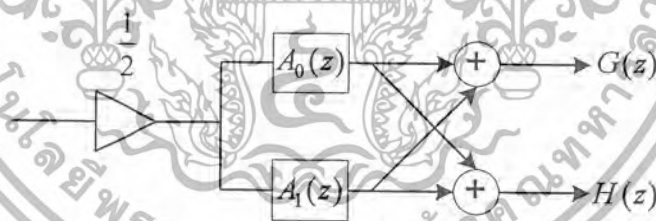
$$H_0(z) = \frac{Y_0(z)}{X(z)} \quad H_1(z) = \frac{Y_1(z)}{X(z)}$$

รูปที่ 2.20 แสดงการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสมาต่อแบบขนาน

โดยหลักการดับบลิ-คอมพลิเมนทารี (doubly-complementary) มีข้อดีคือ ทำให้ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่ำในช่วงแถบผ่าน ซึ่งมีผลมาจากสัมประสิทธิ์ตัวคูณ

### 2.3.6 หลักการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสมาต่อแบบขนานเพื่อใช้งานจริง (Parallel Allpass Realization of IIR Transfer Functions)

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าลูดับบลิ-คอมพลิเมนทารี (doubly-complementary) ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและความถี่สูงผ่าน อันดับที่ 1 สามารถนำไปสร้างใช้งานจริง โดยตัวโครงสร้างนั้นเราจะพิจารณาเหมือนกรณีพิเศษของโครงสร้างส่วนประกอบของตัวกรองออกพาส 2 ตัว นำมาต่อขนานกันดังในรูปที่ 2.21 เราจะพิจารณาส่วนที่เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับที่  $N$  ของ  $G(z)$  ในรูปที่ 2.21 ร่วมกับสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเพาเวอร์-คอมพลิเมนทารี (power-complementary)  $H(z)$  ซึ่งเราจะแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.21 แสดงการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดับบลิ-คอมพลิเมนทารี (doubly-complementary) มาใช้ในโครงสร้างแบบขนานของตัวกรองออกพาส

จากรูปที่ 2.21 จะได้สมการว่า

$$G(z) = \frac{1}{2} \{A_0(z) + A_1(z)\} \quad (2.51)$$

$$H(z) = \frac{1}{2} \{A_0(z) - A_1(z)\} \quad (2.52)$$

จะเห็นได้ว่าสมการทั้ง 2 ข้างต้นเป็นสมการที่ง่ายแต่ก็แสดงถึงเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  และ  $H(z)$  ซึ่งอยู่ในรูปผลรวมของตัวกรองออกพาสในสมการที่ (2.51) และ (2.52) โดยแต่ละอันเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเบาเว้ดีตรีเอล (bounded real) เราสามารถทำการสเกลลิงค์ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนเบาเว้ดีตรีเอล (bounded real) ให้เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่เสถียร ได้ดังสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(z) = \frac{P(z)}{D(z)} = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_N z^{-N}}{1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_N z^{-N}} \quad (2.53)$$

ส่วนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวีคิต์ เรียล (bounded real) ที่เกี่ยวกับสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเพาเวอร์-คอมพลิเมนต์ารี (power-complementary) จะได้สมการว่า

$$H(z) = \frac{Q(z)}{D(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_N z^{-N}}{1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_N z^{-N}} \quad (2.54)$$

สามารถอธิบายคุณลักษณะของเพาเวอร์-คอมพลิเมนต์ารี (power-complementary) ได้

$$|G(e^{j\omega})|^2 + |H(e^{j\omega})|^2 = 1 \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.51) สามารถอธิบาย  $G(z)$  ว่าตัวเศษมีความสมมาตรได้

$$p_n = p_{N-n} \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.52) สามารถอธิบายว่า  $H(z)$  ว่าตัวเศษมีความไม่สมมาตรได้

$$q_n = -q_{N-n} \quad (2.57)$$

เราทำการพัฒนาการปฏิบัติการเพื่อระบุว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสทั้ง 2 ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  ว่ามีคุณลักษณะที่สมมาตรของตัวเศษของ  $G(z)$  ในสมการที่ (2.56) ได้

$$P(z^{-1}) = z^N P(z) \quad (2.58)$$

และเช่นเดียวกันที่คุณลักษณะเศษไม่มีความสมมาตร  $H(z)$  สามารถอธิบายได้

$$Q(z^{-1}) = -z^N Q(z) \quad (2.59)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงความต่อเนื่อง เราสามารถเขียนสมการที่ (2.55) ใหม่ได้

$$G(z^{-1})G(z) + H(z)H(z^{-1}) = 1 \quad (2.60)$$

ทำการแทน  $G(z) = P(z)/D(z)$  และ  $H(z) = Q(z)/D(z)$  ในสมการข้างบนและให้ความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (2.58) และ (2.59) จะได้สมการ

$$[P(z) + Q(z)][P(z) - Q(z)] = z^{-N} D(z^{-1})D(z) \quad (2.61)$$

$$P(z) - Q(z) = z^{-N} [P(z^{-1}) + Q(z^{-1})] \quad (2.62)$$

ถ้าค่าซีโรของ  $[P(z) + Q(z)]$  เป็นไปตาม  $z = \xi_k, 1 \leq k \leq N$  จากสมการที่ (2.61) นั้น

$z = 1/\xi_k, 1 \leq k \leq N$  ก็ต้องเป็นค่าซีโรของ  $[P(z) - Q(z)]$  โดย  $[P(z) - Q(z)]$  จะเป็น มิเรอร์-

อิมเมจ (mirror-image) กับ  $[P(z) + Q(z)]$  จากสมการที่ (2.62) ถ้าค่าซีโรของ  $[P(z) + Q(z)]$  อยู่

ภายในวงกลมหนึ่งหน่วย ของค่าซีโรของ  $D(z)$  ดังนั้น ค่าซีโรของ  $[P(z) - Q(z)]$  อยู่ภายนอกวงกลม

หนึ่งหน่วยของค่าซีโรของ  $D(z^{-1})$  เนื่องจาก  $G(z)$  และ  $H(z)$  เป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่เสถียร

ให้  $z = \xi_k, 1 \leq k \leq r$  ให้ค่า  $r$  เป็นซีโรของ  $[P(z) + Q(z)]$  ที่อยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยและให้ค่า

$N - r$  เป็นค่าซีโร  $z = \xi_k, r + 1 \leq k \leq N$  ที่อยู่ภายนอกวงกลมหนึ่งหน่วย ดังนั้นจากสมการที่ (2.62)

ให้ค่า  $N$  เป็นซีโรของ  $D$  ได้

$$z = \begin{cases} \xi_k, 1 \leq k \leq r \\ \frac{1}{\xi_k}, 1 \leq k \leq N \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดนี้ที่เราจะต้องทำขณะนี้คือ ระบุค่าซีโรข้างต้นกับสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส ที่เหมาะสม  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ที่ง่ายที่สุด เราได้มาซึ่งสมการที่ (2.51) และ (2.52)

$$A_0(z) = G(z) + H(z) = \frac{P(z) + Q(z)}{D(z)} \quad (2.63)$$

$$A_1(z) = G(z) - H(z) = \frac{P(z) - Q(z)}{D(z)} \quad (2.64)$$

เพราะฉะนั้น สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสทั้ง 2 สามารถบรรยายได้ดังนี้

$$A_0(z) = \prod_{k=r+1}^N \frac{z^{-1} - (\xi_k^*)^{-1}}{1 - \xi_k^{-1} z^{-1}} \quad (2.65)$$

$$A_1(z) = \prod_{k=1}^r \frac{z^{-1} - \xi_k}{1 - \xi_k z^{-1}} \quad (2.66)$$

ในส่วนของอันดับ จากการบรรยายถึงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสทั้ง 2 ข้างบน มีความจำเป็นที่ จะต้องใช้วิธีของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ซึ่งเป็นเพาเวอร์-คอมพลีเมนต์นารี (power-complementary) ของ  $G(z)$  แสดงถึงพหุนามอันดับที่ 2  $P^2(z) - z^{-N} D(z^{-1}) D(z)$  เช่นเดียวกับ  $U(z)$

$$P^2(z) - z^{-N} D(z^{-1}) D(z) = U(z) = \sum_{n=0}^{2N} u_n z^{-n} \quad (2.67)$$

เราสามารถเขียนสมการที่ (2.61) ได้ใหม่ว่า

$$Q^2(z) = \sum_{n=0}^{2N} u_n z^{-n} \quad (2.68)$$

สามารถแสดงการทำสมการข้างบนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $q_k$  ของ  $Q(z)$  ได้

$$q_0 = \sqrt{u_0}, q_1 = \frac{u_1}{2q_0} \quad (2.69)$$

$$q_k = -q_{N-k} = \frac{u_k - \sum_{l=1}^{k-1} q_l q_{N-l}}{2q_0}, k \geq 2 \quad (2.70)$$

เราสามารถใช้คุณลักษณะของตัวสัมประสิทธิ์ที่ไม่สมมาตรหลังจากได้ทำการกำหนดค่า  $Q(z)$  ซึ่งเราได้มาจากพหุนาม  $[P(z) + Q(z)]$  ค่าซีโร  $Z = \xi_k$  และกำหนดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสทั้ง 2 จากสมการที่ (2.63) และ (2.64)

สามารถหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดิจิทัลแบบไอโออาร์ ได้จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน อนาล็อกบัตเตอร์เวิร์ธ, เชบีเชฟ, เอลลิปติก โดยใช้วิธีการแปลงเชิงเส้นคู่ (bilinear transform) ยิ่งไปกว่านั้น สำหรับคู่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและ ความถี่สูงผ่าน สมการฟังก์ชันถ่ายโอน อันดับที่  $N$  ต้องเป็นเลข คี่อันดับของ  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  ต้องต่างกัน 1 ในกรณีของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดิจิทัลบัตเตอร์เวิร์ธ, เชบีเชฟ, เอลลิปติก ความถี่ต่ำผ่านและสูงผ่าน อันดับคี่ มีวิธีการที่จะระบุโพลของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ออลพาส  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  โดยจากโพล  $\lambda_k, 0 \leq k \leq N-1$  ของแหล่งกำเนิดสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ความถี่ต่ำผ่าน  $G(z)$  หรือ  $H(z)$  กำหนดให้  $\theta_k$  เป็นค่ามุมของโพล  $\lambda_k$  ถ้าเราสมมุติโพลเป็น จำนวนซึ่ง  $\theta_k < \theta_{k+1}$  แล้วโพลของ  $A_0(z)$  ให้  $\lambda_{2k}$  และโพลของ  $A_1(z)$  ให้  $\lambda_{2k+1}$  โดยรูปที่ 2.21 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงถึงคุณลักษณะของการรวม โพลเข้าด้วยกัน (pole interlacing property) ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ออลพาสทั้ง 2

**ตัวอย่าง** พิจารณาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเชิงเลขบิตเตอร์วีร์ชนิคกรองความถี่ต่ำผ่าน อันดับที่ 7

$$G(z) = \frac{0.000963(1 + 7z^{-1} + 21z^{-2} + 35z^{-3} + 345z^{-4} + 21z^{-5} + 7z^{-6} + z^{-7})}{1 - 2.7825z^{-1} + 3.9668z^{-2} - 3.4051z^{-3} + 1.8757z^{-4} - 0.6509z^{-5} + 0.1308z^{-6} - 0.0116z^{-7}} \quad (2.71)$$

โดยโพลทั้ง 7 ตำแหน่งมีค่าดังต่อไปนี้ (จำนวนขึ้นอยู่กับกรเพิ่มมุม)

$$\begin{aligned} \xi_0 &= 0.4981133 - j0.668405, & \xi_1 &= 0.3907071 - j0.42044395, \\ \xi_2 &= 0.3399766 - j0.2030305, & \xi_3 &= 0.3249196962391, \\ \xi_4 &= 0.33997766 + j0.203035, & \xi_5 &= 0.3907071 - j0.4204395, \\ \xi_6 &= 0.4981133 + j0.668405, \end{aligned}$$

ผลตอบสนอง Z-plane pole-plot แสดงในรูปที่ 2.22 สร้างโดยใช้คุณสมบัตโพลที่สัมพันธ์กัน เราสามารถ ระบุ 2 สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส ดังเช่น

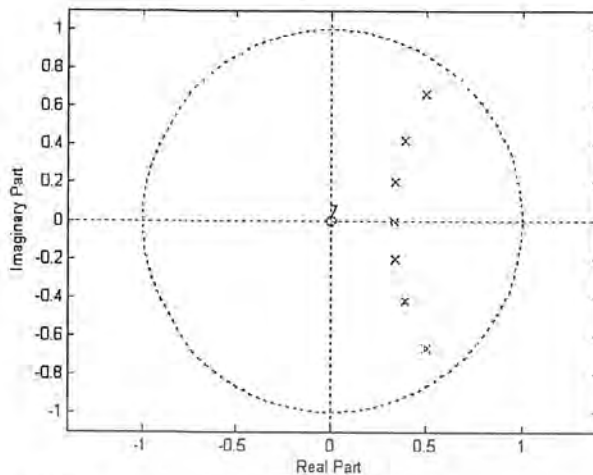
$$\begin{aligned} A_0(z) &= \frac{(z^{-1} - \xi_0)(z^{-1} - \xi_2)(z^{-1} - \xi_4)(z^{-1} - \xi_6)}{(1 - \xi_0 z^{-1})(1 - \xi_2 z^{-1})(1 - \xi_4 z^{-1})(1 - \xi_6 z^{-1})} \\ &= \frac{(0.69488 - 0.99623z^{-1} + z^{-2})(0.15681 - 0.67995z^{-1} + z^{-2})}{(1 - 0.99623z^{-1} + 0.694488z^{-2})(1 - 0.67995z^{-1} + 0.15681z^{-2})} \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} A_0(z) &= \frac{(z^{-1} - \xi_1)(z^{-1} - \xi_3)(z^{-1} - \xi_5)}{(1 - \xi_1 z^{-1})(1 - \xi_3 z^{-1})(1 - \xi_5 z^{-1})} \\ &= \frac{(-0.32492 + 1z^{-1})(0.32942 - 0.781414z^{-1} + z^{-2})}{(1 - 0.3492z^{-1})(1 - 0.781414z^{-1} + 0.32942z^{-2})} \end{aligned} \quad (2.73)$$

สามารถพิสูจน์ได้โดยการแทน 2 สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสข้างบนในสมการที่ (2.51) ทำให้ได้ สมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  ตามสมการที่ (2.71) ในส่วนที่เพิ่มเข้าไปใช้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนใน สมการที่ (2.52) เราจะนำเอาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเพาเวอร์-คอมพลีเมนทารี (power-complementary) ของความถี่สูงผ่าน  $H(z)$  ที่ได้มาใช้

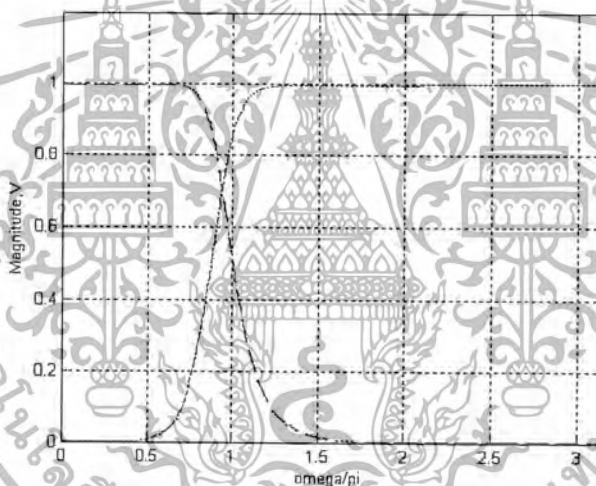
$$H(z) = \frac{0.108(1 - 7z^{-1} + 21z^{-2} - 35z^{-4} - 21z^{-5} + 7z^{-6} - z^{-7})}{1 - 2.7825z^{-1} + 3.9668z^{-2} - 3.4051z^{-3} + 1.8757z^{-4} - 0.6509z^{-5} + 1.308z^{-6} - 0.0116z^{-7}} \quad (2.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งความสัมพันธ์ของ โพลทั้ง 7 ตำแหน่ง

ส่วนค่าผลตอบสนองทางขนาดของ  $G(z)$  ในสมการที่ (2.71) และ  $H(z)$  ในสมการที่ (2.74) จะแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของ  $G(z)$  และ  $H(z)$

โครงสร้างแบบขนานของออลพาสมิคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมิอันดับที่  $M$  สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงโดยใช้จำนวนตัวคูณเพียง  $M$  ตัว ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานจริงของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมิแบบโอไออาร์  $G(z)$  อันดับที่  $N$  มาจากการแยกออลพาสมิของสมการที่ (2.71) ซึ่งต้องการตัวคูณ  $r + (N - r) = N$  ตัวในกรณีอื่นๆทั่วไป การนำไปประยุกต์ใช้งานโครงสร้างตรงของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมิแบบโอไออาร์ อันดับที่  $N$  ใช้ตัวคูณ  $2N + 1$  ตัว นอกจากนั้นตัวบวกที่เพิ่มเข้าไปและปราศจากการเพิ่มตัวคูณ มันสามารถนำไปใช้งาน สมการฟังก์ชันถ่ายโอนเพาเวอร์-คอมพลีเมนทารี (power-complementary)  $H(z)$  อันดับที่  $N$  ได้ง่ายเหมือนกับที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสมิแบบโอไออาร์ที่มีโครงสร้างแบบขนานไปใช้งานจริงสำหรับข้อดีของการนำโครงสร้างแบบขนานของออลพาสมิไปใช้นั้นคือ จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในย่านแถบความถี่ผ่านต่ำมาก ซึ่งมีผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ของตัวคูณและ

**โครงสร้างแบบขนานของออลพาสมิจะมีความสูญเสียต่ำ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.7 วิธีการปรับค่าความถี่คัทออฟด้วยวิธีสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (Spectral Transformation)

ในการปฏิบัติงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลส่วนมาก มักมีความจำเป็นที่ต้องทำการเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของตัวกรองความถี่ เมื่อต้องการสเปคซิฟิเคชัน (specification) ใหม่ เพื่อเป็นการลดความยุ่งยากลงเราจึงใช้วิธีการแปลงสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) ซึ่งสามารถเปลี่ยนตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{old}(z)$  ไปเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{new}(z)$  ด้วยวิธีสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) นี้สามารถใช้ได้กับ ความถี่ต่ำผ่าน, ความถี่สูงผ่าน, ความถี่ผ่าน, ความถี่ตัด แต่การที่จะแปลงเป็น ความถี่สูงผ่าน, ความถี่ผ่าน, ความถี่ตัด นั้นจะต้องเริ่มต้นแปลงจาก ความถี่ต่ำผ่าน เสมอ

เพื่อต้องการที่จะกำจัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $z$  ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{old}(z)$  และสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ต้องการ  $G_{new}(z)$  เราจะต้องกำหนดตัวสัญลักษณ์ให้มีความแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ใช้  $z^{-1}$  เป็นยูนิทิลิตี้ในตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{old}(z)$  และให้  $\hat{z}^{-1}$  เป็นยูนิทิลิตี้ในตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{new}(\hat{z})$  ในระนาบ  $z$  และระนาบ  $\hat{z}$  ภายในวงกลมหนึ่งหน่วย สามารถอธิบายได้โดย

$$z = e^{j\omega}, \quad \hat{z} = e^{j\hat{\omega}}$$

เราสามารถทำการแปลงให้โดเมน  $z$  ไปเป็นโดเมน  $\hat{z}$  ได้โดย

$$\hat{z} = F(z) \quad (2.75)$$

ดังนั้น  $G_{old}(z)$  แปลงเป็น  $G_{new}(\hat{z})$  ได้

$$\hat{G}_{new}(\hat{z}) = G_{old}\{F(\hat{z})\} \quad (2.76)$$

ในการที่จะรับรองความเสถียรของ  $G_{new}(\hat{z})$  นั้นระนาบ  $z$  จะต้องถูกส่งไปยังระนาบ  $\hat{z}$  โดยในระนาบ  $z$  ต้องมีคุณสมบัติดังนี้ จุดที่อยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยจะแสดงว่า  $|z| = 1$  จุดที่อยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วยจะแสดงว่า  $|z| < 1$  เพราะฉะนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ว่า

$$|F(\hat{z})| \begin{cases} > 1 \text{ ถ้า } |z| > 1 \\ = 1 \text{ ถ้า } |z| = 1 \\ < 1 \text{ ถ้า } |z| < 1 \end{cases} \quad (2.77)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.36) และ (2.77) ต้องทำให้เป็น  $1/F(\hat{z})$  เพื่อให้เป็นฟังก์ชันออลพาสที่เสถียร จากสมการที่ (2.32) ทำให้สามารถเขียน  $F(\hat{z})$  ด้วยสัมประสิทธิ์จำนวนจริง ได้ว่า

$$F(\hat{z}) = \pm \prod_{i=1}^L \left( \frac{z - \alpha_i}{1 - \alpha_i^* z} \right) \quad (2.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\alpha_1$  แสดงค่าได้ทั้งจำนวนจริงหรือจำนวนเชิงซ้อนที่เป็นคอนจูเกตกัน โดย  $|\alpha_1| < 1$  ถึงจะเสถียร

การแปลง ความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็น ความถี่ต่ำผ่าน

เราสามารถแปลงตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{old}(z)$  ที่มีค่าความถี่คัทออฟ  $\omega_c$  ไปเป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_{new}(\hat{z})$  ที่มีค่าความถี่คัทออฟ  $\hat{\omega}_c$  ได้ดังนี้

$$\hat{z}^{-1} = F^{-1}(\hat{z}) = \frac{1 - \alpha \hat{z}}{\hat{z} - \alpha} \quad (2.79)$$

สามารถแปลงสมการที่ (2.79) เทียบบนวงกลมหนึ่งหน่วยสามารถสรุปได้เป็น

$$e^{-j\omega} = \frac{e^{-j\omega} - \alpha}{1 - \alpha e^{-j\omega}} \quad ; \text{กำหนดให้ } \alpha \text{ เป็นจำนวนจริง}$$

สามารถเปลี่ยนรูปได้

$$\tan\left(\frac{\omega}{2}\right) = \left(\frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}\right) \tan\left(\frac{\hat{\omega}}{2}\right) \quad (2.80)$$

เราสามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่คัทออฟ  $\omega_c$  ของ  $G_{old}(z)$  และค่าความถี่คัทออฟ  $\hat{\omega}_c$  ของ  $G_{new}(z)$  เทียบกับสมการที่ (2.80) ได้ดังนี้

$$\tan\left(\frac{\omega_c}{2}\right) = \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}\right) \tan\left(\frac{\hat{\omega}_c}{2}\right) \quad (2.81)$$

นำสมการที่ (2.81) มาทำการหาค่า  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\tan\left(\frac{\omega_c}{2}\right) - \tan\left(\frac{\hat{\omega}_c}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\omega_c}{2}\right) + \tan\left(\frac{\hat{\omega}_c}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\omega_c - \hat{\omega}_c}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_c + \hat{\omega}_c}{2}\right)} \quad (2.82)$$

**ตัวอย่าง** กำหนดตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน อันดับที่ 1 มีสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนี้

$$G(z) = \frac{0.4208 + 0.4208z^{-1}}{1 - 0.1584z^{-1}} \quad \text{มีค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz ต้องการเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟเป็น 2.5 kHz}$$

kHz

ทำการหาค่า  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.4\pi - 0.5\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.4\pi + 0.5\pi}{2}\right)} = -0.1587$$

ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าความถี่คัทออฟ 2.5 kHz คือ

$$G_{new}(\hat{z}) = G(z) \Big|_{z^{-1} = \frac{\hat{z}^{-1} + 0.1587}{1 + 0.1587\hat{z}^{-1}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.49816 + 0.49816z^{-1}}{1 - 0.00368z^{-1}} \quad (2.83)$$

นอกจากนี้ยังทำการแปลง ความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็น ความถี่สูงผ่าน, ความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็น ความถี่ผ่าน, ความถี่ต่ำผ่าน ไปเป็น ความถี่ตัด ได้โดยใช้ตารางการแปลงสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) ดังนี้

ตาราง 2.3 การแปลงสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (Spectral Transformation)

| Filter type | Spectral transformation   | Design parameter  |
|-------------|---|---|
| Lowpass     | $z^{-1} = \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}$  | $\alpha = \frac{\sin\left(\frac{\hat{\omega}_c - \hat{\omega}_c}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\hat{\omega}_c + \hat{\omega}_c}{2}\right)}$ <p><math>\hat{\omega}_c</math> : ค่าความถี่คัทออฟที่ต้องการ</p>  |
| Highpass    | $z^{-1} = \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}$  | $\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_c + \hat{\omega}_c}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_c - \hat{\omega}_c}{2}\right)}$ <p><math>\hat{\omega}_c</math> : ค่าความถี่คัทออฟที่ต้องการ</p>  |
| Bandpass    | $z^{-1} = \frac{z^{-2} - \frac{2\alpha\beta}{\beta+1}z^{-1} + \frac{\beta-1}{\beta+1}}{\frac{\beta-1}{\beta+1}z^{-2} - \frac{2\alpha\beta}{\beta+1}z^{-1} + 1}$ | $\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} + \hat{\omega}_{c1}}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} - \hat{\omega}_{c1}}{2}\right)}$ $\beta = \cot\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} - \hat{\omega}_{c1}}{2}\right) \tan\left(\frac{\hat{\omega}_c}{2}\right)$ <p><math>\hat{\omega}_{c2}, \hat{\omega}_{c1}</math> : ค่าความถี่คัทออฟพาซันและขาลงที่ต้องการ</p> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|          |  |  |
|----------|--|--|
| Bandstop | $z^{-1} = \frac{z^{-2} - \frac{2\alpha}{1+\beta} z^{-1} + \frac{1-\beta}{1+\beta}}{\frac{1-\beta}{1+\beta} z^{-2} - \frac{2\alpha}{1+\beta} z^{-1} + 1}$ | $\alpha = \frac{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} + \hat{\omega}_{c1}}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} - \hat{\omega}_{c1}}{2}\right)}$ $\beta = \cot\left(\frac{\hat{\omega}_{c2} - \hat{\omega}_{c1}}{2}\right) \tan\left(\frac{\hat{\omega}_c}{2}\right)$ <p><math>\hat{\omega}_{c2}, \hat{\omega}_{c1}</math> : ค่าความถี่คัทออฟขาขึ้นและขาลงที่ต้องการ</p> |
|----------|--|--|

#### 2.4 หลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์ (Tunable IIR Digital Filters)

พื้นฐานของกรออกแบบตัวกรองปรับค่าได้คือ วิธีการแปลงสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) ด้วยวิธีการแปลงนี้สามารถทำให้ตัวกรองทำการปรับค่าได้ ดังนั้นถ้าเรากำหนดให้  $G_{old}(z)$  คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนต้นแบบและเรายังกำหนดให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการออกแบบคือ  $G_{new}(z)$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้

$$G_{new}(z) = G_{old}(z) \Big|_{z^{-1} = F^{-1}(z)} \quad (2.84)$$

ใน ส่วน  $F^{-1}(z)$  เป็นฟังก์ชันออลพาสที่ได้มาจากตารางสเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน (spectral transformation) ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรที่ใช้ในการแปลงและตัวแปรที่ใช้ทำการปรับค่า เมื่อทำการแปลงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนต้นแบบเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการออกแบบเรียบร้อยแล้ว จะเห็นได้ว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการออกแบบ  $G_{new}(z)$  ไม่สามารถนำไปใช้งานได้เพราะโครงสร้างของมันเป็นแบบดีเลย์-ฟรีรูป เพื่อที่จะทำให้ตัวกรองปรับค่าได้สามารถนำไปใช้งานได้ นั่นต้องจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนต้นแบบ  $G_{old}(z)$  ให้อยู่รูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  ก่อนซึ่งอยู่ในรูปสมการ

$$G(z) = \frac{1}{2} [A_0(z) + A_1(z)] \quad (2.85)$$

โดย  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  เป็นตัวกรองออลพาสที่เสถียรให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  เป็นผลรวมจากการที่นำ  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  มาต่อขนานกันและเห็นได้ว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  นั้นเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เบาต์ดีเรียล (bounded real) ซึ่งสมการเสถียรที่มีความสมมาตรแต่เนื่องจากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน  $G(z)$  ข้างบนมีการจัดตัวของสมการเป็นแบบสมการฟังก์ชันถ่ายโอนเพาเวอร์-คอมพลีเมนทารี (power-complementary)  $H(z)$  ซึ่งสมการเสถียรที่ไม่สมมาตรทำให้เราสามารถออกแบบตัวกรองดิจิทัลได้อันดับที่เป็นจำนวนคี่เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโครงสร้างตัวกรองอลพาต  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  นั้นเราจะนำตัวกรองอลพาตอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 มาใช้เท่านั้น ถ้าตัวกรองอลพาต  $A_0(z)$  และ  $A_1(z)$  มีอันดับสูง เราจะทำตัวกรองอลพาตอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 มาต่อแคสเคด กัน โดยโครงสร้างตัวกรองอลพาตอันดับที่ 1 ต้องมีตัวดีเลย์ 1 ตัวและตัวคูณ 1 ตัว อันดับที่ 2 ต้องมีตัวดีเลย์ 2 ตัวและตัวคูณ 2 ตัว

ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองปรับค่าแบบไอโออาร์ มีดังนี้

ให้ทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำแบบไอโออาร์ ซึ่งสามารถทำการปรับค่าความถี่คutoff ได้ ให้เป็นโครงสร้างแบบขนาน โดยจะต้องใช้วิธีการแปลง สเปกตรัลทรานฟอร์มเมชัน มาช่วยโดยแปลง จากความถี่ต่ำผ่านไปเป็น ความถี่ต่ำผ่านซึ่งทำได้ดังนี้

$$z^{-1} = F^{-1}(z^{-1}) = \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (2.86)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ซึ่งใช้สำหรับเป็นตัวปรับค่าได้จาก

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{\hat{\omega}_c - \omega_c}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\hat{\omega}_c + \omega_c}{2}\right)} \quad (2.87)$$

กำหนดให้  $\omega_c$  เป็นค่าความถี่คutoff ตัวเดิมและ  $\hat{\omega}_c$  เป็นค่าความถี่คutoff ตัวใหม่ หลังจากนั้นให้ทำการแทนสมการที่ (2.86) ลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอลพาต อันดับที่ 1 ชนิด 1

$$a_1(z) = \frac{d_1 + z^{-1}}{1 + d_1 z^{-1}} \quad (2.88)$$

ซึ่งผลของการแทนค่าทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนอลพาต อันดับที่ 1 อันใหม่

$$\begin{aligned} \hat{a}_1(z) &= a_1(z) \Big|_{z^{-1} = \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}} = \frac{d_1 + \left(\frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}\right)}{1 + d_1 \left(\frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}}\right)} \\ &= \frac{(d_1 - \alpha) + (1 - \alpha d_1)z^{-1}}{(1 + \alpha d_1) + (d_1 - \alpha)z^{-1}} = \frac{\left(\frac{d_1 - \alpha}{1 - \alpha d_1}\right) + z^{-1}}{1 + \left(\frac{d_1 - \alpha}{1 - \alpha}\right)z^{-1}} \end{aligned} \quad (2.89)$$

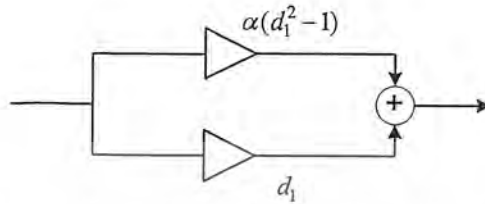
ถ้าค่า  $\alpha$  มีค่าน้อยมากสามารถใช้อนุกรมเทย์เลอร์ ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์  $(d_1 - \alpha)/(1 - \alpha d_1)$

ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอลพาตของ  $\hat{a}_1(z)$  ค่าประมาณออกมาใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{a}_1(z) \equiv \frac{[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]z^{-1}} \quad (2.90)$$

ให้ลองนำค่าสัมประสิทธิ์ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสของ  $\hat{a}_1(z)$  ที่ประมาณค่าออกมาใหม่นำไปแทนตัวคูณของโครงสร้างตัวกรองออกพาส อันดับที่ 1 ชนิด 1 โดยในรูปที่ 2.24 จะเห็นได้ว่ามีตัวคูณ 2 ตัวต่อขนานกันอยู่



รูปที่ 2.24 แสดงตัวคูณที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ในตัวกรองออกพาสอันดับ 1 ชนิด 1

ถ้าทำการแทนสมการที่ (2.86) ลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส อันดับที่ 2 ชนิด 3

$$a_2(z) = \frac{d_2 + d_1 z^{-1} + z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \quad (2.91)$$

ซึ่งผลของการแทนค่าทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส อันดับที่ 2 ใหม่

$$\hat{a}_2(z) = a_2(z) \Big|_{z^{-1} = (z^{-1} - \alpha)/(1 - \alpha z^{-1})} = \frac{d_2 + d_1 + \left( \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \right) + \left( \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \right)^2}{1 + d_1 \left( \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \right) + d_2 \left( \frac{z^{-1} - \alpha}{1 - \alpha z^{-1}} \right)^2} \quad (2.92)$$

ถ้าค่า  $\alpha$  มีค่าน้อยมากสามารถตัดค่า  $\alpha$  ทิ้งถ้าอยู่ในรูป  $\alpha^2$

$$\begin{aligned} \hat{a}_2(z) &\equiv \frac{(d_2 - \alpha d_1) + (d_1 - 2\alpha[1 + d_2])z^{-1} + (1 + \alpha d_1)z^{-2}}{(1 - \alpha d_1) + (d_1 + 2\alpha[1 + d_2])z^{-1} + (d_2 - \alpha d_1)z^{-2}} \\ &\equiv \frac{\left( \frac{d_2 - \alpha d_1}{1 - \alpha d_1} \right) + \left( \frac{d_1 - 2\alpha[1 + d_2]}{1 - \alpha d_1} \right) z^{-1} + z^{-2}}{1 + \left( \frac{d_1 - 2\alpha[1 + d_2]}{1 - \alpha d_1} \right) z^{-1} + \left( \frac{d_2 - \alpha d_1}{1 - \alpha d_1} \right) z^{-2}} \end{aligned} \quad (2.93)$$

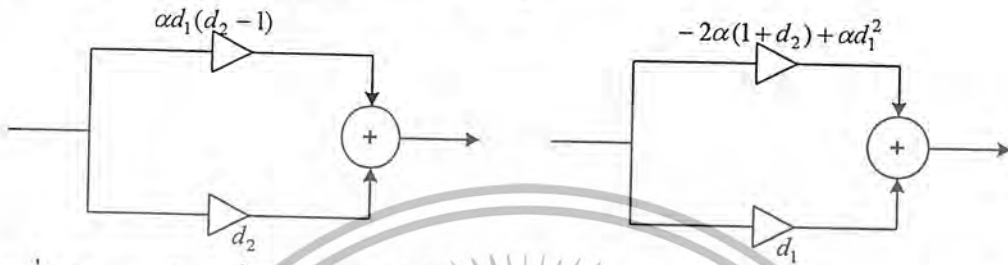
ต่อจากนั้นให้ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์  $(d_2 - \alpha d_1 / 1 - \alpha d_1)$  และ

$(d_1 - 2\alpha[1 + d_2] / 1 - \alpha d_1)$  ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาสของ  $\hat{a}_2(z)$  ได้ค่าประมาณออกมาใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{a}_2(z) \equiv \frac{[d_2 + \alpha d_1(d_2 - 1)] + [d_1 - 2\alpha(1 + d_2) + \alpha d_1^2]z^{-1} + z^{-2}}{1 + [d_1 - 2\alpha(1 + d_2) + \alpha d_1^2]z^{-1} + [d_2 + \alpha d_1(d_2 - 1)]z^{-2}} \quad (2.94)$$

แล้วให้ลองนำค่าสัมประสิทธิ์ในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออกพาส ของ  $\hat{a}_2(z)$  ที่ประมาณค่าออกมาใหม่ นำไปแทนในตัวคูณ  $d_2$  และ  $d_1$  ตามลำดับ ของโครงสร้างตัวกรองออกพาส อันดับที่ 2 ชนิด 3 โดยในรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่ามีตัวคูณ 2 ตัวต่อขนานกันอยู่



รูปที่ 2.25 แสดงตัวคูณที่ได้จากการประมาณค่าโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ในตัวกรองออกพาส อันดับที่ 2 ชนิด 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์ (FIR)

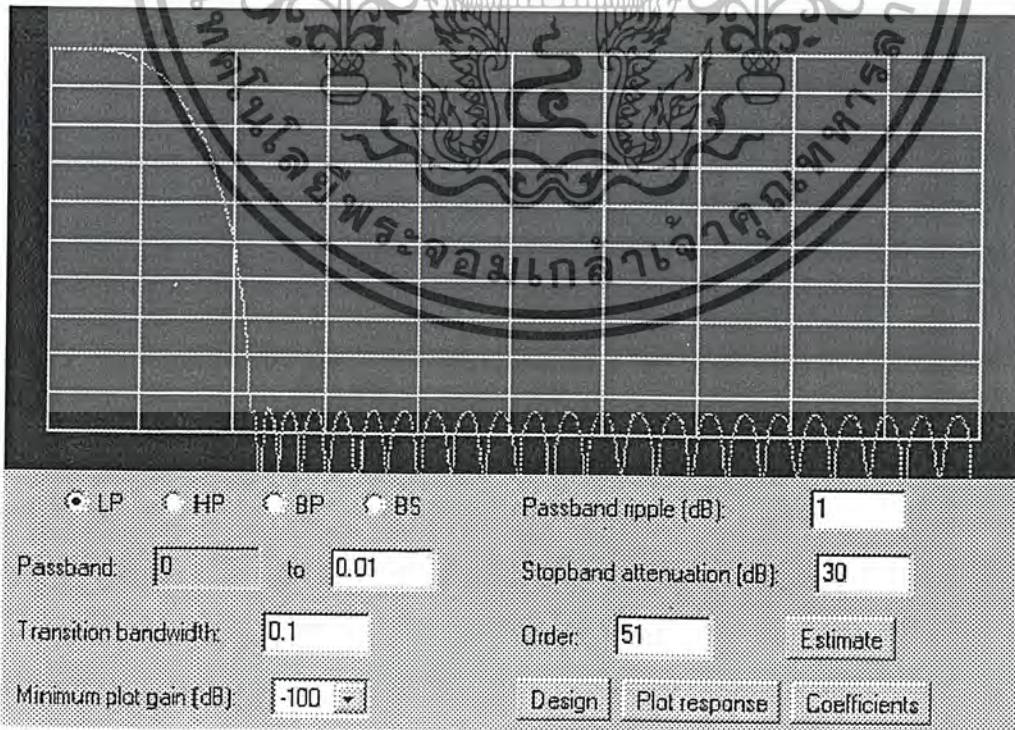
พื้นฐานของการออกแบบตัวกรองแบบเอฟไออาร์คือ เราใช้คำสั่ง REMEZ โดยคำสั่งนี้จะอ้างอิงอัลกอริทึมของ Park-McClellan ในการสร้างตัวกรองแบบเอฟไออาร์ต้นแบบในโปรแกรมแมทแลบ โดยหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเอฟไออาร์โดยการใช้อัลกอริทึมของ Park-McClellan โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.5.1 การออกแบบตัวกรองเอฟไออาร์โดยใช้อัลกอริทึมของ Park-McClellan

ในการดำเนินการออกแบบตัวกรองเอฟไออาร์ (บางครั้ง ต้องอ้างอิงถึง Remez exchange อัลกอริทึม) หลักการออกแบบนี้ยอมให้ผลตอบสนองความถี่ที่ระบุไว้เป็นจำนวนใดๆก็ได้ในส่วนของแถบผ่านแถบหยุด ในแต่ละชนิด สามารถกำหนด ค่าความถี่ที่ยอมรับได้ เพื่อความไม่สลับซับซ้อน โดยวิธีนี้จำกัดชนิดของตัวกรอง 4 ชนิด คือ

1. ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน
2. ตัวกรองความถี่สูงผ่าน
3. ตัวกรองความถี่ผ่าน
4. ตัวกรองความถี่หยุด

วิธีนี้แตกต่างจากวิธีการออกแบบตัวกรองตัวอื่นๆ โดยการนอร์มอลไลซ์ความถี่ การจำกัด แถบความถี่สูง สอดคล้อง หรือ ความถี่ ในควิสต์ ดังนั้น 0.5 หรือ มากกว่า 0.5 ก็ับการเบงกึ่งกลาง ได้ หรือเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาด การใช้ นอร์มอลไลซ์ความถี่มีข้อได้เปรียบ วิธีนี้ไม่ขึ้นกับ ความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.26 แสดงโปรแกรมประมาณค่าอันดับของตัวกรองแบบเอฟไออาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. ชนิดของตัวกรอง

เลือกเจาะจงชนิดตัวกรองเช่น ตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่าน ,ตัวกรองแถบความถี่สูงผ่าน , ตัวกรองแถบความถี่ผ่าน,ตัวกรองแถบความถี่หยุด

### 2. แถบผ่าน

ใส่ค่าความถี่แถบผ่าน ที่จะนอร์มอไลซ์โดย สำหรับตัวกรอง ความถี่ต่ำผ่าน จะถูกตั้งไว้โดยอัตราโนมิต ที่ 0 สำหรับตัวกรองความถี่สูงผ่าน จะถูกตั้งไว้ที่ 0.5

### 3. ความกว้างของแถบเปลี่ยน

ใส่ค่าความกว้างของแถบเปลี่ยน ที่จะนอร์มอไลซ์ความถี่ (อยู่ในช่วง 0 – 0.5) ในกรณี ของ แถบความถี่ผ่าน , แถบความถี่หยุด โดยความกว้าง ของแถบเปลี่ยน จะเท่ากันทั้งสองข้างของแถบเปลี่ยน

### 4. ค่าความพลิวของแถบผ่าน

ใส่ ความพลิว ของแถบผ่าน ที่พอร์รับได้ ในหน่วย เดซิเบล โดยค่าแปรผันนี้ จะถูกยอมให้ อัตราขยาย ของตัวกรอง มากกว่าหรือ น้อยกว่า ซึ่งเป็น ค่าอัตราขยาย ของตัวกรองในอุดมคติ

ค่าความพลิว เดซิเบล จะสอดคล้อง กับ การเปลี่ยนแปลง อัตราขยายแถบผ่าน ระหว่าง  $1 + \delta$  และ

$$1 - \delta \text{ โดยค่า } \delta = 1 - 10^{-r/20}$$

### 5. การลดทอน ของ stopband

ใส่ ค่า การลดทอน ที่น้อยที่สุด ที่พอร์รับได้ (อัตราขยายที่มากที่สุดที่พอร์รับได้) ในแถบหยุดในหน่วยเดซิเบล การลดทอน  $A$  เดซิเบล จะสอดคล้อง กับ อัตราขยาย ของตัวกรอง  $10^{-A/20}$  ในแถบหยุด

### 6. อันดับ

- ใส่ค่า อันดับที่ต้องการ และกด enter จากนั้นกดปุ่ม estimate เพื่อ ประเมินค่า อันดับที่ได้ออกแบบไว้ (ค่าอันดับที่ประมาณ ไว้ (ใช้สูตร ของ Kaiser) ต้องต่ำ กว่าค่าอันดับ ที่ต้องการ ในการออกแบบ)

- ถ้าตัวกรองที่ออกแบบไว้ได้ตั้งค่าความถี่ต่างๆไว้แล้วกดปุ่ม Design เพื่อออกแบบตัวกรอง

- กดปุ่ม Plot response เพื่อแสดงค่าอัตราขยายผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรอง สเกลของความถี่จะอยู่ในช่วง 0 – 0.5 ของความถี่ที่จะนอร์มอไลซ์ อัตราขยายอยู่บน Log สเกล โดยค่า 0 dB อยู่บนสุด เลือก Minimum plot gain กำหนดค่าอัตราขยาย (ในหน่วย dB) ที่ด้านล่างของการพล็อตเปลี่ยนค่าที่ตั้งไว้เพื่อดูผลตอบสนองความถี่ในระดับที่แตกต่าง

ตั้งที่กล่าวมาข้างต้นการ ประมาณค่าอันดับต้องมีค่าน้อย และจากนั้นจึงมารวมกับรายละเอียดของตัวกรองที่ออกแบบไว้

- กดปุ่ม Coefficient เพื่อแสดงสัมประสิทธิ์ตัวกรอง และสามารถคัดลอกและวางใน Text editor ได้ถ้าต้องการ

ข้อดีของการใช้โปรแกรมนี้ คือ สามารถรู้อันดับของตัวกรองชนิดเอพไออาร์ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขต่างๆที่เรากำหนด เช่น แถบผ่าน,ความกว้างของแถบเปลี่ยน,ความพลิวของแถบผ่าน,การลดทอนของแถบหยุด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 หลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์ (Tunable FIR Digital Filters)

บ่อยครั้งในทางปฏิบัติเกิดความจำเป็นในการแปลง ลักษณะ หรือ คุณสมบัติของตัวกรองให้เปลี่ยนไปเป็นตัวกรองที่มีลักษณะ หรือคุณสมบัติแตกต่าง จากเดิมเพื่อลดเวลาหรือหลีกเลี่ยงกระบวนการออกแบบซ้ำอย่างเช่น เมื่อเรามีตัวกรองชนิดความถี่ต่ำผ่านที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้วโดยความถี่คutoff อยู่ที่ 2 kHz ก็เป็นไปได้ที่เราสามารถเลื่อนความถี่คutoff ไปยังตำแหน่งอื่น เช่นอาจย้ายไปยังความถี่ 2.1 kHz โดยตัวกรองยังคงคุณสมบัติประการอื่นๆของตัวกรอง ตามแนวความคิดตามหลักการดังกล่าวเราสามารถนำมาประยุกต์กับตัวกรองเอฟไออาร์เพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวกรองเพื่อการปรับแต่งคุณสมบัติของตัวกรองในที่นี้จะเสนอกระบวนการ โดยตรงในการออกแบบลิเนียร์เฟสแบบเอฟไออาร์ ที่ปรับค่าความถี่คutoff ได้โดยจะขอนำเสนอตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและความถี่สูงผ่าน

ขั้นตอนพื้นฐานเริ่มแรกในการออกแบบ คือ การนำผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองชนิดที่เราต้องการออกแบบมาทำการแปลง IDTFT จากนั้นเราจะได้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองจากนั้นจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมของค่าคงที่ แล้วแก้สมการเพื่อหาคำตอบในรูปของผลตอบสนองเชิงความถี่ค่าใหม่ที่มีตัวแปร  $\omega_c$  (หรือค่าพารามิเตอร์ ความถี่คutoff ใหม่ที่ทำการปรับ) เราสามารถที่จะเชื่อได้ว่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนค่าใหม่ (หมายถึงค่าหลังจากที่ได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ ความถี่คutoff ค่าใหม่แล้ว) จะยังคงคุณสมบัติอื่นๆของตัวกรองเอาไว้มีเพียง ค่าความถี่คutoff เท่านั้น ที่เปลี่ยนไปโดยทดลองให้เห็นจริงจากการจำลองการทำงานในโปรแกรมแมทแล็บ ก่อน

ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์ มีดังนี้  
ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นดังนี้

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & , \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (2.95)$$

ตามสมการที่ (2.95) โดยใช้การแปลง IDTFT กระทำกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองจะได้สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองเป็นดังนี้

$$h_d[n] = \frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}, \quad 0 \leq |n| < \infty \quad (2.96)$$

และจัดรูปให้แสดงอยู่ในเทอมที่มีค่าคงที่คูณอยู่

$$h_{LP}[n] = \begin{cases} c[n]\omega_c & , n = 0 \\ c[n]\sin(\omega_c n) & , 1 \leq |n| \leq N \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (2.97)$$

ในสถานะที่ความถี่คutoff ของระบบหรือบริเวณที่ขนาดของสัญญาณมีขนาดลดลงประมาณ 0.5 หรือประมาณครึ่งหนึ่งของแถบเปลี่ยน

$$c[n] = \begin{cases} 1/\pi & , n = 0 \\ 1/\pi n & , 1 \leq |n| \leq N \end{cases} \quad (2.98)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามกระบวนการข้างต้น นี้จะได้ตัวกรองชนิดความถี่ต่ำผ่าน โดยมีความถี่คัทออฟ ซึ่งสามารถถูกปรับได้ โดยการเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟ จากนั้นจึงทำการคำนวณสัมประสิทธิ์ตามกระบวนการที่อธิบายและจากสมการที่ (2.96) สามารถใช้ในการออกแบบตัวกรองชนิดความถี่ต่ำผ่านแบบปรับค่าได้ โดยจัดรูปให้อยู่เท่ากับตัวสัมประสิทธิ์ของตัวกรองต้นแบบ และหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแบบเอพไออาร์ ตามที่ออกแบบไว้จากนั้นทำการหาคำตอบของตัวสัมประสิทธิ์ โดยจัดรูปของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นจะได้ว่า

$$c[n] = \frac{h_{LP}[0]}{\omega_c} \quad (2.99)$$

$$c[n] = \frac{h_{LP}[n]}{\sin(\omega_c n)}, \quad 1 \leq |n| \leq N \quad (2.100)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์จากการจัดรูปจะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ด้วยความถี่คัทออฟใหม่ดังนี้

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0] \sin(\hat{\omega}_c) = \left( \frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c} \right) h_{LP}[0], \quad (2.101)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n] \sin(\hat{\omega}_c n) = \left( \frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)} \right) h_{LP}[n], \quad 1 \leq |n| \leq N \quad (2.102)$$

ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองความถี่สูงผ่านปรับค่าได้แบบเอพไออาร์ มีดังนี้

ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองความถี่สูงผ่าน เป็นดังนี้

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq |\omega| \leq \omega_c \\ 1, & \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (2.103)$$

ตามสมการที่ (2.103) โดยใช้การแปลง IDTFT กระทำกับผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกรองจะได้สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองเป็นดังนี้

$$h_d[n] = -\frac{\sin(\omega_c n)}{\pi n}, \quad 0 \leq |n| < \infty \quad (2.104)$$

และจัดรูปให้แสดงอยู่ในเทอมที่มีค่าคงที่คูณอยู่

$$h_{HP}[n] = \begin{cases} 1 - c[n]\omega_c & , n = 0 \\ -c[n]\sin(\omega_c n) & , 1 \leq |n| < N \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (2.105)$$

ในสถานะที่ความถี่คัทออฟของระบบหรือบริเวณที่ขนาดของสัญญาณมีขนาดลดลงประมาณ 0.5 หรือประมาณครึ่งหนึ่งของแถบเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c[n] = \begin{cases} 1/\pi & , n = 0 \\ 1/\pi n & , 1 \leq |n| \leq N \end{cases} \quad (2.106)$$

ตามกระบวนการข้างต้น นี้จะได้ตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่าน โดยมีความถี่คัทออฟ ซึ่งสามารถถูกปรับได้ โดยการเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟ จากนั้นจึงทำการคำนวณสัมประสิทธิ์ตามกระบวนการที่อธิบายและจากสมการที่ (2.104) สามารถใช้ในการออกแบบตัวกรองชนิดความถี่สูงผ่านแบบปรับค่าได้ โดยจัดรูปให้อยู่เท่ากับตัวสัมประสิทธิ์ของตัวกรองต้นแบบ และหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแบบเอพไออาร์ ตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นทำการหาคำตอบของตัวสัมประสิทธิ์ โดยจัดรูปของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนั้นจะได้ว่า

$$c[0] = \frac{1 - h_{HP}[0]}{\omega_c} \quad (2.107)$$

$$c[n] = \frac{h_{HP}[n]}{\sin(\omega_c n)} \quad , 1 \leq |n| \leq N \quad (2.108)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์จากการจัดรูปจะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ด้วยความถี่คัทออฟใหม่ดังนี้

$$\hat{h}_{HP}[0] = 1 - c[0]\hat{\omega}_c = 1 - \left(\frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c}\right)(1 - h_{HP}[0]), \quad (2.109)$$

$$\hat{h}_{HP}[n] = -c[n]\sin(\hat{\omega}_c n) = \left(\frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)}\right)h_{HP}[n] \quad , 1 \leq |n| \leq N \quad (2.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การคำนวณและการสร้าง

ในบทนี้เราจะนำทฤษฎีและหลักการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์ (IIR) และแบบเอฟไออาร์ (FIR) ในบทที่แล้วนำมาสร้างใช้งานจริง โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ ช่วยในการออกแบบและจำลองการทำงาน ส่วนการสร้างจริงใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 ซึ่งมีวิธีการออกแบบดังต่อไปนี้

#### 3.1 การสร้างตัวกรองดิจิทัลปรับค่าได้ แบบไอโออาร์

##### 3.1.1 การสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1

เราจะนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $G_L(z) = \frac{0.41665 + 0.41665z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}}$  ที่มีความถี่คัทออฟ 2 kHz และค่าความถี่คัม 10.146 kHz มาทำการออกแบบให้เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่สามารถปรับความถี่คัทออฟเป็น 1.5 kHz, 1.75 kHz, 2.25 kHz

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ 1.5 kHz

เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$G_L(z) = \frac{0.41665 + 0.41665z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}}$$

ให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2.51) จะได้

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right] \quad (3.1)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 1.5 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi - 0.2956\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.2956\pi}{2}\right)} = 0.1755 \quad (3.2)$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ -0.1667 ในเทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่ออกมาคือ

$$\hat{a}_1(z) \cong \frac{[-0.1667 + 0.1755((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + 0.1755((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cong \frac{-0.33725 + z^{-1}}{1 - 0.33725z^{-1}} \quad (3.3)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz ออกมา

$$\begin{aligned} \hat{G}_L(z) &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.33725 + z^{-1}}{1 + 0.33725z^{-1}} \right] \\ &= \frac{0.33137 + 0.33137z^{-1}}{1 - 0.33725z^{-1}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ 1.75 kHz

เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$G_L(z) = \frac{0.41665 + 0.41665z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}}$  ให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2.51) จะได้

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right] \quad (3.5)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 1.75 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.3449\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.3449\pi}{2}\right)} = 0.0843 \quad (3.6)$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ -0.1667 ในทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่ออกมาคือ

$$\hat{a}_1(z) \cong \frac{[-0.1667 + 0.0843((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + 0.0843((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cong \frac{-0.2496 + z^{-1}}{1 - 0.2496z^{-1}} \quad (3.7)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คัทออฟ 1.75 kHz ออกมา

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.2496 + z^{-1}}{1 - 0.2496z^{-1}} \right] \\ = \frac{0.3752 + 0.3752z^{-1}}{1 - 0.2496z^{-1}} \quad (3.8)$$

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ 2.25 kHz เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$G_L(z) = \frac{0.41665 + 0.41665z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}}$  ให้อยู่ในรูปแบบคอมสมการที่ (2.51) จะได้

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right] \quad (3.9)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 2.25 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi - 0.4435\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.4435\pi}{2}\right)} = -0.0799 \quad (3.10)$$

ให้นำค่าสัมประสิทธิ์ -0.1667 ในเทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่ออกมาคือ

$$\hat{a}_1(z) \cong \frac{[-0.1667 + (-0.0799)((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + (-0.0799)((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}}$$

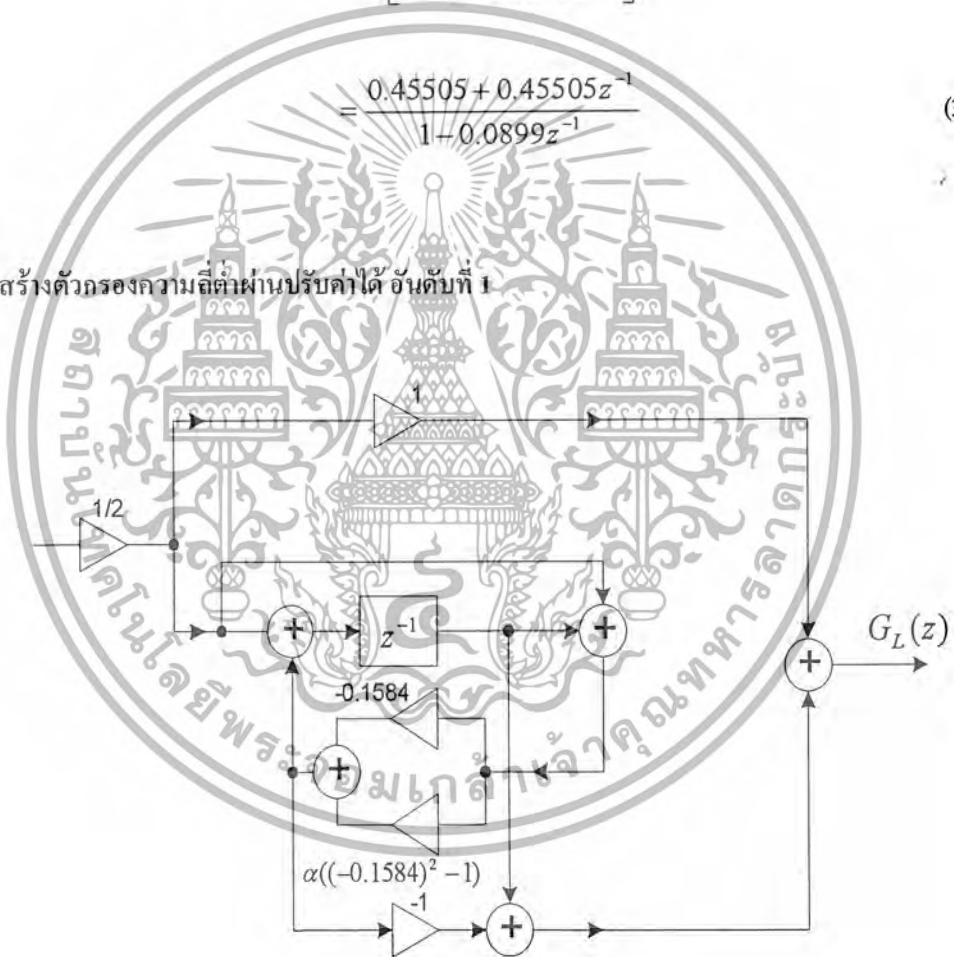
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\approx \frac{-0.0899 + z^{-1}}{1 - 0.0899z^{-1}} \quad (3.11)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คัทออฟ 2.25 kHz ออกมา

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{-0.0899 + z^{-1}}{1 - 0.0899z^{-1}} \right] \\ = \frac{0.45505 + 0.45505z^{-1}}{1 - 0.0899z^{-1}} \quad (3.12)$$

### 3.1.2 โครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 3

เราจะนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$G_L(z) = \frac{0.0982 + 0.2856z^{-1} + 0.2856z^{-2} + 0.0982z^{-3}}{1 - 0.6106z^{-1} + 0.4323z^{-2} - 0.06z^{-3}} \quad \text{ที่มีความถี่คัทออฟ 2 kHz และค่าความถี่สุ่ม}$$

10.146 kHz มาทำการออกแบบให้เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่สามารถปรับความถี่คัทออฟเป็น 1.5 kHz , 1.75kHz , 2.25 kHz

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ 1.5 kHz

เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$G_L(z) = \frac{0.0982 + 0.2856z^{-1} + 0.2856z^{-2} + 0.0982z^{-3}}{1 - 0.6106z^{-1} + 0.4323z^{-2} - 0.06z^{-3}} \quad \text{ให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2.51) จะได้}$$

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ \frac{0.358 - 0.4429z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.4429z^{-1} + 0.358z^{-2}} + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right] \quad (3.13)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 1.5 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi - 0.2956\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.2956\pi}{2}\right)} = 0.1755 \quad (3.14)$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ 0.358 และ -0.4429 ในทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 2 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_2 - \alpha d_1(d_2 - 1)]$  และ  $[d_1 - 2\alpha(1 + d_2) + \alpha d_1^2]$  ของสมการที่ (2.94) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 2 อันใหม่ออกมาคือ

$$\begin{aligned} \hat{a}_2(z) &\cong \frac{[0.358 + 0.1755(-0.4429)(0.358 - 1)] +}{1 + [-0.4429 - 2(0.1755)(1 + 0.358) + 0.1755(-0.4429)^2]z^{-1} +} \\ &\frac{[-0.4429 - 2(0.1755)(1 + 0.358) + 0.1755(-0.4429)^2]z^{-1} + z^{-2}}{[0.358 + 0.1755(-0.4429)(0.358 - 1)]z^{-2}} \\ &\cong \frac{0.4077 - 0.8826z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.8826z^{-1} + 0.4077z^{-2}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เราหาค่าสัมประสิทธิ์  $-0.1667$  ในเทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 อันใหม่ออกมาคือ

$$\begin{aligned}\hat{a}_1(z) &\cong \frac{[-0.1667 + 0.1755((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + 0.1755((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}} \\ &\cong \frac{0.33137 + 0.33137z^{-1}}{1 - 0.33725z^{-1}}\end{aligned}\quad (3.16)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คutoff 1.5 kHz ออกมา

$$\begin{aligned}\hat{G}_L(z) &= \frac{1}{2} \left[ \frac{0.4077 - 0.8826z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.8826z^{-1} + 0.4077z^{-2}} + \frac{-0.33725 + z^{-1}}{1 - 0.33725z^{-1}} \right] \\ &= \frac{0.0352 + 0.1387z^{-1} + 0.1387z^{-2} + 0.0352z^{-3}}{1 - 1.2198z^{-1} + 0.7054z^{-2} - 0.1375z^{-3}}\end{aligned}\quad (3.17)$$

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คutoff ใหม่ 1.75 kHz

เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$G_L(z) = \frac{0.0982 + 0.2856z^{-1} + 0.2856z^{-2} + 0.0982z^{-3}}{1 - 0.6106z^{-1} + 0.4323z^{-2} - 0.06z^{-3}} \quad \text{ให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2.51) จะได้}$$

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ \frac{0.358 - 0.4429z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.4429z^{-1} + 0.358z^{-2}} + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right]\quad (3.18)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 1.75 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi - 0.3449\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.3449\pi}{2}\right)} = 0.0843\quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ 0.358 และ -0.4429 ในทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 2 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_2 - \alpha d_1(d_2 - 1)]$  และ  $[d_1 - 2\alpha(1 + d_2) + \alpha d_1^2]$  ของสมการที่ (2.94) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 2 อันใหม่ออกมาคือ

$$\begin{aligned} \hat{a}_2(z) &\cong \frac{[0.358 + 0.0843(-0.4429)(0.358 - 1)] +}{1 + [-0.4429 - 2(0.0843)(1 + 0.358) + 0.1755(-0.4429)^2]z^{-1} +} \\ &\quad \frac{[-0.4429 - 2(0.0843)(1 + 0.358) + 0.0843(-0.4429)^2]z^{-1} + z^{-2}}{[0.358 + 0.0843(-0.4429)(0.358 - 1)]z^{-2}} \\ &\cong \frac{0.382 - 0.6654z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.6654z^{-1} + 0.382z^{-2}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ -0.1667 ในทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 2 อันใหม่ออกมาคือ

$$\begin{aligned} \hat{a}_1(z) &\cong \frac{[-0.1667 + 0.0843((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + 0.0843((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}} \\ &\cong \frac{-0.2496 + z^{-1}}{1 - 0.2496z^{-1}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คutoff 1.75 kHz ออกมา

$$\begin{aligned} \hat{G}_L(z) &= \frac{1}{2} \left[ \frac{0.382 - 0.6654z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.6654z^{-1} + 0.382z^{-2}} + \frac{-0.2496 + z^{-1}}{1 - 0.2496z^{-1}} \right] \\ &\cong \frac{0.0662 + 0.2026z^{-1} + 0.2026z^{-2} + 0.0662z^{-3}}{1 - 0.915z^{-1} + 0.548z^{-2} - 0.0953z^{-3}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ ให้มีค่าความถี่คutoff ใหม่ 2.25 kHz

เราจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

$$G_L(z) = \frac{0.0982 + 0.2856z^{-1} + 0.2856z^{-2} + 0.0982z^{-3}}{1 - 0.6106z^{-1} + 0.4323z^{-2} - 0.06z^{-3}} \quad \text{ให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2.51) จะได้}$$

$$G_L(z) = \frac{1}{2} \left[ \frac{0.358 - 0.4429z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.4429z^{-1} + 0.358z^{-2}} + \frac{-0.1667 + z^{-1}}{1 - 0.1667z^{-1}} \right] \quad (3.23)$$

ทำการหาค่า  $\alpha$  ที่ใช้ทำการปรับค่าความถี่ให้เป็น 2.25 kHz โดยใช้ตาราง 2.3 เข้าช่วย

$$\alpha = \frac{\sin\left(\frac{0.3942\pi - 0.4435\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{0.3942\pi + 0.4435\pi}{2}\right)} = -0.0799 \quad (3.24)$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ 0.358 และ -0.4429 ในเทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_2 - \alpha d_1(d_2 - 1)]$  และ  $[d_1 - 2\alpha(1 + d_2) + \alpha d_1^2]$  ของสมการที่ (2.94) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 อันใหม่ออกมาคือ

$$\begin{aligned} \hat{a}_2(z) &\equiv \frac{[0.358 + 0.0799(-0.4429)(0.358 - 1)] +}{1 + [-0.4429 - 2(0.0799)(1 + 0.358) + 0.1755(-0.4429)^2]z^{-1} +} \\ &\quad \frac{[-0.4429 - 2(-0.0799)(1 + 0.358) + (-0.0799)(-0.4429)^2]z^{-1} + z^{-2}}{[0.358 + (-0.0799)(-0.4429)(0.358 - 1)]z^{-2}} \\ &\equiv \frac{0.3353 - 0.2415z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.2415z^{-1} + 0.3353z^{-2}} \quad (3.25) \end{aligned}$$

ให้เรานำค่าสัมประสิทธิ์ -0.1667 ในเทอมสมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 และค่า  $\alpha$  ที่หาได้เข้าไปแทนในส่วน  $[d_1 + \alpha(d_1^2 - 1)]$  ของสมการที่ (2.90) มีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 1 อันใหม่ออกมาคือ

$$\hat{a}_1(z) \equiv \frac{[-0.1667 + (-0.0799)((-0.1667)^2 - 1)] + z^{-1}}{1 + [-0.1667 + (-0.0799)((-0.1667)^2 - 1)]z^{-1}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

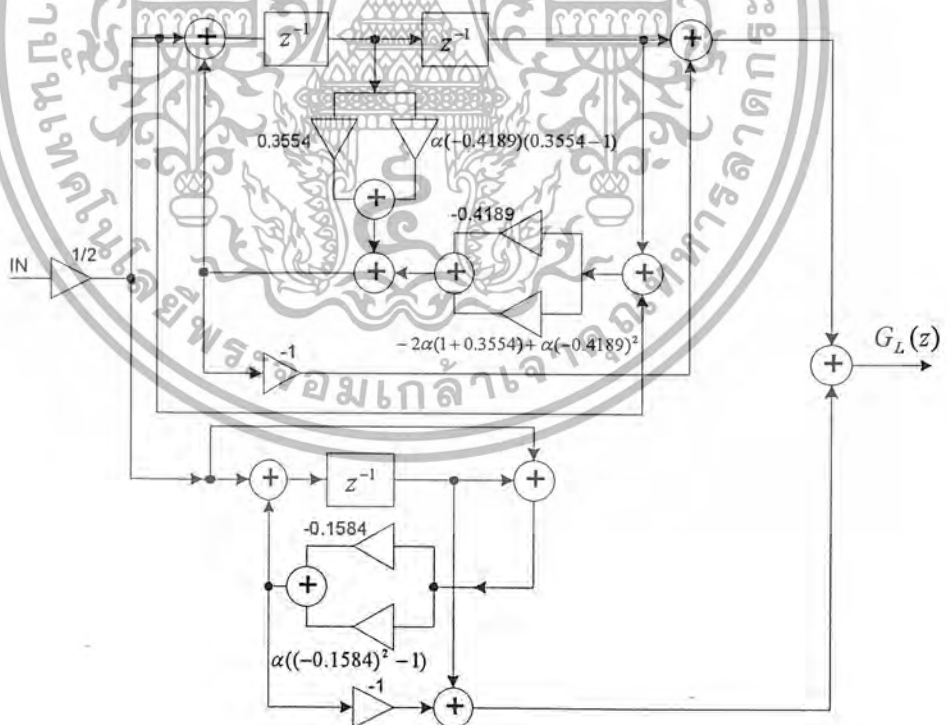
$$\cong \frac{-0.0899 + z^{-1}}{1 - 0.0899z^{-1}} \quad (3.26)$$

ทำการนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาส อันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 อันใหม่เข้าไปแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ของ  $G_L(z)$  ซึ่งมีผลทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $\hat{G}_L(z)$  ที่มีค่าความถี่คutoff 2.25 kHz ออกมา

$$\hat{G}_L(z) = \frac{1}{2} \left[ \frac{0.3353 - 0.2415z^{-1} + z^{-2}}{1 - 0.2415z^{-1} + 0.3353z^{-2}} + \frac{-0.0899 + z^{-1}}{1 - 0.0899z^{-1}} \right]$$

$$\cong \frac{0.1227 + 0.375z^{-1} + 0.375z^{-2} + 0.1227z^{-3}}{1 - 0.3314z^{-1} + 0.357z^{-2} - 0.0301z^{-3}} \quad (3.27)$$

### 3.1.4 โครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 3



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบตัวกรองดิจิทัลปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์

#### 3.2.1. การสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 41

เราจะนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$  อันดับที่ 41 ที่ได้จากการคำนวณที่มีค่าความถี่คัทออฟ 15 kHz และค่าความถี่สูง 10.146 kHz มาทำการออกแบบ ให้เป็นตัวกรอง ความถี่ต่ำผ่านที่สามารถปรับค่าความถี่คัทออฟเป็น 1 kHz และ 2 kHz

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ เป็น 1 kHz

เราต้องทำการแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$ ,  $\omega_c$  และ  $\hat{\omega}_c$  ไปในสมการที่(2.101) และ สมการที่ (2.102)

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0] \hat{\omega}_c = \left( \frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c} \right) h_{LP}[0] \quad (3.28)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n] \sin(\hat{\omega}_c n) = \left( \frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)} \right) h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq N \quad (3.29)$$

โดยการ คำนวณค่าความถี่ คัทออฟให้อยู่ในหน่วยของเรเดียน จาก  $\omega_c = \frac{2\pi \cdot f_c}{f_s}$  จะได้

$\omega_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.2956\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 1.5 kHz และความถี่สูง ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

$\hat{\omega}_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.1971\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 1 kHz และความถี่สูง ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการ จะได้สมการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองความถี่ต่ำ  $\hat{h}_{LP}[n]$  ที่มีความถี่คัทออฟ ค่าใหม่ คือที่  $0.1971\pi$  เรเดียน หรือ ที่ 1 kHz ออกมา

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0] 0.1971\pi = \left( \frac{0.1971\pi}{0.2956\pi} \right) h_{LP}[0] \quad (3.30)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n] \sin(0.1971\pi n) = \left( \frac{\sin(0.1971\pi n)}{\sin(0.2956\pi n)} \right) h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq 41 \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ เป็น 2 kHz

เราต้องทำการแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$ ,  $\omega_c$  และ  $\hat{\omega}_c$  ไปในสมการที่(2.101) และ สมการที่ (2.102)

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0]\hat{\omega}_c = \left(\frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c}\right)h_{LP}[0] \quad (3.32)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n]\sin(\hat{\omega}_c n) = \left(\frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)}\right)h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq N \quad (3.33)$$

โดยการ คำนวณค่าความถี่ คัทออฟให้อยู่ในหน่วยของเรเดียน จาก  $\omega_c = \frac{2\pi \cdot f_c}{f_s}$  จะได้

$\omega_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.2956\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 1.5 kHz และความถี่สุ่ม ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

$\hat{\omega}_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.2956\pi$  เมื่อแทนค่า ความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 2 kHz และความถี่สุ่ม ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการ จะได้สมการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองความถี่ต่ำ  $\hat{h}_{LP}[n]$  ที่มีความถี่คัทออฟ ค่าใหม่ คือที่  $0.3942\pi$  เรเดียน หรือ ที่ 2 kHz ออกมา

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0]0.3942\pi = \left(\frac{0.3942\pi}{0.2956\pi}\right)h_{LP}[0] \quad (3.34)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n]\sin(0.3942\pi n) = \left(\frac{\sin(0.3942\pi n)}{\sin(0.2956\pi n)}\right)h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq 40 \quad (3.35)$$

### 3.2.2 การสร้างตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ อันดับที่ 51

เราจะนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$  อันดับที่ 51 ที่มีค่าที่ได้จากการคำนวณ ที่ ความถี่คัทออฟ 1.5 kHz และค่าความถี่สูง 10.146 kHz มาทำการออกแบบ ให้เป็นตัวกรอง ความถี่ต่ำผ่านที่สามารถปรับค่าความถี่คัทออฟเป็น 1 kHz และ 2 kHz

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ให้มีค่าความถี่คัทออฟใหม่ เป็น 1 kHz

เราต้องทำการแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$ ,  $\omega_c$  และ  $\hat{\omega}_c$  ไปในสมการที่(2.101) และ(2.102) จะได้

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0] \hat{\omega}_c = \left( \frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c} \right) h_{LP}[0] \quad (3.36)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n] \sin(\hat{\omega}_c n) = \left( \frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)} \right) h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq N \quad (3.37)$$

โดยการ คำนวณค่าความถี่ คัทออฟให้อยู่ในหน่วยของเรเดียน จาก  $\omega_c = \frac{2\pi \cdot f_c}{f_s}$  จะได้

$\omega_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.2956\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 1.5 kHz และความถี่สูง ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

$\hat{\omega}_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.1971\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คัทออฟ ( $f_c$ ) เป็น 1 kHz และความถี่สูง ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการ จะได้สมการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองความถี่ต่ำ  $\hat{h}_{LP}[n]$  ที่มีความถี่คัทออฟ ค่าใหม่ คือที่  $0.1971\pi$  เรเดียน หรือ ที่ 1 kHz ออกมา

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0] 0.1971\pi = \left( \frac{0.1971\pi}{0.2956\pi} \right) h_{LP}[0] \quad (3.38)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n] \sin(0.1971\pi n) = \left( \frac{\sin(0.1971\pi n)}{\sin(0.2956\pi n)} \right) h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq 50 \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านปรับค่าได้ให้มีค่าความถี่คutoffใหม่ เป็น 2 kHz

เราต้องทำการแทนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน  $h_{LP}[n]$ ,  $\omega_c$  และ  $\hat{\omega}_c$  ไปในสมการที่(2.101)และ(2.102) จะได้

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0]\hat{\omega}_c = \left(\frac{\hat{\omega}_c}{\omega_c}\right)h_{LP}[0] \quad (3.40)$$

$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n]\sin(\hat{\omega}_c n) = \left(\frac{\sin(\hat{\omega}_c n)}{\sin(\omega_c n)}\right)h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq N \quad (3.41)$$

โดยการ คำนวณค่าความถี่ คutoffให้อยู่ในหน่วยของเรเดียน จาก  $\omega_c = \frac{2\pi \cdot f_c}{f_s}$  จะได้

$\omega_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.2956\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คutoff ( $f_c$ ) เป็น 1.5 kHz และความถี่สุ่ม ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

$\hat{\omega}_c$  มีค่าเท่ากับ  $0.3942\pi$  เมื่อแทนค่าความถี่คutoff ( $f_c$ ) เป็น 2 kHz และความถี่สุ่ม ( $f_s$ ) เป็น 10.146 kHz

จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการ จะได้สมการสมการฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองความถี่ต่ำ  $\hat{h}_{LP}[n]$  ที่มีความถี่คutoff ค่าใหม่ คือที่  $0.3942\pi$  เรเดียน หรือ ที่ 2 kHz ออกมา

$$\hat{h}_{LP}[0] = c[0]0.3942\pi = \left(\frac{0.3942\pi}{0.2956\pi}\right)h_{LP}[0] \quad (3.42)$$

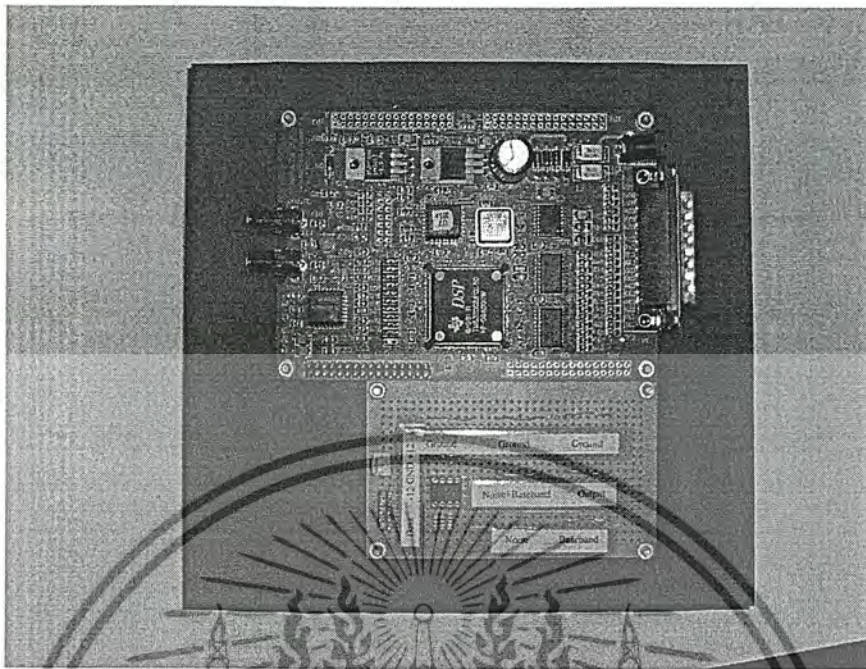
$$\hat{h}_{LP}[n] = c[n]\sin(0.3942\pi n) = \left(\frac{\sin(0.3942\pi n)}{\sin(0.2956\pi n)}\right)h_{LP}[n]; 1 \leq |n| \leq 50 \quad (3.43)$$

## บทที่ 4

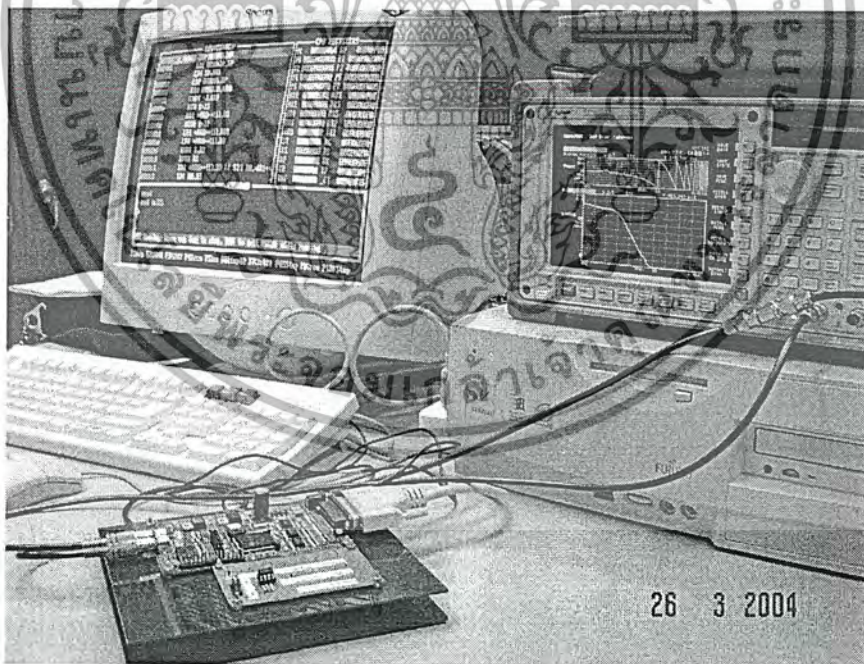
### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะทำการนำเสนอการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์ (IIR) และตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์ (FIR) ที่ออกแบบในบทที่ 3 มาสร้างจริงบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 แล้วทำการวัดค่าผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response) ที่ได้จากการซิมูเลชันโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ โดยการสร้างตัวกรองปรับค่าได้ โดยใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จะมีฮาร์ดแวร์ที่ใช้ดังรูปที่ 4.1-4.2





รูปที่ 4.1 แสดงฮาร์ดแวร์ของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31

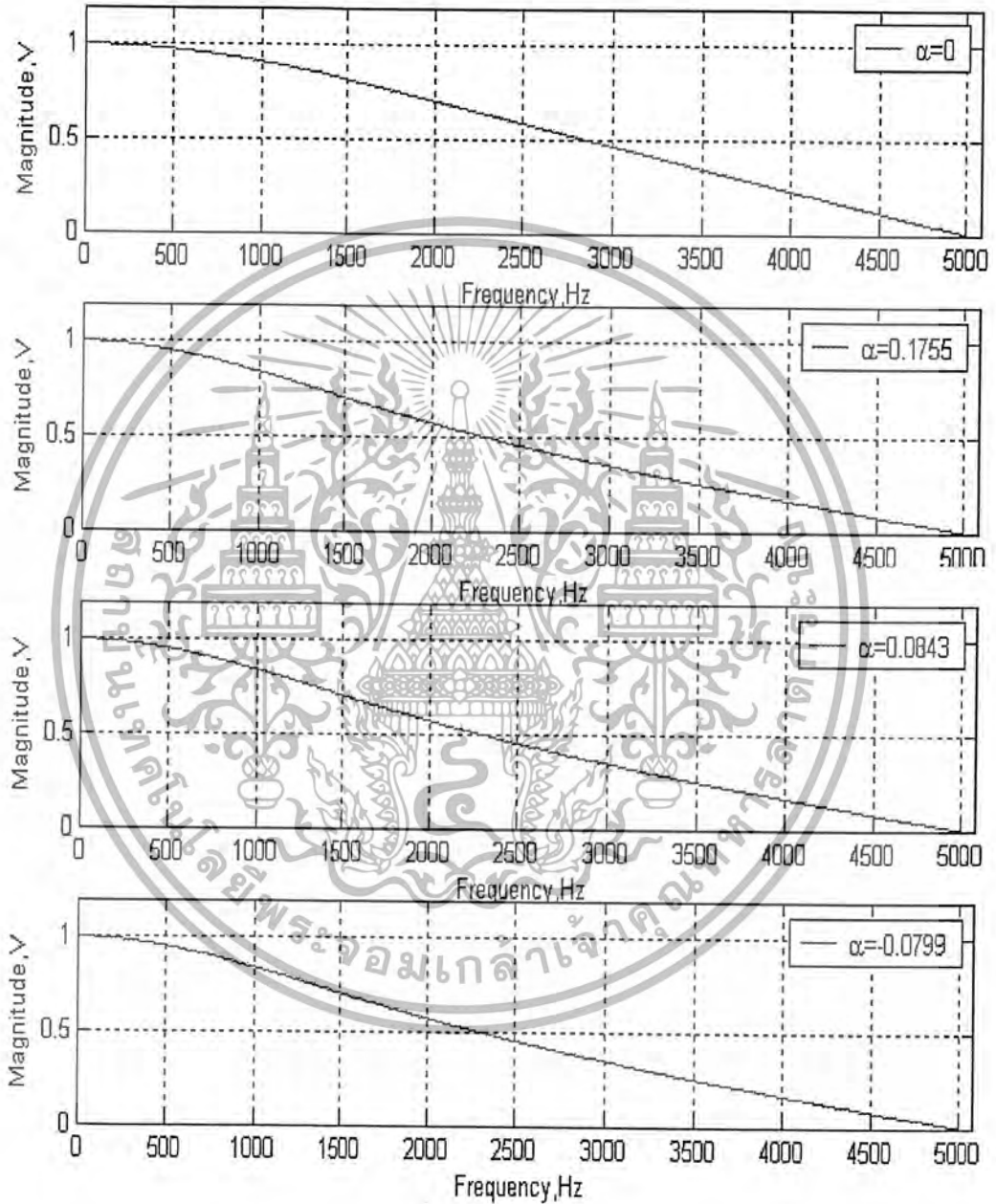


รูปที่ 4.2 แสดงการวัดผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองปรับค่าได้บนเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบโคเนนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

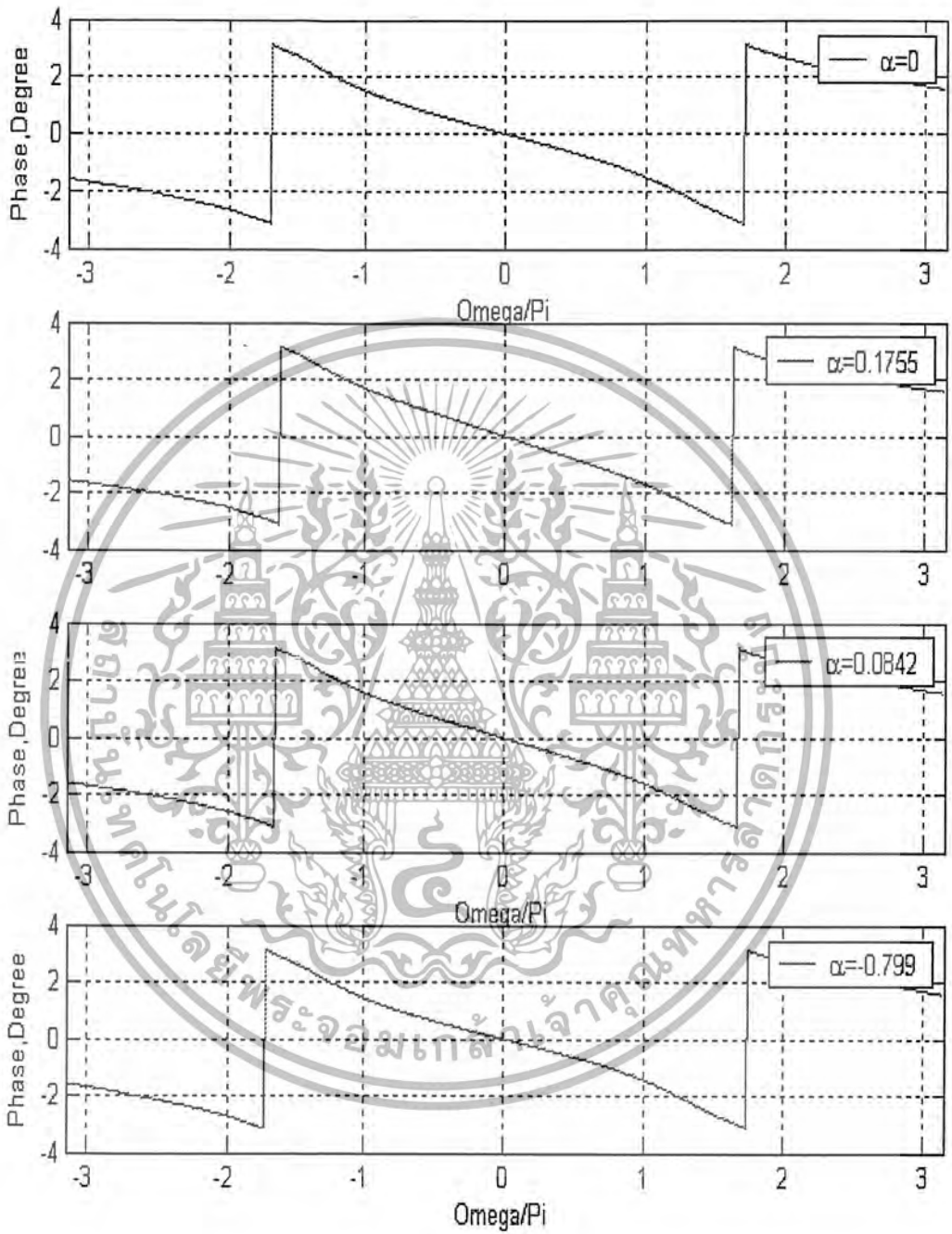
#### 4.1 ผลการทดลองของตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์

##### 4.1.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการจิมูเลขัน



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการจิมูเลขัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

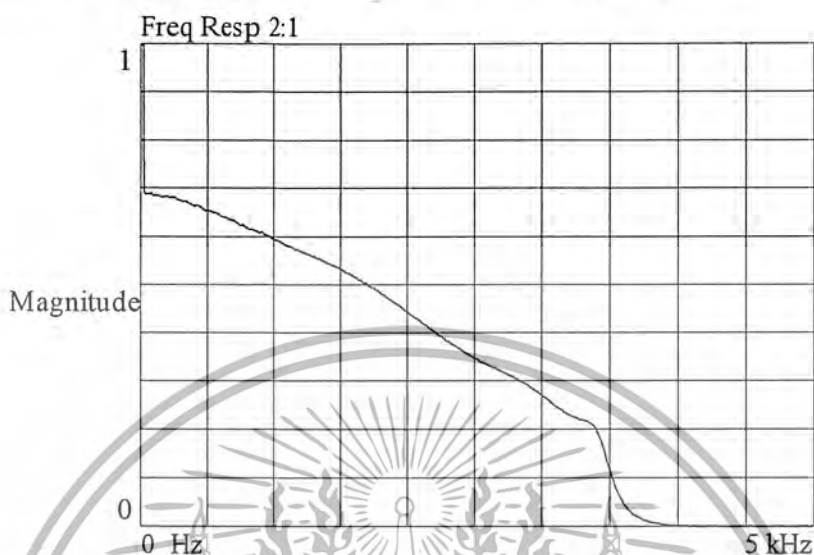


รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการซิมูเลชัน

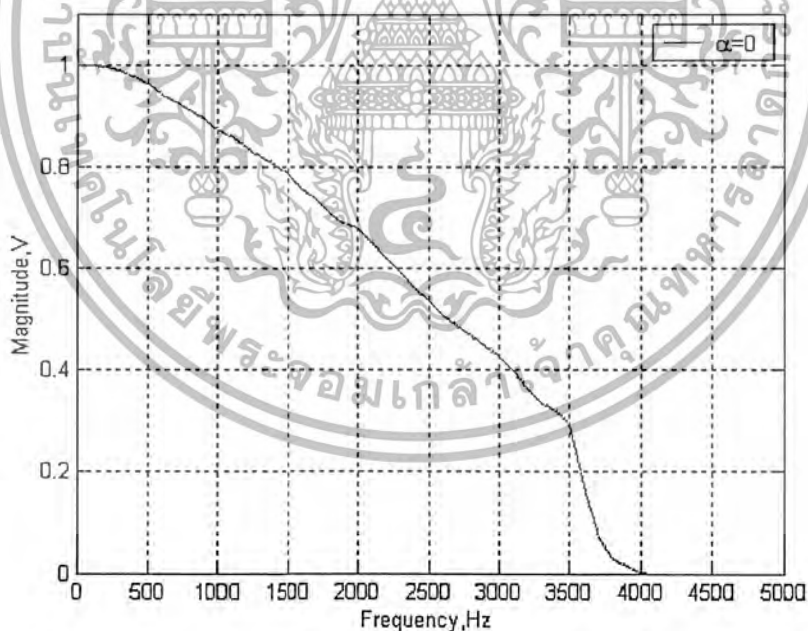
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการวัดจริง

##### 4.1.2.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0$



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$  จากโปรแกรมแมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9999 | 0.9899 | 0.9761 | 0.9625 | 0.9422 | 0.9286 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9075 | 0.8936 | 0.8735 | 0.8564 | 0.8394 | 0.8215 | 0.8012 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.7851 | 0.7621 | 0.7373 | 0.7103 | 0.6912 | 0.6792 | 0.6528 |

|            |        |       |        |        |        |        |        |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300  | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.6229 | 0.592 | 0.5621 | 0.5344 | 0.5091 | 0.4878 | 0.4686 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300   | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.4495 | 0.4255 | 0.3966 | 0.3639 | 0.3375 | 0.3216 | 0.2932 |

|            |        |        |        |        |         |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|---------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700   | 3800   | 3900   | 4000    | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.1724 | 0.0724 | 0.0313 | 0.0129 | 0.00158 | 0    | 0    |

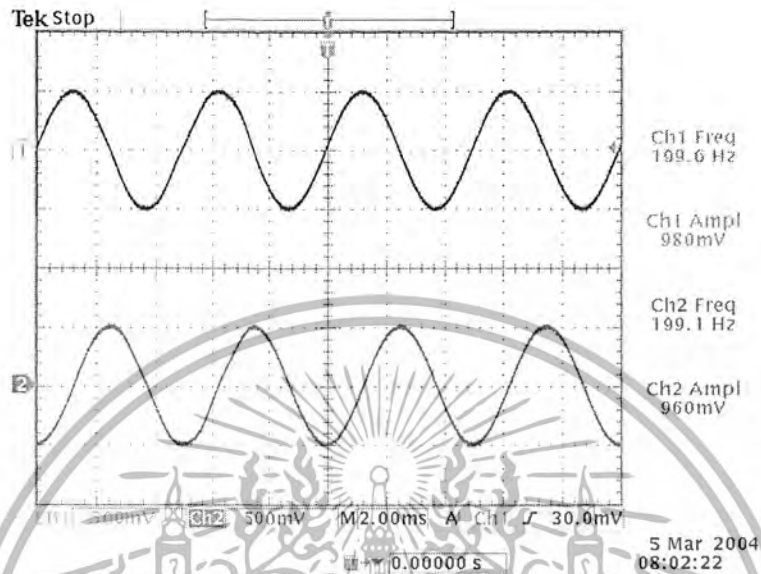
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

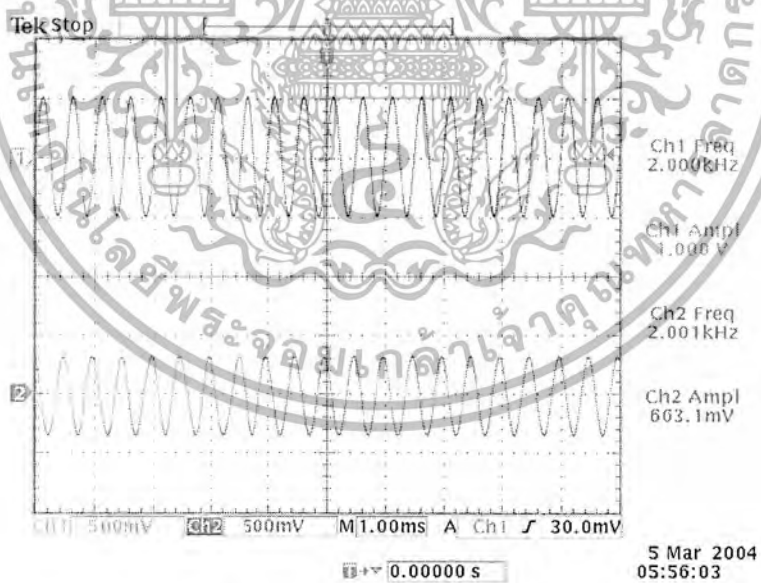
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า

$$\alpha = 0$$

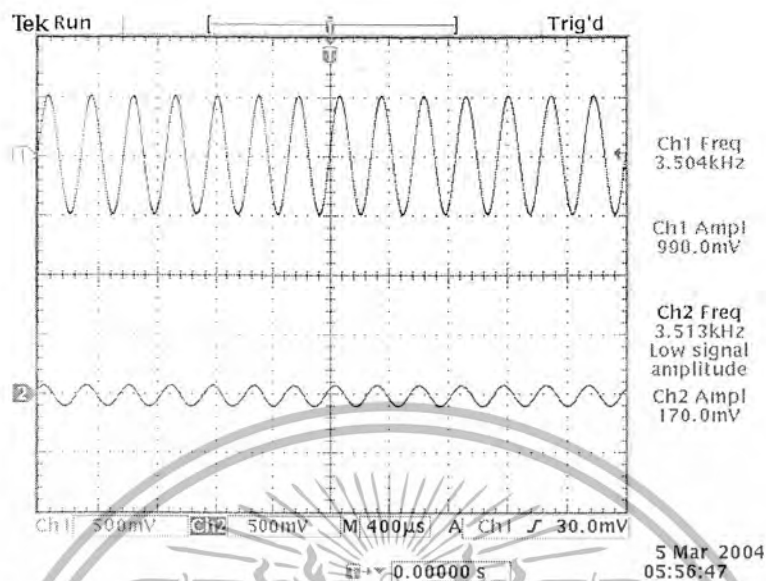


รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



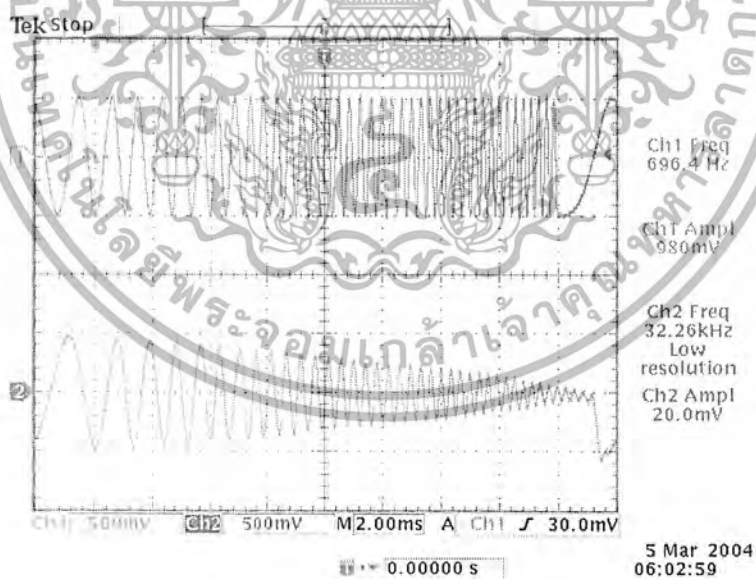
รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz

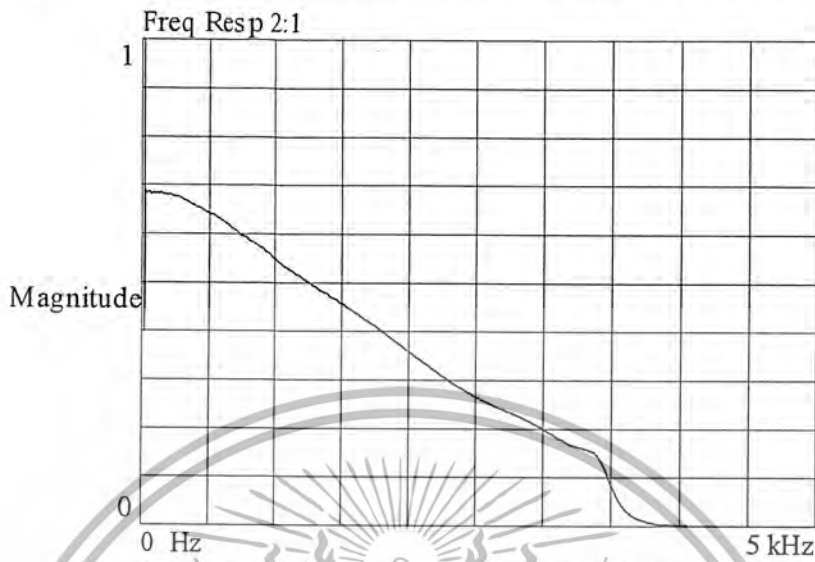
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$



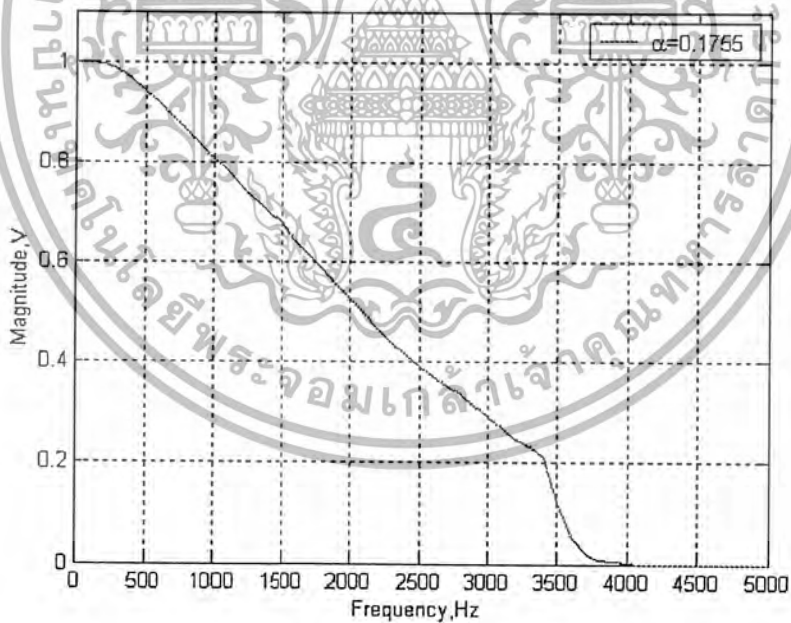
รูปที่ 4.10 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0.1755$



รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$  จากโปรแกรมแมทแล็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$

|            |     |        |       |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300   | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9998 | 0.986 | 0.9761 | 0.9415 | 0.9184 | 0.8909 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.8612 | 0.8351 | 0.8068 | 0.7795 | 0.7498 | 0.7243 | 0.6978 |

|            |        |        |        |        |       |       |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900  | 2000  | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.6789 | 0.6452 | 0.6155 | 0.5866 | 0.555 | 0.527 | 0.4969 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.4679 | 0.4397 | 0.4138 | 0.3898 | 0.3709 | 0.3531 | 0.3352 |

|            |        |        |        |        |       |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300  | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.3152 | 0.2923 | 0.2686 | 0.2461 | 0.233 | 0.2117 | 0.1247 |

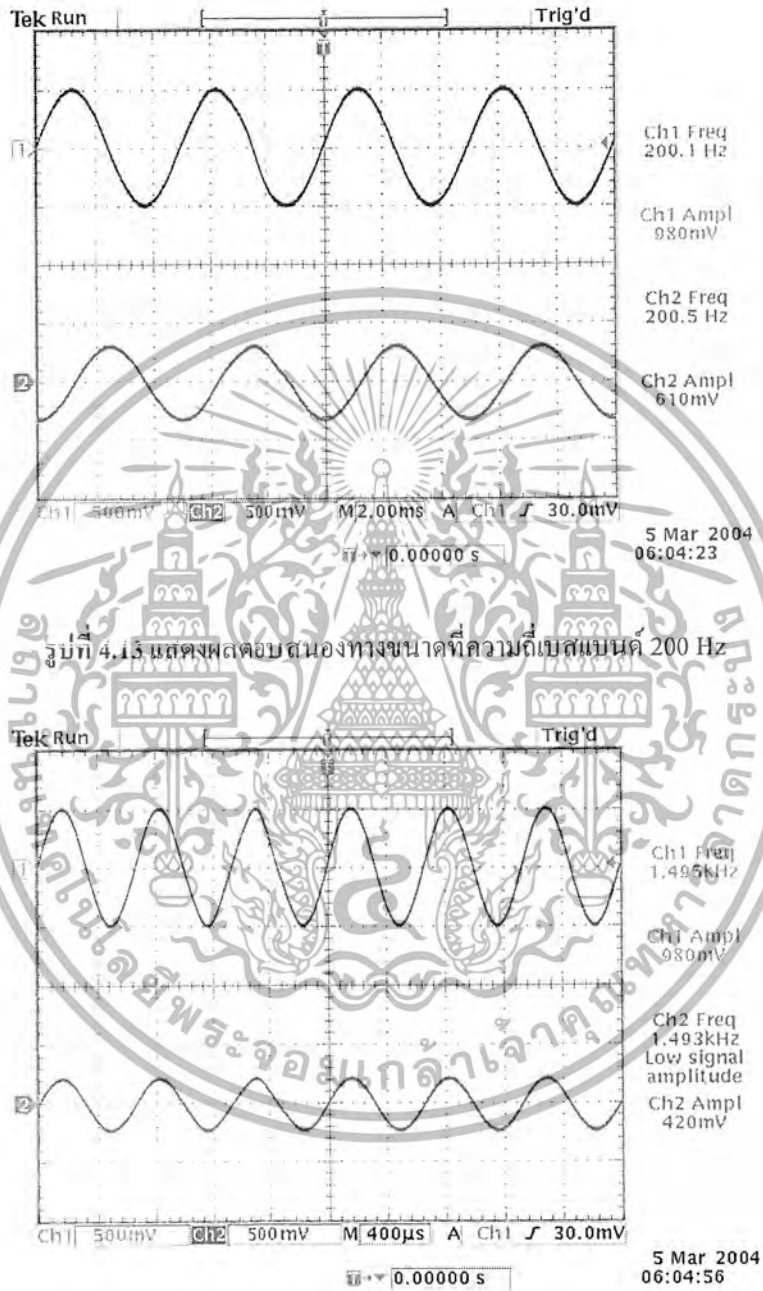
|            |        |        |        |        |        |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700   | 3800   | 3900   | 4000   | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.0519 | 0.0216 | 0.0091 | 0.0038 | 0.0017 | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

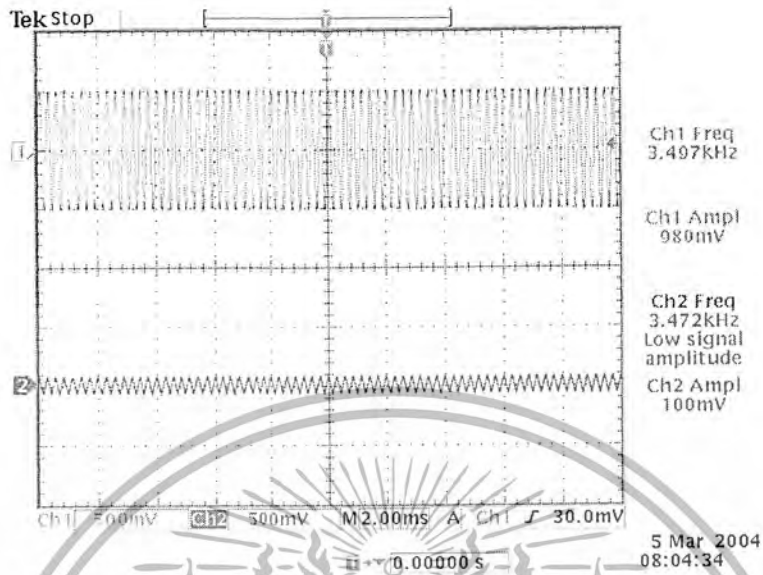
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$



รูปที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองสองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่สแกนที่ 3.5 kHz

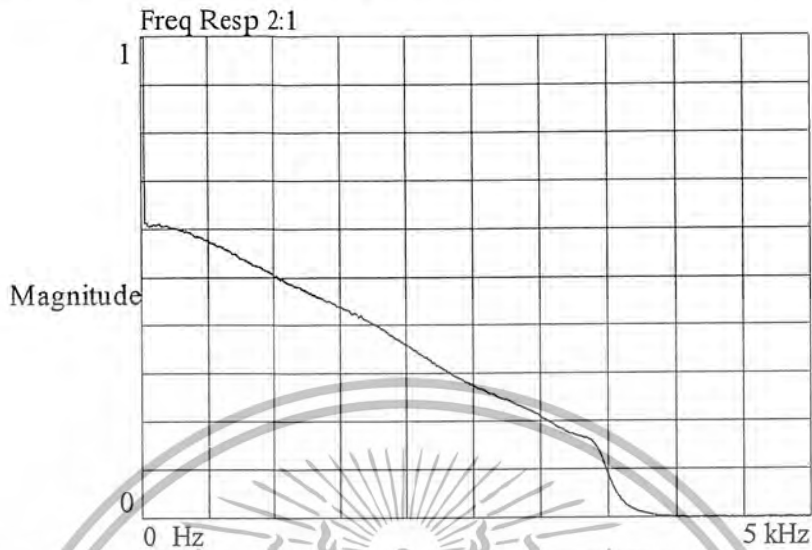
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$



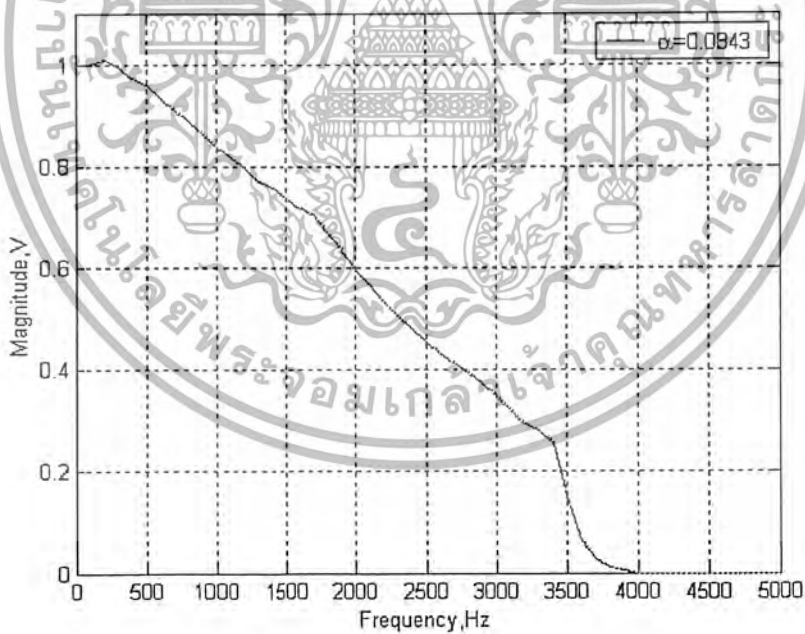
รูปที่ 4.16 แสดงผลการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0.0843$



รูปที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.18 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$  จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 1.0069 | 0.9952 | 0.9738 | 0.9586 | 0.9351 | 0.9126 |

|            |        |       |        |        |        |        |        |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900   | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.8857 | 0.862 | 0.8364 | 0.8168 | 0.7973 | 0.7717 | 0.7586 |

|            |        |        |        |        |        |       |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000  | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.7387 | 0.7175 | 0.7066 | 0.6702 | 0.6391 | 0.598 | 0.5682 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.5351 | 0.5074 | 0.4803 | 0.4562 | 0.4333 | 0.4123 | 0.3951 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300   | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.3741 | 0.3494 | 0.3189 | 0.2937 | 0.2806 | 0.2551 | 0.1489 |

|            |        |        |        |        |      |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700   | 3800   | 3900   | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.0626 | 0.0275 | 0.0113 | 0.0049 | 0    | 0    | 0    |

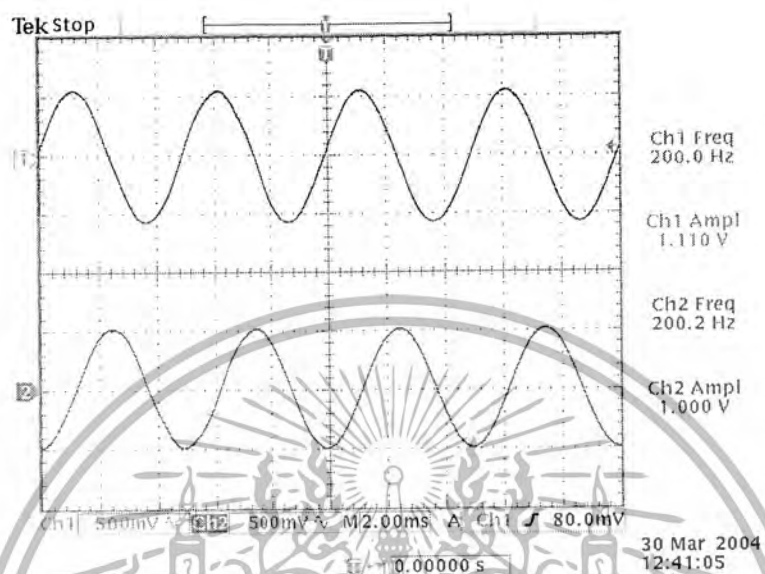
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

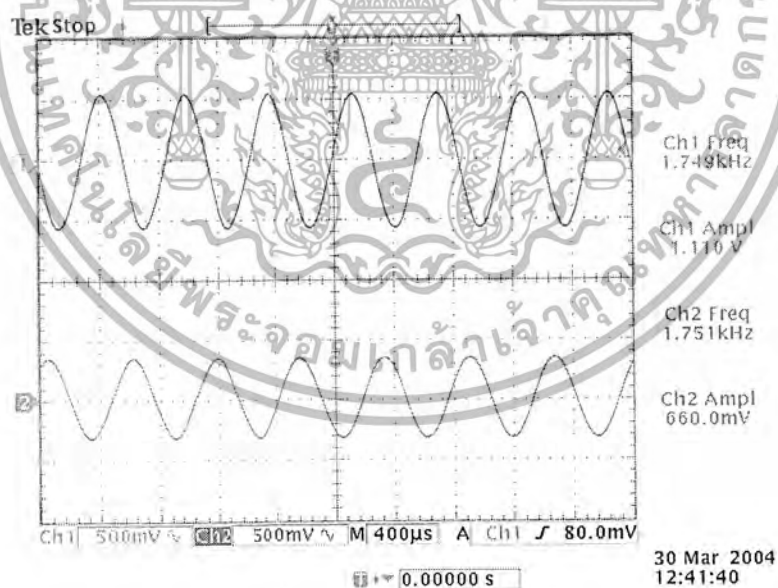
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า

$$\alpha = 0.0843$$

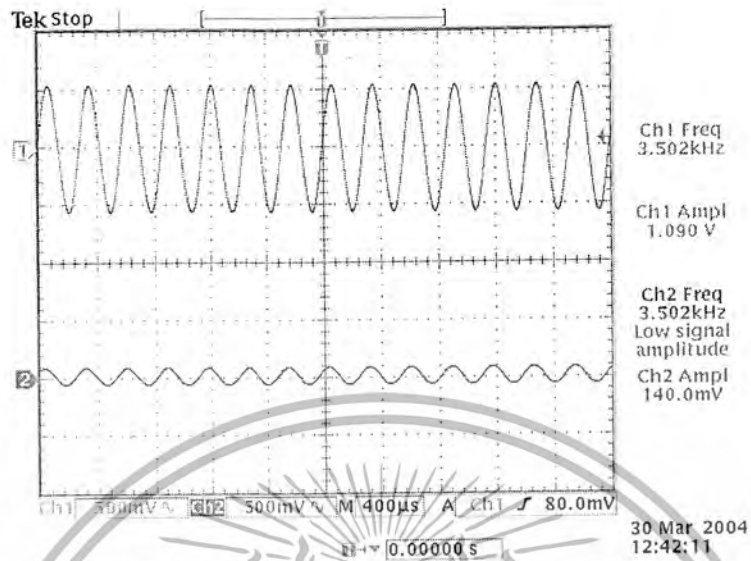


รูปที่ 4.19 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



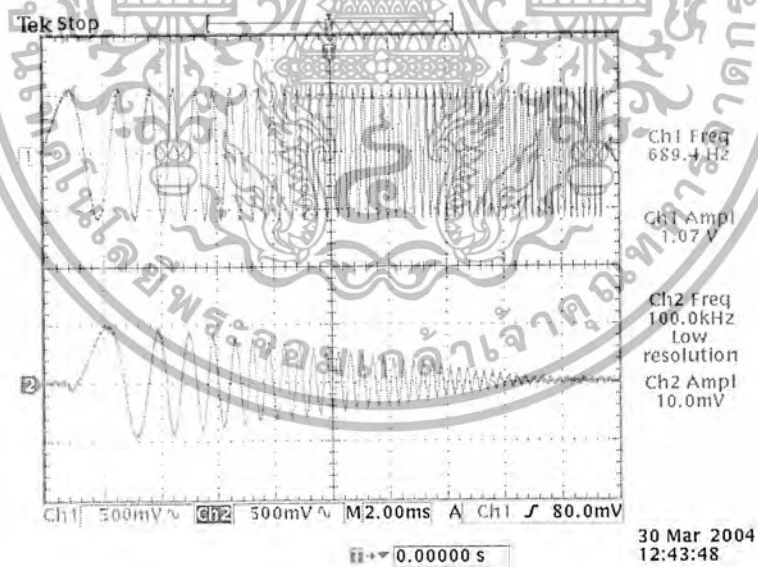
รูปที่ 4.20 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.75 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz

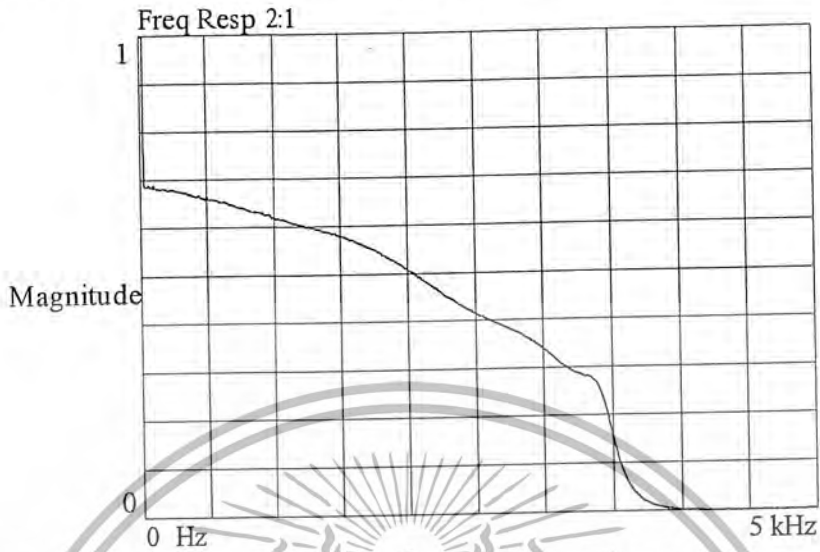
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ขององค์ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$



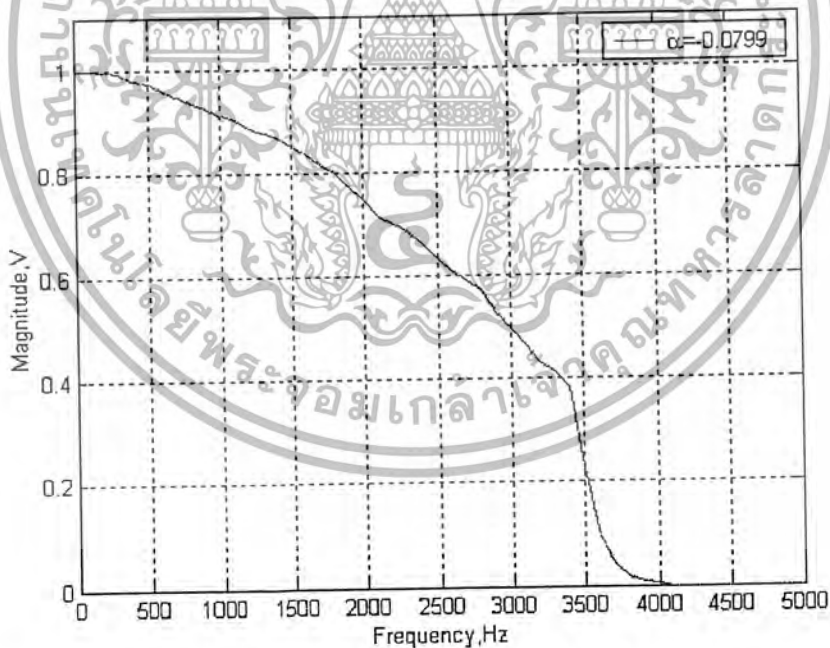
รูปที่ 4.22 แสดงผลการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2.4 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = -0.0799$



รูปที่ 4.23 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$  จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9959 | 0.9923 | 0.9789 | 0.9715 | 0.9587 | 0.9474 |

|            |        |       |        |        |        |        |        |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900   | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9347 | 0.925 | 0.9107 | 0.9022 | 0.8875 | 0.8768 | 0.8663 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.8511 | 0.8366 | 0.8167 | 0.8001 | 0.7728 | 0.7477 | 0.7167 |

|            |        |        |        |        |        |        |       |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800  |
| Mag. (V)   | 0.7021 | 0.6881 | 0.6594 | 0.6307 | 0.6104 | 0.5907 | 0.571 |

|            |        |        |        |        |        |       |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300   | 3400  | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.5286 | 0.4982 | 0.4633 | 0.4313 | 0.4132 | 0.382 | 0.2275 |

|            |        |        |        |        |        |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700   | 3800   | 3900   | 4000   | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.0953 | 0.0395 | 0.0175 | 0.0078 | 0.0037 | 0    | 0    |

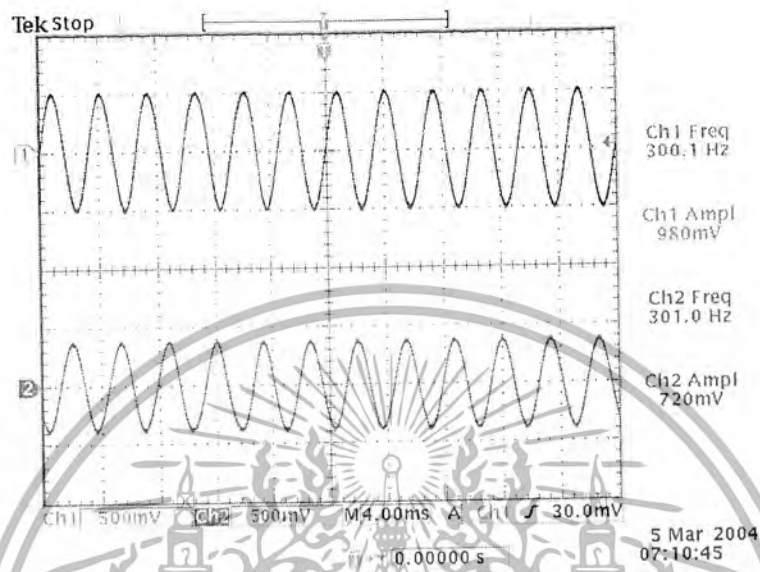
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

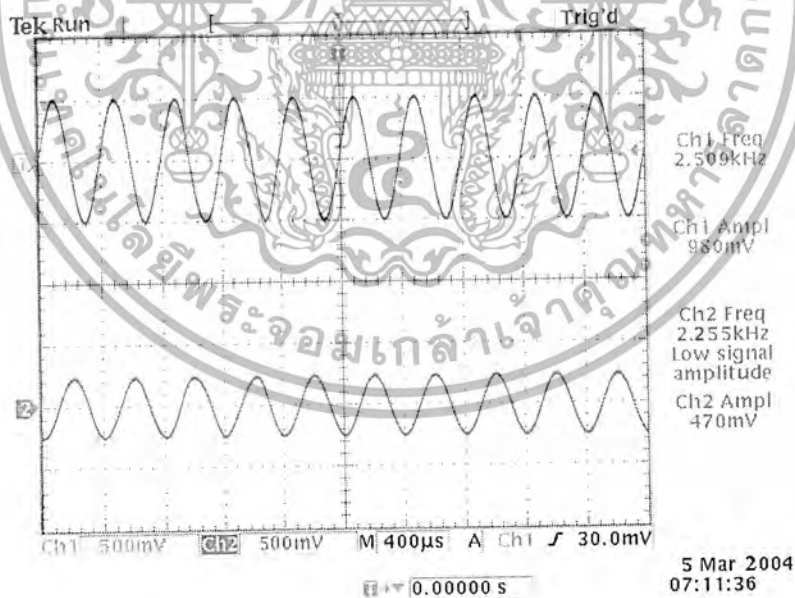
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า

$$\alpha = -0.0799$$

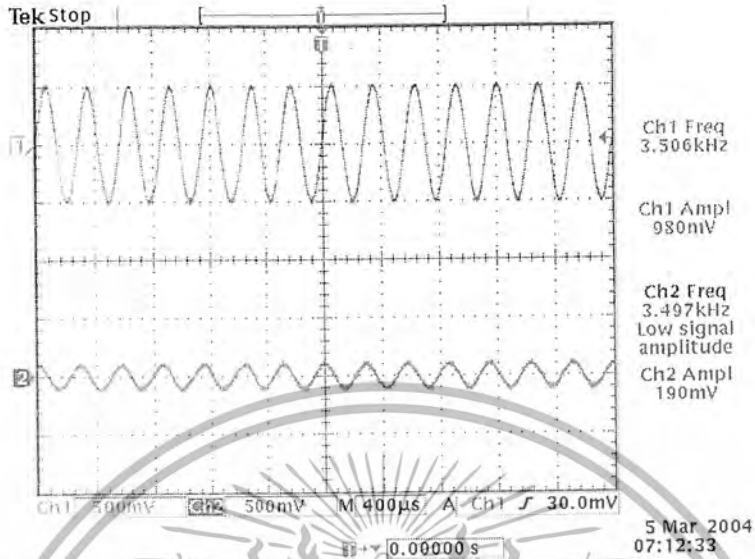


รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 300 Hz



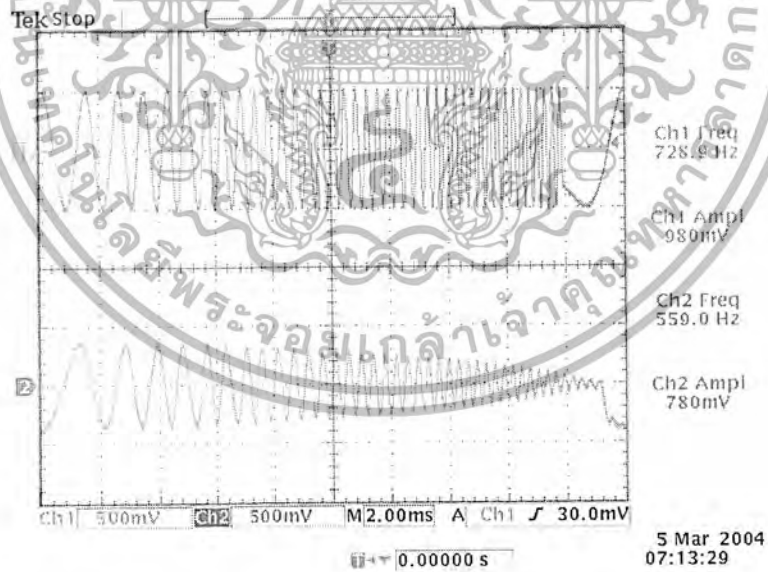
รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงผลตอบสนองสองทางขนาดที่ความถี่สแกน 3.5 kHz

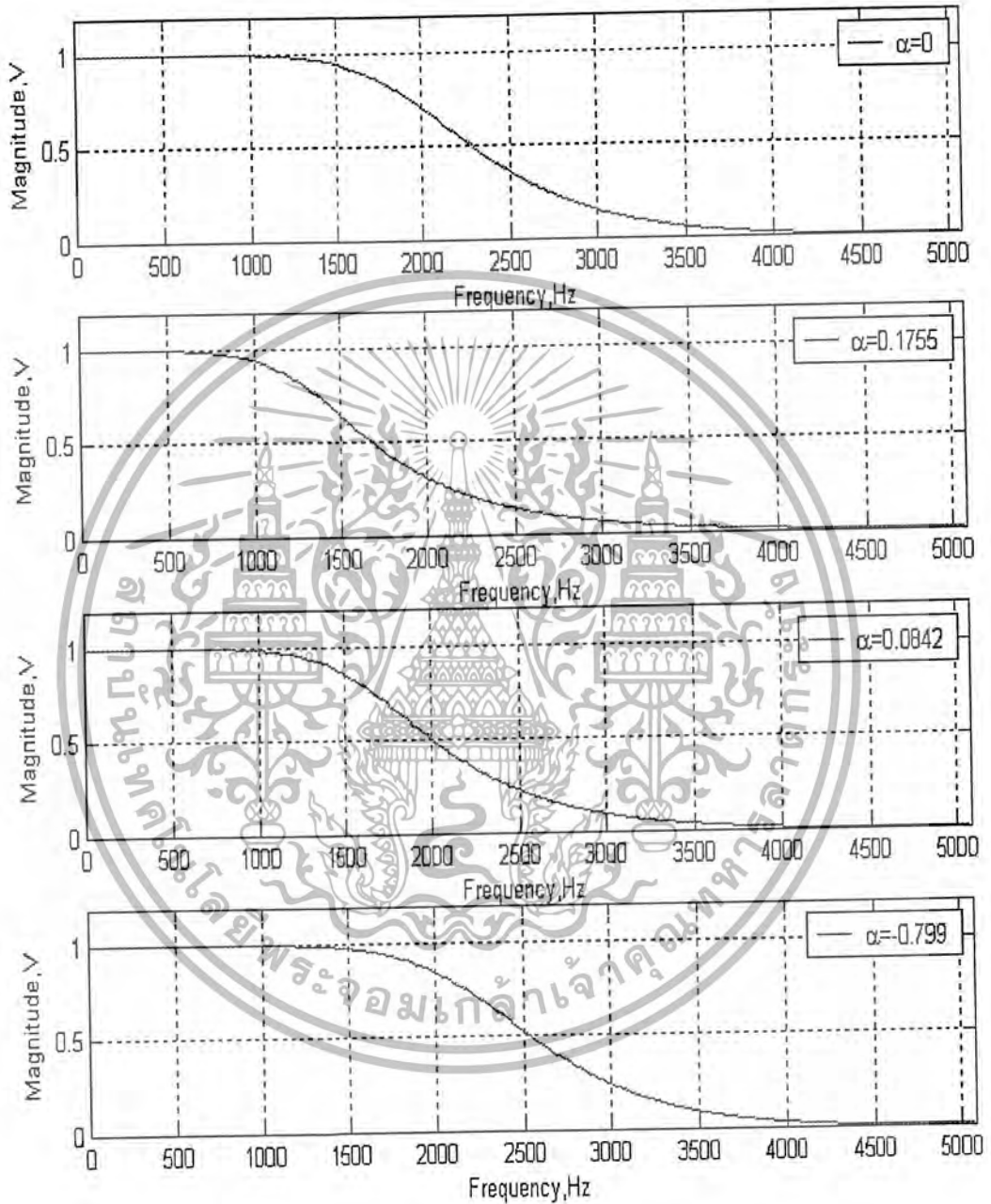
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของขงตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$



รูปที่ 4.28 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$

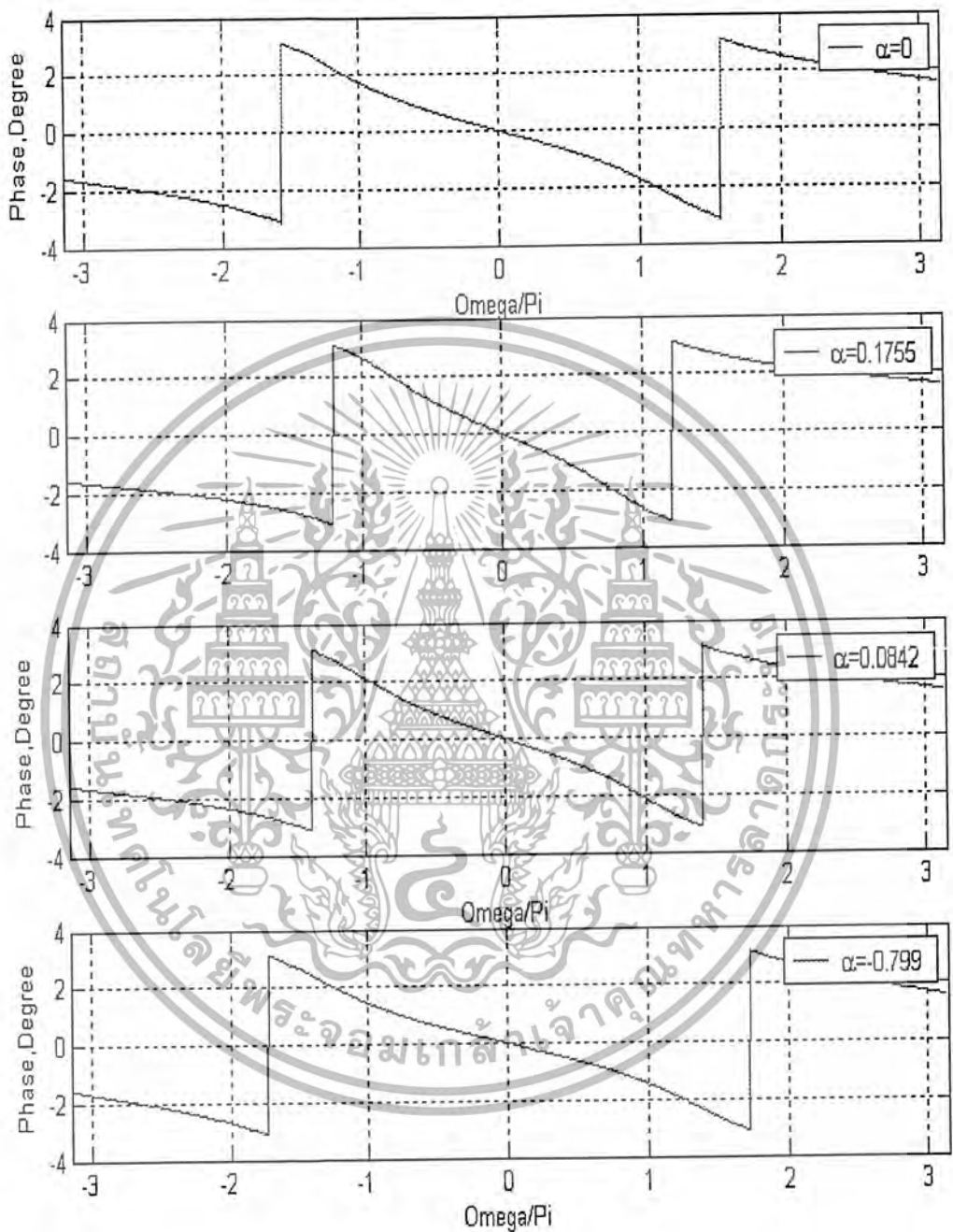
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการซิมูเลชัน



รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการซิมูเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

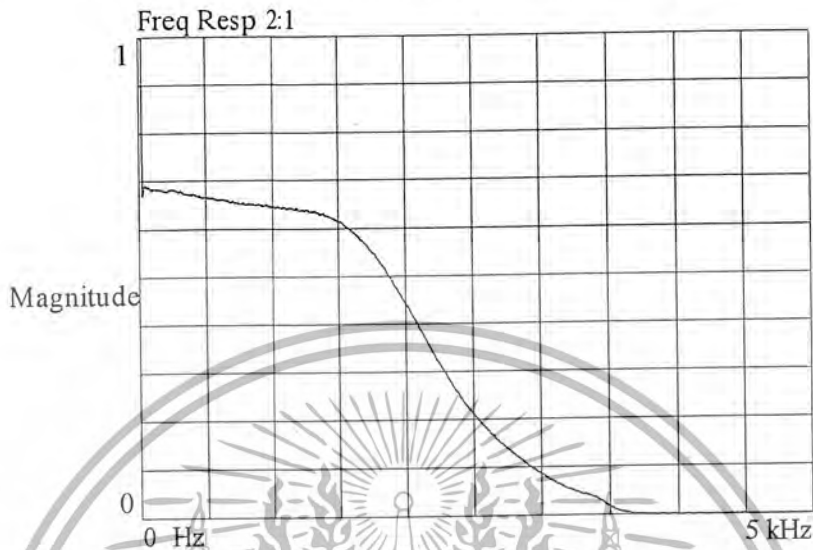


รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการซิมูเลชัน

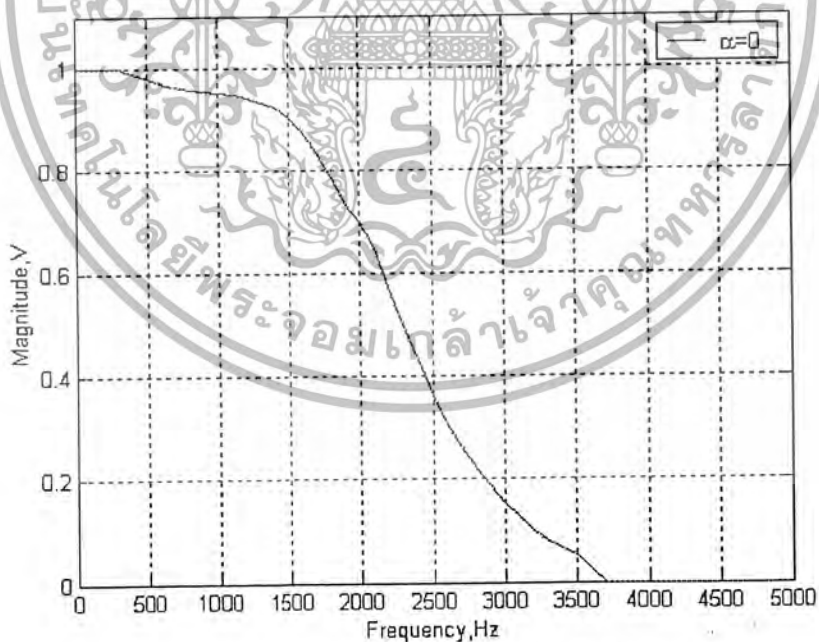
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการวัดจริง

##### 4.1.4.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0$



รูปที่ 4.31 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.32 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0$  จากโปรแกรมแมทแล็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่า  $\alpha = 0$

|            |     |        |       |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300   | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9987 | 0.999 | 0.9892 | 0.9783 | 0.9712 | 0.9626 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9569 | 0.9533 | 0.9507 | 0.9461 | 0.9399 | 0.9319 | 0.9229 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.9036 | 0.8749 | 0.8344 | 0.7851 | 0.7348 | 0.6981 | 0.6494 |

|            |        |        |        |        |        |       |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700  | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.5741 | 0.4986 | 0.4312 | 0.3624 | 0.3085 | 0.263 | 0.2217 |

|            |        |       |        |        |        |        |       |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000  | 3100   | 3200   | 3300   | 3400   | 3500  |
| Mag. (V)   | 0.1873 | 0.154 | 0.1273 | 0.1023 | 0.0803 | 0.0653 | 0.054 |

|            |        |      |      |      |      |      |      |
|------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.0257 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

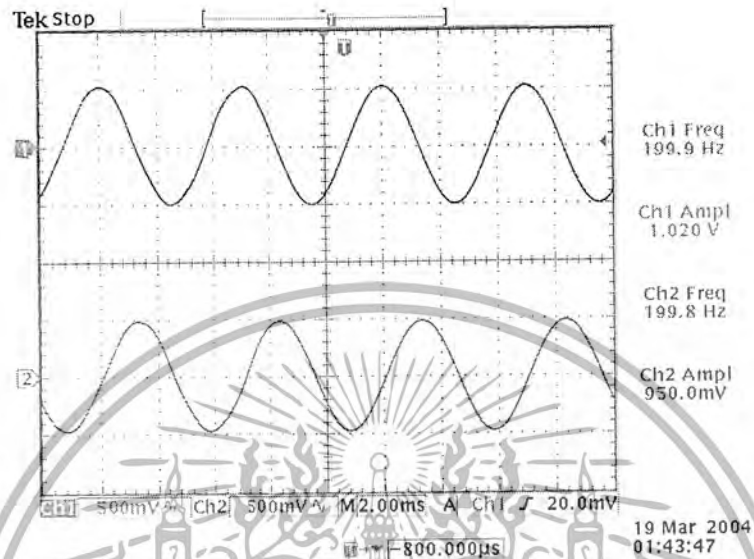
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

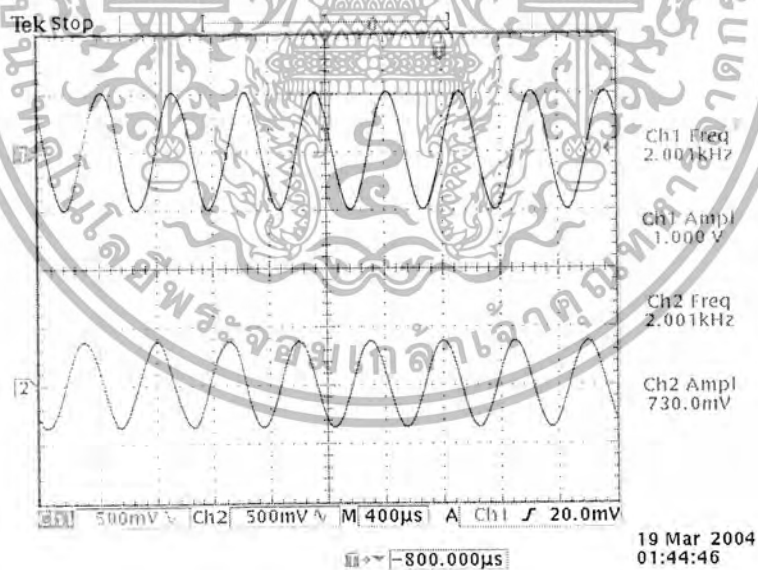
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า

$$\alpha = 0$$

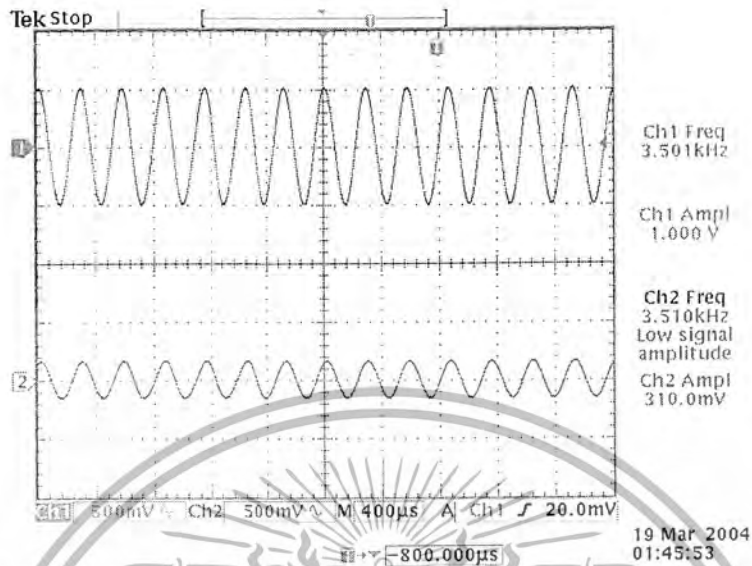


รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



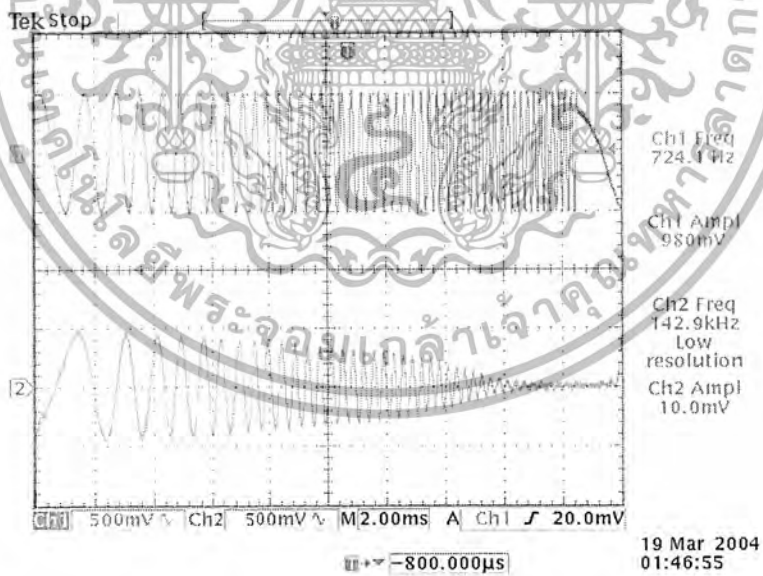
รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz

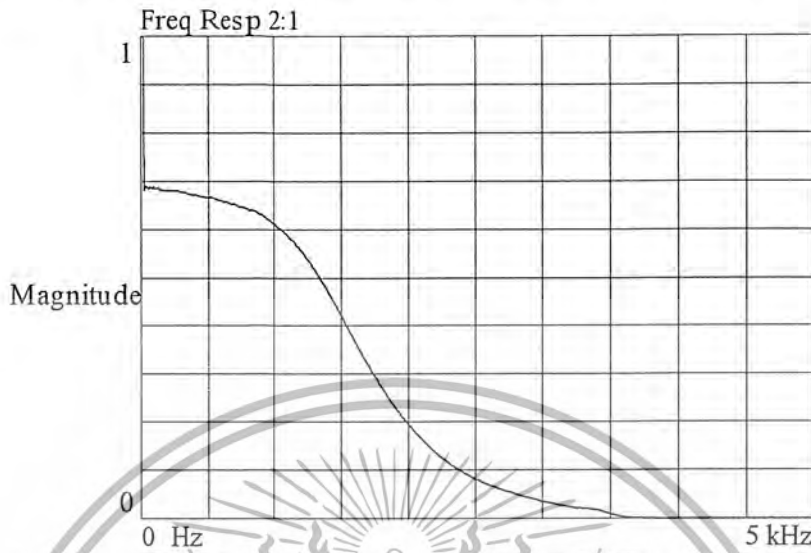
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0$



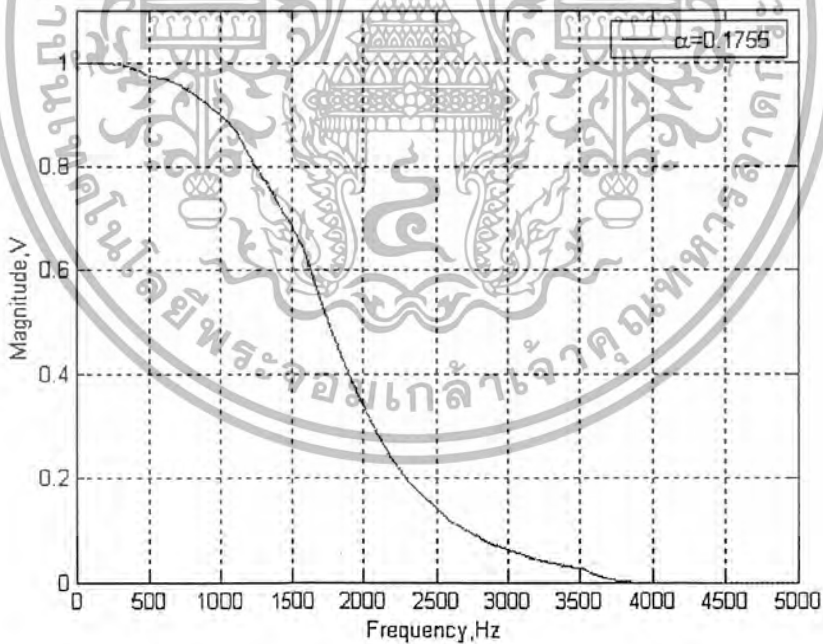
รูปที่ 4.36 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0.1755$



รูปที่ 4.37 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.38 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$  จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$

|            |     |        |        |        |        |        |       |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700   |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9986 | 0.9964 | 0.9887 | 0.9732 | 0.9688 | 0.959 |

|            |        |        |        |       |        |       |       |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100  | 1200   | 1300  | 1400  |
| Mag. (V)   | 0.9405 | 0.9227 | 0.9003 | 0.866 | 0.8189 | 0.762 | 0.721 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.6852 | 0.6307 | 0.5436 | 0.4681 | 0.4025 | 0.3383 | 0.2851 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.2408 | 0.1991 | 0.1682 | 0.1416 | 0.1186 | 0.1023 | 0.0868 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300   | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.0736 | 0.0634 | 0.0528 | 0.0435 | 0.0365 | 0.0314 | 0.0263 |

|            |       |        |        |      |      |      |      |
|------------|-------|--------|--------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600  | 3700   | 3800   | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.014 | 0.0044 | 0.0019 | 0    | 0    | 0    | 0    |

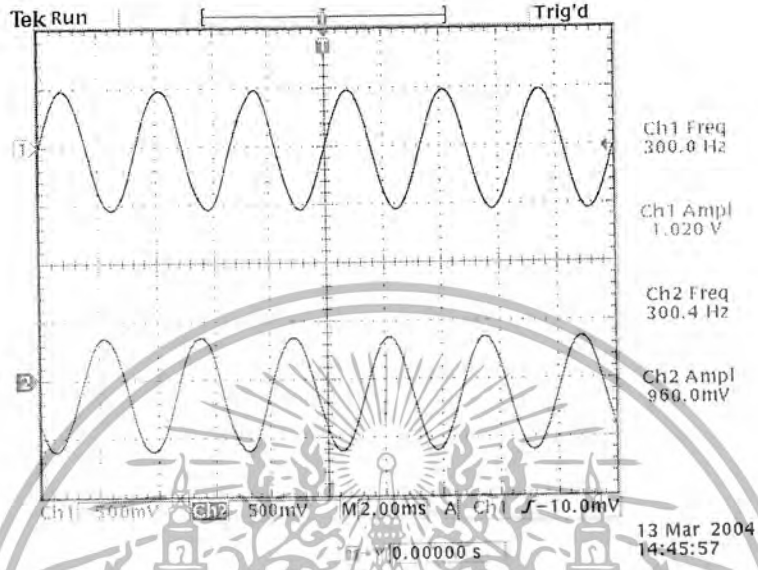
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

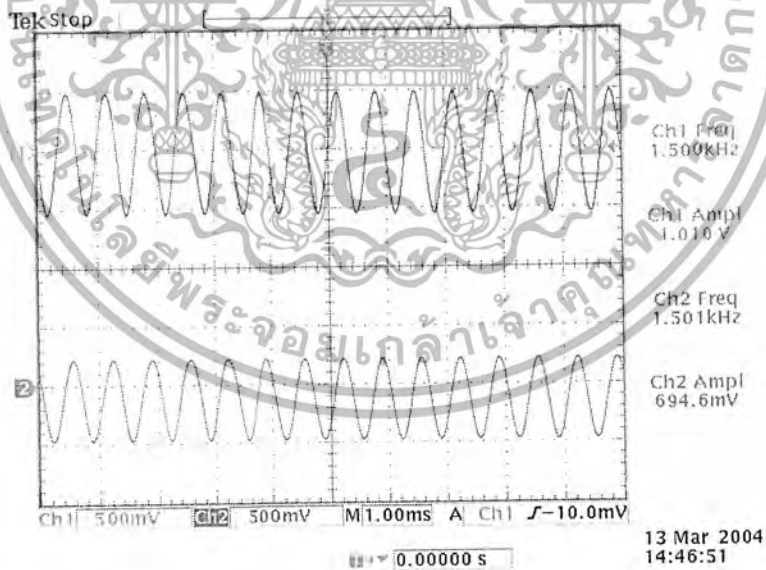
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า

$$\alpha = 0.1755$$

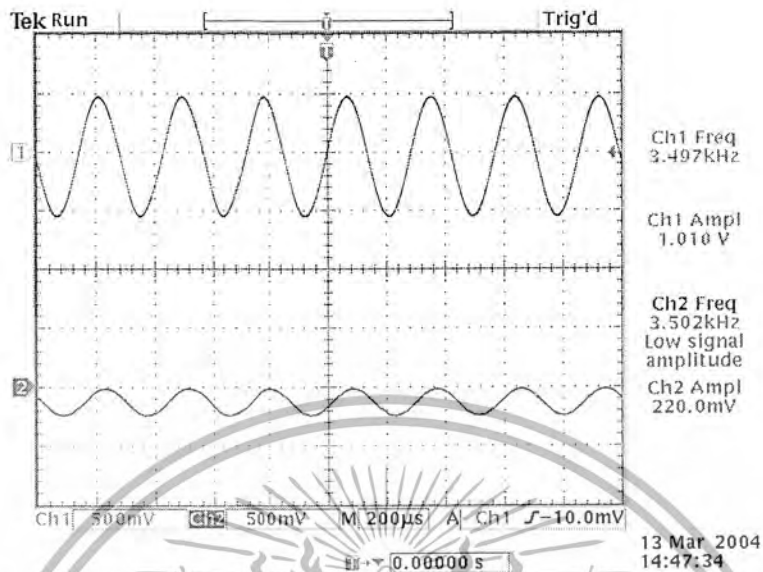


รูปที่ 4.39 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



รูปที่ 4.40 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.5 kHz

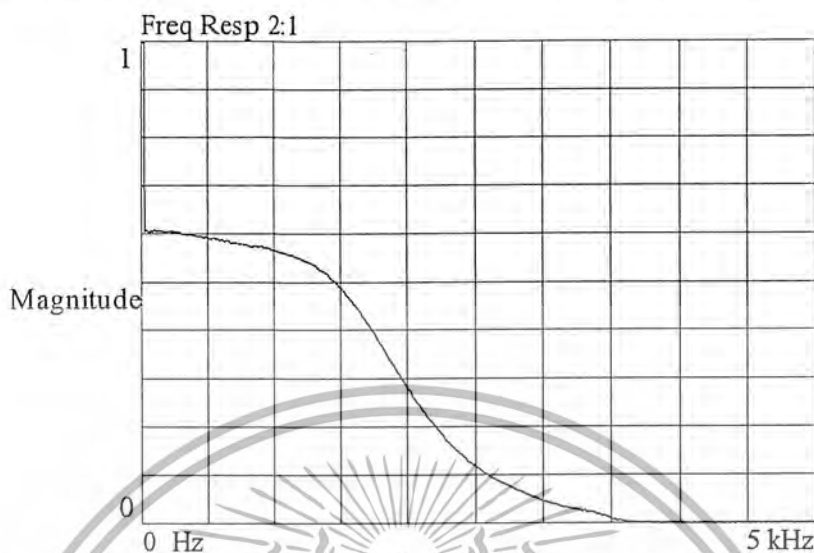
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$



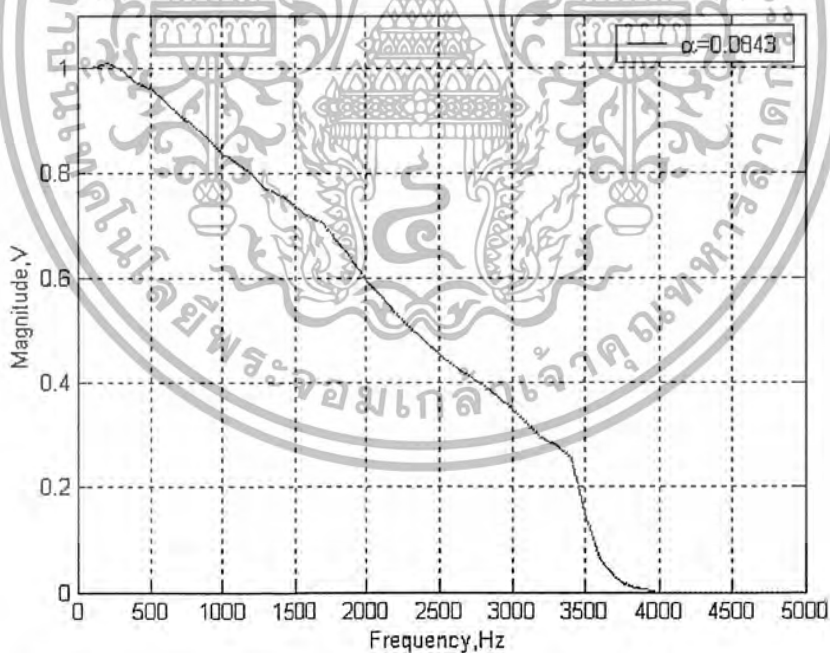
รูปที่ 4.42 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.1755$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = 0.0843$



รูปที่ 4.43 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.44 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$  จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$

|            |     |        |        |       |        |        |       |
|------------|-----|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400   | 500    | 600    | 700   |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9999 | 0.9989 | 0.993 | 0.9842 | 0.9796 | 0.969 |

|            |        |       |        |        |       |        |       |
|------------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900   | 1000   | 1100   | 1200  | 1300   | 1400  |
| Mag. (V)   | 0.9599 | 0.955 | 0.9435 | 0.9308 | 0.915 | 0.8931 | 0.862 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.8137 | 0.7559 | 0.7207 | 0.6817 | 0.6113 | 0.5454 | 0.4699 |

|            |      |       |        |        |        |        |        |
|------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200 | 2300  | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.4  | 0.337 | 0.2807 | 0.2363 | 0.1958 | 0.1386 | 0.1157 |

|            |        |        |        |       |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200  | 3300   | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.0942 | 0.0783 | 0.0651 | 0.052 | 0.0446 | 0.0312 | 0.0179 |

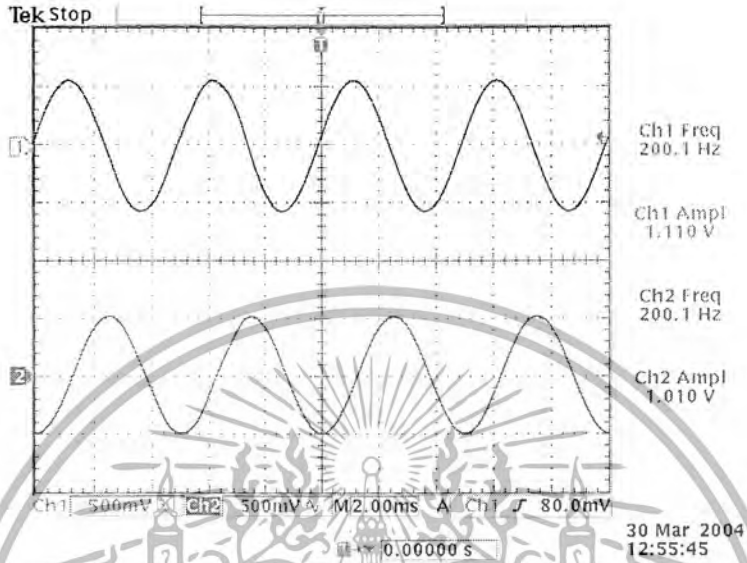
|            |       |        |      |      |      |      |      |
|------------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600  | 3700   | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.007 | 0.0024 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

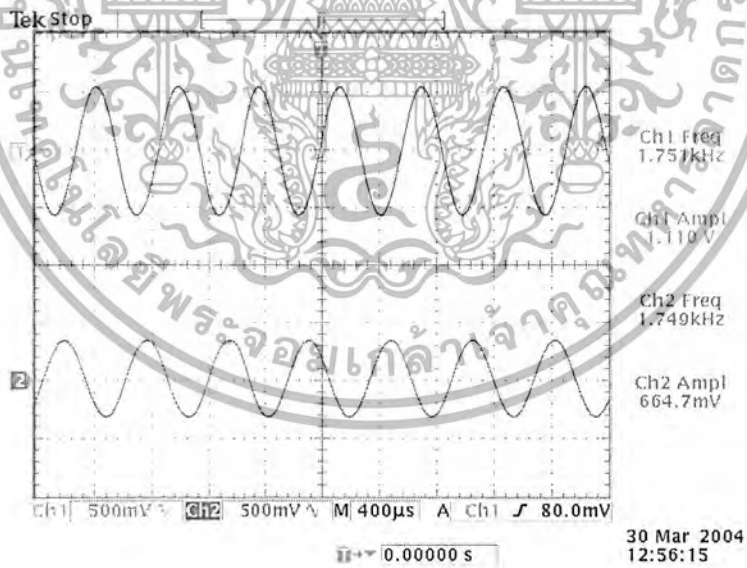
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$

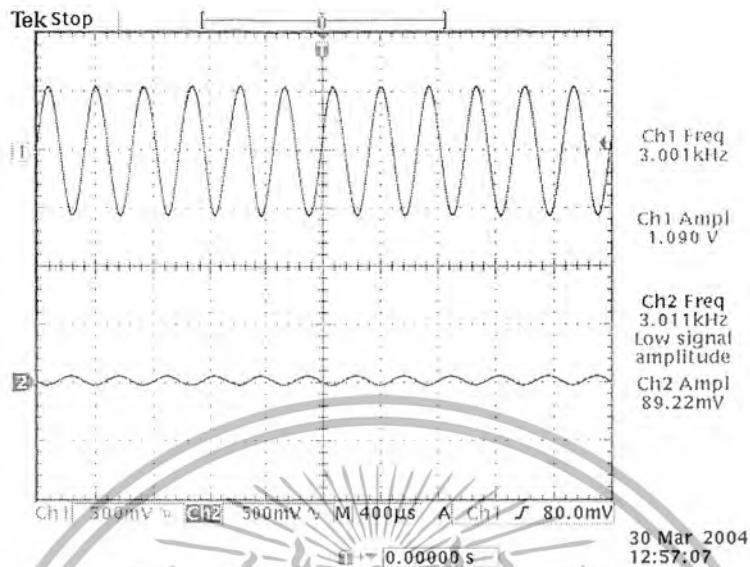


รูปที่ 4.45 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



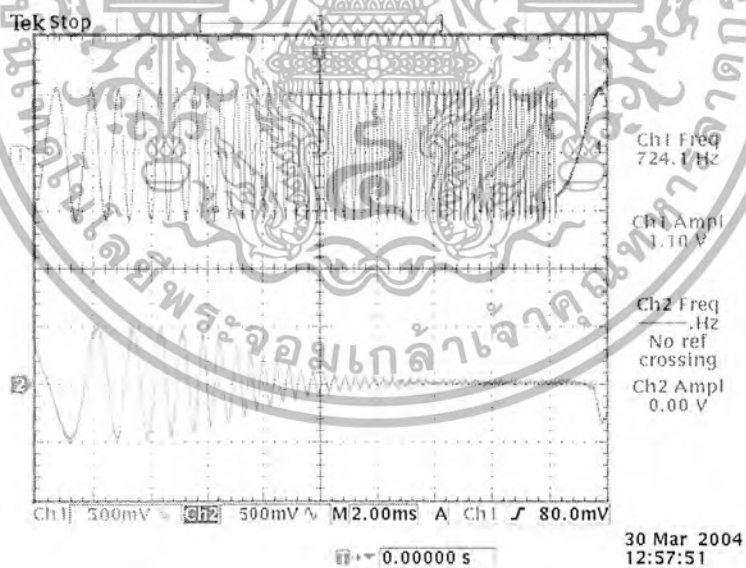
รูปที่ 4.46 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 1.75 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 แสดงผลคอบสนองทางขนาดความถี่เบสแบนด์ 3 kHz

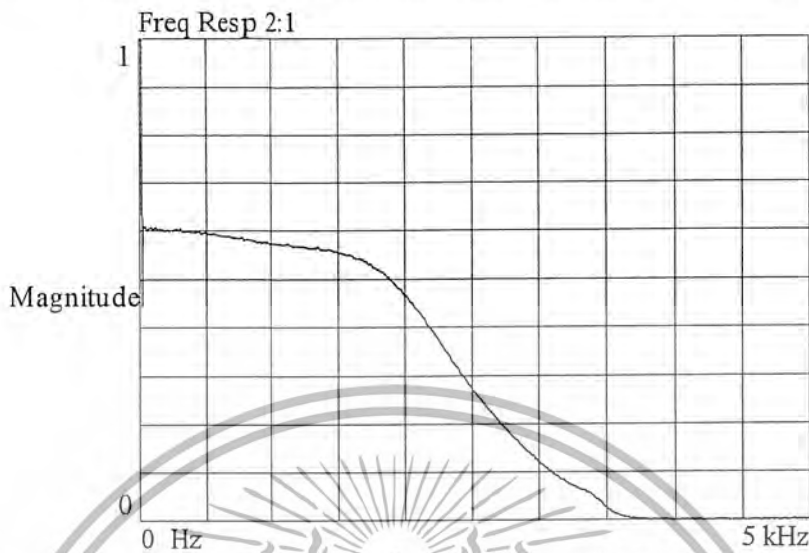
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$



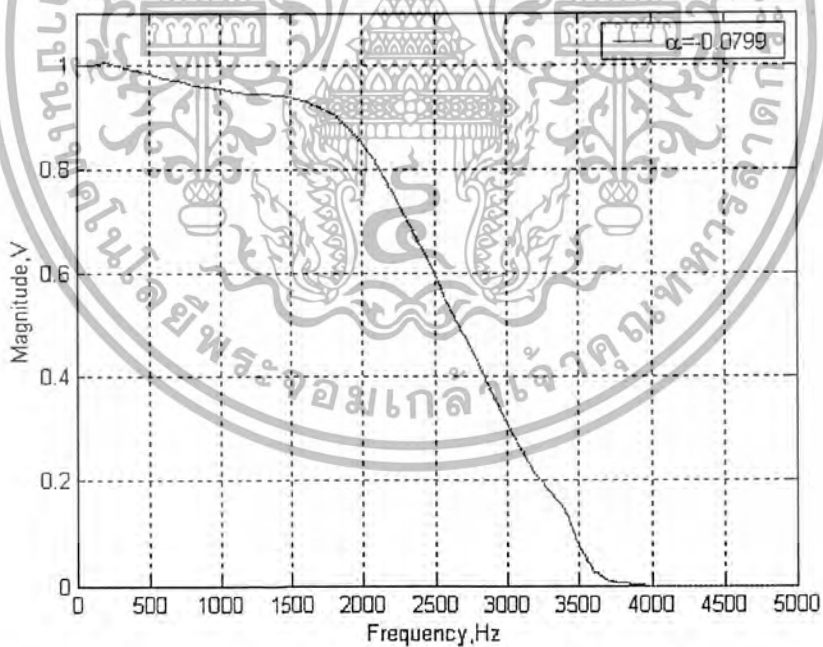
รูปที่ 4.48 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = 0.0843$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4.4 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 จากการวัดจริงที่ค่า $\alpha = -0.0799$



รูปที่ 4.49 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$  จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.50 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$  จากโปรแกรมแมทแล็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$

|            |     |        |        |        |        |       |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600   | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 1.0058 | 0.9968 | 0.9885 | 0.9828 | 0.974 | 0.9709 |

|            |        |        |        |        |       |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200  | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9604 | 0.9579 | 0.9521 | 0.9468 | 0.943 | 0.9431 | 0.9393 |

|            |        |        |        |       |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800  | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.9369 | 0.9314 | 0.9183 | 0.904 | 0.8811 | 0.8504 | 0.8094 |

|            |       |        |        |        |        |        |        |
|------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200  | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.763 | 0.7098 | 0.6535 | 0.5959 | 0.5359 | 0.4795 | 0.4223 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100   | 3200   | 3300   | 3400   | 3500   |
| Mag. (V)   | 0.3653 | 0.3071 | 0.2546 | 0.2103 | 0.1787 | 0.1443 | 0.0754 |

|            |        |        |        |        |      |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600   | 3700   | 3800   | 3900   | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.0271 | 0.0093 | 0.0042 | 0.0021 | 0    | 0    | 0    |

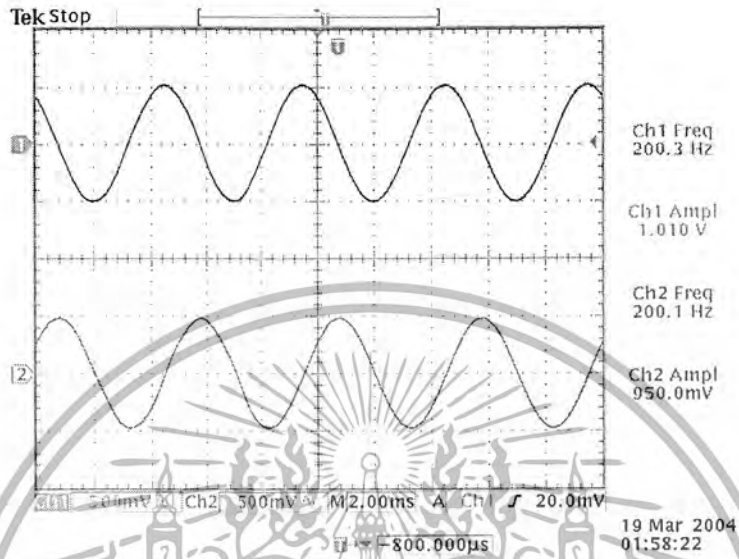
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

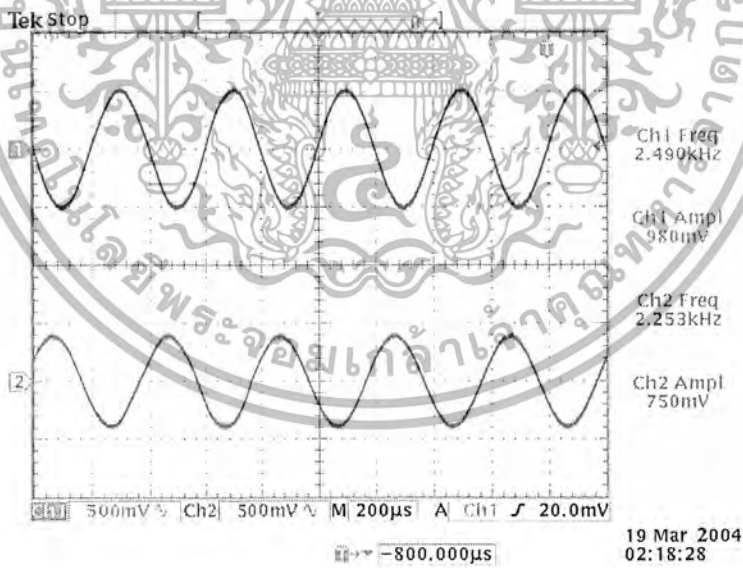
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า

$$\alpha = -0.0799$$

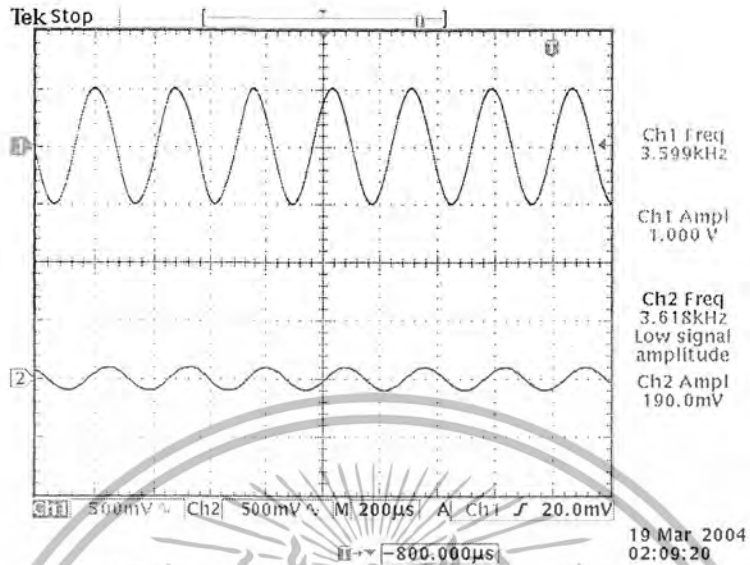


รูปที่ 4.51 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 200 Hz



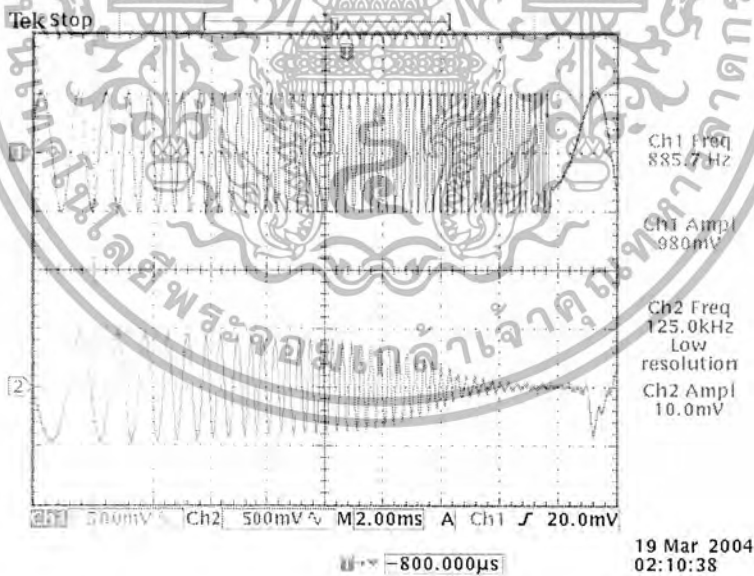
รูปที่ 4.52 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.25 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.53 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 3.6 kHz

ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$

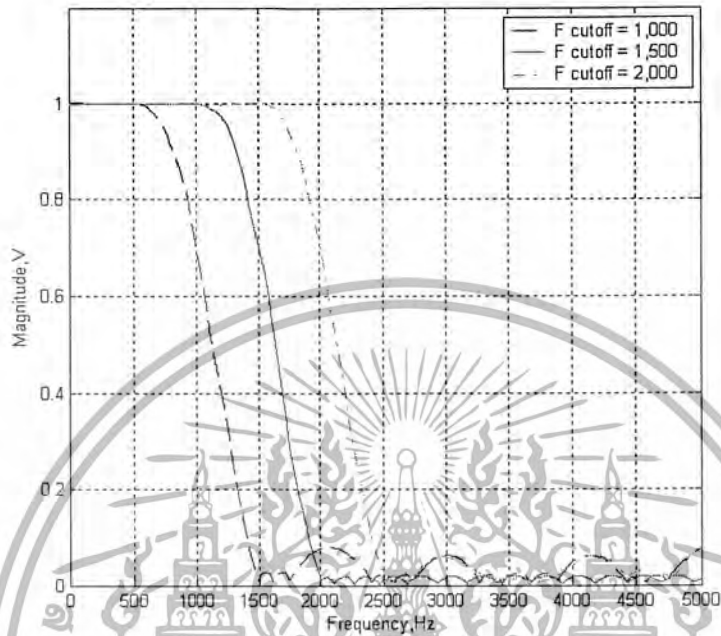


รูปที่ 4.54 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่า  $\alpha = -0.0799$

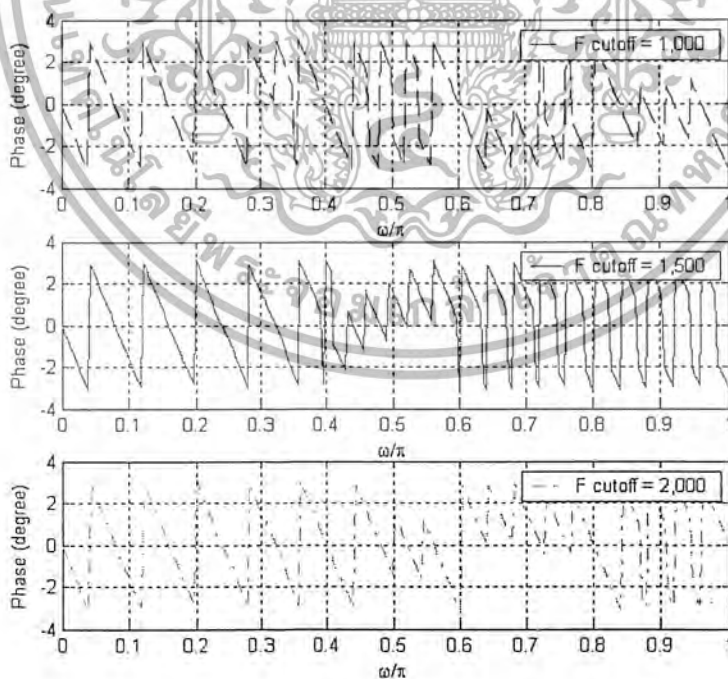
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองของตัวกรองปรับค่าได้แบบซอฟต์แวร์

### 4.2.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการซิมูเลชัน



รูปที่ 4.55 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการซิมูเลชัน

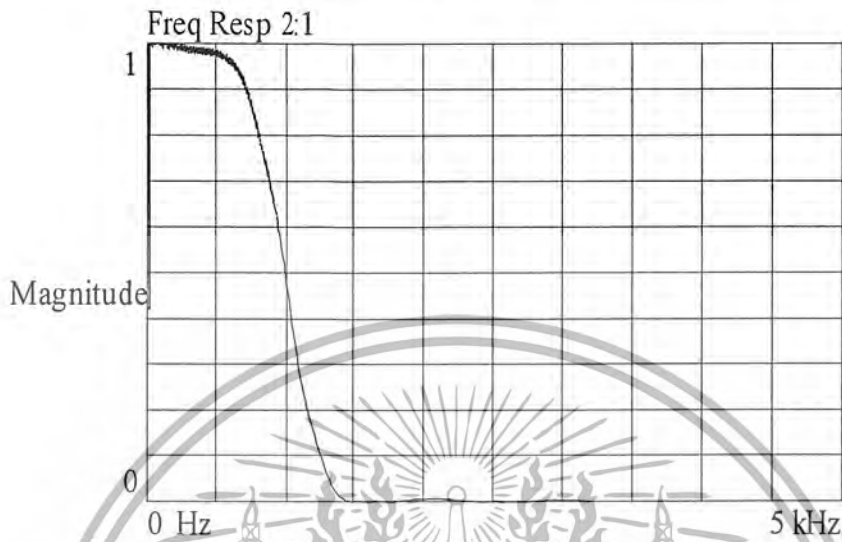


รูปที่ 4.56 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการซิมูเลชัน

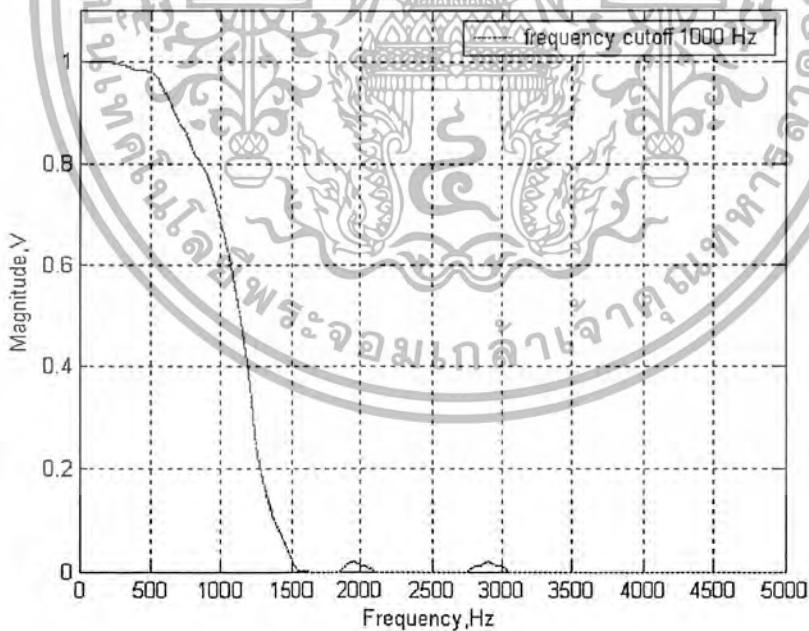
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการวัดจริง

##### 4.2.2.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz



รูปที่ 4.57 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.58 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่ทอพอ 1 kHz

|            |     |       |        |        |        |        |        |
|------------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200   | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.999 | 0.9907 | 0.9842 | 0.9796 | 0.9373 | 0.8841 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.8206 | 0.7754 | 0.6871 | 0.5422 | 0.3607 | 0.1785 | 0.0801 |

|            |        |        |      |      |        |        |      |
|------------|--------|--------|------|------|--------|--------|------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700 | 1800 | 1900   | 2000   | 2100 |
| Mag. (V)   | 0.0202 | 0.0002 | 0    | 0    | 0.0123 | 0.0111 | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |       |
|------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Freq. (Hz) | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 | 2600 | 2700 | 2800  |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0.012 |

|            |        |      |      |      |      |      |      |
|------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000 | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0.0205 | 0.01 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

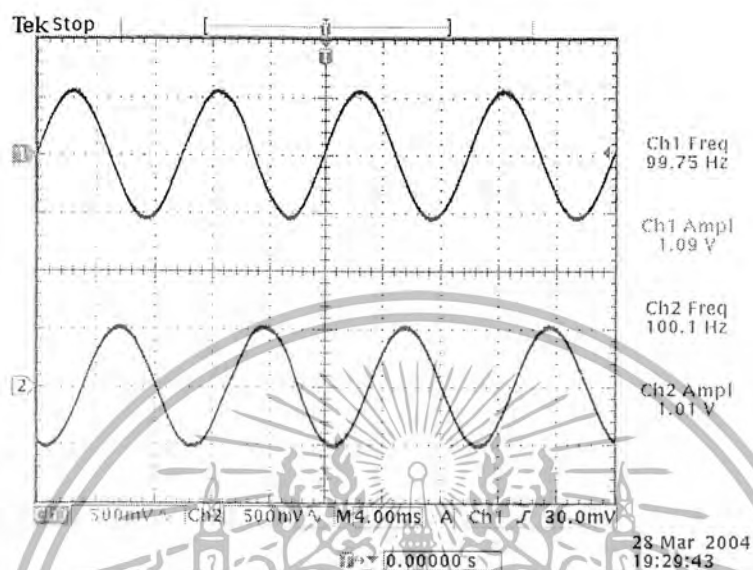
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

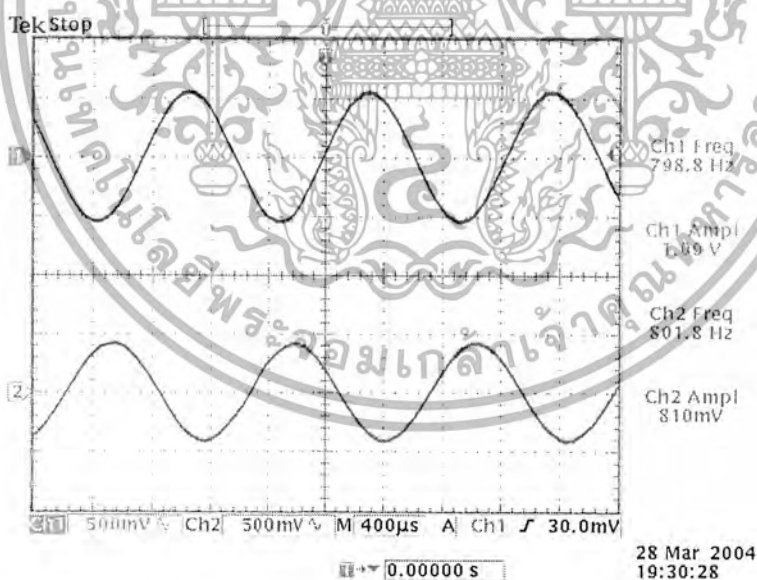
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่  
ค่าความถี่ทอพอ 1 kHz

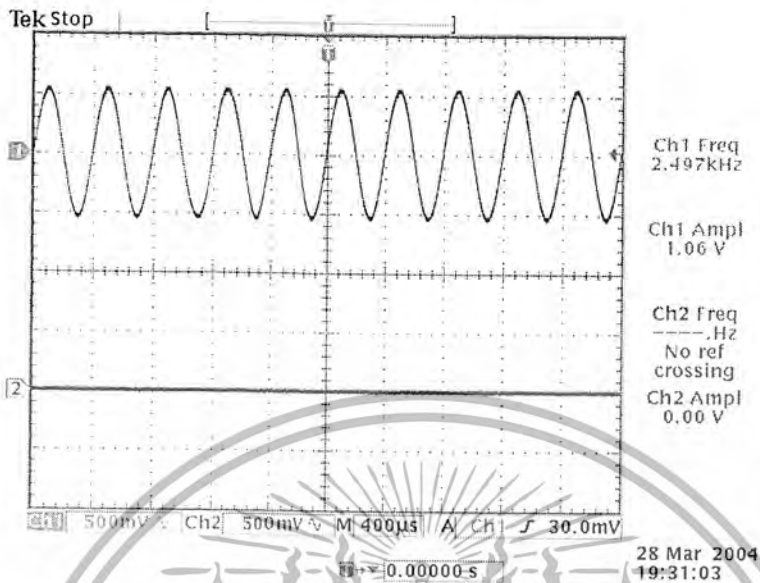


รูปที่ 4.59 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



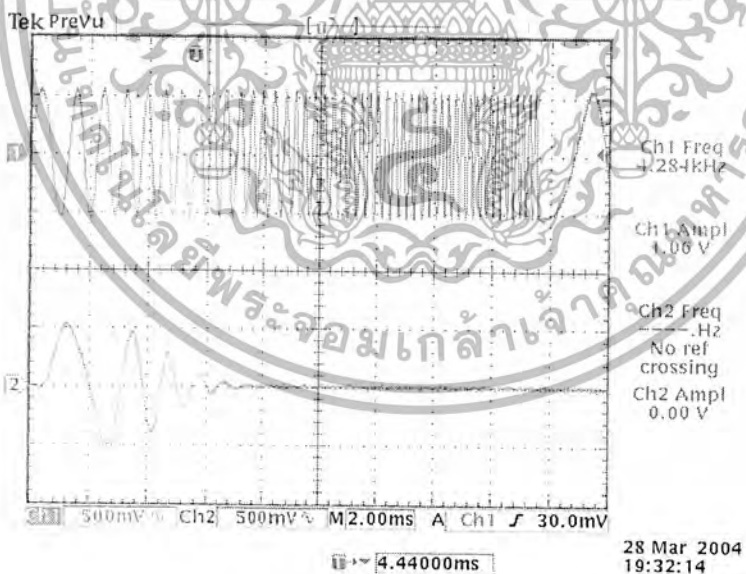
รูปที่ 4.60 แสดงผลตอบสนองของทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz

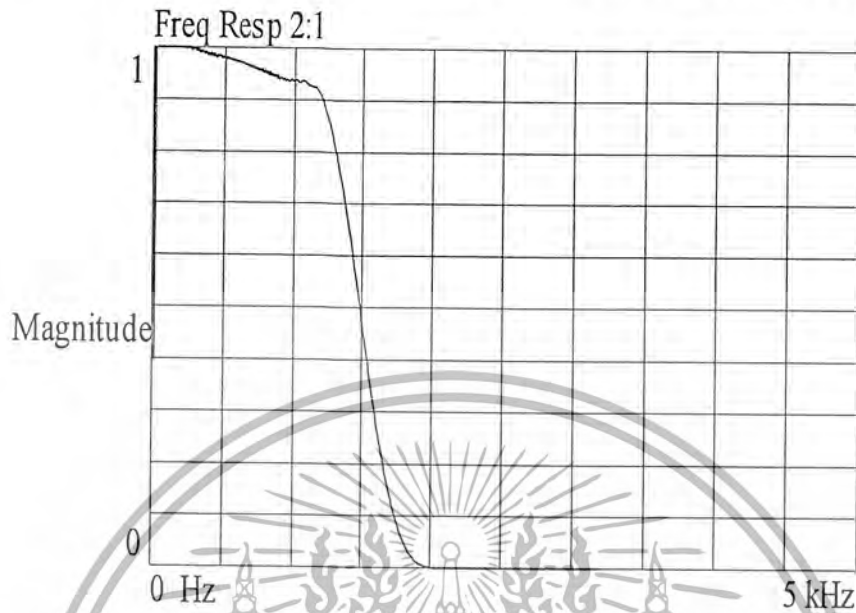
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz



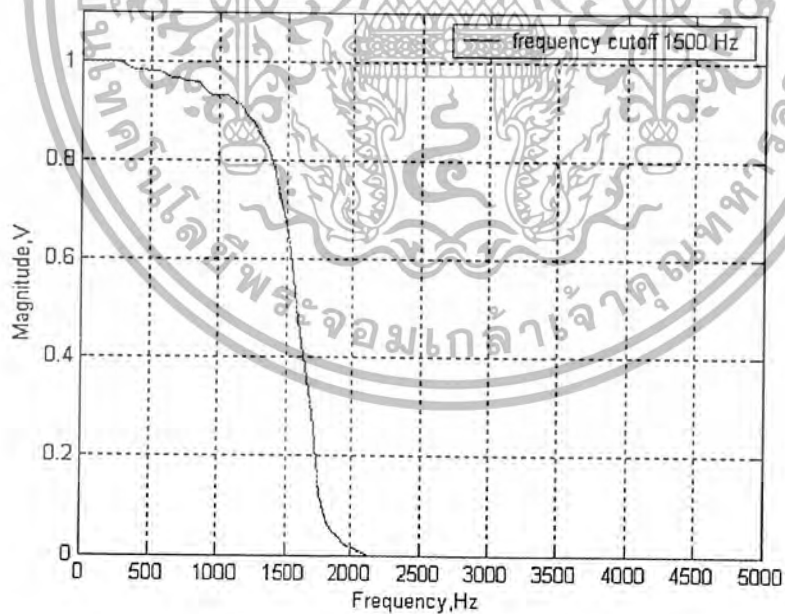
รูปที่ 4.62 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz



รูปที่ 4.63 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.64 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz จากโปรแกรมเมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz

|            |     |     |        |        |        |        |        |
|------------|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200 | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 1   | 0.9965 | 0.9823 | 0.9807 | 0.9767 | 0.9654 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9592 | 0.9401 | 0.9313 | 0.9217 | 0.8941 | 0.8554 | 0.7866 |

|            |        |        |        |        |        |        |       |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100  |
| Mag. (V)   | 0.6672 | 0.4759 | 0.2594 | 0.0707 | 0.0387 | 0.0184 | 0.003 |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 | 2600 | 2700 | 2800 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900 | 3000 | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

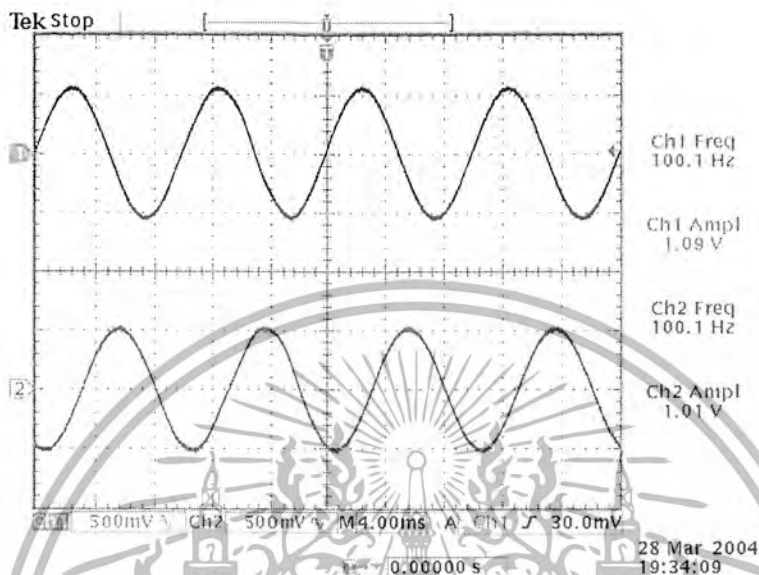
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

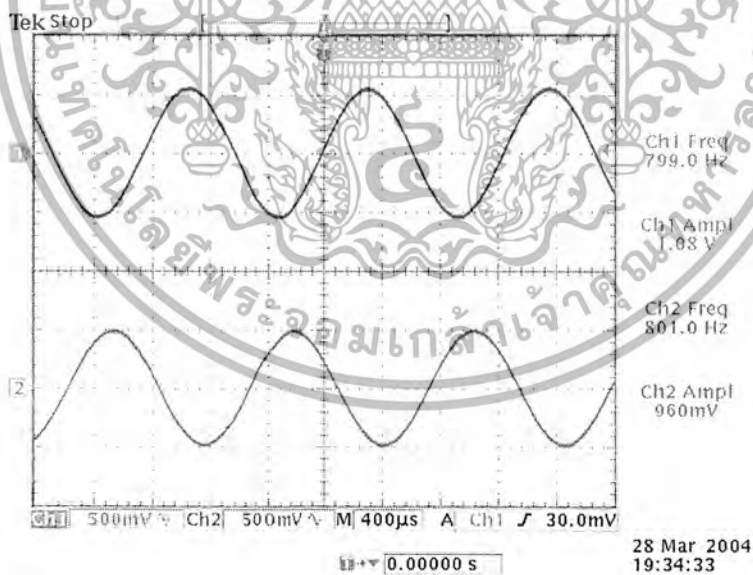
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่ทอพอ 1.5 kHz

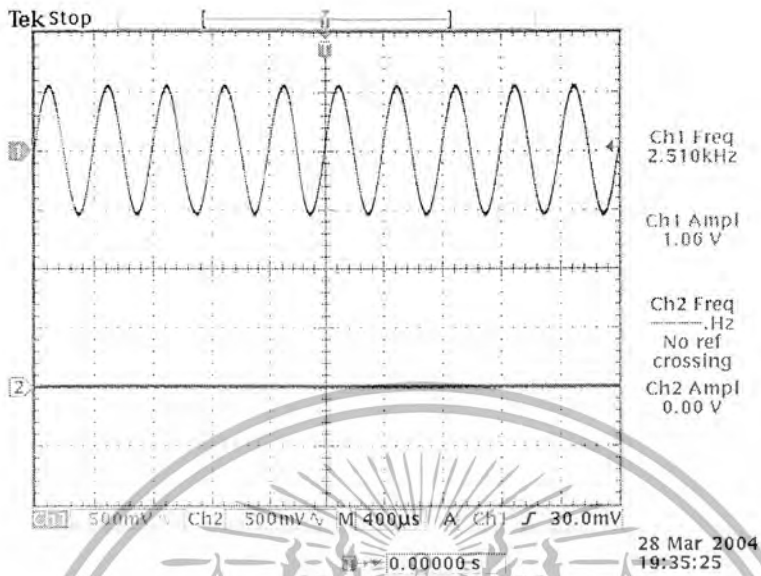


รูปที่ 4.65 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



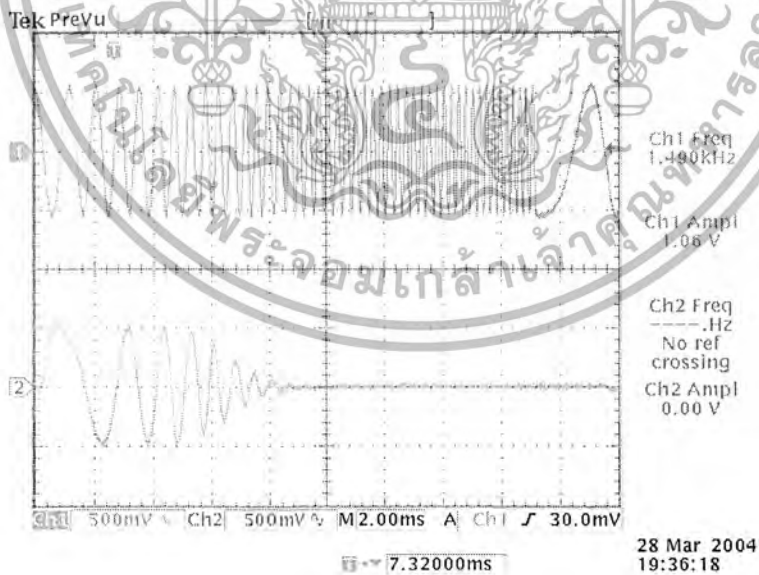
รูปที่ 4.66 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่แบนด์ 2.5 kHz

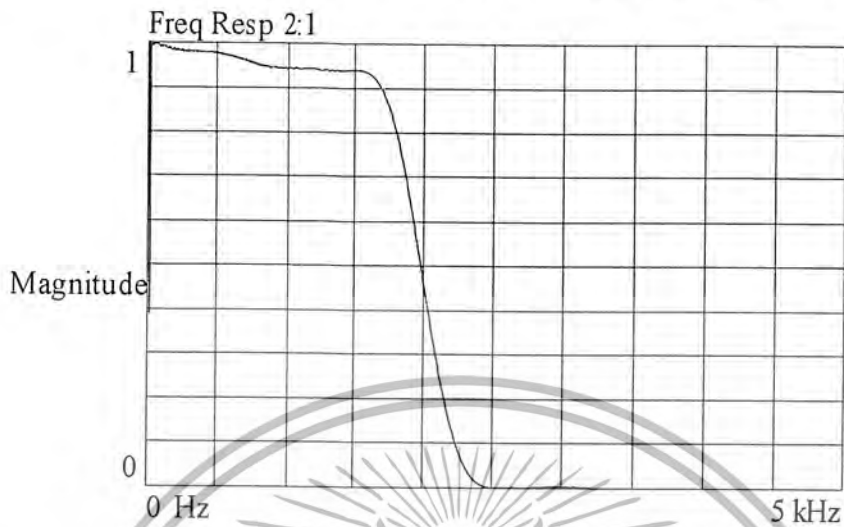
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz



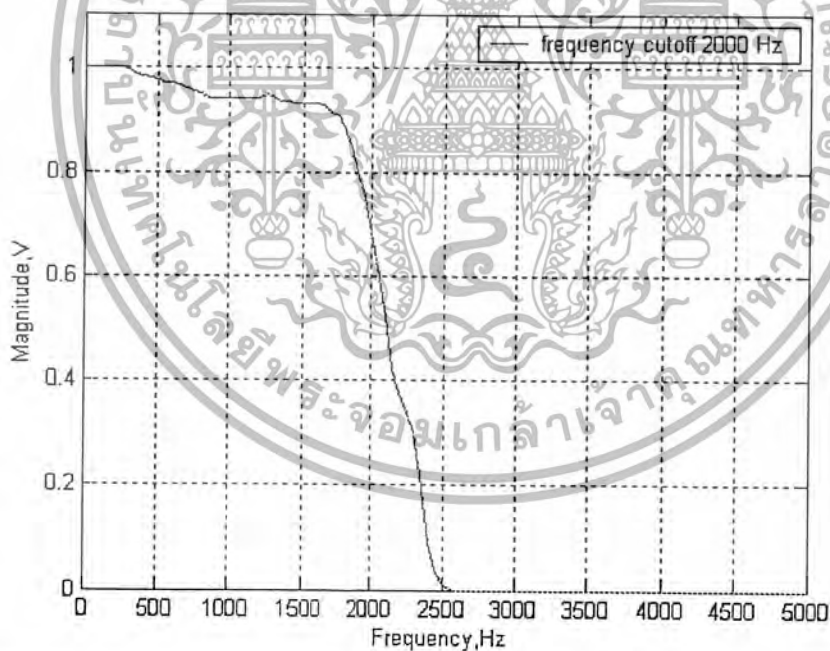
รูปที่ 4.68 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz



รูปที่ 4.69 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.70 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz จากโปรแกรมเมทเพลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9989 | 0.9947 | 0.9842 | 0.9757 | 0.9689 | 0.9585 |

|            |        |      |      |      |      |        |        |
|------------|--------|------|------|------|------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900  | 1000 | 1100 | 1200 | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9517 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.9443 | 0.9336 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.9319 | 0.9301 | 0.9142 | 0.8757 | 0.8023 | 0.6841 | 0.5242 |

|            |        |        |        |        |      |      |      |
|------------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600 | 2700 | 2800 |
| Mag. (V)   | 0.3794 | 0.3012 | 0.0907 | 0.0112 | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900 | 3000 | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

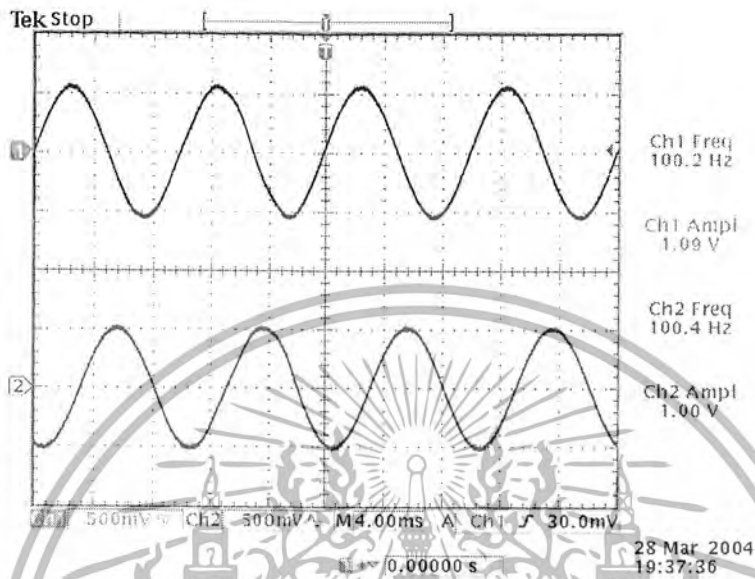
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

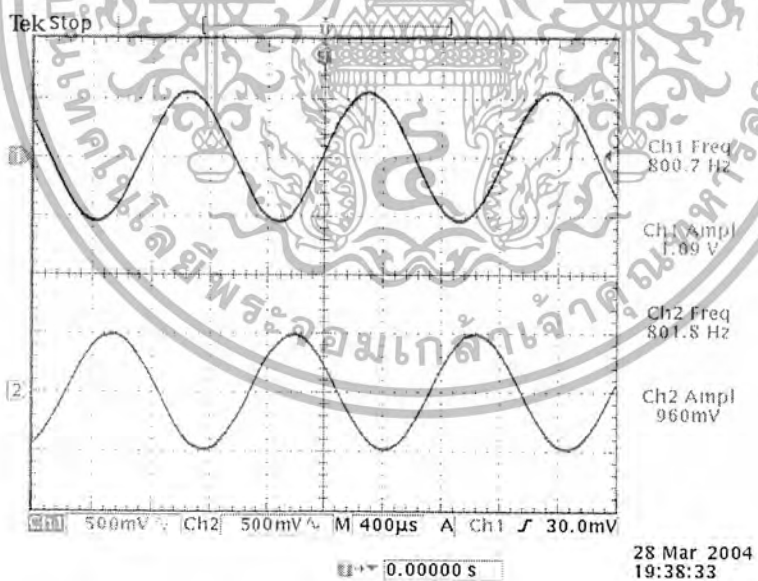
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่  
ค่าความถี่ทอพอ 2 kHz

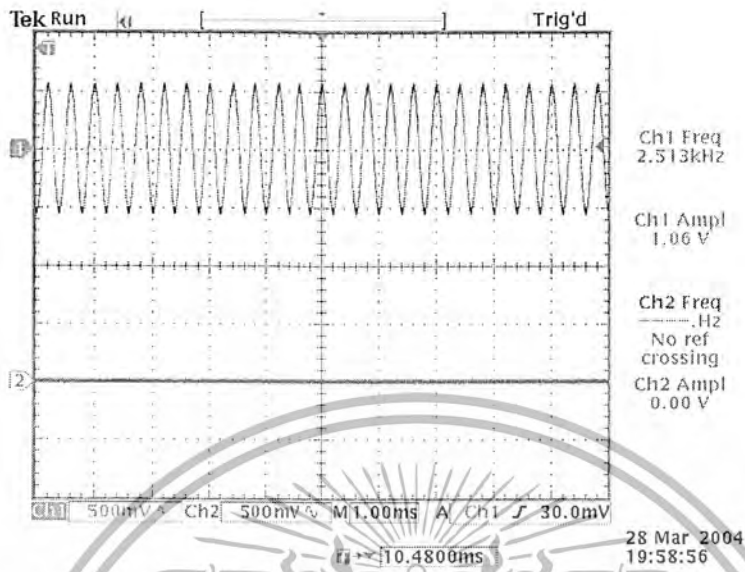


รูปที่ 4.71 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



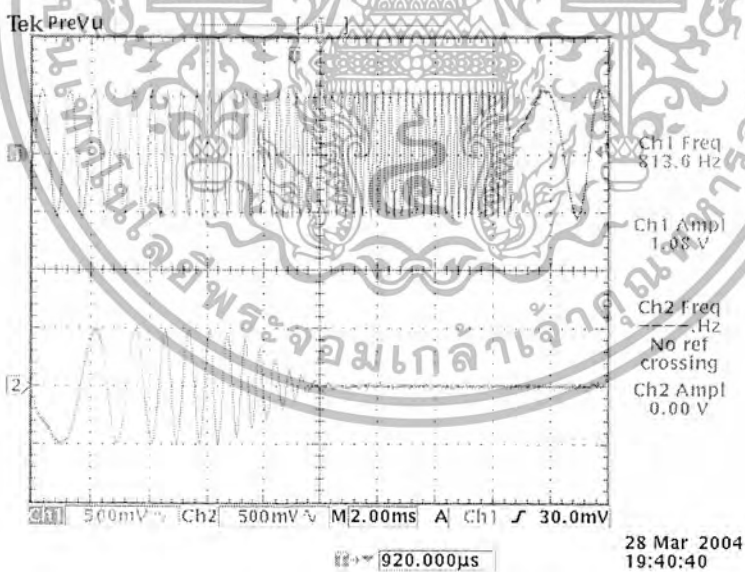
รูปที่ 4.72 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.73 แสดงผลคอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz

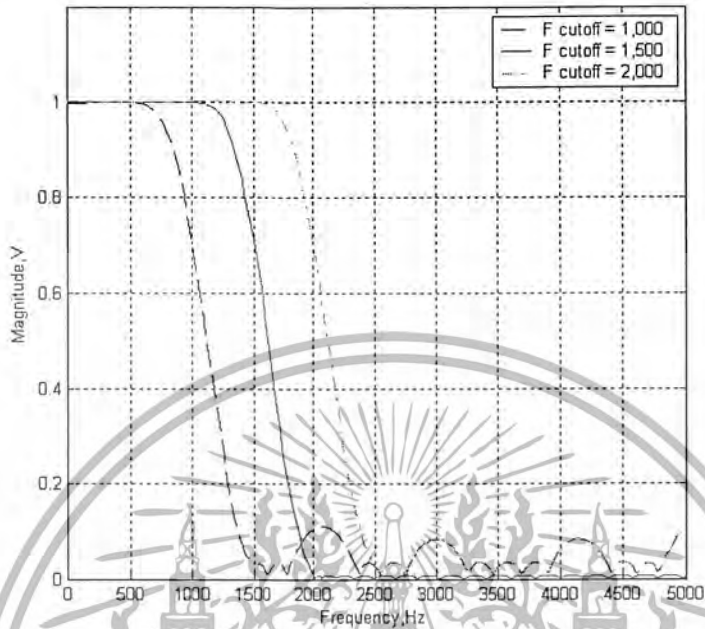
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่ทอพอ 2 kHz



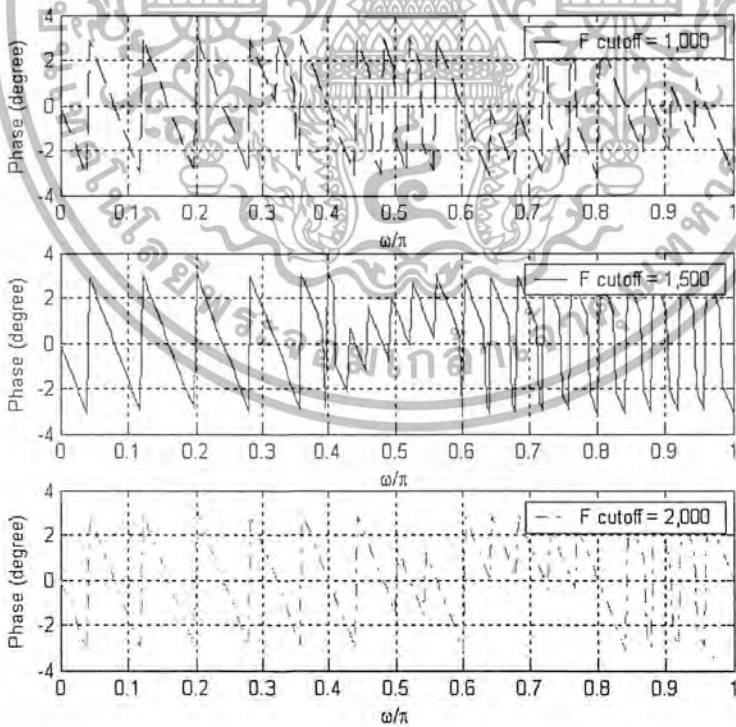
รูปที่ 4.74 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่ทอพอ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการซิมูเลชัน



รูปที่ 4.75 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการซิมูเลชัน

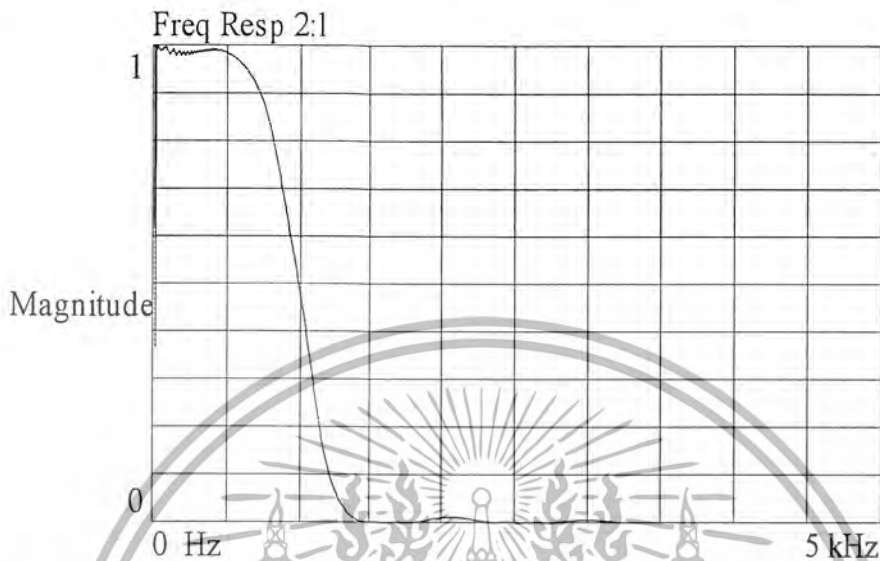


รูปที่ 4.76 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการซิมูเลชัน

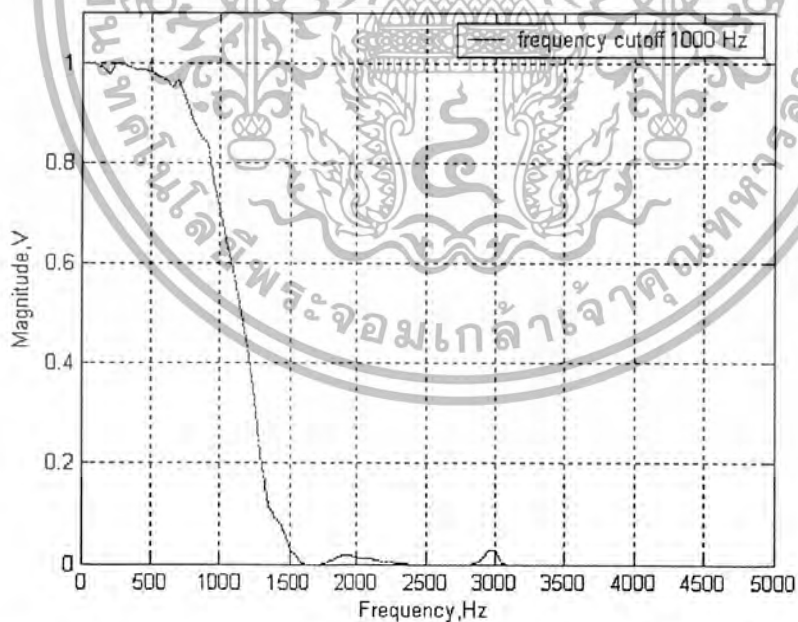
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการวัดจริง

##### 4.2.4.1 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz



รูปที่ 4.77 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.78 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz จากโปรแกรมแมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9775 | 0.9941 | 0.9872 | 0.9841 | 0.9661 | 0.9673 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.8787 | 0.8374 | 0.7121 | 0.5723 | 0.4131 | 0.2165 | 0.0931 |

|            |        |        |      |       |        |        |        |
|------------|--------|--------|------|-------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700 | 1800  | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.0287 | 0.0011 | 0    | 0.007 | 0.0176 | 0.0145 | 0.0125 |

|            |        |        |      |      |      |      |      |
|------------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400 | 2500 | 2600 | 2700 | 2800 |
| Mag. (V)   | 0.0053 | 0.0012 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |        |        |      |      |      |      |      |
|------------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0.0094 | 0.0272 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

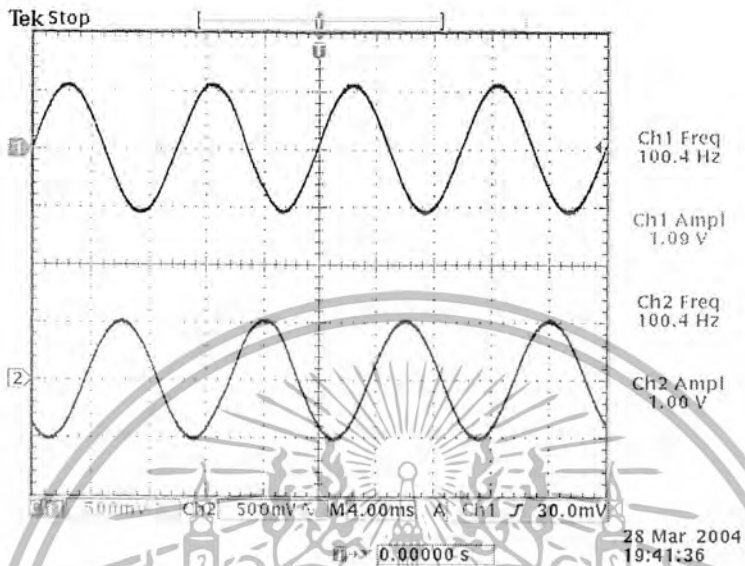
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

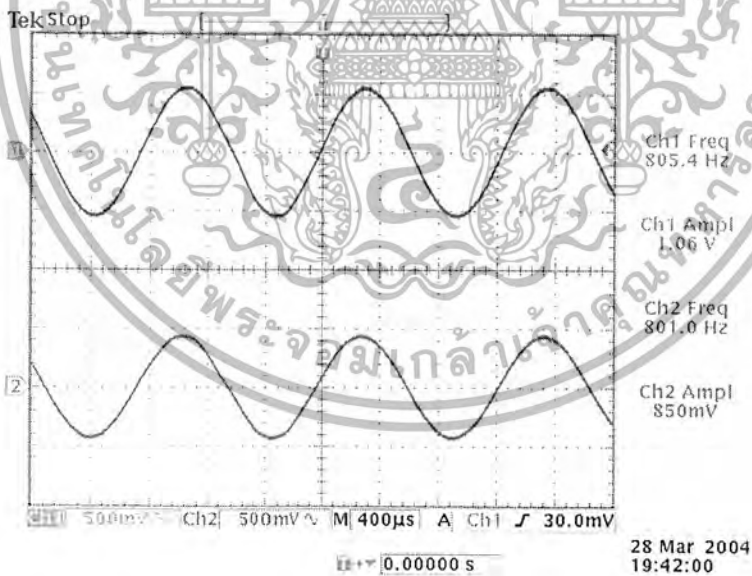
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่ทอพอ 1 kHz

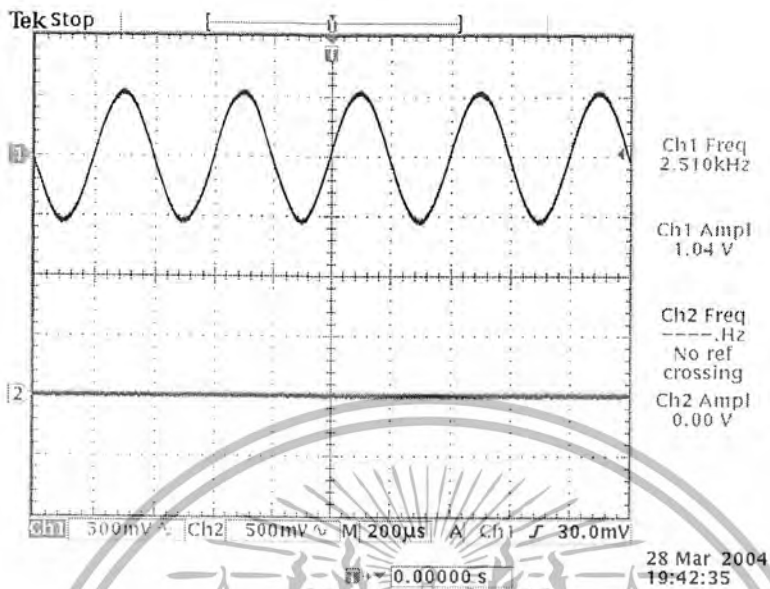


รูปที่ 4.79 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



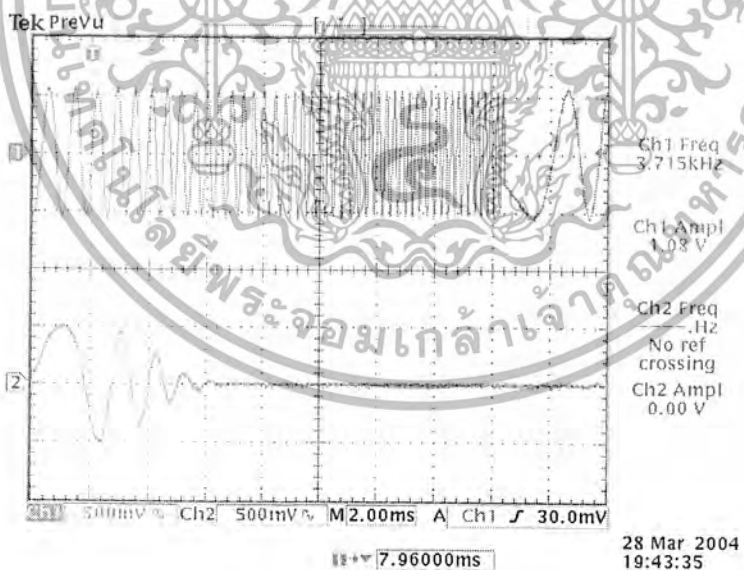
รูปที่ 4.80 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.81 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่แบนด์ 2.5 kHz

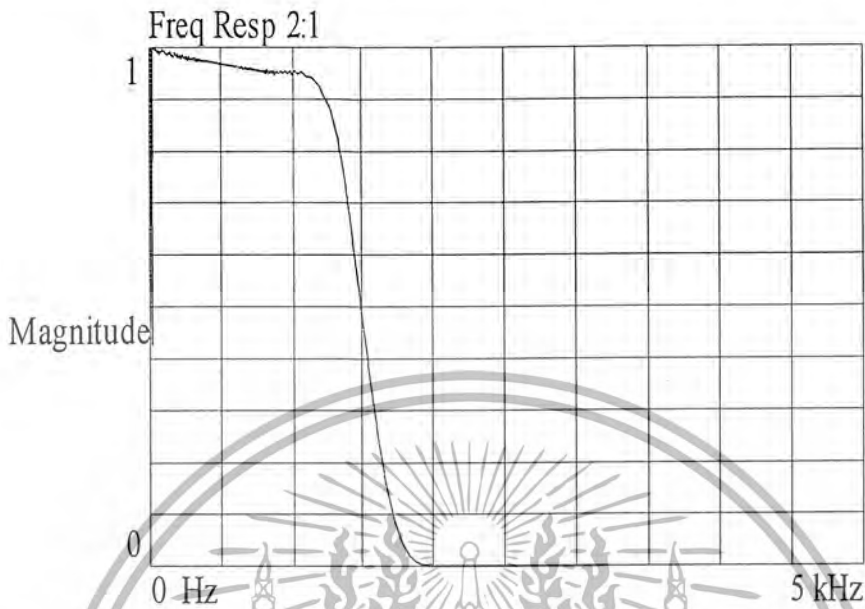
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz



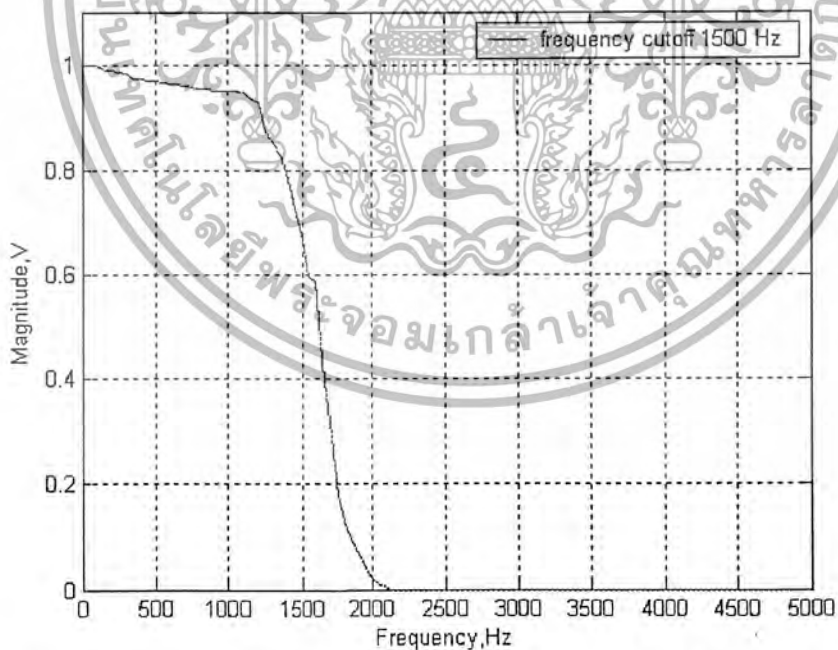
รูปที่ 4.82 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.2 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz



รูปที่ 4.83 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.84 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz

|            |     |        |        |        |        |        |        |
|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100 | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 1   | 0.9887 | 0.9812 | 0.9725 | 0.9687 | 0.9642 | 0.9599 |

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900    | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9541 | 0.9515 | 0.9509 | 0.9488 | 0.9277 | 0.8564 | 0.7842 |

|            |       |       |        |        |        |        |        |
|------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500  | 1600  | 1700   | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.666 | 0.588 | 0.2912 | 0.1191 | 0.0731 | 0.0221 | 0.0012 |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 | 2600 | 2700 | 2800 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900 | 3000 | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

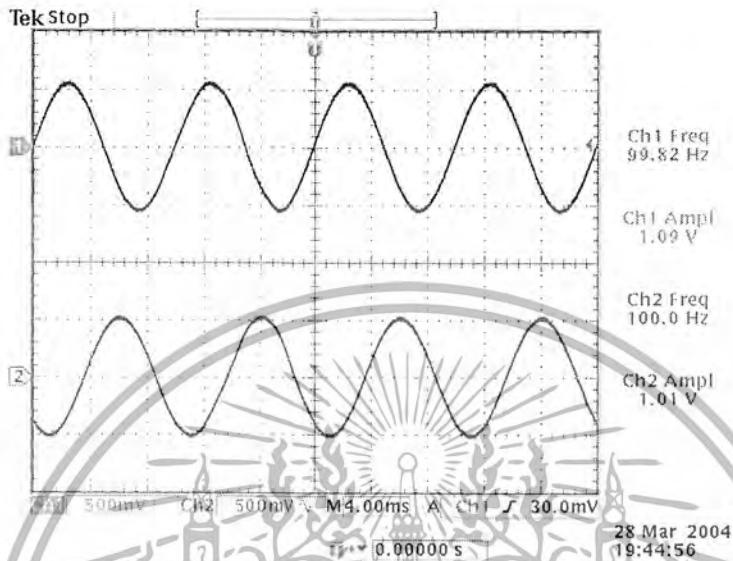
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

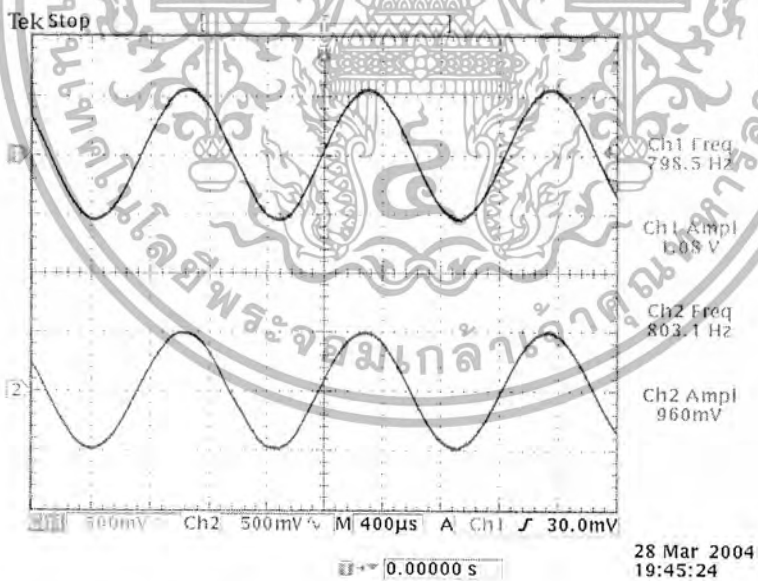
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่  
ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz

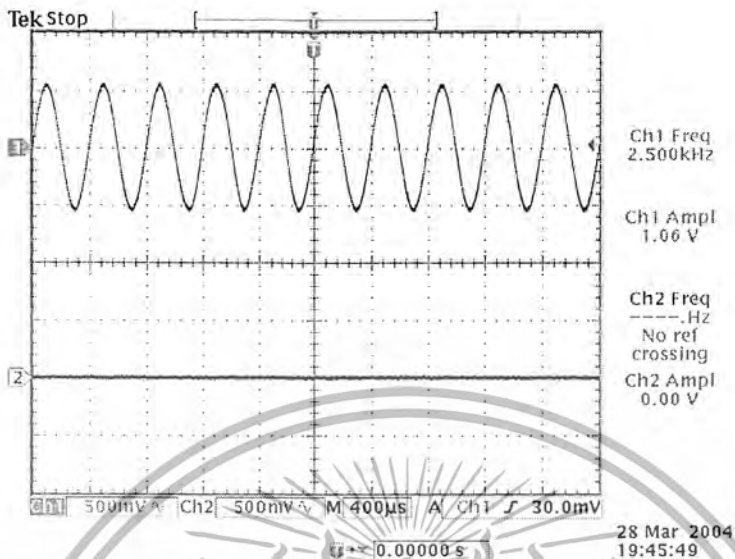


รูปที่ 4.85 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



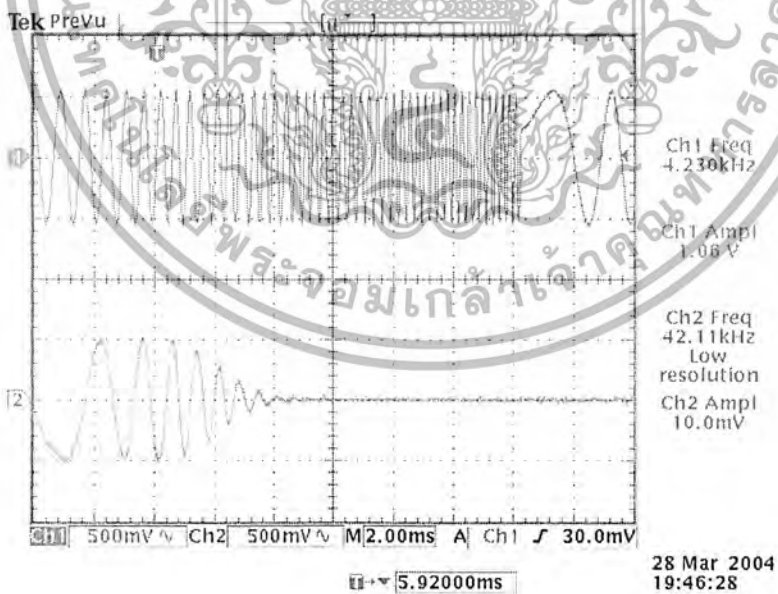
รูปที่ 4.86 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.87 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 2.5 kHz

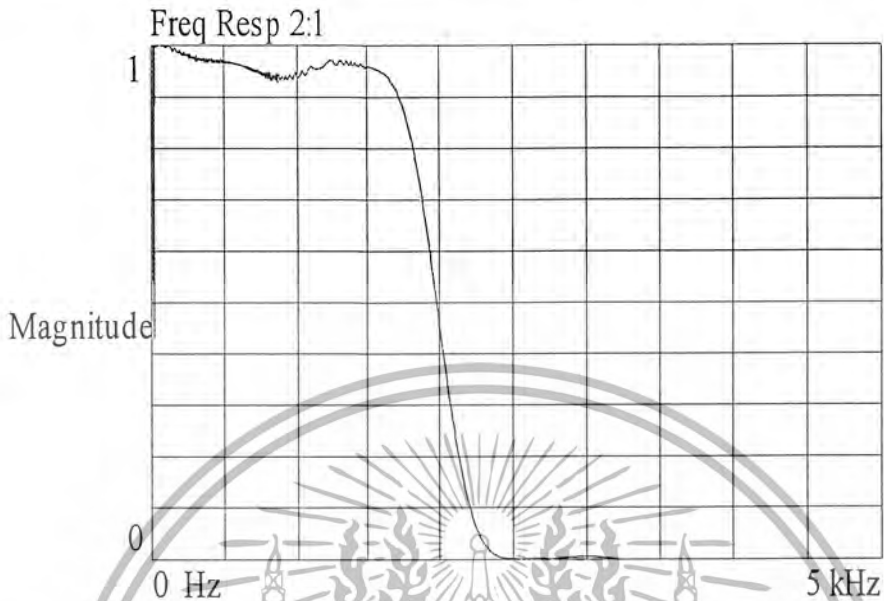
ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz



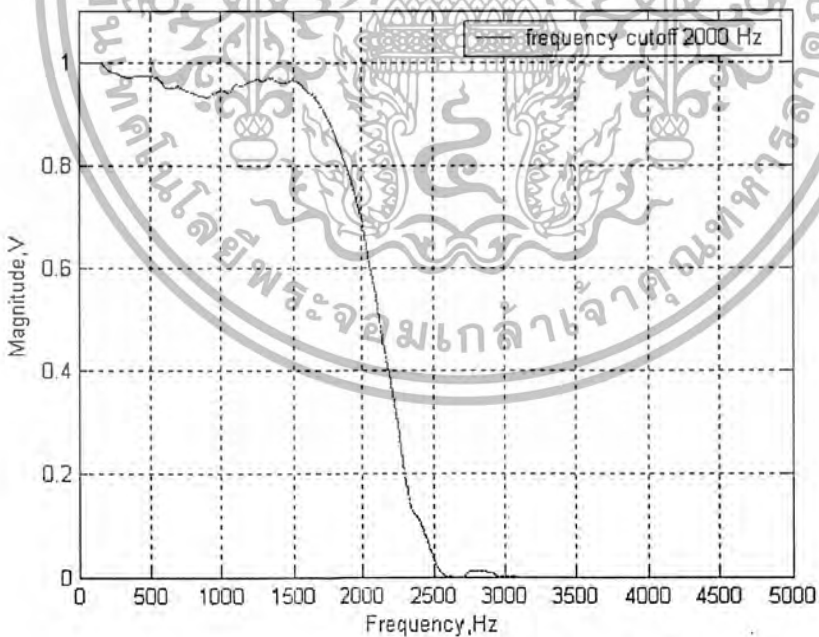
รูปที่ 4.88 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 1.5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.3 ผลการทดลองของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 จากการวัดจริงที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz



รูปที่ 4.89 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิก



รูปที่ 4.90 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz จากโปรแกรมแมทแลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz

|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 100    | 200    | 300    | 400    | 500    | 600    | 700    |
| Mag. (V)   | 0.9999 | 0.9861 | 0.9731 | 0.9732 | 0.9722 | 0.9515 | 0.9533 |

|            |        |       |        |        |        |        |        |
|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 800    | 900   | 1000   | 1100   | 1200   | 1300   | 1400   |
| Mag. (V)   | 0.9408 | 0.932 | 0.9475 | 0.9555 | 0.9622 | 0.9641 | 0.9605 |

|            |        |        |       |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1500   | 1600   | 1700  | 1800   | 1900   | 2000   | 2100   |
| Mag. (V)   | 0.9678 | 0.9463 | 0.913 | 0.8552 | 0.7962 | 0.6982 | 0.5444 |

|            |        |        |        |        |        |      |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--------|
| Freq. (Hz) | 2200   | 2300   | 2400   | 2500   | 2600   | 2700 | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.3936 | 0.2012 | 0.1105 | 0.0301 | 0.0021 | 0    | 0.0125 |

|            |        |        |      |      |      |      |      |
|------------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 2900   | 3000   | 3100 | 3200 | 3300 | 3400 | 3500 |
| Mag. (V)   | 0.0074 | 0.0011 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

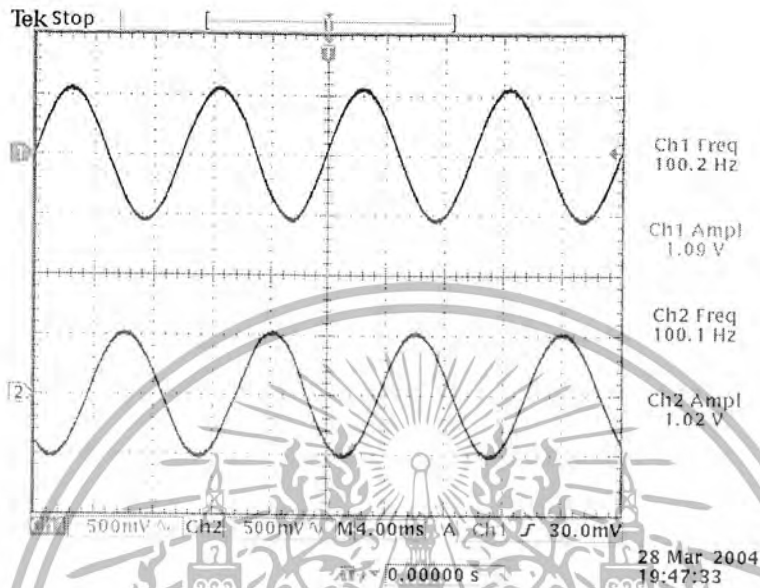
|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4700 | 4800 | 4900 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

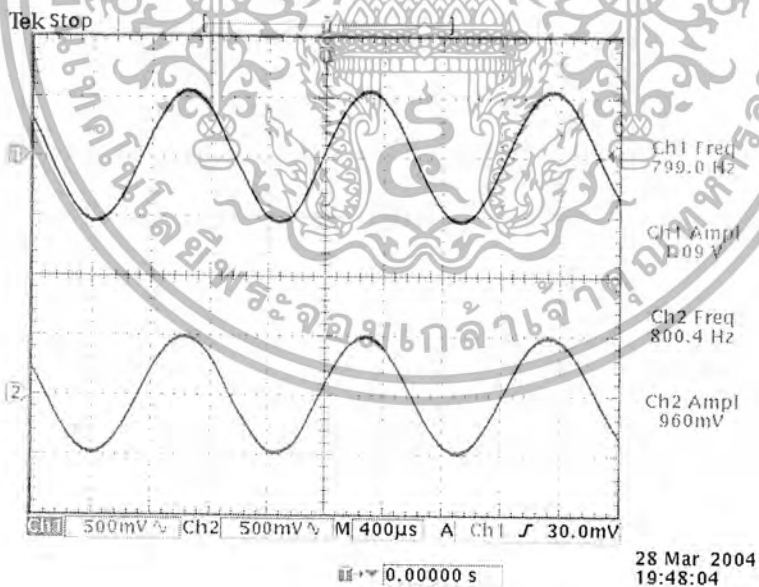
|            |      |
|------------|------|
| Freq. (Hz) | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่  
ค่าความถี่คutoff 2 kHz

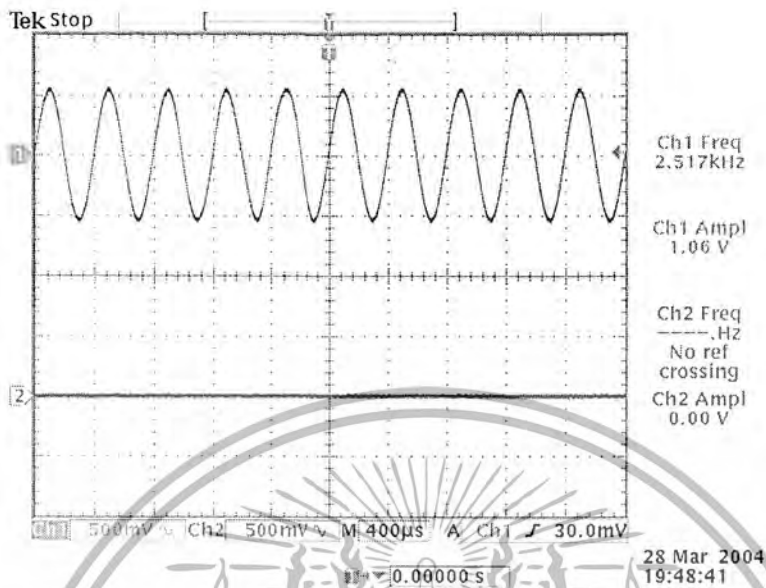


รูปที่ 4.91 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 100 Hz



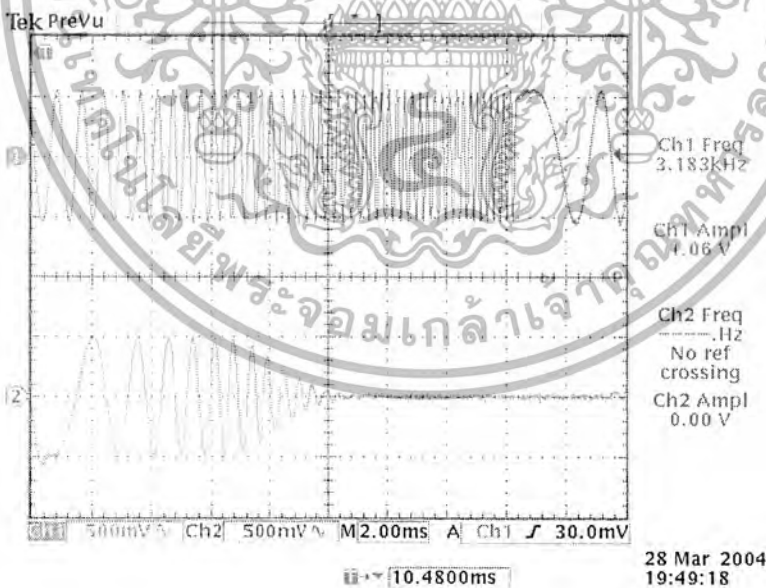
รูปที่ 4.92 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่เบสแบนด์ 800 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.93 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ความถี่แบนด์ 2.5 kHz

ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz



รูปที่ 4.94 แสดงผลการ Sweep ความถี่ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

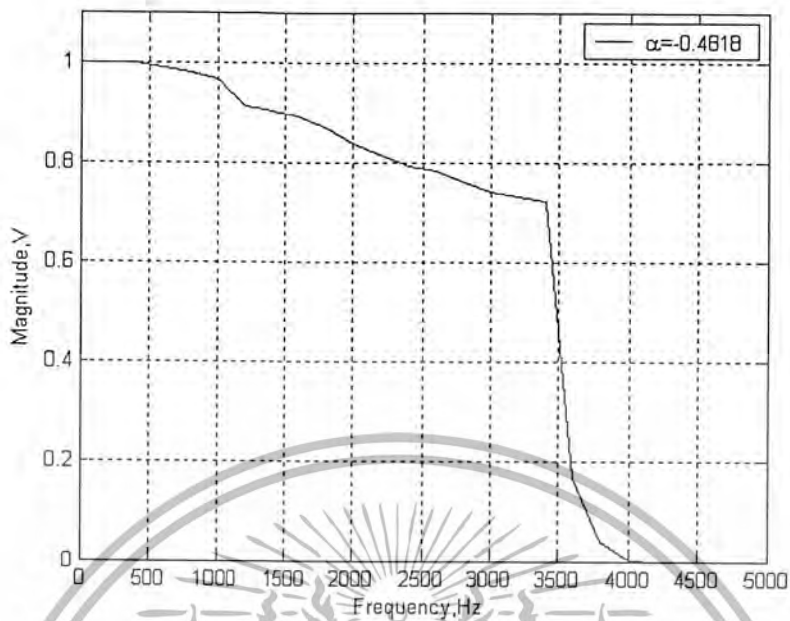
บทที่ 5  
บทวิจารณ์และบทสรุป

จากการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์ นั้นจะต้องทำการจัดสมการฟังก์ชันถ่ายโอน ต้นแบบของตัวกรองความถี่นั้นๆให้อยู่ในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอนออลพาสก่อน หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการแปลงสเปกตรัลทรานส์ฟอร์มเมชัน (spectral transformation) เพื่อทำการปรับค่าความถี่คัทออฟใหม่ ไปที่ความถี่ที่ต้องการ โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้มาใหม่ ยังคงมีคุณสมบัติตามเดิมไว้อยู่ ดังที่ได้ แสดงไว้ในส่วนผลการทดลอง ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าตัวพารามิเตอร์  $\alpha$  ที่ใช้ปรับค่าความถี่คัทออฟนั้น ไม่มีผลต่อคุณลักษณะเดิมของตัวกรองเลย นอกจากเพียงแค่เปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟเท่านั้น

ส่วนการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไอโออาร์สามารถทำได้โดยใช้วิธีการจัดรูปสมการ จนได้ค่าสมการฟังก์ชันถ่ายโอนค่าใหม่ที่มีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนต้นแบบอยู่ด้วย และผลการทดลองจะ เห็นได้ว่าค่าแถบความถี่เปลี่ยน แถบความถี่หยุด แถบความถี่ผ่าน ยังคงลักษณะคุณสมบัติตามเดิมเอาไว้ ซึ่งทำให้เราทราบได้ว่าการเปลี่ยนโดยพารามิเตอร์  $\omega_c$  หรือคือ ค่าความถี่คัทออฟใหม่นั้น ไม่มีผลต่อ คุณลักษณะเดิมของตัวกรองเลย นอกจากเพียงแค่เปลี่ยน ค่าความถี่คัทออฟ เท่านั้น

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบและการทดลองคือ เมื่อทำการออกแบบค่าความถี่คัทออฟ ตั้งแต่ 3.5 kHz ขึ้นไปแล้วนำไปเขียน โปรแกรมเพื่อวัดผล ค่าความถี่คัทออฟที่วัดได้จาก ออสซิลโลสโคป จะไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากภายในตัวบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 มีตัวกรอง รีคอนสตรัคชัน (reconstruction filter) ซึ่งคุณสมบัติของตัวกรองรีคอนสตรัคชัน (reconstruction filter) จะมี ค่าความถี่คัทออฟ 3.5 kHz โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ดังนี้

ผลการทดลองจากการทำการออกแบบตัวกรองปรับค่าได้ที่มีความถี่ที่ออฟ 3.6 kHz



รูปที่ 5.1 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่ที่ออฟ 3.6 kHz จากโปรแกรมแมทแล็บ

ตารางแสดงค่าความถี่และค่าแอมพลิจูดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่ที่ออฟ 3.6 kHz

|            |     |     |        |        |        |        |       |
|------------|-----|-----|--------|--------|--------|--------|-------|
| Freq. (Hz) | 200 | 400 | 600    | 800    | 1000   | 1200   | 1400  |
| Mag. (V)   | 1   | 1   | 0.9891 | 0.9782 | 0.9673 | 0.9433 | 0.913 |

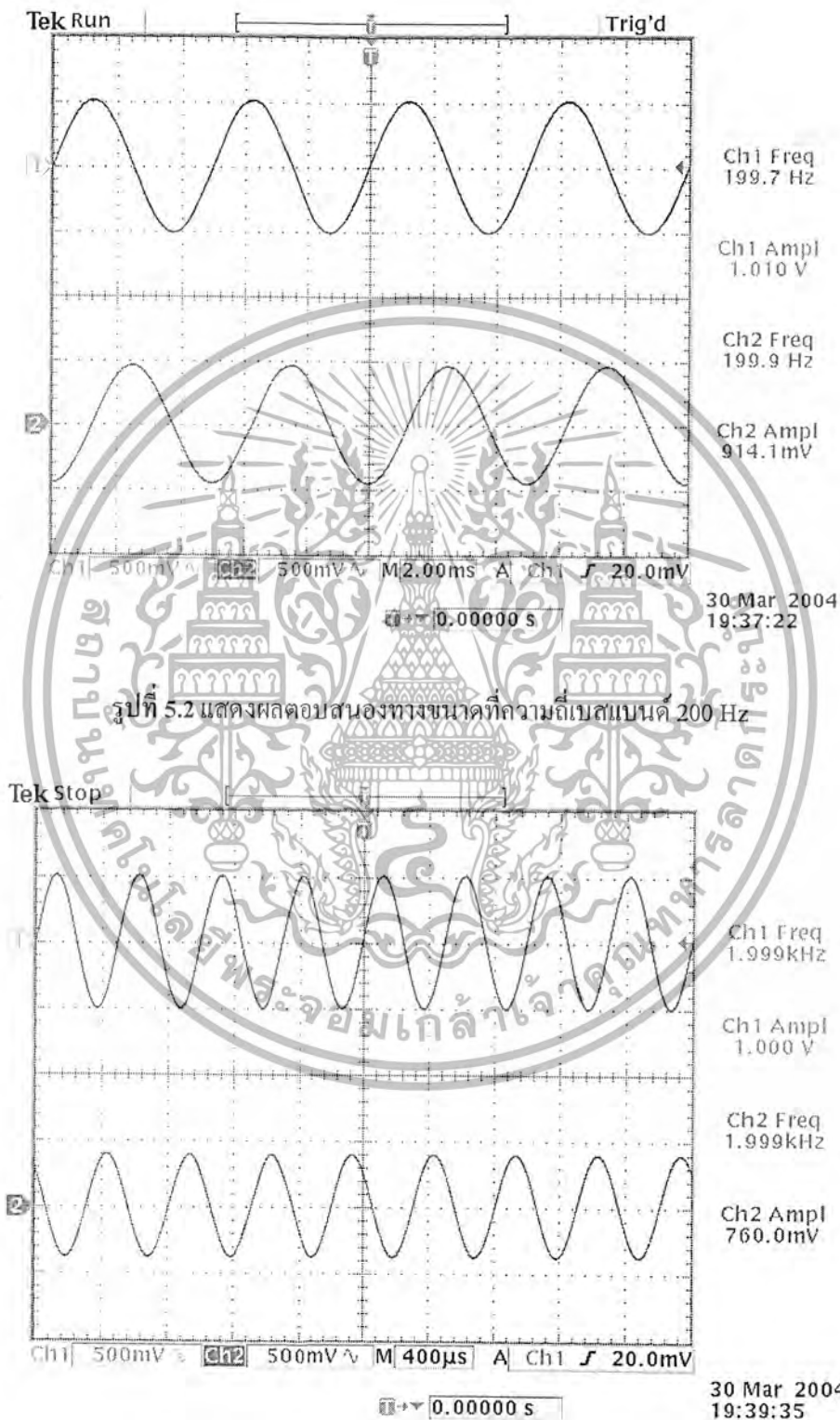
|            |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Freq. (Hz) | 1600   | 1800   | 2000   | 2200   | 2400   | 2600   | 2800   |
| Mag. (V)   | 0.8913 | 0.8695 | 0.8369 | 0.8152 | 0.7934 | 0.7826 | 0.7782 |

|            |        |        |        |       |        |        |      |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------|
| Freq. (Hz) | 3000   | 3200   | 3400   | 3600  | 3800   | 4000   | 4200 |
| Mag. (V)   | 0.7562 | 0.7453 | 0.7292 | 0.168 | 0.0402 | 0.0021 | 0    |

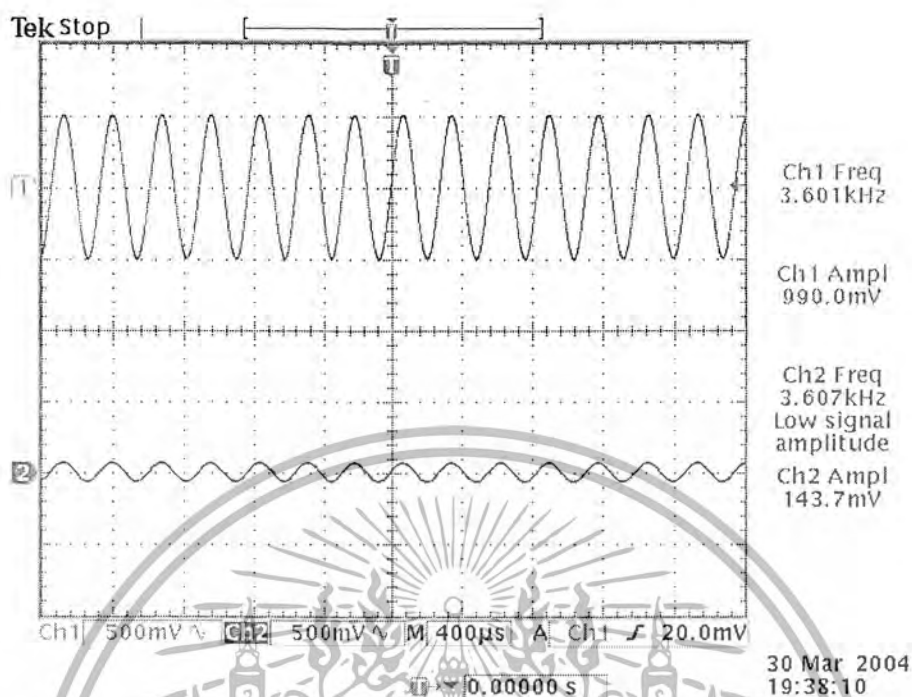
|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| Freq. (Hz) | 4400 | 4600 | 4800 | 5000 |
| Mag. (V)   | 0    | 0    | 0    | 0    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองแสดงการกรองสัญญาณที่ความถี่เบสแบนด์ต่างๆของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ความถี่คัทออฟ 3.6 kHz

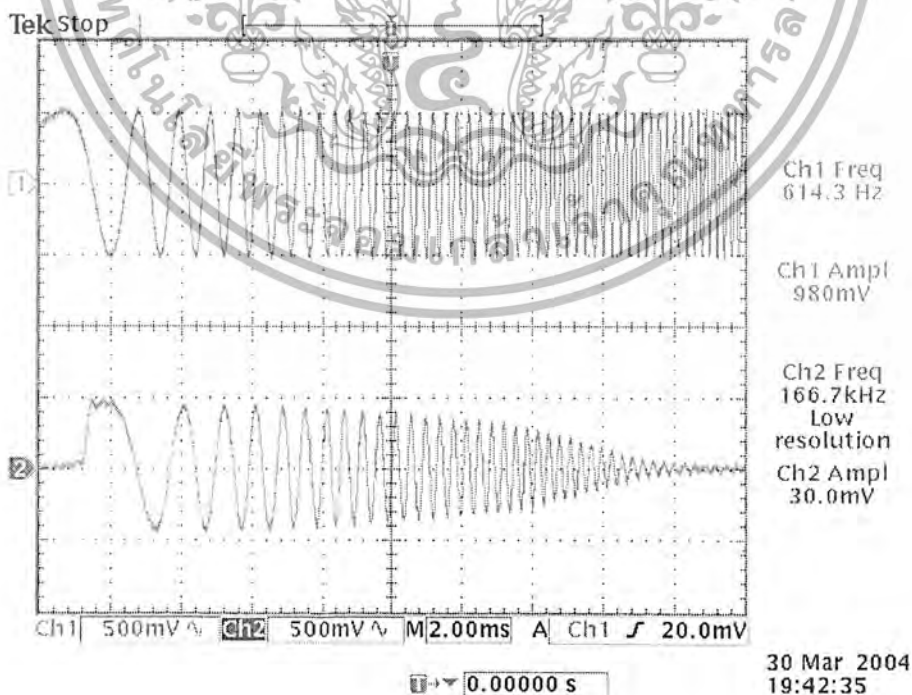


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงผลคลื่นสองทางขนาดที่ความถี่แบนด์ 3.6 kHz

ผลการทดลองแสดงการ Sweep ความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คutoff 3.6 kHz



รูปที่ 5.5 แสดงผลการ Sweep ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คutoff 3.6 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก. โปรแกรมแม่ทแยงที่ใช้จิมูเลขชั้นตัวกรองปรับค่าได้แบบไอไออาร์

```
clear
format long g
n=input('this is order');

if n<2
    dnop=input('this is type filter low or high: ','s');
    Fc=input('this is prototype frequency cut-off');
    Fs=input('this is sampling frequency');
    Wc=(2*Fc)/Fs;
    type=lower(dnop);
switch type
case 'low'
    [r,p,k]=butter(1,Wc,type);
    a1=[1 -p(1)];
    w=-pi:0.01:pi;
    Fn=input('this is desire frequency cut-off');
    Wn=(2*Fn)/Fs;
    alpha=(sin(((Wc*pi)-(Wn*pi))/2))/(sin(((Wc*pi)+(Wn*pi))/2))
    an1=a1(2)-(1-a1(2)*a1(2))*alpha;
    a1=[1 an1]
    h1=freqz(fliplr(a1),a1,w);
    s=0.5*(1+h1);
    mag=abs(s);
case 'high'
    [r,p,k]=butter(1,Wc,type);
    a1=[1 -p(1)];
    w=-pi:0.01:pi;
    Fn=input('this is desire frequency cut-off');
    Wn=(2*Fn)/Fs;
    alpha=(sin(((Wc*pi)-(Wn*pi))/2))/(sin(((Wc*pi)+(Wn*pi))/2))
    an1=a1(2)-(1-a1(2)*a1(2))*alpha;
    a1=[1 an1];
    h1=freqz(fliplr(a1),a1,w);
    s=0.5*(1-h1);
    mag=abs(s);
otherwise
    display('You have not enter a proper choice.')
end
fs=(Fs*w)/(pi*2);
plot(fs,mag);
grid;
axis([0 Fs/2 0 1.2]);
xlabel('Frequency,Hz');
ylabel('Magnitude,V');
```

```
elseif n<4
    dnop=input('this is type filter low or high: ','s');
    Fc=input('this is prototype frequency cut-off');
    Fs=input('this is sampling frequency');
    type=lower(dnop);
    Wc=(2*Fc)/Fs;
switch type
case 'low'
    [r,p,k]=butter(3,Wc,type);
    b1=conv([1 -p(1)],[1 -p(2)]);
    b2=[1 -p(3)];
    w=-pi:0.01:pi;
    Fn=input('this is desire frequency cut-off');
    Wn=(2*Fn)/Fs;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

alpha=(sin((Wc*pi)-(Wn*pi))/2))/(sin((Wc*pi)+(Wn*pi))/2)
bn1=b1(2)+(b1(2)*b1(2)-2*(1+b1(3)))*alpha;
bn2=b1(3)+(b1(3)-1)*b1(2)*alpha;
g=b2(2)-(1-b2(2)*b2(2))*alpha;
b1=[1 bn1 bn2]
b2=[1 g]
h1=freqz(fliplr(b1),b1,w);
h2=freqz(fliplr(b2),b2,w);
s=0.5*(h1+h2);
mag=abs(s);
case 'high'
[r,p,k]=butter(3,Wc,type);
b1=conv([1 -p(1)],[1 -p(2)]);
b2=[1 -p(3)];
w=-pi:0.01:pi;
Fn=input('this is desire frequency cut-off');
Wn=(2*Fn)/Fs;
alpha=(sin((Wc*pi)-(Wn*pi))/2))/(sin((Wc*pi)+(Wn*pi))/2)
bn1=b1(2)+(b1(2)*b1(2)-2*(1+b1(3)))*alpha;
bn2=b1(3)+(b1(3)-1)*b1(2)*alpha;
g=b2(2)-(1-b2(2)*b2(2))*alpha;
b1=[1 bn1 bn2]
b2=[1 g]
h1=freqz(fliplr(b1),b1,w);
h2=freqz(fliplr(b2),b2,w);
s=0.5*(h1-h2);
mag=abs(s);
otherwise
display('You have not enter a proper choice. ')
end
fs=(Fs*w)/(pi*2);
plot(fs,mag);
grid;
axis([0 Fs/2 0 1.2]);
xlabel('Frequency,Hz');
ylabel('Magnitude,V');

else
n>3;
display('It is not implementation because a filter structure have
a cascade realization');
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข. โปรแกรมแมทแลบที่ใช้ข้อมูลชั้นตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์

```
clear
format long g
disp('<<< this program desire for test tunable FIR filter >>>');
disp(' .....');
disp(' input Length must be odd number and must between 5 to 111');
N=input('this is Length >>> ');
if N < 112
    dnop=input('this is type filter low or high: ','s');
    sam=input('this is sampling frequency 10146 or 20161.29 >>> ');
    disp('prototype frequency cut-off should not under 1000 Hz ');
    fc=input('this is prototype frequency cut-off >>> ');
    disp(' .....');
    type=lower(dnop);
    switch type
    case 'low'
        w=0:pi/255:pi;
        fs=fc+500;
        fp=fc-500;
        fj1=input('this is desire for first frequency cut-off >>> ');
        fj2=input('this is desire for second frequency cut-off >>> ');
        j1=(2*fj1)/sam;
        j2=(2*fj2)/sam;
        x=N-1;
        ws=(2*fs)/sam;
        wp=(2*fp)/sam;
        wc=(2*fc)/sam;
        f=[0 wp ws 1];m=[1 1 0 0];
        b1=remez(x,f,m);
        h1=freqz(b1,1,w);
        m1=sqrt(abs(h1));
        y=x/2;
        z=y+1;
        n=-(y):-1;
        c=b1(1:y) ./sin(wc*pi*n);
        wc2=[j1*pi j2*pi];
        for i=1:2
            d=c.*sin(wc2(i)*n);
            q=(b1(z)*wc2(i))/(wc*pi);
            b2=[d q fliplr(d)];
            mag(i,:)=sqrt(abs(freqz(b2,1,w)));
        end
        b=[b2];
        a=[1];
        fre = 1000;
        [G1,F1] = freqz(b,a,fre,fs);
        Hm1=abs(G1);
        disp(' float H[N] = { ')
        fprintf(' %.12f, %.12f, %.12f, %.12f, \n',b2)
        disp('}');
    case 'high'
        w=0:pi/255:pi;
        fs=fc-500;
        fp=fc+500;
        fj1=input('this is desire for first frequency cut-off ');
        fj2=input('this is desire for second frequency cut-off ');
        j1=(2*fj1)/sam;
        j2=(2*fj2)/sam;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x=N-1;
ws=(2*fs)/sam;
wp=(2*fp)/sam;
wc=(2*fc)/sam;
w=0:pi/255:pi;
f=[0 ws wp 1];m=[0 0 1 1];
b1=remez(x,f,m);
h1=freqz(b1,1,w);
m1=sqrt(abs(h1));
y=x/2;
z=y+1;
n=-(y):-1;
c=b1(1:y)./sin(wc*pi*n);
wc2=[j1*pi j2*pi];
for i=1:2
    d=c.*(sin(wc2(i)*n));
    q=1-((1-(b1(z)))*wc2(i))/(wc*pi);
    b2=[d q fliplr(d)];
    mag(i,:)=sqrt(abs(freqz(b2,1,w)));
    b=[b2];
a=[1];
fre = 1000;
[G1,F1] = freqz(b,a,fre,fs);
Hm1=abs(G1);
disp(' float H[N] = { ')
fprintf(' %.12f, %.12f, %.12f, %.12f, \n',b2)
disp('}');
end
otherwise
    display('You have not enter a proper choice. ');
end
j = (sam*w)/(2*pi);
plot(j,mag(1,:), 'b-',j,m1, 'r-',j,mag(2,:), 'g-');
grid;
axis([0 sam/2 0 1,2]);
xlabel('Frequency(Hz)');ylabel('Magnitute,V');
b=[b1];
a=[1];
fre = 1000;
[G1,F1] = freqz(b,a,fre,fs);
Hm1=abs(G1);
disp(' float H[N] = { ')
fprintf(' %.12f, %.12f, %.12f, %.12f, \n',b1)
disp('}');
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.โปรแกรมซึ่งใช้ในการทดสอบการนำสัญญาณเข้าออก

;IO.ASM - NORMAL INPUT OUTPUT TESTING ROUTINE

```
.start ".text",0x809900 ;where text begins
.start ".data",0x809C00 ;where data begins
.include "AICCOM31.ASM" ;AIC communications routines

.data ;assemble into data section
*-----COMMUNICATION ROUTINE VARIABLE-----*
AICSEC .word 0A14h,1h,3E7Eh,073h;For AIC,Fs = 20161.29 kHz

.entry BEGIN ;start of code
.text ;assemble into text section
BEGIN LDP AICSEC
CALL AICSET ;initialize AIC

RUN CALL IOPRI ;get input sample from PRIMARY
IN

FLOAT R6,R4 ;transfer input sample into R3
FIX R4,R7 ;R7 = R4 in integer and output

* CALL IOAUX ;get desired sample from
AUXILARY IN
* FLOAT R6,R5 ;transfer desired sample into
R4
* FIX R5,R7 ;R7 = R5 in integer and output
BR RUN ;repeat with next sample
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข. โปรแกรมตัวกรองปรับค่าได้แบบไอโออาร์

- โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototype_cut_freq 2000.0 /*prototype cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 1500.0 /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,y21=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=x0;
        y20=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*x0+x1;
        y21=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*y21;
        x1=x0;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototype_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คutoff 1.75 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototype_cut_freq 2000.0 /*prototype cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 1750.0 /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,y21=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=x0;
        y20=(-0.167666240820168+a*{(-0.167666240820168*-
0.167666240820168)-1})*x0+x1;
        -(-0.167666240820168+a*{(-0.167666240820168*-
0.167666240820168)-1})*y21;
        x1=x0;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototype_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c"           /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h"             /*math library function */
#define sample_freq 10146                 /*sample frequency */
#define prototype_cut_freq 2000.0         /*prototype cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265                     /*constant pi*/
```

```
/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 2000.0           /*desired cut-off frequency*/
```

```
int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/
```

```
void lowpass(float a)
```

```
{
    int result,x0;                          /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,y21=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=x0;
        y20=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*x0+x1
        -(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*y21;
        x1=x0;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}
```

```
}
main()
```

```
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a;           /*declare variables*/
    AICSET();                               /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototype_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a);                             /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2.25 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c"           /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h"             /*math library function */
#define sample_freq 10146                /*sample frequency */
#define prototype_cut_freq 2000.0        /*prototype cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265                    /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 2250.0          /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0;                          /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,y21=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=x0;
        y20=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*x0+x1
        -((-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*y21;
        x1=x0;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a;           /*declare variables*/
    AICSET();                               /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototype_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a);                             /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototyle_cut_freq 2000.0 /*prototyle cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 1500.0 /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,x2=0.1,y11=0.1,y21=0.1,y22=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*x0+x1
            -((-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*y11;
        y20=(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1)))*x0
            +(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648)))*
            (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764))*x1+x2
            -((-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648)))*
            (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764))*y21
            -((0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1)))*y22;
        x2=x1;
        x1=x0;
        y11=y10;
        y22=y21;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototyle_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.75 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototyle_cut_freq 2000.0 /*prototyle cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 1750.0 /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,x2=0.1,y11=0.1,y21=0.1,y22=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*x0+x1
            -(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*y11;
        y20=(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1))*x0
            +(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))+
            (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))
            *x1+x2
            -(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))+
            (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))
            *y21
            - (0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1))*y22;
        x2=x1;
        x1=x0;
        y11=y10;
        y22=y21;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototyle_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototyle_cut_freq 2000.0 /*prototyle cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/

/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
#define desired_cut_freq 2000.0 /*desired cut-off frequency*/

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/

void lowpass(float a)
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
    float x1=0.1,x2=0.1,y11=0.1,y21=0.1,y22=0.1,y10,y20,y1;
    while(1)
    {
        x0=UPDATE_SAMPLE(result);
        y10=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*x0+x1
            -(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
            0.167666240820168)-1))*y11;
        y20=(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1))*x0
            +(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))
            +(a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))
            *x1+x2
            -(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))
            +(a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))
            *y21
            -(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
            *(0.35808976559648-1))*y22;
        x2=x1;
        x1=x0;
        y11=y10;
        y22=y21;
        y21=y20;
        y1=k*(y10+y20);
        result = (int)(y1);
    }
}

main()
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototyle_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่คutoff 2.25 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
#define sample_freq 10146 /*sample frequency */
#define prototyle_cut_freq 2000.0 /*prototyle cut-off frequency*/
#define pi 3.14159265 /*constant pi*/
```

```
/*PLEASE ENTER DESIRED CUT-OFF FREQUENCY*/
```

```
#define desired_cut_freq 2250.0 /*desired cut-off frequency*/
```

```
int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x3872,0x63}; /*AIC config data*/
```

```
void lowpass(float a)
```

```
{
    int result,x0; /*declare variables */
    float k=0.5;
```

```
float x1=0.1,x2=0.1,y11=0.1,y21=0.1,y22=0.1,y10,y20,y1;
while(1)
```

```
{
    x0=UPDATE_SAMPLE(result);
    y10=(-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*x0+x1
        -((-0.167666240820168+a*((-0.167666240820168*-
        0.167666240820168)-1))*y11;
    y20=(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
        *(0.35808976559648-1)))*x0
        +(-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))+
        (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))*x1+x2
        -((-0.442959157586764-((2*a)*(1+0.35808976559648))+
        (a*(-0.442959157586764*-0.442959157586764)))*y21
        -(0.35808976559648+((a*-0.442959157586764)
        *(0.35808976559648-1)))*y22;
```

```
x2=x1;
x1=x0;
y11=y10;
y22=y21;
y21=y20;
y1=k*(y10+y20);
result = (int)(y1);
}
```

```
main()
```

```
{
    float Fs,Fc,Fn,Wc,Wn,W1,W2,a; /*declare variables*/
    AICSET(); /*initialize AIC*/
    Fs = sample_freq;
    Fc = prototyle_cut_freq;
    Fn = desired_cut_freq;
    Wc = (2*pi*Fc)/Fs;
    Wn = (2*pi*Fn)/Fs;
    W1 = (Wc-Wn)/2;
    W2 = (Wc+Wn)/2;
    a = sin(W1)/sin(W2);
    lowpass(a); /*call sinewave function*/
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.โปรแกรมตัวกรองปรับค่าได้แบบเอฟไออาร์

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คutoff 1 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c"          /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h"             /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x[41];
    float acc;
    float H[41] = {
        -0.000035500584, -0.000541392039, -0.001091734721, -0.000890789205,
        -0.001260864507,0.000506488062, 0.003403579950, 0.007166625253,
        0.008549886965, 0.006070446216,-0.001553315624, -0.013191731845,-
        0.024742803480, -0.029148828439, -0.022739491127,0.002429385538,
        0.043776095950, 0.096642202794, 0.146578297380, 0.183389715371,
        0.196898519225, 0.183389715371, 0.146578297380, 0.096642202794,
        0.043776095950,0.002429385538, -0.022739491127, -0.029148828439,-
        0.024742803480, -0.013191731845,-0.001553315624, 0.006070446216,
        0.008549886965, 0.007166625253, 0.003403579950,0.000506488062,-
        0.001260864507, -0.000890789205, -0.001091734721, -0.000541392039,
        -0.000035500584 };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=40;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=40;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x[41];
    float acc;
    float H[41] = {
-0.000052888065,-0.000703385379,-0.000936691680,- 0.000083341839,
0.002028634335, 0.003668791084,0.002108737737,-0.003442075440,-
0.009267592156, -0.008574367992,0.002326005174,0.017705687124,
0.023241789448, 0.006819074548,-0.027284668858,-0.053633635033,-
0.038551298580, 0.035010279397, 0.148714083223, 0.253063534817,
0.295347778838, 0.253063534817,0.148714083223, 0.035010279397,-
0.038551298580,-0.053633635033,-0.027284668858, 0.006819074548,
0.023241789448, 0.017705687124, 0.002326005174,-0.008574367992,-
0.009267592156, -0.003442075440,0.002108737737, 0.003668791084,
0.002028634335, -0.000083341839,-0.000936691680,-0.000703385379,
-0.000052888065, };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=40;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=40;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 41 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 2 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x[41];
    float acc;
    float H[41] = {
-0.000069843491, -0.000754300598, -0.000329344401, 0.000803457513,
0.002232489246, -0.001003674438, -0.004957933059, -0.002800087097,
0.007014066207, 0.010482221803, -0.003093941893, -0.020013516853,-
0.011850691647, 0.021485636309, 0.038188600566,-0.004853807003,-
0.068924140174, -0.054720692240, 0.095616947823, 0.298667860631,
0.393797038451, 0.298667860631, 0.095616947823, -0.054720692240,-
0.068924140174,-0.004853807003, 0.038188600566, 0.021485636309,-
0.011850691647, -0.020013516853,-0.003093941893, 0.010482221803,
0.007014066207, -0.002800087097, -0.004957933059, -0.001003674438,
0.002232489246, 0.000803457513, -0.000329344401, -0.000754300598,
-0.000069843491 };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=40;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=40;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x[51];
    float acc;
    float H[51] = {
0.000021814056, 0.000182560976, 0.000261523138, 0.000441499614,
0.000367799504, -0.000156879670, -0.001166598508, -0.002368976033,
0.004376726483, -0.001889172484, 0.000753602305, 0.005243174150,
0.008469761231, 0.010489975892, 0.007471105163, -0.001384878550, -
0.014452018755, -0.027180671669, -0.034112625335, -0.023283086851,
0.002507380592, 0.045445530019, 0.095413227305, 0.147027136364,
0.184001777114, 0.197507397587, 0.184001777114, 0.147027136364,
0.095413227305, 0.045445530019, 0.002507380592, -0.023283086851, -
0.034112625335, -0.027180671669, -0.014452018755, -0.001384878550,
0.007471105163, 0.010489975892, 0.008469761231, 0.005243174150,
0.000753602305, -0.001889172484, -0.004376726483, -0.002368976033, -
0.001166598508, -0.000156879670, 0.000367799504, 0.000441499614,
0.000261523138, 0.000182560976, 0.000021814056 };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=50;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=50;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คัทออฟ 1.5 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomc.c" /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h" /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x51;
    float acc;
    float H[51] = {
-0.000091792422, -0.000072767619, 0.000154115748, 0.000506684694,
0.000529584493, -0.000233716213, -0.001515663833, -0.002032545174, -
0.000409484570, 0.003039533706, 0.005458784960, 0.003248485229, -
0.004067961709, -0.011370538427, -0.010552767078, 0.002073779870,
0.019397219818, 0.025531765166, 0.007980304789, -0.027936918692,
-0.055355534736, -0.040021481104, 0.034565062153, 0.149169462220,
0.253908132388, 0.296261096380, 0.253908132388, 0.149169462220,
0.034565062153, -0.040021481104, -0.055355534736, -0.027936918692,
0.007980304789, 0.025531765166, 0.019397219818, 0.002073779870, -
0.010552767078, -0.011370538427, -0.004067961709, 0.003248485229,
0.005458784960, 0.003039533706, -0.000409484570, -0.002032545174, -
0.001515663833, -0.000233716213, 0.000529584493, 0.000506684694,
0.000154115748, -0.000072767619, -0.000091792422 };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=50;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=50;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-โปรแกรมภาษาซีของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 51 ที่ค่าความถี่คutoff 2 kHz

```
#include "c:\dsk\dsk3\aiccomm.c"          /*AIC comm routines */
#include "c:\dsk\dsk3\math.h"            /*math library function */
int AICSEC[4]={0x162c,0x1,0x3872,0x63}; /* sampling 10k */
void ad()
{
    int input,output,n,x51];
    float acc;
float H[51] = {
-0.000042518319, -0.000242257309, -0.000055446290, 0.000433424759,
0.000666019843, -0.000308643480, -0.001625376601, -0.000714650710,
0.003947638514, 0.003344972621, -0.001493364654, -0.007637636498, -
0.003309238073, 0.008605655924, 0.012900827821, -0.002758443741, -
0.021925530652, -0.013018321023, 0.025144456939, 0.039101512814,
-0.005009637739, -0.071552613666, -0.054024822448, 0.095909737509,
0.299664662283, 0.395014795174, 0.299664662283, 0.095909737509, -
0.054024822448, -0.071552613666, -0.005009637739, 0.039101512814,
0.025144456939, -0.013018321023, -0.021925530652, -0.002758443741,
0.012900827821, 0.008605655924, -0.003309238073, -0.007637636498,
-0.001493364654, 0.003344972621, 0.003947638514, -0.000714650710, -
0.001625376601, -0.000308643480, 0.000666019843, 0.000433424759, -
0.000055446290, -0.000242257309, -0.000042518319, };
    while(1)
    {
        input=UPDATE_SAMPLE(output);
        x[0]=input;
        acc=0;
        for(n=0;n<=50;n++)
            acc+=H[n]*x[n];
        for(n=50;n>0;n--)
            x[n]=x[n-1];
        output=acc;
    }
}
main()
{
    AICSET();
    ad();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์อัครพล ตรีรัตน์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไข ปัญหา ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศรวัฒน์ ชิวปรีชา และ อาจารย์สุรพันธ์ ยิ้มมั่น ที่ได้ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด ผู้เขียนพึงระลึกอยู่เสมอว่ารายงานฉบับนี้จะไม่สำเร็จลงได้เลยหากขาดความช่วยเหลือจากทุกท่านจึงขอขอบพระคุณมาอย่างสูง

ปกรณ์ สุภคคีสุทัศน์

ปรัชญ์ ชคทานนท์

พรชนะ เกียรติวิเศษ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- [1] รศ.ดร. มนต์ สัจวรศิลป์,วรรณรัตน์ กัทธอมรกุล, “คู่มือการใช้MATLABฉบับสมบูรณ์”
- [2] Sanjit K. Mitra, “Digital Signal Processing, A Computer-Based Approach”
- [3] Rulph Chassaing, “Digital Signal Processing, Laboratory Experiments Using C and the TMS320C31 DSK”
- [4] Sanjit K. Mitra, “Digital Signal Processing, Laboratory Using MATLAB”

