



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

Three-way Crossover Network using Bernstein Polynomials

นางสาววันวิสา ชัชวงษ์

นายกนก เจนจิระพงศ์เวช

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์

**Three-way Crossover Network using Bernstein Polynomials**

นางสาววันวิสา หัซวงษ์

นายกนก เจนจิระพงศ์เวช

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

แหล่งเงิน (ระบุแหล่งทุน) งบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นางสาววันวิสา ชัชวงษ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายคนก. เคนจ๊ะพะงศ์เวช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ เนื่องจากมีลักษณะเด่นในการออกแบบ คือ วงจรกรองความถี่มีความราบเรียบทางขนาดและสามารถควบคุมคุณลักษณะได้ทั้งทางขนาด เฟส และดีเลย์ โดยใช้การปรับค่าพารามิเตอร์  $n$ ,  $K$  และ  $\epsilon$  ด้วยเหตุนี้จึงนำวงจรกรองความถี่แบบเบียร์นสไตน์มาออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค นอกจากนั้นวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ได้สามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของดิจิทัลได้ โดยใช้ไบลิเนียร์ทรานฟอร์ม ซึ่งสามารถจำลองได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Simulink รวมทั้งทดลองการทำงานที่เวลาจริงผ่านบอร์ด FiO RapidSTM32 จากผลการทดลองพบว่าวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่นำเสนอสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ไบลิเนียร์ทรานฟอร์ม ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค วงจรกรองความถี่

**Research Title:** Three-way Crossover Network using Bernstein Polynomials.....

**Researcher:** Dr. Vanvisa Chutchavong.....

**Faculty:** Engineering..... **Department:** Computer Engineering.....

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.....

**Co-Researcher:** Assoc.Prof.Dr. Kanok Janchitrapongvej.....

**Faculty:** Science and Technology..... **Department:** Industrial Management Technology.....

Southeast Bangkok College.....

## ABSTRACT

This research project presents the design of Crossover Network using Bernstein Polynomials. The Bernstein Polynomials has the best characteristics with more advantages. For example, it has a maximally flat (MAXFLAT) magnitude, a linear-phase and a maximally flat delay with parameters of  $n$ ,  $K$  and  $\mathcal{E}$ . For this reason, the Crossover Network is designed by Bernstein Polynomials moreover analog filters are changed into digital filters by using the bilinear transformation. Both MATLAB and Simulink are good platform for designing the filter. In addition, the experimental results at the real time of Crossover Network can show with FiO RapidSTM32 Board

**Keywords :** Bernstein Polynomials, Bilinear Transform, Crossover Network, Filter

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดีจากรองศาสตราจารย์ อรลภ แสงอรุณ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์วิโรจน์ พิจาจนนชัย อาจารย์จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทดสอบ และทดลองงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาวราชวดี ชำนาญศิลป์ นางสาวรัญญา สร้อยโยธา และนางสาววิไล ลิลิตวัฒน์ นักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

นางสาววันวิสา ชัชวงษ์  
นายกนก เจนจิระพงศ์เวช

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญภาพ.....  | V    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 1    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....  | 1    |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 2    |
| 1.5 สมมุติฐานงานวิจัย.....  | 3    |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 4    |
| บทที่ 2 วงจรกรองโอเวอร์เน็ตเวิร์ค.....                                    | 5    |
| 2.1 บทนำ.....   | 5    |
| 2.2 ประเภทของวงจรกรองความถี่.....   | 5    |
| 2.3 ความถี่คัตออฟและลักษณะโพลออฟ.....                                     | 8    |
| 2.4 วงจรกรองโอเวอร์เน็ตเวิร์ค.....  | 9    |
| 2.5 ความเป็นเชิงเส้นของเฟส.....   | 14   |
| 2.6 สรุป.....   | 17   |
| บทที่ 3 โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์.....                                   | 18   |
| 3.1 บทนำ.....   | 18   |
| 3.2 โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์.....                                       | 18   |
| 3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาล็อกโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์..... | 22   |
| 3.4 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ $\epsilon$ .....                            | 27   |
| 3.5 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ $K$ .....                                   | 33   |
| 3.6 การเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบอื่น.....                          | 36   |

## IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.7 สรุป.....   | 42        |
| <b>บทที่ 4 การออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์</b> .....                           | <b>43</b> |
| 4.1 บทนำ.....   | 43        |
| 4.2 การออกแบบวงจรองความถี่แอนาลอกแบบเบียร์นสไตน์.....   | 43        |
| 4.3 การออกแบบวงจรองความถี่ดิจิตอลแบบเบียร์นสไตน์.....   | 58        |
| 4.4 การจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ด้วยโปรแกรม<br>Simulink.....                | 62        |
| 4.5 การทดลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ โดยใช้บอร์ด Fio<br>RapidSTM32 Blockset..... | 64        |
| 4.6 ผลการทดลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์.....                                      | 70        |
| 4.7 สรุป.....   | 72        |
| <b>บทที่ 5 บทสรุป</b> .....   | <b>73</b> |
| 5.1 บทสรุป.....   | 73        |
| 5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อ.....  | 73        |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b> .....  | <b>74</b> |
| <b>ภาคผนวก</b> .....  | <b>75</b> |
| <b>ประวัตินักวิจัย</b> .....  | <b>93</b> |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรคอสมโอเวอร์เน็ดเวอร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์.....  | 2    |
| 2.1 กราฟผลตอบสนองของวงจรองความถี่ต่ำผ่าน.....  | 6    |
| 2.2 กราฟผลตอบสนองของวงจรองความถี่สูงผ่าน.....  | 7    |
| 2.3 กราฟผลตอบสนองของวงจรองแถบความถี่ต่ำผ่าน.....   | 7    |
| 2.4 กราฟผลตอบสนองของวงจรองแถบความถี่ต่ำหยุด.....   | 8    |
| 2.5 วงจรองความถี่แบบพาสซีฟ ในระบบ 2 ทาง.....   | 10   |
| 2.6 วงจรองความถี่แบบพาสซีฟ ในระบบ 3 ทาง.....   | 10   |
| 2.7 วงจรองความถี่แบบแอคทีฟ ในระบบ 2 ทาง.....   | 10   |
| 2.8 วงจรองความถี่แบบแอคทีฟ ในระบบ 3 ทาง.....   | 11   |
| 2.9 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลำโพง.....  | 14   |
| 2.10 ระบบ 2 ทาง.....   | 14   |
| 2.11 ระบบ 3 ทาง.....   | 16   |
| 3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน.....  | 19   |
| 3.2 การแปลงแกนความถี่จาก $\Omega \rightarrow \omega$ .....                                       | 20   |
| 3.3 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2.....                          | 23   |
| 3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2.....                           | 24   |
| 3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2.....                    | 24   |
| 3.6 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรองความถี่ต่ำผ่านสมการเบียร์นสไตน์อันดับ 4.....                        | 26   |
| 3.7 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 4.....                          | 26   |
| 3.8 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4.....                    | 27   |
| 3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\varepsilon$ อันดับ 2.....         | 29   |
| 3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\varepsilon$ อันดับ 2..... | 30   |

## VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\varepsilon$ อันดับ 4.....  | 32   |
| 3.12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\varepsilon$ อันดับ 4.....   | 33   |
| 3.13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....   | 35   |
| 3.14 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....  | 35   |
| 3.15 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....   | 36   |
| 3.16 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 2 และ<br>อันดับ 4.....                                     | 38   |
| 3.17 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 2 และ<br>อันดับ 4.....                                      | 39   |
| 3.18 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 2<br>และ อันดับ 4.....                               | 40   |
| 3.19 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองผ่านแถบความถี่แบบ Bessel-Thomson และแบบ<br>Bernstein อันดับ 2 และ อันดับ 4.....                  | 41   |
| 4.1 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบียร์นสไตน์ โพลีโนเมียลอันดับ<br>4 ในระบบ 3 ทาง เมื่อ $\varepsilon = 0$ ..... | 46   |
| 4.2 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบียร์นสไตน์ โพลีโนเมียลอันดับ<br>4 ในระบบ 3 ทาง $\varepsilon = 0.2$ .....     | 48   |
| 4.3 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบียร์นสไตน์ โพลีโนเมียลอันดับ<br>4 ในระบบ 3 ทาง $\varepsilon = 1.7315$ .....  | 50   |
| 4.4 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบียร์นสไตน์ โพลีโนเมียล อันดับ<br>4 ในระบบ 3 ทาง $\varepsilon = 2$ .....      | 52   |
| 4.5 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบียร์นสไตน์ โพลีโนเมียล อันดับ<br>4 ในระบบ 3 ทาง $\varepsilon = 5$ .....      | 54   |

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.6 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบสเซลโพลีโนเมียล อันดับ 4<br>ในระบบ 3 ทาง ..... | 58   |
| 4.7 ความสัมพันธ์กันของระบบแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง .....  | 59   |
| 4.8 การแปลงระหว่างโพลใน s-plane ไปยังโพลใน z-plane.....  | 59   |
| 4.9 การแปลงระหว่างความถี่แอนาล็อกและดิจิทัลที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองเชิงความถี่ในการแปลง<br>ไปลิเนียร์.....      | 59   |
| 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของสมการดิจิทัลแบบเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล เมื่อ $\varepsilon = 0.2$ ....        | 61   |
| 4.11 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรมเสริม Simulink.....   | 62   |
| 4.12 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คในแต่ละวงจรของความถี่.....                              | 63   |
| 4.13 ผลตอบสนองของสัญญาณที่รวมกันผ่านวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คและสัญญาณทดลอง.....                               | 64   |
| 4.14 เครื่อง Sweep Generator .....   | 65   |
| 4.15 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....   | 66   |
| 4.16 บอร์ด FiO RapidSTM32 .....  | 66   |
| 4.17 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้ Blockset RapidSTM 32.....  | 67   |
| 4.18 การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด FiO RapidSTM 32 กับ Oscilloscope และ Sweep Generator.....                        | 68   |
| 4.19 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรของความถี่ต่ำผ่าน .....  | 68   |
| 4.20 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรแถบความถี่ผ่าน .....   | 69   |
| 4.21 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรของความถี่สูงผ่าน .....  | 69   |
| 4.22 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรผ่านทุกความถี่ .....   | 70   |
| 4.23 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้เสียงเป็นตัวทดสอบ .....   | 70   |
| 4.24 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรของความถี่ต่ำผ่าน.....  | 71   |
| 4.25 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรแถบความถี่ผ่าน .....  | 71   |
| 4.26 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรของความถี่สูงผ่าน .....   | 71   |

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากเครื่องเสียงที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับระบบไฮไฟที่ดี จะต้องมีตู้ลำโพงที่ตอบสนองความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 15 KHz เป็นอย่างต่ำ ซึ่งลำโพงเพียงตัวเดียวไม่สามารถให้ผลตอบสนองทางความถี่กว้างพอจึงต้องใช้ลำโพงตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปประกอบอยู่ในตู้เดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้แต่ละตัวทำงานช่วงความถี่ที่สามารถตอบสนองได้ดีจะใช้วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค ซึ่งเปรียบเสมือนวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่กลาง และวงจรกรองความถี่สูง แยกสัญญาณความถี่ต่ำผ่านลำโพง Woofer ความถี่กลางผ่านลำโพง Midrange และความถี่สูงผ่านลำโพง Tweeter โครงการวิจัยนี้จึงได้ออกวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเพื่อป้อนให้กับลำโพงแต่ละตัวให้มีคุณภาพเสียงที่ดี โดยนำโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์มาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเพื่อแก้ปัญหาความเพี้ยนและสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ในระบบเครื่องเสียงเพื่อให้เครื่องเสียงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมการคณิตศาสตร์ของโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์
2. เพื่อออกแบบและสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์น สไตน์ออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่กลาง และวงจรกรองความถี่สูง เพื่อป้อนให้กับลำโพง Woofer ลำโพง Midrange และลำโพง Tweeter ตามลำดับ
3. เพื่อแก้ปัญหาความเพี้ยนของสัญญาณความถี่เสียงโดยประยุกต์ใช้ในเครื่องเสียง และสามารถพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์
4. เพื่อตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ออกแบบและสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อป้อนให้กับลำโพง Woofer วงจรกรองความถี่กลางเพื่อป้อนให้กับลำโพง Midrange และวงจรกรองความถี่สูงเพื่อป้อนให้กับลำโพง Tweeter เพื่อแก้ปัญหาความเพี้ยนและสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ในระบบเครื่องเสียงให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพ และสามารถต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

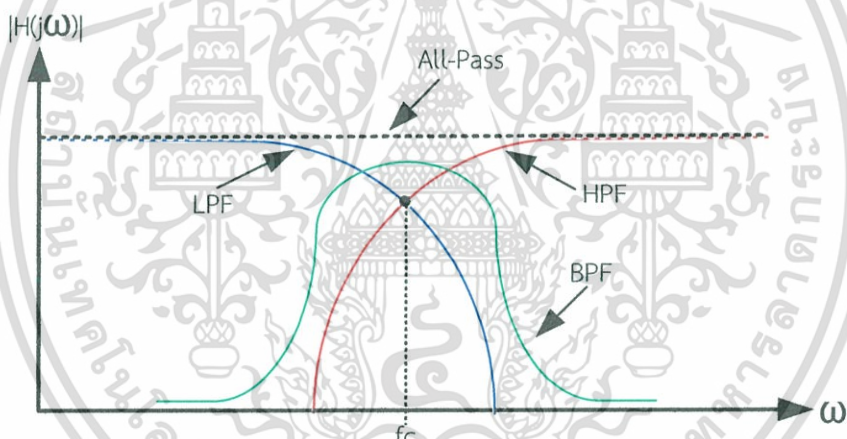
1. รูปแบบการวิจัยเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) การวิจัยจะเน้นวิธีการศึกษาวิเคราะห์ ทดลองและสรุปผลการทดลองอย่างมีขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ของโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

1.2 วิเคราะห์หาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่กลาง และวงจรกรองความถี่สูง โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

1.3 ออกแบบและสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยทำการรวมวงจรความถี่ต่ำ วงจรกรองความถี่กลาง และวงจรกรองความถี่สูง ให้เป็นวงจรกรองความถี่ผ่านตลอด (All-Pass Filter)

1.4 ออกแบบหาจุดตัดครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง และออกแบบให้มีผลต่างเฟสที่จุดตัดครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คทั้ง 3 แถบความถี่มีค่าน้อยที่สุด เพื่อป้องกันกับลำโพงแต่ละตัวให้มีคุณภาพเสียงที่ดี โดยการหาจุดตัดแสดงดังภาพที่ 1.1 ซึ่งก็คือการแสดงวิธีการออกแบบจุดตัดครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค



ภาพที่ 1.1 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลีโนเมียล แบบเบียร์นสไตน์

1.5 จำลองการทำงานของวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทางที่ได้ออกแบบ ด้วยโปรแกรม MATLAB และ Simulink

1.6 ทดสอบระบบทั้งหมดที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB และ Simulink พร้อมทำการแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้ได้วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทางที่ดีที่สุด คือมีการออกแบบจุดตัดครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คมีผลตอบสนองราบเรียบที่สุด และมีผลต่างเฟสที่น้อยที่สุด ณ จุดตัดครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 สร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คแบบ 3 ทางเพื่อแก้ปัญหาความถี่ของสัญญาณความถี่เสียงในเครื่องเสียง

1.8 ทดสอบระบบทั้งหมดด้วยอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ ผ่านบอร์ด FiO RapidSTM32

1.9 ทำการสรุปผลการทดลอง

1.10 วิเคราะห์ สรุปผลทั้งหมด พร้อมเขียนเล่มรายงานการวิจัย

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และ Simulink

2.2 ออสซิลอสโคป (Oscilloscope)

2.3 ชุดเครื่องเสียงเพื่อทำการทดสอบ

3. การวิเคราะห์ข้อมูลวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ ได้แก่ โปรแกรม MATLAB และ Simulink

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยฮาร์ดแวร์ ผ่านบอร์ด FiO RapidSTM32

### 1.5 สมมุติฐานการวิจัย

ในการออกแบบและสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คนั้น สามารถสร้างขึ้นจากวงจรกรองความถี่โดยสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ดังกล่าวสามารถหาได้จากโพลีโนเมียลหลายรูปแบบ อาทิ เช่น บัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) เชบีเชฟ (Chebyshev) หรือเบสเซล (Bessel) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวงจรกรองความถี่เหล่านี้จะให้ผลตอบสนองต่อความถี่ที่แตกต่างกันออกไป เช่น วงจรกรองความถี่แบบเบสเซลจะให้ผลการตอบสนองทางเวลากฎพีดีเลย์ราบเรียบที่สุด วงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทจะให้ผลการตอบสนองทางขนาดราบเรียบที่สุด ส่วนวงจรกรองความถี่แบบเชบีเชฟจะให้ผลการตอบสนองทางขนาดมีความชันมากที่สุดแต่ในช่วงความถี่ผ่านจะมีริปเปิล (Ripple) [1-2] จากคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ดังกล่าวทำให้เลือกวงจรกรองความถี่ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้เพียงวัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น นอกจากนั้นวงจรกรองความถี่เหล่านี้มีรูปแบบวงจรที่คงที่ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ได้ นอกจากปรับเปลี่ยนจำนวนอันดับ (Order) ของวงจรกรองความถี่เท่านั้น ดังนั้นเมื่อนำมาออกแบบและสร้างเป็นวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คก็จะส่งผลให้วงจรมีความยุ่งยากซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คโดยทั่วไปที่มีอยู่เดิมจะมีความล่าช้าระหว่างวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองความถี่สูง ถึงแม้ว่าจะมีการแก้ปัญหาโดยพัฒนาเป็นวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คที่เป็นเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาความล่าช้าระหว่างวงจรได้แล้วก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มความชันในช่วงความถี่คัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออฟ (Cutoff Frequency) ได้และยังทำให้ช่วงความถี่ที่ได้ไม่คงที่อีกด้วย [3-5] ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยการนำโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์มาออกแบบวงจรกรองความถี่ซึ่งมีลักษณะเด่นคือได้วงจรกรองความถี่ที่มีความราบเรียบที่สุด (Maximally Flat) ประกอบกับข้อได้เปรียบอื่น ๆ อาทิเช่น สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาด และเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยมีพารามิเตอร์ 3 ตัวในการควบคุม คือ  $n$   $K$  และ  $\varepsilon$  ซึ่งข้อดีของโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ที่นำมาใช้นี้เองสามารถแก้ปัญหาในขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองความถี่ให้มีความยืดหยุ่น และผลตอบสนองทางความถี่ราบเรียบทั้งทางขนาดและเฟสเป็นเชิงเส้น [6-8] จากนั้นจึงนำมาประยุกต์ออกแบบและสร้างเป็นวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาค่าความเพี้ยนของสัญญาณความถี่เสียงที่ประยุกต์ใช้ในเครื่องเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ของโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์และสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง
2. มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการออกแบบวงจรกรองความถี่และสามารถนำไปใช้สร้างเป็นวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้งานได้จริง
3. สามารถออกแบบและจำลองวงจร โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Simulink
4. สามารถสร้างวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบ 3 ทาง เพื่อแก้ปัญหาค่าความเพี้ยนของสัญญาณความถี่เสียงที่ประยุกต์ใช้ในเครื่องเสียง
5. สามารถตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

#### 2.1 บทนำ

โดยทั่วไปในระบบเครื่องเสียงที่ดีมักจะประกอบด้วยลำโพงหลายๆ ขนาดในการปล่อยความถี่เสียงออกมาให้ฟังแล้วเป็นธรรมชาติที่สุดซึ่งการที่ลำโพงจะสั้นช้าหรือเร็วจะขึ้นอยู่กับความถี่ และการที่ลำโพงจะเสียงดังหรือเสียงเบาขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้า โดยที่ลำโพงเพียงตัวเดียวไม่สามารถปล่อยความถี่เสียงที่มีหลายๆ ความถี่ออกพร้อมๆ กันได้ ลำโพงจึงจำเป็นต้องประกอบด้วยหลายขนาด ซึ่งสามารถแบ่งตามความถี่เสียงที่ออกได้ 3 แบบ ดังนี้

- วูฟเฟอร์ (Woofers) คือ ลำโพงขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับปล่อยสัญญาณเสียงต่ำ
- มิดเรนจ์ (Midrange) คือ ลำโพงขนาดกลางที่ใช้สำหรับปล่อยสัญญาณเสียงกลาง หรือไม่ต่ำไม่สูง
- ทวิตเตอร์ (Tweeters) คือ ลำโพงขนาดเล็กที่ใช้สำหรับปล่อยสัญญาณเสียงสูง

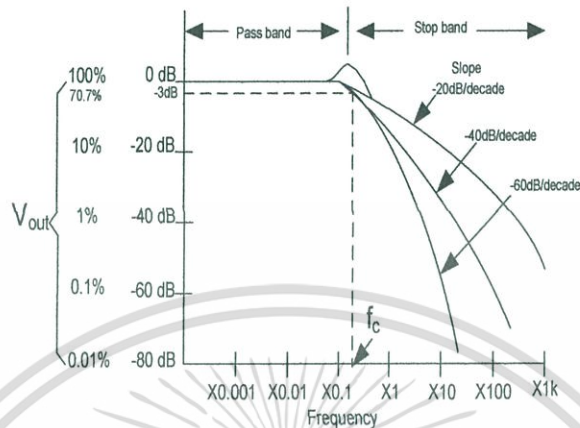
ลำโพงทวิตเตอร์เป็นลำโพงที่ปล่อยสัญญาณเสียงสูง ซึ่งลำโพงมีขนาดเล็กและแผ่นลำโพงค่อนข้างแข็ง จึงสามารถสั้นด้วยความเร็วที่สูงได้ ส่วนลำโพงแบบวูฟเฟอร์เป็นลำโพงที่ปล่อยสัญญาณเสียงต่ำ มีขนาดของแผ่นลำโพงใหญ่ นุ่มและมีมวลมาก จึงสั้นด้วยความเร็วต่ำ อย่างไรก็ตามเสียงทั่วไปมีความถี่กว้างคือมีความถี่จากสูงถึงต่ำซึ่งจะเรียกว่ามีความถี่ช่วงกว้าง ถ้ามีแต่ลำโพงทวิตเตอร์และวูฟเฟอร์จะได้เสียงอยู่ในย่านความถี่สูงกับต่ำเท่านั้นความถี่ในช่วงกลางจะหายไป เพื่อให้คุณภาพของเสียงออกมาทุกช่วงความถี่จึงจำเป็นต้องมีลำโพงมิดเรนจ์ด้วย ภายในตู้ลำโพงคู่หนึ่งจึงมักจะเห็นลำโพงทั้งสามชนิดประกอบเข้าด้วยกัน ถ้าวางถอดชิ้นส่วนของลำโพงออกมา จะพบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Crossover Network) เป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้ความถี่เฉพาะบางย่านความถี่นั้นๆ ผ่านไปได้ ซึ่งวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค จะเป็นตัวแบ่งช่วงความถี่เสียงที่เดียวกันจากลำโพงต่างๆ ไม่ให้เกิดการรบกวนกัน โดยจะป้อนช่วงความถี่ให้กับลำโพงที่มีการตอบสนองในช่วงความถี่นั้นๆ ได้ดี ถ้าขาดวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คก็เปรียบเสมือนการจราจรที่ติดขัด คือ ได้เสียงที่ออกผ่านลำโพงไม่ตรงตามเสียงตัวโน้ตที่ควรจะเป็นหรือได้เสียงที่ไม่มีคุณภาพ

#### 2.2 ประเภทของวงจรกรองความถี่

##### 2.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านไปได้ ส่วน

ความถี่ที่สูงกว่ากำหนดจะถูกลดทอนลงหรือถูกตัดออกไป แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กราฟผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

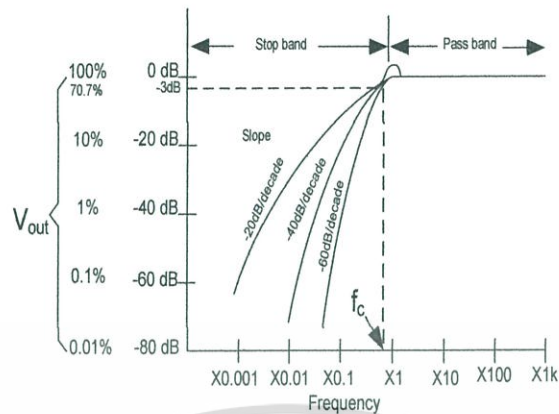
จากภาพที่ 2.1 ในทางอุดมคติสัญญาณที่เข้ามาที่มีความถี่ต่ำจะผ่านเข้าสู่วงจรได้เมื่อสัญญาณความถี่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง จะถูกตัดทอนลงไม่สามารถผ่านไปได้ โดยจุดที่ตัดทอนไม่ให้สัญญาณความถี่ดังกล่าวผ่านได้จะเรียกว่า ความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) แต่ในทางปฏิบัติพบว่าลักษณะของสัญญาณความถี่ที่ตัดออกไปจะไม่เป็นไปตามลักษณะเช่นนั้น แต่สัญญาณจะค่อยๆ ลดทอนลง อัตราขยายลดลงเรื่อยๆ จุดความถี่คัตออฟที่ได้จากกราฟจะมีค่าเท่ากับ 0.707 ของขนาดแรงดันสูงสุด หรือจุดที่อัตราขยายมีค่าเท่ากับ -3 dB โดยช่วงความถี่ของสัญญาณที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟจะเรียกว่า แถบความถี่ผ่าน (Pass Band) และช่วงความถี่ของสัญญาณที่มีค่าความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟจะเรียกว่า แถบความถี่หยุด (Stop Band) เนื่องจากเครื่องเสียงที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับระบบไฮไฟที่ดี จะต้องมิตู้ลำโพงที่ตอบสนองความถี่ระหว่าง 30 Hz ถึง 15 KHz

### 2.2.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่ากำหนดจะถูกตัดออกไป แสดงดังภาพที่ 2.2

จากภาพที่ 2.2 ในทางอุดมคติสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าจะไม่สามารถปรากฏออกมาจากวงจรได้ แต่จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าหรือเท่ากับค่าความถี่คัตออฟเท่านั้นผ่านได้ แต่ในทางปฏิบัติพบว่าไม่เป็นเช่นนั้น กล่าวคือ สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟจะปรากฏออกมาจากวงจรด้วย แต่จะมีอัตราขยายที่น้อยกว่า โดยอัตราขยายจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีสัญญาณความถี่เข้าใกล้ความถี่คัตออฟที่มีขนาดเท่ากับ 0.707 ของแรงดันสูงสุด หรือจุดที่อัตราขยายมีค่าเท่ากับ -3 dB

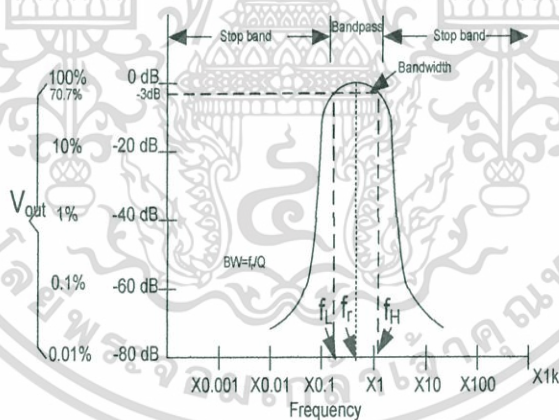
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 กราฟผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

### 2.2.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ในช่วงความถี่ใด ความถี่หนึ่งผ่านไปได้ แต่จะกันไม่ให้สัญญาณความถี่ต่ำกว่าและความถี่สูงกว่าความถี่นั้นๆ ผ่านไปได้ แสดง ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กราฟผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

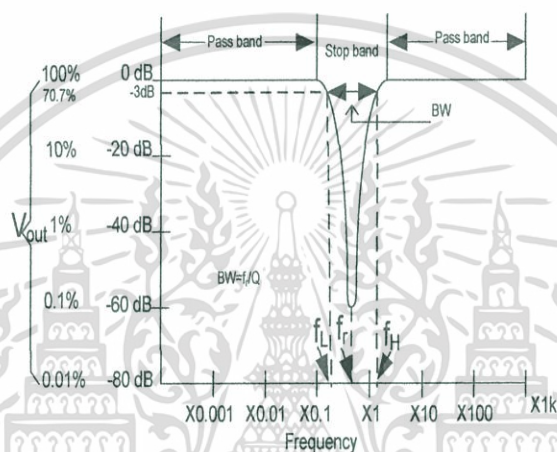
จากภาพที่ 2.3 จะพบว่า ณ สัญญาณความถี่ที่เอาต์พุตมีขนาดสูงสุดเรียกว่า ความถี่รีโซแนนท์ (Resonance Frequency :  $f_r$ ) โดยความถี่แรงดันเอาต์พุตลดลงเหลือ 70.7% ทั้งด้านที่ความถี่สูงขึ้นและที่ความถี่ลดลงเรียกว่า  $f_H$  และ  $f_L$  ตามลำดับ โดยที่ผลต่างของสัญญาณความถี่ทั้งสองนี้ ( $f_H - f_L$ ) จะแสดงแบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW) ของวงจรกรองความถี่ ซึ่งแบนด์วิดท์ ณ ที่นี้ คือช่วงความถี่ของสัญญาณที่ยอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ผ่านไปได้ ส่วนที่นอกเหนือจากช่วง  $f_H$  ถึง  $f_L$  คือช่วง Stop Band หรือ ช่วงที่สัญญาณความถี่ผ่านไม่ได้

### 2.2.4 วงจรกรองแถบความถี่หยุด (Stop Band Filter)

วงจรกรองแถบความถี่หยุดเป็นวงจรกรองความถี่ที่ทำหน้าที่ตรงข้ามกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน คือ วงจรกรองแถบความถี่หยุดจะกั้นไม่ให้ช่วงสัญญาณความถี่ใดความถี่หนึ่งผ่านไปได้ แต่จะยอมให้สัญญาณความถี่ที่มีความถี่สูงกว่าหรือสัญญาณความถี่ต่ำกว่าความถี่นั้นๆ ผ่านไปได้



ภาพที่ 2.4 กราฟผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่หยุด

จากภาพที่ 2.4 ช่วงสัญญาณความถี่  $f_H - f_L$  จะเป็นช่วง Stop Band คือ สัญญาณในช่วงความถี่ผ่านไม่ได้ นอกเหนือช่วงสัญญาณความถี่ดังกล่าวแล้วจะเป็นช่วง Pass Band หรือช่วงที่ความถี่ผ่านได้นั่นเอง

### 2.3 ความถี่คัตออฟและลักษณะโรลออฟ

ความถี่คัตออฟ คือ จุดหรือความถี่ที่ขนาดของเอาต์พุตจากวงจรกรองความถี่ลดลง 0.707 หรือ -3 dB ของขนาดสูงสุด  $f_{CH}$  และ  $f_{CL}$  เช่นความถี่คัตออฟของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอยู่ที่ 500 Hz คิดเป็นอัตราส่วนของเอาต์พุตต่ออินพุตที่ -3 dB แต่อินพุตคิดเป็น 0 dB ในช่วงที่ความถี่ต่ำกว่า 500 Hz จะมีอัตราส่วนแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุต -3 dB หรือขนาดอินพุตจะมีขนาด 0.707 เท่าของแรงดันเอาต์พุตในช่วงที่ความถี่ผ่านได้

โรลออฟ คือ ลักษณะการลาดลงของการตอบสนองต่อความถี่ต่ำจากจุดคัตออฟลงมามีสโลปเล็กน้อยเพียงใดมักบอกเป็นหน่วย ดีบีเปอร์ออกเตป (dB/Octave) หมายความว่าเอาต์พุตของวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่จะลดลงเท่าใด เช่นการสนองตอบของวงกรองความถี่สูงผ่าน มีอัตราการโรลออฟ -6dB/Octave คือความถี่ต่ำกว่าจุดคัตออฟ  $f_{CH} / 2$  จะมีเอตต์พุด 9 dB และต่ำกว่า 4 เท่าจะมีเอตต์พุด -15dB เป็นต้น

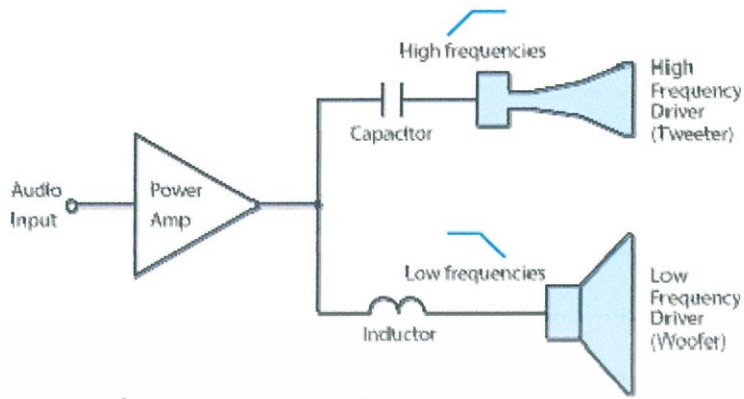
ขนาดของการโรลออฟจะสัมพันธ์กับอันดับ (Order) โดยที่อันดับสูงๆ ค่าออฟโรลจะสูงด้วย เช่นวงกรองความถี่อันดับ 1 มีโรลออฟ -6dB/Octave วงกรองความถี่อันดับ 2 มีโรลออฟ -12dB/Octave จะเห็นว่าค่าโรลออฟจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าตามลำดับ ดังนั้นจำนวนอันดับจะบอกได้ว่าวงกรองความถี่นั้นจะตัดความถี่ที่ไม่ต้องการได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งการสร้างวงกรองแบบแอกทีฟอันดับสูงๆ จะทำได้ยากกว่าวงกรองความถี่อันดับต่ำๆ

#### 2.4 วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

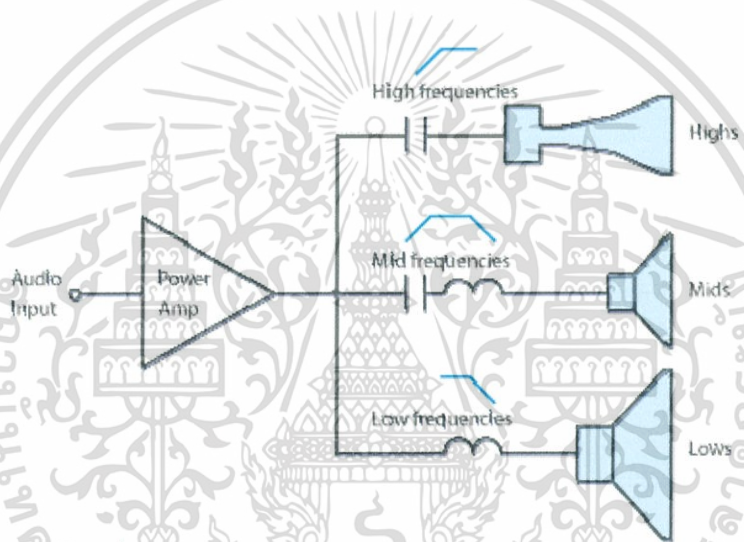
วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค คือ วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณความถี่เสียงทางด้านขาเข้าของระบบออกเป็นช่วงๆ ที่มีความถี่ต่างๆ กัน โดยที่แต่ละช่วงความถี่ที่แยกออกมานั้นจะถูกส่งออกไปยังภาคขยายสัญญาณแต่ละช่วงความถี่แล้วส่งออกสู่ลำโพง เนื่องจากการใช้ลำโพงเพียงตัวเดียวนั้นไม่สามารถให้ผลการตอบสนองทางความถี่ได้ครบตลอดย่านความถี่เสียง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ต้องมีวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเป็นตัวแยกสัญญาณความถี่ต่างๆ เพื่อให้ลำโพงสามารถตอบสนองต่อความถี่แต่ละย่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้จะมีทั้งแบบ 2 ทาง และแบบ 3 ทาง วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ใช้หากเป็นระบบ 2 ทาง จะประกอบด้วยตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำและตัวกรองสัญญาณความถี่สูง ซึ่งตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำจะยอมให้เสียงที่มีความถี่ต่ำหรือเสียงทุ้มผ่านเข้าลำโพงเท่านั้น กล่าวคือตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำจะกำหนดช่วงความถี่ที่เสียงทุ้มผ่านไปได้โดยจะกั้นไม่ให้ความถี่เสียงที่มีค่าความถี่สูงเกินค่าๆ หนึ่งผ่านเข้าลำโพงเสียงทุ้มเด็ดขาด และตัวกรองสัญญาณความถี่สูงจะยอมให้เสียงที่มีความถี่สูงหรือเสียงแหลมผ่านเข้าลำโพงเท่านั้นซึ่งตัวกรองสัญญาณความถี่สูงก็จะกำหนดช่วงความถี่ที่เสียงแหลมผ่านไปได้โดยจะกั้นไม่ให้ความถี่เสียงที่มีค่าความถี่ต่ำกว่าค่าๆ หนึ่งผ่านเข้าลำโพงเสียงแหลมเด็ดขาดเช่นกัน ในกรณีที่ระบบ 3 ทาง จะประกอบด้วยตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง และตัวกรองสัญญาณแถบความถี่ โดยที่ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำและตัวกรองสัญญาณความถี่สูงจะมีคุณสมบัติเหมือนกับระบบ 2 ทาง ส่วนตัวกรองสัญญาณแถบความถี่นั้นจะยอมให้เสียงที่มีระดับปานกลาง ไม่ทุ้มหรือแหลมผ่าน ในขณะที่ตัวกรองสัญญาณแถบความถี่จะกำหนดว่า กรณีสช่วงความถี่ที่สูงกว่าค่าๆ หนึ่ง หรือความถี่ที่ต่ำกว่าค่าๆ หนึ่งจะกั้นไว้ไม่ยอมให้ออกลำโพงเสียงกลางได้ โดยการเพิ่มตัวกรองสัญญาณแถบความถี่ขึ้นจะช่วยให้การเปลี่ยนการทำงานจากลำโพงตัวหนึ่ง ไปยังลำโพงตัวหนึ่งทำงานเป็นไปอย่างนุ่มนวล ไม่เกิดการสะดุด ฟังดูแล้วเป็นธรรมชาติมากขึ้น

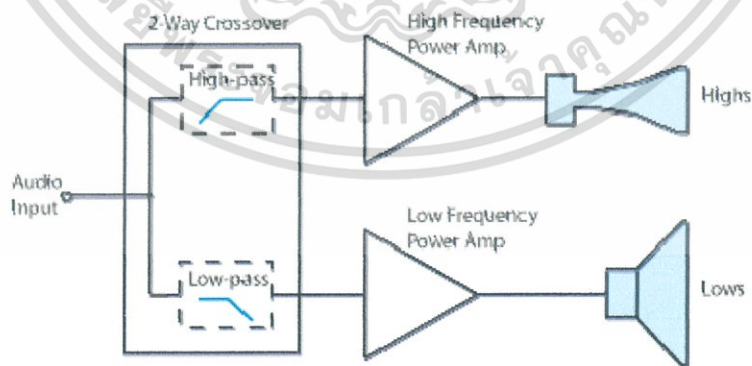
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ในระบบ 2 ทาง

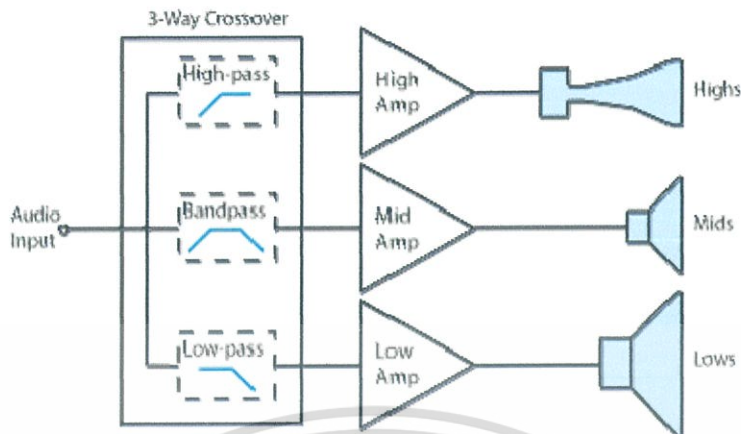


ภาพที่ 2.6 วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ในระบบ 3 ทาง



ภาพที่ 2.7 วงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ ในระบบ 2 ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 วงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ ในระบบ 3 ทาง

#### 2.4.1 คุณสมบัติของวงจรคrossoverเน็ตเวิร์ค

วงจรคrossoverเน็ตเวิร์คที่มีคุณภาพที่ดีนั้นจะประกอบด้วยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีขนาด (Magnitude) ในการรวมกันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน นั้นจะต้องมีความราบเรียบ ดังสมการขนาดสูงสุด  $M_S = |H_L(j\omega) + H_H(j\omega)| = 1$  เพื่อที่จะควบคุมสัญญาณความถี่เสียงที่ได้ทางเอาต์พุตให้คงที่
- อัตราคัตออฟ (Cutoff Rate) มีความสูงชันมากพอ ทั้งทางด้านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่านในย่านแถบความถี่หยุดผ่าน (Stop Band)
- การตอบสนองของขั้วที่ขอมรับได้ในการรวมเอาต์พุตทั้งสองจะต้องทำให้เกิดการอินเฟส (In phase) กันทั้งในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านนั้นคือ  $(L_\phi(\omega) + H_\phi(\omega))$
- ผลการตอบสนองทางเฟส (Phase Response) ในการรวมเอาต์พุตทั้งสองเข้าด้วยกันมีค่าเป็น  $n = \phi_S(\omega) = (L_\phi(\omega) + H_\phi(\omega))^{-1}$  และมีลักษณะที่ต้องการมากที่สุดคือเป็นเชิงเส้น (Phase Linearity) โดย  $\phi_S(\omega) = (L_\phi(\omega) + H_\phi(\omega))^{-1}$  ซึ่งค่าของ  $\tau$  จะเทียบเท่ากับความล่าช้าของเวลา (Time Delay) ในการเชื่อมวงจรจากนั้นจะใช้ค่า  $H_L(s)$  และ  $H_H(\omega)$  แสดงค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่านตามลำดับจัดอยู่ในรูปของความถี่  $S = \sigma + j\omega$  ซึ่งเป็น  $\omega = 2\pi f$  เป็นความถี่เชิงเรเดียน และส่วนในรูปของโพลาร์จะเป็นดังสมการที่ (2.1)

$$H(j\omega) = M(\omega)e^{j\phi(\omega)} \quad (2.1)$$

ซึ่งค่า  $M(\omega)$  เป็นค่าขนาดและ  $e^{j\phi(\omega)}$  เป็นเฟสโดยที่ตัวห้อย  $L$  หรือ  $H$  แสดงว่าเป็นฟังก์ชันของวงจรกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ต่ำผ่านและวงจรรองความถี่สูงผ่านตามลำดับ และส่วนตัวห้อย  $S$  นั้นแสดงถึงการเชื่อมโยงฟังก์ชันระบบ (System Function) จากคุณสมบัติผลการตอบสนองทางเฟสของวงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กนั้นจะมีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณที่ออกจากลำโพง โดยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณนั้นมีผลต่อการรับฟังของมนุษย์ซึ่งในระบบของวงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กแบบเดิมนั้นจะมีผลต่อการตอบสนองทางเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้รูปแบบการแพร่กระจายมีลักษณะค่อนข้างแคบตลอดพื้นที่ตามทิศทางของลำโพงโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่แต่ถ้าวงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กนั้นจะมีผลต่อการตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้นจะมีผลทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างกว่าวงจรรอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กแบบที่ให้ผลการตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผู้ฟังจะได้รับสัญญาณครบตลอดย่านความถี่เสียง

#### 2.4.2 วงจรรองความถี่แบบพาสซีฟและวงจรรองความถี่แบบแอคทีฟ

วงจรรองความถี่เป็นวงจรที่ใช้ในการกรองสัญญาณความถี่ที่ต้องการและสามารถตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการได้ โดยวงจรรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ วงจรรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filters) และวงจรรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filters) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรรองความถี่แบบพาสซีฟจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ส่วนวงจรรองความถี่แบบแอคทีฟจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์ตัวขยายสัญญาณแอคทีฟ คือออปแอมป์ โดยวงจรรองความถี่แบบแอคทีฟจะได้รับความนิยมมากกว่าวงจรรองความถี่แบบพาสซีฟ เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

- มีราคาที่ถูกกว่าวงจรรองความถี่แบบพาสซีฟเนื่องจากไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาสูงแต่ใช้ออปแอมป์แทน
- การไม่ได้ใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใหญ่ ทำให้วงจรรองความถี่แบบแอคทีฟมีขนาดเล็ก
- ไม่เกิดการสูญเสียสัญญาณ เพราะออปแอมป์สามารถขยายสัญญาณชดเชยสัญญาณที่ถูกลดทอนได้
- ไม่มีการรบกวนกันของแหล่งจ่ายสัญญาณอินพุตและ โหลด เพราะใช้ออปแอมป์ที่ทำให้วงจรรองความถี่แบบแอคทีฟมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง เอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์ต่ำ
- สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามที่ออกแบบไว้ง่ายกว่าวงจรรองความถี่แบบพาสซีฟ

แต่วงจรรองความถี่แบบแอคทีฟก็มีข้อจำกัดอยู่บางประการ

- วงจรรองความถี่แบบแอคทีฟมีการตอบสนองความถี่ได้แคบกว่าวงจรรองความถี่แบบพาสซีฟเนื่องจากข้อจำกัดของออปแอมป์
- วงจรรองความถี่แบบแอคทีฟต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเนื่องจากใช้ออปแอมป์ ในขณะที่วงจรรองความถี่แบบพาสซีฟไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง

#### 2.4.3 แนวความคิดในการสร้างวงจร Active Phase Linear Crossover Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวงจรแอกทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค มักเกิดขึ้นกับวงจรแบบ 2 ทาง หรือวงจรแบบ 3 ทางซึ่งประกอบด้วยวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่าน และวงจรกรองแถบความถี่ผ่านนั้นเกิดขึ้นจากความล่าช้าทางเวลาของวงจรโดยที่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ทำให้เกิดสัญญาณซ้าลง ส่วนวงจรรองความถี่สูงผ่านจะทำให้สัญญาณเร็วขึ้น อันเป็นผลให้เกิดปัญหาที่วงจรแอกทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่จุดตัด คือ

- ทำให้สัญญาณจากสองส่วนลดสัญญาณจากอีกส่วนหนึ่งออก
- ความแตกต่างของเฟสระหว่างสัญญาณทั้งสอง มีผลกับประสิทธิภาพของการกระจายของสัญญาณ (Radiation) ของระบบ
- รูปแบบของการกระจายคลื่น (Radiation Pattern) จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่

ในบทความของสแตนเลย์ลิปชิทซ์ และจอห์นแวนเดอร์ลอย (Stanley Lipshitz and Fohn Van Derlooy) เสนอแนวทางเพื่อแก้ปัญหาข้อบกพร่องดังกล่าว โดยใช้วงจรที่เรียกว่า เฟสลิเนียร์ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค (Phase Linear Crossover Network)

การทำเฟสลิเนียร์ โดยใช้วงจรรองความถี่ต่ำผ่านนั้น สามารถแปลงเป็นวงจรรองความถี่สูงได้โดยการเพิ่มวงจรหน่วงเวลาแล้วนำมาทำเป็นวงจรลบแม้ว่าวงจรหน่วงเวลาจะไม่สามารถทำให้ความถี่ที่ได้ตลอดย่านความถี่แต่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เข้ามาผลที่ได้จะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของเฟสระหว่างเอาต์พุตของสัญญาณทั้งสองโดยเฉพาะในย่านจุดตัดแบ่ง (Crossover Point)

#### 2.4.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของระบบครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

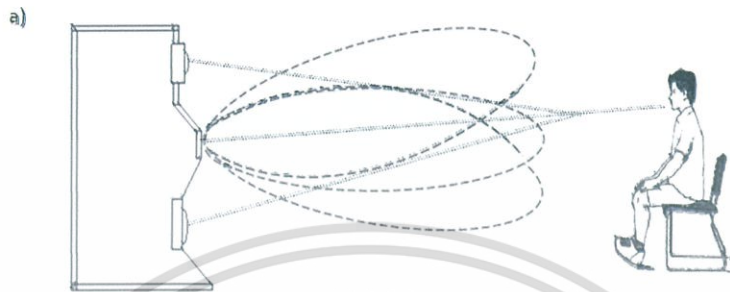
รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลำโพงตามระบบครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเดิม ซึ่งมีรูปแบบค่อนข้างแคบตลอดพื้นที่ตามทิศทางของลำโพง โดยที่การกระจายรูปแบบจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่อันเป็นเหตุให้โลบ (Lobe) เงยขึ้นหรือลดลง แต่ในกรณีวงจรเฟสลิเนียร์จะมีผลให้โลบขยายกว้างมากขึ้นกว่าเดิมพุ่งไปข้างหน้าตลอดย่านความถี่เมื่อผู้ฟังอยู่กลางของแนวนอน ตามภาพที่ 2.9 (ก) แบบทั่วไป และ ภาพที่ 2.9 (ข) เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของเฟสลิเนียร์ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค

จากแนวความคิดในการสร้างวงจรเฟสลิเนียร์ดังกล่าว ยังพบว่าปัญหาส่วนที่ต้องนำมาแก้ไข 2 ประการ คือ

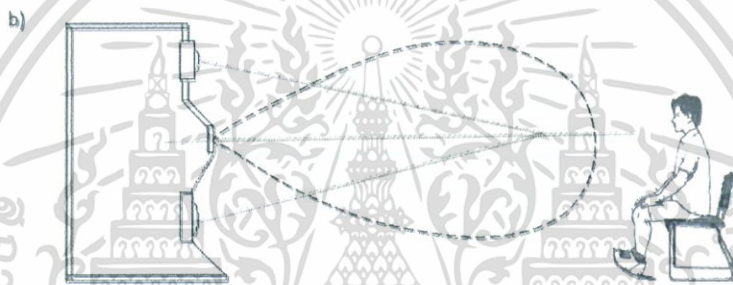
1. ยังมีการเลื่อนเฟสเหลืออยู่ แต่ไม่มีปัญหาในด้านสัญญาณที่ลดทอนลงตลอดย่าน
2. การเลื่อนเฟสเกิดจากตัววงจรเองมากกว่าเกิดจากวงจรรองความถี่ที่ออกแบบถึง 2 เท่า

ดังนั้นจึงทำให้มองเห็นว่า วงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้องเลือกใช้ในอันดับคู่ เช่น 2 4 6 โดยนับนี้จึงเลือกอันดับ 4 เป็นวงจรรองความถี่เป็นวงจรที่ไม่ยุ่งยากมากนัก โดยใช้วงจรอันดับ 2 มาทำการต่อคาสเคดเข้าด้วยกันทำให้เป็นวงจรรองความถี่อันดับที่ 4 เพื่อให้ได้วงจรที่มีเฟสเดียวกันตามแนวคิดดังกล่าวจึง

ได้ผลเป็นวงจรมีเฟสเดียว มีความถี่ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กที่จุด -6 dB ไม่มีการเลื่อนเฟสของช่วงสัญญาณตามรูปภาพบล็อคอโตะแกรม



(ก) รูปแบบทั่วไป

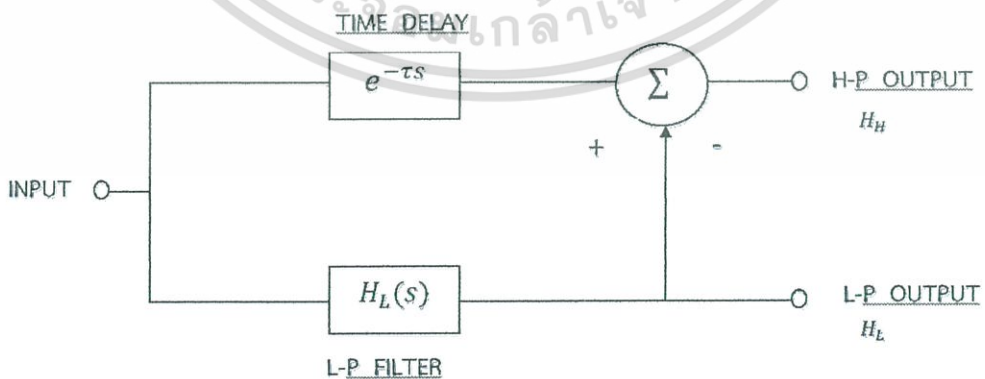


(ข) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของเฟลตนิเยร์ครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ก

ภาพที่ 2.9 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของลำโพง

2.5 ความเป็นเชิงเส้นของเฟส

2.5.1 หลักการของระบบ 2 ทาง



ภาพที่ 2.10 ระบบ 2 ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามภาพที่ 2.10 วงจรหน่วงเวลา (Time Delay Circuit) เป็นวงจรที่สำคัญที่จะช่วยให้ความราบเรียบทางเฟสเมื่อนำสัญญาณทั้งสองมารวมกันเป็นลักษณะวงจรลบจะทำให้ได้ความถี่ 2 ทางตามต้องการคือสัญญาณความถี่ต่ำและสัญญาณความถี่สูง โดยที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับ 4 รับสัญญาณเข้าผ่านสัญญาณความถี่ต่ำออกทางเอาต์พุตขณะที่สัญญาณเข้าอีกด้านหนึ่งผ่านวงจรหน่วงเวลา ที่ออกแบบวงจรให้มีเฟสเดียวกันกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและทำงานเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านตลอดเมื่อสัญญาณผ่านวงจรหน่วงเวลาสัญญาณรวมกันจะเหลือสัญญาณเป็นสัญญาณของวงจรกรองความถี่สูงผ่านซึ่งมีเฟสเดียวกันกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถที่จะเขียนให้ออกมาในรูปของสมการได้ดังต่อไปนี้

$$H_L(S) + H_H(S) = 1 \quad (2.2)$$

$$H_H(S) = 1 - H_L(S) \quad (2.3)$$

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีความสูงชันซึ่งทราบว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีผลทำให้สัญญาณเกิดความล่าช้าเราจึงทำการชดเชยสัญญาณเพื่อที่จะทำให้ผลรวมของวงจรมีค่าเท่ากัน การชดเชยความล่าช้าของสัญญาณทำได้โดยใช้วงจรหน่วงเวลา หรือ วงจรกรองความถี่ผ่านทั้งหมด

$$H_H(S) = e^{-\tau s} - H_L(S) \quad (2.4)$$

ค่าของความล่าช้าของเวลาที่เรทำการชดเชยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $e^{-\tau s}$  แทนลงในสมการ จะได้วงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยการลบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านออกจากค่าความล่าช้าของเวลาทำให้ได้ขนาดที่สมบูรณ์และเป็นเชิงเส้น

ค่าความล่าช้าทางเวลาเป็น  $\tau$  ควรจะกำหนดให้เท่ากับ 0 Hz ค่าของเฟสและกรุปดีเลย์ของวงจรกรองความถี่ผ่าน คือ

$$\tau = -\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{\phi_L(\omega)}{\omega} = -d \frac{\phi_L(0)}{\omega} \quad (2.5)$$

ที่ความล่าช้าทางเฟส (Phase Delay)  $\tau_p(\omega)$  และกรุปดีเลย์  $\tau_g(\omega)$  หาได้จาก

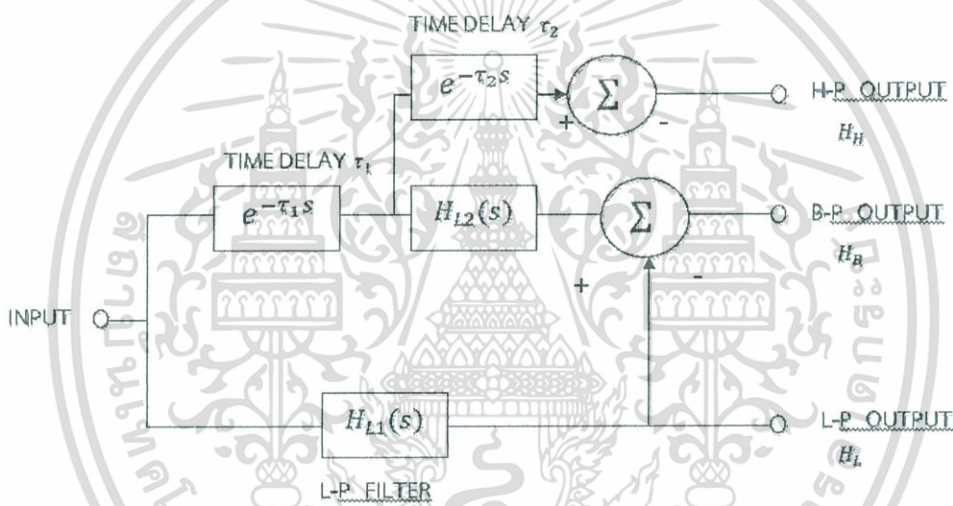
$$\tau_p(\omega) = -\frac{-\phi(\omega)}{\omega} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (2.7)$$

### 2.5.2 หลักการของระบบ 3 ทาง

ในวงจรแบบ 3 ทาง ตามภาพที่ 2.11 ทำการออกแบบโดยวางส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเข้าที่ตรงกลางเพื่อต้องการให้ได้สัญญาณเสียงกลางหรือวงจรกรองแถบความถี่ผ่านวงจรนี้ต้องชดเชย โดยหน่วงเวลา ส่วนที่ 2 ดังนั้นในวงจร 3 ทาง  $z$  เป็นตัวทำให้ล่าช้าทางเวลาของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านมีความล่าช้าขึ้น ในขณะที่  $z$  เป็นตัวทำให้ความล่าช้าทางเวลาของสัญญาณลักษณะวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในช่วงความถี่กลาง



ภาพที่ 2.11 ระบบ 3 ทาง

จากภาพที่ 2.11 ทำการเพิ่มวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเข้ามาอีก 1 ตัวเพื่อสร้างวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

$$\text{Lowpass} = H_L(S) = H_{L1}(S) \quad (2.8)$$

$$\text{Bandpass} = H_g(S) = e^{-\tau_1 s} * H_{L2}(S) - H_{L1}(S) \quad (2.9)$$

$$\text{Highpass} = H_H(S) = e^{-\tau_2 s} * [e^{-\tau_1 s} - H_{L2}(S)] \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการโดยทั่วไปก็เหมือนกับระบบ 2 ทาง โดยจะต้องกำหนดให้ความถี่ของ  $H_{L2}(S)$  มากกว่าของ  $H_{L1}(S)$  จะได้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่คutoff เท่ากับความถี่ของวงจร  $H_{L1}(S)$  และจะได้วงจรกรองความถี่สูงผ่านที่มีความถี่คutoff เท่ากับความถี่ของวงจร  $H_{L2}(S)$  และจะได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านมีช่วงความถี่คutoff เท่ากับความถี่ของวงจร  $H_{L2}(S) - H_{L1}(S)$

## 2.6 สรุป

หัวใจหลักของระบบเครื่องเสียงที่ขาดไม่ได้ คือวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค ซึ่งวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ดีจะต้องมีจุดตัดความถี่คutoff ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน และวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ใกล้เคียงกันหรือเป็นจุดๆ เดียวกันและต้องมีผลรวมของวงจรถัดกล่าวมีค่าเท่ากับ 1 หรือมีความราบเรียบนั่นเอง ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คในระบบ 3 ทางที่ดีโดยใช้สมการเบรินสไตน์โพลีโนเมียล



### บทที่ 3

## โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

### 3.1 บทนำ

โดยปกติการออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาล็อกมักจะนิยมใช้ทฤษฎีการประมาณค่าแบบเบสเซลทอมสัน (Bessel-Thomson) ในการออกแบบแต่ในโครงการวิจัยนี้จะนำเสนอทฤษฎีการประมาณค่าแบบเบียร์นสไตน์หรือโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาล็อกซึ่งมีลักษณะเด่นในการออกแบบ คือ ได้วงจรกรองความถี่ที่มีความราบเรียบที่สุด (Maximally Flat) ประกอบกับข้อได้เปรียบอื่นๆ เช่น สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาดและเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการควบคุม คือ  $n$ ,  $K$  และ  $\varepsilon$  ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ การประยุกต์ใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ในการออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาล็อก ผลจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวงจรกรองความถี่ที่มีอยู่เดิม เช่น วงจรกรองความถี่แบบเบสเซลทอมสัน (Bessel-Thomson) วงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) และวงจรกรองความถี่แบบเชบิเชฟ (Chebyshev)

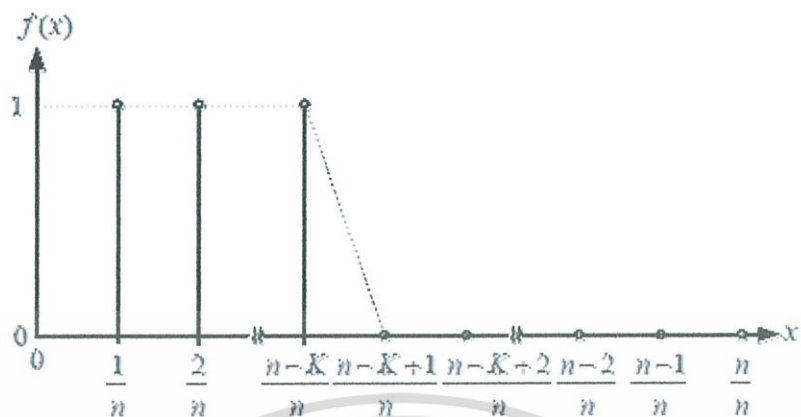
### 3.2 โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials) เกิดขึ้นจากทฤษฎีการประมาณที่มีรูปแบบฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง  $f(x)$  ในช่วงปิดที่  $[0, 1]$  โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับที่  $n^{\text{th}}$  ( $n \geq 1$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$B_n(f; x) = \sum_{i=0}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (3.1)$$

$$\text{เมื่อ } i = 0, 1, \dots, n \text{ และ } \binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชัน  $f(x)$  ในที่นี้ทำการประมาณฟังก์ชันให้เป็นแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Function) มีขอบเขตอยู่ที่  $[0, 1]$  เพราะฉะนั้นฟังก์ชัน  $f\left(\frac{i}{n}\right)$  จึงมีค่าไม่เกิน  $n$  แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อ  $K$  คือจำนวนจุดที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ทำให้ฟังก์ชันการประมาณมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเขียนฟังก์ชันการประมาณความถี่ต่ำผ่านได้เป็น

$$f\left(\frac{i}{n}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq i \leq n-K \\ 0, & n-K+1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (3.2)$$

แทนสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$B_{n,K}(f;x) = \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) สามารถจัดรูปสมการใหม่โดยใช้โพลิโนเมียลแบบ Hermann

$$B_{n,K}(f;x) = (1-x)^K \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i-k} \quad (3.4)$$

จัดรูปให้เข้าใจง่ายขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์

$$B_{n,K}(f;x) = (1-x)^K \sum_{i=0}^{n-K} \binom{K+i-1}{i} x^i \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปลง (Transformation)  $x$  จากช่วง  $[0,1]$  ให้เป็น  $\Omega$  ที่มีช่วงหรือขอบเขตอยู่ที่  $[0, \infty]$

$$x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} \quad (3.6)$$

นำสมการที่ (3.6) แทนลงในสมการที่ (3.5) ได้เป็น

$$B_{n,K}(f; \Omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \Omega^{2i}}{(1 + \Omega^2)^n} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7)  $\Omega$  เป็นแกนความถี่ ( $\Omega$ -axis) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ (Low Pass Prototype Filter) ซึ่งสามารถแปลงเข้าสู่วงจรรองความถี่สูงผ่าน (Low Pass to High Pass Transformation) แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การแปลงแกนความถี่จาก  $\Omega \rightarrow \omega$

จากภาพที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของการแปลงระหว่างแกนความถี่  $\Omega$  ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ กับแกนความถี่  $\omega$  ของวงจรรองความถี่สูงผ่านจะเห็นว่าแถบผ่าน (Pass Band) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบอยู่ที่  $-1 \leq \Omega \leq 1$  ส่วนแถบผ่านของวงจรรองความถี่สูงผ่านจะอยู่ที่  $1 \leq \omega \leq -1$  ดังนั้นเขียนสมการการแปลงได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega = -\frac{1}{\omega} \quad (3.8)$$

นำสมการที่ (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$B_{n,K}(f; \Omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \quad (3.9)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) แทนด้วย  $N(s)$  สามารถหาได้จากคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสอง (Magnitude-squared Characteristics) แทนด้วย  $|N(s)|^2$  แสดงดังสมการ

$$|N(s)|^2 = N(s) \cdot N(-s) \quad (3.10)$$

เพราะฉะนั้นในที่นี้จะเริ่มหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Magnitude-squared Characteristics) ด้วยเหตุเพราะสามารถทำการแปลงเป็นวงจรกรองความถี่ชนิดต่างๆ ได้ด้วยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation) แสดงดังสมการ

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 B^2(\omega)} \quad (3.11)$$

โดยที่  $B(\omega)$  คือ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ในสมการที่ (3.9) นำไปแทนลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 \left[ \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \right]^2} \quad (3.12)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1+\omega^2)^{2n}}{(1+\omega^2)^{2n} + \varepsilon^2 \omega^{4n} \left( \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i} \right)^2} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) เรียกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จากสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ จากนั้นนำสมการที่ได้มาหาค่าโพล (Poles) และซีโร (Zeros) โดยการแทนค่า  $\omega = s/j$  แล้วแก้สมการเลือกค่าโพลและซีโร เป็นที่ทราบกันว่าถ้าต้องการให้ระบบมีความเสถียรภาพ (Stable System) และมีเฟสต่ำสุด (Minimum Phase) จะต้องเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ s (s-plane) ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเศษส่วน (Rational Function)

$$N(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_{m-1}s^{m-1} + a_ms^m}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_{m-1}s^{m-1} + b_ms^m} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $m = 2n$  เป็นอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากสมการที่ (3.13) จะได้เศษเป็น  $(s+1)^{2n}$  เพราะฉะนั้นเลือกค่าซีโร  $s = -1$  นั้นเอง สำหรับค่าโพลสามารถเลือกได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ  $n$ ,  $K$  และ  $\varepsilon$  ของตัวส่วน สรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนหรือเลือกค่าพารามิเตอร์  $n$ ,  $K$  และ  $\varepsilon$  นั้นสามารถปรับคุณลักษณะทางขนาดและเฟสที่ต้องการได้ โดยจะขอกกล่าวถึงรายละเอียดของการปรับพารามิเตอร์ควบคุมทั้งสามในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อกโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อกความถี่ต่ำผ่านอันดับ 2 โดยใช้สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ในเบื้องต้นได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้คือ  $n=1$ ,  $K=1$  และ  $\varepsilon=10$  นำไปแทนลงในสมการที่ (3.13) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านดังสมการที่ (3.15)

$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^2}{(1+\varepsilon^2)s^4 - 2s^2 + 1} \quad (3.15)$$

ในที่นี้เลือกค่า  $\varepsilon=10$  จะได้

$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^2}{101s^4 - 2s^2 + 1} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

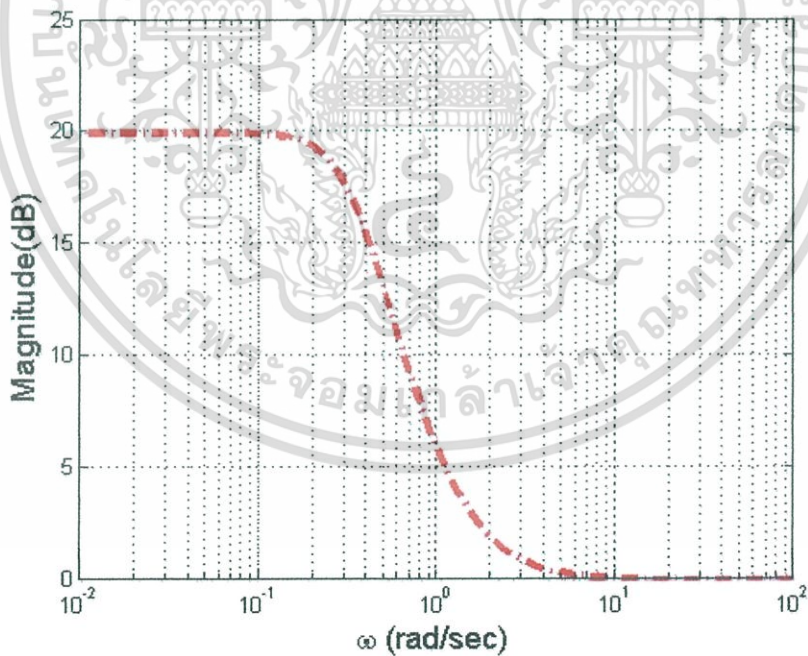
ทำการเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ  $s$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 เมื่อ  $H_0$  คือ ค่าคงที่ที่ใช้กำหนดขนาดโดยกำหนดให้  $H_0 = 1$  ดังนี้

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^2}{s^2 + 0.4678s + 0.0995} \quad (3.17)$$

นำสมการที่ (3.17) มาพล็อตกราฟผลตอบแทนทางความถี่ได้ดังนี้

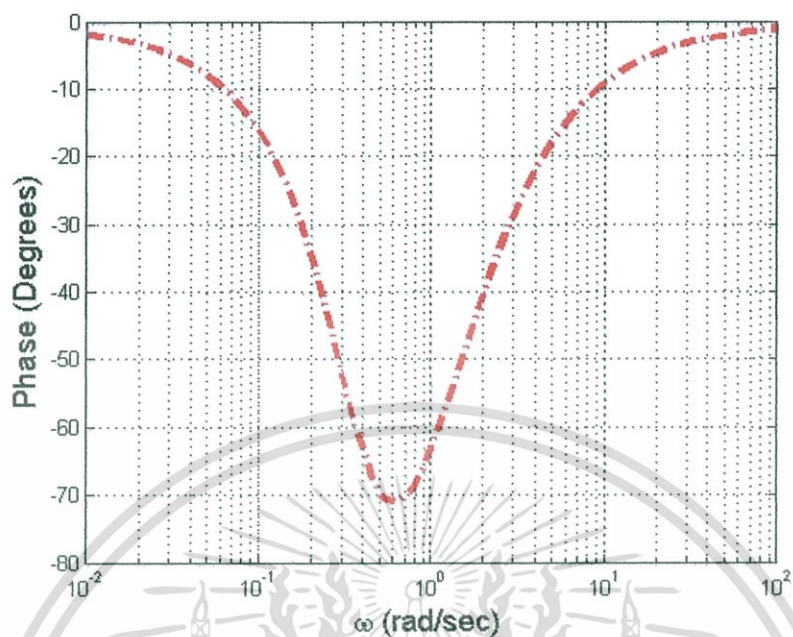
ภาพที่ 3.3 แสดงผลตอบแทนทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบที่สุดทางขนาด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แถบผ่าน (Pass Band) และความถี่แถบหยุด (Stop Band) ดังนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบได้ดี เช่น วงจรชดเชยสัญญาณ (Compensating Circuits)

ภาพที่ 3.4 แสดงผลตอบแทนทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 จะเห็นว่ากราฟมีเฟสเชิงเส้น (Linear Phase)

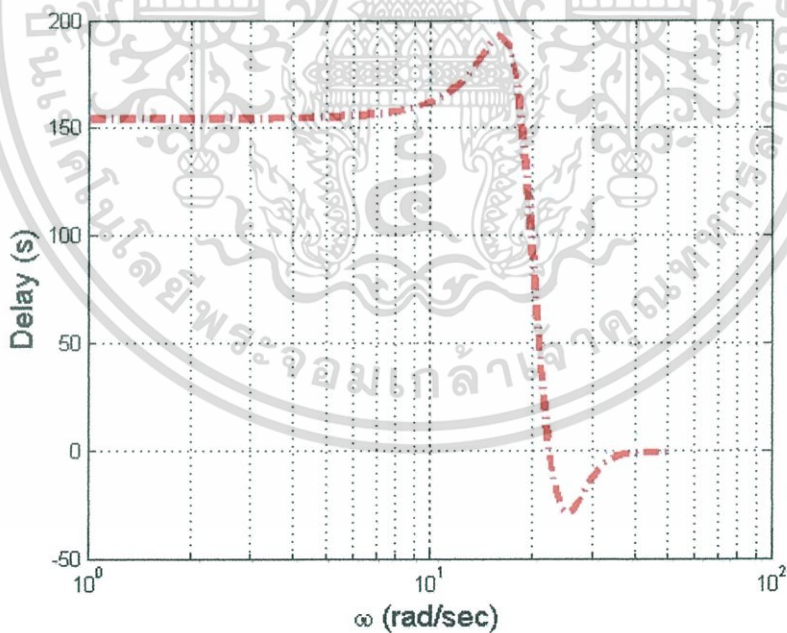


ภาพที่ 3.3 ผลตอบแทนทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไดน์  
อันดับ 2



ภาพที่ 3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไดน์ อันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบทางเวลาประวิง (Maximally Flat Delay) และยังมีคุณลักษณะใกล้เคียงค่าคงที่ (Constant Delay Characteristics) เป็นผลต่อเนื่องจากการมีเฟสเชิงเส้นนั่นเอง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการใช้งานวงจรรองความถี่แบบแอนาล็อก เพราะฉะนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลผลภาพ (Image Processing)

เมื่อทำการออกแบบสมการเบียร์นสไตน์โพลีโนเมียลอันดับ 4 ให้นำสมการที่ (3.13) มาทำเช่นเดียวกัน กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $n=2$   $K=1$  และ  $\varepsilon=10$  จะได้รูปแบบสมการ คือ

$$|N(s)|^2 = \frac{H_o^2 \cdot (1-s^2)^4}{101s^8 - 404s^6 + 406s^4 - 4s^2 + 1} \quad (3.18)$$

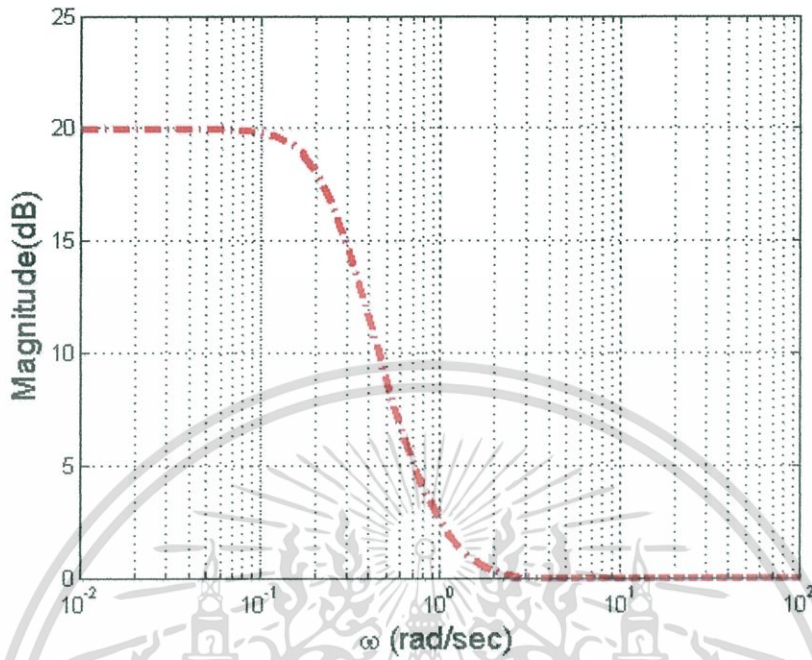
ทำการเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ  $s$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4 ดังนี้

$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1532s^3 + 2.9714s^2 + 0.7941s + 0.0995} \quad (3.19)$$

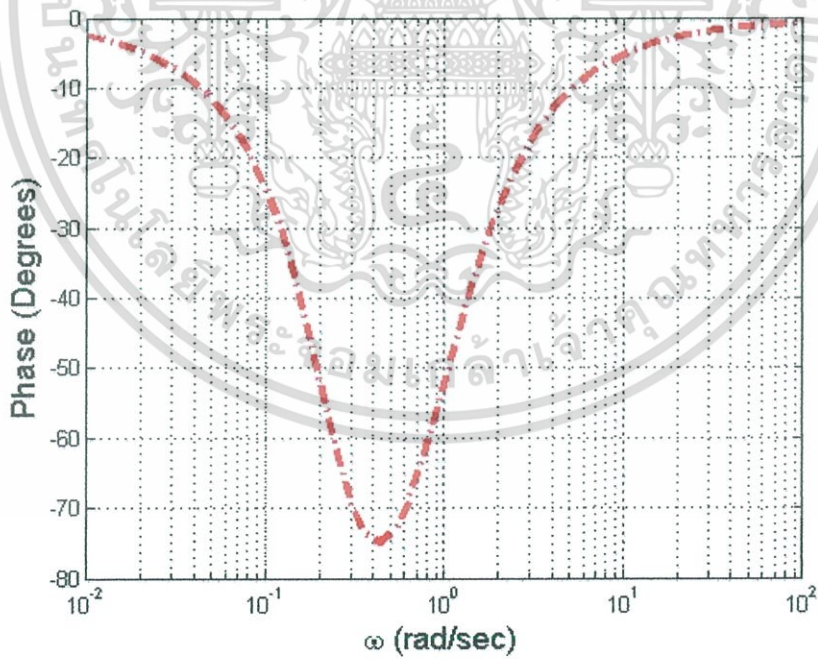
เมื่อ  $H_o$  คือค่าคงที่ที่ใช้กำหนดขนาด

นำสมการที่ (3.19) ทำการพล็อตกราฟผลตอบสนองทางความถี่ โดยสมมติให้  $H_o=1$  แสดงดังภาพที่ 3.6 ภาพที่ 3.7 และภาพที่ 3.8 ตามลำดับ

ภาพที่ 3.6 ภาพที่ 3.7 และภาพที่ 3.8 แสดงผลตอบสนองทางขนาด ทางเฟส และทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4 ตามลำดับ พบว่ามีผลตอบสนองทางด้านต่างๆ เช่นเดียวกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้สมการแบบโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 ดังแสดงข้างต้น

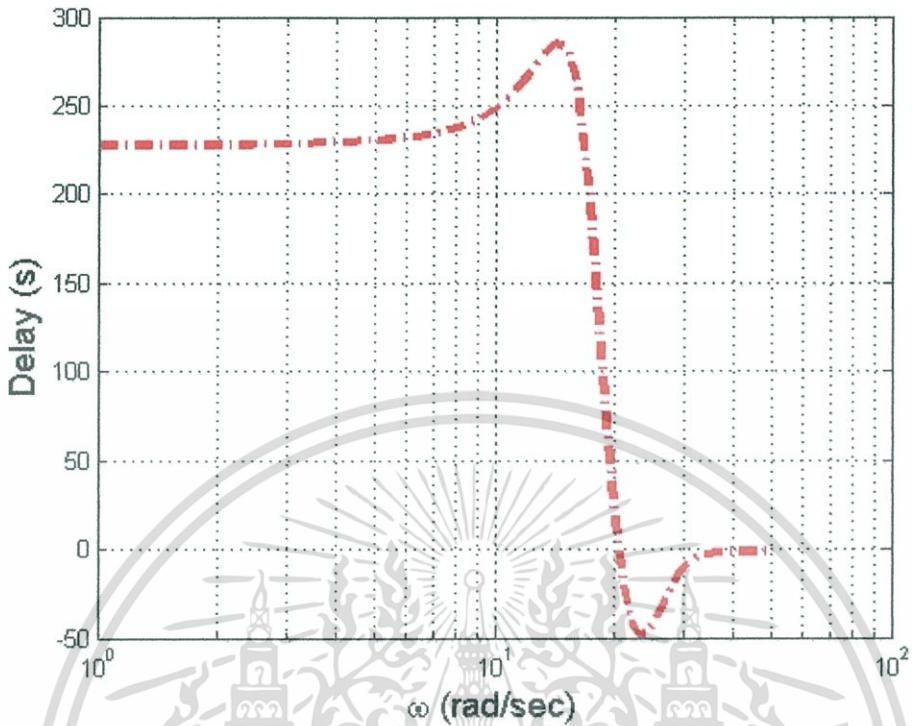


ภาพที่ 3.6 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการ โพลี โนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์  
อันดับ 4



ภาพที่ 3.7 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการ โพลี โนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์  
อันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์ตน์ สไตน์ อันดับ 4

### 3.4 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ $\epsilon$

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้สมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตน์สไตน์อันดับ 2 โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $n=1$  และ  $K=1$  แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  เป็นดังนี้  $\epsilon=0.5$   $\epsilon=1.5$   $\epsilon=2.5$   $\epsilon=3.5$   $\epsilon=10$  และ  $\epsilon=15$  ส่วนค่าคงที่  $H_0=1$  ฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (3.20) สมการที่ (3.21) สมการที่ (3.22) สมการที่ (3.23) สมการที่ (3.24) และสมการที่ (3.25) ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^2}{s^2 + 1.8408s + 0.8944} \quad (3.20)$$

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^2}{s^2 + 1.3134s + 0.5547} \quad (3.21)$$

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^2}{s^2 + 1.0092s + 0.3714} \quad (3.22)$$

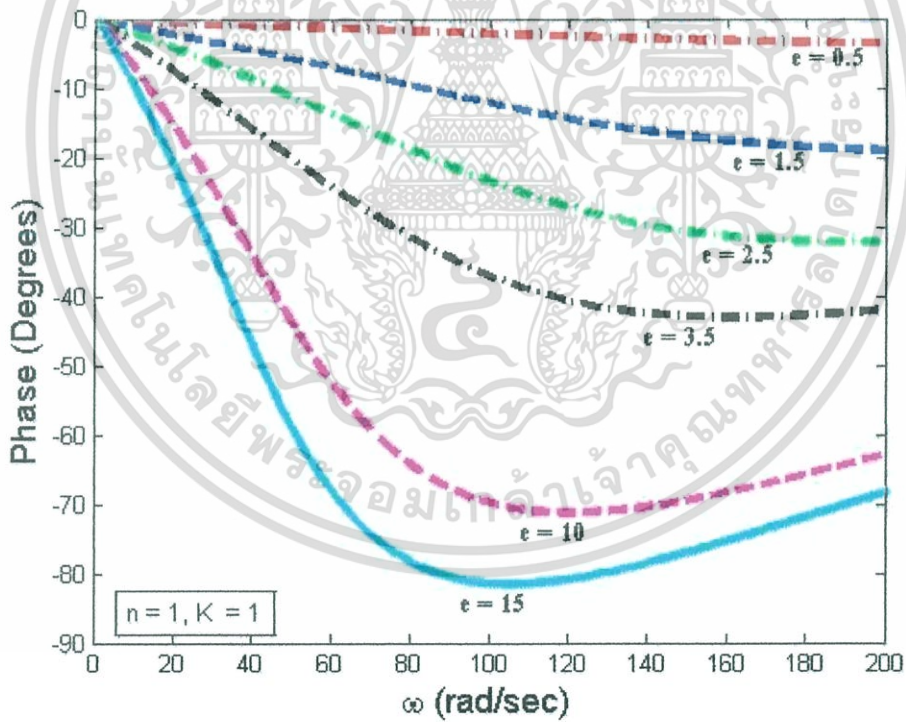
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^2}{s^2 + 0.8368s + 0.2747} \quad (3.23)$$

$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^2}{s^2 + 0.4678s + 0.0995} \quad (3.24)$$

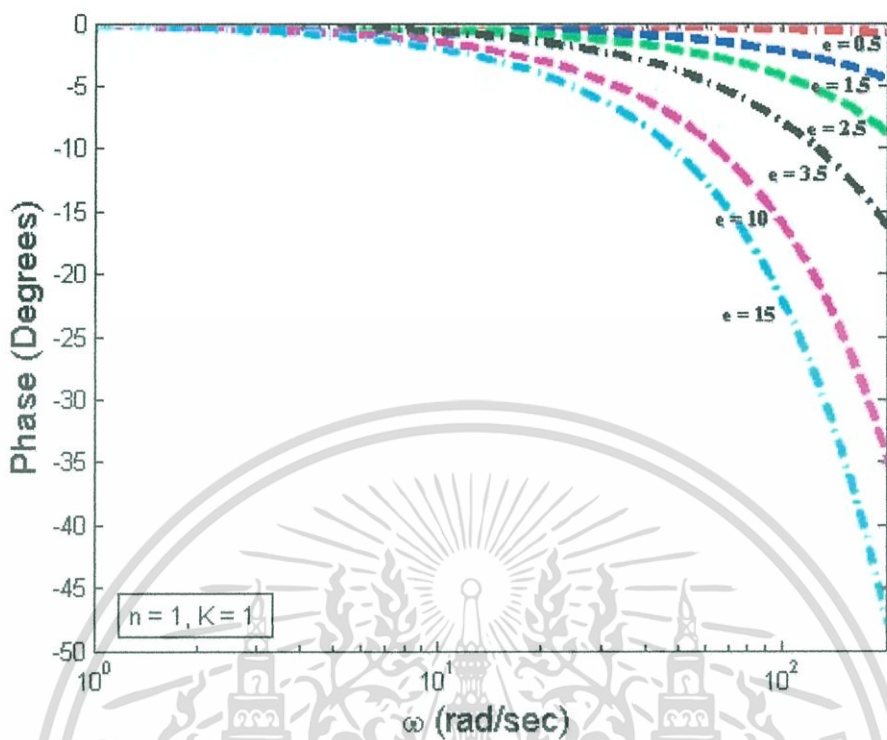
$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^2}{s^2 + 0.3766s + 0.0665} \quad (3.25)$$

นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสได้ดังภาพที่ 3.9 (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น (Linear Scale) และภาพที่ 3.9 (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก (Semi-log Scale) จะเห็นได้ว่ามีเฟสเชิงเส้นทุกเงื่อนไข นอกจากนั้นสโลปของเฟสยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$



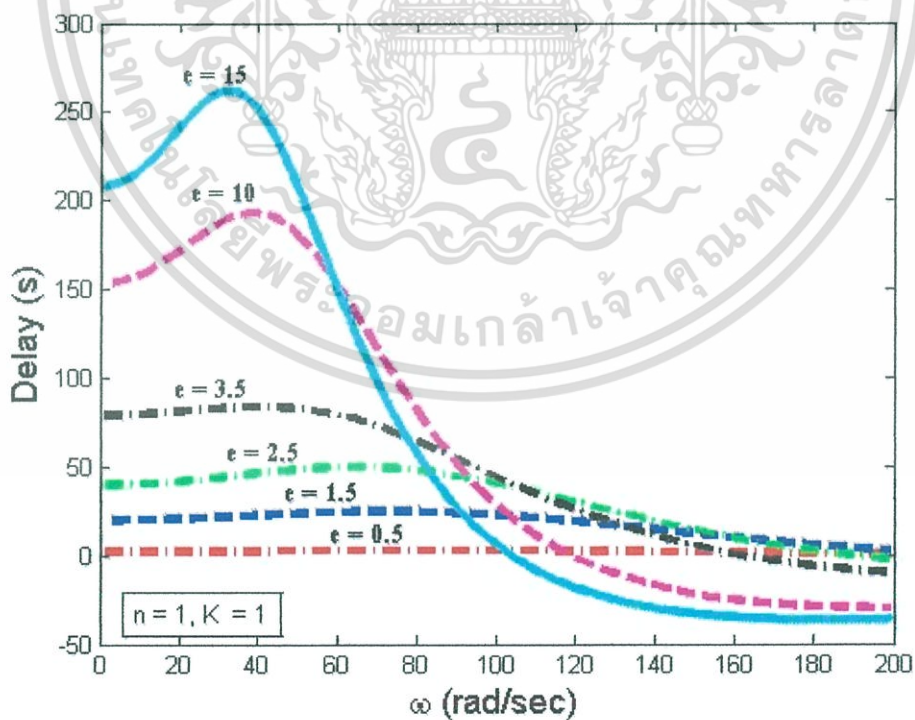
(ก) สเกลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



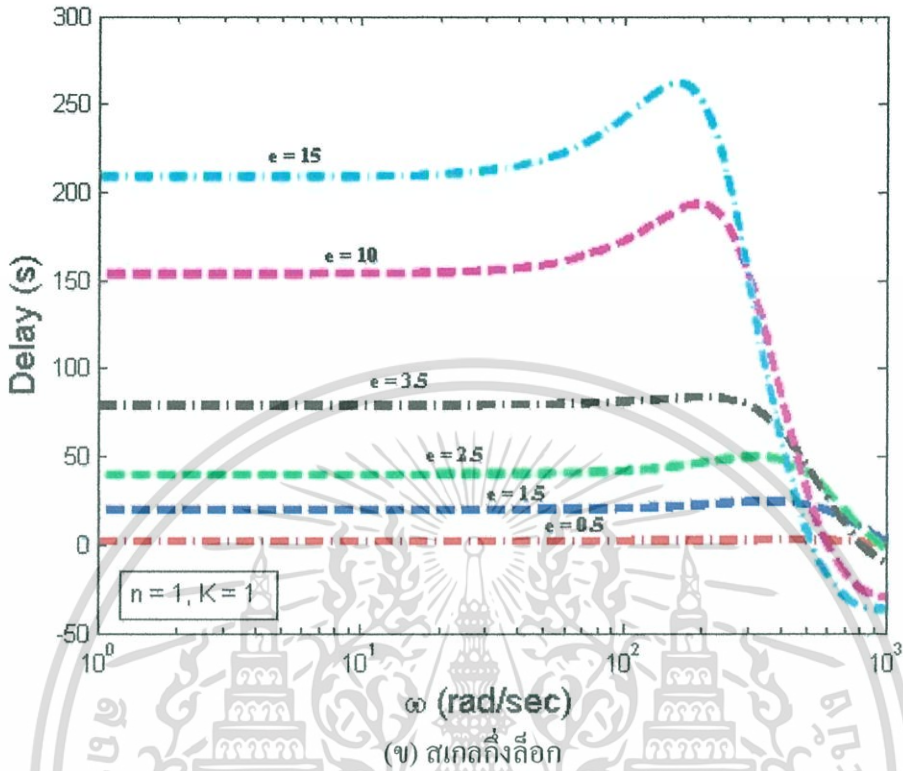
(ข) สเกลกึ่งล็อก

ภาพที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$



(ก) สเกลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$

ภาพที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  เป็นดังนี้  $\varepsilon=0.5$   $\varepsilon=1.5$   $\varepsilon=2.5$   $\varepsilon=3.5$   $\varepsilon=10$  และ  $\varepsilon=15$  ส่วนค่าคงที่  $H_0=1$  โดยฟังก์ชันถ่ายโอนจะเหมือนกับในกรณีพิจารณาเฟสในภาพที่ 3.9 นั้นเอง โดยภาพที่ 3.10 (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น และภาพที่ 3.10 (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก จะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุดทางเวลาประวิง และยังมีคุณสมบัติเป็นค่าคงที่ทุกเงื่อนไข

ทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $n=1$  เป็น  $n=2$  โดยคงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ เช่นเดิม เพื่อดูผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  เป็นดังนี้  $\varepsilon=0.5$   $\varepsilon=1.5$   $\varepsilon=2.5$   $\varepsilon=3.5$   $\varepsilon=10$  และ  $\varepsilon=15$  แสดงได้ดังสมการที่ (3.26) สมการที่ (3.27) สมการที่ (3.28) สมการที่ (3.29) สมการที่ (3.30) และสมการที่ (3.31) ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.9259s^3 + 5.7063s^2 + 3.6617s + 0.8944} \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

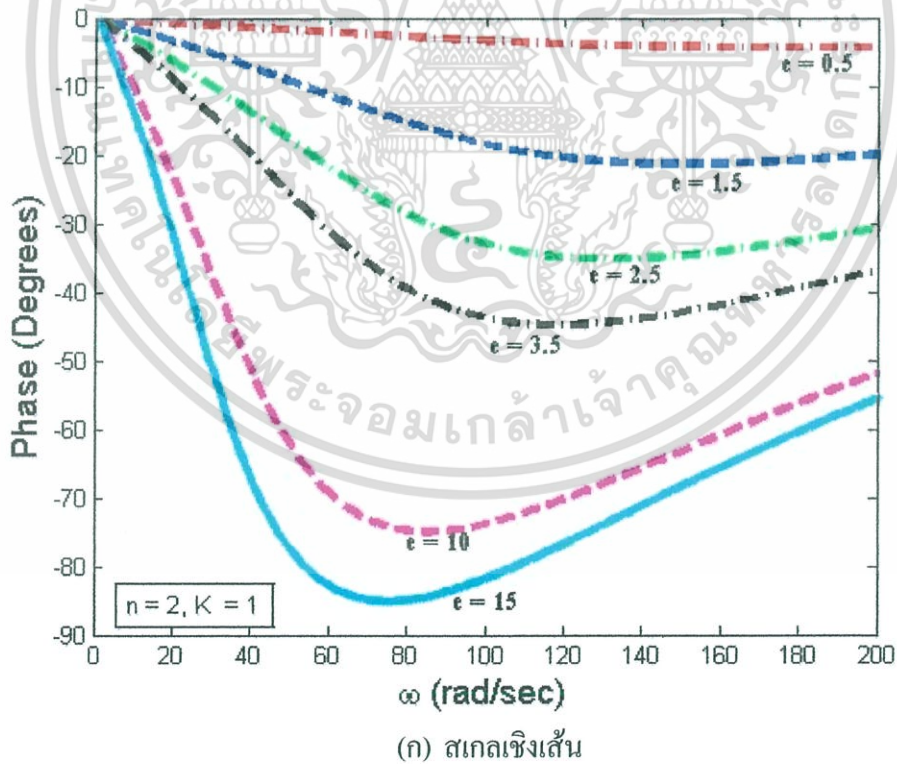
$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.6607s^3 + 4.7004s^2 + 2.5388s + 0.5547} \quad (3.27)$$

$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.4915s^3 + 4.0952s^2 + 1.8957s + 0.3714} \quad (3.28)$$

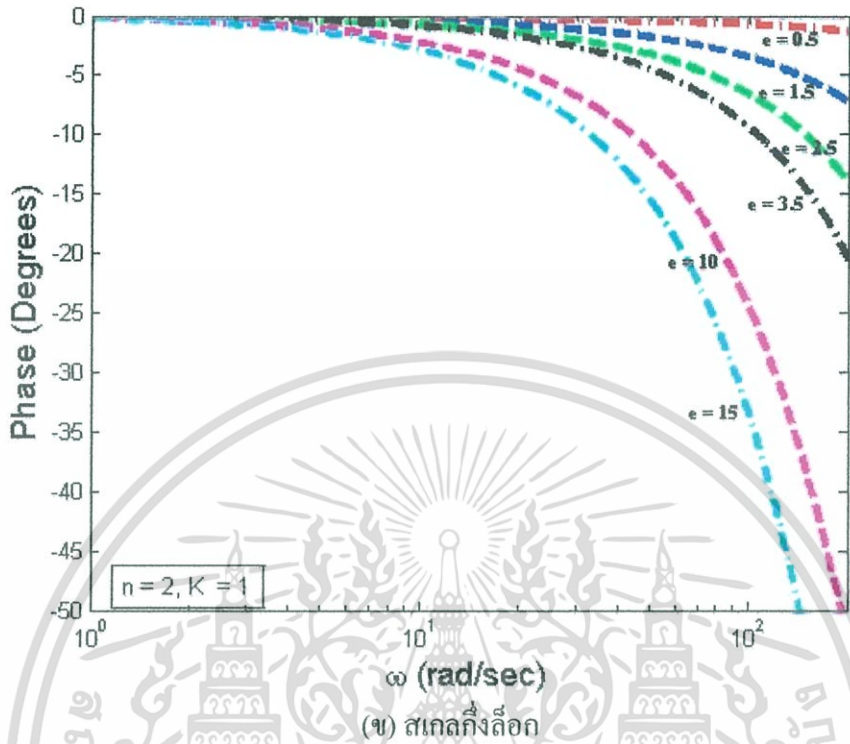
$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.3891s^3 + 3.7432s^2 + 1.5358s + 0.2747} \quad (3.29)$$

$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1533s^3 + 2.9716s^2 + 0.7943s + 0.0995} \quad (3.30)$$

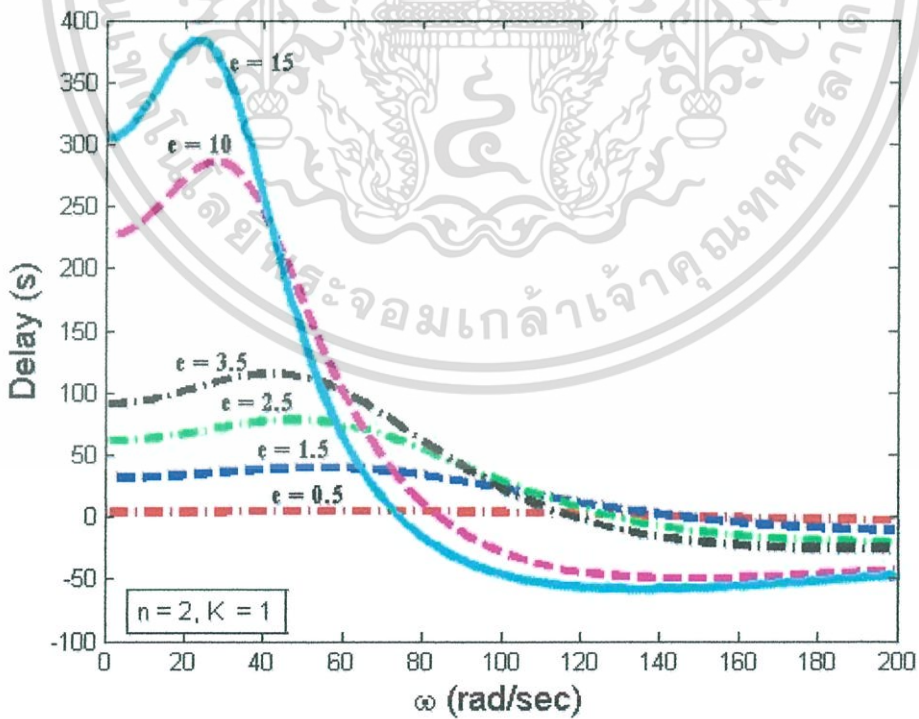
$$N(s) = \frac{H_o \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.0917s^3 + 2.7793s^2 + 0.6225s + 0.0665} \quad (3.31)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

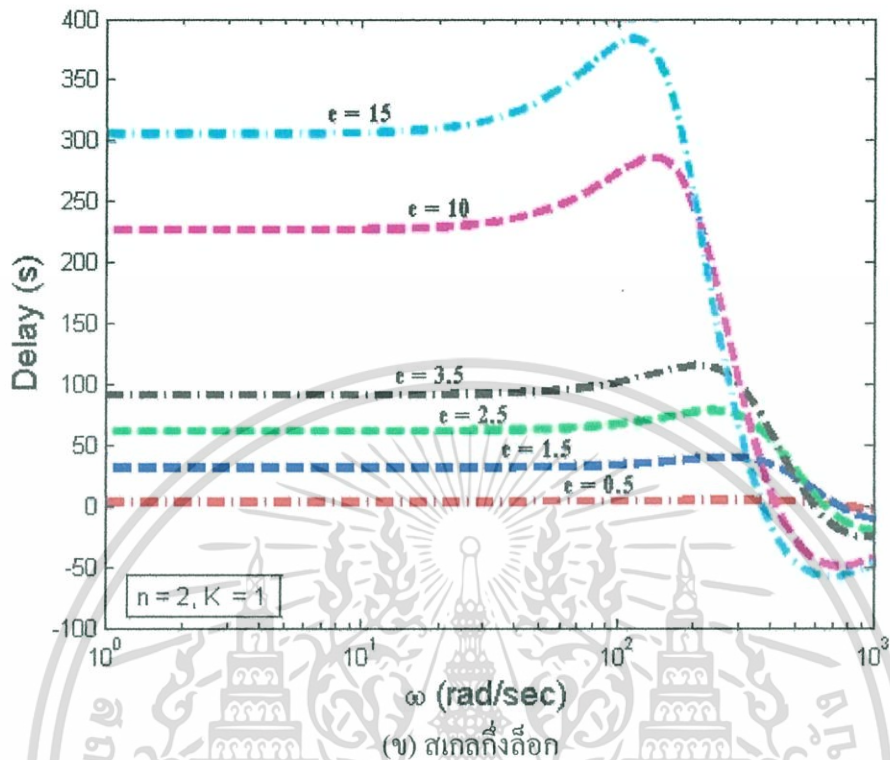


ภาพที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$



(ก) สเกลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$

นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสได้ดังภาพที่ 3.11 (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น (Linear Scale) และภาพที่ 3.11 (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก (Semi-log Scale) จะเห็นได้ว่ามีเฟสเชิงเส้นทุกเงื่อนไข เช่นเดียวกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์อันดับ 2

จากภาพที่ 3.12 เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส และผลตอบสนองเวลาประวิงของวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์อันดับ 4 ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  ซึ่งผลตอบสนองเหมือนกับวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์อันดับ 2 คือ มีเฟสเป็นเชิงเส้น และมีความราบเรียบทางเวลาประวิง

สรุปข้อดีของวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์คือ สามารถปรับเปลี่ยนการลดทอนในช่วงความถี่แถบหยุด ปรับเปลี่ยนสโลปของเฟส และปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นตามต้องการ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$

### 3.5 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ $K$

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 2 เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้  $K = 0$  และ  $K = 1$  โดยกำหนดให้  $n=1$  และ  $\varepsilon = 2.8$  เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการ

$$N(s) = \frac{(1+s)^2}{s^2 + 2s + 1} \quad (3.32)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^2}{s^2 + 0.4678s + 0.0995} \quad (3.33)$$

นำสมการที่ (3.33) ไปพล็อตกราฟแล้วกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงซึ่งในทางปฏิบัตินั้นจะใช้ค่า  $K$  เท่ากับ 1 ถึง  $n$  เท่านั้น จึงไม่สามารถใช้ค่า  $K$  เท่ากับศูนย์ได้

ดังนั้นการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$  จะใช้การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการเบิร์ตสไตน์โพลีโนเมียลอันดับ 4 เมื่อมีค่าพารามิเตอร์  $K = 1$  และ  $K = 2$  โดยกำหนดให้  $n = 2$  และ  $\varepsilon = 3.5$  ได้ดังสมการ

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.3892s^3 + 3.7433s^2 + 1.5359s + 0.2748} \quad (3.34)$$

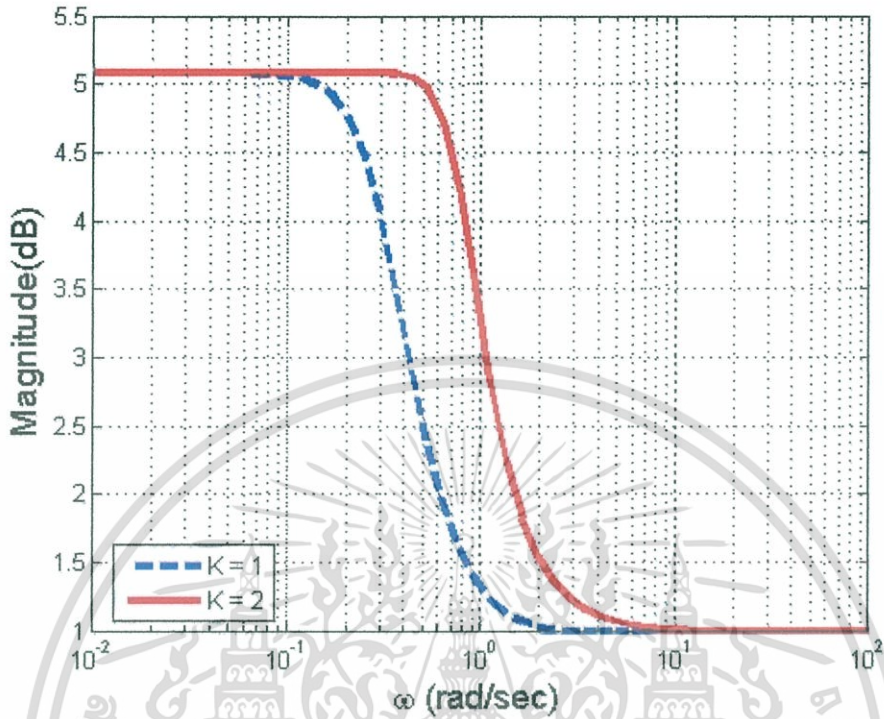
$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 2.2412s^3 + 3.3605s^2 + 1.2646s + 0.2748} \quad (3.35)$$

ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

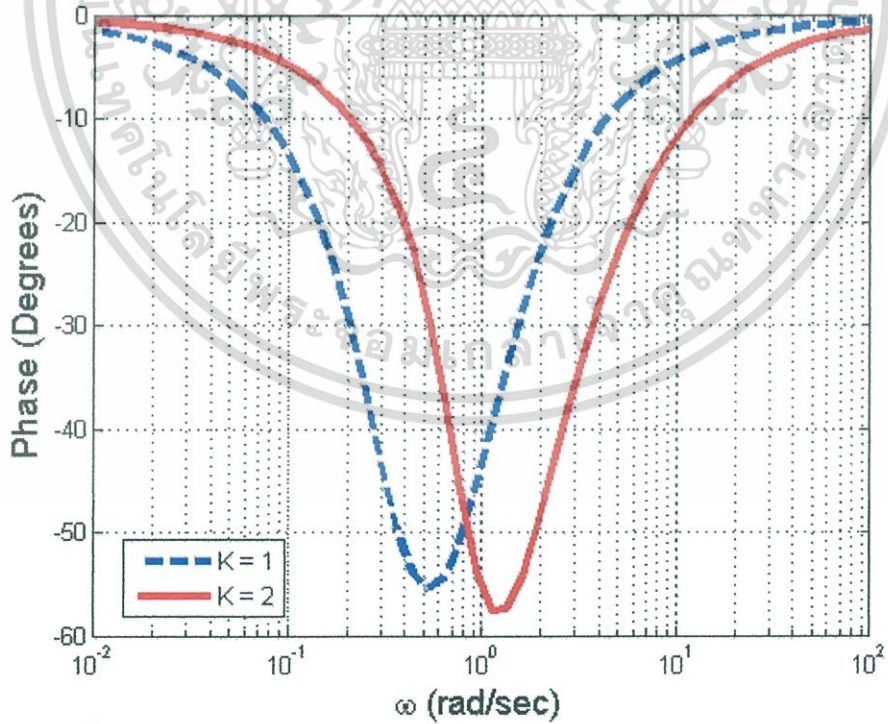
ภาพที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K = 1$  และ  $K = 2$  จะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุดทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและแถบหยุด

ภาพที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K = 1$  และ  $K = 2$  จะเห็นว่าเฟสเป็นเชิงเส้น

ภาพที่ 3.15 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K = 1$  และ  $K = 2$  จะเห็นว่า การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$  ทำให้เกิดความราบเรียบทางเวลาประวิงมากขึ้น

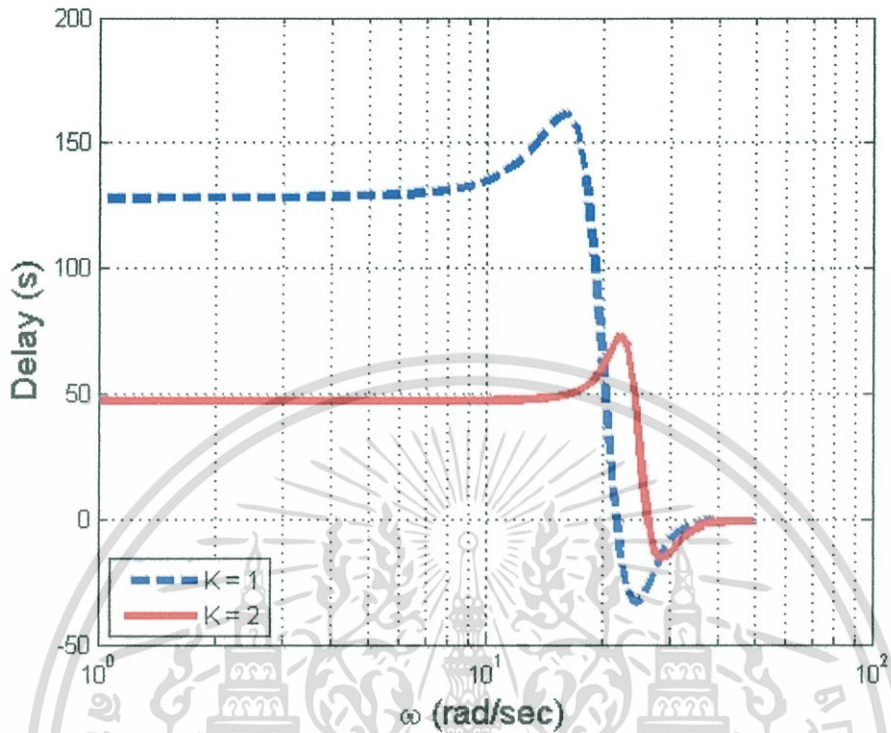


ภาพที่ 3.13 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$



ภาพที่ 3.14 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

สรุปข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ คือ สามารถปรับเปลี่ยนสโลปหรือความชันของขนาดและเฟสได้ตามการใช้งาน และสามารถปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

### 3.6 การเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบอื่น

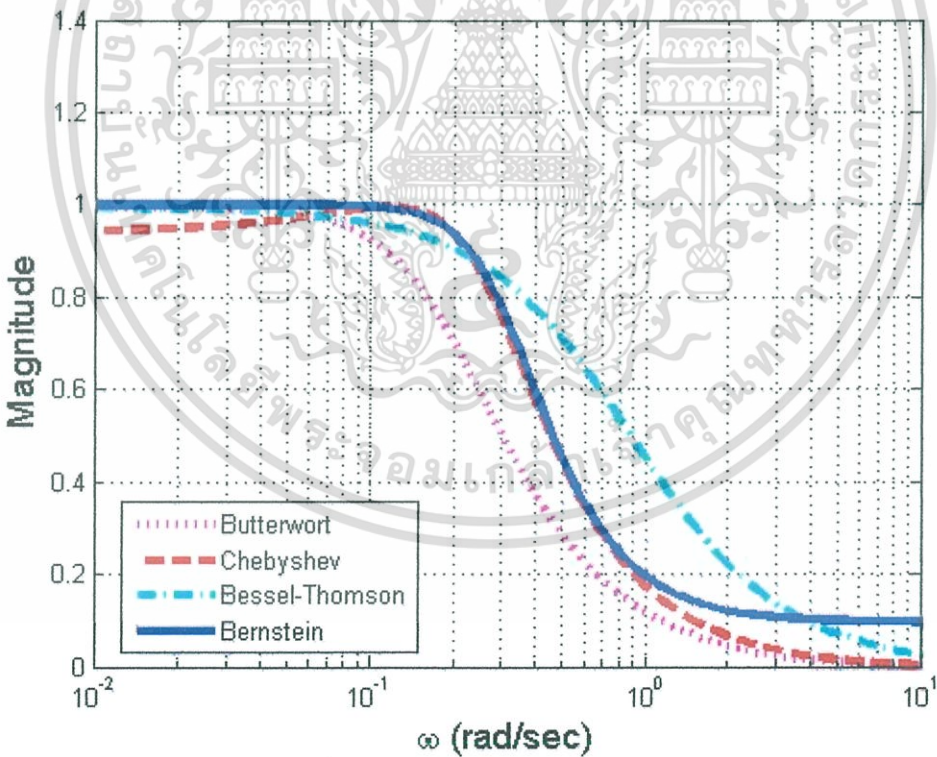
ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 2 กับวงจรกรองความถี่ที่มีอยู่เดิม เช่น วงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth Filter) วงจรกรองความถี่แบบเชบีเชฟ (Chebyshev Filter) และวงจรกรองความถี่แบบเบสเซลทอมสัน (Bessel-Thomson Filter) แสดงดังภาพที่ 3.16 ภาพที่ 3.17 ภาพที่ 3.18 และภาพที่ 3.19

ภาพที่ 3.16 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน อันดับ 2 และอันดับ 4 ของวงจรกรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์กับวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท วงจรกรองความถี่แบบเชบีเชฟ และวงจรกรองความถี่แบบเบสเซลทอมสัน อธิบายได้ดังนี้ คุณลักษณะทางขนาดของวงจรกรองความถี่แบบเบสเซลทอมสันจะมีความราบเรียบทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านน้อยที่สุด คุณลักษณะทางขนาดของวงจรกรองความถี่แบบเชบีเชฟจะมีการกระเพื่อมแบบเท่าเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

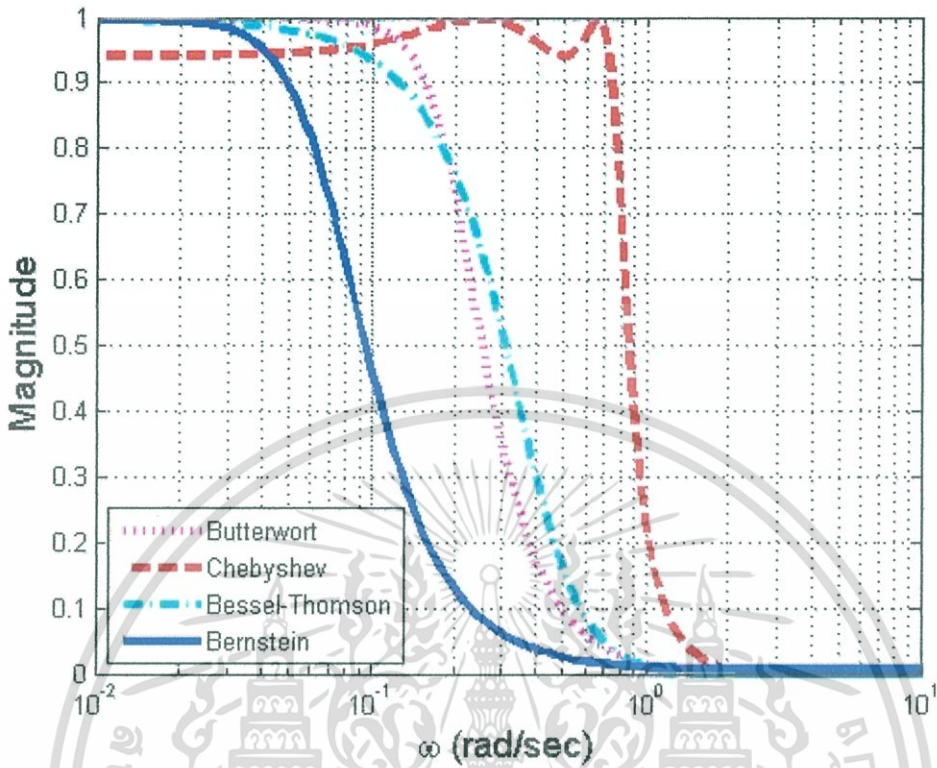
(Equal Ripple) ในย่านความถี่แถบผ่านแต่จะมีความชันที่ดีที่สุด (Sharpness) คุณลักษณะทางขนาดของวงจรรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทจะมีความราบเรียบทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและมีความชันดีรองจากเซบีเชฟ ส่วนคุณลักษณะทางขนาดของวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์จะมีความราบเรียบทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านมีความชันที่ดีและข้อได้เปรียบคือวงจรรองความถี่แบบสมการเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลสามารถปรับคุณลักษณะทางขนาดให้เป็นที่ต้องการได้ เช่น สามารถปรับช่วงย่านความถี่แถบผ่าน ปรับสโลป และปรับการลดทอนในช่วงย่านความถี่แถบหยุด โดยการปรับพารามิเตอร์  $K$  และ  $\varepsilon$

ภาพที่ 3.17 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน อันดับ 2 และอันดับ 4 ของวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์กับวงจรรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท วงจรรองความถี่แบบเซบีเชฟ และวงจรรองความถี่แบบเบสเซลทอมสัน จะเห็นว่าคุณลักษณะทางเฟสของสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์จะเป็นเชิงเส้นที่สุดพร้อมทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยน สโลปของเฟสได้โดยการปรับพารามิเตอร์  $K$  และ  $\varepsilon$



(ก) วงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



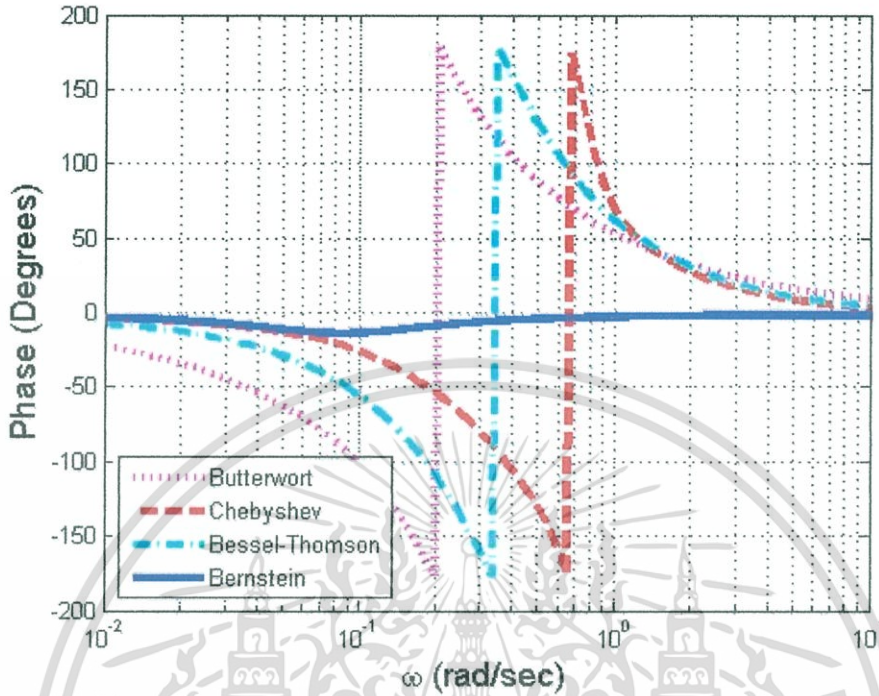
(จ) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4

ภาพที่ 3.16 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ อันดับ 2 และอันดับ 4

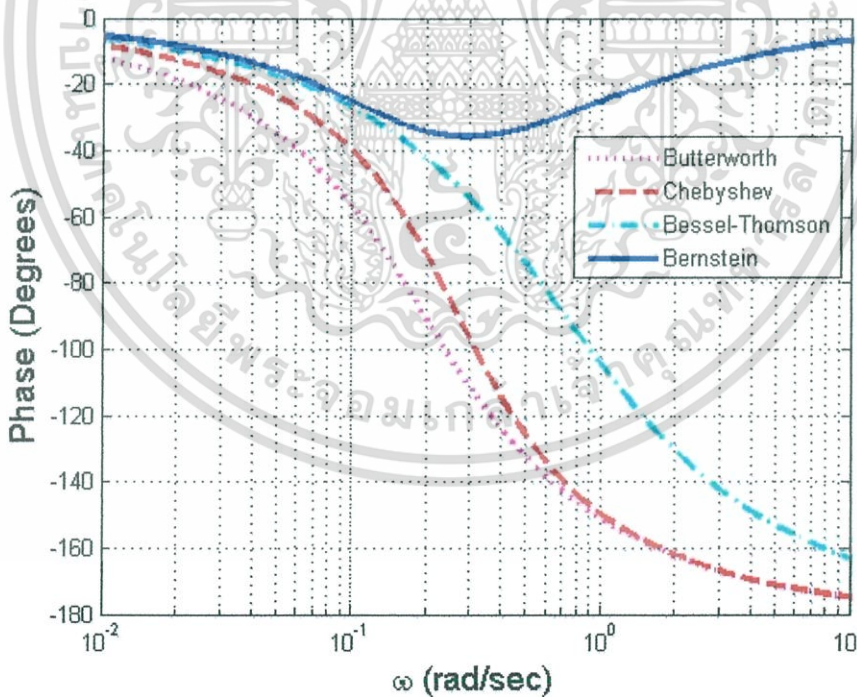
ภาพที่ 3.18 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับ 2 และอันดับ 4 ของวงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์กับวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท วงจรกรองความถี่แบบเชบิเชฟ และวงจรกรองความถี่แบบเบสเซลทอมสัน จะเห็นว่าคุณลักษณะทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์มีความราบเรียบที่สุดและเป็นค่าคงที่ นอกจากนั้นยังสามารถปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$  และ  $\varepsilon$

ภาพที่ 3.19 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) อันดับ 2 และอันดับ 4 แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์และแบบเบสเซลทอมสัน โดยกำหนดให้  $BW = 1$  แล้วนำไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะทางเฟส จะเห็นว่าคุณลักษณะทางเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์มีความเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า หรือเฟสเป็นเชิงเส้นกว่าแบบเบสเซลทอมสันนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



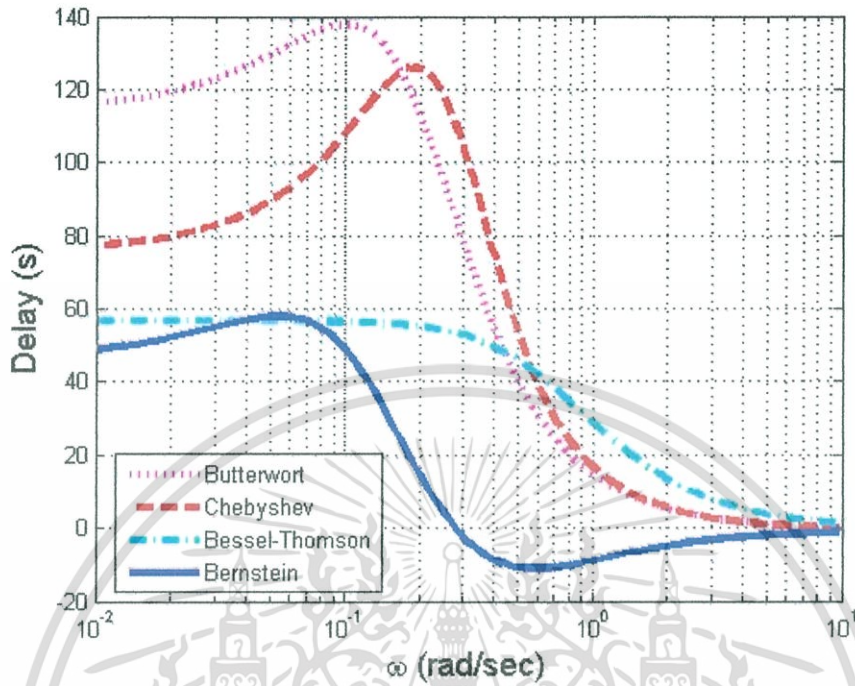
(ก) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2



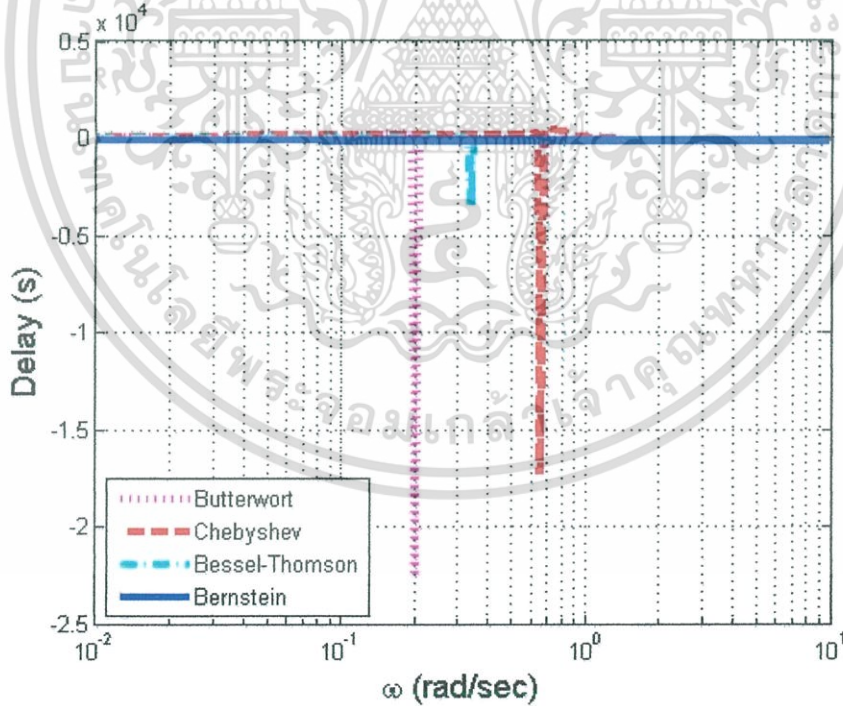
(ข) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4

ภาพที่ 3.17 การเปรียบเทียบผลตอบสองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 และอันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



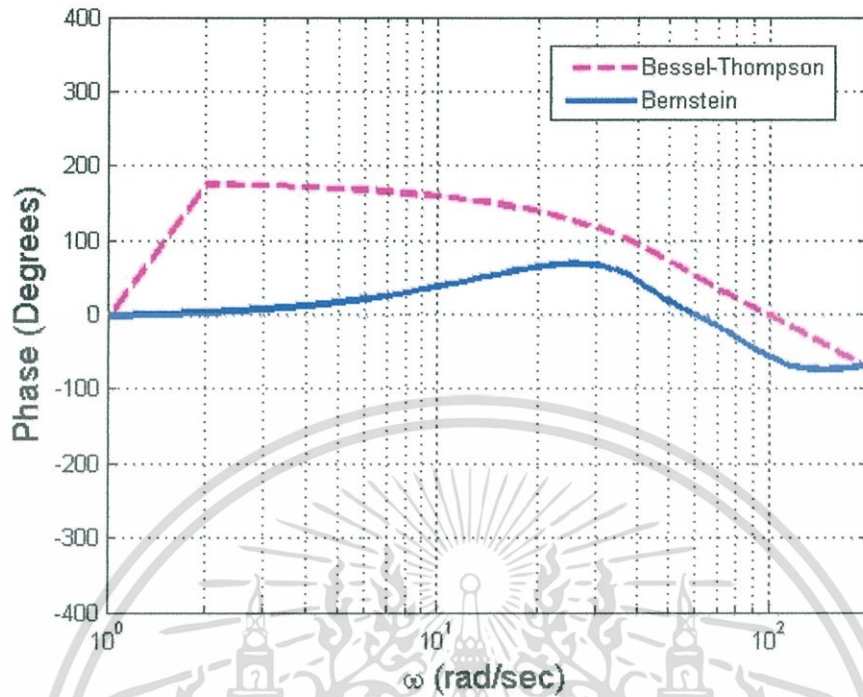
(ก) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 2



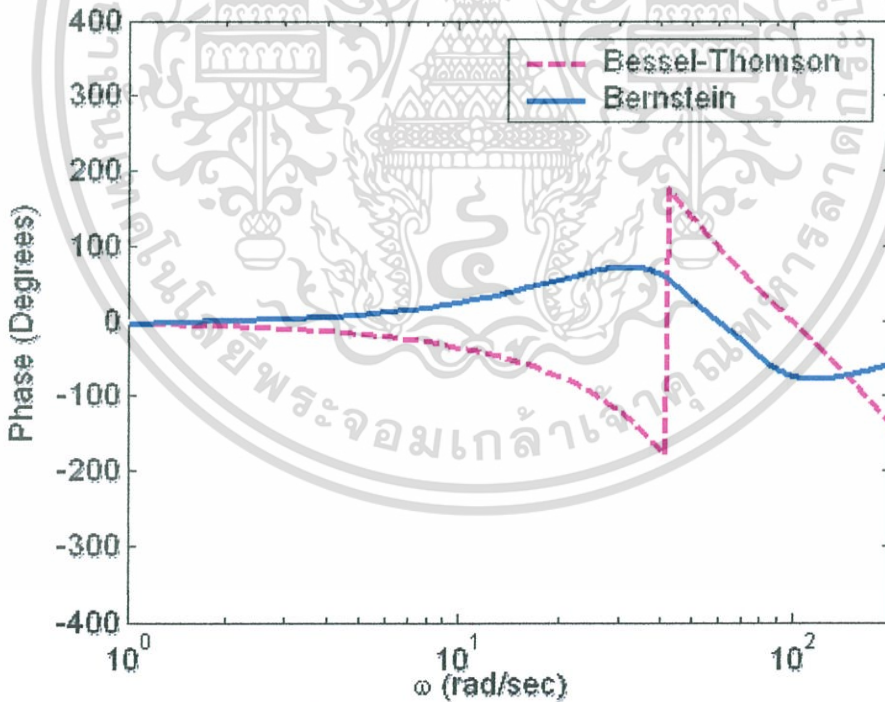
(ข) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4

ภาพที่ 3.18 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ อันดับ 2 และอันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 2



(ข) วงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4

ภาพที่ 3.19 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบ Bessel-Thomson และ แบบ Bernstein อันดับ 2 และอันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 สรุป

การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อกโดยใช้สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์ มีข้อได้เปรียบหลายประการ คือ ผลตอบสนองทางขนาดมีความราบเรียบที่สุดทั้งในย่านความถี่แถบผ่านและความถี่แถบหยุด ผลตอบสนองทางเฟสมีความเป็นเชิงเส้นส่งผลให้มีความราบเรียบทางเวลาประวิง และเวลาประวิงเป็นค่าคงที่ การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ควบคุม  $K$  และ  $\varepsilon$  จะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนการลดทอนในช่วงความถี่แถบหยุด ปรับเปลี่ยนสโลปหรือความชันของขนาดและเฟส ปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรองความถี่แบบเบสเซลทอมสันที่เป็นการประมาณค่าที่มีเฟสเชิงเส้นพบว่าวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์มีเฟสเป็นเชิงเส้นมากกว่าทั้งในวงจรรองความถี่ต่ำผ่านและวงจรรองผ่านแถบความถี่ ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงนำวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่เสียงนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

#### 4.1 บทนำ

ในการแก้ปัญหาของระบบเครื่องเสียงเพื่อไม่ให้สัญญาณเสียงความถี่ต่ำ สัญญาณความถี่สูง และสัญญาณความถี่ระดับกลางเกิดสัญญาณรบกวนกันนั้น จะต้องใช้วงจรกรองความถี่ที่เรียกว่า วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา ซึ่งปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์เนื่องจากวงจรกรองความถี่แบบเบียร์นสไตน์ มีข้อดีกว่าวงจรกรองความถี่แบบอื่นๆ เช่น วงจรกรองความถี่ที่มีความราบเรียบที่สุด และสามารถควบคุมลักษณะทางเฟสและขนาดได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ เป็นต้น จากการออกแบบจะทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  หลายๆ ค่า เพื่อให้ได้วงจรกรองความถี่แบบสมการเบียร์นสไตน์โพลีโนเมียลที่มีคุณสมบัติตามความต้องการ

#### 4.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาลอกแบบเบียร์นสไตน์

ในออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยทั่วไป จะทำการหาสมการวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ก่อนจากนั้นค่อยทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และสมการวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) จากสมการกรองความถี่ต่ำผ่านดังกล่าว เมื่อนำสมการวงจรกรองความถี่ทั้งสามมารวมกันจะต้องได้สมการวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ที่มีความราบเรียบหรือมีค่าเท่ากับ 1 แต่การออกแบบวิธีนี้อาจจะไม่ได้วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ดีเสมอไป จึงได้มีการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยเริ่มหาสมการของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) จากสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 2 ก่อนจากนั้นทำการ Conjugate เพื่อให้ได้สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) และเป็นการลดจำนวนพจน์ของเศษในสมการให้เหลือเศษเพียง 3 พจน์ที่สามารถแบ่งเป็นสมการของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) สมการของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และสมการของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ได้อย่างละพจน์ แล้วนำสมการของวงจรกรองความถี่ทั้งสามมารวมกัน จะต้องได้กราฟของวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ที่มีขนาดราบเรียบหรือมีค่าเท่ากับหนึ่งตามสมการที่ (4.1)

$$|H(j\omega)|_{APF}^2 = |H(j\omega)|_{LPF}^2 + |H(j\omega)|_{BPF}^2 + |H(j\omega)|_{HPF}^2 \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $|H(j\omega)|^2_{LPF}$  คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

$|H(j\omega)|^2_{HPF}$  คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

$|H(j\omega)|^2_{BPF}$  คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

$|H(j\omega)|^2_{APF}$  คือสมการฟังก์ชันถ่ายโอนคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรกรองผ่านทุกความถี่

จากคุณสมบัติของการแปลงเป็น Transfer Function ของสมการวงจรกรองความถี่ผ่านตลอด (All Pass Filter) จะได้

$$TF_{APF} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.2)$$

เมื่อกำหนดให้  $N(s) = D(-s)$  โดย  $N(s)$  คือ Numerator หรือ เศษของสมการ และ  $D(s)$  คือ Denominator หรือ ส่วนของสมการ จะได้

$$TF_{APF} = \frac{D(-s)}{D(s)} \quad (4.3)$$

นำสมการของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์สมการที่ (3.13) มากำหนดค่า  $n = 1$  และ  $n - k = 0$  จะได้ตัวส่วนดังนี้

$$|D(j\omega)|^2 = (1 + \omega^2)^2 + \varepsilon^2 \omega^4 \quad (4.4)$$

$$|D(j\omega)|^2 = (1 + \varepsilon^2)\omega^4 + 2\omega^2 + 1 \quad (4.5)$$

กำหนดให้  $s = j\omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|D(s)|^2 = (1 + \varepsilon^2)s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.6)$$

แทนค่า  $\varepsilon = 0$  ลงในสมการที่ (4.6)

$$|D(s)|^2 = s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.7)$$

$$|D(s)| = s^2 + 2s + 1 \quad (4.8)$$

นำสมการที่ (4.8) แปลงเป็นสมการวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ตามรูปแบบสมการที่ (4.3)

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 2s + 1}{s^2 + 2s + 1} \right] \quad (4.9)$$

นำสมการที่ (4.9) ทำเป็นสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 2s + 1}{s^2 + 2s + 1} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 2s + 1}{s^2 + 2s + 1} \right] \quad (4.10)$$

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 1) - 2s}{s^2 + 2s + 1} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 1) + 2s}{s^2 + 2s + 1} \right] \quad (4.11)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{(s^2 + 1)^2 - (2s)^2}{(s^2 + 2s + 1)^2} \quad (4.12)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{s^4 - 2s^2 + 1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (4.13)$$

นำสมการที่ (4.13) มาแยกพจน์ออกเป็นของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (4.14)$$

$$N(s)_{BPF} = \frac{-2s^2}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (4.15)$$

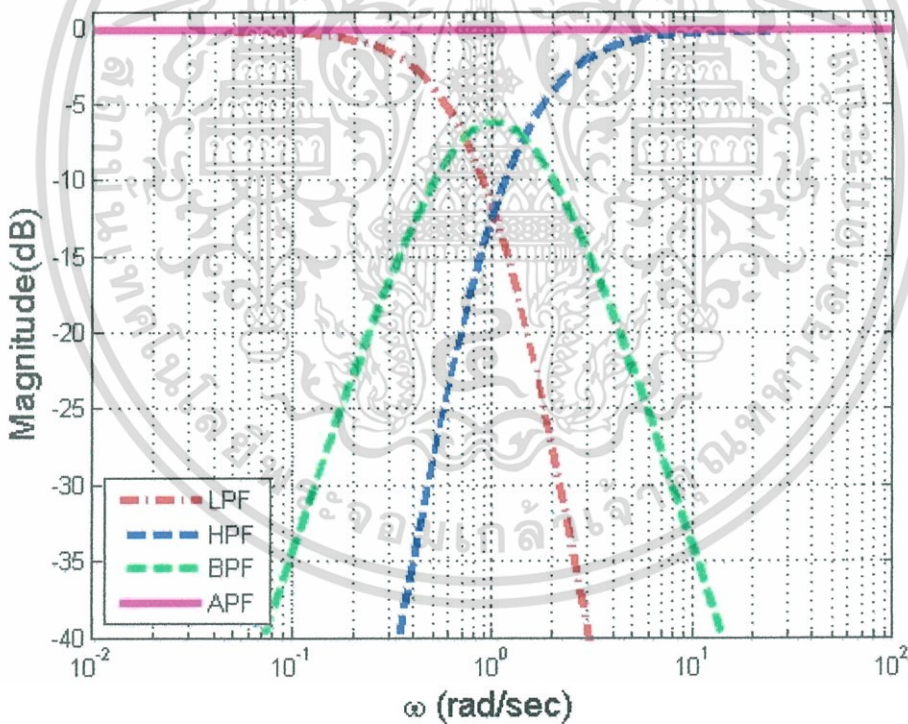
$$N(s)_{LPF} = \frac{1}{s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1} \quad (4.16)$$

โดยกำหนดให้  $N(s)_{HPF}$  คือ สมการวงจรรองความถี่สูงผ่าน

$N(s)_{BPF}$  คือ สมการวงจรรองแถบความถี่ผ่าน

$N(s)_{LPF}$  คือ สมการวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อนำสมการที่ (4.14) สมการที่ (4.15) และสมการที่ (4.16) มาพล็อตกราฟจะได้ดังนี้



ภาพที่ 4.1 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์ สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์น สไคน์อันดับ 4 ในระบบ 3 ทาง ที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0$

ภาพที่ 4.1 แสดงการรวมกันของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบความถี่ผ่านที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon=0$  โดยทั้งสามวงจรมีความราบเรียบทางขนาดที่สุด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แบบผ่านและความถี่แถบหยุดและมีความถี่คัตออฟที่มีจุดตัดใกล้เคียงกันทำการแทนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  ต่างๆ เพื่อหาวงจรรองความถี่แบบเบียร์นสไตน์ที่มีคุณสมบัติตามความต้องการ โดยกำหนดให้  $\varepsilon=0.2$   $\varepsilon=1.7315$   $\varepsilon=2$  และ  $\varepsilon=5$

แทนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon=0.2$  ลงสมการที่ (4.6)

$$|D(s)|^2 = 1.04s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.17)$$

$$|D(s)| = s^2 + 1.9708s + 0.9805 \quad (4.18)$$

นำสมการที่ (4.18) แปลงเป็นสมการวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ตามรูปแบบสมการที่ (4.3)

$$|TF|_{APF} = \frac{s^2 - 1.9708s + 0.9805}{s^2 + 1.9708s + 0.9805} \quad (4.19)$$

นำสมการที่ (4.19) ทำเป็นสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 1.9708s + 0.9805}{s^2 + 1.9708s + 0.9805} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 1.9708s + 0.9805}{s^2 + 1.9708s + 0.9805} \right] \quad (4.20)$$

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 0.9805) - 1.9708s}{s^2 + 1.9708s + 0.9805} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 0.9805) + 1.9708s}{s^2 + 1.9708s + 0.9805} \right] \quad (4.21)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{(s^2 + 0.9805)^2 - (1.9708s)^2}{(s^2 + 1.9708s + 0.9805)^2} \quad (4.22)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{s^4 - 1.9231s^2 + 0.9614}{s^4 + 3.9416s^3 + 5.8451s^2 + 3.8647s + 0.9614} \quad (4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

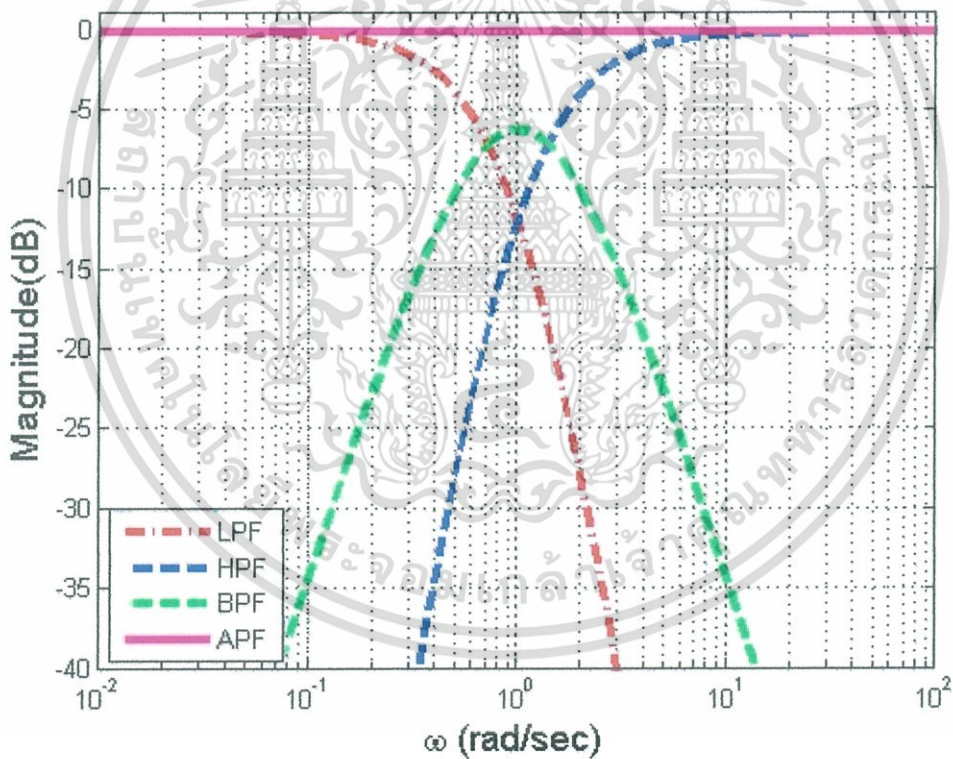
นำสมการที่ (4.23) มาแยกพจน์ออกเป็นของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

$$N(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 3.9416s^3 + 5.8451s^2 + 3.8647s + 0.9614} \quad (4.24)$$

$$N(s)_{BPF} = \frac{-1.9231s^2}{s^4 + 3.9416s^3 + 5.8451s^2 + 3.8647s + 0.9614} \quad (4.25)$$

$$N(s)_{LPF} = \frac{0.9614}{s^4 + 3.9416s^3 + 5.8451s^2 + 3.8647s + 0.9614} \quad (4.26)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.24) สมการที่ (4.25) และสมการที่ (4.26) มาพล็อตกราฟจะได้ดังนี้



ภาพที่ 4.2 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์น สไตน์อันดับ 4 ในระบบ 3 ทางที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$

ภาพที่ 4.2 แสดงการรวมกันของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบความถี่ผ่านที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  ที่มีความราบเรียบทางขนาดและจุดตัดที่ใกล้เคียงกันกับค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0$

แทนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 1.7315$  ลงสมการที่ (4.6)

$$|D(s)|^2 = 3.9981s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.27)$$

$$|D(s)| = s^2 + 1.2250s + 0.5002 \quad (4.28)$$

นำสมการที่ (4.28) แปลงเป็นสมการวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ตามรูปแบบสมการที่ (4.3)

$$|TF|_{APF} = \frac{s^2 - 1.2250s + 0.5002}{s^2 + 1.2250s + 0.5002} \quad (4.29)$$

นำสมการที่ (4.29) ทำเป็นสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 1.2250s + 0.5002}{s^2 + 1.2250s + 0.5002} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 1.2250s + 0.5002}{s^2 + 1.2250s + 0.5002} \right] \quad (4.30)$$

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 0.5002) - 1.2250s}{s^2 + 1.2250s + 0.5002} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 0.5002) + 1.2250s}{s^2 + 1.2250s + 0.5002} \right] \quad (4.31)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{(s^2 + 0.5002)^2 - (1.2250s)^2}{(s^2 + 1.2250s + 0.5002)^2} \quad (4.32)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{s^4 - 0.5002s^2 + 0.2502}{s^4 + 2.4500s^3 + 2.5010s^2 + 1.2255s + 0.2502} \quad (4.33)$$

นำสมการที่ (4.33) มาแยกพจน์ออกเป็นส่วนของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

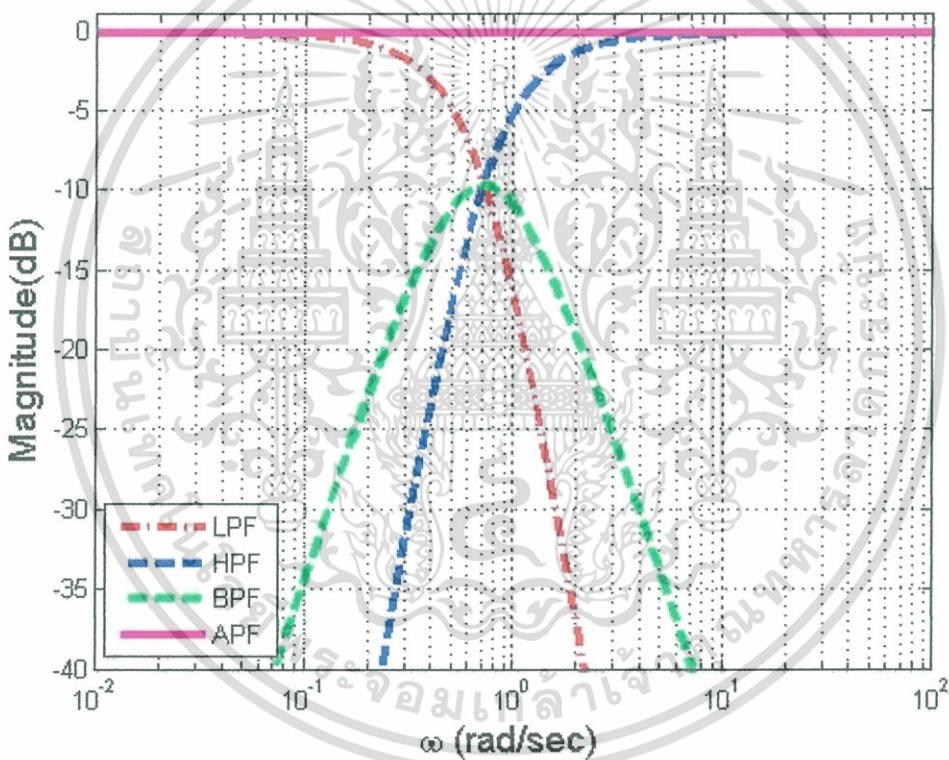
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 2.4500s^3 + 2.5010s^2 + 1.2255s + 0.2502} \quad (4.34)$$

$$N(s)_{BPF} = \frac{-0.5002s^2}{s^4 + 2.4500s^3 + 2.5010s^2 + 1.2255s + 0.2502} \quad (4.35)$$

$$N(s)_{LPF} = \frac{0.2502}{s^4 + 2.4500s^3 + 2.5010s^2 + 1.2255s + 0.2502} \quad (4.36)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.34) สมการที่ (4.35) และสมการที่ (4.36) มาพล็อตกราฟจะได้ดังนี้



ภาพที่ 4.3 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ในระบบ 3 ทางที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 1.7315$

ภาพที่ 4.3 แสดงการรวมกันของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองแถบความถี่ผ่านที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 1.7315$  ที่มีความราบเรียบทางขนาดและจุดตัดความถี่คutoff ที่เดียวกัน แทนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 2$  ลงสมการที่ (4.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|D(s)|^2 = 5s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.37)$$

$$|D(s)| = s^2 + 1.1378s + 0.4473 \quad (4.38)$$

นำสมการที่ (4.38) แปลงเป็นสมการวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ตามรูปแบบสมการที่ (4.3)

$$|TF|_{APF} = \frac{s^2 - 1.1378s + 0.4473}{s^2 + 1.1378s + 0.4473} \quad (4.39)$$

นำสมการที่ (4.39) ทำเป็นสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 1.1378s + 0.4473}{s^2 + 1.1378s + 0.4473} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 1.1378s + 0.4473}{s^2 + 1.1378s + 0.4473} \right] \quad (4.40)$$

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 0.4473) - 1.1378s}{s^2 + 1.1378s + 0.4473} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 0.4473) + 1.1378s}{s^2 + 1.1378s + 0.4473} \right] \quad (4.41)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{(s^2 + 0.4473)^2 - (1.1378s)^2}{(s^2 + 1.1378s + 0.4473)^2} \quad (4.42)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{s^4 - 0.4000s^2 + 0.2001}{s^4 + 2.2756s^3 + 2.1892s^2 + 1.0179s + 0.2001} \quad (4.43)$$

นำสมการที่ (4.43) มาแยกพจน์ออกเป็นส่วนของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

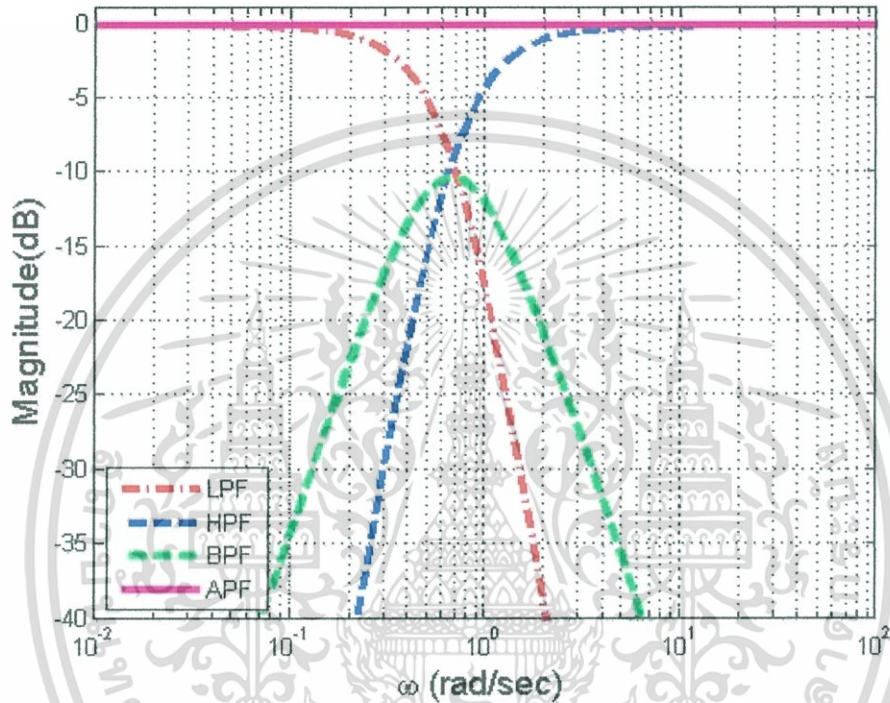
$$N(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 2.2756s^3 + 2.1892s^2 + 1.0179s + 0.2001} \quad (4.44)$$

$$N(s)_{BPF} = \frac{-0.4000s^2}{s^4 + 2.2756s^3 + 2.1892s^2 + 1.0179s + 0.2001} \quad (4.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s)_{LPF} = \frac{0.2001}{s^4 + 2.2756s^3 + 2.1892s^2 + 1.0179s + 0.2001} \quad (4.46)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.44) สมการที่ (4.45) และสมการที่ (4.46) มาพล็อตกราฟจะได้ดังนี้



ภาพที่ 4.4 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์อันดับ 4 ในระบบ 3 ทางที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 2$

ภาพที่ 4.4 แสดงการรวมกันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 2$  ที่มีความราบเรียบทางขนาดและมีจุดตัดความถี่คัตออฟที่เดียวกันซึ่งใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 1.7315$

แทนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 5$  ลงสมการที่ (4.6)

$$|D(s)|^2 = 26s^4 - 2s^2 + 1 \quad (4.47)$$

$$|D(s)| = s^2 + 0.6850s + 0.1962 \quad (4.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (4.48) แปลงเป็นสมการวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) ตามรูปแบบสมการที่ (4.3)

$$|TF|_{APF} = \frac{s^2 - 0.6850s + 0.1962}{s^2 + 0.6850s + 0.1962} \quad (4.49)$$

นำสมการที่ (4.49) ทำเป็นสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ของวงจรรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 0.6850s + 0.1962}{s^2 + 0.6850s + 0.1962} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 0.6850s + 0.1962}{s^2 + 0.6850s + 0.1962} \right] \quad (4.50)$$

$$|TF|_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 0.1962) - 0.6850s}{s^2 + 0.6850s + 0.1962} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 0.1962) + 0.6850s}{s^2 + 0.6850s + 0.1962} \right] \quad (4.51)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{(s^2 + 0.1962)^2 - (0.6850s)^2}{(s^2 + 0.6850s + 0.1962)^2} \quad (4.52)$$

$$|TF|_{APF} = \frac{s^4 - 0.0768s^2 + 0.0385}{s^4 + 1.3700s^3 + 0.8616s^2 + 0.2688s + 0.0385} \quad (4.53)$$

นำสมการที่ (4.53) มาแยกพจน์ออกเป็นของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

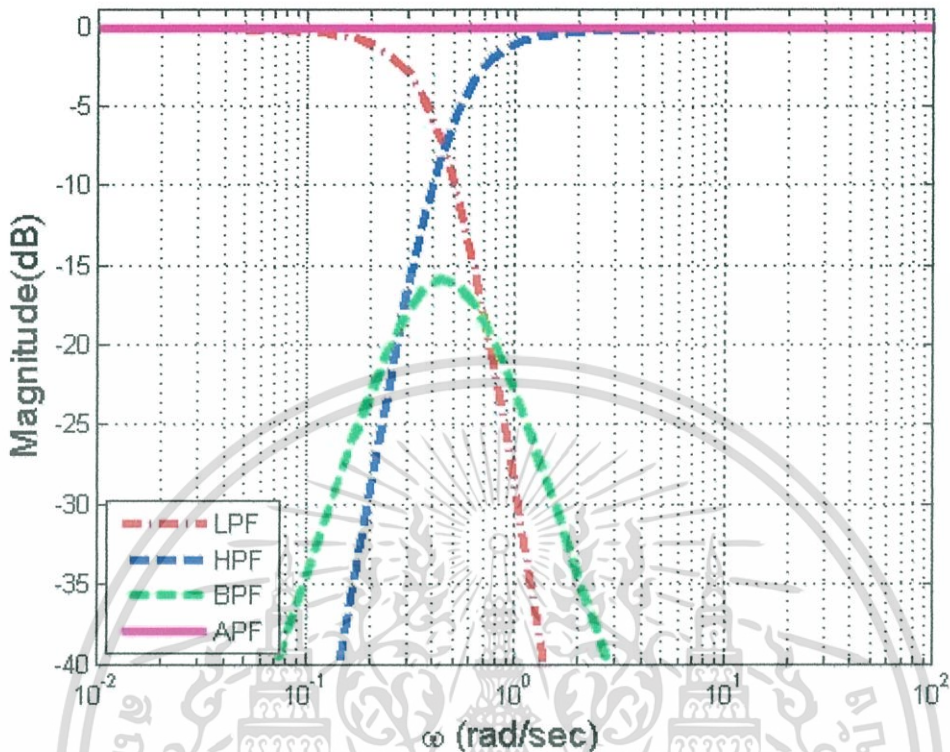
$$N(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 1.3700s^3 + 0.8616s^2 + 0.2688s + 0.0385} \quad (4.54)$$

$$N(s)_{BPF} = \frac{-0.0768s^2}{s^4 + 1.3700s^3 + 0.8616s^2 + 0.2688s + 0.0385} \quad (4.55)$$

$$N(s)_{LPF} = \frac{0.0385}{s^4 + 1.3700s^3 + 0.8616s^2 + 0.2688s + 0.0385} \quad (4.56)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.54) สมการที่ (4.55) และสมการที่ (4.56) มาพล็อตกราฟจะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับ 4 ในระบบ 3 ทางที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 5$

ภาพที่ 4.5 แสดงการรวมกันของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่านและวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 5$  ที่มีความราบเรียบทางขนาดหรือวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (All Pass Filter) มีความราบเรียบก็จริง แต่จากกราฟแสดงความสัมพันธ์พบว่า มีสเกลของกราฟวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ต่ำเกินไป

จากการแทนค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon$  ต่าง พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon = 1.7315$  และ  $\varepsilon = 2$  มีความราบเรียบทางขนาดและจุดตัดความถี่คัตออฟที่เดียวกัน ตรงตามคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์คที่ดี แต่เนื่องจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของพารามิเตอร์  $\varepsilon$  ทั้งสองดังกล่าวนี้ มีกราฟของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่าต่ำเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้เสียงของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านนั้น ออกมาน้อย และค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon = 0$  และ  $\varepsilon = 0.2$  มีกราฟแสดงความสัมพันธ์ทางขนาด ทางเฟส และทางเวลาประวิงที่ใกล้เคียงกัน และมีกราฟของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่สูงกว่าค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon = 1.7315$  และ  $\varepsilon = 2$  แต่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon = 0$  นั้น ทำให้เกิด Zero Phase ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่  $\varepsilon = 0.2$  แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแนวความคิดของการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์มาใช้ กับสมการวงจรกรองความถี่แบบเบสเซล (Bessel Polynomials) ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยเปรียบเทียบกับ สมการวงจรกรองความถี่แบบสมการ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  ในทาง คณิตศาสตร์เบสเซล โพลีโนเมียลเป็นลำดับมุมฉากของสมการพหุนาม ซึ่งให้ความหมายที่แตกต่างกันออกไป ได้หลายแบบ แสดงได้ดังสมการที่ (4.57)

$$y_n(s) = \sum_{k=0}^n \frac{(n+k)!}{(n-k)!k!} \left(\frac{s}{2}\right)^k \quad (4.57)$$

และอีกความหมายที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า หรือเรียกว่าเบสเซล โพลีโนเมียลแบบย้อนกลับ (Reverse Bessel Polynomials) แสดงดังสมการที่ (4.58)

$$\theta_n(s) = s^n y_n\left(\frac{1}{s}\right) = \sum_{k=0}^n \frac{(2n+k)!}{(n-k)!k!} \frac{s^k}{2^{n-k}} \quad (4.58)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่หาได้จากสมการที่ (4.57) มีค่าเท่ากับที่หาได้จากสมการที่ (4.58) เพียงแต่เรียงอยู่ หน้าลำดับที่กลับกัน สมการของเบสเซล โพลีโนเมียลในอันดับต่างๆ แสดงได้ดังสมการที่ (4.59)

$$\begin{aligned} \theta_1(s) &= s+1 \\ \theta_2(s) &= 3s^2+3s+1 \\ \theta_3(s) &= 15s^3+15s^2+6s+1 \\ \theta_4(s) &= 105s^4+105s^3+45s^2+10s+1 \\ \theta_5(s) &= 945s^5+945s^4+420s^3+105s^2+15s+1 \end{aligned} \quad (4.59)$$

ในขณะที่รูปแบบสมการของเบสเซล โพลีโนเมียลแบบย้อนกลับในรูปแบบของสมการที่ (4.58) แสดงได้ดังสมการที่ (4.60)

$$\begin{aligned} y_1(s) &= s+1 \\ y_2(s) &= s^2+3s+3 \\ y_3(s) &= s^3+6s^2+15s+15 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 y_4(s) &= s^4 + 10s^3 + 45s^2 + 105s + 105 \\
 y_5(s) &= s^5 + 15s^4 + 105s^3 + 420s^2 + 945s + 945
 \end{aligned}
 \tag{4.60}$$

สำหรับแนวความคิดในการออกแบบวงจรกรองความถี่โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ที่นำมาใช้ร่วมกับสมการวงจกรองความถี่แบบต่ำผ่านของเบสเซลโพลีโนเมียลแบบซ้อนกลับนั้น จะเริ่มจากการเลือกใช้อันดับ 2 ก่อน

$$y_2(s)_{LPF} = s^2 + 3s + 3 \tag{4.61}$$

จากนั้นนำสมการที่ (4.61) มาแปลงให้อยู่ในรูปแบบของสมการของวงจกรองความถี่ผ่านตลอด (All Pass Filter) ของ Bessel-Thompson Function ตามสมการที่ (4.62) และแสดงได้ดังสมการที่ (4.63)

$$H_{APF} = \frac{y_n(-s)}{y_n(s)} \tag{4.62}$$

$$H(s)_{APF} = \frac{s^2 - 3s + 3}{s^2 + 3s + 3} \tag{4.63}$$

นำสมการที่ (4.63) ทำเป็นสมการแบบเบสเซลโพลีโนเมียลอันดับ 4 ของวงจกรองความถี่ผ่านตลอด (All Pass Filter) โดยใช้วิธีการ Conjugate

$$H(s)_{APF} = \left[ \frac{s^2 - 3s + 3}{s^2 + 3s + 3} \right] \cdot \left[ \frac{s^2 + 3s + 3}{s^2 + 3s + 3} \right] \tag{4.64}$$

$$H(s)_{APF} = \left[ \frac{(s^2 + 3) - 3s}{s^2 + 3s + 3} \right] \cdot \left[ \frac{(s^2 + 3) + 3s}{s^2 + 3s + 3} \right] \tag{4.65}$$

$$H(s)_{APF} = \frac{(s^2 + 3)^2 - 9s^2}{(s^2 + 3s + 3)^2} \tag{4.66}$$

$$H(s)_{APF} = \frac{s^4 + 6s^2 + 9 - 9s^2}{s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 18s + 9} \tag{4.67}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s)_{APF} = \frac{s^4 - 3s^2 + 9}{s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 18s + 9} \quad (4.68)$$

นำสมการที่ (4.68) มาแยกพจน์ออกเป็นของแต่ละวงจรรองความถี่ ได้ดังนี้

$$H(s)_{LPF} = \frac{9}{s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 18s + 9} \quad (4.69)$$

$$H(s)_{BPF} = \frac{-3s^2}{s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 18s + 9} \quad (4.70)$$

$$H(s)_{HPF} = \frac{s^4}{s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 18s + 9} \quad (4.71)$$

โดย  $H(s)_{LPF}$  คือสมการวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

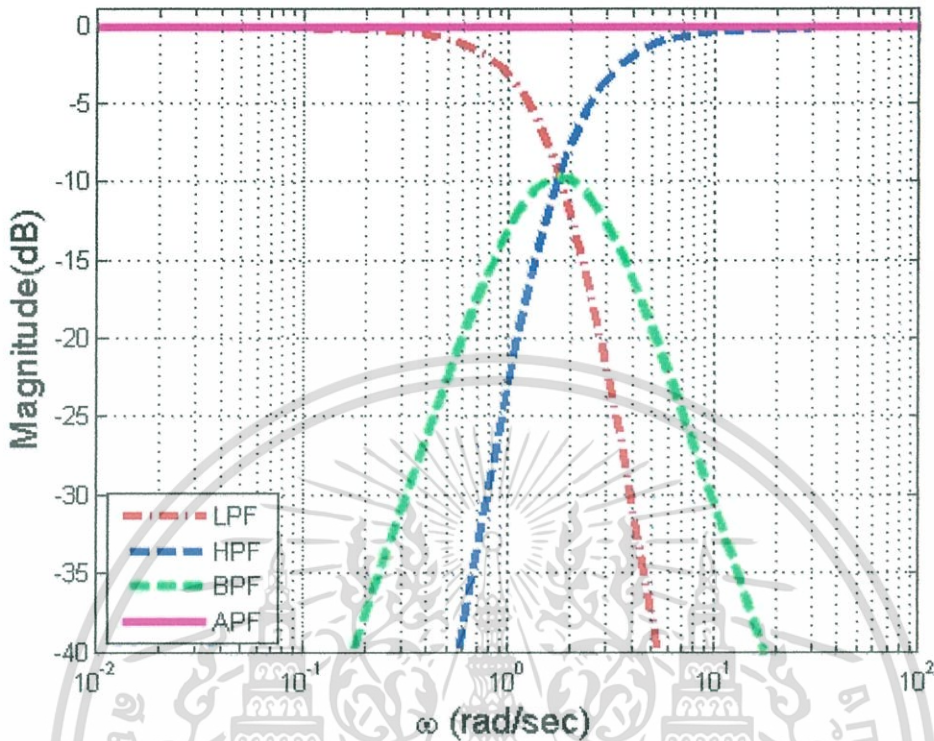
$H(s)_{BPF}$  คือสมการวงจรรองความถี่สูงผ่าน

$H(s)_{HPF}$  คือสมการวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ภาพที่ 4.6 แสดงการรวมกันของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองแถบความถี่ผ่านของสมการเบสเชสโพลีโนเมียล โดยทั้งสามวงจรมีความราบเรียบทางขนาดที่สุด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แบบผ่านและความถี่แถบหยุดและมีความถี่คัตออฟที่มีจุดตัดจุดเดียวกัน

จากการเปรียบเทียบแนวความคิดในการออกแบบวงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์กับสมการแบบเบสเชสโพลีโนเมียล พบว่ากราฟของโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์มีความชันที่ตึกว่ากราฟของแบบเบสเชสโพลีโนเมียล แม้ว่าจุดตัดความถี่คัตออฟจะมีค่าใกล้เคียงกันน้อยกว่ากราฟของแบบเบสเชสโพลีโนเมียลก็จริง แต่วงจรรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตสไตน์นั้น ก็มีวงจรรองแถบความถี่ผ่านที่สูงกว่าสมการแบบเบสเชสโพลีโนเมียล

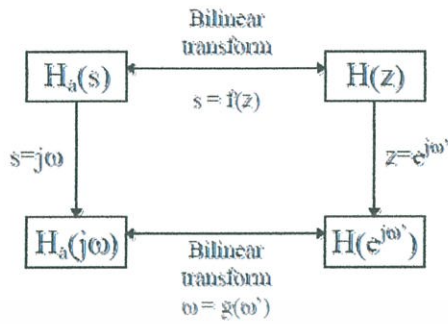


ภาพที่ 4.6 กราฟสเกลกึ่งล็อกแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของการแบ่งพจน์สมการเบสเซลโพลีโนเมียล  
อันดับ 4 ในระบบ 3 ทาง

#### 4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิทัลแบบเบิรน์สไตน์

เริ่มจากวงจรกรองความถี่แบบสมการโพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์ที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  ในรูปแบบแอนาล็อกแปลงให้อยู่ในรูปของสมการดิจิทัล เพื่อง่ายต่อการออกแบบ การเปลี่ยนแปลงแก้ไข และการทดสอบ โดยในภาพที่ 4.7 เป็นการแสดงความสัมพันธ์กันของระบบแอนาล็อกและระบบดิจิทัลทั้งสอง จะเห็นได้ว่าจากฟังก์ชันถ่ายโอนของแอนาล็อก ( $H_a(s)$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $s$  สามารถหาผลตอบสนองเชิงความถี่ได้โดยแทน  $s = j\omega$  และสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบดิจิทัล ( $H(z)$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $z$  ก็สามารถหาผลตอบสนองความถี่ได้โดยแทน  $z = e^{j\omega'}$

สำหรับการแปลงระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของสอง ระบบ คือจาก  $H_a(s)$  ไปเป็น  $H(z)$  หรือจาก  $H_a(j\omega)$  ไปเป็น  $H(e^{j\omega'})$  ต้องการฟังก์ชันพิเศษในการแปลงจากโดเมน  $s$  เป็นโดเมน  $z$  ซึ่งการแปลงนี้เรียกว่าการแปลงไบลิเนียร์ (Bilinear Transform)



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์กันของระบบแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

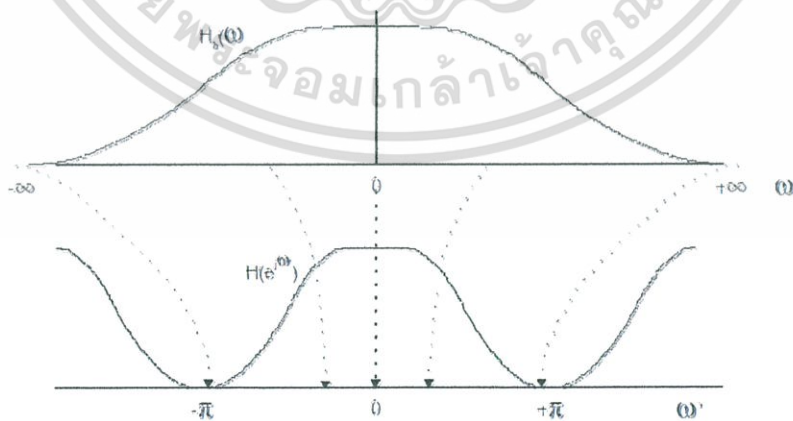
ผลที่เกิดจากการแปลงไบลิเนียร์สามารถมองได้เป็น 2 จุดใหญ่ ๆ คือ

1. เกิดการแปลงโพลและซีโรว์บน S-plane ของระบบต่อเนื่องไปเป็นโพลและซีโรว์บน z-plane ของระบบไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.8 การแปลงระหว่างโพลใน s-plane ไปยังโพลใน z-plane

2. เกิดการแปลงระหว่างความถี่แอนะล็อกไปเป็นความถี่ดิจิตอล



ภาพที่ 4.9 การแปลงระหว่างความถี่แอนะล็อกและดิจิตอลที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองเชิงความถี่ในการแปลงไบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปว่าถ้ามีฟังก์ชันถ่ายโอน  $H_a(s)$  ของตัวกรองความถี่แอนาล็อกต่ำผ่านเราจะสามารถแปลงฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ของตัวกรองความถี่แบบดิจิทัลได้ทันที โดยใช้การแปลงไบลิเนียร์แทนค่า  $s$  ใน  $H_a(s)$  ตามสมการที่ (4.72) คือ

$$s = K \frac{z-1}{z+1} \quad (4.72)$$

ค่า  $K$  คือ ค่าคงที่โดยในที่นี้กำหนดค่าให้เท่ากับ 1 หรือเขียนได้ว่า

$$H(z) = [H_a(s)]_{s=K \frac{z-1}{z+1}} \quad (4.73)$$

นำสมการที่ (4.72) แทนลงในสมการที่ (4.36) หรือสมการวงจรวงความถี่ต่ำผ่านแบบเบิรน์สไตน์ เมื่อกำหนดให้  $\varepsilon = 0.2$  จะได้สมการของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบดิจิทัล ดังสมการที่ (4.75)

$$N(z)_{LPF} = \frac{0.9614}{\left(\frac{z-1}{z+1}\right)^4 + 3.9416 \cdot \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^3 + 5.8451 \cdot \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^2 + 3.8647 \left(\frac{z-1}{z+1}\right) + 0.9614} \quad (4.74)$$

$$N(z)_{LPF} = \frac{z^4 + 4z^3 + 6z^2 + 4z + 1}{16.2397z^4 - 0.3206z^3 + 0.0813z^2 - 0.0006z + 0.0002} \quad (4.75)$$

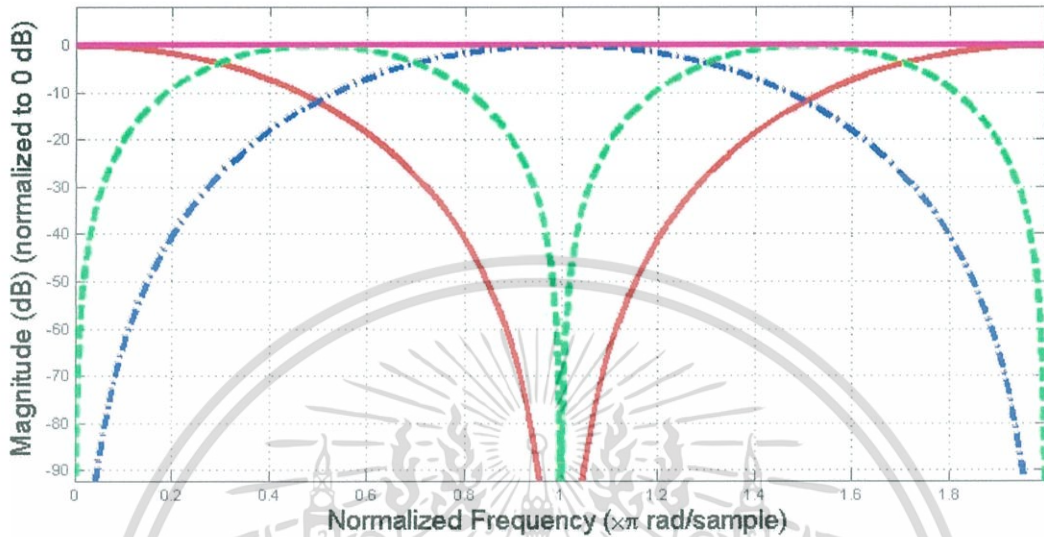
ในทำนองเดียวกันนำสมการที่ (4.72) แทนค่าลงในสมการที่ (4.34) และสมการที่ (4.35) จะได้สมการของวงจรวงความถี่สูงผ่านและสมการของวงจรวงแถบความถี่ผ่านในรูปแบบสมการดิจิทัล แสดงดังสมการที่ (4.76) และสมการที่ (4.77) ตามลำดับ

$$N(z)_{HPF} = \frac{z^4 - 4z^3 + 6z^2 - 4z + 1}{15.6128z^4 - 0.3082z^3 + 0.0782z^2 - 0.0006z + 0.0002} \quad (4.76)$$

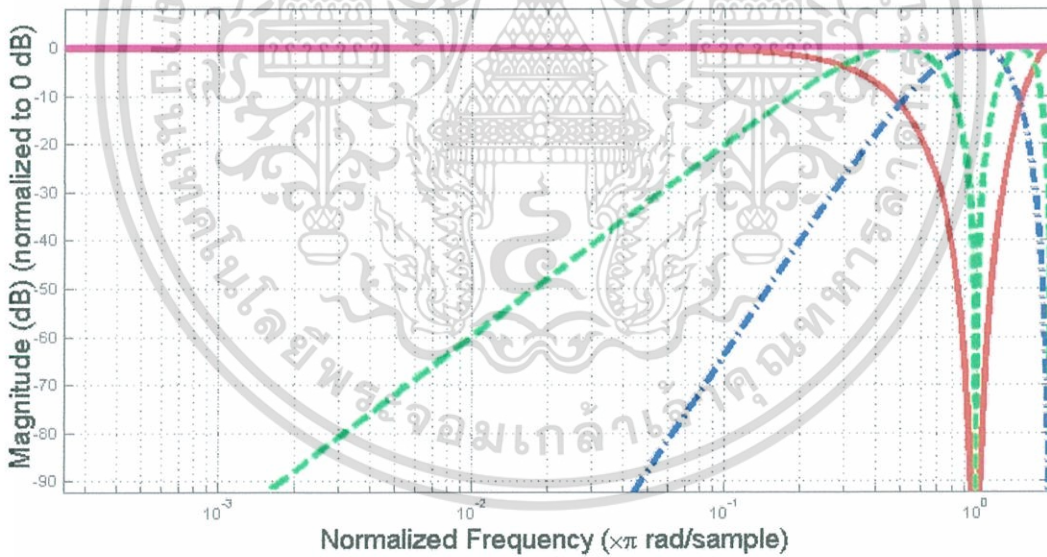
$$N(z)_{BPF} = \frac{-z^4 + 2z^2 - 1}{8.1186z^4 - 0.1623z^3 + 0.0407z^2 - 0.0003z + 0.0001} \quad (4.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการคิจิตอลที่ได้แต่ละชนิดมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 4.10



(ก) สเกลเชิงเส้น



(ข) สเกลกึ่งล็อก

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ทางขนาดของสมการคิจิตอลแบบเบิร์ตสไตน์ ที่ค่าพารามิเตอร์  $\epsilon = 0.2$

รูปที่ 4.10 แสดงการรวมกันของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรรองความถี่สูงผ่านและวงจรรองแถบความถี่ผ่านในรูปของสมการคิจิตอลของวงจรรองความถี่แบบสมการเบิร์ตสไตน์ โพลีโนเมียลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

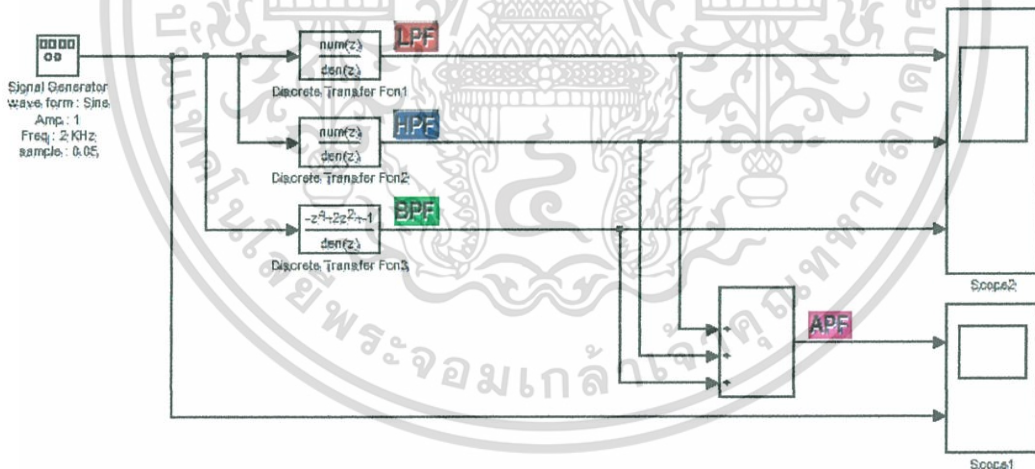
ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  โดยทั้งสามวงจรมีความราบเรียบทางขนาดที่สุด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แบบผ่านและความถี่แถบหยุดและมีความถี่คutoff ที่มีจุดตัดเดียวกัน

จากการนำวงจรกรองความถี่แบบสมการเบียร์นส์ไตน์โพลิโนเมียลที่ค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  ในรูปแบบสมการแอนาล็อกแปลงเป็นรูปแบบของสมการดิจิทัล ผลการทดลองยังคงคุณสมบัติตามความต้องการ เพื่อให้ความแน่ใจว่าผลของการทดลองที่ออกมาสามารถนำไปใช้จริงได้ จะต้องจำลองวัดผลโดยใช้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB เพื่อสังเกตผลในอุดมคติก่อน หากผลที่นั่นเป็นไปตามความต้องการก็จะนำไปใช้จริงผ่านบอร์ด Fio RapidSTM32

#### 4.4 การจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นส์ไตน์ ด้วยโปรแกรม

##### Simulink

เมื่อแปลงสมการของวงจรกรองความถี่แอนาล็อกแบบเบียร์นส์ไตน์ที่มีค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  เป็นสมการของวงจรกรองความถี่ดิจิทัลแล้วต่อมาทำการสร้างแบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรม Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมในโปรแกรม MATLAB เพื่อพิจารณาผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้จากกราฟ



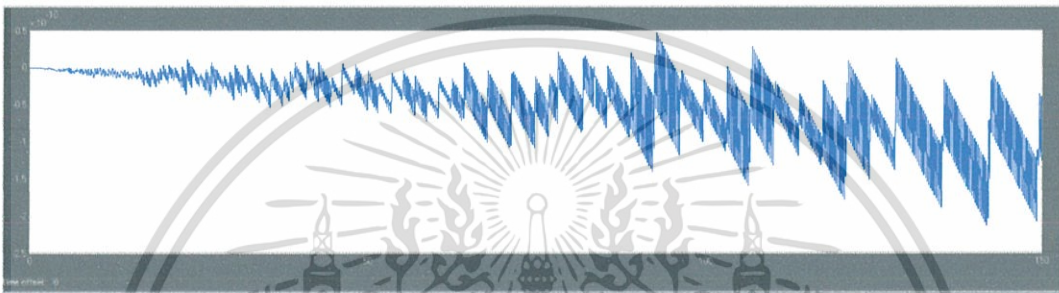
ภาพที่ 4.11 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โปรแกรมเสริม Simulink

อธิบาย Blockset ต่างๆ จากภาพที่ 4.11

- Signal Generator มีหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งจากสี่สัญญาณ คือ Sine Square Sawtooth และการกระจายที่ไม่มีรูปแบบของ Random Noise

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

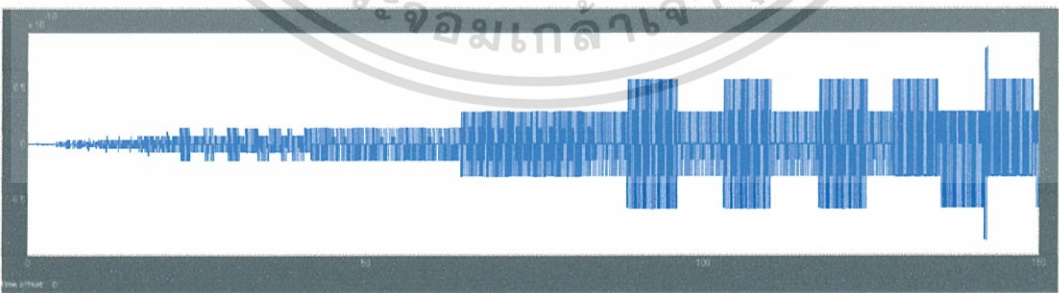
- Discrete Transfer Function มีหน้าที่จำลองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิรน์สไตน์
- Scope มีหน้าที่แสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองของระบบบน Simulink ทำหน้าที่คล้าย Oscilloscope
- Add มีหน้าที่รวมสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านเข้าด้วยกัน



(ก) สัญญาณที่ผ่านแบบจำลองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ข) สัญญาณที่ผ่านแบบจำลองวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



(ค) สัญญาณที่ผ่านแบบจำลองวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

ภาพที่ 4.12 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรออสซิลโลสโคปโอเวอร์เน็ตเวิร์คในความถี่แต่ละวงจรกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสัญญาณ Sine ที่มีความถี่ 2 KHz ผ่านวงจรกรองความถี่แต่ละแบบแล้วด้วยค่า Sample Time เท่ากับ 0.05 sec จะได้ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านแบบจำลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จะแสดงได้ดังภาพที่ 4.12 (ก) ภาพที่ 4.12 (ข) และภาพที่ 4.12 (ค) ตามลำดับ

เมื่อนำสัญญาณที่ผ่านทั้งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่านรวมกัน ออกเป็นผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองผ่านทุกความถี่เทียบกับสัญญาณที่ใช้ทดลอง จะแสดงได้ดังภาพที่ 4.13 (ก) และภาพที่ 4.13 (ข)



(ก) สัญญาณที่ผ่านวงจรกรองผ่านทุกความถี่



(ข) สัญญาณทดลองที่ความถี่ 2 KHz และ Sample Time เท่ากับ 0.05 วินาที

ภาพที่ 4.13 ผลตอบสนองของสัญญาณที่รวมกันผ่านวงจรครอส โอเวอร์เน็ตเวิร์คและสัญญาณทดลอง

#### 4.5 การทดลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ โดยใช้บอร์ด FiO RapidSTM32 Blockset

ในปริิณยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้บอร์ด FiO Rapid STM32 ซึ่งเป็นเสมือนตัวเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมเสริม Simulink ที่มีความสามารถสูงในการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำไปใช้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้ง FiO Rapid STM32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของ ARM7 และบอร์ด FiO มีความสามารถและง่ายต่อการนำไปใช้งาน

บอร์ด FiO และ RapidSTM32 Blockset คือ เครื่องมือสำหรับใช้ระบบสมองกลฝังตัว ซึ่งเปรียบเสมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดจิ๋วอยู่บนแผงวงจรขนาดเล็กแผ่นเดียว ที่ไม่ต้องการเขียนโปรแกรมที่มีความซับซ้อน (low-level) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบเหล่านี้ โดยการใช้ MATLAB เพื่อเชื่อมต่อการสื่อสารของคอมพิวเตอร์ PC กับ FiO RapidSTM32 โดยที่ RapidSTM32 เป็น Blockset สำหรับ Simulink ซึ่งออกแบบมาให้ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32 Blockset RapidSTM32 จะทำให้สามารถแปลงระบบที่เราออกแบบโดยใช้โปรแกรมเสริม Simulink ลงไปเป็นโปรแกรมสั่งงานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32 ได้เลย โดยไม่ต้องเขียนภาษา C หรือแอสเซมบลี การแปลง Blockset ไปเป็นโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นทำได้โดยใช้ Real Time Workshop และ Real Time Workshop Embedded Coder ซึ่งเป็นเครื่องมือที่อยู่ใน MATLAB เป็นตัวเขียนโปรแกรมแทน

ในหัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนการจำลองและออกแบบวงจรออสซิลโลสโคปที่เกิดจากการจำลองวงจรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านในโปรแกรมเสริม Simulink จากนั้นพิจารณาถึงผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านออกมาได้จาก Oscilloscope โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงผลตอบสนองของสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

1. เครื่อง Sweep Generator
2. เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
3. บอร์ด FiO RapidSTM32

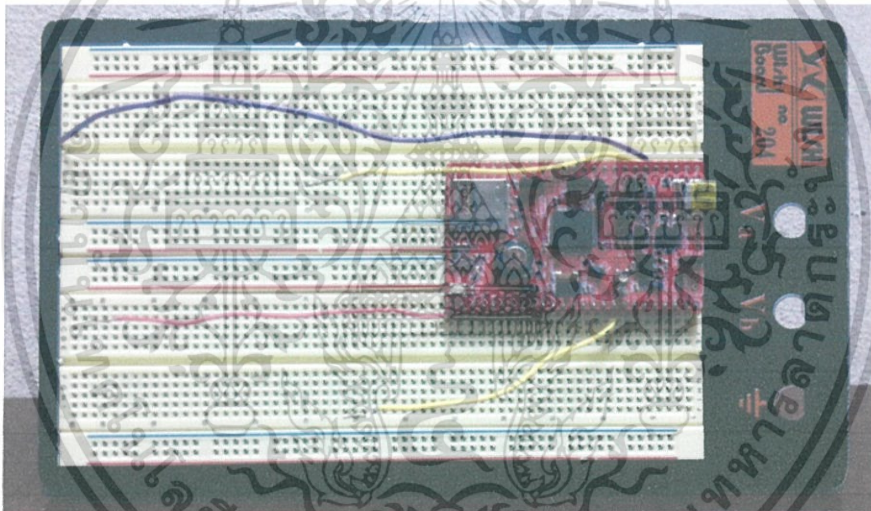


ภาพที่ 4.14 เครื่อง Sweep Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 เครื่องออสซิโลสโคป (Oscilloscope)



ภาพที่ 4.16 บอร์ด FiO RapidSTM32

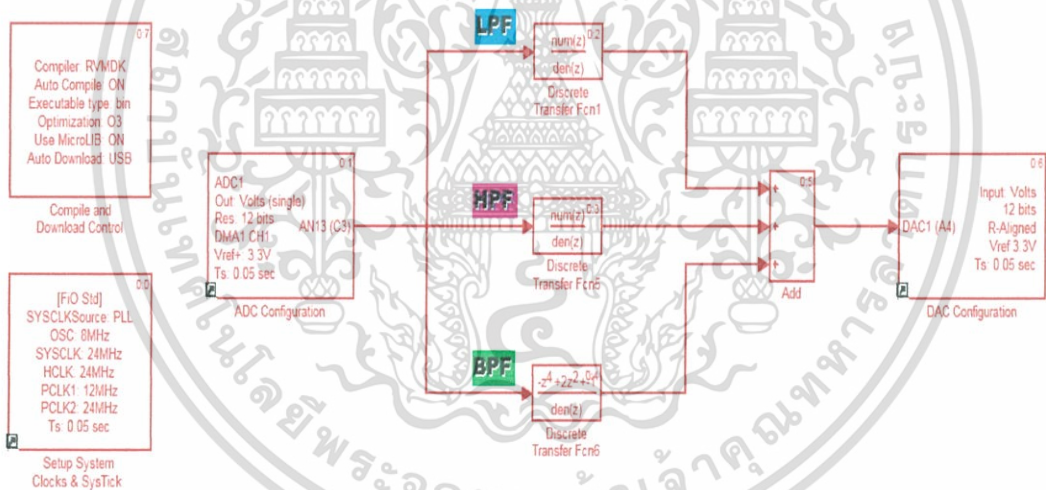
จากนั้นทำการออกแบบและจำลองวงจรครอส โอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้ Blockset RapidSTM32 ในโปรแกรมเสริม Simulink แสดงได้ดังภาพที่ 4.17

อธิบาย Block set ต่างๆ จากภาพที่ 4.17

- Compile and Download Control มีหน้าที่ Compile โปรแกรมเพื่อเปลี่ยนภาษาไปเป็น C โค้ด และ Download ข้อมูลจาก Simulink ลงบอร์ด FiO RapidSTM32 เพื่อนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Setup System Clocks & SysTick มีหน้าที่กำหนดค่าต่างๆของบอร์ด FiO RapidSTM32 ในส่วนนี้เปรียบเสมือนหัวใจหลักของการทำงานของบอร์ด FiO RapidSTM32 โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ
- Discrete Transfer Function มีหน้าที่จำลองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์
- Scope มีหน้าที่แสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองของระบบบน Simulink ทำหน้าที่คล้าย Oscilloscope
- Add มีหน้าที่รวมสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านเข้าด้วยกัน
- ADC Configuration มีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
- DAC Configuration มีหน้าที่รับค่าเพื่อแสดงผลในรูปแบบของดิจิทัลออกสู่บอร์ด FiO RapidSTM32 ในที่นี้กำหนดขาออกที่ขา A4

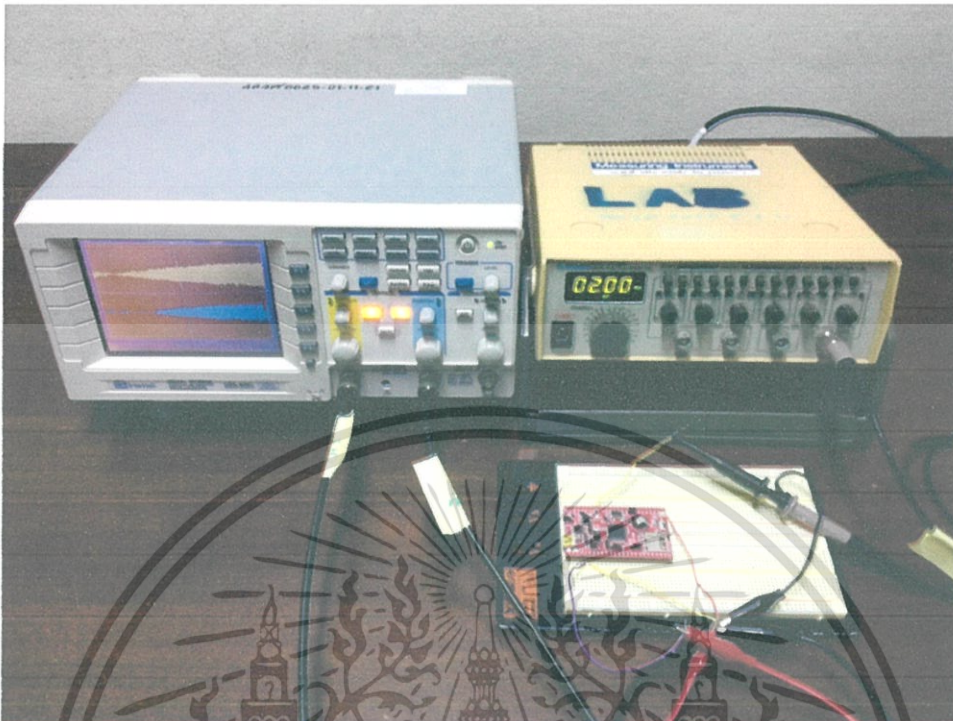


ภาพที่ 4.17 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้ Blockset RapidSTM32

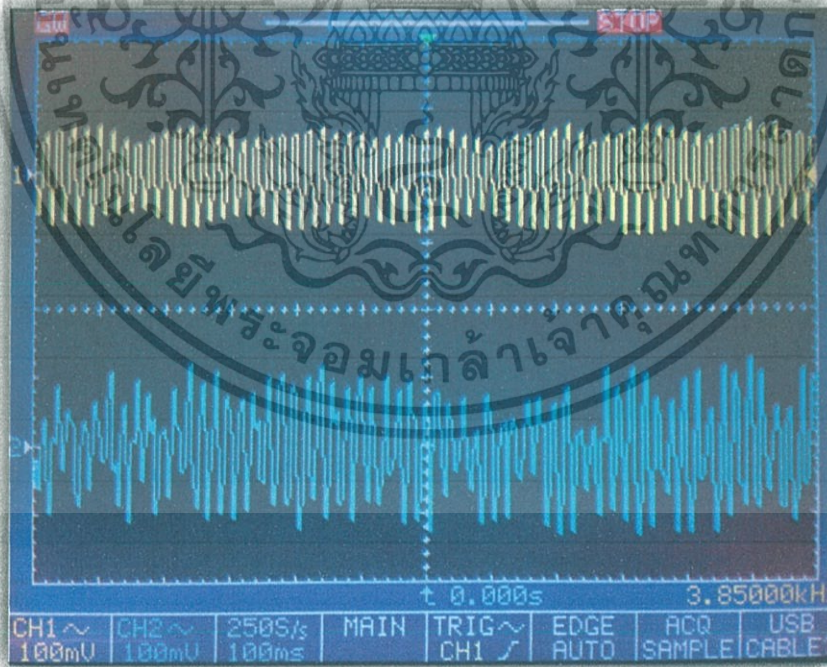
เมื่อทำการออกแบบและจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คเสร็จแล้ว ให้ทำการ Build ข้อมูลลงในบอร์ด FiO RapidSTM32 และเชื่อมต่อ Sweep Generator และ Oscilloscope เข้ากับบอร์ด FiO เพื่อวัดสัญญาณ ดังภาพที่ 4.12

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้จากบอร์ด FiO RapidSTM32 โดยใช้ Oscilloscope จะได้ผลดังภาพที่ 4.19 ภาพที่ 4.20 ภาพที่ 4.21 และภาพที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

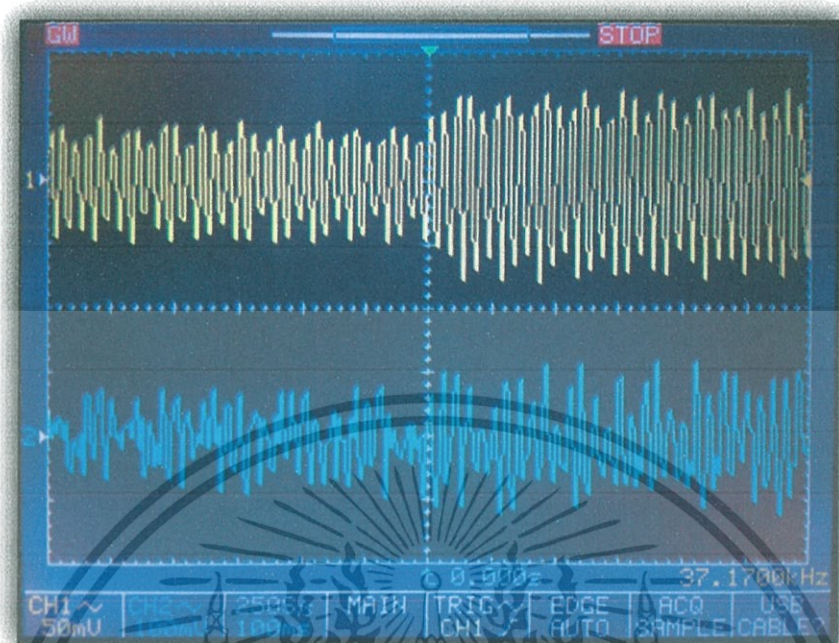


ภาพที่ 4.18 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด FiO กับ Oscilloscope และ Sweep Generator

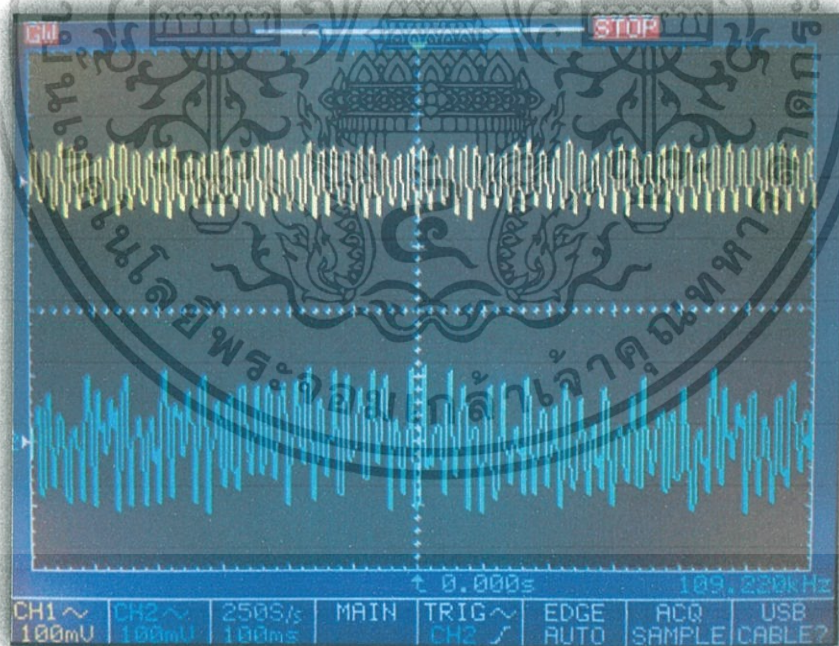


ภาพที่ 4.19 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

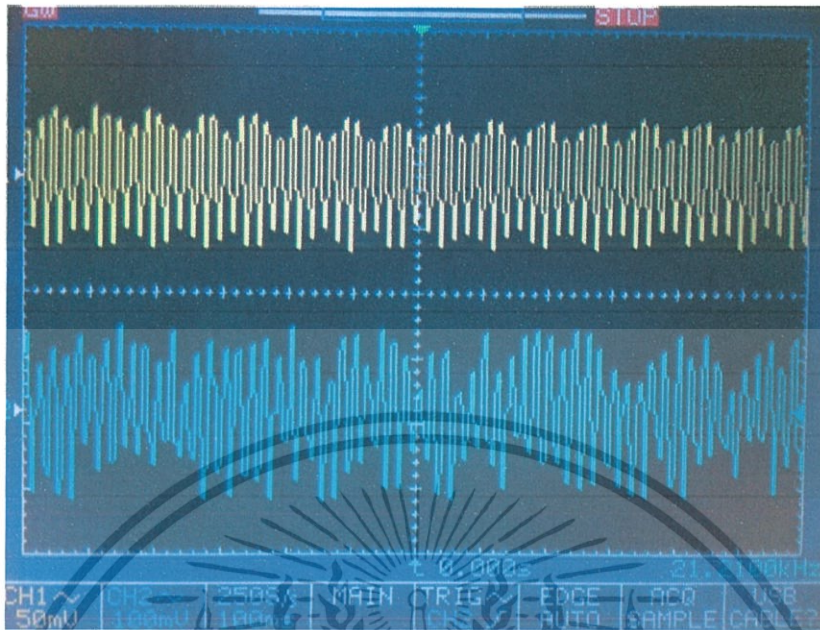


ภาพที่ 4.20 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



ภาพที่ 4.21 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

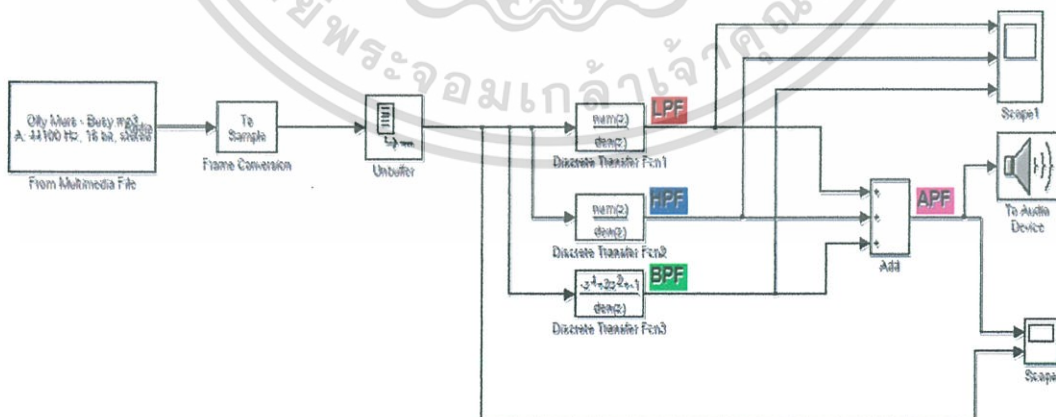
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 ผลตอบสนองของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองผ่านทุกความถี่

#### 4.6 ผลการทดลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

จากผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้จากการออกแบบและจำลองใน โปรแกรมเสริม Simulink และผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้จากบอร์ด FiO นั้น อธิบายได้ว่า เมื่อนำสัญญาณจ่ายผ่านเข้าไปในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของสัญญาณที่ได้สามารถให้เฉพาะความถี่ที่ต้องการและเหมาะสมแสดงการจำลองและออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กได้ดังภาพที่ 4.23

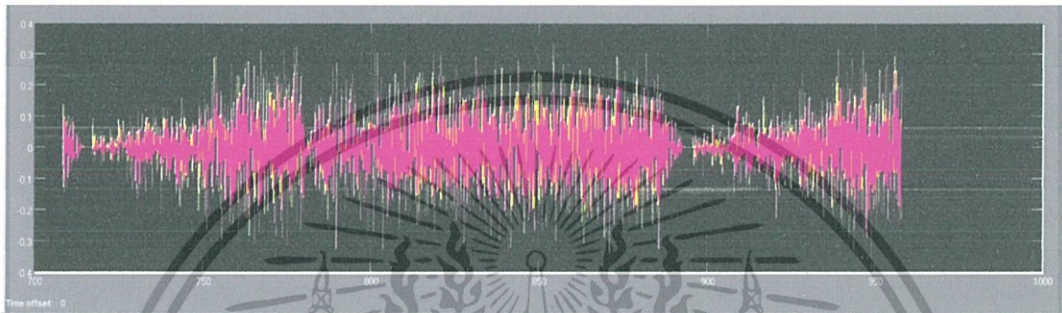


ภาพที่ 4.23 แบบจำลองวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์กโดยใช้เสียงเป็นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจำลองการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวอร์ค โดยใช้เสียงเป็นสัญญาณที่ผ่านเข้าไปวงจร ความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านแล้วออกสู่ลำโพงแต่ละตัว ตามลำดับ เพื่อทดสอบผลลัพธ์ของเสียงว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

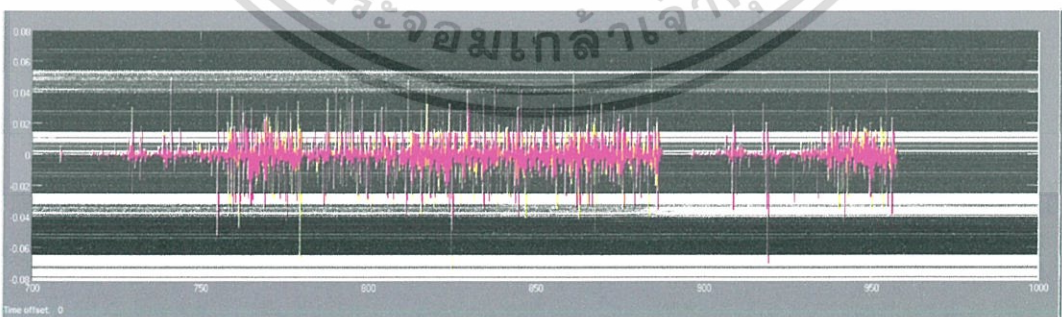
จากผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่านสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.24 ภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.24 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



ภาพที่ 4.25 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน



ภาพที่ 4.26 ผลตอบสนองของเสียงที่ผ่านวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมการโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ โดยในปริญาณิพจน์ฉบับนี้กำหนดค่า  $\varepsilon = 0.2$  ซึ่งค่านี้ให้ผลตอบสนองทางขนาดที่มีความราบเรียบและความชันที่เหมาะสมจากนั้นจำลองการออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คในรูปแบบดิจิทัล และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองของสัญญาณที่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรรองความถี่สูงผ่าน พบว่าผลลัพธ์ของสัญญาณที่ผ่านบอร์ด FIO RapidSTM32 มีลักษณะคล้ายคลึงกับสัญญาณจากการจำลองในโปรแกรมเสริม Simulink ซึ่งเป็นสัญญาณในอุดมคติ

#### 4.7 สรุป

วงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ในรูปแบบของแอนาลอกสามารถออกแบบให้มีความราบเรียบทางขนาด เฟสเป็น zero phase และพบว่าค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon = 0.2$  นั้นจะได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่าสูงพอเหมาะกับการนำมาใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำมาแปลงในรูปแบบของดิจิทัล จำลองผ่านบอร์ด FIO RapidSTM32 พบว่าได้ผลของสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองใกล้เคียงกับผลในอุดมคติที่ได้ทำการออกแบบและสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 5

### การออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

#### 5.1 บทสรุป

การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของสมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติหลายประการของวงจรกรองความถี่แบบเบียร์นสไตน์มีข้อดีกว่าวงจรกรองความถี่แบบเดิมที่มีอยู่ อาทิเช่น สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาดและเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส เป็นต้นเหมาะสมที่จะนำไปออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ดีที่ทำให้วงจรกรองความถี่มีความราบเรียบ เหมาะกับการนำไปออกแบบใช้งาน

การออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้สมการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ด้วยการคอนจูเกตจะทำให้ได้คุณสมบัติทางขนาดที่มีความราบเรียบ แต่จากการทดลองจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  เพื่อให้ได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีกราฟสูงพอเพื่อป้องกันการขาดหายของสัญญาณเสียงกลาง ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์  $\epsilon = 0.2$  นั้นได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่าสูงพอเหมาะกับการนำมาใช้งาน

หลังจากนั้นนำวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ค่าพารามิเตอร์  $\epsilon = 0.2$  มาจำลองผลผ่านโปรแกรม Simulink เพื่อสังเกตผลในการออกแบบ พบว่าผลของสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองโดยสมการวงจรถอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คแบบโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์นั้น สามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพ และเมื่อนำมาใช้จริงผ่านบอร์ด FiO RapidSTM32 พบว่าได้ผลของสัญญาณเสียงที่ผ่านการกรองใกล้เคียงกับผลในอุดมคติที่ได้ทำการออกแบบ

#### 5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อ

1. สามารถนำวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ไปพัฒนาผ่านรูปแบบของเสียงเพื่อให้สามารถสังเกตผลในอีกรูปแบบหนึ่งได้
2. นำวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์มาปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ได้รูปแบบสมการวงจรถอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คที่ดีที่สุดได้
3. มีการปรับขนาดของ Side lobe ให้มีขนาดเล็กลงหรือมีขนาดเท่ากับในอุดมคติ
4. มีการปรับขนาดแบนด์วิธของสมการวงจรถองแถบความถี่ผ่านให้แคบลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Schaumann R. and Van Valkenburg M. E. Van., **Design of Analog Filters**, New York : Oxford University Press, 2001.
- [2] Chen W., **Passive and Active Filters Theory and Implementation**, New York : John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [3] มงคล คุรุรัตนานูวัฒน์ และสรพงษ์ แซ่เตีย., การออกแบบวงจรครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาร์ซีฟิลเตอร์, 2541
- [4] Fernando A.P. Baruqui, Antonio and Eduardo Rapoport., "IC Design of an Analog Tunable Crossover Network," **IEEE Proc. Circuits and Systems on ISCAS**, vol. 2, 2005, pp. 1012-1015.
- [5] J. Robert Ashley., "Requirements for Loudspeaker Crossover Networks," **IEEE Proc. Acoustics, Speech, and Signal Processing on ICASSP**, 1984, pp. 144-147.
- [6] Lorentz G. G., **Bernstein Polynomials**, New York : Chelsea publishing company, 1986.
- [7] Baez-Lopez D., "The Bernstein Filter A New Class of Linear Phase Filter Approximation," **IEEE Proc.** vol. 3, May 1991, pp. 704-707.
- [8] วันวิสา ชัชวงษ์., การแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณวีดีโอในระบบโทรทัศน์, 2553
- [9] Su K. L., **Analog Filters**, Cambridgeshire : University of Cambridge Press, 1996.
- [10] กฤษณพงศ์ มะโนวงศ์, และคมวุฒิ เขตสาสี. การออกแบบวงจรแก้ผิดเพี้ยนทางดีเลย์ของสัญญาณบนพื้นฐานโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [11] กิติชัย แซ่โต้ง, และภานุพุททวงษ์. การออกแบบวงจรแเอ็คทีฟครอสโอเวอร์เน็ตเวิร์คโดยใช้ฟังก์ชันพิเศษ. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [12] มนัส สัจวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล คู่มือการใช้ Matlab ฉบับสมบูรณ์ กรุงเทพมหานคร: อินโฟเพรส, 2543.
- [13] ปรินูญา สวงนสัจย์. คู่มือ Matlab ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี : ไอซีดี พรีเมียร์ จำกัด, 2553.
- [14] Chen W., **Passive and Active Filters Theory and Implementation**, New York : John Wiley & Sons, Inc. 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] มงคล คุรุรัตนานุวัฒน์ และสรพงษ์ แซ่เตีย., การออกแบบวงจรครอส โอเวอร์เน็ตเวิร์ค โดยใช้ยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาร์ซีฟิลเตอร์, 2541
- [16] Fernando A.P. Baruqui, Antonio and Eduardo Rapoport., “IC Design of an Analog Tunable Crossover Network,” **IEEE Proc. Circuits and Systems on ISCAS**, vol. 2, 2005, pp. 1012-1015.
- [17] J. Robert Ashley., “Requirements for Loudspeaker Crossover Networks,” **IEEE Proc. Acoustics, Speech, and Signal Processing on ICASSP**, 1984, pp. 144-147.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้งานวงจรออสซิลโลสโคปแบบ 3 ทาง โดยใช้โพลินีเมียลแบบเบิร์นสไตน์

- วิธีการติดตั้งและการทำงานของบอร์ด FIO RapidSTM32
- การจำลองผลด้วยโปรแกรม Simulink
- การทดลองผ่านบอร์ด FIO RapidSTM 32
- การทดลองฟังเสียงด้วยโปรแกรม Simulink

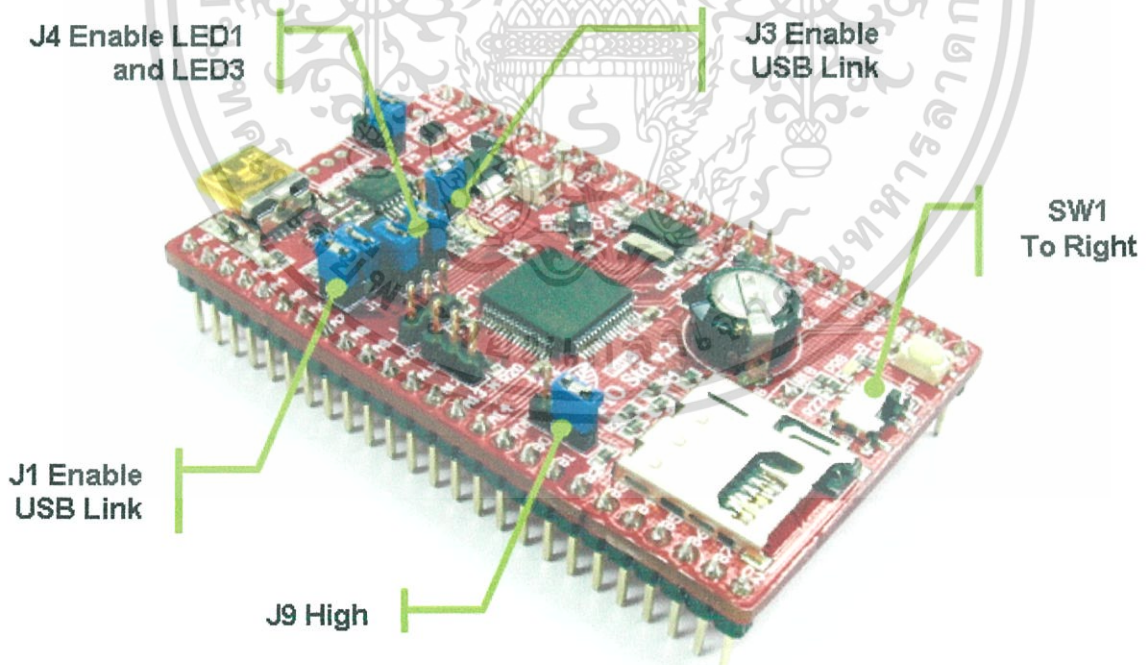


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการติดตั้งและการทำงานของบอร์ด FIO RapidSTM32

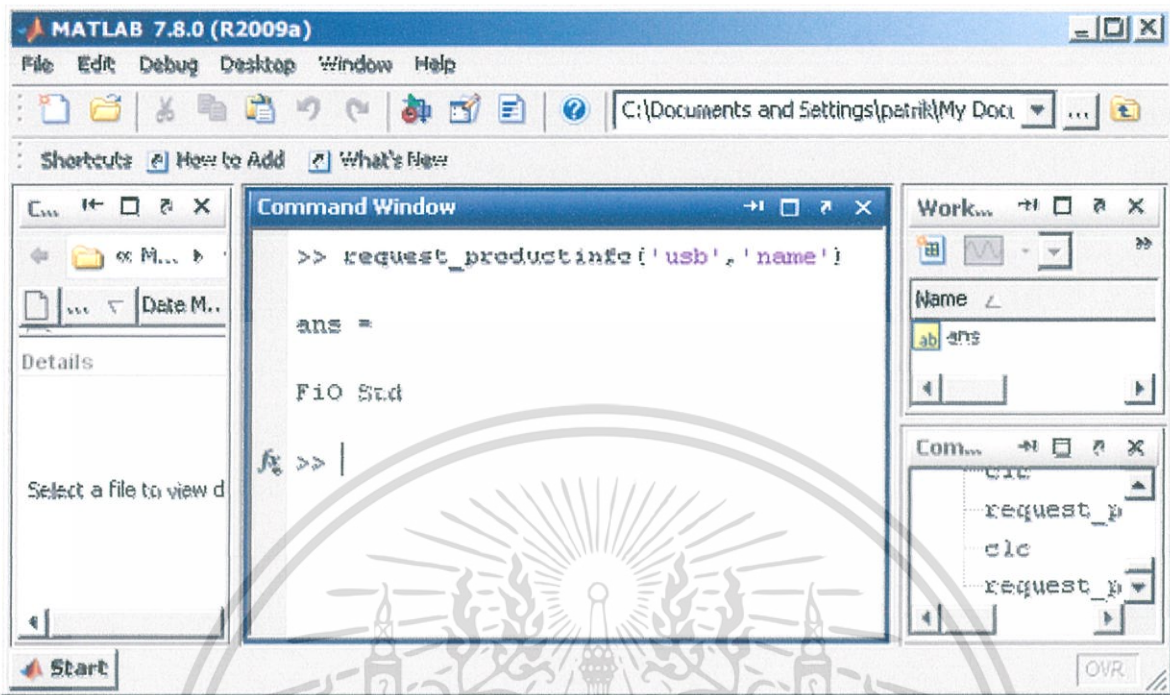
### ขั้นตอนเตรียมการใช้งานบอร์ด FIO RapidSTM32

1. เตรียมคอมพิวเตอร์ PC หรือ Notebook ที่มีระบบปฏิบัติการ 32 bits หรือ 64 bits
2. ติดตั้งโปรแกรม Matlab Version2009a(7.8) 32 bits หรือเวอร์ชันที่ใหม่กว่าเท่านั้น เพื่อใช้งานกับ RapidSTM32
3. ติดตั้ง RapidSTM32 Blockset version 0.3.6.1 หรือเวอร์ชันที่ใหม่กว่า
4. ติดตั้งโปรแกรม RealView MDK for ARM Version 4.0 เพื่อให้คอมพิวเตอร์สื่อสารกับบอร์ด RapidSTM32
5. ติดตั้ง Microsoft .NET Framework 3.5
6. ทำการเชื่อมต่อบอร์ด RapidSTM32 ด้วยสาย USB โดยตั้งค่า Switch และ Jumper ตามภาพที่ 1
7. ทดสอบการเชื่อมต่อบอร์ดโดยการใช้คำสั่งในโปรแกรม Matlab โดยการพิมพ์ request\_productinfo ('usb','name'); หากอยู่ในสถานการณ์เชื่อมต่อจะขึ้นสถานะ ดังภาพที่ 2



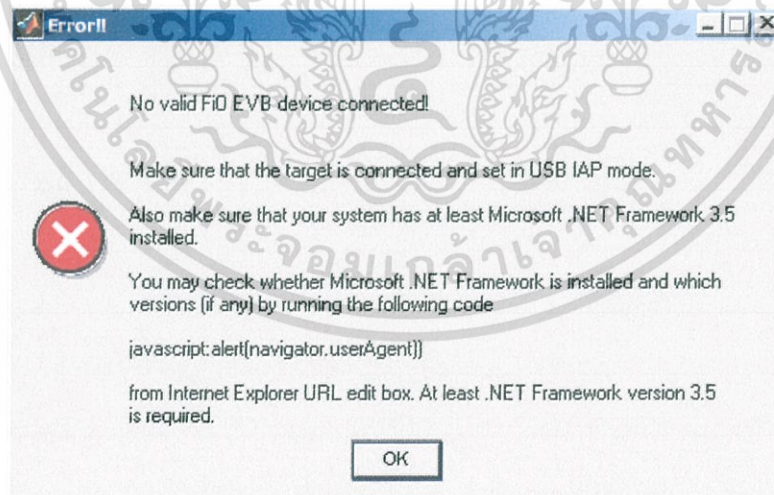
ภาพที่ 1 การตั้งค่า Switch และ Jumper ของบอร์ด RapidSTM32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 แสดงสถานการณ์เชื่อมต่อของคอมพิวเตอร์กับบอร์ด FIO RapidSTM32

หากไม่อยู่ในสถานการณ์เชื่อมต่อจะขึ้นข้อความ ดังรูป

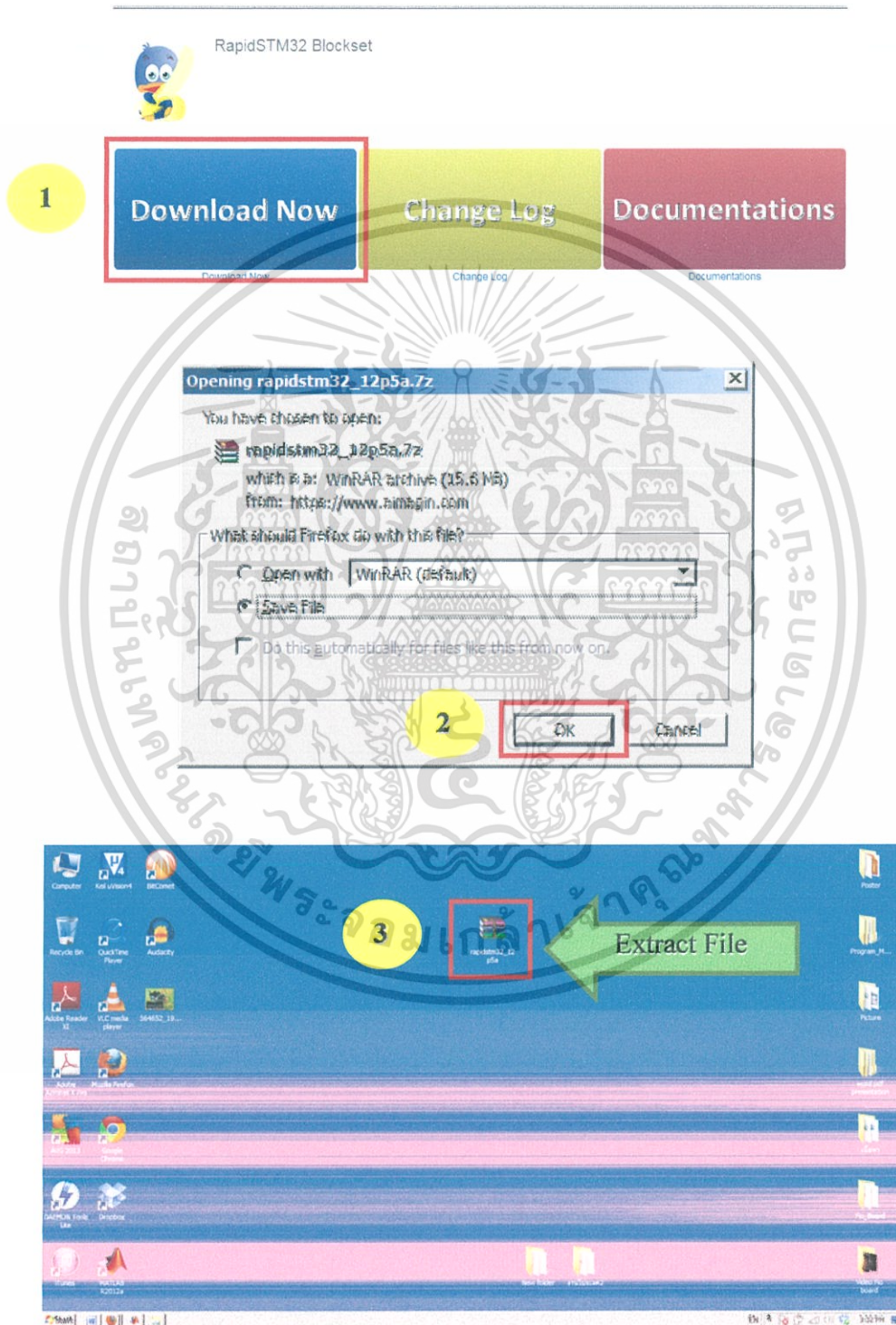


ภาพที่ 3 แสดงสถานะขาดการเชื่อมต่อของคอมพิวเตอร์กับบอร์ด FIORapidSTM

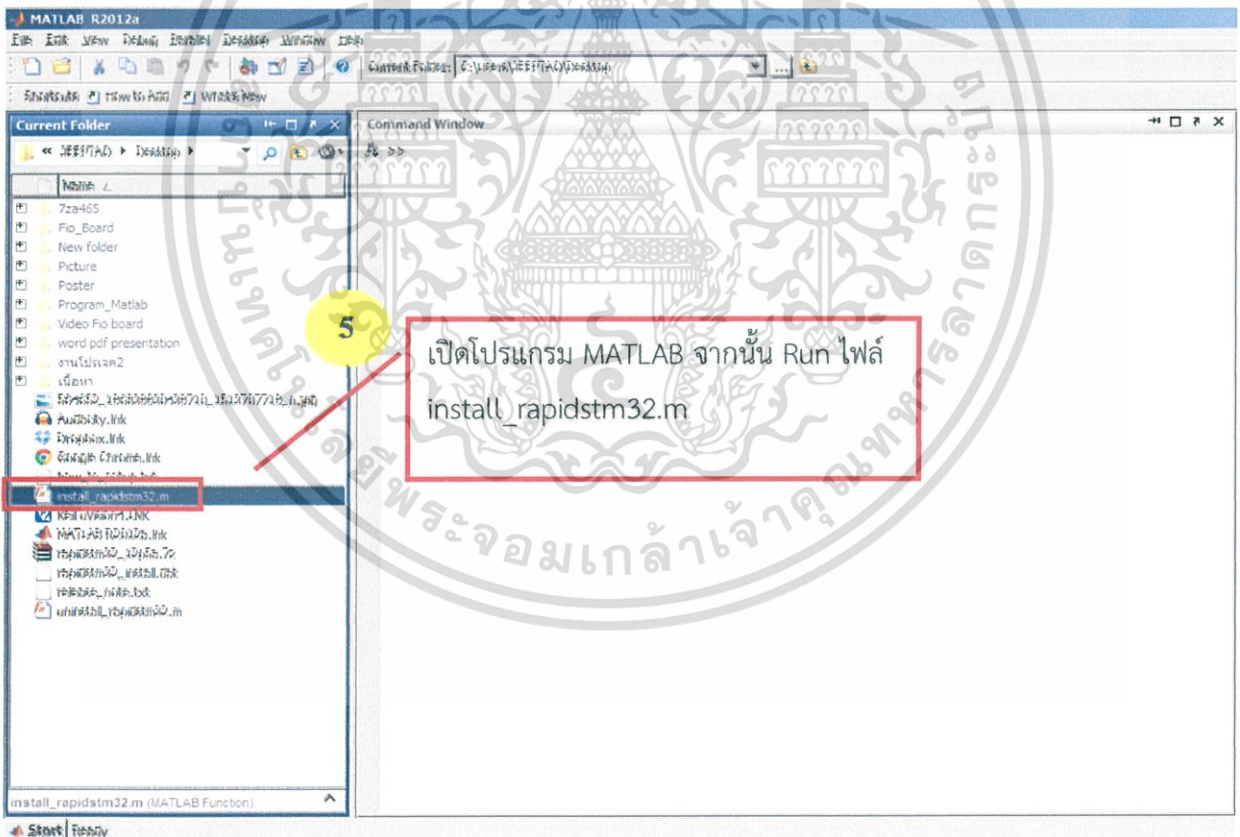
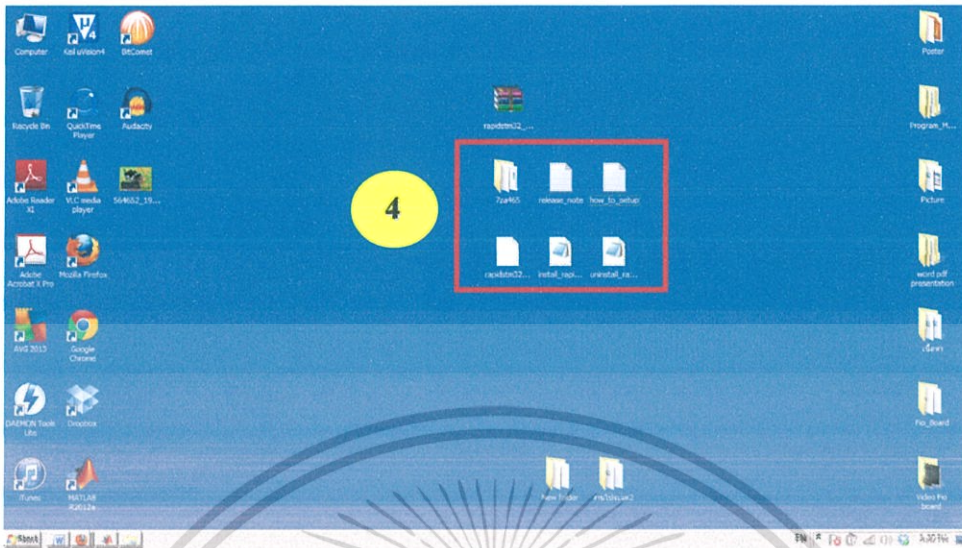
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการติดตั้ง RapidSTM32 Blockset

1. ทำการดาวน์โหลด RapidSTM32 Blockset จาก <https://www.aimagin.com/download/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



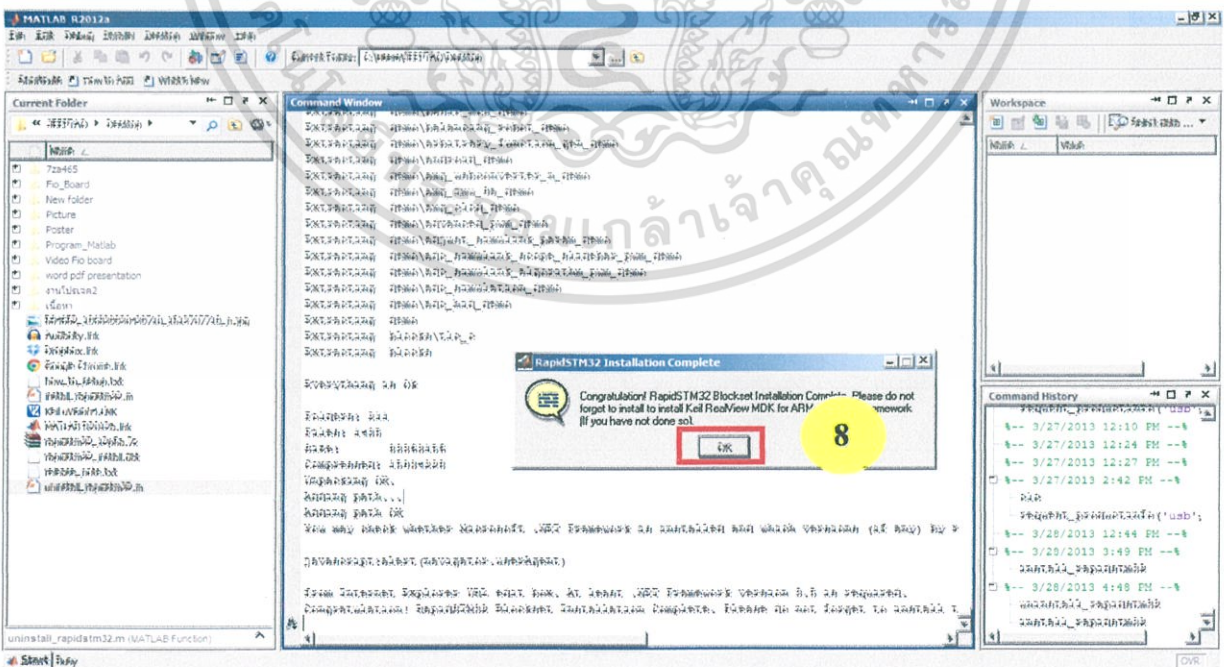
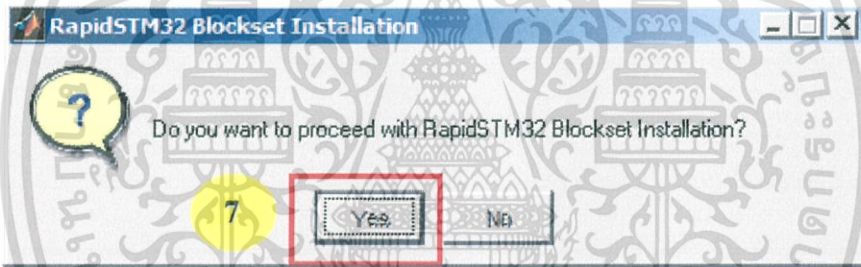
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

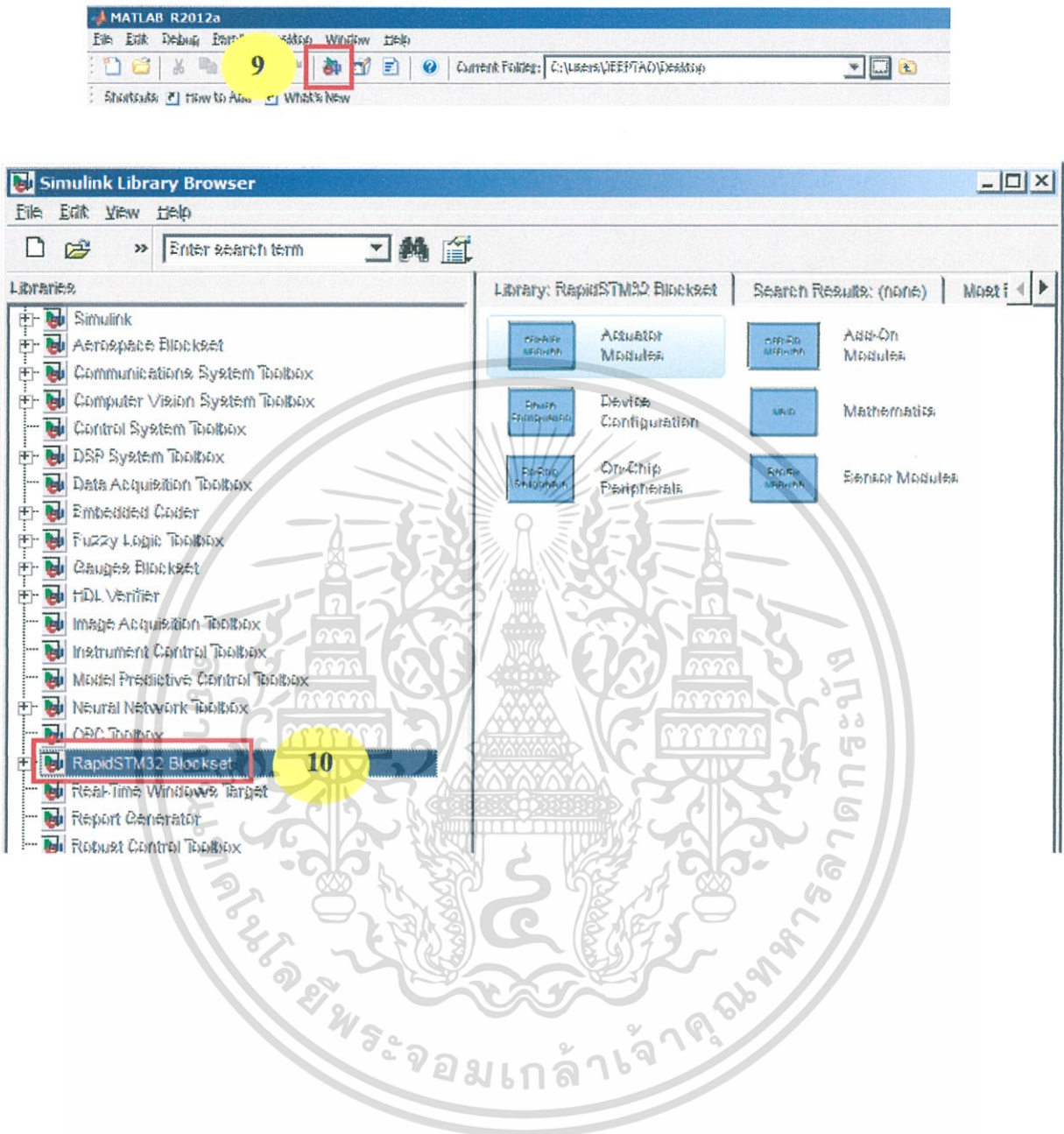
Editor - C:\Users\JEPTAO\Desktop\install_rapidstm32.m
File Edit Text View Layout Tools Debug Desktop Window
Run install_rapidstm32.m (F5)

1 function install_rapidstm32
2
3 % Check Matlab and other tools release/version.
4 %
5 % Install RapidSTM32 toolsuite if the minimum requirements are met.
6 %
7 % Minimum Requirements
8 %
9 % - Matlab Release 2009a
10 % - Simulink
11 % - Real-Time Workshop or Simulink Coder
12 % - Real-Time Workshop Embedded Coder or Embedded Coder
13 %
14 % RapidSTM32 will be installed in the root directory of the same drive as
15 % Matlab root.
16
17 %% Installation confirmation
18 dialog = dialog('Do you want to proceed with RapidSTM32 Blockset Installation?', ...
19 'RapidSTM32 Blockset Installation', 'Yes', 'No', 'Yes');
20 if strcmp(dialog, 'No')
21 error('RapidSTM32 Blockset installation was canceled.')

```

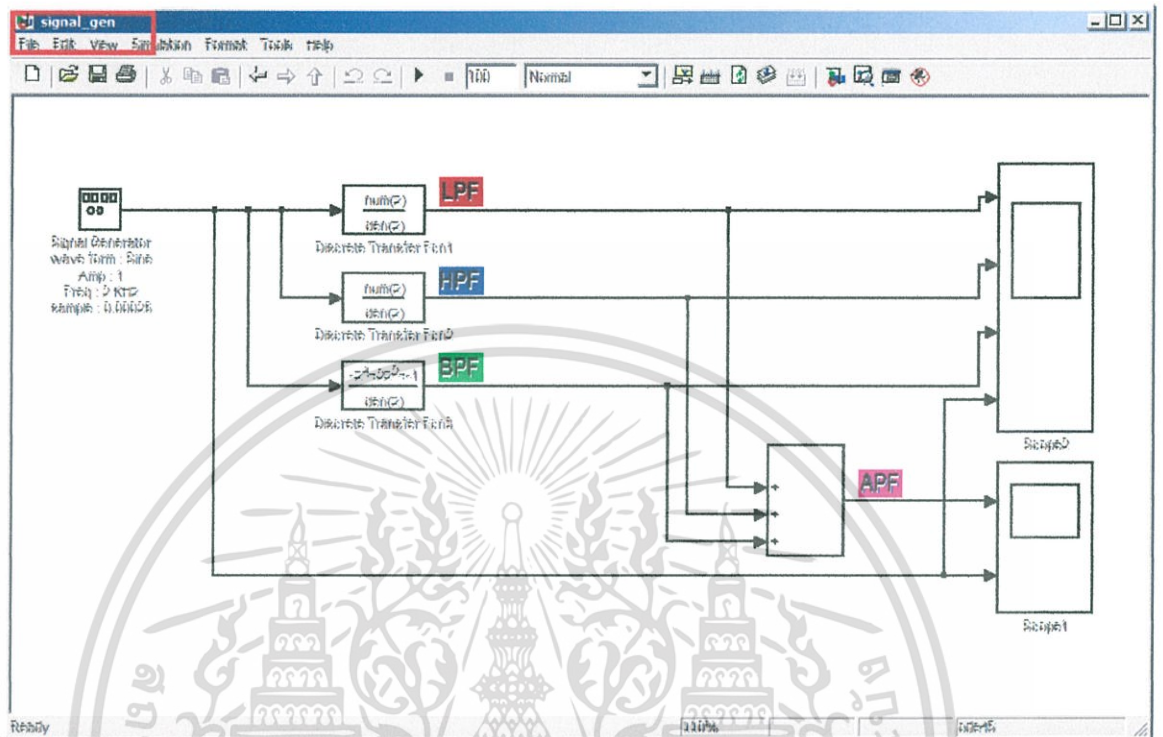


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การจำลองผลด้วยโปรแกรม Simulink



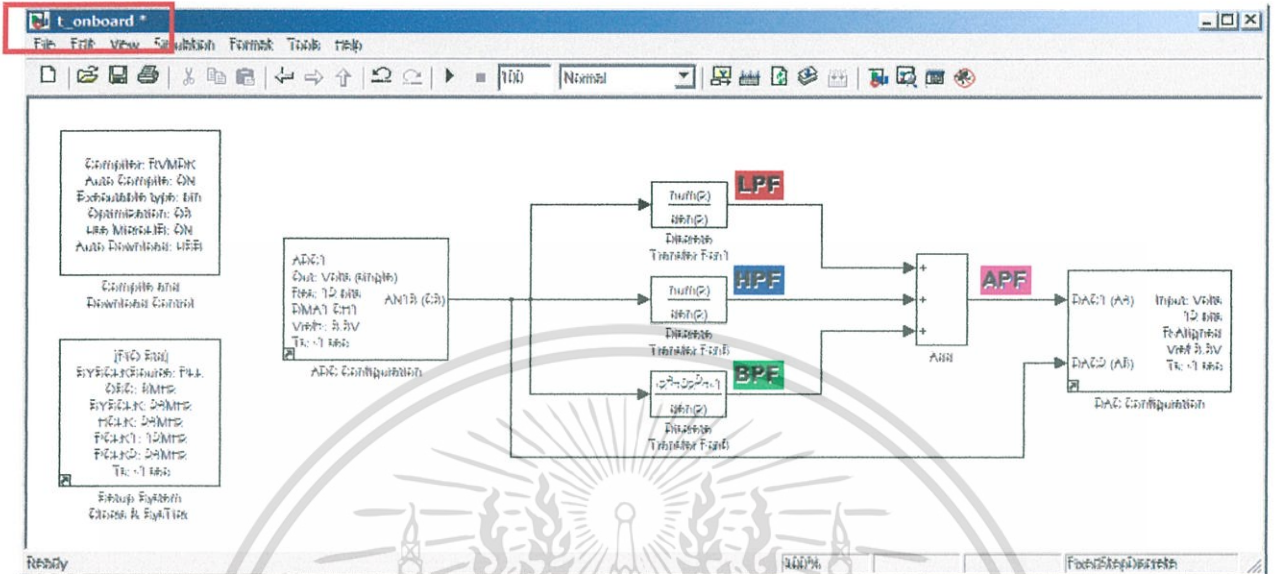
### 1. เปิด Program\_Matlab> Simulink>signal\_gen.m

อธิบาย Blockset ต่างๆ ได้ดังนี้

- Signal Generator มีหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งจากสี่สัญญาณ คือ sine squaresawtooth และการกระจายที่ไม่มีรูปแบบของ Random noise โดยกำหนดสัญญาณทดลองที่ความถี่ 2KHz และ Sample time เท่ากับ 0.00025 วินาที
  - Discrete Transfer Function มีหน้าที่จำลองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์
  - Scope มีหน้าที่แสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองของระบบบน Simulink ทำหน้าที่คล้าย Oscilloscope
  - Add มีหน้าที่รวมสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

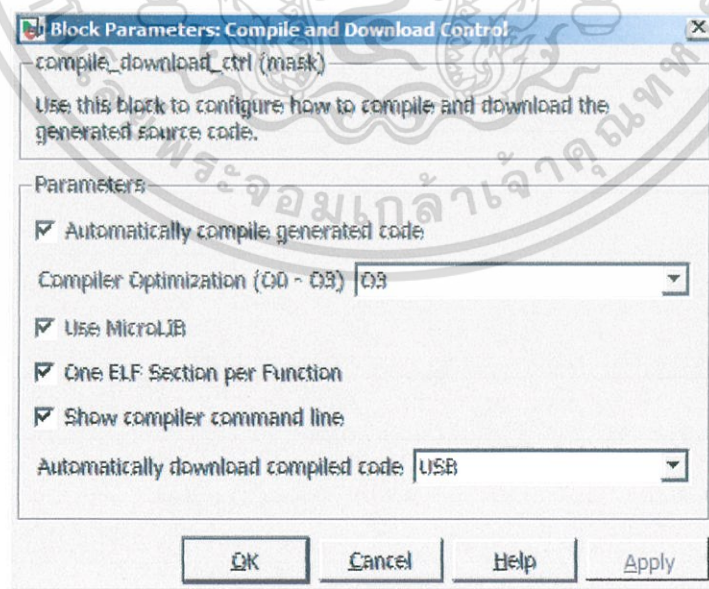
## การทดลองผ่านบอร์ด FiO RapidSTM 32



1. เปิด Program\_Matlab> Simulink > t\_onboard.m

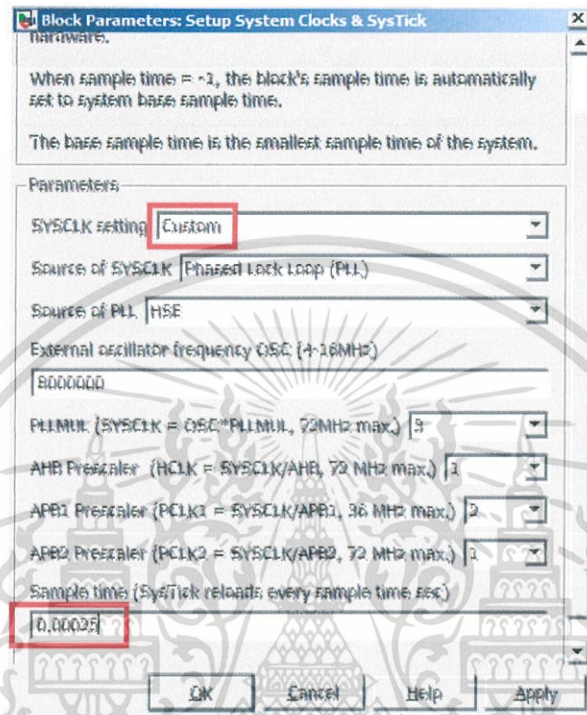
อธิบาย Blocksetต่างๆ ได้ดังนี้

- Compile and Download Control มีหน้าที่ Compile โปรแกรมเพื่อเปลี่ยนภาษาไปเป็น C โค้ดและ Download ข้อมูลจาก Simulink ลงบอร์ด FiO RapidSTM32 เพื่อนำไปใช้งาน

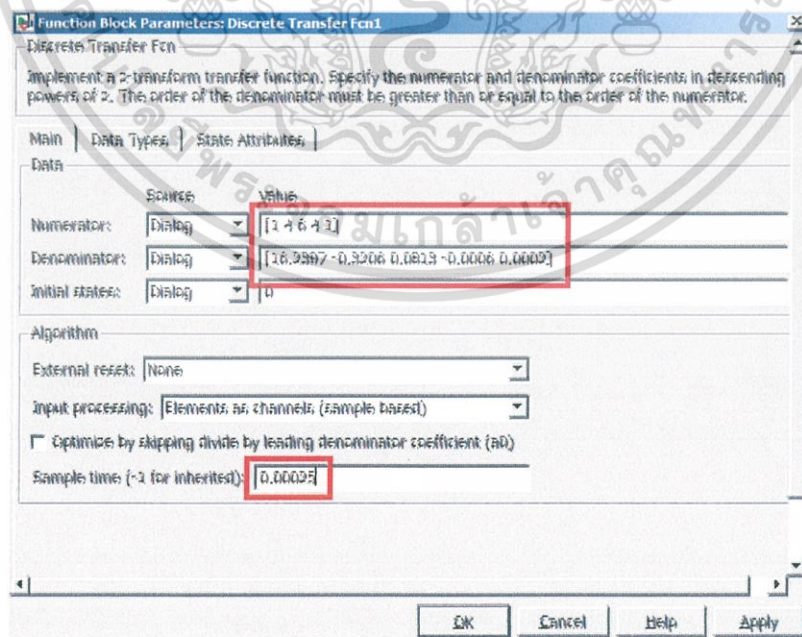


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Setup System Clocks & SysTick มีหน้าที่กำหนดค่าต่างๆของบอร์ด FiO RapidSTM32 ในส่วนนี้เปรียบเสมือนหัวใจหลักของการทำงานของบอร์ด FiO RapidSTM32 โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆเป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ

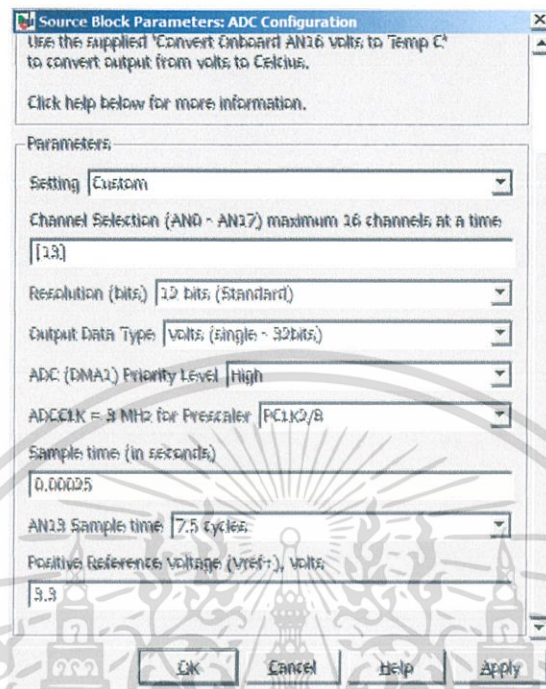


- Discrete Transfer Function มีหน้าที่จำลองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

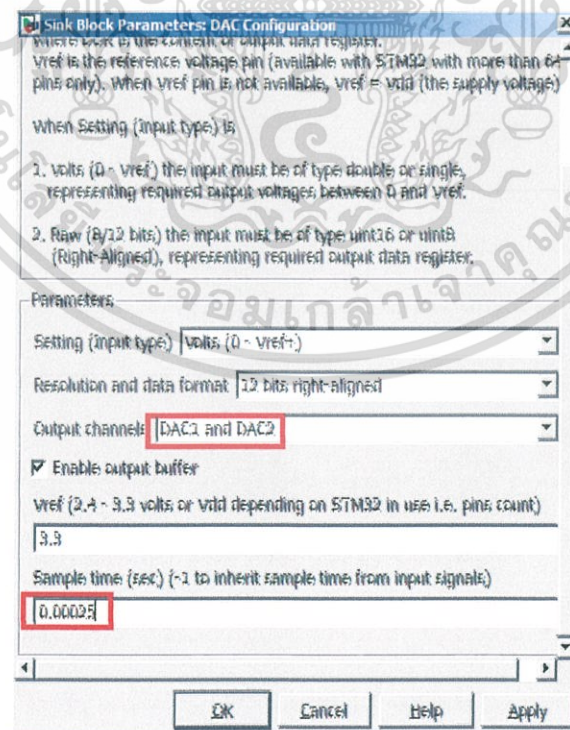


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ADC Configuration มีหน้าที่แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล



- DAC Configuration มีหน้าที่รับค่าเพื่อแสดงผลในรูปแบบของดิจิทัลออกสู่บอร์ด FiO RapidSTM32 ในที่นี้กำหนดขาออกที่ขา A4 หรือ DAC1 และกำหนดขาออกที่ขา A5 หรือ DAC2 เพื่อแสดงผลของสัญญาณทดสอบ



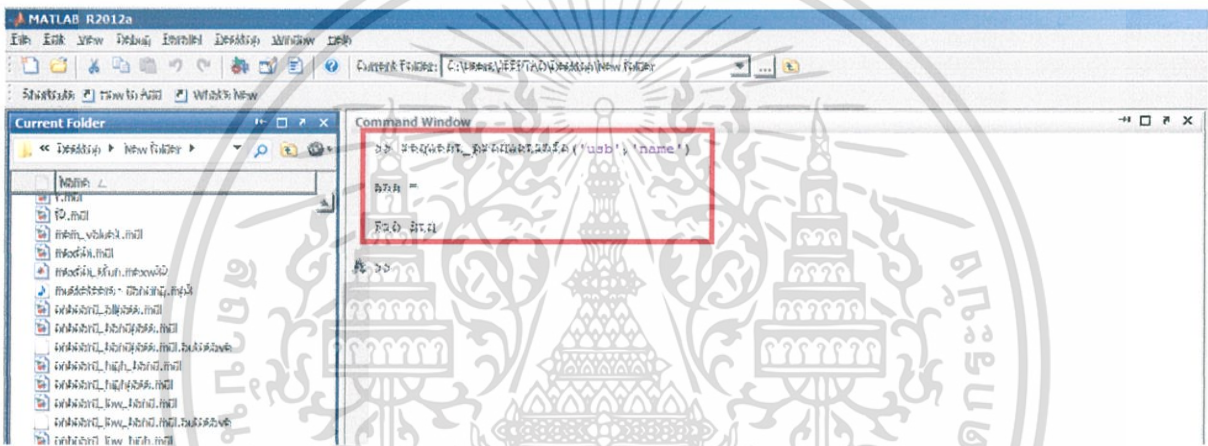
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Scope มีหน้าที่แสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองของระบบบน Simulink ทำหน้าที่คล้าย Oscilloscope

- Add มีหน้าที่รวมสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านเข้าด้วยกัน

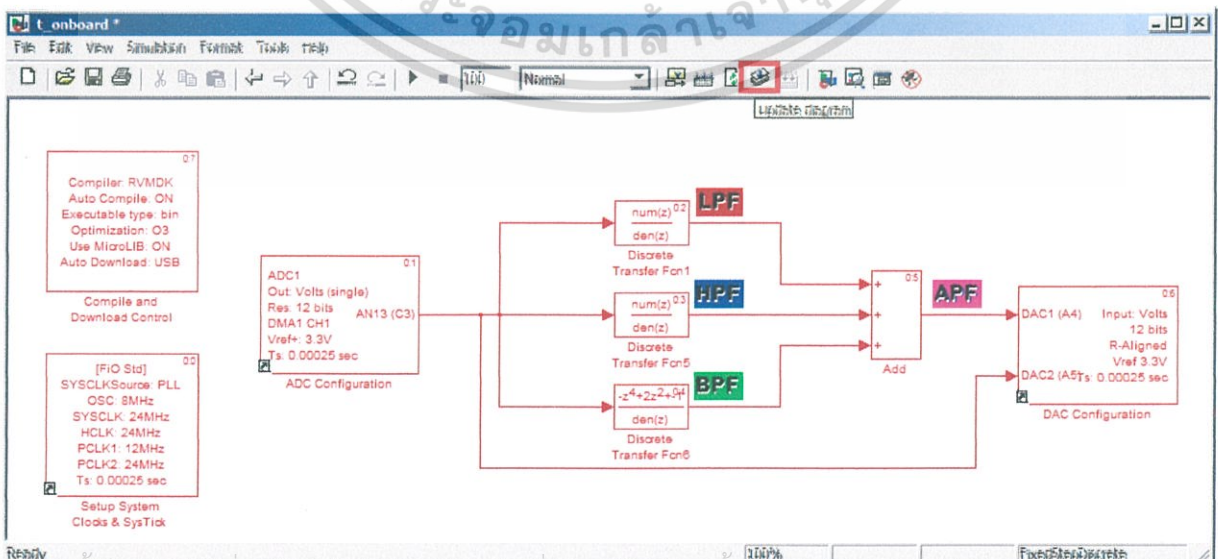
หลังจากออกแบบวงจรคอสไอเวอร์เน็ทเวิร์คในโปรแกรม Simulink เสร็จแล้ว เราจะทำการ Burn ข้อมูลเข้าสู่บอร์ด FiO โดยทำตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

- ตรวจสอบก่อนว่าคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับบอร์ด FiO แล้วหรือยัง โดยการพิมพ์คำสั่งว่า request\_productinfo('usb','name') ในหน้า Command Window



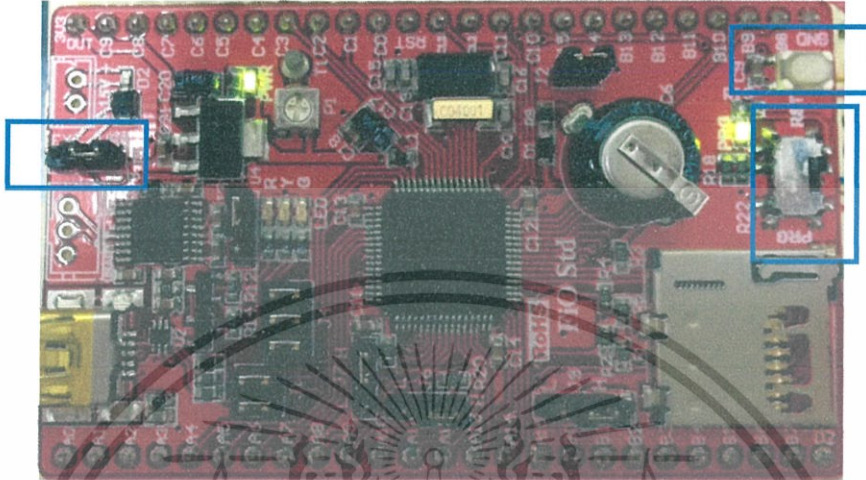
- เปิด Model ที่ชื่อว่า t\_onboard เซตค่าที่ Toolbar > Simulation > Configuration Parameters > Code Generator (Real-time Workshop) > เปลี่ยน System Target File เป็น rapidSTM32.tlc > กด OK

- กด Update Diagram 2 ครั้ง เพื่อให้เวลา Sample Time ของ Blockset มีค่าเท่ากัน

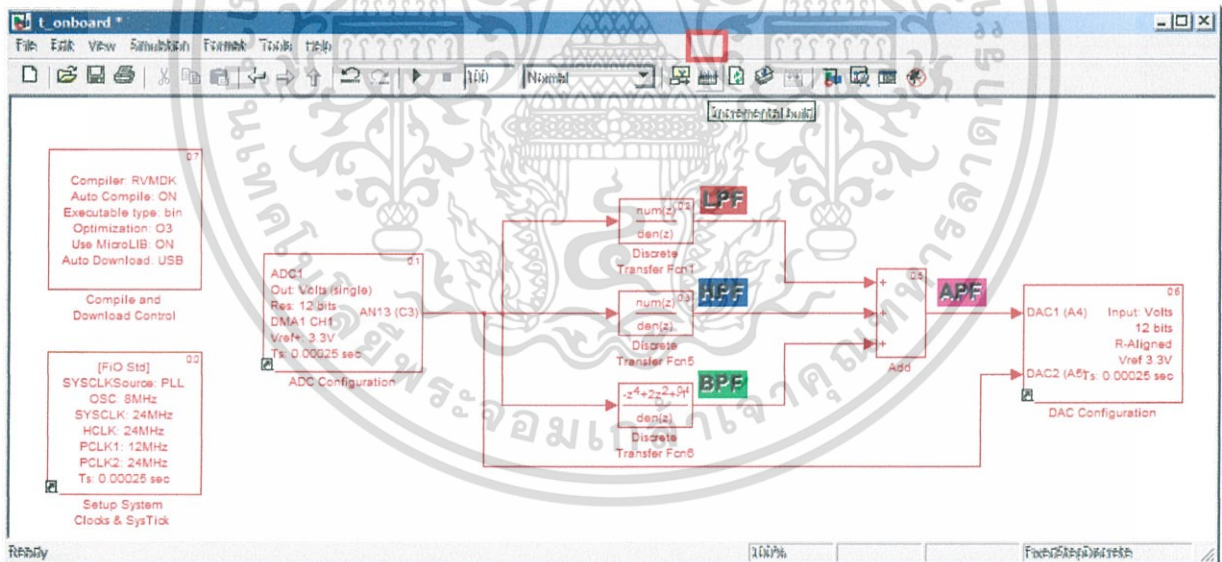


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

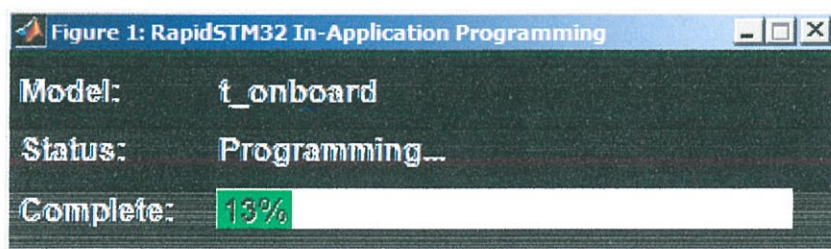
- ก่อนจะ Build ข้อมูลสู่บอร์ด ให้ทำการเชตบอร์ดให้อยู่ในสถานะที่พร้อมจะรับข้อมูล โดยสับ Jumper ไปที่ USB และสับสวิทซ์ให้ไฟขึ้นที่ PRG และทำการกด RESET 1 ครั้ง



- กด Increment Build Diagram ลงบอร์ด FiO RapidSTM32 จากนั้นโปรแกรมจะทำการ Build ข้อมูลลงบอร์ด FiO RapidSTM32

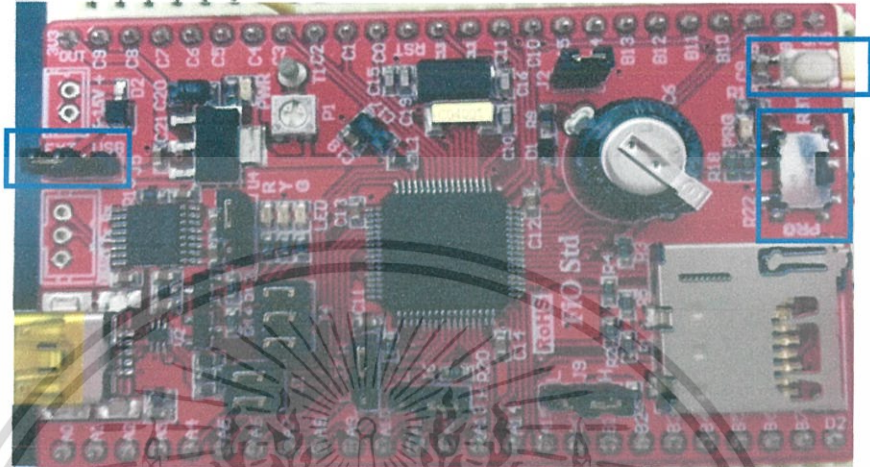


- รอสักพักจะแสดงหน้าต่างที่กำลัง Process ข้อมูลสู่บอร์ด FiO



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

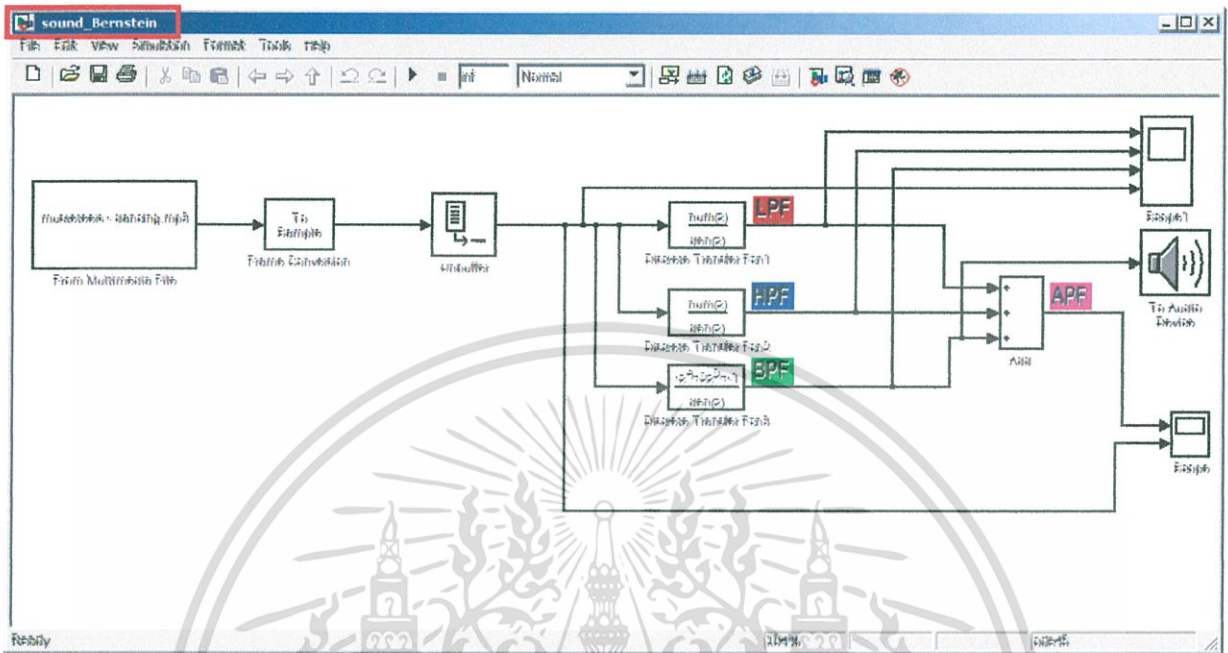
- สับ Jumper ไปที่ EXT และสับสวิตช์ที่บอร์ด FiO RapidSTM32 ให้อยู่ในโหมด Stand Alone จากนั้นกด RESET เพื่อให้บอร์ดอยู่ในสถานะการใช้งานจริง



- จับ Oscilloscope ที่ขา A4 และ A5 แล้วบันทึกผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

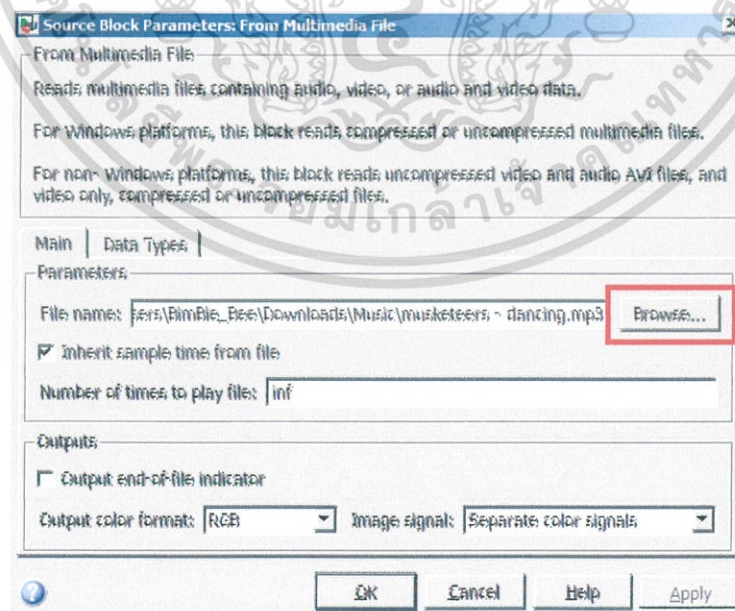
## การทดลองฟังเสียงด้วยโปรแกรม Simulink



1. เปิด Program\_Matlab>Simulink>sound\_Bernstein.m

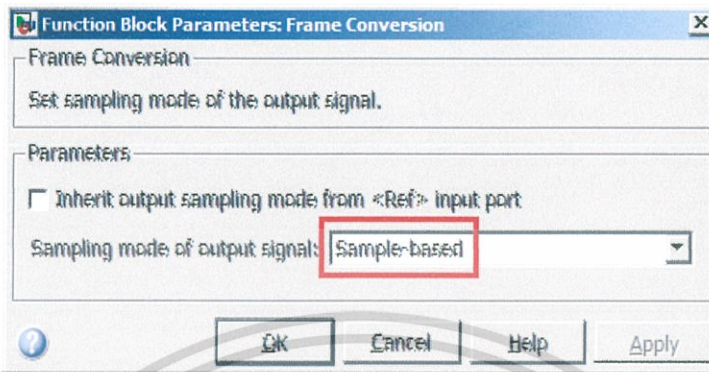
อธิบาย Blocksetต่างๆ ได้ดังนี้

- From Multimedia File มีหน้าที่ดึง ไฟล์เสียงที่จะทดลองฟัง

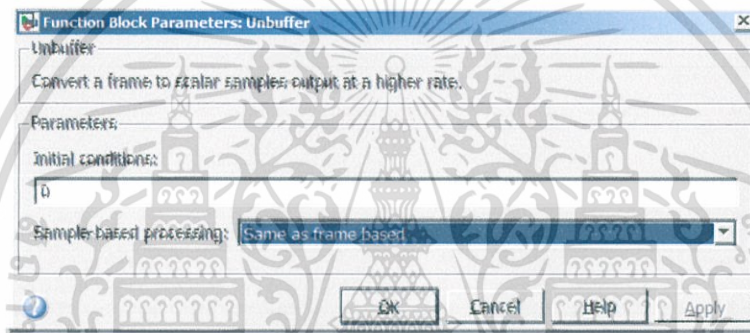


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

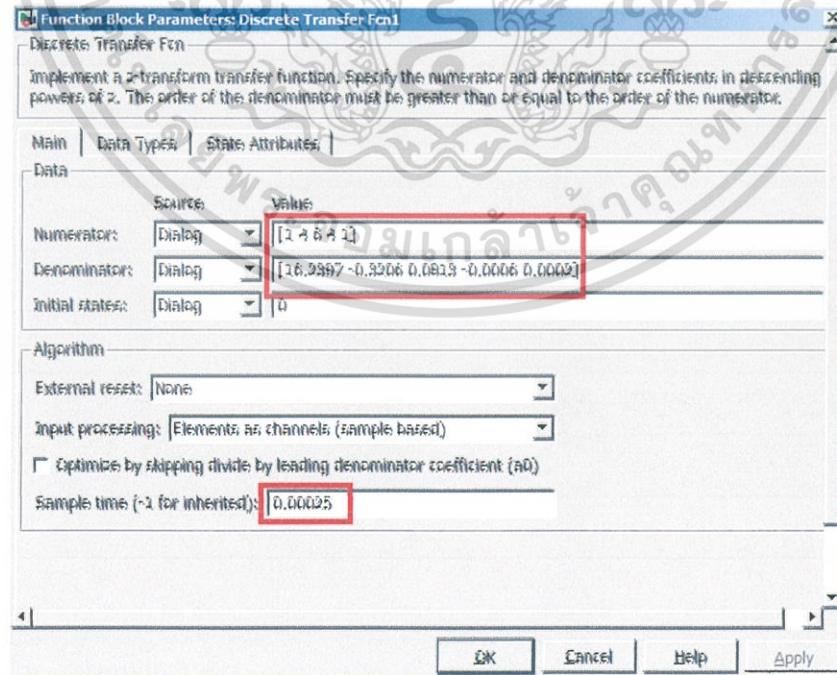
- Frame Conversion กำหนดเป็น Sample-based



- Unbuffer มีหน้าที่



- Discrete Transfer Function มีหน้าที่จำลองเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่านและวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Scope มีหน้าที่แสดงผลสัญญาณระหว่างการจำลองของระบบบน Simulink ทำหน้าที่คล้าย Oscilloscope
- Add มีหน้าที่รวมสัญญาณจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านเข้าด้วยกัน
- To Audio Device มีหน้าที่แสดงผลพัลส์ของสัญญาณ ในที่นี้ คือ เสียงนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล...ดร.วันวิสา ชัชวงษ์

ตำแหน่งปัจจุบัน...อาจารย์และกรรมการประจำหลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ

## ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา            | สาขา                    | สถาบันที่จบ  | ปีที่จบ |
|--------------------------|-------------------------|--|---------|
| วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต | วิศวกรรมไฟฟ้า           | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2554    |
| วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต   | วิศวกรรมสารสนเทศ        | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2546    |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต      | เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2543    |

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)... Satellite Communication, Discrete Signal Processing

## ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

| ปี พ.ศ. | ทุนการศึกษาและทุนวิจัย             | สถาบันที่ให้   |
|---------|------------------------------------|--|
| 2545    | ทุนพัฒนาอาจารย์                    | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร<br>ลาดกระบัง                   |
| 2549    | โครงการวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ<br>จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 2551    | โครงการวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ<br>จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 2553    | โครงการวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ<br>จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 2555    | โครงการวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ<br>จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)**

1. V. Chutchavong, V. Pirajanchai and K. Janchitrapongvej, "Equalization of the Distorted Chrominance Signal using IIR Digital Filter with the Bernstein Filter," TENCON 2005 – IEEE Region 10, Melbourne, Victoria, Australia, November 21-24, 2005.
2. V. Chutchavong, C. Benjangkprasert, O. Sangaroon and K. Janchitrapongvej, "Design of Linear-phase Bernstein Filter for Equalized the Distorted Chrominance," The 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) International Conference, Ubonburi Hotel, Ubon Ratchathani, Thailand, pp.809-812, May 10-13, 2006.
3. V. Chutchavong, C. Benjangkprasert, and K. Janchitrapongvej, "On Design of Video Equalizer for Distorted Chrominance based on the Bernstein Polynomials," 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), GUET, Guilin, China, pp.602-605, June 25-28, 2006.
4. T. Tongyoo, V. Chutchavong, and O. Sangaroon, "Object-Oriented Design Message Control Multi-Threaded Execution," SICE-ICASE International Joint Conference 2006 (SICE-ICCAS 2006), BEXCO, Busan, Korea, pp.1730-1733, October 18-21, 2006.
5. V. Chutchavong, C. Benjangkprasert, O. Sangaroon and K. Janchitrapongvej, "Design of Adaptive Chrominance Delay Equalizer using Linear-Phase FIR Digital Filter," The 2007 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) International Conference, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, pp. 1110-1113, May 9-12, 2007.
6. S. Ardhan, S. Satsri, V. Chutchavong, and O. Sangaroon, "Improved Model for Traffic Fluctuation Prediction by Neural Network," International Conference on Control, Automation and Systems 2007 (ICCAS 2007), COEX, Seoul, Korea, pp.122-125, October 17-20, 2007.
7. S. Satsri, S. Ardhan, V. Chutchavong, and O. Sangaroon, "IP Traffic Prediction in IP-based NGN in Thailand by Neural Network," International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2007), Swissotel Le Concord, Bangkok, Thailand, pp.138-141, November 21-23, 2007.
8. V. Chutchavong, O. Sangaroon, V. Pirajanchai, and K. Janchitrapongvej, "An IIR Digital Video Equalizer Design with the Bernstein Polynomial and Generalized Bilinear Transformation for Gain Chrominance Distortion," International Conference on Control, Automation and Systems 2008 (ICCAS 2008), COEX, Seoul, Korea, pp.2274-2279, October 14-17, 2008.
9. V. Chutchavong, C. Benjangkprasert, and K. Janchitrapongvej, "Gradient-Based Algorithm by using VSLMP Technique for the Amplitude Chrominance Distortion," Laos Journal on Applied Science: 1<sup>st</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Conference on Applied Science (ICAS 2006), Vientiane, Laos, Vol. 1, No. 1, pp.610-617, November 5-7, 2006.

10. วันวิสาขช่วงษ์ อรลาภ แสงอรุณ ขวลิต เบญจางคประเสริฐ และกนก เจนจิระพงศ์เวช, “การแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสี โดยใช้เบียร์นสไตน์โพลีโนเมียล.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30 (EECON-30), โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท กาญจนบุรี, pp.669-672, 25-26 ตุลาคม 2550

11. V. Chutchavong, S. Pongpayom, O. Sangaroon, C. Benjangkprasert, V. Pirajanchai, and K. Janchitrapongvej, “A Variable Luminance-Chrominance Gain Equalizer.” The 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) International Conference, Empress Convention Centre, Chiang Mai, Thailand, pp.899-903, May 19-21, 2010.

ผลงานตีพิมพ์/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. V. Chutchavong, O. Sangaroon, K. Janchitrapongvej, **Linear-Phase Bernstein Filter for Equalized the Distorted Chrominance**, LAMBERT Academic Publishing, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล .....รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช.....

ตำแหน่งปัจจุบัน .....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาท์อีสท์บางกอก.....

### ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา | สาขา                      | สถาบันที่จบ                                    | ปีที่จบ |
|---------------|---------------------------|--|---------|
| D.Eng         | Communication Engineering | Tokai University                               | 2529    |
| M.Eng         | Electrical Engineering    | Tokai University                               | 2520    |
| B.Eng         | วิศวกรรมโทรคมนาคม         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2517    |

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ..... Image Processing, Discrete Signal Processing.....

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Tangthong, N., Pirajnanchai, V. and Janchitrapongvej, K., "Active notch uniformly distributed RC circuit and their application", ICCAS 2008, Page(s): 1548 – 1552.
2. Janchitrapongvej, K., Kawejan, V., Benjangkprasert, C., Tangtisanon, P., Seatia, S., Sudou, S. and Teramoto, M., "Notch frequency adjustable active filter using uniformly distributed RC line", IEEE APCCAS 2000, Page(s): 568 – 570.
3. Benjangkprasert, C., Janchitrapongvej, K., Anantrasirichai, N. and Takahashi, N., "High-speed adaptive noise canceller with parallel block structure using input for stability", ICSP '1998, Page(s): 482 – 485.
4. Phantonglow, R., Janchitrapongvej, K. and Tangtisanon, P., "The design of an active band pass filter using uniformly distributed RC line", ICCAS-2002, Page(s): 1275 – 1278.
5. Pirajnanchai, V., Janchitrapongvej, K. and Panyanouvong, N., "High Frequency Active High-pass Filter used Distributed MOSFET", ICICS-2005, Page(s): 969 – 972.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Benjangkprasert, C., Jorphochaudom, S., Chompoo, S., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "The combination of genetic algorithm and variable step-size algorithm for adaptive IIR notch filter", ICNNSP-2003, Page(s): 480 – 483.
7. Moodleah, S., Benjangkprasert, C., Sangaroon, O., Udomsripaiboon, T., Sa-ad, S. and Janchitrapongvej, K., "Low-complexity turbo equalization using E-BAD detector combine with LDPC codes for high-density magnetic recording", ECTI-CON2008, Page(s): 405 – 408.
8. Chompoo, S., Benjangkprasert, C., Anantrasirichai, N. and Janchitrapongvej, K., "Adaptive feedback equalization receiver for DS-CDMA with turbo coded systems", ICACT-2005, Page(s): 1068 – 1073.
9. Pirajnanchai, V., Chutchavong, V. and Janchitrapongvej, K., "Modification of data transmission filter with Generalized Bessel transformation", ICCAS-2010, Page(s): 2202 – 2205.
10. Wattanaluk, P., Nakasuwa, J., Benjangkprasert, C., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "Variable step-size modified MNG algorithm for adaptive IIR notch filter for detection of sinusoids", ISPACS-2005, Page(s): 245 – 248.
11. Pirajnanchai, V., Benjangkprasert, C. and Janchitrapongvej, K., "Active low pass notch filter using Multielectrode Distributed RC circuit", CSNDSP- 2010, Page(s): 355 – 358.
12. Chutchavong, V., Janchitrapongvej, K. and Pirajnanchai, V., "Equalization of the Distorted Chrominance Signal using IIR Digital Filter with the Bernstein Filter", TENCON-2005, Page: 1 – 5.
13. Panyanouvong, N., Luangphakorn, S., Pirajnanchai, V., Tangisanon, P. and Janchitrapongvej, K., "Designing active lowpass filter using uniformly distributed RC line", ICNNSP-2003, Page: 612 – 615.
14. Saingaroon, O., Griwan, J., Tangisanon, P., Janchitrapongvej, K., Nakasuwan, J. and Moriya, Y., "Amplitude scintillations on Earth satellite via Thaicom", TENCON-2000, Page(s): 102 – 105.
15. Benjangkprasert, C., Teerasakworakun, S. and Janchitrapongvej, K., "Implementation of variable step-size algorithm for lattice form structure for echo cancellation", APCCAS-2002, Page(s): 291 – 294.
16. Pirajnanchai, V. and Janchitrapongvej, K., "Continuous-time low-pass filter using an active distributed mosfet transistor", APCCAS-2004, Page(s): 1049 – 1052.
17. Sukhumalwong, S., Benjangkprasert, C., Anantrasirichai, N. and Janchitrapongvej, K., "Echo Cancellation Using The New Variable Step-size Algorithm Adaptive Lattice Filters", SICE-2006, Page(s): 3169 – 3172

18. Pirajnanchai, V., Janchitrapongvej, K. and Nakasuwan, J., "Frequency Discriminator Using Double Capacitive Layer Distributed RC Network", ICCCAS-2006, Page(s): 2540 – 2544.
19. Tangtisanon, P., Khempila, A., Panyanouvong, N., Saetia, S., Janchitrapongvej, K., Sudo, S. and Teramoto, M., "The design of an active band pass filter using uniformly distributed RC line", ISCAS-2003, Page(s): I-529 - I-532.
20. Udomsripai boon, T., Mingkwan, C., Benjangkaprasert, C., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "Soft output decision feedback equalizer using variable step-size algorithm for turbo coded DS/CDMA systems", ISPACS-2005, Page(s): 505 – 508.
21. Chutchavong, V., Sangaroon, O., Janchitrapongvej, K. and Pirajnanchai, V., "An IIR digital video equalizer design with the Bernstein Polynomial and generalized bilinear transformation for gain chrominance distortion", ICCAS-2008, Page(s): 2274 – 2279.
22. Pirajnanchai, V., Nakasuwan, J., Songthanapitak, N. and Janchitrapongvej, K., "High frequency transistor-only high pass filter", ISPACS-2005, Page(s): 701 – 704.
23. Benjangkaprasert, C., Teerasakworakun, S., Janchitrapongvej, K. and Takahashi, N., "Fast stabilized adaptive algorithm with parallel block structure for a single sinusoidal detection", ICOSP-2002, Page(s): 309 – 312.
24. Benjangkaprasert, C., Phuvasitkul, S., Limwong, W. and Janchitrapongvej, K., "Fast convergence algorithm for adaptive IIR notch filter using combination of genetic search and variable step-size algorithm", ITSC-2003, Page(s): 948 – 952.
25. Pirajnanchai, V., Luangphakorn, S., Nakasuwan, J. and Janchitrapongvej, K., "Novel technique using single pole amplifier in sinewave oscillator", ISCCSP-2004, Page(s): 319 – 321.
26. Tupchai, P., Benjangkaprasert, C., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "A new algorithm of adaptive IIR notch filter for the detection of sinusoids", APCCAS-2002, Page(s): 505 – 508.
27. Keovkolyan, T., Teekapakvisit, C. and Janchitrapongvej, K., "Adaptive iterative receiver for Layered Space-Time coding CDMA systems", ECTI-CON2009, Page(s): 852 – 855.
28. Jorphochaudom, S., Benjangkaprasert, C., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "Hybrid algorithm for adaptive IIR notch filter", ICCAS-2008, Page(s): 2454 – 2458.
29. Dhanawan, S., Benjangkaprasert, C. and Janchitrapongvej, K., "Adaptive Echo Canceller Based on Unbiased Adaptive IIR Notch Filter", ICCEE-2008, Page(s): 886 – 889.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30. Chutchavong, V., Pongpayom, S., Sangaroon, O., Benjangkprasert, C., Janchitrapongvej, K. and Pirajnanchai, V., "A variable luminance-chrominance gain equalizer", ECTI-CON2010, Page(s): 899 – 903.
31. Benjangkprasert, C., Chanthavong, M., Sangaroon, O. and Janchitrapongvej, K., "Adaptive Noise Canceller Using Adaptive IR Notch Filter Based on Lattice Form Structure", ISCIT-2008, Page(s): 18 – 21.
32. Puchalard, R., Benjangkprasert, C., Anantrasirichai, N. and Janchitrapongvej, K., "A robust variable step-size LMS-like algorithm for a second-order adaptive IIR notch filter for frequency detection", SPAWC-2001, Page(s): 232 – 234.
33. Janchitrapongvej, K., Kawejan, V., Seatia, S., Benjangkprasert, C., Tangtisanon, P. and Saingaroon, O., "Capacitive double layers uniformly distributed RC line and its applications to active filters", TENCON-2000, Page(s): 23 – 25.
34. Benjangkprasert, C., Somkur, T. and Janchitrapongvej, K., "A novel algorithm for adaptive IIR notch filter based on lattice form structure", ICCAS-2008, Page(s): 2450 – 2453.
35. V. Chutchavong, C. Benjangkprasert and K. Janchitrapongvej, "On Design of Video Equalizer for Distorted Chrominance based on the Bernstein Polynomials", ICCAS-2006, Page(s): 602 – 605.

**ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (คิดปะ หรือ อื่นๆ)**

1. V. Chutchavong, O. Sangaroon, K. Janchitrapongvej, **Linear-Phase Bernstein Filter for Equalized the Distorted Chrominance**, LAMBERT Academic Publishing, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้