การใช้ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์และวีเนอร์เพื่อปรับเรียบการแสดงผลข้อมูลสำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

นางสาวขวัญใจ นาชัยภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

การใช้ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์และวีเนอร์เพื่อปรับเรียบการแสดงผลข้อมูล
สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

_____

(ศ. น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ขวัญใจ นาชัยภูมิ : การใช้ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์และวีเนอร์เพื่อปรับเรียบการแสดงผลข้อมูลสำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม (THE USE OF SAVITZKY-GOLAY AND WIENER FILTERS FOR DISPLAY SMOOTHING OF SIAM PHOTON SOURCE)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 117 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับส่วนที่เป็นตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน (หรือ BPM) ในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม สัญญาณที่วัดได้จาก BPM ประสบกับการรบกวนค่อนข้างมาก และจากการปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าส่วนมากเป็นสัญญาณรบกวนขาวตามที่พบในกรณีของประเทศต่าง ๆ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาวิธีการกรองสัญญาณดังกล่าว เพื่อการประยุกต์เข้ากับการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ได้เปรียบเทียบสมรรถนะการกรองของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (หรือ AWF) และตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (หรือ SGF) ผลทดสอบยืนยันว่า AWF ให้ผลการกรองที่ดีกว่า เนื่องจากอัลกอริทึมของ AWF จำเป็นต้องทราบสัญญาณอ้างอิงที่แน่นอน จึงได้พัฒนาแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อป้อนให้กับ AWF 3 แนวทาง ได้แก่ การใช้ตัวกรองต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ธ ใช้ SGF และใช้การโหลดสัญญาณจากฐานข้อมูล ตัวกรองที่พัฒนาขึ้นถือเป็นตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก จากการทดสอบพบว่าให้ผลการกรองที่น่าพอใจ และนอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองที่เหมาะสมได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

KHUANJAI NACHAIYAPHUM : THE USE OF SAVITZKY-GOLAY AND WIENER FILTERS FOR DISPLAY SMOOTHING OF SIAM PHOTON SOURCE. THESIS ADVISOR : PROF. WNG.CMDR. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 117 PP.

NOISE/ADAPTIVE WIENER FILTER/BUTTERWORTH FILTER/SAVITZKY-GOLAY FILTER/SIAM PHOTON SOURCE

This research thesis studies the electron beam position monitoring device (BPM) which is installed as a part of the electron-storage ring of the Siam Photon Source. The output signal of the electron beam position monitoring device is usually very noisy, and from the literature survey the noise is white in most cases on various countries. This research thesis thus studies some noise filtering techniques which are aimed for an application to the output signals of the electron beam position monitoring device. Performance comparison studies have been conducted against the adaptive Wiener filter (AWF) and the Savitzky-Golay filter (SGF). The test results confirm that the adaptive Wiener filter provides better filtering performance than the Savitzky-Golay filter does. Since the adaptive Wiener filter algorithm requires the desired signal as a priori, three approaches to generate the desired signal for the adaptive Wiener filter have been developed. These are using the low-pass Butterworth filter, the Savitzky-Golay filter and the downloaded signals from the data-base. The developed filter can be regarded as a numerical filter the uses the adaptive Wiener filter as its main structure. The test results confirm a satisfactory filtering performance of the proposed numerical filter. In addition to this, the user

can select the approach for the desired signal generation as well as the suitable filter's parameters.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co-Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร รักใหม่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ นักวิจัยศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ รวมถึงวิศวกรประจำศูนย์ฯ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

ขอบคุณคุณอัญชุลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล ที่ให้ความช่วยเหลือ ดูแลเรื่องเอกสาร และอำนวยความสะดวกให้กับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย และขอบคุณ คุณภาณุพงษ์ เพชรเลิศ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมภาษา C รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยถามไถ่และให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่ออุทัย คุณแม่นิภาพรรณ น้องอภิชัย รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้ และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และขอขอบคุณคุณชรินทร์ สุขเจริญ ที่ดูแล และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยตลอดมาด้วยเช่นกัน

ขวัญใจ นาชัยภูมิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ง
สารบัญ.....จ
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญรูป.....ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....ฐ

บทที่

1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....6
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....8
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....8
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....9
2.1 บทนำ.....9
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม.....9
2.2.1 การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์.....9
2.2.2 การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองวีเนอร์.....10
2.3 สัญญาณรบกวน.....11
2.3.1 รูปแบบของสัญญาณรบกวน.....11
2.3.2 สัญญาณรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 สรุป....16
3 ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้....17
3.1 บทนำ....17
3.2 ตัวกรองวีเนอร์แบบธรรมดา....17
3.3 ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด....20
3.4 โครงสร้างของโปรแกรมตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้....22
4 ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์....26
4.1 บทนำ....26
4.2 หลักการทำงานของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์....26
4.3 โครงสร้างของโปรแกรมตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์....29
5 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้กับ ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์....38
5.1 บทนำ....38
5.2 สัญญาณทดสอบ....39
5.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้....40
5.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์....46
5.5 สรุป....52
6 ตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก....54
6.1 บทนำ....54
6.2 หลักการออกแบบตัวกรองเชิงเลขที่นำเสนอ....54
6.3 ขั้นตอนการทำงานของตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก....55
6.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรอง....59
6.5 การประยุกต์ใช้ตัวกรองที่นำเสนอกับการแสดงผล ในเครื่องกำเนิดแสงสยาม....73
6.6 สรุป....76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....77
7.1 สรุป.....77
7.2 ข้อเสนอแนะ.....78
รายการอ้างอิง.....80
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. หลักการทำงานตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ.....83
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก.....87
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้.....91
ภาคผนวก ง. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์.....95
ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....105
ภาคผนวก ฉ. คำแนะนำในการใช้โปรแกรม.....107
ประวัติผู้เขียน.....117

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

5.1 แสดงผลของค่า SNR สำหรับสัญญาณทดสอบทั้ง 3 รูปแบบ จากการปรับค่า μ ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้.....46

5.2 แสดงผลของค่า SNR สำหรับสัญญาณทดสอบทั้ง 3 รูปแบบ จากการปรับค่าพารามิเตอร์ M ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์.....52

6.1 ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....59

6.2 ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....64

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2
1.2 ตำแหน่งของ BPM รอบวงกักเก็บอิเล็กตรอน 3
1.3 แนวการวางขั้ววัดทั้ง 4 ขั้ว ของ BPM.....4
1.4 แผนภาพบล็อกหลักการดำเนินงานของ BPM.....5
1.5 สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดตำแหน่งลำอิเล็กตรอนหรือ BPM.....6
2.1 วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิในตัวต้านทาน 12
2.2 การวัดในโดเมนเวลาและการกระจายทางสถิติของสัญญาณรบกวนขาว 13
2.3 วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนช็อตในไดโอด 14
2.4 ความหนาแน่นสเปคตรัมของ pink noise.....14
3.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองวีเนอร์.....18
3.2 ตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยกระบวนวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัว 21
3.3 โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึม
ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ 23
3.4 แผนภูมิการทำงานของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ 24
4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (Steffen, 1986).....28
4.2 อัตราส่วนในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการปรับพารามิเตอร์ K และ M
(Steffen, 1986).....28
4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ 29
4.4 โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์.....30
4.5 แผนภูมิการทำงานของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ 31
4.6 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย mat_qr 32
4.7 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย filter.....34
4.8 คำสั่งใช้สำหรับการเลื่อนกลับเพื่อชดเชยสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุต.....35
4.9 คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสภาวะชั่วครู่ในช่วงแรก.....35
4.10 คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสภาวะชั่วครู่ในช่วงสุดท้าย.....36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 ตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจากการชดเชยด้วยฟังก์ชัน transient_onoff.....36
4.12 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย transient_onoff.....37
5.1 สัญญาณต้นแบบที่ไม่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนขาว.....39
5.2 สัญญาณทดสอบที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนขาว.....40
5.3 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (μ = 0.05).....41
5.4 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (μ = 0.01).....42
5.5 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (μ = 0.005).....43
5.6 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (μ = 0.001).....44
5.7 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (μ = 0.0005).....45
5.8 ผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (M = 0).....47
5.9 ผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (M = 2).....48
5.10 ผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (M = 4).....49
5.11 ผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (M = 6).....50
5.12 ผลการทดสอบตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ (M= 8).....51
6.1 โครงสร้างของ AWF ที่อาศัยตัวกรองแถบความถี่ผ่านในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....55
6.2 โครงสร้างของ AWF ที่ใช้วิธีโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล.....55
6.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของตัวกรองความถี่เชิงเลขที่นำเสนอ.....56
6.4 การเลือกแนวทางสำหรับสร้างสัญญาญอ้างอิง.....57
6.5 การเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....57
6.6 การเลือกใช้ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....58
6.7 การเลือกใช้การโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล.....58
6.8 การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้.....58
6.9 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 10 และ f_c = 20 Hz.....60
6.10 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 10 และ f_c = 30 Hz.....60
6.11 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 10 และ f_c = 40 Hz.....61
6.12 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 10 และ f_c = 50 Hz.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.13 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 4 และ f_c = 35 Hz....62
6.14 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 6 และ f_c = 35 Hz....62
6.15 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 8 และ f_c = 35 Hz....63
6.16 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 10 และ f_c = 35 Hz....63
6.17 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 2 และ K = 10....65
6.18 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 2 และ K = 20....65
6.19 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 2 และ K = 30....66
6.20 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 2 และ K = 40....66
6.21 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 2 และ K = 25....67
6.22 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 4 และ K = 25....67
6.23 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 6 และ K = 25....68
6.24 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 8 และ K = 25....68
6.25 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ N = 4 และ f_c = 35 Hz....69
6.26 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ M = 4 และ K = 25....70
6.27 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณเกาส์เซียน....71
6.28 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณเชิร์ป....71
6.29 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณขบวนพัลส์....72
6.30 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณซายน์....72
6.31 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 1 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน x....74
6.32 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 1 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน y....74
6.33 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 2 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน x....75
6.34 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 2 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน y....75
ก.1 ผลตอบสนองต่อขนาดของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธชนิดต่ำผ่าน....84
ก.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธชนิดต่ำผ่าน (linear plot)....85
ก.3 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ
กับตัวกรองชนิดอื่น ๆ....86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ฉ.1 การเริ่มต้นโปรแกรมทดสอบ....109
ฉ.2 เมื่อเลือกแนวทางที่นอกเหนือจากที่กำหนด....109
ฉ.3 เมื่อเลือกแนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง....110
ฉ.4 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ เมื่อ N = 4 และ fc = 25 Hz....111
ฉ.5 เมื่อเลือกแนวทางที่ 2 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง....112
ฉ.6 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์ เมื่อ M = 2 และ K = 10....112
ฉ.7 เมื่อเลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง....113
ฉ.8 การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวของ AWF....114
ฉ.9 ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง....115
ฉ.10 ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง....115
ฉ.11 ตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงที่สร้างจาก MATLAB....116

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

c_K	=	สัมประสิทธิ์ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์
$d(n)$	=	สัญญาณอ้างอิง
$\hat{d}(n)$	=	สัญญาณเอาต์พุตของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้
$e(n)$	=	สัญญาณความผิดพลาด
f_c	=	ความถี่คัทออฟ (Hz)
f_i	=	ข้อมูลต้นฉบับ
g_i	=	สัญญาณเอาต์พุตของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์
K_L	=	จุดข้อมูลฝั่งซ้ายของความกว้างวินโดว์
K_R	=	จุดข้อมูลฝั่งขวาของความกว้างวินโดว์
K	=	ความกว้างของวินโดว์ (จำนวนคี่)
M	=	อันดับของพหุนาม
N	=	อันดับของตัวกรอง
$\mathbf{A}$	=	เมตริกซ์ที่ออกแบบเพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสม
$\mathbf{R}_x$	=	เมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต
$\mathbf{r}_{dx}$	=	เวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิง
$\boldsymbol{a}$	=	เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของพหุนาม
$\boldsymbol{f}$	=	เวกเตอร์ข้อมูล
$h_{M,K}(L)$	=	ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์
$h_{M,K}(0)$	=	อัตราส่วนของการลดทอนสัญญาณรบกวน
$\mathbf{w}(n)$	=	เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้
$\mathbf{x}(n)$	=	เวกเตอร์อินพุตของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้
ω_c	=	ความถี่คัทออฟ (rad/s)
$\lambda_{\max}$	=	ค่าไอเก้นสูงสุดของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต
μ	=	ค่าเกณฑ์การปรับตัว
ξ	=	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

AWF	=	ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้
BF	=	ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ
BP	=	ตัวกรองแบบผ่านความถี่
MSE	=	Mean Squared Error
SGF	=	ตัวกรองสาวิทซกี-โกเลย์
SNR	=	อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (dB)