

การใช้ตัวกรองสวิตชิ่ง-โกลีย์และวีเนอร์เพื่อปรับเรียบการแสดงผลข้อมูล
สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

นางสาวขวัญใจ นาศัยภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2551

**THE USE OF SAVITZKY-GOLAY AND WIENER
FILTERS FOR DISPLAY SMOOTHING OF
SIAM PHOTON SOURCE**

Khuanjai Nachaiyaphum

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2008**

การใช้ตัวกรองสารพิษ-โลหะและวีเนอร์เพื่อปรับเทียบการแสดงผลข้อมูล
สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกมล)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตกร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ขวัญใจ นาชัยภูมิ : การใช้ตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์และวีเนอร์เพื่อปรับเรียบการแสดงผล
ข้อมูลสำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม (THE USE OF SAVITZKY-GOLAY AND WIENER
FILTERS FOR DISPLAY SMOOTHING OF SIAM PHOTON SOURCE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชาติ สุจิตจร, 117 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับส่วนที่เป็นตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน (หรือ BPM) ในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม สัญญาณที่วัดได้จาก BPM ประสบกับการรบกวนค่อนข้างมาก และจากการปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าส่วนมากเป็นสัญญาณรบกวนขาวตามที่พบในกรณีของประเทศต่าง ๆ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาวิธีการกรองสัญญาณดังกล่าว เพื่อการประยุกต์เข้ากับการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ได้เปรียบเทียบสมรรถนะการกรองของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (หรือ AWF) และตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์ (หรือ SGF) ผลทดสอบยืนยันว่า AWF ให้ผลการกรองที่ดีกว่า เนื่องจากอัลกอริทึมของ AWF จำเป็นต้องทราบสัญญาณอ้างอิงที่แน่นอน จึงได้พัฒนาแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อป้อนให้กับ AWF 3 แนวทาง ได้แก่ การใช้ตัวกรองต่ำผ่านบัตเตอร์เวิร์ท ใช้ SGF และใช้การ โหลดสัญญาณจากฐานข้อมูล ตัวกรองที่พัฒนาขึ้นถือเป็นตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก จากการทดสอบพบว่าให้ผลการกรองที่น่าพอใจ และนอกจากนี้ผู้วิจัยยังสามารถเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองที่เหมาะสมได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

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.สรวิชัย สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

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

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และแนะนำความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

ขอขอบคุณคุณอัญชุลี รักด่านกลาง และคุณภัทรวรรณ สิทธิกวินกุล ที่ให้ความช่วยเหลือ ดูแลเรื่องเอกสาร และอำนวยความสะดวกให้กับผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

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

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่ออุทัย คุณแม่นิภาพรรณ น้องอภิษฐ์ รวมถึงญาติพี่น้องของ ผู้วิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้ และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด และขอขอบคุณคุณชรินทร์ สุขเจริญ ที่ดูแล และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยตลอดมาด้วยเช่นกัน

ขวัญใจ นาชัยภูมิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	8
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 ปรัชญาบรรณกรรม.....	9
2.2.1 การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองสาขาวิชกี้-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	ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์.....	26
4.1	บทนำ.....	26
4.2	หลักการทํางานของตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์.....	26
4.3	โครงสร้างของโปรแกรมตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์.....	29
5	การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้กับ ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์.....	38
5.1	บทนำ.....	38
5.2	สัญญาณทดสอบ.....	39
5.3	ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้	40
5.4	ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสวาวิทซกี-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 ในเครื่องกำเนิดแสงสวาม.....	73
6.6	สรุป.....	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
7.1	สรุป.....	77
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	78
	รายการอ้างอิง.....	80
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. หลักการทำงานตัวกรองแบตเตอรี่เวิร์ธ.....	83
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์ แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก.....	87
	ภาคผนวก ค. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้.....	91
	ภาคผนวก ง. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาวิทชกี-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 ของตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์.....52
6.1	ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....59
6.2	ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดแสงสยาม2
1.2	ตำแหน่งของ BPM รอบวงกักเก็บอิเล็กตรอน3
1.3	แนวการวางขั้ววัดทั้ง 4 ขั้ว ของ BPM.....4
1.4	แผนภาพบล็อกหลักการดำเนินงานของ BPM.....5
1.5	สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดตำแหน่งลำอิเล็กตรอนหรือ BPM.....6
2.1	วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิในตัวต้านทาน12
2.2	การวัดในโดเมนเวลาและการกระจายทางสถิติของสัญญาณรบกวนขาว13
2.3	วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนช็อคในไดโอด14
2.4	ความหนาแน่นสเปกตรัมของ pink noise.....14
3.1	โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองวีเนอร์.....18
3.2	ตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยกระบวนการวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัว21
3.3	โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึม ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้23
3.4	แผนภูมิการทำงานของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้24
4.1	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิชกี-โกเลย์ (Steffen, 1986).....28
4.2	อัตราส่วนในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการปรับพารามิเตอร์ K และ M (Steffen, 1986).....28
4.3	ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิชกี-โกเลย์29
4.4	โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองสาขาวิชกี-โกเลย์.....30
4.5	แผนภูมิการทำงานของตัวกรองสาขาวิชกี-โกเลย์31
4.6	แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย mat_qr32
4.7	แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย filter.....34
4.8	คำสั่งใช้สำหรับการเลื่อนกลับเพื่อชดเชยสภาวะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุต.....35
4.9	คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสภาวะชั่วคราวในช่วงแรก.....35
4.10	คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสภาวะชั่วคราวในช่วงสุดท้าย.....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 ($\mu = 0.05$).....	41
5.4 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.01$).....	42
5.5 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.005$).....	43
5.6 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.001$).....	44
5.7 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.0005$).....	45
5.8 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ (M = 0).....	47
5.9 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ (M = 2).....	48
5.10 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ (M = 4).....	49
5.11 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ (M = 6).....	50
5.12 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ (M = 8).....	51
6.1 โครงสร้างของ AWF ที่อาศัยตัวกรองแถบความถี่ผ่านในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....	55
6.2 โครงสร้างของ AWF ที่ใช้วิธีโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล.....	55
6.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของตัวกรองความถี่เชิงเลขที่นำเสนอ.....	56
6.4 การเลือกแนวทางสำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิง.....	57
6.5 การเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....	57
6.6 การเลือกใช้ตัวกรองสวิตชิ่ง-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 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณเชอร์ป.....	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 ผลตอบสนองต่อขนาดของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทชนิดต่ำผ่าน.....	84
ก.2 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทชนิดต่ำผ่าน (linear plot).....	85
ก.3 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท กับตัวกรองชนิดอื่น ๆ.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ร.1	การเริ่มต้น โปรแกรมทดสอบ.....109
ร.2	เมื่อเลือกแนวทางที่นอกเหนือจากที่กำหนด.....109
ร.3	เมื่อเลือกแนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....110
ร.4	ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท เมื่อ $N = 4$ และ $f_c = 25$ Hz.....111
ร.5	เมื่อเลือกแนวทางที่ 2 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....112
ร.6	ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์ เมื่อ $M = 2$ และ $K = 10$112
ร.7	เมื่อเลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....113
ร.8	การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวของ AWF.....114
ร.9	ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....115
ร.10	ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง.....115
ร.11	ตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงที่สร้างจาก MATLAB.....116

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

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

บทที่ 1

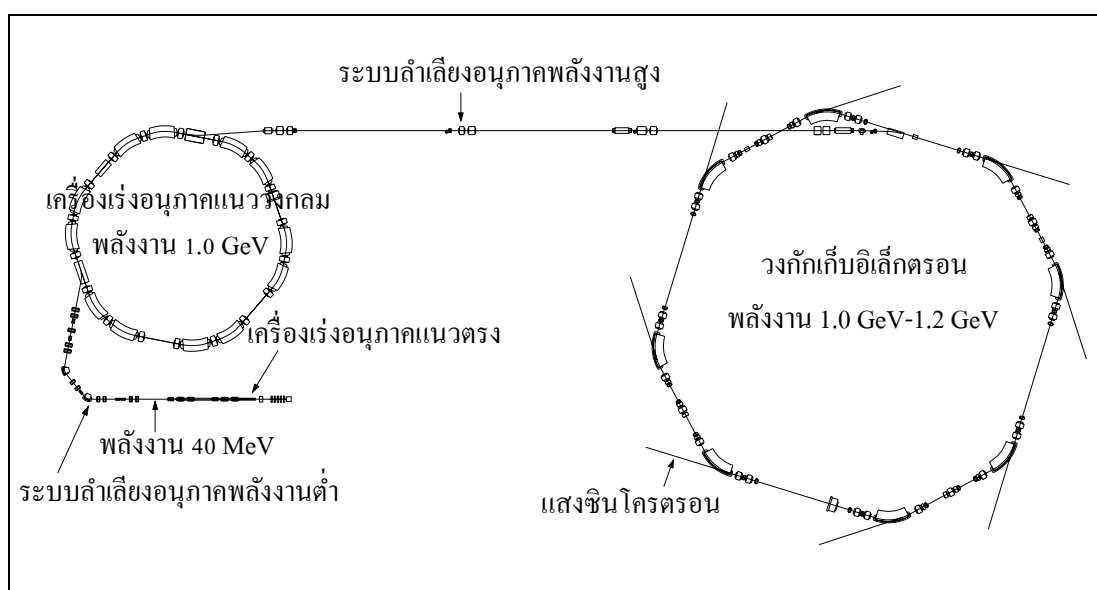
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam Photon Source) หรือเรียกโดยย่อว่า “SPS” เป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 1 GeV เครื่องเดียวในประเทศไทย (ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล, 2542) โดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ศช.) สถานที่ตั้งอยู่ที่บริเวณเทคโนธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งที่พลังงาน 1 GeV นี้ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 0.99999986 เท่าของความเร็วแสง (ศุภกร รักใหม่ และ ประพงษ์ คล้ายสุวรรณ, 2546) เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนนั้นให้แสงซึ่งมีลักษณะ และคุณสมบัติพิเศษที่เหนือกว่าแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่น ๆ หลายประการด้วยกัน คือมีความยาวคลื่นในช่วงที่กว้าง และมีค่าต่อเนื่อง (tunable light) ทำให้นักวิจัยสามารถเลือกใช้แสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับงานวิจัยแต่ละชนิดได้ มีความเข้มและความคมชัดสูง (high-brightness light) ทำให้ปริมาณแสงต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่ที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างที่ศึกษามีค่าสูง ช่วยลดระยะเวลาในการทำการทดลอง และเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจหาสารที่มีปริมาณน้อยมาก ๆ ได้ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถทำงานวิจัยที่ต้องการความละเอียดสูงได้เป็นอย่างดี มีทิศทางของสนามไฟฟ้าที่แน่นอน (polarized light) ทำให้สามารถกำหนดรูปแบบของการโพลาไรซ์ได้ รวมถึงเป็นแสงที่มีลักษณะพัลส์สั้น ๆ (short pulses) ในระดับหนึ่งในพันล้านของวินาที ทำให้สามารถนำแสงซินโครตรอนมาใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของสารที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent phenomena) ได้ และจากคุณสมบัติพิเศษดังที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ทำให้มีการนำแสงซินโครตรอนไปประยุกต์ใช้ในปัญหาต่าง ๆ รวมถึงการค้นคว้าวิจัยทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกแขนงอย่างแพร่หลาย

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยาม แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 (ศุภชัย ประวันตา, 2550) ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน (injection system) และวงกักเก็บอิเล็กตรอน (storage ring) อันดับแรกเริ่มจากการผลิตอนุภาคอิเล็กตรอนจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งผลิตอิเล็กตรอนโดยการให้ความร้อนกับแผ่นโลหะออกไซด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากพื้นผิวโลหะ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า thermionic emission และถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ 100 kV จากนั้น อิเล็กตรอนจะถูกทำให้เป็นกลุ่ม (bunched) ก่อนจะถูกส่งเข้าไปใน

เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (linear accelerator หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า Linac) ซึ่งจะเร่งอิเล็กตรอนโดยการใช้นาฬิกาไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟกำลังสูงที่มีความถี่เท่ากับ 2,856 MHz ให้มีพลังงานขึ้นไปถึง 40 MeV (40 ล้านอิเล็กตรอน โวลต์) จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปตามท่อสุญญากาศที่เรียกว่า ท่อลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ (low-energy beam transport line : LBT) เข้าไปในเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมที่เรียกว่า booster synchrotron ซึ่งจะเร่งอิเล็กตรอนโดยการใช้นาฬิกาไฟฟ้าจากคลื่นวิทยุ (radio frequency field หรือ RF field) ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 118 MHz จนมีพลังงานถึง 1 GeV จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปตามท่อลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง (high-energy beam transport line : HBT) เข้าไปในวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาดเส้นรอบวง 81.3 เมตร ซึ่งจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่อยู่ในท่อสุญญากาศความดันต่ำ ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนแปดเหลี่ยม อิเล็กตรอนที่วิ่งวนในวงจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาว่า แสงซินโครตรอน (synchrotron radiation)

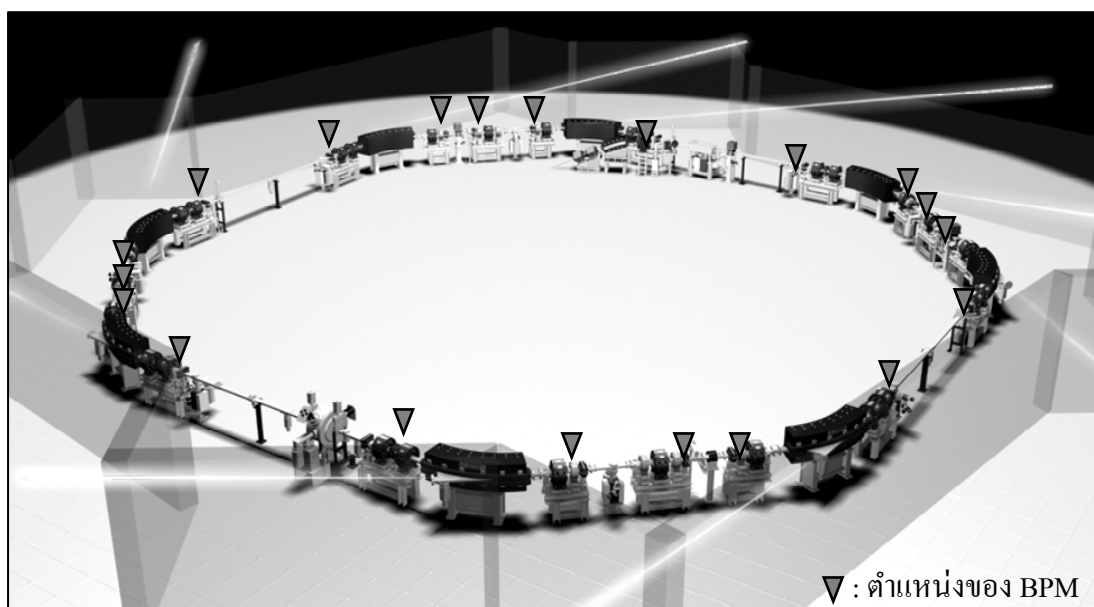


รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ปัจจุบันเครื่องกำเนิดแสงสยามได้ทำการปรับปรุงวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ให้สามารถเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน 1 GeV เป็นระดับพลังงาน 1.2 GeV เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์ ซึ่งในส่วนของวงกักเก็บอิเล็กตรอนนี้ จำเป็นต้องควบคุมลำอิเล็กตรอนให้มีวงโคจรที่เหมาะสมในแบบของการควบคุมป้อนกลับ ซึ่งต้องมีการตรวจวัด และแสดงผลพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ระบบการตรวจวัดและแสดงผลของ SPS ประสบกับการ

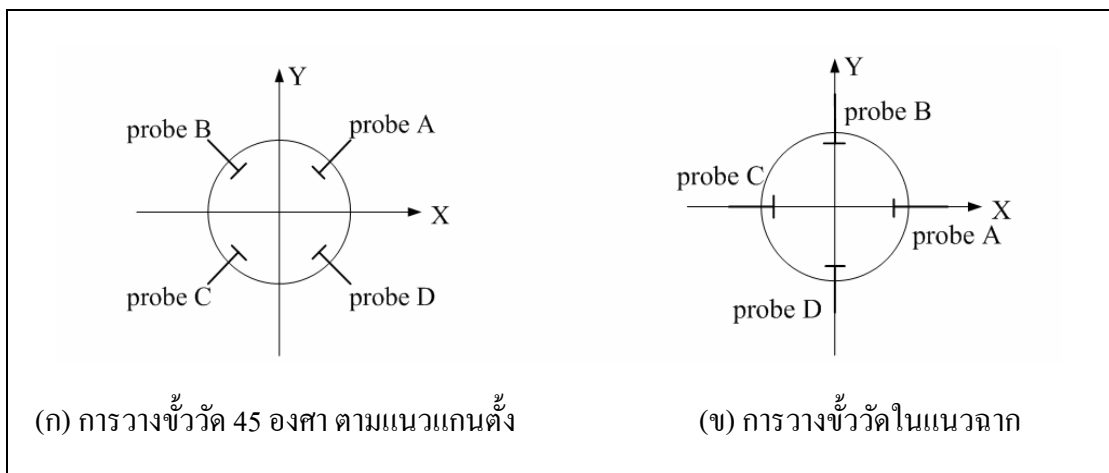
รบกวนและการแทรกสอดทางไฟฟ้าค่อนข้างมากเป็นปกติ ซึ่งสัญญาณรบกวนต่าง ๆ มีทั้งในย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูง ตลอดจนสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟและอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (ADC/DAC) การรบกวนเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสั้น โกวของลำอิเล็กตรอน ทำให้การแสดงผลอาจผิดพลาดได้ และไม่ชัดเจน (Schopper, 1993)

เมื่ออิเล็กตรอนถูกผลิตและเร่งจากเครื่องเร่งอนุภาคในแนวตรง ส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมเพื่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอนอีกครั้ง แล้วส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงและบรรจุเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอน กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปทุก 2 วินาที จำนวนอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งกระแสลำอิเล็กตรอนถึงระดับประมาณ 100 มิลลิแอมแปร์ ก็พร้อมให้บริการแสงซินโครตรอนได้ กระบวนการบรรจุอิเล็กตรอนใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที ลำอิเล็กตรอนจะมีช่วงชีวิตอยู่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนประมาณ 4-6 ชั่วโมง เมื่ออิเล็กตรอนลดจำนวนลงจะสามารถทำการบรรจุอิเล็กตรอนเพิ่มใหม่ได้อีก ทำให้สามารถให้บริการแสงซินโครตรอนได้ต่อเนื่องเป็นเวลานานนับสัปดาห์ ในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณที่ได้จากตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน (beam position monitor : BPM) ที่ติดตั้งรอบวงกักเก็บอิเล็กตรอนจำนวน 20 ตัว เพื่อศึกษาและติดตามการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ดังแสดงตำแหน่งการติดตั้งตามรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ตำแหน่งของ BPM รอบวงกักเก็บอิเล็กตรอน

BPM ประกอบด้วยขั้ววัดเพื่อจับตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน 4 ขั้วต่อกันแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 สัญญาณเอาต์พุตของ BPM ที่ได้จากขั้ววัดทั้ง 4 ขั้ว (A ถึง D) จะแสดงค่าออกมาเป็นแรงดัน (โวลต์) และสามารถคำนวณค่าตำแหน่งตามแนวแกน X และ Y ของลำอิเล็กตรอนในหน่วยมิลลิเมตร ได้จากสมการที่ (1-1) และสมการที่ (1-2) (Bergoz Instrumentation, 1996) สำหรับการวางขั้ววัด 45 องศา และจากสมการที่ (1-3) และสมการที่ (1-4) (Bergoz Instrumentation, 1996) สำหรับการวางขั้ววัด 90 องศา ตามแนวแกนตั้ง



รูปที่ 1.3 แนวการวางขั้ววัดทั้ง 4 ขั้ว ของ BPM

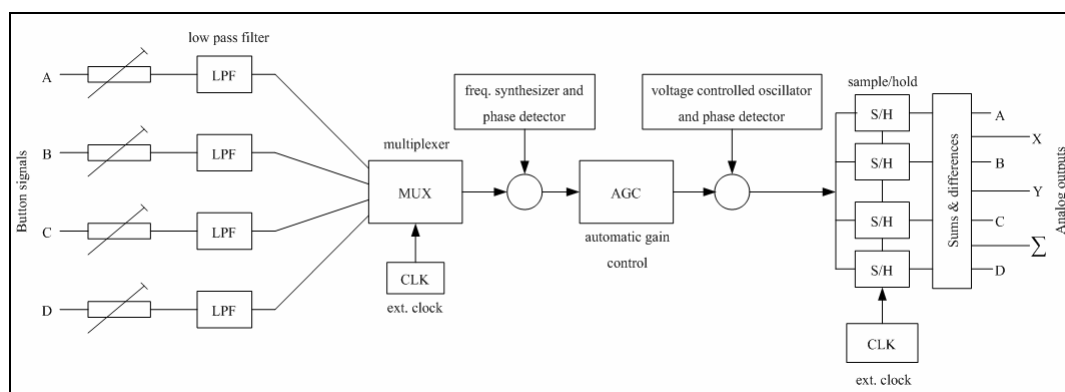
$$X = K_X \frac{V_A - V_B - V_C + V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1-1)$$

$$Y = K_Y \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1-2)$$

$$X = K_X \frac{V_A - V_C}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1-3)$$

$$Y = K_Y \frac{V_B - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1-4)$$

โดยที่ K_X, K_Y คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับเทียบ (calibration) ตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน
 V_A, V_B, V_C, V_D คือ สัญญาณเอาต์พุตของ BPM

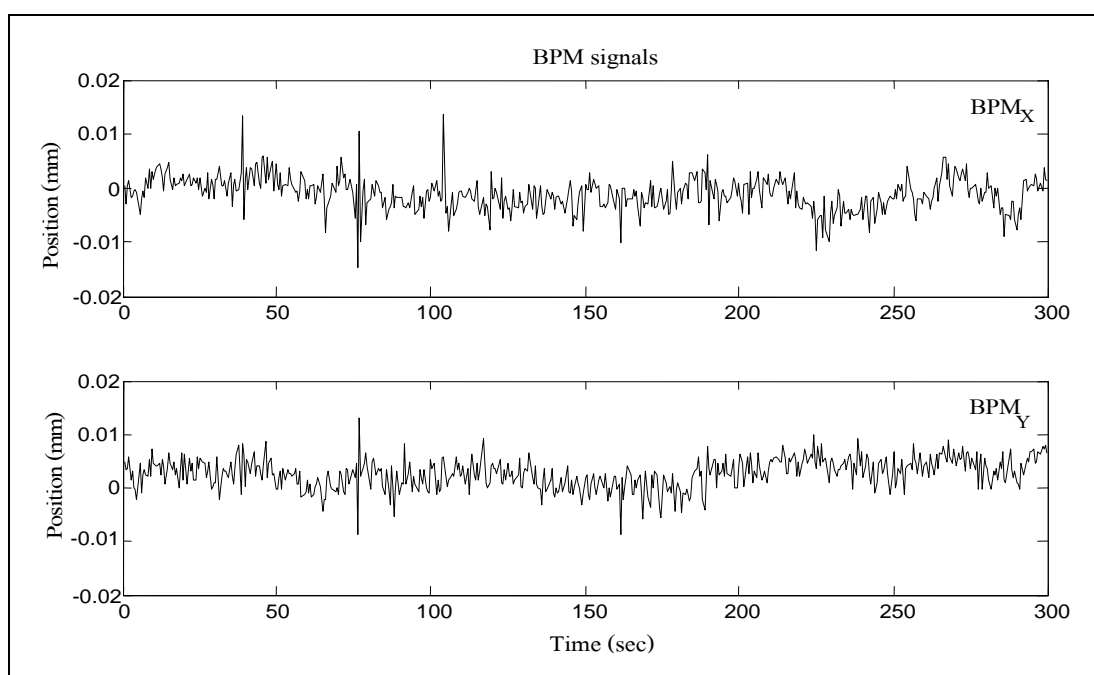


รูปที่ 1.4 แผนภาพบล็อกหลักการดำเนินงานของ BPM

จากรูปที่ 1.3 สัญญาณที่วัดได้จาก BPM ทั้ง 4 ขั้ว จะนำไปผ่านตัวกรองชนิดความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter : LPF) ก่อนที่จะถูกมัลติเพล็กซ์ (MUX) เป็นสัญญาณเดี่ยว เพื่อเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (superheterodyne) ชนิดที่ควบคุมความถี่ของคลื่นที่รับให้ต่ำ (แต่สูงกว่าความถี่เสียง) เพื่อให้เครื่องมีกำลังขยายมาก และแยกสัญญาณได้ดีขึ้น จากนั้นจะมีการแยกสัญญาณโดยการดีมัลติเพล็กซ์ ออกเป็น 4 สัญญาณที่แสดงค่าออกมาเป็นสัญญาณแอนะล็อก สัญญาณทั้ง 4 ที่ถูกรวมแบบมัลติเพล็กซ์ จะรักษาผลรวมให้คงที่โดยการควบคุมอัตราขยายอัตโนมัติ (automatic gain control : AGC) ซึ่งอาจแทนหลักการดำเนินงานด้วยแผนภาพบล็อกอย่างง่าย ๆ ดังรูปที่ 1.4 (Unser, 1996) โดยตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนได้มาจากการรวมกันของสัญญาณแอนะล็อก $X = A - B - C + D$ และ $Y = A + B - C - D$ สำหรับการวางขั้ววัด 45 องศา และ $X = A - C$ และ $Y = B - D$ สำหรับการวางขั้ววัดในแนวฉาก (Bergoz Instrumentation, 1996)

ตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน หรือ BPM ทำงานที่ความถี่สุ่มตัวอย่างสูงสุด 40 kHz หรือแต่ละขั้ววัดใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 25 μs ดังนั้น 4 ขั้วจะถูกสุ่มในเวลา 100 μs จากการสุ่มและแปลงสัญญาณแบบเรียงลำดับ ดังนั้นการสุ่มตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนที่ให้ผลดีที่สุด จะต้องสุ่มด้วยความถี่สูงสุดไม่เกิน 10 kHz (1/100 μs) แต่เนื่องด้วยผลของสัญญาณนาฬิกาภายใน BPM จะไปลดความถี่ในการสุ่มลง 4 เท่า ทำให้ความถี่ในการสุ่มเหลือเพียง 2.5 kHz เท่านั้น การใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก และการสุ่มตัวอย่างของตำแหน่งลำอิเล็กตรอนที่เร็วขึ้น จำเป็นต้องกำจัดความผิดพลาดของสัญญาณในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ซึ่งสรรถนะของ BPM จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่ใน

การสั่นสูงขึ้น และมีข้อสังเกต คือการเพิ่มขึ้นของสัญญาณรบกวนที่ออกมาในแนวแกน X หรือ Y จะมีความไม่ชัดเจนว่าเป็นสัญญาณรบกวนแบบใด โดยแสดงตัวอย่างสัญญาณที่วัดได้จาก BPM ดังรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าการระบุตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยการเกิดสัญญาณรบกวน การเสาะแสวงหาแนวทางเพื่อการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวน จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการใช้งาน SPS ซึ่งเป็นความสำคัญ และที่มาของปัญหาการวิจัยนี้



รูปที่ 1.5 สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องวัดตำแหน่งลำอิเล็กตรอนหรือ BPM

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงสยาม
- เพื่อเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนที่มีต่อการแสดงผลการวัดตำแหน่งลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม
- เพื่อพัฒนาวิธีการลดทอนสัญญาณรบกวน ที่เกิดในการแสดงผลการวัดตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- สัญญาณรบกวนเป็นแบบสุ่ม (random noise) และเป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- เปรียบเทียบสมรรถนะการปรับเรียบสัญญาณด้วยตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay filter) และตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (adaptive Wiener filter) แล้วเลือกใช้ตัวกรองที่ดีกว่า

- ออกแบบและพัฒนาตัวกรองเชิงเลข (numerical filter) ที่มีตัวกรองที่ดีกว่าเป็นโครงสร้างหลัก เพื่อใช้ประโยชน์กับสถานการณ์จริง โดยที่ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองได้ตามความเหมาะสม ซึ่งมีแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง (desired signal) 3 แนวทาง คือ ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth filter) ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ และการไหลคสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล

- พัฒนาอัลกอริทึมของตัวกรองด้วยโปรแกรม MATLAB และ C ที่จะมีกระบวนการทำงานกับข้อมูลเป็นกลุ่ม (batch) ที่ละช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งได้รับจาก BPMs

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ค้นคว้าวรรณกรรมถึงรูปแบบการรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงสยาม และศึกษาแนวทางการแก้ปัญหา

- ศึกษาการออกแบบและใช้งานตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์

- ศึกษาการออกแบบและใช้งานตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

- ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับเรียบสัญญาณด้วยตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์และตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ แล้วเลือกใช้ตัวกรองที่ดีกว่า

- ออกแบบและพัฒนาตัวกรองเชิงเลข (numerical filter) ที่มีตัวกรองที่ดีกว่าเป็นโครงสร้างหลัก เพื่อใช้ประโยชน์กับสถานการณ์จริง โดยมีแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง, $d(n)$, 3 แนวทางคือ ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ และการไหลคสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล

- พัฒนาอัลกอริทึมของตัวกรองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ C ซึ่งใช้กระบวนการการทำงานกับข้อมูลเป็นกลุ่มที่ละช่วงเวลาสั้น ๆ ข้อมูลดังกล่าวได้จาก BPMs

- ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมส่วนเชื่อมโยงกับผู้ใช้ขึ้นเป็นเครื่องมือการกรองสัญญาณรบกวน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้จากการค้นคว้าวรรณกรรมของงานวิจัยต่าง ๆ ตลอดจนเทคโนโลยีที่จะพัฒนาขึ้น เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการใช้งานเครื่องกำเนิดแสงสยาม เพื่อการค้นคว้าวิจัยทางวิทยาศาสตร์ของชาติ โดยมีศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติเป็นผู้ใช้ประโยชน์โดยตรง

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 5 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัว และหลักการทำงานของตัวกรอง

บทที่ 4 กล่าวถึงตัวกรองสาขาวิซชกี-โกเลย์ และหลักการทำงานของตัวกรอง

บทที่ 5 กล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้กับตัวกรองสาขาวิซชกี-โกเลย์ การออกแบบและอนุวัตตัวกรองด้วย MATLAB และ C การทดสอบสมรรถนะของตัวกรอง รวมถึงการอภิปรายและสรุปผลการทดสอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบตัวกรองความถี่เชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งมีแนวทางการสร้างสัญญาณอ้างอิง 3 แนวทาง คือใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ ตัวกรองสาขาวิซชกี-โกเลย์ และการไหลสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล เพื่อทดสอบกับสัญญาณทดสอบ และประยุกต์ใช้กับสัญญาณจาก BPMs ในเครื่องกำเนิดแสงสยาม พร้อมทั้งอภิปรายและสรุปผล

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. หลักการทำงานของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ

ภาคผนวก ข. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก

ภาคผนวก ค. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

ภาคผนวก ง. โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาขาวิซชกี-โกเลย์

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ภาคผนวก ฉ. คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทที่ 2 นี้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับเรียบสัญญาณโดยใช้ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ และตัวกรองวีเนอร์ในการปรับเรียบสัญญาณ โดยอาศัยตำราและฐานข้อมูลออนไลน์ที่เป็นแหล่งสะสมของวรรณกรรมและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น IEEE, ICEE, AIP และ ScienceDirect เป็นต้น รวมถึงการศึกษาถึงรูปแบบของสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ในระบบ และการค้นคว้าวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน หรือเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบคล้ายกันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากการศึกษาค้นคว้าเห็นว่ามีความจำเป็นที่จะหาแนวทางการแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนที่มีต่อการแสดงผลตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดแสงสยาม ซึ่งจะให้ผลดีต่อความถูกต้องแม่นยำในการแสดงผล แต่เนื่องจากการลดทอนสัญญาณรบกวนหรือปรับเรียบข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดค่าในระบบนั้นมีหลายวิธี โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกศึกษาตัวกรอง 2 ชนิด คือตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ (Savitzky-Golay filter) หรือเรียกโดยย่อว่า SGF และตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (adaptive Wiener filter) หรือเรียกโดยย่อว่า AWF เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของการกรองสัญญาณรบกวน แล้วเลือกใช้ตัวกรองที่ดีกว่าเป็นตัวกรองหลักให้กับตัวกรองเชิงเลขที่พัฒนาขึ้น จากผลการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ และตัวกรองวีเนอร์ในการปรับเรียบสัญญาณ หรือกรองสัญญาณรบกวน แยกได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2.1 การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์

ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ มีหลักการมาจากการปรับเรียบสัญญาณโดยอาศัยการประมาณแบบพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ยโดยการเลื่อนวินโดว์ (moving window averaging) (Savitzky and Golay, 1964) จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีงานวิจัยที่อาศัยตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ในการปรับเรียบสัญญาณ ดังปรากฏใน Ergin, Vilabo, Tchouassi, Greenel, and Thomas (2003) ได้เลือกใช้ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ ในการปรับเรียบสัญญาณที่ได้จาก Raman Spectroscopy ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจวัดระดับกลูโคสในร่างกาย

มนุษย์ จากการทดลองวิธีการปรับเรียงดังกล่าว คณะผู้วิจัยฯ พบว่าสามารถวิเคราะห์เพื่อหาระดับโมเลกุลของกลูโคสจากการเพิ่มขึ้นของค่า SNR (signal-to-noise ratio) งานวิจัยของ Nakajima, Juzoji, Zhao, and Hamamoto (2003) ได้เสนอวิธีการใช้ตัวกรองชนิดสวาทซกี-โกเลีย ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (electrocardiogram : ECG) ซึ่งสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ (Gaussian noise) และอุปกรณ์ต่าง ๆ (impulse noise) ซึ่งตัวกรองชนิดนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวกรอง FIR เฉลี่ยมาตรฐาน สำหรับสัญญาณ ECG ที่ถูกรบกวนที่ความถี่ต่างกัน งานวิจัยของ Bakkali (2007) ได้นำเสนอวิธีการใช้ตัวกรองสวาทซกี-โกเลีย ในการหาพื้นผิวทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีการทับถมของฟอสเฟต ซึ่งวิเคราะห์จากบริเวณที่มีการทำเหมืองในโมร็อกโก โดยกล่าวถึงแผนภาพทางธรณีวิทยาได้แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติจากการทับถมของฟอสเฟตที่ไม่ชัดเจน วิธีการกรองแบบสวาทซกี-โกเลีย เอาต์พุตที่ได้จะทำให้จุดที่มีการทับถมของฟอสเฟตหรือระดับการรบกวนมีความชัดเจนขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกรอง และลดการรบกวนสำหรับแผนภาพทางธรณีแบบดั้งเดิม จะเห็นว่าวิธีการนี้จะไม่ทำให้รูปคลื่น (wave shape) ของสัญญาณตั้งต้นเปลี่ยนแปลงไป และงานวิจัยของ Guiñón, Ortega, García-Antón, and Pérez-Herranz (2007) ได้ประยุกต์ใช้ตัวกรองสวาทซกี-โกเลีย ในการปรับเรียงข้อมูลที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (photochemical) และเคมีไฟฟ้า (electrochemical) ของเครื่องปฏิกรณ์ จากผลการปรับเรียงสัญญาณแสดงให้เห็นว่า ตัวกรองสวาทซกี-โกเลียให้ความผิดพลาดที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปรับเรียงด้วยวิธีเลื่อนวินโดว์

2.2.2 การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองวีเนอร์

ตัวกรองวีเนอร์โดยทั่วไปเรียกว่าตัวกรองที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการลดสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม จากการปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำตัวกรองดังกล่าวไปใช้อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น Musznicki, Schanen, Granjon, and Chrzan (2006) ได้นำเสนอวิธีการใช้ตัวกรองวีเนอร์ในการประมาณค่าการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference) ที่เกิดจากตัวแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งตัวกรองวีเนอร์ให้การประมาณที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยของ Nikolaev, Nikolov, Gotchev, and Egiavarian (2000) ได้ประยุกต์ใช้เวฟเล็ต (wavelet) เข้ากับตัวกรองวีเนอร์ในการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (ECG signals) และงานวิจัยของ Chen, Benesty, and Huang (2006) ได้นำเสนอวิธีการใช้ตัวกรองวีเนอร์ในการลดสัญญาณรบกวนของเสียงพูดจากเครื่องขยายเสียง โดยการเปรียบเทียบค่า SNR ก่อนและหลังการกรอง ซึ่งค่า SNR ภายหลังจากการกรองจะมีค่าสูงกว่า จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้น โดยทั่วไปแล้วการออกแบบตัวกรองวีเนอร์ ต้องทราบความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (autocorrelation) และสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) ซึ่งยาก

ต่อการคำนวณ จึงได้มีผู้พัฒนาตัวกรองแบบปรับตัวได้ (adaptive filter) ที่มีสูตรการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อนขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการปรับทศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (least mean square algorithm : LMS) ซึ่งจากการปรับทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีงานวิจัยที่ใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ ดังปรากฏใน Akhaee, Ameri, and Marvasti (2005) ได้ประยุกต์ใช้เวฟเล็ตเข้ากับตัวกรองวีเนอร์ ที่อาศัยวิธี LMS ในการปรับตัวสำหรับการลดสัญญาณรบกวนในเสียงพูด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวให้ผลการกรองที่น่าพอใจ งานวิจัยของ Wang and Milstien (1996) ได้ประยุกต์ใช้วิธี LMS ในการกำจัดสัญญาณรบกวนแถบความถี่แคบ (narrowband) ในตำแหน่งของการร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบเข้ารหัส (code-division multiple-access : CDMA) ที่มีการซ้อนทับ จากการทดสอบที่ได้พบว่าวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนดีกว่าตัวกรองวีเนอร์แบบดั้งเดิม งานวิจัยของ Christiansen, Chabries, and Andersen (1985) ได้ประยุกต์ใช้วิธี LMS ในการกำจัดสัญญาณรบกวนในเสียงพูด ซึ่งการกรองสัญญาณรบกวนจะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่เหมาะสม และงานวิจัยของ Sun and Shu (2006) ได้ใช้วิธี LMS ในการควบคุมการสั่นสะเทือนของยานพาหนะที่มีแบบจำลองแบบ 2 ระดับขึ้นความเสรี (two-degree-of-freedom) จากการจำลองผลพบว่า การควบคุมด้วยวิธี LMS มีประสิทธิภาพ และง่ายต่อการควบคุม

2.3 สัญญาณรบกวน

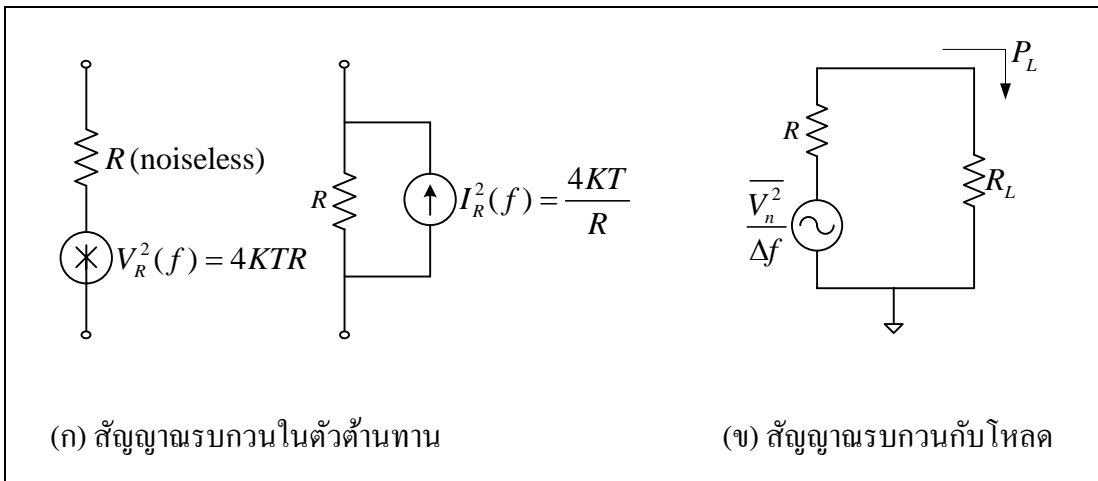
สัญญาณรบกวน (noise) เป็นสัญญาณไม่พึงประสงค์ ที่ผสมมากับสัญญาณข้อมูล และเป็นปรากฏการณ์แบบสุ่ม (random) ทำให้เราไม่สามารถบอกขนาดของสัญญาณรบกวน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งได้แน่นอน แต่สามารถบอกกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนได้โดยวิธีการทางสถิติ สัญญาณรบกวนเป็นสาเหตุที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องรับ มีค่าแตกต่างไปจากที่ควรจะเป็น และเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงยากที่สุด เนื่องจากเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน

2.3.1 รูปแบบของสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น สภาพแวดล้อม ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าหรืออุณหภูมิ โดยแบ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ สัญญาณรบกวนช็อค และสัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์

1) สัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal noise) เกิดจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มตามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวนำ ที่มีความต้านทานภายในวงจรดังรูปที่ 2.1 (ก) โดยความหนาแน่นสเปกตรัม (power spectrum density : PSD) ของสัญญาณรบกวนนี้มีลักษณะที่ราบเรียบหรือกล่าวได้ว่าทุก ๆ ฮาร์โมนิกของสัญญาณรบกวนจะมีค่าพลังงานเท่ากันอย่างต่อเนื่องตลอดย่าน

สเปกตรัม บางครั้งเรียกสัญญาณรบกวนประเภทนี้เรียกว่าสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เราเกี่ยวข้องมากที่สุด เนื่องจากสัญญาณรบกวนประเภทอื่น ๆ จะมีค่า PSD ลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น แต่สัญญาณรบกวนขาว จะมีค่า PSD คงที่ตลอดทุกช่วงความถี่ โดยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิมีความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function : PDF) กระจายอย่างปกติ (normal distribution) หรือกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณรบกวน (mean square value) หาได้จากสมการที่ (2-1) และมีกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่เกิดกับโหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) เมื่อความต้านทานที่โหลด (R_L) มีค่าเท่ากับความต้านทาน (R) ในระบบ สัญญาณรบกวนที่โหลดจะมีกำลังงานสูงสุด ดังสมการที่ (2-2)



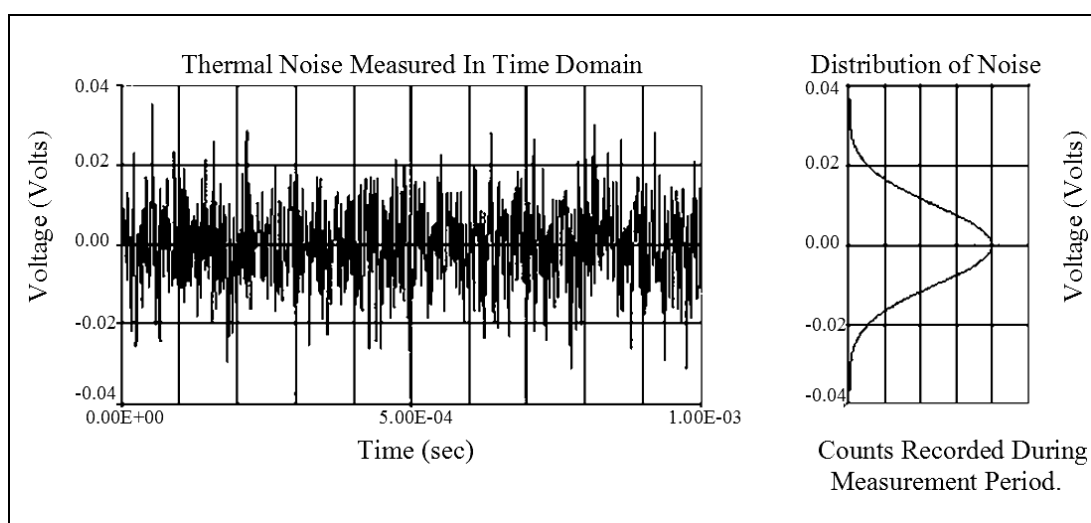
รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิในตัวต้านทาน

$$\overline{v_n^2} = 4KTR \cdot \Delta f \tag{2-1}$$

$$P_n = \frac{1}{4R} \cdot \overline{v_n^2} \cdot B_n = KTB_n \tag{2-2}$$

โดยที่ $\overline{v_n^2}$ คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณรบกวน มีหน่วยเป็น (โวลต์)²
 P_n คือ ค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ (วัตต์)

K	คือ ค่าคงที่โบลทซ์แมน = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
R	คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
Δf	คือ ช่วงความถี่ที่สนใจ (เฮิรตซ์)
B_n	คือ ค่าแบนด์วิดท์สัญญาณรบกวน

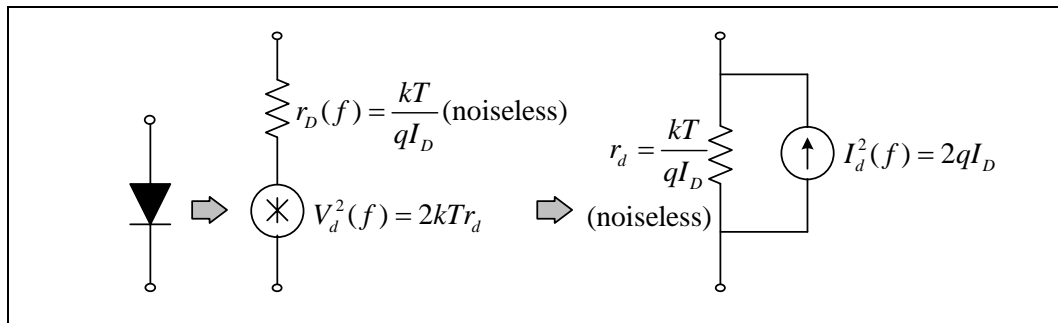


รูปที่ 2.2 การวัดในโดเมนเวลาและการกระจายทางสถิติของสัญญาณรบกวนขาว

2) สัญญาณรบกวนช็อต (shot noise) เกิดจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของพาหะไฟฟ้าข้ามรอยต่อ p-n เมื่อมีกระแสไฟฟ้าตรงไหลในไดโอดและทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนขาวเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องจากอุณหภูมิ ดังแสดงวงจรมุมูลในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีความหนาแน่นสเปกตรัม ดังสมการที่ (2-2)

$$\overline{i^2} = 2qI_D \quad (2-2)$$

โดยที่ q คือ ประจุอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูโลมป์
 I_D คือ กระแสไฟฟ้าตรงที่ไหลผ่านไดโอด (แอมแปร์)

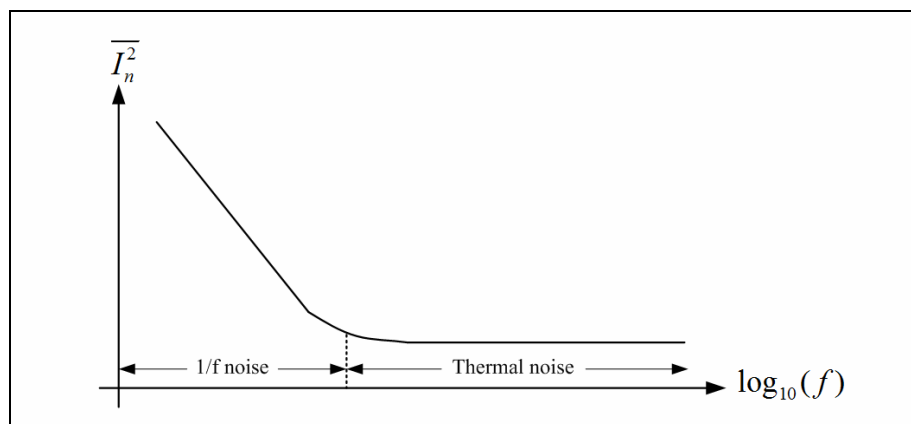


รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนช็อตในไดโอด

3) สัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์ (flicker noise) หรือสัญญาณรบกวน 1/f (1/f noise) เกิดจากการติดกับ (traps) ของพาหะนำไฟฟ้า จากความไม่บริสุทธิ์ (contamination) และความไม่สมบูรณ์ (defects) ในสารกึ่งตัวนำ และ PSD ของสัญญาณรบกวนจะเป็นเส้นกราฟที่มีความชัน 1/f ซึ่งจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า pink noise โดย PSD ของสัญญาณรบกวนนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพในกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (2-3) และกราฟรูปที่ 2.4

$$\frac{\overline{i^2}}{\Delta f} = K_1 \frac{I^a}{f^b} \tag{2-3}$$

เมื่อ $a \approx 0.5 - 2$ และ $b \approx 1$ และ K_1 คือ ค่าคงที่ในแต่ละอุปกรณ์ (ได้จากการทดลอง)



รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นสเปกตรัมของ pink noise

2.3.2 สัญญาณรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีความซับซ้อนมาก การใช้งานมีความจำเป็นต้องควบคุมลำอิเล็กตรอนให้มีวงโคจรที่เหมาะสมในแบบของการควบคุมป้อนกลับ ซึ่งต้องมีการตรวจวัดและแสดงผลพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ระบบการตรวจวัดและแสดงผลของ SPS จะประสบความสำเร็จกับระบบก่อนข้างมากเป็นปกติ สัญญาณรบกวนต่าง ๆ มีทั้งย่านความถี่ต่ำ ย่านความถี่สูง ตลอดจนสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟและอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (ADC/DAC) การรบกวนเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสั่นไหวของลำอิเล็กตรอน การแสดงผลบางส่วนอาจผิดพลาด และไม่ชัดเจน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวเฟืองตำแหน่งลำอิเล็กตรอน (beam position monitor : BPM) จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการรบกวนในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน หรือเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบคล้ายกัน ดังปรากฏใน Johnston, Faust, Pierce, and Stangenes (1967) ได้ศึกษาเรื่องการวัดตำแหน่งวงโคจรของลำอิเล็กตรอนที่ความถี่ต่ำ มีการตั้งสมมติฐานว่าสัญญาณรบกวนที่เคลื่อนที่แบบสุ่ม (random noise) ซึ่งวัดได้จาก BPM ทั้งสัญญาณรบกวนจากวงจรขยาย และสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ ต่างก็เป็นสัญญาณรบกวนขาว งานวิจัยของ Spear (2005) ได้กล่าวถึงความสำคัญของสัญญาณรบกวนซ็อก ที่เกิดจากรอยต่อ p-n ของไดโอดสำหรับการวัดค่ารังสีเอ็กซ์ โดยที่สัญญาณรบกวนซ็อก เป็นสัญญาณรบกวนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งก็คือสัญญาณรบกวนขาวที่มีความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังคงที่ งานวิจัยของ Spear and Russo (1996) ได้กล่าวไว้ว่าสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ เป็นสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าที่มีต้นกำเนิดมาจากความต้านทาน (R_f) ในวงจรออปแอมป์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของเครื่องตรวจวัดการเบนของลำอิเล็กตรอน งานวิจัยของ Ellison, Newberger, and Shih (1991) ได้ศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวน RF phase ของลำอิเล็กตรอน ซึ่งมีสัญญาณรบกวน 3 ชนิดคือ สัญญาณรบกวนขาว สัญญาณรบกวนความถี่ต่ำผ่าน (low pass noise) และรอยบากในสัญญาณ (notched noise) พบว่ามีสัญญาณรบกวนเกิดจากสัญญาณรบกวนขาวมากกว่าสัญญาณรบกวนอีก 2 ชนิด และ Schopper (1993) ได้กล่าวถึง Schottky noise หรือสัญญาณรบกวนซ็อกที่เกิดจากการสั่นของลำอิเล็กตรอน ซึ่งทั้งหมดได้รายงานตรงกันว่าสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่คือสัญญาณรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิ และมีบางส่วนมาจากสัญญาณรบกวนซ็อก ซึ่งทั้งสองประเภทจัดเป็นสัญญาณรบกวนขาว

2.4 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้รายงานผลการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกรอง
สทวิซซกี-โกเลย์ และตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ในการปรับเรียบสัญญาณที่ได้จากการวัด
สัญญาณรบกวนรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวเฟืองสั่นเกตตำแหน่งลำ
อิเล็กตรอน โดยอาศัยฐานข้อมูลต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลการค้นคว้าวรรณกรรมทำให้ทราบ
แนวทางวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ใช้ และผลการดำเนินงานจากคณະนักวิจัยต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตถึง
ปัจจุบัน ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

บทที่ 3

ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

3.1 บทนำ

การกำหนดเรียกอัลกอริทึมที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับแต่งช่องสัญญาณว่าตัวกรอง (filter) นั้นมาจากแนวคิดของทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณของ Norbert Wiener (1894-1964) เมื่ออนุวัตอัลกอริทึมด้วยวงจรเชิงเส้น พบว่าวงจรที่สร้างขึ้นนั้นทำหน้าที่แยกสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสัญญาณรบกวนขาว ดังนั้นรูปแบบของการทำงานของอัลกอริทึมนี้จะคล้ายคลึงกับตัวกรองแอนะล็อกที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่ที่ต้องการออกจากสัญญาณความถี่อื่น ๆ ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรู้สึกในเชิงเทียบเคียงกันของคำว่าตัวกรอง และอัลกอริทึมวีเนอร์ จึงเรียกอัลกอริทึมของวีเนอร์ว่าเป็น “ตัวกรอง” ซึ่งต่อมาภายหลังก็ได้มีการกำหนดชื่ออัลกอริทึมของวีเนอร์ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดในการกรองสัญญาณ (optimum filter) ว่าเป็นตัวกรองวีเนอร์ ในการศึกษาวิจัยนี้เราจะพิจารณาตัวกรองสัญญาณแบบเอฟไออาร์ (FIR) เท่านั้น เพื่อความเชื่อมั่นเกี่ยวกับเสถียรภาพของตัวกรองสัญญาณ เนื่องจากตัวกรองสัญญาณแบบ FIR มีเฉพาะค่าซีโรที่สามารถปรับค่าได้ อย่งไรก็ตามเสถียรภาพของตัวกรองสัญญาณยังขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมซึ่งใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

3.2 ตัวกรองวีเนอร์แบบธรรมดา

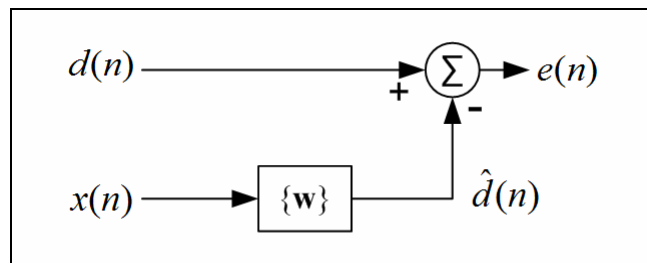
ในขั้นแรกนี้จะได้อธิบายถึงตัวกรองวีเนอร์แบบธรรมดา ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 3.1 สัญญาณ $\hat{d}(n)$ ในแผนภาพดังกล่าวเป็นเอาต์พุตของตัวกรอง ซึ่งแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-1)

$$\hat{d}(n) = \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l) \quad (3-1)$$

และหาค่าความผิดพลาดได้ดังสมการที่ (3-2)

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) = d(n) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(n) \quad (3-2)$$

โดยที่	$\mathbf{x}(n)$	คือ สัญญาณอินพุต (input signal vector)
	$d(n)$	คือ สัญญาณอ้างอิง (desired signal)
	$\hat{d}(n)$	คือ สัญญาณเอาต์พุต (output signal)
	$e(n)$	คือ สัญญาณความผิดพลาด (error signal)
	\mathbf{w}	คือ เวกเตอร์ค่าน้ำหนัก (weighting vector)
เมื่อ	$\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-(p-1))]$	
	$\mathbf{w} = [w(0) \ w(1) \ \dots \ w(p-1)]$	



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองวีเนอร์

ในกรณีการกรองของตัวกรองวีเนอร์ $x(n) = s(n) + r(n)$ และ $d(n) = s(n)$ โดยที่ $s(n)$ คือสัญญาณที่ไม่มีการรบกวน และ $r(n)$ คือสัญญาณรบกวน ในที่นี้คือสัญญาณรบกวนขาว จุดประสงค์ของการใช้ตัวกรอง FIR ดังรูปที่ 3.1 ก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งมีตัววัดปริมาณค่าความผิดพลาด ที่เรียกว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (cost function) หรือ ξ ดังแสดงในสมการที่ (3-3)

$$\xi = E\{|e(n)|^2\} = E\{|d(n) - \mathbf{w}^T \mathbf{x}(n)|^2\}$$

$$\xi = E[d^2(n)] - 2\mathbf{w}^T E[\mathbf{x}(n)d(n)] + \mathbf{w}^T E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)] \mathbf{w}$$

$$= \mathbf{r}_{dd}(0) - 2\mathbf{w}^T \mathbf{r}_{dx} + \mathbf{w}^T \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad (3-3)$$

โดยที่ $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)]$ คือ เมตริกซ์สหสัมพันธ์ (correlation matrix) ของสัญญาณอินพุต

$\mathbf{r}_{dx} = E[d(n)\mathbf{x}(n)]$ คือ เวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation vector) ของสัญญาณ
 อินพุต, $\mathbf{x}(n)$ และสัญญาณอ้างอิง, $d(n)$
 ξ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 \mathbf{r}_{dd} คือ เวกเตอร์สหสัมพันธ์ของสัญญาณอ้างอิง

จากสมการที่ (3-3) เมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ทำได้โดยการหาอนุพันธ์ของ ξ เทียบกับ \mathbf{w} และให้เท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (3-4) และสามารถจัดสมการในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ดังสมการที่ (3-5) และ (3-6)

$$\nabla(\xi) = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{w}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}} (\mathbf{r}_{dd}(0) - 2\mathbf{w}^T \mathbf{r}_{dx} + \mathbf{w}^T \mathbf{R}_x \mathbf{w}) = 0 \quad (3-4)$$

$$0 - 2\mathbf{r}_{dx} + 2\mathbf{w}^T \mathbf{R}_x = 0$$

$$\mathbf{R}_x \mathbf{w} = \mathbf{r}_{dx} \quad (3-5)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{r}_{dx} \quad (3-6)$$

เมื่อ $\mathbf{R}_x = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)] = \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-(p-1)) \end{bmatrix} [x(n) \quad x(n-1) \quad \cdots \quad x(n-(p-1))]$

$$= \begin{bmatrix} r_{xx}(0) & r_{xx}(1) & r_{xx}(2) & \cdots & r_{xx}(p-1) \\ r_{xx}(1) & r_{xx}(0) & r_{xx}(1) & \cdots & r_{xx}(p-2) \\ r_{xx}(2) & r_{xx}(1) & r_{xx}(0) & \cdots & r_{xx}(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}(p-1) & r_{xx}(p-2) & r_{xx}(p-3) & \cdots & r_{xx}(0) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{r}_{dx} = E[d(n)\mathbf{x}(n)] = \begin{bmatrix} d(n)x(n) \\ d(n)x(n-1) \\ d(n)x(n-2) \\ \vdots \\ d(n)x(n-(p-1)) \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3-6) สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ ได้ดังนี้

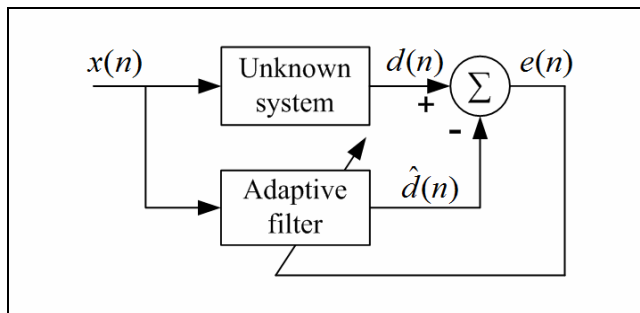
$$\begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ w(2) \\ \vdots \\ w(p-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx}(0) & r_{xx}(1) & r_{xx}(2) & \cdots & r_{xx}(p-1) \\ r_{xx}(1) & r_{xx}(0) & r_{xx}(1) & \cdots & r_{xx}(p-2) \\ r_{xx}(2) & r_{xx}(1) & r_{xx}(0) & \cdots & r_{xx}(p-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{xx}(p-1) & r_{xx}(p-2) & r_{xx}(p-3) & \cdots & r_{xx}(0) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{dx}(0) \\ r_{dx}(1) \\ r_{dx}(2) \\ \vdots \\ r_{dx}(p-1) \end{bmatrix}$$

จะเห็นว่าข้อจำกัดของตัวกรองวีเนอร์คือ ต้องการรู้เมตริกซ์สหสัมพันธ์ (\mathbf{R}_x) และเวกเตอร์สหสัมพันธ์ ไชวี (\mathbf{r}_{dx}) ใช้เวลาในการคำนวณผลนานเนื่องจากต้องหาอินเวอร์สของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ อีกทั้งค่าเวกเตอร์สหสัมพันธ์ ไชวีจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจะต้องมีการคำนวณใหม่เรื่อย ๆ และใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ที่สามารถใช้กับสัญญาณอินพุตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ และใช้เวลาในการคำนวณรวดเร็ว ดังที่จะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

3.3 ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด

การใช้ตัวกรองแบบวีเนอร์เป็นการใช้ในสภาวะที่ไม่มีการผันแปรตามเวลา และต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติความแปรปรวนร่วม (covariance) ซึ่งเป็นค่าอันดับสอง ซึ่งแม้จะสามารถคำนวณค่าที่ถูกต้องได้ แต่การคำนวณทำได้ยาก ในขณะเดียวกันได้มีการพัฒนาตัวกรองแบบปรับตัวได้ (adaptive filters) หลายวิธีเช่น least-mean-square (LMS) algorithm โดย Widrow and Hoff (1959) gradient adaptive lattice (GAL) algorithm โดย Griffiths (1977-1978) recursive-least-square (RLS) algorithm โดย Kuo and Morgan (1996) และ QR decomposition โดย Haykin (1986) เป็นต้น ข้อได้เปรียบของตัวกรองแบบปรับตัวได้ประการหนึ่งคือ มีสูตรการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อนและไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณอินพุต ที่สำคัญค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะถูกปรับโดยอัตโนมัติให้เหมาะสมเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสัญญาณอินพุต ตัวกรองแบบปรับตัวได้ถูกนำไปใช้งานในสภาวะที่ไม่สามารถใช้ตัวกรองแบบธรรมดาได้หรือใช้ได้ไม่ดีนัก เช่น เมื่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ต้องการอยู่ในย่านความถี่เดียวกัน หรือเมื่อไม่รู้ลักษณะที่

แน่นอนของสัญญาณที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการนำตัวกรองแบบปรับตัวที่ใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (LMS algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.2 ตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยกระบวนการวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัว

ตัวกรองวีเนอร์ที่อาศัยกระบวนการวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการปรับตัวดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นวิธีการที่ง่าย การคำนวณไม่ซับซ้อน มีเวลาการลู่เข้า (convergence time) ที่เร็ว และอาศัยค่าสัญญาณผิดพลาด, $e(n)$, มาคำนวณเพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณ โดยใช้เงื่อนไขลดค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (mean square error : MSE) ให้มีค่าต่ำสุด ซึ่งจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของตัวกรองมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงมากที่สุดด้วย เมื่อต้องการหาค่า ξ ที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับ \mathbf{w} ทำได้โดยหา $\frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{w}}$ ดังสมการที่ (3-7)

$$\nabla(n) = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{w}} = -2E[e(n)\mathbf{x}(n)] \tag{3-7}$$

การค้นหาแบบสตีพเพสเดสเซนต์ (steepest-descent method) ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองดังสมการที่ (3-8) (Feuer and Weinstein, 1985)

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{1}{2} \mu \nabla(n) \tag{3-8}$$

จากสมการที่ (3-8) จะเห็นได้ว่าค่า $\mathbf{w}(n+1)$ จะปรับค่าเป็นสัดส่วนตามค่าลบของค่าเกรเดียนต์ ค่า μ ในสมการคือ ค่าเกณฑ์การปรับตัว (adaptation gain) หรือขนาดขั้น (step size) เป็นค่าคงที่ ที่มีผลต่อเสถียรภาพ และอัตราการลู่เข้าของอัลกอริทึม ในการประมาณค่าเกรเดียนต์, $\nabla(n)$, สำหรับระเบียบวิธีของ LMS ประมาณโดยการกำหนดให้ MSE (ξ) มีค่าเท่ากับ $e^2(n)$ ซึ่งแสดงค่าประมาณของเกรเดียนต์ที่ได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\nabla(n) \cong \frac{\partial [e^2(n)]}{\partial \mathbf{w}} = -2e(n)\mathbf{x}(n) \quad (3-9)$$

และเมื่อแทนค่าประมาณของเกรเดียนต์ที่เวลาใด ๆ ดังสมการที่ (3-9) ลงในสมการที่ (3-8) จะได้สมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัวได้ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความผิดพลาดในรอบใหม่ (update equation) ของ LMS อัลกอริทึมดังแสดงในสมการที่ (3-10) (Widrow-Hofit LMS algorithm)

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (3-10)$$

ในการกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ค่าน้ำหนัก (weighting vector) เราสามารถกำหนดเป็นค่าใด ๆ ส่วนค่าที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมคือ ค่า μ เนื่องจากมีผลต่อเสถียรภาพและความเร็วในการลู่เข้า ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการติดตามสัญญาณของตัวกรองด้วย เราสามารถกำหนดค่า μ ได้ดังสมการที่ (3-11)

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}} \quad (3-11)$$

โดยที่ λ_{\max} คือ ค่าไอเกน (eigenvalue) ที่ใหญ่ที่สุดของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต (Troparevsky and D'Attellis, 2004)

3.4 โครงสร้างของโปรแกรมตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

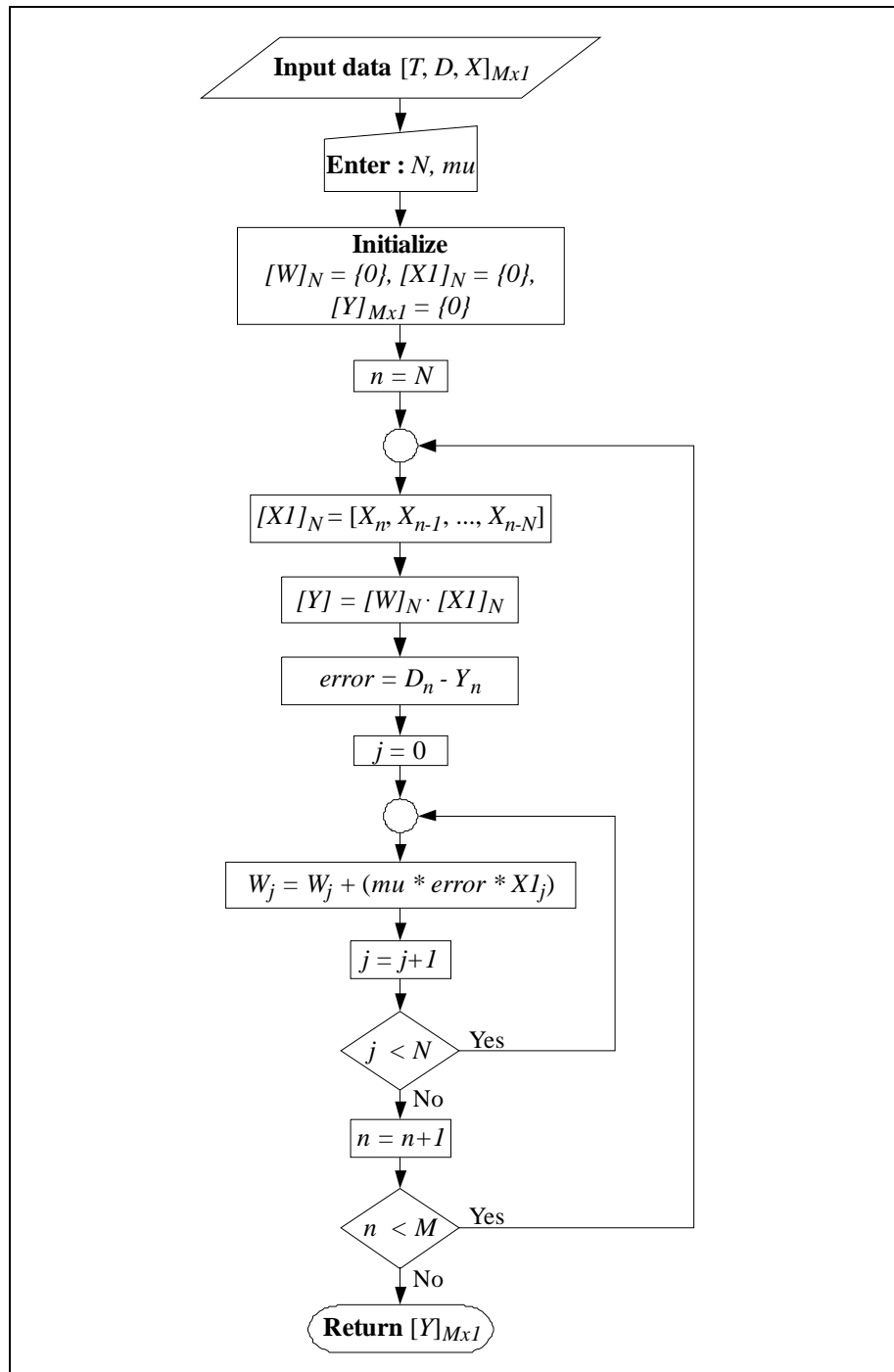
สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองด้วย MATLAB ขั้นตอนแรกทำการโหลดสัญญาณต้นแบบ (signal) และสัญญาณอินพุต (x) ที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนขาว (รายละเอียด

ของสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป) ด้วยคำสั่ง load จากนั้น กำหนดให้สัญญาณอ้างอิงเท่ากับสัญญาณต้นแบบทุกประการ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวกรอง และขั้นตอนต่อไปคือ กำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) และความกว้างของวินโดว์ (N) เนื่องจากค่าความกว้างของวินโดว์ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผลการกรองมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้ N มีค่าเท่ากับ 32 คงที่ตลอดการทดสอบ และเลือกปรับค่า μ เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวกรอง จากนั้นทำการกรองสัญญาณอินพุตโดยการคอนโวลูชันกันระหว่างสัญญาณอินพุต ที่มีจุดข้อมูลเท่ากับ ความกว้างของวินโดว์ กับสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง จากนั้นคำนวณค่าความผิดพลาด และปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองรอบใหม่ จนกว่าจะครบทุกจุดข้อมูลของสัญญาณอินพุต แล้วนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปคำนวณค่า SNR เพื่อตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณต่อไป ซึ่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึม แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.3

```
%adaptive Wiener filter (AWF)
load gaussian
%load chirp
%load pulse
d = signal;
%set step size parameter
mu = input('Step-size parameter : ');
N = 32;           %set window size
M = length(x);
y = zeros(1, M);
w = zeros(1, N);
for n = N : M
    x1 = x(n : -1:n-N+1);
    y(n) = w * x1';      %output of filter
    e = d(n) - y(n);    %error
    w = w + (mu .* e * x1); %update coefficients
end
i = 1: length(signal);
Asignal = sum(abs(signal(i)).^2);
Anoise = sum(abs(signal(i) - y(i)).^2);
SNR = 10*log10(Asignal / Anoise);
subplot(311), plot(t, y, 'k', 'LineWidth',1.5);
xlabel('Time (sec)'); ylabel('Gaussian');
text(0.01, 0.9, {'SNR = ', num2str(SNR),', mu = ', num2str(mu)}),...
'Units', 'normalized');
```

รูปที่ 3.3 โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรอง
วีเนอร์แบบปรับตัวได้

สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองด้วยภาษา C สามารถแสดงโครงสร้างโปรแกรมการทดสอบดังแผนภูมิในรูปที่ 3.4 และมีรายละเอียดของโปรแกรมดังปรากฏอยู่ในภาคผนวก ค. ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 3.4 แผนภูมิการทำงานของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

จากแผนภูมิแสดงการทำงานของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ตามรูปที่ 3.4 ขั้นตอนแรกเป็นการรับข้อมูลอินพุตได้แก่ สัญญาณอ้างอิง และสัญญาณที่ถูกรวมกับสัญญาณรบกวนขาว จากนั้นรับค่าความกว้างของวินโดว์ ซึ่งในที่นี้กำหนดเป็น 20 คงที่ตลอดการทดสอบ และรับค่าเกณฑ์การปรับตัว จากนั้นอัลกอริทึมจะเริ่มทำงานในช่วงแรกคือ จำนวนจุดข้อมูลเท่ากับความกว้างของวินโดว์ โดยดำเนินการคอนโวลูชันกันระหว่างสัมประสิทธิ์ของตัวกรองกับสัญญาณอินพุตช่วงแรก ผลลัพธ์ที่ได้คือเอาต์พุตในช่วงแรก แต่เนื่องจากเรากำหนดค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์ตัวกรองเป็นศูนย์ ดังนั้นในส่วนนี้จึงทำให้เอาต์พุตที่ได้เป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกรองที่ต้องอาศัยเวลาในการปรับตัวในช่วงแรกนั่นเอง จากนั้นนำไปคำนวณค่าความผิดพลาด เพื่อนำไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองรอบใหม่ และทำการคอนโวลูชันกับสัญญาณอินพุตซ้ำ จนครบทุกจุดของข้อมูลอินพุต ในลักษณะของการเลื่อนวินโดว์

บทที่ 4

ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์

4.1 บทนำ

การรบกวนที่เกิดกับสัญญาณ โดยทั่วไปแล้วสามารถลดทอนลงได้ด้วยการใช้ตัวกรองอีก รูปแบบหนึ่งนอกเหนือจากตัวกรองวีเนอร์ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ตัวกรองที่ได้รับการพิจารณาในงานวิจัยนี้ คือตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ (Savitzky-Golay filter) ซึ่งเป็นตัวกรองที่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย ดังปรากฏในงานวิจัยของ Ergin, Vilabo, Tchouassi, Greenel, and Thomas (2003) ได้เลือกใช้ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ ในการปรับเรียบสัญญาณ Raman ที่ได้จาก Raman Spectroscopy งานวิจัยของ Nakajima, Juzoji, Zhao, and Hamamoto (2001) ได้ใช้ตัวกรองชนิดสวิตซ์กี-โกเลย์ ในการกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องตรวจวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ (electrocardiogram : ECG) และ Bakkali (2007) ได้ใช้ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ ในการหาพื้นที่ที่มีการทับถมของฟอสเฟต เป็นต้น ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์ ใช้หลักการของการประมาณพหุนามเป็นช่วง ๆ แบบกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอันดับของพหุนามที่มีค่าสูง จะให้ผลการกรองที่ดี โดยไม่เกิดการลดขนาดของสัญญาณเดิม ซึ่งโดยปกติแล้วการเลื่อนวินโดว์จะทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และจากการศึกษาค้นคว้าดังกล่าว จึงเลือกใช้การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์อีกแนวทางหนึ่ง สำหรับวิทยานิพนธ์นี้

4.2 หลักการทำงานของตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์

ในการปรับเรียบสัญญาณ ตัวกรองสวิตซ์กี-โกเลย์จะอาศัยการประมาณแบบพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ยโดยการเลื่อนวินโดว์ (Savitzky and Golay, 1964) เอาต์พุตของตัวกรองสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (4-1)

$$g_i = \sum_{K=-K_L}^{K_R} c_K f_{i+K} \quad ; i = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (4-1)$$

โดยที่ f_{i+K} คือ สัญญาณอินพุต
 g_i คือ สัญญาณเอาต์พุต

K_L	คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งซ้ายของชุดข้อมูล i
K_R	คือ จำนวนของจุดข้อมูลฝั่งขวาของชุดข้อมูล i
c_K	คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ c_K ในสมการที่ (4-1) เป็นค่าคงที่ ซึ่งจะเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล i จุด แต่สำหรับวิธีการของส่ววิทซกี-โกเลย์ สัมประสิทธิ์ c_K จะถูกแทนด้วยพหุนามอันดับ M ซึ่งอยู่ในรูป $a_0 + a_1i + a_2i^2 + \dots + a_Mi^M$ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ \mathbf{a} แสดงได้ดังสมการที่ (4-2) และสมการที่ (4-3)

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{f} \quad ; \quad \mathbf{a} = (a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M)^T \quad (4-2)$$

$$(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}) \cdot \mathbf{a} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{f} \quad \text{และ} \quad \mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{f}) \quad (4-3)$$

เนื่องจากการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะทำให้ข้อมูลเป็นเชิงเส้น ดังนั้น \mathbf{f} ในสมการที่ (4-3) สามารถแทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) \mathbf{e}_K ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง ส่ววิทซกี-โกเลย์หาได้จากสมการที่ (4-4)

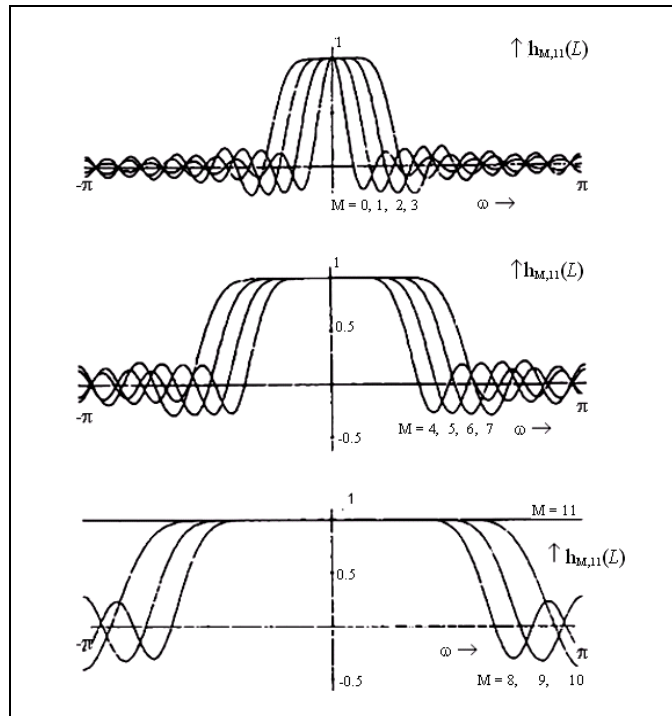
$$c_K = \left\{ (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{e}_K) \right\}_0 = \sum_{m=0}^M \left\{ (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \right\}_{0m} K^m \quad (4-4)$$

โดยที่ $K = 2K_L + 1$ หรือ $K = 2K_R + 1$ (จำนวนคี่)

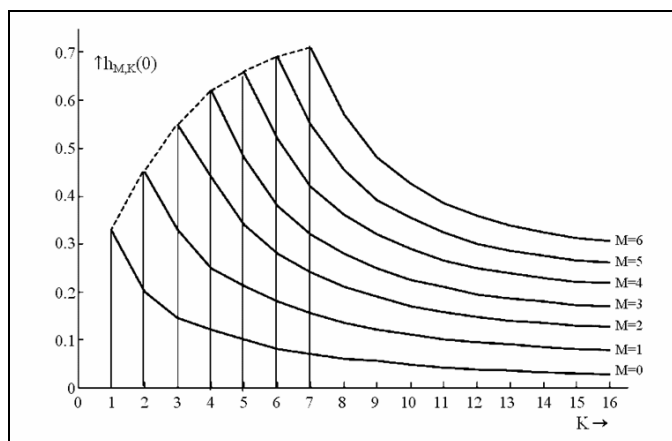
$$\mathbf{A} = K^m = \begin{bmatrix} 1 & -K_L & \dots & (-K_L)^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K_R & \dots & K_R^M \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4-4) จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองส่ววิทซกี-โกเลย์ คือ M และ K รูปที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองส่ววิทซกี-โกเลย์ โดยที่ $K = 11$ และ M เป็นจำนวนเต็มจาก 0 ถึง 11 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูง ๆ การตอบสนองทางความถี่จะมีการกระเพื่อม และแถบผ่านความถี่จะขึ้นอยู่กับค่า M เมื่อ $M = 0$ การกรองสัญญาณจะเป็นการหาค่าเฉลี่ย (average filter) และเมื่อ $M = K$ การกรองสัญญาณจะเป็นแบบ

ผ่านทุกความถี่ (all-pass filter) เมื่อสังเกตอัตราส่วนในการลดทอนสัญญาณรบกวน $h_{M,K}(0)$ ดังรูปที่ 4.2 พบว่า $h_{M,K}(0)$ ควรมีค่าต่ำ ๆ จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนดี ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้ได้ผลกรองที่ดี คือ $M \leq K - 2$

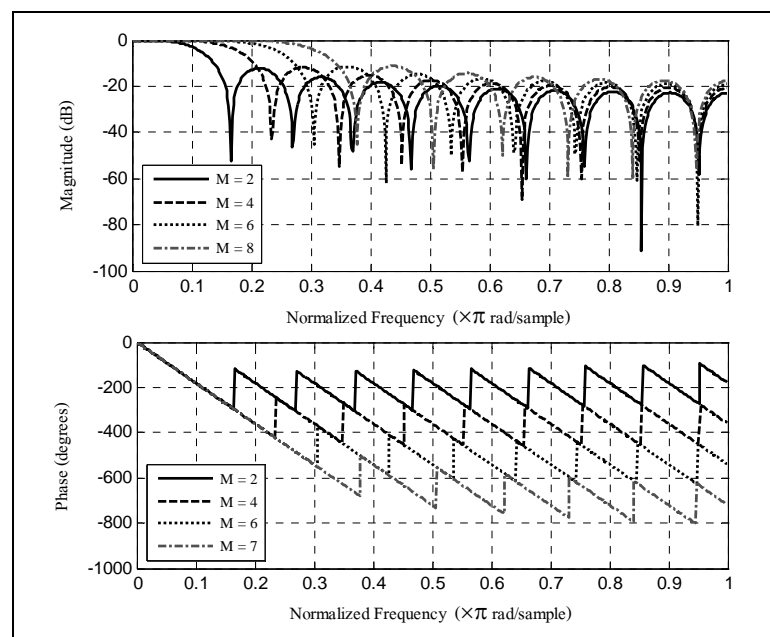


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาทชกี-โกเลย์ (Steffen, 1986)



รูปที่ 4.2 อัตราส่วนในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการปรับพารามิเตอร์ K และ M (Steffen, 1986)

รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์ ที่มีทั้งผลตอบสนองทางขนาด และเฟส จะเห็นว่าการกระเพื่อมที่ความถี่สูงอยู่ระหว่างค่าเฉลี่ยที่มีค่าโดยประมาณ -40 dB ในกรณีที่ $M=2, 4, 6$ และ 8 และมีค่าเฟสต่ำสุด เท่ากับ $-290^\circ, -450^\circ, -610^\circ$ และ -800° ตามลำดับ เมื่อพารามิเตอร์ M มีค่าสูงขึ้น ตัวกรองมีลักษณะสมบัติทางเฟสที่ต่ำลงมากขึ้น นั่นคือ เกิดการประวิงเวลา (delay) มากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวไม่ส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณเอาต์พุตในการประยุกต์ด้านการปรับเรียบสัญญาณ ซึ่งไม่ได้มีความต้องการด้านเวลาจริง (real-time) ในที่นี้จึงไม่พิจารณาผลของเฟส แต่จะพิจารณาผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองเป็นหลัก



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์

4.3 โครงสร้างของโปรแกรมตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์

สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองด้วย MATLAB ผู้วิจัยเลือกใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันใน Signal Processing Toolboxes โดยขั้นตอนแรกทำการโหลดสัญญาณอินพุต (x) และสัญญาณอ้างอิง (d) ด้วยคำสั่ง load จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ M และ K โดยที่ $M \leq K-2$ และ K เป็นจำนวนคี่ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 แต่เนื่องจากค่าความกว้างของวินโดว์ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผลการกรองมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้ K มีค่าเท่ากับ 41 คงที่ตลอดการทดสอบ และเลือกปรับค่าพารามิเตอร์ M เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวกรอง จากนั้นเรียกใช้ฟังก์ชัน `sgolayfilt` จาก toolbox เพื่อคำนวณเอาต์พุตของตัวกรองแล้วนำค่า

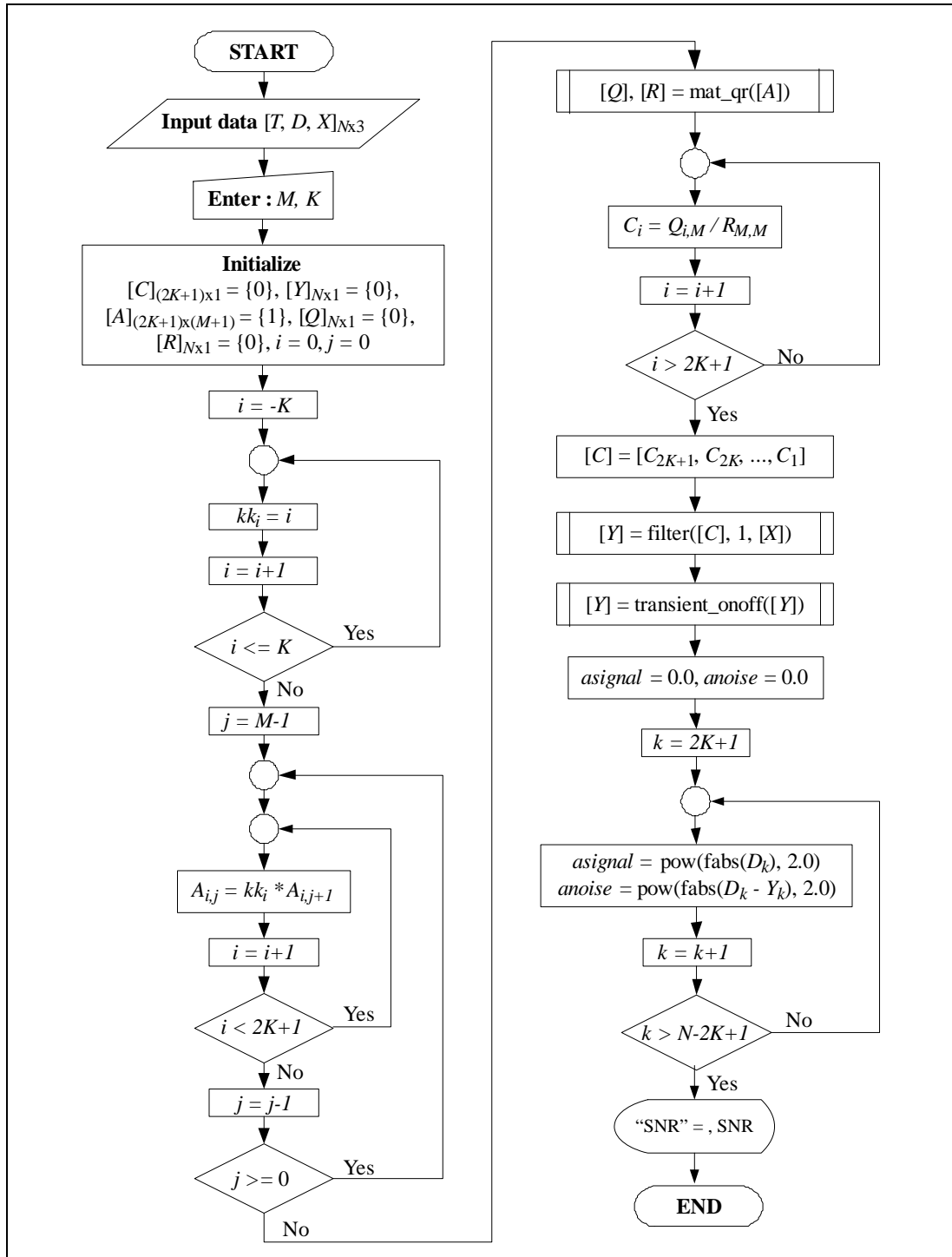
เอาต์พุตที่ได้ไปคำนวณค่า SNR เพื่อตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณต่อไป โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึม แสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 4.4

```
%Savitzky-Golay filter (SGF)
load gaussian
%load chirp
%load pulse
%set order of filter
M = input(' Parameter M (between 0 to 8) : ');
%set window size (left size or right size)
Kr = 20;
K = (2 * Kr) + 1;          % window size
y = sgolayfilt(x, M, K);   %filter output
%choose steady state interval
i = (2*Kr)+1 : length(signal)-(2*Kr)+1;
Asignal = sum(abs(signal(i)).^2);
Anoise = sum(abs(signal(i) - y(i)).^2);
SNR = 10*log10(Asignal / Anoise); %compute SNR
subplot(311), plot(t, y, 'b', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Time (sec)'); ylabel('Gaussian');
text(0.01, 0.9, {'SNR = ', num2str(SNR), ', M = ', num2str(M)},...
      'Units', 'normalized');
```

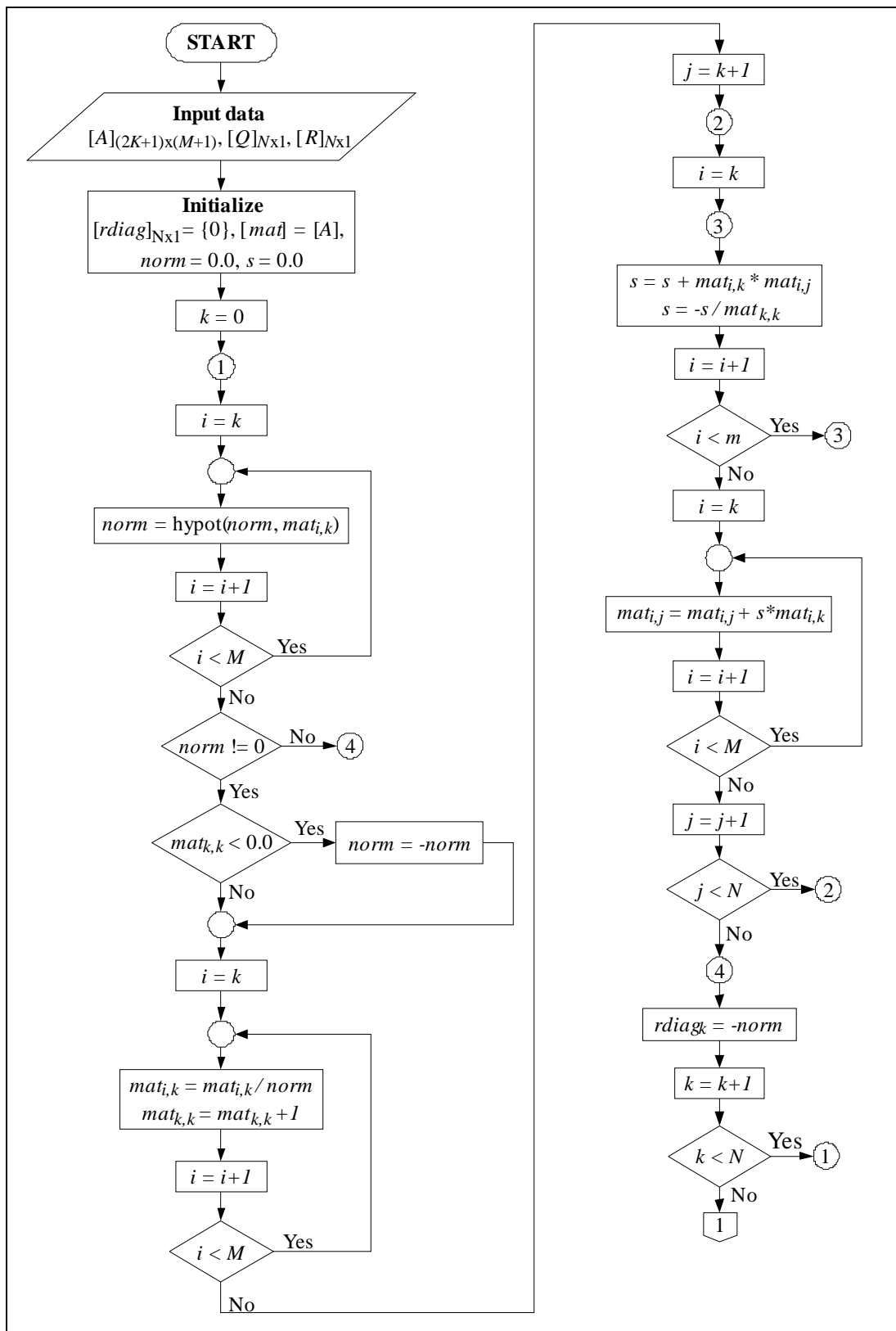
รูปที่ 4.4 โปรแกรม MATLAB สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์

สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองด้วยภาษา C สามารถอธิบายโครงสร้างโปรแกรมการทดสอบได้ด้วยแผนภูมิตามรูปที่ 4.5 และมีรายละเอียดของโปรแกรมดังปรากฏอยู่ในภาคผนวก ง. ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยในขั้นตอนแรกเป็นการโหลดข้อมูล จากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ M และ K ให้กับตัวกรอง เช่นเดียวกับกรณีทดสอบด้วย MATLAB จากนั้นกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ แล้วทำการสร้างเมตริกซ์ A จากค่า M และ K ที่กำหนดในขั้นแรก แล้วนำไปแยกตัวประกอบด้วยวิธี QR (Press and Teukolsky, 1990) โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน `mat_qr` ที่อาศัยวิธีการของ Gram-Schmidt ดังแสดงแผนภูมิการทำงานไว้ในรูปที่ 4.6 จากนั้นนำเมตริกซ์ Q และ R ที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง C และเข้าสู่กระบวนการกรองสัญญาณ ซึ่งจะอาศัยวิธีการกรองสัญญาณแบบ Direct Form II Transposed ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ดังแสดงในสมการที่ (4-5) และแสดงแผนภูมิการทำงานในส่วนของฟังก์ชัน filter ไว้ในรูปที่ 4.7 เมื่อ $a(1) \neq 0$ สัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะถูกนอมนัลไลซ์ด้วย $a(1)$

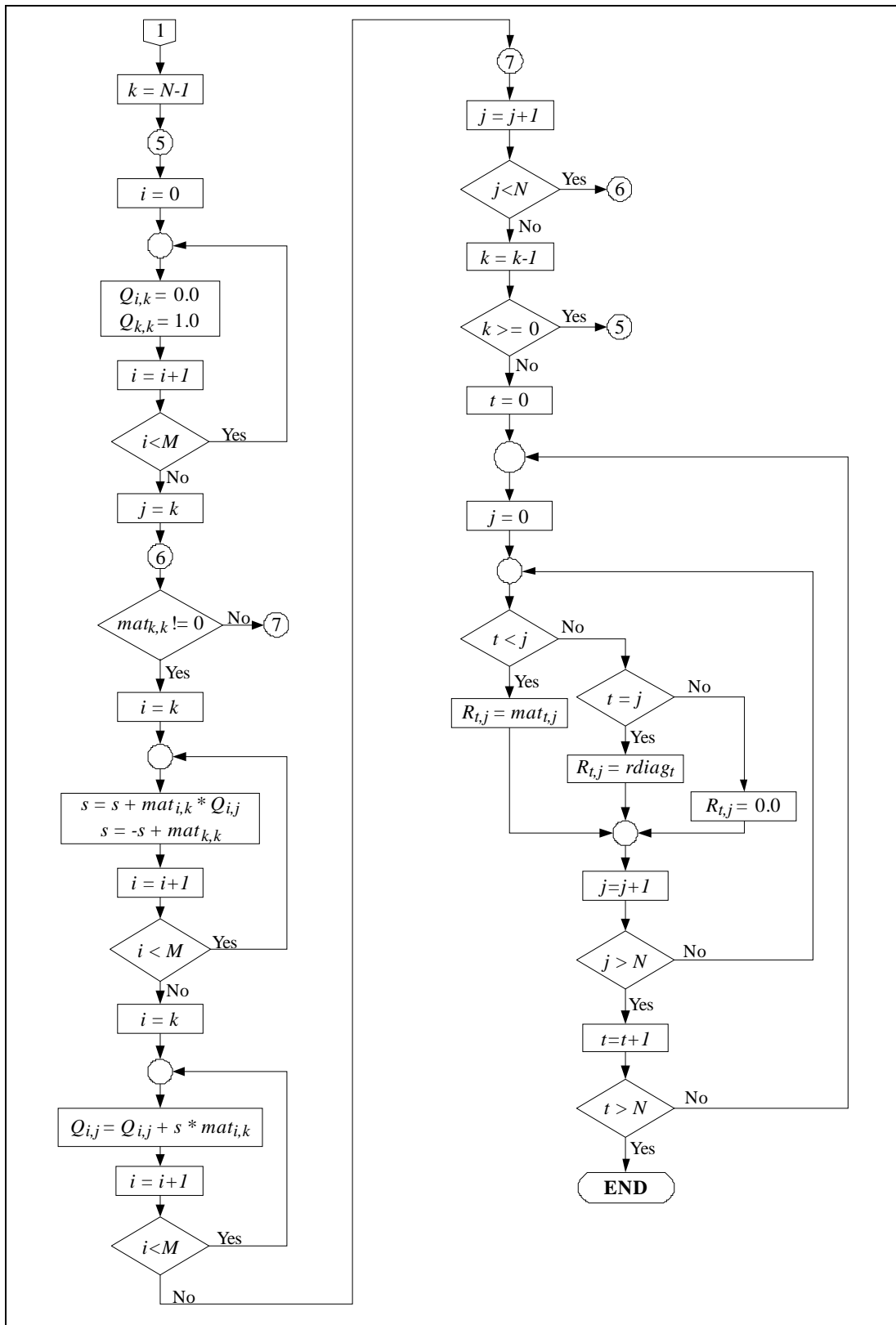
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(nb+1)z^{-nb}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(na+1)z^{-na}} \quad (4-5)$$



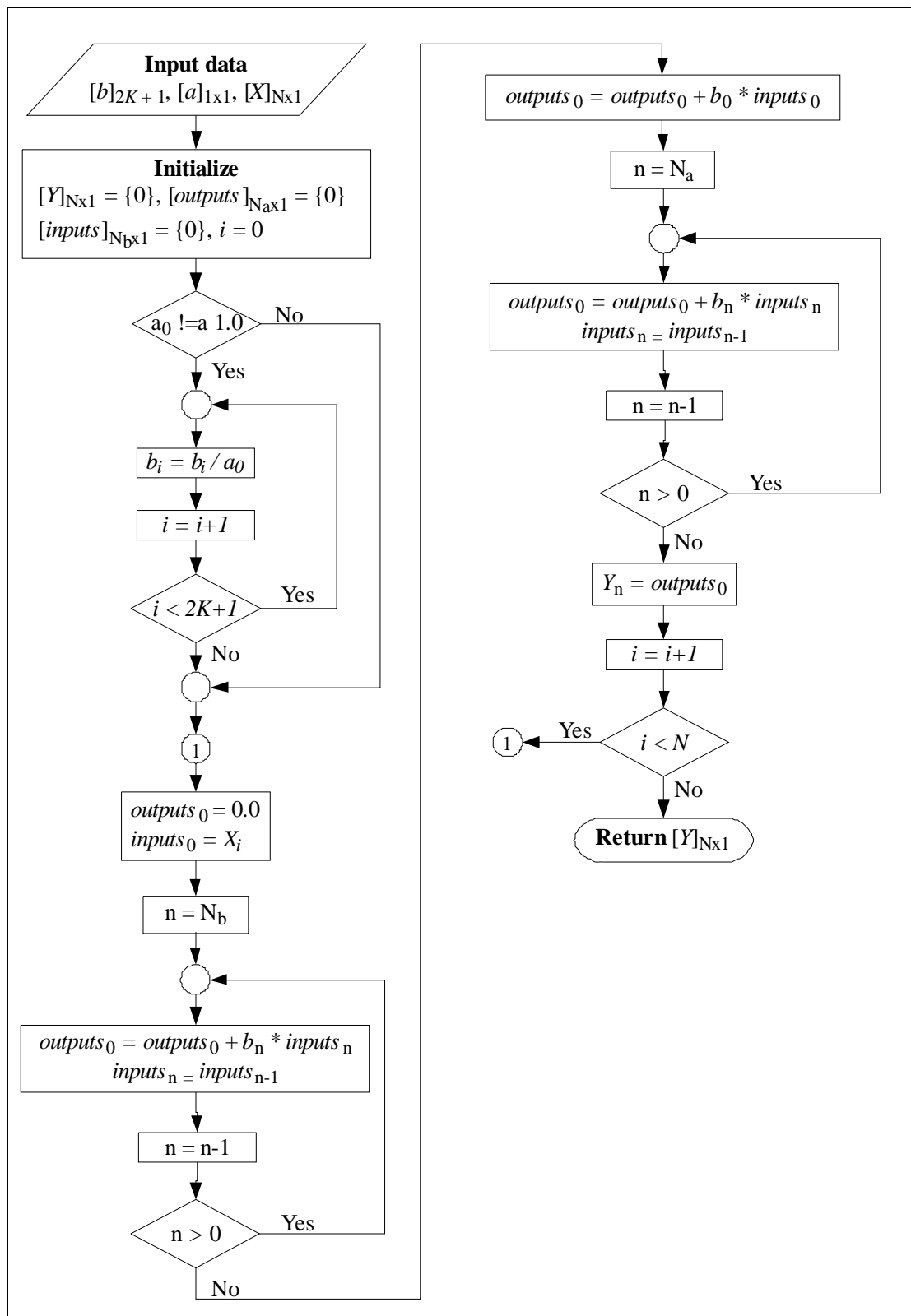
รูปที่ 4.5 แผนภูมิการทำงานของตัวกรองสาขาทชกี-โกลด์



รูปที่ 4.6 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย mat_qr



รูปที่ 4.6 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย mat_qr (ต่อ)



รูปที่ 4.7 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย filter

ขั้นตอนต่อไป ทำการปรับปรุงเอาต์พุตใหม่ โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน `transient_onoff` ที่สร้างขึ้น โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ขั้นตอน คือการคำนวณสถานะชั่วคราวในช่วงแรก (transient on) ช่วงสถานะคงตัว (steady state) และสถานะชั่วคราวในช่วงสุดท้าย (transient off) (Press and Teukolsky, 1990) เนื่องจากอัลกอริทึมของตัวกรอง หลังจากการใช้ฟังก์ชัน `filter` จะทำให้เอาต์พุตที่ได้ถูกเลื่อนไป โดยมีระยะเลื่อนเท่ากับความกว้างของวินโดว์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ส่งผลให้ค่า SNR ที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง (เสมือนไม่ลู่เข้า) จึงต้องมีการชดเชยช่วงสถานะคงตัว โดยการเลื่อนข้อมูลกลับเท่ากับความกว้างของวินโดว์ ด้วยคำสั่งดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นทำการชดเชยสถานะชั่วคราวในช่วงแรก และช่วงสุดท้าย ด้วยคำสั่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 โดยที่แสดงตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงไว้ในรูปที่ 4.11 ซึ่งสัญญาณทดสอบเป็นสัญญาณเชิงรีป โดยกำหนดให้ $M = 2$ และแสดงการทำงานในส่วนนี้ไว้ในรูปที่ 4.12

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณ โดยการคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ด้วยฟังก์ชัน `calc_snr` และให้แสดงค่า SNR ที่ `command prompt`

```
// Compute the steady state output
for (i = 0; i < npoints; i++)
{
    if (i < npoints-K)
        y[i] = y[i+K];
}
```

รูปที่ 4.8 คำสั่งใช้สำหรับการเลื่อนกลับเพื่อชดเชยสถานะคงตัวของสัญญาณเอาต์พุต

```
// Compute the transient on
for (i = 0; i < K; i++)
{
    y[i] = 0;
    for (j = 0; j < 2*K+1; j++)
        y[i] += c[j] * x[(2*K)-j];
}
```

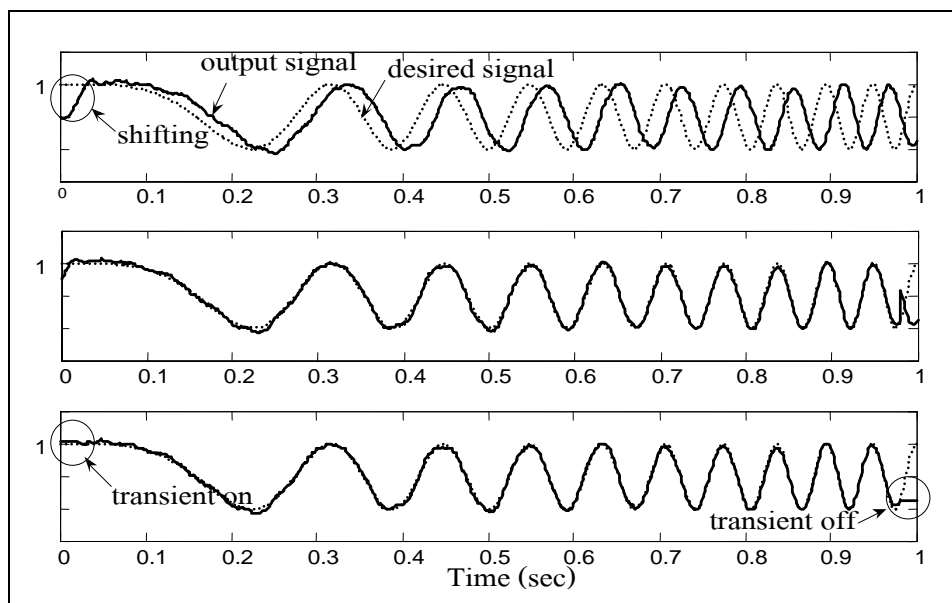
รูปที่ 4.9 คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสถานะชั่วคราวในช่วงแรก

```

for (i = npoints-K; i < npoints; i++)
{
  y[i] = 0;
  for (j = 0; j < 2*K+1; j++)
    y[i] += c[j] * x[(npoints-1)-j];
}

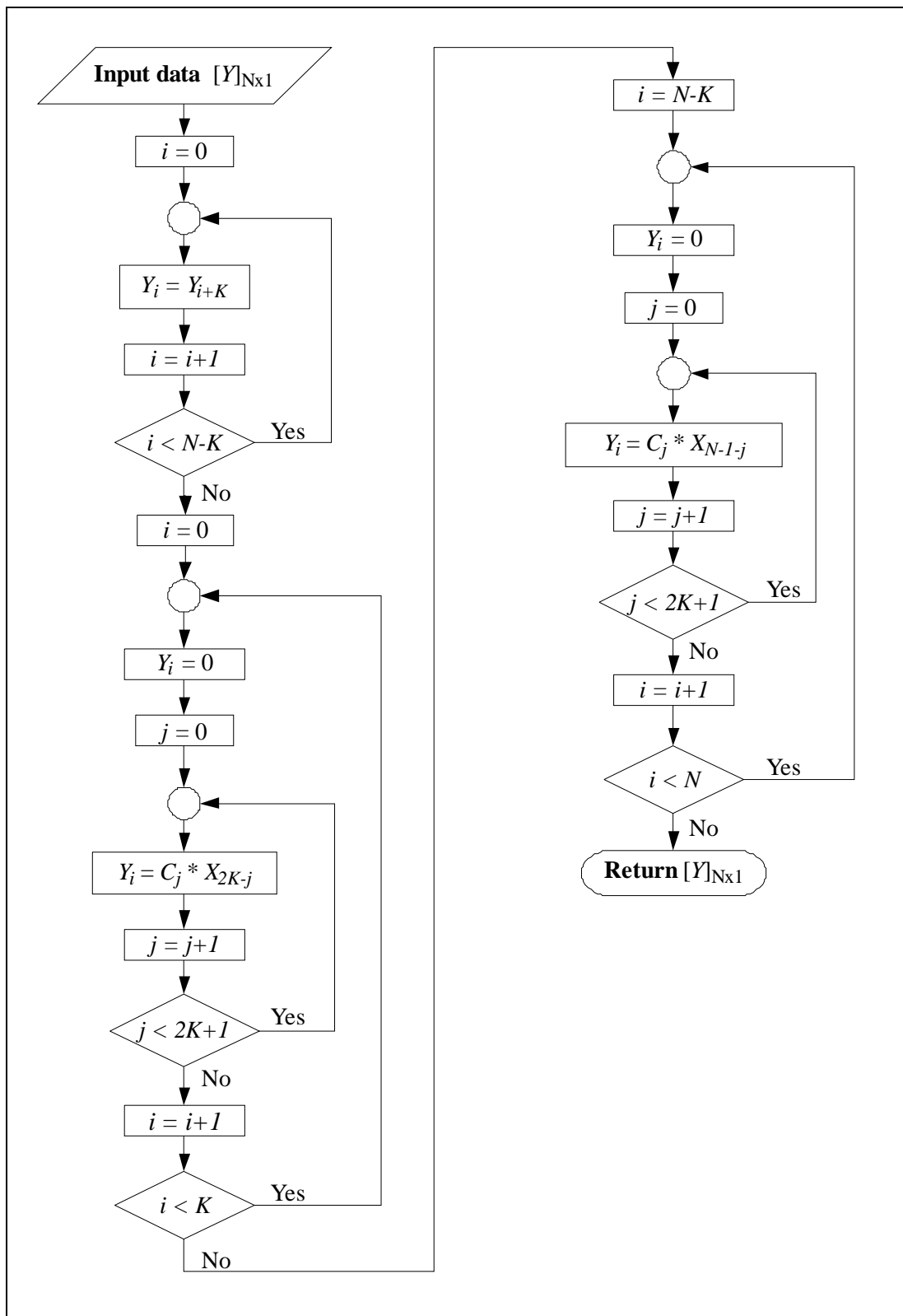
```

รูปที่ 4.10 คำสั่งใช้สำหรับการชดเชยสถานะชั่วคราวในช่วงสุดท้าย



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจากการชดเชยด้วยฟังก์ชัน transient_onoff

จากรูปที่ 4.11 รูปบน แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเอาต์พุตที่ยังไม่ได้รับการชดเชยกับสัญญาณอ้างอิง ทำให้การคำนวณค่า SNR ผิดพลาด รูปกลาง แสดงการชดเชยช่วงสภาวะคงตัวโดยการเลื่อนกลับ ที่มีระยะการเลื่อนเท่ากับความกว้างของวินโดว์ เห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิงมีการซ้อนทับกัน แต่เนื่องจากช่วงสภาวะชั่วคราวในช่วงแรก และช่วงสุดท้าย ยังมีความผิดเพี้ยนอยู่มาก ดังนั้นจึงมีการชดเชยในช่วงดังกล่าว ซึ่งแสดงได้ดังสัญญาณเส้นทึบรูปล่างสุด แต่เนื่องจาก สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ยังคงมีรูปร่างผิดเพี้ยนเล็กน้อย และการพิจารณาผลการกรองสัญญาณโดยทั่วไป จะไม่สนใจช่วงสภาวะชั่วคราว ดังนั้น ในการคำนวณค่า SNR จึงเลือกพิจารณาช่วงสภาวะคงตัวเท่านั้น เพื่อเปรียบเทียบค่า SNR ที่ได้กับการทดสอบด้วย MATLAB



รูปที่ 4.12 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมย่อย transient_off

บทที่ 5

การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ กับตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลีย

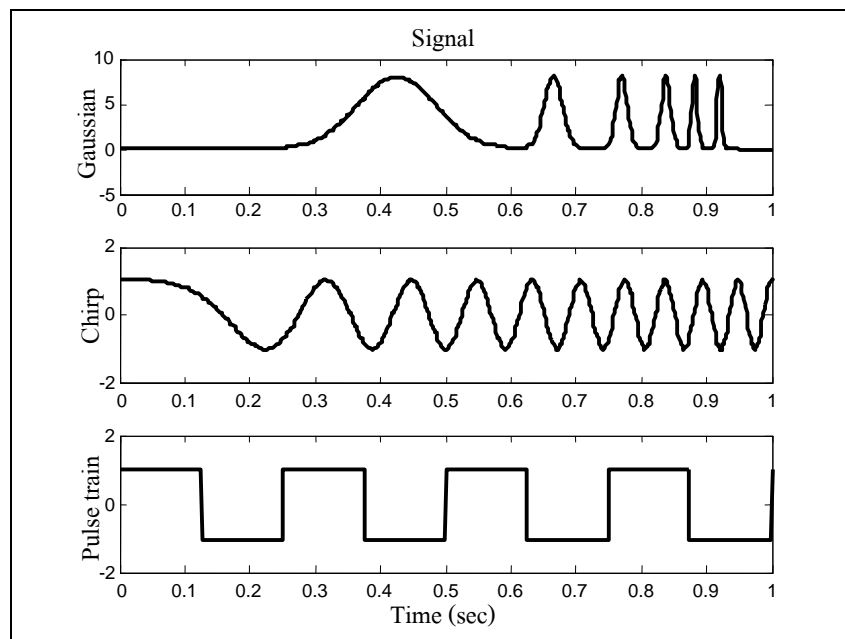
5.1 บทนำ

ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ที่อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (LMS) เป็นวิธีการหนึ่ง ที่อาศัยค่าเกรเดียนท์ ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณเอาต์พุตของตัวกรอง ตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลียจะอาศัยวิธีการประมาณแบบพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ยโดยการเลื่อนวินโดว์ ซึ่งได้อธิบายหลักการทำงานของตัวกรองทั้งสอง ไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อ การตอบสนองทางความถี่สำหรับตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ คือค่าความกว้างของวินโดว์ (N) และค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) และสำหรับตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลีย คือค่าความกว้างของวินโดว์ (K) และอันดับของพหุนาม (M)

บทนี้บรรยายเกี่ยวกับการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวกรองทั้งสองด้วย MATLAB และ C โดยการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรอง โดยมีการใช้ประโยชน์จากสัญญาณทดสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian signal) สัญญาณเชิร์ป (chirp signal) และสัญญาณขบวนพัลส์ (pulse-train signal) โดยกำหนดให้มีความถี่การสุ่มสัญญาณเป็น 1 kHz เมื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวกรองทั้งสอง จะถูกนำไปผสมด้วยสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ที่มีค่า $SNR = 10$ dB เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวกรองทั้งสอง ดังที่อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ในหัวข้อ 5.3 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) และกำหนดค่าความกว้างของวินโดว์เท่ากับ 32 คงที่ตลอดการทดสอบ เนื่องจากการปรับค่าความกว้างวินโดว์จะส่งผลกระทบต่อเอาต์พุตของตัวกรองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังที่อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 และในหัวข้อที่ 5.4 จะแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลีย โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ M และกำหนดค่าความกว้างของวินโดว์เท่ากับ 41 คงที่ตลอดการทดสอบ เนื่องจากการปรับค่าดังกล่าวส่งผลกระทบต่อเอาต์พุตของการกรองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 แล้วเลือกใช้ตัวกรองที่มีสมรรถนะดีกว่าเป็นตัวกรองหลัก ให้กับตัวกรองเชิงเลขที่พัฒนาขึ้น

5.2 สัญญาณทดสอบ

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวกรองทั้งสองชนิด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาใช้ประโยชน์จากสัญญาณทดสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian signal) สัญญาณเชิร์ป (Chirp signal) และสัญญาณขบวนพัลส์ (pulse-train signal) โดยกำหนดให้มีความถี่การสุ่มสัญญาณเป็น 1 kHz ดังที่แสดงรูปคลื่นในรูปที่ 5.1

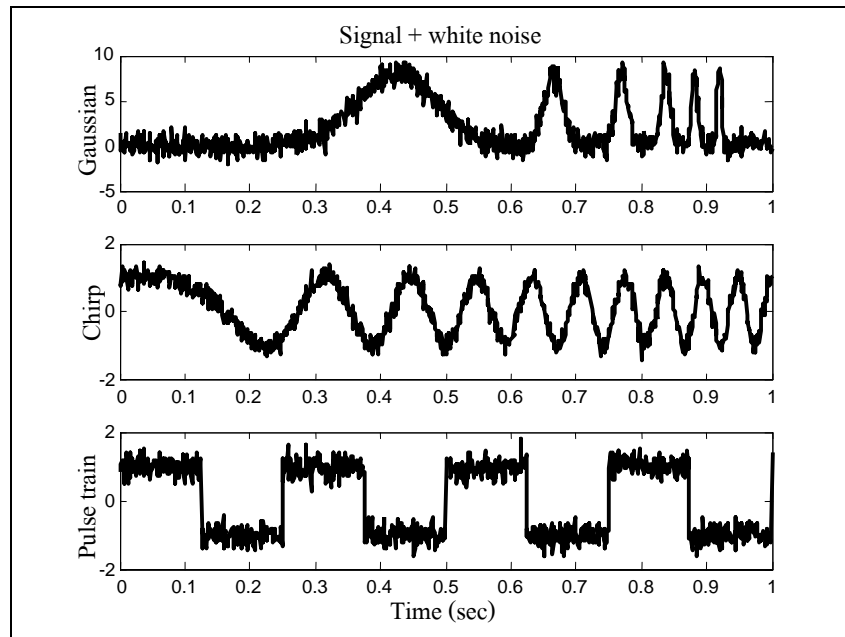


รูปที่ 5.1 สัญญาณต้นแบบที่ไม่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนขาว

เมื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวกรองทั้งสอง จะถูกนำไปผสมด้วยสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ที่มีค่า $SNR = 10$ dB ดังแสดงรูปคลื่นในรูปที่ 5.2 โดยเงื่อนไขการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวกรองทั้งสองพิจารณาได้จาก 2 คุณลักษณะ ของสัญญาณเอาต์พุต คือรูปร่างของสัญญาณ (wave shape) และค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio : SNR) ซึ่งค่า SNR ที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ว่า สัญญาณที่ได้จากการกรองมีคุณภาพดี ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (5-1)

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right) \quad (5-1)$$

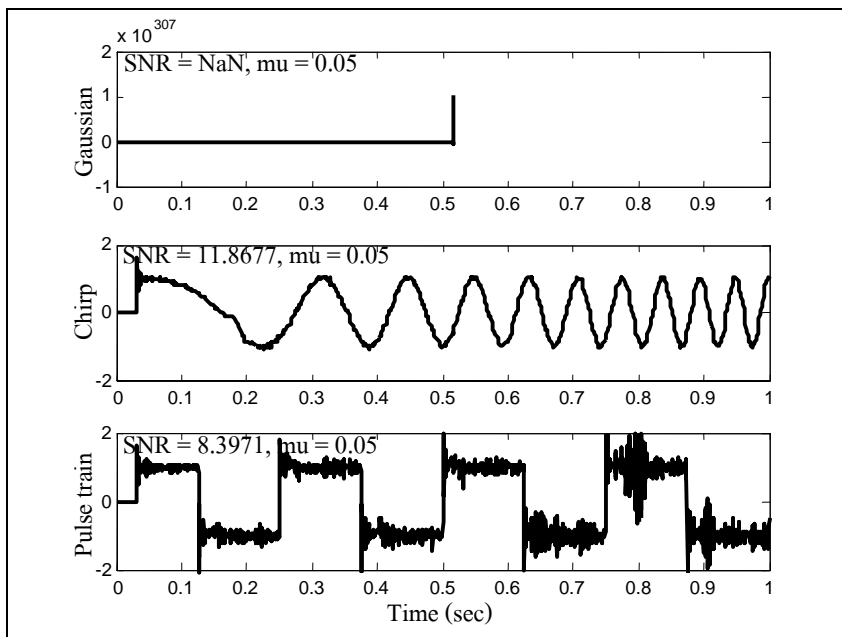
โดยที่	P_{signal}	คือ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ไม่ถูกรบกวน (W)
	P_{noise}	คือ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน (W)
	A_{signal}	คือ ขนาด rms ของสัญญาณที่ไม่ถูกรบกวน
	A_{noise}	คือ ขนาด rms ของสัญญาณรบกวน



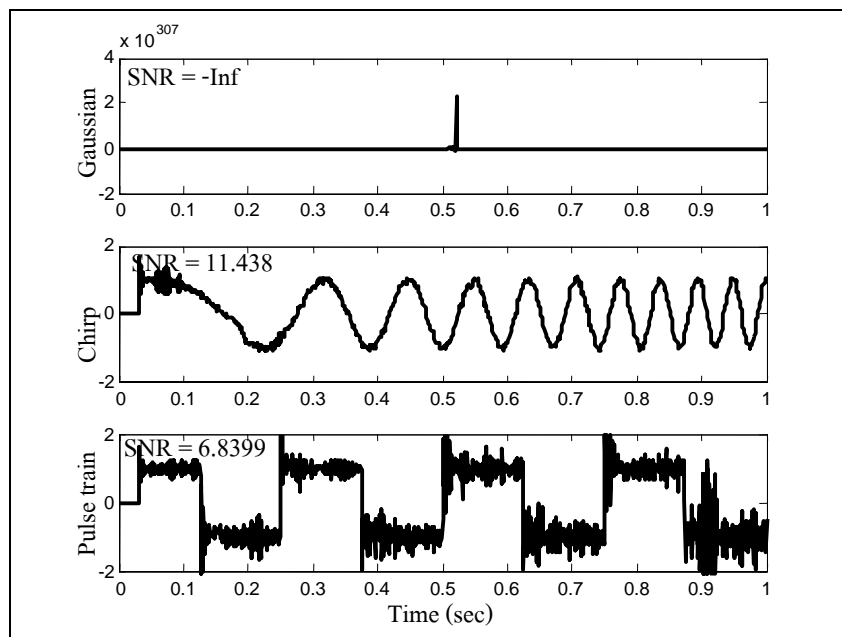
รูปที่ 5.2 สัญญาณทดสอบที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนขาว

5.3 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

ในการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ เป็นการศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ โดยกำหนดค่าความกว้างของวินโดว์เท่ากับ 32 ครั้งที่ตลอดการทดสอบ เนื่องจากการปรับค่าความกว้างของวินโดว์จะส่งผลกระทบต่อเอาต์พุตของตัวกรองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 แล้วทำการปรับค่าเกณฑ์การปรับตัวเป็น 0.05, 0.01, 0.005, 0.001 และ 0.0005 ตามลำดับ เพื่อสังเกตเอาต์พุตของตัวกรอง ทั้งรูปคลื่นและค่า SNR ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 5.3 ถึง 5.7 โดยรูปย่อย (ก) แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองด้วย MATLAB รูปย่อย (ข) แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองด้วยภาษา C และสรุปค่า SNR ได้ดังตารางที่ 5.1

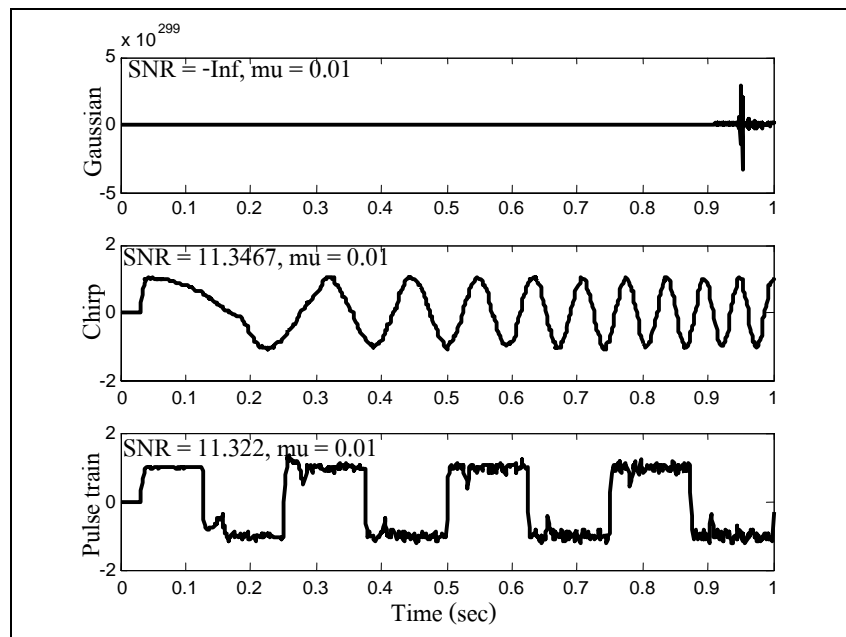


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

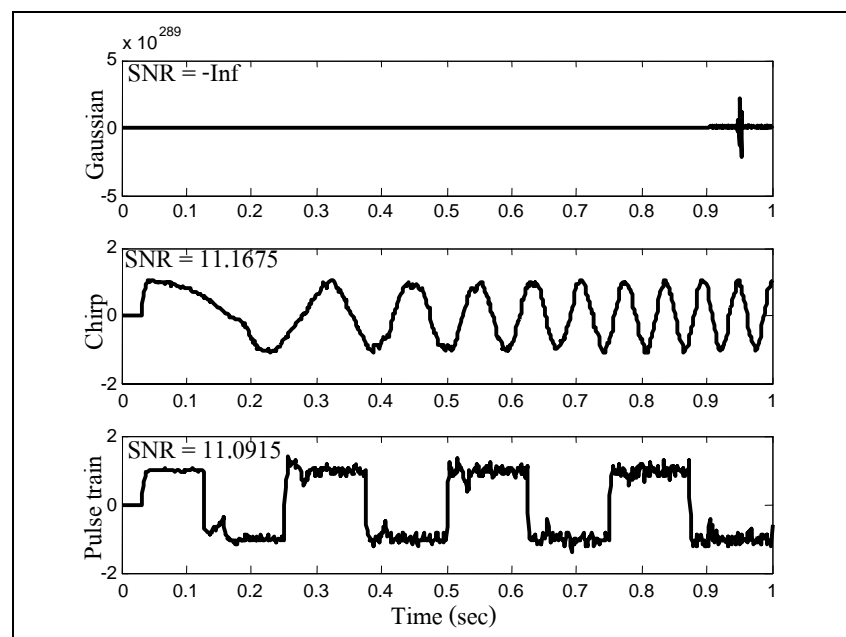


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.05$)

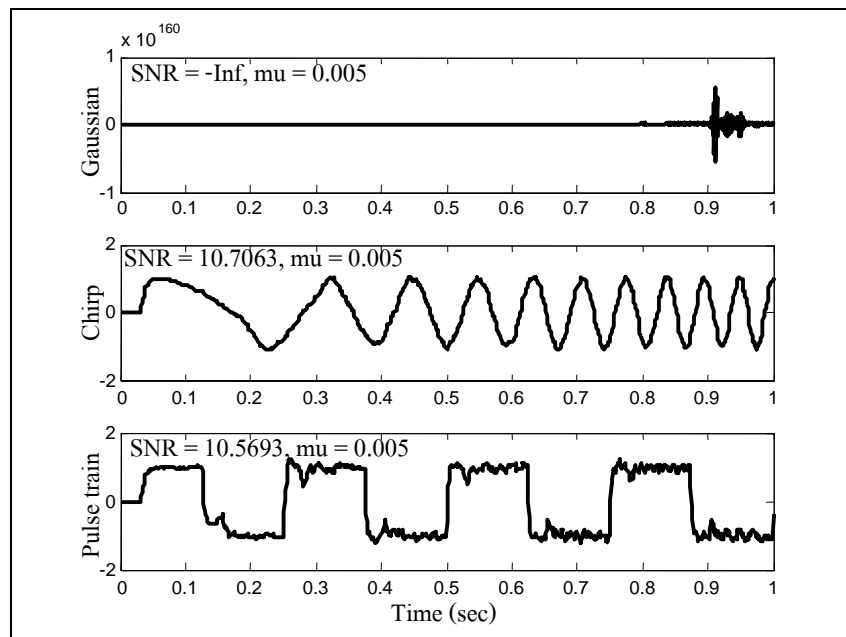


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

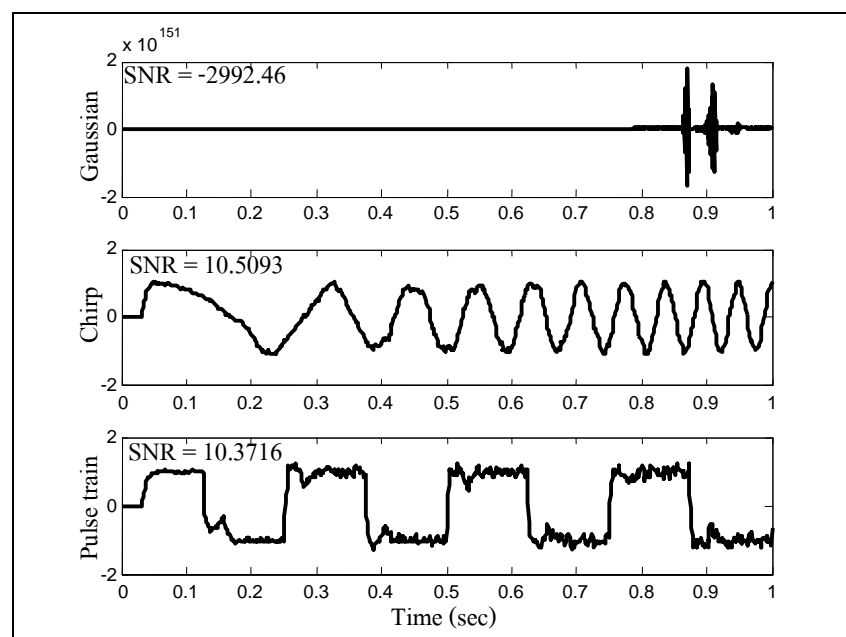


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.01$)

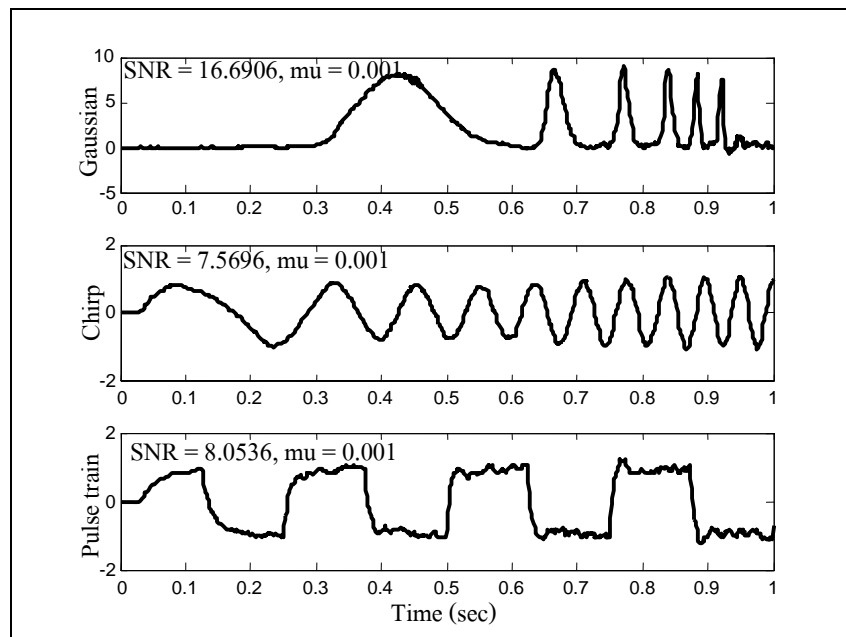


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

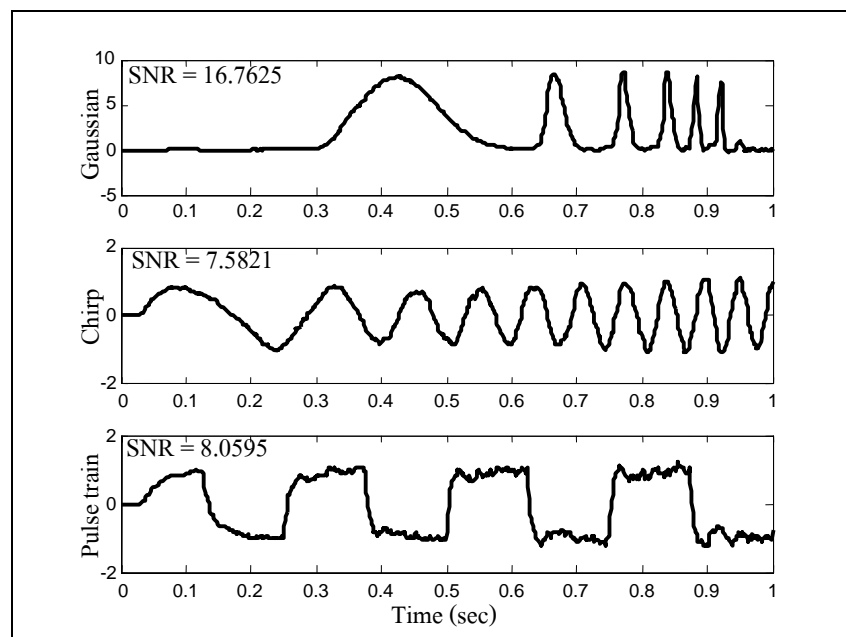


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.005$)

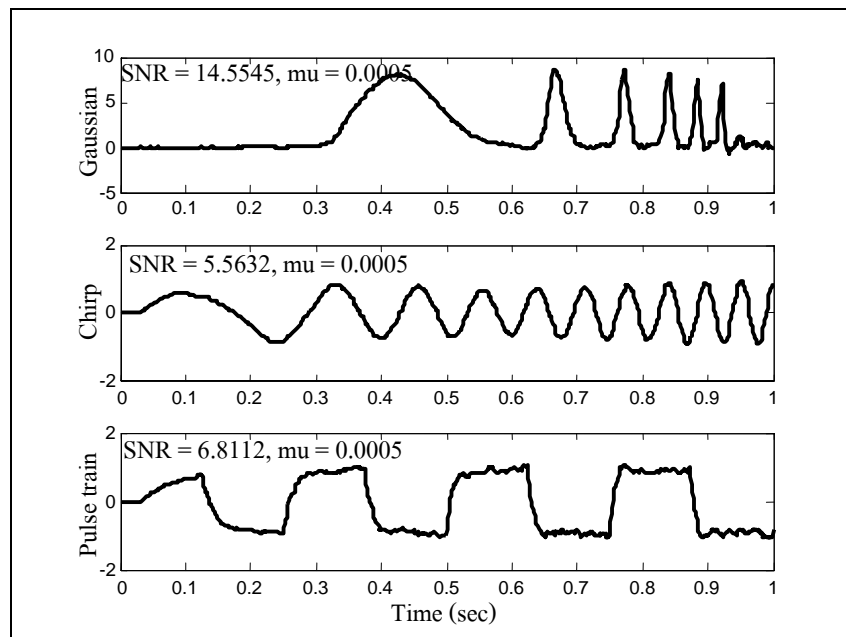


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

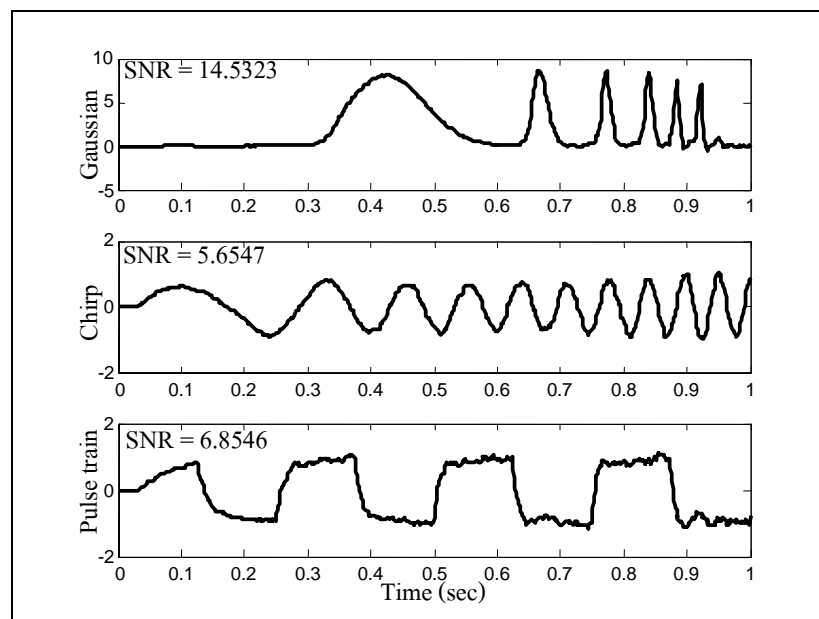


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ ($\mu = 0.001$)



(ก) การทดสอบด้วย MATLAB



(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ โดยกำหนด ($\mu = 0.0005$)

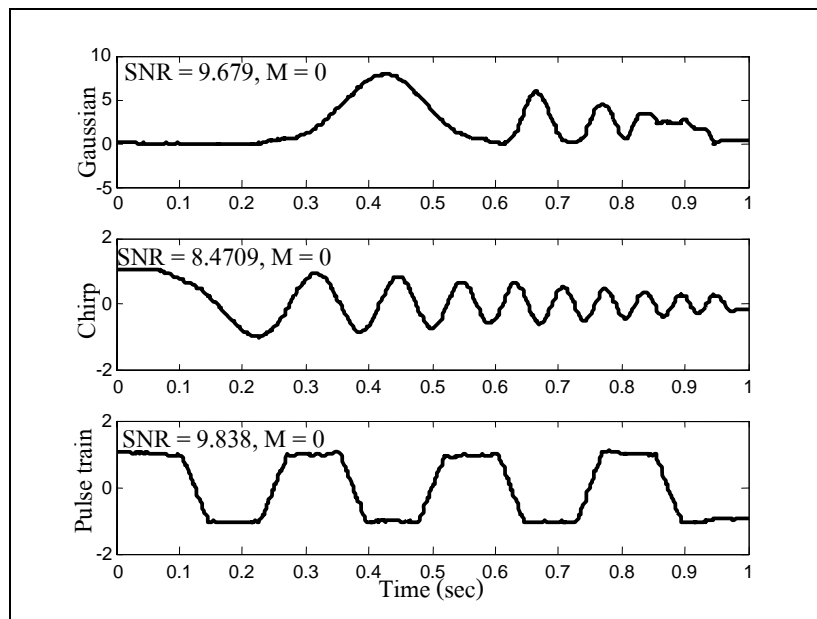
ตารางที่ 5.1 แสดงผลของค่า SNR สำหรับสัญญาณทดสอบทั้ง 3 รูปแบบจากการปรับค่า μ ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

ค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ)	อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR, dB)					
	สัญญาณเกาส์เซียน		สัญญาณเชิงรีป		สัญญาณขบวนพัลส์	
	MATLAB	C	MATLAB	C	MATLAB	C
0.05	ไม่ลู่เข้า	ไม่ลู่เข้า	11.8677	11.4380	8.3971	6.8399
0.01	ไม่ลู่เข้า	ไม่ลู่เข้า	11.3467	11.1675	11.3220	11.0915
0.005	ไม่ลู่เข้า	ไม่ลู่เข้า	10.7063	10.5093	10.5693	10.3716
0.001	16.6906	16.7625	7.5696	7.5821	8.0536	8.0595
0.0005	14.5545	14.5323	5.5632	5.6547	6.8112	6.8546

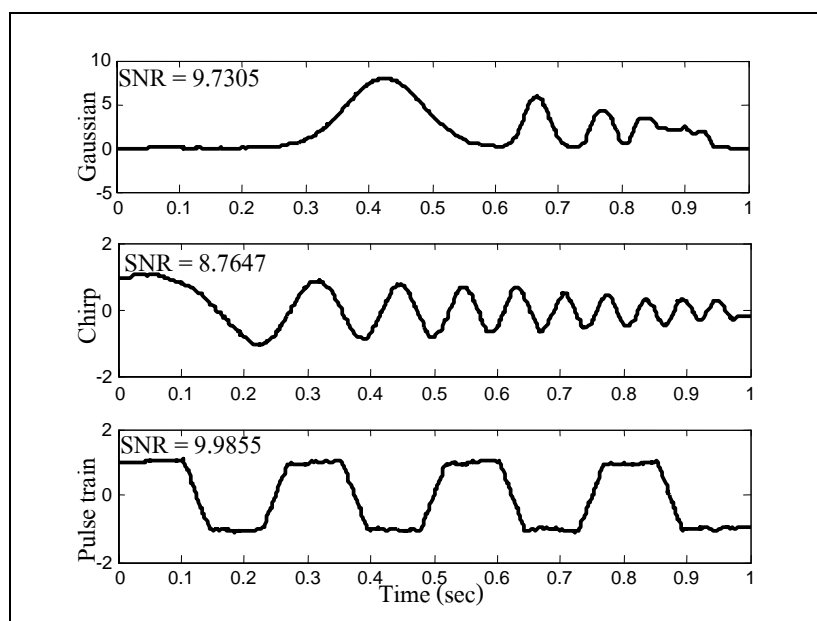
จากผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ เมื่อสัญญาณอินพุต คือสัญญาณเกาส์เซียน จะเห็นว่า ค่าเกณฑ์การปรับตัวมีค่ามากเกินไป จะทำให้อัลกอริทึมไม่ลู่เข้า ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าเกณฑ์การปรับตัวให้ต่ำลง และจะเห็นได้ว่า ค่าเกณฑ์การปรับตัวเท่ากับ 0.001 ให้ผลการกรองที่ลู่เข้าและให้ค่า SNR ที่สูง แต่เมื่อลดค่าเกณฑ์การปรับตัวลง จะส่งผลให้ขนาดของสัญญาณลดลงในช่วงความถี่สูง เมื่อสัญญาณอินพุต คือสัญญาณเชิงรีป จะเห็นว่า ที่ค่าเกณฑ์การปรับตัวเท่ากับ 0.05 ค่า SNR ที่ได้จะมีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.3 แต่ยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่ค่อนข้างมาก จึงเลือกค่าเกณฑ์การปรับตัวที่ต่ำกว่า นั่นคือ 0.01 ที่ให้ค่า SNR ที่สูง และมีรูปคลื่นของสัญญาณที่คล้ายคลึงกับสัญญาณต้นฉบับ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเมื่อสัญญาณอินพุต คือสัญญาณขบวนพัลส์ จะเห็นว่า ค่าเกณฑ์การปรับตัวทุกค่าทำให้อัลกอริทึมของตัวกรองลู่เข้า แต่เมื่อมีค่ามากเกินไป จะเห็นว่าเอาต์พุตที่ได้ยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่ค่อนข้างมาก จึงมีการปรับค่าเกณฑ์การปรับตัวให้ต่ำลง ซึ่งค่าที่เหมาะสมคือ 0.01 ที่ให้ค่า SNR ที่สูง และจากการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ จะเห็นว่าอัลกอริทึมของตัวกรองมีช่วงเวลาเริ่มต้นในการปรับตัว และขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าความกว้างของวินโดว ซึ่งไม่ส่งผลกับคุณภาพของสัญญาณเอาต์พุต

5.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์

การทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ เป็นการศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ M โดยกำหนดค่าความกว้างของวินโดวเท่ากับ 41 คงที่ตลอดการทดสอบ โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ M เป็น 0, 2, 4, 6 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 และสรุปค่า SNR ได้ดังตารางที่ 5.2

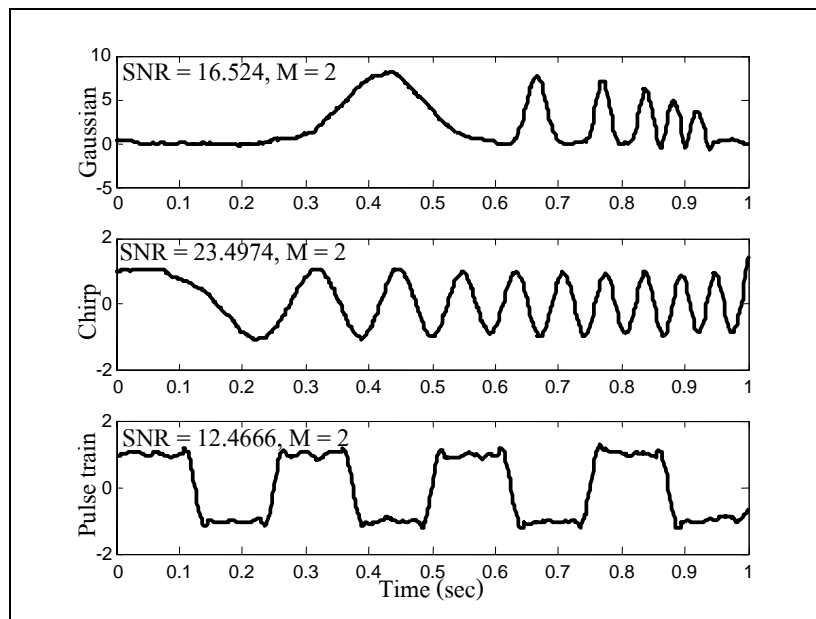


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

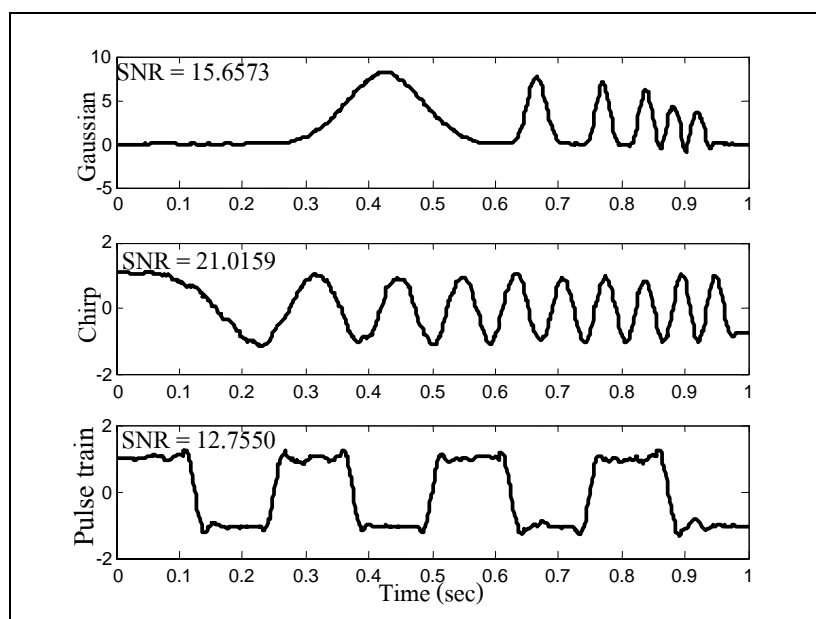


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ ($M=0$)

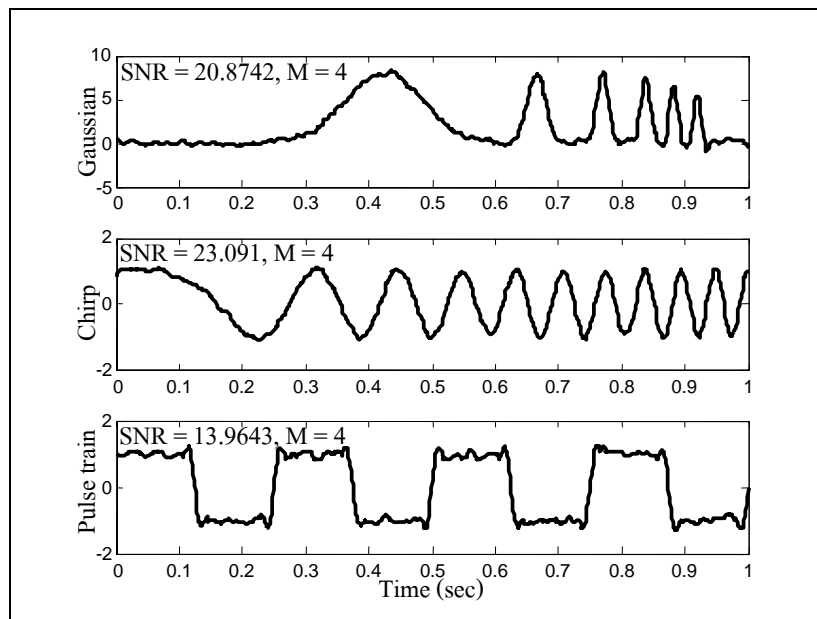


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

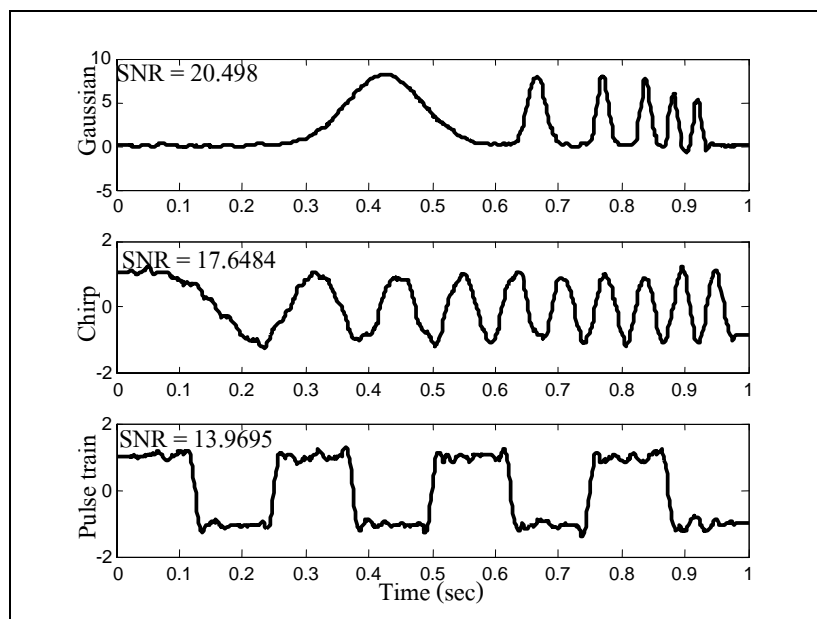


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบตัวกรองสาขาวิซกี-โกเลย์ ($M=2$)

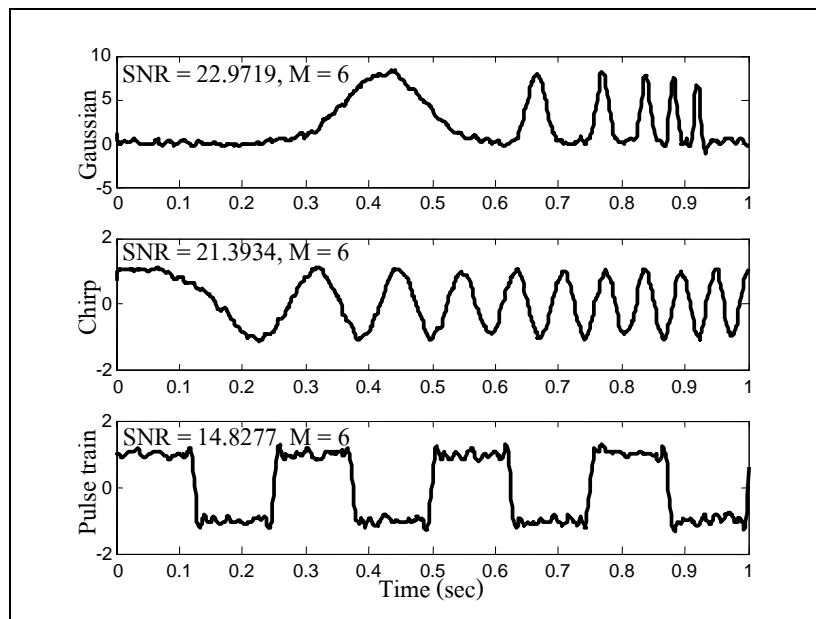


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

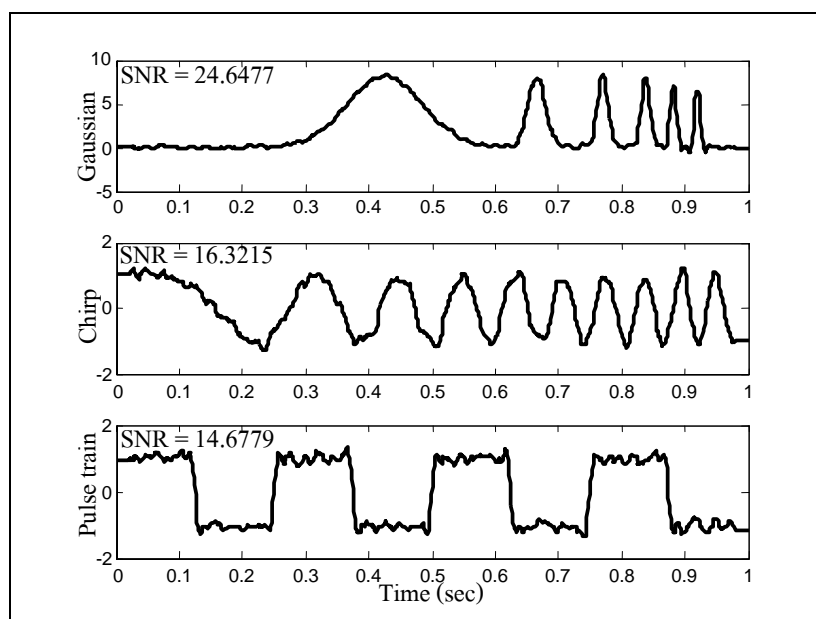


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกเลย์ ($M = 4$)

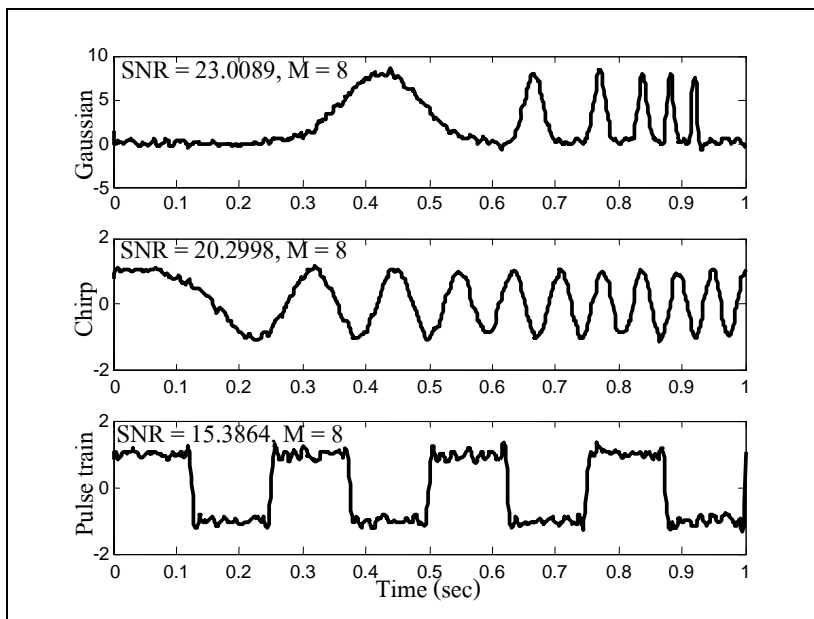


(ก) การทดสอบด้วย MATLAB

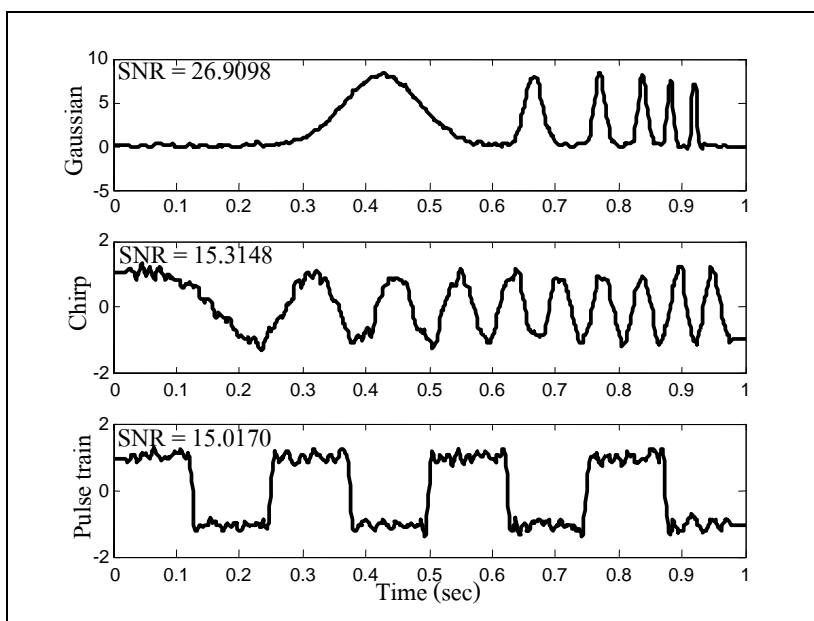


(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกลด์ (M = 6)



(ก) การทดสอบด้วย MATLAB



(ข) การทดสอบด้วย C

รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบตัวกรองสวิตชิ่ง-โกลเดย์ ($M = 8$)

ตารางที่ 5.2 แสดงผลของค่า SNR สำหรับสัญญาณทดสอบทั้ง 3 รูปแบบจากการปรับค่าพารามิเตอร์ M ของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์

ค่าพารามิเตอร์ (M)	อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR, dB)					
	สัญญาณเกาส์เซียน		สัญญาณเชิร์ป		สัญญาณขบวนพัลส์	
	MATLAB	C	MATLAB	C	MATLAB	C
0	9.6790	9.73047	8.4709	8.7647	9.8380	9.9855
2	16.5240	15.6573	23.4974	21.0159	12.4666	12.7550
4	20.8742	20.4980	23.0910	17.6484	13.9643	13.9695
6	22.9719	24.6477	21.3934	16.3210	14.8277	14.6779
8	23.0089	26.9098	20.2998	15.3145	15.3864	15.0170

จากผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ตามรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 และตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าตัวกรองดังกล่าวให้ผลการปรับเรียบสัญญาณที่ดี แต่การปรับค่าพารามิเตอร์ M จะส่งผลกับรูปร่างของสัญญาณนั้นคือ เมื่อ M มีค่าต่ำ ๆ เช่น $M = 0$ ซึ่งตัวกรองจะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับการหาค่าเฉลี่ยสัญญาณ (average filter) ทำให้สัญญาณถูกลดขนาดลง ที่ความถี่สูง ๆ แต่เมื่อ M มีค่าสูง ๆ จะทำให้ตัวกรองมีคุณสมบัติแบบผ่านตลอด (all pass filter) จึงทำให้ทุกองค์ประกอบของความถี่รวมถึงสัญญาณรบกวนปะปนออกมากับสัญญาณเอาต์พุต ดังนั้นควรเลือกค่าพารามิเตอร์ M ที่เหมาะสม

5.5 สรุป

บทที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้กับตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ จากการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองด้วย MATLAB และ C ให้ผลการทดสอบอัลกอริทึมที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองทั้งสองจะเห็นว่า ตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ให้ผลการปรับเรียบข้อมูลที่ดีกว่า แต่เมื่อพิจารณาขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเทียบกับสัญญาณอ้างอิง จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของการประมาณแบบพหุนาม ส่วนตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้จะให้ผลการปรับเรียบสัญญาณที่ไม่ดีนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ แต่ให้ผลการกรองสัญญาณรบกวนที่ดีกว่าเนื่องจากไม่ทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และยังคงรูปคลื่นของสัญญาณต้นฉบับไว้ได้ แต่เนื่องจากตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ต้องการเวลาในการปรับตัวช่วงเริ่มต้น ซึ่งค่าเริ่มต้นดังกล่าวไม่ส่งผลกับการกรองสัญญาณ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวกรอง

วีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็น โครงสร้างหลักให้กับตัวกรองที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจากคุณสมบัติของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้จำเป็นต้องทราบสัญญาณอ้างอิงที่แน่นอน และตัวกรองสควิชกี-โกเลย์ให้ผลการปรับเรียบสัญญาณที่ดี และมีคุณสมบัติคล้ายกับตัวกรองชนิดแถบผ่าน (band-pass filter) จึงใช้ประโยชน์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลัก ซึ่งจะขอก้าวในบทต่อไป

บทที่ 6

ตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก

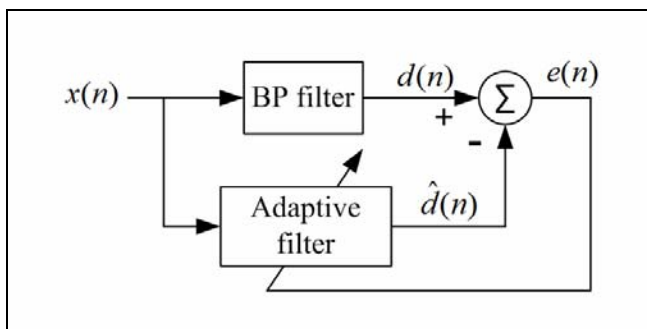
6.1 บทนำ

บทที่ 5 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้กับตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ และได้เลือกตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (AWF) ที่ให้ผลการกรองที่ดีกว่าเป็นตัวกรองหลัก ในการทำงานของ AWF ผู้ใช้จะต้องรู้สัญญาณอ้างอิง (desired signal) ที่แน่นอน ดังนั้นจึงเป็นอุปสรรคสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้งานในสถานการณ์ที่ไม่ทราบสัญญาณอ้างอิงที่แน่ชัด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเสนอแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลัก 3 แนวทาง เพื่อป้อนให้กับ AWF นั่นคือ การใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ ใช้ตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ และใช้การไหลสัญญาณจากฐานข้อมูล โดยผู้ใช้สามารถเลือกแนวทาง และพารามิเตอร์ของตัวกรอง สำหรับการสร้างสัญญาณอ้างอิงได้ตามความเหมาะสม และในบทที่ 6 นี้ยังได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้ตัวกรองที่นำเสนอกับสัญญาณจากตัวเฟ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน (BPM) ของเครื่องกำเนิดแสงสยามด้วย

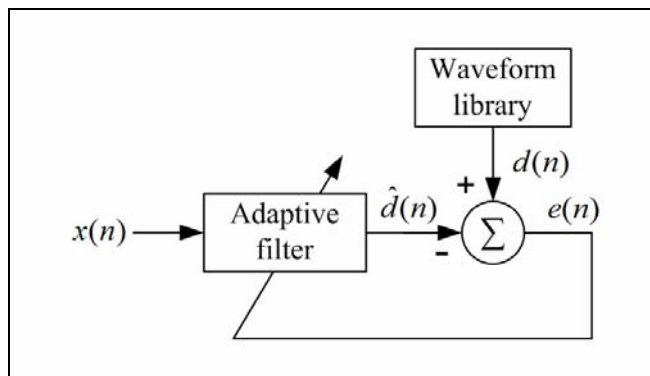
6.2 หลักการออกแบบตัวกรองเชิงเลขที่นำเสนอ

การออกแบบตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก มีวิธีการสร้างสัญญาณอ้างอิง 2 รูปแบบ *รูปแบบแรก* ใช้ตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (BP filter) ดังแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 6.1 ซึ่งในส่วน of ตัวกรองแถบความถี่ผ่าน ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ (BF) หรือตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ (SGF) ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง สำหรับตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ เป็นตัวกรองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติราบเรียบมากที่สุด (maximally flat) นั่นคือผลการตอบสนองทางความถี่ไม่ปรากฏการกระเพื่อม (ripples) ในช่วงแถบผ่านและในช่วงตัดแถบ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวกรองชนิดต่ำผ่าน สำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลัก โดยอธิบายรายละเอียดหลักการการทำงานของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งจะเห็นว่า มีพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดสำหรับการกรองสัญญาณ คือค่าอันดับของตัวกรอง (N) และค่าความถี่ คัทออฟ (f_c) สำหรับตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ เป็นตัวกรองที่อาศัยการประมาณแบบพหุนามเป็นช่วง ๆ ดังที่ได้อธิบายหลักการการทำงานไว้ในบทที่ 4 ซึ่งในการหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง จะเห็นว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสาขาวิทซกี-โกเลย์ คือ M และ K

รูปแบบที่สอง เป็นการโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล ดังแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 6.2 การโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล เป็นการใช้ประโยชน์สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยโหลดสัญญาณความถี่ที่ต้องการตรวจสอบมาเป็นสัญญาณอ้างอิง โดยสังเกตสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ และค่า SNR หากสัญญาณอินพุตมีองค์ประกอบทางความถี่ตรงกันหรือเหมือนกัน จะทำให้สัญญาณมีความเข้ากันได้ และให้ค่า SNR ที่สูง



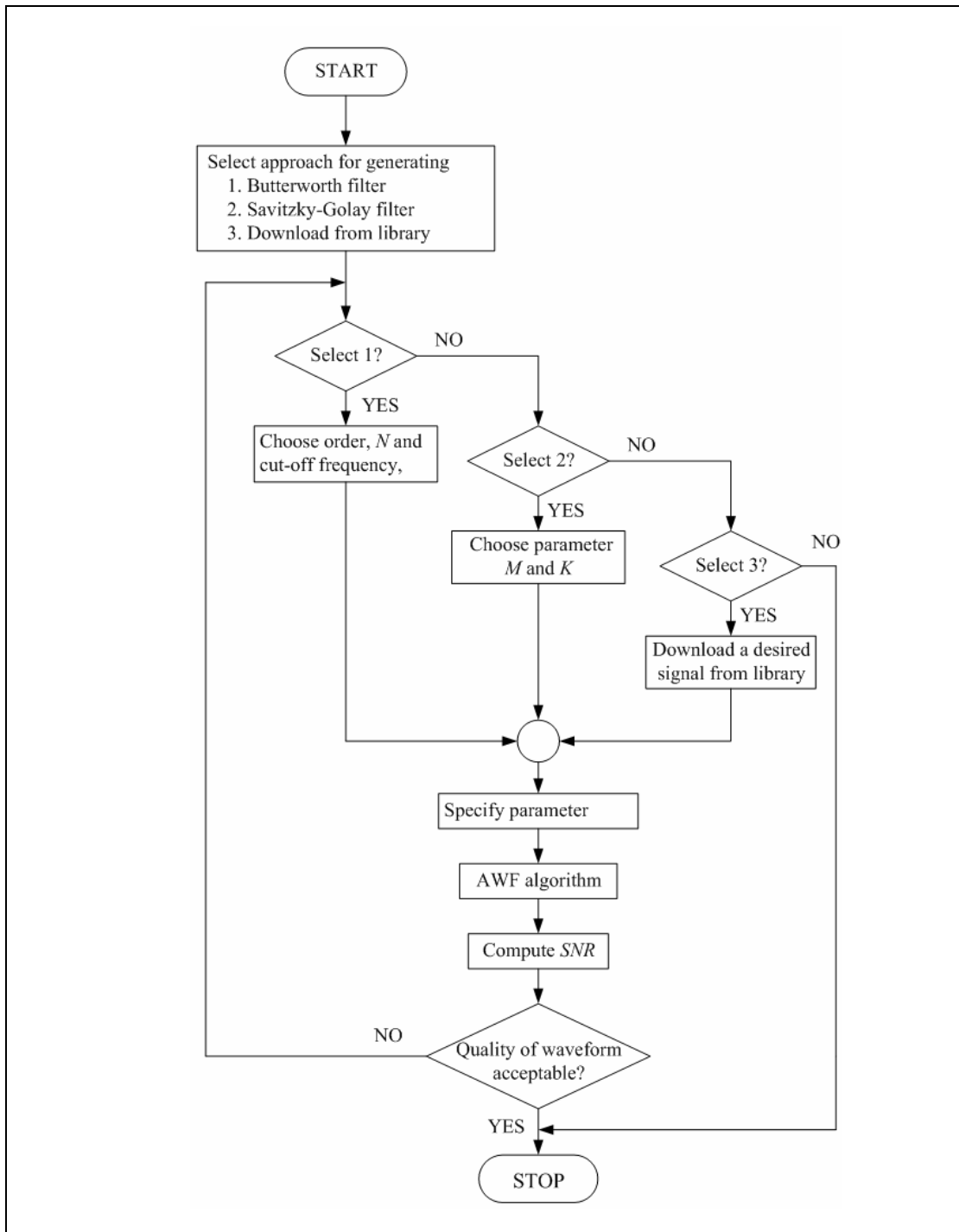
รูปที่ 6.1 โครงสร้างของ AWF ที่อาศัยตัวกรองแถบความถี่ผ่านในการสร้างสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 6.2 โครงสร้างของ AWF ที่ใช้วิธีโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล

6.3 ขั้นตอนการทำงานของตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก

ตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก สามารถแสดงได้ดังแผนภูมิในรูปที่ 6.3 โดยขั้นตอนแรกผู้ใช้งานจะต้องเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลักคือ *เลือก 1* ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ *เลือก 2* ใช้ตัวกรองสวาวิทซกี-โกเลย์ และ *เลือก 3* โหลดสัญญาณจากฐานข้อมูล โดยมีข้อความเพื่อสื่อสารกับผู้ใช้ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของตัวกรองความถี่เชิงเลขที่นำเสนอ

เมื่อผู้ใช้เลือก 1 จะเป็นการใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผู้ใช้ต้องกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกรอง นั่นคือค่าอันดับ N และ f_c ดังแสดงตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 6.5 โดยเลือกค่า $f_c = 35$ Hz และ $N = 4$ หากผู้ใช้เลือก 2 เป็นการใช้ตัวกรอง

สาขาชก-โกลีย์ ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผู้ใช้ต้องกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกรอง นั่นคือ M และ K ดังแสดงตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 6.6 โดยเลือกค่า $M = 2$ และ $K = 20$ โดยที่ K คือจุดข้อมูลฝั่งซ้ายหรือขวาของความกว้างวินโดว์ที่ต้องการเท่านั้น เนื่องจากในตัวอย่างต้องการความกว้างของวินโดว์เท่ากับ 41 ซึ่งค่า K ก็คือครึ่งหนึ่งของความกว้างของวินโดว์นั่นเอง หากผู้ใช้เลือก 3 เป็นการโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล ผู้ใช้จะต้องเลือกสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ ดังรูปที่ 6.7 แสดงตัวอย่างการเลือกสัญญาณเกาส์เซียนจากฐานข้อมูล จากนั้นเมื่อผู้ใช้เลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ นั่นคือ ค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) ดังแสดงตัวอย่างการกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวในรูปที่ 6.8 โดยกำหนดค่า $\mu = 0.001$ เพื่อให้อัลกอริทึมของ AWF ทำงาน และดำเนินการตามอัลกอริทึมของ AWF และเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิง จากนั้นนำเอาต์พุตที่ได้ไปคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เพื่อวิเคราะห์ค่าดังกล่าว ซึ่งค่า SNR ที่สูงสัญญาณจะมีคุณภาพดี แต่จะต้องพิจารณารูปคลื่นสัญญาณควบคู่ไปด้วย หากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ยังไม่ดีพอผู้ใช้สามารถกลับไปเลือกแนวทางการสร้างสัญญาณอ้างอิง รวมถึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองได้ตามความเหมาะสม

```

=====Three approaches to generate desired signal=====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach :

```

รูปที่ 6.4 การเลือกแนวทางสำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิง

```

=====Three approaches to generate desired signal=====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 1
fc = 35
N = 4

```

รูปที่ 6.5 การเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

```

=====Three approaches to generate desired signal=====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 2
Parameter M (between 0 to 8) : 2
left or right side of window size (K) : 20

```

รูปที่ 6.6 การเลือกใช้ตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

```

=====Three approaches to generate desired signal=====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 3
1 : Gaussian signal
2 : Chirp signal
3 : Pulse train signal
4 : Sine signal
Choose the signal type : 1

```

รูปที่ 6.7 การเลือกใช้การโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล

```

=====Three approaches to generate desired signal=====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 1
fc = 25
N = 4
=====AWF algorithm=====
Step-size parameter : 0.001

```

รูปที่ 6.8 การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

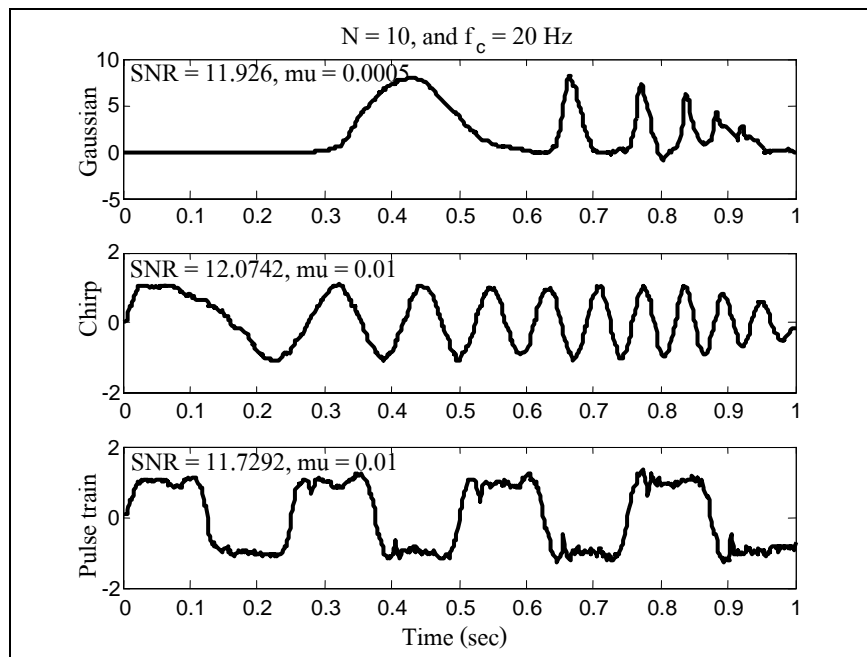
6.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวกรอง

เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่นำเสนอ ได้พิจารณาใช้ประโยชน์จากสัญญาณทดสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian signal) สัญญาณเชิร์ป (Chirp signal) และสัญญาณขบวนพัลส์ (pulse-train signal) โดยกำหนดให้มีความถี่ของการสุ่มสัญญาณเป็น 1 kHz เมื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวกรองทั้งสอง จะถูกนำไปผสมด้วยสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ที่มีค่า SNR = 10 dB ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ของบทที่ 5 เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรอง *แนวทางแรก* เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าอันดับ (N) และความถี่คutoff (f_c) ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท โดยขั้นตอนแรกกำหนดค่า $N = 10$ และปรับค่า f_c เป็น 20 30 40 และ 50 Hz ตามลำดับ ดังตารางที่ 6.1

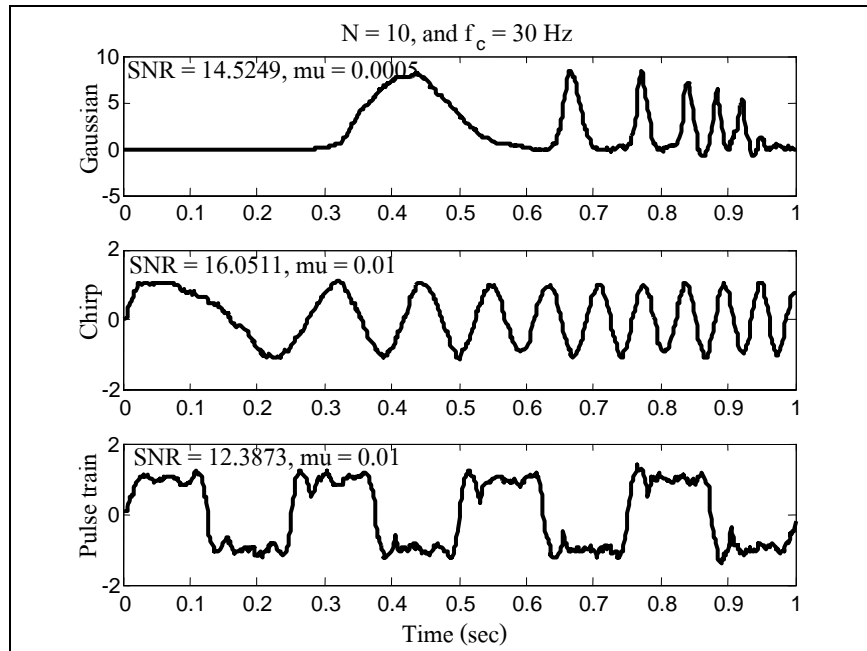
ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

N	f_c (Hz)	SNR (dB)		
		สัญญาณเกาส์เซียน	สัญญาณเชิร์ป	สัญญาณขบวนพัลส์
10	20	11.9260	12.0742	11.7292
10	30	14.5249	16.0511	12.3873
10	40	14.4689	16.0333	12.6736
10	50	14.6670	15.9007	13.1935
4	35	14.6030	16.1071	12.7746
6	35	14.5342	16.1287	12.6160
8	35	14.4893	16.1321	12.5040
10	35	14.4691	16.1353	12.4058

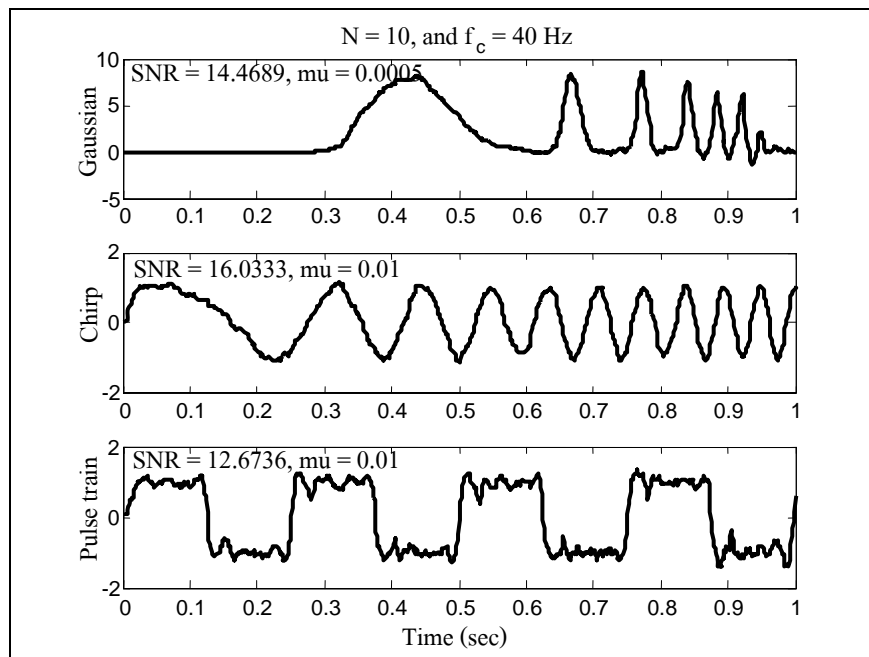
จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่าค่า f_c ที่ทำให้สัญญาณมีค่า SNR สูง อยู่ในช่วง 30-40 Hz ดังนั้นจึงเลือกค่า $f_c = 35$ Hz และเพื่อตรวจสอบว่า $N = 10$ เหมาะสมหรือไม่ จึงปรับค่า N เป็น 4 6 8 และ 10 ตามลำดับ จากผลการทดสอบเห็นว่า $N = 4$ จะให้ค่า SNR ที่สูง เพราะฉะนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ $N = 4$ โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 6.9 ถึง 6.16 ตามลำดับ



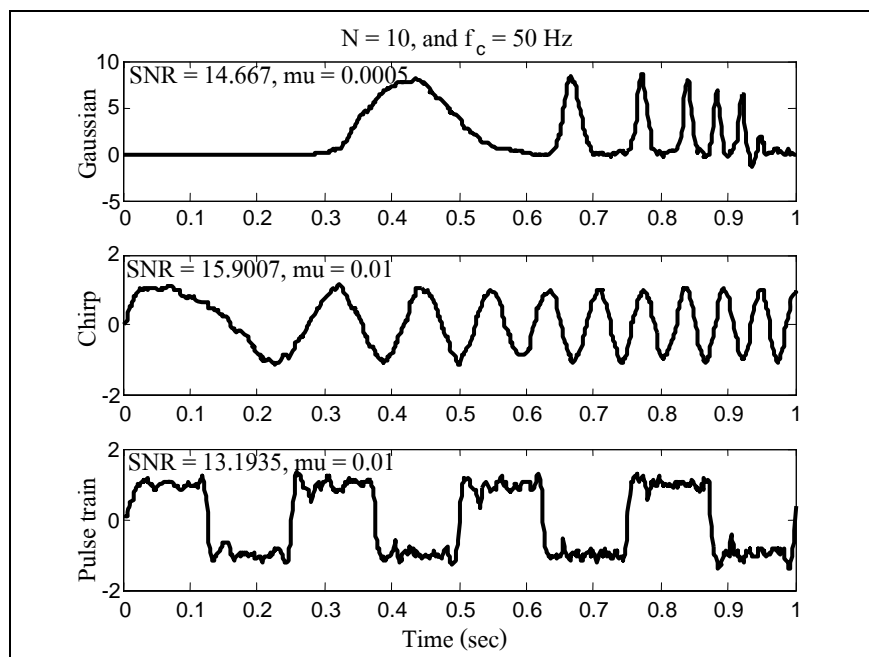
รูปที่ 6.9 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 10$ และ $f_c = 20$ Hz



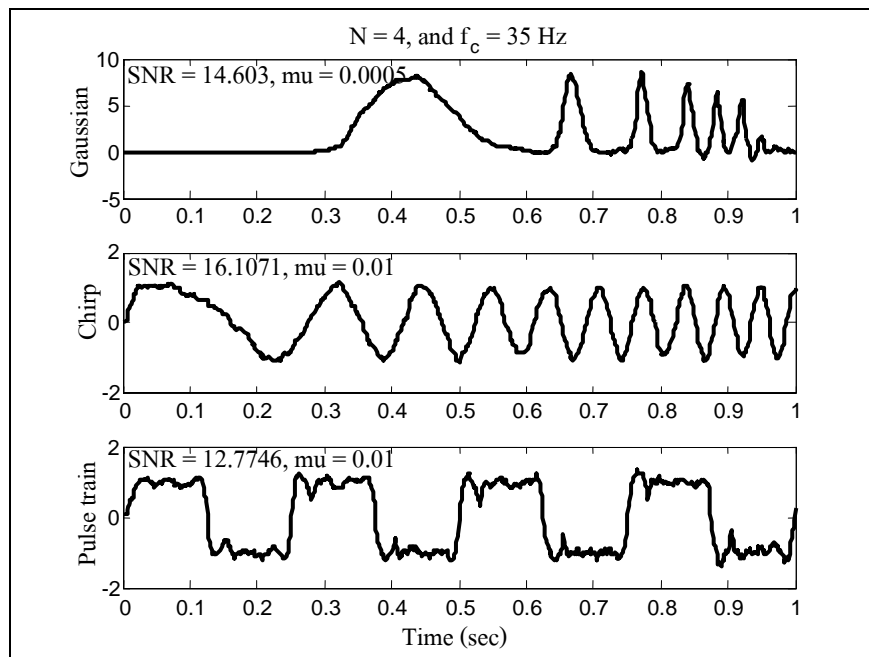
รูปที่ 6.10 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 10$ และ $f_c = 30$ Hz



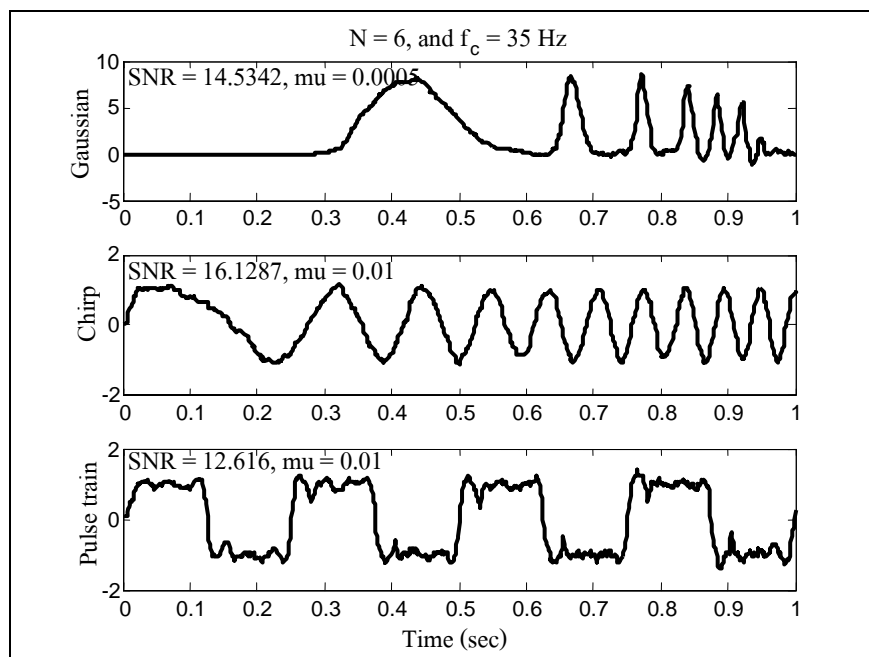
รูปที่ 6.11 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 10$ และ $f_c = 40$ Hz



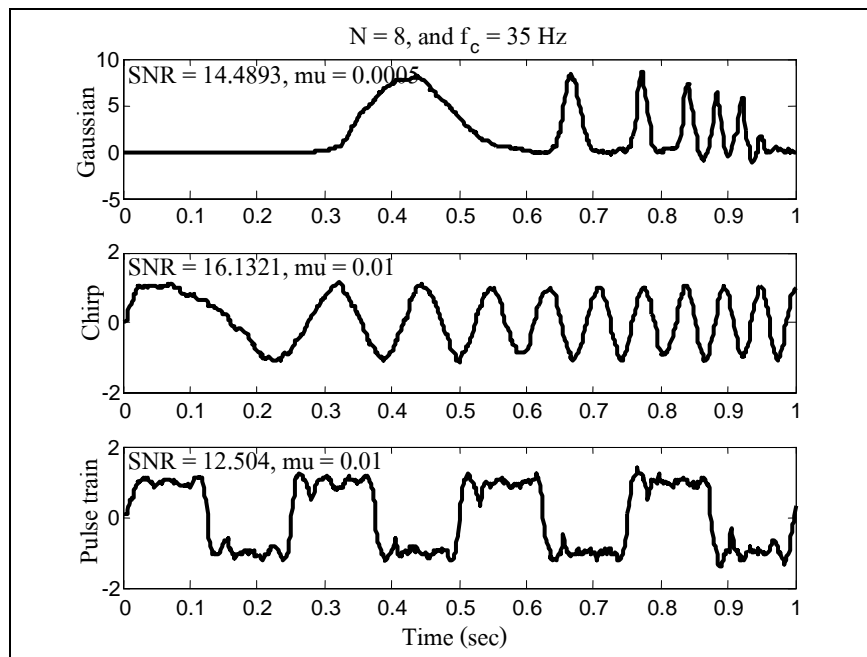
รูปที่ 6.12 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 10$ และ $f_c = 50$ Hz



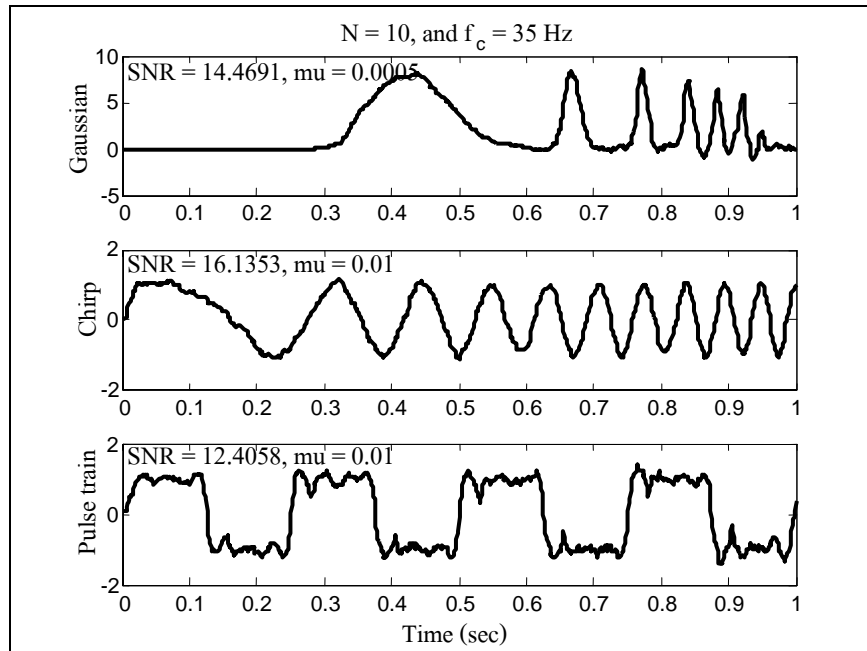
รูปที่ 6.13 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 4$ และ $f_c = 35$ Hz



รูปที่ 6.14 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 6$ และ $f_c = 35$ Hz



รูปที่ 6.15 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 8$ และ $f_c = 35$ Hz



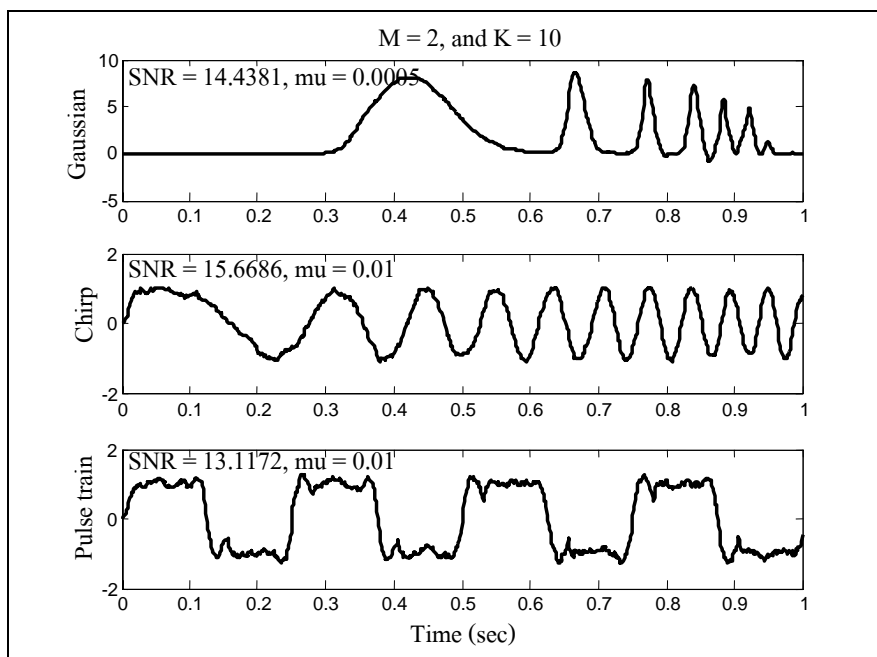
รูปที่ 6.16 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 10$ และ $f_c = 35$ Hz

แนวทางที่สอง เป็นการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ M และ K ของตัวกรองสาขาวิกกี-โกเลย์ โดยขั้นตอนแรกกำหนดค่า $M = 2$ และปรับค่า K เป็น 10, 20, 30 และ 40 ดังตารางที่ 6.2

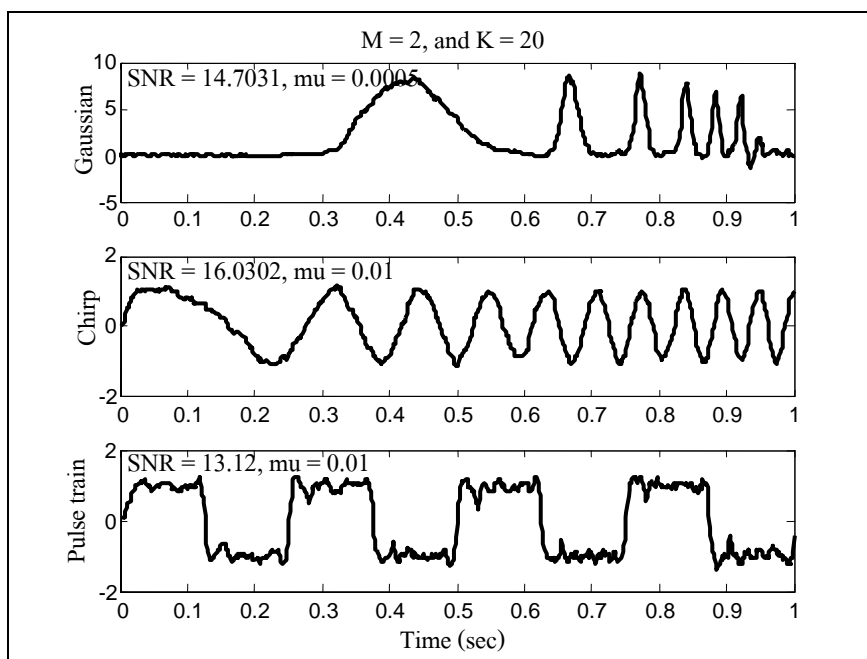
ตารางที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบค่า SNR เมื่อใช้ตัวกรองสาขาวิกกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

M	K	SNR (dB)		
		สัญญาณเกาส์เซียน	สัญญาณเชอร์ป	สัญญาณขบวนพัลส์
2	10	14.4381	15.6686	13.1172
2	20	14.7031	16.0302	13.1200
2	30	14.2349	16.2126	12.5385
2	40	13.1132	14.9993	11.9890
2	25	14.4440	16.1756	12.8503
4	25	14.7288	15.8100	13.1754
6	25	14.7062	15.6522	13.0511
8	25	14.7201	15.5630	12.9269

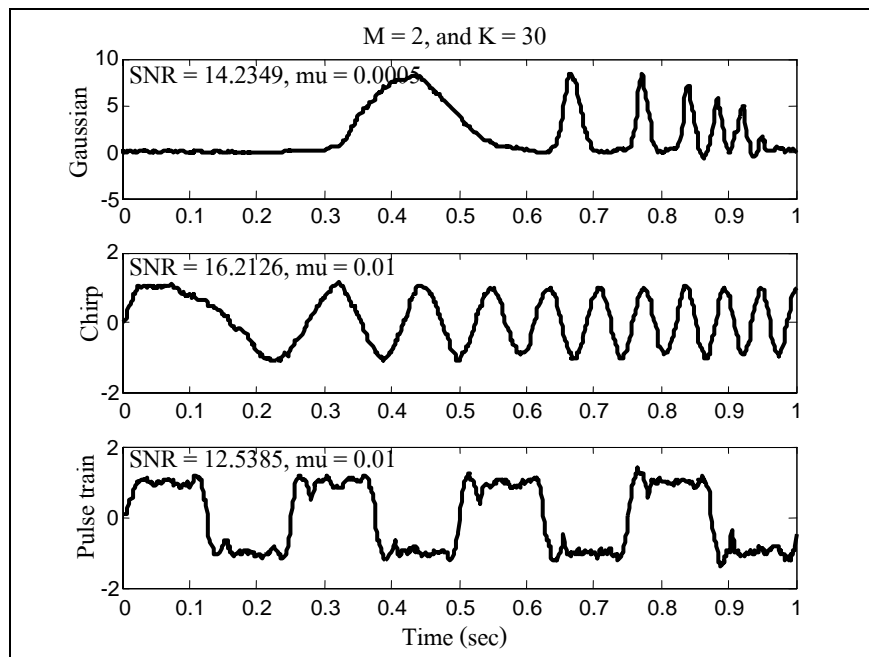
จากผลการทดสอบในตาราง สังเกตได้ว่า ค่า K อยู่ในช่วง 20-30 ทำให้สัญญาณมีค่า SNR ที่สูง ดังนั้นจึงเลือกค่า $K = 25$ และปรับค่า M เป็น 2 4 6 และ 8 ตามลำดับ จากผลการทดสอบอาจสังเกตว่า $M = 4$ จะให้ค่า SNR ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลดีในภาพรวม จึงเลือกค่า $M = 4$ สำหรับการทดสอบนี้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.17 ถึง 6.24 ตามลำดับ



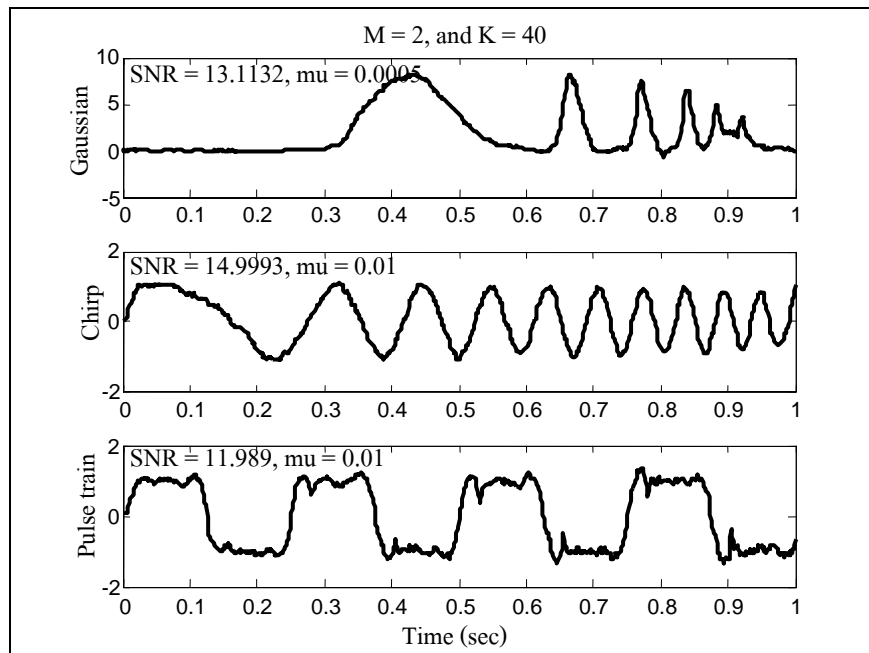
รูปที่ 6.17 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M=2$ และ $K=10$



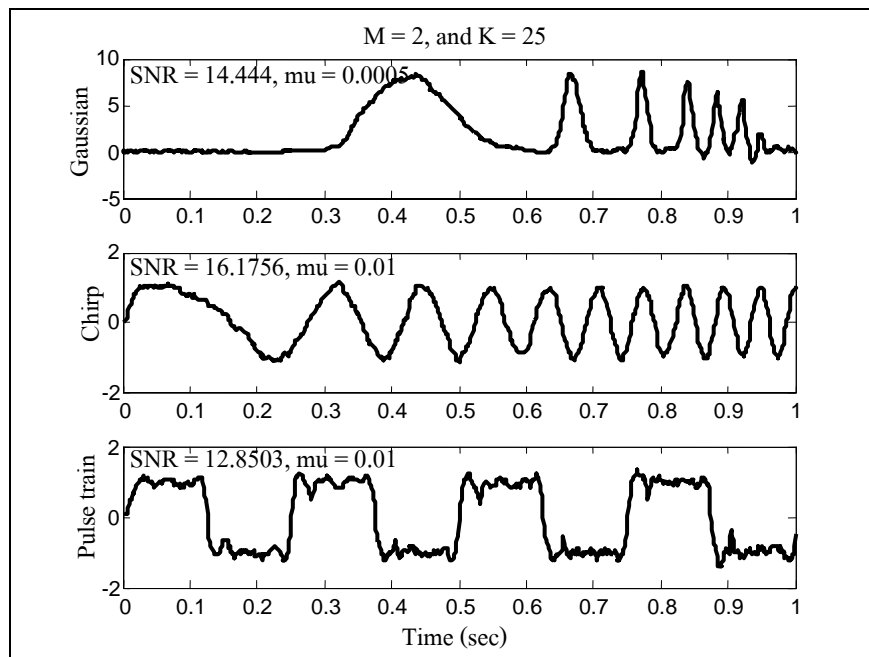
รูปที่ 6.18 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M=2$ และ $K=20$



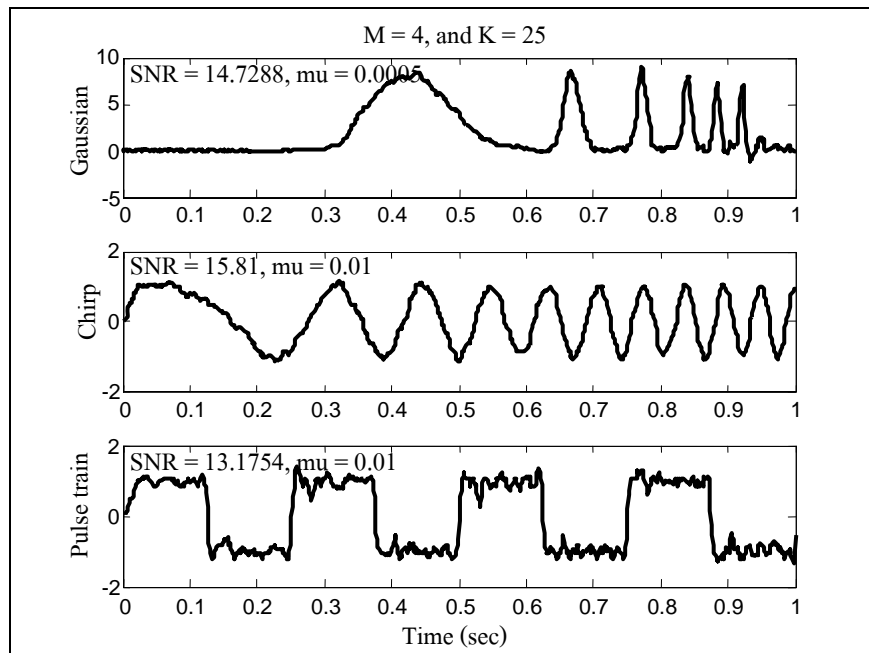
รูปที่ 6.19 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 2$ และ $K = 30$



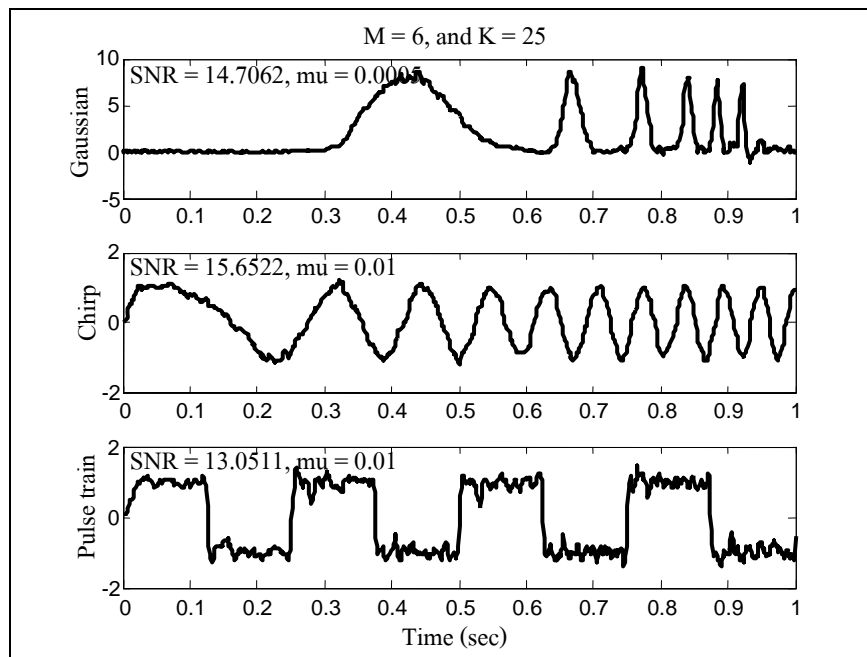
รูปที่ 6.20 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 2$ และ $K = 40$



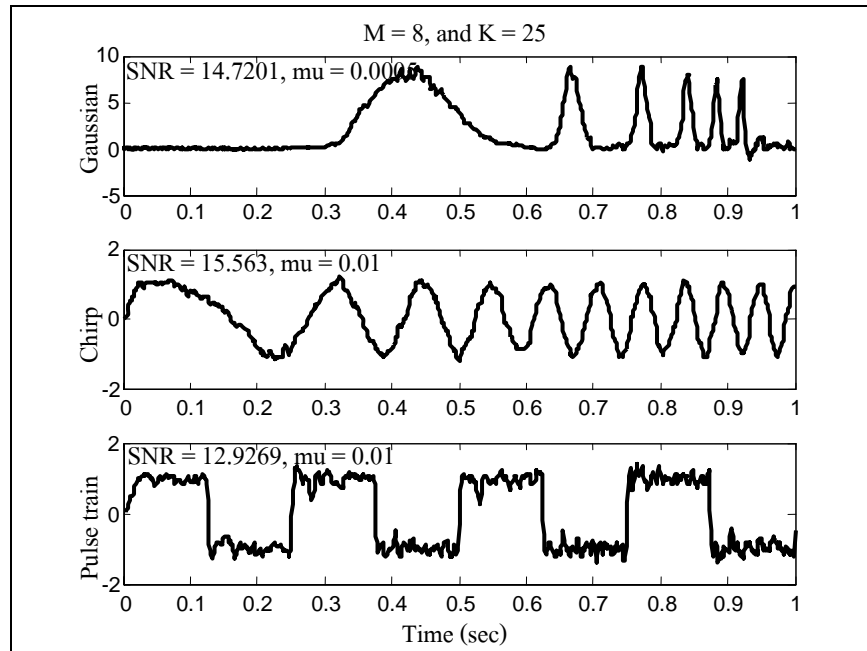
รูปที่ 6.21 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 2$ และ $K = 25$



รูปที่ 6.22 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 4$ และ $K = 25$

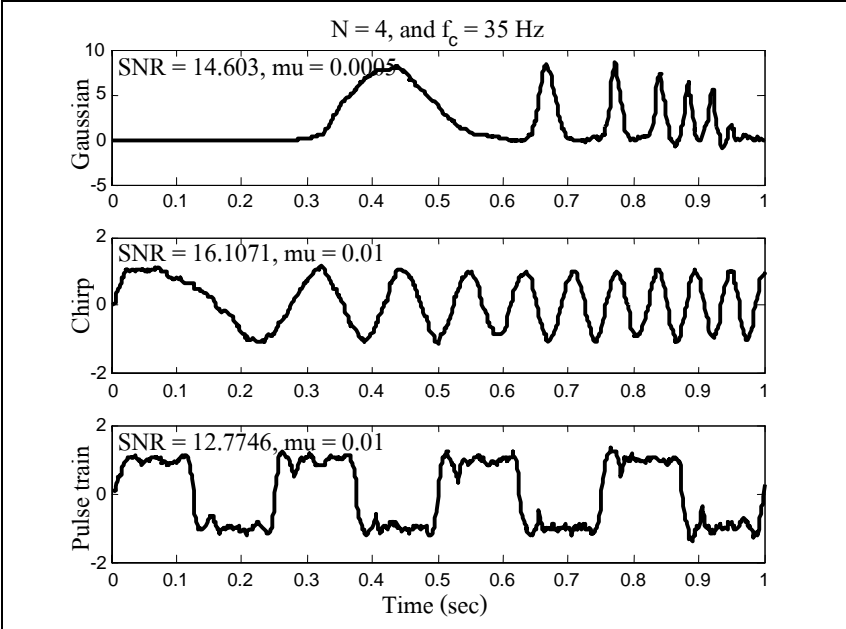


รูปที่ 6.23 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 6$ และ $K = 25$

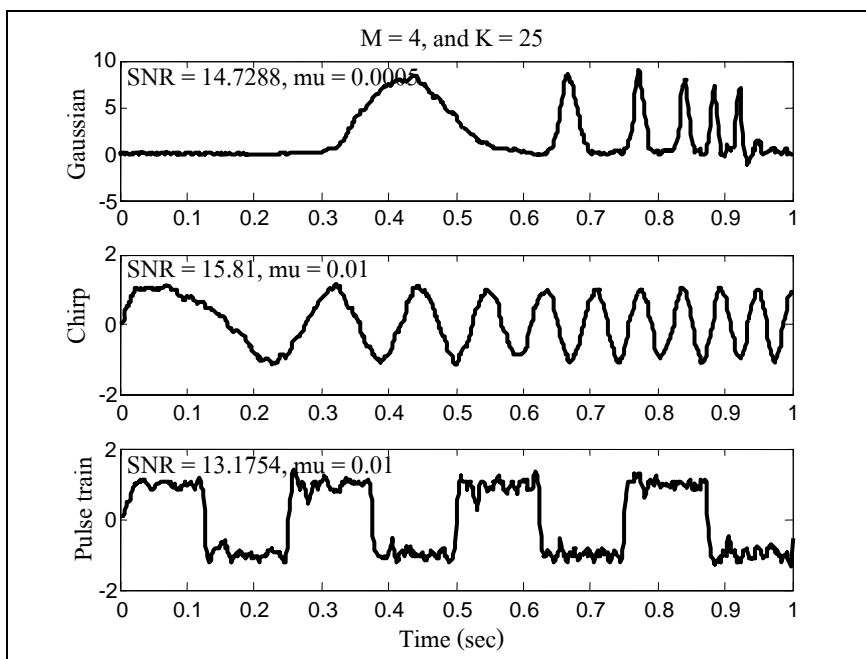


รูปที่ 6.24 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 8$ และ $K = 25$

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า ค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบในกรณี BF คือ $N=4$ และ $f_c = 35$ Hz และกรณีของ SGF คือ $M = 4$ และ $K = 25$ โดยการทดสอบ กำหนดให้ค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) เป็น 0.0005 สำหรับสัญญาณเกาส์เซียน และ 0.01 สำหรับสัญญาณเชิร์ป และสัญญาณขบวนพัลส์ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 6.25 และรูปที่ 6.26 จะเห็นว่า การสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท และตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ ในกรณีที่สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเกาส์เซียนและสัญญาณเชิร์ป จะให้ผลการปรับเรียบสัญญาณที่คล้ายกัน แต่เมื่อพิจารณากรณีที่สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณขบวนพัลส์ BF จะให้ผลการปรับเรียบที่ดีกว่า แต่ส่งผลทำให้รูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนไป และพบว่า SGF สามารถกรรูปคลื่นของสัญญาณต้นฉบับไว้ได้ ซึ่งในที่นี้พิจารณาเมื่อ SNR มีค่าใกล้เคียงกัน

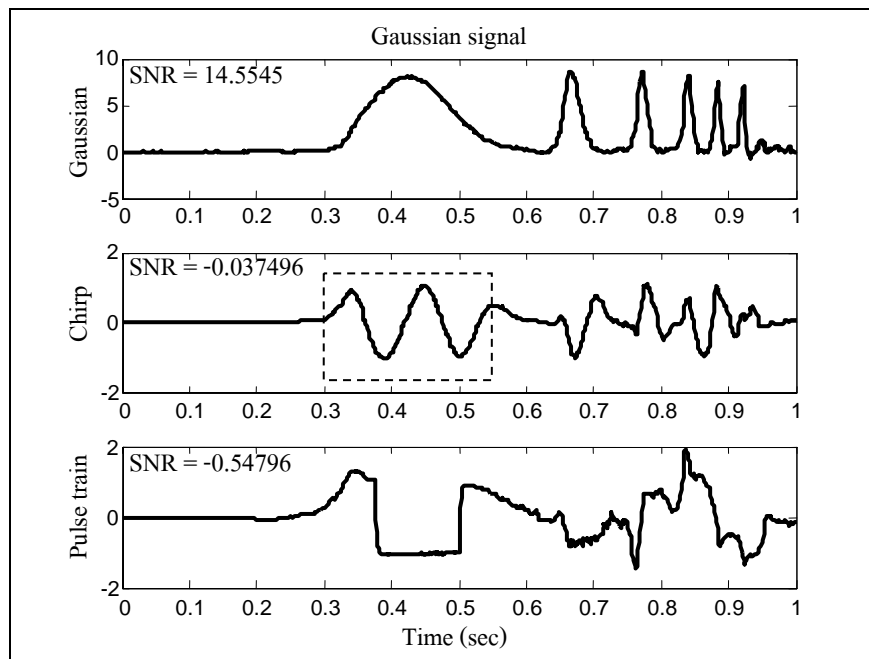


รูปที่ 6.25 ใช้ BF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $N = 4$ และ $f_c = 35$ Hz

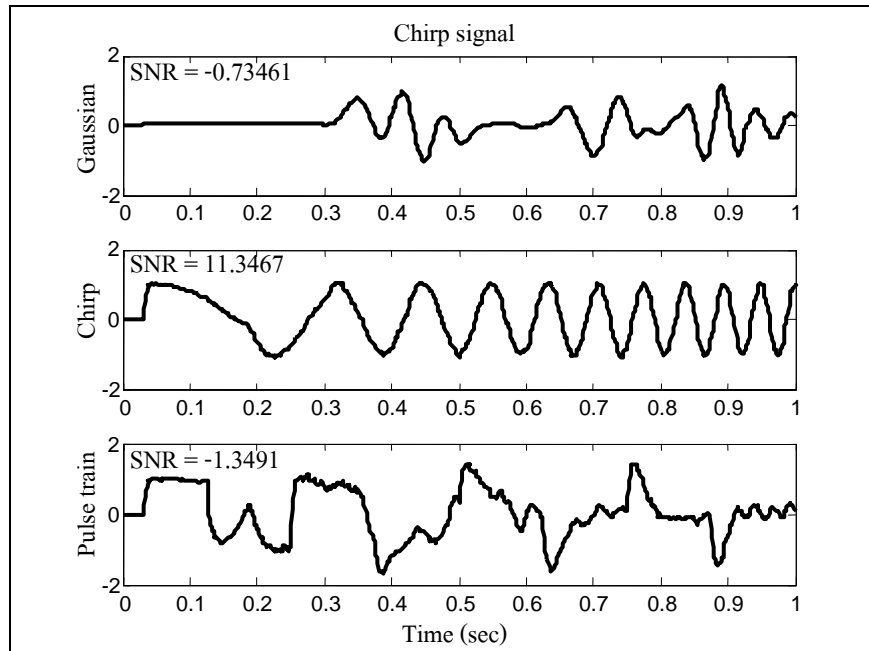


รูปที่ 6.26 ใช้ SGF ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เมื่อ $M = 4$ และ $K = 25$

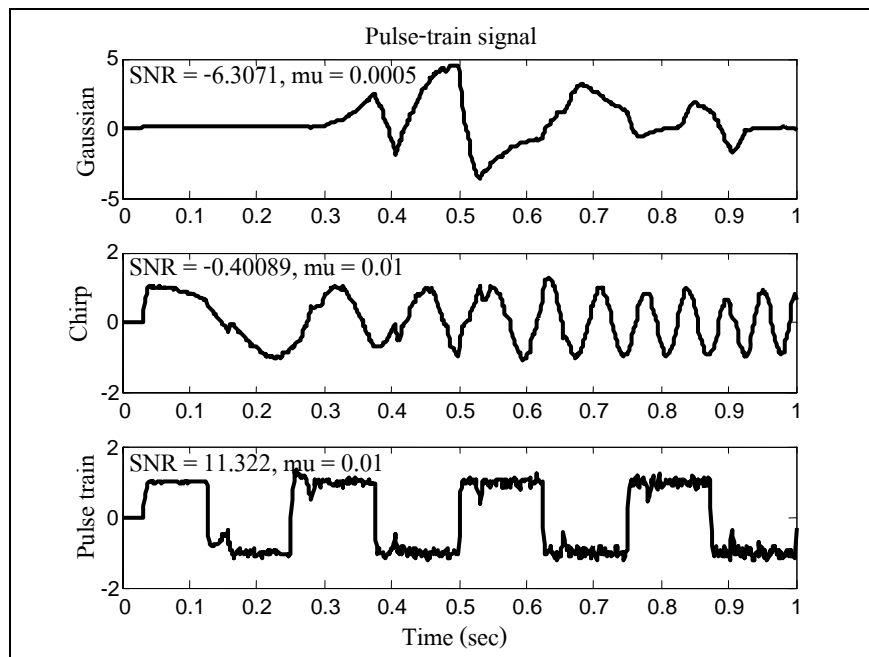
แนวทางที่สาม เป็นการโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งแนวทางนี้ สามารถใช้ประโยชน์สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุตได้โดยการโหลดสัญญาณที่ทราบองค์ประกอบความถี่ที่แน่นอนจากฐานข้อมูล นั่นคือ สัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเชิงรีป สัญญาณขบวนพัลส์ และสัญญาณซายน์ จากผลการทดสอบที่ได้เห็นว่า เมื่ออินพุตเป็นสัญญาณเกาส์เซียน และสัญญาณเชิงรีป จะให้ผลการกรองที่ดีที่สุด เนื่องจากสัญญาณมีความเข้ากันได้เฉพาะสัญญาณอินพุต และสัญญาณอ้างอิงที่ตรงกันเท่านั้น สังเกตได้จากรูปคลื่นและค่า SNR ที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 6.27 และรูปที่ 6.28 และจากรูป 6.27 กรอบเส้นประแสดงให้เห็นว่ามีช่วงเวลาสั้น ๆ ที่สัญญาณเกาส์เซียนมีองค์ประกอบความถี่ตรงกับสัญญาณเชิงรีป รูปที่ 6.29 แสดงผลการกรองเมื่ออินพุตคือสัญญาณเชิงรีป จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณขบวนพัลส์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณเชิงรีปมาก เป็นเพราะสัญญาณพัลส์มีองค์ประกอบของความถี่เป็นอนันต์ ตัวกรองจึงกรององค์ประกอบความถี่ในย่านความถี่สูง ๆ ของสัญญาณทิ้งไป และปรับตัวให้เข้ากับสัญญาณอ้างอิง แต่เมื่อสังเกตค่า SNR จะเห็นว่ามีค่าต่ำ เนื่องจากเป็นการนำสัญญาณอ้างอิง (สัญญาณขบวนพัลส์) และเอาต์พุตที่มีลักษณะคล้ายกับสัญญาณเชิงรีปดังกล่าว มาคำนวณเทียบกัน รูปที่ 6.30 แสดงผลการกรองเมื่อสัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณซายน์ จะเห็นว่า รูปคลื่นของสัญญาณมีความผิดเพี้ยน และให้ค่า SNR ที่ต่ำ แต่เมื่อพิจารณาองค์ประกอบความถี่ จะเห็นว่า มีช่วงเวลาสั้น ๆ ที่มีองค์ประกอบความถี่ที่ตรงกัน ดังแสดงในส่วนที่ล้อมไว้ด้วยกรอบเส้นประ เช่นเดียวกับกรณีของสัญญาณเกาส์เซียน



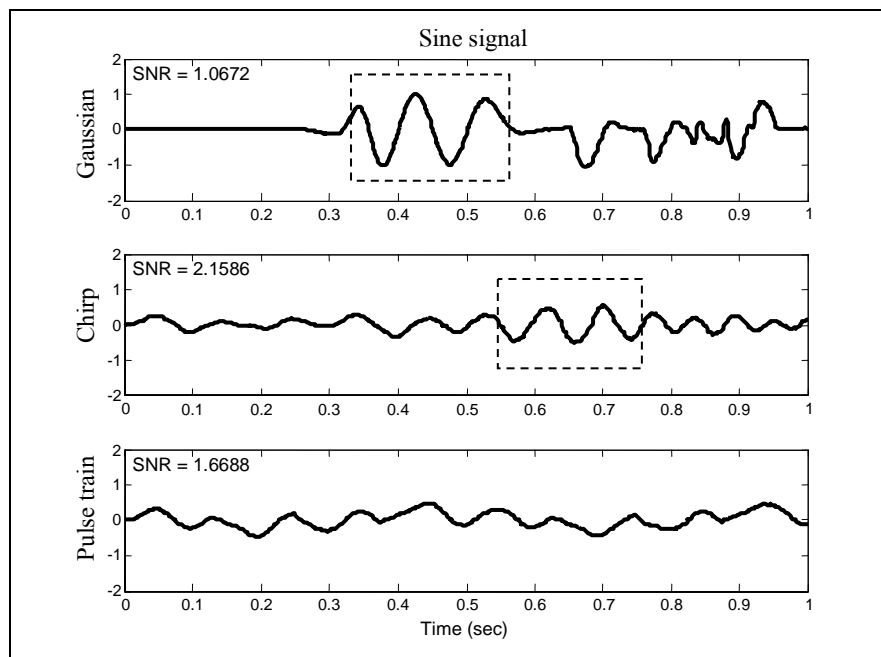
รูปที่ 6.27 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณเกาส์เซียน



รูปที่ 6.28 สัญญาณอ้างอิงได้จากการโหลดเป็นสัญญาณเชิร์ป



รูปที่ 6.29 สัญญาณอ้างอิงได้จากการไหลดเป็นสัญญาณขบวนพัลส์

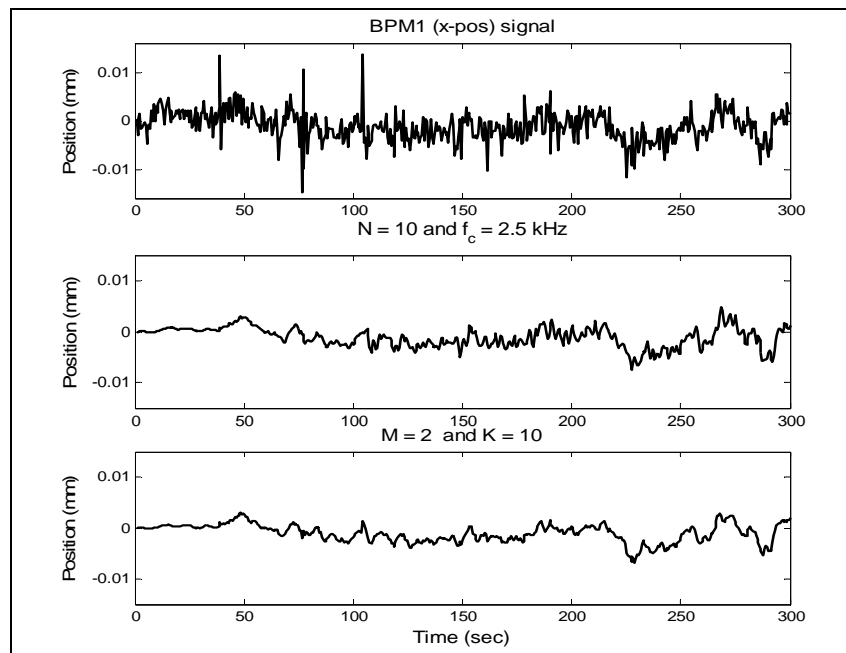


รูปที่ 6.30 สัญญาณอ้างอิงได้จากการไหลดเป็นสัญญาณซายน์

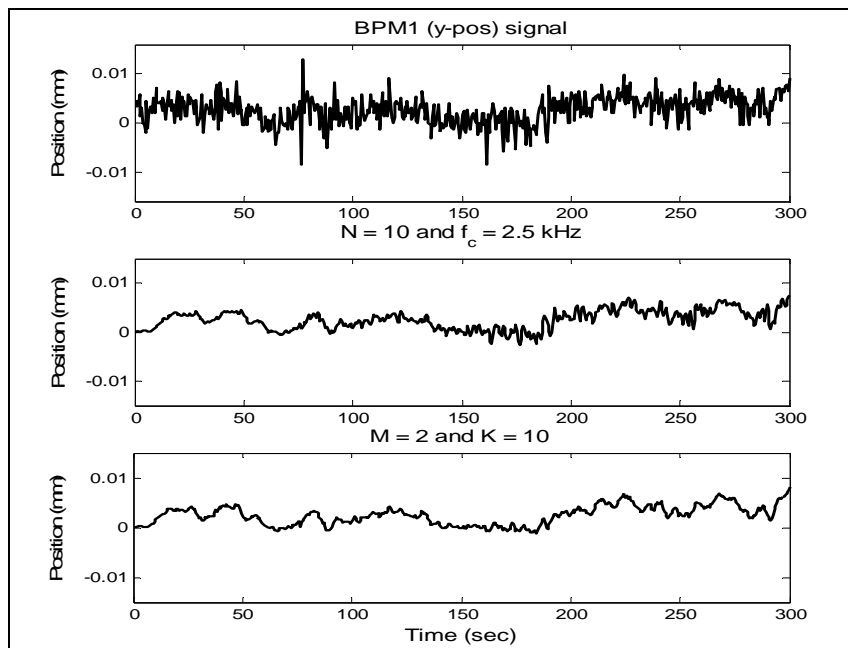
6.5 การประยุกต์ใช้ตัวกรองที่นำเสนอกับการแสดงผลในเครื่องกำเนิดแสงสยาม

การประยุกต์ใช้ตัวกรองเชิงเลขที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อปรับเรียบสัญญาณจากตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน (BPM) ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ซึ่งสัญญาณรบกวนที่ปรากฏส่วนใหญ่เป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise) (Johnson, Faust, Pierce, and Stangenes (1967), Schopper (1993), Spear and Russo (1996), and Spear (2005)) อาจมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสัญญาณรบกวนที่มีองค์ประกอบทางความถี่แน่นอน เช่น สัญญาณรบกวนที่ความถี่ 50 Hz หรือสัญญาณรบกวนที่ 100 kHz หรือสูงกว่า เนื่องมาจากการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ความถี่สูง เป็นต้น สัญญาณรบกวนในกลุ่มเหล่านี้ หากตรวจพบสามารถกำจัดไปได้ง่าย ด้วยการใช้นotch filter หรือ band-stop filter ตัวกรองเชิงเลขที่ได้พัฒนาขึ้นได้ถูกประยุกต์ใช้กับสัญญาณที่ได้จาก BPM งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกทดสอบสัญญาณจาก BPM ตัวที่ 1 และ 2 ทั้งแนวแกน x และ y โดยกำหนดพารามิเตอร์สำหรับทดสอบ ในกรณีใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง คือ $N = 10$ และ $f_c = 2.5$ kHz และในกรณีใช้ตัวกรองสวิตซ์-โกเลียในการสร้างสัญญาณอ้างอิง คือ $M = 2$ และ $K = 10$ ซึ่งแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 6.31 ถึง 6.34

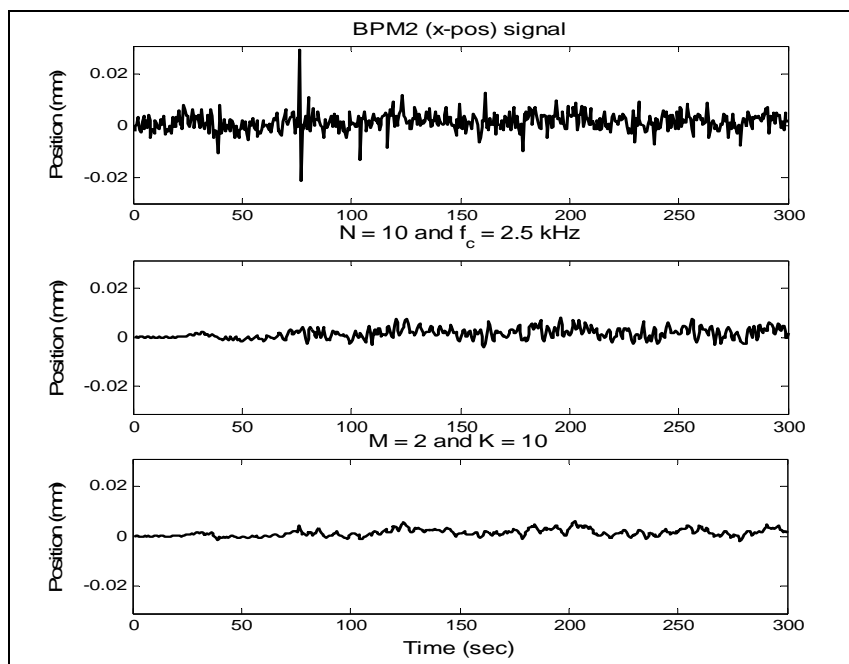
จากผลการทดสอบที่ได้เห็นว่า การใช้ตัวกรองสวิตซ์-โกเลียในการสร้างสัญญาณอ้างอิง จะให้ผลการกรองที่ดีกว่า เนื่องจากสามารถกรองสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (random noise) ได้ดีกว่า และพบว่ากรณีที่ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิงนั้น ผลการกรองยังคงมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เกิดจากค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดเท่านั้น และเมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน จะเห็นว่าตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนจะแกว่งอยู่ระหว่าง -0.01 ถึง 0.01 มิลลิเมตร ซึ่งง่ายต่อการพิจารณา และวิเคราะห์เสถียรภาพของลำอิเล็กตรอน หากต้องการให้ข้อมูลราบเรียบมากขึ้น ผู้ใช้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองใหม่ได้ตามความเหมาะสม ทั้งนี้การเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง และการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรอง จะขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ใช้เอง



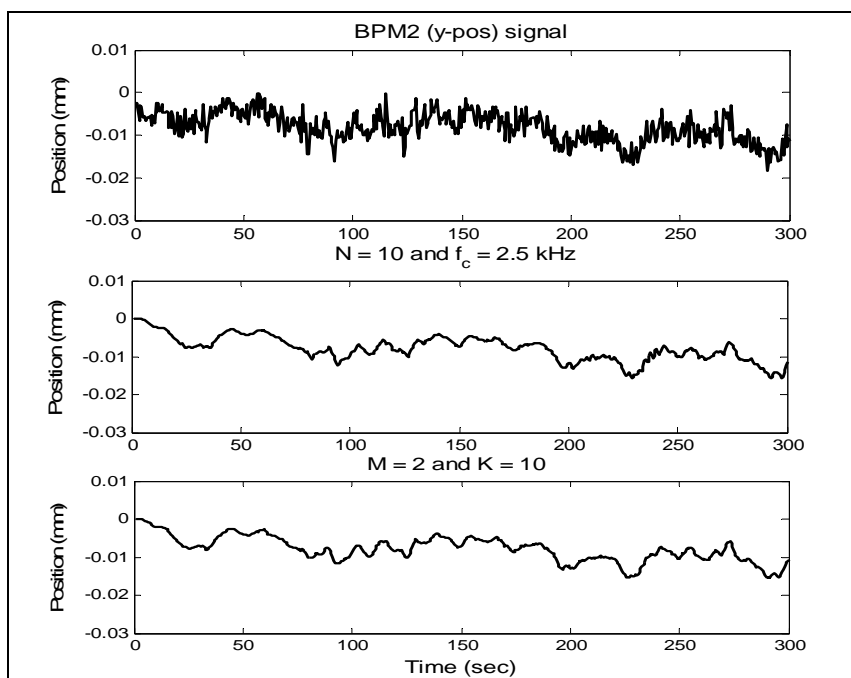
รูปที่ 6.31 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 1 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน x



รูปที่ 6.32 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 1 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน y



รูปที่ 6.33 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 2 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน x



รูปที่ 6.34 ผลการกรองสัญญาณที่ได้จาก BPM ตัวที่ 2 เมื่อวัดตำแหน่งตามแนวแกน y

6.6 สรุป

จากการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่พัฒนาขึ้น ผู้ใช้สามารถเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ให้กับตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ 2 แบบ แบบแรกเป็นการใช้ตัวกรองความถี่ผ่าน (BP filter) ที่สามารถเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทหรือตัวกรองสอว์ทซกี-โกเลย์ได้ และจากผลการทดสอบจะเห็นว่า คุณภาพของสัญญาณที่ได้มีความใกล้เคียงกัน สำหรับแบบที่สองเป็นการ โหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุต และพบว่าอัลกอริทึมของตัวกรองให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจ เนื่องจากสามารถตรวจสอบองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ โดยสังเกตจากรูปคลื่น และค่า SNR ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองได้ตามความเหมาะสม และสามารถประยุกต์ใช้กับการปรับเรียบสัญญาณที่ได้จาก BPM ในเครื่องกำเนิดแสงสวามได้เป็นอย่างดี

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษา สัญญาณรบกวน และออกแบบตัวกรองเชิงเลขเพื่อปรับเทียบข้อมูลจากตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอเล็กตรอน หรือ BPM ในเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยได้เลือกศึกษาตัวกรองเชิงเลขสองชนิดมาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวกรอง นั่นคือ ตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ และตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ การอนุวัตตัวกรองดำเนินงานด้วย MATLAB™ และ C เมื่อทดสอบการทำงานของตัวกรองทั้งสองภาษาเปรียบเทียบกันพบว่าตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ให้ผลการปรับเทียบสัญญาณที่ดี แต่จะส่งผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลงที่ความถี่สูง จึงได้สรุปเลือกตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่ให้ผลการกรองที่ดีกว่า ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดของสัญญาณเอาต์พุต เป็นตัวกรองหลักให้กับตัวกรองเชิงเลขที่พัฒนาขึ้น แต่เนื่องจากตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ที่เลือกใช้นั้น ต้องการทราบค่าที่แน่นอนของสัญญาณอ้างอิง และตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ยังให้ผลการปรับเทียบสัญญาณที่ดี ดังนั้นจึงเลือกตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลัก แต่เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงได้หลายวิธี จึงได้ออกแบบให้มีแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพิ่มเป็น 3 แนวทาง คือ ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท ใช้ตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ และใช้การโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ และเพื่อทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรอง งานวิจัยนี้ได้ใช้ประโยชน์จากสัญญาณทดสอบ 3 รูปแบบ ใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับ AWF ได้แก่ สัญญาณเกาส์เซียน (Gaussian signal) สัญญาณเชียร์ป (Chirp signal) และสัญญาณขบวนพัลส์ (pulse-train signal) โดยกำหนดให้มีความถี่ของการสุ่มสัญญาณเป็น 1 kHz สัญญาณอินพุตจะผสมด้วยสัญญาณรบกวนขาว ที่มีค่า SNR = 10 dB

อัลกอริทึมของตัวกรองเชิงเลขในขั้นตอนแรกเป็นการเลือกแนวทางการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรอง เมื่อเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ทในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผู้ใช้จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกรอง คืออันดับของตัวกรอง (N) และความถี่คัทออฟ (f_c) ถ้าผู้ใช้เลือกใช้ตัวกรองสวาทซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผู้ใช้จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกรอง คือ M และ K และถ้าผู้ใช้เลือกการโหลดสัญญาณจากฐานข้อมูล ผู้ใช้จะต้องเลือกสัญญาณจากฐานข้อมูลที่มีองค์ประกอบของความถี่ที่แน่นอน เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณอินพุต เมื่อผู้ใช้เลือกแนวทางสำหรับสร้างสัญญาณอินพุตได้แล้ว ต้องกำหนดพารามิเตอร์ของตัวกรองหลัก

นั่นคือค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) เพื่อให้อัลกอริทึมของตัวกรองทำงาน และจากเอาต์พุตที่ได้ นำไปตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณโดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือค่า SNR และสังเกตจากรูปคลื่นของสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้รูปคลื่นของสัญญาณเอาต์พุตใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง และให้ค่า SNR สูงในภาพรวมสำหรับแนวทางแรก (ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ) คือ $N = 4$ และ $f_c = 35$ Hz แนวทางที่สอง (ตัวกรองสาขาวิทชกี-โกเลย์) คือ $M = 4$ และ $K = 25$ โดยการทดสอบ กำหนดให้ค่าเกณฑ์การปรับตัว (μ) เป็น 0.0005 สำหรับสัญญาณเกาส์เซียน และ 0.01 สำหรับสัญญาณเชิงรีป และสัญญาณขบวนพัลส์ ส่วนแนวทางที่สามเป็นการไหลคสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล เพื่อให้ประโยชน์ในการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับตัวกรองหลัก ซึ่งได้แก่ สัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเชิงรีป สัญญาณขบวนพัลส์ และสัญญาณซายน์ จากผลการทดสอบพบว่า ตัวกรองสามารถตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุตได้เป็นอย่างดี โดยตรวจสอบได้จากรูปคลื่นของสัญญาณ และค่า SNR ในการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุต ยังพบอีกว่า มีช่วงเวลาสั้น ๆ ที่สัญญาณอินพุตและสัญญาณอ้างอิงมีองค์ประกอบของความถี่ที่ตรงกัน

จากผลการทดสอบข้างต้น ได้นำตัวกรองความถี่เชิงเลขประยุกต์ใช้ในการปรับเรียบสัญญาณที่ได้จากตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน หรือ BPM ในเครื่องกำเนิดแสงสยาม ซึ่งจากการปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน และเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบที่คล้ายกัน สรุปได้ว่าสัญญาณรบกวนที่ปรากฏในระบบการเดินเครื่องเร่งอนุภาคโดยปกติเป็นสัญญาณรบกวนขาว อาจมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสัญญาณรบกวนที่มีองค์ประกอบทางความถี่แน่นอน เช่น สัญญาณรบกวนที่มีความถี่ 50 Hz หรือสัญญาณรบกวนที่ 100 kHz หรือสูงกว่า เนื่องมาจากการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบสวิตซ์ที่ความถี่สูง เป็นต้น สัญญาณรบกวนในกลุ่มเหล่านี้ หากตรวจพบสามารถกำจัดไปได้ง่าย ด้วยการในตัวกรองแบบช่องบาก (notch filter) หรือ ตัวกรองแบบตัดแถบ (band-stop filter) และจากการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองกับสัญญาณจาก BPM พบว่าสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้การเลือกใช้แนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรอง ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้ใช้เอง

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากสัญญาณข้อมูลที่ได้จากตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน เป็นสัญญาณที่ไม่ทราบสัญญาณเป้าหมายที่แน่นอน จึงเป็นเพียงการยอมรับได้ของผู้ใช้เท่านั้น ดังนั้นควรมีการวิเคราะห์ผลการทดสอบ และกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ จากนักวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรง เพื่อได้ผลที่แม่นยำและเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป

2. ในการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรอง อาจมีการเพิ่มแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองความถี่เชิงเลข เพื่อให้ผู้ใช้เลือกใช้ได้หลากหลาย

3. เมื่อมีการใช้ประโยชน์จากตัวกรองเชิงเลขที่ได้พัฒนาในการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยการโพลคสัญญาณที่ทราบองค์ประกอบความถี่ที่แน่นอนจากฐานข้อมูลที่มีอยู่ หากตรวจพบว่า มีองค์ประกอบความถี่ที่ไม่ต้องการปะปนอยู่กับสัญญาณอินพุต ควรมีการพัฒนาตัวกรองเชิงเลข ให้สามารถกรองความถี่ดังกล่าวทิ้งไป

รายการอ้างอิง

- ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล และคณะ (2542). เครื่องกำเนิดแสงสยาม. *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*. : 22-31.
- ศุภกร รักใหม่ และ ประพษ์ กล้ายสุบรรณ. (2546). แสงซินโครตรอนการศึกษาโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของสาร. *Lab Today*.: 51-61.
- ศุภชัย ประวันตา (2550). การออกและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วที่มีพิกัดกระแส 20 แอมแปร์ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.: 8-20.
- Akhaee, M.A. Ameri, A., and Marvasti, F.A. (2005). Speech Enhancement by Adaptive Noise Cancellation in the Wavelet Domain. *IEEE Int. Conf. Communications and Signal Processing*.: 719-723.
- Bakkali, S. (2007). Using Savitzky-Golay filtering method to optimize surface phosphate deposit “disturbances”. *CIINDET Conf. Engineering*. 10(35): 62-67.
- Bergoz Instrumentation. (1996). *Beam Position Monitor User’s Manual*. National Synchrotron Research Center (NSRC).
- Chen, J., Benesty, J., and Huang, Y. (2006). Time delay estimation in room acoustic environments: an overview. *EURASIP Jour. Applied Signal Processing*. 2006(1):1-19.
- Christiansen, R. W., Chabries, D. M., and Andersen, D. (1985). Noise reduction in speech using a modified LMS adaptive predictive filter. *IEEE Anal. Conf. Medicine and Biology Society*.: 1100-1102.
- Ellison, J.A., Newberger, B.S., and Shih, H.-J. (1991). Effect of RF Phase Noise on the SSC Beam. *Proc. IEEE Conf. Particle Accelerator*. 1: 216-218.
- Ergin, A., Vilabo M. J., Tchouassi A., Greenel R., and Thomas G. A., (2003), Detection and analysis of glucose at metabolic concentration using Raman spectroscopy, *Proc. IEEE Conf. Bioengineering*.: 337-338.
- Feuer, A., and Weinstein, E. (1985). Convergence Analysis of LMS Filters with Uncorrelated Gaussian Data. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 31(1): 222-230.

- Guiñón, J. L., Ortega, E., García-Antón, J., and Pérez-Herranz, V. (2007). Moving Average and Savitzki-Golay Smoothing Filters Using Mathcad. **ICEE Int. Conf. Engineering Education.**: 39.
- Haykin, S. (2002). **Adaptive Filter Theory**. (4th Edition). Prentice-Hall.
- Johnson, L., Faust, J., Pierce, W., and Stangenes, M. (1967). A Low Frequency Beam Position Monitor. **IEEE Trans. Nuclear Science.**: 1106-1110.
- Kuo, S. M., and Morgan, D. R. (1996) Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. New York. Wiley.
- Musznicki, P., Schanen, J.L., Granjon, P., and Chrzan, P.J. (2006). EMI estimation for DC/AC hard switching converter using Wiener filter. **IEEE Int. Conf. Power Electronics and Motion Control.**: 473-478.
- Nachaiyaphum, K., Sujitjorn, S., and Rugmai, S. (2008). Adaptive Wiener Filter Based Numerical Filter with an Application to Beam Position Monitoring. **WSEAS Trans. Electronics.** 2(5): 40-52.
- Nakajima, I., Juzoji, H., Zhao, Y., and Hamamoto, N. (2001), DSP Technology in Wearable Satellite Terminals for ETS-VIII < Savitzky - Golay smoothing filter >, **Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications.**: 131-136.
- Nikolaev, N., Nikolov, Z., Gotchev, A., and Egiavarian, K. (2000). Wavelet domain Wiener filtering for ECG denoising using improved signal estimate. **Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing.** 6: 3578-3581.
- Press, W. H., and Teukolsky, S. A. (1990) Savitzky-Golay Smoothing Filters. **Computers in Physics.**, 4(1990): 669-672.
- Savitzky, A., and Golay, M. J. E. (1964). Smoothing differentiation of data by simplified least squares procedures. **Anal. Chem.** 36(8): 1627-1639.
- Schopper, H. (1993). **Advances of Accelerator Physics and Technologies**. World Scientific Publishing.
- Spear, J. D. (2005). Shot noise in x-ray measurements with *p-i-n* diodes. **Rev. Sci. Instrum.** 76: 076101-076101-3.

- Spear, J. D., and Russo, R. E. (1996). Low noise position sensitive detector for optical probe beam deflection measurements. **Rev. Sci. Instrum.** 67(7): 2481-2484.
- Steffen, P. (1986). On digital smoothing filters: A brief review of closed form solutions and two new filter approaches. **Circuit, Systems, and Signal Processing**, 5: 187-210.
- Sun, J., and Shu, G. (2006). Adaptive controller for vehicle active suspension generated through LMS filter algorithms. **Transactions of Tianjin University**. 12(3): 163-168.
- Troparevsky, M. I., and D'Attellis, C.E. (2004). On the convergence of the LMS algorithm in adaptive filtering. **Signal Processing**. 84(2004): 1985-1988.
- Unser, K. B. (1996). New Generation Electronics Applied to Beam Position Monitors. **Proc. AIP Conf. 7th Beam Instrumentation Workshop**. (390): 527-535.
- Wang, J., and Miltien, L. B. (1996). Adaptive LMS filters for cellular CDMA overlay situations. **IEEE Jour. Communications**. 14(9): 1548-1559.

ภาคผนวก ก

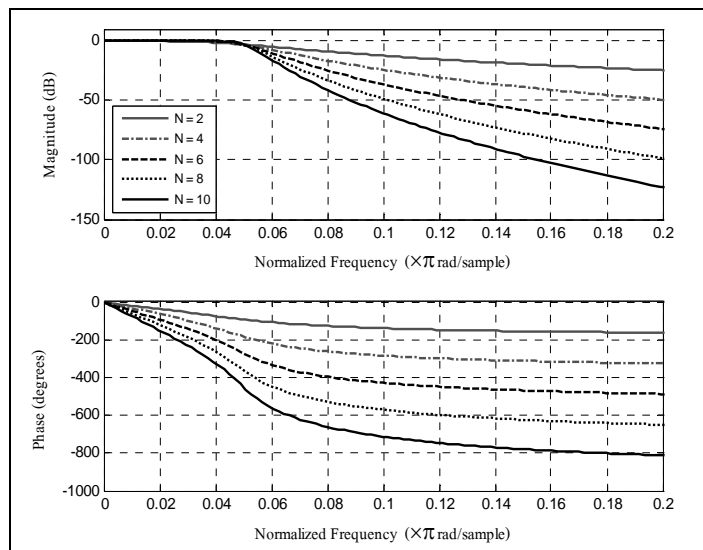
หลักการทำงานของตัวกรองแบตเตอรี่เวิร์ช

หลักการทำงานของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ

ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธถูกกล่าวถึงครั้งแรกในบทความของ Stephen Butterworth ซึ่งเป็นตัวกรองอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่อาศัยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองกรอง ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ก.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของตัวกรองกรองบัตเตอร์เวิร์ธ

ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ เป็นตัวกรองผ่านความถี่ที่มีผลการตอบสนองทางความถี่ที่ราบเรียบที่สุดในช่วงแถบผ่าน (maximally flat) นั่นคือผลการตอบสนองทางความถี่ไม่ปรากฏการกระเพื่อม (ripples) ในช่วงแถบผ่าน และลดลงจนเป็นศูนย์ในช่วงหยุดผ่าน



รูปที่ ก.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธชนิดต่ำผ่าน

รูปที่ ก.1 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ ที่มีทั้งผลตอบสนองทางขนาด และเฟส พบว่าเมื่ออันดับของตัวกรองเพิ่มขึ้น ย่านผ่านความถี่จะแคบลง และแต่ละค่าของ N ผลการตอบสนองทางเฟสจะเกิดการค่าต่ำสุดที่ค่า ๆ หนึ่ง คือ เมื่อ N เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 เฟสต่ำสุดที่ -150° , -320° , -490° , -650° และ -810° ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของตัวกรองเชิงเส้น และจากผลตอบสนองทางเฟส เมื่อ N มีค่าสูงขึ้น ตัวกรองมีลักษณะทางเฟสที่ต่ำลงมากขึ้น นั่นคือ

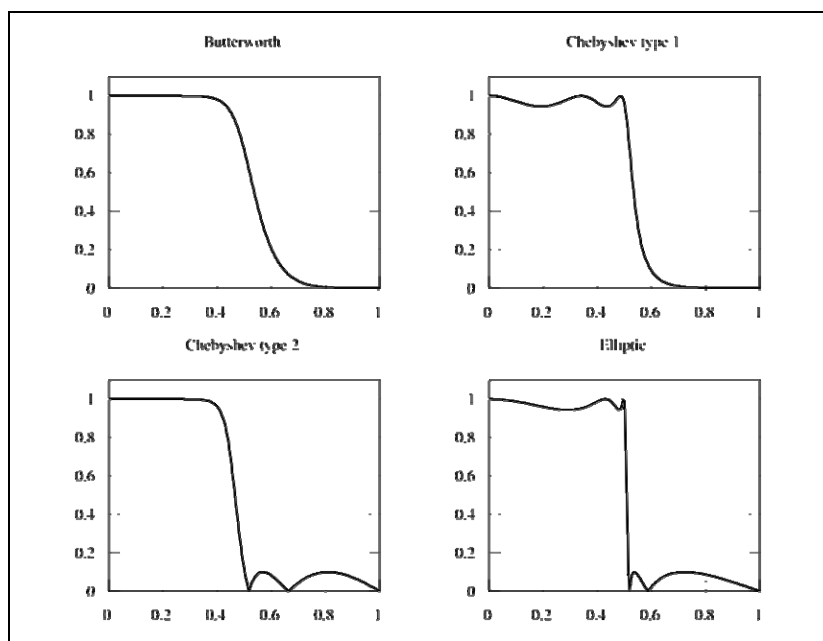
G_0

คือ ค่าอัตราขยายดีซี มีค่าเท่ากับ 1

จากรูปที่ ก.2 และสมการที่ (ก-1) จะเห็นว่าเมื่อค่าอันดับของตัวกรอง (N) มีค่าเข้าใกล้อนันต์ เกณฑ์จะกลายเป็นฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยม และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่คutoff จะผ่านด้วยอัตราขยาย G_0 ส่วนความถี่ที่สูงกว่าความถี่คutoff จะถูกตัดทิ้งไป ซึ่งคุณสมบัตินี้คือ ตัวกรองอุดมคตินั่นเอง เมื่ออันดับของตัวกรองมีค่าน้อย ๆ จะทำให้ช่วงตัดแถบจะมีความชันน้อยลง และจะเห็นว่าที่ $\omega = 0$ ขนาดกำลังสอง เท่ากับ 1 และที่ $\omega = \omega_c$ ขนาดกำลังสองจะลดลงไปเหลือ 0.5 หรือ -3 dB

ก.2 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่กับตัวกรองเชิงเส้นอื่น ๆ

รูปที่ ก.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธกับตัวกรองเชบิเชฟ (Chebyshev type I/type II) และตัวกรองเอลลิปติก (elliptic filter) โดยมีอันดับของตัวกรองเท่ากับ 5 จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าความชันของผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธจะลดลงจนเป็นศูนย์ช้ากว่าตัวกรองชนิดอื่น แต่มีคุณสมบัติที่เหนือกว่าตัวกรองทั้ง 3 ชนิด คือไม่ปรากฏการกระเพื่อมในช่วงแถบผ่านและในช่วงตัดแถบ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองหลักอีกแนวทางหนึ่ง



รูปที่ ก.3 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่มีตัวกรองวีเนอร์
แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก


```

#####
% โปรแกรมทดสอบสมรรถนะของตัวกรองเชิงเลขที่มี AWF เป็นโครงสร้างหลัก
% ที่พัฒนาด้วย MATLAB™
% โดย ขวัญใจ นาชัยภูมิ (มกราคม 2551) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####
function main(filename)
% main('data')
% Three approaches to generate desired signal :
% 1. generated by Butterworth filter.
% 2. generated by Savitzky-Golay filter.
% 3. generated by Download waveform.
% close all;clear all;clc;

run(filename)

%***** Input signal *****
load gaussian
% load chirp
% load pulse

% x = xlsread('data_xy.xls', 5, 'h2:h554');
% t = xlsread('data_xy.xls', 5, 'A2:A554');

disp('=====Three approaches to generate desired signal=====');
disp('1 : Butterworth filter. ');
disp('2 : Savitzky-Golay filter. ');
disp('3 : Downloaded waveform. ');
disp('=====');
int = input('Choose the approach : ');

% Start program loop
if int==1
    fs = 1000;           % sampling frequency (Hz)
    N = input(' N = '); % filter order
    fc = input(' fc = '); % cut-off frequency (Hz)
    FN = fs / 2;
    % Normalized Cutoff frequency (rad/s)
    Fc = fc / FN;
    [b, a] = butter(N, Fc, 'low'); % coeffs of filter
    d = filter(b, a, x);          % filter output (BF)
    figure()
    freqz(b,a,512)

elseif int==2
    % M is filter order or order of polynomial
    % K is window size
    M = input(' Parameter M (between 0 to 8) : ');
    if M==0
        K = input(' left or right side of window size (K): ');
    elseif M==1

```

```

    K = input(' left or right side of window size (K): ');
elseif M==2
    K = input(' left or right side of window size (K): ');
elseif M==3
    K = input(' left or right side of window size (K): ');
elseif M==4
    K = input(' left or right side of window size (K): ');
elseif M==5
    K = input(' left or right side of window size (K): ');
else M==6
    K = input(' left or right side of window size (K): ');
end

A=ones(2*K+1, M+1);
for j=M:-1:1,
    A(:,j) = [-K:K]'.*A(:,j+1);
End

[Q, R] = qr(A);
c = Q(:, M+1) / R(M+1, M+1);
n = length(x);           % points of data
d = filter(c(2*K+1:-1:1),1,x);
d(1:K) = x(1:K);
d(K+1:n-K) = d(2*K+1:n);
d(n-K+1:n) = x(n-K+1:n);    % Desired signal
figure(2)
freqz(c,1,512)
else
    disp('1 : Gaussian signal');
    disp('2 : Chirp signal');
    disp('3 : Pulse train signal');
    disp('4 : Sine signal');
    D = input('Choose the signal type : ');

    Data           % Download desired signal.

    if D==1
        d = d1;           % Desired signal is Gaussian signal
    elseif D==2
        d = d2;           % Desired signal is chirp signal
    elseif D==3
        d = d3;           % Desired signal is pulse-train signal
    else
        d = d4;           % Desired signal is sine signal
    end
end

% Start AWF algorithm.
disp('=====AWF algorithm=====');

mu = input('Step-size parameter : ');
N = 32;

```

```
ha = adaptfilt.lms(N, mu);
y = filter(ha, x, d);

% i = 1 : length(signal);
% Asignal = sum(abs(signal(i)).^2);
% Anoise = sum(abs(signal(i) - y(i)).^2);
% SNR = 10*log10(Asignal / Anoise);

% Plot graph
figure()
% subplot(312),
plot(t, y, 'k', 'LineWidth', 1.5); hold on
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Gaussian');
% ylabel('Chirp');
% ylabel('Pulse train');
title('Gaussian signal');
text(0.01, 0.9, {'SNR = ', num2str(SNR), ', mu = ', ...
    num2str(mu)}), 'Units', 'normalized');

% ***** END PROGRAM *****%
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้

```

#####
//โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (AWF)
//โดย ขวัญใจ นาชัยภูมิ (มกราคม 2551) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####
#include <iostream>
#include <iterator>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <numeric>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <iomanip>
#include <cmath>

typedef std::vector<double> VectorT;

// t is time (sec)
// x is noisy signal (input signal)
// d is dedired signal
// N is window size
VectorT adaptive_wiener_filter(const VectorT& t,
                               const VectorT& x,
                               const VectorT& d,
                               const double mu,
                               const int N)
{
    int signal_size = x.size();
    VectorT y(signal_size, 0);
    VectorT w(N, 0);
    VectorT x1(N, 0);
    double error;

    for (int n = N; n <= signal_size; n++)
    {
        std::reverse_copy(x.begin()+n-N, x.begin()+n, x1.begin());
        y[n-1] = std::inner_product(w.begin(), w.end(), x1.begin(), 0.0);
        error = d[n-1] - y[n-1]; // compute error

        for (int j = 0; j < w.size(); j++)
            // update coefficients
            w[j] = w[j] + (mu * error * x1[j]);
    }
    return y;
}

void load_data(const std::string& filename, VectorT& t, VectorT& x, VectorT& d)
{
    std::ifstream fin(filename.c_str());
    if (!fin.is_open())

```

```

{
    std::cerr << "File not found!\n";
    exit(1);
}

std::string record_line;
double c1, c2, c3;
// read every line from the stream
while (std::getline(fin, record_line))
{
    std::istringstream ss(record_line);
    if (ss >> c1 >> c2 >> c3)
    {
        t.push_back(c1);
        d.push_back(c2);
        x.push_back(c3);
    }
}
fin.close();
}

void save_data(const std::string& filename,
              const VectorT& t, const VectorT& x,
              const VectorT& d, const VectorT& y)
{
    std::ostringstream output;
    for (int n = 0; n < t.size(); n++)
    {
        output << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << t[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << d[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << x[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << y[n] << std::endl;
    }

    std::ofstream fout(filename.c_str());

    fout << output.str();
    fout.close();
}

// compute signal to noise ratio (SNR)
double calc_snr(const VectorT& d, const VectorT& y)
{
    double asignal = 0.0;
    double anoise = 0.0;
    int k;

    for (k = 0; k < d.size(); k++)
    {
        asignal += pow(fabs(d[k]), 2.0);
    }
}

```

```
        anoise += pow(fabs(d[k] - y[k]), 2.0);
    }

    double snr = 10.0 * log10(asignal / anoise);
    return snr;
}

int main(void)
{
    VectorT t, x, d, y;

    // load data waveform filename.txt generated by MATLAB
    load_data("pulse_signal.txt", t, x, d);

    // adaptive Wiener filter (AWF) algorithm
    y = adaptive_wiener_filter(t, x, d, 0.0001, 32);

    // save output to filename output.txt
    save_data("output.txt", t, x, d, y);

    // use function calc_snr
    double SNR = calc_snr(d, y);

    // show SNR value on command prompt
    std::cout << "SNR = " << SNR << std::endl;

    return 0;
}

//***** END PROGRAM *****/
```

ภาคผนวก ง

โปรแกรมการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสาวิทชกี-โกเลย์


```

#####
//โปรแกรมภาษาซีที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของตัวกรองสภาวะทวิ-โกลด์ (SGF)
//โดย ขวัญใจ นาชัยภูมิ (มกราคม 2551) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
#####
#include <iostream>
#include <iterator>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <numeric>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <iomanip>
#include <cassert>
#include <cmath>

typedef std::vector<double> VectorT;
typedef std::vector<VectorT> MatrixT;

/** Display matrix */
std::ostream& operator <<(std::ostream& xout, const MatrixT& mat)
{
    const int row = mat.size();
    const int col = mat[0].size();

    if (row == 0)
    {
        xout << std::endl << std::setw(10) << "[ ]" << std::endl;
        return xout;
    }

    xout << std::endl;
    for(int i = 0; i < row; i++)
    {
        if (i == 0)
            xout << " [";
        else
            xout << " ";

        for(int j = 0; j < col; j++)
        {
            xout << std::setprecision(6) << std::scientific << mat[i][j];

            if (j != col-1)

                xout << ", ";
        }

        if (i != row-1)
            xout << ";" << std::endl;
    }
}

```

```

    }
    xout << "]" << std::endl;

    return xout;
}

/** QR - Orthogonal-triangular decomposition. */
void mat_qr(const MatrixT& a, MatrixT& q, MatrixT& r)
{
    const int m = a.size();
    const int n = a[0].size();

    assert(m >= n);

    int i, j, k;
    VectorT rdiag(n);

    MatrixT mat = a;

    for (k = 0; k < n; k++)
    {
        // Compute 2-norm of k-th column without under/overflow.
        double norm = 0.0;
        for (i = k; i < m; i++)
            norm = hypot(norm, mat[i][k]);

        if (norm != 0.0)
        {
            // Form k-th Householder vector.
            if (mat[k][k] < 0.0)
                norm = -norm;

            for (i = k; i < m; i++)
                mat[i][k] /= norm;

            mat[k][k] += 1.0;

            // Apply transformation to remaining columns.
            for (j = k+1; j < n; j++)
            {
                double s = 0.0;
                for (i = k; i < m; i++)

                    s += mat[i][k] * mat[i][j];

                s = -s / mat[k][k];

                for (i = k; i < m; i++)
                    mat[i][j] += s * mat[i][k];
            }
        }
    }
}

```

```

    rdiag[k] = -norm;
}

// Calculate Q
q = MatrixT(m, VectorT(n));

for (k = n-1; k >= 0; k--)
{
    for (i = 0; i < m; i++)
        q[i][k] = 0.0;

    q[k][k] = 1.0;

    for (j = k; j < n; j++)
    {
        if (mat[k][k] != 0.0)
        {
            double s = 0.0;

            for (i = k; i < m; i++)
                s += mat[i][k] * q[i][j];

            s = -s / mat[k][k];

            for (i = k; i < m; i++)
                q[i][j] += s * mat[i][k];
        }
    }
}

// Calculate R
r = MatrixT(n, VectorT(n));

for (int t = 0; t < n; t++)
{
    for (int j = 0; j < n; j++)
    {
        if (t < j)

            r[t][j] = mat[t][j];
        else if (t == j)
            r[t][j] = rdiag[t];
        else
            r[t][j] = 0.0;
    }
}

/** Matrix multiplication */
MatrixT mat_multiply(const MatrixT& a, const MatrixT& b)

```

```

{
  const int l_row = a.size();
  const int l_col = a[0].size();
  const int r_row = b.size();
  const int r_col = b[0].size();

  // check matrix multiply rule.
  assert(l_col == r_row);
  MatrixT ret_mat(l_row, VectorT(r_col));

  for(int i = 0; i < l_row; i++)
  {
    for(int j = 0; j < r_col; j++)
    {
      double sum = 0.0;

      for (int k = 0; k < l_col; k++)
        sum += a[i][k] * b[k][j];
      ret_mat[i][j] = sum;
    }
  }

  return ret_mat;
}

/**
 * filter : the Matlab equivalent function.
 *
 *  $a[0]*y[n] = b[0]*x[n] + b[1]*x[n-1] + \dots + b[nb]*x[n-nb]$ 
 *  $\quad - a[1]*y[n-1] - \dots - a[na]*y[n-na]$ 
 *
 * If a[0] is not equal to 1, the filter coefficients are normalized by a[0].
 */
VectorT filter(const VectorT& _b, const VectorT& _a, const VectorT& x)
{
  assert(_b.size() != 0 &&
         _a.size() != 0 &&
         x.size() != 0);

  assert(_a[0] != 0.0);

  int n, nb, na;

  VectorT b = _b;
  VectorT a = _a;
  VectorT y(x.size());

  // If a[0] is not equal to 1, the filter coefficients are normalized by a[0].
  if (a[0] != 1.0)
  {
    for (nb = 0; nb < b.size(); nb++)

```

```

        b[nb] /= a[0];
        for (na = 0; na < a.size(); na++)
            a[na] /= a[0];
    }

    VectorT outputs(a.size());
    VectorT inputs(b.size());
    for (n = 0; n < x.size(); n++)
    {
        outputs[0] = 0.0;
        inputs[0] = x[n];

        for (nb = b.size()-1; nb > 0; nb--)
        {
            outputs[0] += b[nb] * inputs[nb];
            inputs[nb] = inputs[nb-1];
        }
        outputs[0] += b[0] * inputs[0];

        for (na = a.size()-1; na > 0; na--)
        {
            outputs[0] += -a[na] * outputs[na];
            outputs[nb] = outputs[nb-1];
        }

        y[n] = outputs[0];
    }

    return y;
}

/**
 * Savitzky Golay filter
 *
 *
 * PARAMETERS:
 * M : Cut-off frequency (between 0 to 6)
 *
 * K : Noise reduction factor
 *     M = 0; 2 <= K <= 15
 *     M = 1; 3 <= K <= 25
 *     M = 2; 4 <= K <= 35
 *     M = 3; 5 <= K <= 55
 *     M = 4; 6 <= K <= 65
 *     M = 5; 7 <= K <= 38
 *     M = 6; 8 <= K <= 20
 */
// t is time (sec)
// x is noisy signal (input signal)
// M is filter order (order of polynomial)

```

```

// K is window size
VectorT savitzky_golay_filter(const VectorT& t,
                              const VectorT& x,
                              const int M,
                              const int K)
{
    int i, j;
    int npoints = x.size();
    VectorT y;
    MatrixT q, r;
    VectorT c(2*K+1);

    VectorT kk;
    for (i = -K; i <= K; i++)
        kk.push_back(i);

    for (j = M-1; j >= 0; j--)
    {
        for (i = 0; i < 2*K+1; i++)
            a[i][j] = kk[i] * a[i][j+1];
    }

    mat_qr(a, q, r);

    for (i = 0; i < 2*K+1; i++)
        c[i] = q[i][M] / r[M][M];

    std::reverse(c.begin(), c.end());
    y = filter(c, VectorT(1, 1.0), x);

    // Compute the steady state output
    for (i = 0; i < npoints; i++)
    {
        if (i < npoints-K)
            y[i] = y[i+K];
    }

    // Compute the transient on
    for (i = 0; i < K; i++)
    {
        y[i] = 0;

        for (j = 0; j < 2*K+1; j++)
            y[i] += c[j] * x[(2*K)-j];
    }

    // Compute the transient off
    for (i = npoints-K; i < npoints; i++)
    {
        y[i] = 0;
    }
}

```

```

        for (j = 0; j < 2*K+1; j++)
            y[i] += c[j] * x[(npoints-1)-j];
    }
    return y;
}

/**
 * Load data from file
 *
 * -----
 * | time | desired-signal | noisy-signal |
 * -----
 */
void load_data(const std::string& filename,
              VectorT& t, VectorT& d, VectorT& x)
{
    std::ifstream fin(filename.c_str());
    if (!fin.is_open())
    {
        std::cerr << "File not found!\n";
        exit(1);
    }

    std::string record_line;

    double c1, c2, c3;
    // read every line from the stream
    while (std::getline(fin, record_line))
    {
        std::istringstream ss(record_line);
        if (ss >> c1 >> c2 >> c3)
        {
            t.push_back(c1);
            d.push_back(c2);
            x.push_back(c3);
        }
    }

    fin.close();
}

/**
 * Save data to file
 *
 * -----
 * | time | desired-signal | noisy-signal | filtered-signal |
 * -----
 */
void save_data(const std::string& filename,
              const VectorT& t, const VectorT& d,

```

```

        const VectorT& x, const VectorT& y)
    {
        std::ostringstream output;
        for (int n = 0; n < t.size(); n++)
        {
            output << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << t[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << d[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << x[n] << "\t"
                << std::setw(25) << std::setprecision(16) << std::scientific << y[n] << std::endl;
        }
        // std::cout << output.str() << std::endl;

        std::ofstream fout(filename.c_str());

        fout << output.str();
        fout.close();
    }

double calc_snr(const VectorT& d, const VectorT& y)
{
    double asignal = 0.0;
    double anoise = 0.0;
    int k;
    int K = 20;

    // choose steady state interval
    for (k = 2*K+1; k < d.size()-2*K+1; k++)
    {
        asignal += pow(fabs(d[k]), 2.0);

        anoise += pow(fabs(d[k] - y[k]), 2.0);
    }

    // computed signal to noise ratio (SNR)
    double snr = 10.0 * log10(asignal / anoise);
    return snr;
}

int main(void)
{
    VectorT t, d, x, y;

    int K = 20;

    // load input data
    // ('gaussian_signal','chirp_signal','pulse_signal')
    load_data("pulse_signal.txt", t, d, x);

    // output filter
    y = savitzky_golay_filter(t, x, 0, K);
    save_data("output.txt", t, d, x, y);
}

```



```
        double SNR = calc_snr(d, y);
    std::cout << "SNR = " << SNR << std::endl;

    return 0;
}

//***** END PROGRAM *****/
```

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

Nachaiyaphum, K., Sujitjorn, S., and Rugmai, S. (2008). A Numerical Filter Based on an Adaptive Wiener Filter. **WSEAS Proc. Int. Conf. Signal Processing.**: 134-139.

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Nachaiyaphum, K., Sujitjorn, S., and Rugmai, S. (2008). Adaptive Wiener Filter Based Numerical Filter with an Application to Beam Position Monitoring. **WSEAS Trans. Electronics.** 2(5): 40-52.

ภาคผนวก ฉ

คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

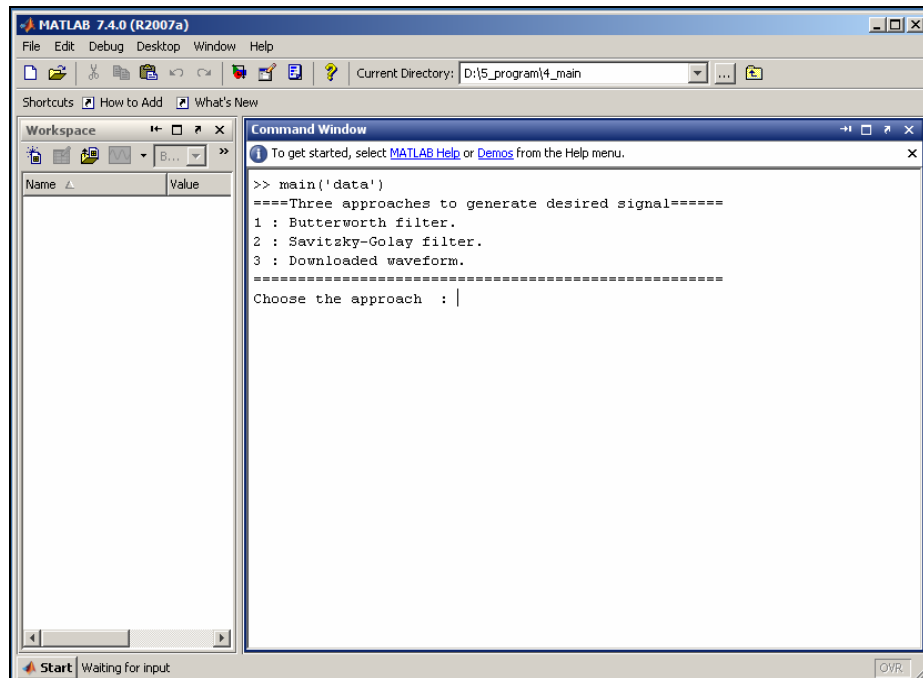
โปรแกรม main.m เป็นโปรแกรมการทดสอบอัลกอริทึมของตัวกรองเชิงเลข ที่มีตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถใช้งานได้กับ MATLAB 7.0 หรือเวอร์ชันที่สูงกว่า โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนของสัญญาณอินพุตที่ป้อน ส่วนของการสร้างสัญญาณอ้างอิง และส่วนของอัลกอริทึมของตัวกรองวีเนอร์แบบปรับตัวได้ (AWF) ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานดังต่อไปนี้

ฉ.1 การป้อนสัญญาณอินพุต

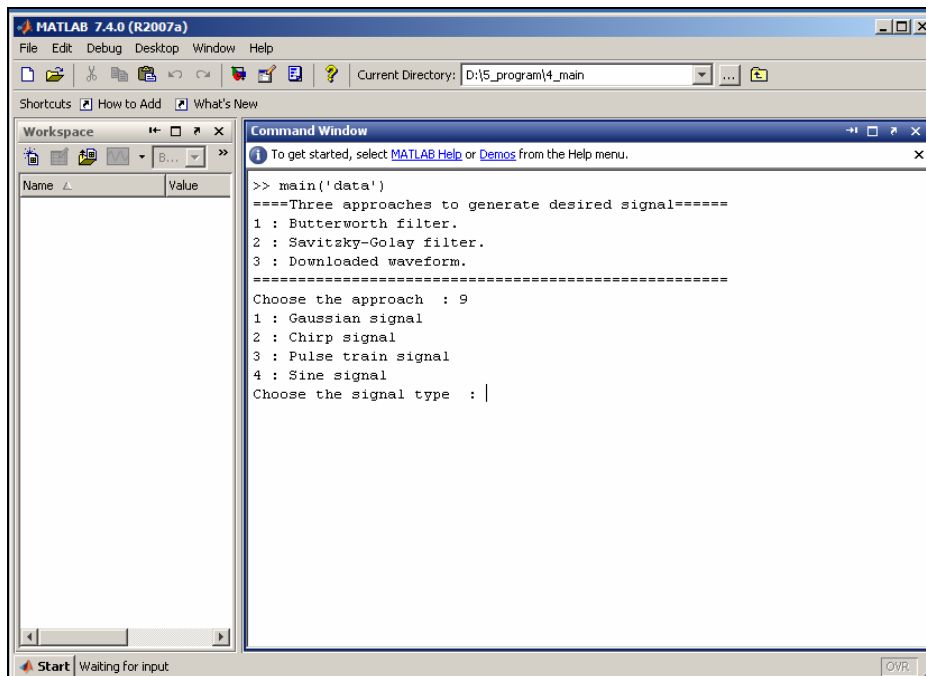
ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดเลือกสัญญาณอินพุตที่ต้องการปรับเรียบหรือกรองสัญญาณรบกวน จากโปรแกรมสำหรับการทดลองใช้งาน มี 3 สัญญาณทดสอบที่ผสมกับสัญญาณรบกวนขาว คือสัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเซิร์ป และสัญญาณขบวนพัลส์ เมื่อประยุกต์ใช้งานกับสัญญาณจาก BPM จะเป็นการโหลดข้อมูลที่ได้จากการวัด

ฉ.2 การสร้างสัญญาณอ้างอิง

การสร้างสัญญาณอ้างอิงให้กับตัวกรองเชิงเลข มี 3 แนวทาง คือการใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท การใช้ตัวกรองสาขาวิทซี-โกเลย์ และการโหลดสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล เมื่อมีการเรียกใช้โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ฉ.1 ผู้ใช้จะต้องป้อนค่าตัวเลข 1 หรือ 2 หรือ 3 เพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง และเมื่อผู้ใช้ป้อนค่าอักขระอื่น ๆ โปรแกรมจะกำหนดให้เป็นการเลือกใช้นิวทาจที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ดังแสดงตัวอย่างการป้อนตัวเลข 9 ในรูปที่ ฉ.2 โดยผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม ซึ่งแต่ละแนวทางจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรอง รวมถึงเลือกโหลดสัญญาณจากฐานข้อมูล และป้อนค่าพารามิเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด ดังนี้



รูปที่ จ.1 การเริ่มต้นโปรแกรมทดสอบ



รูปที่ จ.2 เมื่อเลือกแนวทางที่นอกเหนือจากที่กำหนด

ฉ.2.1 การเลือกใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธ

การใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ธในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองดังนี้ คือค่าอันดับของตัวกรอง (N) และค่าความถี่คัทออฟ (f_c) ที่มีหน่วยเป็น Hz โดยที่ N เป็นจำนวนเต็มบวก มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 14 ที่ทำให้อัลกอริทึมของตัวกรองให้ผลการตอบสนองทางความถี่ที่ถูกต้อง การกำหนดค่าความถี่คัทออฟจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการสุ่มสัญญาณอินพุต (f_s) ซึ่ง f_c จะต้องน้อยกว่า $f_s/2$ สำหรับสัญญาณทดสอบทั้ง 3 สัญญาณ ค่าของ f_c ควรจะอยู่ในช่วง $10 \leq f_c \leq 350$ Hz และจากรูปที่ ฉ.3 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้งสอง โดยเลือกค่า $N = 4$ และ $f_c = 25$ Hz ($f_s = 1000$ Hz) ซึ่งในส่วนนี้ได้แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณไว้ด้วย โดยจะแสดงเมื่อกด Enter บนแป้นพิมพ์ พร้อมกับมีคำสั่งในการป้อนค่า ดังแสดงในรูปที่ ฉ.4 ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ ฉ.3 ต่อไป

```

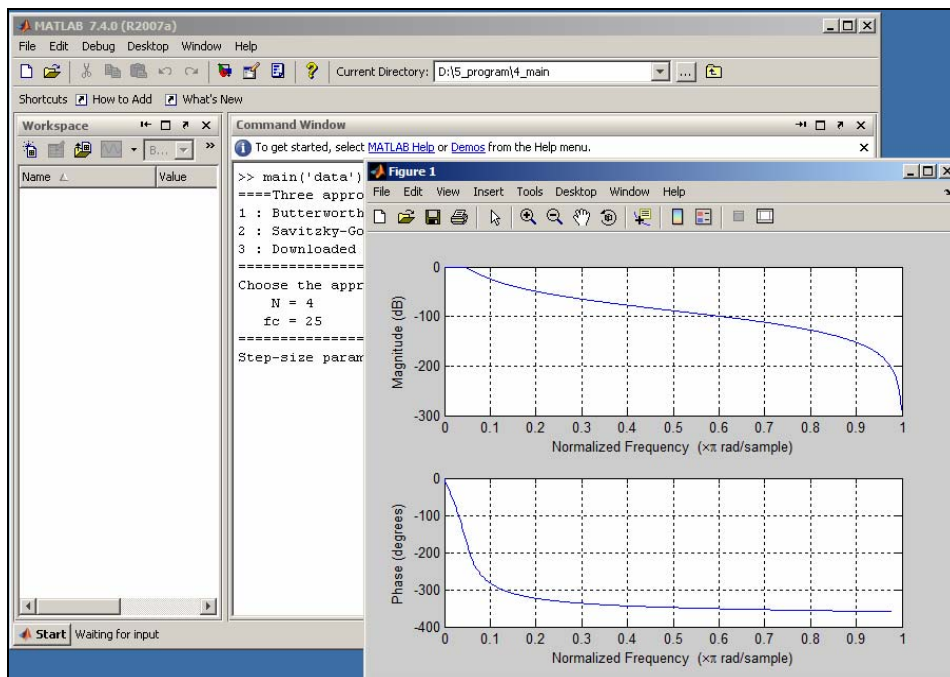
MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: D:\S_program\4_main

Workspace
Name Value

Command Window
1 To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

>> main('data')
====Three approaches to generate desired signal====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 1
N = 4
fc = 25|
  
```

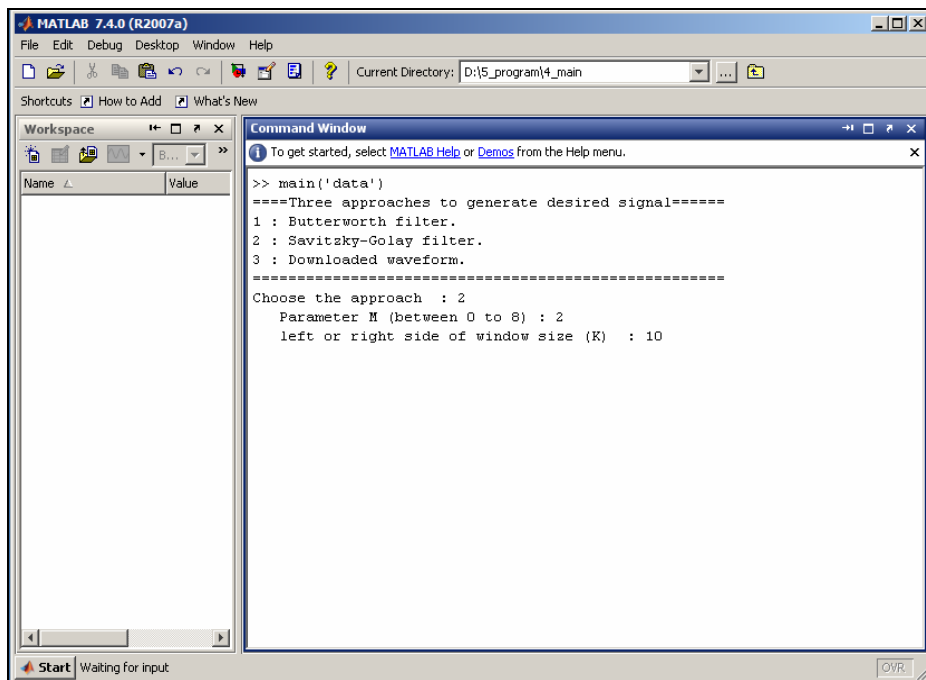
รูปที่ ฉ.3 เมื่อเลือกแนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง



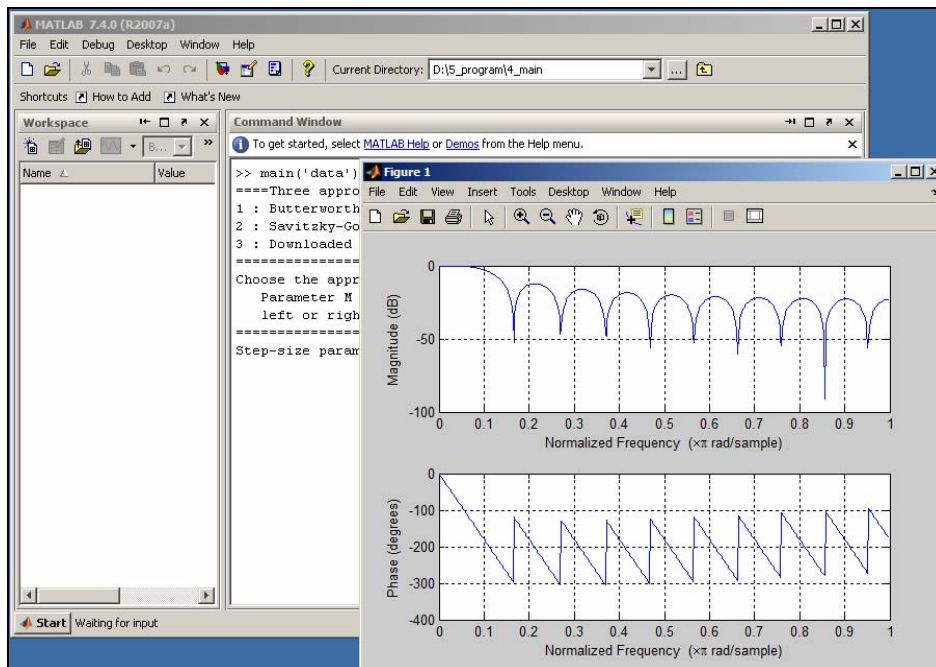
รูปที่ ๑.4 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท เมื่อ $N = 4$ และ $f_c = 25$ Hz

๑.2.2 การเลือกใช้ตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์

การใช้ตัวกรองสวิตซกี-โกเลย์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง มีพารามิเตอร์ที่จะต้องกำหนด คืออันดับของตัวกรอง (M) และความกว้างของวินโดว์ K (ฝั่งซ้ายหรือขวาของจุดข้อมูลเท่านั้น) ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีข้อกำหนด คือ $M \leq K-2$ จึงจะทำให้อัลกอริทึมของตัวกรองทำงาน แต่หาก $M=0$ ตัวกรองจะมีคุณสมบัติแบบหาค่าเฉลี่ย (averaging filter) ซึ่งย่านของ K ที่ให้ผลของอัลกอริทึมที่น่าพอใจควรจะอยู่ในช่วง $10 \leq K \leq 100$ และย่านของค่าพารามิเตอร์ M คือ $0 \leq M \leq 8$ รูปที่ ๑.5 แสดงการตัวอย่างการกำหนดค่าพารามิเตอร์ M และ K โดยกำหนด $M = 2$ และ $K = 10$ ซึ่งในส่วนนี้ได้แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณไว้ด้วย โดยจะแสดงเมื่อกด Enter บนแป้นพิมพ์ พร้อมกับมีคำสั่งในการป้อนค่า ดังแสดงในรูปที่ ๑.6 ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ ๑.3 ต่อไป



รูปที่ จ.5 เมื่อเลือกแนวทางที่ 2 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ จ.6 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองสวิตซ์-โกเลย์ เมื่อ $M = 2$ และ $K = 10$

ฉ.2.3 การไหลคสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล

เมื่อเลือกใช้การไหลคสัญญาณอ้างอิงจากฐานข้อมูล ผู้ใช้จะต้องมีสัญญาณดังกล่าวไว้ก่อนแล้ว และต้องเป็นสัญญาณที่ทราบองค์ประกอบของความถี่ที่แน่นอน เพื่อใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณอินพุต ซึ่งจากโปรแกรมทดลองใช้ได้สร้างสัญญาณอ้างอิงไว้ในฐานข้อมูล 4 สัญญาณ คือสัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเชิงรีป สัญญาณขบวนพัลส์ และสัญญาณซายน์ การทดสอบโปรแกรมเมื่อเลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง ผู้ใช้จะต้องเลือกชนิดของสัญญาณอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ ฉ.7 และทำการป้อนค่าตัวเลข 1 ถึง 4 โดยที่ *ป้อน 1* คือสัญญาณเกาส์เซียน *ป้อน 2* คือสัญญาณเชิงรีป *ป้อน 3* คือสัญญาณขบวนพัลส์ และ *ป้อน 4* คือสัญญาณซายน์ หากมีการป้อนค่าตัวเลขที่นอกเหนือจากที่กำหนด โปรแกรมจะนำสัญญาณสุดท้ายมาเป็นสัญญาณอ้างอิง ในที่นี้ คือสัญญาณซายน์ จากนั้นกด Enter บนแป้นพิมพ์ เพื่อรับค่าเกณฑ์การปรับตัว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ ฉ.3

```

MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: D:\5_program\4_main

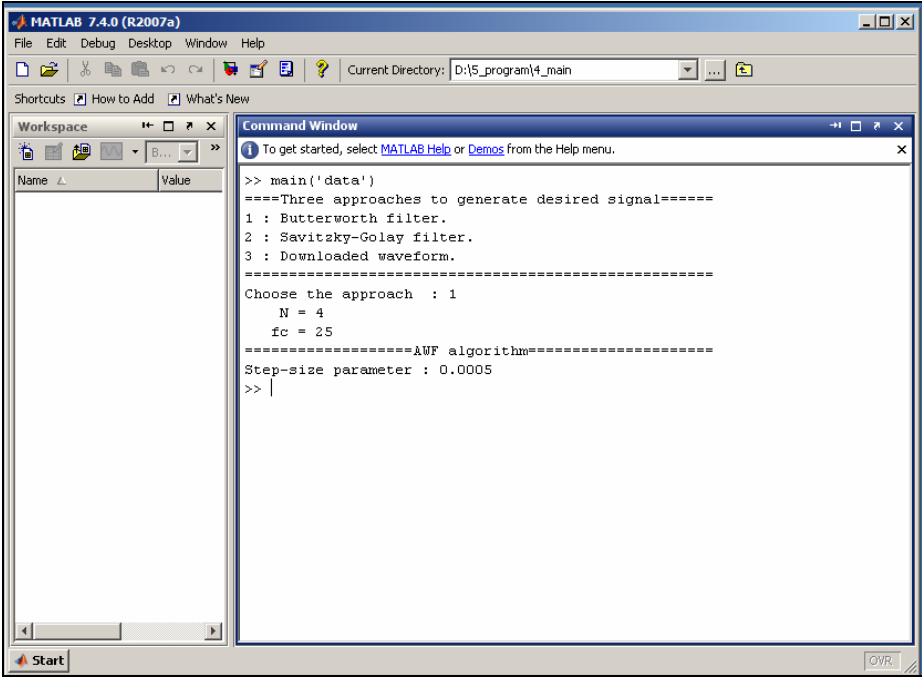
Workspace
Name Value
-----
Command Window
To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

>> main('data')
====Three approaches to generate desired signal====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitzky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 3
1 : Gaussian signal
2 : Chirp signal
3 : Pulse train signal
4 : Sine signal
Choose the signal type : 1
=====AUF algorithm=====
Step-size parameter :
  
```

รูปที่ ฉ.7 เมื่อเลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

ฉ.3 อัลกอริทึมของ AWF

เมื่อมีการเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิงตามหัวข้อ ฉ.2 แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะต้องกำหนดค่าเกณฑ์ปรับตัว (step-size parameter : μ) สำหรับสัญญาณทดสอบ คือสัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเชิงรีป และสัญญาณขบวนพัลส์ ค่าเกณฑ์การปรับตัวที่ทำให้อัลกอริทึมของตัวกรองลู่เข้า อยู่ในช่วง $0 < \mu < 0.05$ สำหรับสัญญาณเกาส์เซียน และสัญญาณเชิงรีป และ $0 < \mu < 0.001$ สำหรับกรณีที่ประยุกต์ใช้กับสัญญาณจาก BPM ค่าเกณฑ์ปรับตัวควรมีค่าอยู่ในช่วง $0 < \mu$ แต่ไม่เกิน 1000 การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวแสดงดังรูปที่ ฉ.8 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเลือกใช้สัญญาณเกาส์เซียนเป็นสัญญาณอินพุต และเลือกแนวทางที่ 1 (ใช้ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท) ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง โดยกำหนดค่า $N = 4$, $f_c = 25$ Hz และ $\mu = 0.0005$ รูปที่ ฉ.9 แสดงผลการทดสอบที่ได้จากการเลือกแนวทางในการสร้างสัญญาณอ้างอิง และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองดังรูปที่ ฉ.8 และรูปที่ ฉ.10 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบเมื่อเลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง เลือกโหลดสัญญาณเกาส์เซียน และกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวเป็น 0.0005



```

MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: D:\5_program\4_main
Shortcuts How to Add What's New

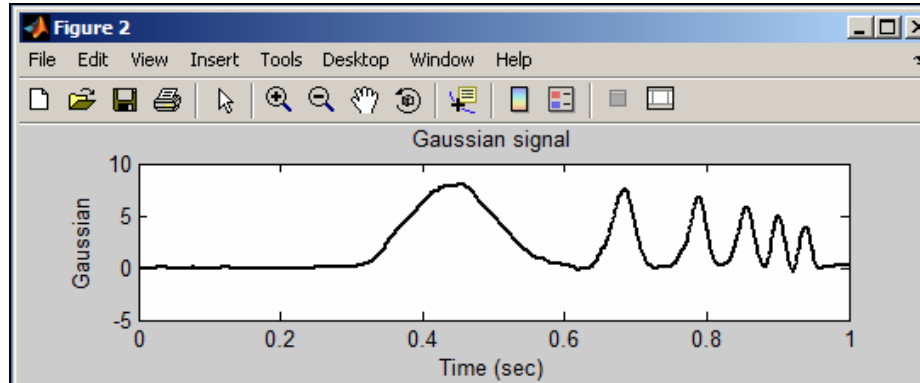
Workspace
Name Value

Command Window
To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

>> main('data')
====Three approaches to generate desired signal====
1 : Butterworth filter.
2 : Savitsky-Golay filter.
3 : Downloaded waveform.
=====
Choose the approach : 1
      N = 4
      fc = 25
=====AWF algorithm=====
Step-size parameter : 0.0005
>> |
  
```

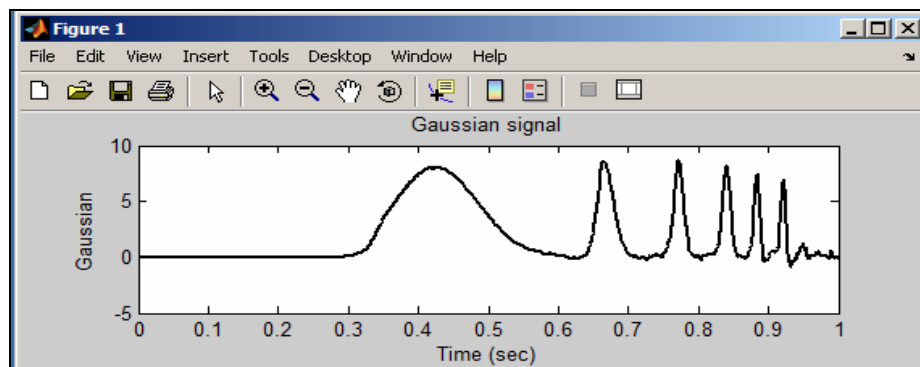
รูปที่ ฉ.8 การกำหนดค่าเกณฑ์การปรับตัวของ AWF

- เลือกแนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง/ $N = 4$ และ $f_c = 25 \text{ Hz} / \mu = 0.0005$



รูปที่ ๙.9 ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 1 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

- เลือกแนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง/ โหลดสัญญาณเกาส์เซียน/ $\mu = 0.0005$

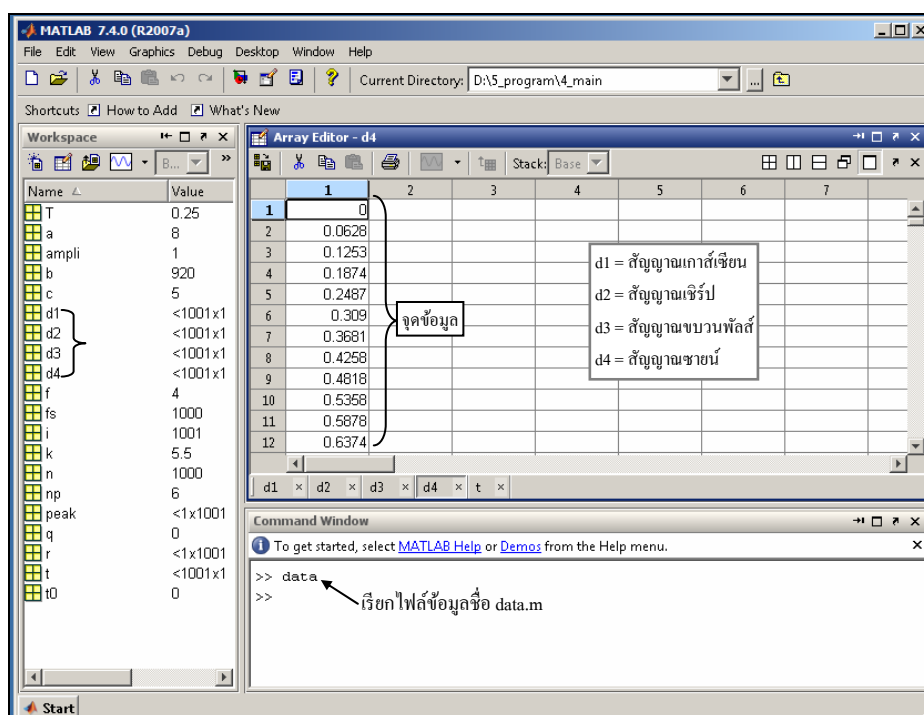


รูปที่ ๙.10 ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้แนวทางที่ 3 ในการสร้างสัญญาณอ้างอิง

๙.4 การสร้างไฟล์ข้อมูลสำหรับคานวน์โหลดเป็นสัญญาณอ้างอิง

การสร้างไฟล์ข้อมูลสำหรับคานวน์โหลดมาเป็นสัญญาณอ้างอิง สามารถสร้างจาก MATLAB ตัวอย่างเช่นสัญญาณซายน์ที่มีความถี่เท่ากับ 50 Hz สามารถสร้างโดยใช้ประโยชน์จากฟังก์ชัน \sin ใน Signal Processing Toolboxes คือ $d = \sin(2*\pi*50*t)$ โดยที่ t เป็นคาบเวลาที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 จากนั้นคำสั่งโหลดจะเป็นเงื่อนไขในการเลือกสัญญาณ โดยให้ผู้ใช้ป้อนค่าตัวเลข 1 ถึง 4 ซึ่งในตัวอย่างโปรแกรมเป็นสัญญาณเกาส์เซียน สัญญาณเซิร์ป สัญญาณขบวนพัลส์ และสัญญาณซายน์

ตามลำดับ ดังที่กล่าวถึงการเลือกโหนดในหัวข้อที่ ๓.2.3 ซึ่งทำการบันทึกไว้ในไฟล์ชื่อ data.m โดยที่ผู้ใช้สามารถสร้างสัญญาณอ้างอิงเพิ่มเติมได้ เพื่อใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบองค์ประกอบความถี่ในย่านต่าง ๆ ของสัญญาณอินพุต ซึ่งสัญญาณอ้างอิงที่สร้างจะต้องมีความถี่ในการสุ่มสัญญาณที่ตรงกับสัญญาณอินพุต จึงจะสามารถนำมาเปรียบเทียบผลได้ รูปที่ ๓.11 แสดงตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงที่สร้างจาก MATLAB



รูปที่ ๓.11 ตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณอ้างอิงที่สร้างจาก MATLAB

ประวัติผู้เขียน

นางสาวขวัญใจ นาชัยภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดชัยภูมิ เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนบ้านโคกมั่งงอย และระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนคอนสวรรค์ อำเภอคอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2546 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัทฮอนด้าเฟาดรี (เอเชีย) เป็นเวลา 1 ปี จากนั้นได้เป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นเวลา 1 ปี ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2549 โดยได้รับทุนการศึกษาจากศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ศซ.)

ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้สอนปฏิบัติการในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม และ (3) ปฏิบัติการระบบควบคุม โดยผู้เขียนมีความสนใจเกี่ยวกับตัวกรองเชิงเลข และการกรองสัญญาณรบกวนจากเครื่องมือวัด และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะที่ศึกษา 2 บทความ ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ.