สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

28

รายงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี 2549

วงจรกรองแบบปรับตัวได้ ที่ใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจาย

โดย

นายศรวัฒน์ ชิวปรีชา

RCH
TK
7872
.F5
ศ1ว7ว

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....84578
วัน,เดือน,ปี.....22 มี.ค. 2551

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปี (2549-2550)

ส่วนที่ 1: โครงการวิจัย

1. **ชื่อโครงวิจัย**

   วงจรกรองแบบปรับตัวได้ ที่ใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจาย

2. **ผู้รับผิดชอบโครงการวิจัย**

   หัวหน้าโครงการวิจัย นายศรวัฒน์ ชิวปรีชา

   ผู้ร่วมโครงการวิจัย (1) ดร. พิพัฒน์ พรหมมี

   ผู้ร่วมโครงการวิจัย (2) นายสิรภพ ตู้ประกาย

3. **วัตถุประสงค์โครงการวิจัย**

   โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขแบบปรับตัวได้ มีคุณสมบัติในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ได้อย่างอัตโนมัติ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ได้หลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น การประยุกต์ในการจำลองคุณลักษณะของระบบที่ไม่ทราบ, การพัฒนาเป็นอิควอไลเซอร์แบบปรับตัวได้, การกำจัดสัญญาณรบกวนและการพัฒนาอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพสาย สำหรับในโครงงานนี้จะนำเสนอการออกแบบและการสร้างวงจรกรองแบบปรับตัวได้ โดยใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด นอกจากนี้ได้นำโปรแกรมแมทแลบมาใช้ในการแสดงผลจำลองการทำงานของวงจร และใช้เทคนิคของโครงสร้างเลขคณิตกระจาย สำหรับในส่วนของการสร้างเป็นฮาร์ดแวร์

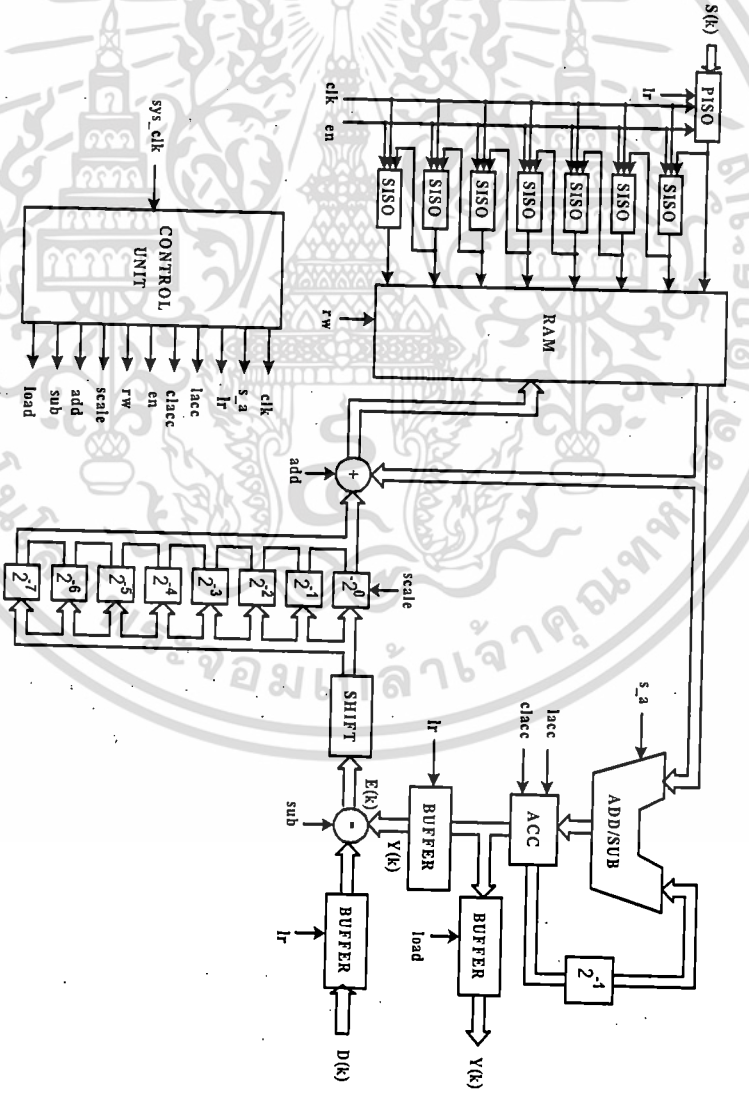
4. **คุณสมบัติและรายละเอียดการทำงานของชิ้นงานในโครงการวิจัย**

   ในระบบการสื่อสารสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือการทำให้การรับส่งข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทางเป็นไปอย่างถูกต้อง โดยสัญญาณจากด้านส่งที่จะส่งผ่านไปยังด้านรับนั้นจะต้องเป็นสัญญาณเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าในขั้นตอนการส่งสัญญาณนั้นจะต้องไม่มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเลย แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามักจะถูกรบกวนจนทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ไปถึงปลายทางลดลง ดังนั้นการที่จะนำสัญญาณนั้นไปใช้งานจะต้องทำการกรองสัญญาณรบกวนทิ้งก่อน โดยธรรมชาติของสัญญาณรบกวนมักจะมีค่าความถี่และขนาดไม่แน่นอน ดังนั้นในการกรองสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณที่เราต้องการจึงต้องมีการสร้างวงจรกรองความถี่ที่สามารถปรับตัวได้ ซึ่งวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้นี้ ก็ได้นำเอาหลักการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมาประยุกต์ใช้งานเช่นกัน เนื่องจากถ้าเราสร้างวงจรกรองความถี่ในระบบอนาล็อกจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของระบบว่าต้องการวงจรกรองสัญญาณที่มีคุณสมบัติอย่างไร ตอบสนองความถี่ในย่านใด และต้องมีการคำนวณและนำมาประกอบกันเป็นวงจร หลังจากนั้นจะต้องมีการทดสอบความถูกต้องว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ถ้าพบว่าวงจรมีความผิดพลาดหรือไม่เป็นไปตามที่ต้องการแล้ว ก็จะต้องมีการคำนวณและสร้างใหม่ ซึ่งมีความยุ่งยากและใช้เวลามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b 41956 22
i

โครงงานนี้จึงนำเสนอการออกแบบวงจรกรองแบบปรับตัวได้(Adaptive filter) ที่ใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจาย (Distributed Arithmetic, DA) โดยใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด (LMS Algorithm) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ในการสร้างนั้นจะต้องทำการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า (step size) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยทำการซิมูเลชั่นด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) ก่อนนำไปเขียนโปรแกรมภาษาวีเอชดีแอล (VHDL :Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)ในส่วนของการสร้างเป็นฮาร์ดแวร์ จะใช้หลักการเบื้องต้นของโครงสร้างเลขคณิตกระจายที่นำมาใช้งานด้านการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข คือการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ซึ่งเป็นสมการที่อยู่ในรูปผลบวกของผลคูณ ให้กระจายออกเป็นระดับบิท และเก็บค่าผลคูณย่อยไว้ในตารางเปิดดู (Look up table) ทำให้วงจรที่ได้ปราศจากตัวคูณ จากนั้นจะทำการบรรยายพฤติกรรมการทำงานด้วยภาษาวีเอชดีแอล วงจรที่ได้ออกแบบจะถูกสังเคราะห์และโปรแกรมลงในอุปกรณ์เอฟพีจีเอ (FPGA : Field Programmable Gate Array) สำหรับทดสอบการทำงาน



โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณแบบปรับตัวได้ โดยใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. งบประมาณ 150,000 บาท

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. ค่าอุปกรณ์สำนักงาน และเอกสารประกอบการวิจัย	10,000
2. ค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ FPGA	110,000
3. ค่าถ่ายเอกสาร	20,000
รวมทั้งสิ้น (หนึ่งแสนห้าหมื่นบาท)	150,000

6. งบประมาณช่วงสอง 75,000 บาท

7. ระยะเวลาดำเนินงานโครงการวิจัย (เริ่มต้น-สิ้นสุดโครงการ)

ขั้นตอนการดำเนินงาน	งบประมาณปี 2549											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาข้อมูลการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข	←	—	→									
2. ทำการออกแบบวงจรและจำลองผลการทำงานทาง Software				←	—	—	→					
3. ทำการแก้ไขและปรับปรุงวงจร								←	—	→		
4. สรุปผลและจัดทำรายงานวิจัยเผยแพร่ทางวิชาการ											←	→

8. รายงานความก้าวหน้าของโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	งบประมาณปี 2549						
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	กพ		
1. ทำการแก้ไขและปรับปรุงวงจร	←	—	→				
2. สรุปผลและจัดทำรายงานวิจัยเผยแพร่ทางวิชาการ		←	—	—	→		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมวลผลสัญญาณ

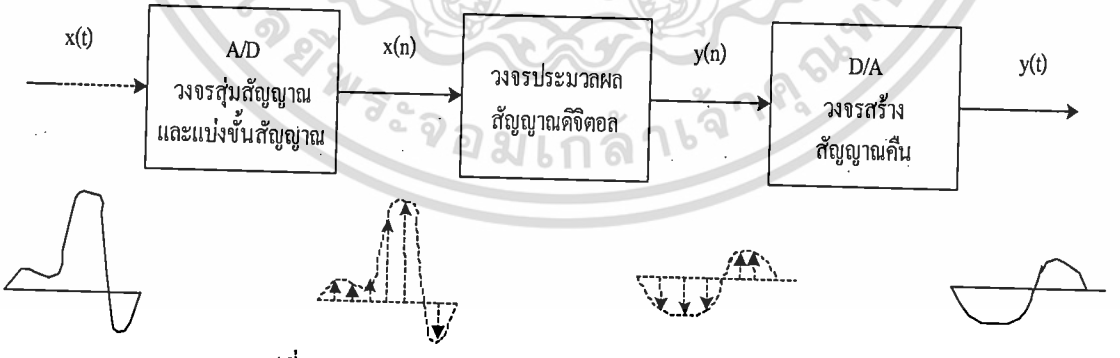
การประมวลผลสัญญาณ คือ การนำเอาสัญญาณมาเข้าระบบการประมวลผลที่ข้างในประกอบขึ้นด้วยระบบอุปกรณ์ที่ทำการปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์ เช่น การบวกสัญญาณ การคูณ การหาร การถอดรากที่สอง หรือการอินทิเกรตสัญญาณ แต่เดิมนั้นเรานิยมใช้ระบบการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบระบบการประมวลผลสัญญาณเชิงอุปมาน ซึ่งสัญญาณเข้าและออกจะเป็นสัญญาณต่อเนื่องหรือเชิงอุปมาน ข้อดีของระบบการประมวลผลแบบนี้ก็คือ ราคาถูก การออกแบบทำได้ง่าย แต่ข้อจำกัดของระบบการประมวลผลสัญญาณเชิงอุปมานก็คือประสิทธิภาพและความแม่นยำในการประมวลผล คุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ก็ยังแปรค่าตามสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ อายุการใช้งาน ความชื้น ทำให้ความเชื่อถือของระบบมีได้แค่ในระดับหนึ่งเท่านั้น

ผลจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตวงจรรวม ทำให้กลอุปกรณ์ดิจิตอลเช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ลอจิก เกต หรืออุปกรณ์สนับสนุนต่างๆมีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพดีขึ้นมาก ทำให้ความสนใจในการนำเอาระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมีเพิ่มมากขึ้น ข้อดีของระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล คือระบบมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูง สามารถออกแบบและแก้ไขได้โดยง่าย โดยทั่วไปการศึกษา ออกแบบและพัฒนาระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล จะแบ่งเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ

1. วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล (Digital filtering) วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอลมีหลายประเภทด้วยกัน แต่มีวงจรกรองอยู่ 2 ชนิด ซึ่งเป็นวงจรกรองเชิงเส้นที่เป็นพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบดิจิตอลแบบอื่นๆ คือ วงจรกรองความถี่แบบไม่มีการป้อนกลับ (non-recursive filter) และวงจรกรองความถี่แบบป้อนกลับ (recursive filter)

2. การแปลงเชิงเลข (Digital transform) การแปลงเชิงเลขโดยเฉพาะการแปลงฟูริเยอร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform หรือ DFT) ที่ทำการประมวลผลโดยใช้ขั้นตอนที่เรียกว่า การแปลงฟาสท์ฟูริเยอร์ (Fast Fourier Transform หรือ FFT) มีส่วนทำให้การประมวลผลสัญญาณเชิงเลขได้รับความนิยมมากขึ้น

ระบบประมวลผลสัญญาณโดยส่วนใหญ่ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบในระบบประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล

วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล คือ กระบวนการที่ไปดัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณ ให้มีสเปกตรัมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนดให้ หรือทำการตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการในช่วงความถี่ที่กำหนดออกไป ซึ่งทำให้สามารถแยกสัญญาณในช่วงความถี่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการได้ ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรนั้น ต้องใช้เครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย ดังนั้นเราจึงนิยมเรียกว่า วงจรกรองความถี่เชิงเลข

การที่วงจรกรองความถี่เชิงเลขมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวางนั้น อาจมาจากข้อได้เปรียบหลายประการดังนี้

1. ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ สามารถออกแบบให้มีความใกล้เคียงกับผลตอบสนองความถี่ที่กำหนดให้ หรือผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้ นอกจากนี้การออกแบบวงจรกรองความถี่ให้มีผลตอบสนองเชิงเส้นทำได้ง่าย

2. คุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบและสร้างแล้วจะไม่ขยับเลื่อนไปตามสภาพแวดล้อม หรือตามอุณหภูมิ หรือระยะเวลาในการใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานในย่านความถี่ต่ำได้เป็นอย่างดี

3. การประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่แบบปรับความถี่ได้ (Adaptive Filter) ทำได้ง่าย

4. ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโดยคำนึงถึงความของคำ (word length) ของตัวเลขฐานสองที่ต้องการใช้ และยังสามารถออกแบบให้มีผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการได้

5. ในปัจจุบัน ถ้าพิจารณาในแง่มุมของเสถียรภาพของวงจรกรองความถี่ ความเชื่อถือได้ ราคา หรือขนาดของวงจรกรองความถี่เชิงเลข สิ่งเหล่านี้กำลังได้รับการพัฒนา และปรับปรุง ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าของวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter) หรือเรียกว่าวงจรกรองความถี่แบบอุปมาน

วงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Filter)

วงจรกรองความถี่ทั่วๆไป เป็นวงจรกรองความถี่แบบสัมประสิทธิ์คงที่ หรือแบบไม่แปรตามเวลา สำหรับวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้จะเป็นวงจรกรองความถี่แบบที่มีสัมประสิทธิ์ปรับเปลี่ยนตลอดเวลา โดยมีลักษณะการปรับค่าสัมประสิทธิ์โดยอัตโนมัติ โดยใช้เงื่อนไขทางสถิติของสัญญาณและของโมเดลของสิ่งแวดล้อมที่สร้างขึ้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ตัวกรองแบบปรับตัวได้นี้ทำให้ขอบเขตของการประยุกต์ใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิตอลขยายวงออกไปกว้างมาก ตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้นี้จะมีประโยชน์อย่างมากในสภาวะที่เราไม่สามารถใช้ตัวกรองความถี่ดิจิตอลแบบธรรมดาได้หรือใช้ได้แต่ให้ผลไม่ดีนัก ซึ่งจะให้ผลที่ดีขึ้นถ้าใช้ตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้ ยกตัวอย่างเช่น

1. เมื่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ต้องการอยู่ในย่านความถี่เดียวกัน ซึ่งถ้าเราใช้ตัวกรองความถี่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงที่ และต้องการให้สัญญาณรบกวนส่วนใหญ่หมดไป ก็จะทำให้สัญญาณที่ต้องการหายไปด้วย

2. เมื่อไม่รู้ลักษณะที่แน่นอนของสัญญาณรบกวน เช่น ไม่รู้ว่าสัญญาณรบกวนอยู่ในย่านความถี่ใดหรือเข้ามาในทิศทางใดในกรณีของสายอากาศแบบอะเรย์ เป็นต้น

3. เมื่อสัญญาณที่ต้องการมีความผิดเพี้ยน ไม่รู้ลักษณะที่แน่นอน เช่น กรณีของโมเดมหรือโทรศัพท์มือถือ ที่มีการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณที่ตัวรับได้รับจะถูกทำให้ผิดเพี้ยนไปด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณที่ไม่รู้ค่าแน่นอนและอาจมีค่าแปรตามเวลาด้วย เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้ตัวกรองเพื่อทำการกรองเอาความผิดพลาดนี้ออกไป

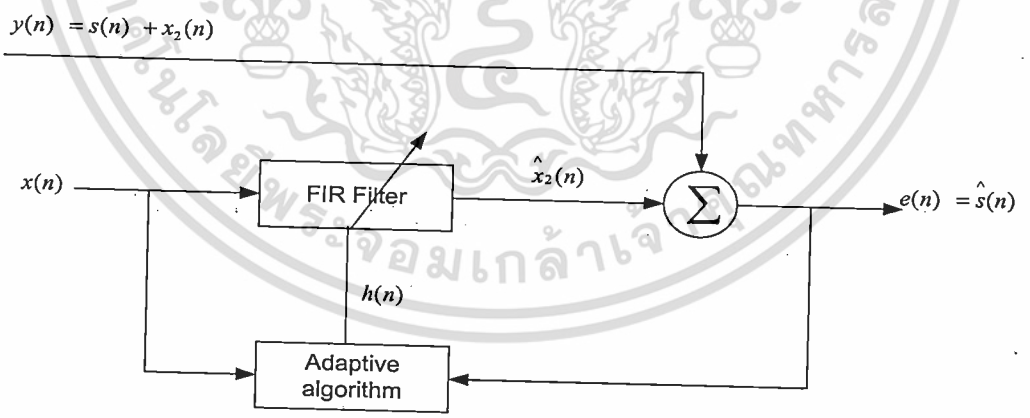
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตามแนวความคิดที่ว่า จะบรรจุกลุ่มตัวแปร (Parameter) ที่ปรับค่าได้และค่านั้นจะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับการประเมินค่าคุณสมบัติทางสถิติของสัญญาณที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นทฤษฎีของวงจรกรองปรับตัวได้จะมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับทฤษฎีวงจรกรองความถี่ดิจิตอลทั่วไป ในการออกแบบต้องการจะจัดกลุ่มของตัวแปรที่ดีที่สุดจากความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของสัญญาณที่เกี่ยวข้อง ให้เหมาะสมกับบรรทัดฐานและความต้องการ ปัญหาหลักของวงจรกรองปรับตัวได้คือการหาอัลกอริทึม (Algorithm) ที่จะปรับค่าตัวแปรได้ดีในสถานการณ์ที่ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของสัญญาณ โดยทั่วไปนั้นวงจรกรองปรับตัวได้จะทำงานโดยใช้กระบวนการทำงานซ้ำๆ (Iterative) ในการกรองและปรับค่าตัวแปรไปในเวลาเดียวกัน วงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้มีสองลักษณะคือ

1. วงจรกรองปรับตัวได้แบบลูปเปิด (Open Loop) จะทำการเรียนรู้สถิติของสัญญาณที่เกี่ยวข้องและนำผลที่ได้ป้อนให้แก่อัลกอริทึมโดยไม่มีการป้อนกลับ (Non-Recursive) การกระทำลักษณะนี้เพื่อจะให้ได้การกรองที่ดีจะต้องการกลุ่มตัวแปรจำนวนมาก ทำให้ต้องสร้างฮาร์ดแวร์ที่ซับซ้อนซึ่งมีราคาแพง วงจรกรองพวกนี้ได้แก่ วงจรกรองปรับตัวได้แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

2. วงจรกรองปรับตัวได้แบบลูปปิด (Close Loop) จะทำการเรียนรู้สถิติของสัญญาณที่เกี่ยวข้องและปรับปรุงกลุ่มของค่าตัวแปรปัจจุบันจากสัญญาณที่เข้ามาใหม่และสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากการทำงานรอบที่แล้ว การทำงานเช่นนี้จะเป็นลักษณะของการป้อนกลับ (Recursive) มีข้อดีคือต้องการกลุ่มตัวแปรน้อย ทำให้สามารถใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีความซับซ้อนไม่มากนักได้ วงจรกรองความถี่พวกนี้ได้แก่ วงจรกรองปรับตัวได้แบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้

สามารถอธิบายโครงสร้างพื้นพื้นฐานของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ จากรูปที่ 2 ได้ ดังนี้

1. เราสามารถวัดสัญญาณมาได้ 2 สัญญาณ คือ x(n) และ y(n) โดยที่ y(n) เป็นสัญญาณที่ผสมกันระหว่าง s(n) และ $x_2(n)$ วัตถุประสงค์ของตัวกรองก็คือ ต้องการแยก s(n) ออกจาก $x_2(n)$ โดยไม่จำเป็นต้องรู้ย่านความถี่หรือลักษณะทางสถิติของสัญญาณทั้งสองล่วงหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เงื่อนไขที่จำเป็น คือ s(n) ต้องไม่มีความสัมพันธ์กับ $x_2(n)$ ในทางสถิติ (statistical independent) หรือสัมพันธ์กันน้อยมาก เช่น เป็นสัญญาณเสียงที่มีแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง ที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ส่วน x(n) ซึ่งเป็นสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่วัดได้นั้น ต้องมีความสัมพันธ์กับ $x_2(n)$

3. เราจะนำ x(n) ผ่านตัวกรอง FIR ที่สร้างขึ้นซึ่งมีสัมประสิทธิ์ h(n) และอันดับเท่ากับ N ให้สัญญาณขาออกของตัวกรอง คือ $\hat{x}_2(n)$ ถ้าหากว่าเราสามารถปรับสัมประสิทธิ์ h(n) ให้มีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์ที่เป็นโมเดลระหว่าง x(n) กับ $x_2(n)$ ได้ $\hat{x}_2(n)$ ก็จะเป็นสัญญาณที่ใกล้เคียงกับ $x_2(n)$ และเมื่อนำ $\hat{x}_2(n)$ ลบออกจาก y(n) สัญญาณที่เหลืออยู่ซึ่งจะเรียกว่า สัญญาณความคลาดเคลื่อน e(n) ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับ s(n) นั่นคือเราสามารถแยก $x_2(n)$ ออกจาก s(n) ได้

ตัวที่จะคำนวณหาสัมประสิทธิ์ h(n) ก็คือ อัลกอริทึมปรับตัวได้ ซึ่งรับค่า e(n) และ x(n) จากนั้นคำนวณ h(n) ป้อนให้กับตัวกรอง FIR และจะปรับค่า h(n) ไปเรื่อยๆ ทุกๆขั้นเวลา จนกระทั่ง h(n) ลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง อัลกอริทึมในการปรับตัว (Adaptive Algorithm) มีด้วยกันหลากหลายวิธี เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์นี้ การศึกษาถึงอัลกอริทึมเหล่านี้รวมอยู่ในสาขาของการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลขั้นสูง ซึ่งบางครั้งก็เรียกว่า การประมวลผลสัญญาณทางสถิติ (statistical signal processing) หรือการประมวลผลสัญญาณแบบปรับตัวได้ (Adaptive signal processing) หรือทฤษฎีการประมาณค่า (estimation theory)

กรรมวิธีการพัฒนาอัลกอริทึมของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้

ในการพัฒนาแต่ละอัลกอริทึมจะพบว่าแต่ละอัลกอริทึมมีคุณลักษณะเฉพาะตัว จึงมีความสำคัญมากในการที่จะทำความเข้าใจในความสามารถและขีดจำกัดเพื่อให้การเลือกใช้งานมีประสิทธิภาพ

1. กรรมวิธีการประมาณแบบสตอแคสติก เกรเดียนท์ (Stochastic Gradient Approach) เป็นกรรมวิธีที่วัดค่าความผิดพลาดโดยใช้ค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสองและพยายามลดค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสอง โดยการทำการหาค่าจุดต่ำสุดบนเออร์เรอร์เพอร์ฟอร์มานซ์เซอร์เฟส (Error Performance Surface) ซึ่งค่าต่ำสุดจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้ค่าเฉลี่ยผลต่างกำลังสองมีค่าต่ำสุด การหาอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์จะทำการแก้สมการของวีนเนอร์และฮอร์พ (Weiner-Hopf Equation) อัลกอริทึมในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้คือลีสต์มีนสแควร์ (Least Mean Square) หรือเรียกอีกอย่างว่าแอลเอ็มเอสอัลกอริทึม (LMS Algorithm)

2. กรรมวิธีการประมาณแบบลีสต์สแควร์ (Least Square Estimation) กรรมวิธีนี้ใช้การลดคอสต์ ฟังก์ชัน (Cost Function) โดยอาจใช้วิธีการของรีเคอซีฟ ลีสต์สแควร์ (Recursive Least Square) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 อัลกอริทึมดังนี้

- รีเคอร์ซีฟ ลีสต์สแควร์ อัลกอริทึมมาตรฐาน (Standard RLS Algorithm)
- รีเคอร์ซีฟ ลีสต์สแควร์ อัลกอริทึมโดยการถอดราก (Square Root RLS Algorithm)
- รีเคอร์ซีฟ ลีสต์สแควร์ อัลกอริทึมแบบเร็ว (Fast RLS Algorithm)

ตัวกรองวีนเนอร์จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ h(n) ที่ดีที่สุด ทุกๆค่าเวลา n แต่ปัญหาของตัวกรองวีนเนอร์ก็คือ ค่า h(n) มีการคำนวณที่ยุ่งยากและจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะไม่ทราบค่าที่แน่นอน ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ตัวกรองวีนเนอร์แทบจะไม่มีการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อย่างไรก็ตามตัวกรองวีนเนอร์นี้มีประโยชน์มากในแง่ทฤษฎี เพราะมันคือเป้าหมายที่ตัวกรองปรับตัวได้แบบอื่นๆต้องการไปถึง อัลกอริทึมปรับตัวได้ที่นิยมได้แก่ LMS, RLS และ Kalman ล้วนแล้วแต่มีผลตอบสนองที่พิสูจน์ได้ว่าลู่เข้าสู่ผลตอบสนองของตัวกรองวีนเนอร์ทั้งสิ้น กล่าวคือ อัลกอริทึมเหล่านี้ไม่ได้ให้ผลตอบสนองที่เหมือนกับผลตอบสนองของตัวกรองวีนเนอร์ทุกๆขั้นเวลา แต่ถ้าถูกใช้ในสภาวะที่ลักษณะทางสถิติของสัญญาณอินพุทเปลี่ยนแปลงไม่เร็วนัก เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะหนึ่ง มันจะสามารถให้ผลตอบสนองที่ลู่เข้าสู่ผลตอบสนองของตัวกรองวีนเนอร์ได้ ลักษณะสำคัญของการคำนวณสัมประสิทธิ์ด้วยอัลกอริทึมเหล่านี้ที่ปรับปรุงจากตัวกรองวีเนอร์ คือ

1. ไม่จำเป็นต้องรู้ค่าทางสถิติของสัญญาณอินพุท
2. มีการคำนวณที่สามารถปรับไปใช้การคำนวณแบบเวลาจริงได้

การวัดประสิทธิภาพในระบบปรับตัว

ในระบบปรับตัวทุกระบบมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวัดประสิทธิภาพ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมต่างๆในตัวกรองปรับตัวก็เช่นกัน นอกจากจะต้องทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแล้วยังต้องทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอีก เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้อัลกอริทึมที่ให้การตอบสนองที่ดี การวัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมมีหลายวิธีดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. ความเร็วในการลู่เข้า (Convergence Rate)

อัตราการลู่เข้าของระบบปรับตัวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากซึ่งจะต้องทำการวัดเพื่อให้ได้ตามความต้องการของงานที่จะนำไปใช้ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเร็วในการลู่เข้านั้นสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมได้ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้อัลกอริทึมไม่จำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่มีความเร็วสูงสุดเนื่องจากการเพิ่มความเร็ว ราคาในการสร้างและความซับซ้อนของวงจรก็จะสูงขึ้นเช่น การเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับความจำเป็นในการใช้งานมากกว่า

2. ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square Error)

จะวัดในลักษณะของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่น้อยที่สุด (Minimum(Mean Square Error : MMSE) ซึ่งใช้ในการวัดความสามารถในการทำงานของระบบในการลดสัญญาณรบกวน (Eliminating Noise) ทำนายสัญญาณ (Signal prediction) หรือแยกแยะระบบ (System Identifying) แล้วแต่ว่าเป็นระบบอะไร โดยทั่วไปแล้วค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างของตัวกรอง ความไวของสัมประสิทธิ์ ตลอดจนสัญญาณรบกวนทั่วไป

3. ความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปร (Parameter Estimation Accuracy)

ความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปรเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากเมื่อมีการนำระบบปรับตัวไปใช้ในการหาคุณลักษณะของระบบที่ไม่ทราบ (System Identifying) ซึ่งความถูกต้องในการประมาณค่าตัวแปรมีมาก จะทำให้ได้แบบจำลองของระบบที่ต้องการใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

4. ความซับซ้อนในการประมวลผล (Computation Complexity)

ความซับซ้อนในการประมวลผลมีความสำคัญมากในการนำระบบปรับตัวไปใช้งานจริงโดยทั่วไปต้องการความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำ ทำให้การสร้างมีราคาถูก นอกจากนั้นหากนำไปโปรแกรมลงในตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
84578

ประมวลผลสัญญาณสำเร็จรูปแล้วนั้นก็ต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานของตัวประมวลผลเปรียบเทียบกับความซับซ้อนในการประมวลผลของอัลกอริทึมด้วย

5. เสถียรภาพ (Stability)

ความมีเสถียรภาพของระบบมีความสำคัญมากในการใช้งานตัวกรองปรับตัวได้โดยเฉพาะตัวกรองแบบไอไออาร์ เนื่องจากอาจเกิดการเลื่อนของโพลออกนอกวงกลมหนึ่งหน่วย ทำให้เกิดการออสซิเลตและทำให้ค่าลู่ออก (Diverge) จนไม่สามารถทำงานได้ การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของตัวกรองด้วย

6. ความคงทนของระบบ (Robustness)

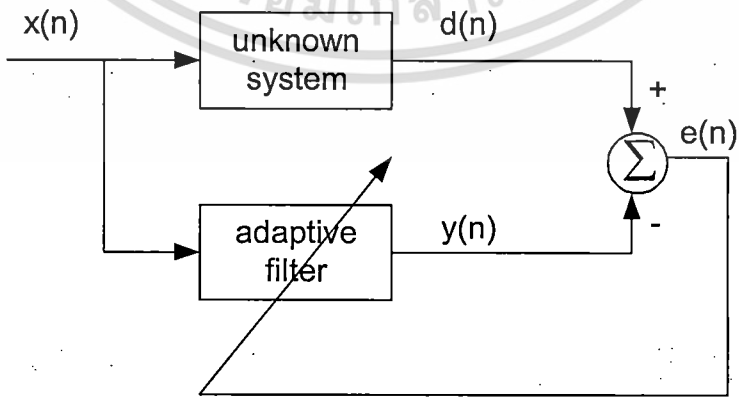
เนื่องจากค่าอินพุทของตัวกรองปรับตัวได้มักมีค่าต่างๆที่ไม่แน่นอนจึงมีความจำเป็นที่ตัวกรองจะต้องมีความทนต่อความแปรปรวนของสัญญาณ โดยทั่วไปความคงทนของระบบเป็นค่าที่ยากต่อการวัดในการทดลองโดยทั่วไปจึงไม่ทำการวัดคุณลักษณะนี้

การประยุกต์ใช้งานวงจรกรองปรับตัวได้

ตัวกรองปรับตัวได้มีคุณสมบัติในการปรับตัวได้อย่างอัตโนมัติทำให้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อุปกรณ์หลายๆอย่าง ต่อไปจะทำการอธิบายตัวอย่างการนำตัวกรองปรับตัวได้ไปประยุกต์ใช้งาน

1. การประยุกต์ในการจำลองคุณลักษณะของระบบที่ไม่ทราบ (System Identification)

สมมติว่ามีระบบที่ไม่เป็นที่รู้จักและต้องการพิจารณาผลตอบสนองของระบบนั้นต่อสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบ โดยสมมติว่าระบบนี้ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและมีคุณสมบัติเชิงเส้น และต้องการที่จะพัฒนาแบบจำลอง (Model) สำหรับระบบนี้โดยใช้ตัวกรองปรับตัวได้ เพื่อที่จะสร้างสัญญาณเอาท์พุทให้เหมือนกับเอาท์พุทของระบบที่ไม่เป็นที่รู้จัก โดยการป้อนอินพุทที่เหมือนกันให้แก่ระบบทั้งสองและทำการเปรียบเทียบเอาท์พุททั้งสอง เพื่อสร้องสัญญาณผิดพลาด ซึ่งเป็นความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสอง อาจกล่าวได้ว่าการทำงานของตัวกรองปรับตัวได้เป็นการพยายามปรับผลตอบสนองให้เหมือนกับผลตอบสนองของระบบที่ไม่เป็นที่รู้จัก เพื่อที่จะทำให้สัญญาณผิดพลาดมีน้อยที่สุดคือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง และสำหรับในกรณีที่สัญญาณอินพุทของระบบที่ไม่เป็นที่รู้จักนั้นคงที่และระบบที่ไม่เป็นที่รู้จักไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาจะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงสู่ศูนย์ (Convergence) ในขณะนั้นเองกล่าวได้ว่าตัวกรองปรับตัวทำการจำลองคุณลักษณะของระบบที่ไม่ทราบได้แล้ว



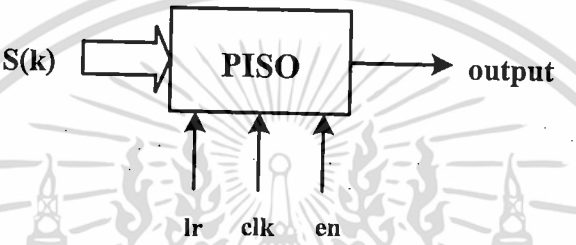
รูปที่ 3 แสดงการประยุกต์ใช้ตัวกรองปรับตัวในการจำลองคุณลักษณะของระบบที่ไม่ทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ภาษาวีเอชดีแอลออกแบบการทำงานของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ โดยใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจาย และ LMS (Least Mean Square) อัลกอริทึม

ในการออกแบบการทำงานของวงจรโดยใช้ภาษาวีเอชดีแอล สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. สัญญาณอินพุท (Input) s(k) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ทำการแปลงเป็นเลขจำนวนส่วนเติมเต็มสองจะถูกโหลดเข้าวงจร PISO (Parallel In Serial Out) โดยในการโหลดข้อมูลนั้นจะถูกควบคุมโดยขาสัญญาณ lr และเมื่อทำการโหลดข้อมูลเข้ามาแล้ววงจร PISO จะทำการเก็บข้อมูลที่เข้ามาไว้2ชุด เพื่อที่จะนำมาชี้แอดเดรสของแรมในรอบหลัง ซึ่งแต่ละชุดจะทำงานได้นั้นขึ้นอยู่กับขาสัญญาณ en จากนั้นเลื่อนข้อมูลออกที่ละบิท โดยในการเลื่อนของบิทนั้นจะใช้สัญญาณนาฬิกา (clock) ในการเลื่อนสัญญาณซึ่งถูกควบคุมด้วยขาสัญญาณ clk

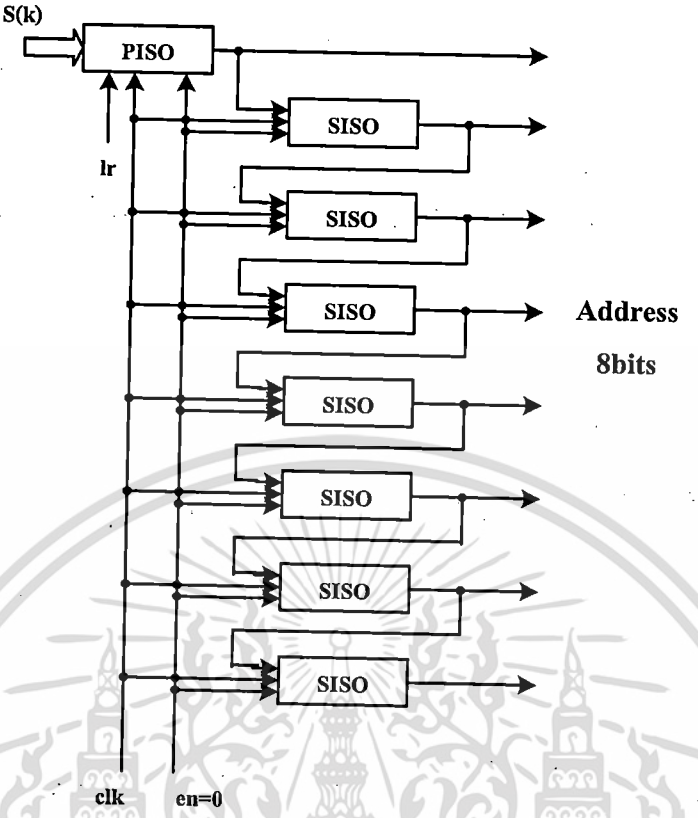


รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของการออกแบบวงจร PISO

2. สัญญาณที่ถูกเลื่อนออกมาจากวงจร PISO นั้นจะถูกนำไปป้อนเป็นสัญญาณอินพุทให้กับวงจร SISO (Serial In Serial Out) ป้อนเก็บไว้2ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะทำงานได้นั้นขึ้นอยู่กับขาสัญญาณ en เช่นเดียวกับวงจร PISO และทำการเคลียร์ค่าในวงจรรีจีสเตอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (ACC) โดยขาสัญญาณ clacc

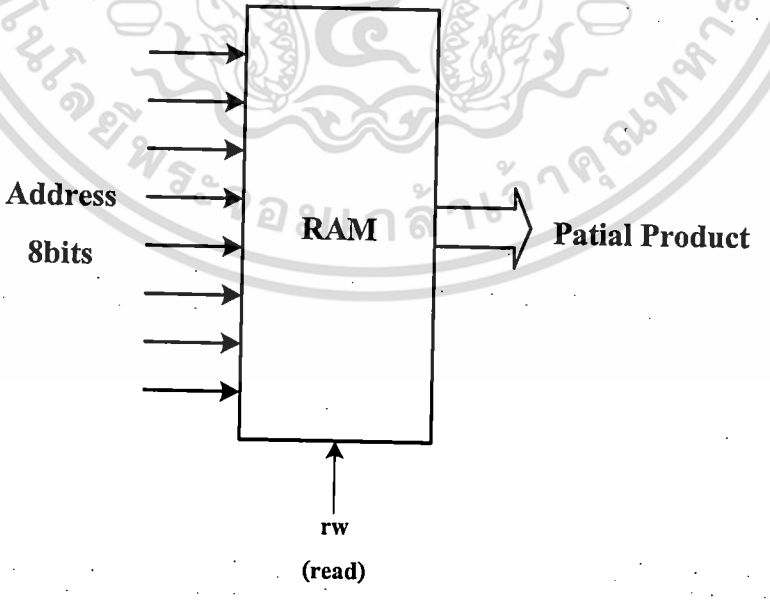
3. ข้อมูลที่ถูกเลื่อนออกมาจาก PISO และ SISO จะถูกควบคุมด้วยขาสัญญาณ clk ตัวเดียวกัน ดังนั้นข้อมูลของ PISO และ SISO จะถูกเลื่อนออกมาพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของการออกแบบวงจร PISO และ SISO

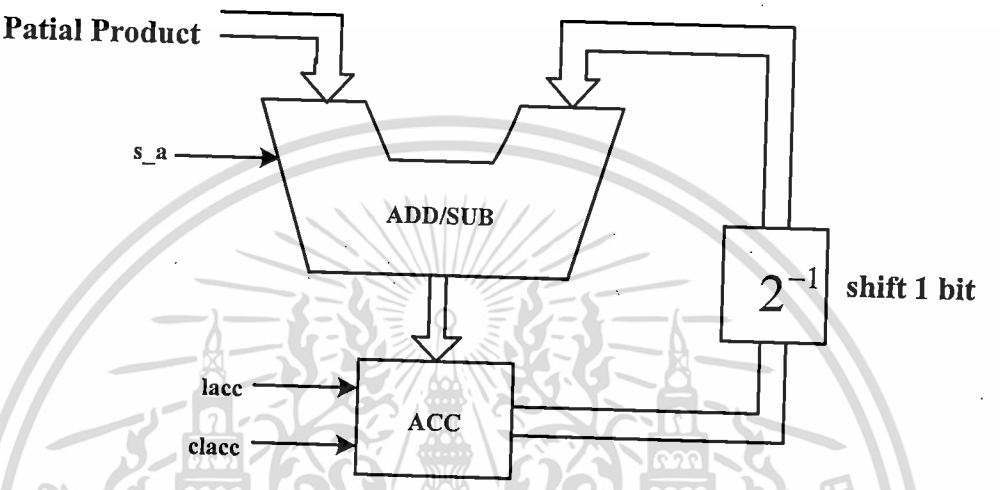
4. ข้อมูลที่ถูกเลื่อนออกมานั้นจะถูกนำไปชี้ตำแหน่งข้อมูล (Address) ของส่วนเก็บค่าและเรียกค่าข้อมูล (RAM) เพื่อทำการอ่านค่าของผลคูณย่อย (Partial Product) ที่อยู่ใน RAM ออกมา



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของการออกแบบวงจรส่วนเก็บค่าและเรียกค่าข้อมูล (RAM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

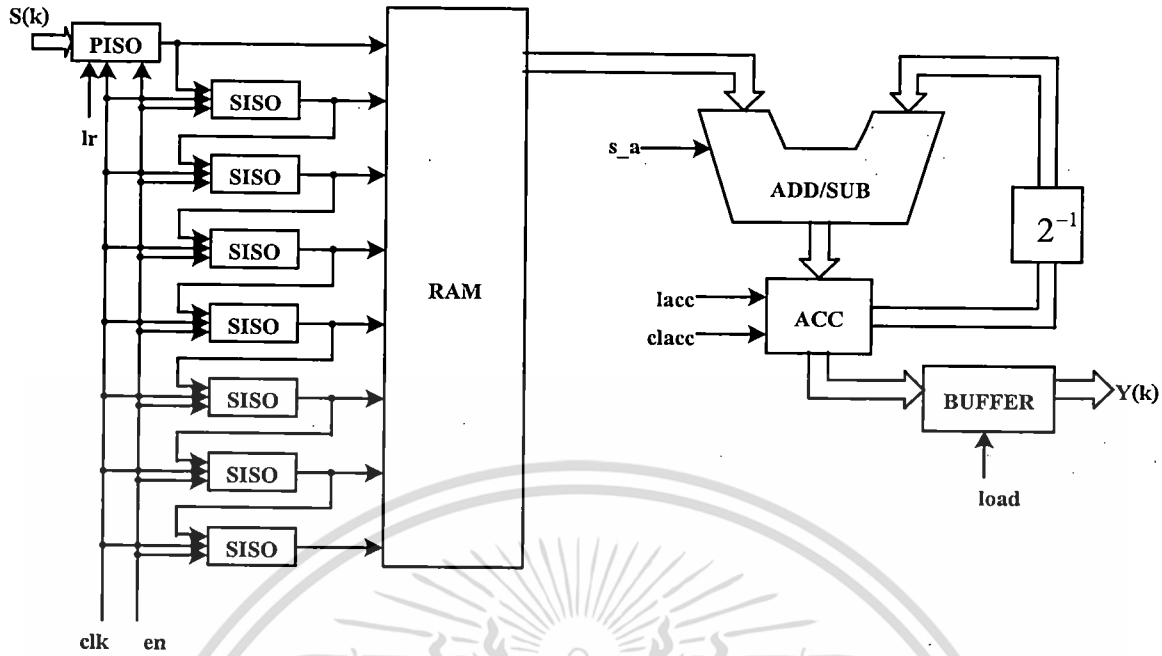
5. ผลคูณย่อยที่ออกมาจาก RAM นั้นจะมาเข้าวงจรสเกลลิ่ง แอคคิวมูเลเตอร์ (Scaling Accumulator) ซึ่งทำหน้าที่ในการหาผลรวมและผลต่างของเลขส่วนเติมเต็มสอง (2's complement) แทนการคูณโดยตรง ซึ่งภายในวงจรสเกลลิ่ง แอคคิวมูเลเตอร์ประกอบด้วยวงจรหาผลรวมและผลต่าง (ADD_SUB) ที่ถูกควบคุมโดยขาสัญญาณ s_a และ รีจีสเตอร์แอคคิวมูเลเตอร์ ข้อมูลในวงจรรีจีสเตอร์แอคคิวมูเลเตอร์ จะถูกนำออกมาโดยขาสัญญาณ lacc ซึ่งถูกเลื่อนไป1บิทก่อนที่จะมาหาผลรวมหรือผลต่างกับผลคูณย่อยที่ออกมาจาก RAM



รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของการออกแบบวงจรสเกลลิ่ง แอคคิวมูเลเตอร์

6. การทำงานจะวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-5 จนครบ8 รอบ ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นส่วนของการใช้โครงสร้างเลขคณิตกระจายในการออกแบบการทำงานของวงจร เมื่อทำงานวนจนครบ 8 รอบแล้ว วงจรหาผลรวมและผลต่างจะทำหน้าที่เป็นวงจรหาผลต่าง และจะได้สัญญาณเอาท์พุท (Output) y(k) ออกมา ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) สัญญาณเอาท์พุท y(k) จะถูกนำออกมาโดยขาสัญญาณ load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



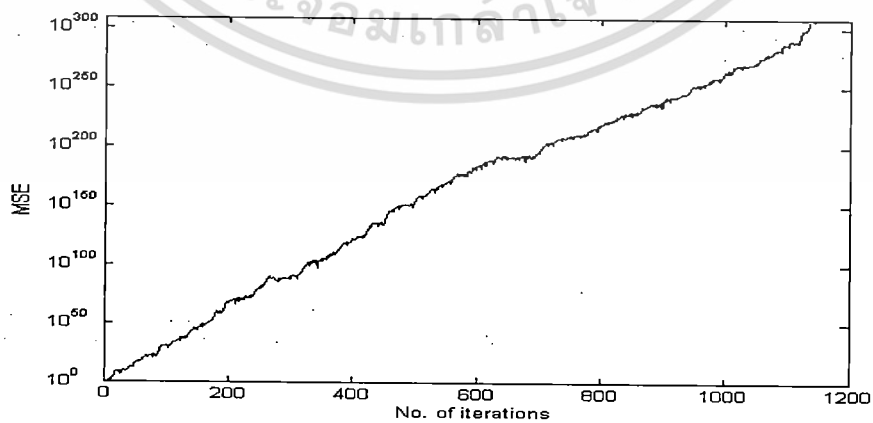
รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของการออกแบบวงจรโครงสร้างเลขคณิตกระจาย

การทดลองและผลการทดลอง

ผลการทดลองการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมแมทแลบ

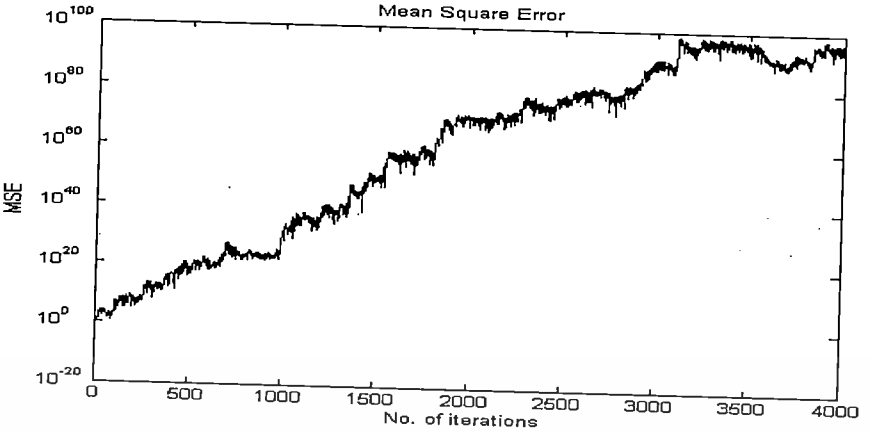
ในการทดลองที่ 1 นี้ เป็นการซิมูเลชั่นโดยโปรแกรมแมทแลบ เพื่อพิจารณาความเร็วของการลู่เข้าของสัญญาณ โดยเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด (Mean Square Error : MSE) ของแต่ละค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า (step size) และพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างเป็นฮาร์ดแวร์ โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การลู่เข้าเป็น 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125, 0.015625 และ 0.0078125

1. ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด (Mean Square Error : MSE)

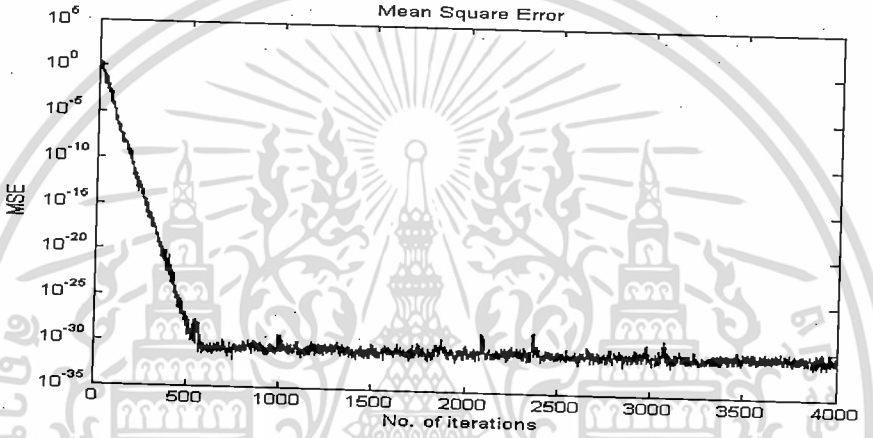


รูปที่ 9 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.25

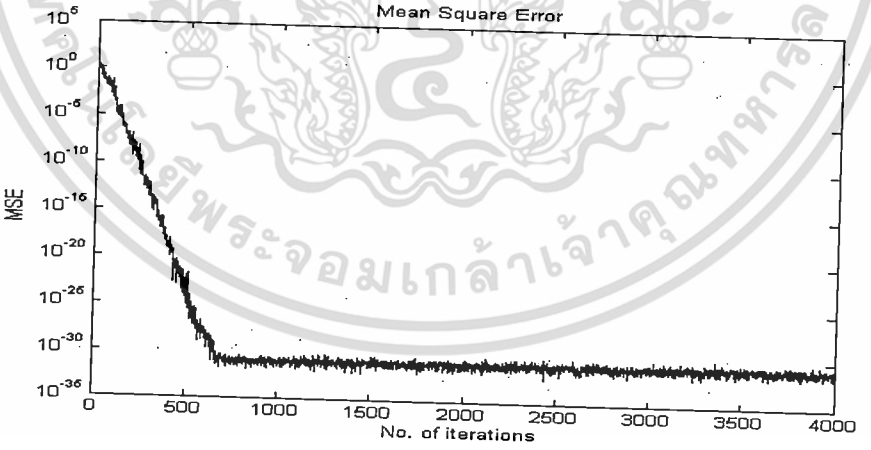
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.125

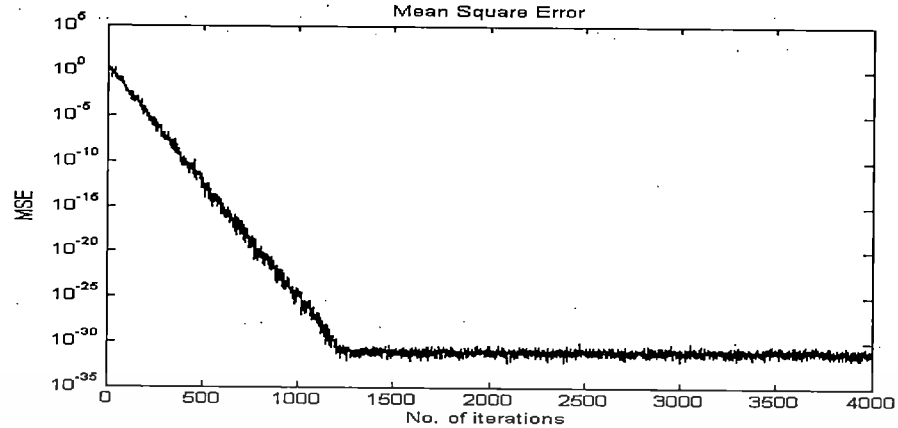


รูปที่ 11 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

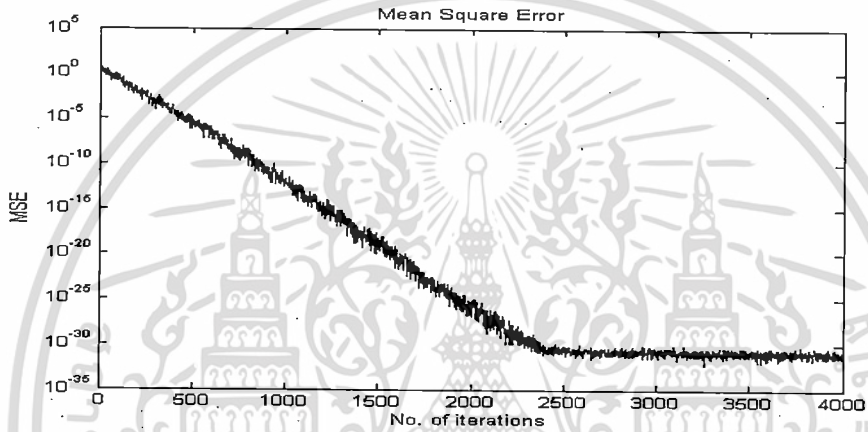


รูปที่ 12 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.03125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.015625



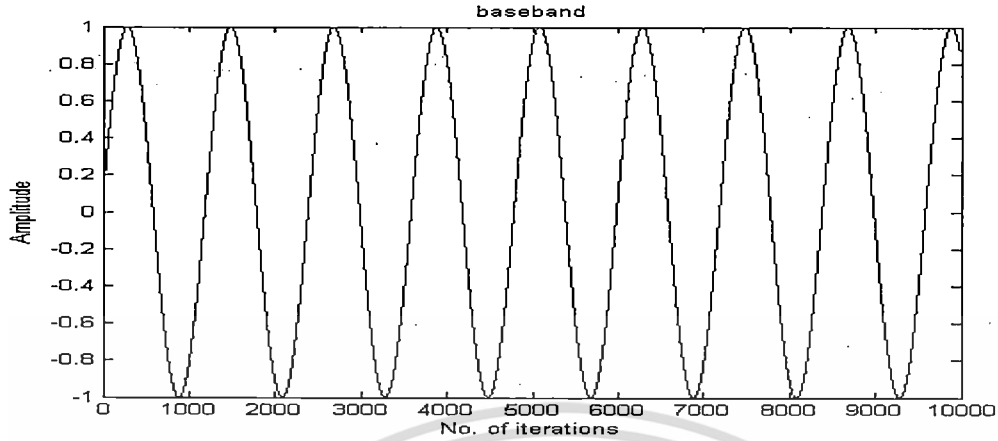
รูปที่ 14 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ของวงจรกรองอันดับที่ 8 สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0078125

จากรูปที่ 9 ถึง 14 เป็นผลจากการซิมูเลชั่นด้วยโปรแกรมแมทแลบ จะสังเกตเห็นว่าถ้าใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าต่างกัน การลู่เข้าของสัญญาณก็จะมีความเร็วไม่เท่ากัน โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าค่ามากจะมีความเร็วในการลู่เข้ามากกว่าการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีค่าน้อย แต่ถ้าเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีค่ามากเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้

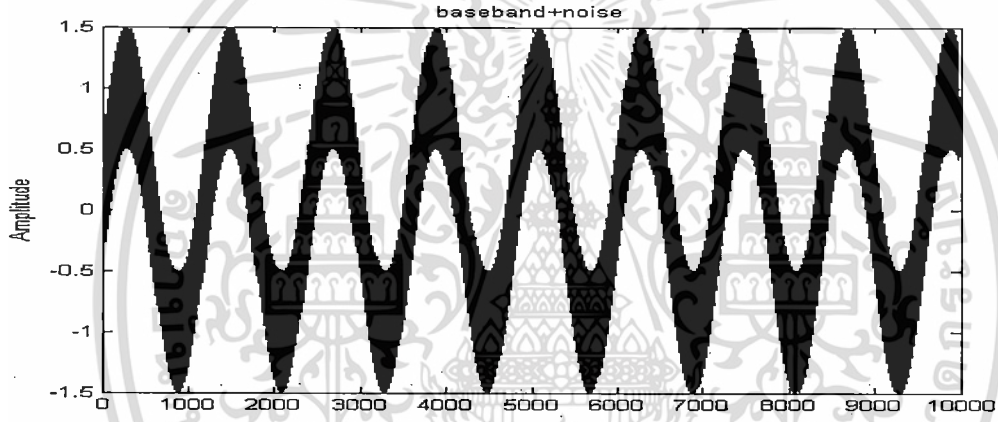
ในการทดลองที่ 2 จะนำค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีความเร็วในการลู่เข้าเร็วที่สุด 3 อันดับแรก คือ0.0625 0.03125 และ 0.015625 ตามลำดับ มาใช้ในการซิมูเลชั่นเพื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรกรองแบบปรับตัวได้ เมื่อทำการกำหนดสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz ขนาด 0.5 โวลท์ รวมอยู่กับสัญญาณรูปไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต้องการ โดยทำการปรับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการเป็น 100 Hz, 500 Hz และ1kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

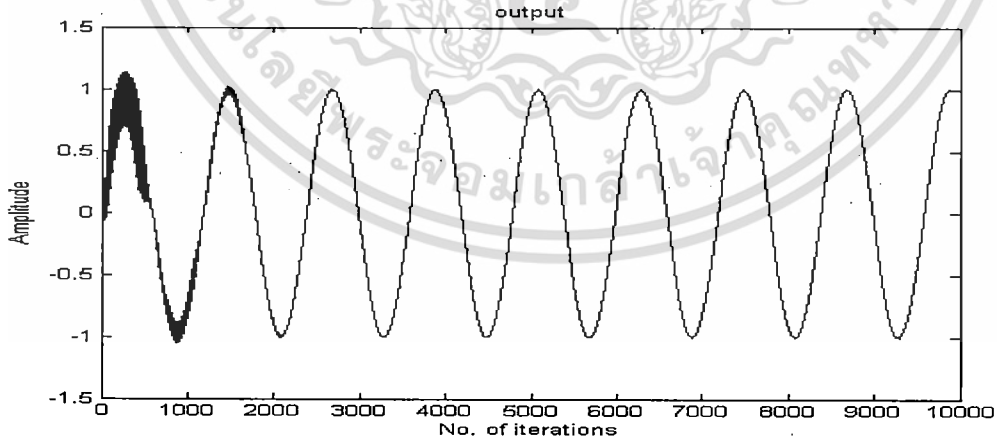
2 สัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้ เมื่อสัญญาณอินพุทคือการบวกกันของสัญญาณรูปไซน์ 2 สัญญาณ



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



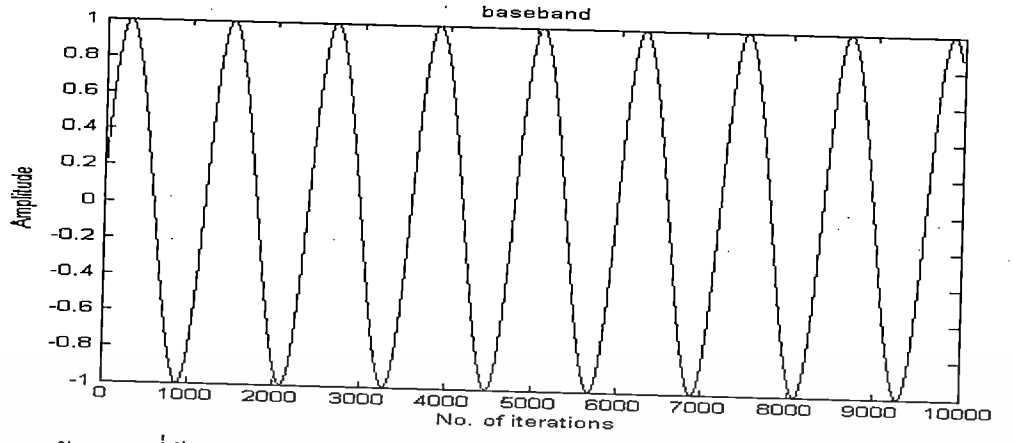
ข) สัญญาณอินพุท



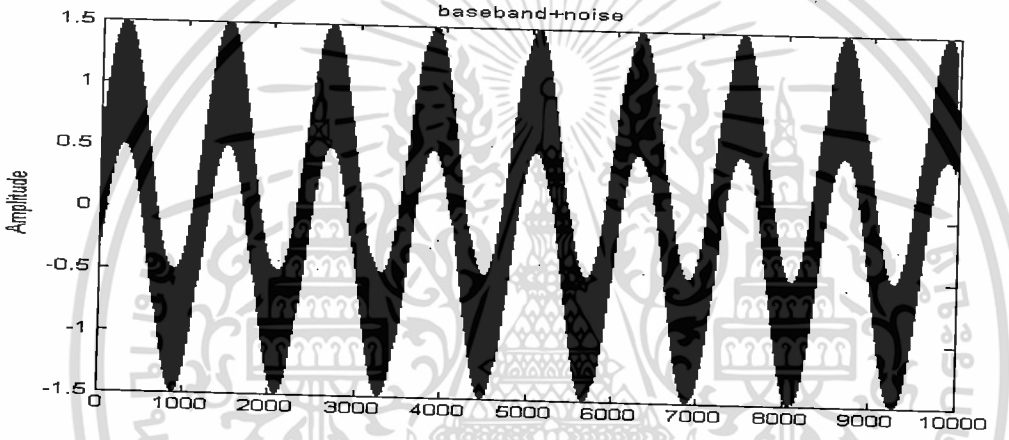
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 15 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 100 Hz

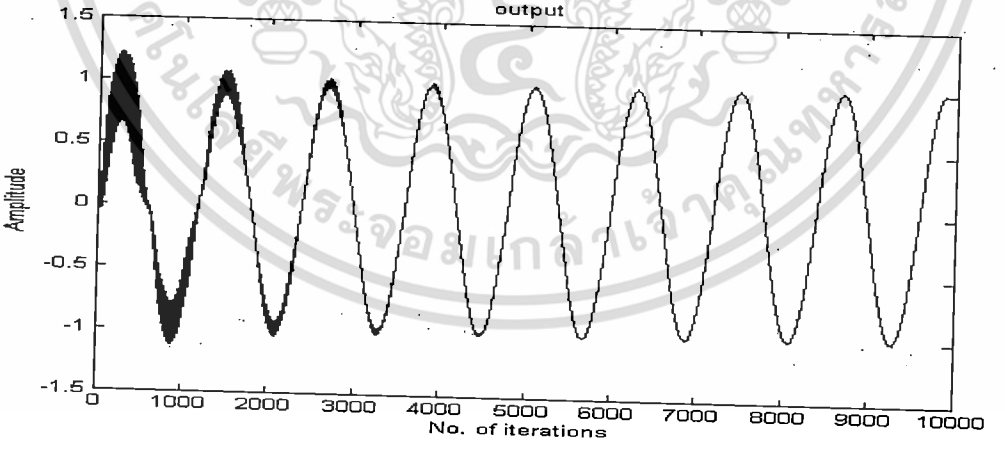
เอกสารนี้ ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



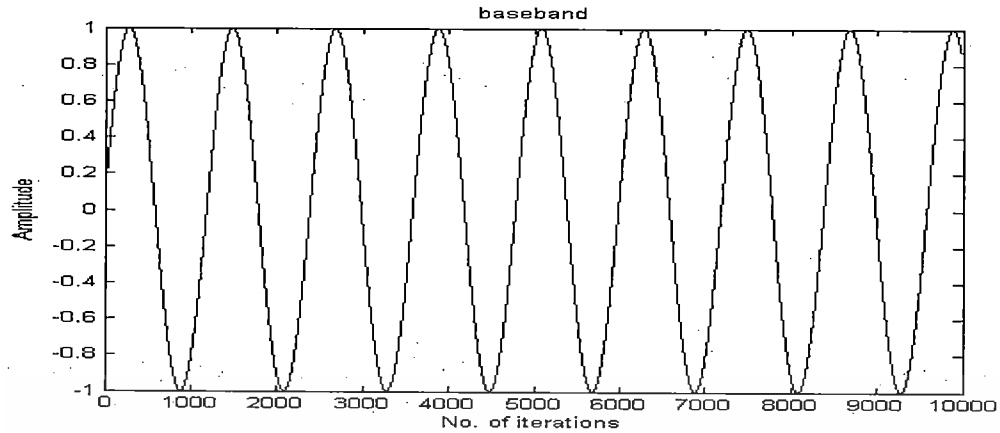
ข) สัญญาณอินพุท



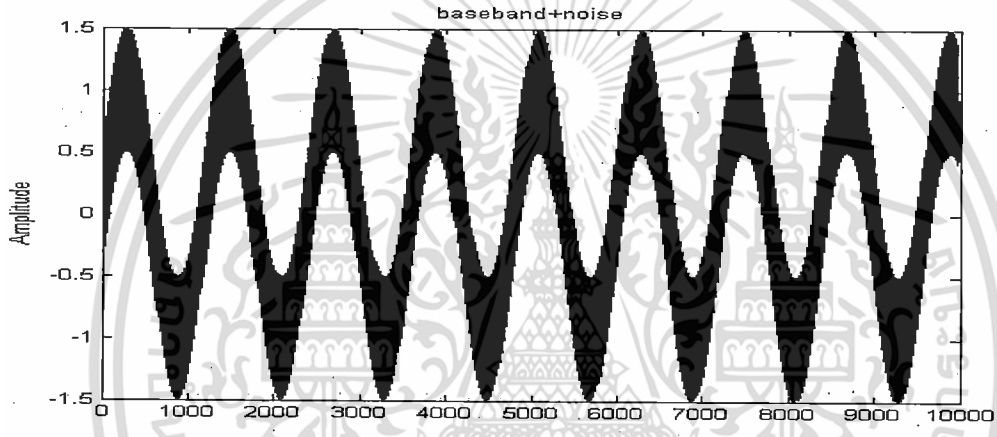
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 16 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.03125 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 100 Hz

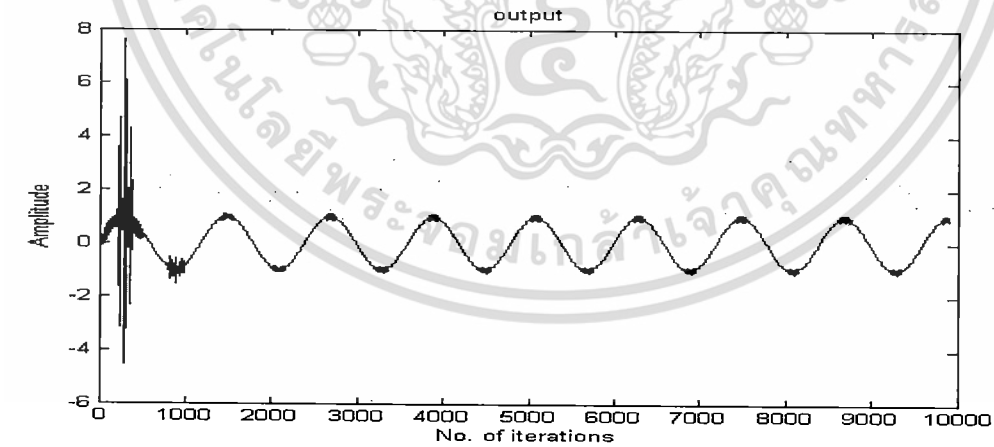
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



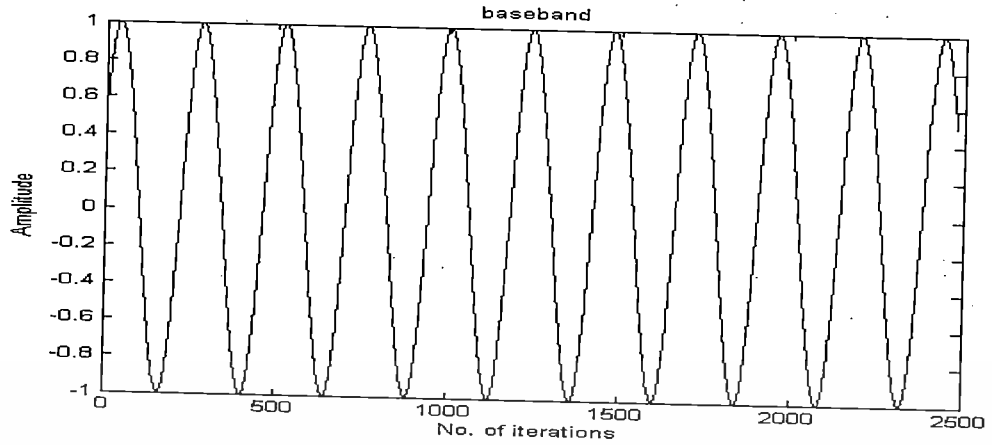
ข) สัญญาณอินพุท



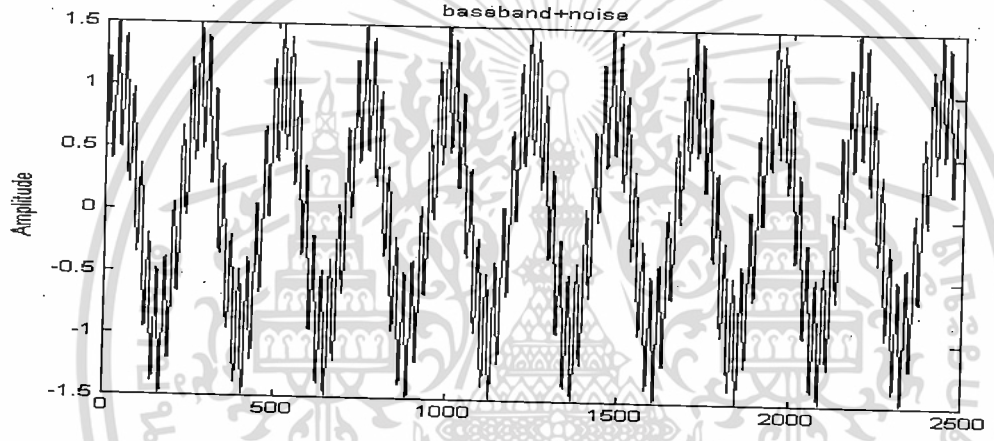
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 17 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.015625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 100 Hz

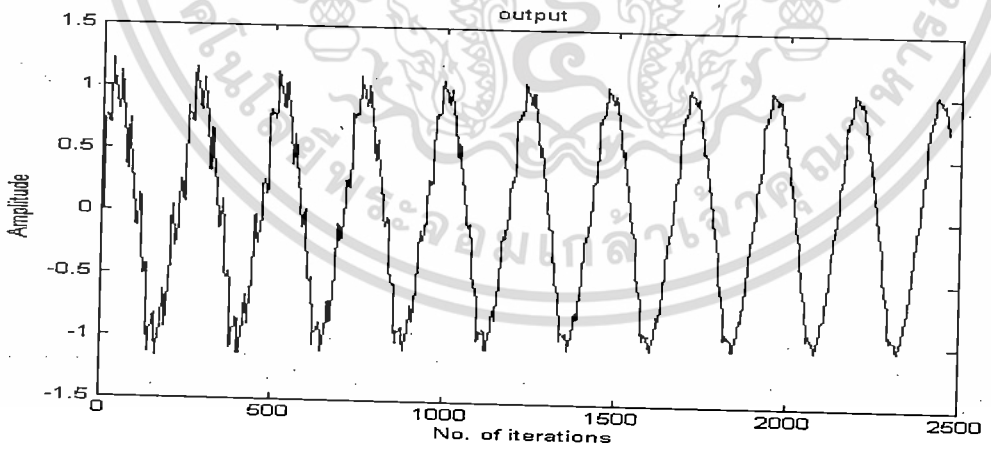
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



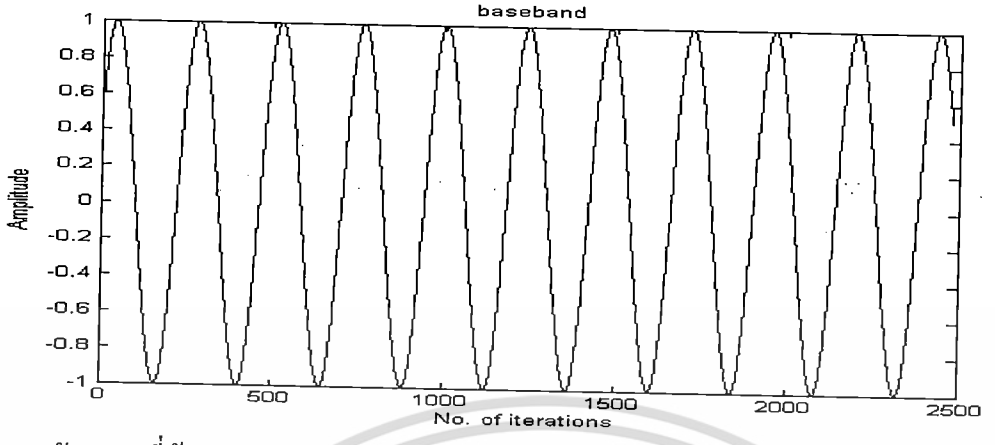
ข) สัญญาณอินพุท



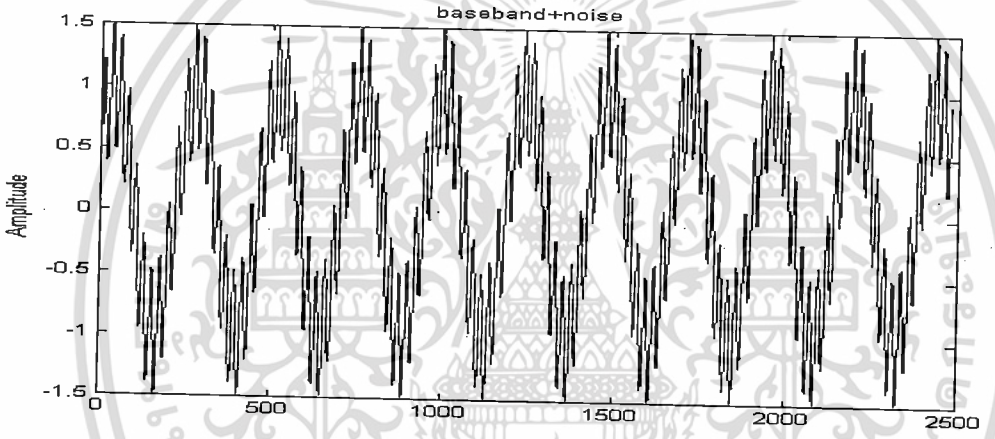
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 18 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการความถี่ 500 Hz

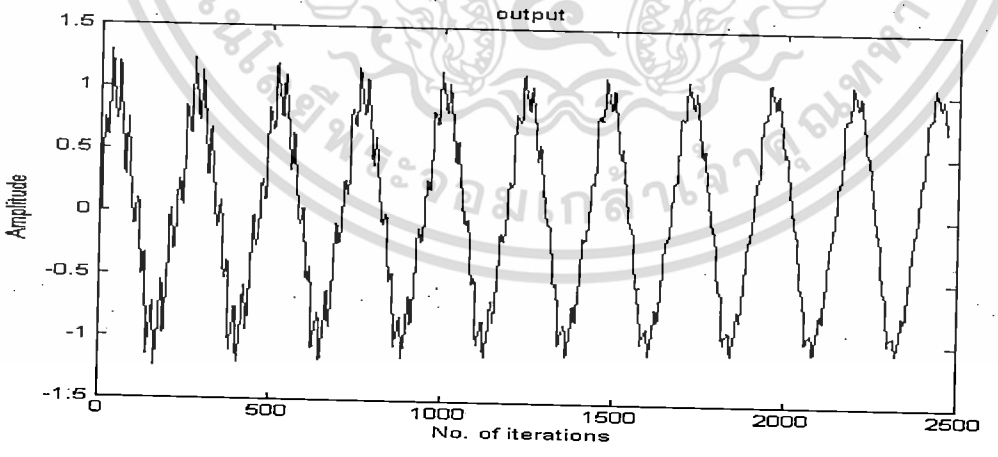
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



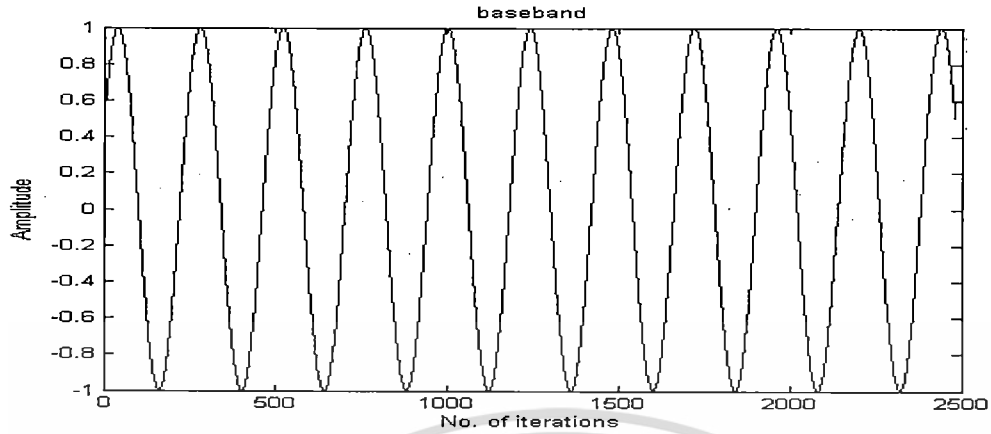
ข) สัญญาณอินพุท



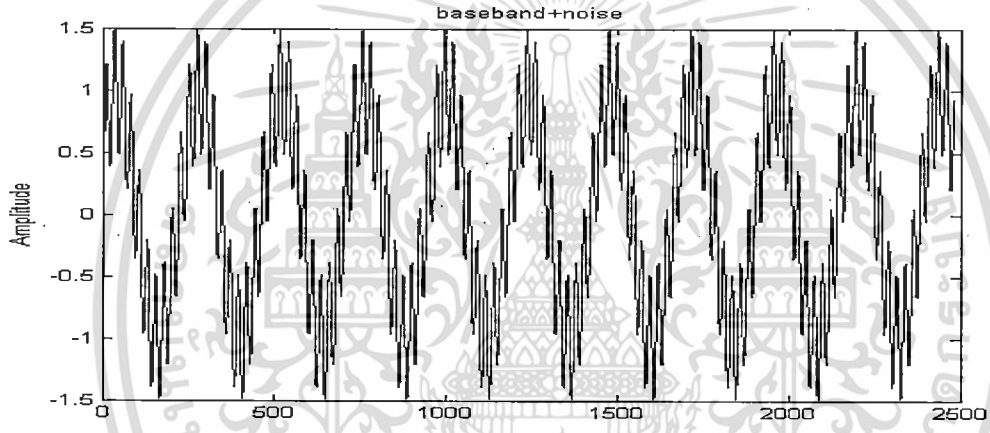
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 19 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.03125 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 500 Hz

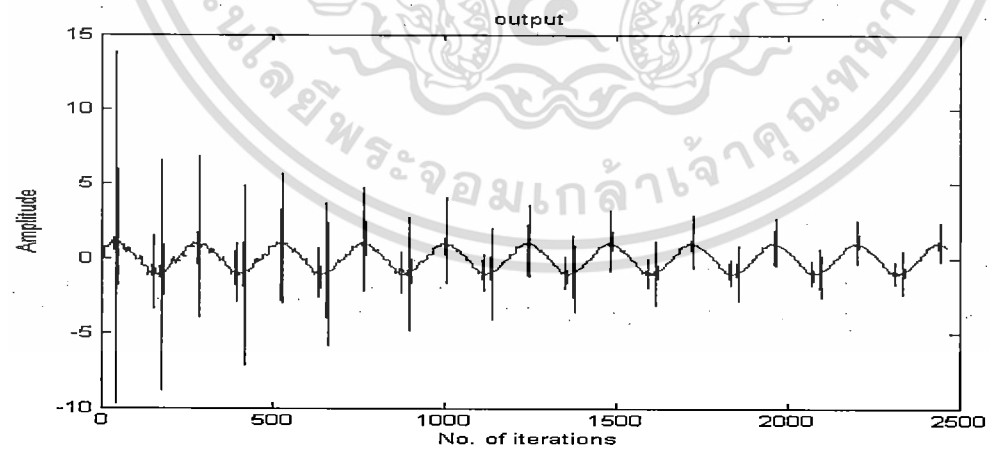
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



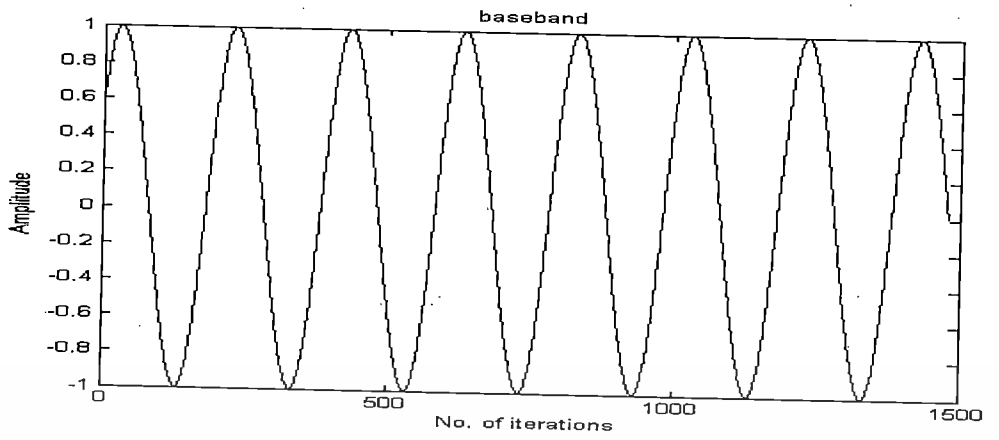
ข) สัญญาณอินพุท



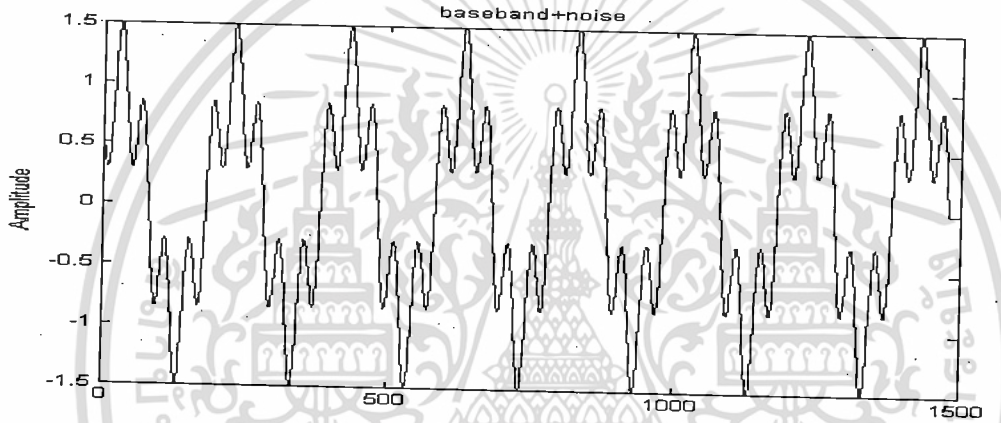
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 20 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.015625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 500 Hz

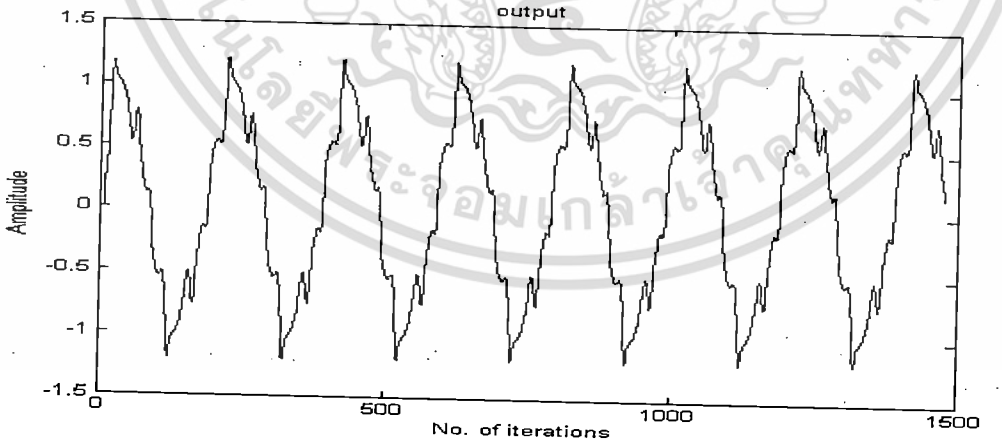
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



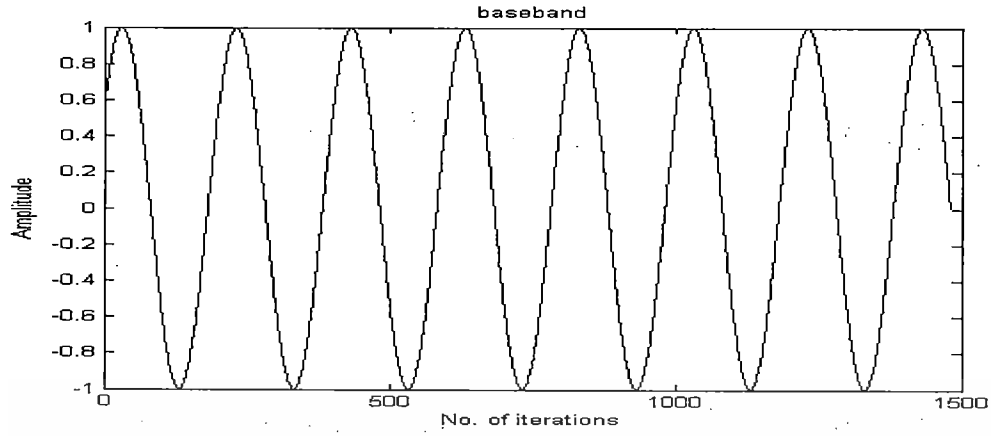
ข) สัญญาณอินพุท



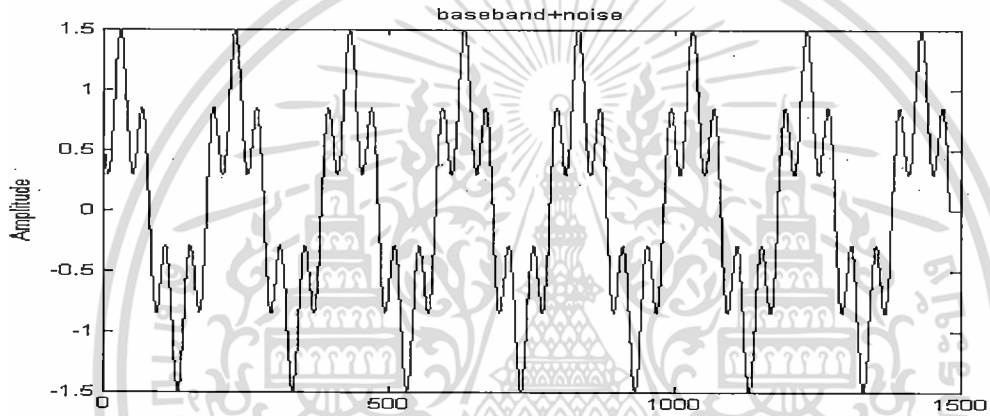
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 21 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 1 kHz

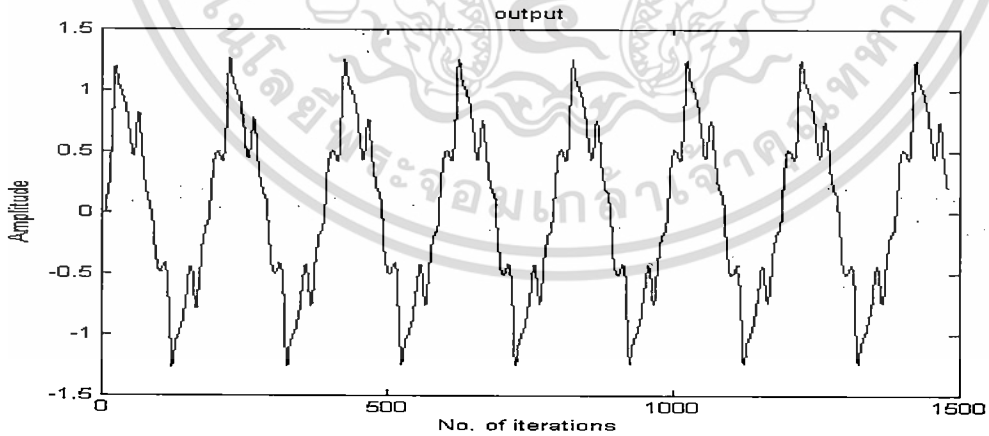
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



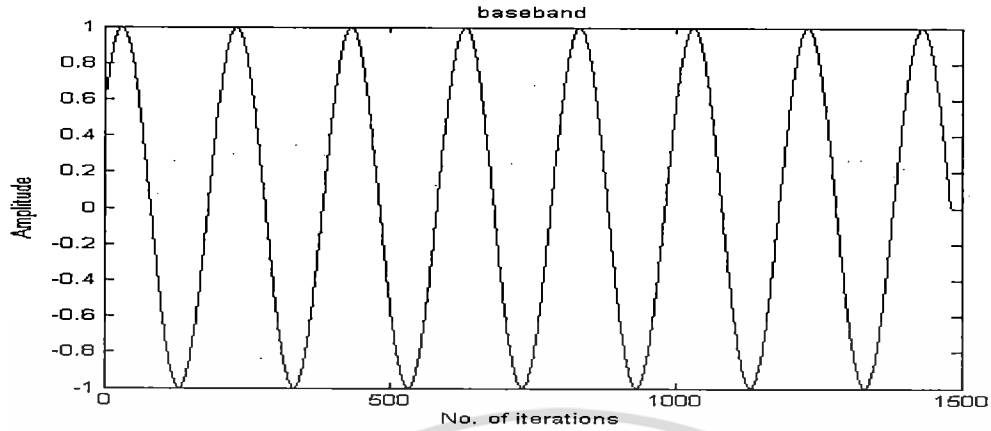
ข) สัญญาณอินพุท



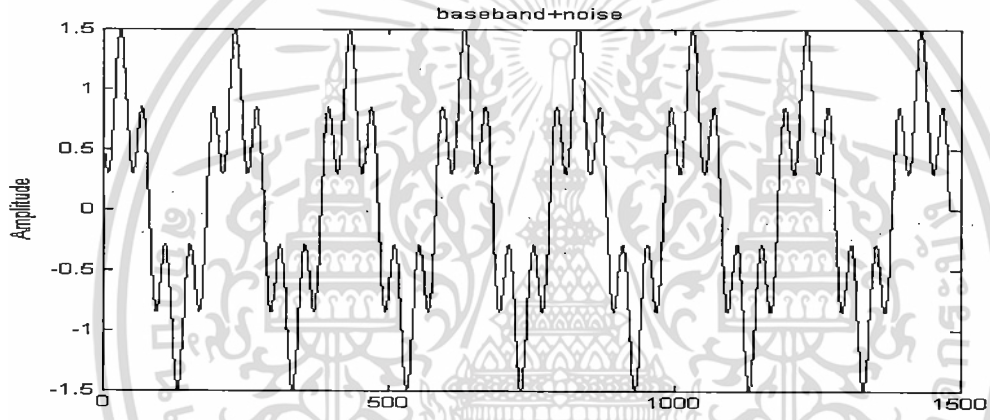
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 22 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.03125 เมื่อสัญญาณอินพุทคือสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 1 kHz

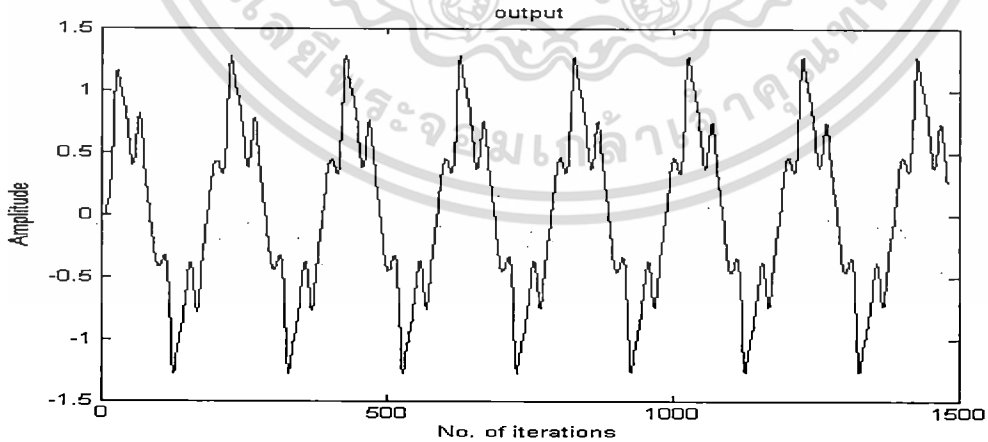
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) สัญญาณที่ต้องการ (desire signal)



ข) สัญญาณอินพุท



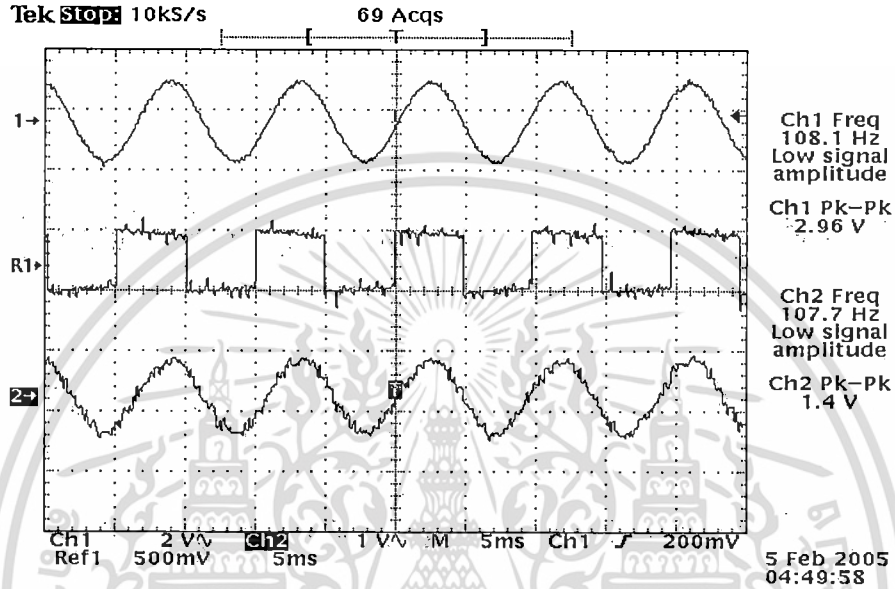
ค) สัญญาณที่กรองได้

รูปที่ 23 แสดงสัญญาณต่างๆที่ได้จากวงจรกรองอันดับที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.015625 เมื่อสัญญาณอินพุทคือ สัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz บวกกับสัญญาณที่ต้องการ ความถี่ 1 kHz

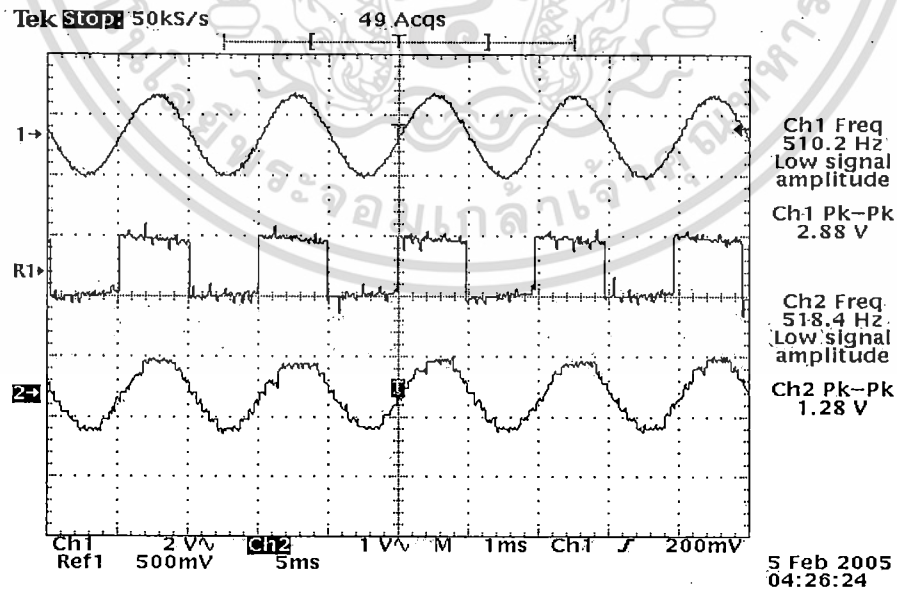
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาท์พุทที่ผ่านตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้ อันดับที่ 8 โดยสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม

ในการทดลองนี้ เป็นการทดลองเพื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทเมื่อมีการป้อนสัญญาณจริง โดยทำการป้อนสัญญาณอินพุทซึ่งเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ความถี่ 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz และ 5 kHz ขนาด 0.5 Volt และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่เท่ากับสัญญาณอินพุท โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการซิมูเลชั่นโดยโปรแกรมแมทแลบ

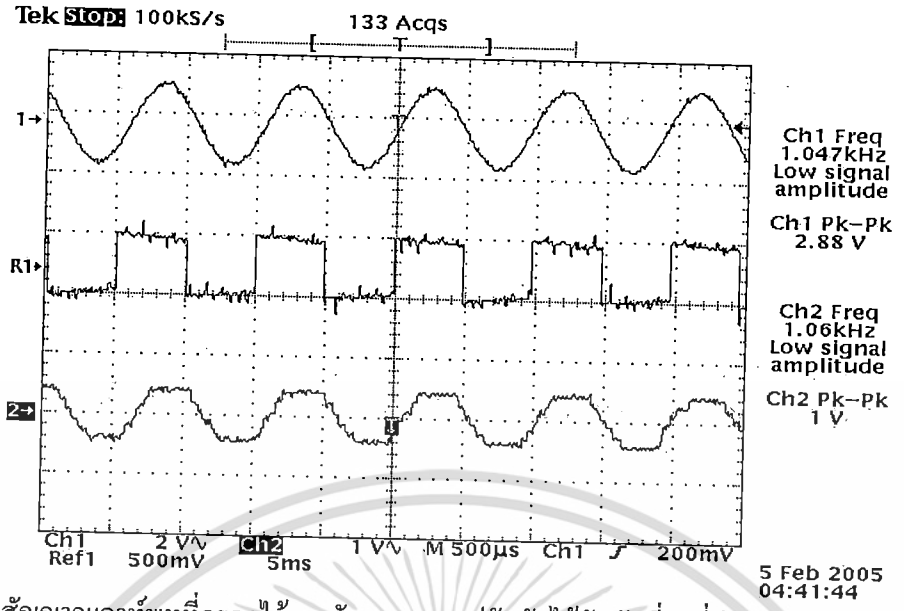


รูปที่ 24 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้ อันดับที่ 8 ที่มีสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ 100 Hz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

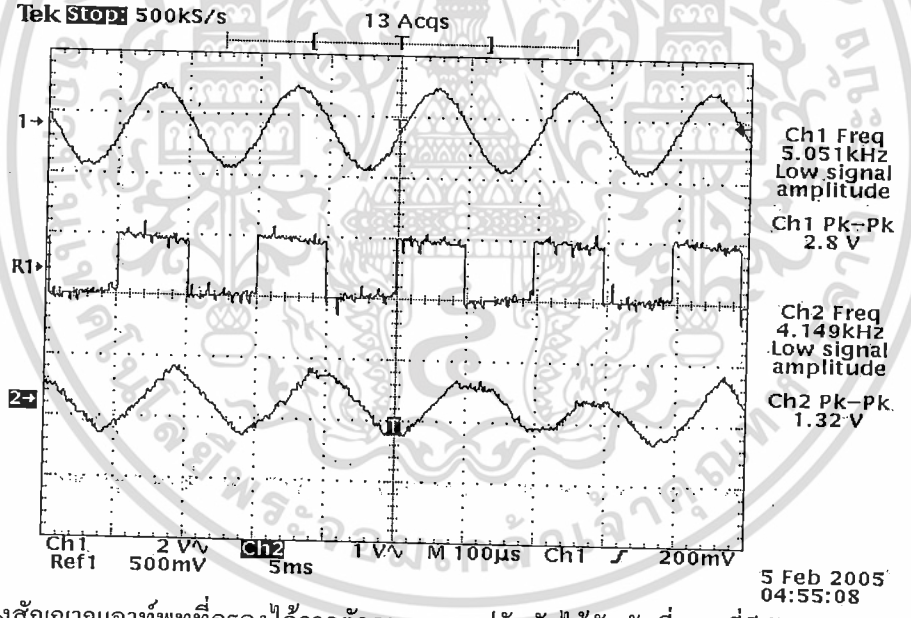


รูปที่ 25 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้ อันดับที่ 8 ที่มีสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ 500 Hz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 26 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 ที่มีสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ 1 kHz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

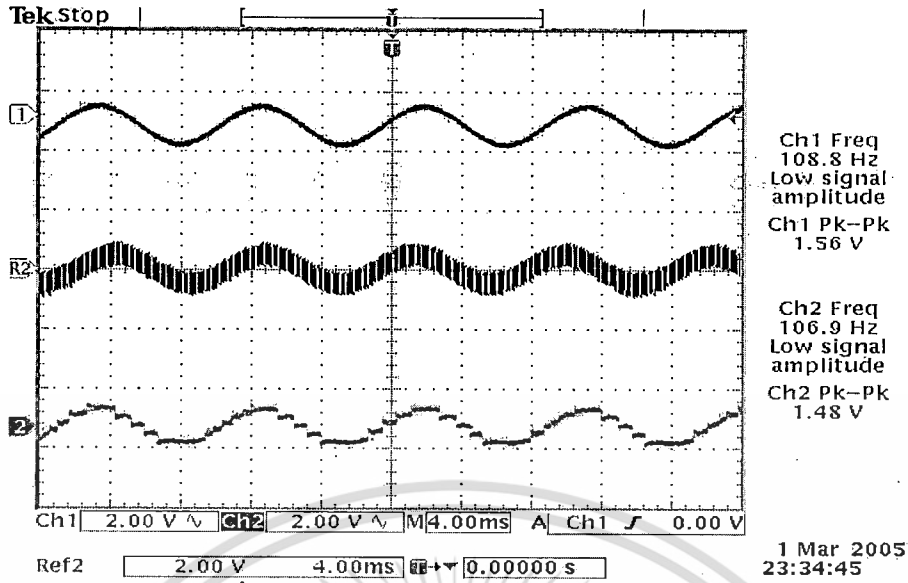


รูปที่ 27 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 ที่มีสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ความถี่ 5 kHz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

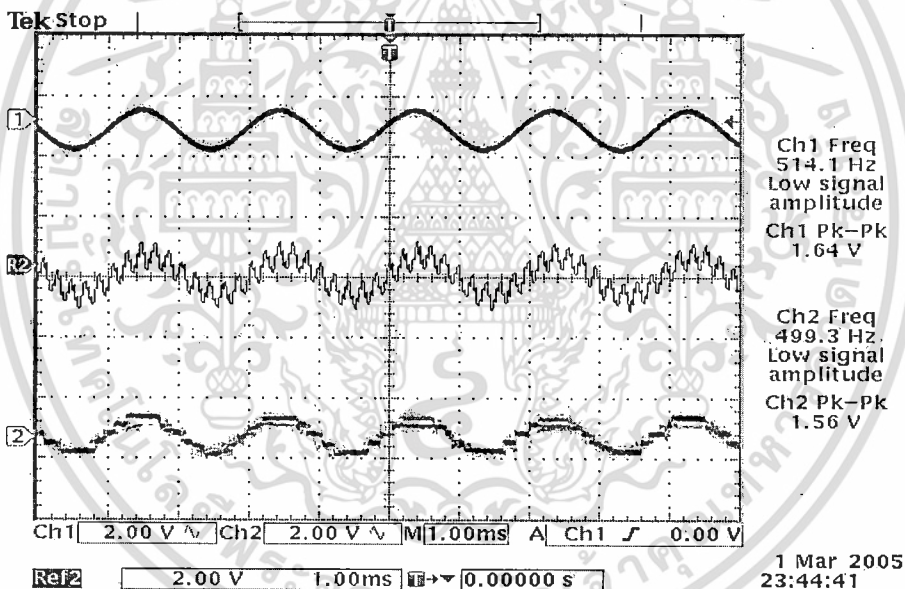
สัญญาณเอาท์พุทที่ผ่านตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้ อันดับที่ 8 โดยสัญญาณอินพุทคือการบวกกันของสัญญาณรูปไซน์ 2 สัญญาณ

สัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz ขนาด 0.5 โวลท์ รวมอยู่กับสัญญาณรูปไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต้องการ โดยทำการปรับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการเป็น 100 Hz, 500 Hz , 1kHz และ 2 kHz โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

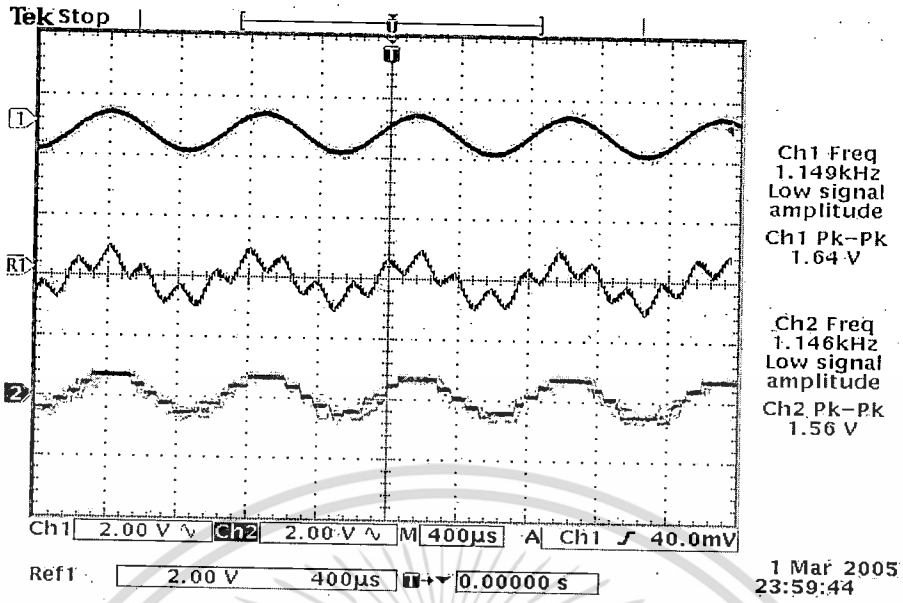


รูปที่ 28 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 100 Hz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

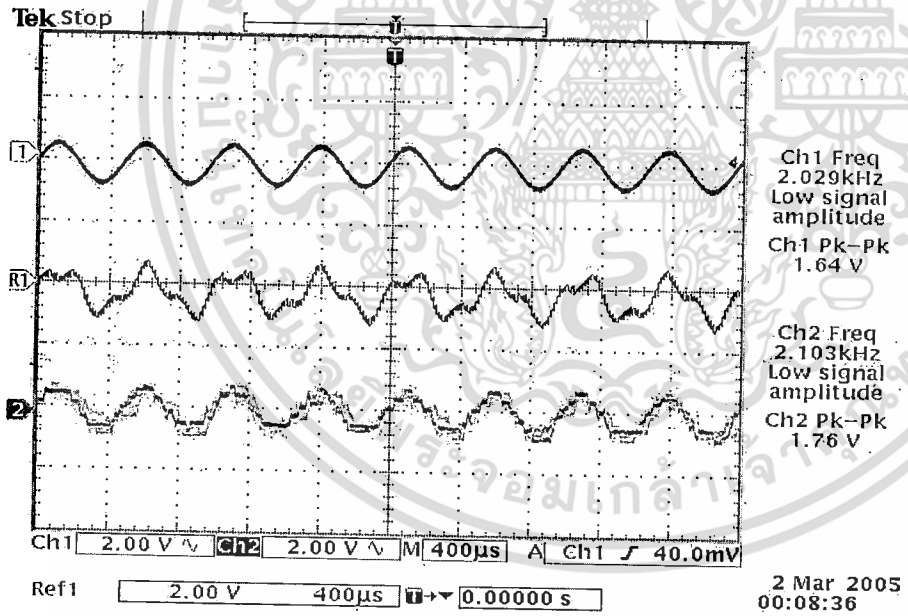


รูปที่ 29 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 500 Hz ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 30 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 1 kHz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

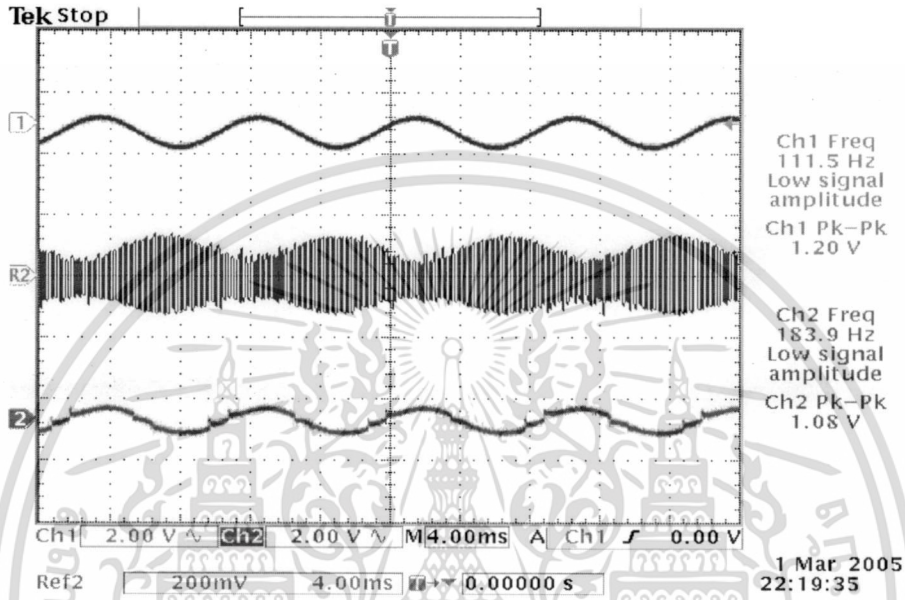


รูปที่ 31 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 2 kHz ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

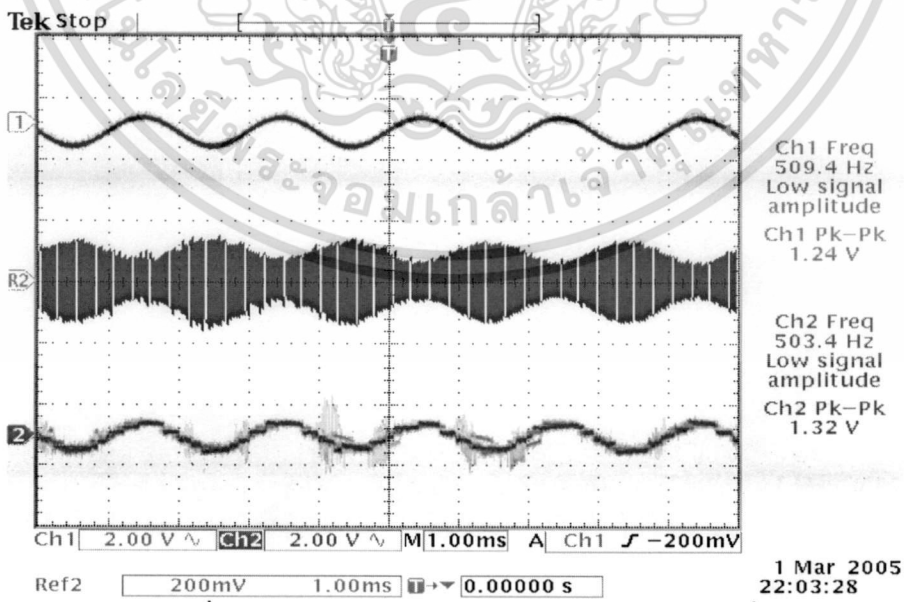
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาท์พุทที่ผ่านตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้ อันดับที่ 8 โดยสัญญาณอินพุทคือ การคูณกันของสัญญาณรูปไซน์ 2 สัญญาณ

สัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 50 kHz ขนาด 0.5 โวลท์ คูณกับสัญญาณรูปไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต้องการ โดยทำการปรับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการเป็น 100 Hz, 500 Hz , 1kHz และ 5 kHz โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

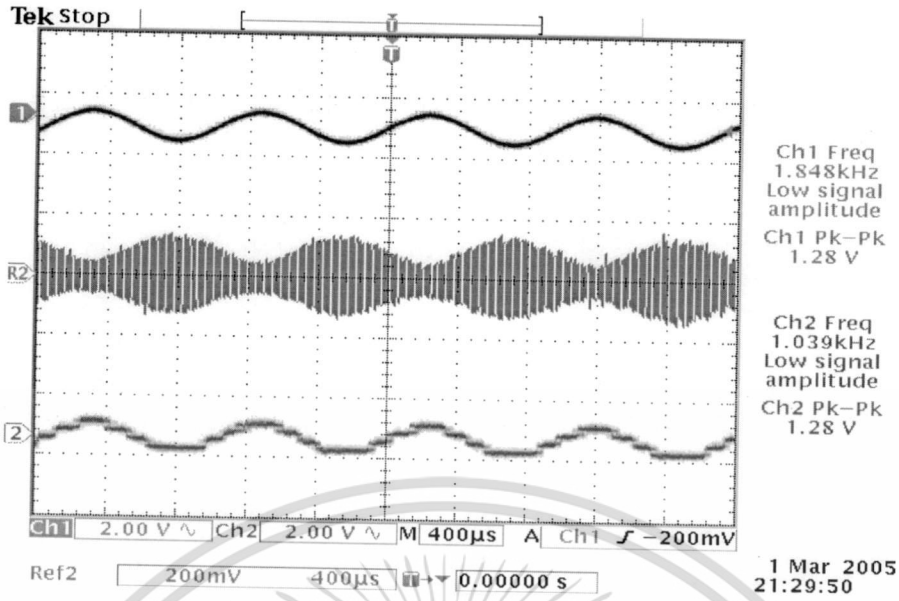


รูปที่ 32 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 100 Hz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

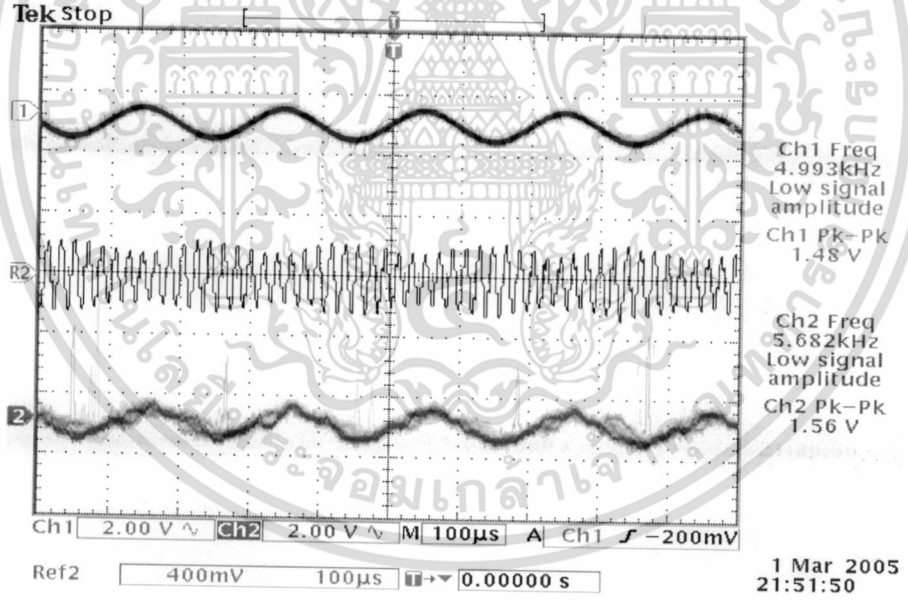


รูปที่ 33 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้ โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 500 Hz ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 1 kHz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625



รูปที่ 35 แสดงสัญญาณเอาท์พุทที่กรองได้จากตัวกรองแบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 โดยสัญญาณที่ต้องการเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 5 kHz สัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625

จากรูปที่ 32 ถึงรูปที่ 35 พบว่าตัวกรองความถี่แบบปรับตัวได้อันดับที่ 8 ที่มีสัมประสิทธิ์การลู่เข้า เท่ากับ 0.0625 มีประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณที่ดีพอสมควร คือสามารถกรองแยกเอาสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ต้องการออกมาได้ และที่ความถี่ต่ำสัญญาณที่กรองออกมาได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณที่ต้องการมากกว่าที่ความถี่สูง

สรุปผล

จากการออกแบบและทำการจำลองผลการทำงานของวงจรกรองความถี่แบบปรับตัวได้ โดยการซิมูเลชั่นด้วยโปรแกรมแมทแลบ ทำให้ทราบว่าจะสามารถกรองเอาสัญญาณที่ต้องการออกมาได้ก็ต่อเมื่อ เลือกค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า (step size) ให้เหมาะสม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า คือตัวที่ควบคุมว่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวคเตอร์ทิศทางเร็วมากน้อยแค่ไหน ดังนั้นการเลือกค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่เหมาะสมจะมีผลต่อประสิทธิผลการทำงานของระบบมาก

จากผลการทดลองที่ 1 เมื่อทำการซิมูเลชั่นโดยเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าเป็น 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125, 0.015625 และ 0.0078125 แล้วพิจารณาค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของแต่ละค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า พบว่า ถ้าเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีค่าน้อยเกินไป ก็จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้ช้า แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปก็อาจทำให้สัมประสิทธิ์ไม่สามารถลู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้องได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีความเร็วในการลู่เข้าเร็วที่สุด 3 อันดับแรกคือ 0.0625, 0.03125 และ 0.015625 ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ 2 ที่มีการนำค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าที่มีความเร็วในการลู่เข้าเร็วที่สุด 3 อันดับแรกคือ 0.0625, 0.03125 และ 0.015625 ตามลำดับ มาใช้ในการซิมูเลชั่นเพื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรกรองแบบปรับตัวได้ เมื่อทำการกำหนดสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 5 kHz ขนาด 0.5 โวลท์ รวมอยู่กับสัญญาณรูปไซน์ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต้องการ โดยทำการปรับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการเป็น 100 Hz, 500 Hz และ1kHz พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.0625 จะสามารถกรองเอาสัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการออกมาได้มีคุณภาพมากที่สุด

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความถี่ก็มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองสัญญาณของวงจรกรองแบบปรับตัวได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาการกรองสัญญาณที่ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้าค่าเดียวกันแต่ความถี่ต่างกัน คือ 100 Hz, 1kHz และ 5 kHz พบว่าสัญญาณที่กรองออกมาได้นั้นมีคุณภาพต่างกัน โดยคุณภาพของสัญญาณจะแย่ลง คือมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณที่ต้องการ เมื่อความถี่สูงขึ้นตามลำดับ

ข้าพเจ้าขอรับรอง ข้อความข้นต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ

(นายศรวัฒน์ ชิวปรีชา)

หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้