

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับ
ชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน
AN IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTER FOR
HEARING LOSS COMPENSATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับ
ชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน
AN IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTER FOR
HEARING LOSS COMPENSATION



โดย
นางสาวเนติลักษณ์ พันธุ์จิ้น
นายพิเชษฐ์ น้อยโสภณ

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับ
ชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน
AN IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTER FOR
HEARING LOSS COMPENSATION



โดย
นางสาวเนติลักษณ์ พันธุ์จิ้น 52010625
นายพิเชษฐ์ น้อยโสภณ 52010830

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา
ผศ.อัศรพล ตีร์รัตน์

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555


ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

()
อาจารย์ที่ปรึกษา

๕ มี.ค. ๒๕๕๖

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

()
กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

๕ มี.ค. ๕๖

วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน

AN IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTER FOR HEARING LOSS COMPENSATION

ผู้จัดทำ

1. นางสาวเนติลักษณ์ พันธุ์จัน รหัสนักศึกษา 52010625
2. นายพิเชษฐ์ น้อยโสภณ รหัสนักศึกษา 52010830



(ผศ.ดร.ศรวัดน์ ชิวปรีชา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผศ.อักรพล ตีร์รัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการไต่ยีนในครั้งนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำต้องขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรวัฒน์ ชิวปรีชา ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง ขอบพระคุณคณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลในการจัดทำ ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้อีกกำลังใจ และสนับสนุนการทำงานตลอดมา และขอบคุณเพื่อนๆที่ช่วยเหลือกันจนสามารถทำงานสำเร็จได้

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำต้องขอบพระคุณคณะกรรมการผู้สอบปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ช่วยพิจารณา และให้คำแนะนำ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่อไป จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวเนติลักษณ์ พันธุ์จัน
นายพิเชษฐ์ น้อยโสภณ
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความ
สูญเสียของการได้ยิน

AN IMPLEMENTATION OF DIGITAL FILTER FOR
HEARING LOSS COMPENSATION

โดย นางสาวเนติลักษณ์ พันธุ์จีน 52010625

นายพิเชษฐ์ น้อยโสภณ 52010830

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ศรวฒน์ ชิวปรีชา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.อัครพล ตีร์รัตน์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน โดยใช้วิธีการออกแบบจากวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) ซึ่งแต่ละบุคคลจะมีรูปแบบการสูญเสียการได้ยินแตกต่างกัน โดยจะทำการสร้างวงจรกรองความถี่ เพื่อชดเชยย่านความถี่เสียงที่ไม่ได้ยินนั้น และสร้างเป็นเครื่องช่วยฟังด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ABSTRACT

This project presents an implementation digital filter for compensating the hearing loss in human. Finite impulse response (FIR) filter will be designed for each hearing loss pattern. The proposed digital filter will be used to compensate in frequency band which has hearing problem. Finally, digital filter will be implemented on digital signal processor (DSP) and perform as a digital hearing aid.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	XVI
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 กรอบการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข (A FRAMEWORK FOR DIGITAL FILTER DESIGN)	2
2.2 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด	13
2.3 เครื่องช่วยฟัง (HEARING AIDS)	19
2.4 หูตึง (HEARING LOSS)	24
2.5 ELECTRET MICROPHONE	29
2.6 ภาคขยายสัญญาณ (AMPLIFIER)	30
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์	33
3.1 การออกแบบ	33
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	49
3.3 โครงสร้างของระบบ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	56
4.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER)	56
4.2 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER)	64
4.3 ตารางเปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณ เชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER)	71
4.4 ผลการทดลองวัดสัญญาณที่ส่งออกมาจากโปรแกรมทดสอบการได้ยิน	76
4.5 ผลการทดลองต่อติระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด MC56F8037EVM (FREESCALE)	82
4.6 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองและการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER)	84
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	120
5.1 สรุปผล	120
5.2 ข้อเสนอแนะ	120
บรรณานุกรม	121
ภาคผนวก	
โปรแกรมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=18000 HZ และ FILTER LENGTH=9	19
2.2 เครื่องช่วยฟังแบบพกกระเป๋	22
2.3 เครื่องช่วยฟังแบบทัดหลังใบหู	22
2.4 เครื่องช่วยฟังชนิดสั่งทำขนาดเล็กใส่ในหูแบบ ITE ITC CIC ตามลำดับ	23
2.5 เครื่องช่วยฟังชนิดแว่นตา	24
2.6 เครื่องช่วยฟังแบบรับเสียงข้ามหู	24
2.7 การตรวจการได้ยินด้วยส้อมเสียง	27
2.8 COCHLEAR IMPLANT	28
2.9 Electret condenser microphone capsules	29
2.10 ELECTRET CONDENSER MICROPHONE CAPSULES CIRCUIT	30
2.11 POWER AMPLIFIER CIRCUIT	31
3.1 AUDIOGRAM การได้ยินสำหรับคนปกติ	33
3.2 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ	34
3.3 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 HZ	35
3.4 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ กรณีที่ 1	36
3.5 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ กรณีที่ 2	37
3.6 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 HZ	38
3.7 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่	39
3.8 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง	40
3.9 AUDIOGRAM การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น	41
3.10 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ	42
3.11 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลาง ที่ความถี่ประมาณ 4000 HZ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางใน ทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1	44
3.13 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางใน ทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2	45
3.14 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ ความถี่ประมาณ 4000 HZ	46
3.15 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุก ช่วงความถี่	47
3.16 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ ช่วงความถี่สูง	48
3.17 คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น	49
3.18 โครงสร้างของบอร์ด MC56F8037EVM	50
3.19 บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด MC56F8037EVM	51
3.20 บล็อกไดอะแกรมของ MC56F8037	52
3.21 โปรแกรม CODEWARRIOR IDE VERSION 5.6.1	53
3.22 โปรแกรมทดสอบการได้ยิน	54
3.23 โครงสร้างของระบบ	54
3.24 การทดลองการออกแบบการออกแบบวงจรกรองและการกรองสัญญาณ เชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER)	55
4.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ ยินเนื่องจากอายุ	56
4.2 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz	57
4.3 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2	59
4.5 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz	60
4.6 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสีย การได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่	61
4.7 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง	62
4.8 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนอง อิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสีย การได้ยินแบบเชิงเส้น	63
4.9 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินเนื่องจาก อายุ	64
4.10 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz	65
4.11 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1	66
4.12 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz	68
4.14 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่	69
4.15 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง	70
4.16 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น	71
4.17 สัญญาณที่มี FREQUENCY 250 HZ AMPLITUDE 0.5 V	76
4.18 สัญญาณที่มี FREQUENCY 250 HZ AMPLITUDE 1 V	76
4.19 สัญญาณที่มี FREQUENCY 500 HZ AMPLITUDE 0.5 V	77
4.20 สัญญาณที่มี FREQUENCY 500 HZ AMPLITUDE 1 V	77
4.21 สัญญาณที่มี FREQUENCY 1000 HZ AMPLITUDE 0.5 V	78
4.22 สัญญาณที่มี FREQUENCY 1000 HZ AMPLITUDE 1 V	78
4.23 สัญญาณที่มี FREQUENCY 2000 HZ AMPLITUDE 0.5 V	79
4.24 สัญญาณที่มี FREQUENCY 2000 HZ AMPLITUDE 1 V	79
4.25 สัญญาณที่มี FREQUENCY 4000 HZ AMPLITUDE 0.5 V	80
4.26 สัญญาณที่มี FREQUENCY 4000 HZ AMPLITUDE 1 V	80
4.27 สัญญาณที่มี FREQUENCY 8000 HZ AMPLITUDE 0.5 V	81
4.28 สัญญาณที่มี FREQUENCY 8000 HZ AMPLITUDE 1 V	81
4.29 สภาวะปกติ LED ติด 6 ดวง	82
4.30 สั่งให้ LED สีแดงดับ	82
4.31 สั่งให้ LED ดับทุกดวง	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	84
4.33 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=200 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=200 HZ และ $V_{p,p}=0.980$ V	85
4.34 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=400 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=400 HZ และ $V_{p,p}=0.760$ V	85
4.35 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=600 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ f=600 Hz และ $V_{p,p}=0.460$ V	86
4.36 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=800 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ f=800 Hz และ $V_{p,p}=0.220$ V	86
4.37 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=1000 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=1000 HZ และ $V_{p,p}=0.060$ V	87
4.38 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=1200 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=1200 HZ และ $V_{p,p}=0.060$ V	87
4.39 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=1400 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=1400 HZ และ $V_{p,p}=0.060$ V	88
4.40 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ F=1600 HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ F=1600 HZ และ $V_{p,p}=0.060$ V	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.41	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=0.060$ V	89
4.42	ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	90
4.43	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p,p}=1.060$ V	91
4.44	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p,p}=1.060$ V	91
4.45	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p,p}=0.960$ V	92
4.46	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p,p}=0.720$ V	92
4.47	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p,p}=0.420$ V	93
4.48	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=0.180$ V	93
4.49	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p,p}=0.080$ V	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.50	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=0.060$ V	94
4.51	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p-p}=0.060$ V	95
4.52	ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	96
4.53	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	97
4.54	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	97
4.55	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	98
4.56	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	98
4.57	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	99
4.58	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.59	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	100
4.60	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	100
4.61	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V	101
4.62	ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	102
4.63	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1.080$ V	103
4.64	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1.120$ V	103
4.65	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.840$ V	104
4.66	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.420$ V	104
4.67	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.320$ V	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.68	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=0.70$ V	105
4.69	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p,p}=1.120$ V	106
4.70	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p,p}=1.10$ V	106
4.71	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=0.60$ V	107
4.72	ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	108
4.73	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p,p}=0.640$ V	109
4.74	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p,p}=0.820$ V	109
4.75	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p,p}=0.920$ V	110
4.76	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p,p}=0.960$ V	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.77	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p-p}=0.940$ V	111
4.78	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.940$ V	111
4.79	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=0.880$ V	112
4.80	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p-p}=0.660$ V	112
4.81	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.340$ V	113
4.82	ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE: FIR FILTER) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ FREQUENCY SAMPLING=4000 HZ และ FILTER LENGTH=11	114
4.83	แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=200$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V	115
4.84	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=400$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=0.80$ V	115
4.85	CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=600$ HZ และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.60$ V	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.86 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p,p}=0.50$ V	116
4.87 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1000$ HZ และ $V_{p,p}=0.460$ V	117
4.88 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1200$ HZ และ $V_{p,p}=0.40$ V	117
4.89 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1400$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p,p}=0.340$ V	118
4.90 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1600$ HZ และ $V_{p,p}=0.220$ V	118
4.91 CH1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=1$ V และ CH2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $F=1800$ HZ และ $V_{p,p}=0.10$ V	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	71
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ	
4.2	72
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 HZ	
4.3	72
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1	
4.4	73
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2	
4.5	73
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 HZ	
4.6	74
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่	
4.7	74
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง	
4.8	75
เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (FINITE IMPULSE RESPONSE:FIR FILTER) การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น	
4.9	89
ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่า ความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 1	
4.10	95
ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่า ความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.11	ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p,p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 3	101
4.12	ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p,p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 4	107
4.13	ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p,p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 5	113
4.14	ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด DIGITAL SIGNAL PROCESSOR (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p,p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 6	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มนุษย์สามารถคิดค้นวิธีการใหม่ๆที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์กับตนเอง และสังคมมากที่สุด เช่น ในด้านสาธารณสุข จะเห็นได้จากในอดีต ที่ผู้สูญเสียการได้ยินจะใช้เครื่องช่วยฟัง ซึ่งจะมีข้อจำกัดหลายอย่าง ทั้งทางด้านราคา และคุณภาพ เป็นต้น ดังนั้น เราจึงต้องคิดค้นวิธีการลดต้นทุนต่างๆของอุปกรณ์ทั้งที่ประสิทธิภาพคงเดิม

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้งานกับผู้สูญเสียการได้ยินในลักษณะต่างๆ ได้ เนื่องจากวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยินนี้ สามารถชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน และยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้อีกทางหนึ่ง

สำหรับโครงการปริญญาโทครั้งนี้ เป็นการสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน ดังนั้น จึงต้องอาศัยการประยุกต์ความรู้ที่จำเป็นและเกี่ยวข้อง คือ วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์ (Finite impulse response:FIR filter) หลักการทำงานของเครื่องช่วยฟัง รูปแบบการสูญเสียการได้ยิน โปรแกรม MATLAB และตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นสำคัญ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) ด้วยวิธี Frequency sampling
- 2) เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเครื่องช่วยฟัง
- 3) เพื่อศึกษารูปแบบการสูญเสียการได้ยิน
- 4) ออกแบบวงจรกรองสัญญาณเพื่อชดเชยย่านความถี่เสียงที่ไม่ได้ยินด้วยโปรแกรม MATLAB
- 5) ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องช่วยฟังด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

สามารถสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน ซึ่งจะตั้งค่าโปรแกรมที่เหมาะสมกับผู้สูญเสียการได้ยินในลักษณะต่างๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรอบการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข (A Framework for Digital Filter Design)

2.1.1 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลข

วงจรกรองสัญญาณเชิงเลข (Digital Filters) ดังที่จะได้ทำการศึกษาต่อไปนี้ คือ Mathematic algorithm ที่ถูกสร้างขึ้นทั้งในรูปแบบของ Hardware และ/หรือ Software ที่ดำเนินการต่อ Digital input signal เพื่อที่จะผลิต Digital output signal สำหรับวัตถุประสงค์ในการกรองสัญญาณ (Filtering)

วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขถือเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ๆ สำหรับการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (Digital Signal Processing: DSP) เนื่องจากการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขสามารถประยุกต์ไปใช้งานในลักษณะอื่นได้ที่ไม่ได้จำกัดแค่ต้องการใช้กรองสัญญาณแต่เพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขกับวงจรกรองสัญญาณเชิงอนาล็อก (Analog filter) วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขมีข้อดีที่เหนือกว่าและถูกนำไปใช้งานในหลายๆการประยุกต์ใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น Data compression, Biomedical signal processing, Speech processing, Image processing, Data transmission, Digital audio, Telephone echo cancellation เหตุผลก็เพราะข้อดีต่างๆเหล่านี้

- วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขสามารถออกแบบให้มีคุณลักษณะ (Characteristics) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ถ้าออกแบบด้วย Analog filters เช่นการออกแบบให้มี Linear phase response (ผลตอบสนองเฟสเชิงเส้น)
- ความแตกต่างจาก Analog filters ตรงที่ประสิทธิภาพ (Performance) ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขนั้นไม่ขึ้นหรือแปรเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น ซึ่งทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเทียบ (Calibrate) เป็นระยะๆ อย่างในกรณีของ Analog filters
- ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข สามารถปรับค่าได้อย่างอัตโนมัติถ้าวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขถูกสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ Programmable processor ซึ่งลักษณะนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางใน วงจรกรองสัญญาณแบบปรับตัวได้ (Adaptive filters)

- ทั้งสัญญาณข้อมูลที่ผ่านการกรองและที่ยังไม่ได้ผ่านการกรองสามารถที่จะ บันทึก (Save) สำหรับการใช้งานต่อไปได้ (เนื่องจากเป็นสัญญาณดิจิทัล)
- ด้วยความก้าวหน้าอย่างมากของเทคโนโลยีทางด้าน VLSI (Very Large Scale Integrated circuits) ทำให้การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขสามารถทำให้ มีขนาดเล็ก กินกำลังงานไฟเลี้ยงต่ำ และก็มีราคาที่ถูกลง วงจรกรองสัญญาณ เชิงเลขจึงถูกใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น
- ในทางปฏิบัติ ความละเอียดในการกรองสัญญาณที่ได้จาก analog filters มีขีดจำกัด ยกตัวอย่างเช่น โดยทั่วไปค่า Maximum Stop band Attenuation ของ Active filters (คือ Analog filters ที่สร้างด้วยอุปกรณ์จำพวก op-amps เป็นต้น) จะมีค่าอยู่ราว 60-70 dB ด้วยค่าของอุปกรณ์ที่ไม่ได้มีขายตามท้องตลาด ในขณะที่วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขค่าความละเอียดจะมีขีดจำกัด อยู่กับความยาวคำ (Word length) ที่เลือกใช้
- วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขสามารถใช้งานที่ย่านความถี่ต่ำมากๆได้ ซึ่งพบอย่าง มากในงานด้าน Biomedical applications ในขณะที่ Analog filter ไม่สามารถทำงานได้ดีในทางปฏิบัติ นอกจากนั้นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขยัง สามารถทำงานได้ในย่านความถี่ที่กว้างอีกด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลง ค่าของค่า Sampling frequency

ส่วนข้อเสียหลักของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขเมื่อเทียบกับวงจรกรองสัญญาณเชิง อนุกรม คือ

- ข้อจำกัดเรื่องความเร็ว (Speed limitation): ค่า Conversion time ของ ADC (Analog to Digital converter) และค่า Setting time ของ DAC (Digital to Analog converter) เป็นตัวจำกัดค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำการ ประมวลผลได้ นอกจากนั้นความเร็วในการดำเนินการของวงจรสัญญาณ เชิงเลขยังขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวประมวลผล (Digital processor) ที่ใช้งาน และจำนวนของ arithmetic operations (จำนวนของตัวคูณ ตัวบวก/ลบ สัญญาณ) ที่จะต้องใช้ใน Filtering algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลของความยาวจำกัด (Finite word length effect): วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขจะได้รับผลกระทบจาก ADC Noise ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการ Quantization ของสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous signal) และ Round off noise ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการคำนวณของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข ยิ่งอันดับของวงจรกรองแบบป้อนกลับยิ่งสูง (Higher order recursive filters) การสะสมของ Round off noise ก็ยิ่งจะมากขึ้นและอาจนำไปสู่ความไม่มีเสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณ (Instability)
- ใช้เวลาในการออกแบบและพัฒนาที่นาน (Long design and development times): โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับ Hardware development ซึ่งอาจจะใช้เวลานานกว่ากรณีของ Analog filters แต่ในปัจจุบันด้วย Computer-aided design (CAD) ช่วยให้การออกแบบและสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขทำได้อย่างสะดวกสบายและรวดเร็วมากขึ้น

2.1.2 ชนิดของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข: FIR และ IIR Filters

วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขแบ่งได้อย่างกว้างๆได้เป็น 2 ชนิดตามชื่อดังนี้ วงจรกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite impulse response: IIR Filters) และวงจรกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response: FIR Filters) ซึ่ง Input และ Output signals ของวงจรกรองสัญญาณจะมีความสัมพันธ์กันด้วยสมการ Convolution sum ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (2.1) สำหรับ IIR Filter และดังในสมการที่ (2.2) สำหรับ FIR Filter

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k) \quad (2.1)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{n-1} h(k)x(n-k) \quad (2.2)$$

ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ที่จะคำนวณ Output ของ IIR Filter โดยใช้สมการที่ (2.1) เพราะความยาวของผลตอบสนองอิมพัลส์ยาวเกินไป (Infinite ในทางทฤษฎี) ดังนั้นจะใช้สมการในการคำนวณสำหรับ IIR Filter ในรูปแบบป้อนกลับ (Recursive form) แทน ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k)x(n-k) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M b_k y(n-k) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการที่ (2.2) และ (2.3) จะเป็นสมการผลต่าง (Difference equations) สำหรับ FIR และ IIR Filters ตามลำดับ

อีกรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้แทน FIR และ IIR Filters แสดงในสมการที่ (2.4a) และ (2.4b) ตามลำดับ ซึ่งก็คือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer functions) ของวงจรกรองสัญญาณ และเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับใช้ในการแสดงผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency responses)

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} \quad (2.4a)$$

$$\frac{\sum_{k=0}^N a_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^M b_k z^{-k}} \quad (2.4b)$$

2.1.3 การเลือกใช้งานระหว่าง FIR และ IIR Filters

การเลือกระหว่าง FIR และ IIR Filters นั้นขึ้นอยู่กับเปรียบเทียบข้อดีของวงจรกรองสัญญาณทั้ง 2 ชนิด ดังนี้

- FIR Filters สามารถให้ผลตอบสนองเฟสแบบเชิงเส้นได้อย่างแน่ชัด ซึ่งจากผลตรงนี้ทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องความผิดเพี้ยนของเฟส (Phase distortion) ของสัญญาณที่เกิดจากตัววงจรกรองสัญญาณเอง ในขณะที่ผลตอบสนองเฟสของ IIR Filters จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear phase response) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณขอบของแถบความถี่ (Band edges)
- FIR Filters เมื่อทำให้เป็นจริง (Realization) จะมีโครงสร้างแบบไม่มีการป้อนกลับ (Non recursive) ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณตามสมการที่ (2) โดยตรง และเนื่องจากไม่มีการป้อนกลับนี้เองที่ทำให้ FIR Filters มีเสถียรภาพเสมอ (Stable) เนื่องจากระบบจะไม่มีโพล (Poles) ในขณะที่เสถียรภาพของ IIR Filters อาจจะไม่เสถียรภาพเสมอไป ถ้าออกแบบไม่ดี IIR Filters อาจจะไม่เสถียรภาพก็ได้
- ผลกระทบจากการใช้จำนวนบิตที่จำกัด (Limited number of bits) ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข เช่น Round off noise และ Coefficient quantization errors จะเกิดขึ้นใน FIR Filters น้อยกว่า IIR Filters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

- FIR Filters ต้องใช้จำนวนสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ที่มากกว่า IIR Filters เพื่อให้ได้วงจรรองสัญญาณที่มีความคมของความถี่ตัด (Sharp cutoff filters) เช่นเดียวกัน นั้นหมายความว่า จากข้อกำหนดของผลตอบสนองทางขนาด (Amplitude response) ที่เหมือนกัน การสร้างวงจรรองสัญญาณเป็นแบบ FIR จะใช้เวลาในการประมวลผลที่นานกว่า รวมทั้งต้องการ Storage elements ที่มากกว่าด้วย
- Analog filters สามารถที่จะทำการแปลง (Transformed) ไปเป็น IIR digital filters ที่สมมูลกัน (Equivalent) โดยที่ IIR Filters ที่ได้จะมีคุณลักษณะที่คล้ายกันกับต้นแบบที่เป็น Analog filters ก่อนที่จะทำการแปลง ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถใช้กับการออกแบบ FIR Filters แต่อย่างไรก็ตามสำหรับ FIR Filters จะสามารถทำการออกแบบได้ง่ายกว่าสำหรับการออกแบบวงจรรองสัญญาณที่ต้องการผลการตอบสนองทางความถี่ในรูปแบบใดๆ (Arbitrary frequency responses)

ได้ดังนี้ แนวทางอย่างกว้างที่จะใช้สำหรับการเลือกว่าเมื่อไหร่จะใช้ FIR หรือ IIR Filters สรุป

- ใช้ IIR Filters เมื่อสิ่งสำคัญที่ต้องการมากที่สุดคือวงจรรองสัญญาณที่มีความคม (Sharp cutoff filters) และมีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ (Low computational complexity) ซึ่งจะทำให้วงจรรองสัญญาณมีค่า Throughput สูง (High throughput)
- ใช้ FIR Filters ถ้าจำนวนของสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณมีจำนวนไม่มากจนเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าต้องการวงจรรองสัญญาณที่ปราศจากการผิดเพี้ยนทางเฟส (No phase distortion)

2.1.4 ขั้นตอนการออกแบบวงจรรองสัญญาณ

การออกแบบวงจรรองสัญญาณเชิงเลข (Digital filter) เกี่ยวข้องกับขั้นตอน 5 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. การกำหนดความต้องการหรือคุณลักษณะของวงจรรองที่ต้องการ
2. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณที่สอดคล้องกับ

ความต้องการของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การแทน (Representation) วงจรกรองสัญญาณตามรูปแบบของโครงสร้าง (Structure) ที่เหมาะสม

4. การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effects) ที่เกิดจากการใช้ความยาวจำกัด (Finite word length) ซึ่งจะเกิดผลกระทบกับประสิทธิภาพของวงจรกรองสัญญาณ

5. การสร้าง (Implementation) ของวงจรกรองสัญญาณตามรูปแบบของโครงสร้าง (Structure) ที่ได้ในรูปแบบของ Software implementation และ/หรือ Hardware implementation

2.1.5 ข้อกำหนดความต้องการของวงจรกรองสัญญาณ

คุณลักษณะของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขส่วนมากในการออกแบบจะถูกกำหนดขึ้นในชั้น Frequency domain สำหรับ Frequency selective filters เช่น Lowpass และ Bandpass filters เป็นต้น คุณลักษณะของวงจรจะถูกกำหนดอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า Tolerance schemes

2.1.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการเลือกวิธีการหนึ่งในหลายๆวิธีของการประมาณการ (Approximation methods) และการคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์ $h(k)$ สำหรับ FIR Filter หรือ a_k และ b_k สำหรับ IIR Filter วิธีการใดจะถูกใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณขึ้นอยู่กับว่าวงจรกรองสัญญาณที่จะออกแบบเป็น FIR หรือ IIR Filter

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของ IIR Filter โดยพื้นฐานทั่วไปแล้วจะใช้วิธีการแปลง (Transformation) จาก Analog filter ที่รู้คุณลักษณะ (Characteristics) อยู่แล้วไปเป็น Digital filter ที่สมมูลกัน (Equivalent) วิธีการแปลงพื้นฐานที่ใช้งานกันคือการแปลงแบบ Impulse invariant (การแปลงแบบยีนยง) และการแปลง Bilinear transformation (การแปลงเชิงเส้นคู่)

สำหรับ FIR Filter จะมีวิธีการออกแบบอยู่หลักๆ 3 วิธี คือ วิธี Window (วิธีหน้าต่าง) วิธีการสุ่มตัวอย่างความถี่ (Frequency sampling method) และ Optimal design (เช่น Park-McClellan algorithm)

วิธีหน้าต่าง (Window method) เป็นวิธีการออกแบบ FIR Filter ที่ง่ายที่สุด และเป็นวิธีการที่ยืดหยุ่นสำหรับการคำนวณ FIR Filter coefficients

จุดดึงดูดและน่าสนใจหลักของวิธีการออกแบบ Frequency sampling method คือสามารถทำการจัดโครงสร้างการคำนวณของ FIR Filter ให้อยู่ในรูปแบบที่มีการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Recursive realization) ซึ่งจะสามารถทำให้การคำนวณการทำงานของวงจรกรองสัญญาณมีประสิทธิภาพ โดยปกติโครงสร้างการคำนวณของ FIR Filter จะเป็นแบบไม่มีการป้อนกลับ (Non-recursive form)

ด้วยความเป็นไปได้ของประสิทธิภาพและความง่ายในการใช้งานโปรแกรมทำให้ Optimal design method ถูกใช้งานแพร่หลายมากขึ้นในอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้งานส่วนมาก ซึ่งวิธีการนี้จะให้ FIR Filters ที่ออกแบบได้ตรงตามที่ต้องการได้มากที่สุด แต่กระบวนการออกแบบจริงๆ (หมายถึงพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบขึ้นมาเอง) ก็มีความซับซ้อนมากเช่นกันและต้องอาศัยความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ในเรื่อง Optimization theory อีกด้วยรวมทั้งการเขียนโปรแกรมในลักษณะวนรอบ (Iterations) เพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุด เว้นแต่ว่าจะมี Software package สำเร็จรูปที่ใช้ในการออกแบบดังกล่าวตอนต้น ผู้ออกแบบก็เพียงแค่ออกคุณลักษณะของวงจรที่ต้องการออกแบบเข้าไปซึ่งในกรณีนี้ก็จะถือว่าเป็นการง่ายในการออกแบบ

มีหลากหลายวิธีสำหรับการใช้ในการสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณโดยที่ใช้งานกันส่วนมากสรุปได้ดังนี้

- Impulse invariant IIR
- Bilinear transformation IIR
- Pole-zero placement IIR
- Window FIR
- Frequency sampling FIR
- Optimal design FIR

2.1.7 การแทนวงจรกรองสัญญาณโดยโครงสร้างที่เหมาะสม

โครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณ (Filter structure) หรือการทำให้เป็นจริงของวงจรกรองสัญญาณ (Filter realization) เกี่ยวข้องกับวิธีการแปลงจาก Transfer function $H(z)$ ที่กำหนด ให้ไปเป็นโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณที่มีความเหมาะสม

Block หรือ Flow diagram โดยมากจะถูกใช้ในการแสดงโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณซึ่งมักจะเป็นการแสดงขั้นตอนของการคำนวณ (Computational procedure) สำหรับการสร้าง (Implementing) วงจรกรองสัญญาณเชิงเลข (Digital filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบขนาน (Parallel) และแบบต่อเรียง (Cascade) จะถูกใช้โดยมากสำหรับ IIR filter เพราะว่าจะช่วยให้การคำนวณโดยรวมของวงจรมั่นง่ายขึ้นและทำให้ความไว (Sensitivity) ของวงจรลดลงได้อย่างมาก โดยความไวที่ว่าเป็นผลที่เกิดขึ้นมาจากการสร้างวงจรกรองสัญญาณด้วยการใช้จำนวนของบิตที่จำกัด ซึ่งในกรณีนี้โครงสร้างแบบ Parallel หรือ Cascade จะให้ความไวที่ต่ำกว่าโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct form) อย่างมาก

โครงสร้างที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากสำหรับ FIR Filter คือโครงสร้างแบบโดยตรง (Direct form) ซึ่งบางครั้งเรียกว่าโครงสร้างแบบ Tapped delay line หรือ Transversal filter

โครงสร้างสำหรับ FIR Filter อีก 2 ชนิดที่มีการใช้งานคือโครงสร้างแบบสุ่มความถี่ (Frequency sampling structure) และ Fast convolution technique

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบ Transversal filter นั้น โครงสร้างแบบ Frequency sampling จะมีโครงสร้างการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากกว่า (ใช้จำนวนของตัวคูณน้อยกว่า ซึ่งหมายถึงมีจำนวนของสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่า) แต่อาจจะไม่ง่ายในการสร้าง (Implementation) นัก และต้องใช้จำนวนของ Storage elements ที่มากอีกด้วย

โครงสร้างแบบที่เรียกว่า Fast convolution อาศัยหลักในการแปลงสัญญาณจาก Time domain ไปเป็น Frequency domain ก่อนด้วยการแปลง Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งจะทำให้การหา Output สามารถทำได้ด้วยการคูณแทนการทำ Convolution โดยตรงใน Time domain ผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณใน Frequency domain จะถูกแปลง Inverse Fourier Transform (IFFT) กลับ ก็จะได้ Output ใน Time domain

โครงสร้างอีกลักษณะหนึ่งที่เรียกว่า Lattice structure สามารถที่จะใช้ทั้งสำหรับ FIR และ IIR Filter โครงสร้าง Lattice structure พื้นฐานจะมีลักษณะที่เป็นหนึ่งอินพุต (Single input) และคู่ของเอาต์พุต (Pair of outputs)

การทำให้เป็นจริงของโครงสร้าง (Structure realization) ที่ถูกใช้กันโดยทั่วไปสำหรับ FIR หรือ IIR Filters มีดังต่อไปนี้

- Transversal (Direct) FIR
- Frequency sampling FIR
- Fast convolution FIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Direct form I, II IIR
- Cascade IIR
- Parallel IIR
- Lattice IIR หรือ FIR

สำหรับวงจรกรองสัญญาณ การจะเลือกว่าจะใช้โครงสร้างแบบใดโดยหลักใหญ่แล้วจะขึ้นอยู่กับ

- วงจรกรองสัญญาณนั้นเป็น FIR หรือ IIR
- โครงสร้างนั้นง่ายแก่การสร้างขึ้นจริงหรือไม่ (Implementation) ไม่ว่าจะเป็ นในแง่ Software หรือ Hardware implementation
- ความไว (Sensitivity) ของวงจรมันเป็นอย่างไร มีความไว (Sensitivity) ต่อผลของการใช้ความยาวคำที่จำกัด (Effects of finite word length) หรือไม่

2.1.8 การวิเคราะห์ผลของความยาวคำจำกัด (Analysis of finite word length effects)

ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขขึ้นจริง (ไม่ว่าจะเป็น Software หรือ Hardware implementation) บ่อยครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องแทนค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ (Filter coefficients) โดยใช้จำนวนของบิตที่จำกัด โดยทั่วไป 8 ถึง 16 บิต และการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic operations) ที่เป็นการคำนวณที่สอดคล้องตามสมการ ผลต่างนั้นก็จะถูกดำเนินการในลักษณะที่มีความละเอียดของตัวเลขที่จำกัดเช่นกัน (Finite precision arithmetic)

แหล่งกำเนิดหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขลดลงอันเป็นผลเนื่องมาจากการใช้ความยาวคำที่จำกัดนั้น มีดังนี้

- Input/Output signal quantization: คือ ผลของความยาวคำจำกัดอันเนื่องมาจากการจัดระดับของสัญญาณทั้งอินพุตและเอาต์พุต โดยเฉพาะสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC Noise) ซึ่งเกิดในขั้นตอนของการจัดระดับของสัญญาณอินพุต ผลกระทบอันนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio:SNR) ที่วัดได้ที่เอาต์พุต

- Coefficient quantization:คือ ผลของความยาวค่าจำกัดที่เกิดจากการแทนสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณด้วยจำนวนบิตที่จำกัด ซึ่งผลอันนี้จะนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนในผลตอบสนองทางความถี่ทั้งของ FIR และ IIR Filters แต่จะส่งผลกระทบต่อระบบมากกว่าในกรณีของ IIR Filters ซึ่งบางครั้งอาจนำไปสู่ความไม่เสถียรภาพ (Instability) ของ IIR Filters ก็เป็นไปได้
- Arithmetic round off errors:เกิดจากการใช้ Finite precision arithmetic ในการกระทำทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบการคำนวณของวงจรรองสัญญาณ ซึ่งถ้าไม่มีการใช้ Finite precision arithmetic นั้นหมายความว่าผลลัพธ์จากการคำนวณจะต้องถูกแทนด้วยจำนวนบิตที่เพิ่มมากขึ้น และยังถ้าเป็น IIR Filters ซึ่งมีการป้อนกลับด้วยแล้วนั้นแต่ละรอบที่มีการป้อนกลับก็จะต้องเพิ่มจำนวนบิตไปทุกครั้งซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะต้องมีขนาดความยาวค่ายาวอยู่ในช่วงที่กำหนดโดยอาศัยการปัด (Rounding) หรือตัด (Truncate) ซึ่งผลของการปัดหรือตัดนี้เองที่ทำให้เกิดสิ่งๆ ที่เรียกว่า Round off noise (errors) ขึ้นในวงจรรองสัญญาณเชิงเลข เช่นเดียวกันผลกระทบอันนี้จะทรงอิทธิพลสำหรับ IIR Filters มากกว่าในกรณีของ FIR Filters ซึ่งนอกจากจะส่งผลกับค่า SNR ของสัญญาณ Output แล้ว ในกรณีของ IIR Filters อาจถึงขั้นรุนแรงที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพไปเลยก็เป็นได้
- Overflow:ผลกระทบอันนี้เกิดจากผลลัพธ์ที่เกิดจากการบวก (ซึ่งเป็นหนึ่ง Operation ที่อยู่ในขั้นตอนการทำงานของวงจรรองสัญญาณ) มีค่าเกินกว่าช่วงของความยาวค่าที่กำหนดไว้ให้ใช้ (Exceeds permissible word length) เช่น เลขบวกค่ามากๆ 2 จำนวน มาบวกกัน แทนที่ผลบวกที่ได้จะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นไปอีก แต่ผลลัพธ์ที่ได้ดันกลับซั๊กกลายเป็นค่าลบ ปรากฏการณ์นี้จะทำให้ได้ Output samples ที่ผิด และอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้ IIR Filters ขาดเสถียรภาพ แต่สำหรับ FIR Filters การแก้ไขปัญหาเรื่องของ Overflow นั้นทำได้ง่ายมาก

ผลกระทบดังกล่าวทั้งหมดมานี้จะมากจะน้อยอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับวงจรรองสัญญาณ จะถูกนำไปสร้างอย่างไร ซึ่งบางครั้งบางผลกระทบอาจไม่มีความสำคัญเลยก็เป็นได้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อทำการสร้างวงจรรองสัญญาณด้วยโปรแกรมภาษาระดับสูงบน Computer ไปด้วย การคำนวณค่าต่างๆ ไม่อาจผิดพลาดได้ทั้งหมดอีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coefficient quantization และ Round off errors รวมทั้งเรื่องของ Overflow ไม่สำคัญไม่ต้องทำการพิจารณาก็ได้ เนื่องจากการคำนวณบนเครื่อง Computer ทั่วไปเป็นแบบ Floating-point 64 bits ทำให้ผลกระทบเรื่องของความยาวค่าจำกัดแทบจะไม่มี

สำหรับการประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time processing) จะใช้ความยาวค่าที่จำกัดโดยทั่วไปใช้ 8 bits 12 bits และ 16 bits ในการแทน Input และ Output signals Filter coefficients และผลลัพธ์ที่เกิดจากการทำ Arithmetic operations ซึ่งในกรณีอย่างนี้ มีความจำเป็นเสมอที่จะต้องทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการ Quantization ซึ่งจะส่งผลกับประสิทธิภาพของวงจรกรองสัญญาณด้วย

2.1.9 การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข (Implementation of a filter)

สมการผลต่าง (Differential equations) จะถูกสร้างขึ้นในลักษณะของ Software routine หรือ Hardware ตัวอย่างของสมการผลต่างทั้งของ FIR และ IIR ถูกแสดงในสมการที่ (2.2) และ (2.3) ที่ผ่านมา โดยจะเห็นได้ว่าการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่ง $y(n)$ ซึ่งก็คือ Filter output จะเกี่ยวข้องกับการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เพียงแค่การคูณ (Multiplications) การบวก/ลบ (Additions/subtractions) และการหน่วงข้อมูล (Delays) ดังนั้นในการสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขเราต้องการสิ่งที่เรียกว่า Basic building blocks ดังนี้

- Memory (เช่น ROM) สำหรับเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ (Filter coefficients) หรือเรียกได้ว่าเป็น Coefficients memory
- Memory (เช่น RAM) สำหรับการเก็บค่าปัจจุบันและอดีตของ Inputs และ Outputs นั่นคือ $\{x(n), x(n-1), \dots\}$ และ $\{y(n), y(n-1), \dots\}$ เรียกง่าย ๆ ว่าเป็น Data memory
- Hardware หรือ Software multiplier (s) (หมายถึงอาจจะมีตัวคูณตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้)
- Adder หรือ Arithmetic logic unit

ในการประมวลผลที่เรียกว่า Batch processing ซึ่งเป็นแบบไม่ใช่เวลาจริง ข้อมูลทั้งหมดที่จะนำมาใช้ในการประมวลผลจะถูกเก็บไว้ใน Storage device บางอย่าง เช่น เทปแม่เหล็ก CD-ROM Hard-disk เป็นต้น ซึ่งลักษณะงานประเภทนี้จะมีการเก็บข้อมูลทั้งหมดมาก่อน จากนั้นค่อยนำข้อมูลทั้งหมดมาทำการประมวลผลในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเช่นนี้โดยทั่วไปวงจรกรองสัญญาณจะถูกสร้างในลักษณะของการเขียนโปรแกรม ภาษาระดับสูงและทำการ Runs บนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปซึ่งอาจจะเป็น PC หรือ Mainframe ดังนั้น Batch processing อาจอธิบายได้ว่าเป็นการสร้างแบบที่เป็น Software ล้วนๆเพียงอย่างเดียว (Pure soft implementation)

สำหรับระบบประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time processing) การทำงานของ วงจรกรองสัญญาณอาจจะอยู่ในรูปแบบที่กระทำต่อ Input sample ปัจจุบัน $x(n)$ เพื่อทำการผลิต Output sample ปัจจุบัน $y(n)$ เช่นกัน ก่อนที่ Output sample ตัวถัดไปจะเข้ามาถึง นั่นคือ ระบบจะต้องทำการประมวลผลได้เสร็จสิ้นภายใน Sample period หรืออาจจะอยู่ในรูปแบบที่ กระทำต่อ Block ของข้อมูลอินพุท รูปแบบการกระทำที่ง่ายกว่าอย่างเช่นโดยการใช้ FFT (Fast Fourier Transform) Algorithm โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการผลิต Block ของข้อมูล Output ซึ่งจำต้องดำเนินการเสร็จภายในช่วงเวลาที่เป็นสัดส่วนกับ Block length

การกรองสัญญาณแบบเวลาจริงนี้บางครั้งต้องการความเร็วในการประมวลผลที่สูงและ ต้องการ Hardware เฉพาะงาน (เช่น Hardware ที่เป็นตัวคูณ หรือระบบทั้งหมดเลยเป็น Hardware ก็ย่อมได้) เพื่อที่จะทำให้ Sampling rate ของระบบสามารถใช้งานที่ความถี่สูงได้หรือ ทำให้สามารถออกแบบวงจรที่เป็นอันดับสูง (High order) ได้

2.2 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

คุณสมบัติที่สำคัญของ FIR filters ดังคุณลักษณะเด่นหลักของ FIR filters ดังต่อไปนี้

1. FIR Filters โดยพื้นฐานจะถูกแสดงในรูปแบบของสมการ 2 สมการดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (2.5a)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k} \quad (2.5b)$$

2. FIR Filters สามารถมีผลตอบสนองเฟสแบบเป็นเชิงเส้น (Linear phase response) ได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. FIR Filters สามารถทำการสร้าง (Implement) ได้อย่างง่าย และ DSP processors ทั้งหมดที่ขายตามท้องตลาดมีโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (Architecture) ที่เหมาะสมกับขั้นตอนการทำงานของกรกรองของ FIR Filters

2.2.1 ผลตอบสนองเฟสแบบเชิงเส้นและสิ่งที่เกี่ยวข้อง

ความสามารถในการมีผลตอบสนองเฟสแบบเชิงเส้นได้อย่างชัดเจนเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของ FIR Filters และสำหรับคำว่าค่าความหน่วงเฟส (Phase delay) และค่าความหน่วงกลุ่ม (Group delay) ของวงจรกรองสัญญาณจะเป็นปริมาณที่ทำการวัดเพื่อเป็นประโยชน์ในการพิจารณาว่าวงจรกรองสัญญาณนั้นมีการดัดแปลง (Modified) คุณลักษณะทางเฟสของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณไปอย่างไร

ถ้าเราทำการพิจารณาว่าสัญญาณใดๆประกอบด้วยหลายๆองค์ประกอบทางความถี่ (หรือเรียกว่าเป็น Composite signal) เช่น Speech waveform หรือ Modulate signal

- Phase delay ของวงจรกรองสัญญาณ คือ ปริมาณของ Time delay ของแต่ละองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการผ่านวงจรกรองสัญญาณ
- Group delay คือ ค่า Average time delay แต่ละองค์ประกอบทางความถี่ของ Composite signal (สัญญาณที่ประกอบไปด้วยหลายองค์ประกอบทางความถี่)

ในทางคณิตศาสตร์ Phase delay คือ ค่าติดลบของ Phase angle ที่หารด้วยความถี่ (ความถี่เชิงมุมดิจิทัล ω หน่วย คือ rad) ในขณะที่ค่า Group delay คือ ค่าติดลบของ Derivative ของ Phase เทียบกับความถี่ ดังสมการที่ (2.6a) และ (2.6b) ตามลำดับ

$$T_p = -\frac{\theta}{\omega} \quad (2.6a)$$

$$T_g = -\frac{d\theta(\omega)}{d(\omega)} \quad (2.6b)$$

วงจรกรองสัญญาณที่มีผลตอบสนองเฟสแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นสาเหตุให้เกิดการผิดเพี้ยนทางเฟส (Phase distortion) ของสัญญาณซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อรูปร่างของสัญญาณ Waveform ของสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณออกมาผิดเพี้ยนไปเลย ซึ่งการผิดเพี้ยนดังกล่าวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาให้เกิดขึ้นสำหรับหลายๆ Applications โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Applications ที่ต้องใช้สายตาในการมองรูปคลื่นหรือรูปของสัญญาณ เช่น งานทางด้าน Video และ Image processing งานทางด้าน Biomedical signal processing ด้าน Data transmission การผิดเพี้ยนทางเฟสดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณที่มีผลตอบสนองเฟสแบบเป็นเชิงเส้นในช่วงแถบของความถี่ที่เราสนใจ

วงจกรองสัญญาณที่กล่าวได้ว่ามีผลตอบสนองเฟสแบบเป็นเชิงเส้นถ้า Phase response สอดคล้องกับความสัมพันธ์ความถี่ ดังนี้

$$\theta(\omega) = -\alpha\omega \quad (2.7a)$$

$$\theta(\omega) = \beta - \alpha\omega \quad (2.7b)$$

โดย α และ β เป็นค่าคงที่

ถ้าวงจกรองสัญญาณสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.7a) วงจกรองสัญญาณนั้นจะมีลักษณะที่เป็นทั้ง Constant group delay และ Constant phase delay นอกจากนั้นแล้วเงื่อนไขในสมการที่ (2.7a) ยังสอดคล้องกับการที่ผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของวงจกรองสัญญาณนั้นมีลักษณะเป็น Positive symmetry impulse response และ Phase response ในกรณีนี้จะเป็นฟังก์ชันอย่างง่ายของ Filter length (ความยาวของวงจกรองสัญญาณ คือ จำนวนตัวของค่าสัมประสิทธิ์หรือ Impulse response นั้นเอง)

$$h(n) = h(N-n-1), n = 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2} \quad (N : \text{odd})$$

$$n = 0, 1, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) - 1 \quad (N : \text{even})$$

$$\text{และ } \alpha = \frac{N-1}{2}$$

ถ้าวงจกรองสัญญาณสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.7b) วงจกรองสัญญาณนั้นจะมีลักษณะที่เป็น Constant group delay แต่เพียงอย่างเดียว ในกรณีนี้ Impulse response ของวงจกรองสัญญาณจะเป็นลักษณะ Negative symmetry

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h(n) = -h(N - n - 1)$$

$$\text{และ } \alpha = \frac{N-1}{2}, \beta = \pi/2$$

2.2.2 FIR Filter specifications

สำหรับการกำหนด Phase response เราเพียงแค่งำหนดลงไปว่าเราต้องการให้ Impulse response ของวงจรกรองสัญญาณที่จะออกแบบเป็น Positive symmetry หรือ Negative symmetry และจำนวนตัวของ Impulse response เป็น Odd หรือ Even และสำหรับ Amplitude response ของ FIR Filters บ่อยครั้งจะถูกกำหนดในรูปแบบของ Tolerance scheme

2.2.3 FIR Filter coefficients calculation methods

เป้าหมายหลักเพียงหนึ่งเดียวของ FIR coefficient calculation methods ส่วนมาก คือ การให้ได้มาซึ่งค่าของ $h(n)$ ที่ทำให้ผลลัพธ์ของการทำงานของ Filter นั้นเป็นไปตาม Design specifications เช่น Amplitude response ตลอดจน Requirements ต่างๆ เป็นไปตามที่ต้องการ มีอยู่หลายวิธีที่เป็นได้และใช้งานกันอยู่สำหรับการหาค่าของ $h(n)$ ดังนี้

- Window method
- Frequency sampling method
- Optimal design method (Optimization)

2.2.4 การออกแบบ FIR Filter ด้วยวิธี Nonrecursive frequency sampling method

วิธี Frequency sampling method /จะทำให้เราสามารถทำการออกแบบ Non recursive FIR Filters สำหรับทั้งในรูปแบบของ Standard frequency selective filters (Lowpass, Highpass, Bandpass และ Bandstop Filters) รวมทั้ง Filters ที่มีผลตอบสนองทางความถี่ในรูปแบบใดๆ (Arbitrary frequency response)

สมมติว่าเราต้องการคำนวณหาค่า FIR Filter coefficients ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ เราสามารถทำได้โดยการไปสุ่มตัวอย่างของ Frequency response นั้นมาจำนวน N samples ด้วย intervals คือ $\frac{k \times F_s}{N}$, $k=0, 1, \dots, N-1$ ค่าของ Filter coefficients $h(n)$ สามารถ

เอกสารนี้เป็นคำนวณได้ด้วยการอาศัย Inverse DFT ของ Frequency samples คือ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) e^{j(2\pi/N)nk} \quad (2.8)$$

โดย $H(k)$, $k=0, 1, \dots, N-1$ คือ Samples (จุดตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มไปมา) ของ Ideal หรือที่เรียกว่า Target frequency response

สมการที่ (2.8) สามารถแสดงว่าสำหรับ Linear phase filters ที่มี ลักษณะ Positive symmetry impulse response สามารถเขียนได้ว่า (สำหรับ N even)

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{(N/2)-1} 2|H(k)| \cos[2\pi k(n-\alpha)/N] + H(0) \quad (2.9)$$

$$\text{โดย } \alpha = \frac{N-1}{2}$$

และสำหรับ N odd ค่า Upper limit ในเครื่องหมาย Summation ในสมการที่ (9) จะเปลี่ยนเป็น $(N-1)/2$ อย่างไรก็ตามระหว่างแต่ละ Samples (ซึ่งเป็นค่าที่เราไม่ได้สุ่ม:ไม่นิยาม) ผลตอบสนองที่ได้ก็จะมีค่าแตกต่างออกไปจากจุดของความถี่ที่เราไปสุ่มมา

เพื่อให้ได้ผลการประมาณค่า (Approximation) ของ Desired frequency response ที่ดี เราจะต้องทำการสุ่มตัวอย่างด้วยจำนวนของ Frequency samples ที่มากเพียงพอ

ตัวอย่างการออกแบบ Lowpass FIR Filter ด้วยวิธี Frequency sampling method โดยมีข้อกำหนดของวงจรรอง คือ Passband 0-5 kHz Sampling frequency 18 kHz และ Filter length 9

ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าวสามารถแสดงการนิยามค่าของแต่ละ Frequency samples ได้ ดังนี้

$$|H(k)| = 1, k = 0, 1, 2$$

$$= 0, k = 3, 4$$

โดย k คือ Frequency index

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

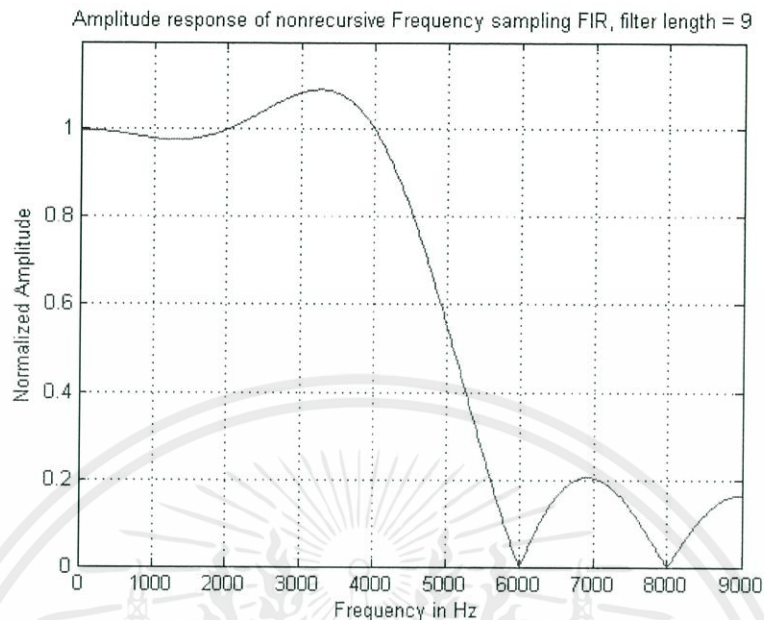
การนิยามค่าของแต่ละ Frequency samples นี้มีความสำคัญมากสำหรับการออกแบบด้วยวิธี Frequency sampling method และเป็นจุดเริ่มก่อนที่จะใช้สมการสำหรับการออกแบบ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของ FIR Filter ต่อไป

จากนิยามของ $|H(k)|$ เราก้จะใช้สมการดังต่อไปนี้ในการหาค่า Impulse response (Filter coefficients) ของ FIR Filter ที่ออกแบบด้วยวิธี Frequency sampling method

$$h(n) = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=1}^{(N-1)/2} 2|H(k)| \cos\left[\frac{2\pi k(n-\alpha)}{N}\right] + H(0) \right]$$

โดย $\alpha = \frac{N-1}{2}$ และค่าของตัวแปร n (Time index) ที่ใช้ในการออกแบบนี้จะมีค่าของ $n=0, 1, \dots, N-1$ โดยตรงเลย ซึ่งในกรณีของ Frequency sampling method สมการของ $|H(k)|$ ถูกพิจารณาจากค่าความถี่ที่เป็นความถี่ฝั่งบวก (Positive frequency) แต่เพียงอย่างเดียวอยู่แล้ว ไม่ได้สนใจความถี่ฝั่งลบ (ค่าความถี่ที่เป็นค่า Negative ไม่มีจริงในทางปฏิบัติ ความถี่ติดลบมีในทางทฤษฎีเท่านั้น) ให้การคำนวณค่า Impulse response ของวิธี Frequency sampling method พิจารณาจากค่าของ Time index คือ $n=0, 1, \dots, N-1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

เมื่อ Frequency sampling=18000 Hz และ Filter length=9

2.3 เครื่องช่วยฟัง (Hearing Aids)

เครื่องช่วยฟัง คือ เครื่องขยายเสียงขนาดเล็กที่สามารถใส่ติดไว้ที่หู เพื่อทำหน้าที่ขยายเสียง จากภายนอกทำให้ผู้ฟังรับรู้เสียงได้ดีขึ้น เครื่องช่วยฟังถือเป็นอุปกรณ์ช่วยการได้ยิน (Hearing devices) ชนิดหนึ่งสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน ซึ่งมีอยู่หลายแบบ ได้แก่

1. เครื่องช่วยฟัง (Hearing aids) แบ่งเป็น 2 ประเภท

1.1 เครื่องช่วยฟังชนิดฟังเสียงทางอากาศ (Air conduction hearing aid) เป็นเครื่องที่ใส่ไว้ที่หู โดยให้เสียงผ่านเข้าทางช่องหู

1.2 เครื่องช่วยฟังชนิดฟังเสียงทางกระดูก (Bone conduction hearing aid) เป็นเครื่องที่ใส่ไว้ที่หู โดยให้เสียงผ่านเข้าที่บริเวณหลังใบหู (Mastoid) กรณีที่ผู้ป่วยไม่สามารถใส่เครื่องทางช่องหู เช่น รูหูตีบ ไม่มีรูหู ผู้ป่วยที่มีหนองไหลจากหูตลอดเวลา เป็นต้น เครื่องประเภทนี้ มีทั้งชนิดที่วางอยู่ภายนอก และชนิดที่แพทย์ต้องทำการ ผ่าตัดเพื่อฝังไว้ที่กะโหลกศีรษะโดยมีตัวรับเสียงอยู่ภายนอก (Bone-Anchor hearing aid)

2. เครื่องช่วยการรับรู้ด้วยการสั่นสะเทือน (Vibro-tactile hearing aid) สำหรับผู้ที่สูญเสียการได้ยินอย่างมากจนไม่สามารถรับรู้ด้วยการได้ยินโดยเฉพาะผู้ที่หูพิการและมีปัญหาทาง

สายตา (หูหนวก-ตาบอด) เครื่องจะแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นความรู้สึกสัมผัสแทน ผู้ใช้จะต้องฝึกฝนการรับรู้ เพราะข้อมูลที่ได้มีความจำกัด โดยเฉพาะ น้ำเสียงและวรรณยุกต์ ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้ เนื่องจากมีเทคโนโลยีของการผ่าตัดหูชั้นในเทียม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ป่วยรับรู้เสียงได้ดีกว่า

3. การผ่าตัดหูชั้นในเทียม (Cochlear Implant) เป็นเครื่องช่วยการได้ยินอีกชนิดหนึ่งซึ่งจะต้องอาศัยการผ่าตัดเพื่อฝังอุปกรณ์เข้าไปในอวัยวะรับเสียงในหูของผู้ป่วยหูพิการซึ่งไม่สามารถได้รับประโยชน์จากการใช้เครื่องช่วยฟัง อุปกรณ์ดังกล่าวจะแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่จะสามารถกระตุ้นเซลล์ขนภายในอวัยวะรับเสียงให้สามารถทำหน้าที่ได้ดีขึ้น หลังจากทำการผ่าตัดฝังอุปกรณ์แล้ว ผู้ป่วยจำเป็นต้องได้รับการฟื้นฟูสมรรถภาพการฟัง และการพูดโดยเฉพาะในเด็กที่หูพิการแต่กำเนิด เนื่องจากเสียงที่ผู้ป่วยได้ยินจะไม่เหมือนกับที่คนปกติรับรู้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้กำลังเป็นที่สนใจของนักวิชาการและผู้ป่วยที่หูหนวก เพราะจะช่วยให้ผู้ป่วยกลับมาได้ยินอีกครั้ง สำหรับเด็ก ก็จะช่วยให้เด็กมีพัฒนาการทางภาษาและการพูด สามารถเรียนร่วมกับเด็กปกติได้โดยไม่ต้องใช้ภาษามือ หากได้รับการผ่าตัดและการฟื้นฟูที่ถูกต้อง เหมาะสม

4. เครื่องกลบเสียงรบกวน (Tinnitus masker) เป็นเครื่องที่ปล่อยเสียงรบกวนที่คลื่นความถี่เฉพาะเพื่อกลบเสียงรบกวนในผู้ป่วยซึ่งประสบกับปัญหาเสียงรบกวนในหูตลอดเวลาในขณะที่มีการได้ยินปกติ แต่จะไม่มีการขยายเสียง ลักษณะของตัวเครื่องจะเหมือนกับเครื่องช่วยฟังแบบใส่ในช่องหู

2.3.1 ข้อบ่งชี้ในการใช้เครื่องช่วยฟัง

การใช้เครื่องช่วยฟังให้เกิดผลดีสำหรับผู้ป่วยแต่ละราย ควรอยู่ในความดูแลของโสตแพทย์และนักโสตสัมผัสวิทยา เนื่องจากสาเหตุของการสูญเสียการได้ยินในผู้ป่วยแตกต่างกันไป บางรายสามารถรักษาหรือแก้ไขได้ด้วยการให้ยาหรือการผ่าตัด อาจไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องช่วยฟัง นอกจากนั้น คุณสมบัติและรายละเอียดของเครื่องช่วยฟังที่มีอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายอย่าง ซึ่งผู้ป่วยควรทราบเพื่อประกอบการตัดสินใจ มิฉะนั้น ผู้ป่วยอาจไม่ได้รับประโยชน์จากการใช้เครื่องช่วยฟังเท่าที่ควรหรืออาจเป็นอันตรายทำให้สูญเสียการได้ยินมากขึ้น ผู้ป่วยที่จะได้รับประโยชน์จากเครื่องช่วยฟังควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ผู้ป่วยที่สูญเสียการได้ยินซึ่งไม่สามารถรักษาให้หายได้ด้วยการให้ยาหรือการผ่าตัด
2. การสูญเสียการได้ยินนั้นมีผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวัน เช่น ได้ยินเสียงแต่ไม่เข้าใจความหมาย
3. การสูญเสียการได้ยินที่มีผลกระทบต่อพัฒนาการทางภาษาและการพูดในเด็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือจำเป็นต้องนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผู้ป่วยสูญเสียการได้ยินจากโรคหูที่อาจได้รับประโยชน์จากการผ่าตัด แต่มีข้อห้ามในการผ่าตัด เช่น เป็นโรคหัวใจ เลือดการได้ยินเพียงข้างเดียว อีกข้างหนึ่งหูหนวก เป็นต้น

2.3.2 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้เครื่องช่วยฟัง

1. การรับฟังเสียงดีขึ้น สามารถโต้ตอบสื่อความหมายด้วยการฟังและการพูดดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวันได้เช่นเดียวกับคนทั่วไปในสังคม

2. ผู้ป่วยที่สูญเสียการได้ยินและมีเสียงดังรบกวนในหู เมื่อใส่เครื่องช่วยฟังแล้ว นอกจากการฟังจะดีขึ้น เสียงรบกวนในหูมักจะลดลงหรือหายไป

3. การใส่เครื่องช่วยฟังจะช่วยรักษาหน้าที่ของหูให้คงไว้ สำหรับผู้ที่สูญเสียการได้ยินเป็นเวลานานๆ หากไม่ได้รับการฟื้นฟู ความสามารถในการเข้าใจคำพูดจะลดลงทีละน้อย จนฟังไม่รู้เรื่อง ซึ่งจะเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการใช้เครื่องช่วยฟัง เพราะผู้ป่วยจะได้ยินแต่เสียงที่ถูกขยายให้ดังขึ้น แต่ไม่สามารถจำแนกรายละเอียดของเสียงนั้นๆได้ ดังนั้นผู้ป่วยที่สูญเสียการได้ยินที่แพทย์ไม่สามารถรักษาได้อีกแล้ว ควรใส่เครื่องช่วยฟังที่เหมาะสม เพื่อคงสภาพการฟัง

2.3.3 ชนิดของเครื่องช่วยฟัง

1. เครื่องช่วยฟังแบบพกกระเป๋ (Pocket aid) เครื่องชนิดนี้มีขนาดใหญ่ ผู้ใช้มักเห็นบัตว์เครื่องไว้ที่กระเป๋ มีสายต่อจากตัวเครื่องเข้าสู่หูฟัง

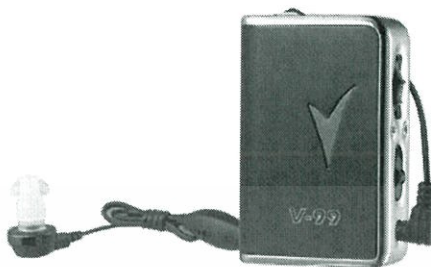
ข้อดี:

- เครื่องมีขนาดใหญ่ จับเหมาะมือ ปรังง่าย เหมาะสำหรับผู้สูงอายุ
- ราคาถูก หากการสูญเสียการได้ยิน 2 ข้างเท่ากันสามารถใช้เครื่องเดียว โดยต่อสายแยกเข้าสองหู
- มีกำลังขยายมาก เหมาะสำหรับผู้สูญเสียการได้ยินอย่างรุนแรง
- แบตเตอรี่หาซื้อง่าย

ข้อเสีย:

- ต้องมีสาย รุงรัง จำกัดการเคลื่อนไหว
- การฟังเสียงไม่เป็นธรรมชาติ เนื่องจาก ไมโครโฟนรับเสียงอยู่ที่บริเวณหน้าอก ไม่
- สามารถแยกทิศทางของเสียงได้ บางครั้งมีเสียงเครื่องเสียดสีกับเสื้อผ้าอีกด้วย
- ทำให้เห็นความพิการได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 เครื่องช่วยฟังแบบพกกระเป๋

2. เครื่องช่วยฟังแบบทัดหลังใบหู (Behind the ear hearing aid) เครื่องชนิดนี้มีขนาดเล็ก ตัวเครื่องเรียวยาวโค้งเกาะอยู่ที่บริเวณหลังหู

ข้อดี:

- การฟังเสียงเป็นธรรมชาติ เพราะไมโครโฟนอยู่ที่บริเวณหู
- ไม่เกะกะรุงรัง เพราะไม่ต้องมีสาย
- สามารถใช้กับผู้สูญเสียการได้ยินน้อยจนถึงสูญเสียการได้ยินรุนแรง

ข้อเสีย:

- ผู้ป่วยต้องคลำหาปุ่มซึ่งมีขนาดเล็ก หากต้องการปรับระดับเสียง
- ค่าใช้จ่ายสูงกว่า หากหูเสียทั้ง 2 ข้าง ต้องใส่ 2 เครื่อง
- ต้องใช้แบตเตอรี่เฉพาะของเครื่องช่วยฟัง (ขนาด 1.4 โวลต์)



รูปที่ 2.3 เครื่องช่วยฟังแบบทัดหลังใบหู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องช่วยฟังชนิดสั่งทำขนาดเล็กใส่ในหู (Custom made hearing aid) แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- In The Ear hearing aid (ITE)
- In The Canal hearing aid (ITC)
- Complete In the Canal hearing aid (CIC)

ข้อดี:

- การฟังเสียงยังเป็นธรรมชาติ เพราะไมโครโฟนอยู่ในหู
- เห็นความพิการน้อยลง โดยเฉพาะ CIC แทบจะไม่เห็นเลย

ข้อเสีย:

- เครื่องมีขนาดเล็ก ปรับยาก
- ต้องสั่งทำเฉพาะบุคคล ราคาสูง
- ใช้ได้เฉพาะผู้ที่มีการสูญเสียการได้ยินไม่มาก (<70 dB)
- ต้องใช้แบตเตอรี่เฉพาะของเครื่องช่วยฟัง (ขนาด 1.4 โวลต์)



รูปที่ 2.4 เครื่องช่วยฟังชนิดสั่งทำขนาดเล็กใส่ในหูแบบ ITE ITC CIC ตามลำดับ

4. เครื่องช่วยฟังชนิดแว่นตา (Eyeglasses hearing aid) ในปัจจุบันไม่มีการใช้ เนื่องจาก ราคาแพง การประกอบเครื่องยุ่งยากต้องประสานงานกับร้านแว่น หากเครื่องชำรุดต้องส่งซ่อมทั้งชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 เครื่องช่วยฟังชนิดแว่นตา

5. เครื่องช่วยฟังแบบรับเสียงข้ามหู (CROS hearing aid) สำหรับผู้ที่หูหนวกข้างหนึ่ง อีกข้างหนึ่งปกติ ซึ่งจะมีปัญหาในการแยกทิศทางของเสียง การใส่เครื่องช่วยฟังในข้างหูหนวกจะไม่เกิดประโยชน์เพราะเครื่องช่วยฟังมีกำลังขยายที่จำกัด ดังนั้น การใส่ไมโครโฟนติดไว้ที่หูข้างหนวก เพื่อดักเสียงจากหูข้างนั้น แล้วส่งต่อไปที่หูข้างปกติ ทำให้รับรู้ที่มาของเสียงนั้นได้ ลักษณะของเสียงจากหูข้างเสียจะเป็นเสียงที่ผ่านไมโครโฟนในขณะที่หูข้างปกติจะได้ยินเสียงที่เป็นธรรมชาติ



รูปที่ 2.6 เครื่องช่วยฟังแบบรับเสียงข้ามหู

2.4 หูตึง (Hearing Loss)

2.4.1 การได้ยินเสียงตามธรรมชาติ

คลื่นเสียงจะเดินทางผ่านช่องหูไปยังเยื่อแก้วหูจากนั้นกระดูก 3 ชิ้น ค้อน ทัง และ โกลน ในหูชั้นกลางจะส่งสัญญาณในลักษณะของการสั่นสะเทือนไปยังประสาทหูชั้นในหรือกระดูกก้นหอย ภายในกระดูกก้นหอยจะมีเซลล์ขน (Hair cell) นับล้าน เป็นอวัยวะที่ช่วยรับสัญญาณที่ส่งผ่านมาจากแก้วหู

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปยัง เส้นประสาทที่เชื่อมต่อไปยังสมองเพื่อทำการประมวลผล และรับรู้เสียง

2.4.2 สาเหตุของการสูญเสียความสามารถในการได้ยิน

การสูญเสียการได้ยินสามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เกิดโดยที่หูนั้นทำงานบกพร่อง หรือมีความผิดปกติทางกายภาพของภายในหูเอง ส่วนสาเหตุอื่นๆที่เกิดขึ้นตอนหลังนั้นอาจจะมาจากการบาดเจ็บหรือการเจ็บป่วยได้ ทั้งนี้รวมถึง ความผิดปกติของเหลวภายในหูชั้นกลาง การติดเชื้ออย่างรุนแรง การบาดเจ็บทางศีรษะ การฟังเสียงที่ดังมาก อยู่ในที่มีเสียงดังมากเป็นเวลานาน

2.4.3 ประเภทของความสูญเสียการได้ยิน

1. การนำเสียงบกพร่อง (Conductive hearing loss)

เกิดจากความผิดปกติของหูชั้นนอก และหูชั้นกลาง แต่ประสาทหูยังคงดีอยู่ทำให้มีความผิดปกติในการส่งผ่านคลื่นเสียงไปสู่หูชั้นในสามารถแก้ไขได้ด้วยทางยา หรือการผ่าตัด

อาการ

มีของเหลวออกจากช่องหู เช่น เลือด หรือหนอง มีประวัติการอักเสบของช่องหูมาก่อน การพูดคุยมักพูดเสียงเบาทุ้มนุ่มนวล การได้ยินจะชัดเจนเมื่ออยู่ในที่จ่อแจแต่ไม่ค่อยดีในที่เงียบๆ บางรายอาจมีเสียงรบกวนในหูเป็นเสียงต่ำๆ การพูดจาชัดเจนออกเสียงได้ตามปกติ ตรวจการได้ยินพบการสูญเสียในช่วงความถี่ต่างๆ และมักไม่มากกว่า 60 dBHL

สาเหตุ

- โรคหรือความผิดปกติที่หูชั้นนอก: หูพิการแต่กำเนิด สิ่งแปลกปลอมทำให้เกิดการอุดตันในช่องหู ขี้หูอุดตัน

- โรคหรือความผิดปกติที่แก้วหู: มีรูทะลุที่เยื่อแก้วหู แก้วหูอักเสบ เยื่อแก้วหูหนา

- โรคหรือความผิดปกติในหูชั้นกลาง: มีเลือดออกในหูชั้นกลาง โรคหูน้ำหนวก โรคหูชั้นกลางมีหินปูนจับแข็ง ภาวะแทรกซ้อนจากการติดเชื้อไวรัส กระดูกสามชิ้นแตกหรือหัก

2. ประสาทรับฟังเสียงบกพร่อง (Sensorinural hearing loss)

เป็นความผิดปกติที่หูชั้นในหรือประสาทรับฟังเสียง จะได้ยินเสียงแต่ฟังไม่รู้เรื่อง เป็นโรคที่ไม่สามารถรักษาให้หายได้

อาการ

ถ้ามีการสูญเสียของประสาทหูมากกว่าสองข้างและเป็นเวลานาน เสียงพูดจะดังมากกว่าปกติ เพราะไม่ได้ยินเสียงตัวเอง มีเสียงรบกวนในหูเป็นเสียงสูงๆ จะฟังเสียงพูดได้ดีเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 02-254-4000 หรือ 02-254-4001

อยู่ในที่สงบและจะไม่ค่อยเข้าใจคำพูดแม้ว่าเสียงพูดนั้นดังถึงระดับการได้ยินปกติแล้วก็ตาม มักมีอาการเวียนศีรษะแบบบ้านหมุนร่วมด้วย ถ้าประสาทหูเสียมากทั้งสองข้างหรือเป็นมาแต่กำเนิด มักจะพูดไม่ชัดหรือพูดไม่ได้ ไม่มีประวัติของการตรวจหู ตรวจการได้ยินจะพบการสูญเสียในช่วงความถี่สูงๆ

สาเหตุ

- ประสาทรับฟังเสียงบกพร่องแต่กำเนิด: ขาดออกซิเจนขณะอยู่ในครรภ์หรือระหว่างคลอด ติดเชื้อแต่กำเนิดหรือหลังคลอด เช่น ซิฟิลิส หัด หัดเยอรมัน คางทูม สุกใส ไข้หวัดใหญ่ ปอดอักเสบ การอักเสบของเยื่อหุ้มสมองชั้นใน ประสาทรับฟังเสียงบกพร่องจากยา: ผู้ป่วยจะมีการสูญเสียการได้ยินของหูทั้งสองข้างพร้อมๆ กัน ยาบางชนิดทำให้มีอาการชั่วคราว เมื่อหยุดยาการได้ยินอาจกลับคืนมาได้ แต่ยาบางชนิดก็ทำให้มีอาการถาวรรักษาไม่หาย เช่น Kanamycin Streptomycin

- ประสาทการรับฟังบกพร่องจากเสียงดัง (Noise induced hearing loss)
- โรคที่เกิดจากความผิดปกติเกี่ยวกับปริมาณของของเหลวในหูชั้นใน (Meniere's disease) ทำให้มีอาการหูอื้อ เวียนศีรษะ บ้านหมุน คลื่นไส้ อาเจียน และมีเสียงรบกวนในหู อาจเป็นหูเดียวหรือสองหูก็ได้ อาการของโรคจะเป็นซ้ำๆ กัน มีอาการเป็นๆ หายๆ

- ประสาทหูพิการจากการจับแฉียงของกระดูกในหูชั้นใน
- ประสาทหูบกพร่องในวัยชรา (Presbycusis hearing loss) ความผิดปกติเกิดขึ้นจากเซลล์ขนที่อยู่บริเวณฐานของก้นหอยในหูชั้นในมีการเสื่อมไปตามอายุ ทำให้รับฟังเสียงสูงๆ ได้ไม่ดี มักมีเสียงดังในหูเป็นเสียงสูงๆ ตรวจช่องหูไม่พบสิ่งผิดปกติ มีความผิดปกติของการได้ยินของหูทั้งสองข้าง มักพบในคนที่อายุ 40 ปีขึ้นไป

- ศีรษะถูกกระทบกระเทือน ทำให้ประสาทรับฟังเสียงบกพร่องเล็กน้อยไปจนถึงระดับรุนแรง

3. การรับฟังเสียงบกพร่องแบบผสม (Mix hearing loss)

เกิดจากความผิดปกติในระบบการนำเสียงร่วมกับประสาทรับฟังเสียงบกพร่อง พบในโรคที่มีความพิการที่หูชั้นนอก ชั้นกลาง และชั้นในรวมกัน เช่น โรคหูน้ำหนวกเรื้อรัง ซึ่งอาการลุกลามเข้าไปในหูชั้นใน โรคหินปูนจับแฉียงที่กระดูกโกลน เป็นต้น การรักษาโดยการผ่าตัด อาจจะช่วยได้บ้าง แต่ไม่ทั้งหมด

4. ความบกพร่องที่สมองส่วนกลาง (Central hearing impairment)

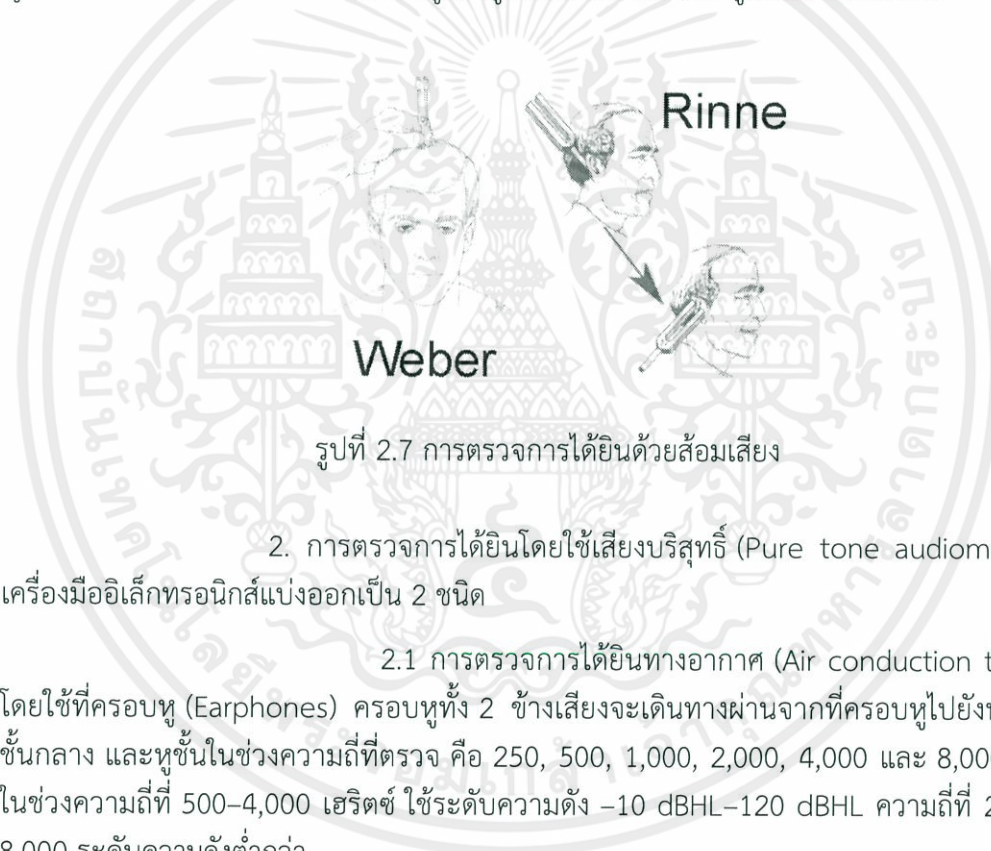
เป็นความบกพร่องของสมอง โดยเฉพาะทำให้ผู้ป่วยได้ยินเสียง แต่ไม่สามารถแปลความหมายได้ จึงไม่สามารถเข้าใจความหมายของเสียงที่ได้ยิน และไม่สามารถโต้ตอบกลับไปได้ เช่น ผู้ป่วยที่ได้รับอุบัติเหตุทางสมอง หรือโรคหลอดเลือดในสมองแตก ตีบตัน เป็นต้น

2.4.4 การตรวจการได้ยินสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท

1. การตรวจการได้ยินด้วยส้อมเสียง (Tuning fork test) เสียงที่ใช้ในการตรวจอยู่ที่ 512 เฮิร์ตซ์ มี 2 วิธี

1.1 Weber test วิธีตรวจ คือ ผู้ตรวจวางส้อมเสียงที่เคาะแล้วไว้ในแนวกลางศีรษะ เช่น กลางหน้าผาก กลางกระหม่อม คาง ฟันหน้า แล้วถามผู้ป่วยว่าได้ยินเสียงดังไปหูด้านไหนมากกว่ากัน

1.2 Rinne test วิธีตรวจ คือ ผู้ตรวจวางส้อมเสียงที่ถูกเคาะแล้วหน้าช่องหู แต่อย่าแตะใบหูของผู้ป่วย และวางก้านของส้อมเสียงไว้ที่บริเวณกระดูกมาสตอยด์ ให้ผู้ป่วยฟังเปรียบเทียบว่าได้ยินหน้าช่องหูกระดูกดังกว่าหรือตรงกระดูกมาสตอยด์ดังกว่า



รูปที่ 2.7 การตรวจการได้ยินด้วยส้อมเสียง

2. การตรวจการได้ยินโดยใช้เสียงบริสุทธิ์ (Pure tone audiometry) ใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.1 การตรวจการได้ยินทางอากาศ (Air conduction test-AC) โดยใช้ที่ครอบหู (Earphones) ครอบหูทั้ง 2 ข้างเสียงจะเดินทางผ่านจากที่ครอบหูไปยังหูชั้นนอก ชั้นกลาง และหูชั้นใน ช่วงความถี่ที่ตรวจ คือ 250, 500, 1,000, 2,000, 4,000 และ 8,000 เฮิร์ตซ์ ในช่วงความถี่ที่ 500-4,000 เฮิร์ตซ์ ใช้ระดับความดัง -10 dBHL-120 dBHL ความถี่ที่ 250 และ 8,000 ระดับความดังต่ำกว่า

2.2 การตรวจการได้ยินทางกระดูก (Bone conduction test-BC) วาง Bone vibratorไว้ที่บริเวณกระดูกมาสตอยด์ของหูข้างที่ตรวจ เสียงจะเดินทางผ่านจากกระดูกมาสตอยด์ไปยังหูชั้นใน ช่วงความถี่ที่ใช้ตรวจ คือ 500-4,000 เฮิร์ตซ์ ระดับความดังที่ใช้เริ่มตั้งแต่ 10 dBHL -70 dBHL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การตรวจการได้ยินโดยใช้คำพูด (Speech audiometry) เครื่องมือที่ใช้ตรวจเรียก Speech audiometer เสียงพูดที่ผ่านเข้าไปในเครื่องสามารถผ่านทางไมโครโฟน ระดับความดังเริ่มตั้งแต่ 10 เดซิเบล-110 เดซิเบล จะไม่มีความถี่เฉพาะปรากฏให้เห็นเพราะเสียงพูดนั้นเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่หลายๆความถี่รวมกัน แบ่งเป็น 3 ประเภท

3.1 Speech-detection threshold (SDT) คือ ระดับเสียงพูดที่ต่ำที่สุดที่ผู้ถูกทดสอบสามารถรับฟังได้ว่าเป็นเสียง วิธีตรวจ SDT คือ ผู้ตรวจเพิ่มความดังโดยใช้เสียงพูด หรือทำเสียงต่างๆเพื่อให้เกิดความสนใจ หรือตอบสนองเสียงที่ได้ยิน

3.2 Speech-reception threshold (SRT) คือ ระดับเสียงพูดที่ต่ำที่สุดที่ผู้ถูกตรวจสามารถเข้าใจว่าเป็นคำพูด อย่างน้อยร้อยละ 50 ของคำที่ใช้ทดสอบในระดับเดียวกันแต่ละพยางค์ต้องมีความดังใกล้เคียงกัน เช่น ไฟฟ้า ดอกไม้ รองเท้า เสื้อผ้า พ่อ แม่

3.3 Word-discrimination testing หรือ Speech discrimination testing (SD) หรือ Word recognition testing (WR) เป็นการตรวจความสามารถของผู้ถูกทดสอบในการแยกแยะเสียงพูด เมื่อเสียงพูดอยู่ในระดับความดังที่พอเหมาะ

2.4.5 การรักษาอาการไม่ได้ยิน

วิธีการรักษานั้นจะขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการไม่ได้ยิน ซึ่งโดยปกติแล้วมีการใช้ยา การผ่าตัด หรือใช้เครื่องช่วยฟัง (Hearing aids) เครื่องช่วยฟังเป็นอุปกรณ์ชิ้นเล็กๆเอาไว้ขยายเสียงที่เข้ามา ทำให้ผู้ป่วยได้ยินเสียงได้ดีขึ้นชัดเจน สำหรับผู้ป่วยเด็กบางคนที่ไม่สามารถจะได้ยิน หรือเข้าใจคำได้โดยแม้ว่าจะใช้เครื่องช่วยฟัง (Hearing aids) แล้วก็ตาม มีความจำเป็นจะต้องใช้อุปกรณ์อีกประเภทที่เรียกว่า “Cochlear implant” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นเล็กๆ ที่จะถูกผ่าตัดใส่เข้าไปทำหน้าที่แทน Cochlear ของผู้ป่วยรายนั้น โดยที่อุปกรณ์ชิ้นนี้จะเข้าไปทำหน้าที่แทนเซลล์ขนในการส่งข้อมูลเสียงไปยังสมองต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.8 Cochlear implant
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 การป้องกันการสูญเสียการได้ยิน

1. ดูแลสุขภาพตนเองให้แข็งแรง ระวังมิให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ โดยเฉพาะโรคติดเชื้อระบบทางเดินหายใจเชื้อโรคจะเข้าสู่ได้
2. หลีกเลี่ยงการแคะหูเพราะจะเกิดแผลเยื่อแก้วหูทะลุ
3. หลีกเลี่ยงการกระทบบริเวณหูและศีรษะ
4. หลีกเลี่ยงการรับเสียงดังโดยมีอุปกรณ์ป้องกันเสียงตลอดเวลาทำงาน
5. รับการตรวจสมรรถภาพการได้ยินประจำอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง
6. ถ้ามีอาการผิดปกติเรื่องการได้ยินควรพบแพทย์ทันที

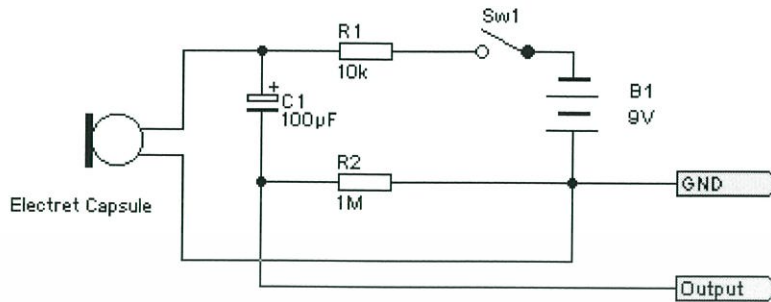
2.5 Electret microphone

Electret microphone เป็นประเภทของไมโครโฟนคอนเดนเซอร์ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ไฟเลี้ยง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ได้มีการประจุไฟฟ้าอย่างถาวรแล้ว Electret ทำจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า และมีไฟฟ้าประจุที่วัสดุแล้ว ชื่อนี้มาจาก Electrostatic และ Magnet รวมกัน



รูปที่ 2.9 Electret condenser microphone capsules

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Electret condenser microphone capsules circuit

2.5.1 ประวัติ

Electret microphone ผลิตขึ้นในปี ค.ศ.1920 ถูกนำมาเป็นองค์ประกอบของคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน แต่ก็ยังไม่สามารถทำได้ จนทำสำเร็จในปี ค.ศ.1962 Gerhard Sessler และ Jim West ได้นำ Teflon มาใช้เป็นวัสดุ ปัจจุบันถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ถึงแม้ว่า Electret microphone จะราคาถูกและมีคุณภาพต่ำ แต่ข้อดี คือ สัญญาณรบกวนต่ำ และอายุการใช้งานนาน มีปฏิกริยาต่อ Ultra-flat ได้ดี ซึ่งจำเป็นสำหรับไมโครโฟน

2.5.2 การผลิต

โดยปกติจะหลอมวัสดุที่จะใช้ทำซึ่งเป็นฉนวนก่อน วัสดุเหมาะสม เช่น พลาสติกหรือซีผึ้ง แล้วปล่อยให้แข็งในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าทำให้วัสดุเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น โดยแยกเป็นขั้วลบและขั้วบวก

2.5.3 ประเภท

1. Foil-type or diaphragm-type เป็นชนิดที่ใช้บ่อย แต่มีคุณภาพต่ำ
2. Back electret เหมาะสำหรับการผลิตทรานสดิวเซอร์
3. Front electrets

2.6 ภาคขยายสัญญาณ (Amplifier)

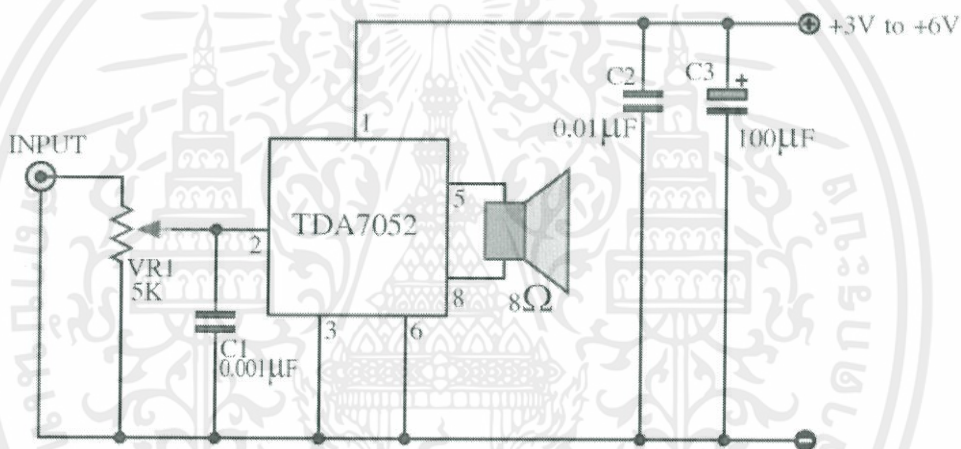
ภาคขยายสัญญาณ (Amplifier) เป็นภาคที่รับสัญญาณไฟฟ้าความถี่เสียง จากภาคสัญญาณเข้า แล้วนำไปขยายสัญญาณให้มีความแรงขึ้นเพื่อเตรียมส่งต่อไปยังภาคสัญญาณออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคขยายสัญญาณเป็นภาคที่รับสัญญาณไฟฟ้าความถี่เสียง จากภาคสัญญาณเข้า แล้วนำมาปรับแต่งและขยายสัญญาณให้มีความแรงขึ้นเพื่อเตรียมส่งต่อไปยังภาคสัญญาณออก ภาคขยายแบ่งออกเป็น 2 วงจร คือ

1. วงจรก่อนการขยาย (Pre amplifier) เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามาจากภาคสัญญาณเข้ามีความแตกต่างกันมากบ้าง น้อยบ้าง เช่น ไมโครโฟน เครื่องบันทึกเสียง เครื่องเล่นคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ดังนั้นภาคก่อนการขยายจะช่วยในการปรับแต่งเสียงให้มีสัญญาณมากน้อยพอๆ กัน ก่อนจะส่งไปวงจรขยายกำลัง

2. วงจรขยายกำลัง (Power amplifier) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากวงจรก่อนขยาย (Pre amplifier) เข้ามาเพื่อทำการขยายให้มีกำลังแรงเพิ่มขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนนี้ ก็ได้แก่ เครื่องขยายเสียง (Amplifier) นั่นเอง



รูปที่ 2.11 Power amplifier circuit

เครื่องขยายเสียง นิยมแบ่งชนิดตามกำลังของการขยายเสียง คือ การแบ่งตามความดังของภาคขยาย เช่นเครื่องขยายเสียงที่นิยมใช้กัน มีกำลังตั้งแต่ 10 วัตต์ ไปจนถึง หลายร้อยวัตต์เลยทีเดียว กำลังวัตต์ของเครื่องขยายเสียงจะบอกถึงความดังที่ออกทางลำโพงกล่าวคือ เครื่องขยายเสียงที่มีกำลัง 200 วัตต์ จะดังกว่า เครื่องขยายเสียงที่มีกำลัง 150 วัตต์นั่นเอง

2.6.1 การขยายสัญญาณไฟฟ้า

สัญญาณไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น มักจะมีกำลังต่ำ ไม่เพียงพอที่จะนำไปทำงานตามที่เราต้องการได้ เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ามีกำลังสูงขึ้น จึงต้องมีการขยายสัญญาณไฟฟ้า ให้มีขนาดโตขึ้นพอจะนำไปจัดการหรือวิเคราะห์ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทบาทในยุคแรกของอิเล็กทรอนิกส์คือการขยายเสียง โดยไมโครโฟนจะเปลี่ยนสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แต่เนื่องจากขนาดของสัญญาณไฟฟ้ามีน้อย ที่ระดับมิลลิโวลต์ จึงต้องมีวงจรขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นที่ระดับโวลต์ เพื่อให้สามารถป้อนเข้าลำโพงได้ ดังนั้นจึงต้องการขยายสัญญาณขึ้นเป็นร้อยเท่าพันเท่า ประเด็นสำคัญคือสัญญาณไฟฟ้า (Signal) ต้องไม่มีสัญญาณรบกวน (Noise) มิฉะนั้นสัญญาณรบกวนก็จะถูกขยายไปด้วย

ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กที่ระดับมิลลิโวลต์ หรือไมโครโวลต์ เช่น สัญญาณไฟฟ้าจากไมโครโฟนจะอยู่ที่ระดับมิลลิโวลต์ ส่วนสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการเต้นของหัวใจจะอยู่ที่ระดับไมโครโวลต์

สัญญาณไฟฟ้าง่ายๆจะถูกขยายถึง 1,000,000 เท่า จนมีขนาด 1 โวลต์ ซึ่งพอที่จะนำไปวิเคราะห์ในวงจรไฟฟ้าภาคต่อได้ นอกจากนั้นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับรู้กัมมันตรังสี ซึ่งมีขนาดเล็กจำเป็นต้องมีการขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นพอที่จะจัดการต่อไปได้ โดยสรุปการขยายสัญญาณไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องจำเป็นมากสำหรับอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์

สำหรับกรณีสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณเสียงตามปกติ มันจะถูกขยายประมาณ 1000 เท่า จนมีขนาดระดับ 1 โวลต์ การขยายส่วนนี้เรียกว่า Preamplifier จากนั้นสัญญาณก็จะผ่านเข้าภาคขยายกำลัง (Power-amplifier) จนกระทั่งสัญญาณไฟฟ้ามืดและกำลังสูงพอที่จะทำให้ลำโพงทำงานได้

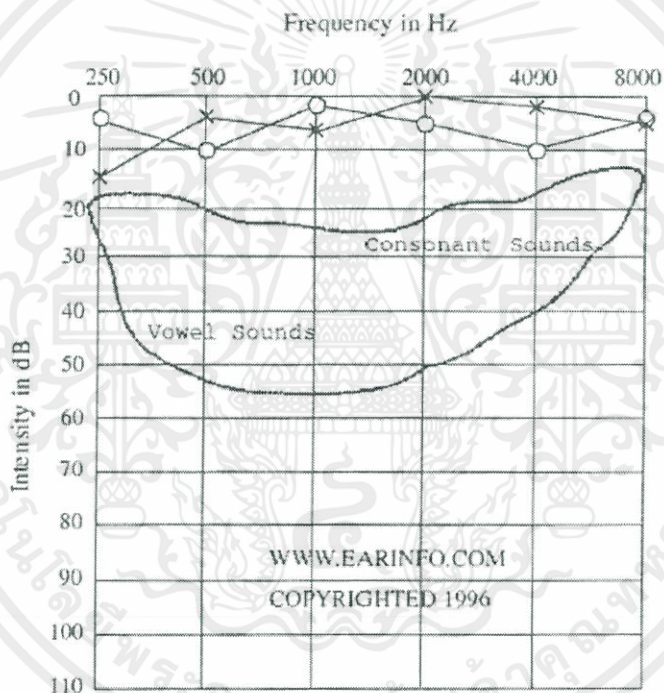
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปฏิญานินทร์

3.1 การออกแบบ

การสร้างวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับชดเชยความสูญเสียของการได้ยิน โดยใช้วิธีการออกแบบจากวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอนิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) ด้วยวิธี Frequency sampling ซึ่งแต่ละบุคคลจะมีรูปแบบการสูญเสียการได้ยินแตกต่างกัน โดยจะทำการสร้างวงจรกรองความถี่ เพื่อชดเชยย่านความถี่เสียงที่ไม่ได้ยินนั้น ซึ่งการได้ยินสำหรับคนปกติจะเป็น Audiogram ดังรูปที่ 3.1



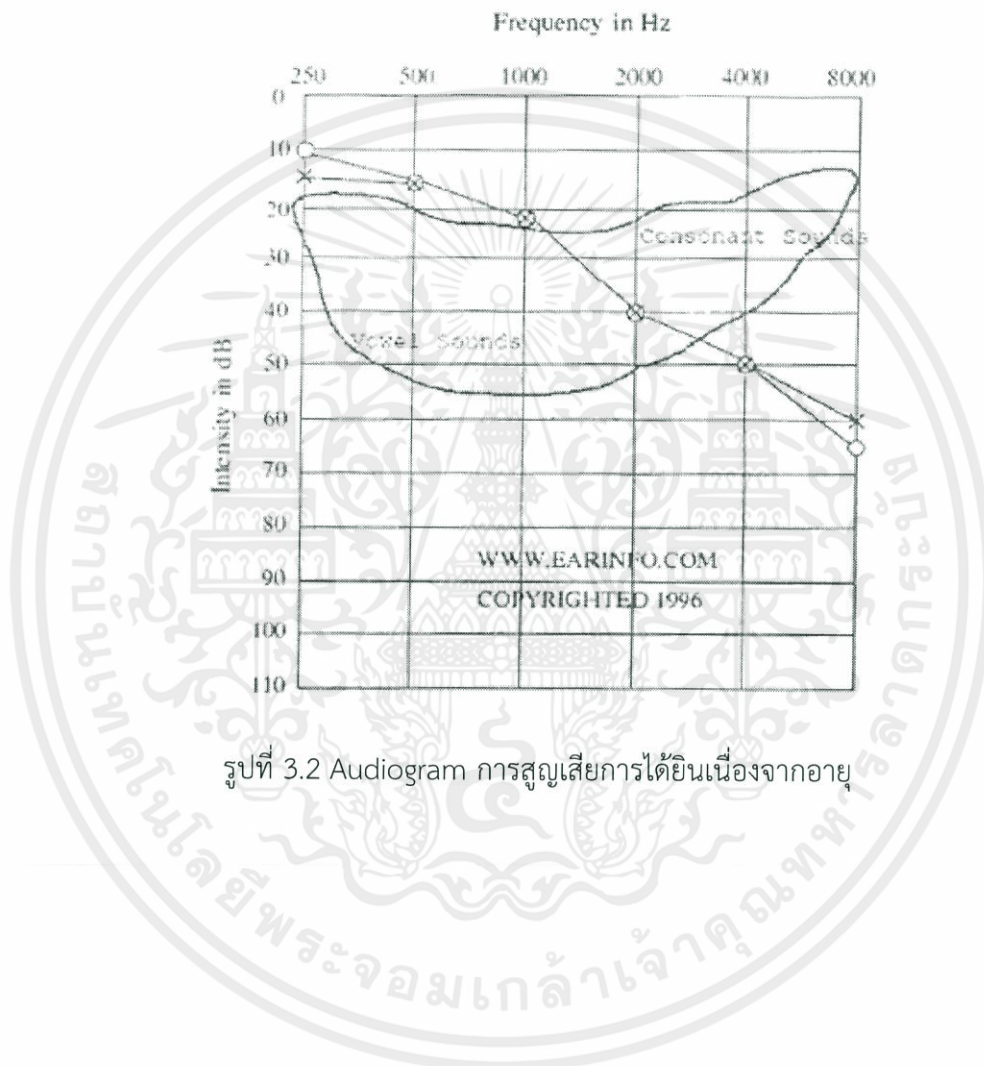
รูปที่ 3.1 Audiogram การได้ยินสำหรับคนปกติ

โดยกำหนดให้ X, O เป็นความสามารถในการได้ยินในหูซ้าย และขวาตามลำดับ ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างรูปแบบการสูญเสียการได้ยินในลักษณะต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ตัวอย่างรูปแบบการสูญเสียการได้ยิน

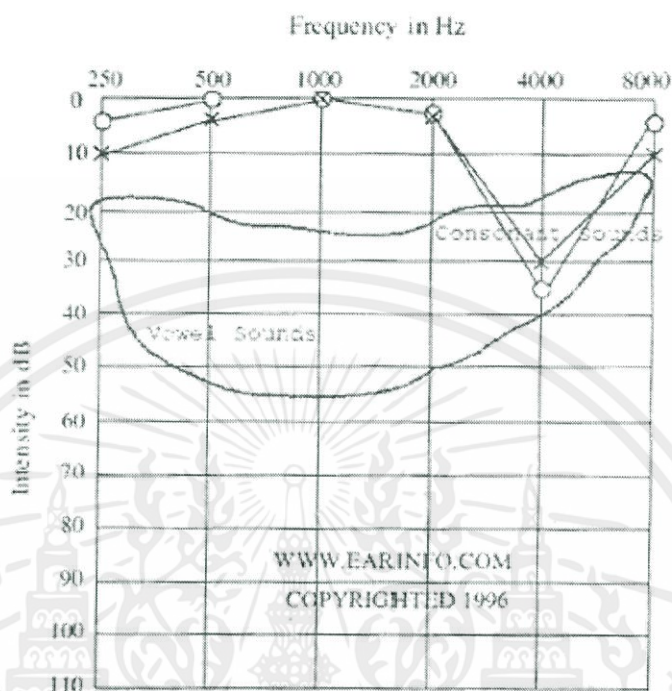
ตัวอย่างที่ 1 การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ



รูปที่ 3.2 Audiogram การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

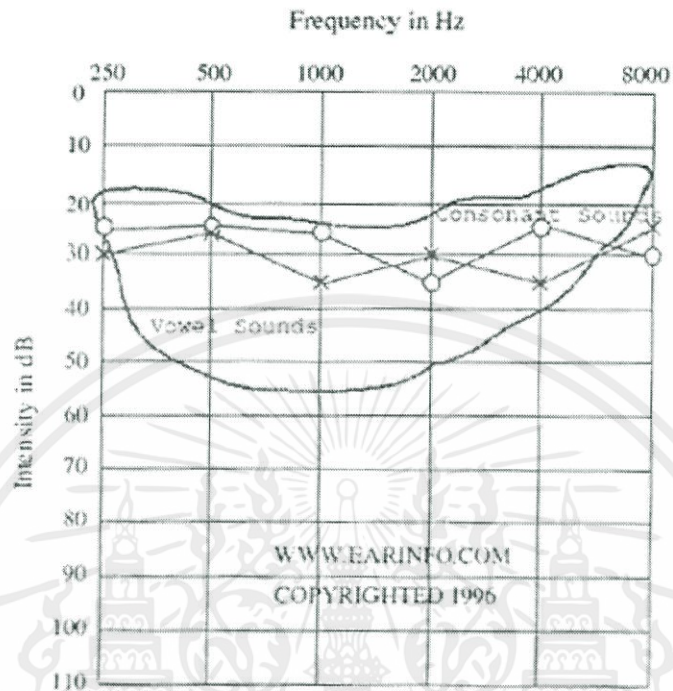
ตัวอย่างที่ 2 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 3.3 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

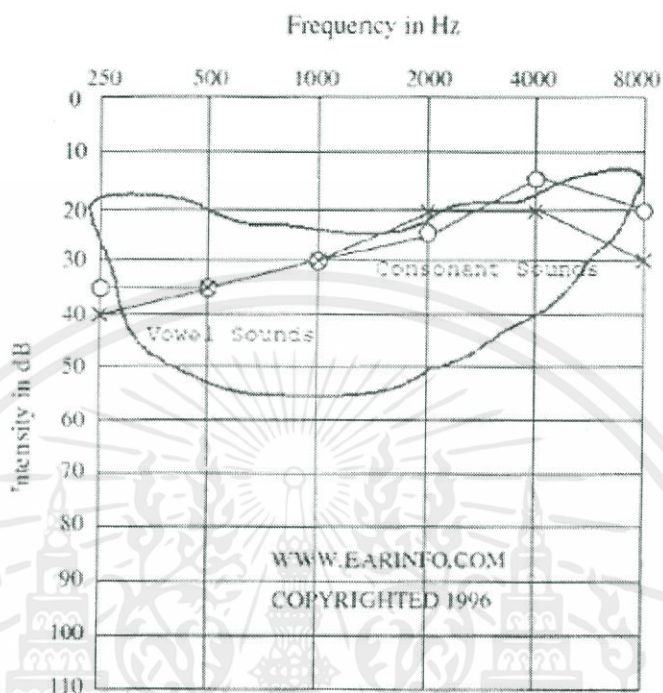
ตัวอย่างที่ 3 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1



รูปที่ 3.4 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

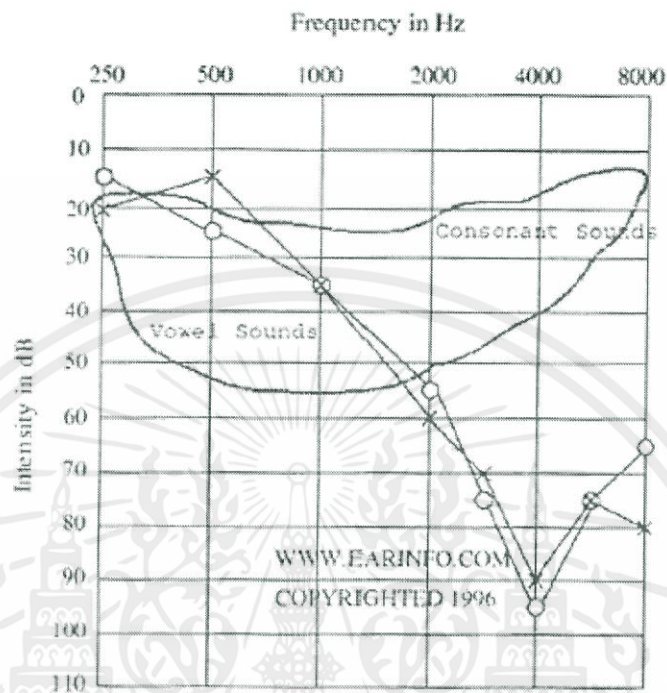
ตัวอย่างที่ 4 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ครั้งที่ 2



รูปที่ 3.5 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

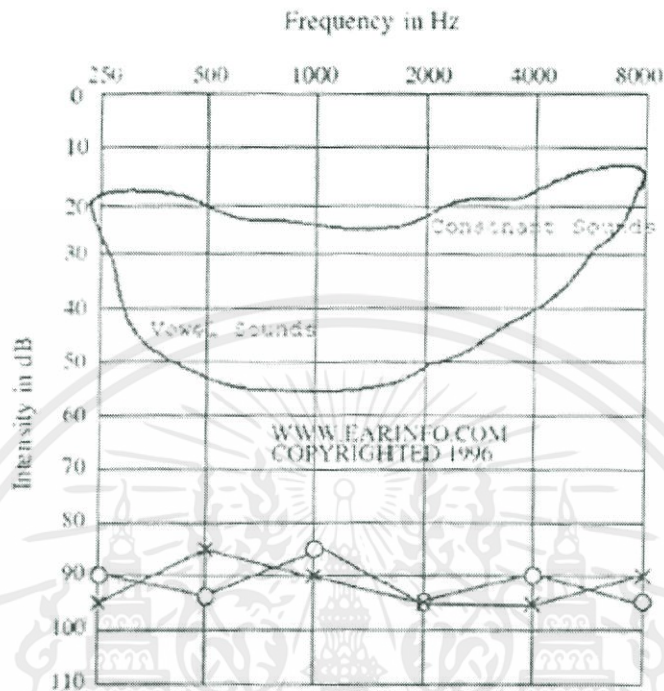
ตัวอย่างที่ 5 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 3.6 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

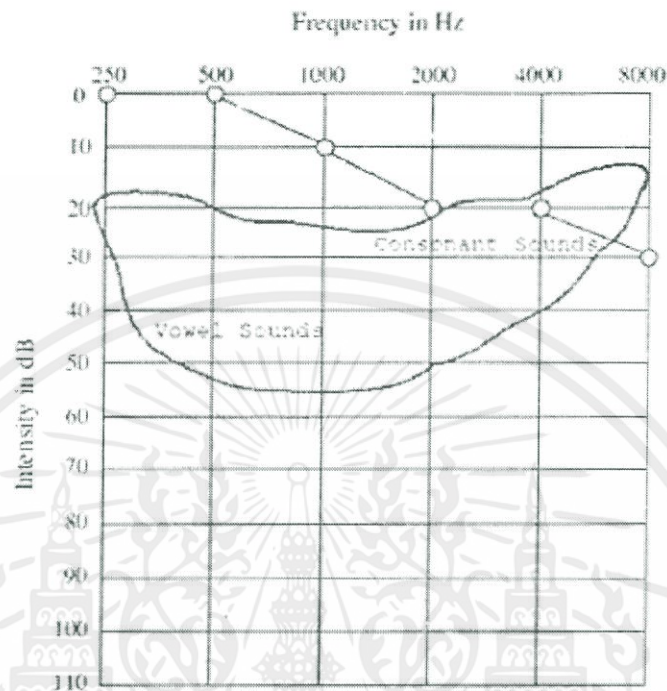
ตัวอย่างที่ 6 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่



รูปที่ 3.7 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

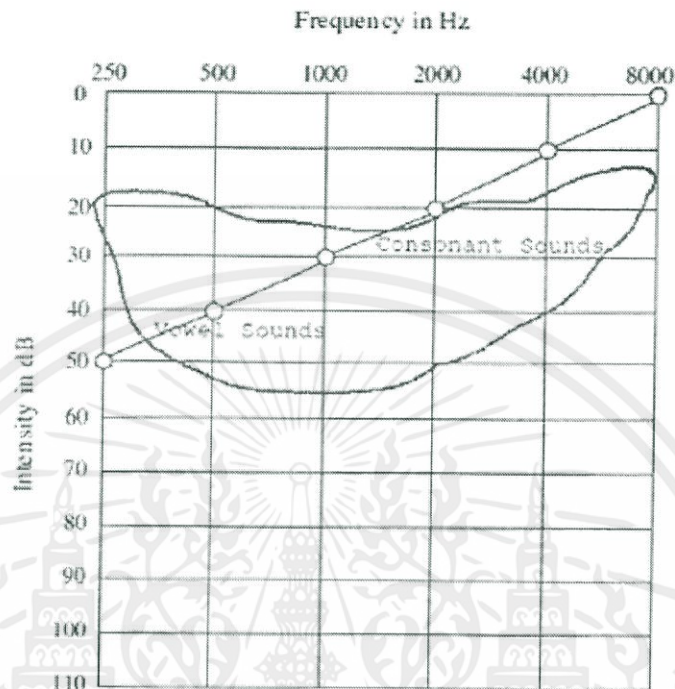
ตัวอย่างที่ 7 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง



รูปที่ 3.8 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 8 การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.9 Audiogram การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

3.1.2 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณที่นำมาชดเชยย่านความถี่เสียง

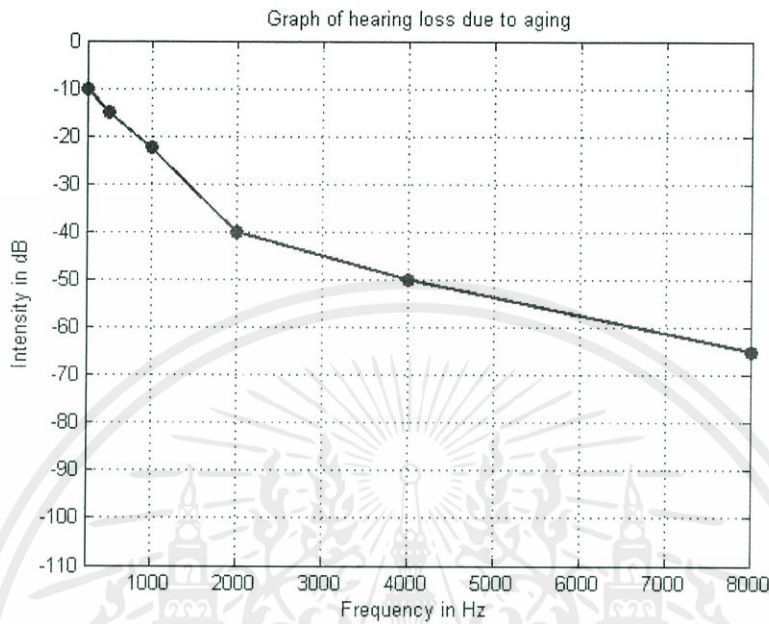
ที่ไม่ได้ยิน

จากตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.1.1 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณที่นำมาชดเชยย่านความถี่เสียงที่ไม่ได้ยินเป็นดังนี้

การทดลองการสูญเสียการได้ยินในหูขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

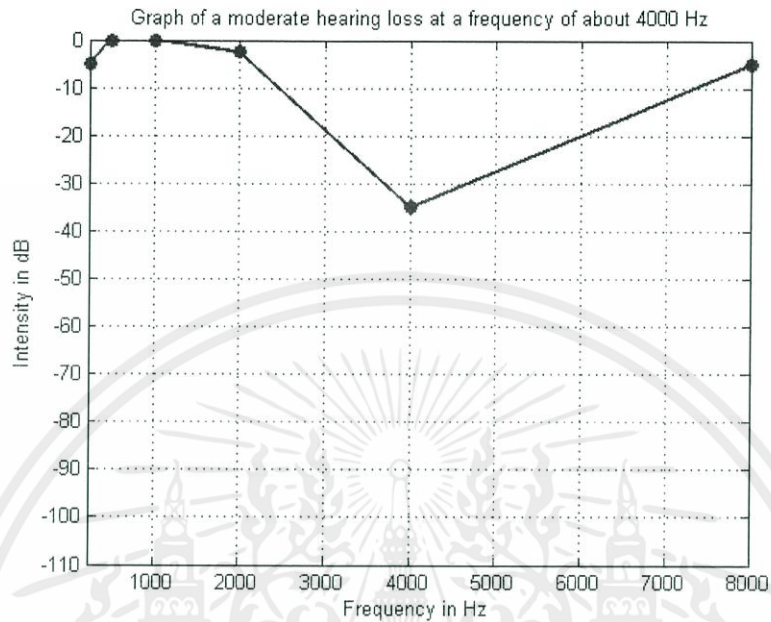
ตัวอย่างที่ 1 การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ



รูปที่ 3.10 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

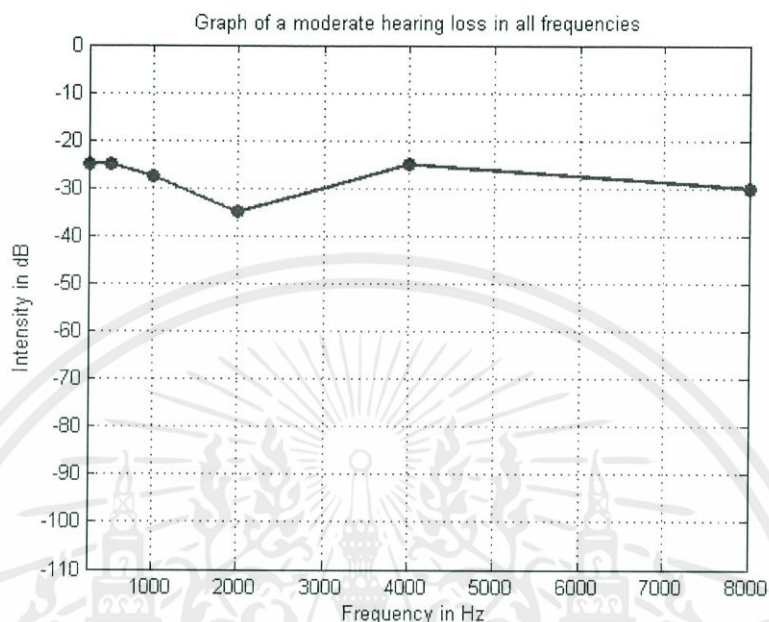
ตัวอย่างที่ 2 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 3.11 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

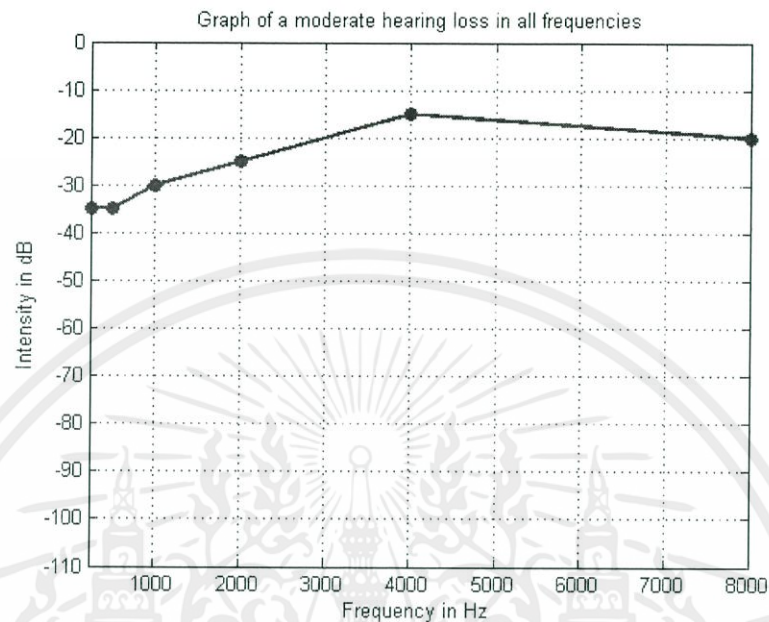
ตัวอย่างที่ 3 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1



รูปที่ 3.12 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

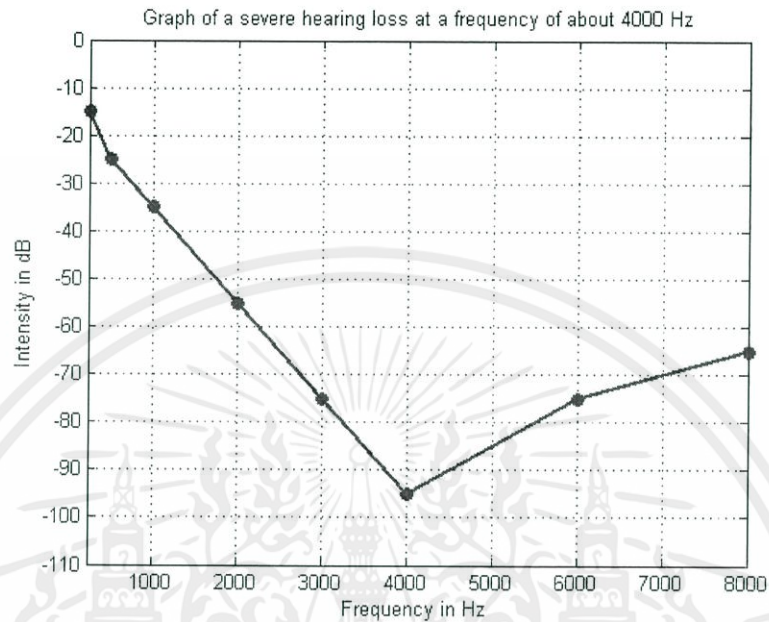
ตัวอย่างที่ 4 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 2



รูปที่ 3.13 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

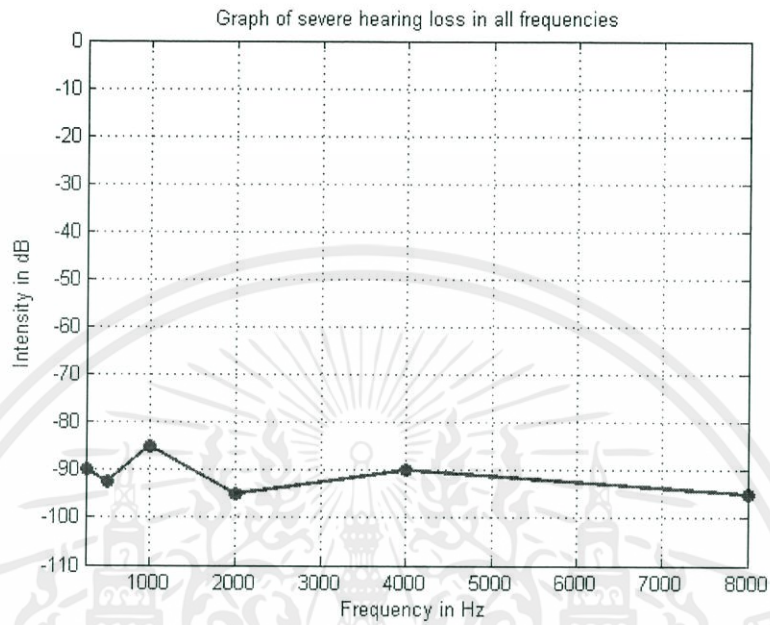
ตัวอย่างที่ 5 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 3.14 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

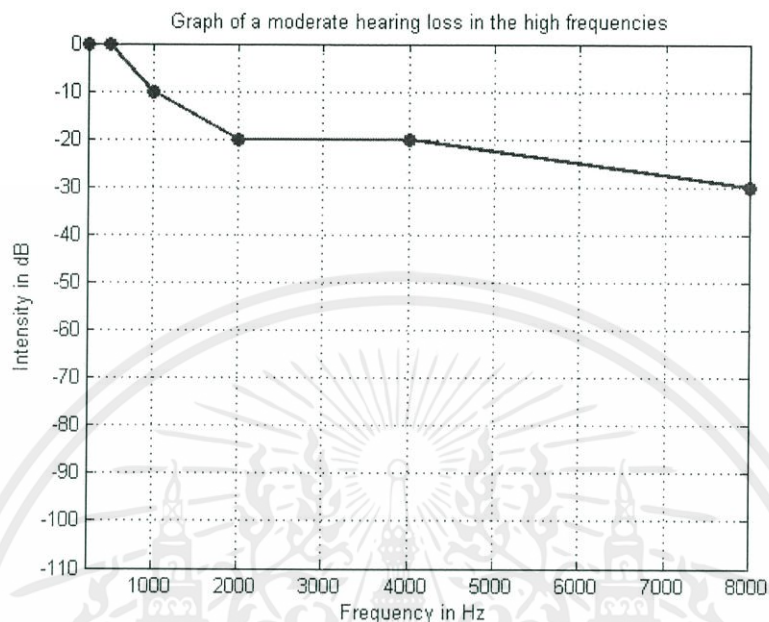
ตัวอย่างที่ 6 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่



รูปที่ 3.15 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

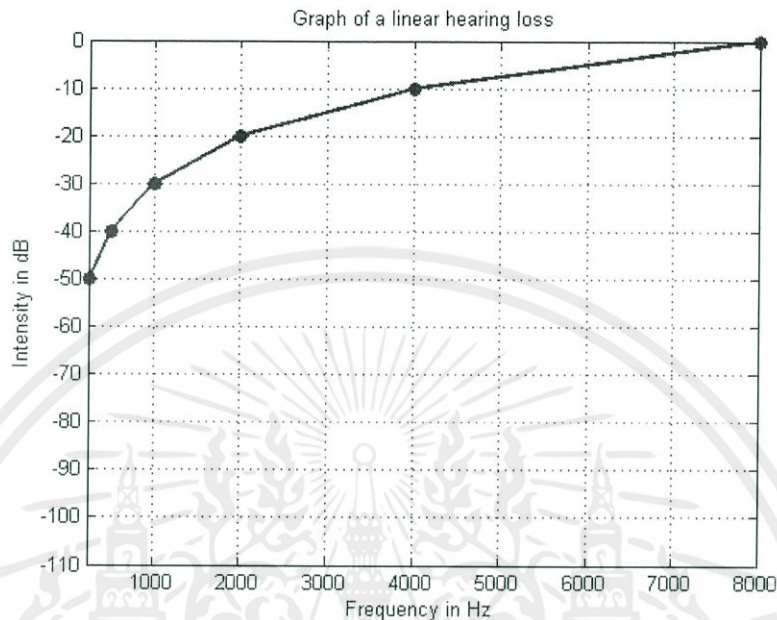
ตัวอย่างที่ 7 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง



รูปที่ 3.16 คุณลักษณะของวงจรรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 8 การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณการสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor (DSP))

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลหรือ Digital Signal Processor (DSP) คือรูปแบบของไมโครโปรเซสเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลอย่างรวดเร็ว

ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าตามบ้าน เช่น วิทยุเทป เครื่องเล่น CD วิทยุเทป โทรทัศน์และอื่นๆ อีกมากมาย ถ้ามีการนำสัญญาณดิจิทัลมาผ่าน IC Chip ที่มีบทบาทสำคัญในเรื่องการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลซึ่งก็คือ DSP Chip หรือ IC Digital Signal Processor ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณ โดยสัญญาณจะถูกแปลงจากอนาล็อกไปเป็นดิจิทัลแล้วจึงนำไปประมวลผลเมื่อประมวลผลเสร็จจะแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ได้กลับไปเป็นสัญญาณอนาล็อกอีกครั้ง ซึ่งไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไปและระบบปฏิบัติการส่วนมากสามารถประมวลผล DSP Algorithm ได้แต่ไม่เหมาะสมสำหรับ Application ของ Pocket PDA ดังนั้น

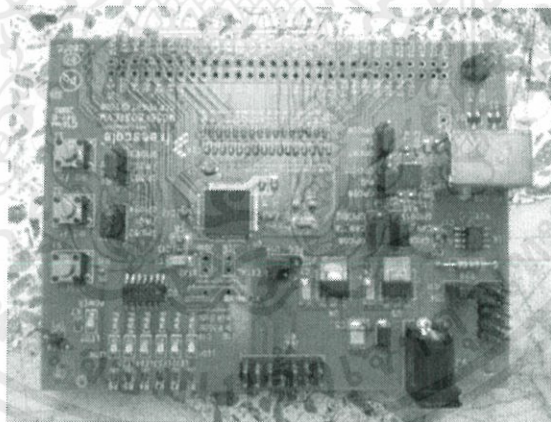
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจึงถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น สามารถรองรับ Application ได้หลากหลายมากขึ้นและ DSP Chip สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้มากขึ้น

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจัดเป็นโปรเซสเซอร์พิเศษ ที่ออกแบบมาเฉพาะสำหรับงานการคำนวณทางด้านการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล (Digital Signal Processing) ทำให้สามารถทำงานประเภทนี้ได้อย่างรวดเร็วกว่าใช้โปรเซสเซอร์ที่ออกแบบมาสำหรับงานทั่วไปสามารถโปรแกรมได้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

โดยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่นำมาใช้งานนี้ได้ใช้ของบริษัท FREESCALE รุ่น MC56F8037EVM ดังนั้นซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้งานครั้งนี้จึงใช้ซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า CodeWarrior IDE version 5.6.1 โดยบอร์ด MC56F8037EVM ได้พัฒนาเพิ่มเติมจากบอร์ด MC56F8037 ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาชิ้นงานซอฟต์แวร์หรือฮาร์ดแวร์แบบการประมวลผลแบบทันที (Real-time) มีฟังก์ชันเพื่อรองรับการสั่งการจากผู้ใช้งานและมีความคล่องตัวสำหรับให้นำไปพัฒนาชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

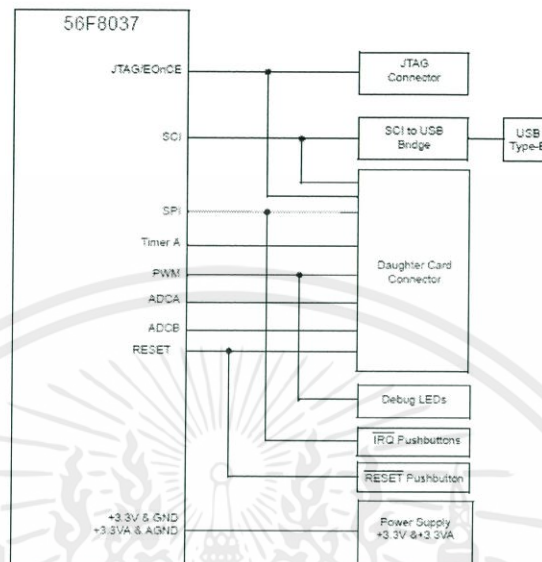
โครงสร้างของบอร์ด MC56F8037EVM แสดงได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 โครงสร้างของบอร์ด MC56F8037EVM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

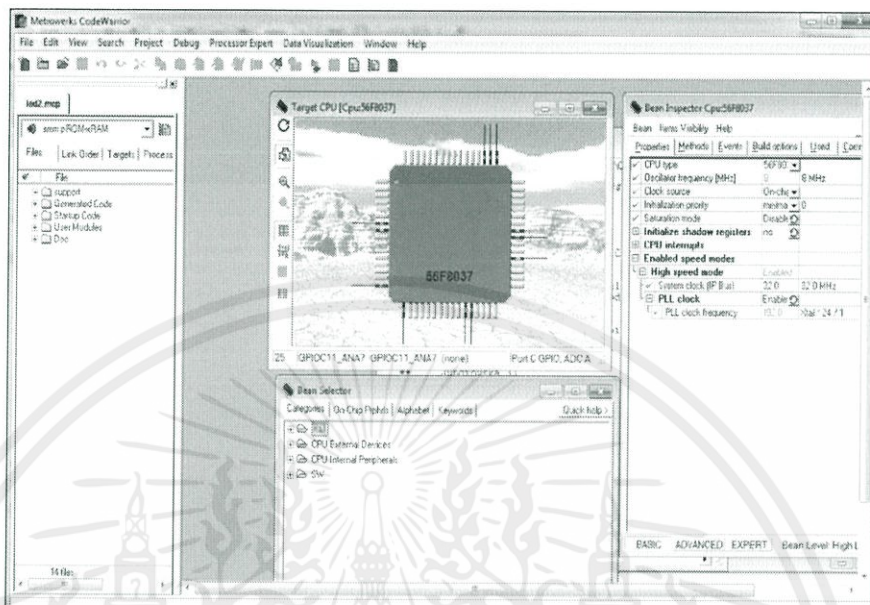
บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด MC56F8037EVM แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด MC56F8037EVM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม CodeWarrior IDE version 5.6.1 แสดงได้ดังรูปที่ 3.21



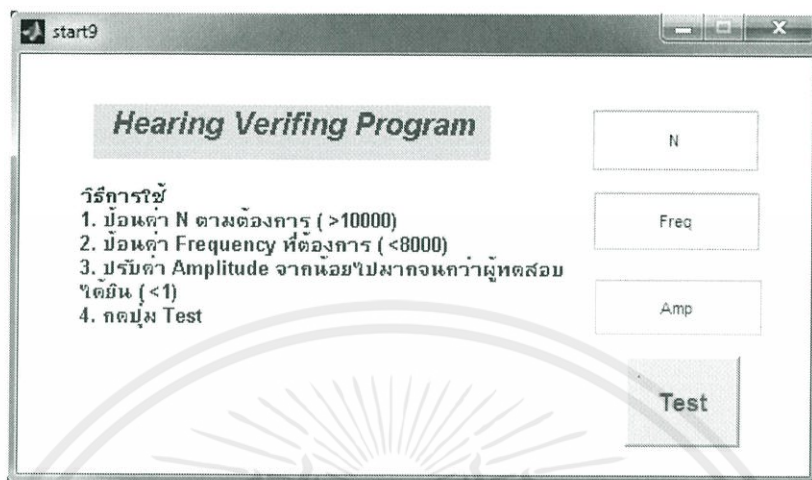
รูปที่ 3.21 โปรแกรม CodeWarrior IDE version 5.6.1

3.2.2 โปรแกรมทดสอบการได้ยิน

เป็นการเขียนโปรแกรมจาก MATLAB โดยโปรแกรมจะสร้างสัญญาณ Sine wave ซึ่งสามารถกำหนด Frequency และ Amplitude ตามที่ผู้ใช้ต้องการได้ การทำงานของโปรแกรมคือป้อนค่า N ที่เหมาะสม Frequency ที่ต้องการทดสอบ และปรับ Amplitude โดยเริ่มปรับจากค่าน้อยไปยังค่ามากกว่าผู้ทดสอบสามารถได้ยินเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมทดสอบการได้ยิน แสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 โปรแกรมทดสอบการได้ยิน

3.3 โครงสร้างของระบบ

โครงสร้างของระบบ ส่วนหลักๆจะแบ่งออกเป็นส่วนของ Function generator หรือ ส่วนของการปรับ Off set ส่วนของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ส่วนของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor (DSP)) และส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก (DAC)



รูปที่ 3.23 โครงสร้างของระบบ

3.3.1 ส่วนของ Function generator หรือส่วนของการปรับ Off set

เนื่องจากการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) ที่เราใช้รับสัญญาณอนาลอกนั้น จะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ จึงต้องยกระดับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับนี้ขึ้นมา

3.3.2 ส่วนของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC)

เมื่อได้สัญญาณที่มีขนาดเหมาะสมแล้ว ก็นำมาแปลงจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (ADC) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

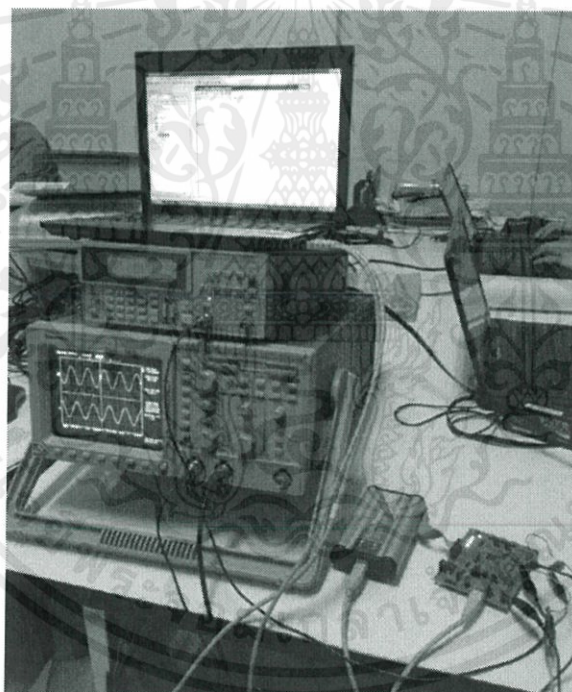
3.3.3 ส่วนของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor (DSP))

ส่วนนี้ เราได้ใช้ภาษาซี ในการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณ แล้วนำมาทดสอบการใช้งาน ซึ่งสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณนั้นได้มาจากการจำลองตัวกรองสัญญาณในโปรแกรม MATLAB นั่นเอง

3.3.4 ส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (DAC)

เมื่อเราทำการกรองสัญญาณผ่านโปรแกรมที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณแล้ว เราจะทำ การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอกอีกครั้งก่อนที่สัญญาณจะออกไปยังผู้ฟัง

การทดลองการออกแบบการออกแบบวงจรกรองและการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิต ผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การทดลองการออกแบบการออกแบบวงจรกรองและการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิต ผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

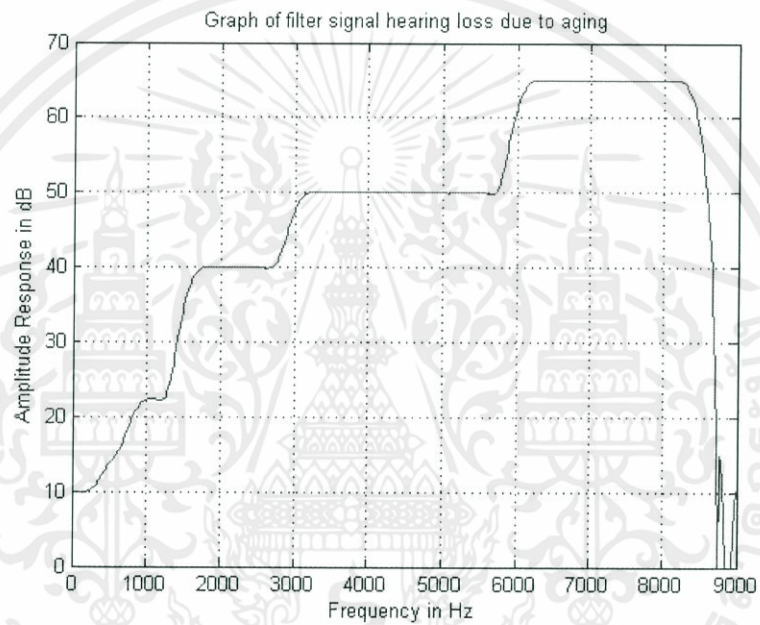
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

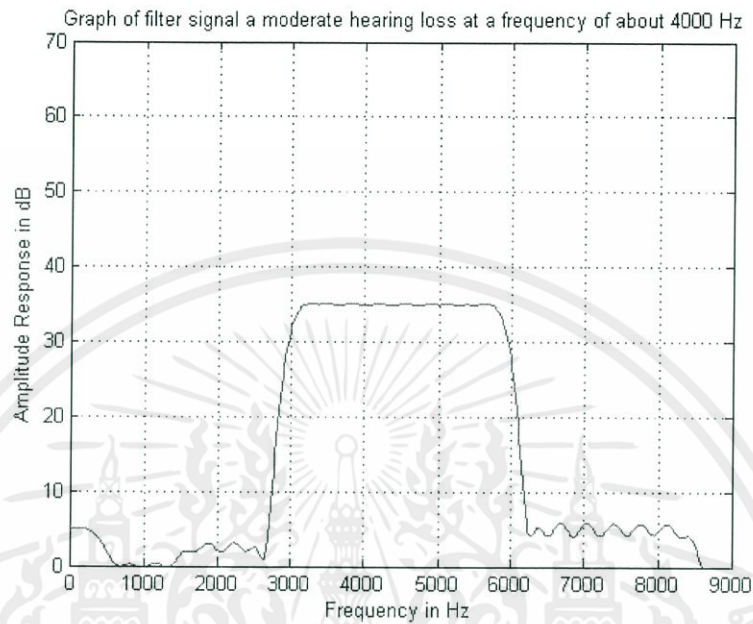
ตัวอย่างที่ 1 การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ



รูปที่ 4.1 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

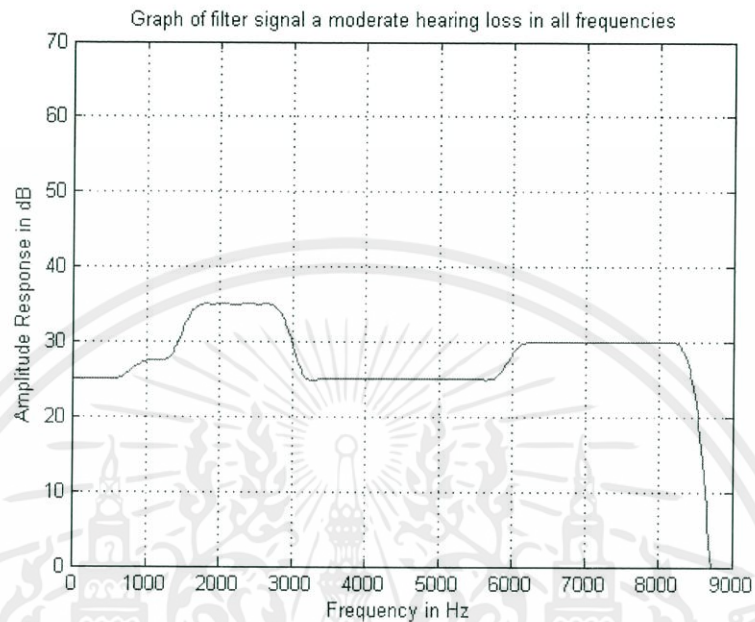
ตัวอย่างที่ 2 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

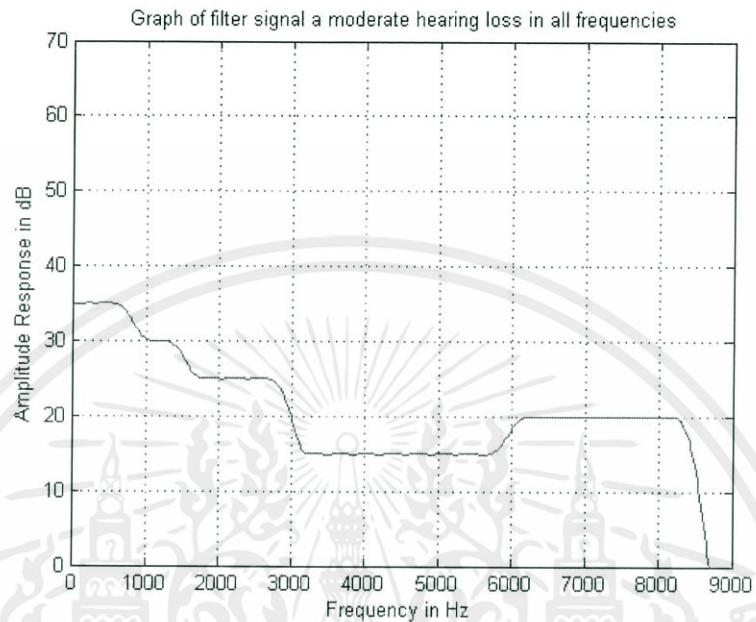
ตัวอย่างที่ 3 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

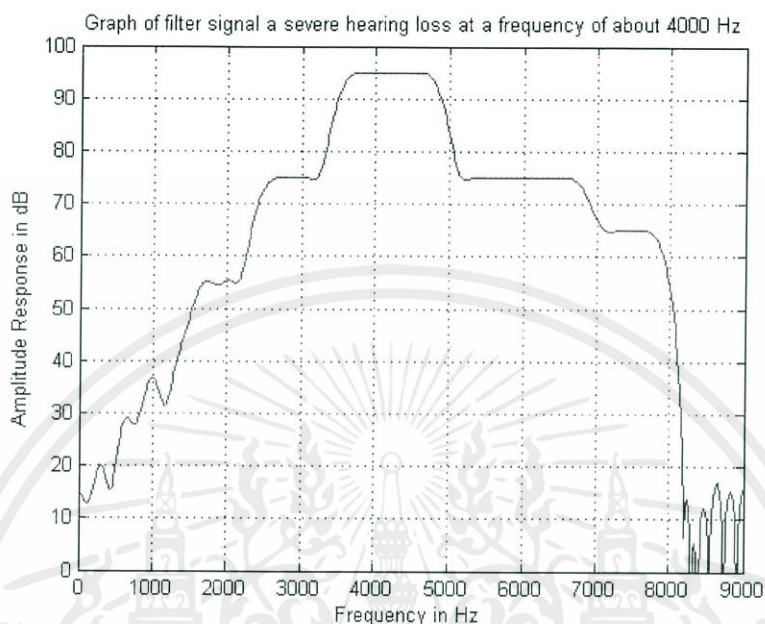
ตัวอย่างที่ 4 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2



รูปที่ 4.4 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

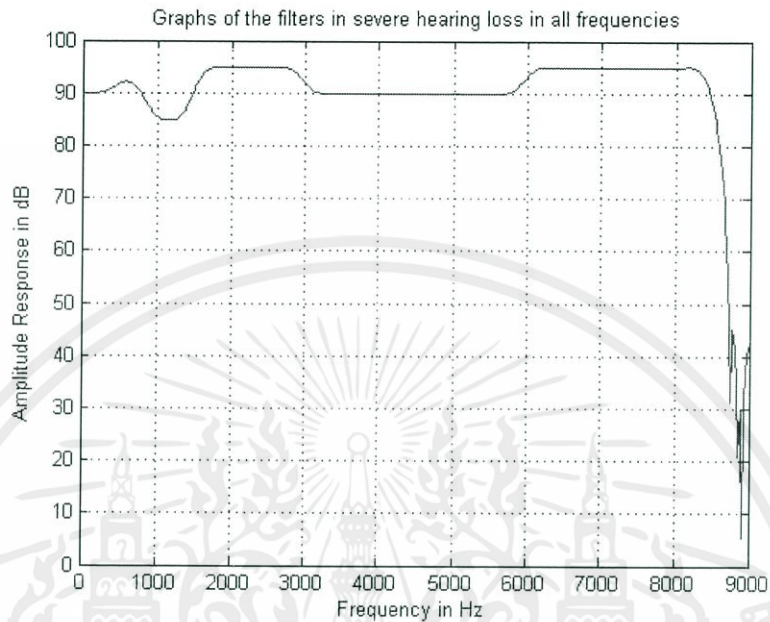
ตัวอย่างที่ 5 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 4.5 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด
(Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

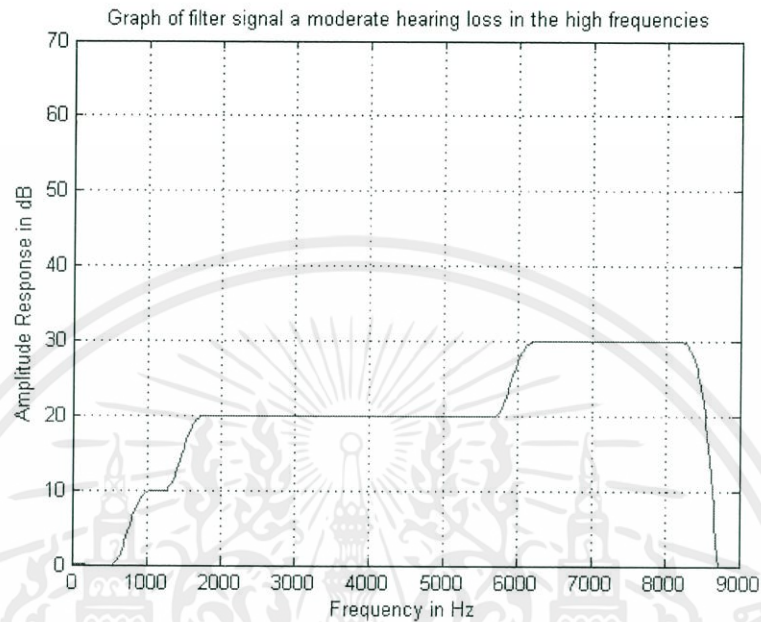
ตัวอย่างที่ 6 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

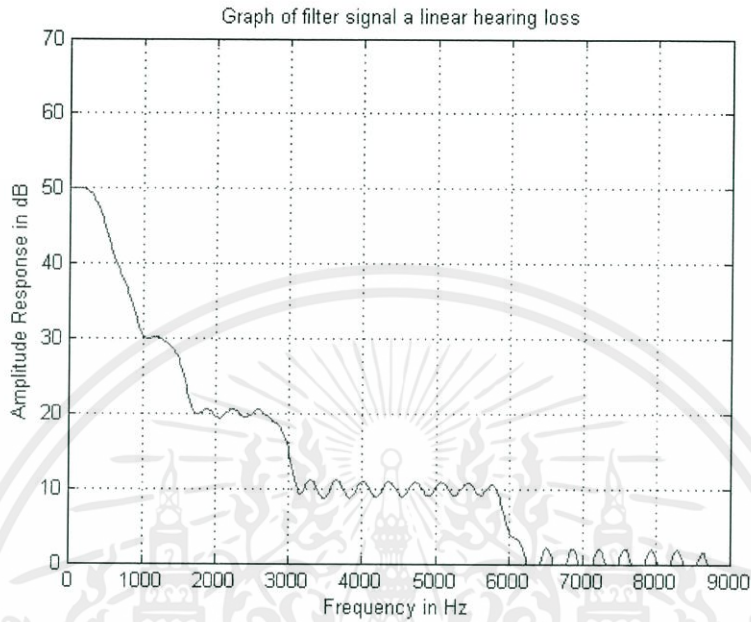
ตัวอย่างที่ 7 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 8 การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

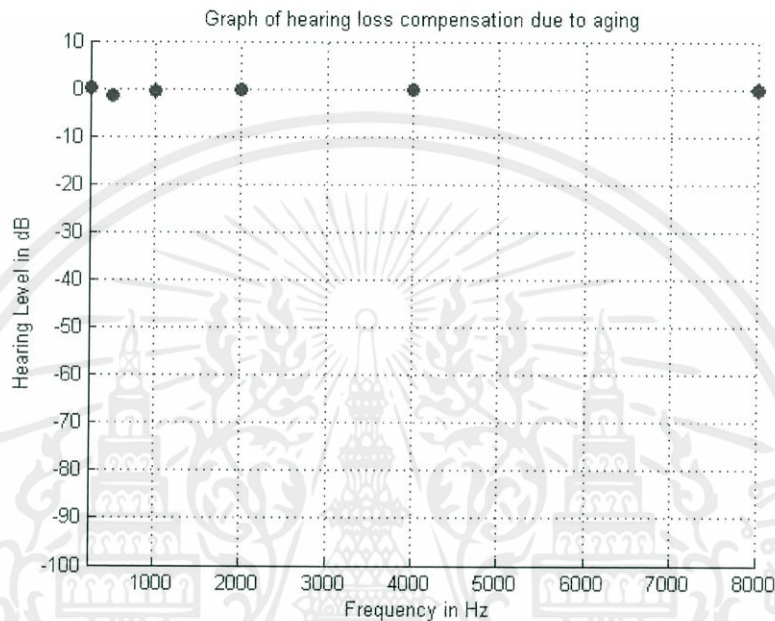


รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

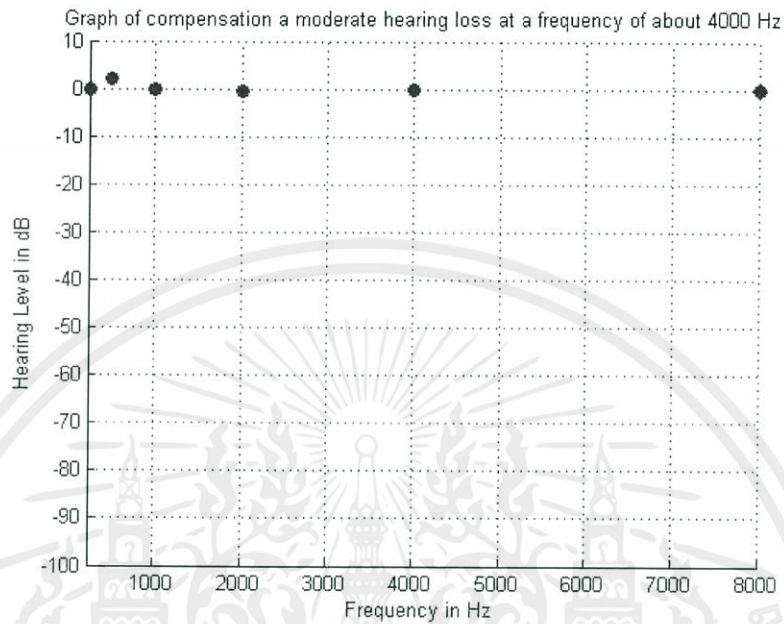
ตัวอย่างที่ 1 การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

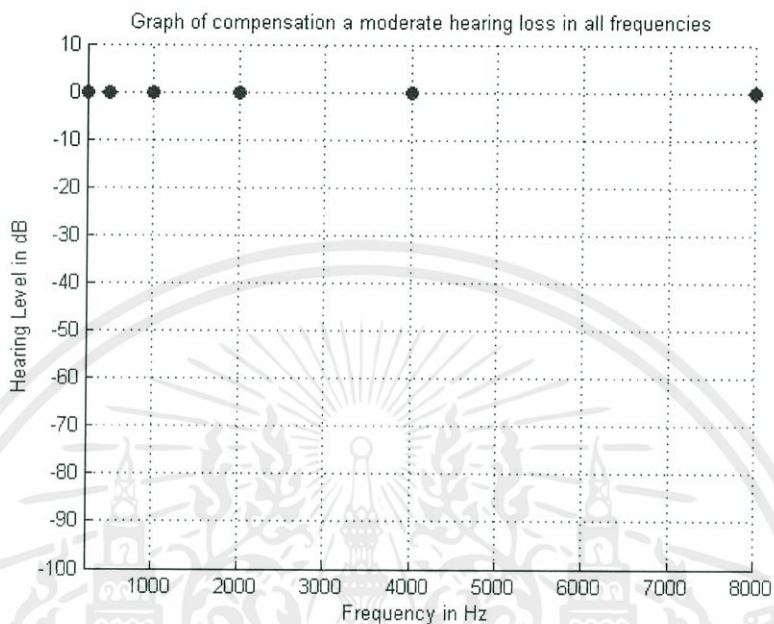
ตัวอย่างที่ 2 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

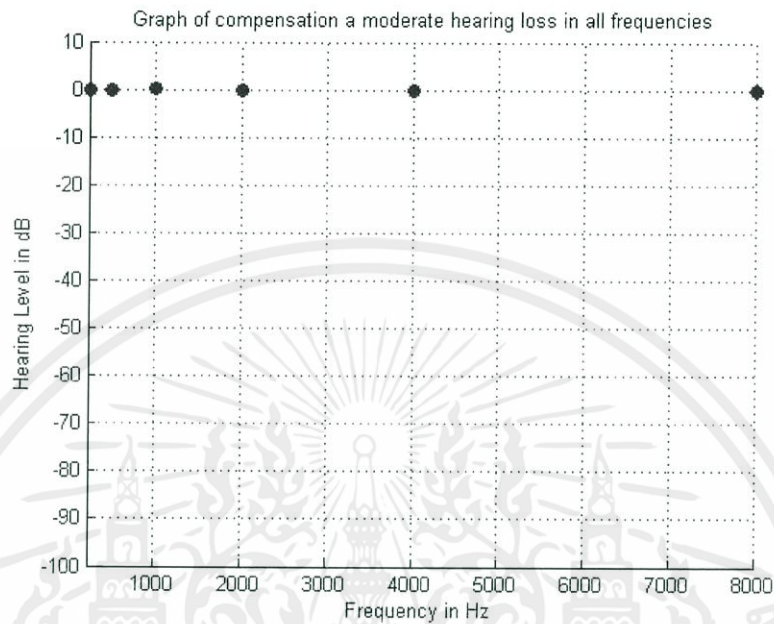
ตัวอย่างที่ 3 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 4 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2



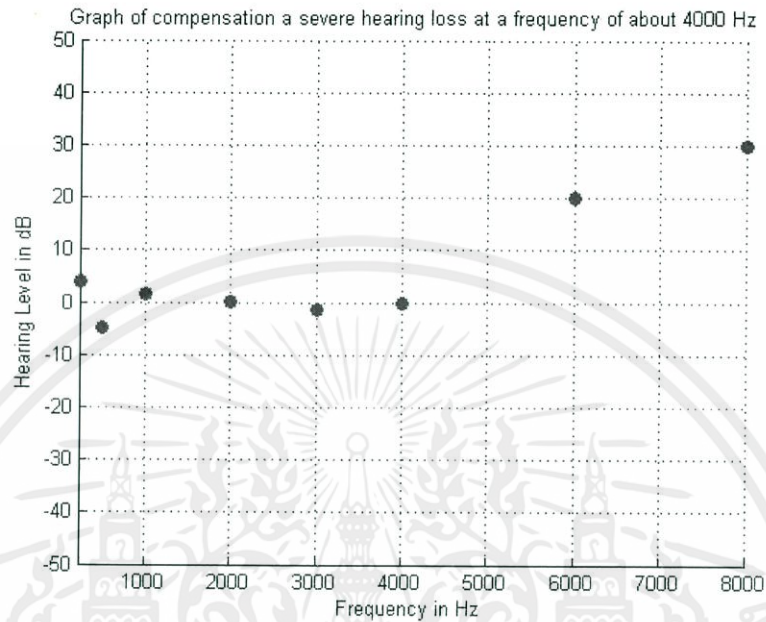
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

(Finite impulse response:FIR filter)

การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

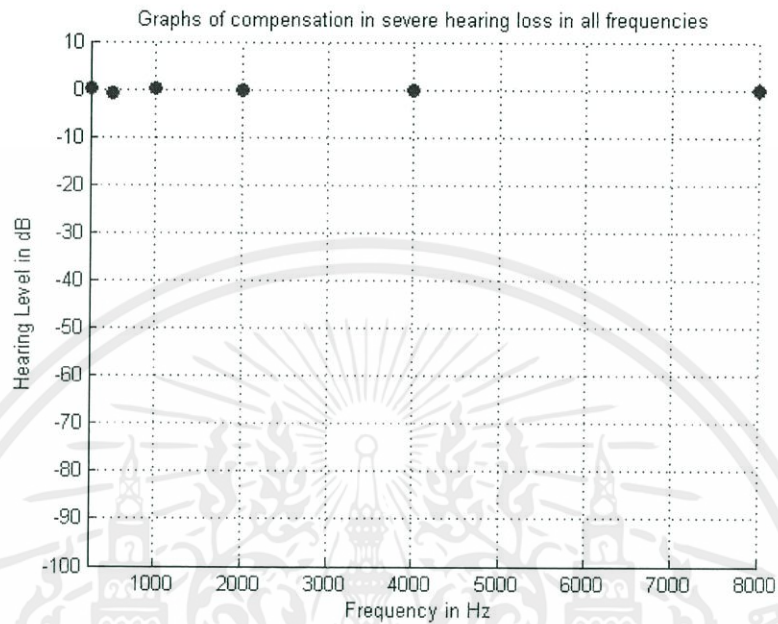
ตัวอย่างที่ 5 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

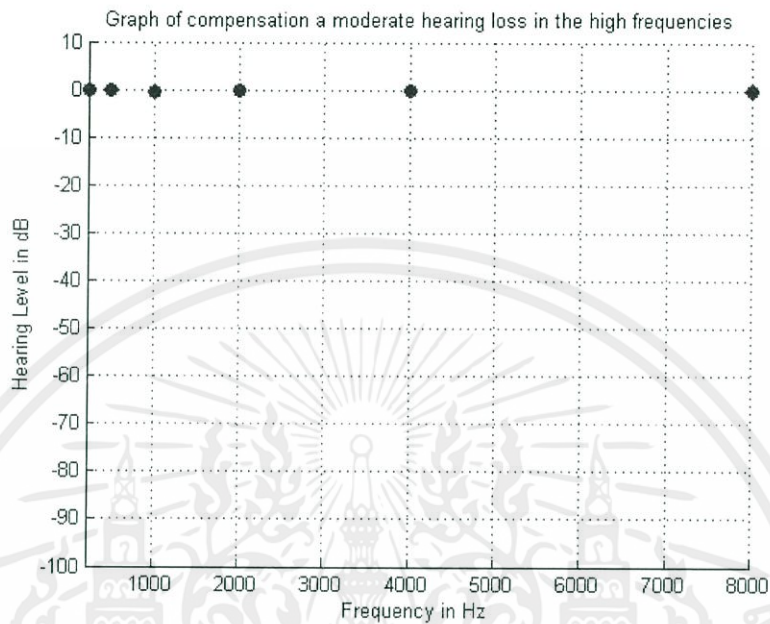
ตัวอย่างที่ 6 การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

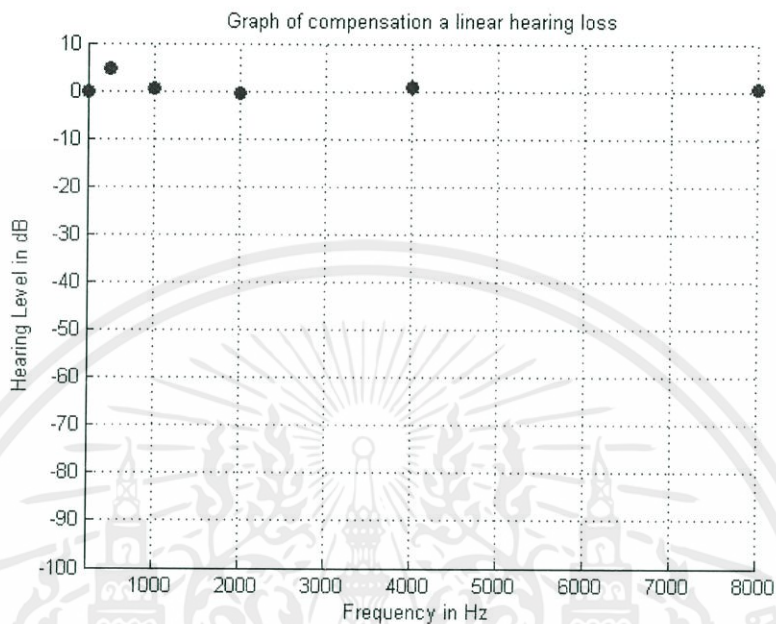
ตัวอย่างที่ 7 การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่ 8 การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

4.3 ตารางเปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0.20
500	1.35 (Max)
1000	0.32
2000	0.12
4000	0.17

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินเนื่องจากอายุ (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
8000	0.13

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0.20
500	2.04 (Max)
1000	0.25
2000	0.15
4000	0.15
8000	0.27

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0
500	0
1000	0.21 (Max)
2000	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 1 (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
8000	0.15

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางในทุกช่วงความถี่กรณีที่ 2

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0
500	0.02
1000	0.11
2000	0.15 (Max)
4000	0.02
8000	0.12

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	4.09
500	4.93
1000	1.52
2000	0.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ 3000 งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 1.21 ม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงที่ความถี่ประมาณ 4000 Hz (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
4000	0.10
6000	19.90
8000	29.90 (Max)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบรุนแรงในทุกช่วงความถี่

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0.12
500	0.71 (Max)
1000	0.30
2000	0.12
4000	0.14
8000	0.14

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง

ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0.01
500	0.07
1000	0.35 (Max)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบปานกลางที่ช่วงความถี่สูง (ต่อ)

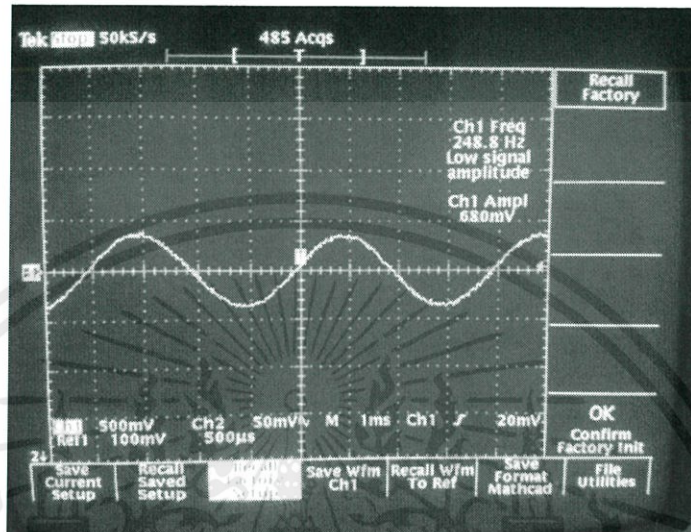
ความถี่ (Hz)	Error (dB)
2000	0.12
4000	0.16
8000	0.14

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบความผิดพลาดผลการทดลองการกรองสัญญาณเชิงเลข
ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)
การสูญเสียการได้ยินแบบเชิงเส้น

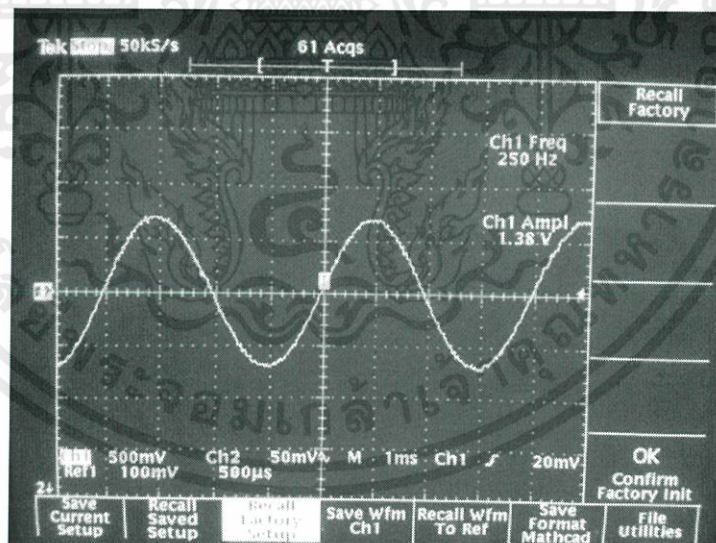
ความถี่ (Hz)	Error (dB)
250	0.25
500	4.68 (Max)
1000	0.36
2000	0.53
4000	0.89
8000	0.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองวัดสัญญาณที่ส่งออกมาจากโปรแกรมทดสอบการได้ยิน สัญญาณที่ได้จากโปรแกรมทดสอบการได้ยิน

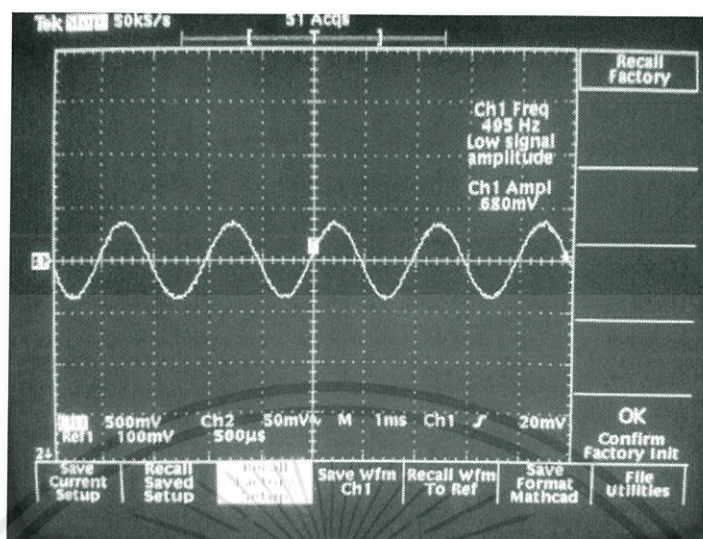


รูปที่ 4.17 สัญญาณที่มี Frequency 250 Hz Amplitude 0.5 V

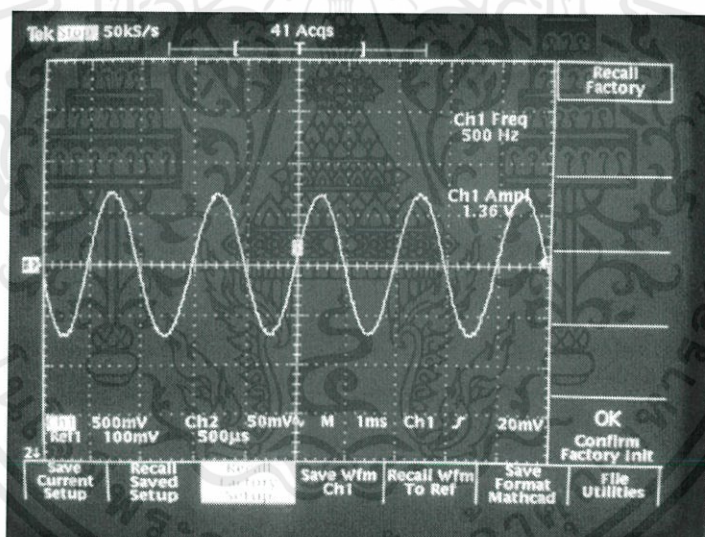


รูปที่ 4.18 สัญญาณที่มี Frequency 250 Hz Amplitude 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

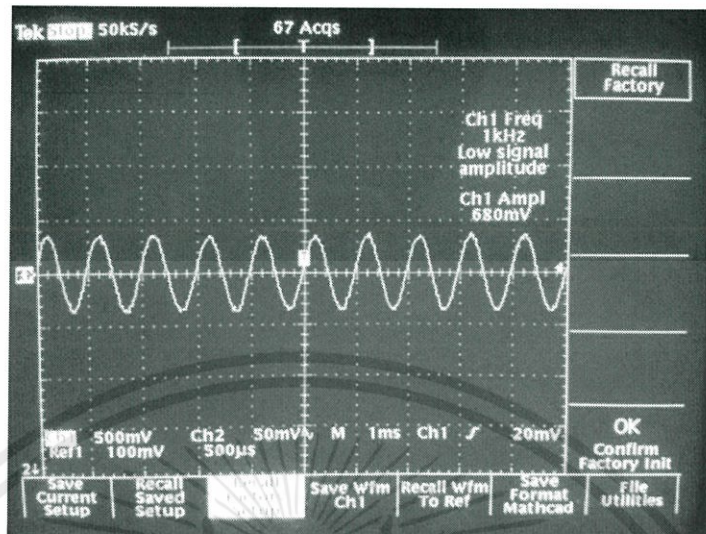


รูปที่ 4.19 สัญญาณที่มี Frequency 500 Hz Amplitude 0.5 V

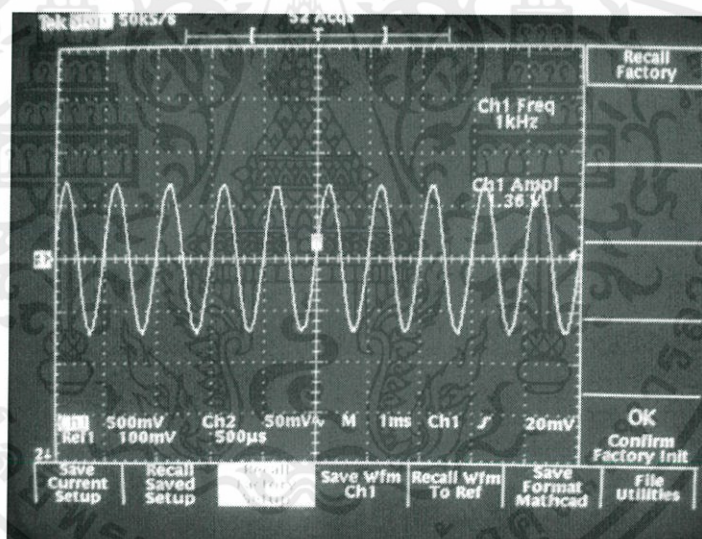


รูปที่ 4.20 สัญญาณที่มี Frequency 500 Hz Amplitude 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

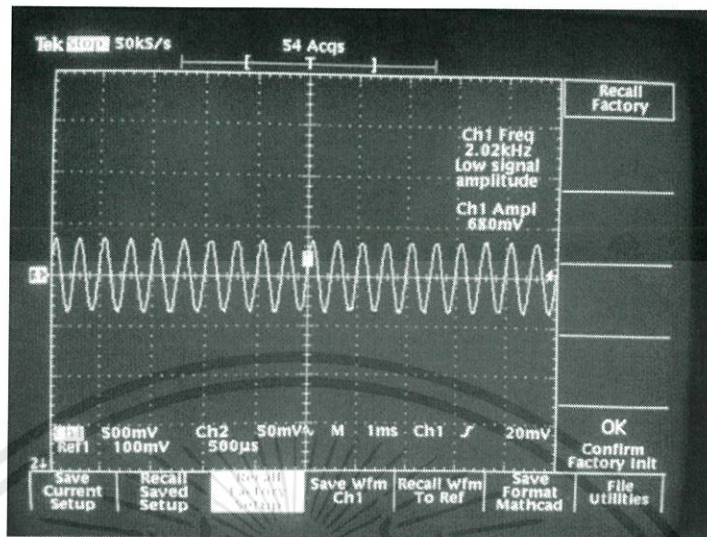


รูปที่ 4.21 สัญญาณที่มี Frequency 1000 Hz Amplitude 0.5 V

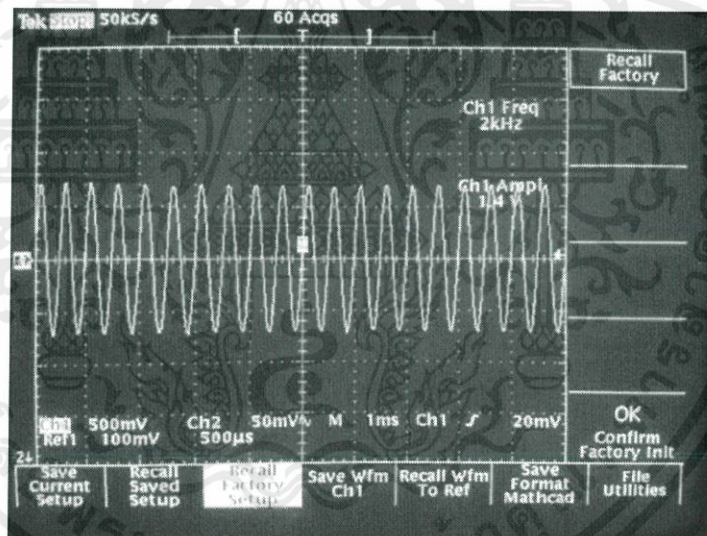


รูปที่ 4.22 สัญญาณที่มี Frequency 1000 Hz Amplitude 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

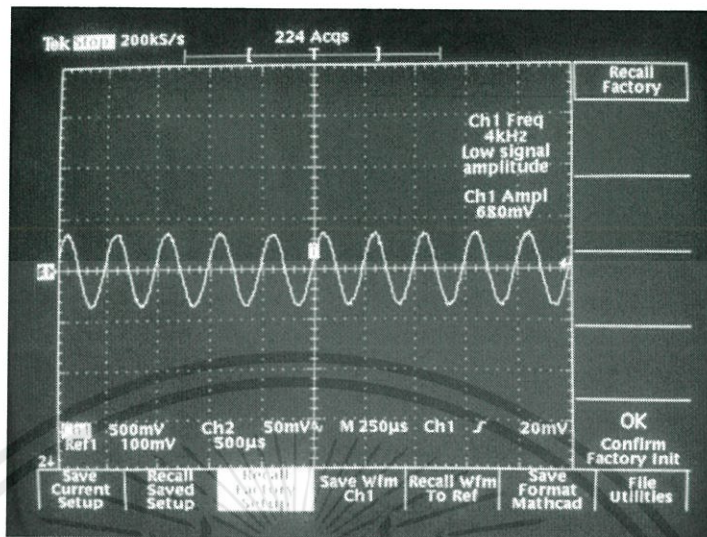


รูปที่ 4.23 สัญญาณที่มี Frequency 2000 Hz Amplitude 0.5 V

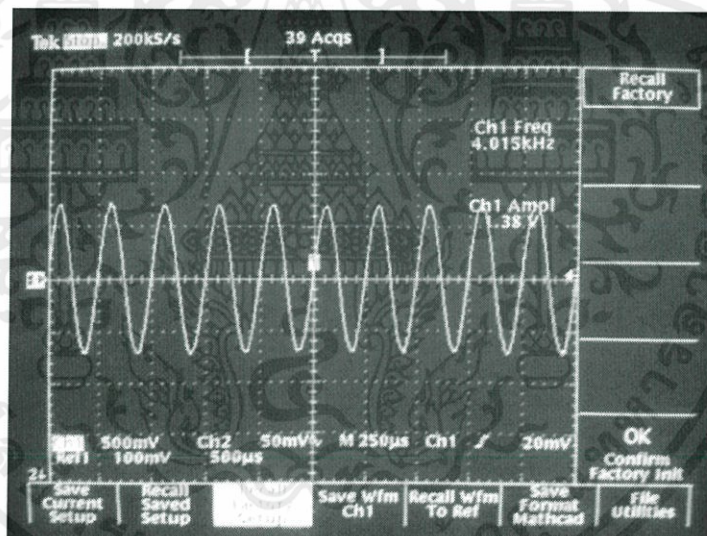


รูปที่ 4.24 สัญญาณที่มี Frequency 2000 Hz Amplitude 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

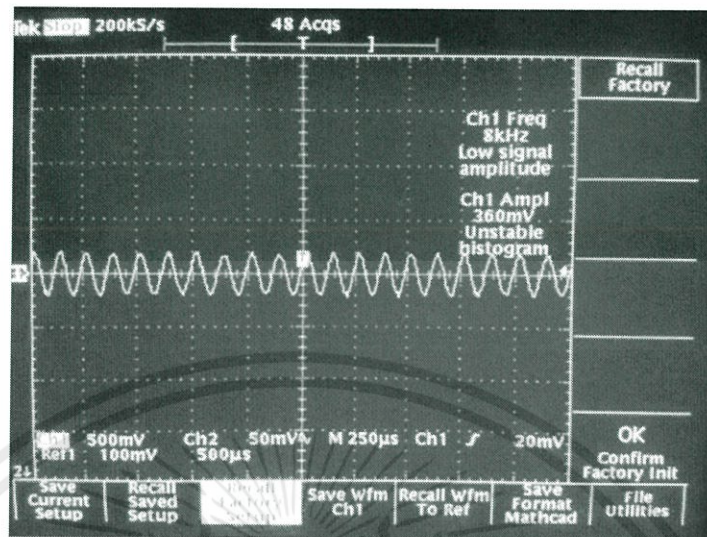


รูปที่ 4.25 สัญญาณที่มี Frequency 4000 Hz Amplitude 0.5 V

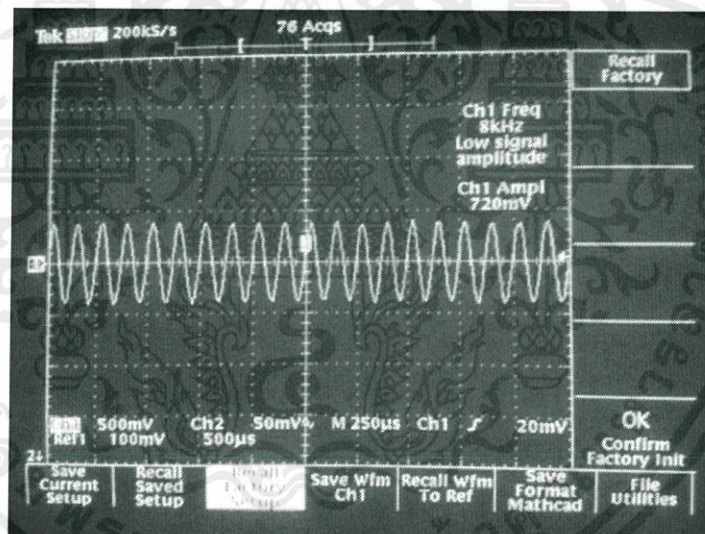


รูปที่ 4.26 สัญญาณที่มี Frequency 4000 Hz Amplitude 1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 สัญญาณที่มี Frequency 8000 Hz Amplitude 0.5 V

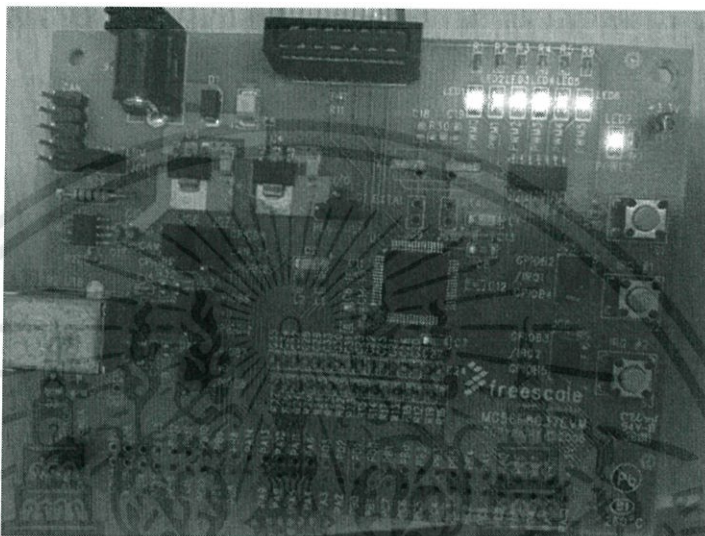


รูปที่ 4.28 สัญญาณที่มี Frequency 8000 Hz Amplitude 1 V

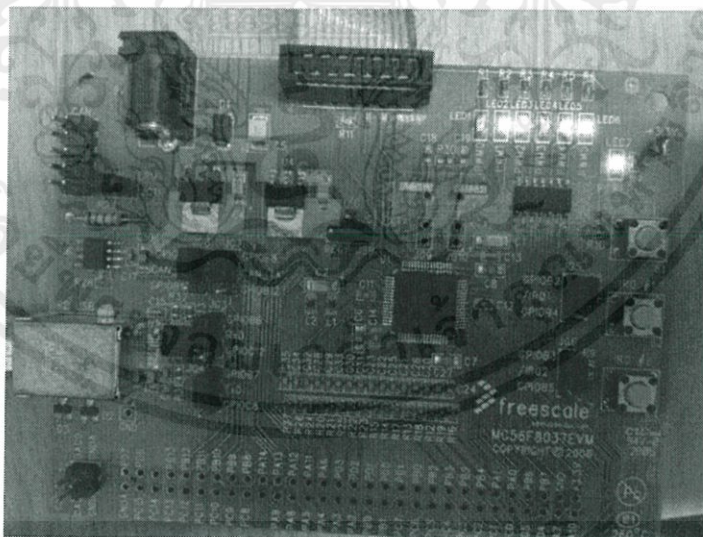
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองต่อติตรระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด MC56F8037EVM (Freescale)

ทดลองสั่งการ เปิด-ปิด LED บนตัวบอร์ด

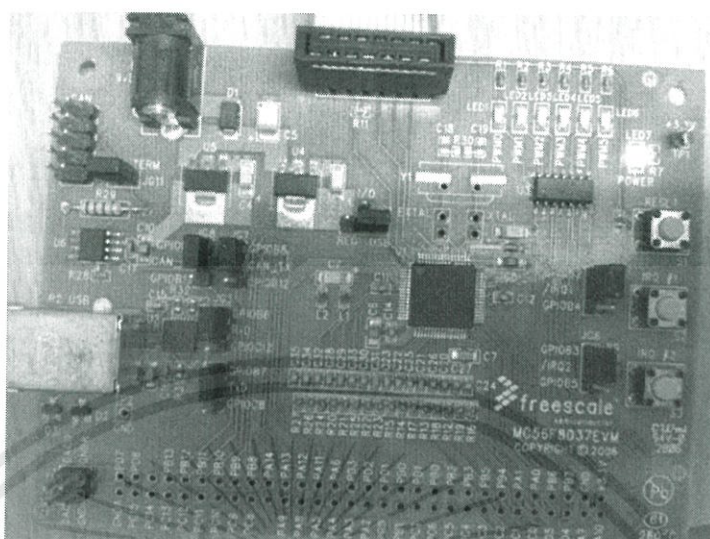


รูปที่ 4.29 สภาวะปกติ LED ติด 6 ดวง



รูปที่ 4.30 สั่งให้ LED สี่แดงดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

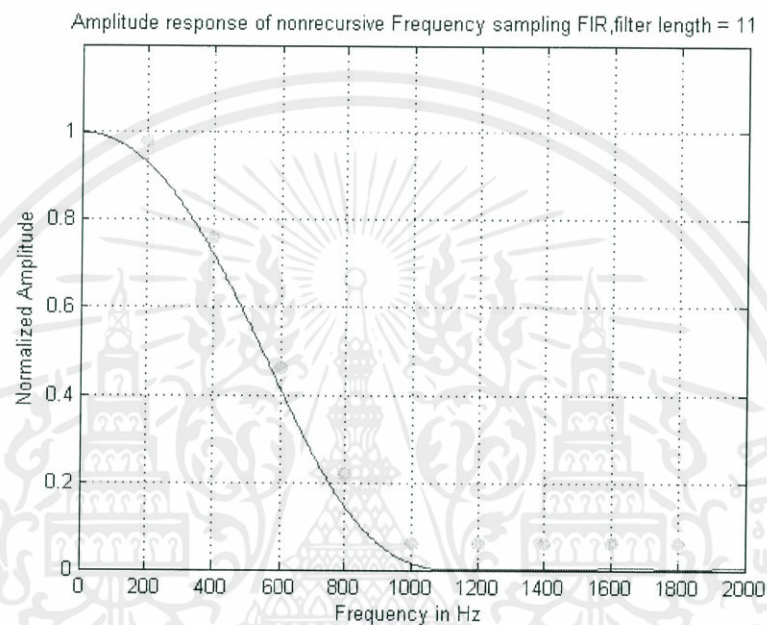


รูปที่ 4.31 สั่งให้ LED ดับทุกดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

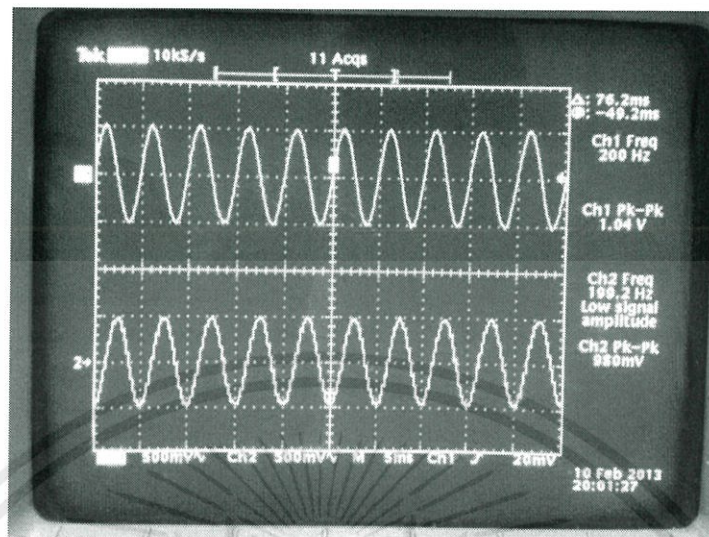
4.6 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองและการกรองสัญญาณเชิงเลข ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด
(Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 1

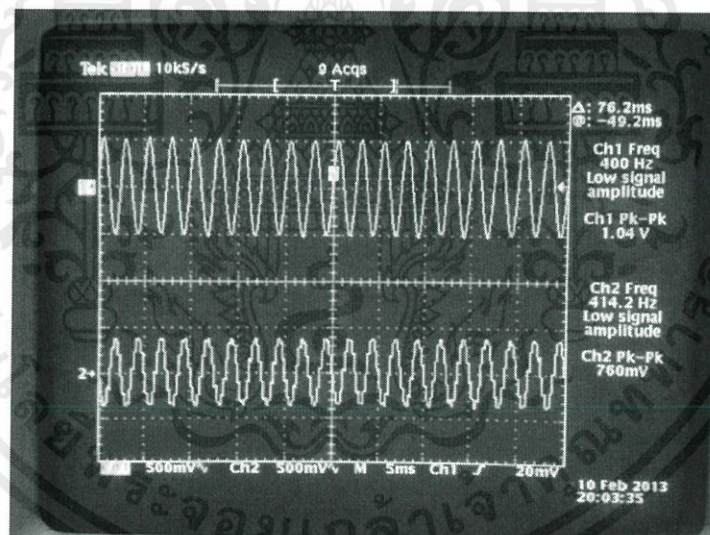


รูปที่ 4.32 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด
(Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง
เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

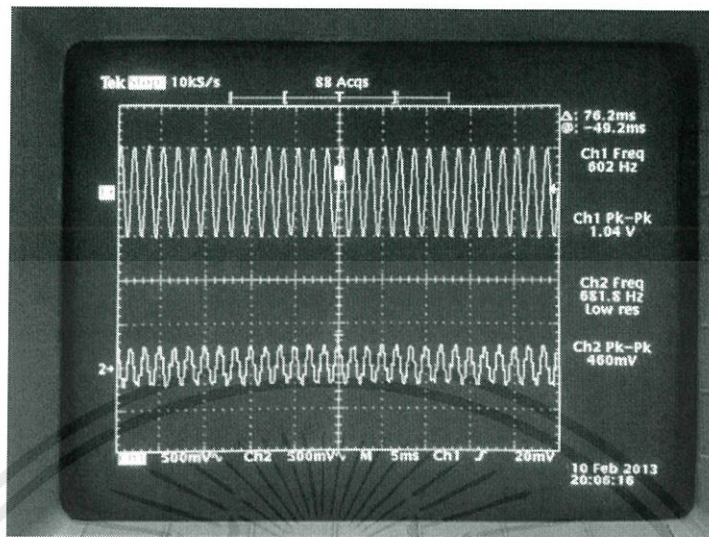


รูปที่ 4.33 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=0.980$ V

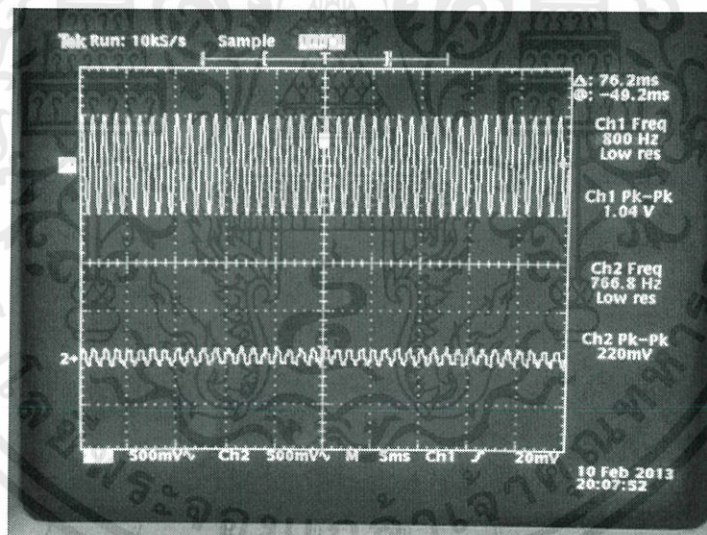


รูปที่ 4.34 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=0.760$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

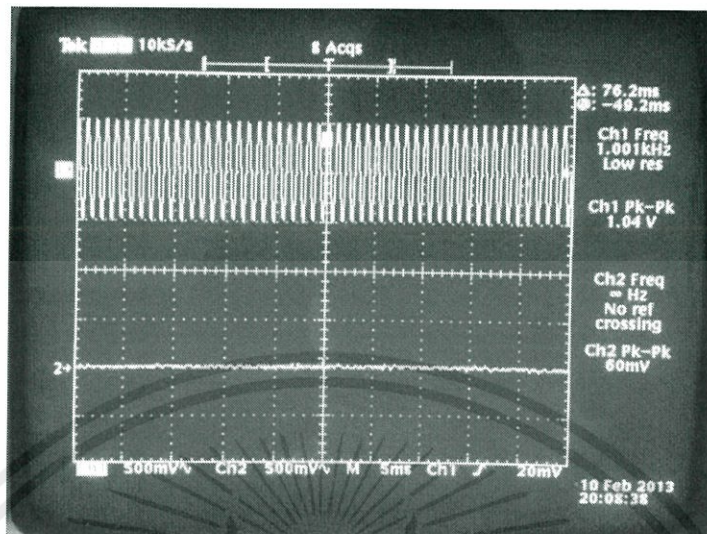


รูปที่ 4.35 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.460$ V

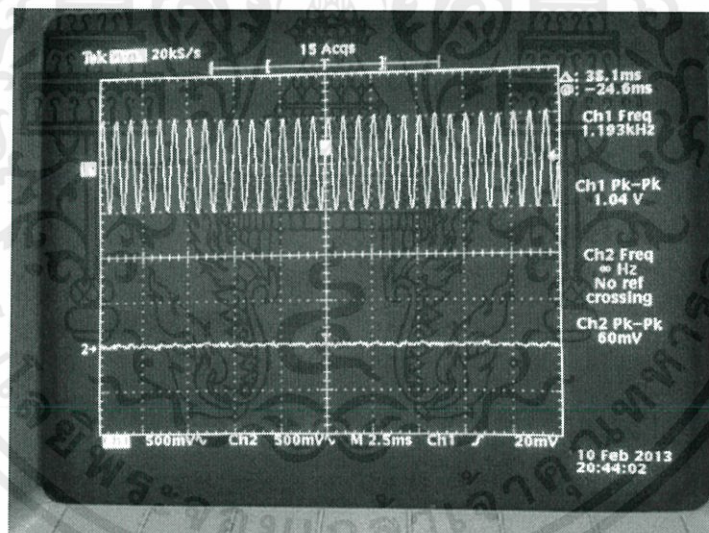


รูปที่ 4.36 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.220$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

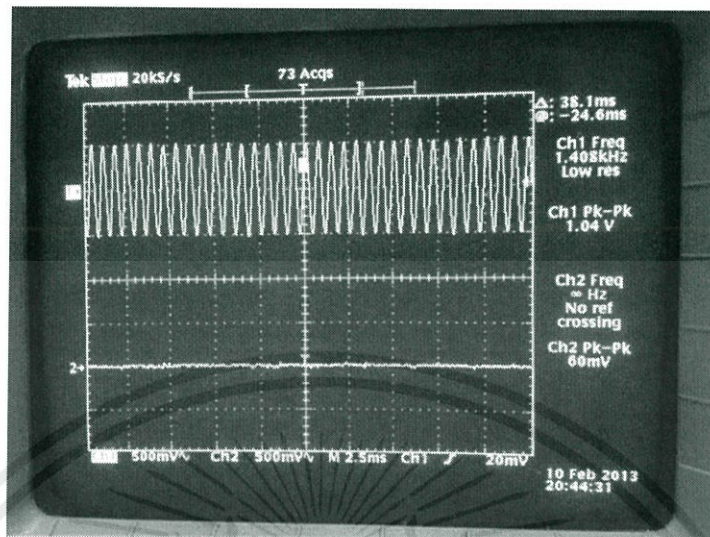


รูปที่ 4.37 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

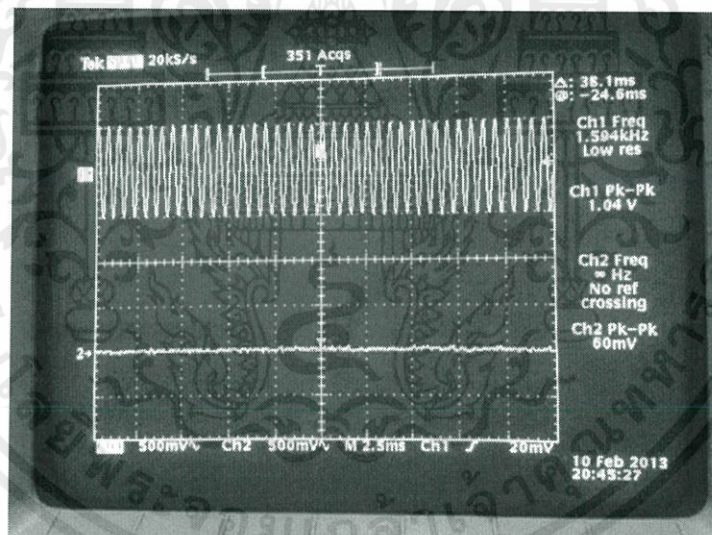


รูปที่ 4.38 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

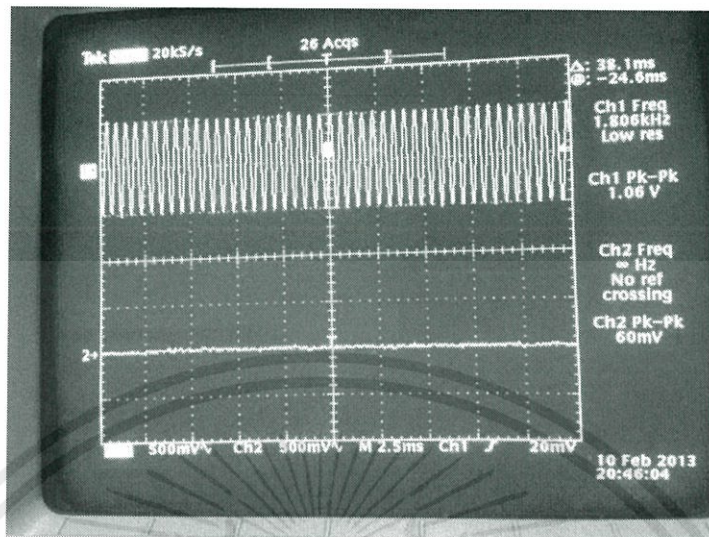


รูปที่ 4.39 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V



รูปที่ 4.40 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



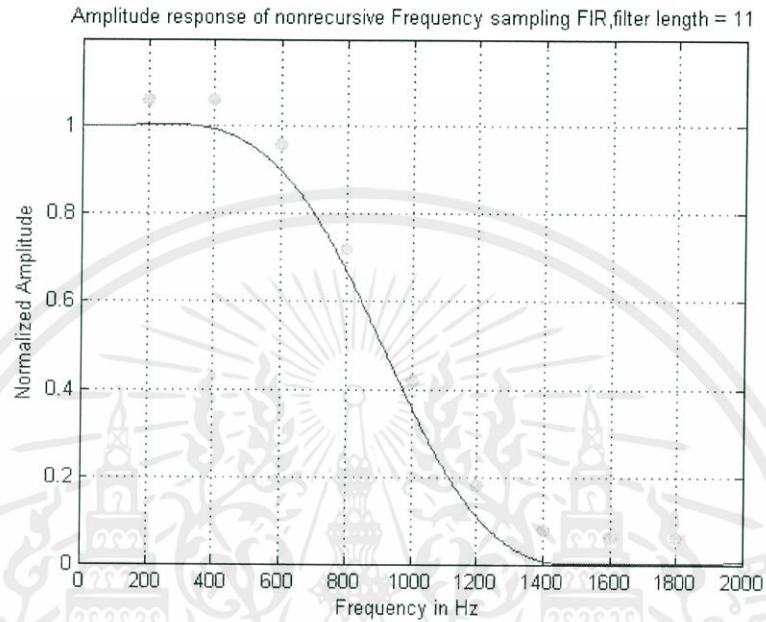
รูปที่ 4.41 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

ตารางที่ 4.9 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 1

ความถี่ Case 1 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	0.934	0.980	0.046
400	0.724	0.760	0.036
600	0.415	0.460	0.045
800	0.145	0.220	0.075
1000	0.017	0.60	0.043
1200	0	0.60	0.060
1400	0	0.60	0.060
1600	0	0.60	0.060
1800	0	0.60	0.060

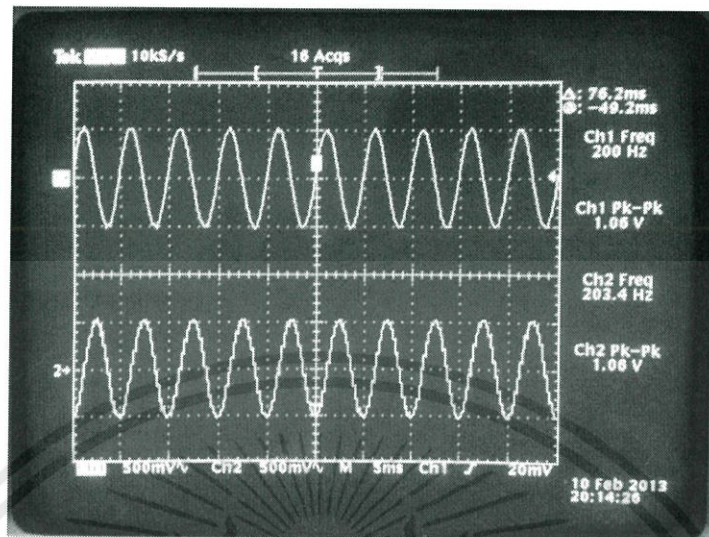
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้อ่านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 2

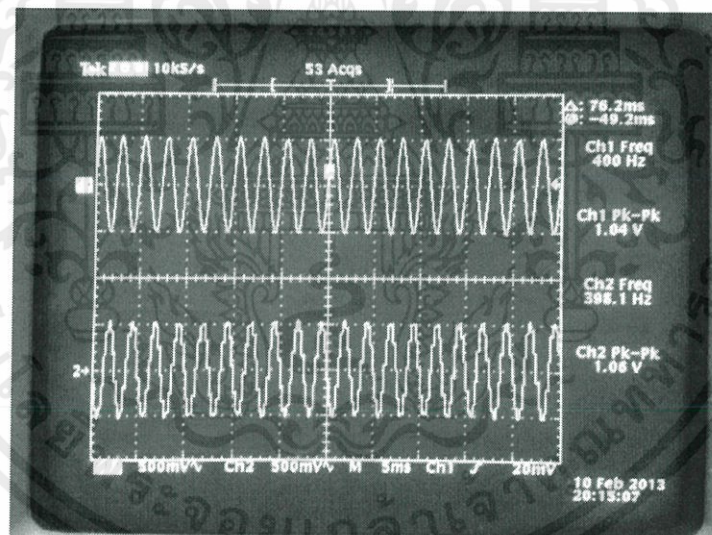


รูปที่ 4.42 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

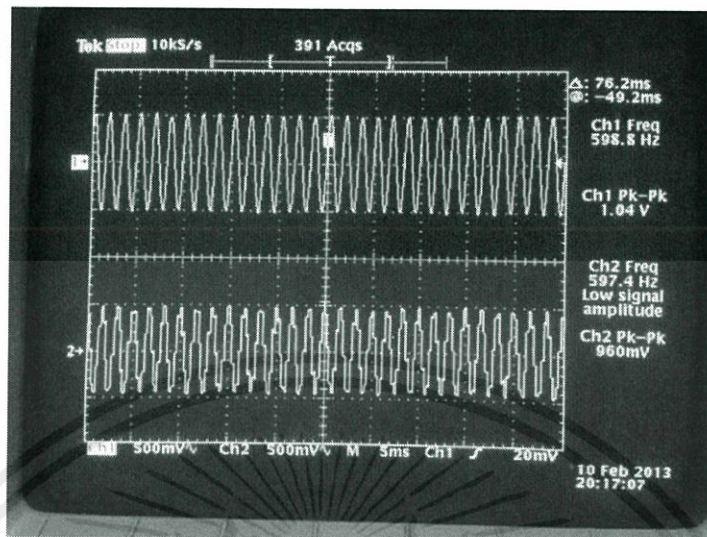


รูปที่ 4.43 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1.060$ V

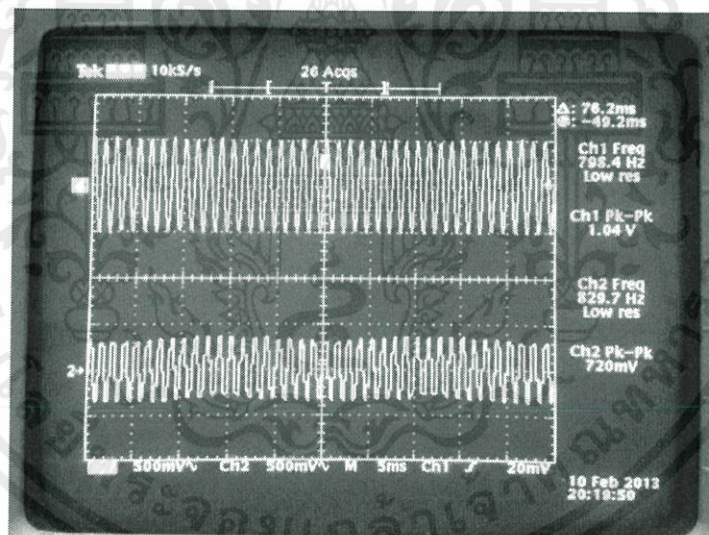


รูปที่ 4.44 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1.060$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

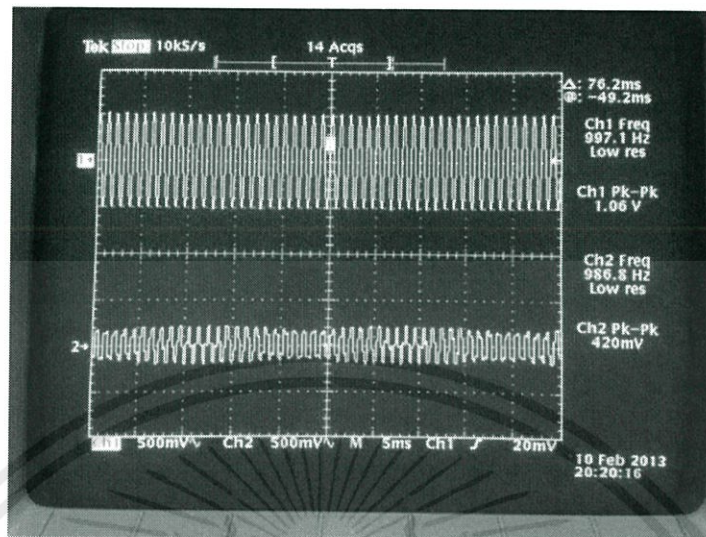


รูปที่ 4.45 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.960$ V

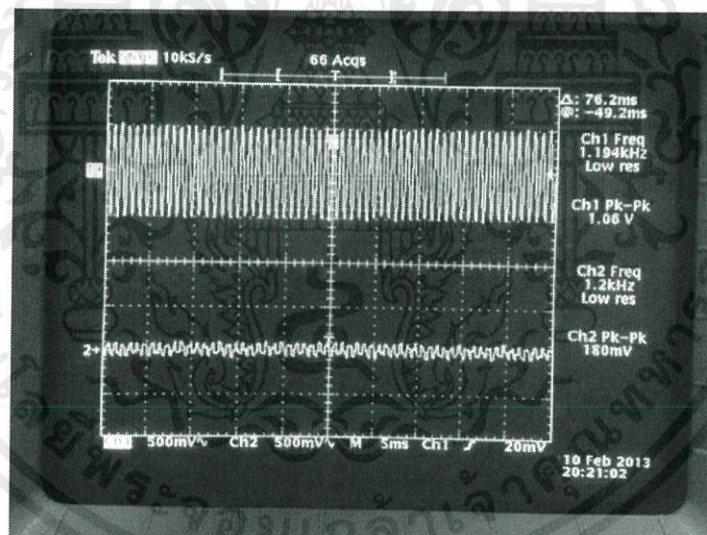


รูปที่ 4.46 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.720$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

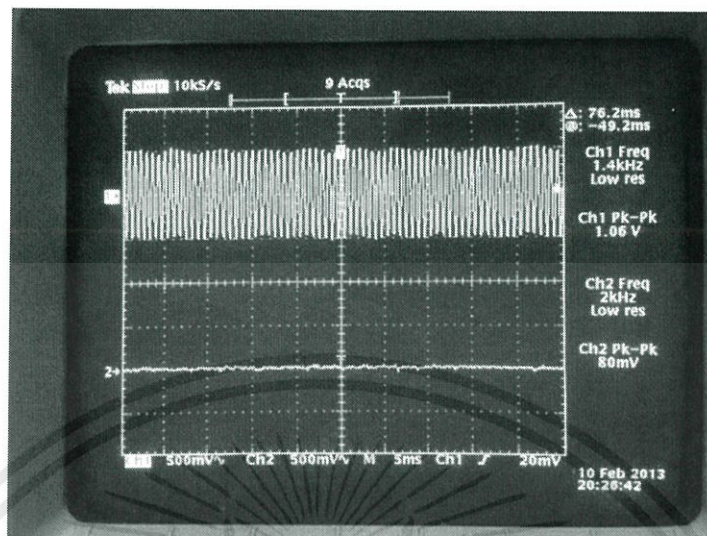


รูปที่ 4.47 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.420$ V

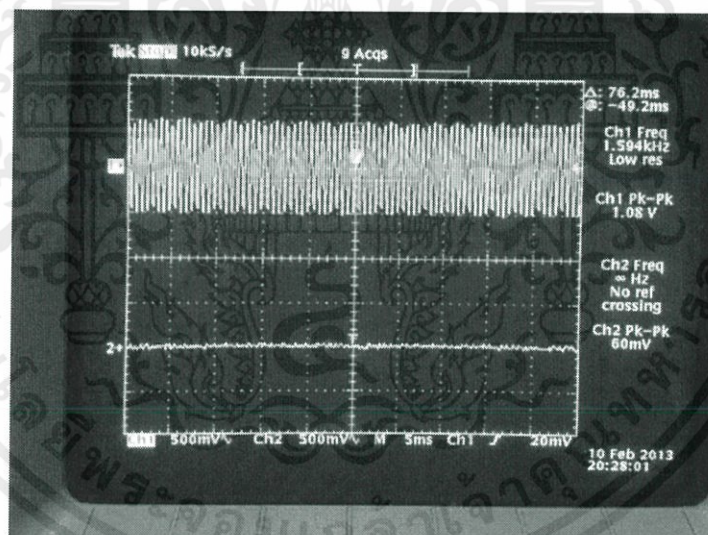


รูปที่ 4.48 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.180$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

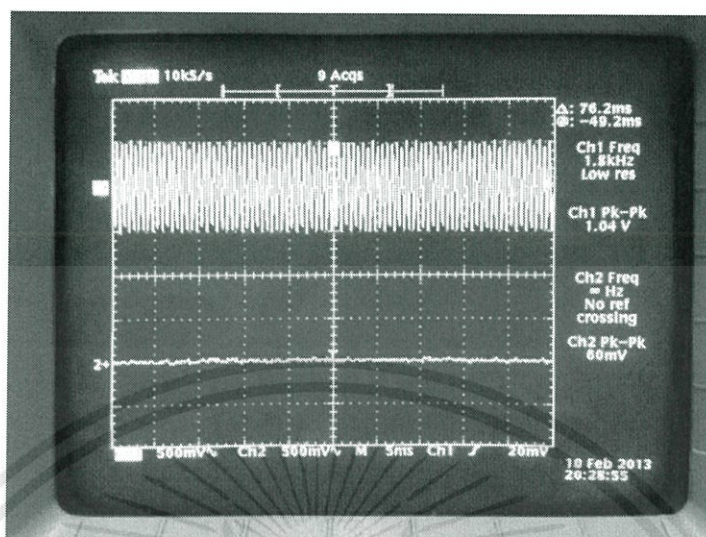


รูปที่ 4.49 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=0.080$ V



รูปที่ 4.50 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



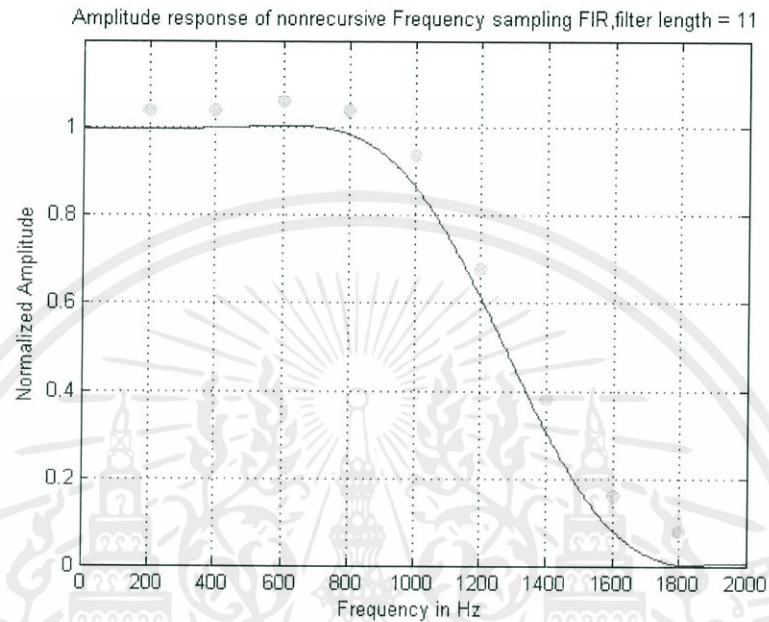
รูปที่ 4.51 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตจากบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.060$ V

ตารางที่ 4.10 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 2

ความถี่ Case 2 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	1	1.060	0.060
400	0.994	1.060	0.066
600	0.910	0.960	0.059
800	0.671	0.720	0.049
1000	0.360	0.420	0.060
1200	0.110	0.180	0.070
1400	0	0.80	0.080
1600	0	0.60	0.080
1800	0	0.60	0.080

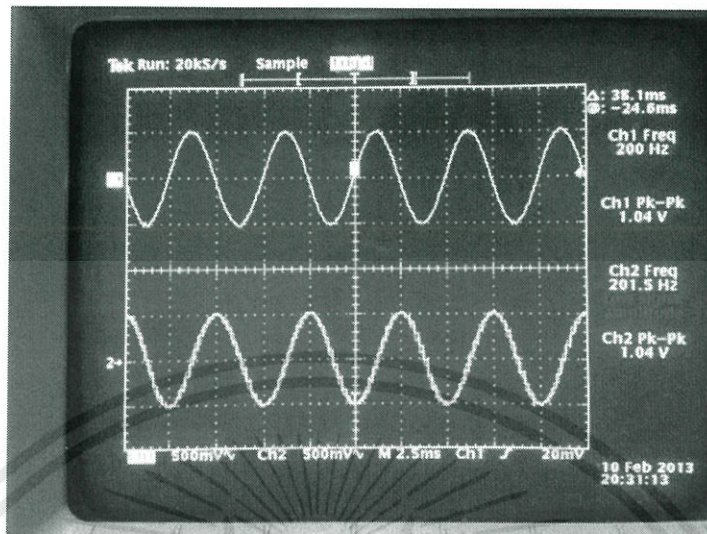
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 3

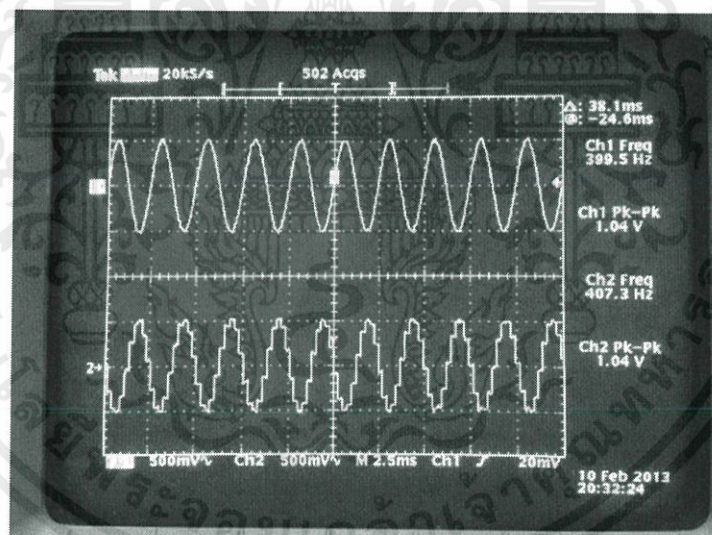


รูปที่ 4.52 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

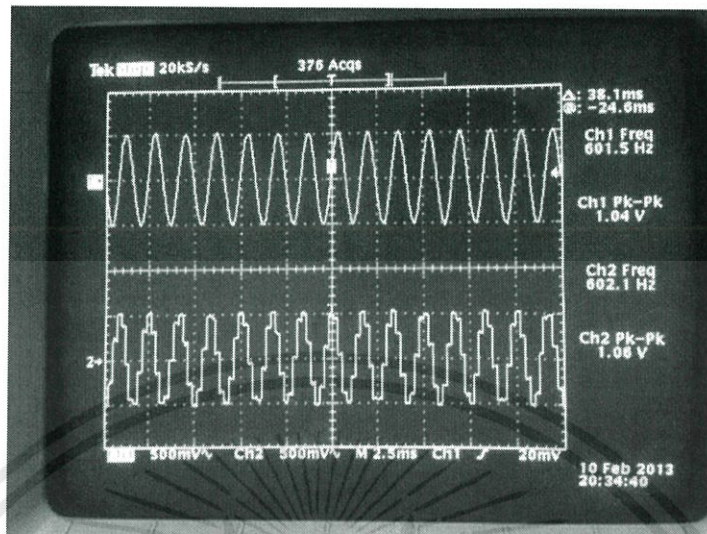


รูปที่ 4.53 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

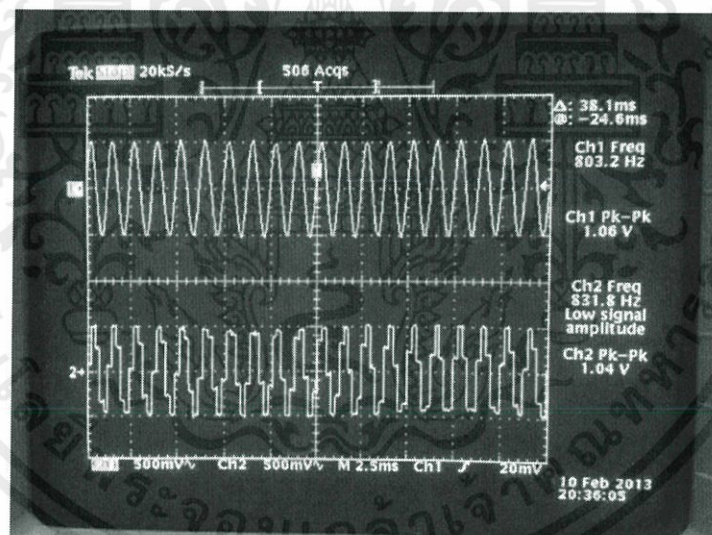


รูปที่ 4.54 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

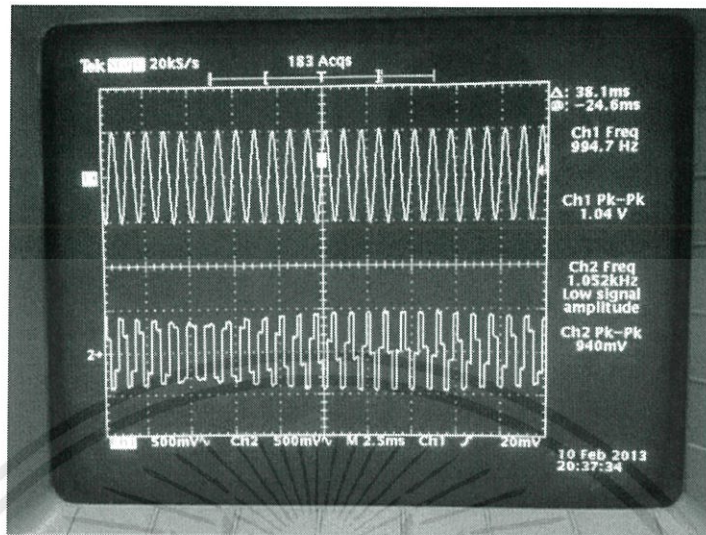


รูปที่ 4.55 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

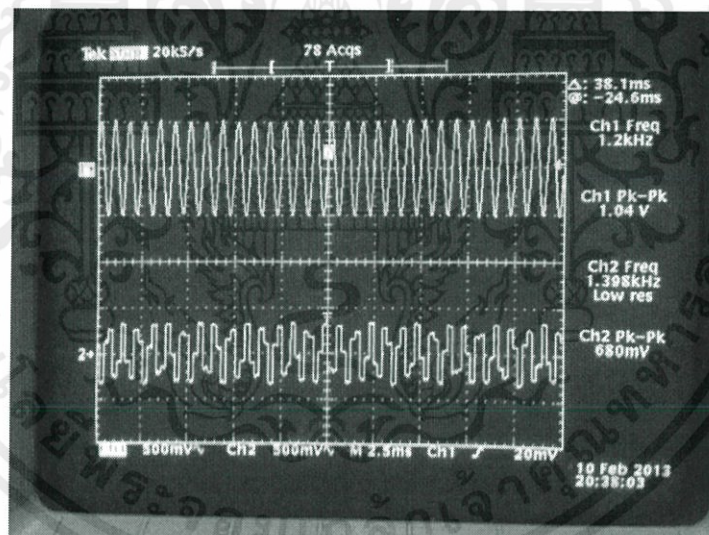


รูปที่ 4.56 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

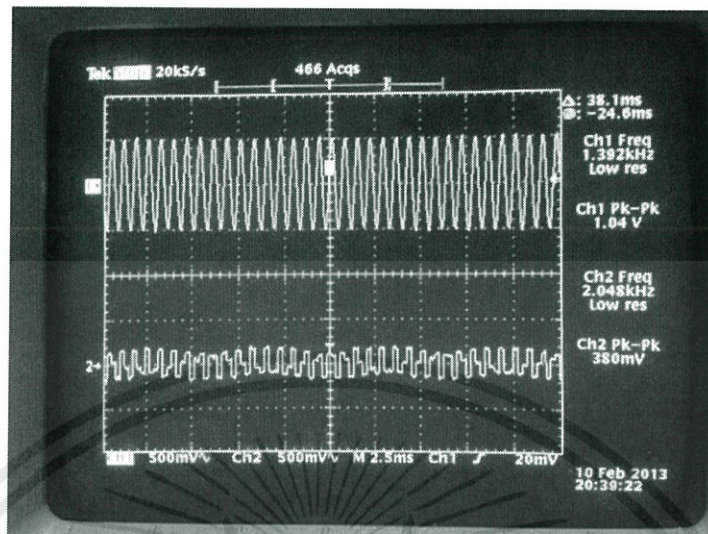


รูปที่ 4.57 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

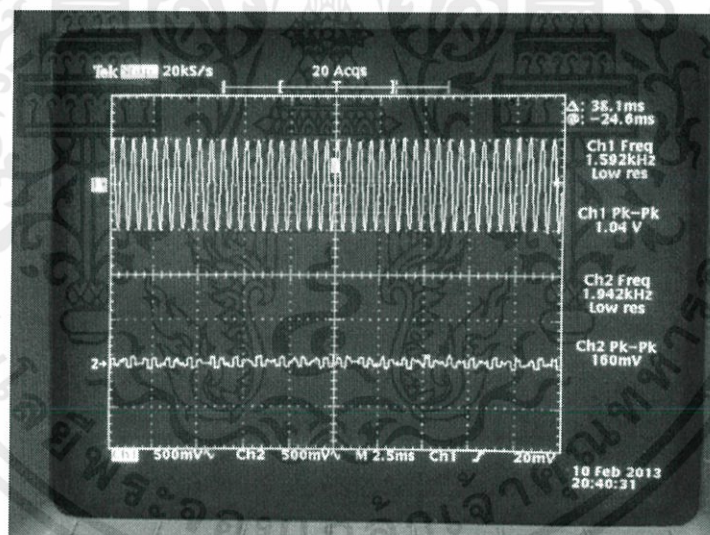


รูปที่ 4.58 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

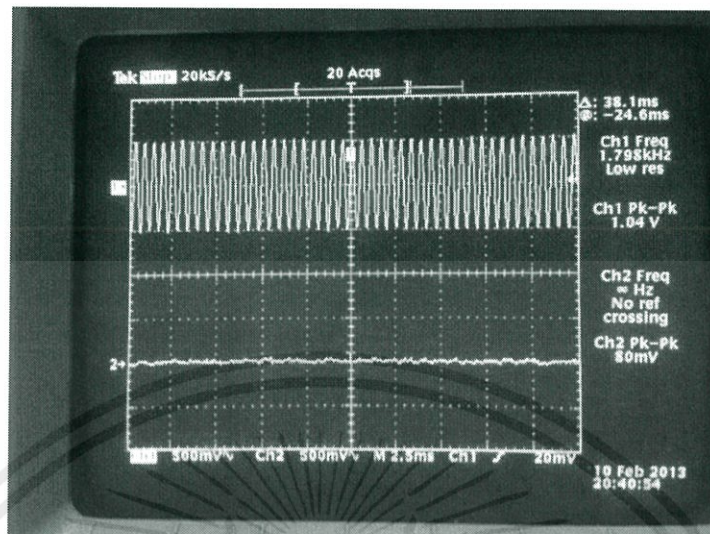


รูปที่ 4.59 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V



รูปที่ 4.60 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



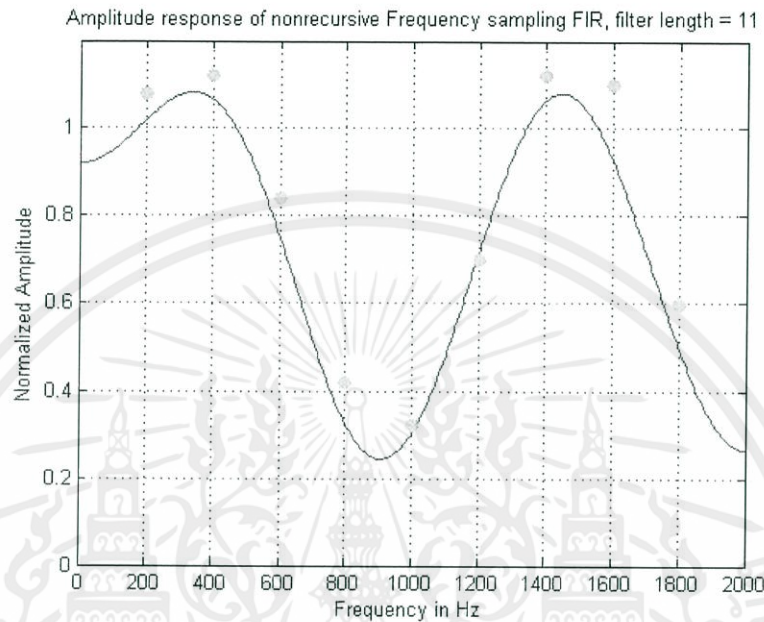
รูปที่ 4.61 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

ตารางที่ 4.11 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 3

ความถี่ Case 3 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	1	1.040	0.040
400	1	1.040	0.040
600	1	1.060	0.060
800	0.985	1.040	0.055
1000	0.870	0.940	0.070
1200	0.617	0.680	0.063
1400	0.305	0.380	0.075
1600	0.081	0.160	0.079

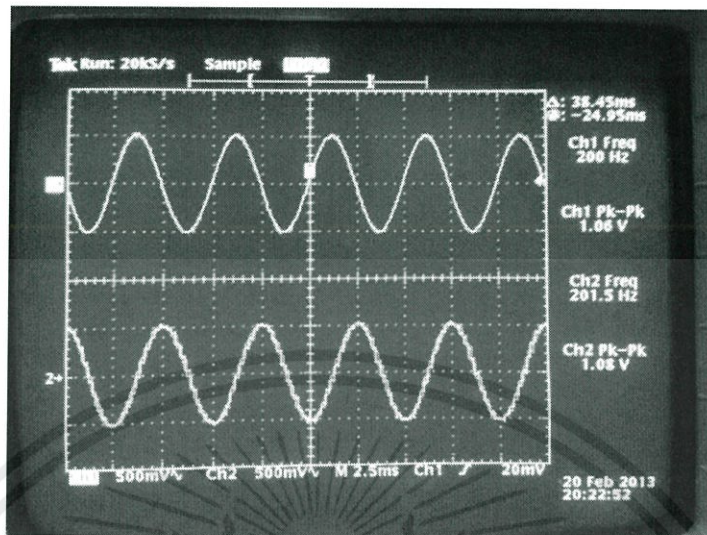
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 4

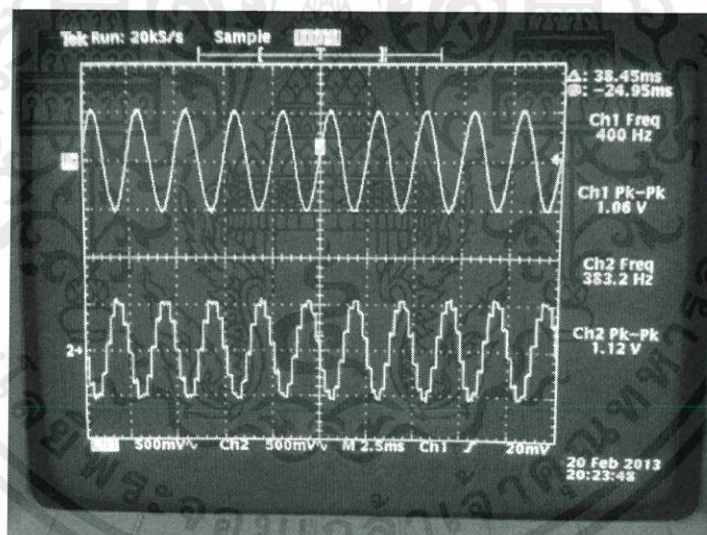


รูปที่ 4.62 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

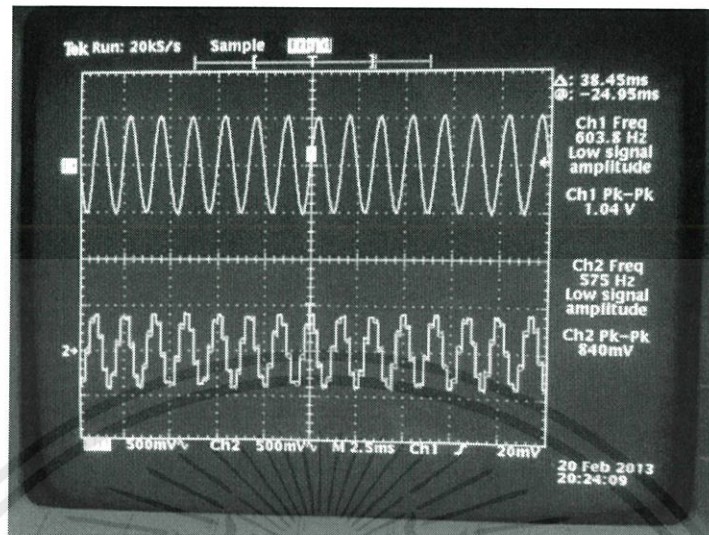


รูปที่ 4.63 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1.080$ V

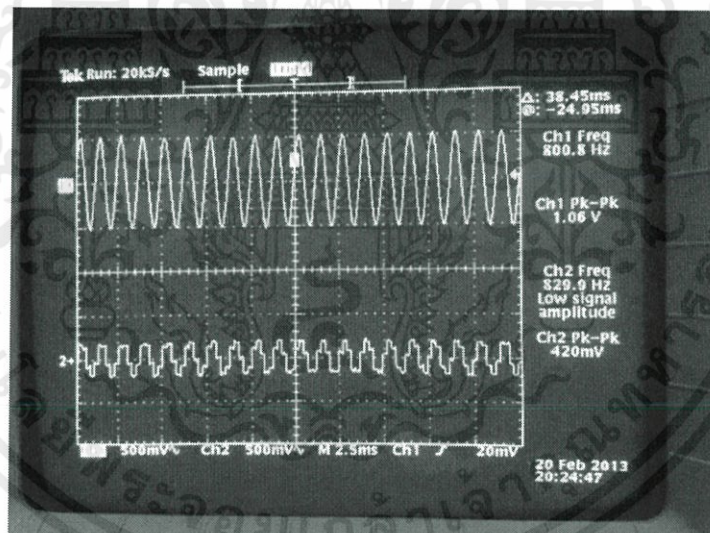


รูปที่ 4.64 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1.120$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

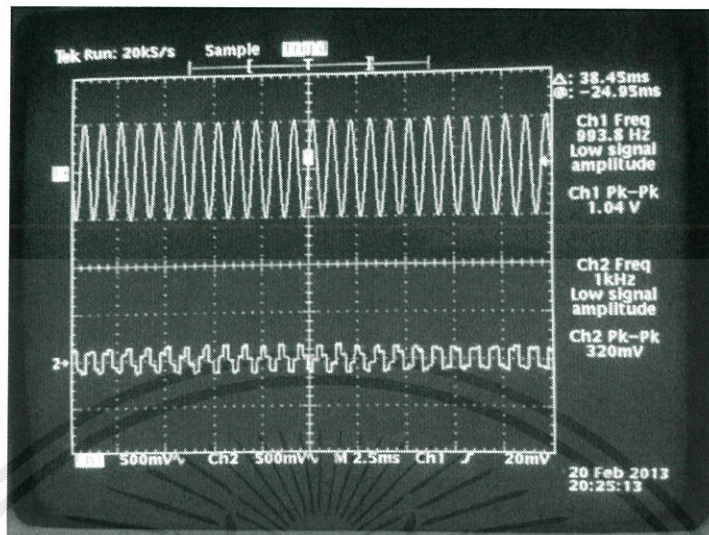


รูปที่ 4.65 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.840$ V

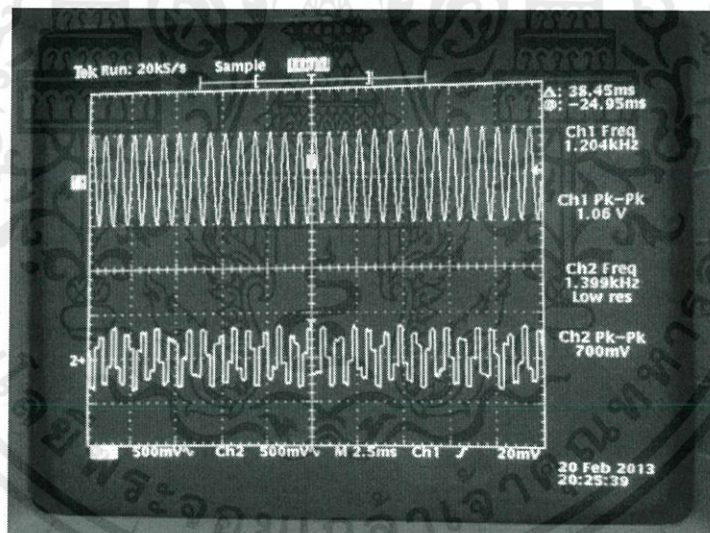


รูปที่ 4.66 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.420$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

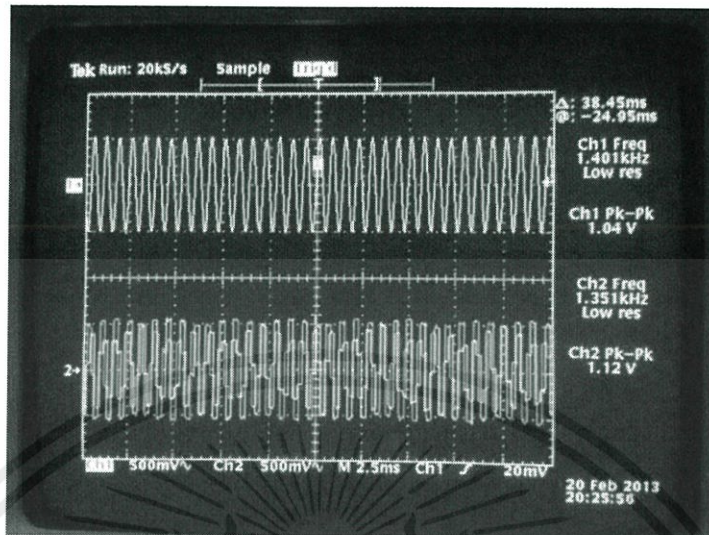


รูปที่ 4.67 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.320$ V

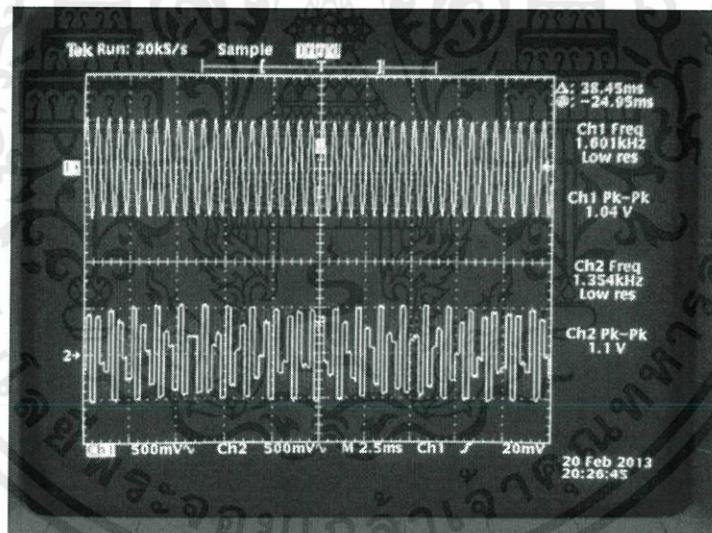


รูปที่ 4.68 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.70$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

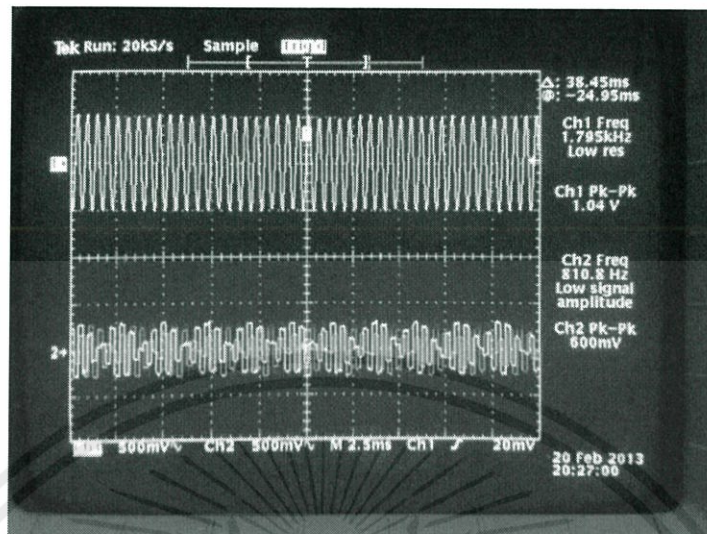


รูปที่ 4.69 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1.120$ V



รูปที่ 4.70 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1.10$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



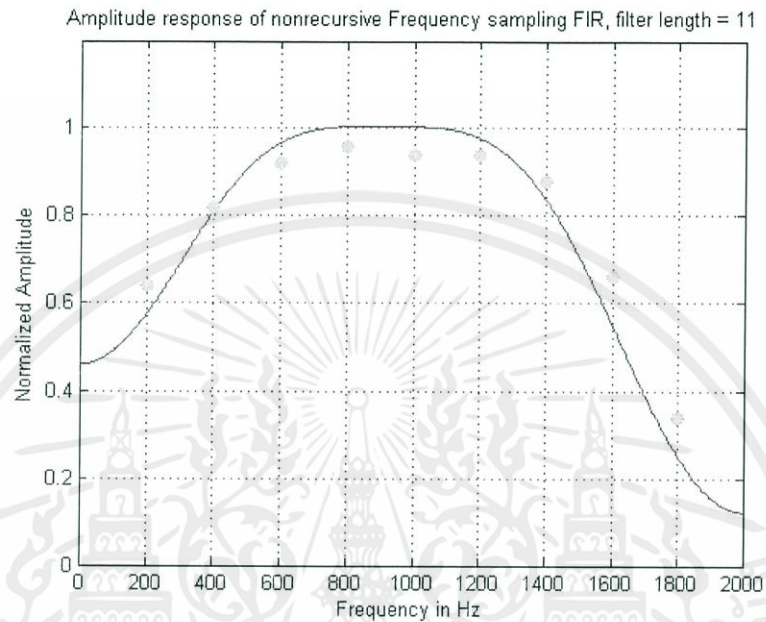
รูปที่ 4.71 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.60$ V

ตารางที่ 4.12 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 4

ความถี่ Case 4 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	1.019	1.080	0.061
400	1.065	1.120	0.055
600	0.754	1.840	0.086
800	0.328	1.420	0.049
1000	0.302	0.320	0.092
1200	0.718	0.70	0.018
1400	1.065	1.120	0.055
1600	0.933	1.10	0.167
1800	0.60	0.60	0.000

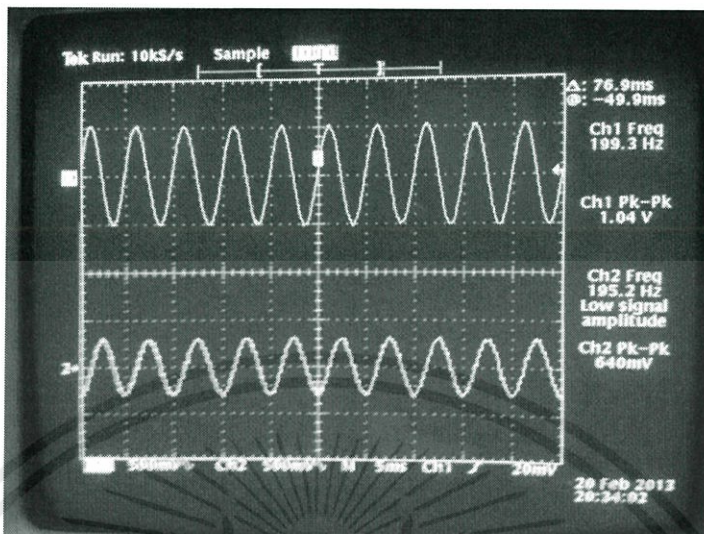
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 5

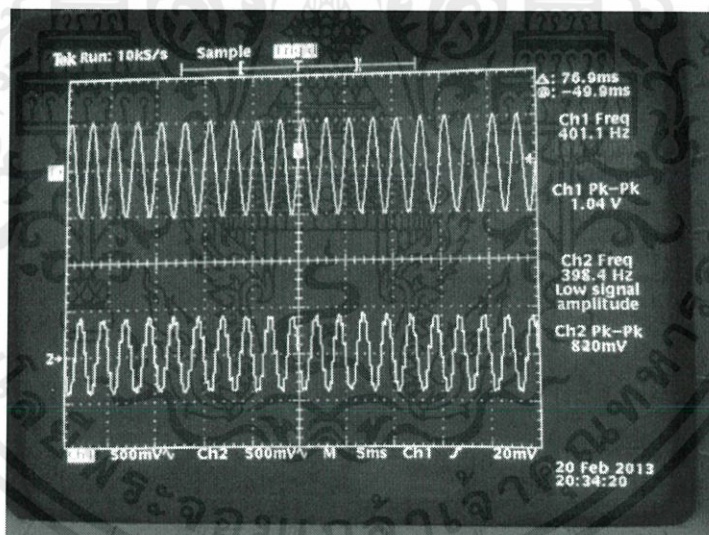


รูปที่ 4.72 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

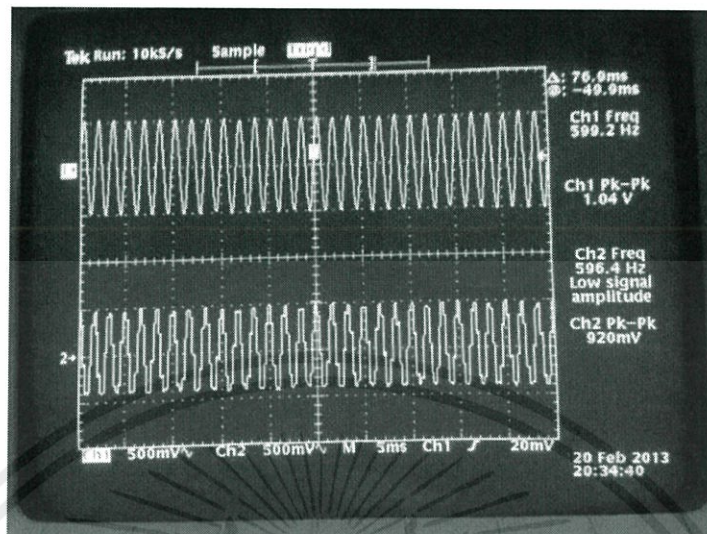


รูปที่ 4.73 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=0.640$ V

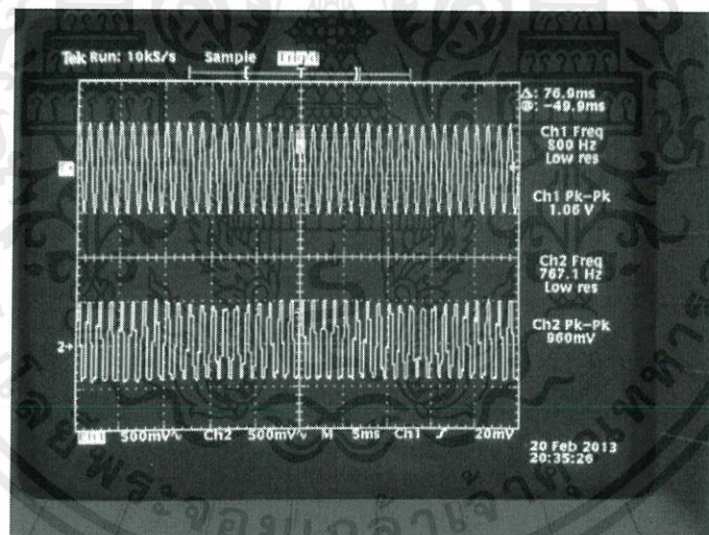


รูปที่ 4.74 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=0.820$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

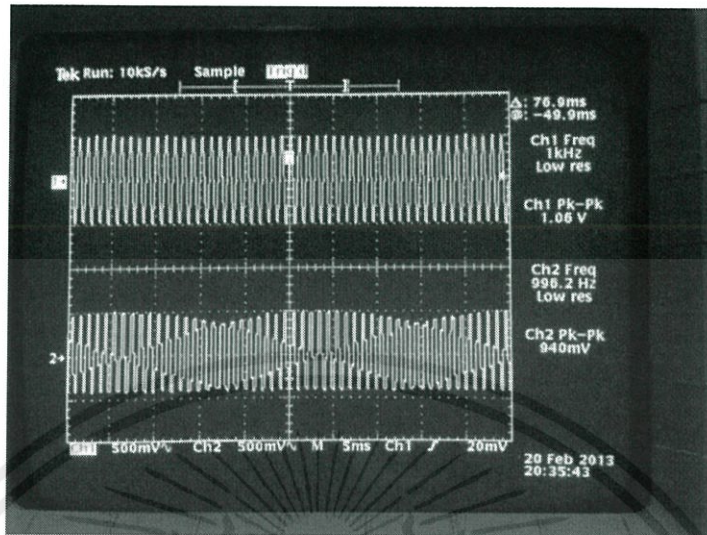


รูปที่ 4.75 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.920$ V

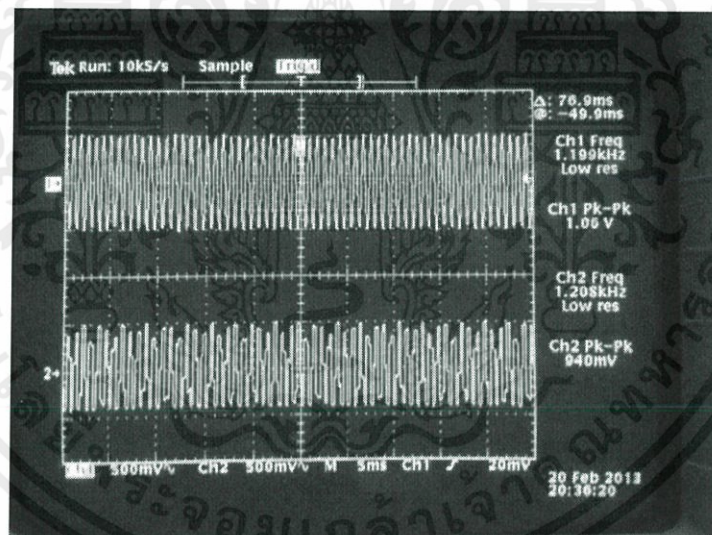


รูปที่ 4.76 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.960$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

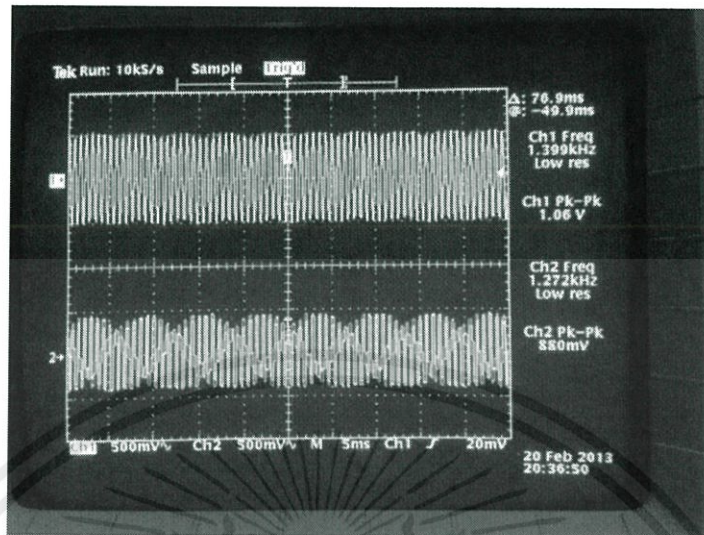


รูปที่ 4.77 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.940$ V

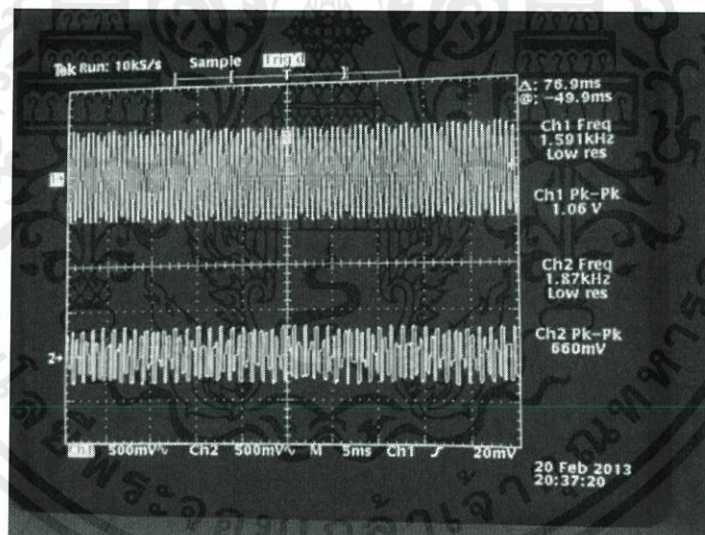


รูปที่ 4.78 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.940$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

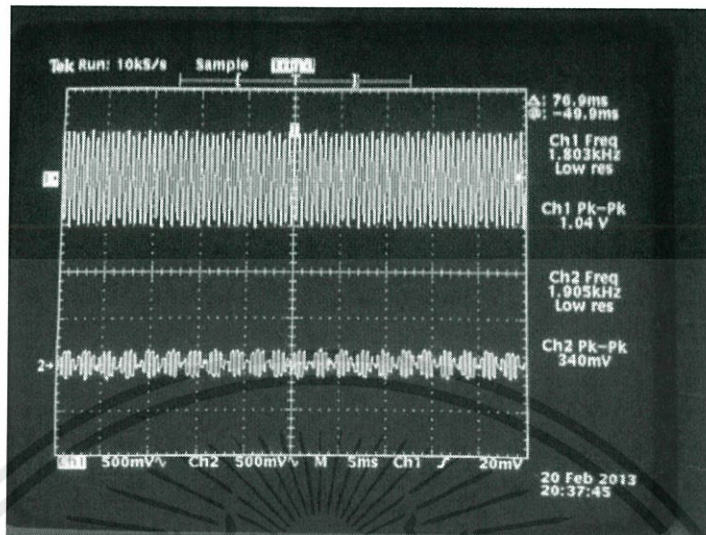


รูปที่ 4.79 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=0.880$ V



รูปที่ 4.80 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=0.660$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



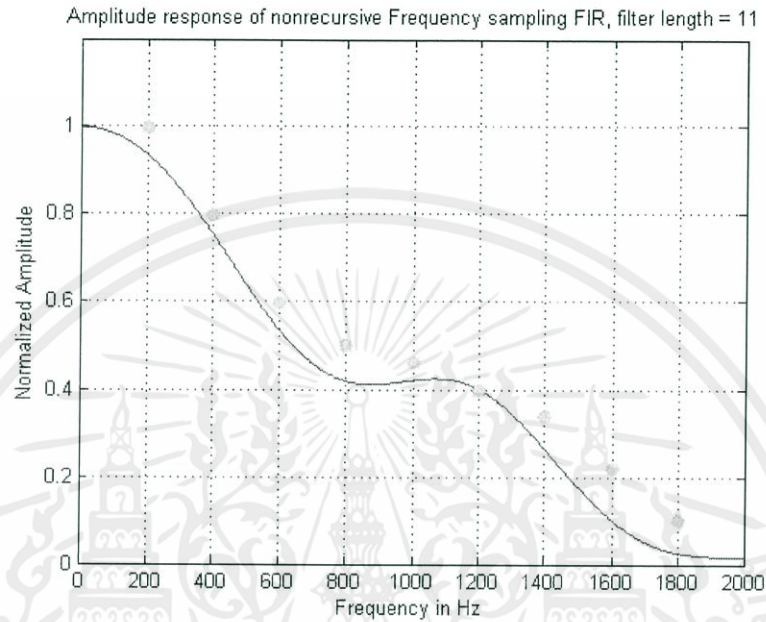
รูปที่ 4.81 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.340$ V

ตารางที่ 4.13 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 5

ความถี่ Case 5 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	0.577	0.640	0.063
400	0.812	0.820	0.008
600	0.968	0.920	0.048
800	1.004	0.960	0.044
1000	1.005	0.940	0.065
1200	0.976	0.940	0.036
1400	0.836	0.880	0.044
1600	0.551	0.660	0.109
1800	0.251	0.340	0.089

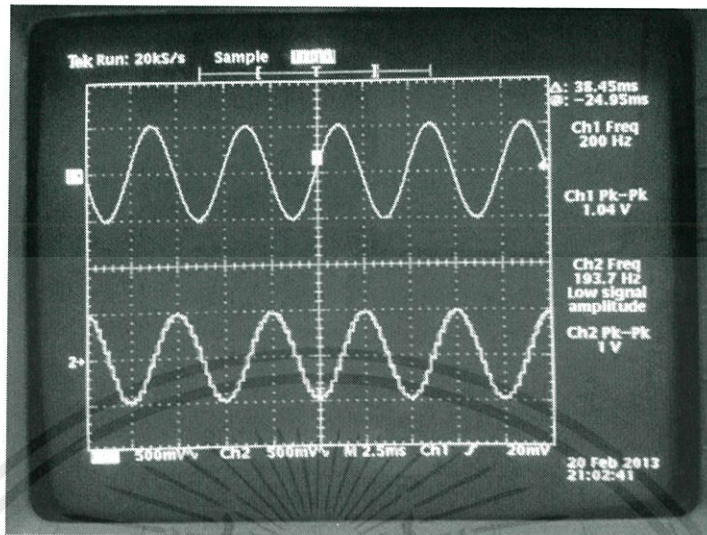
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) แบบที่ 6

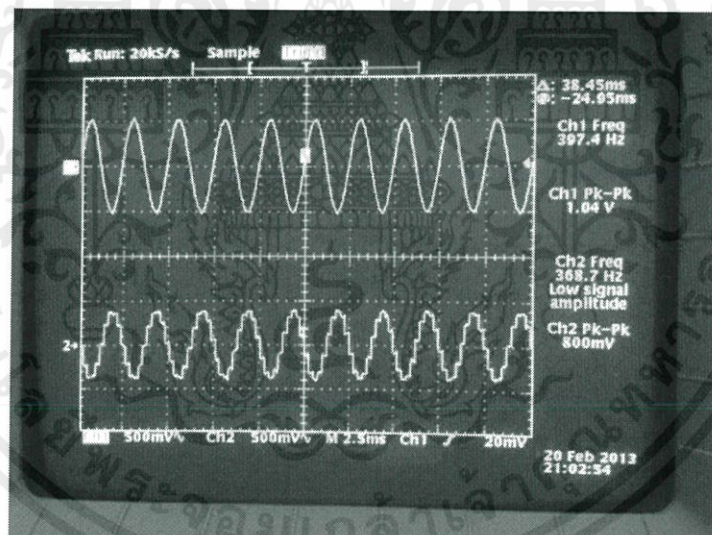


รูปที่ 4.82 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response:FIR filter) และจุดวงกลมแสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง เมื่อ Frequency sampling=4000 Hz และ Filter length=11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

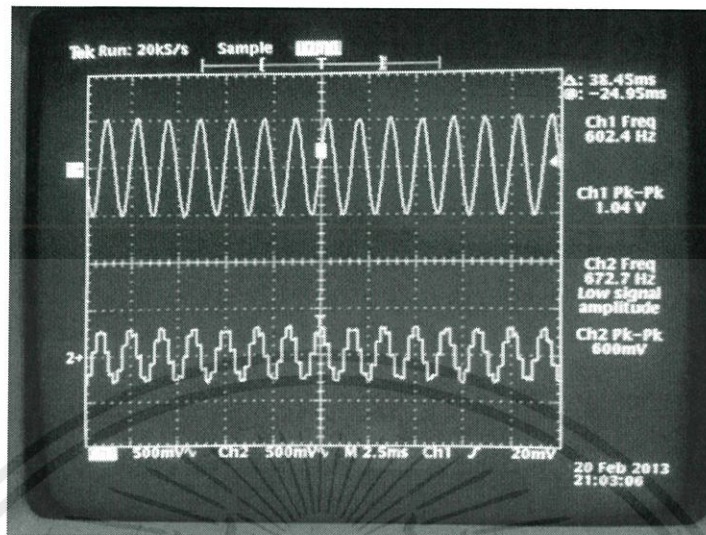


รูปที่ 4.83 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V

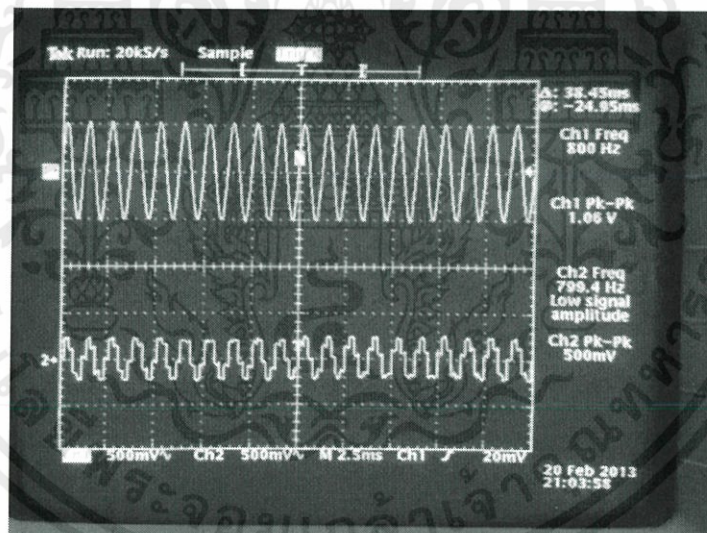


รูปที่ 4.84 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=400$ Hz และ $V_{p-p}=0.80$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

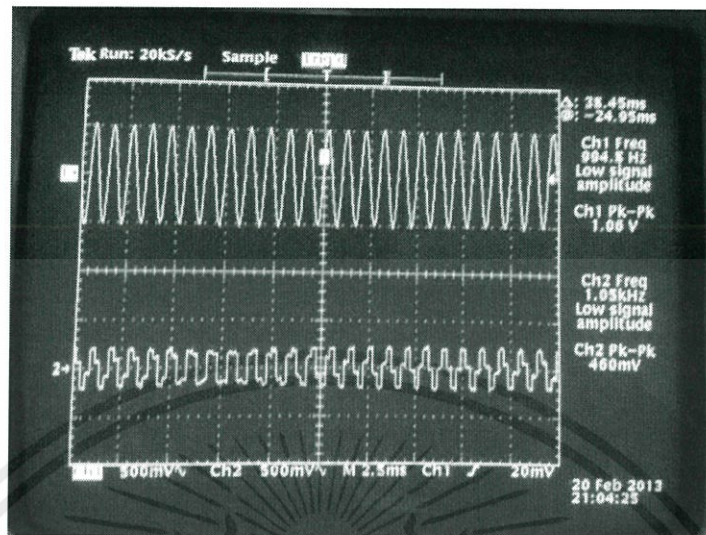


รูปที่ 4.85 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=600$ Hz และ $V_{p-p}=0.60$ V

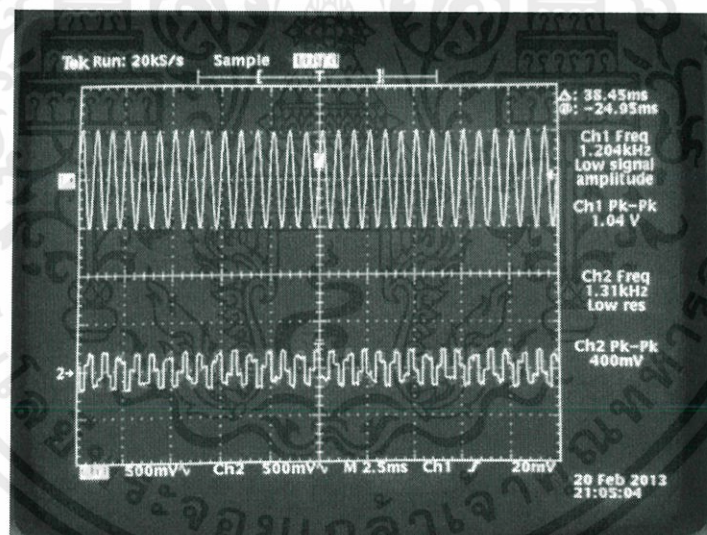


รูปที่ 4.86 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=800$ Hz และ $V_{p-p}=0.50$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

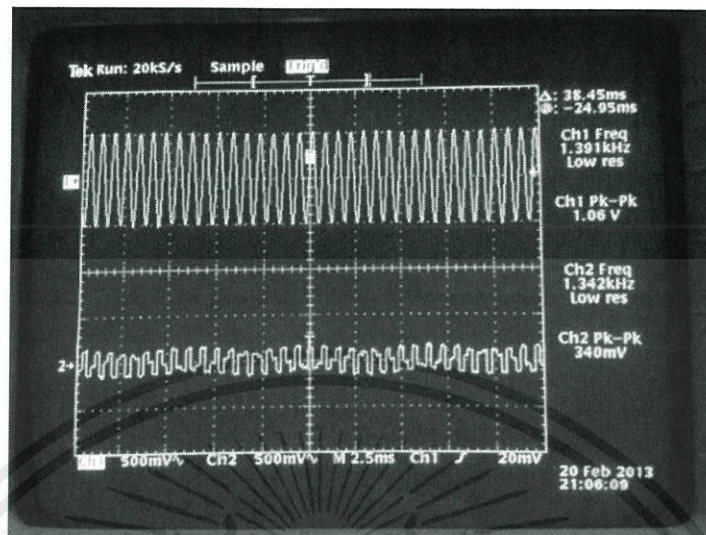


รูปที่ 4.87 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1000$ Hz และ $V_{p-p}=0.460$ V

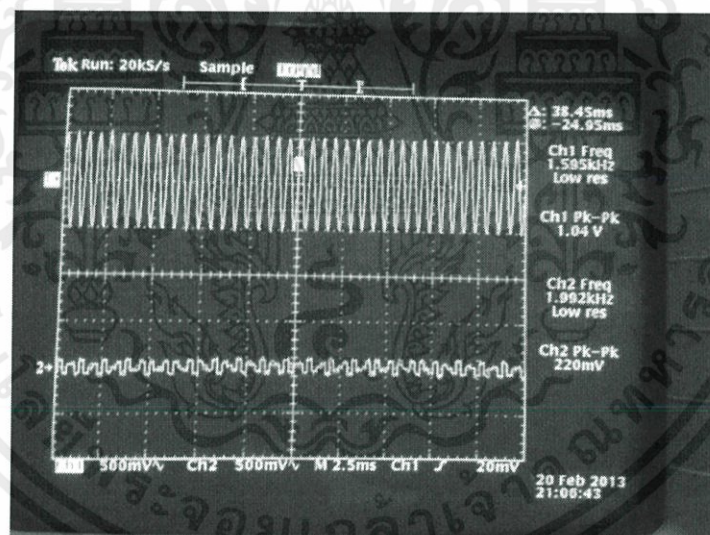


รูปที่ 4.88 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1200$ Hz และ $V_{p-p}=0.40$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

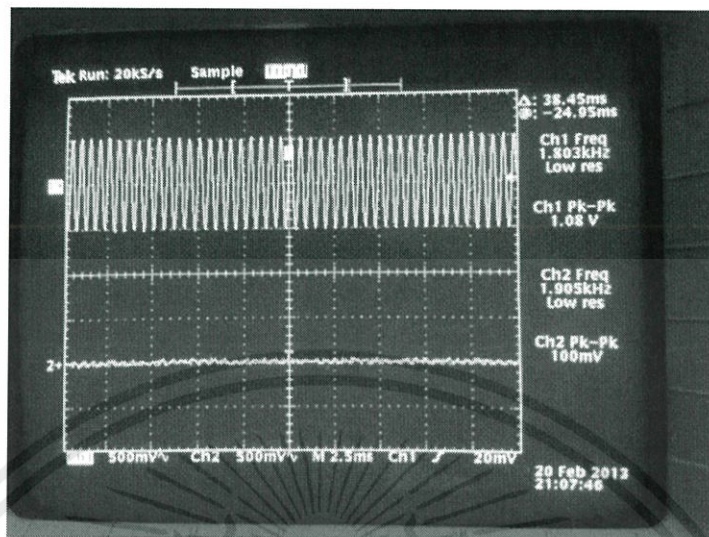


รูปที่ 4.89 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1400$ Hz และ $V_{p-p}=0.340$ V



รูปที่ 4.90 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1600$ Hz และ $V_{p-p}=0.220$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.91 Ch1 แสดงสัญญาณอินพุตเข้าบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=1$ V และ Ch2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตออกบอร์ด DSP เมื่อ $f=1800$ Hz และ $V_{p-p}=0.10$ V

ตารางที่ 4.14 ค่าเอาต์พุตจากบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อป้อนสัญญาณ $V_{p-p}=1$ V เข้าสู่บอร์ด แบบที่ 6

ความถี่ Case 6 (Hz)	Normalized Amplitude (V)	V_{p-p} ที่ได้จากการทดลอง (V)	ค่าความคลาดเคลื่อน
200	0.935	1	0.065
400	0.754	0.80	0.046
600	0.537	0.60	0.063
800	0.420	0.50	0.080
1000	0.421	0.460	0.039
1200	0.40	0.40	0
1400	0.263	0.340	0.077
1600	0.101	0.220	0.119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปฏิญานิพนธ์นี้ ประสบความสำเร็จในการออกแบบการสร้างวงจรรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับขดเคียวความสูญเสียของการได้ยิน โดยใช้วิธีการออกแบบจากวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด คณะผู้จัดทำทำการสร้างวงจรรองความถี่ เพื่อขดเคียว่านความถี่เสียงที่ไม่ได้ยินนั้นจากโปรแกรม MATLAB ซึ่งแต่ละบุคคลจะมีรูปแบบการสูญเสียการได้ยินแตกต่างกันจากนั้น ทำการเขียนโปรแกรมภาษาซีลงบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในส่วนนี้ ยังไม่ได้ผลที่สมบูรณ์ตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์

ผลการทดสอบการทำงานพบว่า วงจรรองสัญญาณดิจิทัลที่ได้ออกแบบและนำไปโปรแกรมใส่บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้น สามารถทำการกรองความถี่ที่เราได้ออกแบบไว้ได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ในการประมวลผลมีความเร็วในการประมวลผลไม่พอ จึงจำเป็นต้องลดขนาดของวงจรรองสัญญาณลงมาที่ 11 และลดอัตราการสุ่มความถี่สัญญาณลงมาที่ 4,000 เฮิรตซ์ ซึ่งต่ำกว่ารูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ ในการพัฒนาเป็นเครื่องช่วยฟังนั้น จึงต้องทำการเปลี่ยนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่มีความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.ศรววัฒน์ ชิวปรีชา. *Digital signal processing Part2 Digital filter design. 2/2554.*, 2554.
- [2] ราชราชาวิทยาลัย โสต ศอ นาสิกแพทย์ แห่งประเทศไทย. “เครื่องช่วยฟัง.”
http://www.rcot.org/data_detail.php?op=knowledge&id=81.
- [3] Freescale Semiconductor. “Hearing Aids.”
<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/application.jsp?code=APLHRNG#>.
- [4] Freescale Semiconductor. “Hearing Aids.”
http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/MDAPPUSGDRM118.pdf#page=50.
- [5] พูนศักดิ์ สักกทัตติยกุล. “โรคหูตึง.”
<http://www.thaigoodview.com/node/48360>.
- [6] บริษัท ศูนย์การได้ยินดีเมด จำกัด. “เสียงและการได้ยิน.”
http://www.dmedhearing.com/detail_page.php?typeof=article&id_hd=8&id_dd=th.
- [7] BlogGang. “การสูญเสียการได้ยิน.”
<http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=radioarms&date=09-04-2008&group=24&gblog=1>.
- [8] Kmitnbxmie8. “การตรวจสอบสมรรถภาพการได้ยิน.”
<http://www.kmitnbxmie8.com/images/1179882366/ear.pdf>.
- [9] Sessler, G.M.; West, J.E. (1962). "Self-biased condenser microphone with high capacitance". *Journal of the Acoustical Society of America* 34 (ฉบับที่): 1787–1788.
- [10] Rod Elliott. “Electret condenser microphone capsules circuit.”
<http://sound.westhost.com/project93.htm>.
- [11] Eleccircuit. “Power amplifier circuit.”
<http://www.eleccircuit.com/super-small-amp-12w-by-ic-tda7052/>.
- [12] ผศ.ดร.รุจโรจน์ แก้วอุไร. “ภาคขยายสัญญาณ (Amplifier).”
<http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355201/p52-3.html>.
- [13] บริษัท วิชาการดอทคอม จำกัด. “การขยายสัญญาณไฟฟ้า.”
<http://www.vcharkarn.com/lesson/view.php?id=1395>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่า H_k

```

clear all;
clc;
Fs=18000;
p1=250;
p2=500;
p3=1000;
p4=2000;
p5=4000;
p6=8000;
i=1:Fs;
if p6*2<=Fs
for i=1:(p1+126)
    H(i)=(10^(10/20));
end
for i=(p1+127):(p2+251)
    H(i)=(10^(15/20));
end
for i=(p2+252):(p3+501)
    H(i)=(10^(22.25/20));
end
for i=(p3+502):(p4+1001)
    H(i)=(10^(40/20));
end
for i=(p4+1002):(p5+2001)
    H(i)=(10^(50/20));
end
for i=(p5+2002):(p6+501)
    H(i)=(10^(65/20));
end
for i=(p6+502):((Fs/2)+1)
    H(i)=1;
end
for i=((Fs/2)+1):((Fs-p6)+2)
    H(i)=1;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for i=((Fs-p6)+1):((Fs-p5)+2)
    H(i)=(10^(65/20));
end
for i=((Fs-p5)+1):((Fs-p4)+2)
    H(i)=(10^(50/20));
end
for i=((Fs-p4)+1):((Fs-p3)+2)
    H(i)=(10^(40/20));
end
for i=((Fs-p3)+1):((Fs-p2)+2)
    H(i)=(10^(22.25/20));
end
for i=((Fs-p2)+1):((Fs-p1)+2)
    H(i)=(10^(15/20));
end
for i=((Fs-p1)+1):(Fs+1)
    H(i)=(10^(10/20));
end
i1=1:i ;
figure(1)
plot(i1,H)
axis([0,Fs,0,2000]);
xlabel('frequency(Hz)');
ylabel('Magnitude');
title('ideal Filter that you want to build');grid on;
N=100;
interval=Fs/N;
for k=1:(N+1)
    for i1=1:i;
        if i1==((k-1)*interval)+1
            Hk(k)=H(i1);
        end
    end
end
i1=1:i;
k=1:(N+1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

figure(2)
stem((k-1),Hk)
axis([0,(max(k)-1),0,2000]);
xlabel('K');
ylabel('Magnitude');
title('H(K)');
end

```

2. โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอนิมพัลส์

จำกัด (Finite impulse response:FIR filter)

```

clear all;
clc;
m=1;
for i1=250:500
    y(m)=(-0.02)*i1-5;
    m=m+1;
end
i1=250:500;
figure(1); plot(i1,y,'LineWidth',2)
hold on
plot(250,y(1),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
m=1;
for i1=500:1000
    y(m)=(-0.015)*i1-7.5;
    m=m+1;
end
i1=500:1000;
plot(i1,y,'LineWidth',2)
plot(500,y(1),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
m=1;
for i1=1000:2000
    y(m)=(-0.0175)*i1-5;
    m=m+1;
end
i1=1000:2000;
plot(i1,y,'LineWidth',2)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จะต้องมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

plot(1000,y(1),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
m=1;
for i1=2000:4000
    y(m)=(-0.005)*i1-30;
    m=m+1;
end
i1=2000:4000;
plot(i1,y,'LineWidth',2)
plot(2000,y(1),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
m=1;
for i1=4000:8000
    y(m)=(-0.00375)*i1-35;
    m=m+1;
end
i1=4000:8000;
plot(i1,y,'LineWidth',2)
plot(4000,y(1),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(8000,y(4001),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
hold off
title('Graph of hearing loss due to aging');
xlabel('Frequency in Hz');
ylabel(['Intensity in dB']);
xlim([250,8000]);
ylim([-110,0]);
grid on;
N=101;
alpha=(N-1)/2;
upper_limit=(N/2)-1;
Fs=18000;
H=[3.1623 3.1623 3.1623 ...
    5.6234 5.6234 ...
    13.3352 13.3352 13.3352 13.3352 ...
    100 100 100 100 100 100 100 100 ...
    316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278
    316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278 316.2278

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่และไม่รับประกัน

```

316.2278 ...
1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794
1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 1778.2794 ...
1 1];
m=1;
for n=0:(N-1);
    for k=1:upper_limit
        inner(k)=2*abs(H(k+1))*cos(abs(2*pi*k*(n-alpha)/N));
    end
    tot_inner=sum(inner)+H(0+1);
    h(m)=(1/N)*tot_inner;
    m=m+1;
end
[p,q]=freqz(h,1,512,Fs);
amp_resp=abs(p);
z=1;
for n=-(N-1)/2:(N-1)/2
    w(z)=0.54+0.46*cos(2*pi*n/N);
    z=z+1;
end
h1=h.*w;
[p2,q]=freqz(h1,1,512,Fs);
amp_resp2=abs(p2);
figure(2);plot(q,20*log10(amp_resp2));
title('Graph of filter signal hearing loss due to aging');
xlabel('Frequency in Hz'); ylabel('Amplitude Response in dB'); axis([0 Fs/2 0 70]); grid;
f1=250;
f2=500;
f3=1000;
f4=2000;
f5=4000;
f6=8000;
N1=0:200;
t=N1/Fs;
x1=(1/3.1623)*sin(2*pi*f1*t);
x2=(1/5.6234)*sin(2*pi*f2*t);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งชื่อผู้ส่งมาด้วยเสมอ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

x3=(1/13.3352)*sin(2*pi*f3*t);
x4=(1/100)*sin(2*pi*f4*t);
x5=(1/316.2278)*sin(2*pi*f5*t);
x6=(1/1778.2794)*sin(2*pi*f6*t);
y1=filter(h1,1,x1);
y2=filter(h1,1,x2);
y3=filter(h1,1,x3);
y4=filter(h1,1,x4);
y5=filter(h1,1,x5);
y6=filter(h1,1,x6);
figure(3);
hold on
plot(250,20*log10(max(abs(y1(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(500,20*log10(max(abs(y2(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(1000,20*log10(max(abs(y3(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(2000,20*log10(max(abs(y4(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(4000,20*log10(max(abs(y5(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
plot(8000,20*log10(max(abs(y6(100:200)))),'ro','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',7)
hold off
title('Graph of hearing loss compensation due to aging');
xlabel('Frequency in Hz');
ylabel('Hearing Level in dB');
xlim([250,8000]);
ylim([-100,10]);
grid on;
error250=abs(1-20*log10(max(abs(y1(100:200))))))
error500=abs(1-20*log10(max(abs(y2(100:200))))))
error1000=abs(1-20*log10(max(abs(y3(100:200))))))
error2000=abs(1-20*log10(max(abs(y4(100:200))))))
error4000=abs(1-20*log10(max(abs(y5(100:200))))))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ และขอสงวนสิทธิ์ในเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
error8000=abs(1-20*log10(max(abs(y6(100:200))))))
```

3. โปรแกรมที่ใช้ในสร้างโปรแกรมทดสอบการได้ยิน

```
function varargout=start9(varargin)
gui_Singleton=1;
gui_State=struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @start9_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @start9_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback=str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}]=gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function start9_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output=hObject;
guidata(hObject, handles);
function varargout=start9_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1}=handles.output;
function n_Callback(hObject, eventdata, handles)
function n_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function freq1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function freq1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function amp_Callback(hObject, eventdata, handles)
function amp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function test1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Fs N t pit y1 f1 a1;
Fs=18000;
N=str2num(get(handles.n,'string'));
t=(0:N)/Fs;
pit=2*pi*t;
f1=str2num(get(handles.freq1,'string'));
a1=str2num(get(handles.amp,'string'));
y1=(a1)*sin(pit*f1);
sound(y1,Fs);
pause;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้