สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณความผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟส ของระบบการส่งสัญญาณเสียง

Realization of Audio Test Signal used for Measuring Amplitude and Phase Distortions In Audio Signal Transmission System

รองศาสตราจารย์ อรลาภ แสงอรุณ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK
5102.9
.C369D

เลขหมู่.....131158.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..22 พ.ค. 2557

b.12602437
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาด้านวิชาการจากรองศาสตราจารย์ ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช ผู้ร่วมวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประศาสตร์วิชาความรู้ให้ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ และรองศาสตราจารย์ นิภา ลีลารุจิ พี่สาวที่แสนดี รองศาสตราจารย์ นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย มิตรแท้ที่ยั่งยืน ผู้เป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

อรลาภ แสงอรุณ ผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณความผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟส ของระบบการส่งสัญญาณเสียง

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Realization of Audio Test Signal used for Measuring Amplitude and Phase Distortions in Audio signal Transmission system

แหล่งเงิน เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 64,900 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล์

นางสาว อรลาภ แสงอรุณ

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ksornlar@kmitl.ac.th

คำสำคัญ (Keywords) Modulated 2T Sine- squared Pulse, Audio Test Signal

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณความผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟสของระบบการส่งสัญญาณเสียงด้วยสัญญาณทดสอบซายน์กำลังสองพัลซ์ โดยนำเสนอวิธีการใหม่ในประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในขอบข่ายเวลาจากฟังก์ชันเศษส่วนที่มีตัวส่วนเป็นฟังก์ชันของเบสเสลโพลิโนเมียล และประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวเศษที่เหมาะสมด้วยวิธีการ Least square เพื่อให้ได้ผลตอบสนองซายน์กำลังสองพัลซ์ที่มีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันซายน์กำลังสองทางอุดมคติ จากนั้นนำสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ได้มาจำลองผลการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice และทำการคูณกับสัญญาณพาหะเป็นสัญญาณมอดูเลท พัลซ์ซายน์กำลังสองซึ่งเป็นสัญญาณทดสอบรูปคลื่นแบบง่าย และทำการสร้างวงจรจริงโดยใช้วงจรแอคทีฟอาร์ซี

Abstract

This research presents the designs of audio test signal used for measuring amplitude and phase distortions in audio signal transmission system using sine square pulse. In this paper, the sine squares pulse is approximated in the time domain basis by optimization the coefficient of rational function. In order to assure that the test signal has symmetrical sine square slope, hence the Bessel Polynomial is utilized as denominator of the transfer function. Herein, least square method is used for searching this optimum numerator coefficient of approximation transfer function. It is shown that we can generate the sine square test signal with smaller error. Simulation results are demonstrated by using PSpice and it can be realized by active networks.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ..... I

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

รูปผลงาน III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน..... 1

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้.....2

1.5.1 ฮาร์ดแวร์.....2

1.5.2 ซอฟแวร์.....2

บทที่ 2 การประมาณซายน์กำลังสองพัลซ์ 3

2.1 บทนำ..... 3

2.2 สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ (Sine square pulse) ในอุดมคติ..... 3

2.3 สมการเบสเสลโพลิโนเมียล(Bessel Polynamia)..... 4

2.4 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) 6

2.5 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในเชิงเวลา (Time Domain).....7

2.6 ขั้นตอนการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ (Approximate of Sine square pulse) 7

2.6.1 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่สาม 7

2.6.2 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่ห้า 9

2.6.3 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่เจ็ด 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3 การออกแบบสร้างวงจร และผลการวัด.....14

3.1 บทนำ.....14

3.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว.....17

3.2.1 การออกแบบวงจร $H_1(s)$.....17

3.3 จำลองการทำงานของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัวโดยใช้โปรแกรม Pspice.....20

3.4 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณอินพุต.....25

3.5 จำลองการทำงานของวงจรมัลติพลายเออร์.....25

3.6 จำลองการทำงานของวงจรบวก (Adder).....26

3.7 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณพาหะ (Carrier).....26

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....27

4.1 บทนำ.....27

4.2 สัญญาณอินพุต.....27

4.2.1 สัญญาณอินพุตจำลองผลบนโปรแกรม Pspice.....27

4.2.2 สัญญาณอินพุตที่วัดได้จากวงจรจริง.....28

4.3 สัญญาณเอาท์พุต.....28

4.3.1 สัญญาณเอาท์พุตจำลองผลบนโปรแกรม Pspice.....28

4.3.2 สัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป.....29

4.4 สัญญาณอินพุตเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุต.....29

4.4.1 สัญญาณอินพุตเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจำลองผลบนโปรแกรม Pspice.....29

5.4.2 สัญญาณอินพุตเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป.....30

4.5 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะ.....30

4.5.1 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะจำลองผลโดยโปรแกรม Pspice.....30

4.5.2 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะจากการวัดจากวงจรจริง.....31

4.6 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์.....31

4.6.1 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ จำลองผลโดยโปรแกรม Pspice.....31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

4.6.2 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์
จากเครื่องวงจรจริง 32
4.7 การทดสอบการวัดความผิดเพี้ยนในระบบการส่งสัญญาณเสียง.....33
4.7.1 การทดสอบวัดสัญญาณที่จุดตัดข้าม (Crossover) ของวงจร cross over network.....34
4.7.2 ผลการวัดจากวงจรจริง.....34
บทที่ 5 สรุปผล 36
5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง.....36
5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....38
บรรณานุกรม.....39
ภาคผนวก.....40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์(Sin square pulse) ในอุดมคติ....4

2.2 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม 8

2.3 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ 8

2.4 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม 8

2.5 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้า 9

2.6 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้า เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ.... ...9

2.7 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้าโดยใช้วิธีคาสเคด.... 10

2.8 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด.... 11

2.9 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ....11

2.10 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด 11

3.1 โครงสร้างของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว....14

3.2 วงจรสมการ $H_1(s)$ 21

3.3 วงจรสมการ $H_2(s)$ 21

3.4 วงจรสมการ $H_3(s)$ 22

3.5 วงจรสมการ $H_4(s)$ 22

3.6 วงจรบัพเฟอร์....23

3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำ....23

3.8 วงจรรวมออปแอมป์หนึ่งตัวนำมาคาสเคดกัน....24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 วงจรสัญญาณอินพุต....25

3.10 วงจรมัลติพลายเออร์....25

3.11 วงจรบวก(Adder) 26

3.11 วงจรสัญญาณพาหะ....26

4.1 สัญญาณอินพุตบนโปรแกรม Pspice 27

4.2 สัญญาณอินพุตจากวงจรวัดโดยเครื่องออสซิโลสโคป 28

4.3 สัญญาณเอาท์พุตบนโปรแกรม Pspice 28

4.4 สัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป....29

4.5 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตบนโปรแกรม Pspice 29

4.6 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป 30

4.7 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะบนโปรแกรม Pspice.... .30

4.8 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะจากเครื่องออสซิโลสโคป....31

4.9 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์บนโปรแกรม PSpice 31

4.10 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์จากเครื่อง....32

4.11 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์ความถี่สูงเป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์....32

4.12 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์ความถี่ต่ำเป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์....32

4.13 ก.ภาพแสดงความถี่จุดตัดข้าม (Crossover frequency)ที่ดี ข.การผิดเพี้ยนของความถี่จุดตัดข้าม....33

4.14 ไดอแกรมแสดงการทดสอบ....34

4.15 a ผลการวัด สัญญาณ กรณี วงจรจุดตัดข้าม crossกันพอดี สัญญาณไม่ผิดเพี้ยน....34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.15 a ผลการวัด สัญญาณ กรณี วงจรจุดตัดข้าม crossกันพอดี สัญญาณไม่ผิดเพี้ยน..... 34

4.15 b. ผลการวัด สัญญาณ กรณีเกิด boost signal และbump signal 34

4.16 วงจรรวม.....35

5.1 สัญญาณทดสอบที่จะนำไปใช้งานต่อไป.....37

5.2 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณทดสอบที่สร้างขึ้น.....37

5.3 ชุดอุปกรณ์การวัดความผิดเพี้ยนของระบบสัญญาณเสียง.....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

ในการวัดคุณสมบัติของระบบสัญญาณเสียงทั้งทางขนาด (Magnitude response) และเฟส (Phase response) อุปกรณ์ทดสอบที่ออกแบบจะวัดคุณสมบัติข้างต้นทาง Frequency Domain ซึ่งมีความยุ่งยากและอุปกรณ์มีราคาแพงรวมทั้งอุปกรณ์ประกอบ เช่น ต้องใช้ Spectrum Analyzer หรือ Audio Analyzer

สำหรับงานวิจัยนี้จะสร้างสัญญาณทดสอบ Audio ซึ่งวัดได้ทั้งการผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟสหรือกรุ๊ปดีเลย์พร้อมกัน โดยสามารถวัดได้ทางขอบข่ายเวลา (Time Domain) แทนที่จะวัดทาง Frequency Domain ซึ่งยุ่งยากและราคาแพง โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นเป็นไซน์กำลังพัลส์ mod รวมกับ Sub-carrier โดย Sub-carrier สามารถปรับความถี่ได้ตามที่ต้องการสำหรับความผิดเพี้ยน สามารถใช้ ออสซิลโลสโคปราคาถูกวัดได้ทั้งทางขนาดและทางเฟส

1.2 วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบในการวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงที่ความถี่กลางและความถี่สูง เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมลำโพงเครื่องเสียง และต่อยอดงานวิจัย

2.2 เพื่อใช้อุปกรณ์นี้วัดโครงข่ายจุดตัดข้าม (Cross over network) ในอุปกรณ์ชุดลำโพงเสียงเพื่อใช้แยกสัญญาณเสียงต่ำ (Woofer) และสัญญาณเสียงสูง (Tweeter)

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในโดเมนเวลาด้วยวิธีการใหม่ โดยประมาณจากฟังก์ชันเศษส่วน เพื่อให้ได้ผลตอบสนองซายน์กำลังสองพัลซ์ใกล้เคียงซายน์กำลังสองพัลซ์ในอุดมคติที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด
2. นำฟังก์ชันที่ได้จากการประมาณไปสร้างวงจรจริงและเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. อุปกรณ์วัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง
2. สมการคณิตศาสตร์สำหรับประมาณสัญญาณซายน์กำลังพัลซ์ (Sine square pulse) แบบใหม่

1.5 อุปกรณ์ที่ต้องใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมจำลองสัญญาณต้นแบบและความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง 1 เครื่อง
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณต้นแบบและวัดความผิดเพี้ยน
- ชุดลำโพงพร้อมวงจรโครงข่ายจุดตัดข้ามที่จะทดสอบ
- เครื่องออสซิโลสโคป 1 เครื่อง
- เครื่องกำเนิดสัญญาณต้นแบบ (Arbitrary waveform) 1 เครื่อง

1.5.2 ซอฟแวร์

- โปรแกรม MATLAB version 2009
- โปรแกรม Orcad PSpice 9.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การประมาณซายน์กำลังสองพัลซ์

2.1 บทนำ

การออกแบบเน็ทเวิร์กฟังก์ชัน เพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ สามารถประมาณผลตอบสนองได้ทั้งในขอบข่ายความถี่ และขอบข่ายเวลา สำหรับการประมาณฟังก์ชันในขอบข่ายความถี่นั้นมีความยุ่งยากมาก ในปริญญานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการประมาณเน็ทเวิร์กฟังก์ชันในขอบข่ายเวลา ซึ่งการประมาณฟังก์ชันในขอบข่ายเวลานี้มีการวิจัยกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ที่ดีที่สุด เช่น การประมาณฟังก์ชันด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งวิธีการนี้ถ้าการออปติไมเซชันไม่เหมาะสม อาจทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

สำหรับบทวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการใหม่ในการประมาณเน็ทเวิร์กฟังก์ชัน โดยกำหนดให้ฟังก์ชันของสมการเศษส่วน (Rational function) ให้มีตัวส่วนเป็น เบสเสลโพลิโนเมียล (Bessel Polynomial) ซึ่งมีเฟสเป็นเส้นตรง (Linear phase) จากนั้นทำการประมาณตัวเศษด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวเศษที่เหมาะสม ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.2 สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ (Sine square pulse) ในอุดมคติ

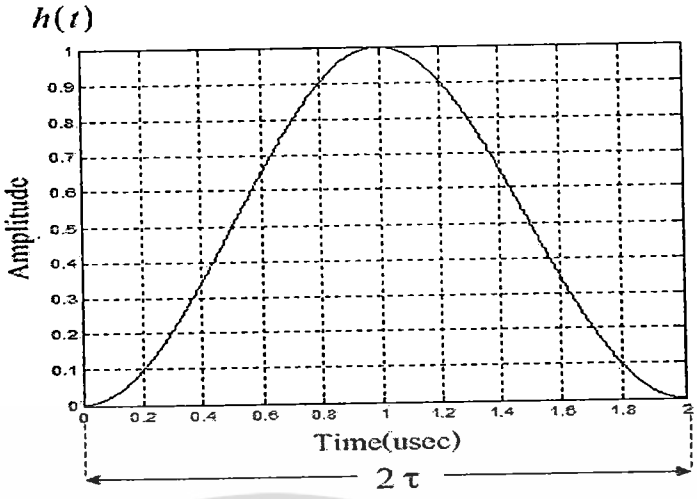
สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ เป็นสัญญาณที่นิยมใช้เป็นสัญญาณทดสอบในการส่งสัญญาณภาพในระบบโทรทัศน์ สำหรับงานวิจัยนี้เสนอแนวคิดใหม่โดยนำสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ ดังกล่าว มาเป็นสัญญาณทดสอบในระบบการส่งสัญญาณเสียง แต่เนื่องจากสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในอุดมคติไม่สามารถสร้างเป็นวงจรจริงได้ จึงต้องทำการประมาณจากทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ ในอุดมคติแสดงโดยสมการ (2.1)

$$h(t) = \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau}\right) \quad ;0 \le t \le 2\tau \tag{2.1}$$

จากสมการ (2.1) สามารถพล็อตรูปสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 สัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ (Sine square pulse) ในอุดมคติ
โดยที่ 2τ เป็นแบนวิดท์ของสัญญาณเสียงความถี่ต่ำ

2.3 สมการเบสเสลโพลิโนเมียล (Bessel Polynamial)

ในทางคณิตศาสตร์ เบสเสลโพลิโนเมียลเป็นลำดับมุมฉากของสมการพหุนาม ซึ่งมีการให้ความหมายที่แตกต่างกันออกไปหลายแบบ แต่คำนิยามที่เป็นที่นิยมของนักวิทยาศาสตร์แสดงดังสมการ (2.2)

$$y_n(x) = \sum_{k=0}^{n} \frac{(n+k)!}{(n-k)!k!}\left(\frac{x}{2}\right)^k \tag{2.2}$$

และอีกความหมายหนึ่ง ที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมไฟฟ้า ที่เรียกกันในชื่อเบสเสลโพลิเมียลแบบย้อนกลับ (Reverse Bessel polynomials) แสดงดังสมการ (2.3)

$$\theta_n(x) = x^n y_n\left(\frac{1}{x}\right) = \sum_{k=0}^{n} \frac{(2n+k)!}{(n-k)!k!}\frac{x^k}{2^{n-k}} \tag{2.3}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (2.2) ที่หาได้จะเหมือนกับในสมการ (2.3) แต่เรียงอยู่หน้าสมการลำดับที่กลับกัน ตัวอย่าง สมการของเบสเสลโพลิโนเมียลจะอยู่ในรูปของสมการ (2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$
\begin{aligned}
y_1(x) &= x+1 \\
y_2(x) &= 3x^2+3x+1 \\
y_3(x) &= 15x^3+15x^2+6x+1 \\
y_4(x) &= 105x^4+105x^3+45x^2+10x+1 \\
y_5(x) &= 945x^5+945x^4+420x^3+105x^2+15x+1 \\
y_6(x) &= 10395x^6+10395x^5+4725x^4+1260x^3+210x^2+21x+1 \\
y_7(x) &= 135135x^7+135135x^6+62370x^5+17325x^4+3150x^3+378x^2+28x+1
\end{aligned}
\tag{2.4}
$$

ในขณะที่รูปสมการของเบสเสลโพลิเมียลแบบย้อนกลับอยู่ในรูปของสมการ (2.5)

$$
\begin{aligned}
\theta_1(x) &= x+1 \\
\theta_2(x) &= x^2+3x+3 \\
\theta_3(x) &= x^3+6x^2+15x+15 \\
\theta_4(x) &= x^4+10x^3+45x^2+105x+105 \\
\theta_5(x) &= x^5+15x^4+105x^3+420x^2+945x+945 \\
\theta_6(x) &= x^6+21x^5+210x^4+1260x^3+4725x^2+10395x+10395 \\
\theta_7(x) &= x^7+28x^6+378x^5+3150x^4+17325x^3+62370x^2+135135x+135135
\end{aligned}
\tag{2.5}
$$

โดยเบสเสลโพลิโนเมียลแบบย้อนกลับนี้จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวกรองสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์

ข้อดีของเบสเสลโพลิโนเมียล

- ค่าโพล (Pole) ที่ได้มาจากการใช้สมการเบสเสลโพลิโนเมียล จะอยู่ในครึ่งซ้ายของวงกลมหนึ่งหน่วยเสมอ ซึ่งจะสามารถบอกได้เลยว่า เมื่อนำสมการนี้ไปใช้ในระบบ ระบบจะมีความเสถียร

-สมการของเบสเสลโพลิโนเมียลจะให้สัญญาณที่มีเฟสเป็นเส้นตรง (Linear phase) ซึ่งคุณสมบัติของเฟสที่เป็นเส้นตรงนั้นจะให้ผลตอบสนองอิมพัลซ์ของระบบ (Impulse responce) ที่มีความสมมาตร เมื่อนำสมการนี้ไปสร้างสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ รูปสัญญาณที่ได้จะมีความสมมาตรตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method)

การหาสัมประสิทธิ์เทอมเศษนั้น เป็นการง่ายที่จะนำเอาวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมาเป็นเกณฑ์ในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่างๆเพื่อประมาณผลตอบสนองอิมพัลซ์ของระบบ และการประมาณค่าฟังก์ชันโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ฟังก์ชันที่ดีที่สุดของข้อมูล เพราะเกิดจากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนั้นแสดงดังสมการ (3.6)

$$h^*(t) = \sum_{v=1}^{m}\left[2A_v \in^{-\infty_v t} \cos\beta_v t + 2B_v \in^{-\infty_v t} \sin\beta_v t\right] + \sum_{v=1}^{m} C_\mu \in^{-\infty_\mu t} \qquad (2.6)$$

แต่ละค่าของ V จะเป็นค่าโพลของคู่คอมเพล็คคอนจูเกท และแต่ละค่าของ μ จะเป็นค่าโพลที่เป็นจำนวนจริง

$$E_2 = \int_{t1}^{t2} [h(t) - h^*(t)]^2 \, dt \qquad ; \; t1 < t < t2 \qquad (2.7)$$

โดยกำหนดให้

$$\frac{\partial E_2}{\partial A_v} = 0 \;,\; \frac{\partial E_2}{\partial B_v} = 0 \;,\; \frac{\partial E_2}{\partial C_v} = 0$$

จะได้ 2M+N สมการ :

$$\int_{t1}^{t2}\left[h(t) - h^*(t)\right] \in^{-\infty_v t} \cos\beta_v t \;\; dt = 0 \qquad (2.8)$$

$$\int_{t1}^{t2}\left[h(t) - h^*(t)\right] \in^{-\infty_v t} \sin\beta_v t \;\; dt = 0 \qquad (2.9)$$

$$\int_{t1}^{t2}\left[h(t) - h^*(t)\right] \in^{-\sigma_v t} dt = 0 \qquad v = 1,2,...,M, \;\; \mu = 1,2,...,N \qquad (2.10)$$

ตั้งแต่ค่าของ A_v B_v และ C_v ที่ประกอบอยู่ในสมการที่ (2.15) เรายังไม่ทราบค่า เราสามารถหาได้โดยง่ายด้วยการอินทิเกรท ในกลุ่มของสมการ 2M+N ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นค่าคงที่ก็จะได้มาจากการอินทิเกรทของแต่ละรูปแบบตามสมการข้างล่างนี้

$$\int_{t1}^{t2} h(t) \in^{-\infty_v t} \cos\beta_v t \;\; dt = 0 \qquad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{t1}^{t2} h(t) \in^{-\infty_v t} \sin \beta_v t \quad dt = 0 \tag{2.12}$$

$$\int_{t1}^{t2} h(t) \in^{-\sigma_v t} dt = 0 \tag{2.13}$$

2.5 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในเชิงเวลา (Time Domain)

จากทฤษฎีพื้นฐาน โดยกำหนดค่าเน็ทเวิร์กฟังก์ชันเป็นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่อยู่ในรูปสมการโพลิ โนเมียล เพื่อสะดวกในการนำไปสร้างวงจรจริง รูปแบบของสมการแสดงดังสมการ (2.14)

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \tag{2.14}$$

เมื่อ P(s) เป็นฟังก์ชันตัวเศษ

Q(s) เป็นฟังก์ชันตัวส่วน

การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในที่นี้เลือกใช้วิธีการของเบสเสลโพลิโนเมียลในการหาค่า Q(s) ส่วนการหาค่า P(s) ใช้วิธีการวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

2.6 ขั้นตอนการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ (Approximate of Sine square pulse)

2.6.1 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่สาม

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{(s^2 + 3s + 3)(s+1)} \tag{2.15}$$

ดังนั้น

$$h^*(t) = 2Ae^{-1.5t}\cos(0.866t) + 2Be^{-1.5t}\sin(0.866t) + Ce^{-t} \tag{2.16}$$

หาสัมประสิทธิ์โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

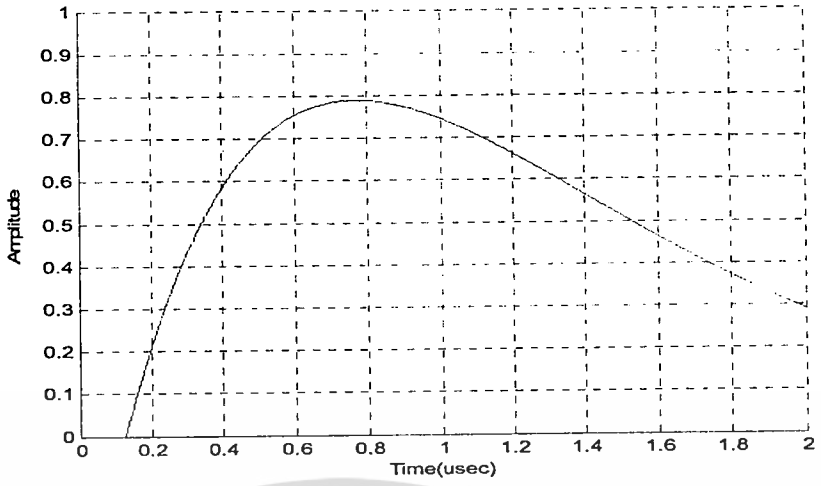
$$E_2 = \int_{t_1}^{t_2} [h(t) - h^*(t)]^2 \, dt$$

$$\frac{\partial}{\partial A} E_2 = 0, \ \frac{\partial}{\partial B} E_2 = 0, \ \frac{\partial}{\partial C} E_2 = 0$$

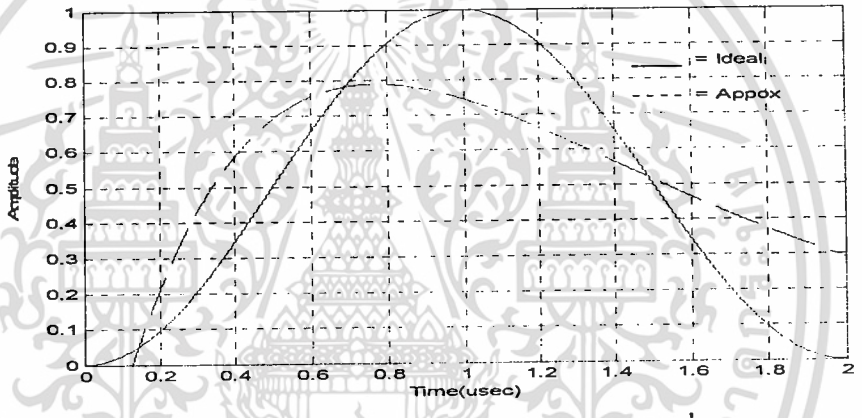
$$A = -0.572 \ , B = 1.962 \ , C = 0.664$$

จากนั้นนำค่า A ,B ,C ที่หาได้แทนในสมการที่ (2.16) นำมาพล็อตในเชิงเวลา แสดงดังรูปที่ 2.2

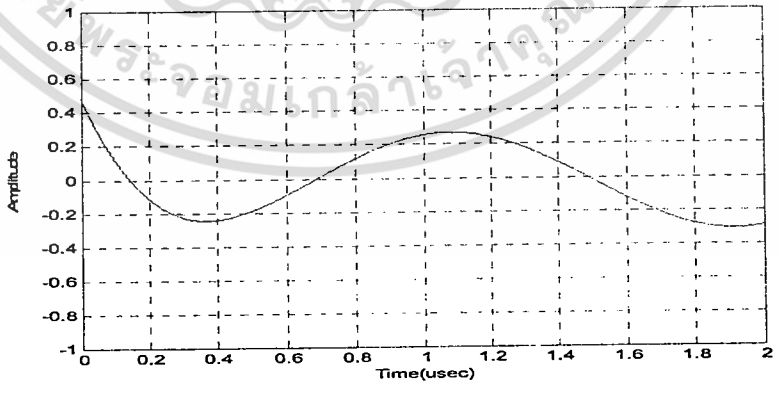
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม ตามสมการที่ (2.16)



รูปที่ 2.3 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม ตามสมการที่ (2.16)เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ ตามสมการที่ (2.1)



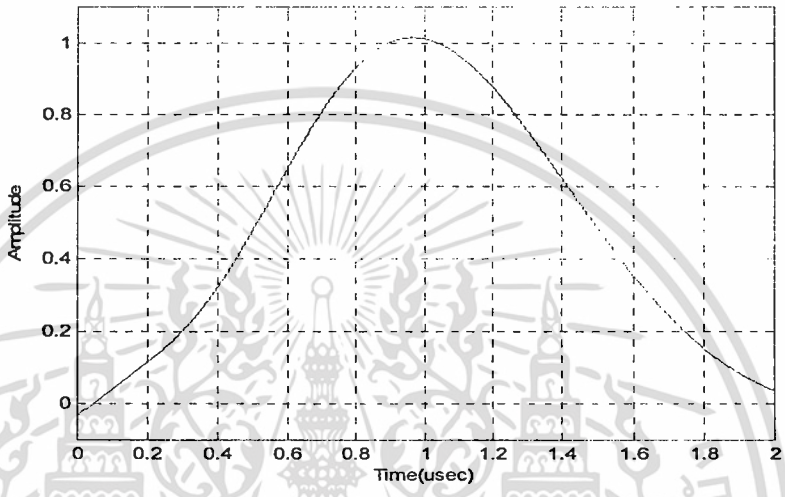
รูปที่ 2.4 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

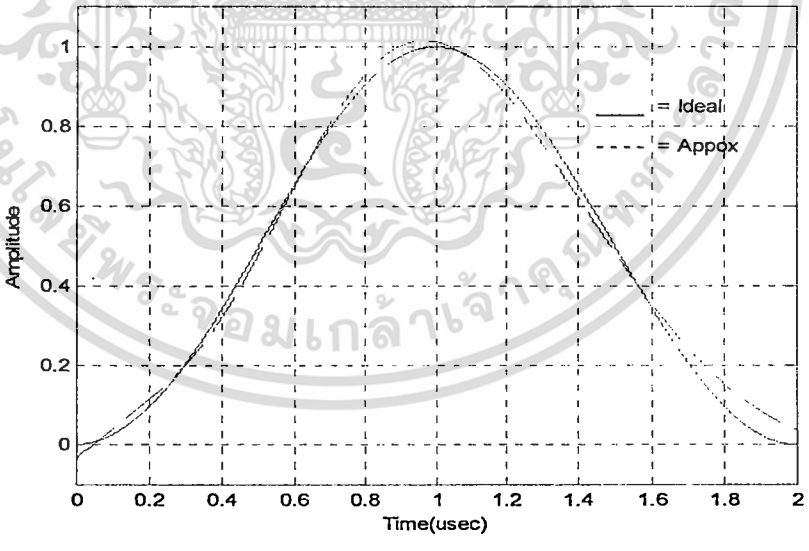
2.6.2 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่ห้า

$$H(s) = \frac{s^5 + \alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{s^5 + 15\,s^4 + 105\,s^3 + 420\,s^2 + 945\,s + 945} \qquad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกันกับวิธีข้างต้น จากสมการ 2.17 สามรถพล็อตกราฟของผลตอบสนองในเชิงเวลา แสดงดังรูปที่ 2.5

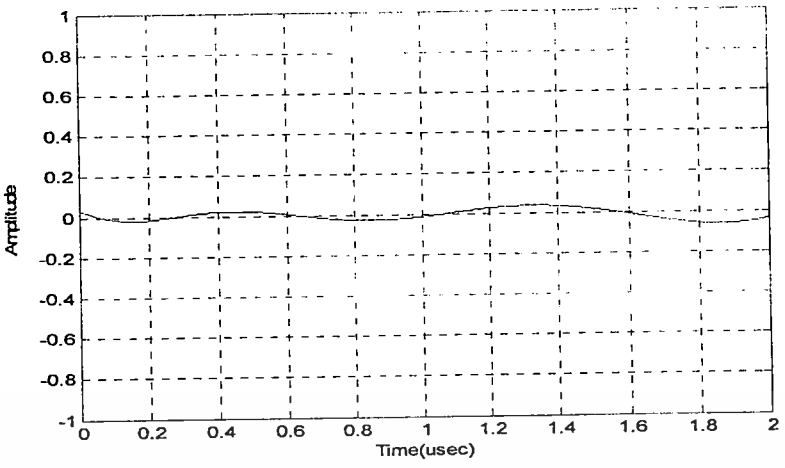


รูปที่ 2.5 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้า



รูปที่ 2.6 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้า เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ ตามสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่ห้า

2.6.3 การประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับที่เจ็ด

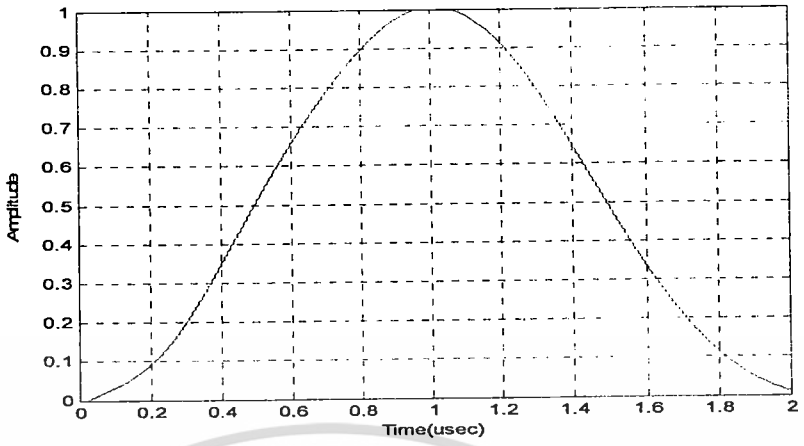
$$H(s) = \frac{s^7 + \alpha_6 s^6 + s^5 + \alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{s^7 + 28s^6 + 378s^5 + 3150s^4 + 17325s^3 + 62370s^2 + 135135s + 135135} \quad (2.17)$$

ดังนั้น

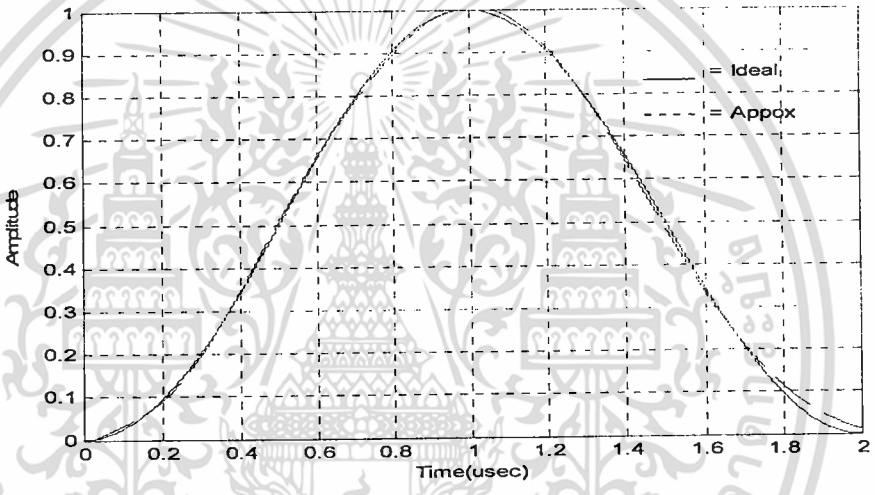
$$\begin{aligned} h^*(t) = {} & 2Ae^{-2.6857t}\cos(5.4207t) + 2Be^{-2.6857t}\sin(5.4207t) \\ & + 2Ce^{-4.0701t}\cos(3.5172t) + 2De^{-4.0701t}\sin(3.5172t) \\ & + 2Ee^{-4.7583t}\cos(1.7393t) + 2Fe^{-4.7583t}\sin(1.7393t) \\ & + Ge^{-4.9718t} \end{aligned} \quad (2.18)$$

หาสัมประสิทธิ์โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้ค่า A,B,C,D,E,F และ G ที่หาได้แทนลงในสมการที่ (2.18) นำมาพล็อตในเชิงเวลา แสดงได้ตามรูป 2.8

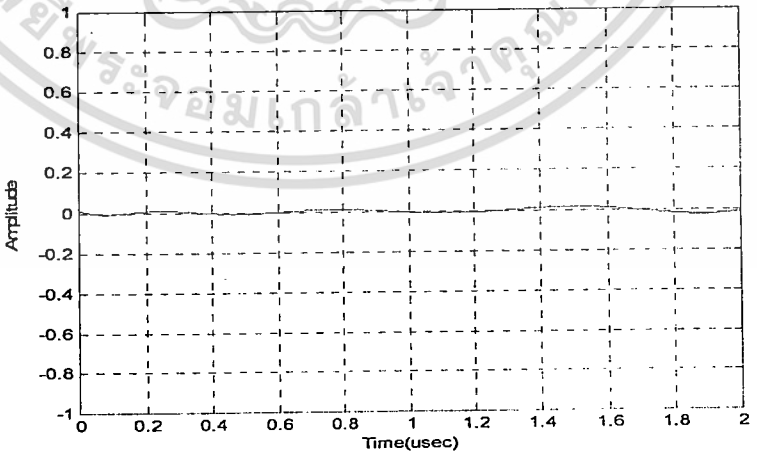
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด ตามสมการที่ (2.18)



รูปที่ 2.9 ผลการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด ตามสมการที่ (2.18) เทียบกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติ ตามสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.10 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์สมการลำดับที่เจ็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์โดยใช้สมการลำดับต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนลำดับสมการเพิ่มมากขึ้นรูปสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ที่สร้างขึ้น ก็ยิ่งใกล้เคียงกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ในอุดมคติ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อสมการลำดับยิ่งสูงวงจรของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์จะมีขนาดวงจรที่ใหญ่ขึ้น ใช้อุปกรณ์มากขึ้น และการต่อวงจรก็จะยากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ลำดับที่เจ็ด ดังนั้นจะหาค่าสัมประสิทธิ์ α ได้จาก

$$A = -1.611$$
$$B = 1.868$$
$$C = 27.851$$
$$D = -17.542$$
$$E = -110.333$$
$$F = 30.974$$
$$G = 168.175$$

$$A = 0.00002\alpha_0 + 0.00018\alpha_1 - 0.00166\alpha_2 + 0.0022\alpha_3 + 0.04893\alpha_4 - 0.3435\alpha_5 + 0.005442\alpha_6 + 12.27867 \quad (3.31)$$

$$B = 0.00028\alpha_0 - 0.00068\alpha_1 - 0.0067\alpha_2 + 0.0608\alpha_3 - 0.0807\alpha_4 - 1.7906\alpha_5 + 12.5321\alpha_6 - 1.9921 \quad (3.32)$$

$$C = 0.00012\alpha_0 - 0.0017\alpha_1 + 0.0103\alpha_2 - 0.0347\alpha_3 - 0.0165\alpha_4 + 1.1375\alpha_5 - 8.7813\alpha_6 + 38.5677 \quad (3.33)$$

$$D = -0.00072\alpha_0 - 0.0035\alpha_1 + 0.0492\alpha_2 - 0.2989\alpha_3 + 1.0031\alpha_4 + 0.4780\alpha_5 - 32.9139\alpha_6 + 254.0997 \quad (3.34)$$

$$E = -0.00086\alpha_0 + 0.00507\alpha_1 - 0.02630\alpha_2 + 0.12017\alpha_3 - 0.46850\alpha_4 + 1.37415\alpha_5 - 1.05249\alpha_6 - 25.2535 \quad (3.35)$$

$$F = -0.0031\alpha_0 + 0.02135\alpha_1 - 0.13012\alpha_2 + 0.67511\alpha_3 - 3.08437\alpha_4 + 12.02474\alpha_5 - 35.26960\alpha_6 + 27.01366 \quad (3.36)$$

$$G = 0.00071\alpha_0 - 0.0035\alpha_1 + 0.01764\alpha_2 - 0.08771\alpha_3 + 0.43608\alpha_4 - 2.1681\alpha_5 + 10.77939\alpha_6 - 53.59295 \quad (3.37)$$

จะได้ค่า α ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_0 = 3002153.472$$
$$\alpha_1 = 2017652.450$$
$$\alpha_2 = 678612.257$$
$$\alpha_3 = 137392.437$$
$$\alpha_4 = 17613.116$$
$$\alpha_5 = 1390.305$$
$$\alpha_6 = 51.702$$

ฉะนั้นจะได้สมการเป็น ดังสมการต่อไปนี้

$$H(s) = \frac{s^7 + 51.702s^6 + 1390.305s^5 + 17613.116s^4 + 137392.437s^3}{s^7 + 28s^6 + 378s^5 + 3150s^4}$$

$$\frac{+678612.257s^2 + 2017652.45s + 3002153.472}{+17325s^3 + 62370s^2 + 135135s + 135135} \qquad (2.19)$$

จัดรูปใหม่

$$H(s) = \frac{\left[s^2 + 5.5254s + 36.4608\right]\left[s^2 + 6.9012s + 24.5674\right]}{\left[s^2 + 5.3714s + 36.597\right]\left[s^2 + 9.5166s + 25.6666\right]}$$

$$\frac{\left[s^2 + 33.8696s + 619.9923\right]\left[s + 5.4058\right]}{\left[s^2 + 8.1402s + 28.9364\right]\left[s + 4.9718\right]} \qquad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบสร้างวงจร และผลการวัด

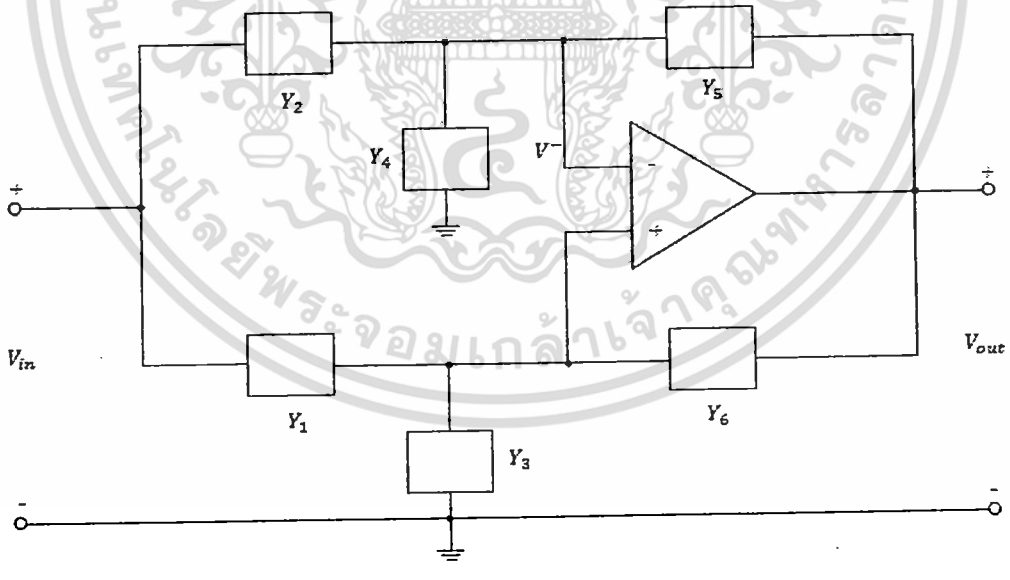
3.1 บทนำ

ในการสังเคราะห์วงจรเน็ทเวิร์กแบบแอคทีฟ อาร์ ซี จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นอาจทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีคาสเคด (Cascade) โดยการแยกองค์ประกอบของเน็ทเวิร์กฟังก์ชันให้อยู่ในรูปผลคูณของเทอมลำดับที่หนึ่ง (First order) หรือเทอมลำดับที่สอง (Second order) ในกรณีที่มีโพลจริงคูณอยู่ด้วย แต่ละเทอมสามารถนำมาสร้างวงจรแบบแอคทีฟ อาร์ ซี (Active R C circuit) ที่มีรูปแบบเดียวกันแล้วนำมาอนุกรมกัน จะได้วงจรรวมแทนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทั้งหมด

2. วิธีโดยตรง (Direct)คือการสร้างวงจรแบบแอคทีฟ อาร์ ซี วงจรเดียวแทนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทั้งหมด รูปแบบวงจรจึงซับซ้อนแตกต่างกันไปตามลำดับสูงสุดของเน็ทเวิร์กฟังก์ชัน

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างของวงจร แบบ ใช้ ออปแอมป์ หนึ่งตัว (Single-Amplifier Realization) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มาคาสเคดกัน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 ที่ปลายของระยะทั้ง 2 ของออปแอมป์เป็นสมการได้ว่า

$$Y_2(V-V_{in})+Y_4(V)+Y_6(V-V_0)=0 \tag{3.1}$$

$$Y_1(V-V_{in})+Y_3(V)+Y_5(V-V_0)=0 \tag{3.2}$$

จาก (3.1) และ (3.2) เราตัดเทอม V ออกจะได้ Transfer voltage ratio ฟังชั่นคือ

$$H(s)=\frac{V_0(s)}{V_{in}(s)}$$

$$=\frac{Y_1(Y_2+Y_4+Y_6)-Y_2(Y_1+Y_3+Y_5)}{Y_6(Y_1+Y_3+Y_2)-Y_5(Y_2+Y_4+Y_2)} \tag{3.3}$$

จาก (3.3) ทำให้สมการง่ายต่อการคำนวณ (Simplify) โดยให้

$$Y_1+Y_3+Y_5=Y_2+Y_4+Y_6 \tag{3.4}$$

ตามเงื่อนไขในสมการ (3.4) สมการ (3.3) จะลดรูปลงเหลือ

$$H(s)=\frac{V_0(s)}{V_{in}(s)}=\frac{Y_1-Y_2}{Y_6-Y_5}=\frac{Y_2-Y_1}{Y_5-Y_6} \tag{3.5}$$

สมการ (3.5) เขียนเป็นรูปแบบของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ทั่วไปว่า

$$H(s)=\frac{P(s)}{Q(s)} \tag{3.6}$$

เพื่อให้สมการ (3.6) สามารถออกแบบให้เป็นวงจร RC ได้ โดยใช้ทฤษฎีของ RC One-port network ซึ่งคุณสมบัติของ RC ในรูป One-port admittance เขียนได้ว่า

$$Y(s)=\frac{Hs(S+\alpha_3)(S+\alpha_5)(S+\alpha_5)\ldots}{(S+\alpha_2)(S+\alpha_4)\ldots} \tag{3.7}$$

โดยที่ $0<\alpha_2<\alpha_3<\alpha_4<\alpha_5\ldots$

$$\frac{Y(s)}{S}=H+\frac{k_0}{S}+\frac{k_2}{S+\alpha_2}+\frac{k_3}{S+\alpha_4}+\ldots \tag{3.8}$$

จาก (3.6) ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s)=\frac{\frac{P(s)}{D(s)}}{\frac{Q(s)}{D(s)}} \tag{3.9}$$

โดยที่ $D(s)$ มีรากที่ไม่จำกัด (Unrestricted) แต่มีเงื่อนไขว่ารากจะต้องเป็นรากง่ายๆ (Simple) ค่าจริง (Real) และอยู่บน Negative axis เท่านั้น

จาก (3.9) เทียบเป็นสัมประสิทธิ์กับ (3.5) จะได้

$$\frac{P(s)}{D(s)}=Y_1-Y_2 \quad \text{หรือ} \quad Y_2-Y_1 \tag{3.10a}$$

$$\frac{Q(s)}{D(s)}=Y_6-Y_5 \quad \text{หรือ} \quad Y_5-Y_6 \tag{3.10b}$$

หรือ

$$\frac{P(s)}{D(s)}=K_\infty s+\frac{\sum_i k_i s}{s+\sigma_i}-\frac{\sum_j k_j s}{s+\beta_i} \tag{3.11a}$$

$$\frac{Q(s)}{D(s)}=K_\infty s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u}-\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \tag{3.11b}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ k_∞, k_i, k_j, k_u และ k_v เป็นบวกและเป็นค่าจริง ถ้า k_∞ และ $k_{\infty'}$ เป็นบวก จะได้ว่า

$$Y_1(s)=K_\infty s+\frac{\sum_v Ik_i s}{s+\sigma_i} \quad \text{และ} \quad Y_2(s)=\frac{\sum_j k_j s}{s+\beta_i} \tag{3.12a}$$

$$Y_5(s)=\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \quad \text{และ} \quad Y_2(s)=K_{\infty'} s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \tag{3.12b}$$

$$Y_1(s)=\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \quad \text{และ} \quad Y_6(s)=K_{\infty'} s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \tag{3.13a}$$

$$Y_5(s)=K_\infty s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \quad \text{และ} \quad Y_6(s)=\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_i} \tag{3.13b}$$

ซึ่งจากสมการ (3.12a) และ (3.12b) สามารถออกแบบสร้างเป็นวงจร RC สุดท้ายในการคำนวณหาค่า Y_3 และ Y_4 จากสมการ (3.4) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$Y_3 - Y_4 = (Y_6 - Y_5) - (Y_1 - Y_2)$$

$$= Q(s) - \frac{P(s)}{D(s)} \tag{3.14a}$$

หรือ $$Y_4 - Y_3 = (Y_5 - Y_6) - (Y_2 - Y_1)$$

$$= Q(s) - \frac{P(s)}{D(s)} \tag{3.14b}$$

3.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว

สร้างวงจรจาก Transfer voltage ratio ฟังชั่น สมการที่ (2.20) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) \cdot H_4(s) \tag{3.15}$$

3.2.1 ตัวอย่างการออกแบบวงจร $H_1(s)$

$$H_1 = \frac{[s^2 + 5.5254s + 36.4608]}{[s^2 + 5.3714s + 36.597]} = \frac{P(s)}{Q(s)} \tag{3.16}$$

ให้ $D(s)$ = (s+5) (s+7) เมื่อ

$$\frac{P(s)}{D(s)} = Y_1 - Y_2 \;, \frac{Q(s)}{D(s)} = Y_6 - Y_5 \;, \frac{Q(s) - P(s)}{D(s)} = Y_3 - Y_4$$

หา Y_1, Y_2 จาก

$$\frac{P(s)}{SD(s)} = \frac{[s^2 + 5.5254s + 36.4608]}{s(s+5)(s+7)} \tag{3.17}$$

$$= \frac{A}{s} + \frac{B}{s+5} + \frac{C}{s+7} \tag{3.18}$$

หาค่า A ,B ,C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

131158

$$A=\frac{SP(s)}{SD(s)}\Big|_{s=0} \quad =\frac{s\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=0} \quad =1.0417$$

$$B=\frac{(s+5)P(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-5} \quad =\frac{(s+5)\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-5} \quad =-3.3834$$

$$C=\frac{(s+7)P(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-7} \quad =\frac{(s+7)\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-7} \quad =3.3416$$

นำค่า A ,B ,C ที่ได้ไปแทนลงในสมการ (4.18) จะได้

$$\frac{P(s)}{D(s)}=\frac{1.0417s}{s}-\frac{3.3834s}{s+5}+\frac{3.3416s}{s+7}=Y_1-Y_2 \tag{3.19}$$

$$\therefore \quad Y_1=\frac{1.0417s}{s}+\frac{3.3416s}{s+7} \tag{3.20}$$

$$Y_1=\frac{1}{0.96}+\frac{1}{0.2993+\dfrac{1}{0.4774s}} \tag{3.21}$$

$$\therefore \quad Y_2=\frac{3.3834s}{s+5} \tag{3.22}$$

$$Y_2=\frac{1}{0.2956+\dfrac{1}{0.6767s}} \tag{3.23}$$

หา Y_5, Y_6 จาก

$$\frac{Q(s)}{SD(s)}=\frac{[s^2+5.3714s+36.597]}{s(s+5)(s+7)} \tag{3.24}$$

$$=\frac{D}{s}+\frac{E}{s+5}+\frac{F}{s+7} \tag{3.25}$$

หาค่า D ,E ,F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D=\frac{SP(s)}{SD(s)}\Big|_{s=0} \quad =\frac{S\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=0} \quad =1.0456$$

$$E=\frac{(s+5)Q(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-5} \quad =\frac{(s+5)\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-5} \quad =-3.4740$$

$$F=\frac{(s+7)Q(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-7} \quad =\frac{(s+7)\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-7} \quad =3.4284$$

นำค่า D ,E ,F ที่ได้ไปแทนลงในสมการ (3.25) จะได้

$$\frac{Q(s)}{D(s)}=\frac{1.0456s}{s}-\frac{3.474s}{s+5}+\frac{3.4284s}{s+7}=Y_6-Y_5 \tag{3.26}$$

$$\therefore \quad Y_6=\frac{1.0456s}{s}+\frac{3.4284s}{s+7} \tag{3.27}$$

$$Y_6=\frac{1}{0.9564}+\frac{1}{0.2917+\dfrac{1}{0.4898s}} \tag{3.28}$$

$$\therefore \quad Y_5=\frac{3.474s}{s+5} \tag{3.29}$$

$$Y_5=\frac{1}{0.2879+\dfrac{1}{0.6948s}} \tag{3.30}$$

หา Y_3, Y_4 จาก

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)}=(Y_6-Y_5)-(Y_1-Y_2) \tag{3.31}$$

นำค่าจากสมการ (3.26) และ (3.19) มาแทนในสมการ (3.31) จะได้

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)}=\left[\frac{1.0456s}{s}-\frac{3.474s}{s+5}+\frac{3.4284s}{s+7}\right]-\left[\frac{1.0417}{s}-\frac{3.3834s}{s+5}+\frac{3.3416s}{s+7}\right] \tag{3.32}$$

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)}=\left[\frac{0.0039s}{s}-\frac{0.0906s}{s+5}+\frac{0.0868s}{s+7}\right]=Y_3-Y_4 \tag{3.33}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \quad Y_3 = \frac{0.0039s}{s} + \frac{0.0868s}{s+7} \tag{3.34}$$

$$Y_3 = \frac{1}{256.4103} + \frac{1}{11.5207 + \frac{1}{0.0124s}} \tag{3.35}$$

$$\therefore \quad Y_4 = \frac{0.0906s}{s+5} \tag{3.36}$$

$$Y_4 = \frac{1}{11.037 + \frac{1}{0.0181s}} \tag{3.37}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับ สมการ

$$H_2 = \frac{[s^2 + 6.9012s + 24.5674]}{[s^2 + 9.5166s + 25.6666]} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

$$H_3 = \frac{[s^2 + 33.8696s + 619.9923]}{[s^2 + 8.1402s + 28.9364]} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

$$H_4 = \frac{s + 5.4058}{s + 4.9718} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

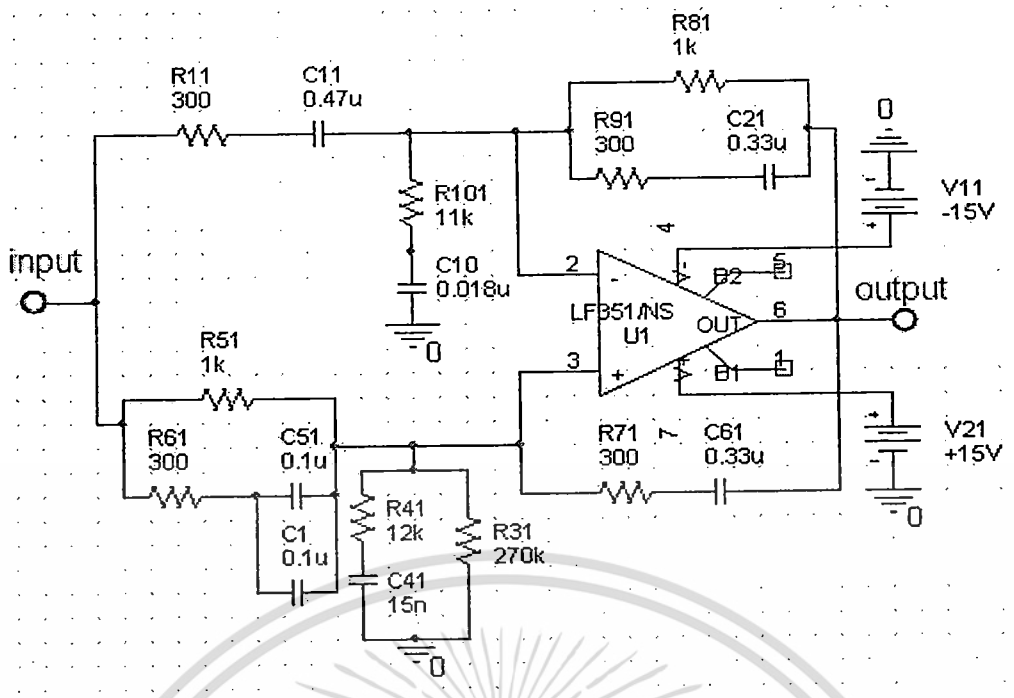
สามารถออกแบบได้ด้วยวิธีการเดียวกัน

3.3 จำลองการทำงานของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัวโดยใช้โปรแกรม PSpice

PSpice เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือการออกแบบการทำงาน พร้อมยังสามารถจำลองดูผลลัพธ์ของการตอบสนองทางขนาดและทางเฟส ก่อนที่จะนำวงจรดังกล่าวไปทำการสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริง

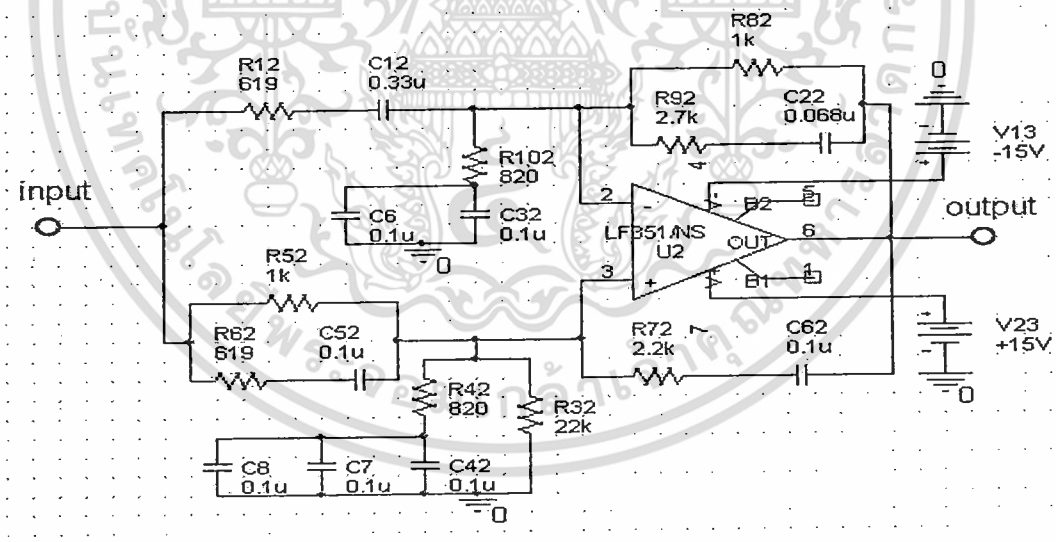
นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_1 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจรรูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรสมการ $H_1(s)$

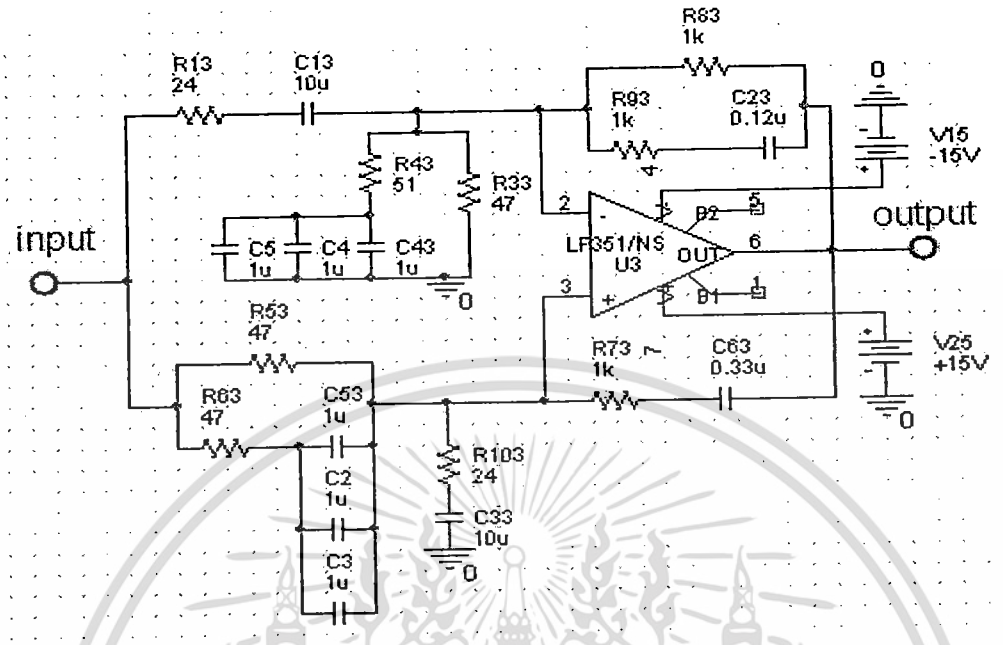
นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_2 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจรรูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมการ $H_2(s)$

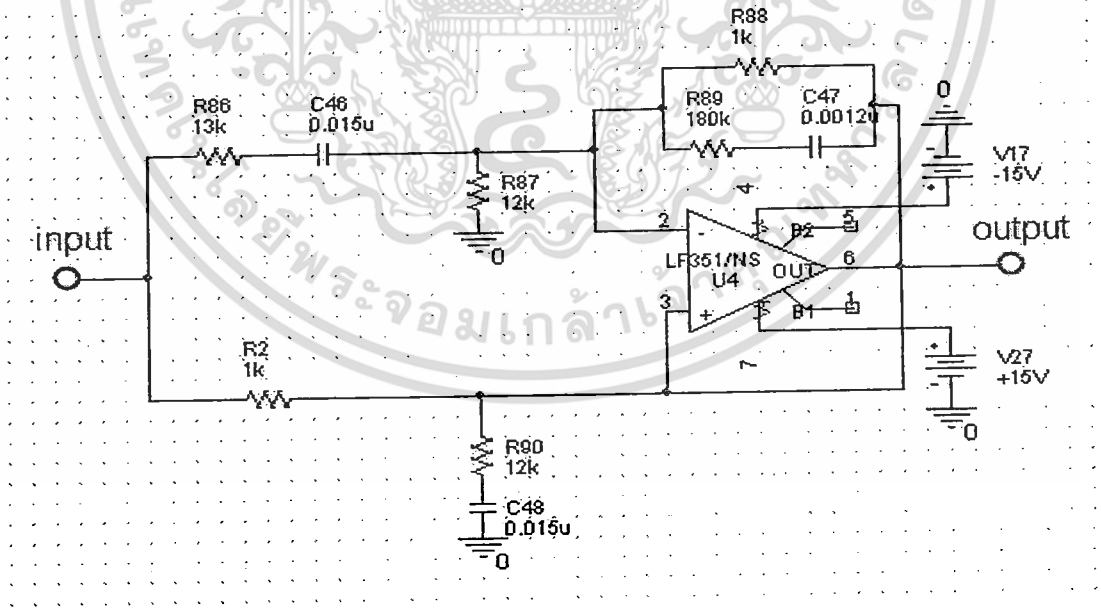
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_3 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจรรูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมการ $H_3(s)$

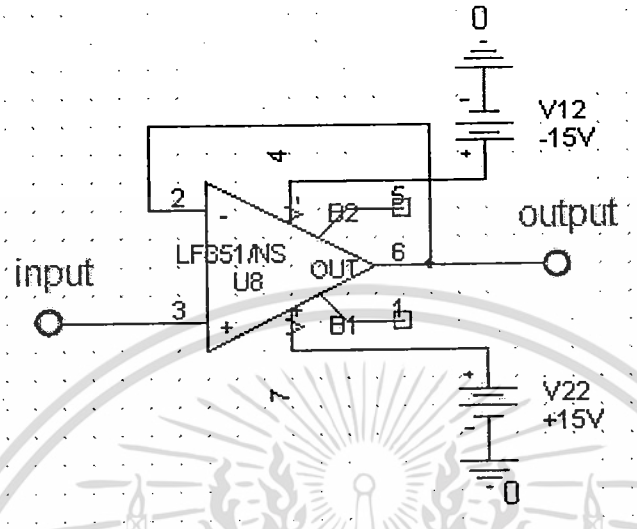
นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_4 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจร รูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมการ $H_4(s)$

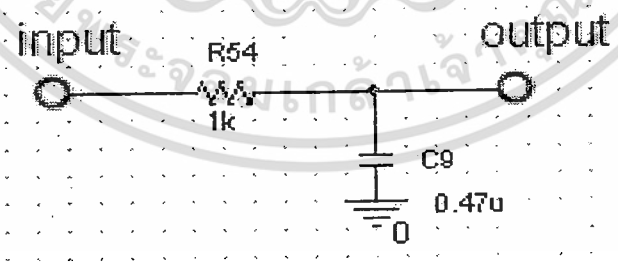
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำวงจรในรูปที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 คาสเคดกัน โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 เป็นบัพเฟอร์ตัวเชื่อมแต่ละวงจรจะได้วงจร ดังรูปที่ 3.6



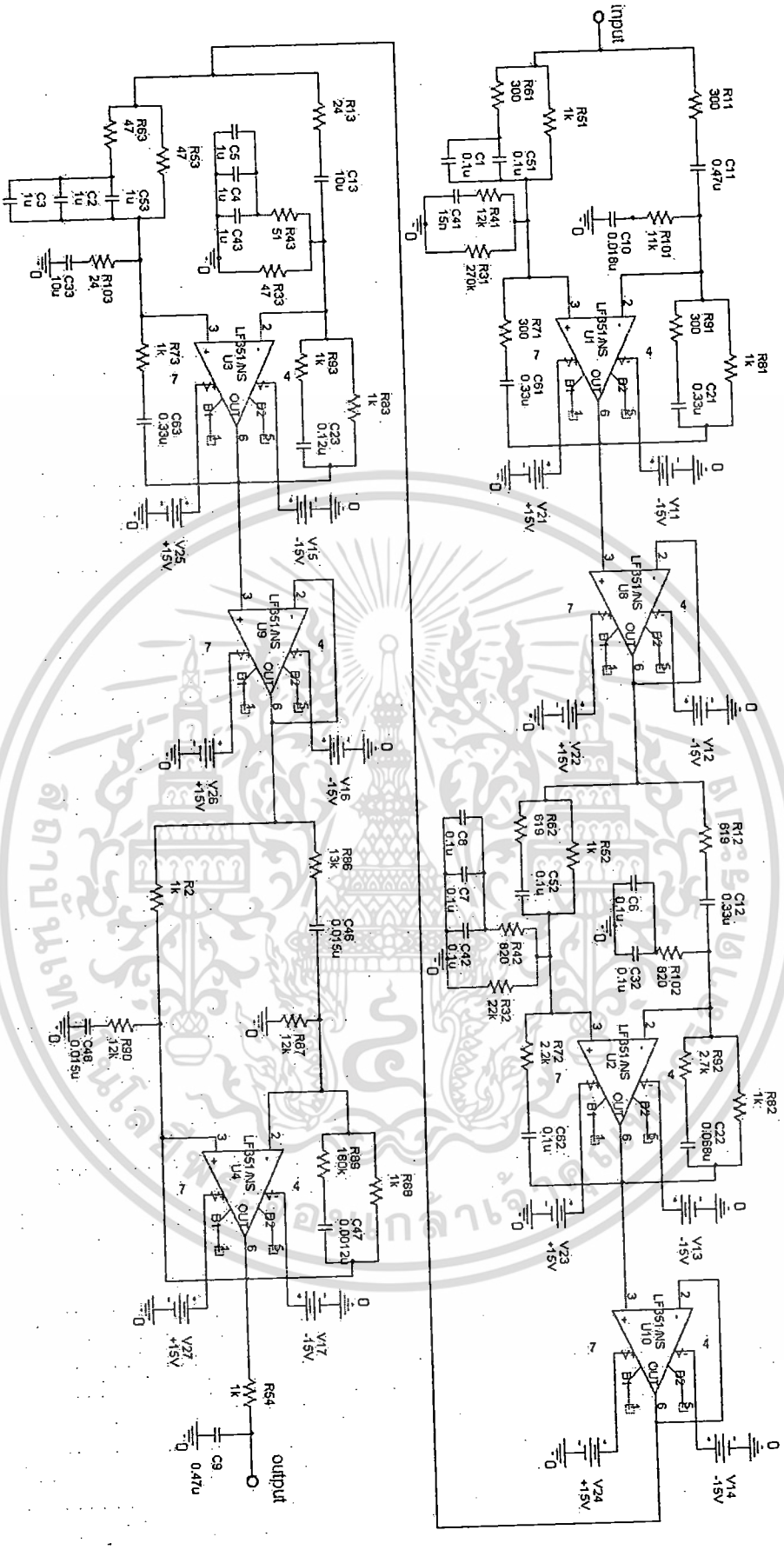
รูปที่ 3.6 วงจรบัพเฟอร์

เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุตที่ได้ยังมีสัญญาณความถี่สูงอยู่ ฉะนั้นจึงนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมาใช้ในการกรองความถี่สูงออกให้เลือกเฉพาะความถี่ต่ำที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

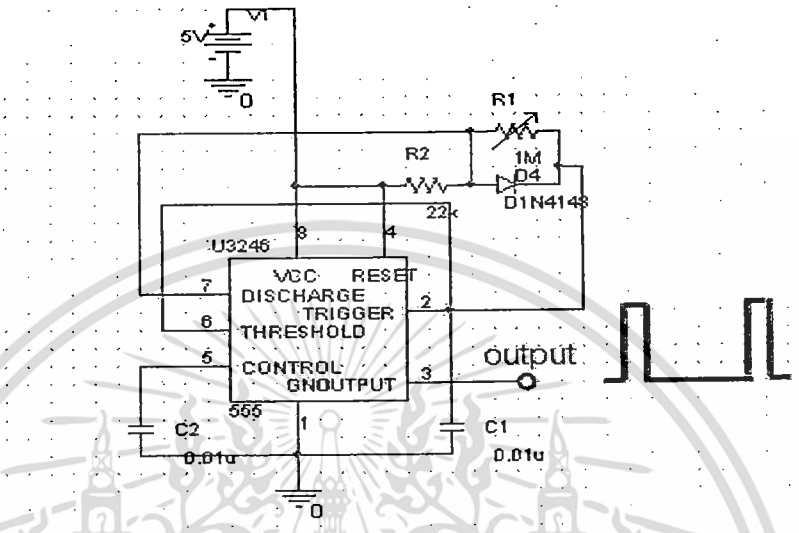


รูปที่ 3.8 วงจรรวมออปแอมป์หนึ่งตัวนำมาคาสเคดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณอินพุต

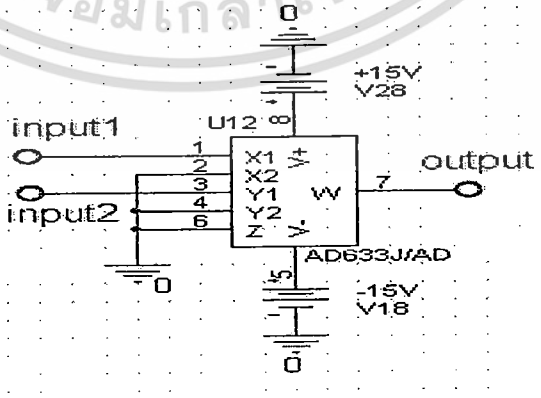
ทำการสร้างอินพุตซึ่งเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแคบๆ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9วงจรสัญญาณอินพุต

3.5 จำลองการทำงานของวงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier)

ส่วนนี้คือการนำสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์จากวงจรดังรูปที่ 3.6 มาต่อเข้ากับวงจรมัลติพลายเออร์ที่อินพุตขาหนึ่ง ส่วนอินพุตอีกขาหนึ่งคือสัญญาณพาหะ (carrier)

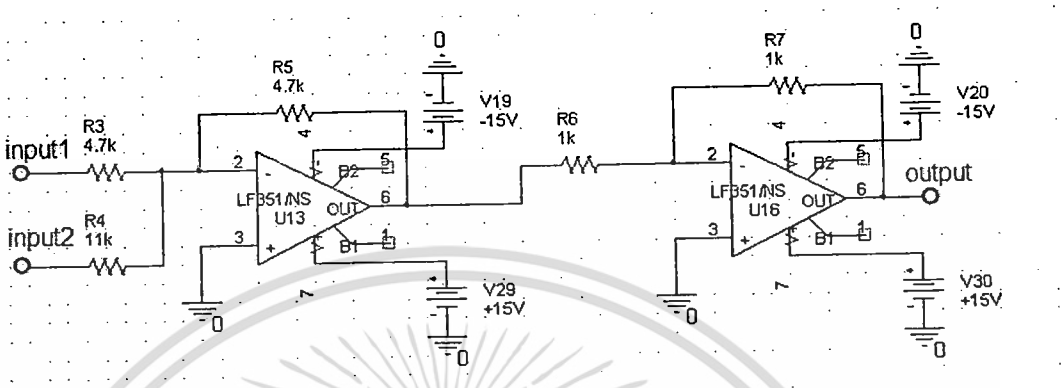


รูปที่ 3.10 วงจรมัลติพลายเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 จำลองการทำงานของวงจร Adder

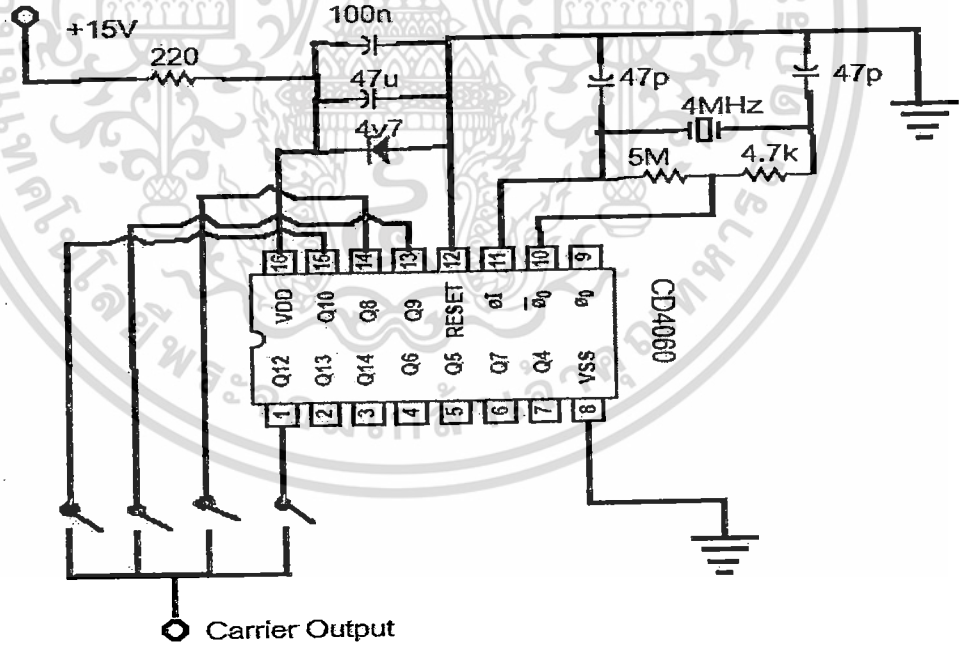
ส่วนนี้คือ การนำสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากวงจรดังรูปที่ 3.8 รวมกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์จากวงจรดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.11 วงจรบวก(Adder)

3.7 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณพาหะ (Carrier)

ทำการสร้างสัญญาณพาหะ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสัญญาณพาหะ (Carrier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

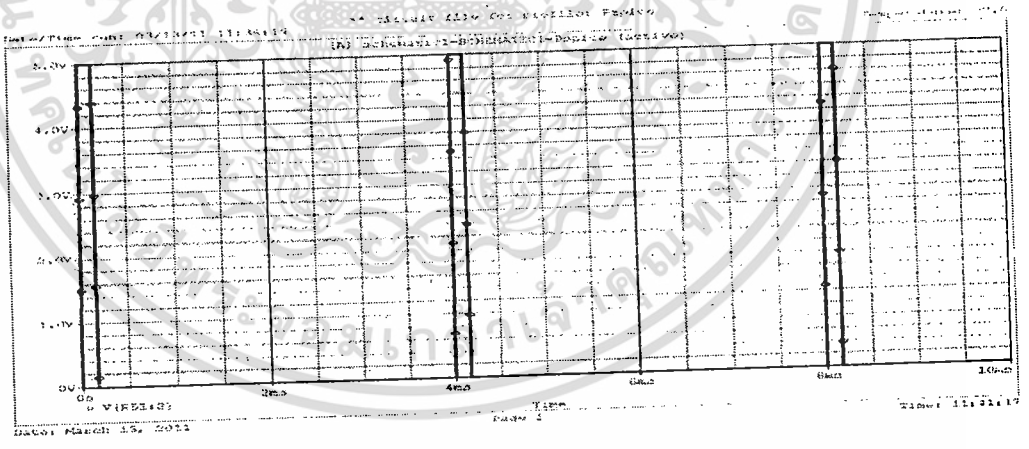
เมื่อได้รูปแบบวงจรต้นแบบที่ใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนทางขนาดและเฟสแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำอาวงจรไปทดลองสร้างจริง โดยเปรียบเทียบการจำลองผลของวงจรบนโปรแกรม PSpice กับผลตอบสนองจากวงจรจริงที่ทำการต่อกับเครื่องออสซิโลสโคป

ในงานวิจัยนี้ จะแสดงผลสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้แก่ระบบ สัญญาณเอาท์พุต สัญญาณเอาท์พุตคูณกับสัญญาณพาหะ โดยจะแสดงในรูปของกราฟ

4.2 สัญญาณอินพุต

สัญญาณอินพุตที่ใช้ป้อนเป็นสัญญาณอิมพัลซ์

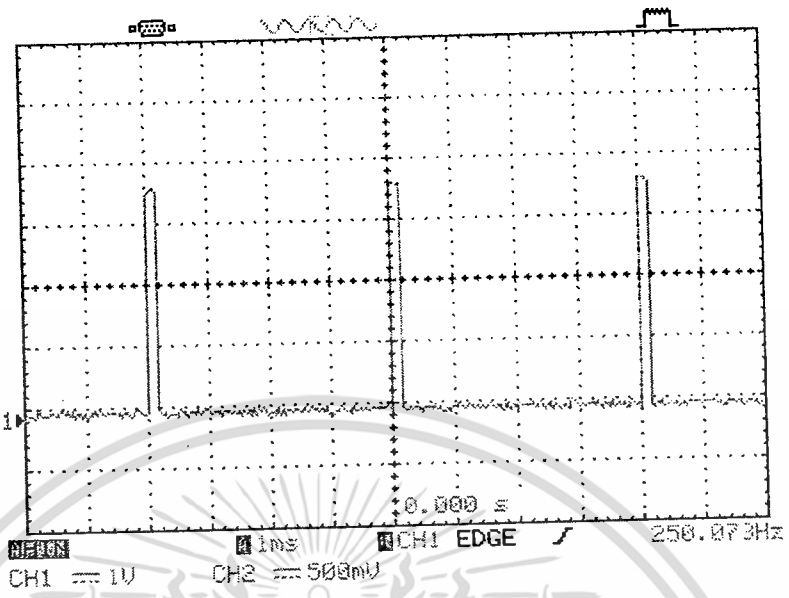
4.2.1 สัญญาณอินพุตจากการจำลองผลบนโปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.1 สัญญาณอินพุตบนโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สัญญาณอินพุตที่วัดได้จากวงจรจริง

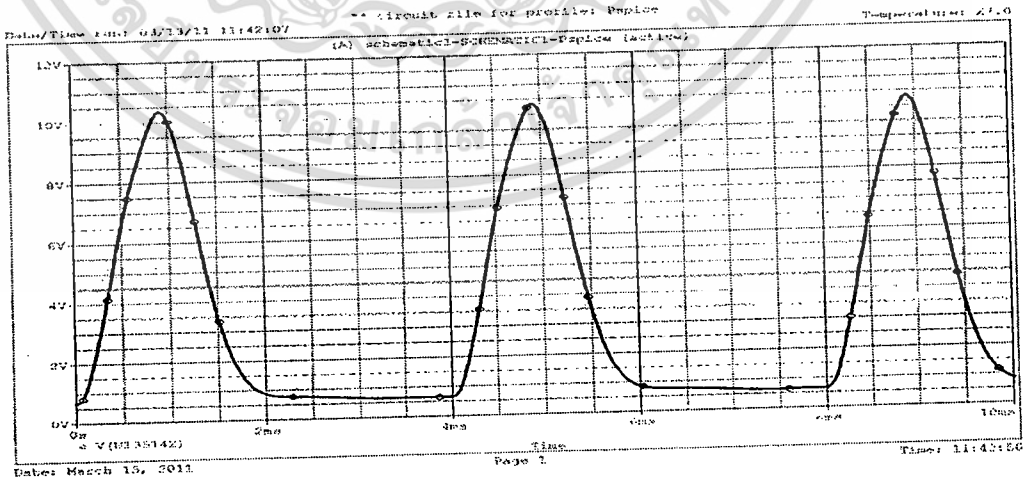


รูปที่ 4.2 สัญญาณอินพุตวัดโดยเครื่องออสซิโลสโคป

4.3 สัญญาณเอาท์พุต

สัญญาณเอาท์พุตหรือผลตอบสนองของระบบจะได้เป็นสัญญาณซายน์ เนื่องจากสมการต้นแบบที่ใช้ในการสร้างวงจรคือสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์

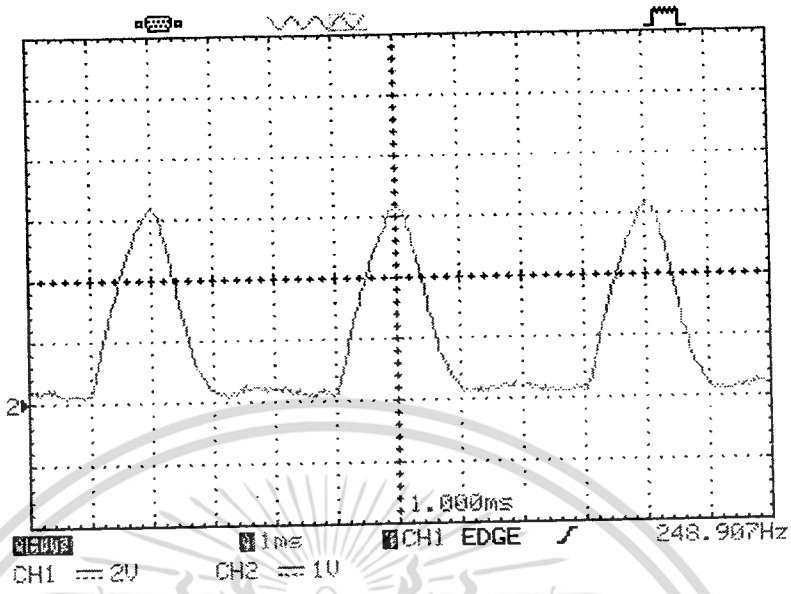
4.3.1 สัญญาณเอาท์พุตจากการจำลองผลบนโปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.3 สัญญาณเอาท์พุตบนโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

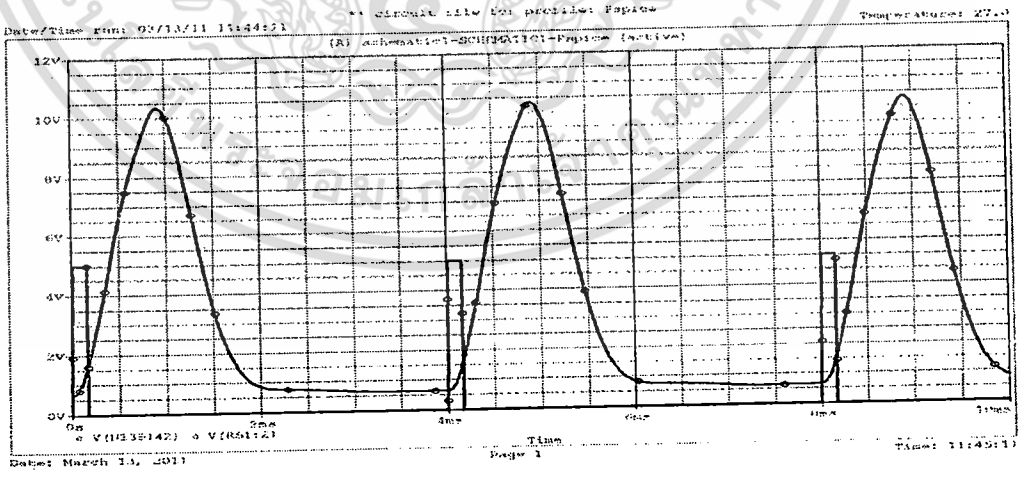
4.3.2 สัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป



รูปที่ 4.4 สัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป

4.4 สัญญาณอินพุตเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุต

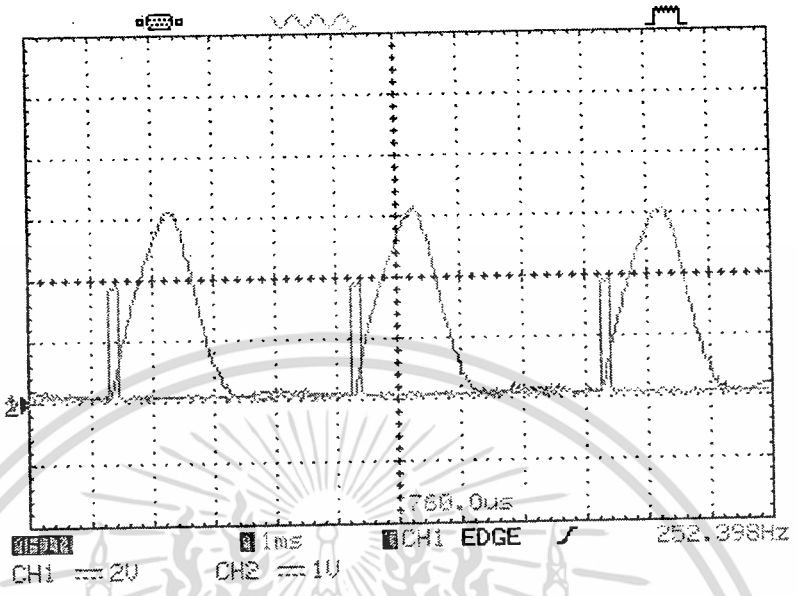
4.4.1 สัญญาณอินพุตเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจำลองผลโดยโปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตบทโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

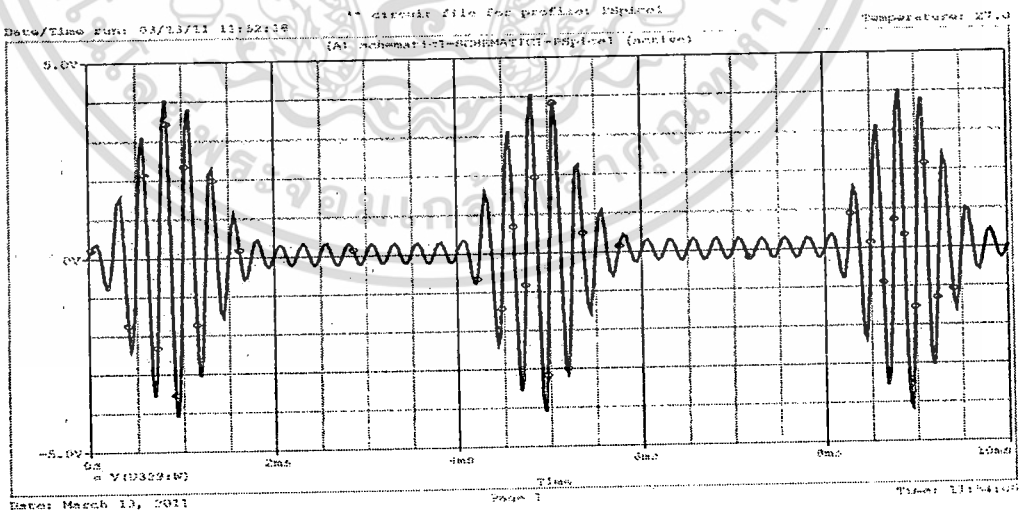
4.4.2 สัญญาณอินพุตวัดเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจากวงจรจริง



รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุตจากเครื่องออสซิโลสโคป

4.5 สัญญาณเอาท์พุตคูณกับสัญญาณพาหะ

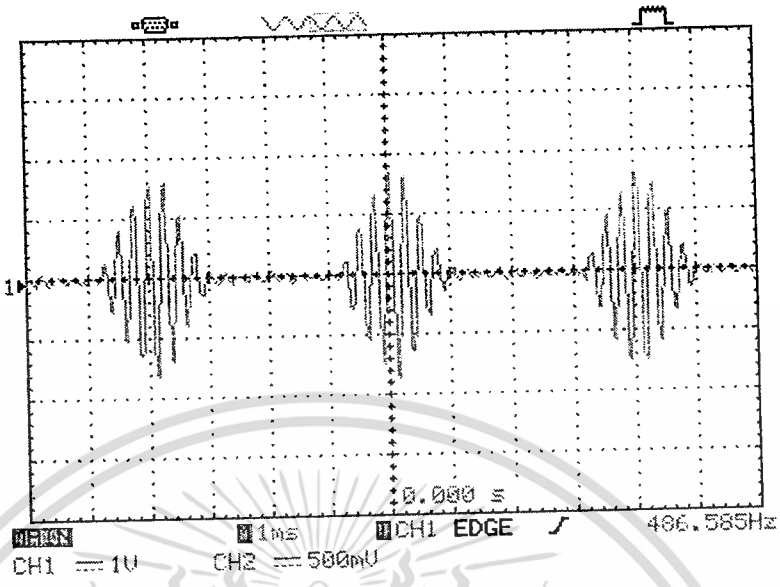
4.5.1 สัญญาณเอาท์พุตคูณกับสัญญาณพาหะจำลองผลบนโปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะบนโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

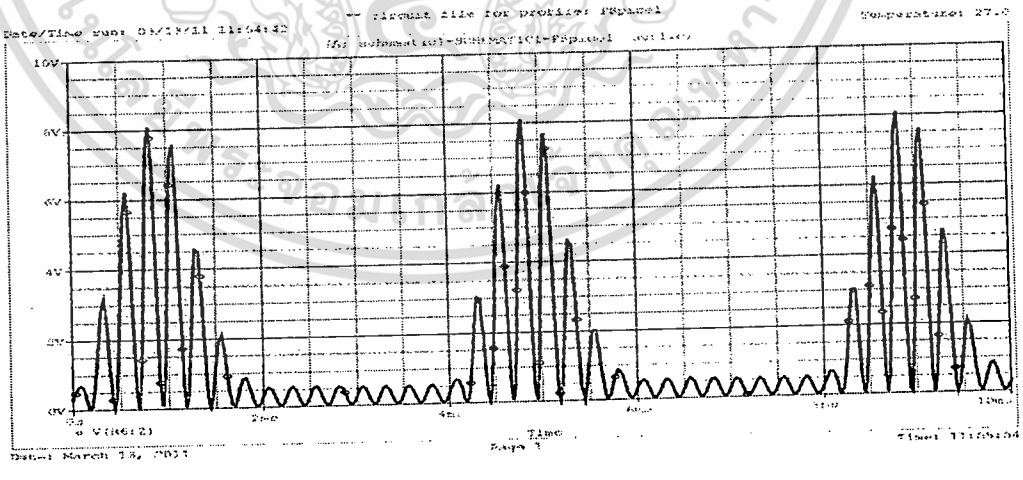
4.5.2 สัญญาณเอาท์พุตคูณกับสัญญาณพาหะ จากการวัดจากวงจรจริง



รูปที่ 4.8 สัญญาณเอาท์พุตเมื่อคูณกับสัญญาณพาหะจากเครื่องออสซิโลสโคป

4.6 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์

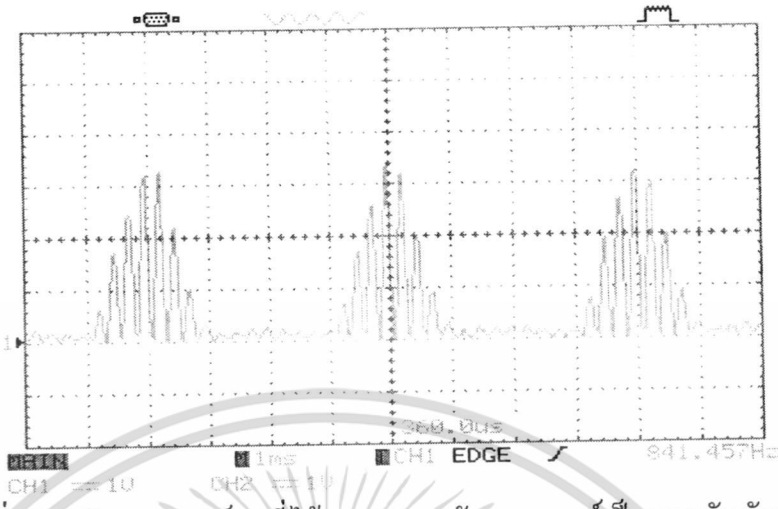
4.6.1 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาหะเป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ จำลองผลบนโปรแกรม PSpice



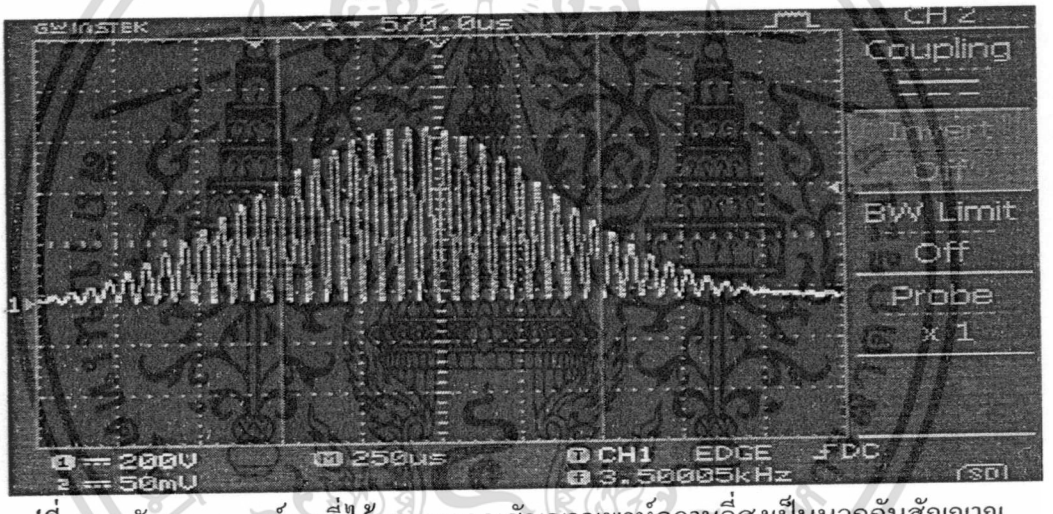
รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์เป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์บนโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

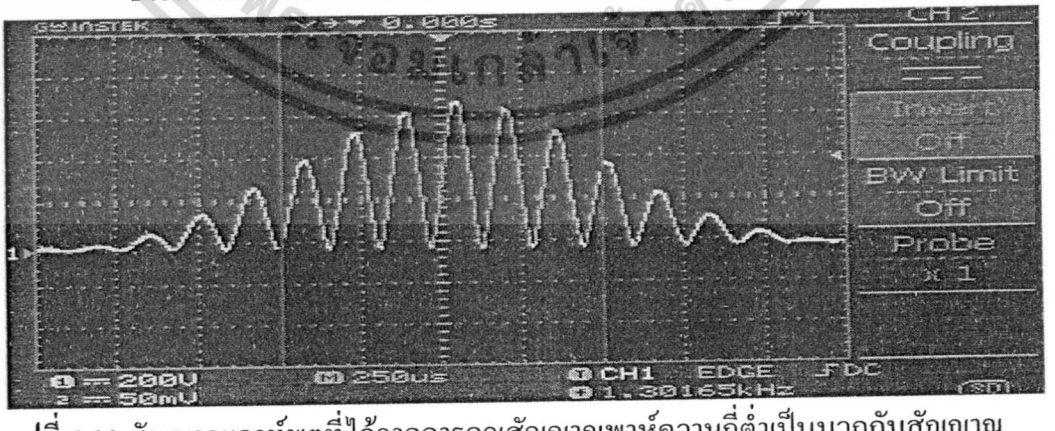
4.6.2 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์เป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ วัดจาก วงจรจริง



รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์เป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ วัดจากวงจรจริง



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์ความถี่สูงเป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ วัดจากวงจรจริง



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการคูณสัญญาณพาห์ความถี่ต่ำเป็นบวกกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ วัดจากวงจรจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบการวัดความผิดเพี้ยนในระบบการส่งสัญญาณเสียง

ในระบบ Loud Speaker ที่ดี จุดตัดข้าม(Crossover) ระหว่างความถี่กลางและความถี่สูงจะต้องมีคุณสมบัติตามอุดมคติ 2 ข้อ คือ

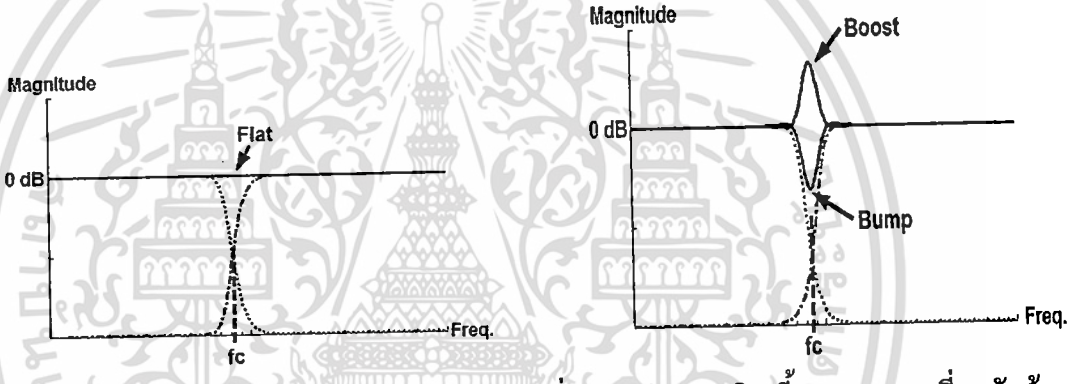
1) ผลรวมทางขนาด (Magnitude Response)

$$|H_{\varepsilon}(\omega)| = |H_{LP}(\omega)| + |H_{HP}(\omega)|$$

$$= 1 \quad (0\ \text{dB})$$

2) ผลรวมทางเฟส (Phase Response)

$$\varphi_{\sum}(\omega) = 0$$



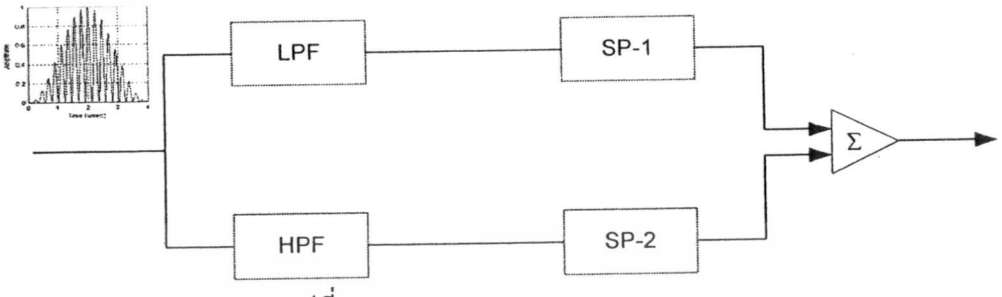
รูป 4.13 ก.ความถี่จุดตัดข้าม (Crossover frequency)ที่ดี รูป ข.การผิดเพี้ยนของความถี่จุดตัดข้าม

รูป 4.13 ก. แสดงความถี่จุดตัดข้าม(Crossover frequency , f_c)ของระบบเสียงที่ดี และรูป 4.12 ข. แสดงการผิดเพี้ยนของระบบ กรณีที่การ Crossover ไม่เป็นไปตามกฎทั้ง 2 ข้อดังกล่าวข้างต้น จะเกิดผลของสัญญาณทดสอบดังรูป ข ซึ่งจากรูป ก. และ ข. นี้จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการผิดเพี้ยนทางขนาดหรือผิดเพี้ยนทางเฟส สามารถสังเกตเห็นได้ง่ายจากการใช้ออสซิโลสโคป (Oscilloscope) วัดผลตอบสนองทางขนาดและเฟส โดยพิจารณาจากฐาน (baseline) ของสัญญาณทดสอบโดยการวัดขนาดสูงสุดของฐาน (baseline peak) เทียบกับ Peak level จะทำให้รู้ถึงขนาดและดีเลย์ที่ผิดเพี้ยนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

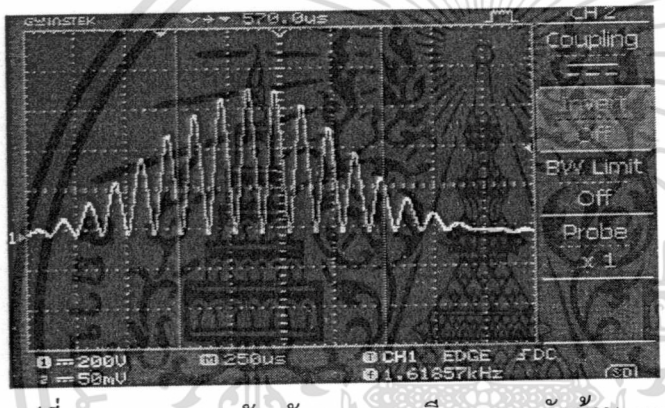
4.7.1 การทดสอบ **วัด** จุดตัดข้าม(Crossover) ของวงจร cross over network แสดงดังไดอะแกรม

ในรูป 4.13

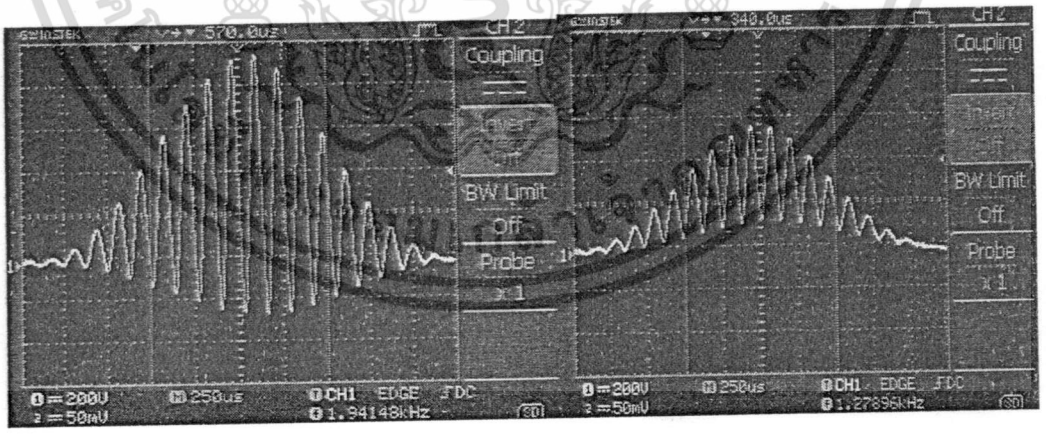


รูปที่ 4.14

4.7.2 ผลการวัดจากวงจรจริงแสดงในรูปที่ 4.15

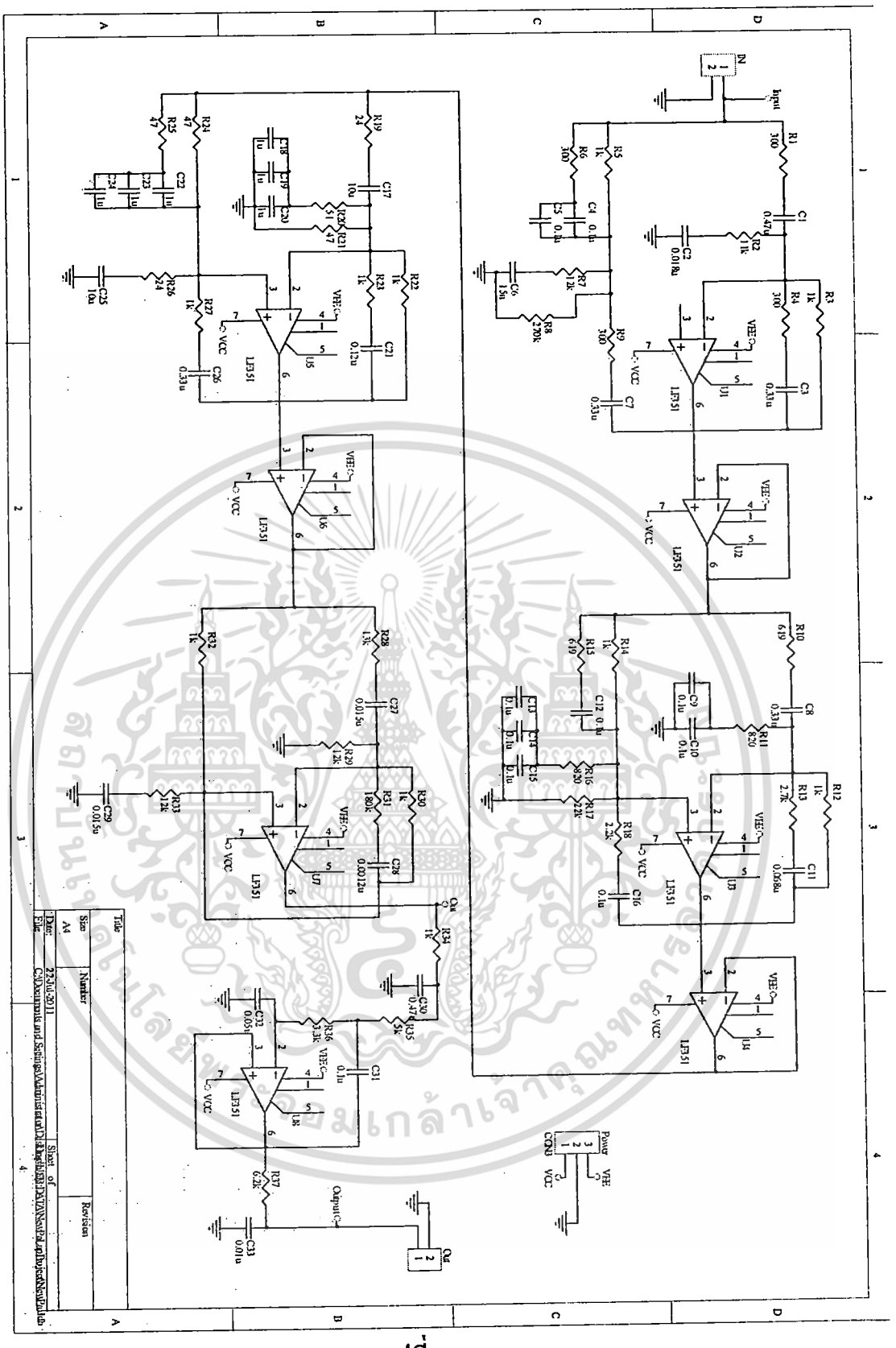


รูปที่ 4.15 a. ผลการวัด สัญญาณ กรณี วงจรจุดตัดข้าม crossกันพอดี สัญญาณไม่ผิดเพี้ยน



รูปที่ 4.15 b. ผลการวัด สัญญาณ กรณีเกิด boost signal และbump signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 วงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผล

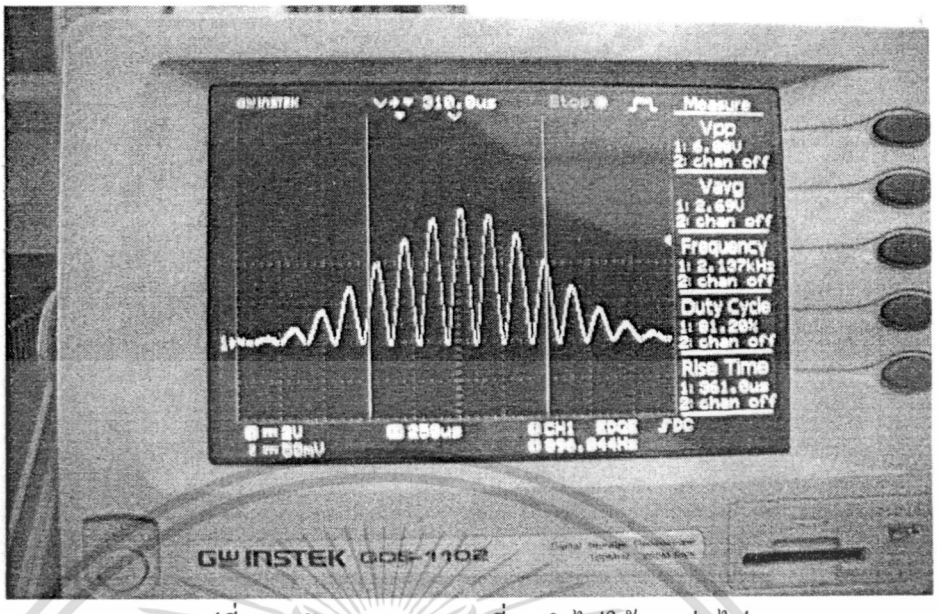
5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองวิธีต่างๆที่ใช้ในการหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ พบว่าการใช้วิธีการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์ในขอบข่ายของเวลาจะทำได้ง่ายกว่าการประมาณในขอบข่ายของความถี่ ในโครงงานนี้ได้ใช้ทฤษฎีของเบสเสลโพลิโนเมียลเข้ามาช่วยในการประมาณสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ในเทอมส่วน เพราะสมการของเบสเสลโพลิโนเมียลจะมีรากอยู่ทางด้านลบ โดยระบบที่จะเสถียรได้นั้นต้องมีรากอยู่ทางด้านลบ ส่วนสัมประสิทธิ์ของเทอมเศษ ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการหาค่าที่เหมาะสม

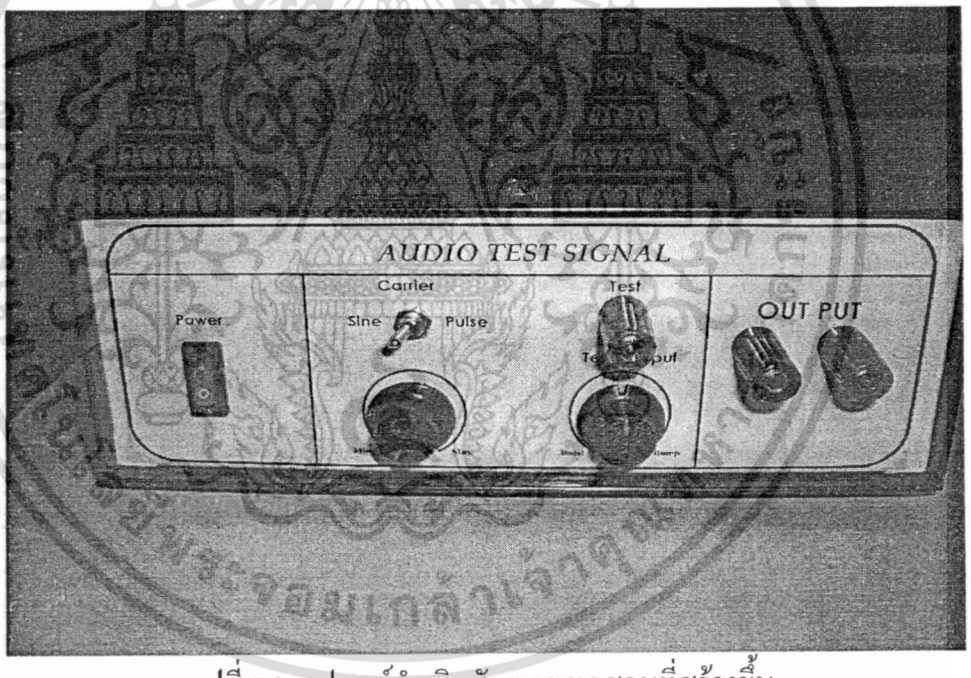
ในส่วนของการวิเคราะห์และออกแบบหาสมการต้นแบบเพื่อนำมาสร้างวงจรของสัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ พบว่าเมื่อใช้สมการที่มีจำนวนสมการลำดับที่เพิ่มมากขึ้นจะได้สัญญาณซายน์กำลังสองพัลส์ที่ใกล้เคียงกับสัญญาณซายน์ในอุดมคติมากขึ้น แต่เนื่องจากสมการที่มีลำดับที่มากขึ้น การสร้างวงจรจะยุ่งยากและอุปกรณ์มีราคาแพงมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้สมการลำดับที่เจ็ด เพราะสมการลำดับที่เจ็ด จะให้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณในอุดมคติเป็นที่ยอมรับได้ วงจรไม่ยุ่งยากจนเกินไป จึงได้นำสมการลำดับที่เจ็ดมาใช้ในการสร้างและออกแบบวงจรต่อไป

การออกแบบวงจรนั้นได้มีการออกแบบและจำลองผลบนโปรแกรม PSpice ก่อนในขั้นต้น เพื่อสังเกตผลตอบสนองของระบบ เมื่อผลตอบสนองของระบบเป็นที่น่าพอใจ จึงทำการสร้างวงจรจริง จากผลการทดลองเปรียบเทียบพบว่า ผลตอบสนองของวงจรที่สร้างจริง และผลการตอบสนองด้วยโปรแกรม PSpice สอดคล้องกับผลตอบสนองของซายน์กำลังสองพัลซ์ในอุดมคติ โดยให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

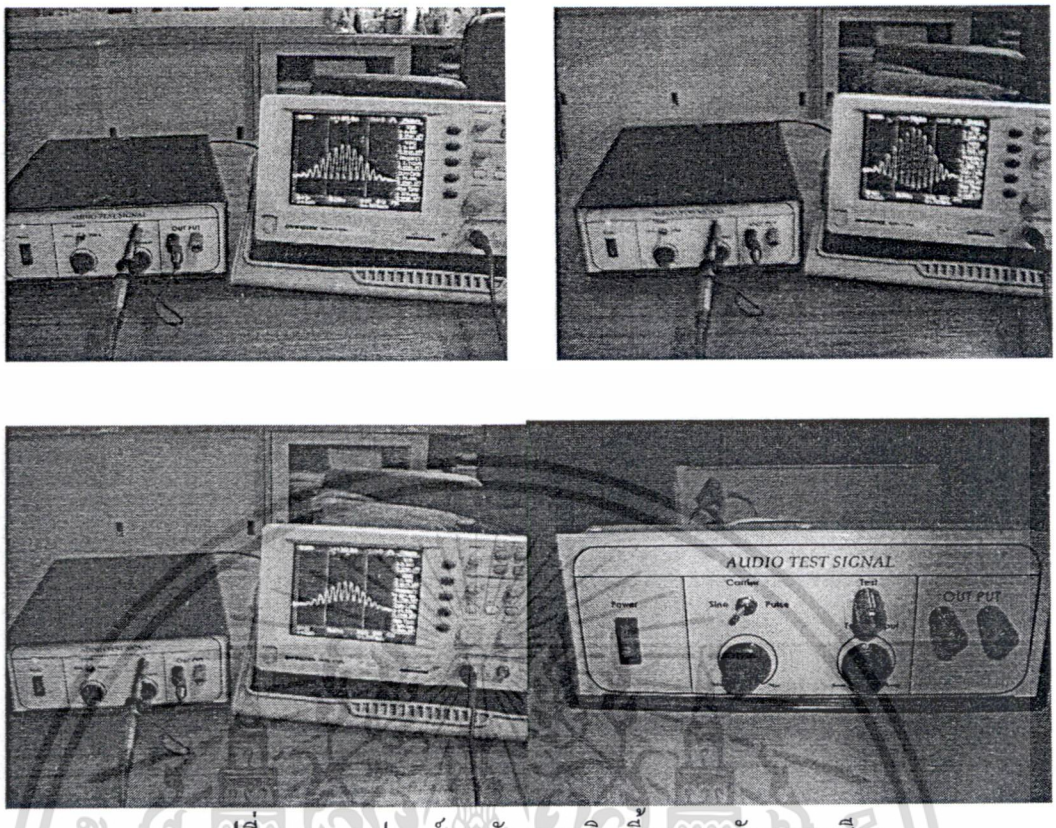


รูปที่ 5.1 สัญญาณทดสอบที่จะนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณทดสอบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ชุดอุปกรณ์การวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง

5.2 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

1. การสร้างสมการที่มีจำนวนลำดับที่เพิ่มมากขึ้นจะให้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น แต่จะทำให้วงจรมีขนาดใหญ่

2. เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แบบอนาลอกเท่านั้น ฉะนั้นการพัฒนาจึงควรมีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในแบบดิจิตอลต่อไป โดยอุกาณ์จะมีขนาดเล็กลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] L. Kendall , "Analog **filters**",2 nd ed. United States of America : Prentice-Hall, 2002.

[2] L. Kendall , "Time-domain synthesis of linear networks",United States of America Prentice-Hall, 1971.

[3] S. McKeever and M.Foote, "The Random House science encyclopedia", Toronto:Random House, 1993.

[4] W.E. Thomson, "The Synthesis Of A Network To Have A Sine-Suuared Impulse Response",23 June 1952

[5] M.A. Masnadi-Shirazi and M. Ghasemi, "Laguerre Digital Filter Design",May 1995

[6] A. Venkataraman and A.V. Oppenheim,"Signal Approximation Using The Bilinear Transform",April 2008

[7] K. Steiglits, "Rational Transform Approximation via the Laguerre Spectrum",1965

[8] กนก เจนจิระพงศ์เวช. การตรวจสอบสัญญาณวีดีโอ.

[9] ดำรง ทิพย์โยธา. คู่มือโปรแกรมสำเร็จรูป Mathcad Mathematica Matlab Maple. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้