สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์โดย ใช้สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลซ์

Program Measurement of Amplitude and Group Delay Chrominance Distortion with the Modulated 20T Sine-Squared Pulse

โดย

นางสาวนภาพร อุ่นแสงจันทร์

นายวิทธวัช แป้นอ่อง

เลขหมู่ .....
เลขทะเบียน 83085
วัน,เดือน,ปี 5 ส.ค. 2551

.b 11914091
i. .. ..

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAM MEASUREMENT OF AMPLITUDE AND GROUP DELAY CHROMINANCE DISTORTION WITH THE MODULATED 20T SINE-SQUARED PULSE

BY

MISS NAPAPORN AUNSANGCHAN

MR. WITAWAT PANONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ปดีเลย์ โดยใช้สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์
Thesis Title	Program Measurement of Amplitude and Group Delay Chrominance Distortion with the Modulated 20T Sine-Squared Pulse
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนภาพร อุ่นแสงจันทร์ รหัสนักศึกษา 47012111
	นายวิทธวัช แป้นอ่อง รหัสนักศึกษา 47012138
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วันวิสา ชัชวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	ปีการศึกษา 2550

หัวข้อปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

.....

(อาจารย์วันวิสา ชัชวงษ์)

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์ โดยใช้สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนภาพร อุ่นแสงจันทร์
	นายวิทธวัช แป้นอ่อง
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. วันวิสา ชัชวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2550

บทคัดย่อ

ในระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์สี สัญญาณถูกส่งผ่านตัวกลางต่างๆทำให้คุณภาพของสัญญาณผู้รับนั้นเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งเป็นปัญหากับผู้รับสัญญาณ ปริญญานิพนธ์นี้กล่าวถึงโปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์ของสัญญาณโทรทัศน์สี โดยใช้สัญญาณมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์มาทดสอบ ในการออกแบบโปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนดังกล่าวข้างต้น ได้นำเอาสัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์มาช่วยในการวัดค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์สี ผลการทดลองโปรแกรมดังกล่าวนั้นจะให้ผลใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Program Measurement of Amplitude and Group Delay Chrominance Distortion with the Modulated 20T Sine-Squared Pulse	
Student	Miss Napaorn	Aunsangchan
	Mr.Wittawat	Panoang
Advisor	Miss Vanvisa	Chutchavong
Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Kanok	Janchitrapongvej
Gradute Level	Bachelor Degree Of Information Engineering	
Academic Year	2007	

ABSTRACT

In color television signal transmission system, vedio signal which transmit through channel are normally deteriorate the color television signal. It's problem for receiver. This project is imply the programe measure for Amplitude and Group Delay values. It tests color television used the Modulated 20T Sine-Squared Pulse. The Programe Designing bring the Modulated 20T Sine-Square Pulse help to measure distortion of color television signal. The experiment and theory are results by the computer programe.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นผลสำเร็จ โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆ ฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช และอาจารย์วันวิสา ชัชวงษ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำในเรื่องต่างๆ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้วิชาความรู้ทางด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณบูรพาจารย์ทุกท่านผู้เขียนเอกสารและตำราอ้างอิงที่เป็นประโยชน์ ขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณพี่ๆ(บางคน)ที่ห้องฮาร์ดแวร์และmr_S จาก www.todaystep.com ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านอุปกรณ์และคำแนะนำในการทำอุปกรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ-จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ได้คณะผู้จัดทำได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวอันเคารพยิ่ง ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆด้าน จึงขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นภาพร อุ่นแสงจันทร์

วิทธวัช แป้นอ่อง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฌ
บทที่1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของโครงงาน	1
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 หลักการของการส่งและการรับโทรทัศน์สี	5
2.2 การส่งและการรับโทรทัศน์สี	5
2.3 การส่งและการรับโทรทัศน์สีในทางปฏิบัติ	6
2.4 สัญญาณโทรทัศน์สีประกอบด้วยอะไรบ้าง	7
2.5 ระบบโทรทัศน์	10
2.5.1 โทรทัศน์สีระบบเอ็น.ที.เอส.ซี.	10
2 5.2 โทรทัศน์สีระบบ พี.เอ.แอล.	14
2.5.3 โทรทัศน์สีระบบ เอส.อี.ซี.เอ.เอ็ม.	16
2.6 อุปกรณ์แสดงค่า (Hardware)	16
2.61 ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์	16
2.6.2 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51	17
2.6.3 ลักษณะการจัดขาภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 ความผิดเพี้ยนในระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ 19

3.1 ชนิดของความผิดเพี้ยน 19

3.2 ความผิดเพี้ยนเชิงเส้น 20

3.3 ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณส่องสว่าง 20

3.4 ความผิดเพี้ยนรูปสัญญาณลองไทม์ 20

3.5 ความผิดเพี้ยน ฟิลด์-ไทม์เวฟฟอร์ม 21

3.6 ความผิดเพี้ยนไลน-ไทม์เวฟฟอร์ม 23

3.6.1 ความผิดเพี้ยนที่เกิดเนื่องจากคุณลักษณะที่ความถี่กลาง 25

3.6.2 ความผิดเพี้ยนที่เกิดเนื่องจากคุณลักษณะที่ความถี่สูง 27

3.7 ความผิดเพี้ยนชอท -ไทม์ เวฟฟอร์ม 27

3.8 การวัดค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์ 28

3.8.1 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์ โดยใช้สัญญาณพัลส์ มอดูเลชั่นไซน์กำลังสอง 28

3.8.2 การคำนวณหาความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมมอดูเลตพัลส์ 20T 30

3.8.3 ทฤษฎีและการหาสูตรสำเร็จของความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์ 32

3.9 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว 35

3.10 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดียว 36

3.11 กรณีที่เกิดการผิดเพี้ยนทางอัตราการขยายและดีเลย์ พร้อมกัน 37

บทที่ 4 ผลการทดลองและผลลัพธ์ 39

4.1 ผลการทดลองการใช้โปรแกรมวัดความผิดเพี้ยนร่วมกับฮาร์แวร์ 39

4.2 Software 43

4.3 Hardware 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุป 40

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 40

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข 40

5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของภาพในรูปซึ่งมีพื้นที่เท่ากัน 5

รูปที่ 2.2 ระบบการส่งและการรับโทรทัศน์สี 6

รูปที่ 2.3 สัญญาณคัลเลอร์เบิรสต์ 9

รูปที่ 2.4 สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีของโทรทัศน์สีระบบ เอ็น.ที.เอส.ซี. 10

รูปที่ 2.5 การกระจายกำลังงานที่ความถี่ต่างๆในสัญญาณที่ให้ภาพสี 13

รูปที่ 2.6 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 18

รูปที่ 3.1 แสดงขอบเขตชนิดของความผิดเพี้ยน 20

รูปที่ 3.2 แสดงความผิดเพี้ยนรูปสัญญาณลองไทม์ 21

รูปที่ 3.3 ความผิดเพี้ยนฟีลด์-ไทม์เวฟฟอร์ม 22

รูปที่ 3.4 แสดงความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณสี่เหลี่ยม Sag 23

รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมต่อคุณลักษณะ
ทางขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ 25

รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองของสัญญาณต่อ LPF ทางอุดมคติและวงจร RC 27

รูปที่ 3.7 สัญญาณพัลส์ ซายน์กำลังสองเทียบกับสัญญาณซายน์ 28

รูปที่ 3.8 รูปวงจรผลิตสัญญาณรวมมอดูเลต 20T 29

รูปที่ 3.9 แสดงการรวมสัญญาณ (b) + (c) 30

รูปที่ 3.10 แสดงความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมพัลส์ 20 T 32

รูปที่ 3.11แสดงความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว 35

รูปที่ 3.12 แสดงการผิดเพี้ยนของดีเลย์เพียงอย่างเดียว 37

รูปที่ 3.13 แสดงความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายและดีเลย์ พร้อมกัน 37

รูปที่4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง 39

รูปที่ 4.2 รูปแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = +100 ns 39

รูปที่ 4.3 รูปแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = 0 ns 40

รูปที่ 4.4 รูปแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = -100 ns 40

รูปที่ 4.5 รูปแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = +100 ns 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.6 รูปแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = 0 ns 41

รูปที่ 4.7 รูปแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = -100 ns 41

รูปที่ 4.8 รูปแสดงค่า Gain = -3 dB , Time Delay = +100 ns 41

รูปที่ 4.9 รูปแสดงค่า Gain = -3 dB , Time Delay = 0 ns 42

รูปที่ 4.10 รูปแสดงค่า Gain = -3 dB , Time Delay = -100 ns 42

รูปที่ 4.11รูปวงจร 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 การจำแนกความผิดเพี้ยนเชิงเส้น 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

สัญญาณภาพเป็นสัญญาณรวม(Composite waveform)ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณส่องสว่าง (Luminance signal)กับสัญญาณสี(Chrominance signal) และสัญญาณซิงค์(Sync signal)สัญญาณภาพโทรทัศน์นั้นมีแถบความถี่กว้าง ดังนั้นเมื่อส่งไปยังเครื่องรับซึ่งสัญญาณต้องผ่านช่องสัญญาณต่างๆ เช่นอากาศหรือวงจรกรองความถี่ภายในเครื่องรับ เป็นต้น ทำให้องค์ประกอบทางด้านความถี่สูงซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณสีมีความผิดเพี้ยนไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณแสงสว่างกับสัญญาณสี เกิดความไม่สมดุล ทำให้สีของภาพที่มองเห็นที่จอโทรทัศน์เพี้ยนไป ในการทดสอบระบบโทรทัศน์เพื่อดูความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์นั้นส่วนใหญ่จะนิยมนำเอาสัญญาณทดสอบมาใช้มากกว่าการใช้สัญญาณภาพจริง ๆ ทั้งนี้เพราะสัญญาณสอบนั้นเป็นสัญญาณที่มีรูปแบบที่แน่นอนเมื่อป้อนสู่ระบบแล้วหากระบบมีความบกพร่องจนทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปก็สามารถสังเกตเห็นได้ง่ายซึ่งสัญญาณที่นิยมใช้กันคือ สัญญาณพัลส์ซายน์กำลังสองแบบ T และ 2T สำหรับทดสอบโทรทัศน์ขาว-ดำและสัญญาณมอดูเลต20 T ซายน์กำลังสองสำหรับโทรทัศน์สี ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์โดยเฉพาะความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นเกิดขึ้นบ่อยและเห็นได้ชัดซึ่งจะสามารถแบ่งความผิดเพี้ยนออกได้เป็นสามชนิดกล่าวคือ ความผิดเพี้ยนทางขนาด ความผิดเพี้ยนทางมุม ความผิดเพี้ยนทั้งขนาดและทางมุม

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อวัดสัญญาณความผิดเพี้ยนของแอมพลิจูดโดยใช้สัญญาณทดสอบ มอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์
2. เพื่อวัดสัญญาณความผิดเพี้ยนของกรุ๊ฟดีเลย์โดยใช้สัญญาณทดสอบ มอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์

1.2 ขอบเขตของโครงงาน

เขียนโปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์โดยใช้สัญญาณทดสอบ มอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลส์ ของระบบโทรทัศน์สีและสัญญาณทดสอบสัญญาณโทรทัศน์สีพร้อมจอ LCD แสดงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาระบบโทรทัศน์สี
2. ศึกษาสัญญาณทดสอบ
3. ทดสอบผลการทดลองด้วยโปรแกรมMatlab
4. สร้างอุปกรณ์แสดงค่าที่วัดได้
5. ทดสอบอุปกรณ์แสดงค่า
6. ทดสอบโปรแกรมพร้อมแสดงค่าออกที่อุปกรณ์
7. สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หลักการของการส่งและการรับโทรทัศน์สี

โทรทัศน์สีกับโทรทัศน์ขาวดำ มีเรื่องราวและหลักการที่ล้ายคลึงกัน มาตรฐานของโทรทัศน์สีจะต้องเข้ากันได้กับมาตรฐานโทรทัศน์ขาวดำในระบบเดียวกันด้วยเสมอ ประชาชนทั่วไปที่มีทั้งเครื่องรับโทรทัศน์ทั้งแบบโทรทัศน์ขาวดำและแบบโทรทัศน์สี จึงจะสามารถรับชมโทรทัศน์ได้ กล่าวคือ เมื่อสถานีโทรทัศน์ส่งสัญญาณโทรทัศน์สีออกอากาศ นอกจากเครื่องรับโทรทัศน์จะสามารถรับสัญญาณโทรทัศน์สีนี้ได้เป็นภาพสีบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สีแล้ว ยังจะต้องทำให้เครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำในเขตบริการ สามารถรับสัญญาณโทรทัศน์สีนี้เป็นภาพขาวดำบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำด้วยความเข้ากันได้หรือความสามารถของเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำในการรับสัญญาณโทรทัศน์สีนี้ซึ่งมีชื่อพิเศษเรียกว่าcompatibility หรือ correct reception of color TV transmission by B/W TV receivers นอกจากนั้นหากสถานีโทรทัศน์ขาวดำส่งสัญญาณโทรทัศน์ออกอากาศ นอกจากเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำในเขตบริการจะสามารถรับสัญญาณโทรทัศน์นี้ให้ปรากฏเป็นภาพขาวดำได้บนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำแล้ว ยังจะต้องสามารถทำให้เครื่องรับโทรทัศน์สีในเขตบริการรับสัญญาณโทรทัศน์นี้ได้และมีภาพขาวดำบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สีด้วย ความสามารถในเรื่องนี้ มีชื่อพิเศษเรียกว่า reverse compatibility หรือ correct reproduction of B/W TV transmission by color TV receiver เนื่องด้วยการเลือกใช้มาตรฐานของโทรทัศน์สี จะต้องเข้ากันได้กับมาตรฐานของโทรทัศน์ขาวดำ ปัญหาต่างๆในการรับชมโทรทัศน์จึงไม่เกิดขึ้น สำหรับประเทศไทย ในระยะเวลาที่มีการส่งโทรทัศน์สีกันใหม่ๆ คงจะยังพอจำกันได้ว่า เมื่อสถานีโทรทัศน์สีไทยทีวี ช่อง 3 กับสถานีโทรทัศน์สีกองทัพบก ช่อง 7 ออกอากาศในระบบยุโรป 625 เส้น ต่อภาพ 25 ภาพต่อวินาที และเป็นโทรทัศน์สีระบบ PAL เครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำแบบเก่าในระบบอเมริกันจะสามารถรับสัญญาณโทรทัศน์สีได้เป็นภาพขาวดำ ในช่อง 2 กับช่อง 9 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันก่อนที่สถานีโทรทัศน์กองทัพบก ช่อง 7 ระบบอเมริกัน 525 เส้นต่อภาพ 30 ภาพต่อวินาที จะหยุดทำการส่งออกอากาศ เครื่องรับโทรทัศน์สีในเขตกรุงเทพมหานคร จะสามารถรับภาพได้เป็นภาพขาวดำที่ช่อง 5 เช่นเดียวกัน ความต้องการในเรื่องการให้บริการโทรทัศน์สีในเขตบริการที่มีเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำอยู่ด้วยเช่นนี้ มีอยู่ด้วยกันหลายประการ ซึ่งพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) หากสถานีโทรทัศน์สีส่งภาพสีออกอากาศ เครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำจะต้องสามารถรับภาพสีนั้นได้เป็นภาพขาวดำ และเครื่องรับโทรทัศน์สีก็จะรับภาพนั้นเป็นภาพสีในทำนองเดียวกันหากสถานีโทรทัศน์ส่งภาพขาวดำออกอากาศ ทั้งเครื่องรับโทรทัศน์สีกับเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำจะต้องรับภาพนั้นได้เป็นภาพขาวดำ

(ข) สัญญาณโทรทัศน์สีที่ส่งออกอากาศ จะประกอบด้วยสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำซึ่งให้ภาพขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่าง ที่เรียกว่า luminance signal กับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี ซึ่งเรียกว่า chrominance signal รวมกันอยู่ วิธีการรวมสัญญาณโทรทัศน์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันนี้ขึ้นอยู่กับโทรทัศน์สีแต่ละระบบ

(ค) สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) จะต้องมีขอบเขตของความถี่อยู่ในย่านของความถี่สัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ (luminance signal)

โทรทัศน์สีในโลกปัจจุบันนี้ มีอยู่หลายแบบหลายระบบต่างๆกัน สถานีโทรทัศน์ไทยทีวีสีช่อง 3 กับสถานีโทรทัศน์สีกองทัพบก ช่อง 7 ซึ่งออกอากาศในกรุงเทพมหานคร เลือกส่งโทรทัศน์สีระบบ PAL ออกอากาศในมาตรฐานยุโรป 625 เส้นต่อภาพ 25 ภาพต่อวินาที แต่สถานีโทรทัศน์สีในประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และอีกหลายๆประเทศ กลับเลือกส่งโทรทัศน์สีระบบ NTSC นี้ เป็นโทรทัศน์สีระบบแรกของโลก ซึ่งเริ่มใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1955 แต่เนื่องจากสภาวการณ์ในเรื่องของระบบไฟฟ้าตามบ้าน (domestic line frequency) ของแต่ละประเทศแตกต่างกันออกไป จึงทำให้จำเป็นต้องมีโทรทัศน์สีระบบต่างๆขึ้นเพื่อความเหมาะสม คณะกรรมการที่ปรึกษาทางวิทยุระหว่างประเทศ (International Radio Consultative Committee หรือเรียกชื่อสั้นๆว่า *CCIR*) ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกผู้แทนประเทศต่างๆ ได้เริ่มทำการศึกษาเรื่องโทรทัศน์สีระบบต่างๆขึ้น ตั้งแต่ประมาณปี ค.ศ. 1955 เพื่อที่จะได้จัดทำคำแนะนำให้ประเทศอื่นๆที่ยังมิได้มีโทรทัศน์สี ได้ศึกษาความเหมาะสมของโทรทัศน์สีระบบต่างๆ ในปัจจุบันนี้โทรทัศน์สีที่มีให้เลือกใช้กันแพร่หลายในโลกมีอยู่ด้วยกันสามระบบ ดังต่อไปนี้

(ก) โทรทัศน์สีระบบ NTSC (National Television System Committee)

(ข) โทรทัศน์สีระบบ PAL (Phase Alteration Line)

(ค) โทรทัศน์สีระบบ SECAM (Sequential a Memorire)

2.2 การส่งและการรับโทรทัศน์สี

โทรทัศน์สีระบบต่างๆ มีหลักการส่งและหลักการรับโทรทัศน์คล้ายคลึงกับหลักการส่งและหลักการรับโทรทัศน์ขาวดำ กล่าวคือ แทนที่เครื่องส่งโทรทัศน์จะส่งสัญญาณภาพขาวดำไปให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

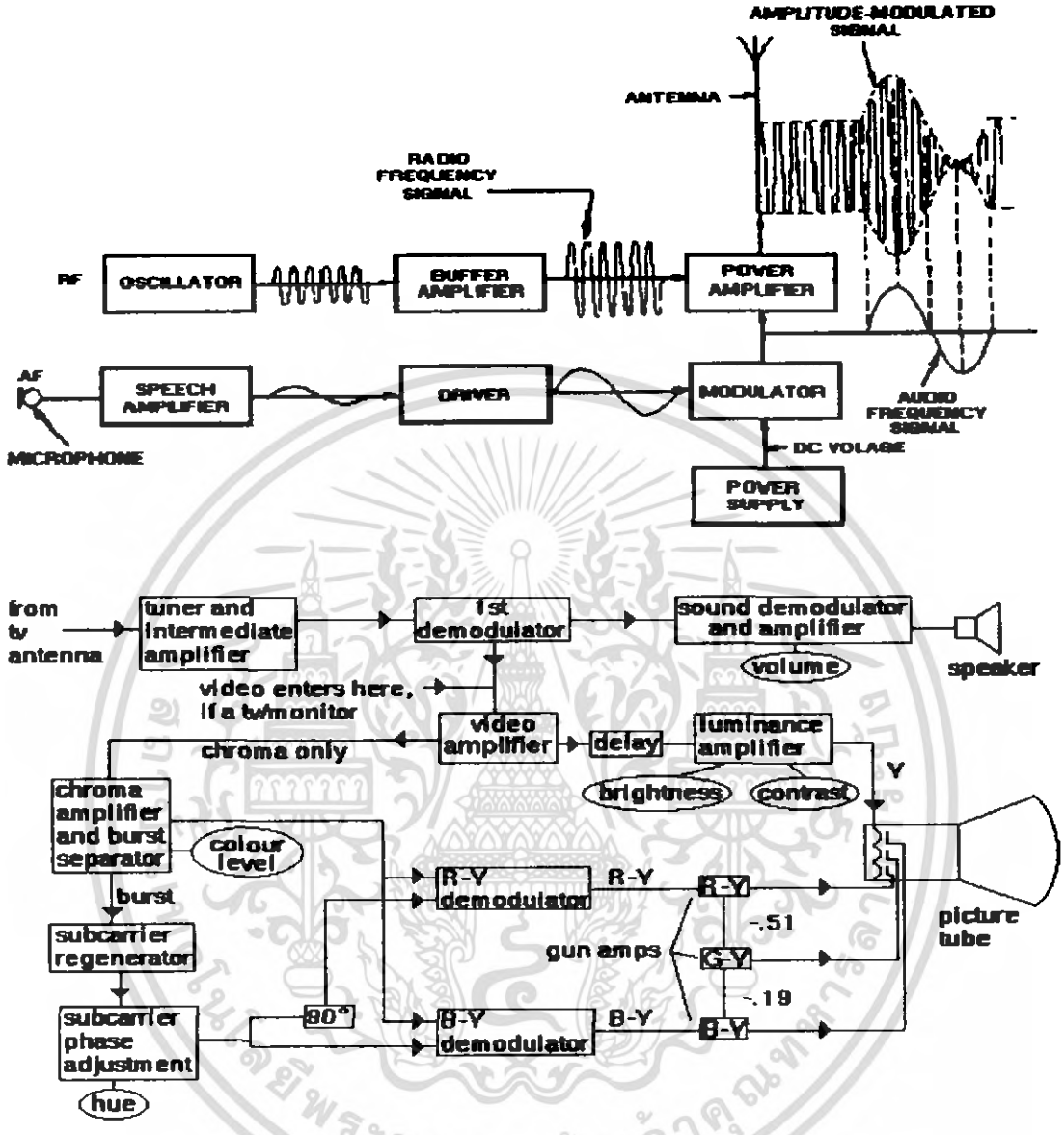
เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องส่งโทรทัศน์สีก็จะส่งสัญญาณภาพสีไปแทน ภาพสีของเครื่องส่งโทรทัศน์สี ประกอบด้วยภาพจากสัญญาณของแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงิน เมื่อเครื่องรับโทรทัศน์สีได้รับสัญญาณภาพสีนี้แล้ว ก็จะทำให้มีภาพสีปรากฏบนจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สีขึ้น ภาพที่มองเห็นนี้จะละเอียดหรือหยาบไม่น่าดู ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง สิ่งที่สำคัญก็คือ จำนวนจุดดำหรือจุดสีเล็กๆที่เป็นส่วนประกอบของภาพ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า picture element ภาพเหล่านี้จะประกอบขึ้นด้วยจุดดำหรือจุดสีเล็กๆ ซึ่งมีทั้งส่วนดำสนิทและส่วนที่ดำจาง หรือส่วนที่มีสีเข้มกับส่วนที่มีสีจาง ขนาดของจุดดำหรือจุดสีในภาพที่มืดสนิทหรือมีสีเข้ม จะมองเห็นใหญ่กว่าขนาดของจุดดำหรือจุดสีในส่วนของภาพสีจาง จำนวนของจุดดำหรือจุดสีที่มีมากหรือน้อยนี้ จะมีผลทำให้ภาพมองดูละเอียดชัดเจนหรือหยาบไม่น่าดูแตกต่างกันด้วย

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของภาพในรูปซึ่งมีพื้นที่เท่ากัน

2.3 การส่งและการรับโทรทัศน์สีในทางปฏิบัติ

สำหรับการส่งและการรับโทรทัศน์สีในทางปฏิบัติ เครื่องส่งโทรทัศน์สีและเครื่องรับโทรทัศน์สีจะต้องมีวงจรพิเศษเพื่อทำการส่งสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง (Luminance signal) ปะปนกันไปกับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) ตามที่แสดงไว้เป็นแผนผังในด้านการส่งโทรทัศน์สี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ระบบการส่งและการรับโทรทัศน์สี

2.4 สัญญาณโทรทัศน์สีประกอบด้วยอะไรบ้าง

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ความต้องการเรื่องการให้บริการโทรทัศน์สีในเขตบริการที่มีเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำอยู่ด้วย มีอยู่ด้วยกันสามประการ ประการแรกคือ เรื่องของ compatibility กับ reverse compatibility ประการที่สองคือ สัญญาณโทรทัศน์สีที่ส่งออกอากาศ จะต้องประกอบด้วยส่วนที่เป็นสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) กับส่วนที่เป็นสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) ประการที่สามคือ ความถี่ของสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) จะต้องมีขอบเขตอยู่ในความถี่เดียวกันกับสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) ในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิบัติ กล้องโทรทัศน์สีจะช่วยเหลือทำให้เกิดสัญญาณแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงินขึ้น ซึ่งหากจะทำการส่งสัญญาณแสงสีเหล่านี้ไปยังเครื่องรับโทรทัศน์โดยตรง จะเป็นการยุ่งยาก จึงใช้วิธีการนำสัญญาณแสงสีทั้งสามเหล่านี้ มาผสมกันในวงจรพิเศษ ซึ่งเรียกว่า วงจรเมตริกซ์ (matrix) เพื่อทำให้เกิดสัญญาณใหม่สองสัญญาณ คือสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) เมื่อสถานีโทรทัศน์สีส่งสัญญาณต่างๆเหล่านี้ออกอากาศ เครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำก็จะรับแต่เฉพาะสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือส่วนที่เป็นสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) ส่วนเครื่องรับโทรทัศน์สี ก็จะรับสัญญาณโทรทัศน์ทั้งหมด แล้วทำให้เกิดเป็นภาพสีที่จอภาพหลอดต่อไป

กล่าวโดยสรุป สถานีโทรทัศน์สีจะต้องส่งสัญญาณต่างๆออกอากาศไปให้เครื่องรับโทรทัศน์เพื่อทำให้เกิดภาพสีขึ้นที่จอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สี และภาพขาวดำที่จอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์ขาวดำ กับมีเสียงที่ลำโพงของเครื่องรับโทรทัศน์ ดังต่อไปนี้

- สัญญาณเสียง (sound signal)
- สัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal)
- สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal)
- สัญญาณซิ้งค์ ,แบล้งค์กิ้ง และอีควัลไลซิ่ง (synchronizing, blanking, and equalizing signals)
- สัญญาณซิ้งค์ของภาพสี (color sync signal)

เหตุผลและความจำเป็นในการที่จะต้องส่งสัญญาณต่างๆเหล่านี้ มีดังต่อไปนี้

(ก) สัญญาณเสียง (sound signal) เพื่อทำให้เกิดเสียงที่ลำโพงเครื่องรับโทรทัศน์ตามต้องการ

(ข) สัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) สัญญาณนี้ คือ สัญญาณภาพ (video signal or brightness signal) ในเรื่องของโทรทัศน์ขาวดำนั่นเอง กล้องโทรทัศน์สีในห้องส่งโทรทัศน์ จะช่วยทำให้เกิดสัญญาณแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงินขึ้น ซึ่งเราอาจใช้สัญลักษณ์ E_R, E_G, E_B แทนค่าสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นโวลต์ที่ได้จากหลอดสีแดง-หลอดสีเขียว-หลอดสีน้ำเงิน ตามลำดับ สัญญาณแสงสีทั้งสามนี้ จะผ่านวงจรพิเศษ เรียกว่า วงจรเมตริกซ์ (matrix) เพื่อทำให้เกิดสัญญาณส่องสว่าง (brightness or video signal, or luminance signal) E_Y โดยมีส่วนผสมของแสงสีทั้งสามในอัตราส่วนที่แน่นอน ดังต่อไปนี้

$$E_Y = 0.299E_R + 0.587 E_G + 0.114 E_B$$

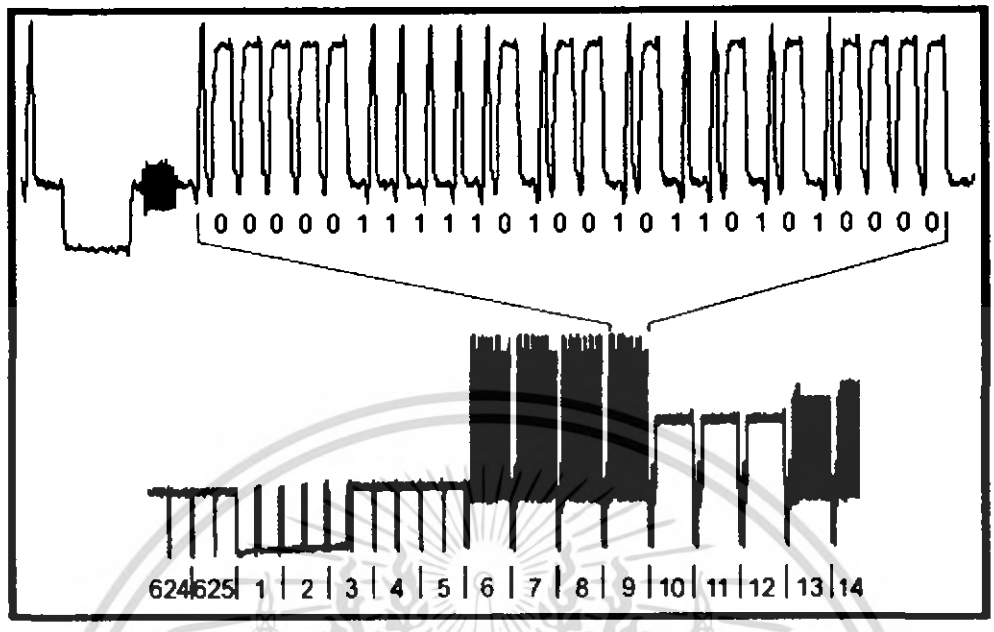
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal) สัญญาณนี้เป็นสัญญาณที่เครื่องส่งโทรทัศน์สีได้ทำการไปยังเครื่องรับโทรทัศน์เพื่อช่วยเหลือทำให้เกิดภาพสีขึ้นทางจอหลอดภาพของเครื่องรับโทรทัศน์สี คุณลักษณะของสัญญาณนี้จะขึ้นอยู่กับระบบของโทรทัศน์สีซึ่งมีอยู่สามระบบคือ โทรทัศน์สีระบบ NTSC, โทรทัศน์สีระบบ PAL และโทรทัศน์สีระบบ SECAM สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีในโทรทัศน์สีระบบ NTSC จะประกอบด้วยสัญญาณสีสองสัญญาณที่รวมกันอยู่ในรูปของ amplitude-modulated signal suppressed carrier โดยจะต้องทำให้มุมระหว่างคลื่นพาห์ทั้งสองต่างกันเก้าสิบองศา สัญญาณสีทั้งสองสัญญาณนี้ เครื่องรับโทรทัศน์สีจะมีวงจรพิเศษแยกออกมาเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมเรื่องแสงสี (hue) และการอิ่มตัวของแสงสี (saturation) ของภาพสีที่ปรากฏบนจอหลอดภาพ สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีนี้ จะใช้คลื่นพาห์ของสัญญาณ หรือคัลเลอร์ซับแคริเออร์ (color subcarrier) ที่ความถี่ 3.58 เมกกะเฮิรตซ์ และจะต้องรวมกันกับสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) เพื่อใช้คลื่นพาห์ของเครื่องส่งโทรทัศน์สีนำออกอากาศเพื่อส่งต่อไปให้ถึงเครื่องรับโทรทัศน์สี วิธีการส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีรวมไปกับสัญญาณส่องสว่าง โดยการใช้คลื่นพาห์ของสัญญาณสีนี้เป็นวิธีการพิเศษในทางไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า multiplex transmission

(ง) สัญญาณซิงค์, แบล้งกิ้ง และอีควัลไลซิ่ง (synchronization, blanking, and equalizing signals) สัญญาณดังกล่าวนี้ มีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณซิงค์ สัญญาณแบล้งกิ้ง และสัญญาณอีควัลไลซิ่ง ในเรื่องโทรทัศน์ขาวดำทุกประการ

(จ) สัญญาณซิงค์ของภาพสี (color sync signal) เนื่องจากสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี อยู่ในรูปของ amplitude-modulated signal (suppressed carrier) ซึ่งเมื่อเครื่องรับโทรทัศน์สีรับได้แล้ว ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องพาห์ของภาพสี หรือคัลเลอร์ซับแคริเออร์ (color subcarrier) ที่เหมือนกันกับที่ใช้ในเครื่องส่งโทรทัศน์ด้วย ฉะนั้น เครื่องรับโทรทัศน์สีจึงจำเป็นต้องมีวงจรผลิตเครื่องพาห์ของภาพสี หรือคัลเลอร์ซับแคริเออร์ที่ต้องการขึ้น เพื่อทำให้คลื่นพาห์ของภาพสี หรือคัลเลอร์ซับแคริเออร์ที่ใช้ในด้านเครื่องส่งโทรทัศน์กับด้านรับโทรทัศน์สี มีความถี่และเฟส (phase angle) ที่ถูกต้องตรงกัน เครื่องส่งโทรทัศน์จึงจำเป็นต้องส่งสัญญาณซิงค์ของภาพสี (color sync signal) ไปให้เครื่องรับโทรทัศน์สี โดยส่งไปในส่วนของ back porch ของซิ้งค์พัลส์ทางแนวนอน ซึ่งเรียกสัญญาณซิ้งค์ของภาพสีนี้ว่า คัลเลอร์เบิร์สต์ (color burst)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สัญญาณคัลเลอร์เบิรสต์

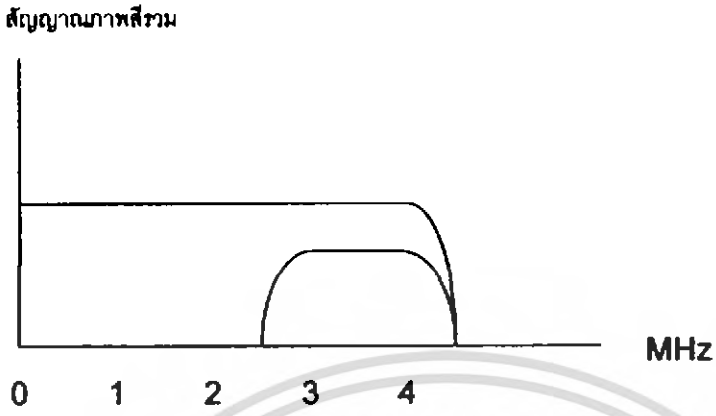
2.5 ระบบโทรทัศน์

ความแตกต่างของโทรทัศน์สีระบบต่างๆ อยู่ที่วิธีการและวงจรในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีรวมไปกับสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำ หรือสัญญาณส่องสว่างเท่านั้น

2.5.1 โทรทัศน์สีระบบเอ็น.ที.เอส.ซี. (NTSC color TV System)

โทรทัศน์สีระบบแรกของโลกคือโทรทัศน์สีระบบอเมริกันเอ็น.ที.เอส.ซี. ซึ่งเป็นโทรทัศน์สีของสหรัฐอเมริกา และต่อมาก็ได้แพร่หลายไปอีกในหลายประเทศที่ใช้โทรทัศน์ระบบอเมริกัน 525 เส้นต่อภาพ 30 ภาพต่อวินาที หลักการของการส่งโทรทัศน์สีระบบนี้ ได้แสดงไว้ดังรูปโดยกล้องโทรทัศน์สีจะทำให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าจากแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงิน มีขนาด E_R , E_G ,E_B ตามลำดับ แสงสีทั้งสามนี้ จะผสมกับวงจรพิเศษที่รียกว่า วงจรเมตริกซ์ (matrix circuit) การบวกลบผสมสีทางไฟฟ้าของแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงิน เหล่านี้ จะทำให้เกิดสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) E_Y กับสัญญาณโทรทัศน์ที่ทำให้ภาพสี (chrominance signal) สองสัญญาณคือ inphase signal voltage E_I และ quadrature-phase color signal voltage E_Q โดยมีส่วนผสมของแสงสีทั้งสามดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีของโทรทัศน์สีระบบ เอ็น.ที.เอส.ซี.

เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในการส่งสัญญาณทางไฟฟ้าเหล่านี้ จากเครื่องส่งโทรทัศน์ไปยังเครื่องรับโทรทัศน์ จึงใช้วิธีการ double modulation AM-AM กล่าวคือ สัญญาณภาพสีทั้งสองสัญญาณจะมีคลื่นพาห์ของตัวเองโดยเฉพาะ เรียกว่า คัลเลอร์ซับแคริเออร์ (color subcarrier) สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี E_I กับ E_Q จะผ่านเข้าไปยัง encoder ซึ่งมี balanced modulator อยู่สองชุด แต่ละชุดจะมีคัลเลอร์ซับแคริเออร์ (color subcarrier) ซึ่งมีความถี่เดียวกัน แต่มีเฟส (phase angle) ต่างกันอยู่เก้าสิบองศา ผลลัพธ์ที่ได้จาก balance modulator ทั้งสองนี้ ก็คือ สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีทางไฟฟ้าสองชุด ซึ่งแต่ละชุดจะอยู่ในรูปร่างของ amplitude-modulated suppressed-carrier double-sidebands สัญญาณเหล่านี้ จะนำไปรวมกับสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง กับสัญญาณอื่นๆก่อน แล้วจึงจะใช้คลื่นพาห์ในเครื่องส่งโทรทัศน์นำออกอากาศในวิธีของ amplitude modulation ตามที่แสดงไว้แล้ว สัญญาณที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปร่างของ amplitude-modulated double-sidebands ซึ่งกว้างประมาณข้างละ 4 เมกกะเฮิรตซ์ แต่การนำผ่านวงจร vestigial sideband filter จะช่วยลดไซด์แบนด์ด้านต่ำ (lower sideband) ลงบ้าง และจะส่งไซด์แบนด์ด้านสูง (upper sideband) เต็มที่ ซึ่งจะทำให้มีแบนด์วิดท์ทั้งสิ้น (over RF bandwidth) ประมาณ 6 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากับแบนด์วิดท์ของช่องโทรทัศน์ขาวดำในระบบอเมริกันพอดี สำหรับแบนด์วิดท์ของโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี E_I กับ E_Q นั้น ผลของการทดลองได้พบว่า สายตาของคนเรา จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงในเรื่องรายละเอียดของสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่างได้ง่ายและดีกว่าการเปลี่ยนแปลงเรื่องรายละเอียดของสัญญาณโทรทัศน์ให้ภาพสี โดยเฉพาะในส่วนประกอบเล็กๆของภาพบนจอโทรทัศน์ ไม่จำเป็นต้องทำให้รายละเอียดของสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีมีมากเท่ากับรายละเอียดสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง ฉะนั้น โทรทัศน์สีระบบ NTSC จึงกำหนดให้โทรทัศน์สีขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีรายละเอียดของสัญญาณภาพได้กว้างเต็มที่ประมาณ 4.2 เมกกะเฮิรตซ์ ส่วนสัญญาณโทรทัศน์ที่ทำให้ภาพสี E_I ซึ่งแสดงคุณลักษณะคุณสมบัติของแสงสีเขียวน้ำเงิน (cyan) หรือแสงสีส้ม (orange color) จะมีรายละเอียดได้กว้างประมาณ 1.5 เมกกะเฮิรตซ์ กับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี E_Q ซึ่งแสดงลักษณะคุณสมบัติของแสงสีม่วง (purple) หรือแสงสีเขียว (green) นั้น สามารถกำหนดให้มีรายละเอียดได้เพียงประมาณ 0.5 เมกกะเฮิรตซ์ ก็เป็นการเพียงพอแล้ว

การส่งโทรทัศน์สีระบบ NTSC จากเครื่องส่งโทรทัศน์มายังเครื่องโทรทัศน์นี้ สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี จะใช้เครื่องพาห์ของภาพสี หรือคัลเลอร์ซับแคริเออร์ จึงจำเป็นต้องส่งคัลเลอร์ซับแคริเออร์นี้มายังเครื่องรับโทรทัศน์ด้วย การเลือกใช้คัลเลอร์ซับแคริเออร์ก็จำเป็นต้องพิถีพิถันและมีหลักเกณฑ์เหมือนกัน ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้ เนื่องจากรายละเอียดของสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง จะมีความถี่ระหว่าง 0 ถึง 4 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีกำลังงานรวมกลุ่มอยู่ในบริเวณความถี่ 15,750 เฮิรตซ์ อันเป็นค่าของความถี่ของการสะแกนทางแนวนอน หากเลือกใช้คัลเลอร์ซับแคริเออร์ให้มีค่าเท่ากับฮาร์มอนิก (harmonic) ต่างๆของความถี่ตามที่กล่าวมาแล้วนี้ จะทำให้ลดอาการรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างความถี่คัลเลอร์ซับแคริเออร์กับความถี่ของความแตกต่างระหว่างคลื่นพาห์ของเสียงกับคลื่นพาห์ของภาพได้ ฉะนั้น ในหลักการจึงมีข้อกำหนดดังนี้

1. กำหนดให้ความถี่ของความแตกต่างระหว่างคลื่นพาห์ของเสียงกับคลื่นพาห์ของภาพ (sound carrier spacing relative to video carrier) มีค่าเท่ากับ ฮาร์มอนิกที่ 286 ของความถี่ในการสแกนทางแนวนอน
2. กำหนดให้ความถี่ของคัลเลอร์ซับแคริเออร์ มีค่าเท่ากับ ฮาร์มอนิกที่ 455 ของครึ่งหนึ่งของความถี่ในการสแกนทางแนวนอน
3. หากกำหนดให้ความถี่ของการสแกนทางแนวนอนมีค่า 15,750 เฮิรตซ์ เราจะพบว่า

ความถี่ของคัลเลอร์ซับแคริเออร์นี้จะมีค่า (455) (15,750) / (2) เฮิรตซ์ หรือ 3.58 เมกกะเฮิรตซ์

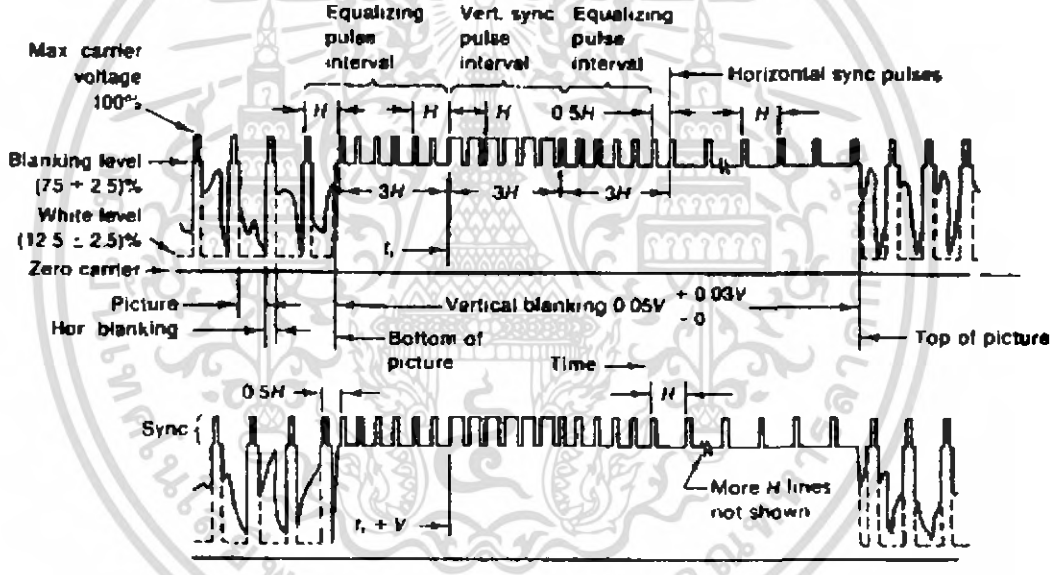
อย่างไรก็ตาม มาตรฐานของโทรทัศน์สีระบบ NTSCนี้จะมีส่วนที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยมาตรฐานของโทรทัศน์ขาวดำในระบบอเมริกันเหมือนกัน เพราะสาเหตุที่ต้องการลดการรบกวนในการเลือกใช้ความถี่ของคัลเลอร์ซับแคริเออร์นี้ เมื่อความแตกต่างระหว่างคลื่นพาห์ของเสียงกับคลื่นพาห์ของภาพในโทรทัศน์ระบบอเมริกันมีค่าความถี่ 4.5 เมกกะเฮิรตซ์ เราจะได้ตัวเลขที่แน่นอนของค่าความถี่ต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ของการสแกนทางแนวนอน จะมีค่า (4.5) / (286) เมกกะเฮิรตซ์ หรือ 15,734.296 เฮิรตซ์ ความถี่ของคัลเลอร์ซับแคริเออร์ จะมีค่า (455) (15,734.296) / (2) เฮิรตซ์ หรือ 3.579545 เมกกะเฮิรตซ์

ความถี่ของฟิลด์ มีค่า (15,734.296) / (262.5) เฮิรตซ์ หรือ 59.94 เฮิรตซ์

ตัวเลขที่แน่นอนในเรื่องความถี่ของการสะแกนแนวนอน และในเรื่องความถี่ของฟิลด์ สำหรับโทรทัศน์สี จะมีค่าใกล้เคียงกับ 15,750 เฮิรตซ์ และ 60 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นตัวเลขที่ใช้ในมาตรฐานโทรทัศน์ขาวดำระบบอเมริกันมาก และไม่ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการซิงค์สัญญาณต่างๆ แต่ประการใดในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.5 สัญญาณส่องสว่างกับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีรวมกันอยู่ในสัญญาณภาพสีรวม

รูปที่ 2.5 เป็นสัญญาณภาพสีรวม (colorplexed composite video signal) ที่เครื่องส่งโทรทัศน์สี จะต้องส่งไปให้เครื่องรับโทรทัศน์ ซึ่งประกอบไปด้วยโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีสองสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปร่างของ amplitude-modulated suppressed-carrier double sidebands สัญญาณซิงค์ สัญญาณแบล้งค์กิ้ง สัญญาณอีควัลไลซิ่ง และสัญญาณซิ้งค์ของภาพสีที่เรียกว่า คัลเลอร์เบิรสต์ (color burst) ทางด้านเครื่องรับโทรทัศน์ ก็มีการแยกสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่างออกจากสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี และจะมีวงจรคัลเลอร์ดีมอดดูเลเตอร์ (color demodulator) สองชุด ซึ่งใช้คัลเลอร์ซับแคริเออร์ที่มีความถี่เดียวกัน แต่มีเฟสต่างกันอยู่ที่เก้าสิบองศา เพื่อทำให้เกิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรทัศน์ที่ให้ภาพสี E_I กับ E_Q ความสัมพันธ์ของสัญญาณโทรทัศน์ที่ทำให้ภาพสีทั้งสองคือ (E_R-E_Y) และ (E_B-E_Y) กับสัญญาณคัลเลอร์

ซับแคริเออร์เมื่อนำสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่างกับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีเหล่านี้มาผสมกันในวงจรเมตริกซ์ (matrix circuit) ก็จะได้สัญญาณของแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงิน เพื่อป้อนให้แคโถดของหลอดภาพ และทำให้เกิดภาพสีขึ้นที่จอหลอดภาพในเครื่องรับโทรทัศน์สี

2.5.2 โทรทัศน์สีระบบพี.เอ.แอล. (PAL color TV System)

โทรทัศน์สีระบบ พี.เอ.แอล. เป็นโทรทัศน์สีที่มีระบบคล้ายคลึงกับโทรทัศน์สีระบบเอ็น.ที.เอส.ซี.แต่ได้รับการเสริมแต่งแก้ไขให้มีความแตกต่างกันอยู่หลายอย่าง เรื่องที่สำคัญก็คือได้ปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความผิดเพี้ยนทางเฟสและแอมพลิจูด(phase and amplitude distortion) โดยปกติการส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่มีความถี่และอมพลิจูดแตกต่างกัน ผ่านวงจรขยายสัญญาณหรือวงจรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง จะทำให้ต้องใช้เวลานานมากน้อยและมีการขยายมากน้อยแตกต่างกันออกไปตามแต่ความถี่และแอมพลิจูดของสัญญาณโทรทัศน์ ซึ่งจะมีผลต่อสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีและสัญญาณคัลเลอร์ซับแคริเออร์มาก ความผิดเพี้ยนเหล่านี้ จะทำให้ภาพสีของเครื่องรับโทรทัศน์สีมีสีสันผิดเพี้ยนไปจากภาพสีของเครื่องส่งโทรทัศน์สี ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องแก้ไข โทรทัศน์สีระบบ เอ็น.ที.เอส.ซี. มีวิธีแก้ไขเรื่องนี้โดยการพิจารณาการออกแบบวงจรที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสม แต่โทรทัศน์สีระบบ พี.เอ.แอล. มีวิธีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาในเรื่องนี้โดยวิธีการส่งสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีให้มีเฟสแตกต่างกันหนึ่งร้อยแปดสิบองศา สลับกันไปในแต่ละช่วงเวลาที่มีการสแกนทางแนวนอน หลักการของโทรทัศน์ระบบ พี.เอ.แอล. นี้ ได้แสดงในรูป โดยกล้องโทรทัศน์สีจะทำให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าจากแสงสีแดง-แสงสีเขียว-แสงสีน้ำเงิน โดยมีขนาด E_R, E_G, E_B ตามลำดับ สัญญาณแสงสีทั้งสามสี จะผสมกันในวงจรเมตริกซ์ (matrix circuit) ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง E_Y กับสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีสองสัญญาณ คือ E_U กับ E_V ซึ่งเป็นผลต่างของสัญญาณแสงสีแดงกับสัญญาณส่องสว่าง และสัญญาณแสงสีน้ำเงินกับสัญญาณส่องสว่าง ดังต่อไปนี้

สัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal)

$$E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$$

สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี (chrominance signal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_U = 0.493 (E_B - E_Y)$$

$$E_V = 0.877(E_R - E_Y)$$

สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี จะเกี่ยวข้องแต่เฉพาะสัญญาณจากแสงสีแดงและสัญญาณจากแสงสีน้ำเงิน ส่วนสัญญาณที่เกิดจากแสงสีเขียวจะหายไป ฉะนั้น เครื่องรับโทรทัศน์สีจะต้องมีวงจรพิเศษทำให้เกิดสัญญาณนี้ขึ้นมาได้ เพื่อตรวจสอบดูว่า สัญญาณ $(E_G - E_Y)$ เกิดขึ้นอย่างไรหรือไม่ จากสัญญาณต่างๆที่มีอยู่ในสามสัญญาณ คือ E_Y, E_U, E_V จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อได้ค่าที่เหมาะสม

การส่งโทรทัศน์สีระบบ พี.เอ.แอล. ก็มีหลักการคล้ายๆกันกับการส่งโทรทัศน์สีระบบ เอ็น.ที.เอส.ซี. และได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.4 โดยใช้วิธีการของ double modulation AM-AM สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสี E_U กับ E_V จะผ่านเข้าไปยังเอนโคดเดอร์ (encoder) ซึ่งมี balanced modulator อยู่สองชุด แต่ละชุดจะใช้คัลเลอร์ซับแคริเออร์ (color subcarrier) ซึ่งมีความถี่เดียวกันแต่มีเฟส (phase angle) ต่างกันอยู่เก้าสิบองศา รวมทั้งคลื่นพาห์คัลเลอร์ซับแคริเออร์ชุดหนึ่งจะต้องผ่าน 0° / 180° พี.เอ.แอล. สวิตช์ (PAL switch) เพื่อทำหน้าที่ปิดเปิดสลับเฟสของคัลเลอร์ซับแคริเออร์ ในทุกๆการสแกนเส้นคี่หรือการสแกนเส้นคู่แล้วแต่กรณี ผลลัพธ์ที่ได้จากมอดูเลเตอร์เหล่านี้ก็คือสัญญาณทางไฟฟ้าสองชุด ซึ่งแต่ละชุดอยู่ในรูปร่างของ amplitude-modulated suppress carrier double sidebands และสัญญาณทางไฟฟ้าทางมอดูเลเตอร์ตัวหนึ่ง จะมีค่าเฟสของคัลเลอร์ซับแคริเออร์สลับกันไปมา ระหว่าง 0 องศา กับ 180 องศา ในแต่ละการสแกนเส้นคู่หรือการสแกนเส้นคี่แล้วแต่กรณี สัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีเหล่านี้จะนำไปรวมกับสัญญาณโทรทัศน์ขาวดำหรือสัญญาณส่องสว่างและสัญญาณอื่นๆเสียก่อน แล้วจึงใช้คลื่นพาห์ในเครื่องส่งโทรทัศน์นำออกอากาศในวิธีของการ amplitude modulation สัญญาณที่เกิดขึ้นจึงอยู่ในรูปร่างของ amplitude-modulated double sidebands ซึ่งมีขนาดกว้างประมาณ 5 เมกกะเฮิรตซ์ หลังจากสัญญาณเหล่านี้ผ่านวงจร vestigial sideband filter แล้วก็จะช่วยลดไซด์แบนด์ด้านต่ำ (lower sideband) ลงบ้าง และจะส่งไซด์แบนด์ด้านสูง (upper sideband) เต็มที่ ซึ่งจะทำให้มีค่าแบนด์วิดท์ (overall RF bandwidth) ประมาณ 7 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากันกับแบนด์วิดท์ของช่องโทรทัศน์ขาวดำในระบบยุโรปพอดี สำหรับแบนด์วิดท์ของสัญญาณโทรทัศน์ที่ให้ภาพสีซึ่งเกิดจาก E_U กับ E_V นั้น สามารถกำหนดให้มีค่าประมาณ 1.3 เมกกะเฮิรตซ์ ถึง 1.5 เมกกะเฮิรตซ์ เท่ากันทั้งสองสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 โทรทัศน์สีระบบเอส.อี.ซี.เอ.เอ็ม. (SECAM color TV system)

SECAM (Sequential a memoire หรือ Sequential color with memory) เป็นระบบโทรทัศน์อีกระบบหนึ่งคิดค้นขึ้นโดย Dr.Henry D.France เริ่มใช้มาตั้งแต่ปีค.ศ.1967 นิยมใช้กันอยู่ 33 ประเทศแถบยุโรปตะวันออก ได้แก่ ฝรั่งเศส อัลจีเรีย เยอรมันตะวันออก ฮังการี ตูนีเซีย รูมาเนีย และรัสเซีย ฯลฯ เป็นต้น ระบบ SECAM เป็นระบบที่ไม่มีความผิดเพี้ยนของสี รายละเอียดของภาพมีคุณภาพสูงเทียบเท่ากันระบบ PAL ข้อเสีย ภาพจะมีการสั่นไหวเหมือนระบบ PAL ส่วนการตัดต่อภาพในระบบนี้ไม่สามารถทำได้ ซึ่งในการผลิตรายการโทรทัศน์ส่วนมากใช้ระบบ PAL และเมื่อผลิตเสร็จแล้วจึงเปลี่ยนกลับไปเป็นระบบ SECAM แล้วจึงส่งออกอากาศ และเนื่องจากความกว้างของคลื่นสัญญาณมีน้อย จึงทำให้เกิดคลื่นความถี่สัญญาณสีรบกวนภาพ(Patterning Effects) จึงทำให้ภาพเกิดมีสีรบกวนในขณะรับชมรายการได้

2.6 อุปกรณ์แสดงค่า

2.6.1 ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นอุปกรณ์ไอซี (IC : Integrated Circuit) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้หลายครั้ง รับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิตอลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิตอลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออาจจะเรียกอีกอย่างได้ว่าไมโครโพรเซสเซอร์ชิพเดี่ยว (Single-Chip Microprocessor) ซึ่งเป็นไมโครโพรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU : Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาในภายหลังเพื่อนำไปใช้ในวงจรด้านงานควบคุม คือ แทนที่ในการใช้งานจะต้องต่อวงจรภายนอกต่างๆเพิ่มเติม เช่นเดียวกับไมโครโพรเซสเซอร์ ก็จะทำการรวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ ส่วนอินพุต/เอาท์พุตบางส่วนเข้าไปในตัวไอซีเดียวกันและเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปด้วยเพื่อให้มีความสามารถเหมาะกับการใช้งานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา วงจรการสื่อสารอนุกรม เป็นต้น ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถจะทำงานเสมือนกับเป็นคอมพิวเตอร์เล็กๆเครื่องหนึ่งกล่าวโดยสรุปคือ

Microcontroller = Microprocessor + Memory + I/O

ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางโดยมักจะเป็นการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ (Embeded Systems) เพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่าง เช่นใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรถยนต์, เครื่องปรับอากาศ, เครื่องซักผ้าอัตโนมัติ เป็นต้นเพราะว่าไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีเหมาะสมต่อการใช้งานควบคุมหลายประการเช่น

1. ไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็ก
2. ระบบที่ได้มีราคาถูกกว่าการใช้ชิพไมโครโพรเซสเซอร์
3. วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
4. มีคุณสมบัติเพิ่มเติมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะซึ่งใช้งานได้ง่าย
5. ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันทำให้เลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม

2.6.2 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

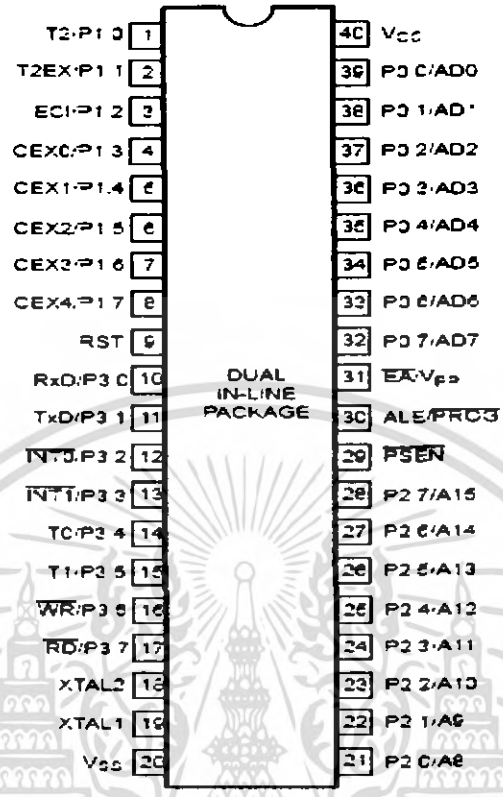
การเรียนรู้เพื่อพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51 ที่เหมาะสมควรจะมีขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมใหญ่พอสมควร ซึ่งในที่นี้ใช้ MCS-51 เบอร์ P89C51RD2 ของ Phillips เนื่องจากมีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลชมากถึง 64 กิโลไบต์ มีพอร์ตให้ใช้งานถึง 4 พอร์ต พร้อม ไทเมอร์ 3 ตัว มีโมดูล PCA สำหรับสร้าง PWM จำนวน 5 ช่อง และยังมีหน่วยความจำแรมพิเศษอีก 1 กิโลไบต์ และมีความสามารถเด่นคือ สามารถโปรแกรมหน่วยความจำผ่านพอร์ตอนุกรมในแบบ ISP (*In-system Programming*) ทำให้สามารถพัฒนาหรือแก้ไขโปรแกรมได้สะดวกขึ้น

2.6.3 ลักษณะการจัดขาภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ลักษณะการจัดขาภายนอกของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จะมีการแบ่งกลุ่มการจัดขาออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ

- กลุ่มขาแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง และสัญญาณนาฬิกา
- กลุ่มขาสำหรับการอ้างแอดเดรสและรับส่งข้อมูล
- กลุ่มขาที่ใช้ในการควบคุม
- กลุ่มขาพอร์ตใช้งานแบบขนานและอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

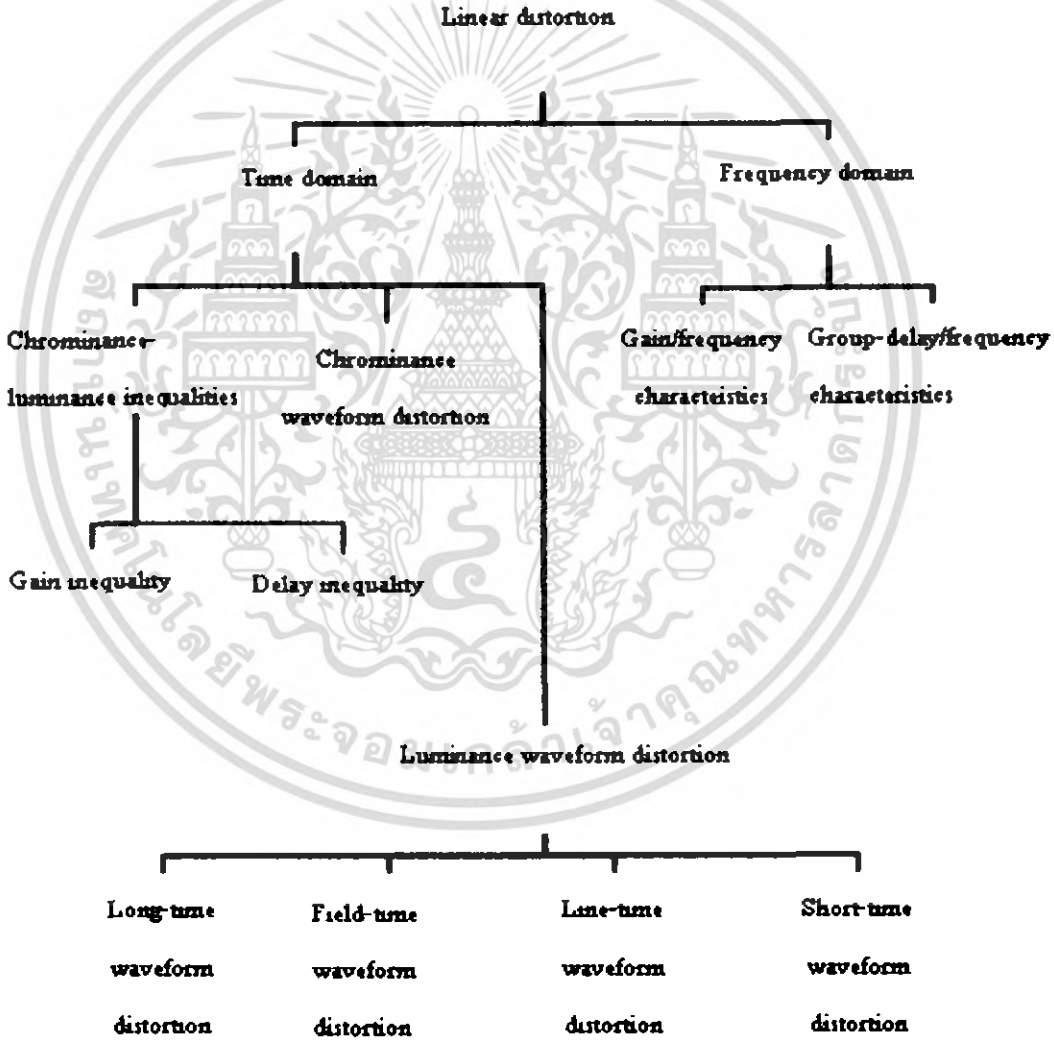
83085
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3

ความผิดเพี้ยนในระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์

3.1 ชนิดของความผิดเพี้ยน (Type of Distortion)

ความผิดเพี้ยนในระบบการส่ง สามารถแบ่งได้เป็นความผิดเพี้ยนเชิงเส้น(Linear distortion) ความผิดเพี้ยนไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear distortion) ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นสามารถจำแนกได้ดังตาราง



ตารางที่ 3.1 การจำแนกความผิดเพี้ยนเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

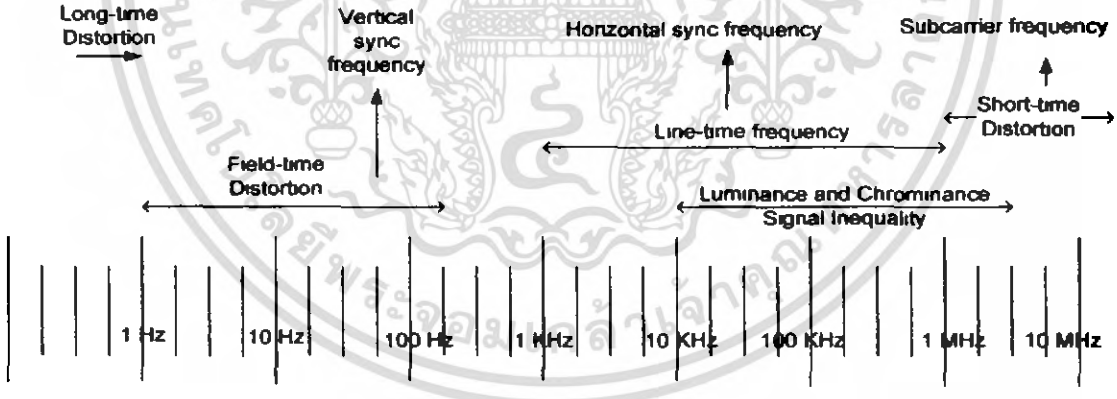
3.2 ความผิดเพี้ยนเชิงเส้น (Linear distortion)

ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นเกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะของความถี่ในสายส่งไม่ราบเรียบ(non-flat) ซึ่งวิธีการวัดความผิดเพี้ยนเชิงเส้นสามารถทำได้สองวิธี โดยวิธีแรกใช้สัญญาณตรวจวัดในขอบข่ายของเวลา (time domain) และวิธีที่สองวัดคุณลักษณะทางขนาดและเฟสในของขอบข่ายความถี่(frequency domain)

ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ด้วยวิธีการทางขอบข่ายของเวลานั้น ได้แก่การส่งสัญญาณทดสอบไปร่วมกับสัญญาณโทรทัศน์โดยการใส่ (insert test signal) เข้าไปในช่องแบล้งกิ้ง ตามข้อตกลงระหว่างประเทศ ซึ่งรับรองโดย CCIR เมื่อปี 1974 ให้ใส่สัญญาณทดสอบที่เส้นที่ 17 (330) และ 18 (331) สำหรับโทรทัศน์ระบบ 625 เส้น ดูได้จากภาคผนวกที่ 1

3.3 ความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณส่องสว่าง (Luminance waveform distortion)

ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลตอบสนองของขนาดและเฟสต่อความถี่ทดสอบสามารถแบ่งขอบเขตหรือแบนด์การส่งสัญญาณภาพออกเป็น 4 ขอบเขต (regions) ดังแสดงในรูป



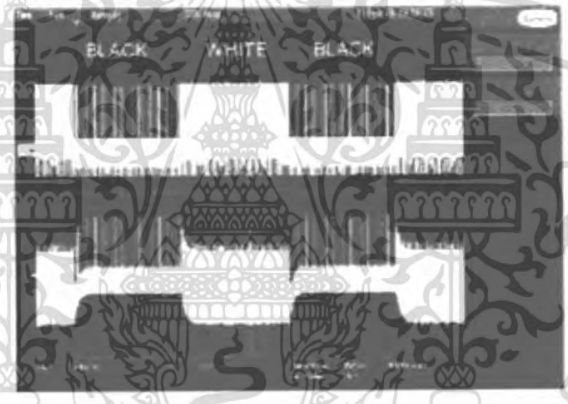
รูปที่ 3.1 แสดงขอบเขตชนิดของความผิดเพี้ยน

3.4 ความผิดเพี้ยนรูปสัญญาณลองไทม์ (Long-time waveform distortion)

ในบางครั้งขนาดของสัญญาณภาพที่ส่งไปในข้อมูลภาพนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ในช่วงคาบเวลาระหว่าง 1~10 วินาที โดยสายตามนุษย์สามารถรับรู้ได้จากการเปลี่ยนแปลงของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สว่าง (brightness) หรือการกระพริบของภาพ (flicker) ความผิดเพี้ยนของลองไทม์อาจเกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น จากการสัมของสายกำลังส่ง (Power Line hum) และ Power supply ripple ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณภาพ (average picture level) หรือใช้ตัวย่อว่า APL เปลี่ยนแปลง โดย APL นั้นเป็นระดับของสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของแบล้งกิ้งในช่วงของ active picture period เท่านั้น โดยค่าดังกล่าวแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ระหว่างผลต่างของระดับแบล้งกิ้งกับระดับสัญญาณสีขาว (white level) จากการที่ตัวแยกซิงค์ (Sync separator) กับ d.c. restorer ไม่อาจเปลี่ยนแปลงตามระดับของสัญญาณภาพที่เลื่อนออกไป (level shift) ทำให้ส่วนของสัญญาณซิงค์ไม่เรียงกันเป็นแถวดังรูป วิธีการวัดความผิดเพี้ยนของลองไทม์นั้นกระทำโดยการวัดคุณลักษณะของ transient เมื่อ APL มีการเปลี่ยนแปลง

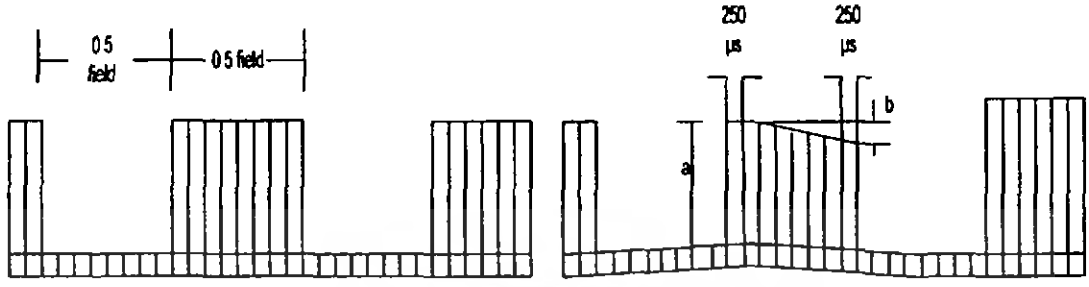


รูปที่ 3.2 แสดงความผิดเพี้ยนรูปสัญญาณลองไทม์

3.5 ความผิดเพี้ยน ฟีลด์-ไทม์เวฟฟอร์ม (Field-time waveform distortion)

สัญญาณซิงค์แนวตั้ง (vertical sync signal) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสะแกนทางแนวตั้งความถี่ 50 เฮิรตซ์ หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่าความถี่ฟิลด์ ถ้าสัญญาณดังกล่าวเกิดการผิดเพี้ยนขึ้นจะทำให้ภาพด้านบนของจอภาพมีความเข้มจางลง (shading) สำหรับสัญญาณที่ใช้ในกาวัดความผิดเพี้ยน ฟีลด์-ไทม์ ได้แก่ รูปสัญญาณสี่เหลี่ยม (square waveform) โดยความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเรียกว่า Sag ดังแสดงในรูปที่3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



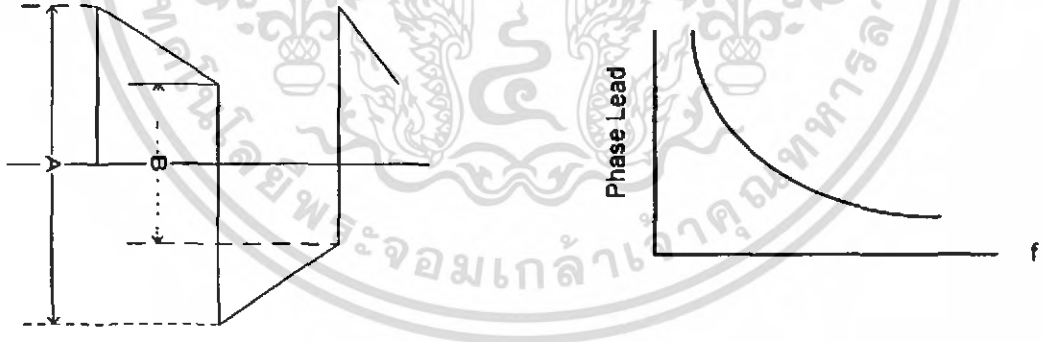
รูปที่ 3.3 ความผิดเพี้ยนฟีลด์-ไทม์เวฟฟอร์ม

สำหรับรูปที่ 3.3 แสดงผลตอบสนองของสัญญาณทดสอบรูปสี่เหลี่ยมความถี่ 50 เฮิรตซ์ต่อคุณลักษณะของขนาดและเฟส โดยความผิดเพี้ยน โดย sag สามารถคำนวณได้จาก

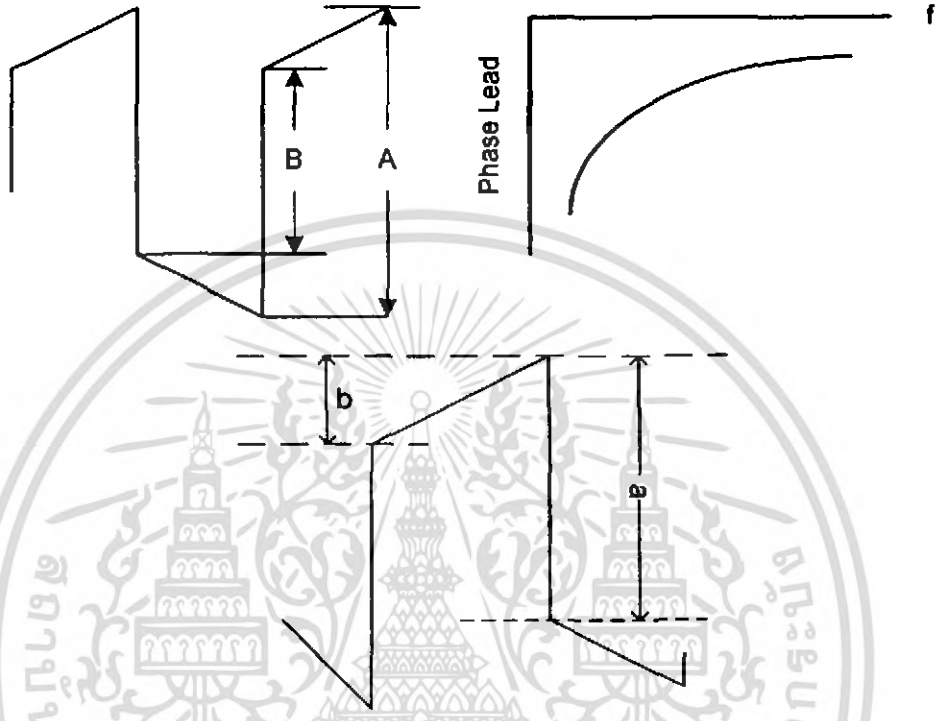
$$Sag = \frac{A-B}{A+B} x100(\%)$$

หรือ อาจเขียนได้ว่า

$$= \frac{b}{a} x100\ (\%)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

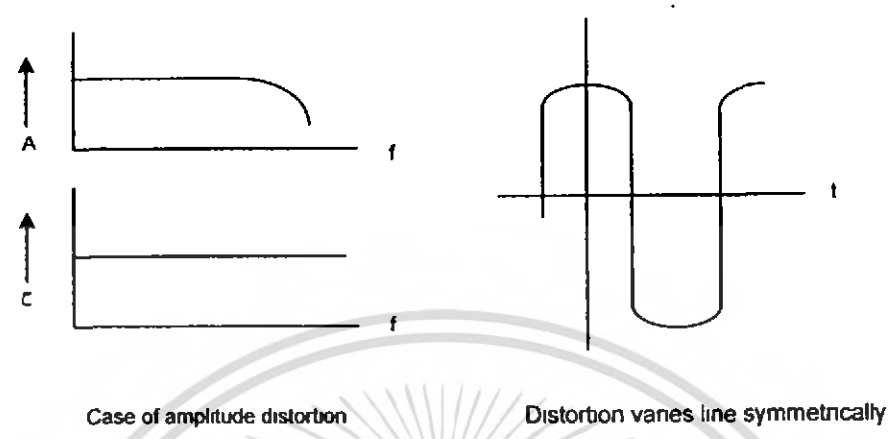


รูปที่ 3.4 แสดงความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณสี่เหลี่ยม Sag

3.6 ความผิดเพี้ยนไลน์ -ไทม์เวฟฟอร์ม (Line-time waveform distortion)

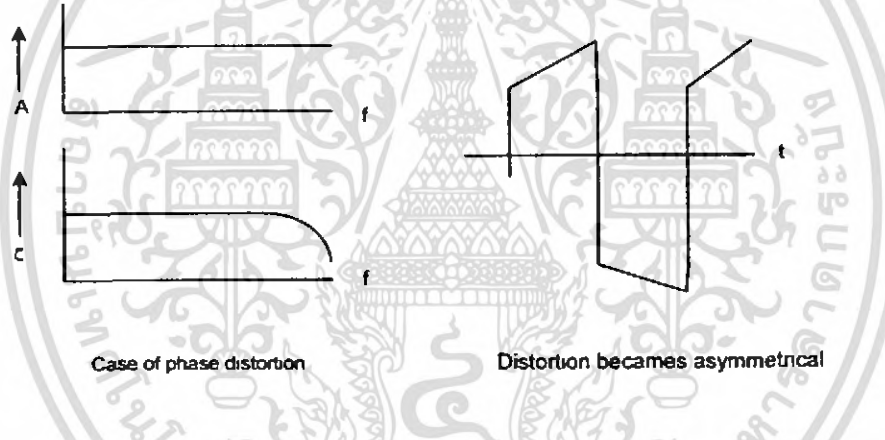
ไลน์-ไทม์ มีความหมายถึง ช่วงคาบของการสแกนทางแนวนอน 1 คาบเวลา (horizontal *scanning period*) ของสัญญาณภาพ โดยที่ความผิดเพี้ยนของไลน์-ไทม์ สามารถใช้ประเมินคุณลักษณะการส่งสัญญาณภาพในย่านความถี่ซิงค์ทางแนวนอน ตลอดจนถึงความถี่กลางและความถี่สูง (mid-and high frequency) ในการวัดไลน์-ไทม์นั้นจะใช้สัญญาณบาร์ (bar) หรือสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่เหมือนกับความถี่ของไลน์ (line frequency) ถ้าระบบที่ทำการทดสอบมีคุณลักษณะทางขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ไม่ราบเรียบตามแบนด์ความถี่ที่ส่งแล้ว ความผิดเพี้ยนของไลน์ -ไทม์จะเกิดขึ้น โดยชนิดของความผิดเพี้ยนจะแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นในย่านความถี่ต่ำ ความถี่กลางหรือความถี่สูง โดยความผิดเพี้ยนดังกล่าวได้แยกจำแนกชนิดออกดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



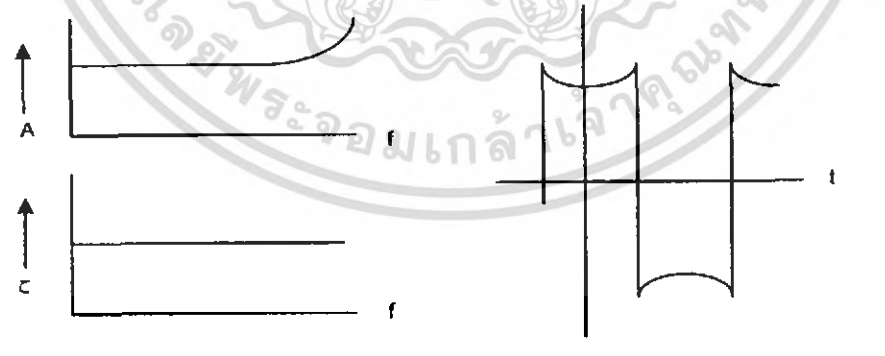
Case of amplitude distortion

Distortion varies line symmetrically



Case of phase distortion

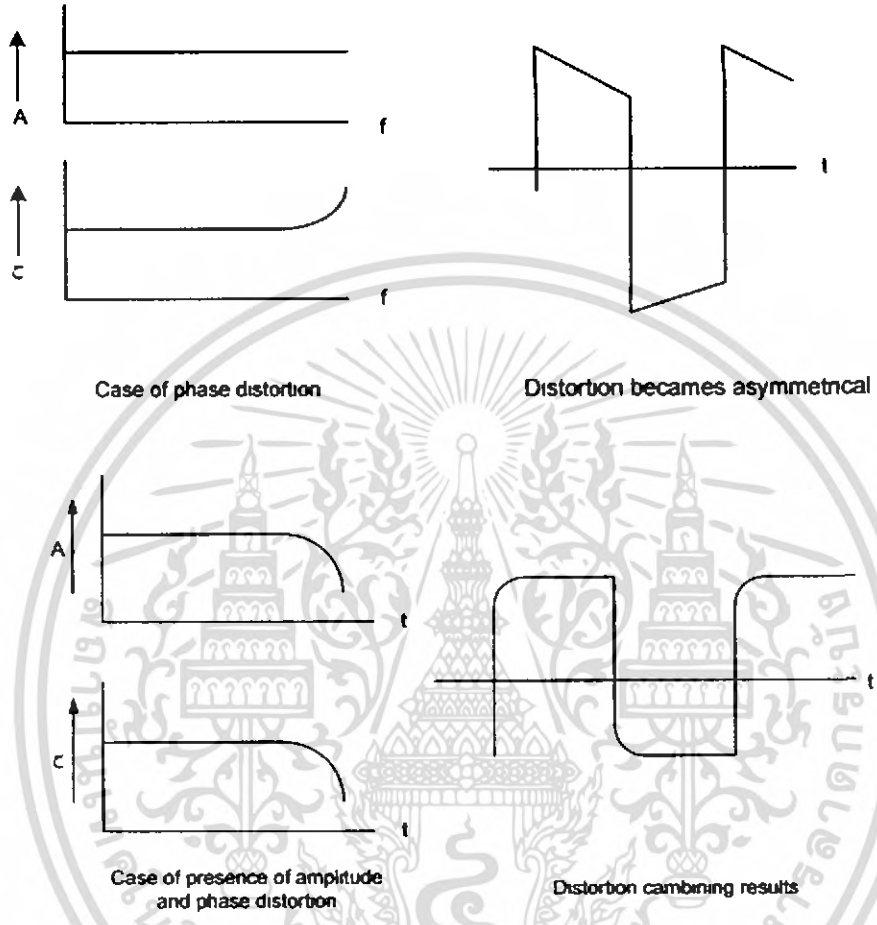
Distortion becames asymmetrical



Case of amplitude distortion

Distortion varies line symmetrically

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

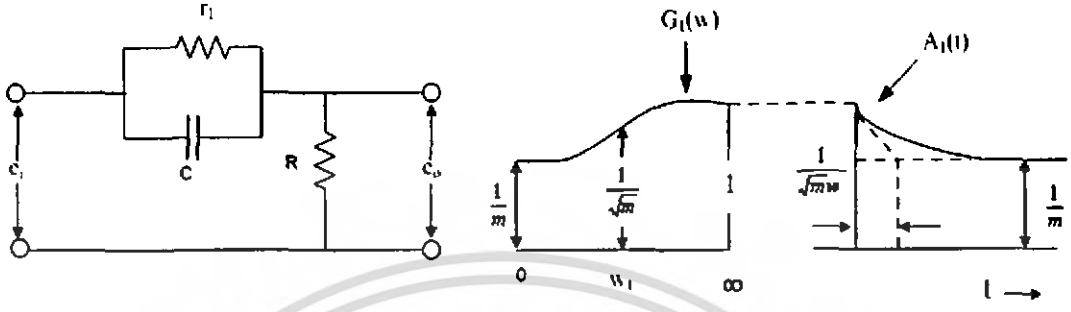


รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมต่อคุณลักษณะทางขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์

3.6.1 ความผิดเพี้ยนที่เกิดเนื่องจากคุณลักษณะที่ความถี่กลาง

ความถี่ Line-time จัดอยู่ในช่วงความถี่ซึ่งมีขอบข่ายประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ สำหรับตัวอย่างง่ายๆที่มีผลต่อความถี่กลาง สามารถพิจารณาได้จากวงจรเนตเวิร์ก สามารถพิจารณาได้จากวงจรเนตเวิร์ก แสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก. รูป ข. รูป ค.

จาก รูป ก. แสดงตัวอย่างวงจรที่มีผลต่อคุณลักษณะที่ความถี่กลาง

รูป ข. แสดงคุณลักษณะทางขนาดต่อความถี่

และ รูป ค. แสดงผลตอบสนองของสัญญาณยูนิตพัลส์ต่อวงจรในรูป ก.

จะเห็นได้ว่าค่าขนาดของGainที่ความถี่สูงจะสูงกว่าขนาดความถี่ต่ำและความถี่กลาง ผลของการเปลี่ยนแปลงเนตเวิร์กคอมโพนันส์ (Network Components) โดยการป้อนสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมความถี่ไลน์ประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์ แล้วทำการปรับค่า Time Constant ของวงจรเนตเวิร์ก ซึ่งเราปรับให้ผลตอบสนองต่อความถี่ขนาด สามารถแบ่งขอบข่ายของความถี่ออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. ความถี่ในย่าน Line frequency ประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์
2. ความถี่กลางสัญญาณภาพ (medium video frequency) ประมาณ 50 ~ 500 กิโลเฮิรตซ์
3. ความถี่สูงสัญญาณภาพ (high video frequency) ตั้งแต่ 0 5 ~6 เมกกะเฮิรตซ์ และผลของสัญญาณเอ้าต์พุต

เราอาจพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบของเนตเวิร์ก โดยการป้อนสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมความถี่ไลน์ที่ประมาณ 15 กิโลเฮิรตซ์ แล้วทำการปรับค่า Time Constant ของวงจรเนตเวิร์ก ซึ่งเราปรับให้ผลตอบสนองต่อความถี่ทางขนาดออกเป็น 3 ช่วงและผลของสัญญาณเอ้าต์พุต

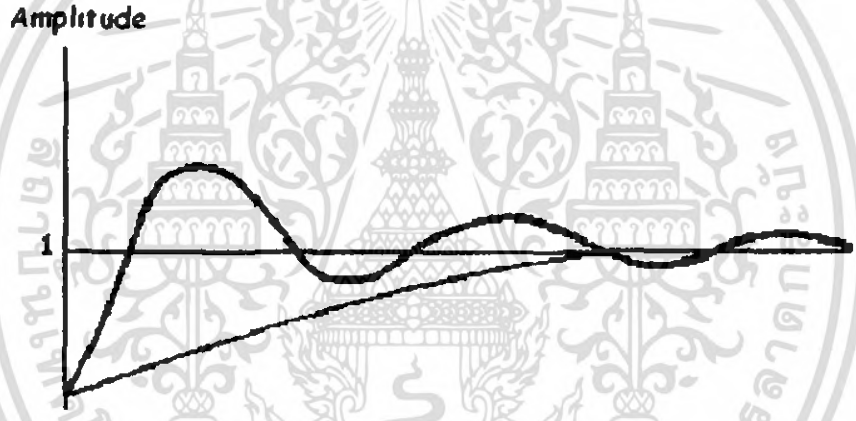
สำหรับความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในย่านความถี่กลางเราเรียก Positive streaking ถ้าการส่งสัญญาณภาพเกิดความผิดเพี้ยนดังกล่าว จะทำให้เกิดผลต่อสัญญาณส่องสว่าง และถ้าเกิดความผิดเพี้ยนทางNegative streakingขึ้น จะทำให้เกิดผลต่อสัญญาณส่องสว่างในทางตรงกันข้าม ฉะนั้นในการส่งสัญญาณภาพจะต้องควบคุมให้ลักษณะทางขนาดเฟสในระบบสายส่งราบเรียบที่สุดต่อความถี่กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ความผิดเพี้ยนที่เกิดเนื่องจากคุณลักษณะที่ความถี่สูง

ในการพิจารณาผลของความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะที่ความถี่สูงไม่ราบเรียบนั้น จะมีผลให้ความคมชัดของภาพในแนวนอนแย่ลง (Horizontal resolution) จากรูปที่ 3.5 เป็นตัวอย่างที่จะแสดงให้เห็นว่า ถ้าป้อนสัญญาณยูนิต พัลส์ (*Unit pulse*) ผ่านวงจรเนตเวิร์กดังกล่าวทำให้ *horizontal* resolution ลดลงแสดงว่าแบนด์วิดท์ของวงจรกรองความถี่ต่ำ 1 MHz ให้ horizontal resolution ได้ประมาณ 100 ไลน์

จากรูป การแสดงผลตอบสนองของยูนิต พัลส์เมื่อป้อนสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำซึ่งมีคุณลักษณะของ sharp cut off จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยน overshoot หรือ ringing ขึ้น

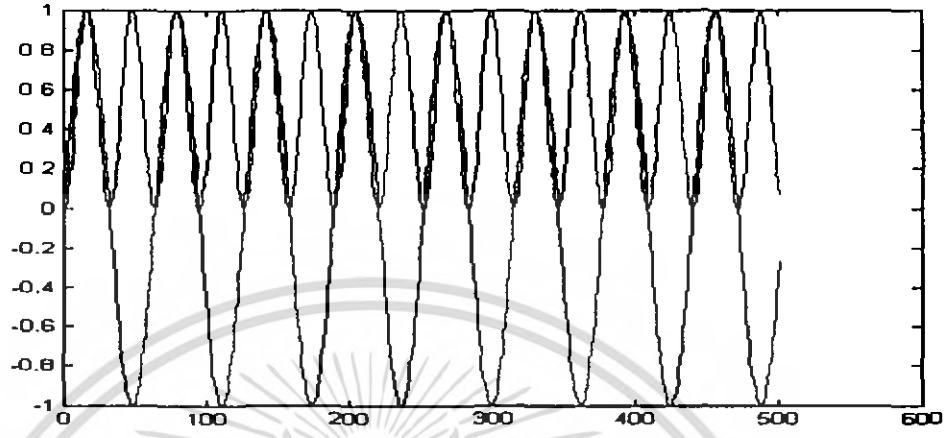


รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองของสัญญาณต่อ LPF ทางอุดมคติและวงจร RC

3.7 ความผิดเพี้ยนชอท -ไทม์ เวฟฟอร์ม (Short-time waveform distortion)

สัญญาณทดสอบที่ใช้ประเมินความผิดเพี้ยนของผลตอบสนองทางขนาด หรือ เฟสต่อความถี่ในย่านความถี่สูง ในทางปฏิบัตินิยมใช้สัญญาณทดสอบพัลส์ ซายน์ กำลังสอง และสัญญาณบาร์(sine square pulse and bar) ซึ่งพัลส์ ซายน์ กำลังสองมีความไว (sensitivity) ต่อความผิดเพี้ยนสูงกว่าพัลส์รูปสี่เหลี่ยม สัญญาณพัลส์ ซายน์กำลังสองเทียบกับสัญญาณซายน์ จะเห็นได้ว่า พัลส์ ซายน์ กำลังสองมีขนาดเป็นบวกทุกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 สัญญาณพัลส์ ซายน์กำลังสองเทียบกับสัญญาณซายน์

ปัจจุบันโคไซน์กำลังสองเป็นที่นิยมในการใช้ตรวจสอบข้อบกพร่อง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระบบโทรทัศน์ พัลส์ดังกล่าวนี้อาจเป็นแบบ T และ 2T สำหรับตรวจสอบโทรทัศน์ขาวดำ และแบบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองใช้ในการตรวจสอบโทรทัศน์สี วิธีการตรวจสอบระบบใดๆทำได้โดยการป้อนโคไซน์กำลังสองพัลส์ให้กับระบบนั้น แล้วสังเกตการณ์ตอบสนองต่างๆของระบบกล่าวคือ การตอบสนองของขนาด (Amplitude Response) การตอบสนองของเฟส (Phase Response) และเอนเวโลปดีเลย์ (Envelope Delay)

3.8 การวัดค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์

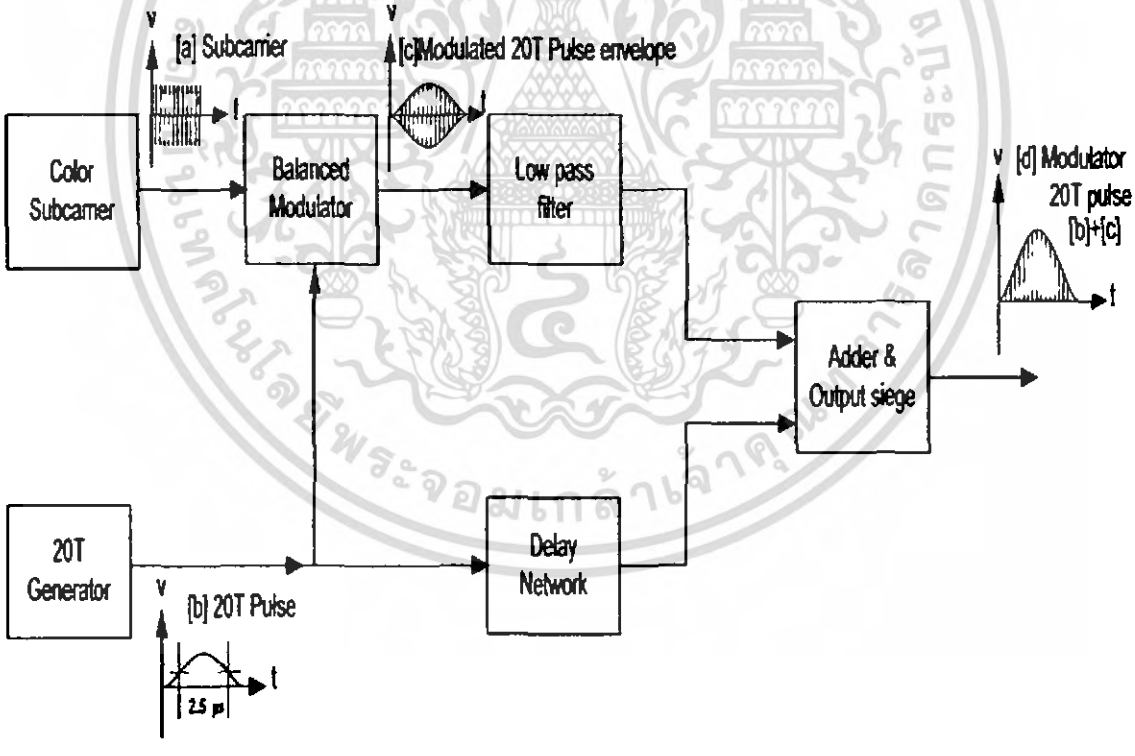
3.8.1 การวัดความผิดพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์ โดยใช้สัญญาณพัลส์ มอดูเลชั่นไซน์กำลังสอง (The Measurement of Gain Delay Distortion by using Modulationsine-Squraed pulse)

ในการวัดคุณสมบัติของสายส่งสำหรับงานด้านโทรทัศน์สี การทดสอบลูมิแนนซ์โครมิแนนซ์อัตราขยายและดีเลย์ อินอิควอลิตี้ (Luminance-Chrominance Gain and Delay Incquality)โดยการใช้สัญญาณรวม(Composite Signal)ซึ่งประกอบด้วยพัลส์กำลังสองหรือโคไซกำลังสองอย่างใดอย่างหนึ่ง ในที่นี้จะกล่าวถึงพัลส์โคไซน์กำลังสอง(sinc Squared Pulse) รวมกับพัลส์มอด (Pulse Mod) ที่ความถี่คลื่นพาหะของสี(Color Subcarrier) ในกรณีที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นสัญญาณรวมจะมีเอนเวโลป (Envelope)โดยเฉพาะที่ฐานของพัลส์ (Baseline) เป็นเส้นตรงและในกรณีที่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในระบบการส่ง จากการสังเกตเอนเวโลปของฐานของพัลส์ (Envelope of Baseline) ซึ่งอาจจะเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

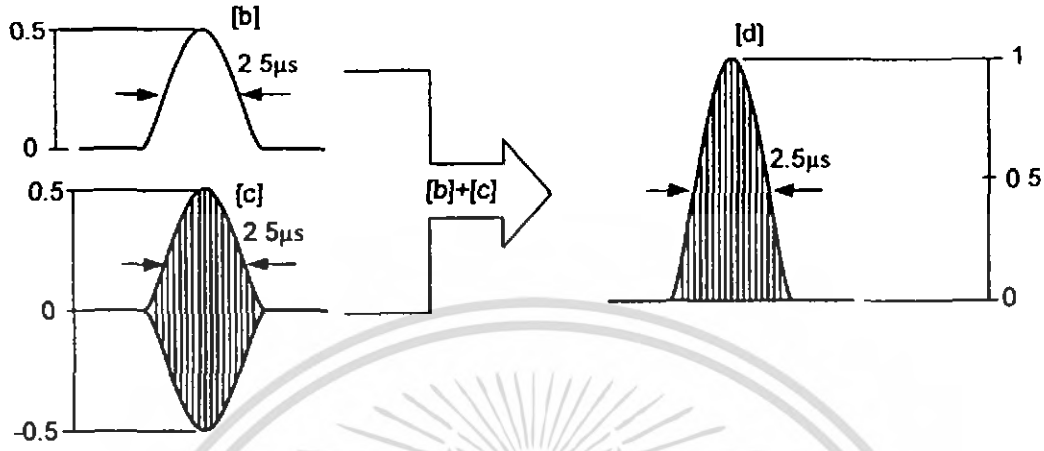
สัญลักษณ์ของไซน์ หรือโคไซน์นั้นเราสามารถพิจารณาได้จากออสซิลโลสโคป โดยการวัดค่ายอด (peak) สูงสุดและต่ำสุดของฐานพัลส์เราก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการขยาย (Gain) และดีเลย์ (Delay) ได้

สัญญาณรวมมอดูเลตพัลส์20T (Composite 20T pulse) สามารถสร้างขึ้นได้ ดังแสดงในรูป 2.5 โดยการป้อนสัญญาณพัลส์ 20T จากเครื่องกำเนิด รูป (b) โดยสัญญาณดังกล่าวมีค่า h.a.d. 2 ไมโครวินาที ในระบบ PAL และ 2.5 ไมโครวินาทีในระบบ NTSC แล้วมอดกับสัญญาณคัลเลอร์ขับแคริเออร์ (a) จะได้สัญญาณรูป (c) โดยสัญญาณที่มอดแล้วจะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำแบนด์วิดท์กว้าง เพื่อกรองเอาฮาร์มอนิกที่ไม่ต้องการออก ส่วนสัญญาณจาก (b) อีกทางหนึ่งจะผ่านวงจรหนึ่ง(Delay network) เพื่อปรับให้สัญญาณ (b) กับสัญญาณ (c) มีไทม์มิ่งเท่ากัน แล้วจึงผ่านวงจรรวม (adder) ก็จะได้สัญญาณรวมมอดูเลตพัลส์ 20T ในรูป (d) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาใช้วัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณโทรทัศน์สี



รูปที่ 3.8 รูปวงจรผลิตสัญญาณรวมมอดูเลต 20T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการรวมสัญญาณ (b) + (c)

3.8.2 การคำนวณหาความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมมอดูเลตพัลส์ 20T

เควินซี สเปคตรัมของมอดูเลต 20T พัลส์ และ 12.5T พัลส์ ดังจะกล่าวต่อไปนี้ มอดูเลตโคไซน์กำลังพัลส์ ประกอบด้วย สัญญาณในย่านความถี่ต่ำสัญญาณที่ยังไม่ได้มอดและสัญญาณในย่านความถี่สูง สัญญาณมอดแล้วสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ มีสมการดังนี้

$$V\ell(t) = \frac{A}{2}\cos^2\frac{\pi t}{40T}$$

สเปคตรัมดังนี้

$$V\ell(\omega) = \frac{A}{2}\cdot\frac{20T}{1-\left(\frac{20\omega T}{\pi}\right)}\cdot\frac{\sin 20\omega T}{20\omega T}$$

$$V\ell(f) = \frac{A}{2}\cdot\frac{20T}{1-(40Tf)^2}\cdot\frac{\sin 40\pi fT}{40\pi fT} \qquad \text{--------- (2 2)}$$

สเปคตรัมของมอดูเลตโคไซน์ กำลังสองพัลส์แบบ 20T มีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_c(t) = \frac{A}{2}\cos^2\frac{\pi}{40T}\cos\omega_c t \qquad |t| \le 20T$$

$$= 0 \qquad |t| \ge 20T$$

$$V_c(\omega) = \frac{A}{2}\int_0^{20T}\left\{\left(1+\cos\frac{\pi}{20T}\right)\cos\omega_c t\right\}\cdot\cos\omega t\cdot dt$$

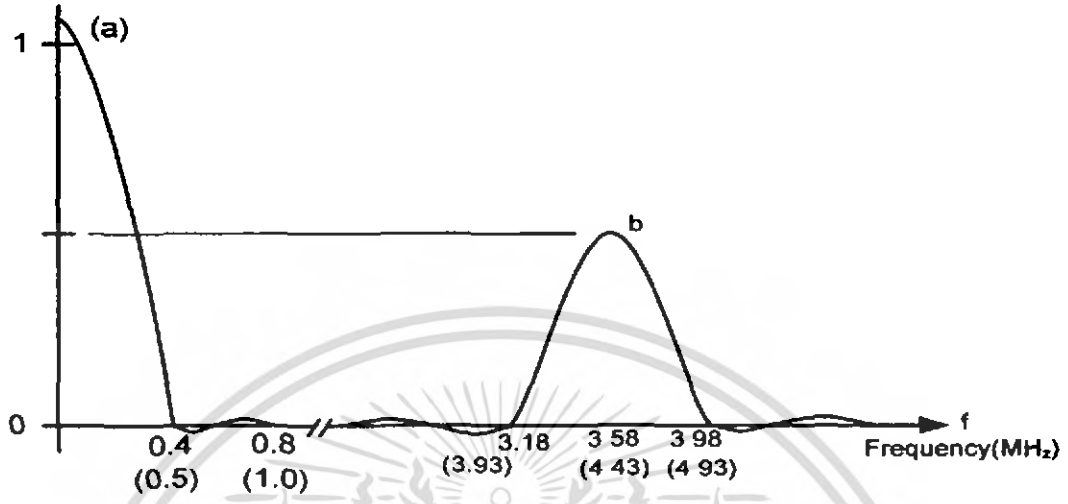
$$= \frac{A}{2}\left[\frac{20T}{1-\left\{\frac{20T(\omega-\omega_c)}{\pi}\right\}^2}\sin\frac{(\omega-\omega_c)20T}{\omega-\omega_c 20T}\right] + \frac{A}{2}\frac{20T}{1-\left\{\frac{20T(\omega+\omega_c)}{\pi}\right\}^2}\cdot\frac{\sin(\omega+\omega_c)20T}{(\omega+\omega_c)20T}$$

สมการของฟรีเควันซี่ สเปคตรัมอาจเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$V_c(f)_{20T} = \frac{A}{2}\cdot\left[\frac{20T}{1-\{40T(f-f_c)\}^2}\cdot\frac{\sin(f-f_c)40\pi T}{(f-f_c)40\pi T}\right] \qquad \text{(2.3)}$$
$$+\frac{20T}{1-\{40T(f+f_c)\}^2}\cdot\frac{\sin(f+fc)}{(f+f_c)40\pi T}$$

จากสมการที่2-3 นำไปวาดจะได้รูปสเปคตรัมดังรูปที่(2.7) สัญญาณที่ยังไม่ได้มอดและสัญญาณในย่านความถี่สูงสัญญาณมอดแล้ว สัญญาณในย่านความถี่ต่ำ มีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมพัลส์20 T

3.8.3 ทฤษฎีและการหาสูตรสำเร็จของความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์

การหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี (Chrominance signal) ทั้งอัตราขยาย (gain) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ A และไทม์ดีเลย์ (τ) โดยผลจากการคำนวณหาความผิดเพี้ยนทั้ง A และ τ จะสัมพันธ์กับค่ายอดทั้งสองจากฐานของพัลส์ ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าทราบค่ายอดจากฐานของพัลส์ ก็สามารถที่จะหาความผิดเพี้ยนของพัลส์ว่าในระบบทดสอบ (System Under test) จะมีผลต่อสัญญาณสีทางด้านไหน เช่น ระบบทดสอบอาจมีผลทางด้านความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย (gain distortion) อย่างเดียวหรือความผิดเพี้ยนทางด้านไทม์ดีเลย์ (Time delay Distortion) เพียงอย่างเดียว หรือมีผลของความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยาย ไทม์ดีเลย์ ซึ่งในบทนี้จะแสดงค่าโดยประมาณด้วยค่าที่กำหนดให้ของค่ายอดทั้งสองที่ฐานของพัลส์และอัตราการขยายที่ไม่เท่ากัน (A) และดีเลย์อินอิควอลิตี้ (r) ที่สัมพันธ์กัน

วิธีการคำนวณของอัตราการขยาย และดีเลย์อินอิควอลิตี้ กำหนดสัญลักษณ์การคำนวณดังต่อไปนี้

$f(t)$ = เบสไลน์ฟังก์ชั่นของ โคไซน์กำลังสองพัลส์

$u(t)$ = เอนเวโลป ด้านบนของ โคไซน์กำลังสองพัลส์

$l(t)$ = เอนเวโลป ด้านล่างของโคไซน์กำลังสองพัลส์

Y_1 & Y_2 = ขนาดของเบสไลน์ด้านล่างของ โคไซน์กำลังสองพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A = อัตราการขยายของโคไซน์กำลังสองพัลส์ที่ได้ถูกรวมกับเบสแบน (base band) ที่สัมพันธ์กัน

τ = ดีเลย์อินอิควอลิตี้ ส่วนที่ถูกรวมช้าไป หรือนำหน้าสัญญาณที่ยังไม่มีการมอด

T_0= ระยะเวลาของขนาดของพัลส์ ในกรณีของ 20T pulse คือ2μs. และ12.5 T

วิธีการคำนวณให้พิจารณาจากรูปที่ 3.9 จะได้เอนเวโลปด้านบนและด้านล่างดังนี้

$$U(t) = f(t) + Af(t-\tau) \qquad \text{-------- (2.4)}$$

$$1(t) = f(t) - Af(t-\tau) \qquad \text{--------- (2.5)}$$

และค่าเบสแบน (Baseband) ก็คือ

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\cos^2 \frac{\pi^1}{2T_0} & 0 < t < T_0 \\ 0 & t > T_0 \end{cases} \qquad \text{-------- (2.6)}$$

การหาค่า เอนเวโลปด้านบนและด้านล่างได้ด้วยการแทนค่าสมการ (2.3) ลงในสมการ 2.1) และ (2.2) ตามลำดับ จากเอนเวโลปด้านล่างจะทำให้เราทราบค่า Y_1 และ Y_2 ส่วนเอนเวโลปด้านบนจะทำให้เราทราบค่า Y_{max} จากผลการคำนวณนี้จะทำให้เราสามารถหาสูตรสำเร็จของความผิดเพี้ยนของการขยายที่แน่นอนแสดงได้ดังนี้ วิธีการหาสูตรสำเร็จดังแสดงในภาคผนวกที่ 2

$$A = \frac{1-(y_1 + y_2 + y_1 y_2)}{1+(y_1 + y_2 - y_1 y_2)} \qquad \text{-------- (2.7)}$$

โดยกำหนดให้ $y_1 = \frac{Y_1}{Y_{max}}, \quad y_2 = \frac{Y_2}{Y_{max}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเอนเวโลปด้านล่างที่ฐานของพัลส์เราสามารถจะหาค่าดีเลย์ อินอิควอลิตี้ (Delay Inequality) จากค่ายอดทั้งค่าบวกและค่าลบของ Y_1 และ Y_2 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้สูตรสำเร็จในการหาค่าดีเลย์ อินอิควอลิตี้ดังนี้ วิธีการหาสูตรสำเร็จดังแสดงในภาคผนวกที่2

$$\tau = \frac{T_0}{\pi}\cos^{-1}\left[1+\frac{8y_1y_2}{\{1-(y_1+y_2+y_1y_2)\}\cdot\{1+(y_1+y_2-y_1y_2)\}}\right] \qquad \text{--------- (2.8)}$$

ค่ายอดทั้งค่าบวกและค่าลบของเอนเวโลปด้านล่างจากฐานของพัลส์ Y_1 และ Y_2 ทำการ normalized ด้วยค่ายอดสูงสุดของเอนเวโลปด้านบน นั่นก็คือ

$$y_1 = \frac{Y_1}{Y_{max}}, \qquad y_2 = \frac{Y_2}{Y_{max}}$$

สมการ (2.7) และสมการ (2.8) เป็นสูตรสำเร็จที่ใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ อินอิควอลิตี้ ตามลำดับ

3.9 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว (Distortion Cause by Gain Difference Only)

ในกรณีนี้แสดงว่าค่ายอด Y_1 และ Y_2 ค่าใดค่าหนึ่งมีค่าเป็น 0 ดังนั้นจะไม่มีความผิดเพี้ยนทางดีเลย์เกิดขึ้นก็คือ τ = 0เพราะฉะนั้นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจึงมีค่าความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียวซึ่งสามารถให้เห็นจริงได้ ดังนี้

เมื่อ Y_1 หรือ Y_2 มีค่าเป็น 0 สมการ (3.5) จะกลายเป็น

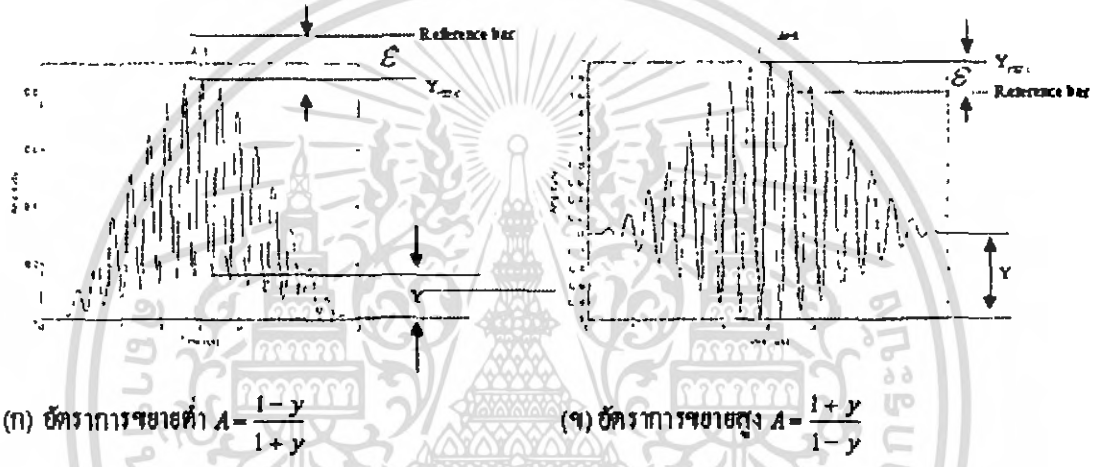
$$\tau = \frac{T_0}{\pi}\cos^{-1}(1) = 0$$

และสมการ (2.7) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1 - y_{1,2}}{1 + y_{1,2}} = \frac{1 - \dfrac{Y}{Y_{\max}}}{1 + \dfrac{Y}{Y_{\max}}} \qquad \text{--------- (2.9)}$$

ซึ่ง ($y_{1,2}$) หรือ Y อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบ เนื่องจากขนาดของความผิดเพี้ยนที่สัมพันธ์กันดังรูป (3.2)



(ก) อัตราการขยายต่ำ $A = \frac{1-y}{1+y}$ (ข) อัตราการขยายสูง $A = \frac{1+y}{1-y}$

รูปที่ 3.11 แสดงความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว

ความผิดเพี้ยนของอัตราการขยาย (ε) พิจารณาได้จากสมการ (2.9) ดังนี้

$$\varepsilon = 1 - A = \frac{2Y / Y_{\max}}{1 - Y / Y_{\max}} \qquad \text{--------- (2.10)}$$

ถ้า $1 >> Y / Y_{\max}$ ดังนั้น $\varepsilon = 2Y / Y_{\max}$

ซึ่ง $2Y / Y_{\max}$ จะถูกเรียกเป็น Relative Chrominance Level (RCL) และบางครั้งถูกเรียกว่า Relative Amplitude of the Color Sub – Carrier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดียว

ในกรณีที่ $Y_1 = Y_2$ ซึ่งฐานของพัลส์มีรูปร่างเป็นคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเท่ากัน แต่อยู่ตรงข้ามแสดงว่าไม่มีความผิดเพี้ยนทางอัตราการขยาย ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีแต่ความผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์เพียงอย่างเดียว ดังได้แสดงต่อไปนี้ จากสมการ (2.7) แทนค่า $Y_1 = Y2$ จะได้ดังนี้

$$A = \frac{1+(Y/Y_{max})^2}{1+(Y/Y_{max})^2} = 1 = 0\,db$$

จากสมการ (2.8) จะกลายเป็น

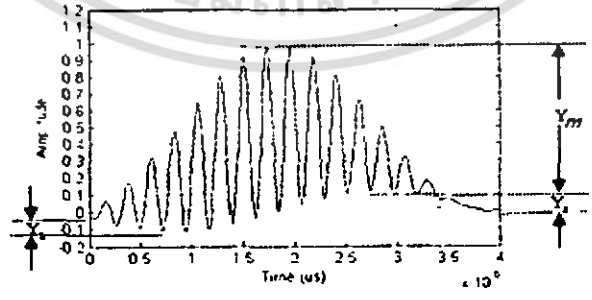
$$\tau = \frac{T_0}{\pi}\cos^{-1}\left[1 - \frac{8(Y/Y_{max})^2}{\left\{1+(Y/Y_{max})^2\right\}^2}\right] \qquad \text{--------- (2.11)}$$

โดนอาศัยสูตรทางตรีโกณมิติ สมการ (2.11) จะกลายเป็น

$$\tau = \frac{2T_0}{\pi}\tan^{-1}\frac{2Y/Y_{max}}{\left\{1-(Y/Y_{max})^2\right\}^2} \qquad \text{--------- (2.12)}$$

$$= \frac{4T_0}{\pi}\tan^{-1}\frac{Y}{Y_{max}}$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ $Y_1 = -Y_2$ จะได้ A = 0 dB ส่วนการผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์ดังแสดงในรูป (3.3)

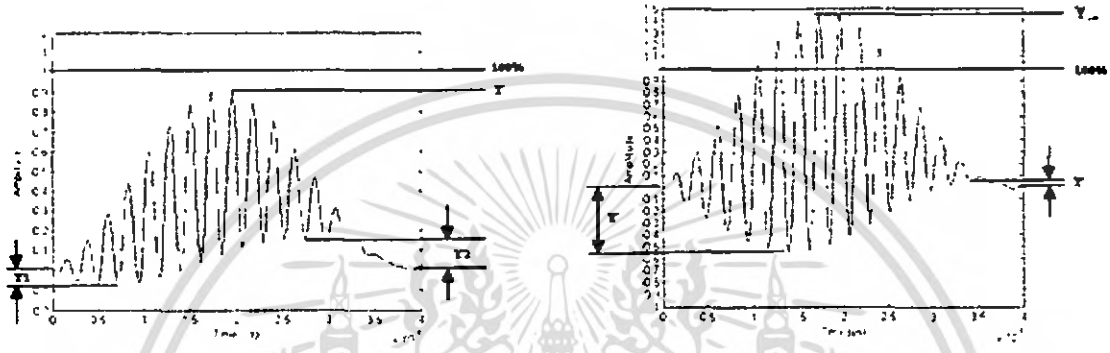


รูปที่ 3.12 แสดงการผิดเพี้ยนของดีเลย์เพียงอย่างเดียว กรณี $Y_1 = -Y_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 กรณีที่เกิดการผิดเพี้ยนทางอัตราการขยายและดีเลย์ พร้อมกัน

กรณีที่เกิดการผิดเพี้ยนทางอัตราการขยายและดีเลย์ พร้อมกัน ในกรณีที่เกิดความผิดเพี้ยนทั้งสองแบบ ค่ายอดทั้งบวกและลบ มีค่าแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายและดีเลย์ พร้อมกัน

เมื่อความผิดเพี้ยนมีค่าน้อย ดังนั้นผลคูณของ Y_1Y_2สามารถตัดทิ้งได้ สมการ (2.7) และ (2.8) อาจเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$A = \frac{1-(y_1+y_2)}{1+(y_1+y_2)} \qquad \text{---------- (2.13)}$$

$$\tau = \frac{T_0}{\pi}\cos^{-1}\left[1+\frac{8y_1y_2}{1-(y_1y_2}\right]$$

และถ้า $(y_1+y_2)^2 << 1$ ความผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์อาจเขียนได้ใหม่ คือ

$$\tau = \frac{4T_0}{\pi}\sqrt{-y_1y_2} \qquad \text{--------- (2.14)}$$

ความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายคำนวณด้วยสมการ (2.7) และ (2.13) จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากและความผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์ เมื่อคำนวณด้วยสมการ (2.8) และ (2.14) ค่าที่ได้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อผลคูณ Y_1Y_2 มีค่าน้อย

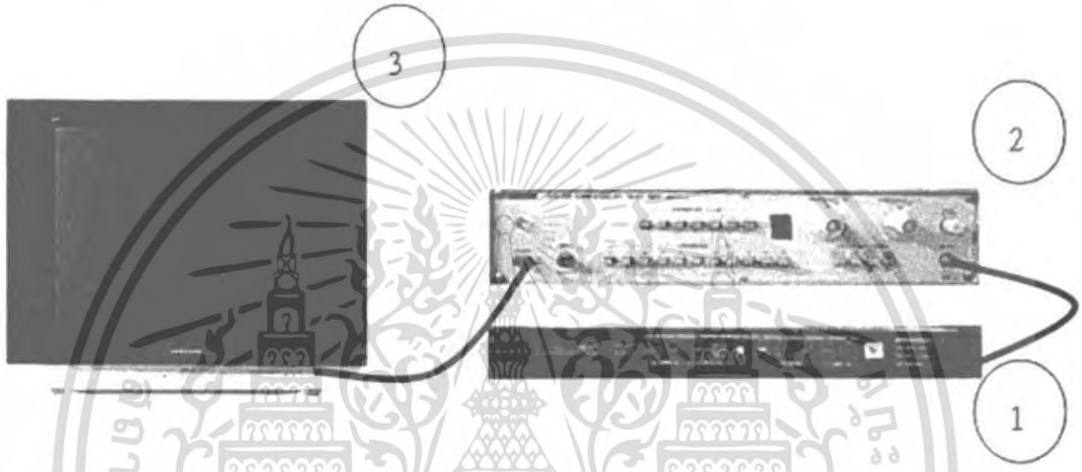
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการใช้โปรแกรมวัดความผิดเพี้ยนร่วมกับฮาร์ดแวร์

4.1.1 อุปกรณ์ในการทดลอง



1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ 20T (Pal television generator TSG-271)

2 เครื่องทำให้สัญญาณผิดเพี้ยน(Color Gain & Delay Test Set MS321A)

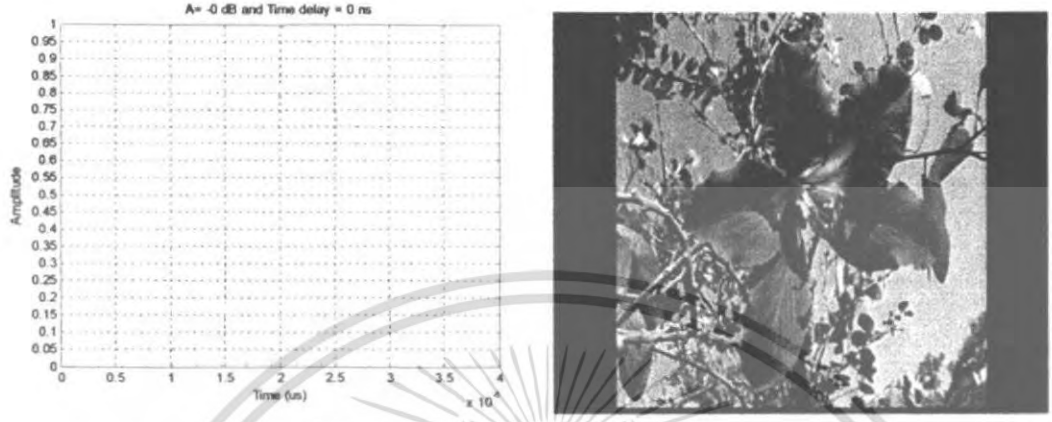
3 โทรทัศน์ที่แสดงรูปภาพที่ผิดเพี้ยนและไม่ผิดเพี้ยน

รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

จากรูป นำสัญญาณทดสอบคือสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านเครื่องที่ทำให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนโดยผิดเพี้ยนทางด้านอัตราขยายตั้งแต่ค่า -3dB ถึง +3dB และด้านกรุ๊ฟดีเลย์ตั้งแต่ค่า -100ns ถึง +100ns จะได้รูปที่ผิดเพี้ยนแสดงออกทางหน้าจอโทรทัศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองที่ไม่มีความผิดเพี้ยน

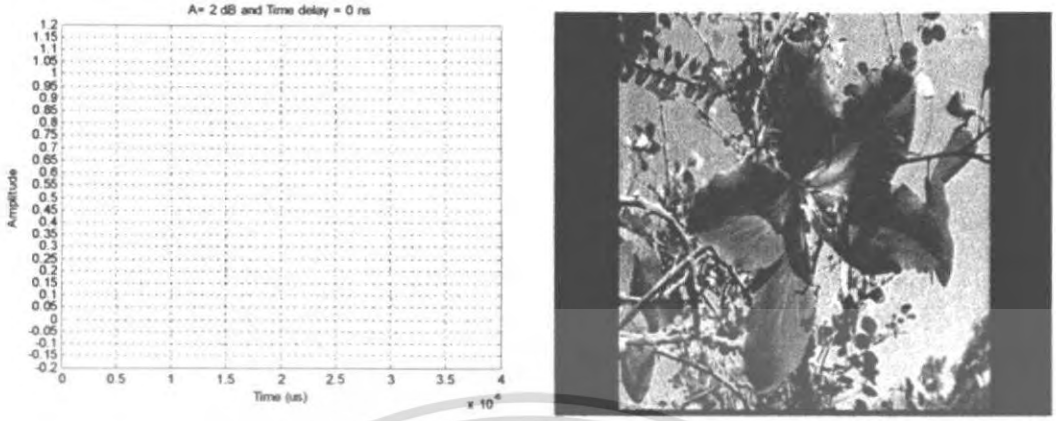


รูปที่ 4.2 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = 0 ns

4.1.3 ผลการทดลองที่มีความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดอย่างเดียว

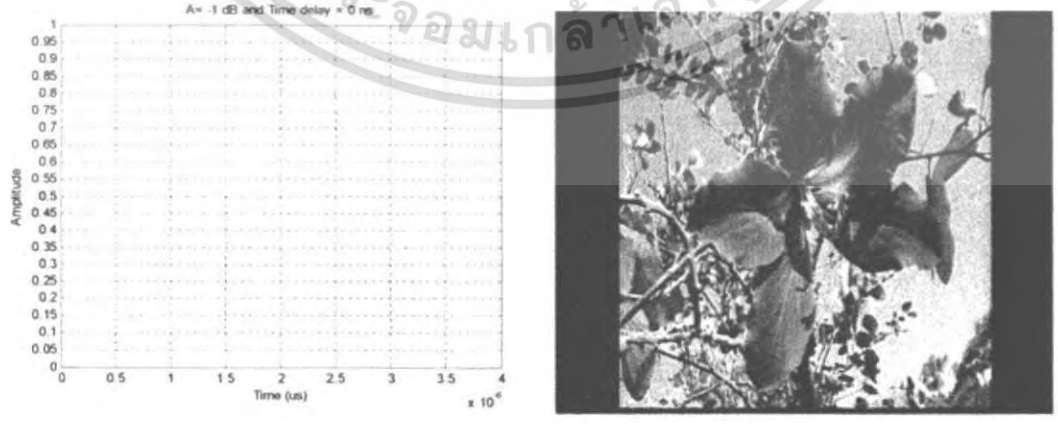
รูปที่ 4.3 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = 0 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



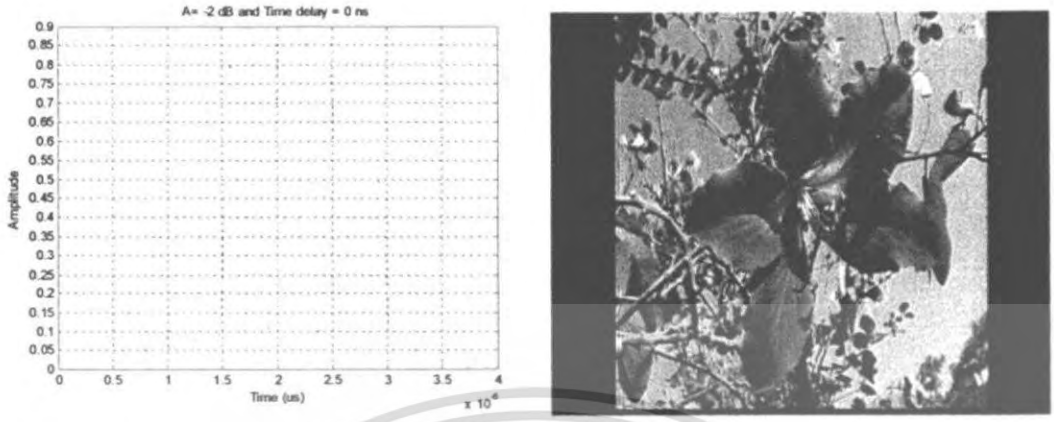
รูปที่ 4.4 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = +2 dB , Time Delay = 0 ns

รูปที่ 4.5 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = +1 dB , Time Delay = 0 ns



รูปที่ 4.6 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = -1 dB , Time Delay = 0 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

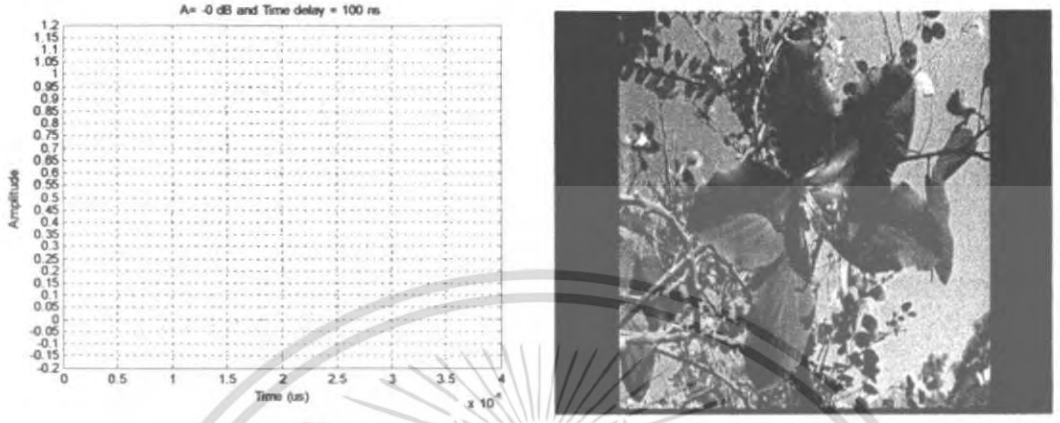


รูปที่ 4.7 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = -2 dB , Time Delay = 0 ns

รูปที่ 4.8 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = -3 dB , Time Delay = 0 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

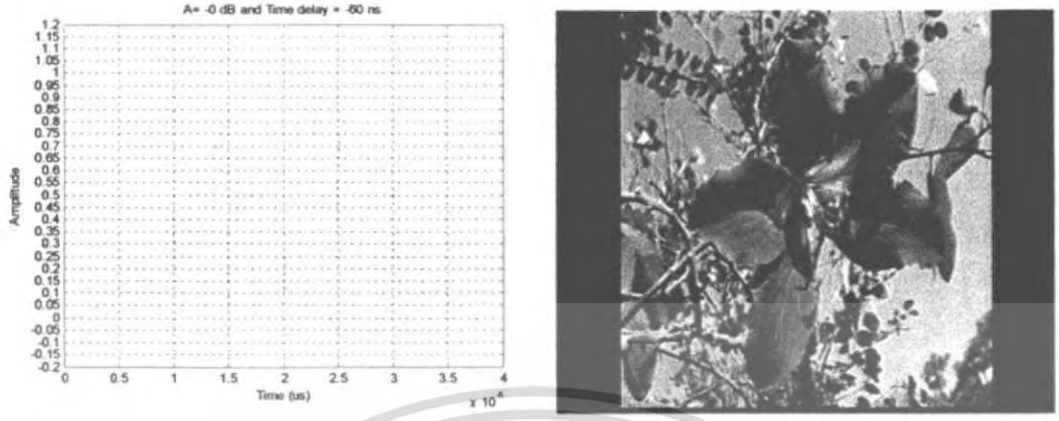
4.1.3 ผลการทดลองที่มีความผิดเพี้ยนทางกรุ๊ฟดีเลย์อย่างเดียว



รูปที่ 4.9 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = +100 ns

รูปที่ 4.10 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = +60 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

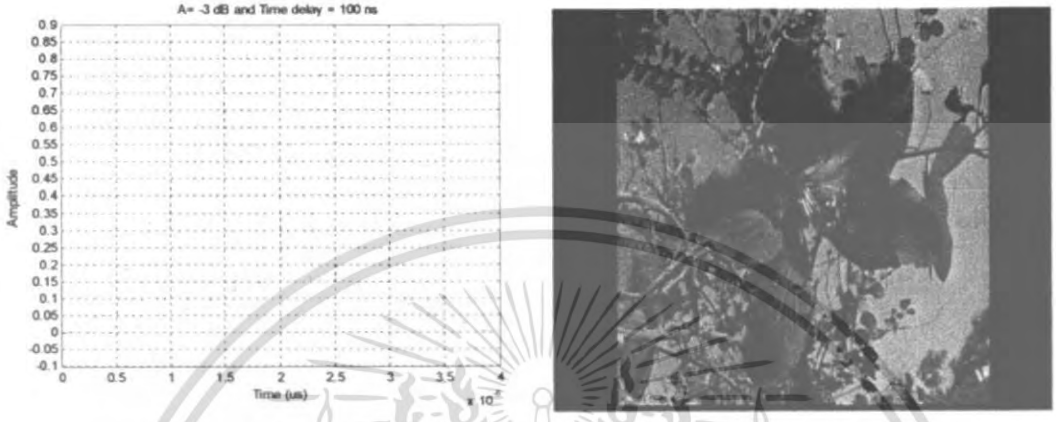


รูปที่ **4.11** รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = -60 ns

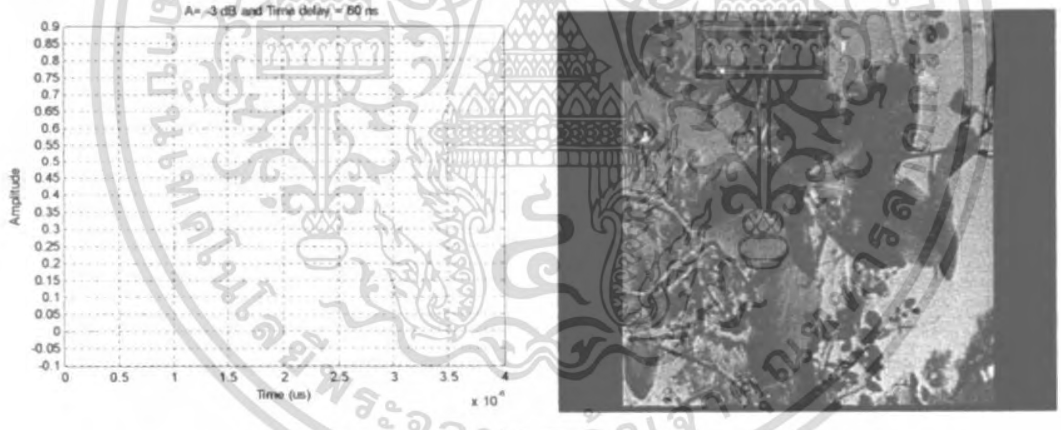
รูปที่ **4.12** รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = 0 dB , Time Delay = -100 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการทดลองที่มีความผิดเพี้ยนทั้งทางด้านแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์

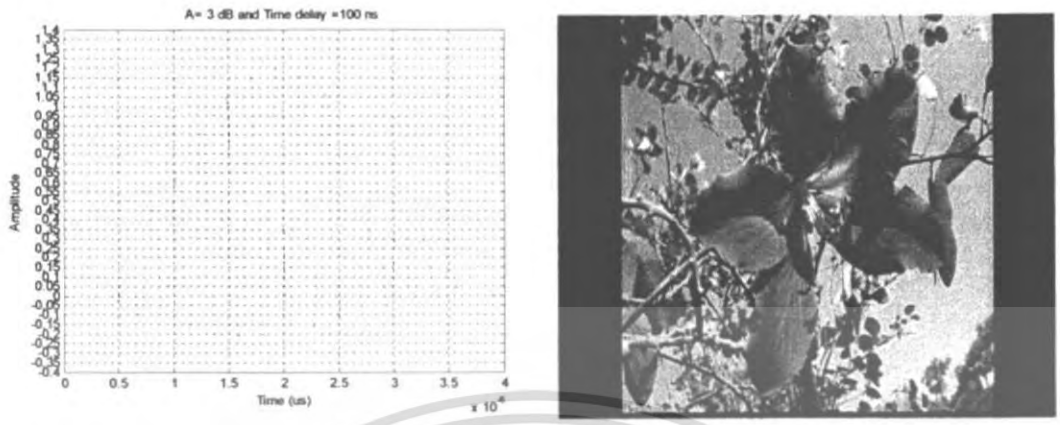


รูปที่ 4.13 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = -3dB , Time Delay = +100 ns



รูปที่ 4.14 รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = -3dB , Time Delay = -100 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ **4.15** รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = +100 ns

รูปที่ **4.16** รูปกราฟและรูปภาพแสดงค่า Gain = +3dB , Time Delay = -100 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงงานนี้เกี่ยวกับโปรแกรมการวัดความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์โดยใช้สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไซน์กำลังสองพัลซ์ พร้อมจอ LCD แสดงค่าที่วัดได้

จากการดำเนินงาน โปรแกรมนี้สามารถวัดความผิดเพี้ยนทั้งทางแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์ได้ ทั้งรูปกราฟและแสดงค่าความผิดเพี้ยนออกมา ซึ่งจอLCDที่จะแสดงค่าออกมานั้นมีข้อจำกัดของค่าที่วัดได้เนื่องจากได้คัดเลือกค่าที่มีความผิดเพี้ยนจากรูปที่เห็นความผิดเพี้ยนชัดเจนเท่านั้น

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

ปัญหา : ค่าที่แสดงออกจอ LCD ไม่สามารถรองรับค่าได้หมดทุกค่าที่วัดออกมาได้เนื่องจากเครื่องวัดสัญญาณผิดเพี้ยนมีค่าจำกัด

แนวทางแก้ไข : เลือกค่าที่เห็นความผิดเพี้ยนที่ชัดเจนภายในขอบเขตที่อุปกรณ์สามารถสร้างความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นได้

ปัญหา : เครื่องกำเนิดสัญญาณผิดเพี้ยนมีค่าผิดเพี้ยนที่จำกัด ภาพที่ออกมาจึงไม่เห็นความแตกต่างมากนัก

แนวทางแก้ไข : ใช้ดูรูปกราฟจากโปรแกรมMatlabที่เขียนไว้ จะเห็นค่าผิดเพี้ยนที่ชัดเจนขึ้น

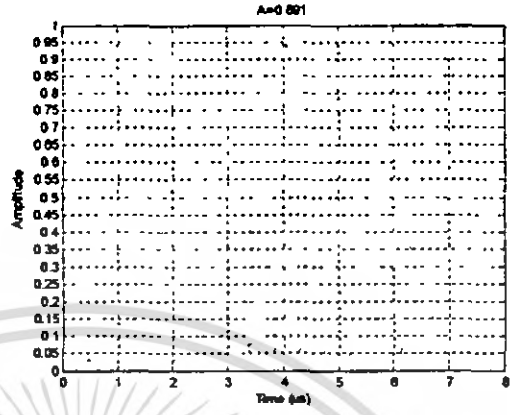
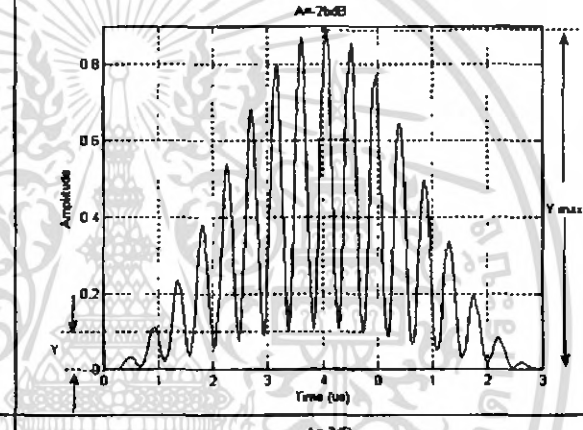
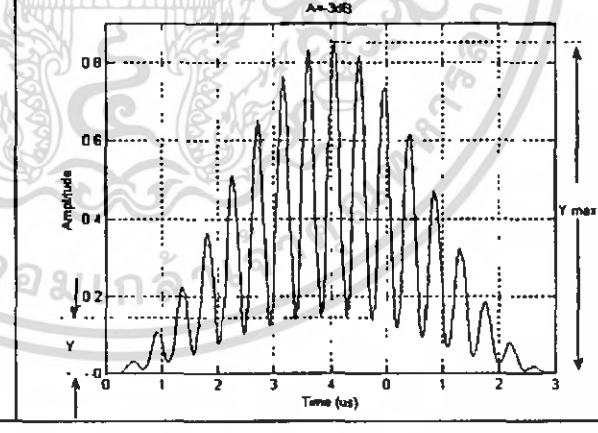
5.3 แนวทางพัฒนาในอนาคต

1. นำผลที่ประมวลมาจากโปรแกรมไปแสดงค่าออกจอ LCD ได้ทุกค่า
2. ค่าที่วัดได้จากโปรแกรมสามารถนำไปแสดงบนโปรแกรมต่างๆแทนจอLCD

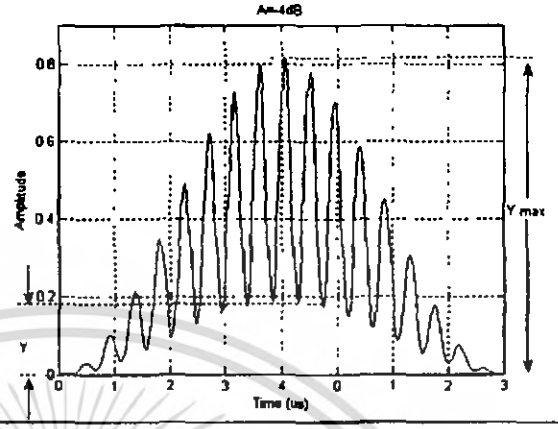
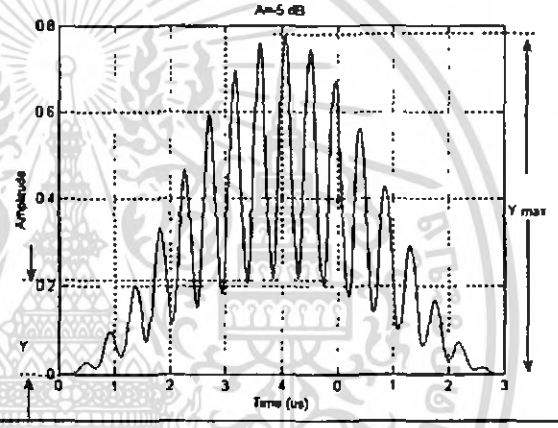
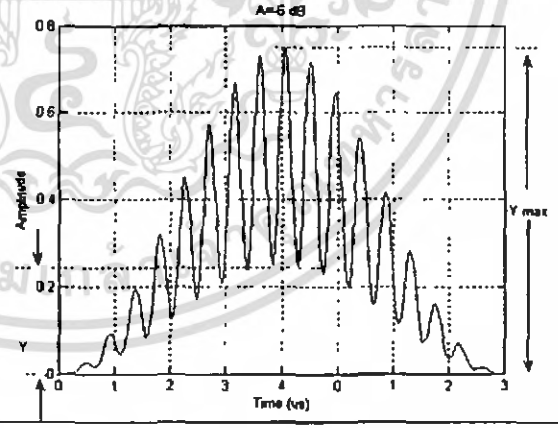
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

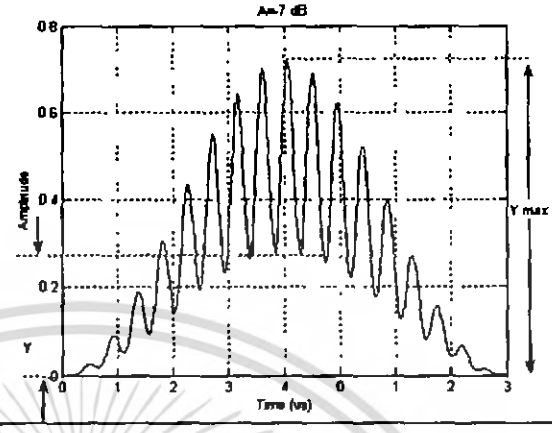
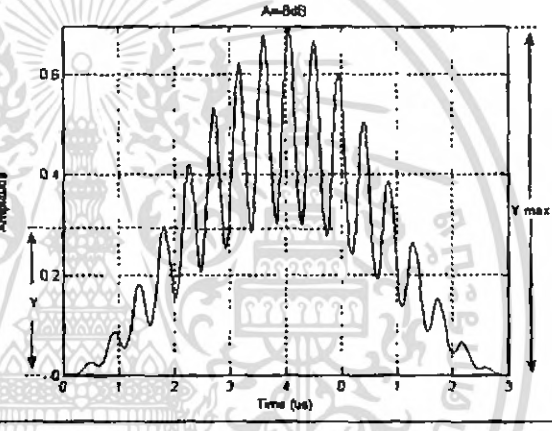
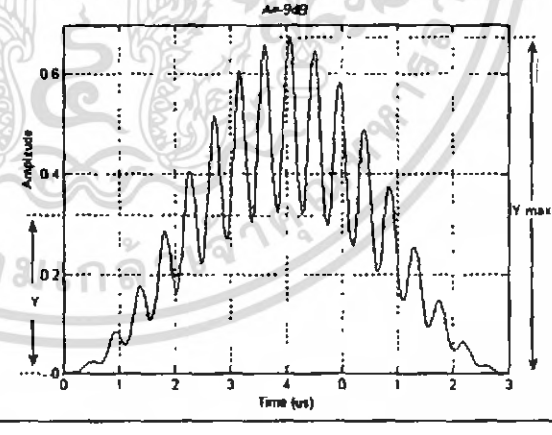
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	ϵ (1-A)	dB	รูป
0.05	*0.95*	*0.05*	*0.89*	0.11	*-1*	
0.11	0.90	0.10	0.79	0.21	-2	
0.18	0.85	0.15	0.71	0.29	-3	

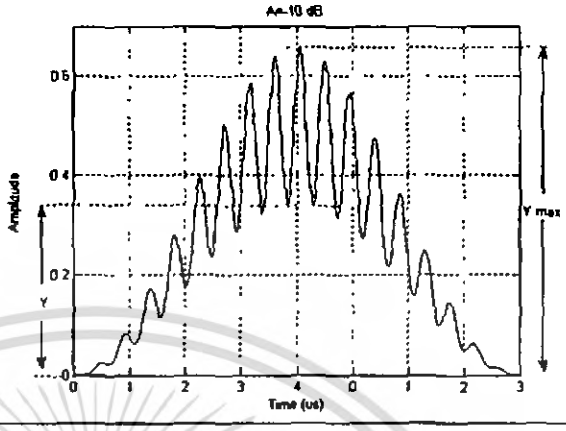
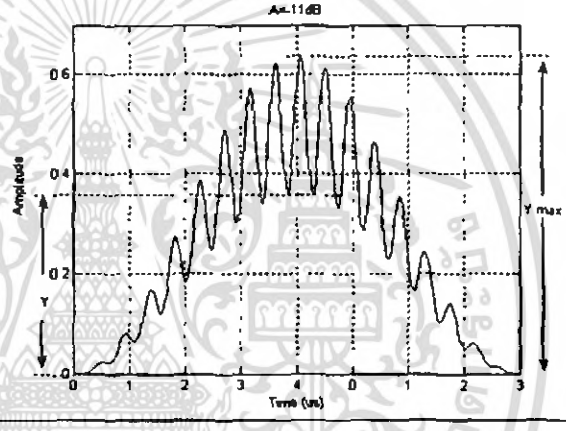
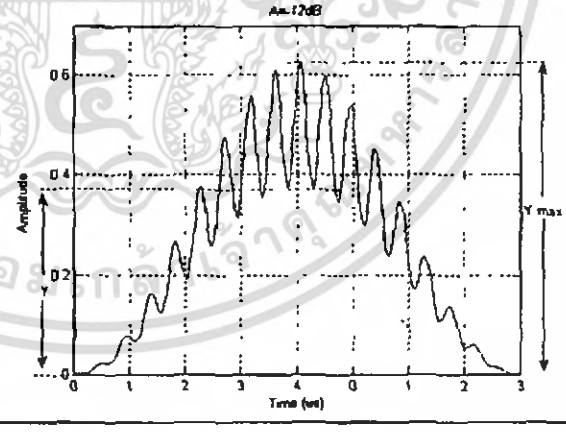
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	€ (1-A)	dB	รูป
0.23	0.81	0.19	0.63	0.37	-4	
0.28	0.78	0.22	0.56	0.44	-5	
0.33	0.75	0.25	0.50	0.50	-6	

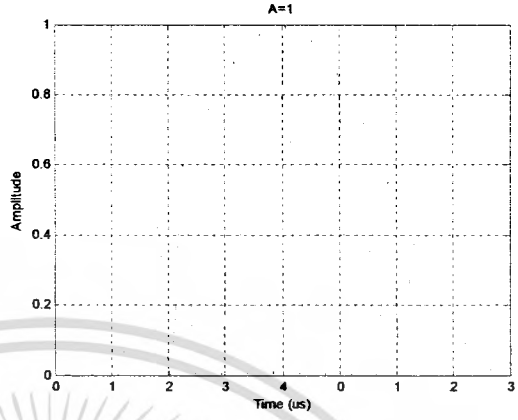
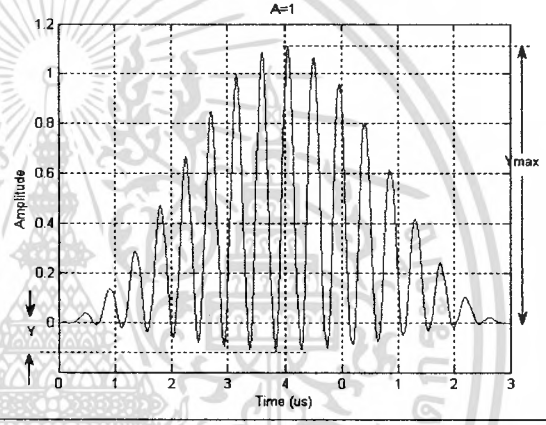
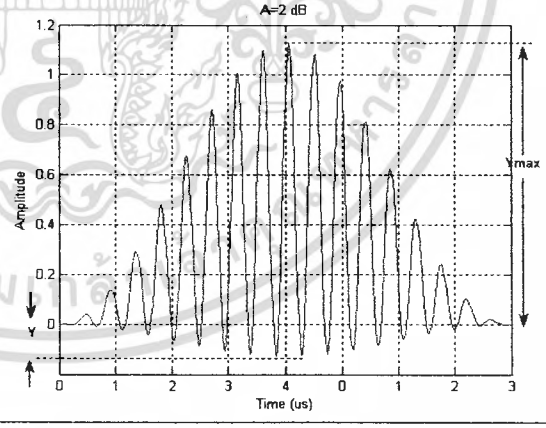
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
Y	Y max	Y	A	ϵ (1-A)	dB	รูป
0.39	0.72	0.28	0.45	0.55	-7	
0.43	0.70	0.30	0.40	0.60	-8	
0.47	0.68	0.32	0.35	0.65	-9	

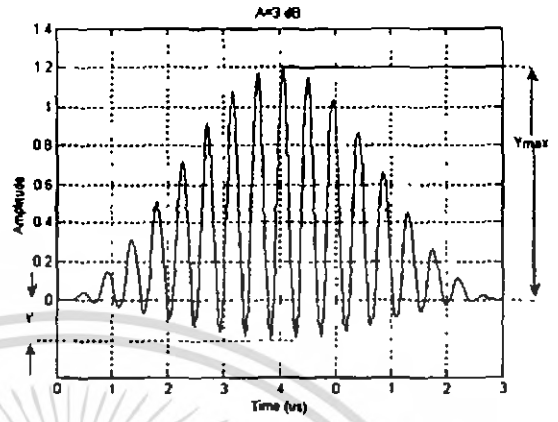
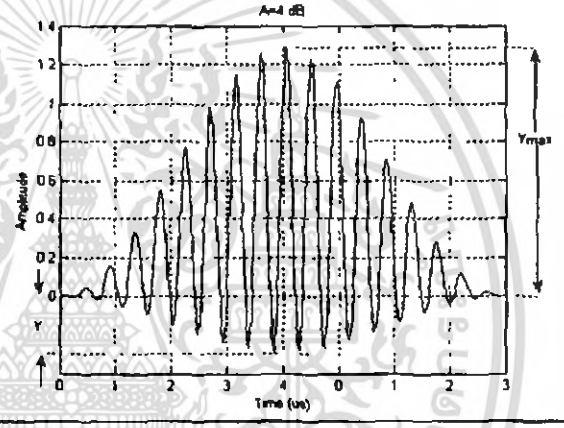
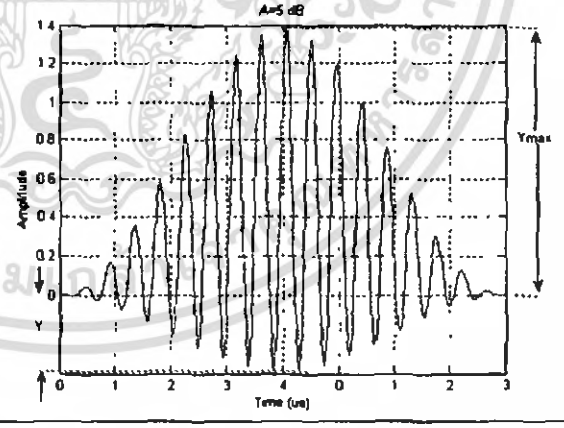
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	ϵ (1-A)	dB	รูป
0.52	0.66	0.34	0.32	0.68	-10	
0.56	0.64	0.36	0.28	0.72	-11	
0.58	0.63	0.37	0.25	0.75	-12	

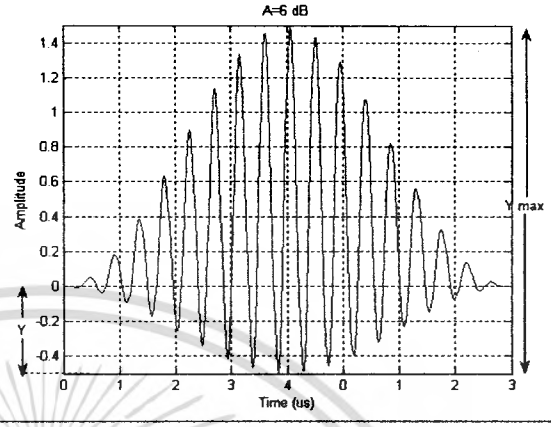
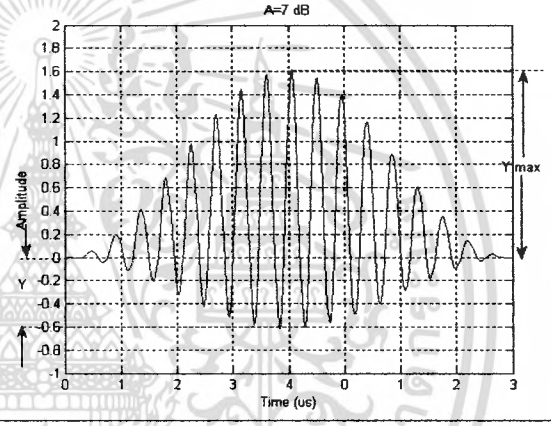
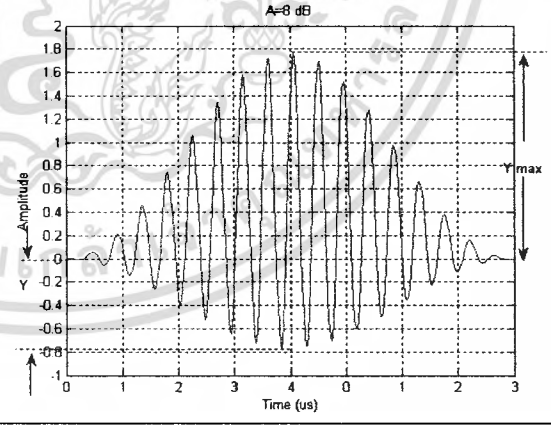
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	€ (1-A)	dB	รูป
0	1	0	1	0	0	
-0.06	1.06	-0.06	1.12	-0.12	1	
-0.12	1.13	-0.13	1.26	-0.26	2	

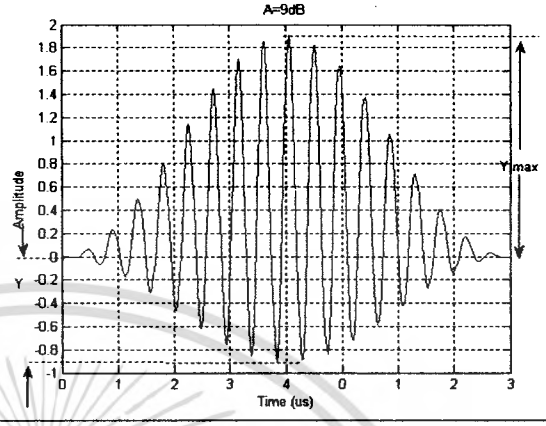
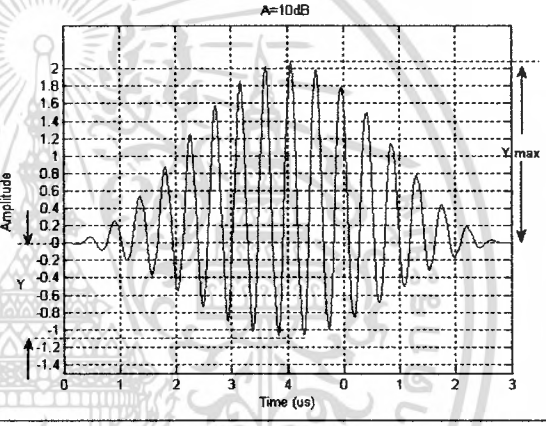
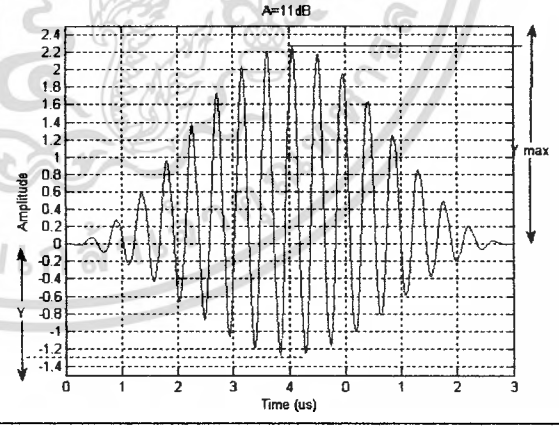
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	€ (1-A)	dB	รูป
-0.17	1.20	-0.20	1.41	-0.41	3	
-0.22	1.29	-0.29	1.59	-0.59	4	
-0.28	1.39	-0.39	1.78	-0.78	5	

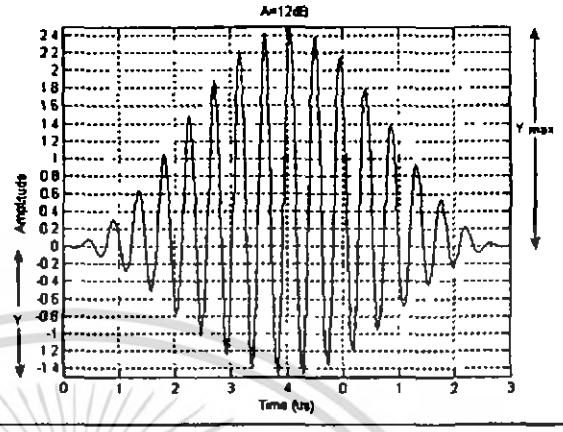
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	€ (1-A)	dB	รูป
-0.33	1.50	-0.50	2.00	-1	6	
-0.38	1.62	-0.62	2.24	-1.24	7	
-0.42	1.75	-0.75	2.51	-1.51	8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

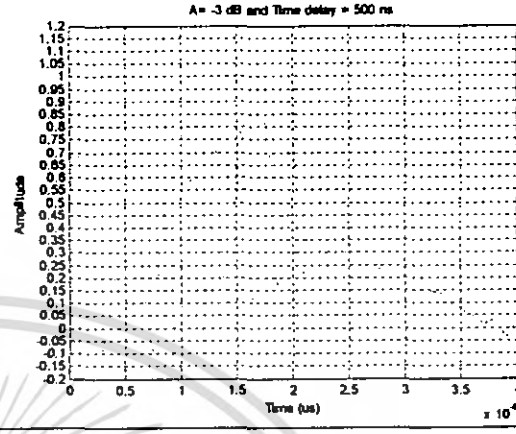
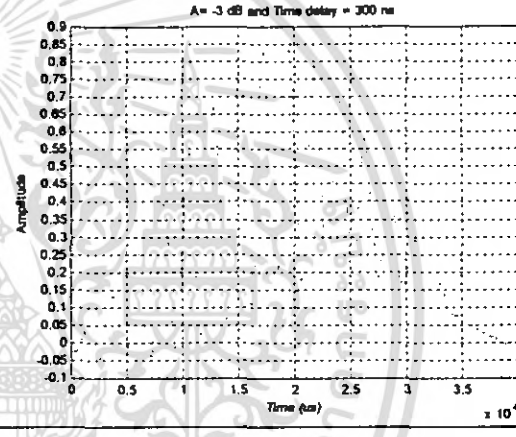
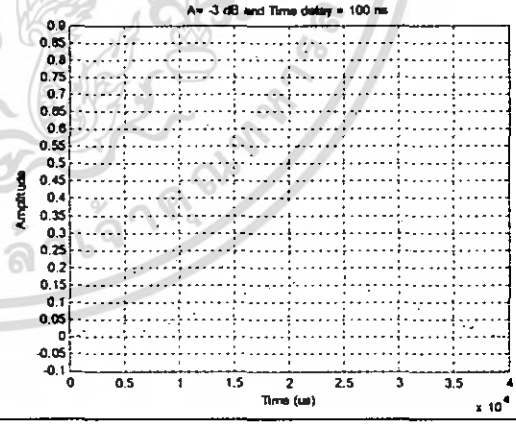
ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	€ (1-A)	dB	รูป
-0.47	1.90	-0.90	2.82	-1.82	9	
-0.52	2.07	-1.07	3.16	-2.16	10	
-0.56	2.27	-1.27	3.55	-2.55	11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด						
y	Y max	Y	A	ϵ (1-A)	dB	รูป
0.20	2.49	-0.49	4.00	-3	12	

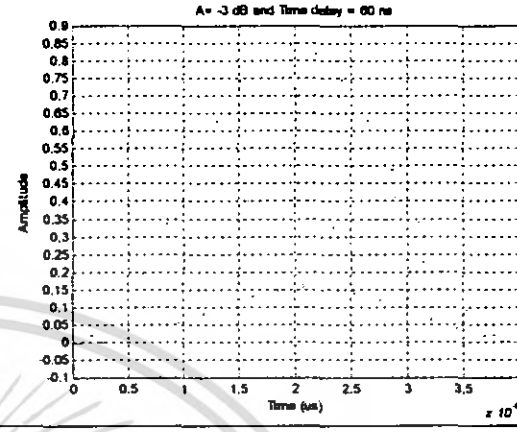
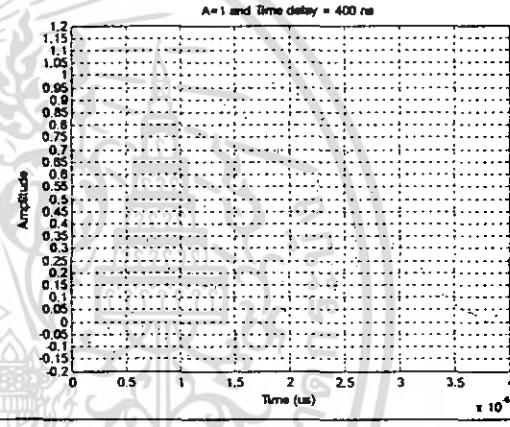
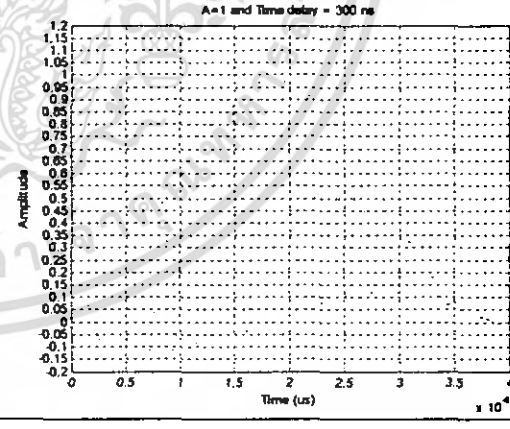
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางด้านแอมพลิจูดและกรุ๊ปดีเลย์

Y_1	Y_2	Y max	A	dB	τ (ns)	รูป
-0.1	0.25	0.815	0.70	-3	500	
-0.05	0.20	0.85	0.70	-3	300	
-0.01	0.16	0.85	0.70	-3	100	

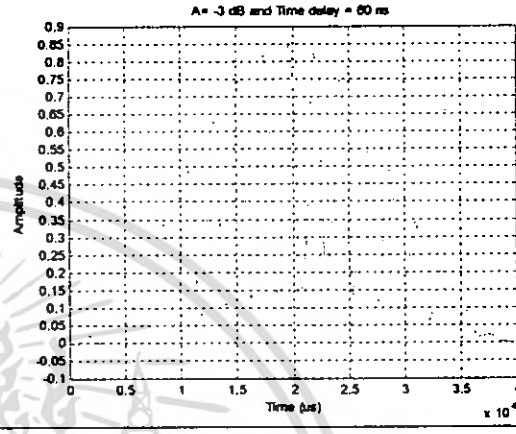
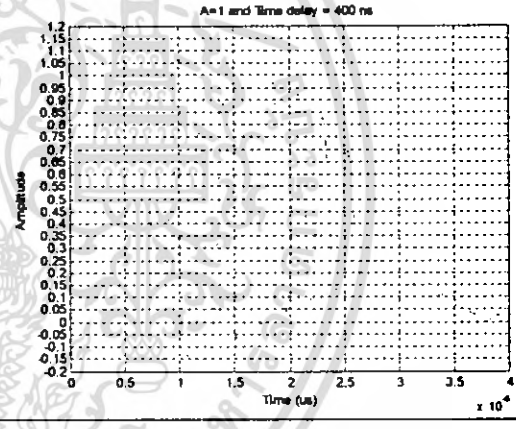
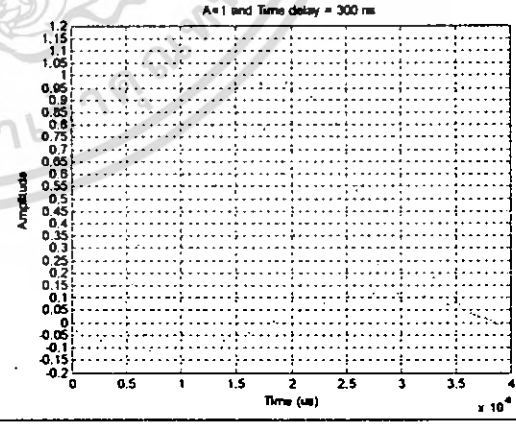
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางด้านแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์

Y_1	Y_2	Y max	A	dB	τ (ns)	รูป
-0.002	1.55	0.85	0.70	-3	60	
0	0.15	0.85	0.70	-3	0	
0.155	-0.002	0.85	0.70	-3	-60	

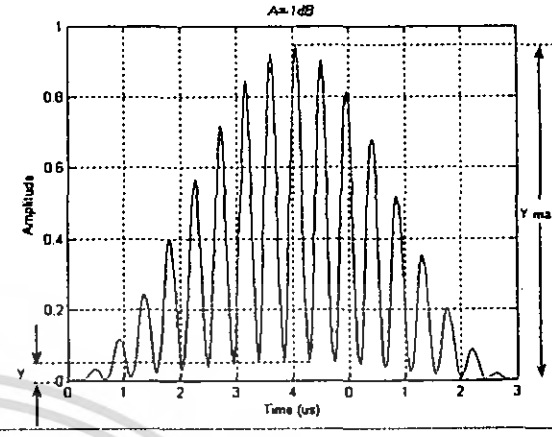
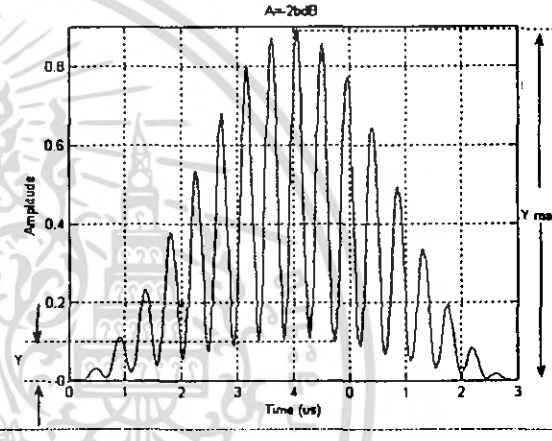
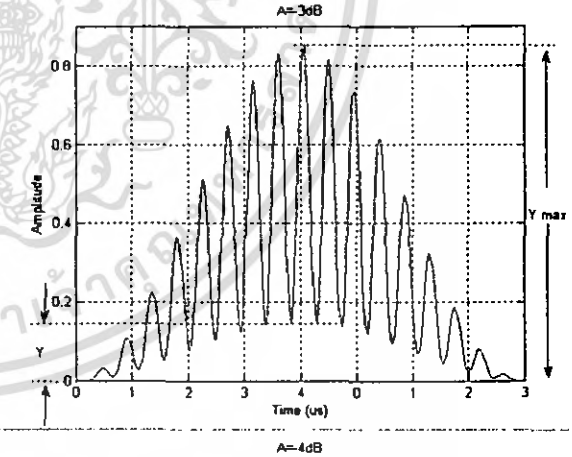
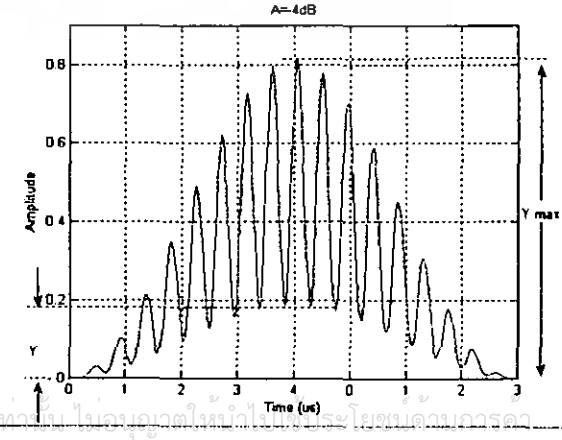
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางด้านแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์

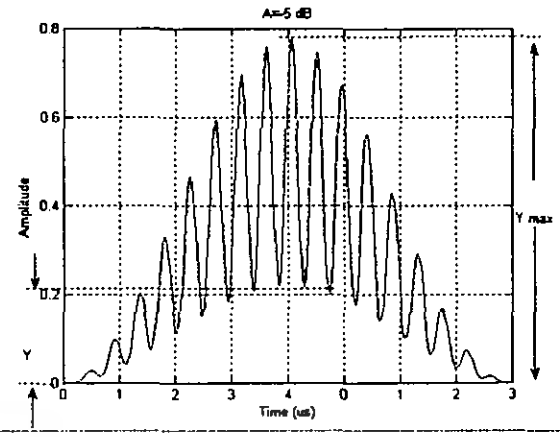
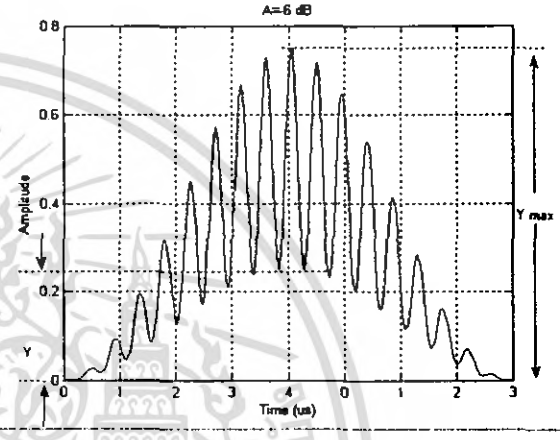
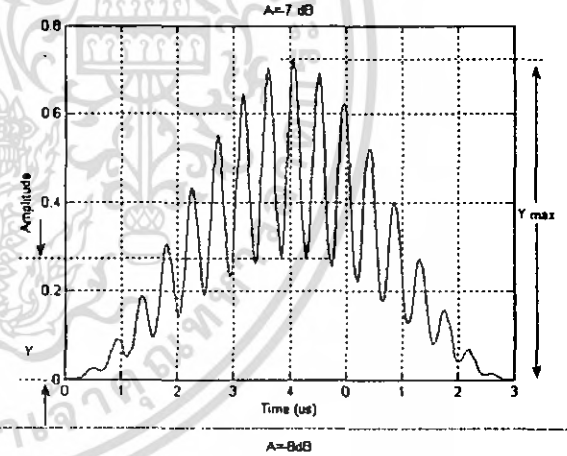
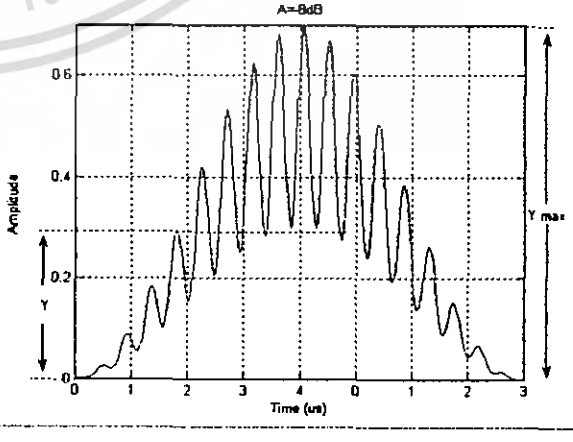
Y_1	Y_2	Y max	A	dB	τ (ns)	รูป
0.16	-0.01	0.85	0.70	-3	-100	
0.20	-0.05	0.85	0.70	-3	-300	
0.25	-0.10	0.85	0.70	-3	-500	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางแอมพลิจูด

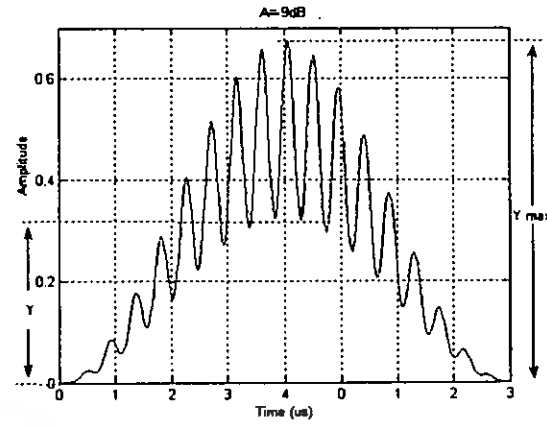
y	Y max	Y	A	dB	รูป
0.81	0.55	0.45	0.10	-1	
0.67	0.60	0.40	0.20	-2	
0.53	0.65	0.35	0.30	-3	
0.42	0.70	0.30	0.40	-4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

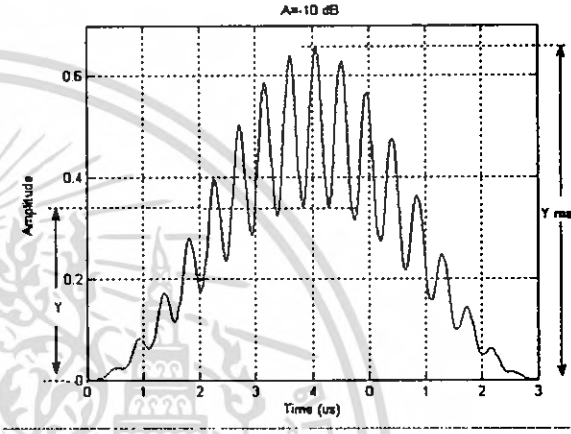
0.33	0.75	0.25	0.50	-5	
0.25	0.80	0.20	0.60	-6	
0.17	0.85	0.15	0.70	-7	
0.11	0.90	0.10	0.80	-8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

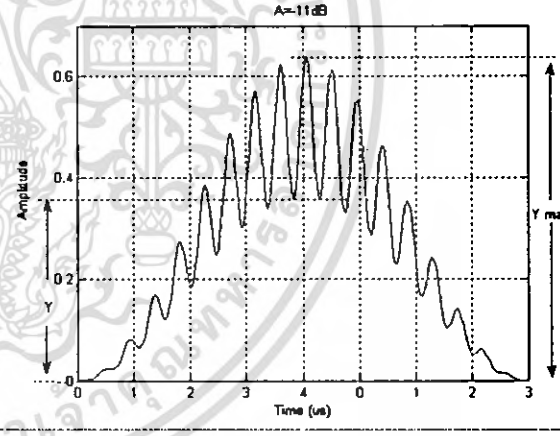
0.05	0.95	0.05	0.90	-9



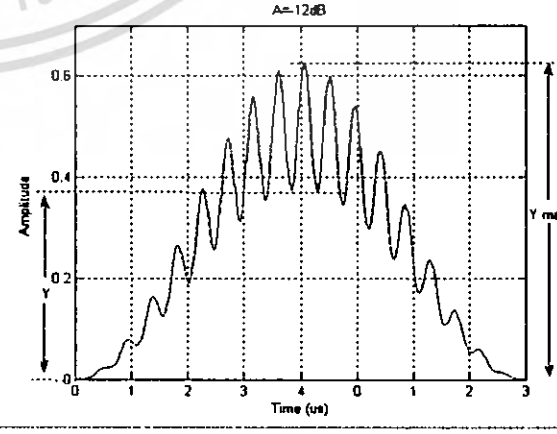
0.00	1.00	0.00	1.00	-10



0.20	1.25	0.25	1.50	-11

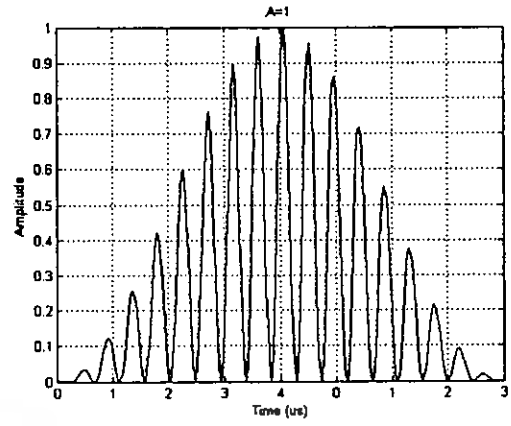


0.33	1.5	0.5	2.00	-12

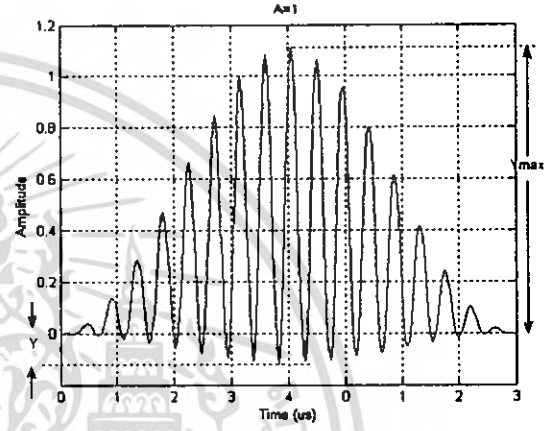


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

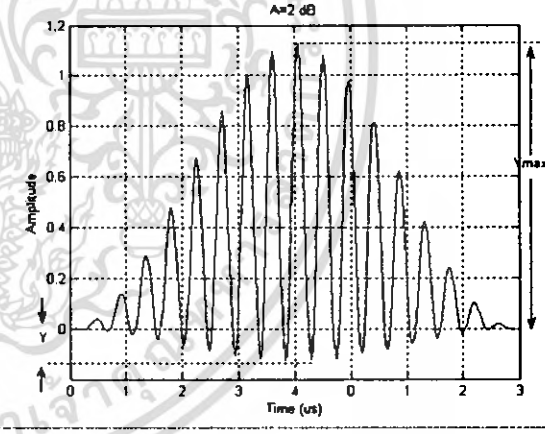
0.42	1.75	0.75	2.50	0



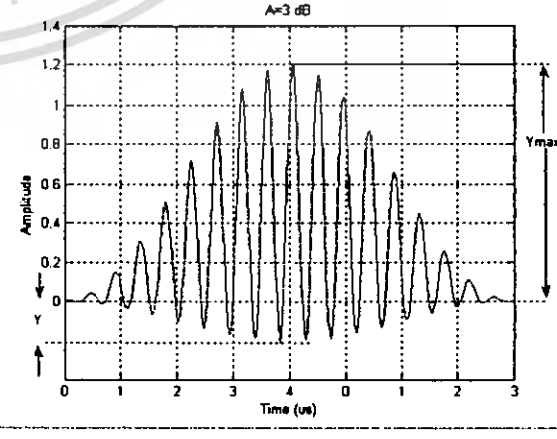
0.50	2.0	1.00	3.00	1



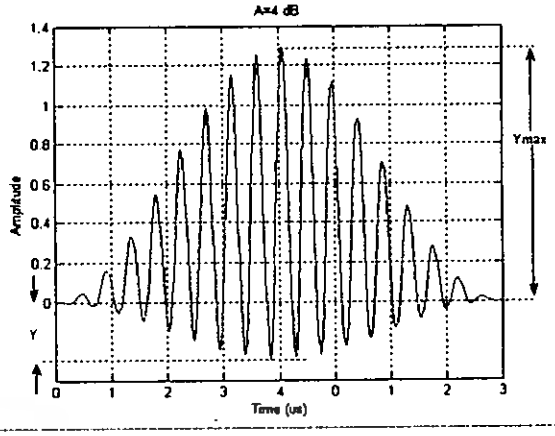
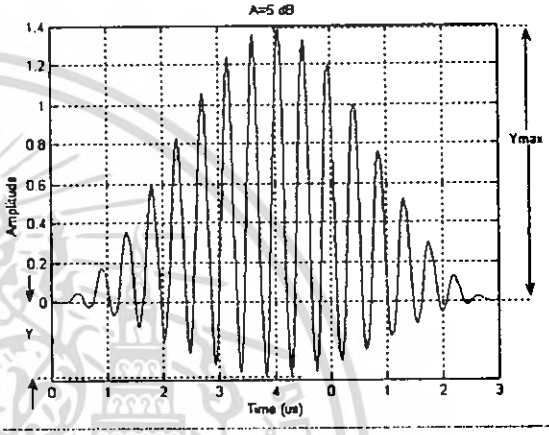
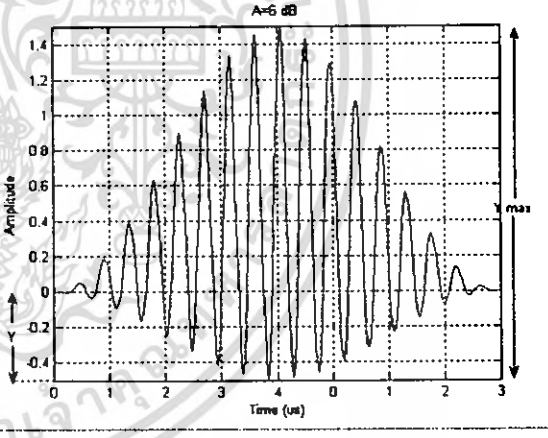
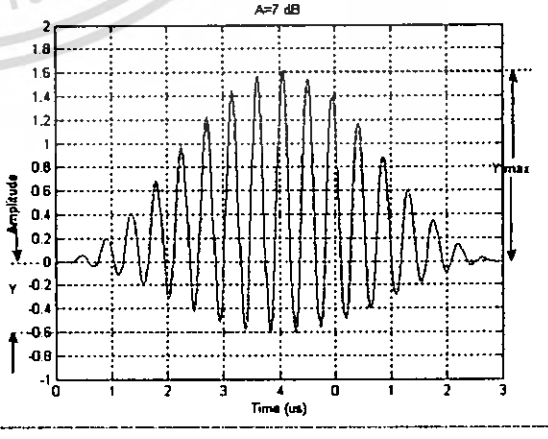
0.55	2.25	1.25	3.50	2



0.60	2.50	1.50	4.00	3

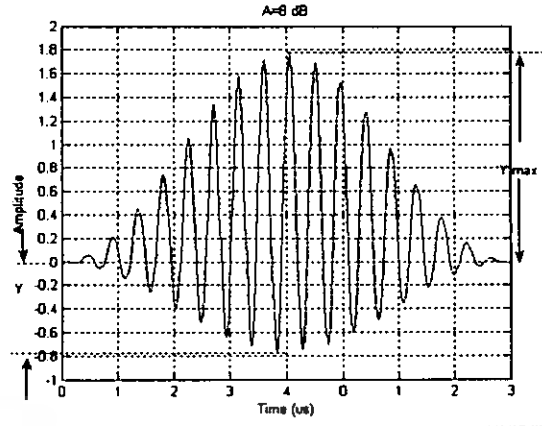


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

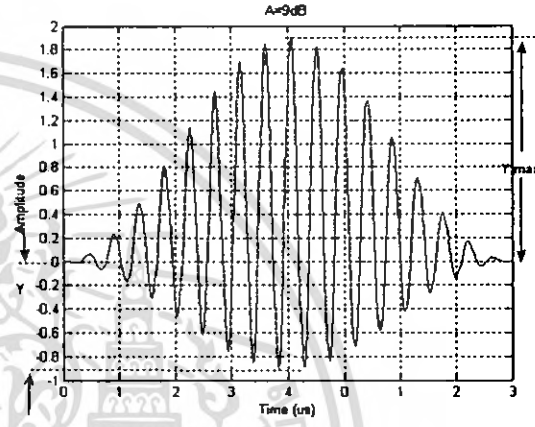
0.63	2.75	1.75	4.50	4	
0.67	3.00	2.00	5.00	5	
0.69	3.25	2.25	5.50	6	
				7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

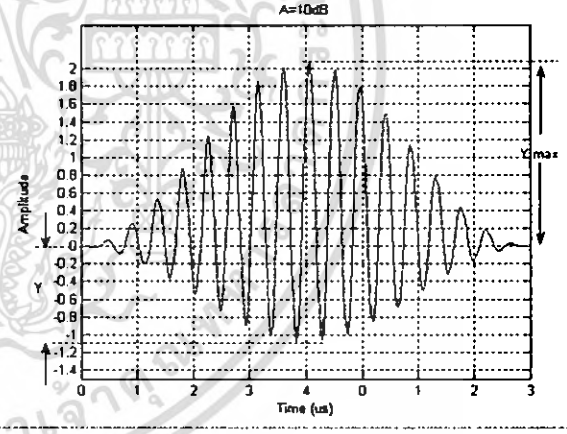
8



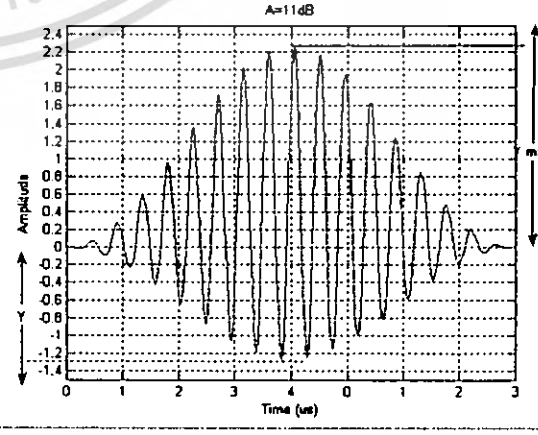
9



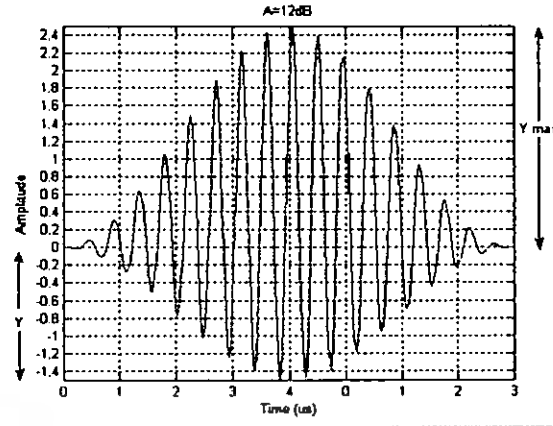
10



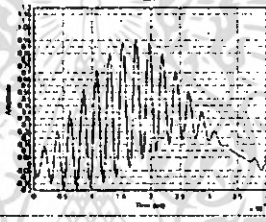
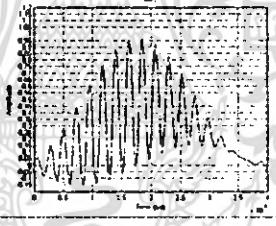
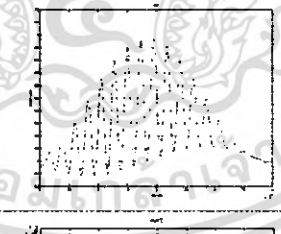
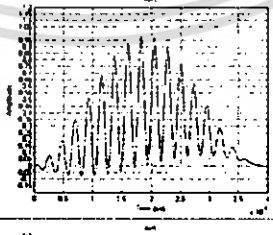
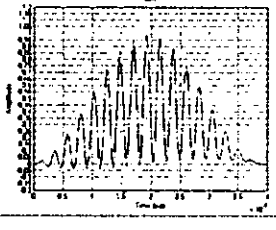
11



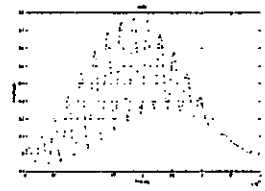
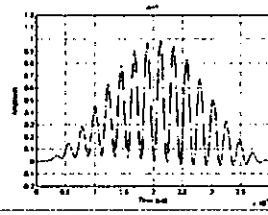
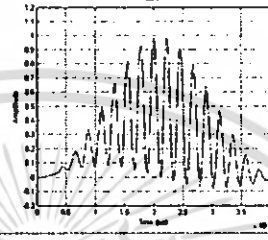
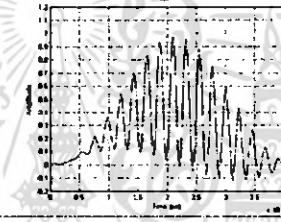
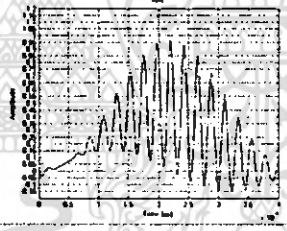
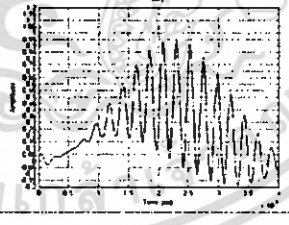
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทางกรุ๊ฟดีเลย์

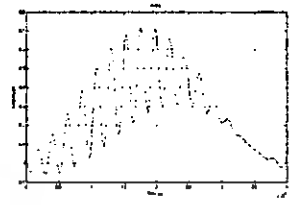
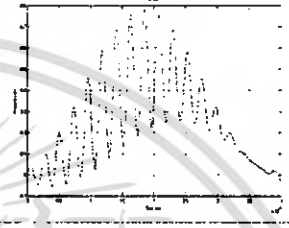
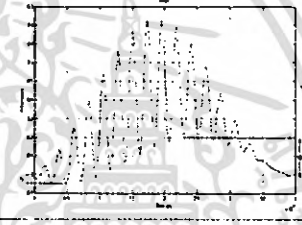
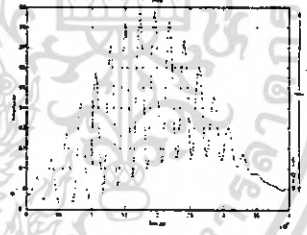
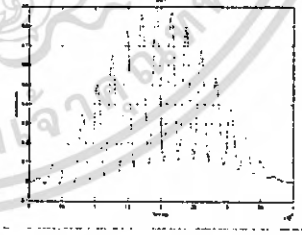
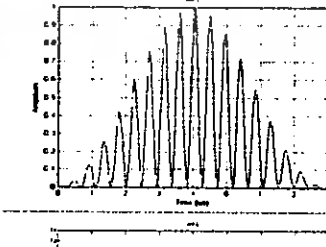
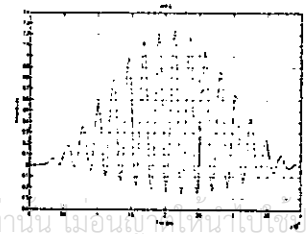
Y_1	Y_2	Y max	τ (μs)	รูป
-0.2	0.2	1	0.5	
-0.15	0.15	1	0.4	
-0.10	0.10	1	0.3	
-0.075	0.075	1	0.2	
-0.05	0.05	1	0.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

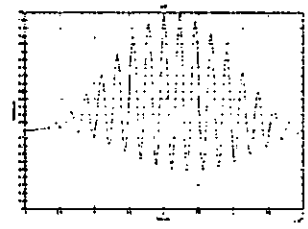
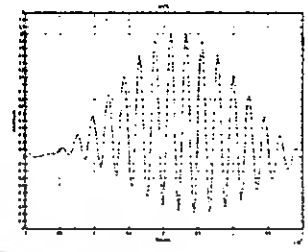
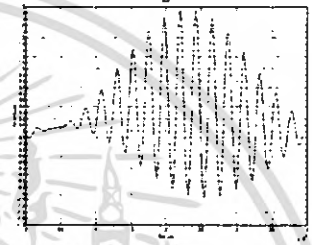
0	0	1	0	
0.05	-0.05	1	-0.1	
0.075	-0.075	1	-0.2	
0.1	-0.1	1	-0.3	
0.15	-0.15	1	-0.4	
0.2	-0.2	1	-0.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความผิดเพี้ยนทั้งทางด้านแอมพลิจูดและกรุ๊ฟดีเลย์

Y_1	Y max	Y_2	A	τ (μs)	รูป
0.05	0.725	0.3	0.50	0.5	
0.04	0.775	0.25	0.60	0.4	
0.03	0.825	0.2	0.70	0.3	
0.02	0.875	0.125	0.80	0.2	
0.01	0.95	0.07	0.90	0.1	
0	1	0	1.00	0	
0.01	1.25	0.25	1.50	-0.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.02	1.47	0.5	2.00	-0.2	
0.03	1.71	0.78	2.50	-0.3	
0.04	1.94	1.05	3.00	-0.4	
0.05	2.17	1.33	3.50	-0.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้