สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโครมิแนนซ์

An Equalization of chrominance signal amplitude

T 086679

โดย

นางสาวยุพเรศ ปทุมมาเกสร	38012065
นายราชู พันธ์ฉลาด	38012067
นายเรือนเพชร สังสมสัก	38012068

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 86679
วัน,เดือน,ปี 30 S.A. 2551

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ วงจรแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโครมินแนนซ์

An Equalizion of chrominance signal amplitude

โดย นายสมบุญ ตปุญญานนท์ 38012065

นายราชู พันธ์ฉลาด 38012067

นายเรือนเพชร สังสมสัก 38012068

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์จักรี ทีฆภาควิศิษฏ์

ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2539

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้นับปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(.....)

..... กรรมการ

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโครมิแนนซ์

An Equaliztion of chrominance signal amplitude

นางสาวยุพเรศ ปทุมมาเกสร
นายราชู พันธ์ฉลาด
นายเรือนเพชร สังสมสัก
อาจารย์จักรี ทีมภาควิศิษฏ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้เสนอการออกแบบวงจรแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโครมิแนนซ์ในระบบโทรทัศน์สี โดยการประมาณผลตอบสนองทางขนาดตามที่ต้องการ ในการออกแบบนั้นจะใช้เทคนิคของ non-minimum phase network ซึ่งจะทำให้วงจรมีเยรุ๊ฟดีเลย์ที่ราบเรียบ

ในการออกแบบดังกล่าว ได้นำเอาสัญญาณทดสอบพัลซ์มอดดูเลตซายน์กำลังสองมาร่วมทำการออกแบบ ซึ่งจากการวัดค่าผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ให้ผลใกล้เคียงกับทฤษฎีการคำนวน

Abstrack

This thesis,a method of equalizing gain distortion of the chrominance signal by approximating the response of the specified magnitude characteristic is presented. In order to design an chrominance equalizer with maximally flat group delay, a non-minimum phase network technique is utilized

Here in, the equalizer can be designed by means of a modulated sine-squared test signal. From the experimental results, it is showed that the measured magnitude response of the equalizer is in good agreement with the calculated characteristic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0023 2

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์จักรี ทัชเภาคีพันธุ์ และ อาจารย์กนก เจนจิระพงศ์พัฒ ที่ได้ให้คำแนะนำในการออกแบบวงจร พร้อมทั้งให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงงาน เช่น โปรแกรมคำนวน,ข้อมูลที่จำเป็น และเครื่องมือในการทดสอบวงจร ซึ่งวงจรที่ได้ออกแบบไว้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

กลุ่มผู้จัดทำโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ		A
กิตติกรรมประกาศ		B
บทนำ		C
บทที่ 1	ทฤษฎีและหลักการ	1
	1.1 ชนิดของความผิดเพี้ยน	1
	1.1.1 ความผิดเพี้ยนชนิดเชิงเส้น	1
	1.1.2 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์โดยใช้สัญญาณพัลส์มือดดูเล็ตซายน์กำลังสอง	2
	1.1.3 ความถี่สเป็คตรัมของสัญญาณพัลซ์มือดดูเล็ตซายน์กำลังสอง	4
	1.1.4 ทฤษฎีและการหาสูตรสำเร็จของความผิดเพี้ยนทางขนาดและดีเลย์	4
	1.1.5 สาเหตุของความผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว	6
	1.2 เฟสและกรุ๊ฟดีเลย์	8
	1.3 คุณลักษณะทางขนาด เฟส และ ดีเลย์ ของฟังชั่น	9
	1.4 ดีเลย์ฟิลเตอร์	16
	1.4.1 การหน่วงเวลาของสัญญาณและฟังชั่นถ่ายโอน	16
	1.4.2 ผลตอบสนองของเบสเซล-ทอมสัน	18
	1.5 Non -minimum Phase Network	23
	1.6 ข้อจำกัดของตำแหน่งซีโร่	26
	1.7 ชนิดของการประมาณค่า	27
	1.8 การชดเชยอัตราขยายทางขนาด	28
บทที่ 2	การออกแบบ	29
	2.1 การสร้างวงจร	38
บทที่ 3	ผลการทดลอง	45
บทวิจารณ์และสรุป		48
การประยุกต์นำไปใช้งาน		49
เอกสารอ้างอิง		50
ภาคผนวก		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

ปัจจุบันนี้ โทรทัศน์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อความเป็นอยู่ในชีวิตประจำวัน ทำให้เราทราบข่าวสาร และความบันเทิงต่างๆ

ในการที่จะให้ได้สัญญาณภาพที่ปรากฏต่อหน้าผู้ชมทางบ้านให้ภาพที่คุณภาพสมบูรณ์แบบได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องมีการตรวจสอบสัญญาณภาพทางด้านส่ง โดยการป้อนสัญญาณทดสอบเข้าไปในระบบที่ต้องการตรวจสอบเสียก่อนว่าจะมีผลต่อสัญญาณภาพอย่างไร เป็นที่ทราบดีกันอยู่แล้วว่าสัญญาณภาพจริง ๆ นั้น เมื่อเกิดความผิดเพี้ยน (distortions) ขึ้นเราไม่สามารถที่จะทำการวัดความผิดเพี้ยนโดยตรงได้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้สัญญาณทดสอบ ซึ่งเป็นสัญญาณที่สร้างขึ้นมาให้มีรูปแบบง่าย ๆ และง่ายต่อการวัดนั่นคือสัญญาณพัลซ์มีอดดูเลตชายน์กำลังสอง ถ้าสัญญาณทดสอบป้อนผ่านระบบที่ต้องการตรวจสอบแล้วทำให้สัญญาณทดสอบเสียรูป แสดงว่าระบบที่ทดสอบจะมีผลต่อสัญญาณภาพ จึงทำการแก้ไขก่อนที่จะส่งสัญญาณภาพออกอากาศ ซึ่งความผิดเพี้ยนดังกล่าวก็คือผลตอบสนองต่อความถี่สูงโดยจะทำให้ขนาด และ/หรือ เฟสของสัญญาณภาพเปลี่ยนไปเป็นผลให้สัญญาณที่เครื่องรับเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้เสนอการออกแบบทางวงจรแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมินแนนซ์ทางขนาดในกรณีที่สัญญาณถูกเพิ่มและลดอัตราการขยายโดยวงจรที่ได้ออกแบบ จะต้องทำให้มีผลกระทบต่อเฟสของสัญญาณน้อยที่สุด ซึ่งในการออกแบบนี้เราจะใช้เทคนิค non-minimum phase network ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วสามารถแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดได้โดยไม่มีผลต่อเฟสและกรุ๊ปดีเลย์ของสัญญาณโครมินแนนซ์

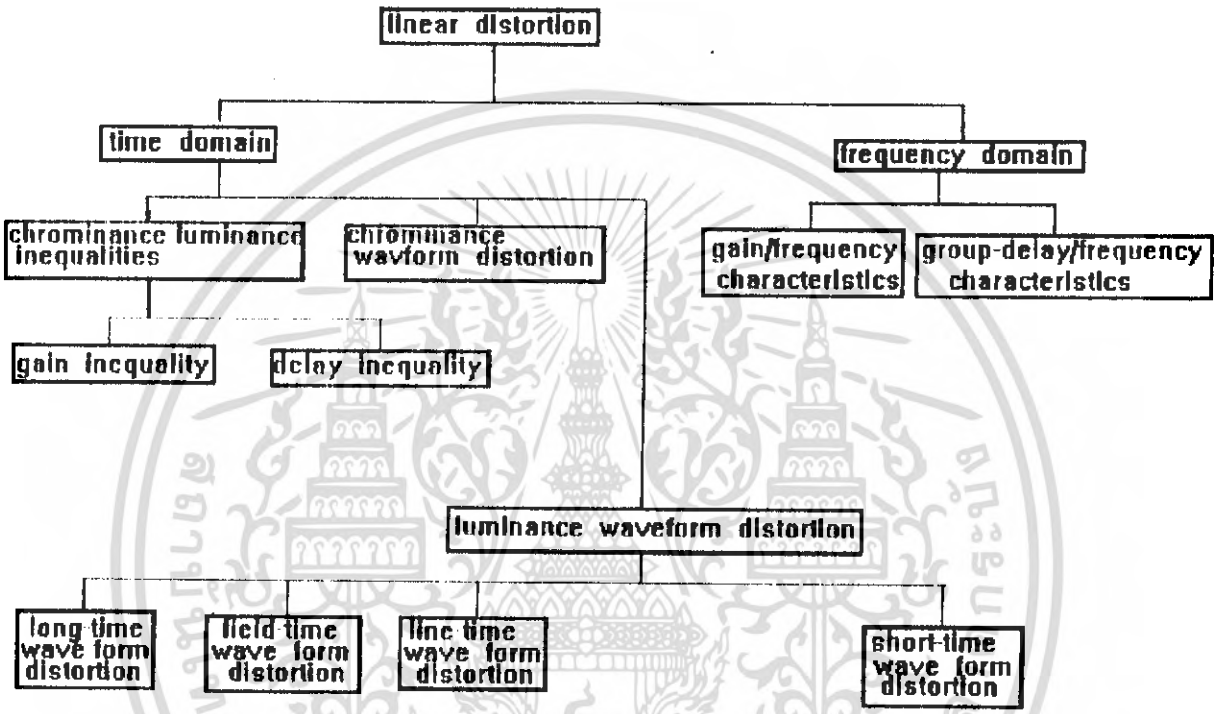
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

ทฤษฎีและหลักการ

1.1ชนิดของความผิดเพี้ยน (Type of Distortions)

ความผิดเพี้ยนในระบบการส่ง สามารถแบ่งออกได้เป็นความเพี้ยนเชิงเส้น (Linear distortion) และความผิดเพี้ยนไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear distortion) ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นสามารถจำแนกออกได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 การจำแนกความผิดเพี้ยนชนิดเชิงเส้น

1.1.1ความผิดเพี้ยนเชิงเส้น (Linear distortion)

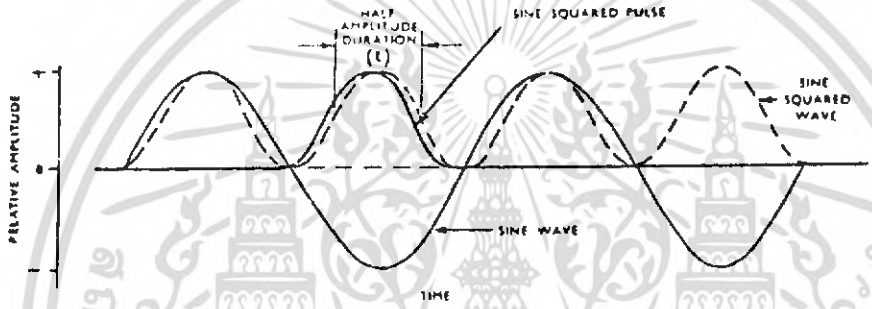
ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นเกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะของความถี่ในสายส่งไม่ราบเรียบ (non-flat)ซึ่งวิธีการวัดความผิดเพี้ยนชิงเส้นสามารถทำได้สองวิธี โดยวิธีแรกจะใช้สัญญาณตรวจวัดในขอบข่ายของเวลา (time domain) และวิธีที่สองวัดคุณลักษณะทางขนาดและเฟสในขอบข่ายของความถี่ (frequency domain)ในปริญญานิพนธ์นี้เราจะได้ทำการศึกษาความผิดเพี้ยนของสัญญาณในขอบข่ายของความถี่เกี่ยวกับความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโทรทัศน์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้พัลซ์ มอดดูเลทซายน์กำลังสอง (The Measurement of Gain and Delay Distortion by using Modulation sine-Squared pulse)

สัญญาณทดสอบที่เราใช้ประเมินความผิดเพี้ยนของผลตอบสนองทางขนาด ในทางปฏิบัตินิยมใช้สัญญาณทดสอบพัลซ์ ซายน์ กำลังสองและสัญญาณบาร์(sine square pulse and bar)ซึ่งพัลซ์ ซายน์ กำลังสองมีความไว (sensitivity) ต่อความผิดเพี้ยนสูงกว่าพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2 แสดงพัลซ์ ซายน์กำลังสองเทียบกับสัญญาณซายน์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า พัลซ์ กำลังสองมีขนาดเป็นบวกทุกค่า



รูปที่ 2 สัญญาณพัลซ์ ซายน์กำลังสองเทียบกับสัญญาณซายน์

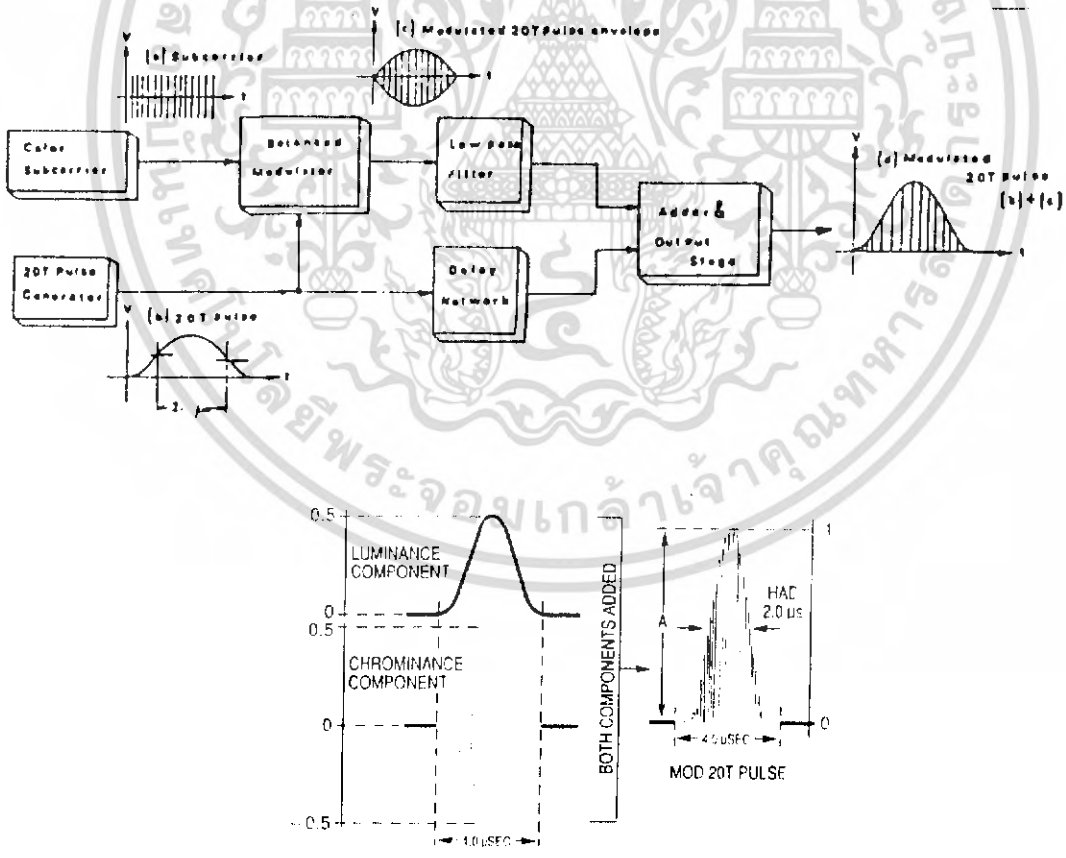
ซึ่งปัจจุบันพัลซ์ซายน์กำลังสองเป็นที่นิยมใช้ในการตรวจสอบข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในระบบโทรทัศน์ พัลซ์ดังกล่าวอาจเป็นแบบ T และ 2T สำหรับตรวจสอบ โทรทัศน์ขาว-ดำ และแบบมอดดูเลต 20T ซายน์กำลังสองสำหรับตรวจสอบโทรทัศน์สี วิธีการตรวจสอบใด ๆ ทำได้โดยการป้อนสัญญาณพัลซ์ซายน์กำลังสองให้กับระบบ แล้วสังเกตการตอบสนองต่าง ๆ ของระบบดังกล่าวคือ การตอบสนองทางขนาด (Amplitude Response) การตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และเอ็นเวอร์โลบดีเลย์ (Envelope Delay)ส่วนในโครงงานนี้เราจะใช้สัญญาณทดสอบมอดดูเลต 20T ซายน์กำลังสองเพื่อนำมาใช้ทดสอบผลตอบสนองทางขนาด (Amplitue Response)ต่อความถี่ของสัญญาณ

ในการวัดคุณสมบัติของสายส่งสำหรับงานด้านโทรทัศน์สี การทดสอบลูมิแนนท์โครมิแนนซ์ทางอัตราขยายทางและดีเลย์อินควอลิตี้(Luminance-Chrominance Gain and Delay Inequality)โดยการใช้สัญญาณรวม(Composite Signal) ซึ่งประกอบด้วยพัลซ์ไซน์กำลังสองรวมกับพัลซ์มีอด (Pulse Mod) ที่ความถี่คลื่นพาหะของสัญญาณสี (Colour Subcarrier) ในกรณีที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น สัญญาณรวมจะมีเอ็นวิโลบ (envelope) โดยเฉพาะที่ฐานของพัลซ์ (Baseline) เป็นเส้นตรงและในกรณีเมื่อเกิดความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นในระบบการส่ง จากการสังเกตที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นวิโลบของฐานของพัลซ์ (Envelope of Baseline) อาจจะเกิดเป็นลักษณะของไซน์ หรือ โคไซน์ เราสามารถพิจารณาได้จาก ออสซิลโลสโคป โดยการวัดค่ายอด (peak)สูงสุดและต่ำสุด ของฐานพัลซ์เราก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราขยาย (Gain) และ ดีเลย์ (delay) ได้

สัญญาณรวมไมคูเล็ทพัลซ์ 20T (Composite 20T pulse)สามารถสร้างขึ้นได้ดังแสดงในรูป ที่ 3 โดยการป้อนสัญญาณพัลซ์ 20T จากเครื่องกำเนิดรูป (b) โดยสัญญาณดังกล่าวมีค่า (half amplitude duration(h.a.d.) 2 ไมโครวินาทีในระบบ PAL และ 2.5 ไมโครวินาทีในระบบ NTSC แล้วนำไปมอดกับสัญญาณคัลเลอร์ซับแคเรีย รูป (a) จะได้สัญญาณรูป (c) โดยสัญญาณที่มอดแล้ว จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ(low pass filter)แบบวิดกว้างเพื่อกรองเอาฮาร์โมนิคที่ไม่ต้องการออก ส่วนสัญญาณจาก (b) อีกทางหนึ่งจะไปผ่านวงจรหน่วงเวลา(Delay network) เพื่อปรับให้สัญญาณ (b) กับสัญญาณ (c) มีไทม์มิ่งเท่ากัน แล้วจึงผ่านวงจรรวม (adder) ก็จะได้สัญญาณรวมไม คูเล็ทพัลซ์ 20T ในรูป (d) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โทรทัศน์สี



รูปที่ 3 วงจรผลิตสัญญาณรวมไมคูเล็ท 20T

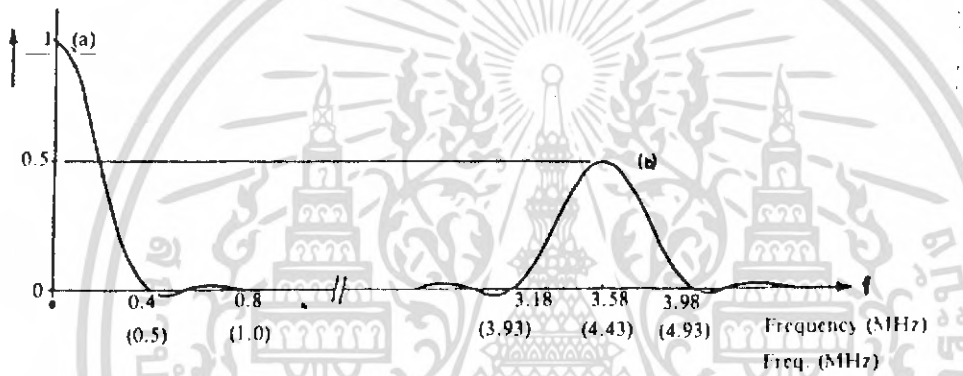
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.3 สเปคตรัมของสัญญาณรวมโมดูเล็ทพัลซ์ 20T

ฟรีเควนซี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมโมดูเล็ท 20T จะประกอบด้วยสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ(สัญญาณที่ยังไม่ได้มีอดด)กับสัญญาณในย่านความถี่สูง(สัญญาณที่ถูกมีอดแล้ว)จากการคำนวนหาความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวม 20T จะได้ดังสมการ

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

จากสมการที่ (1) นำไปพล็อตจะได้รูปสเปคตรัมดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงความถี่สเปคตรัมของสัญญาณรวมพัลซ์ 20T

จากสเปคตรัมเราจะเห็นได้ว่าสัญญาณมีอดดูเลท 20T นี้ประกอบด้วยสัญญาณในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงเราจึงสามารถนำเอาสัญญาณนี้มาใช้ในการตรวจสอบความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบได้

1.1.4 ทฤษฎีและการหาสูตรสำเร็จของความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์

การหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี (Crominance signal) ทางด้านอัตราการขยาย (gain)ใช้สัญญลักษณ์ A และ ไทม์ดีเลย์ τ โดยผลจากการคำนวณหาความผิดเพี้ยนทั้ง A และ τ จะสัมพันธ์กับค่ายอดทั้งสองจากฐานของพัลซ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าเราทราบค่ายอดจากฐานพัลซ์ ก็จะสามารถหาค่าความผิดเพี้ยนของพัลซ์ว่าในระบบทดสอบ(System Under Test) จะมีผลต่อสัญญาณสีทางด้านไหนเช่นระบบทดสอบอาจมีผลทางด้านความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย(gain distortion) อย่างเดียวหรือความผิดเพี้ยนทางด้านไทม์ ดีเลย์(Time delay Distortion)เพียงอย่างเดียว หรือทั้งสองอย่างแต่ในโครงงานนี้เราจะศึกษาเฉพาะความผิดเพี้ยนทางด้านอัตราขยายเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาอัตราการขยาย กำหนดให้

f(t) = เบสไลน์ฟังก์ชั่นของซายน์กำลังสองพัลซ์

u(t) =เอ็นวิโลป(envelope) ด้านบนของซายน์กำลังสองพัลซ์

l(t) = เอ็นวิโลป(envelope) ด้านล่างของซายน์กำลังสองพัลซ์

Y_1 และ Y_2 = ขนาดของเบสไลน์ด้านล่างของซายน์กำลังสองพัลซ์

A = อัตราขยายของซายน์กำลังสองพัลซ์ที่ได้ถูกรวมกับเบสแบน(base band)ที่สัมพันธ์กัน

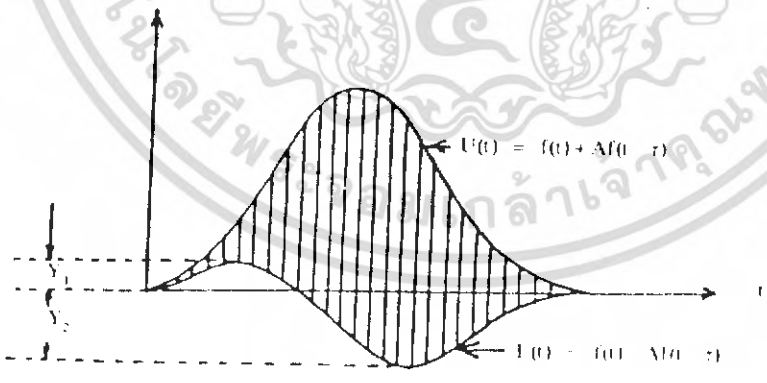
T_0 = ระยะเวลาขนาดของ pulse ในกรณีของ 20T พัลซ์คือ 2 ไมโครวินาทีในระบบ PAL SYSTEM

τ = ดีเลย์อินอิควอลิตี้ ส่วนที่ถูกรวมช้าไป หรือนำหน้าสัญญาณที่ยังไม่ได้มีอค

พิจารณารูปที่ 5 จะได้เอ็นวิโลปด้านบนและด้านล่างดังนี้

$$U(t) = f(t) + Af(t-\tau) \quad \text{----------} \quad (1.1.4\text{-}1)$$

$$l(t) = f(t) - Af(t-\tau) \quad \text{----------} \quad (1.1.4\text{-}2)$$



รูปที่ 5 สัญญาณรวมโคซายน์กำลังสองพัลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเบสแบน (baseband) คือ

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\cos^2 \frac{\pi t}{2T_0} & 0 < 1 < T_0 \\ 0 & t > T_0 \end{cases} \quad \text{---------- (1.1.4-3)}$$

จะได้สูตรของการหาความผิดเพี้ยนทางขนาดคือ

$$A = \frac{1-(y_1 + y_2 + y_1y_2)}{1+(y_1 + y_2 - y_1y_2)} \quad \text{---------- (1.1.4-4)}$$

กำหนดให้

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

และสูตรสำหรับการหาความผิดเพี้ยนทางดีเลย์คือ

$$\tau = \frac{T_0}{\pi}\cos^{-1}\left[1 + \frac{8y_1y_2}{\{1-(y_1 + y_2 + y_1y_2)\}\bullet\{1+(y_1 + y_2 - y_1y_2)\}}\right] \quad \text{---------- (1.1.4-5)}$$

1.1.5 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว (Distrotion Cause by Difference Only)

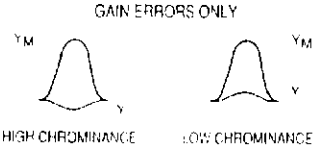
ในกรณีแสดงด้วยค่า Y1 และ Y2 ค่าใดค่าหนึ่งเป็น 0 ดังนั้นจะไม่มีความผิดเพี้ยนทางดีเลย์เกิดขึ้น ($\tau = 0$) เพราะฉะนั้นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจริงจึงมีแต่ความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียวซึ่งแสดงให้เห็นดังนี้จากสมการ (5) เมื่อ Y1 หรือ Y2 มีค่าเป็น 0 จะได้ว่า

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

และสมการ (4) จะกลายเป็น

$$A = \frac{1-y_{1,2}}{1+y_{1,2}} = \frac{1-\frac{Y}{Y_{max}}}{1+\frac{Y}{Y_{max}}} \quad \text{---------- (1.1.5-1)}$$

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



รูปที่ 6 แสดงการแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (1.1.5-1) ความผิดเพี้ยนของอัตราขยายหาได้ดังนี้

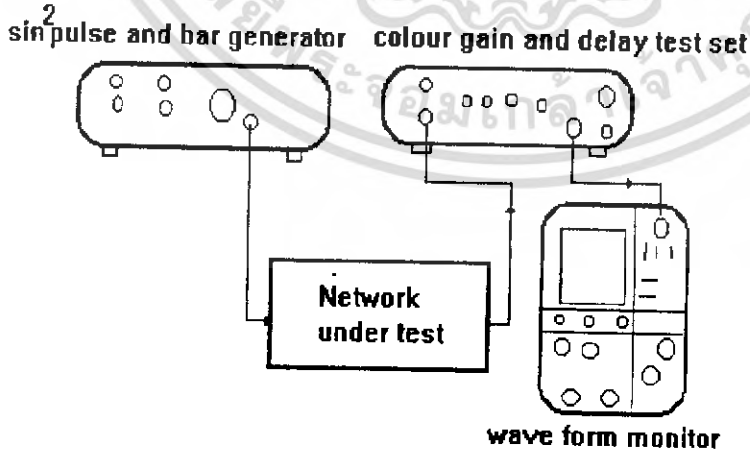
$$\varepsilon = 1 - A = \frac{2Y / Y_{max}}{1 - Y / Y_{max}} \qquad \text{---------- (1.1.5-2)}$$

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 ดังนั้นเราจะได้สูตรความผิดเพี้ยนทางขนาดสองสูตรคือ

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

ในการวัดความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายและดีเลย์ของสัญญาณสีนั้นจะประกอบด้วยเครื่องผลิตสัญญาณรวมโมดูเลทพัลซ์ซายน์กำลังสอง(ดังในรูปที่ 7)ป้อนผ่านระบบที่ต้องการวัดและเอาท์พุทต่อเข้าเครื่องวัดซึ่งเครื่องวัดดังกล่าวสามารถปรับอัตราขยายของสัญญาณสีในช่วง -3เดซิเบล ถึง +3เดซิเบล และปรับดีเลย์ได้ทีละ 20 นาโนวินาที รวม 120 นาโนวินาทีโดยในขั้นแรกตั้งเครื่องวัดเป็นกลางโดยปรับอัตราขยายเป็น 0 เดซิเบล และดีเลย์เป็น 0 นาโนวินาทีแล้วป้อนสัญญาณทดสอบเข้าระบบที่ต้องการจะทดสอบต่อผ่านเครื่องวัดแล้วเข้าเวฟฟอร์มมอนิเตอร์ จากการสังเกตถ้าฐานของสัญญาณ(base line)ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแสดงว่าระบบดังกล่าวไม่มีผลต่อสัญญาณโทรทัศน์สี แต่ถ้าเกิด base line เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจจะเกิดจากอัตราขยายเพียงอย่างเดียว หรือเฉพาะดีเลย์เพียงอย่างเดียว หรือ เกิดความผิดเพี้ยนทั้งสองอย่างพร้อม ๆ กันการวัดนั้นทำได้โดยการปรับอัตราขยายของเครื่องวัดและดีเลย์ไทม์ไปพร้อมๆ กันจนกว่า base line ของสัญญาณรวมโมดูเลทพัลซ์ซายน์กำลังสองจะราบเรียบและทำการอ่านค่าที่ได้บันทึกไว้ ก็จะทราบความผิดเพี้ยนทางขนาดและดีเลย์ไทม์ของสัญญาณโทรทัศน์สีได้



รูปที่ 7 แสดงวิธีการวัดความผิดเพี้ยนทางขนาดและดีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 เฟสและกรุ๊ฟดีเลย์ (Phase and Group delay function)

phase angle $\Phi(\omega)$ และกรุฟดีเลย์ฟังก์ชั่น กำหนดเป็น

$$\phi(\omega) = -\angle H_{(j\omega)} \qquad \text{----------(1.2-1)}$$

$$\tau(w) = \frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} = \frac{-d\angle \mathrm{H}(j\omega)}{d\omega} \qquad \text{----------(1.2-2)}$$

เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงธรรมชาติของฟิลเตอร์ (filter) เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างเฟส และ กรุ๊ฟดีเลย์ดังนั้นเราจะมาศึกษาใน 2 กรณีต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ให้ฟิลเตอร์มีคุณสมบัติดังนี้

$$H_1(j\omega) = 1 \quad \text{ที่} \quad -\omega_c < \omega < \omega_c \qquad \text{---------- (1.2-3)}$$

$$= 0 \quad \text{ที่อื่น ๆ}$$

นั่นคือ ฟิลเตอร์จะมีเฟสเป็นศูนย์และจะมีกรุ๊ฟดีเลย์เป็นศูนย์ด้วยสำหรับทุก ๆความถี่ดังนั้นผลตอบสนอง (Impuse response) กำหนดเป็น

$$H_1 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} H_{r(j\omega)} e^{j\omega t}\, d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t}\, d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi(jt)}\int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t}\, dj\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi(jt)} e^{j\omega t}\Big|_{-\omega c}^{\omega c}$$

$$= \frac{1}{2\pi jt}\left[e^{j\omega ct} - e^{j(-\omega c)t}\right]$$

$$= \frac{1}{\pi t}\frac{1}{2j}\left(e^{j\omega ct} - e^{-j\omega ct}\right)$$

$$= \frac{1}{\pi t}\frac{1}{2j}\frac{2j}{2j}\left(e^{j\omega ct} - e^{-j\omega ct}\right)$$

$$= \frac{2}{\pi t}\sin\omega ct = \frac{\omega c}{\pi}\frac{\sin\omega ct}{\omega ct} \qquad \text{---------- (1.2-4)}$$

กรณีที่ 2 ให้ฟิลเตอร์อีกอันมีคุณสมบัติดังนี้

$$H_{2j\omega} = 1\exp\left[-\frac{jk\pi\omega}{2\omega_c}\right] \quad ; \quad -\omega_c \le \omega \le \omega_c$$

$$= 0 \quad \text{ที่อื่น ๆ} \qquad \text{---------- (1.2-5)}$$

ฟิลเตอร์ตัวที่สองต่างจากตัวแรกคือจะมีเฟสในช่วง pass band ล้าหลังอยู่ ดังนั้น impulse response **กำหนดเป็น**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

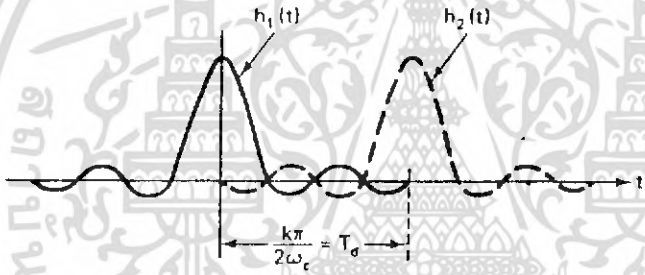
$$H_{r(t)} = \frac{\omega c}{\pi} \frac{\left(\omega ct - \frac{k\pi}{2}\right)}{\omega ct - \frac{k\pi}{2}} \qquad \text{---------- (1.2-6)}$$

เปรียบเทียบสมการที่ (1.2-4) กับ (1.2-6)

เราพบว่าฟิลเตอร์ตัวหลังมีความล่าหลัง (time lag) จากฟิลเตอร์ก่อนหน้านี้อยู่ $(k\pi)/2\omega_c$ แสดงให้เห็นได้ดังรูปข้างล่าง และเราจะได้กรุฟดีเลย์ของฟิลเตอร์ตัวที่สองเป็น

$$\tau(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}\left(\frac{k\pi\omega}{2\omega_c}\right) = \frac{k\pi}{2\omega_c} = Td(timedelay)$$

รูปร่างลักษณะของสัญญาณอิมพัลซ์เรสปอนส์(impulse response)**ของฟิลเตอร์ทั้งสองจะแสดงได้ดังรูปที่ 8**



รูปที่ 8 แสดงผลกระทบผลจากการมีกรุ๊ฟดีเลย์ไม่ราบเรียบของฟิลเตอร์

ในการออกแบบวงจรดิจิตอลไลเซกร์นั้นจะเกี่ยวข้องกับสัญญาณสีของไทรทัศน์ซึ่งหากว่าวงจรที่เราออกแบบมีกรุ๊ฟดีเลย์ไม่ราบเรียบแล้วก็จะทำให้เฟสของสัญญาณสีเปลี่ยนไปได้ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนทางเฟสขึ้นได้ดังนั้นในการออกแบบวงจรแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดนี้เราจะต้องพยายามทำให้วงจรที่ออกแบบมีกรุ๊ฟดีเลย์ที่ราบเรียบมากที่สุดเพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อเฟสของสัญญาณสี

1.3 AMPLITUDE,PHASE, and DELAY

เราจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Pole และ Zero ของระบบและเราจะค้นหาผลของตำแหน่งของ Pole และ Zero ที่มีผลต่อคุณสมบัติของ H(s) ตามแนวแกน $j\omega$ ผลตอบสนองของ system function กำหนดเป็น

$$H_{(j\omega)} = M_{(\omega)} e^{j\phi_{(\omega)}} \qquad \text{----------(1.3-1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

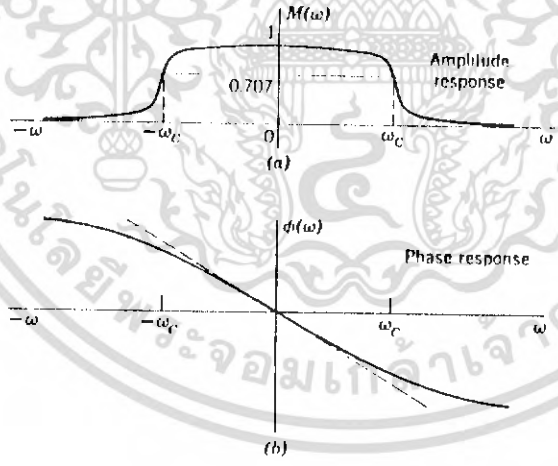
เมื่อ $M_{(\omega)}$ เป็นผลตอบสนองทางขนาดและเป็นฟังก์ชั่นคู่ในตัวแปร ω

$\phi_{(\omega)}$ เป็นผลตอบสนองทางเฟส และเป็นฟังก์ชั่นในตัวแปร ω

ผลตอบสนองทางเฟสและขนาดนี้เราจะนำมาทำการออกแบบวงจรส่งผ่าน(Transmission circuit) ต่าง ๆ เราลองพิจารณาผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำ(low pass filter) ในรูป 9(a)และ9(b) cut off frequency จะอยู่ที่ ω_c ซึ่งตรงจุดนี้ค่ากำลังงานของสัญญาณจะลดลงครึ่งหนึ่ง ถ้าคิดในเทอมของ dBจุดนี้ที่เป็นจุดที่ขนาดลดลง -3dB นั่นเองซึ่งมีค่า 0.707 เท่าของ $H_{(j\omega max)}$

จากรูปเราจะเห็นว่าที่ความถี่มากกว่า ω_c เท่านั้นที่ผ่านไปได้สมมุติว่าเราพิจารณาขวนพัลซ์ที่สเปคตรัมประกอบด้วยฮาโมนิกส์ต่างๆที่สูงกว่า ω_c เราทราบว่าระบบจะยอมให้ฮาโมนิกส์ที่ต่ำกว่า ω_c เท่านั้นที่จะผ่านไปได้แต่จะกัน harmonic ที่สูงกว่า ω_c นั่นคือ จะทำให้ขบวนพัลซ์ที่ output จะเพี้ยนไป เมื่อเทียบกับ ที่จุดกำเนิดเพราะฮาโมนิกส์ที่สูงกว่านั้นหายไป

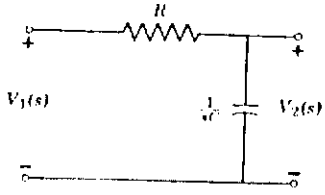
และถ้าผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้นแล้ว ผลลัพธ์คือพัลซ์จะมีความผิดเพี้ยนน้อยมาก



รูปที่ 9

เราจะเห็นได้ว่าจากผลตอบสนองทางเฟสในรูป (b) เฟสเราจะประมาณได้ว่าเป็นเชิงเส้นในช่วง $-\omega_c \le \omega \le +\omega_c$ ถ้าโนเทอมของนัยสำคัญของฮาโมนิกส์ทั้งหมดน้อยกว่า ω_c แล้วระบบนี้จะทำให้เฟสมีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด (minimum phase distortion) ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10

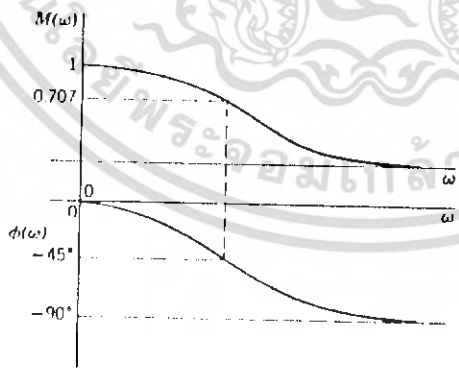
จากรูปที่ 10 จะได้โวลเตจทรานเฟอร์ฟังชั่นว่า

$$H_{(s)} = \frac{V_{2(s)}}{V_{1(s)}} = \frac{(1/sc)}{\{(1/sc)+R\}} = \frac{(1/sc)}{\{(1+Rsc)/sc\}}$$

$$\frac{1}{(1+Rsc)} \quad \frac{(1/Rc)}{\{s+(1/sc)\}} \qquad \text{----------(1.3-2)}$$

แทน $s = j\omega$

$$H_{(j\omega)} = \frac{(1/Rc)}{\{j\omega+(1/Rc)\}} \qquad \text{----------(1.3-3)}$$



รูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของวงจรรูปที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป polar form $H_{(j\omega)}$ จะเป็น

$$H_{(j\omega)} = \frac{1/RC}{\sqrt{\omega^2 + \left[\frac{1}{RC}\right]^2}} e^{j\tan^{-1}(\omega RC)} = M_{(\omega)} e^{j\phi(\omega)}$$

----------(1.3-4)

จากรูปที่ 11 ที่ $\omega = 0$ ขนาดมีค่า =1 และเฟสเป็น 0 องศาที่ ω เพิ่มขึ้น ขนาดและเฟสจะลดลง ที่ $\omega = 1/RC$ ขนาดจะมีค่าเท่ากับ 0.707 และเฟสจะเป็น 45 องศา

$$H_{(j\omega)} = \frac{1/RC}{\sqrt{2}} e^{-j\tan^{-1}(1)} = 0.707\left(\frac{1}{RC}\right)\angle -45^0$$

สุดท้ายที่ $\omega \to \infty M_{(\omega)}$ มีค่าเป็น 0 และ $\phi(\omega)$ มีค่า -90 องศา

$$H_{(j\omega)} = \frac{1/RC}{\infty} e^{-j\tan^{-1}(\infty)} = 0\angle -90^0$$

เราจะมาดูวิธีหาค่า Amplitude &phase Response จากตำแหน่งของ pole กับ zero จาก

$$H_{(s)} = \frac{A_0(s - z_0)(s - z_1)}{(s - p_0)(s - p_1)(s - p_2)}$$

$$= \frac{A_0(j\omega - z_0)(j\omega - z_1)}{(j\omega - p_0)(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)}$$

----------(1.3-5)

เฟคเตคร์ $j\omega - zi$ หรือ $j\omega - pi$ จะสัมพันธ์กับ Vector จาก zi หรือ pj ในทิศทางตามจุดต่าง ๆ ของ $j\omega$ บนแกนจินตภาพ เราสามารถเขียนเวกเตคร์ในรูปของ Waveform ได้ว่า

$$j\omega - zi = Nie^{j\psi}, j\omega - pj = Mje^{j\theta}$$

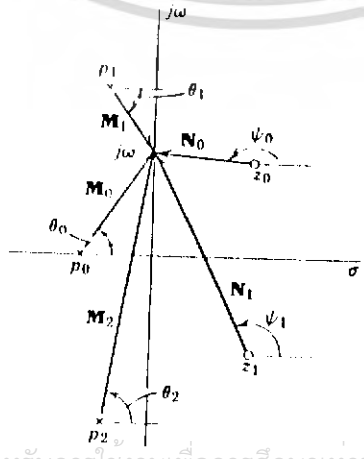
----------(1.3-6)

กลายเป็น

$$H_{(j\omega)} = \frac{A_0 N_0 N_1}{M_0 M_1 M_2} e^{j(\psi_0 + \psi_1 - \theta_0 - \theta_1 - \theta_2)}$$

----------(1.3-7)

ดังในรูปที่12 θ_1 จะมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 12 การคำนวนหาผลตอบสนองทางขนาดและเฟสจาก P-Z ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาฟังก์ชั่นต่อไปนี้

$$F_{(s)} = \frac{4s}{s^2 + 2s + 2} = \frac{4s}{(s+1+j)(s+1-j)} \quad \text{----------(1.3-8)}$$

เราจะหาขนาดและเฟสที่ $(j2)$ $F_{(s)}$

$$M_{(j2)} = 4\left(\frac{2}{\sqrt{2} * \sqrt{10}}\right) = 1.78$$

$$\phi_{(j2)} = 90^0 - 45^0 - 71.8^0 = -26.8$$

ที่ $F_{(j0)}$

$$M_{(j0)} = \frac{4(0)}{\sqrt{2} * \sqrt{2}} = 0$$

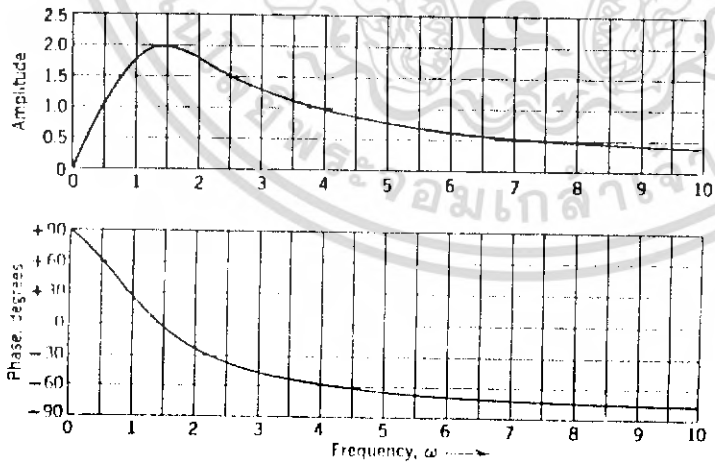
$$\phi_{(j0)} = 90^0 - 45^0 + 45^0 = 90^0$$

และที่ $\omega \to \infty$

$$M_{(j\infty h)} = \frac{4(\omega h)}{(\omega h + 1)(\omega h + 1)} = \frac{4(\omega h)}{\omega h^2} = \frac{4}{\omega h}$$

$$\phi_{(\infty h)} \cong 90^0 - 90^0 - 90^0 = -90^0$$

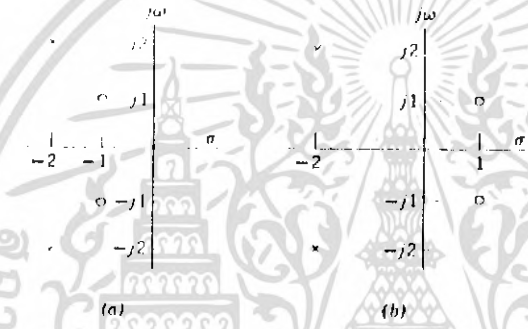
ซึ่งทั้ง 3 จุด นี้เพียงพอแล้วที่เราจะสรุปคุณสมบัติของ $F_{(s)}$



รูปที่ 13 แสดงการนำค่าที่ได้จากการคำนวณมา plot

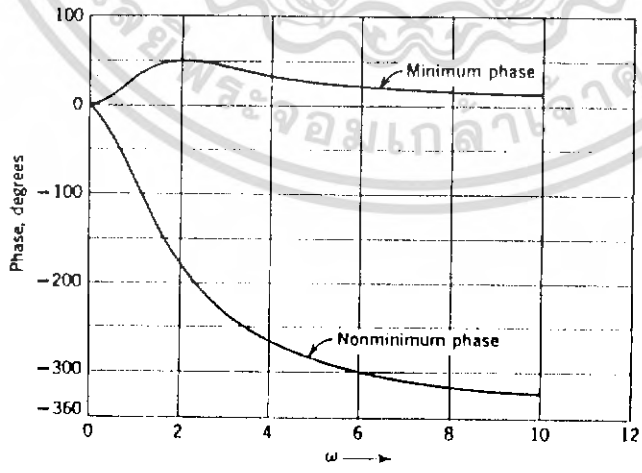
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาในเรื่อง เสถียรภาพ จะต้องไม่มี pole ใน RHP plane แต่อย่างไรก็ตาม ทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นอาจมีค่าซีโร่ใน RHP plane ได้ พิจารณารูปที่ 14(a) และ 14(b) ทั้งสองรูปมีตำแหน่งของโพลที่เหมือนกัน แต่ตำแหน่ง Zero จะต่างกันคือ รูป (a) LHP $S=-1\pm j1$ ส่วนใน (b) เหมือนเงาของ (a) $S=1\pm j1$ ข้อสังเกตผลตอบสนองขนาดของทั้งสองจะเหมือนกัน เพราะขนาดของเวเตอร์เท่ากัน เราจะพบว่าขนาด(absolute magnitude)ของเฟส ของ (b) มากกว่าของ (a) ที่ทุกๆความถี่ ทั้งนี้เพราะว่าค่า Zero ใน RHP จะช่วยทำให้ phase shift ได้มากกว่า จากเหตุผลนี้เองเราสามารถกำหนดนิยามออกมาได้ว่าระบบใดก็ตามที่มีค่า Zero ใน LHP หรือแกน $j\omega$ เท่านั้น เราเรียกว่า "minimum phase function" และถ้าระบบใดมี Zero 1หรือมากกว่าใน RHP แล้วเราเรียกว่า :"non-minimum phase function"



(a) Minimum phase function. (b) Nonminimum phase function.

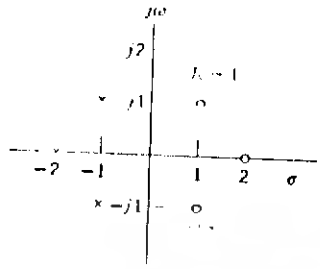
รูปที่ 14แสดง minimum phase system และ nonminimum phase system



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบเฟสของ minimum-nonminimum phase ฟังชั่น

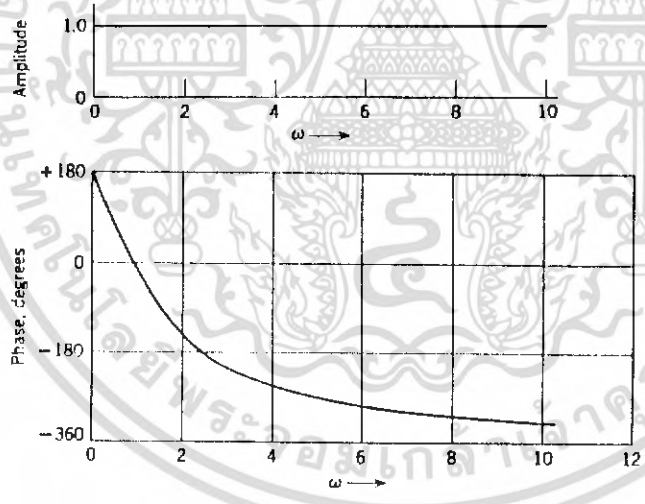
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเราลองพิจารณา P-Z ไดอะแกรมในรูป 16



รูปที่ 16

เราจะสังเกตเห็นว่า Zero จะเป็นเหมือนภาพสะท้อนของ pole ทาง LHP ในเทอมของเวกเตอร์ที่เราวาดจากค่า pole ไปยังจุดต่าง ๆ ของ $j\omega$ บนแกนจินตภาพนั้น จะเหมือนกับภาพสะท้อน สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ ผลตอบสนองทางความถี่ที่ทุกความถี่



รูปที่ 17 แสดง Amplitude และ Phase ของ All-pass function

เราสรุปได้ว่าระบบฟังชั่นใด ๆ ที่มีค่าโพลเฉพาะ LHP และมี Zeroที่เป็นภาพสะท้อนของ pole ใน เราเรียกว่า All-pass functionซึ่งโดยทั่วไปเราจะใช้สำหรับแก้ความผิดเพี้ยนทางเฟสของระบบส่งผ่าน (Transmission system)

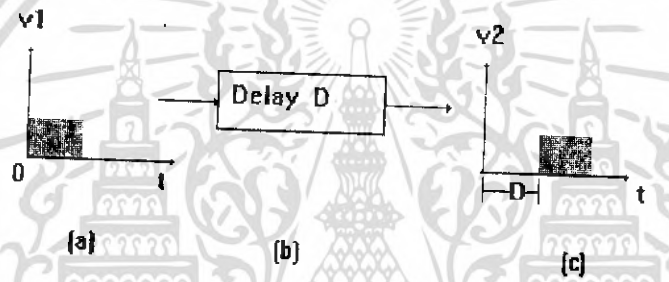
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ดีเลย์ฟิลเตอร์ (Delay filters)

พื้นฐานอย่างหนึ่งในการประมวลผลสัญญาณคือ ไทม์ดีเลย์ (Time Delay) ซึ่งดีเลย์จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านที่ว่างซึ่งอาจจะเป็นสายโคเอ็กเชียล สายใยแก้วนำแสง หรือ อื่น ๆ เพราะว่าดีเลย์เกิดขึ้นจากการที่สัญญาณเดินทางผ่านที่ว่างต่าง ๆ นั้นเหมือนกันเราจึงสามารถประมาณค่าของดีเลย์โดยใช้ ดีเลย์ฟิลเตอร์

1.4.1 การหน่วงเวลาของสัญญาณและฟังชั่นถ่ายโอน (Time Delay and Transfer function)

ดีเลย์เป็นปริมาณทางเวลา(Time-domain quantity)แต่ฟิลเตอร์ที่เราออกแบบนี้เราออกแบบในโดเมนของความถี่ (frequency domain) ในรูปผลตอบสนองทางขนาดและเฟส ดังนั้นเราจึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างสองปริมาณดังกล่าว ซึ่งจะทำให้ทราบถึง ไทม์ดีเลย์ โดยการพิจารณาสัญญาณอินพุทดังในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ถูกหน่วงเวลา

สัญญาร v_1 เมื่อถูกป้อนเข้าวงจรหน่วงเวลา สัญญาณที่เอาท์พุทจะถูกหน่วงเวลาไป D วินาทีเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$v_2 = v_1(t-D) \qquad \text{.....(1.4.1-1)}$$

จากวิเคราะห์ฟูเรียย์เราทราบมาว่า สัญญาณใดๆ จะเกิดจากผลบวกอนันต์ของสัญญาณ Sinusoidal สมมติสัญญาณ v_1 มีสมการเป็น

$$v_1 = A\sin(\omega t + \varnothing) \qquad \text{.....(1.4.1-2)}$$

จาก (1.4.1-1) v_2 จะกลายเป็น

$$v_2 = A\sin(\omega(t - D) + \varnothing) \qquad \text{.....(1.4.1-3)}$$

$$v_2 = A\sin(\omega t - \omega D + \varnothing) \qquad \text{.....(1.4.1-4)}$$

เราจะเห็นว่าสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทจะต่างกันก็เพียงดีเลย์เท่านั้นคือ มุมเฟสนั่นเอง

$$\theta = -\omega D \qquad \text{.....(1.4.1-5)}$$

ถ้าหากเราแทน (1.4.1-2) ด้วยเฟสเซอร์จะกลายเป็น

$$v_1 = A\angle\varnothing \qquad \text{.....(1.4.1-6)}$$

สมการ (1.4.1-4) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$v_2 = A\angle(\varnothing - \omega D) \quad \text{.....(1.4.1-7)}$$

จะได้ว่าอัตราส่วนของ

$$\frac{v_2}{v_1} = 1\angle -\omega D \quad \text{.....(1.4.1-8)}$$

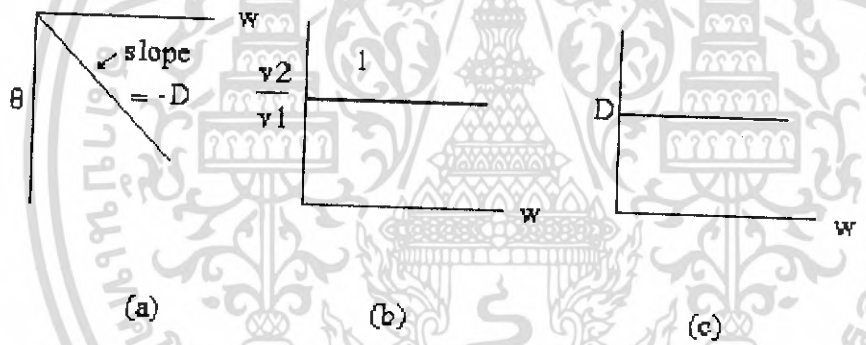
หรือในรูปเอ็กโปแนนเชียลจะได้ว่า

$$\frac{v_{2(j\omega)}}{v_{1(j\omega)}} = e^{-j\omega D} \quad \text{.....(1.4.1-9)}$$

ถ้าให้ D =1 และให้ s = jω จาก (1.4.1-9) จะกลายเป็น

$$\frac{v_{2(s)}}{v_{1(s)}} = e^{-s} \quad \text{.....(1.4.1-10)}$$

ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสต่อความถี่ของสมการ (1.4.1-9) สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงผลตอบสนองทาง เฟส,ขนาด,และ ดีเลย์

จากรูปที่ 19 บอกเราว่าหากว่าเฟสของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามความถี่ในลักษณะเป็นเชิงเส้น (linear) และมีสโลปเป็นลบจะทำให้ขนาดคงที่และ ดีเลย์จะคงที่ด้วยซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ถูกดีเลย์นี้ปราศจากความผิดเพี้ยน

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างวงจรจากทรานเฟอร์ฟังชั่น $T = e^{-s}$ ด้วยอุปกรณ์ RLCแต่เราสามารถที่จะประมาณค่าสมการที่ (1.4.1-10) จากอัตราส่วนของโพลิโนเมียลดังสมการ

$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad \text{.....(1.4.1-11)}$$

ถ้าให้ s = jω ใน (1.4.1-11) จะกลายเป็นปริมาณเชิงซ้อนนั่นคือ

$$T(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad \text{.....(1.4.1-12)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

86679

เฟสของ $T(j\omega)$ **คือ**

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X(\omega)}{R(\omega)}\right) \qquad \text{.....(1.4.1-13)}$$

แทนค่า θ **ลงในสมการที่** (1.4.1-5) **จะได้ปริมาณทางเวลา(delay)ว่า**

$$D = -\left(\frac{1}{\omega}\right) \bullet \tan^{-1}\left[\frac{X(\omega)}{R(\omega)}\right] \qquad \text{.....(1.4.1-14)}$$

และเราจะนิยามให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ว่า

$$D = \frac{-d\theta}{d\omega} \qquad \text{.....(1.4.1-15)}$$

$$= \left\{\frac{\left(\frac{-Rdx}{d\omega}\right) + \left(\frac{xdR}{d\omega}\right)}{\left(R^2 + x^2\right)}\right\}$$

สมการที่ (1.4.1-5) **เราเรียกว่า เฟสดีเลย์** (phase delay) **ส่วนในสมการที่** (1.4.1-15) **เราเรียกว่า กรุ๊ฟดีเลย์** (group delay)

1.4.2 เบสเซล-ทอมสัน เรสปอนส์ (Bessel-Thomson Response)

ในการหาทรานเฟอร์ฟังชั่น ที่ทำให้การประมาณค่าทางดีเลย์คงที่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นนั้นจะมีวิธีการประมาณค่าได้หลายวิธีอันหนึ่งที่นำมาใช้คือ All-pole transferfinction อันดับ 2

$$T_2(s) = \frac{a_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \qquad \text{.....(1.4.2-1)}$$

จาก

$$T(s) = e^{-s} = \frac{1}{e^{s}}$$

และ

$$e^{s} = \sinh(s) + \cosh(s) \qquad \text{.....(1.4.2-2)}$$

จะได้

$$T(s) = \frac{1}{\left[\sinh(s) + \cosh(s)\right]} = \frac{\frac{1}{\sinh(s)}}{1 + \cosh(s)} \qquad \text{...(1.4.2-3)}$$

จากการกระจายเลขยกกำลังของไฮเพอโบลิกฟังชั่นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\cosh(s) = 1 + \frac{s^2}{2!} + \frac{s^4}{4!} + \frac{s^6}{6!} + \bullet\bullet\bullet \qquad \text{.....(1.4.2-4)}$$

$$\sinh(s) = s + \frac{s^3}{3!} + \frac{s^5}{5!} + \frac{s^7}{7!} + \bullet\bullet\bullet \qquad \text{.....(1.4.2-5)}$$

$$\coth(s) = \frac{1}{s} + \cfrac{1}{\cfrac{3}{s} + \cfrac{1}{\cfrac{5}{s} + \cfrac{1}{\cfrac{7}{s} + \cdots}}} \qquad \text{.....(1.4.2-6)}$$

ผลลัพท์ของผลหารเอาเฉพาะเทอมต้น ๆ จะทำให้ดีเลย์ราบเรียบที่ $\omega \rightarrow 0$ซึ่งไม่มีความสำคัญอะไรเมื่อผลหารถูกตัดทิ้งออกไปถ้าเรานำเอาเศษส่วนมาบวกเข้าด้วยกันเราจะได้เป็น เบสเซลโพลิโนเมียลถ้าเราต้องการแค่อันดับสองจะได้ดังสมการ

$$\coth(s) = \frac{1}{s} + \frac{1}{\frac{3}{s}} = \frac{1}{s} + \frac{s}{3} = \left(\frac{3 + s^2}{3s}\right) \qquad \text{.....(1.4.2-7)}$$

นำเศษและส่วนของ (1.4.2-7) มาบวกเข้าด้วยกันจะได้

$$s^2 + 3s + 3 \qquad \text{.....(1.4.2-8)}$$

จาก (1.4.2-8) คือเบสเซลโพลิโนเมียล อันดับที่สองซึ่งเราสามารถเขียนเป็นสูตร recursion ได้ว่า

$$\beta_n = (2n-1)\beta_{n-1} + s^2\beta_{n-2} \qquad \text{.....(1.4.2-9)}$$

เพื่อให้ได้เบสเซลโพลิโนเมียลอันดับ n ในรูปของ เบสเซล-ทอมสัน ฟังชั่นเศษของ T(s) จะกำหนดเป็น $T_n(j0) = 1$ ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ว่า

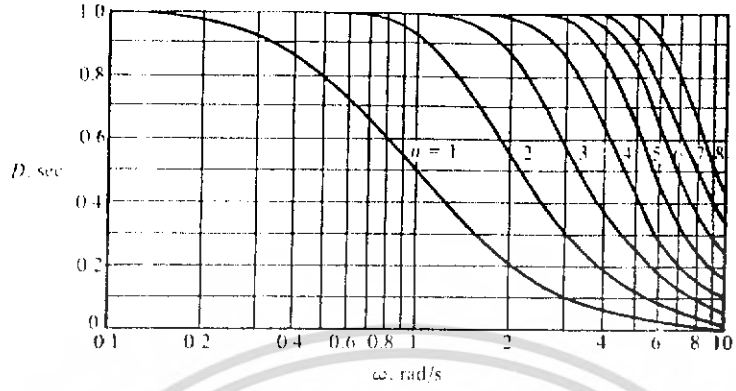
$$T_n(s) = \frac{\beta_n(0)}{\beta_n(s)} \qquad \text{.....(1.4.2-10)}$$

แต่เราจะสนใจในคุณสมบัติของเบสเซลโพลิโนเมียลเท่านั้นนั่นคือ $\beta_n(s)$ ว่าจะมีผลตอบสนองต่อสัญญาณต่อความถี่อย่างไรบ้างโดยทั่วไปเราจะให้เทอมเศษมีค่าเท่ากับค่าคงที่ในเทอมของส่วนเพื่อจะทำให้อัตราการขยายที่ความถี่นอร์มอลไลซ์เป็นหนึ่งนั่นคือเราสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$T_n(s) = \frac{b_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \ldots + b_1 s + b_0} \qquad \text{.....(1.4.2-11)}$$

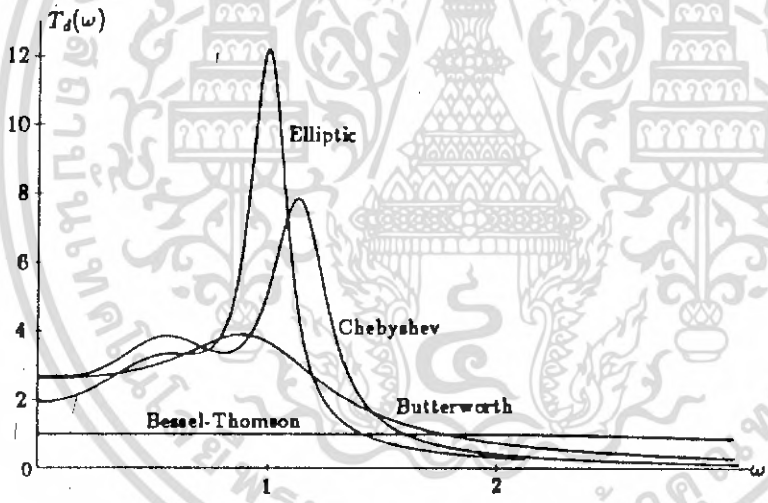
จากการแทนค่า n = 1 ถึง 8 ในสมการ (1.4.2-11) และทำการคำนวนหาผลตอบสนองทางดีเลย์จะได้ดังในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 แสดงผลตอบสนองทางดีเลย์ของ Bessel-Thomson responce

จากรูปเราจะเห็นว่ามันจะให้คุณสมบัติที่เรียกว่า Maximally flat group delay คือจะให้กรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบมากที่สุดในบรรดาโพลิโนเมียลต่างๆ ซึ่งเราจะเห็นความแตกต่างดังในรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของดีเลย์ของโพลิโนเมียลชนิดต่างๆ

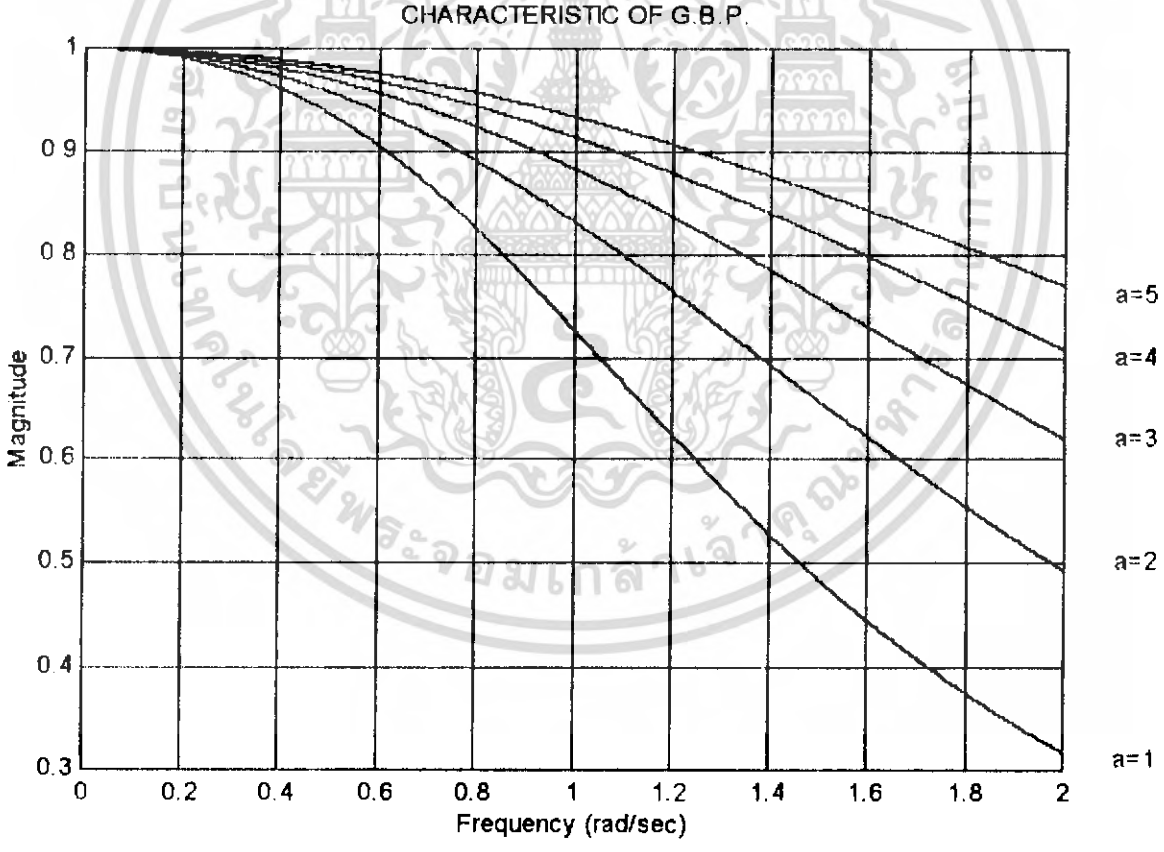
เราจะเห็นว่า เบสเซลโพลิโนเมียลมีคุณสมบัติทำให้กรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบได้ในย่านความถี่ที่เราต้องการในการออกแบบวงจรชดเชยอัตราขยายในปริญญานิพนธ์นี้เราได้นำเอา เจนเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียล (G.B.P.)มาเป็นฟังชั่นส่วนของทรานเฟอร์ฟังชั่น ซึ่ง G.B.P. มีที่มาจาก เบสเซลโพลิโนเมียลธรรมดาแต่จะมีพารามิเตอร์ a ไว้สำหรับปรับคุณลักษณะทางขนาดและเฟส ซึ่งความแตกต่างของโพลิโนเมียลทั้งสองแสดงให้เห็นได้ในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันดับ	Bessel Polynomain	G.B.P.
0	1	1
1	s+1	s+a
2	s^2+3s+3	$s^2+(a+1)s+\left(\frac{1}{4}\right)(a+1)(a+2)$
3	$s^3+6s^2+15s+15$	$s^3+\left(\frac{3}{2}\right)(a+2)s^2+\left(\frac{3}{4}\right)(a+2)(a+1)s+\left(\frac{1}{8}\right)(a+2)(a+3)(a+4)$

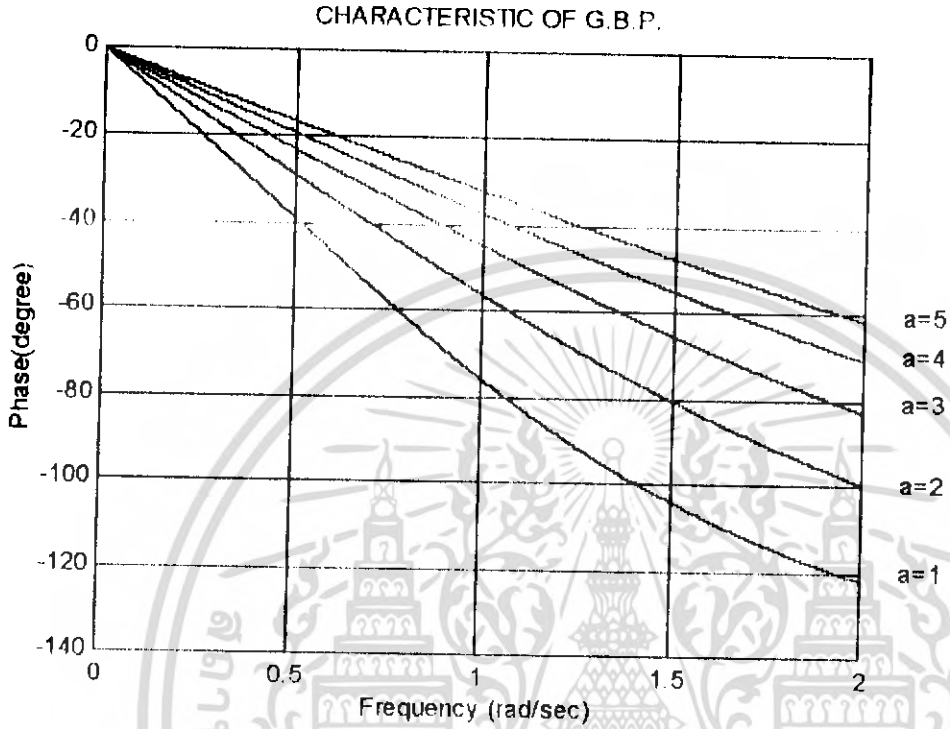
ตารางที่ 1

ถ้าให้ a = 2 G.B.P. ก็จะกลายเป็นเบสเซลโพลิโนเมียลธรรมดาจะเปรียบเทียบความแตกต่าง **ระหว่างทั้งสองนี้โดยใช้อันดับสองโดยการเปลี่ยนค่า a ไปค่าต่างๆ กันจะได้ผลตอบสนองทั้งทาง ขนาดและทางเฟสดังในรูปที่ 22 และรูปที่ 23**



รูปที่ 22 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของเบสเซลและเจเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 23 แสดงผลตอบสนองทางเฟสของเบสเซลและเกนเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 22 และรูปที่ 23 เราจะเห็นว่าเจนเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียลมีพารามิเตอร์ a เป็นตัวปรับคุณลักษณะทางขนาดและเฟสเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดซึ่งเราจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ค่า a น้อยกว่า 2 จะทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับเบสเซลธรรมดา และถ้า a มากกว่า 2 ผลตอบสนองจะช้าลงดังนั้นในการออกแบบวงจรในปริญญานิพนธ์นี้เราได้นำ G.B.P. มาใช้ในการออกแบบเพื่อที่ว่าจะได้สามารถปรับค่า a เพื่อให้วงจรชดเชยอัตราการขยายทางขนาดมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดพร้อมกันนั้นตามคุณสมบัติของเบสเซลโพลิโนเมียล เฟสเป็นเชิงเส้นมากที่สุดซึ่งจะเป็นผลให้กรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบด้วย

1.5 Non-minimum -Phase Network

ในกรณีของ Non-minimum-Phase Network อันดับที่สอง ซึ่งโดยทั่วไปจะเข้าใจกันว่าคือ allpass functions แต่จริง ๆ แล้วฟังชั่นใด ๆ ก็ตามที่สามารถกระจายให้อยู่ในรูปของผลคูณของ allpass network และ network ที่มีค่าซีโร่เฉพาะในระนาบขวามือของ S แปลนก็เรียกว่าเป็น Non-Minimum-Phase Network ซึ่งเราสามารถกระจาย Network ดังกล่าวได้โดยการนำค่าโพลและซีโร่ที่อยู่ในระนาบซ้ายมือของ S แปลน ซึ่งจะได้ว่า

$$T(s) = \frac{s^2 - \left(\frac{\omega_z}{q_z}\right)s + \omega_z^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{q_p}\right)s + \omega_p^2}$$

$$= \frac{s^2 - \left(\frac{\omega_z}{q}\right)s + \omega_z^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_z}{q_z}\right)s + \omega_z^2} \cdot \frac{s^2 + \left(\frac{\omega_z}{q_z}\right)s + \omega_z^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_p}{q_p}\right)s + \omega_p^2} \qquad \text{.....(1.5-1)}$$

$T_1(s)$ $T_2(s)$

โดยที่ T1(s) จะแทน allpass network และ T2(s) จะแทน minimum-phase network ซึ่งตำแหน่งของโพลและซีโร่แสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 24

โดยทั่วไป allpass function อันดับสองจะเขียนอยู่ในรูป

$$T(s) = \frac{s^2 - \left(\frac{\omega_0}{q}\right)s + \omega_0^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{q}\right)s + \omega_0^2} \qquad \text{.....(1.5-2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

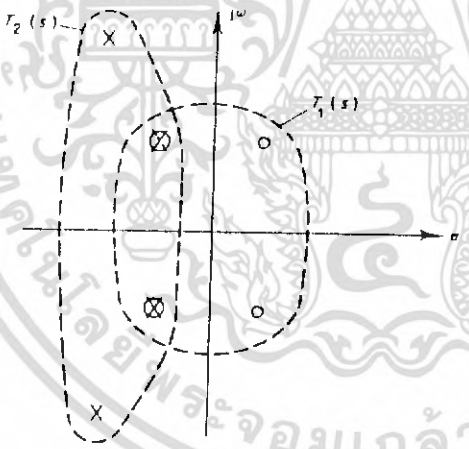
$$b = 2q \qquad \text{.....(1.5-3)}$$

จากสมการที่ (1.5-2) จะมีเฟสดังสมการ

$$\phi(\omega) = -2\cot^{-1}\left[q\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right] \qquad \text{.....(1.5-4)}$$

กรุ๊ฟดีเลย์หรือความชันของเฟสใน (1.5-4) กำหนดได้ว่า

$$\tau(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = \frac{\frac{2q}{\omega_0}\left[1+\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right]}{1+q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \qquad \text{.....(1.5-5)}$$



รูปที่ 24 แสดงตำแหน่งของรากจากการกระจาย non-minimum phase network **อันดับสอง ซึ่งจะ**

ประกอบด้วย allpass function T1(s) และ minimum phase function T2(s)

และที่ความถี่ ω_0

$$\tau(\omega_0) = \frac{4q}{\omega_0} \qquad \text{.....(1.5-6)}$$

ค่าดีเลย์จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ต่ำกำหนดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_{1\max} = \omega_0\left(\sqrt{4 + \frac{1}{q^2}} - 1\right) \qquad \text{.....(1.5-7)}$$

allpass network จะประกอบด้วยตัวแปร ω0 และ q จากสมการที่ (1.5-4) เราจะได้ว่า

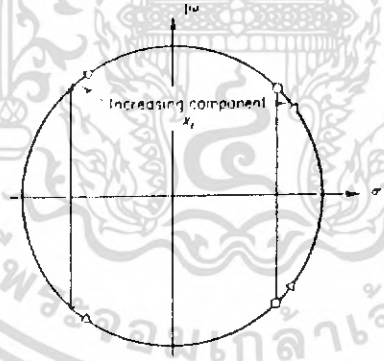
$$\begin{aligned} \phi(0) &= 0 \\ \phi(\omega_0) &= 180^\circ \\ \phi(\omega \to \infty) &= 360^\circ \end{aligned} \qquad \text{.....(1.5-8)}$$

ความถี่ที่ทำเฟสมีค่า 90 องศา และ 270 องศาคือ

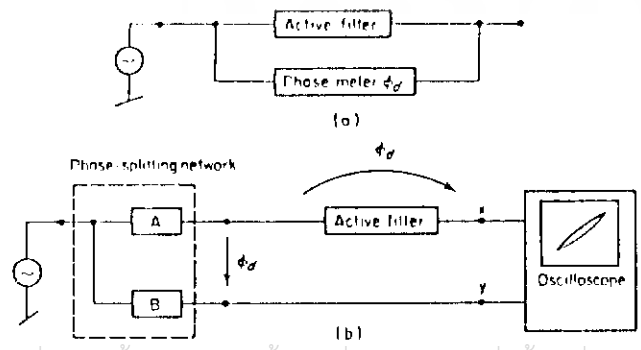
$$\omega_{90,270} = \frac{\omega_0}{2q}\left(\sqrt{4q^2 + 1} \mp 1\right) \qquad \text{.....(1.5-9)}$$

ดังนั้นกระบวนการปรับแต่ง allpass network อันดับสองจะมีกระบวนการดังนี้

1. ปรับ $\omega_z = \omega_p = \omega_0$,$\phi(\omega_0)$ ปรับให้ได้ 180 องศา
2. ปรับ $-q_z = q_p = q$,มุมที่ ω_{90} หรือ ω_{270} จะต้องปรับให้ได้ -90 หรือ -270 องศาตามลำดับ



รูปที่ 25 แสดงผลกระทบจากการปรับ allpass network อันดับสองในข้อ 2



รูปที่ 26 แสดงรูปแบบการต่อวงจรเพื่อปรับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นว่า ในการนำเทคนิคของ non-minimum phase network มาใช้เมื่อเราสร้างวงจรได้แล้วเรา จะต้องทำการปรับแต่งวงจรตามขั้นตอนดังกล่าวเพื่อให้วงจรมีกรุ๊ฟดีเลย์ที่ราบเรียบที่สุดนั่นเอง

1.6 ข้อจำกัดของตำแหน่งซีโร่(Restriction on Zero Location)

ถ้าให้ $P_m(s)$ เป็นฟังชั่นเศษของทรานเฟอร์ฟังชั่นที่ต้องการออกแบบดังนั้น $P_m(s)$ ก็คือซีโร่ของทรานเฟอร์ฟังชั่นกำหนดให้

$$P_m(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \ldots + a_n \qquad \ldots\ldots\ldots(1.6\text{-}1)$$

ส.ป.ส. ของ $P_m(s)$ จะต้องเป็นค่าจริงบวกดังนั้นเราจะพบว่าถ้าหากว่า s เป็นค่าจริงแล้ว $P_m(s)$ จะต้องเป็นค่าจริงด้วยซึ่งเราเรียกฟังชั่นที่มีคุณสมบัติดังกล่าวว่า Positive Real Function $P_m(s)$ ใน (1.6-1) เป็นฟังชั่นของจำนวนจริง (real function) และถ้ามี ซีโร่อย่างน้อยหนึ่งค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน a+jb แล้วย่อมจะมีคู่คอนจูเกตของมันดังนั้นหากเกิดในกรณีเช่นนี้ขึ้นเราสามารถหาค่า ส.ป.ส.ตามข้อกำหนดของ positive real function ได้ว่า

$$P(s) = (s+\sigma+j\beta)(s+\sigma-j\beta) = (s+\sigma)^2 + \beta^2$$

or

$$P(s) = s^2 + 2s\sigma + (\sigma^2 + \beta^2) \qquad \ldots\ldots\ldots(1.6\text{-}2)$$

จากสมการที่ (1.6-2) ส.ป.ส.จะเป็นค่าจริงเมื่อ σ และ β เป็นค่าจริง สำหรับส.ป.ส.ตัวที่สองนั้น ถ้าจะให้เป็นบวกค่าของ σ เป็นบวกเท่านั้น ส่วนผลคูณของรากจำนวนเชิงซ้อนอื่น ๆ ที่ไม่เป็นค่าคอนจูเกตกัน เช่น (s+a+jb)(s+c+jd), $a \neq c$,$b \neq d$ จะไม่เป็นจำนวนจริงดังนั้นในกรณีเช่นนี้เราจะไม่ยอมให้เกิดขึ้นในฟังชั่นเศษของทรานเฟอร์ฟังชั่นที่เราต้องการออกแบบ ถ้าหากว่า Pm(s) เป็นโพลิโนเมียลคันดับสองแล้วจะได้ว่า

$$P(s)P(-s) = M^2(s) - N^2(s) \qquad \ldots\ldots\ldots(1.6\text{-}3)$$

เมื่อ

$$M(s) = s^2 + (\sigma^2 + \beta^2)$$

$$N(s) = 2s\sigma$$

จากสมการที่ (1.6-3) จะได้ว่า

$$P(s)P(-s) = s^4 + s^2(2\sigma^2 + 2\beta^2 - 4\sigma^2) + (\sigma^4 + 2\sigma^2\beta^2 + \beta^4) \qquad \ldots\ldots\ldots(1.6\text{-}4)$$

แทน s=jω จะได้ขนาดกำลังสอง

$$P(j\omega)P(-j\omega) = \omega^4 - \omega^2 2(\beta^2 - \sigma^2) + (\sigma^2 + \beta^2)^2 \qquad \ldots\ldots\ldots(1.6\text{-}5)$$

จาก (1.6-5) จะเป็นข้อกำหนดของ positive real function สมมติฟังชั่นที่เราต้องการออกแบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_2(s) = a_2 s^2 + a_1 s + a_0$$

$$P_2(s)P_2(-s) = \left(a_2 s^2 + a_0\right)^2 - \left(a_1 s\right)^2$$

$$P_2(j\omega)P_2(-j\omega) = a_4\omega^4 + a_2\omega^2 + a_0 \qquad \text{.....(1.6-6)}$$

จากสมการ (1.6-5) และ (1.6-6) จะได้ว่า

$$\frac{a_2}{a_4} = -2\left(\beta^2 - \sigma^2\right)$$

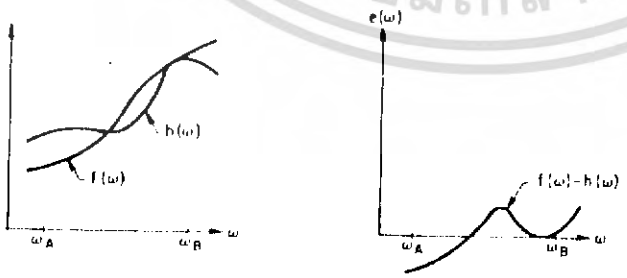
$$\frac{a_0}{a_4} = \left(\sigma^2 + \beta^2\right)^2 \qquad \text{.....(1.6-7)}$$

จาก (1.6-7) จะเห็นได้ว่า a_0/a_4 จะต้องมีค่าเป็นบวกเสมอดังนั้นในการออกแบบหากค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวเราจะต้องออกแบบใหม่ทั้งนี้เพราะว่าเราต้องการให้รากของฟังชั่นเศษ(ค่าซีโร่)ของทรานเฟอร์ฟังชั่นมีลักษณะเป็นควอดแรนต์สมมาตรซึ่งจะทำให้การเลื่อนเฟสของฟังชั่นเศษเป็นศูนย์ดังในรูปที่ 24

ส่วนฟังชั่นส่วนที่จะนำมาออกแบบเราได้ใช้ เจนเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียลซึ่งมีเฟสเป็นเชิงเส้นมากที่สุดและเมื่อนำมาออกแบบแล้วจะให้เฟสชิฟของสัญญาณเป็นศูนย์ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานเป็นผลให้วงจรสามารถแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดได้โดยไม่มีผลต่อเฟสหรือกรุ๊ปดีเลย์

1.7 ชนิดของการประมาณค่า (Type of approximation)

ในการหาอัตราส่วนของโพลิโนเมียลเพื่อสร้างทรานเฟอร์ฟังชั่นให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดและ/หรือเฟสตามที่ต้องการนั้นเราจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการประมาณค่าที่เหมาะสมตัวอย่างเราต้องการประมาณค่าฟังชั่น f(Ω) ด้วยฟังชั่น h(Ω) ในช่วง Ω_A ถึง Ω_B ความเป็นไปได้ในการที่จะประมาณนี้แสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 27



รูปที่ 27 แสดงการประมาณค่าฟังชั่น f(Ω) ด้วยฟังชั่น h(Ω) และค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

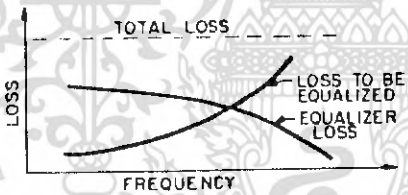
เราจะเห็นว่าการประมาณค่าที่ได้นั้นจะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นโดยที่เราไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ อย่างไรก็ตามเราจำเป็นที่จะต้องให้ $h(\Omega)$ มีค่าใกล้เคียงกับ $f(\Omega)$ มากที่สุดวิธีการหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการประมาณฟังชั่นดังกล่าวคือวิธีการของ กำลังสองน้อยที่สุด(Least Mean-Square) ดังสมการ

$$\varepsilon = \int_{wa}^{wb} \left[f(\omega) \quad h(\omega) \right]^2 d\omega \qquad \text{.....(1.7-1)}$$

ดังนั้นทางเดียวที่จะทำให้การประมาณค่าดีที่สุดคือจะต้องทำให้ค่า mean-square error มีค่าต่ำที่สุด

1.8 AMPLITUDE EQUALIZERS

บ่อยครั้งเรามีความต้องการรักษารูปร่างของสัญญาณที่ส่งออกไปยังเครื่องรับไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นดังนั้นในกรณีที่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเราจำเป็นที่ต้องสร้างวงจรในการชดเชยความผิดเพี้ยนดังกล่าวความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นก็คือความผิดเพี้ยนทางขนาด และ/ หรือ ทางเฟสดังในรูปที่ 28



รูปที่ 28 ลักษณะของการสูญเสียที่ต้องใช้วงจรชดเชยอัตราขยายมาช่วยแก้ปัญหา

ทางหนึ่งที่จะออกแบบวงจรอีกวิธีหนึ่งโดยการเลือก ส.ป.ส.การสูญเสีย (coefficients of the loss function) ดังสมการ

$$\left|H(j\omega)\right|^2 = \frac{a_0 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4 + \ldots}{b_0 + b_1\omega^2 + b_2\omega^4 + \ldots} \qquad \text{.....(1.8-1)}$$

ซึ่ง ส.ป.ส. ที่เราต้องการหาก็คือ a_0 ถึง a_n โดยใช้วิธี Least Square ดังกล่าวส่วน b_0 ถึง b_n เราจะใช้ G.B.P. ดังกล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 การออกแบบ

ในการประมาณคุณลักษณะทางขนาดตามที่ต้องการ โดยให้มีกรุ๊ฟดีเลย์ที่ราบเรียบที่สุดนั้น เราจะใช้หลักของ non minimum phase network มาใช้โดยการกำหนดให้ทรานสเฟอร์ฟังชั่นที่ต้องการประมาณเป็น

$$H_{(s)} = \frac{P_m(s)P_m(-s)}{D_n^2(s)} \qquad \text{.....(2-1)}$$

โดยที่ $P_m(s)$ เป็นโพลิโนเมียลของฟังก์ชั่นลำดับที่ m และ $D_n(s)$ เป็น เจนเนอร์ไรเบส เซลโพลิโนเมียลลำดับที่ n โดยที่ $m \le n$ จากสมการที่ (2-1) จะเห็นได้ว่าค่าซีโร่ (Zero) ของฟังก์ชั่นเสน เป็น กวอดเดรนสมมาตร ทำให้เฟสของฟังก์ชั่นแสนเป็นศูนย์ ส่วนฟังก์ชั่นส่วน ทำให้กรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุด (maximally flat group delay)

จากสมการที่ (2-1) เขียนให้อยู่ในรูปคุณลักษณะทางขนาดจะได้ว่า

$$|H(\omega)| = \left| \frac{P_m(s)P_m(-s)}{D_n(s)D_n(-s)} \right|_{s=j\omega} \qquad \text{.....(2-2)}$$

ในการหาค่า $|H(\omega)|$ ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่เราต้องการประมาณนั้นเราจะใช้หลักการของ Least mean square approximation ดังสมการข้างล่าง

$$E = \int_0^{\omega_0} \left\{ F_s(\omega) - |H(\omega)| \right\}^2 d\omega \qquad \text{.....(2-3)}$$

โดยที่ E คือ ค่า error ที่จะเกิดขึ้นจากการประมาณ

$F_s(\omega)$ คือ คุณลักษณะทางขนาดที่ต้องการจริง

$H(\omega)$ คือ คุณลักษณะทางขนาดที่ต้องการประมาณ

ในการพิจารณาหาค่าคุณลักษณะทางขนาดตามที่ต้องการนั้นในที่นี้เราจะใช้ $P_m(s)$ และ $D_n(s)$ เป็นโพลิโนเมียลดับดับที่สองซึ่งเราสามารถเขียนคุณลักษณะทางขนาดกำลังสองของ H(s) ได้ว่า

$$|H(\omega)| = \frac{a_4\omega^4 + a_2\omega^2 + a_0}{\omega^4 + b_2\omega^2 + b_0} \qquad \text{.....(2-4)}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ เราจะให้ $a_0 = b_0$ และ $D_n(s)$ เป็นโพลิโนเมียลลำดับที่สองของเจนเนอร์ไรเบสเซลโพลิโนเมียล (G.B.P.) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$D_2(s) = s^2 + (a+1) + \frac{(a+1)(a+2)}{4} \qquad \text{.....(2-5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a เป็นพารามิเตอร์ของ G.B.P.ซึ่งเป็นตัวปรับคุณลักษณะทางขนาดและทางเฟสของ G.B.P. ถ้าให้ a = 2 ก็จะกลายเป็น เบสเซลโพลิโนเมียลธรรมดาและรากของสมการ (2-5) คือ

$$S_{1,2} = \frac{-(a+1)}{2} \pm j\frac{\sqrt{a+1}}{2} \qquad \text{.....(2-6)}$$

จากสมการ (2-6) ค่า a จะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า-1 โดยจะต้องให้รากของสมการของในระนาบซ้ายมือ (L.H.P.) จาก (2-5) เขียนให้อยู่ในรูปคุณลักษณะทางขนาดกำลังสองได้ว่า

$$\left|D_2(\omega)\right|^2 = \omega^4 + \left\{(a+1)^2 - \frac{(a+1)(a+2)}{2}\right\}\omega^2 + \left\{\frac{(a+1)(a+2)}{4}\right\} \qquad \text{.....(2-7)}$$

โดยการแทนค่า สมการ (2-4) ลงใน (2-3) จะได้ว่า

$$E = \int_0^{\omega_0}\left\{F_s(\omega) - \frac{a_4\omega^4 + a_2\omega^2 + a_0}{\omega^4 + b_2\omega^2 + b_0}\right\}^2 d\omega \qquad \text{.....(2-8)}$$

จาก (2-7)

$$b_2 = (a+1)^2 - \frac{(a+1)(a+2)}{2}$$

$$b_0 = \left\{\frac{(a+1)(a+2)}{4}\right\}$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ เราจะทำการ normalize ให้ $\omega_0 = 1, a_0 = b_0$ โดยหลักการของ Least square เราสามารถหาค่า สัมประสิทธิ์ของ a_2 และ a_4 ได้จากสมการ

$$\frac{\partial E}{\partial a_4} = \frac{\partial E}{\partial a_2} = 0 \qquad \text{.....(2-9)}$$

จาก (2-9) จะได้ว่า

$$a_4A_2^8 + a_2A_2^6 = A_1^4 - a_0A_2^4 \qquad \text{.....(2-10)}$$

$$a_4A_2^6 + a_2A_2^4 = A_1^2 - a_0A_2^2 \qquad \text{.....(2-11)}$$

โดยที่

$$A_2^n = \int_0^1 \frac{\omega^n}{\left(\omega^4 + b_2\omega^2 + b_0\right)^2} d\omega$$

$$A_1^n = \int_0^1 \frac{F_s(\omega).\omega^n}{\left(\omega^4 + b_2\omega^2 + b_0\right)} d\omega \qquad \text{.....(2-12)}$$

จาก (2-12) หาค่าโดยวิธีการของ Romberg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (2-10) และ(2-11) ทำการแก้สมการด้วยวิธีการของเมตริกเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_4 กับ a_2 แต่ค่าสัมประสิทธิ์ a_4, a_2 มีข้อจำกัดตามคุณสมบัติของ Positive Real Function ดังสมการที่ (1.6-7) จะเห็นได้ว่า $\frac{a_0}{a_4}$ จะต้องเป็นบวกเท่านั้นซึ่งถ้าหากในการคำนวณหาค่า a_4 กับ a_2 นั้นหากสัมประสิทธิ์ a_4 ติดลบเราจะสมมติโพลิโนเมียลของเศษใหม่เป็น ลำดับที่หนึ่ง ซึ่งเขียนคุณลักษณะทางขนาดได้ว่า

$$P(s)P(-s)\big|_{s=j\omega} = a_2\omega^2 + a_0 \qquad \text{.....(2-13)}$$

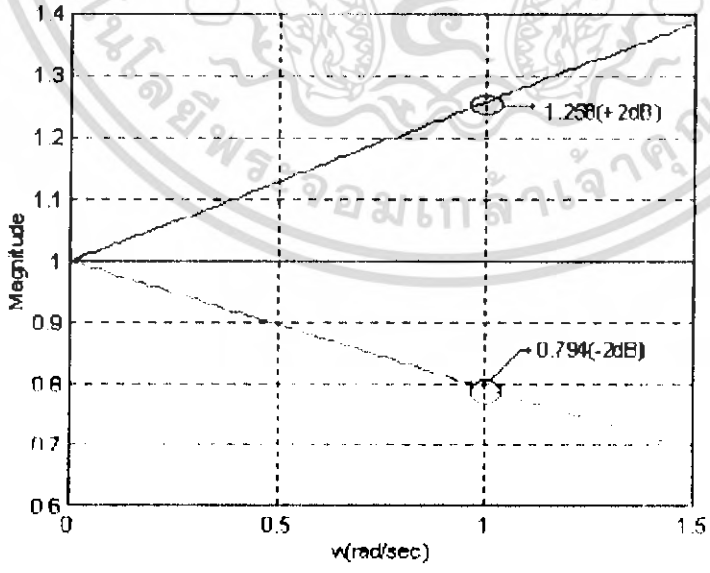
ฉะนั้นคุณลักษณะทางขนาดกำลังสองของ $|H(\omega)|$ เขียนใหม่เป็น ได้ว่า

$$|H(\omega)| = \frac{a_2\omega^2 + a_0}{\omega^2 + b_2\omega^2 + b_0} \qquad \text{.....(2-14)}$$

และสัมประสิทธิ์ a_2 หาได้จากสมการที่ (2-11) คือ

$$a_2 = \frac{A_1^2 - a_0 A_2^2}{A_2^4}; a_2 > 0 \qquad \text{.....(2-15)}$$

ในการออกแบบวงจรอิควอไลเซอร์เพื่อเพิ่มอัตราการขยาย ในย่านความถี่พาหะสี (Color Subbcarrier) ที่ 4.43 MHz นั้นเราจะประมาณคุณลักษณะทางขนาดที่ต้องการเป็นสมการเชิงเส้นได้ ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของวงจรที่ต้องการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 29 $\omega_0 = 1$ เป็นความถี่ normalize เราจะได้คุณลักษณะทางขนาดที่ต้องการเป็น +2dB และ -2dB ก็คือกราฟ เส้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ฉะนั้น คุณลักษณะทางขนาดจริงที่เรา ต้องการคือ

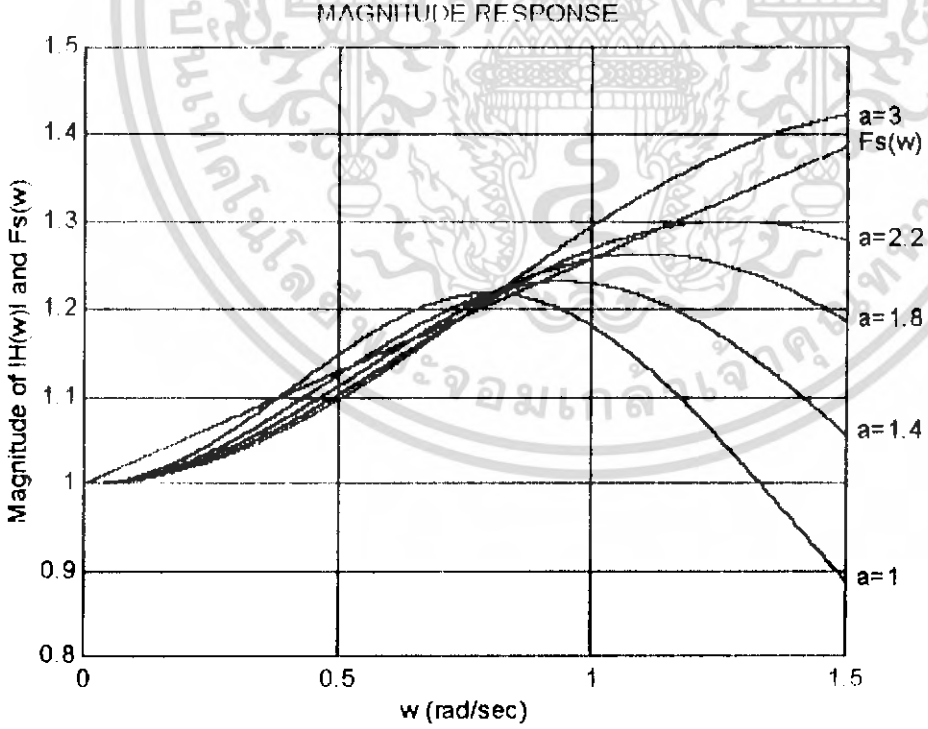
$$F_s(\omega) = 1 + 0.258\omega \qquad 0<\omega<1 \qquad \text{.....(2-16)}$$

สำหรับการเพิ่มอัตราขยาย +2dB และ

$$F_s(\omega) = 1 - 0.206\omega \qquad 0<\omega<1 \qquad \text{.....(2-17)}$$

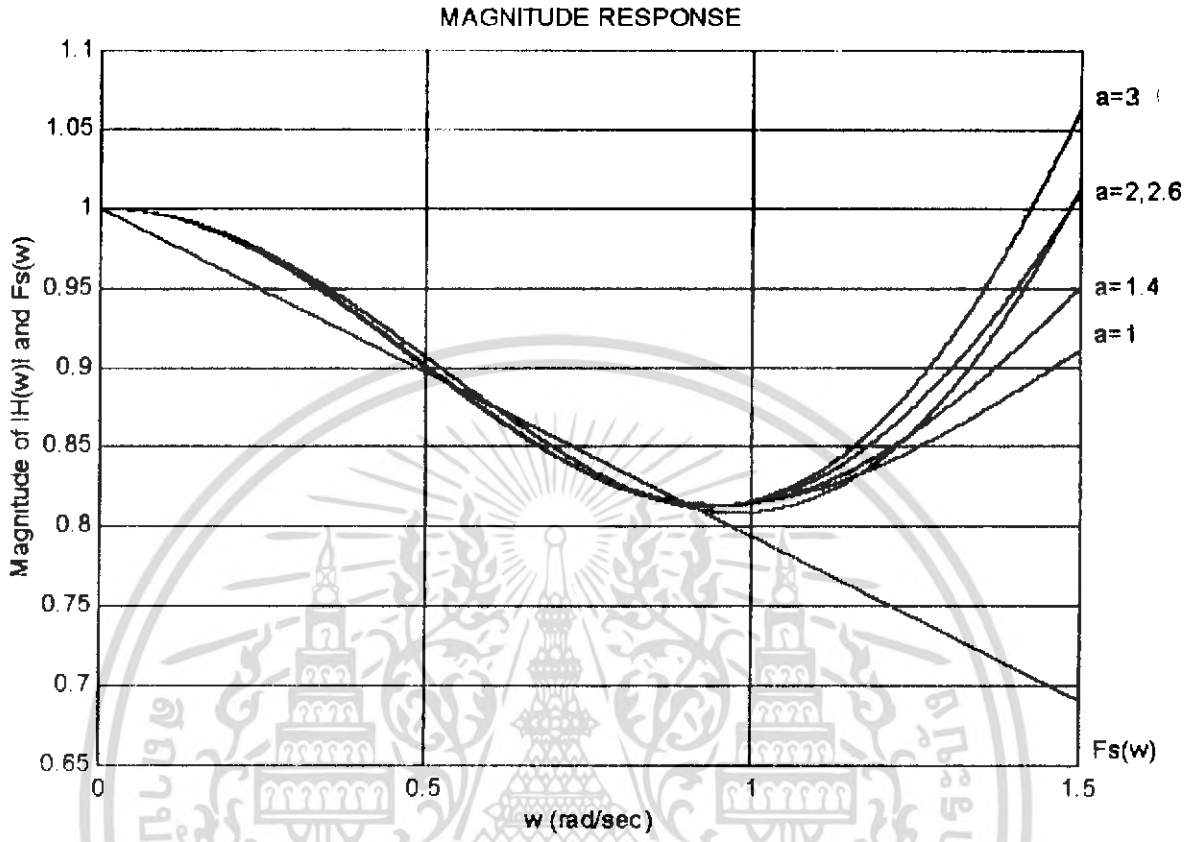
สำหรับการลดอัตราขยายของ -2dB

จากข้างต้น จะเห็นได้ว่า G.B.P.จะมีพารามิเตอร์ a เป็นตัวปรับคุณลักษณะทางขนาด และทางเฟส ดังนั้นในการคำนวณหาค่า a_1 และ a_2 นั้นเราจะทดลองเปลี่ยนค่า a ไปเรื่อย ๆ แล้วทำการอินทิเกรตสมการที่ (2-12) และแทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (2-10) และ (2-11) และจากการเปลี่ยนค่า a จาก 1 ถึง 3 เราจะได้คุณลักษณะที่ประมาณเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 30 และ 31



รูปที่ 30 แสดงค่าผลตอบสนองทางขนาดโดยการเพิ่มอัตราการขยาย +2dBที่ประมาณเป็นเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนค่า a ในช่วง 1 ถึง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 แสดงผลตอบสนองทางขนาดโดยการลดอัตราการขยาย -2dBที่ประมาณเป็นเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนค่า a ในช่วง 1 ถึง 3

จากรูปที่ 30 และ 31 เราจะเห็นว่าค่า a ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1.8-2 ดังนั้นในกรณีเพิ่มอัตราการขยายเราจะใช้ a = 1.8 และในกรณีลดอัตราขยายเราจะใช้ a = 2 และจากใช้วิธีการของ Romberg Integration ร่วมกับ Least-Mean Square ในการหาค่า ส.ป.ส. a_4 และ a_2 เราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a_4 กับ a_2 ได้ ฟังก์ชั่นที่ต้องการประมาณมีดังนี้

สำหรับการเพิ่มอัตราการขยาย ให้ a = 1.8 จากสมการ (2-12) เราจะหาค่า A_1'' กับ A_2'' ซึ่งจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A_1^{\ 1} = 2.5885*10^{-2}$

$A_1^{\ 2} = 4.41123*10^{-2}$

$A_2^{\ 8} = 1.16323*10^{-3}$

$A_2^{\ 6} = 1.5516*10^{-3}$

$A_2^{\ 4} = 2.3*10^{-3}$

$A_2^{\ 2} = 4.24168*10^{-3}$

ทำการแก้สมการโดยการแทนค่าต่าง ๆ ที่ได้ลงใน (2-10) และ (2-11) หาค่า a_4 และ a_2 ได้ว่า

$$a_4 = 0.86421, a_2 = 6.8357$$

a_0

เราจะเห็นว่า a_4 จะมีค่าเป็นลบซึ่งใช้ไม่ได้ดังนั้นเราจะต้องสมมติโพลิโนเมียลเศษใหม่ดังสมการ (2-15)

ซึ่งเราจะได้ $a_2 = 6.2526$

แทนค่าสัมประสิทธิ์ ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (2-14) จะได้ ฟังก์ชั่นที่ต้องการประมาณให้มีอัตราการขยาย +2dB คือ

$$H(\omega)_{+2dB} = \frac{6.2526\omega^2 + 7.08}{\omega^4 + 2.52\omega^2 + 7.08} \qquad \text{.....(2-18)}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการลดอัตราการขยาย ให้ a = 2 จะได้

$A_1^{\ 4} = 1.4293*10^{-2}$

$A_1^{\ 2} = 2.5456*10^{-2}$

$A_2^{\ 8} = 7.607*10^{-4}$

$A_2^{\ 6} = 1.0109*10^{-3}$

$A_2^{\ 4} = 1.49*10^{-3}$

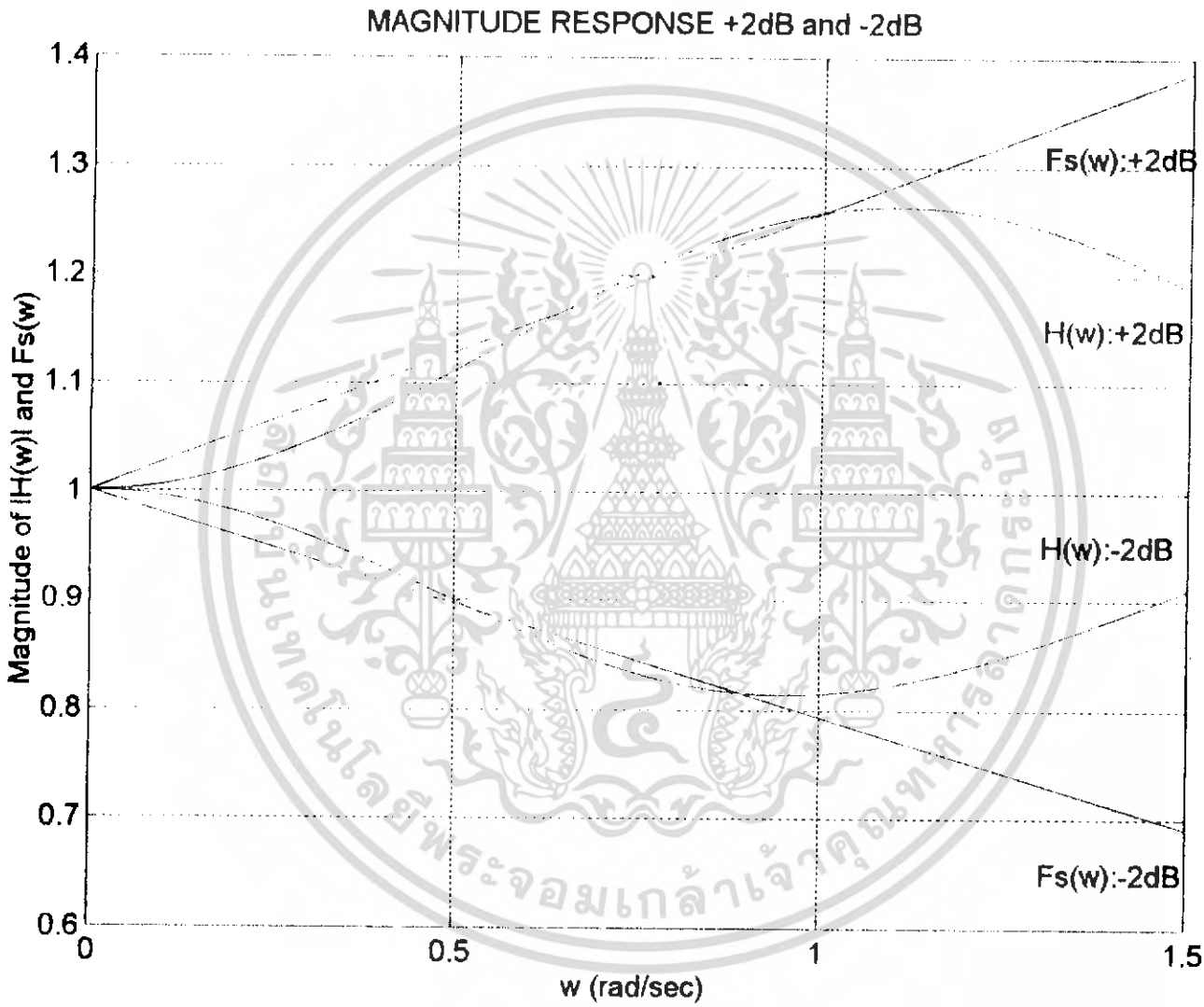
$A_2^{\ 2} = 2.72*10^{-3}$

จะได้ $a_4 = 2.978, a_2 = -1.366$ และเราจะได้ฟังชั่นที่ต้องการประมาณให้ลดอัตราการขยาย -2 dB

$$H(\omega)_{-2dB} = \frac{2.978\omega^4 - 1.366\omega^2 + 9}{\omega^4 + 3\omega^2 + 9} \qquad \text{.....(2-19)}$$

นำ (2-18) และ (2-19) มาพล็อทกราฟจะได้ดังรูป 32

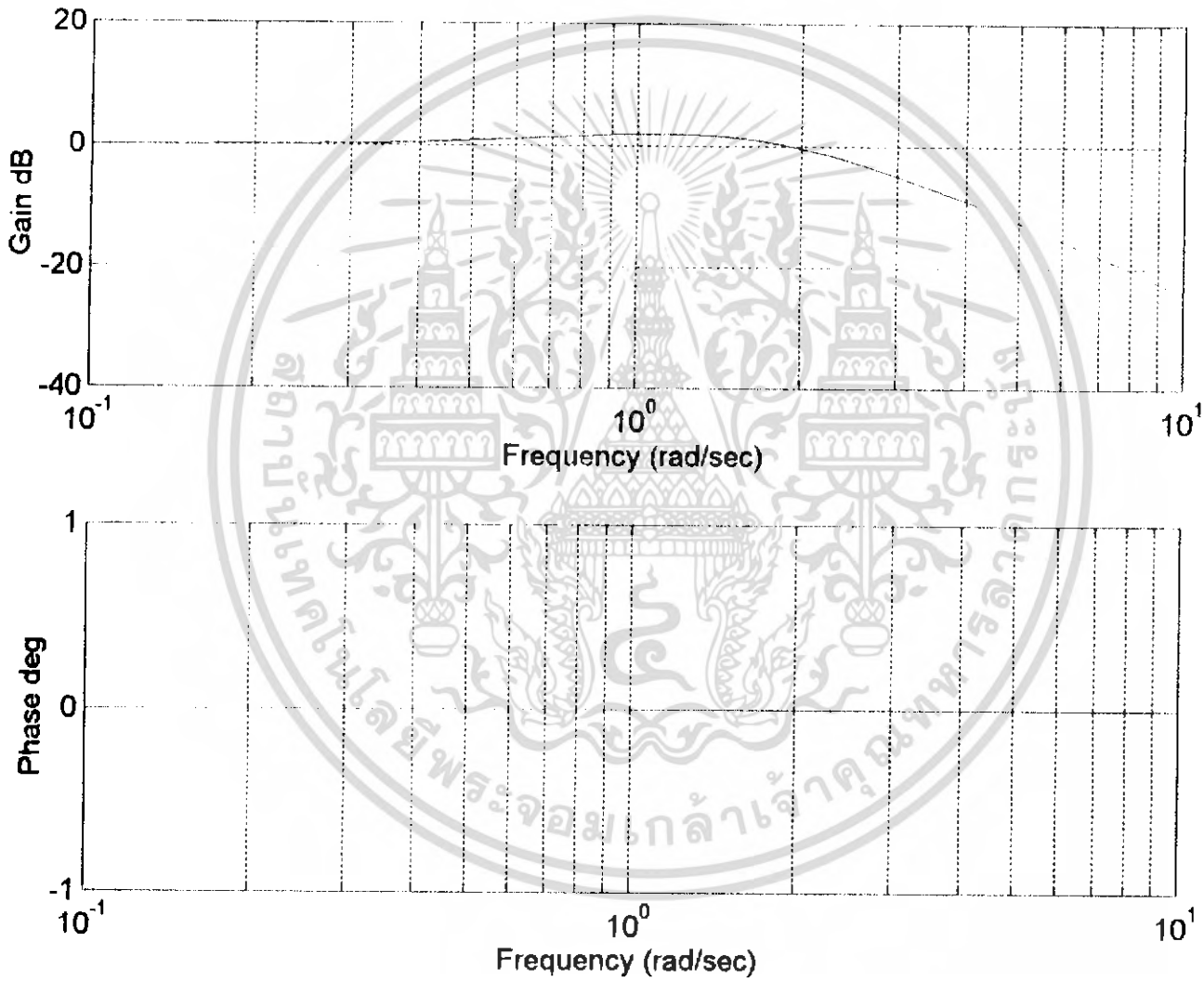
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 32 แสดงคุณลักษณะทางขนาดที่ต้องการชดเชยจริงและที่ประมาณขึ้น

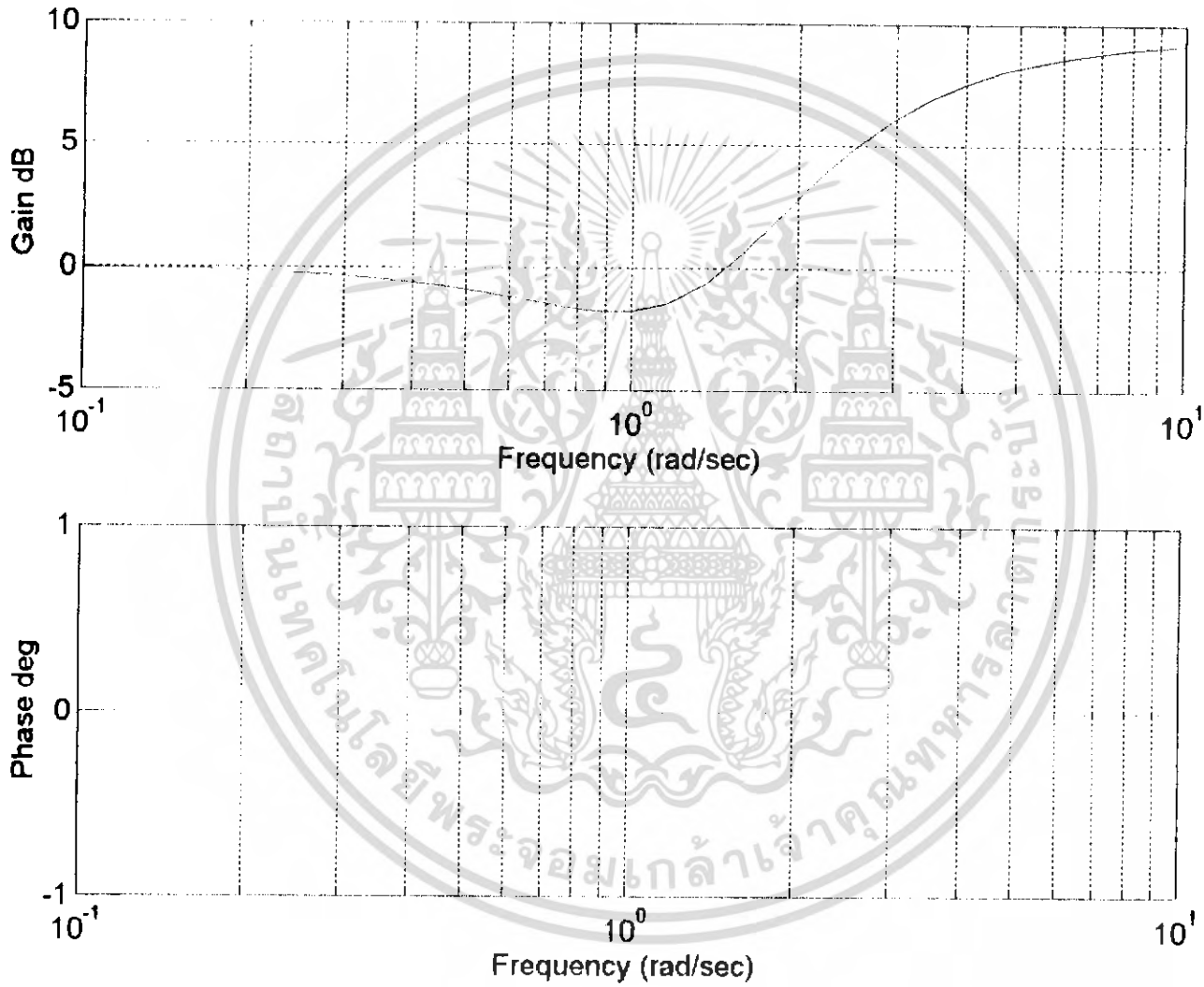
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปเราจะเห็นว่าค่าผิดพลาดจะอยู่ในช่วง 0-0.035 ซึ่งก็พอรับได้ และจาก (2-18) และ (2-19) คุณลักษณะทางขนาดในรูปของเคซิเบลแสดงดังรูป 33 และ รูปที่ 34 ตามลำดับ



รูปที่ 33 แสดงคุณลักษณะทางขนาดในแบบเคซิเบลและเฟสของสมการ (2-18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 34 แสดงคุณลักษณะทางขนาดในหน่วยเดซิเบลและเฟสของสมการ (2-19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 33 และรูปที่ 34 คุณลักษณะทางขนาดมีค่าใกล้เคียงกับบวกและลบ 2 dB ส่วนผลตอบสนองทางเฟสเป็นศูนย์นั่นคือเฟสของสัญญาณที่ อินพุทเทียบกับเอาท์พุทจะเหมือนกล่าวคือไม่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณซึ่งจะทำให้วงจรสามารถชดเชยอัตราขยายทางขนาดได้โดยไม่มีผลต่อเฟสหรือกรุ๊ฟดีเลย์

2.1 การสร้างวงจร

จาก (2-18) และ (2-19) เป็นคุณลักษณะทางขนาด ทำการแปลงให้อยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นในตัวแปร s เพื่อจะนำไปสร้างวงจรจะได้ว่า

จากสมการที่ (2-18) จะกลายเป็น

$$H(s)_{+2dB} = \frac{6.2526(s+1.065)^2(s-1.064)}{(s^2+2.8s+2.66)^2}$$

$$= 6.2526\frac{(s+1.064)^2}{(s^2+2.8s+2.66)^2}\bullet\frac{(s-1.064)}{(s+1.064)}$$

$$= 6.2526\frac{s^2+2.128s+1.1321}{s^2+2.8s+2.66}\bullet\frac{1}{s^2+2.8s+2.66}\bullet\frac{(s-1.064)}{(s+1.064)}$$

$$= H_1(s)\bullet H_2(s)\bullet H_3(s)$$

$$H_1(s) = \frac{s^2+2.128s+1.1321}{s^2+2.8s+2.66} \quad \text{.....(2.1-1)}$$

$$H_2(s) = \frac{1}{s^2+2.8s+2.66} \quad \text{.....(2.1-2)}$$

$$H_3(s) = \frac{s-1.064}{s+1.064} \quad \text{.....(2.1-3)}$$

$$H(s)_{-2dB} = \frac{2.978(s^2+1.9838s+1.738)(s^2-1.9838s+1.738)}{(s^2+3s+3)^2}$$

$$= 2.978\frac{(s^2+1.9838s+1.738)^2}{(s^2+3s+3)^2}\bullet\frac{(s^2-1.9838s+1.738)}{(s^2+1.9838s+1.738)}$$

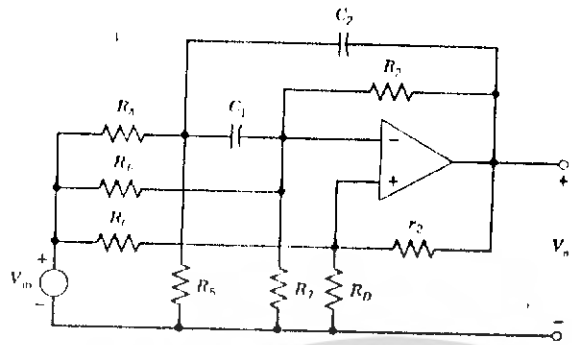
$$= H_{11}(s)\bullet H_{11}(s)\bullet H_{22}(s)$$

$$H_{11}(s) = \frac{s^2+1.9838s+1.738}{s^2+3s+3} \quad \text{.....(2.1-4)}$$

$$H_{22}(s) = \frac{s^2-1.9838s+1.738}{s^2+1.9838s+1.738} \quad \text{.....(2.1-5)}$$

สมการ (2.1-1),(2.1-4)และ(2.1-5) สามารถสร้างวงจรได้จากรูปวงจรมาตรฐาน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 Friend 's SAB circuit

จากรูปที่ 12 มีทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นคือ

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = K\frac{b_2 s^2 + b_1 s + b_o}{s^2 + a_1 s + a_o} \qquad \text{.....(2.1-6)}$$

กำหนดให้

$$C_1 = C_2 = 1F, \gamma = 0.1; \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right); 0 \le K_3 \le 1$$

ในการออกแบบเราจะกำหนดให้ จะได้

$$K_1 = \frac{R_5}{R_4 + R_5}, R = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \qquad \text{.....(2.1-7)}$$

$$K_2 = \frac{Rd}{Rc + Rd}, \gamma_1 = \frac{RcRd}{Rc + Rd} \qquad \text{.....(2.1-8)}$$

$$K_3 = \frac{R_7}{R_6 + R_7}, R_3 = \frac{R6R_7}{R_6 + R_7} \qquad \text{.....(2.1-9)}$$

จากการกำหนดข้างต้นเราจะได้ว่า

$$R_1 = \frac{2\gamma}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 8a_0\gamma}} \qquad \text{.....(2.1-10)}$$

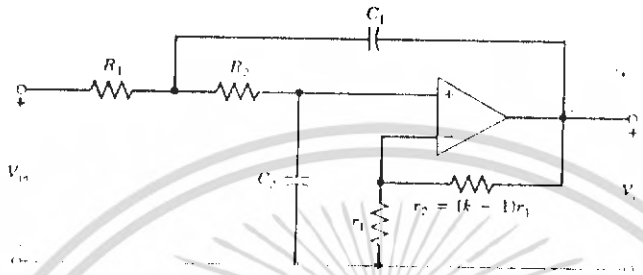
$$K_1 = \frac{b_2 + 2b_0R_1^2 - b_1R_1}{1 + \gamma} \qquad \text{.....(2.1-11)}$$

$$R_3 = \frac{(1+\gamma)(b_2 - K_3)}{R_1 a_0 (b_2/a_o - b_2)} \qquad \text{.....(2.1-12)}$$

$$R_2 = \frac{R_3}{R_1 R_3 a_0 + \gamma} \qquad \text{.....(2.1-13)}$$

สมการ (2.1-2) สร้างจาก Low pass filter Sallen and Key ดังรูปที่ 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 36 แสดงวงจรของ Salen and Key

จากรูปมีสมการที่นำมาออกแบบคือ

$$H(s) = \frac{K}{s^2 + as + b} \qquad \text{.....(2.1-14)}$$

โดยการกำหนดให้

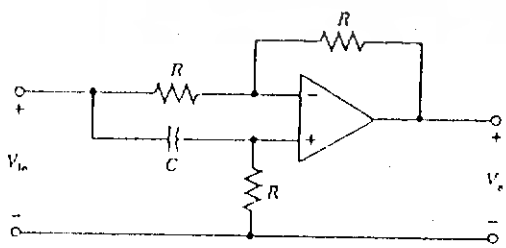
R1=R2=R , C1=C2=C

$$\frac{1}{RC} = \sqrt{b} \qquad \text{.....(2.1-15)}$$

$$k = 3 - \frac{a}{\sqrt{b}} \qquad \text{.....(2.1-16)}$$

$$Kr = 3b - a\sqrt{b} \qquad \text{.....(2.1-17)}$$

และจากสมการที่ (2.1-3) จะสร้างรูปวงจรมารตรฐานดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 แสดงวงจร First order allpass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสมการที่นำมาใช้ในการออกแบบคือ

$$H(s) = \frac{s}{s+a} \quad \text{.....(2.1-17)}$$

$$a = \frac{1}{RC} \quad \text{.....(2.1-18)}$$

โดยอาศัยรูปที่ 35 และสมการที่ (2.1-6) ถึง (2.1-13) นำไปออกแบบวงจรในสมการที่ (2.1-1), (2.1-4) และ (2.1-5)จะได้ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (2.1-1) ต้องดัดแปลงทรานเฟอร์ฟังชั่นใหม่ดังนี้

$$H_1(s) = 2\frac{0.5s^2 + 1.064s + 0.566}{s^2 + 2.8s + 2.66}$$

$$K = 2, b_2 = 0.5, b_1 = 1.064, b_0 = 0.566, a_1 = 2.8, a_0 = 2.6$$

หาค่าต่างๆ ตามสมการจะได้

$$R_1 = \frac{2(0.1)}{-2.8 + \sqrt{(-2.8)^2 + 8 \bullet 2.66 \bullet 0.1}} = 0.56\Omega$$

$$K_1 = \frac{1 + 2(1.738)(0.53)^2 - (1.9838)(0.53)}{1 + 0.1} = 0.841$$

ให้ K3 = 1

$$R_3 = \frac{(1+0.1)(0.5-1)}{(0.56)(2.66)\left(\frac{0.566}{2.66} - 0.5\right)} = \frac{0.55}{0.427} = 1.2855\Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{0.56 \bullet 2.66 + \frac{0.1}{1.2855}} = 0.638\Omega$$

$$R_4 = \frac{0.56}{0.2356} = 2.377\Omega$$

$$R_5 = \frac{0.56}{0.7644} = 0.7326\Omega$$

$$R_6 = 1.2855\Omega$$

$$R_7 = \infty$$

$$b_2 = K_2 = 0.5$$

$$R_c = R_d = \frac{r_1}{K_2} = 2r_1$$

$$r_1 = 1K\Omega, r_2 = 10K\Omega$$

$$\therefore R_c = R_d = 2K\Omega$$

โดยปกติดัดราขยายที่ต้องการคือ 1 แต่ ทรานเฟอร์ฟังชั่นที่เราทำการออกแบบไว้มีอัตราขยายเป็น 2 ดังนั้นเราต้องเพิ่มอัตราขยายให้กับวงจร โดยใช้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1+\frac{R_a}{R_b}=2$$

$$\therefore R_a = R_b = 1K\Omega$$

และโดยการคำนวณในทำนองเดียวกันสมการที่ (2.1-4)และ(2.15) เราจะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

ในสมการที่ (2.1-4)

$R_1 = 0.53\Omega$

$R2 = 0.6057\Omega$

$R_3 = 1.6446\Omega$

$R_4 = 1.262\Omega$

$R_5 = 0.9138\Omega$

$R_6 = R_3$

$R_7 = \infty$

$r_1 = 1K\Omega$

$r_2 = 10K\Omega$

$R_c = R_d = 2K\Omega$

$R_a = R_b = 1K\Omega$

และจากสมการ (2.1-5) จะได้ค่าต่างๆ ดังนี้

$R_1 = 0.617\Omega$

$R_2 = 0.932\Omega$

$R_3 = \infty$

$R_4 = R_1$

$R_5 = \infty$

$r_1 = 1K\Omega$

$r_2 = 10K\Omega$

$R_c = 3.225K\Omega$

$R_d = 1.449K\Omega$

$R_a = 8.6075K\Omega$

$R_b = 1K\Omega$

จากสมการ (2.1-2) ทำการคำนวนหาค่าต่าง ๆ ได้ว่า

$C_1 = C_2 = 1F$

$R_1 = R_2 = 0.613\Omega$

$k = 1.2832$

$r_1 = 1K\Omega$

$r_2 = 283.2\Omega$

$K_r = 3.4133$

$K_d = 1$

จะเห็นว่าอัตราการขยายของวงจรที่เราคอนเวิร์ทมีอัตราขยายเป็น 3.4133 แต่อัตราขยายที่เรา ต้องการคือ 1 ดังนั้นเราจะทำการลดทอนอัตราขยายด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_2' = \frac{R_1}{k_1}, R_3' = \frac{R1}{1-k_1}; \rightarrow k_1 = \frac{1}{3.4133}$$

เมื่อทำการสเกลลิ่งค่าต่างๆ แล้วจึงเอามาแทนในสมการเพื่อหาค่า R2 และ R3 และจากสมการที่ (2.1-3) คำนวณหาค่าต่างๆดังนี้

$$R = 0.94\Omega$$

$$C = 1F$$

จากการคำนวณที่ผ่านมาแรกทำการสเกลลิ่งค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์จากสมการข้างล่าง

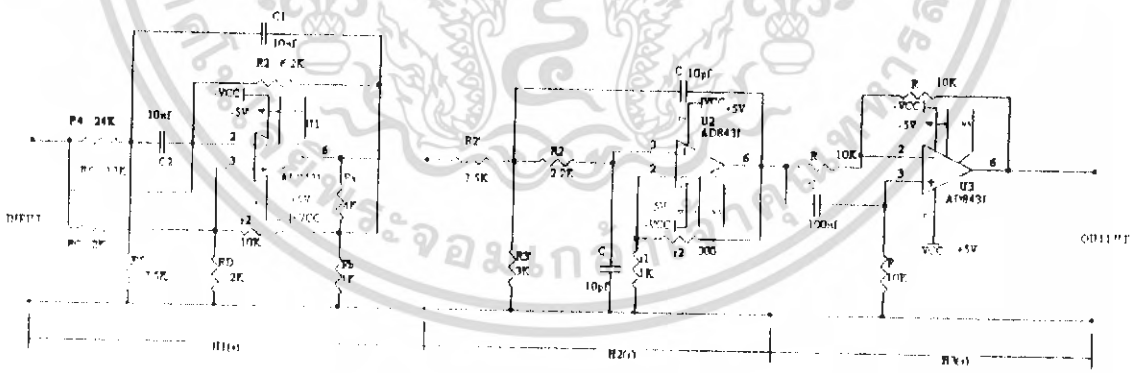
$$R_{new} = k_m R_{old} \quad \text{.....(2.1 - 19)}$$

$$C_{new} = \frac{C_{old}}{k_m k_f} \quad \text{.....(2.1 - 20)}$$

$$k_m = magnitudescalling = 10^4$$

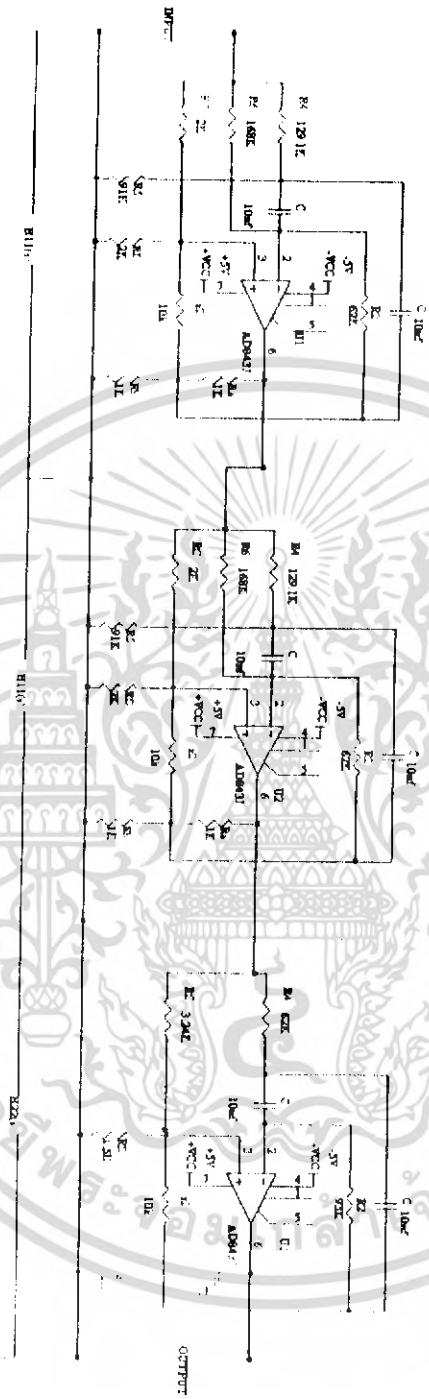
$$k_f = frequencyscalling = 10^8$$

เราจะได้ค่าความต้านทานและคาปาซิเตอร์ค่าใหม่และสุดท้ายเราจะได้วงจรชดเชยอัตราขยายทางขนาดทั้งเพิ่มอัตราขยาย +2 เดซิเบล และ ลดอัตราขยาย -2 เดซิเบล ดังในรูปที่ 38 และรูปที่ 39 ตามลำดับ



รูปที่ 38 แสดงวงจรชดเชยอัตราขยาย +2 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



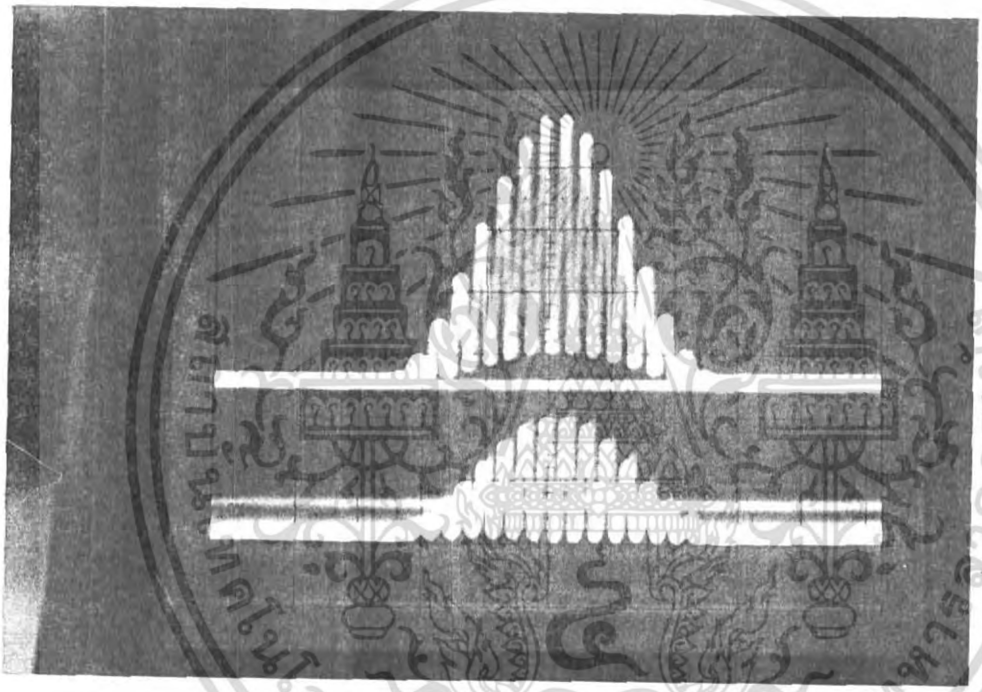
รูปที่ 39 แสดงวงจรชดเชยอัตราขยาย -2 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลการทดลอง

วงจรอิควอไลเซอร์ที่ออกแบบเป็นวงจรแอ็คทีฟ RC โดยใช้ ออปแอมป์ เบอร์ AD843 ซึ่งมีแบนวิดท์ 34 MHZ ซึ่งสามารถนำมาใช้สัญญาณทดสอบของเราได้ จากรูปที่ 38 ที่ได้จากการออกแบบคือวงจรชดเชยอัตราขยายขนาด +2 เดซิเบล โดยการป้อนสัญญาณทดสอบ พัลซ์มอดูเล็ต 20T ที่มีความผิดเพี้ยนไป -2 เดซิเบล (อัตราการขยายถูกลดทอน) เมื่อผ่านวงจรอิควอไลเซอร์ที่มีการชดเชยอัตราขยาย +2 เดซิเบลแล้วเราจะเห็นว่าสามารถแก้ความผิดเพี้ยนได้ดังในรูปที่ 40



← อินพุท
0.2v/div
1us/div
←เอาท์พุท
0.5v/div
1us/div

รูปที่ 40 แสดงรูปร่างของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรในรูปที่ 38

สูตรหาขนาดของสัญญาณสีอินพุทที่ผิดเพี้ยนจะหาได้ดังสมการ

$$A = \frac{1-\frac{Y}{Ym}}{1+\frac{Y}{Ym}} \quad \ldots\ldots(3-1)$$

$$A_{dB} = 20\log A = 20\log\left[\frac{1-\frac{Y}{Ym}}{1+\frac{Y}{Ym}}\right] \quad \ldots\ldots(3-2)$$

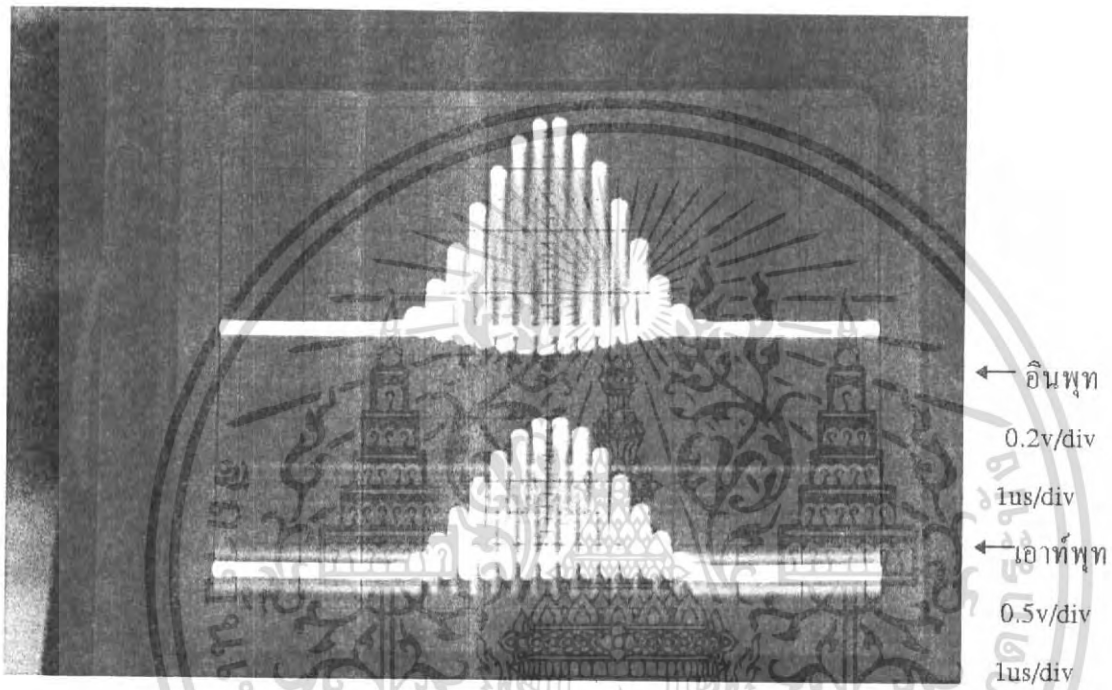
จากรูปที่ 40 เราประมาณ $Y = 2.5$,$Y_m = 21$ แทนค่าลงใน (3-1) ,(3-2)จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1-\frac{2.5}{21}}{1+\frac{2.5}{21}} = 0.78723$$

$$A_{dB} = 20\log A = 20\log(0.78723) \cong -2.07dB$$

และจากวงจรในรูปที่ 39 ซึ่งเป็นวงจรชดเชยอัตราขยาย -2 เดซิเบล โดยการป้อนสัญญาณทดสอบที่มีความผิดเพี้ยนทางอัตราขยาย +2 เดซิเบล (ถูกเพิ่มอัตราขยาย) เมื่อผ่านวงจรอิควอไลเซอร์ที่ได้ออกแบบไว้วงจรจะสามารถแก้ความผิดเพี้ยนได้ดังในรูปที่ 41



รูปที่ 41 แสดงรูปร่างของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรในรูปที่ 39

สูตรหาขนาดของสัญญาณสีอินพุทที่ผิดเพี้ยนจะหาได้ดังสมการ

$$A = \frac{1+\frac{Y}{Ym}}{1-\frac{Y}{Ym}} \quad \text{.....(3-3)}$$

$$A_{dB} = 20\log A = 20\log\left[\frac{1+\frac{Y}{Ym}}{1-\frac{Y}{Ym}}\right] \quad \text{.....(3-4)}$$

จากรูปที่ 41 เราประมาณ $Y = 2$,$Y_m = 18$ แทนค่าลงใน (3-3) ,(3-4)จะได้

$$A = \frac{1+\frac{2}{18}}{1-\frac{2}{18}} = 1.25$$

$$A_{dB} = 20\log A = 20\log(1.25) \cong 1.938dB$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นว่าวงจรที่ได้ออกแบบไว้สามารถแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสีได้ค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทวิจารณ์และสรุป

จากผลการทดลอง โดยการป้อนสัญญาณทดสอบพัลส์มอดูเล็ตซายน์กำลังสอง เข้าวงจรอิควอไลเซอร์ที่ได้ออกแบบไว้โดยการใช้เทคนิคของ non-minimum phase network ซึ่งวิธีการดังกล่าวการเลื่อนเฟส (Phase shift) ของทรานส์เฟอร์ฟังชั่นของเศษ (Numerator) เป็นศูนย์ส่วนทรานเฟอร์ฟังชั่นของส่วน(Denominator)ในปริญญานิพนธ์นี้เราได้ใช้เจนเนอร์ไรเบสเซลโพลลิไนเมียลซึ่งมีเฟสเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ทำให้วงจรที่ได้ออกแบบไว้มีผลต่อเฟสของสัญญาณสีน้อยที่สุด และวงจรที่ได้ทำการออกแบบไว้นั้นสามารถขยายของสัญญาณสีได้ ในการออกแบบดังกล่าวได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ a ของ [illegible] ปรับค่าคุณลักษณะทางขนาดและเฟสของวงจรโดยการเปลี่ยนเปลี่ยนค่า a จาก 1 ถึง 3 ทั้งสองวงจรเราจะได้ค่า a ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.8 ถึง 2 จากการทดลองปรับให้สัญญาณผิดเพี้ยนไป + 2 เดซิเบลและ -2 เดซิเบล โดยการใช้สูตรในสมการที่ (3-2) และ (3-4) โดยการปรับให้มีขนาดผิดเพี้ยนให้ได้ใกล้เคียงที่สุด จากนั้นป้อนสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรอิควอไลเซอร์ จะสามารถแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสีได้และด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้นเราสามารถสร้างวงจรอิควอไลเซอร์ได้ตั้งแต่ -3dB~+3dB ได้ตามต้องการ

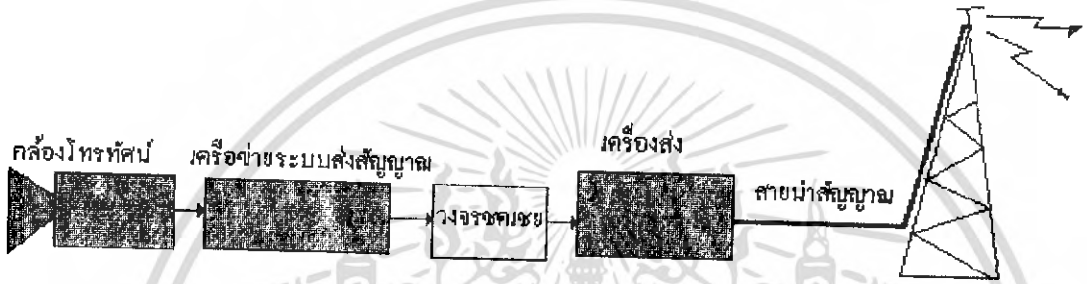
ปัญหาในการทดลองที่พบเกี่ยวเฟสของสัญญาณเสียไปเราต้องมีการปรับแต่งวงจรตามคุณสมบัติของเทคนิค non-minimum phase ดังกล่าวในทฤษฎี เพื่อให้ได้รูปร่างสัญญาณดีที่สุดเท่าที่จะทำได้

วิธีในการที่จะแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสีนี้มีหลายวิธีด้วยกันแต่หากมีผู้ใดต้องการที่จะพัฒนาโดยการใช้วิธีการในปริญญานิพนธ์นี้ก็ทำได้อาจโดยการเพิ่ม อันดับของโพลลิไนเมียลให้มากขึ้น หรืออาจจะใช้ฟังชั่นทางคณิตศาสตร์ตัวอื่นที่คิดว่าให้คุณสมบัติที่ดีกว่านี้มาแทนฟังชั่นทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ก็ย่อมทำได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์นำไปใช้งาน

ก่อนที่จะทำการส่งสัญญาณภาพออกไปทางเครื่องรับนั้นสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องโทรทัศน์จะต้องผ่านกระบวนการแปลงจากสัญญาณภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าจากนั้น จะผ่านวงจรต่างๆอีกมากมายดังนั้นก่อนที่สัญญาณภาพจะเดินทางไปถึงเครื่องส่งอาจจะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณสีได้โดยขนาดและ/หรือเฟสของสัญญาณอาจเปลี่ยนไป ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้เราได้ทำการสร้างวงจรแก้ไขความบกพร่องของสัญญาณสีหรือสัญญาณโครมิแนนซ์ที่ขนาดผิดเพี้ยนไป ซึ่งวงจรที่เราได้ทำการออกแบบไว้นั้นเราจะนำมาแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณสีให้กลับเป็นปกติก่อนที่จะส่งออกอากาศไปนั่นเอง ดังแสดงการนำไปใช้งานด้วยบล็อกไดอะแกรมข้างล่าง



รูปที่ 40 แสดงการนำวงจรชดเชยอัตราขยายไปใช้งาน

จากรูปที่ 40 เราจะเห็นว่าเราจะนำวงจรชดเชยอัตราขยายทางขนาดมาแก้ไขสัญญาณสีก่อนที่จะทำการส่งเข้าเครื่องส่งและส่งออกอากาศต่อไปซึ่งจะทำให้คุณภาพของสัญญาณทางเครื่องรับนั้นดีกว่าการที่ไม่ได้แก้ไขก่อนส่งไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Siocos,C.A.,"Chrominance to Luminance ratio and Timing Measurements in Color Television"IEEE Trans on Broadcasting,vol. BC-14,NO.1 1-4,1968
2. กนก เจนจิระพงศ์เวช ,การตรวจสอบสัญญาณวีดีโอ ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,หน้าที่ 1-40
3. Harry YF.Lam,Analog and Digital Filters Design and Realization, 1979 P.1-10,P377-380
4. M.E. Van Valkenburg, Analog Filter design 1982 P. 85-117, P.279-295,P.523-547
5. Kendall L. Su,Analog filters ,CHAPMAN & HALL 1996 ,P.64-72
6. G.S. Moschytz and P.Horn,Active Filter Design Handbook,JOHN WILEY & SONS,P.108-111
7. Richard W. Daniels, Ph.D.,Approximation Methods for Electronic filter Design,Bell Telephone Laboratories,inc.,P.5-6
8. Francis Scheid,numerical Analysis, Mc Graw Hill Schaum'outline Series, 126-127 1986
9. Krail,H,L and O.Frink. "A New class of Orthogonal Polynomials ."Trans Am Math. Soc.,65,100-115 1949
10. Wai-Kai Chen ,Passive and Active Filters Theory and implementations,Joh n Wiley & Sons.,P.194-239,P.274-319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
โปรแกรมคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคำนวณ

ROMBERG.PAS

```
program Romberg;

{-------------------------------------------------------------------------}
{-                                                                       -}
{-    Turbo Pascal Numerical Methods Toolbox                             -}
{-    (C) Copyright 1986 Borland International.                          -}
{-                                                                       -}
{-         Purpose: This program demonstrates integration with the       -}
{-                  Romberg algorithm.                                   -}
{-                                                                       -}
{-  Include Files:  COMMON.INC          procedure DisplayWarning         -}
{-                                      procedure DisplayError           -}
{-                                      procedure IOCheck                -}
{-                                      procedure GetOutputFile          -}
{-                  Romberg.INC         procedure Romberg                -}
{-                                                                       -}
{-   Version Date: 26 January 1987                                       -}
{-                                                                       -}
{-------------------------------------------------------------------------}

{$R+}     { Enable range checking }

const
  TNArraySize = 50;              { Size of the vectors }
  IOerr:boolean = false;         { Global variable IOerr }
                                 { Flags an I/O error    }

type
  TNvector = array[0..TNArraySize] of real;

var
  LowerLimit, UpperLimit : real;    { Limits of integration }
  Tolerance : real;                 { Tolerance in the answer }
  MaxIter : integer;                { Maximum number of iterations }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  Integral : real;                { Value of the integral }
  Iter : integer;                 { Number of iterations to find answer }
  Error : byte;                   { Flags if something went wrong }
  OutFile : text;                 { Output file }

function TNTargetF(X : real) : real;

{-------------------------------------------------}
{-      This is the function to integrate        -}
{-------------------------------------------------}

begin
 TNTargetF := (x*x)/((x*x*x*x+55*x*x+1089)*(x*x*x*x+55*x*x+1089));
end; { function TNTargetF }

{$I ROMBERG.INC}      { Load procedure Romberg }

{$I COMMON.INC}       { Load procedure IOCheck }
                      { Load procedure GetOutputFile }

procedure Initialize(var LowerLimit : real;
                     var UpperLimit : real;
                     var Integral   : real;
                     var Tolerance  : real;
                     var MaxIter    : integer;
                     var Iter       : integer;
                     var Error      : byte);

{-------------------------------------------------}
{- Output: LowerLimit, UpperLimit, Integral,     -}
{-         Tolerance, MaxIter, Iter, Error       -}
{-                                               -}
{- This procedure initializes the above variables to zero -}
{-------------------------------------------------}

begin
  LowerLimit := 0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  UpperLimit := 0;
  Integral := 0;
  Tolerance := 0;
  MaxIter := 0;
  Iter := 0;
  Error := 0;
end; { procedure Initialize }

procedure GetData(var LowerLimit : real;
                  var UpperLimit : real;
                  var Tolerance  : real;
                  var MaxIter    : integer);

{-------------------------------------------------------}
{- Output: LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter  -}
{-                                                     -}
{- This procedure assigns values to the above variables -}
{- from keyboard input                                 -}
{-------------------------------------------------------}

procedure GetLimits(var LowerLimit : real;
                    var UpperLimit : real);

{-------------------------------------------------------}
{- Output: LowerLimit, UpperLimit                      -}
{-                                                     -}
{- This procedure assigns values to the limits of      -}
{- integration from keyboard input                     -}
{-------------------------------------------------------}

begin
  repeat
    repeat
      Write('Lower limit of integration? ');
      ReadIn(LowerLimit);
      IOCheck;
    until not IOerr;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Writeln;
    repeat
      Write('Upper limit of integration? ');
      Readln(UpperLimit);
      IOCheck;
    until not IOerr;
    if LowerLimit = UpperLimit then
    begin
      Writeln;
      Writeln('      The limits of integration must be different.');
      Writeln;
    end;
  until LowerLimit <> UpperLimit;
end; { procedure GetLimits }

procedure GetTolerance(var Tolerance : real);

{-------------------------------------------}
{- Output: Tolerance                       -}
{-                                         -}
{- This procedure reads in the accepted Tolerance -}
{- from the keyboard.                      -}
{-------------------------------------------}

begin
  Writeln;
  repeat
    Tolerance := 1E-8;
    Write('Tolerance (> 0, default = ', Tolerance : 9, ') ');
    Readln(Tolerance);
    IOCheck;
    if Tolerance <= 0 then
    begin
      IOerr := true;
      Tolerance := 1E-8;
    end;
  until not IOerr;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  end; { procedure GetTolerance }

  procedure GetMaxIter(var MaxIter : integer);

  {-----------------------------------------------}
  {- Output: MaxIter                             -}
  {-                                             -}
  {- This procedure reads in the accepted MaxIter -}
  {- from the keyboard.                          -}
  {-----------------------------------------------}

  begin
    WriteLn;
    repeat
      MaxIter := 100;
      Write('Maximum number of iterations: (> 0, default = ', MaxIter, ') ');
      ReadLn(MaxIter);
      IOCheck;
      if MaxIter <= 0 then
      begin
        IOerr := true;
        MaxIter := 1000;
      end;
    until not IOerr;
  end; { procedure GetMaxIter }

  begin { procedure GetData }
    GetLimits(LowerLimit, UpperLimit);
    GetTolerance(Tolerance);
    GetMaxIter(MaxIter);
    GetOutputFile(OutFile);
  end; { procedure GetData }

  procedure Results(LowerLimit : real;
                    UpperLimit : real;
                    Tolerance  : real;
                    MaxIter    : integer;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                Integral   : real;
                Iter       : integer;
                Error      : byte);

{-------------------------------------------------------}
{- This procedure outputs the results to the device OutFile -}
{-------------------------------------------------------}

begin
  Writeln(OutFile, 'Lower Limit:' : 30, LowerLimit : 25);
  Writeln(OutFile, 'Upper Limit:' : 30, UpperLimit : 25);
  Writeln(OutFile, 'Tolerance:' : 30, Tolerance : 25);
  Writeln(OutFile, 'Maximum number of iterations:' : 30, MaxIter : 5);
  Writeln(OutFile, 'Number of iterations:' : 30, Iter : 5);
  Writeln(OutFile);
  if Error = 3 then
    DisplayWarning;
  if Error in [1..2] then
    DisplayError;

  case Error of
    0 : Writeln(OutFile, 'Integral:' : 25, Integral);

    1 : Writeln(OutFile, 'The tolerance must be greater than zero.');

    2 : Writeln(OutFile,
              'The maximum number of iterations must be greater than zero.');
    3 : begin
          Writeln(OutFile, 'Tolerance not reached in ', Iter, ' iterations.');
          Writeln(OutFile, 'The last iterate of the integral is:', Integral);
        end;
  end; { case }
end; { procedure Results }

begin { program Romberg }
  Initialize(LowerLimit, UpperLimit, Integral, Tolerance,
             MaxIter, Iter, Error);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  GetData(LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter);
  Romberg(LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter, Integral, Iter, Error);
  Results(LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter, Integral, Iter, Error);
  Close(OutFile);
end. { program Romberg }
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROMBERG.INC

```
procedure Romberg(LowerLimit : real;
                  UpperLimit : real;
                  Tolerance  : real;
                  MaxIter    : integer;
                var Integral : real;
                var Iter     : integer;
                var Error    : byte);

{------------------------------------------------------------------------}
{-                                                                      -}
{-    Turbo Pascal Numerical Methods Toolbox                            -}
{-    (C) Copyright 1986 Borland International.                         -}
{-                                                                      -}
{-   Input: LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter                  -}
{-  Output: Integral, Iter, Error                                       -}
{-                                                                      -}
{- Purpose: Given a function, TNTargetF(X), this procedure approximates -}
{-          the integral of TNTargetF from LowerLimit to UpperLimit     -}
{-          using the Romberg method.                                   -}
{-                                                                      -}
{- User-defined Functions: TNTargetF(X : real) : real;                  -}
{-                                                                      -}
{-   Global Variables:  LowerLimit : real;   Lower limit of integration -}
{-                      UpperLimit : real;   Upper limit of integration -}
{-                      Tolerance  : real;   Tolerance in answer        -}
{-                      MaxIter    : integer; Maximum number of iterations -}
{-                      Integral   : real;   Value of the integral of   -}
{-                                           TNTargetF over the given   -}
{-                                           interval                   -}
{-                      Iter       : integer; Number of iterations      -}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{-                  Error      : byte;    Flags if something goes      -}
{-                                        wrong                        -}
{-                                                                     -}
{-            Errors:  0: No errors                                    -}
{-                     1: Tolerance <= 0                               -}
{-                     2: MaxIter <= 0                                 -}
{-                     3: Iter > MaxIter                               -}
{-                                                                     -}
{-        Version Date:  26 January 1987                               -}
{-                                                                     -}
{---------------------------------------------------------------------}

{$R+}     { Enable range checking }

var
  Spacing : real;                { Spacing between points }
  NewEstimate,
  OldEstimate : TNvector;        { Iteration variables }
  TwoToTheIterMinus2 : integer;

procedure TestAndInitialize(LowerLimit        : real;
                            UpperLimit        : real;
                            Tolerance         : real;
                            MaxIter           : integer;
                        var Iter              : integer;
                        var Spacing           : real;
                        var OldEstimate       : TNvector;
                        var TwoToTheIterMinus2 : integer;
                        var Error             : byte);

{---------------------------------------------------------------------}
{- Input: LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter                 -}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{- Output: Iter, Spacing, OldEstimate, TwoToTheIterMinus2, Error  -}
{-                                                                -}
{- This procedure tests Tolerance and MaxIter for errors (they    -}
{- must be greater than zero) and initializes the above           -}
{- variables.                                                     -}
{-----------------------------------------------------------------}

begin
  Error := 0;
  if Tolerance <= 0 then
    Error := 1;
  if MaxIter <= 0 then
    Error := 2;
  if Error = 0 then
  begin
    Spacing := UpperLimit - LowerLimit;
    OldEstimate[1] := Spacing *
                      (TNTargetF(LowerLimit) + TNTargetF(UpperLimit)) / 2;
    Iter := 1;
    TwoToTheIterMinus2 := 1;
  end;
end; { procedure TestAndInitialize }

procedure Trapezoid(TwoToTheIterMinus2 : integer;
                    LowerLimit         : real;
                    Spacing            : real;
                    OldEstimate        : real;
                var NewEstimate        : real);

{-----------------------------------------------------}
{- Input: TwoToTheIterMinus2, LowerLimit, Spacing,    -}
{-        OldEstimate                                 -}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  {- Output: NewEstimate                                    -}
  {-                                                        -}
  {- This procedure uses the trapezoid rule to              -}
  {- improve the integral approximation (OldEstimate)       -}
  {- on the interval [LowerLimit, LowerLimit + Spacing].    -}
  {- The results are returned in the variable NewEstimate   -}
  {-------------------------------------------------------- -}

  var
    Sum : real;
    Dummy : integer;

  begin
    Sum := 0;
    for Dummy := 1 to TwoToTheIterMinus2 do
      Sum := Sum + TNTargetF(LowerLimit + (Dummy - 0.5) * Spacing);
    NewEstimate := 0.5 * (OldEstimate + Spacing * Sum);
  end; { procedure Trapezoid }

procedure Extrapolate(Iter        : integer;
                      OldEstimate : TNvector;
                  var NewEstimate : TNvector);

{-------------------------------------------------------}
{- Input: Iter, OldEstimate                            -}
{- Output: NewEstimate                                 -}
{-                                                     -}
{- This procedure uses Richardson extrapolation        -}
{- to improve the current approximation to the integral -}
{- (OldEstimate).  The result is returned in the       -}
{- variable NewEstimate                                -}
{-------------------------------------------------------}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
var
  Extrap : integer;
  FourToTheExtrapMinus1 : real;

begin
  FourToTheExtrapMinus1 := 1;
  for Extrap := 2 to Iter do
  begin
    FourToTheExtrapMinus1 := FourToTheExtrapMinus1 * 4;
    NewEstimate[Extrap] :=
                  (FourToTheExtrapMinus1 * NewEstimate[Extrap - 1] -
                  OldEstimate[Extrap - 1]) / (FourToTheExtrapMinus1 - 1);
  end;
end; { procedure Extrapolate }

begin { procedure Romberg }
  TestAndInitialize(LowerLimit, UpperLimit, Tolerance, MaxIter, Iter,
                Spacing, OldEstimate, TwoToTheIterMinus2, Error);
  if Error = 0 then
  begin
    repeat
      Iter := Succ(Iter);
      Trapezoid(TwoToTheIterMinus2, LowerLimit, Spacing, OldEstimate[1],
            NewEstimate[1]);
      TwoToTheIterMinus2 := TwoToTheIterMinus2 * 2;
      Extrapolate(Iter, OldEstimate, NewEstimate);
      Spacing := Spacing / 2;
      OldEstimate := NewEstimate;
    until { The fractional difference between }
        { iterations is within Tolerance    }
        (ABS(NewEstimate[Iter - 1] - NewEstimate[Iter]) <=
        ABS(Tolerance * NewEstimate[Iter])) or (Iter >= MaxIter);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if Iter >= MaxIter then
      Error := 3;
    Integral := NewEstimate[Iter];
  end;
end; { procedure Romberg }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคำนวณหา ส.ป.ส.

```
main()
{
  float A1^4,A1^2,A2^4,A2^2,a0,z1,z2,A2^8,A2^6,det,deta4,deta2,a4,a2;
  printf("Enter A1^4 = ");
  scanf("%f",&A1^4);
  printf("Enter A1^2 = ");
  scanf("%f",&A1^2);
  printf("Enter A2^8 = ");
  scanf("%f",&A2^8);
  printf("Enter A2^6 = ");
  scanf("%f",&A2^6);
  printf("Enter A2^4 = ");
  scanf("%f",&A2^4);
  printf("Enter A2^2 = ");
  scanf("%f",&A2^2);
  printf("Enter a0 = ");

  scanf("%f",&a0);
  z1= A1^4-a0*A2^4;
  z2= A1^2-a0*A2^2;
  det=A2^8*A2^4-A2^6*A2^6;
  deta4=z1*A2^4-z2*A2^6;
  deta2=A2^8*z2-A2^6*z1;
  a4 = deta4/det;
  a2 = deta2/det;
  printf("z1=%f z2=%f det=%f\n",z1,z2,det);
  printf("a4=%f a2=%f \n",a4,a2);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหาค่า ERROR

```
main()
{
 float a4,H(ω),ω,Fs(ω),ERROR,b2,a0,a2;
 printf("Enter the initial of ω \n");
 scanf("%f",&ω);
 printf("Enter a4 \n");
 scanf("%f",&a4);
 printf("Enter a2 \n");
 scanf("%f",&a2);
 printf("Enter a0 \n");
 scanf("%f",&a0);
 printf("Enter b2 \n");
 scanf("%f",&b2);
 while(ω<1.1){
 H(ω)=((a4*ω*ω*ω*ω+a2*ω*ω+a0)/(ω*ω*ω*ω+b2*ω*ω+a0));
 Fs(ω)=(1-(0.206*ω));
 ERROR=Fs(ω)-H(ω);
 printf("w=%f Fs(ω)=%f H(ω)=%f ERROR=%f \n",ω,Fs(ω),H(Wω),ERROR);
 ω=ω+0.1;
}
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้