

การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแอกทีฟที่พดิสทริบิวท์อาซีไลน์ฟิลเตอร์
Realization of an Active Distributed RC Line Filters and Its Application



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-37-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง วิทยาเขตระยอง

การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแยกที่ฟีดสทริบิวท์อาร์ซีไลน์ฟิลเตอร์
Realization of an Active Distributed RC Line Filters and Its Application



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-37-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

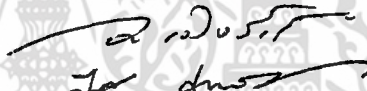
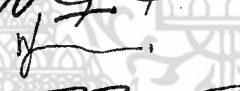
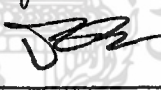

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแยกที่ผิดสกรีนวิวิธ อารีไลน์
 ฟิลเตอร์
**Realization of an Active Distributed RC Line Filters
 and its Application**

ชื่อนักศึกษา นายไพศาล สิทธิโยภาสกุล รหัสประจำตัว 30126-045

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช	
ผศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์	
รศ.ดร.วัลลภ สุระกำพลธร	
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	
ผศ.วิชัย สุรพัฒน์	

ค่าระดับคะแนนรวมที่เป็นเอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 3 เมษายน 2534 เวลา 10.00 น.

สถานที่สอบ ห้องประชุมภาคอิเล็กทรอนิกส์ (B-312)

บัณฑิตวิทยาลัยรับเรียบร้อยแล้ว



รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... 17... เดือน... ๒๕๓๔... พ.ศ. ๒๕๓๔...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแอกทีฟฟิลต์รีวิวท์อาซีไลน์ฟิลเตอร์
นักศึกษา	นายไพศาล สิทธิโยภาสกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.กนก เจริญพงศ์เวช
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2533

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เสนอหลักการออกแบบวงจรกรองความถี่ และวงจรอควอไลเซชันที่สามารถยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่ย่านความถี่สูงได้ โดยใช้วงจรแบบแอกทีฟฟิลต์รีวิวท์อาซี พร้อมทั้งพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบและค่าความไวของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบได้

นอกจากนี้ยังเสนอหลักการในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อควอไลเซชันที่สามารถกำหนดคุณลักษณะผลตอบสนองของกรูฟดีเลย์ตามที่ต้องการได้ ซึ่งสามารถใช้ในการชดเชยเฟสของสัญญาณหรือแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรูฟดีเลย์คงที่ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นของโพลและซีโรแบบขนาน และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาค่าตอบของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ถูกประมาณขึ้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งของโพลและซีโรที่ดีที่สุด ในการออกแบบวงจรอควอไลเซชันดังกล่าวข้างต้นนั้น ได้นำเอาสัญญาณทดสอบมีอดดูละท ไซน์กำลังสองพัลซ์มาช่วยในการออกแบบเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสี่ในระบบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์ โดยไม่มีผลต่อความผิดเพี้ยนทางกรูฟดีเลย์ของสัญญาณสี่ จากการทดลองวงจรดังกล่าวนี้ให้ผลใกล้เคียงกับทฤษฎีการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

Thesis Title Realization of an Active Distributed RC Line Filters
and Its Application
Name Mr.Paisan Sithiyopasakul
Thesis Advisor Asst.Prof. Dr.Kanok Janchitrapongvej
Level of Study Master of Engineering in Electrical Engineering
Academic Year 1990

Abstract

The thesis imply, the method of realization of active distributed RC filters and an equalizer using uniform distributed RC circuit are presented. The amplitude frequency response of this equalizer can be increased or decreased at higher frequencies. Here in, the stability and sensitivity due to the variation of element values of the active distributed RC filters and an equalizer are investigated.

The thesis also describe an iterative method of group delay equalization over a specified amplitude frequency response of the design equalizer. Whereby an equal ripple approximation may be achieved with the aid of electronic computer in searching the optimized poles and zeros.

By the used of the modulated sine-squared test signal in designing equalizer mentioned above, it is shown that the equalizer can be used to correct the relative gain distortion of the chrominance signal in the color picture signal transmission system without relative delay distortion.

The experimental results and computer simulations of the circuit showed good agreement with the theoretical values.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	1
1.2 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป	4
2.1 เน็ตเวิร์กฟังก์ชัน	4
2.2 ทฤษฎีไซน์กำลังสองพัลส์	7
2.3 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดดูเลท ไซน์กำลังสองพัลส์	16
บทที่ 3 ดิสทริบิวท์อาซี	23
3.1 สายส่ง	23
3.2 โครงสร้างของลิมิตพารามิเตอร์	29
3.3 โครงสร้างของดิสทริบิวท์อาซี	33
บทที่ 4 การออกแบบวงจรแยกที่ผลิตทริบิวท์อาซี	38
4.1 เสถียรภาพของระบบ	38
4.2 ความไวของอุปกรณ์	41
4.3 การออกแบบวงจรรองความถี่แบบแยกที่ผลิตทริบิวท์อาซี	43
4.4 การออกแบบวงจรอิควอไลเซอ์แบบแยกที่ผลิตทริบิวท์อาซี	80
บทที่ 5 การทดสอบและการประยุกต์ใช้งาน	89
5.1 การทดสอบวงจรแยกที่ผลิตทริบิวท์อาซี	89
5.2 การออกแบบวงจรดีเลย์อิควอไลเซอ์	100
5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรอิควอไลเซอ์เพื่อกำหนดความผิดเพี้ยนของ สัญญาณ โครมมิตันซ์ต่อลูนิตันซ์ในระบบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์	108
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	114
กิตติกรรมประกาศ	115
เอกสารอ้างอิง	116
ภาคผนวก รายละเอียดของโปรแกรม	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การออกแบบวงจรใด ๆ ในขอบข่ายของความถี่เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลตอบสนองทางขนาดแบบต่าง ๆ เช่น การออกแบบวงจรกรองความถี่ สามารถทำได้หลายวิธีและการสังเคราะห์วงจรก็ทำได้หลายแบบเช่น อาจจะเป็นแบบพาสซีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R,C และ L หรือเป็นแบบแอ็กทีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R,C ร่วมกับออปแอมป์ ซึ่งวงจรถูกกล่าวจะใช้พวกลัมด์โอลิเมนต์ (Lumped Element) แต่เทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวงจรที่มีส่วนประกอบเป็นดิสทริบิวท์อาชี [11,12] ซึ่งเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชีมีคุณลักษณะทั่วไปที่ดีกว่ามีขนาดเล็กกว่าเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อาชี วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการใหม่ในการออกแบบวงจรกรองความถี่และวงจรอควอไลเซอร์ที่สามารถยกหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่ย่านความถี่สูง [1] โดยใช้วงจรแอ็กทีฟดิสทริบิวท์อาชี (Active Distributed RC Circuit) โดยวงจรถูกกล่าวมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำ สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็ก โดยที่ค่า Parasitic Capacitors [5] ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ในช่วงความถี่สูง

โดยทั่วไปในระบบการรับส่งสัญญาณติดต่อสื่อสาร จะต้องส่งผ่านสัญญาณเข้าวงจรต่าง ๆ ซึ่งอาจทำให้ผลตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้นและทำให้กรูฟด์เลย์ทได้ไม่คงที่ ถ้าหากในระบบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องให้เฟสเป็นเชิงเส้น เช่น ในระบบโทรทัศน์หรือระบบรับส่งสัญญาณพัลส์ ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องชดเชยเฟสของสัญญาณ โดยทำให้เฟสที่ได้เป็นเชิงเส้นและให้กรูฟด์เลย์ทคงที่มากที่สุด และเพื่อให้การออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้งานมีประสิทธิภาพมากที่สุด วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรถ่ายอควอไลเซอร์ เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรูฟด์เลย์ทคงที่ [2] และสามารถกำหนดคุณลักษณะของกรูฟด์เลย์ทตามที่ต้องการได้ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ในการหาคำตอบ นอกจากนี้ยังได้นำวิธีการออกแบบวงจรที่ได้มาประยุกต์ เพื่อใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิตันซ์ต่อลูมิแนนซ์ในระบบการส่งโทรทัศน์สี โดยนำเอาสัญญาณเมื่อดูเลข ไซน์กำลังสองพัลส์มาใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี

1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางคณิตศาสตร์และนำมาประยุกต์ใช้งานของดิสทริบิวท์อาชีไลน์ฟิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตอร์

2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบวงจรรองความถี่และวงจรถือคอโลเซอร์ โดยใช้ วงจรแบบแอคทีฟดิสทริบิวต์อาซี
3. เพื่อศึกษาการประมาณหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชันในการออกแบบวงจรถือคอโลเซอร์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของโพลและซีโรที่ดีที่สุด
4. เพื่อศึกษาการวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดูเลทไซน์ กำลังสองพัลส์
5. เพื่อออกแบบวงจรถือสำหรับแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โครมิกแนชต่อลูมินแนช ในระบบโทรทัศน์

1.2 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเอาตัวดิสทริบิวต์อาซีไลน์ฟิลเตอร์ที่เป็นชนิดยูนิฟอร์ม ซึ่ง ภายในประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ จำนวน 2 ตัว ร่วมกับออปแอมป์ 1 ตัว มาใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำ, วงจรรองความถี่สูง และวงจรถือคอโลเซอร์ที่ใช้ในการชดเชยระดับของสัญญาณที่ความถี่สูง ซึ่งทั้งหมดจะเป็นการหาผลตอบสนองทางขนาดเป็นหลัก ส่วนในตอนหลังจะเป็นการประมาณหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชัน เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลตอบสนองกรูฟดีเลย์ตามที่กำหนด และในท้ายที่สุดจะนำเอาวิธีชดเชยผลตอบสนองทั้งทางขนาดและเฟส มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบการส่งโทรทัศน์

ในบทที่ 2 กล่าวถึงผลตอบสนองของเน็ตเวิร์กฟังก์ชัน ทฤษฎีไซน์กำลังสองพัลส์ในการตรวจสอบข้อบกพร่องของระบบการส่งโทรทัศน์ การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดูเลทไซน์กำลังสองพัลส์

ในบทที่ 3 เป็นการแสดงโครงสร้างของดิสทริบิวต์อาซี การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวต์อาซีซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับของสายส่ง เปรียบเทียบโครงสร้างและพารามิเตอร์ระหว่างเน็ตเวิร์กแบบลัมด์และแบบดิสทริบิวต์

ในบทที่ 4 เป็นการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำ, วงจรรองความถี่สูง และวงจรถือคอโลเซอร์ที่ใช้การยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่ย่านความถี่สูง โดยใช้วงจรแอคทีฟดิสทริบิวต์อาซี (Active Distributed RC Circuit) ซึ่งวงจรถือคอโลแบบได้จะมีพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดค่าของผลตอบสนองทางความถี่เปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบที่ออกแบบ และค่าความไว (Sensitivity) ของอิลีเมนต์แต่ละตัวในวงจร

ในบทที่ 5 แสดงผลการทดสอบวงจรแอกทีฟที่ประดิษฐ์ที่อาศัยที่ได้จากบทที่ 4 และเสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อิกควอลไลเซอร์ ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะของกรุปดีเลย์ตามที่ต้องการได้ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นของโพลและซีโรขนานไปกับแกน $j\omega$ ใน S-Plane แล้วให้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของโพลและซีโรที่ดีที่สุดด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน การประยุกต์นำวงจรที่ออกแบบได้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 นี้ มาใช้เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิกแนชต่อลูนิกแนชในระบบการส่งโทรทัศนส์ โดยนำมอดูเลตไซน์กำลังสองพัลส์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาใช้ตรวจสอบความบกพร่องและวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ของสัญญาณ

ในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะสรุปผลการวิจัย และวิจารณ์ถึงข้อดีข้อเสียของการออกแบบวงจรที่ได้เสนอไว้พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก เป็นรายละเอียดของ โปรแกรมทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงเป็นกราฟพร้อมทั้งรายละเอียดทั้งหมด โดยสามารถเลือกแสดงผลได้ 3 ทาง คือ 1. จอแสดงผล (Monitor) 2. เครื่องพิมพ์ (Printer) 3. เอกซ์-วายพล็อตเตอร์ (X-Y Plotter)

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถนำวงจรแอกทีฟที่ประดิษฐ์ที่อาศัยไปใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่ ที่สามารถกำหนดค่าผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ หรือใช้ในการออกแบบวงจรอิกควอลไลเซอร์ที่สามารถยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดที่ย่านความถี่สูงได้ตามที่ต้องการ
2. สามารถนำไปใช้ในการประมาณหาเน็ทเวิร์กฟังก์ชันในขอบข่ายของความถี่ เพื่อให้ได้คุณลักษณะทางขนาดหรือกรุปดีเลย์ใกล้เคียงกับคุณลักษณะทางขนาดหรือกรุปดีเลย์ที่ต้องการตามอุดมคติได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบการรับส่งสัญญาณโทรทัศนส์
4. หลักการและการคำนวณหาผลลัพธ์ต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เขียนเป็นโปรแกรมไว้เพื่อเป็นการจำลองผลตอบสนอง และให้ตรวจสอบดูรายละเอียดที่ได้จนเป็นที่พอใจ แล้วจึงทำการสร้างวงจรเพื่อใช้งานจริง ซึ่งจะสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

บทที่ 2 ทฤษฎีทั่วไป

2.1 เน็ตเวิร์กฟังก์ชัน

การออกแบบวงจรใด ๆ เพื่อให้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ จะทำได้โดยหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชันของวงจรเทียบเคียงกับฟังก์ชันที่ต้องการในอุดมคติ ซึ่งค่าที่ได้จะต้องให้ใกล้เคียงกับฟังก์ชันในอุดมคติมากที่สุด เช่น การออกแบบวงจรกรองความถี่จะต้องให้เน็ตเวิร์กฟังก์ชันที่ได้อย่างมีสัญญาณความถี่ในย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ผ่านออกไปได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสียหรือผิดเพี้ยน และสามารถกำจัดสัญญาณความถี่ในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ได้ทั้งหมดโดยสิ้นเชิง แต่เนื่องจากวงจรใด ๆ สามารถแทนได้แต่เฉพาะฟังก์ชันที่อยู่ในรูปโพลีโนเมียลเศษส่วนเท่านั้น จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลตอบสนองชนิดต่าง ๆ ของฟังก์ชันแบบนี้ ซึ่งผลตอบสนองของเน็ตเวิร์กฟังก์ชันต่อความถี่ [14, 15, 16] ที่สำคัญ ได้แก่

- ผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response)
- ผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response)

ผลตอบสนองทั้งสองชนิดนี้จะถูกพิจารณาเปรียบเทียบกับความถี่ของสัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลง เน็ตเวิร์กโดยทั่วไปสามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่อยู่ในรูปโพลีโนเมียลคือ

$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad \dots(2.1)$$

โดยที่ $N(s)$ และ $D(s)$ เป็นโพลีโนเมียลของตัวเศษและโพลีโนเมียลของตัวส่วนตามลำดับ m เป็นอันดับของโพลีโนเมียลเศษ และ n เป็นอันดับของโพลีโนเมียลส่วน โดยที่ $n \geq m$ a และ b เป็นสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวเลขจำนวนจริง s เป็นตัวแปรความถี่เชิงซ้อน (Complex-Frequency Variable)

สมการ (2.1) ที่อยู่ในรูปโพลีโนเมียลสามารถแยกตัวประกอบซึ่งจะได้

$$T(s) = K \frac{(s-z_1)(s-z_2) \dots (s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2) \dots (s-p_n)} \quad \dots(2.2)$$

$$T(s) = K \frac{\prod_{i=1}^m (s-z_i)}{\prod_{j=1}^n (s-p_j)}$$

โดยที่ K เป็นอัตราขยาย ซึ่งมีค่าคงที่
 z_i เป็นตำแหน่งซีโรว์อันดับที่ i
 p_j เป็นตำแหน่งโพลอันดับที่ j

เมื่อพิจารณาผลตอบแทนทางความถี่ของเน็ตเวิร์ก โดยสมมติป้อนสัญญาณอินพุตเป็นรูปไซน์และเน็ตเวิร์กเป็นแบบลิเนียร์ ผลตอบสนองของวงจรในสภาวะเสถียรของสัญญาณรูปไซน์ ซึ่ง s มีค่าเท่ากับ $j\omega$ ดังนั้นสมการ (2.2) จะได้

$$T(j\omega) = K \frac{(j\omega-z_1)(j\omega-z_2)\dots(j\omega-z_m)}{(j\omega-p_1)(j\omega-p_2)\dots(j\omega-p_n)} \dots(2.3)$$

เมื่อพิจารณาพหุคูณ (jw-s_i) โดยให้ s_i เป็นซีโรว์ คือ s_i = z_i หรือเป็นโพล คือ s_i = p_i ซึ่งค่า s_i จะเป็นตัวเลขเชิงซ้อนสมมติให้

$$s_i = \alpha_i + j\beta_i$$

ค่าพหุคูณ (jw - s_i) จะได้เป็น

$$- \alpha_i + j(\omega - \beta_i) = M_i e^{j\theta_i} \dots(2.4)$$

เมื่อ

$$M_i = \sqrt{\alpha_i^2 + (\omega - \beta_i)^2}$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{\omega - \beta_i}{-\alpha_i}$$

ดังนั้นสมการ (2.3) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$T(j\omega) = K \frac{M_{z1} e^{j\theta_{z1}} M_{zi} e^{j\theta_{zi}} \dots M_{zm} e^{j\theta_{zm}}}{M_{p1} e^{j\theta_{p1}} M_{pj} e^{j\theta_{pj}} \dots M_{pn} e^{j\theta_{pn}}}$$

$$= K \frac{M_{z1} M_{zi} \dots M_{zm}}{M_{p1} M_{pj} \dots M_{pn}} e^{j(\theta_{z1} + \theta_{zi} + \dots + \theta_{zm} - \theta_{p1} - \theta_{pj} - \dots - \theta_{pn})} \quad (2.5)$$

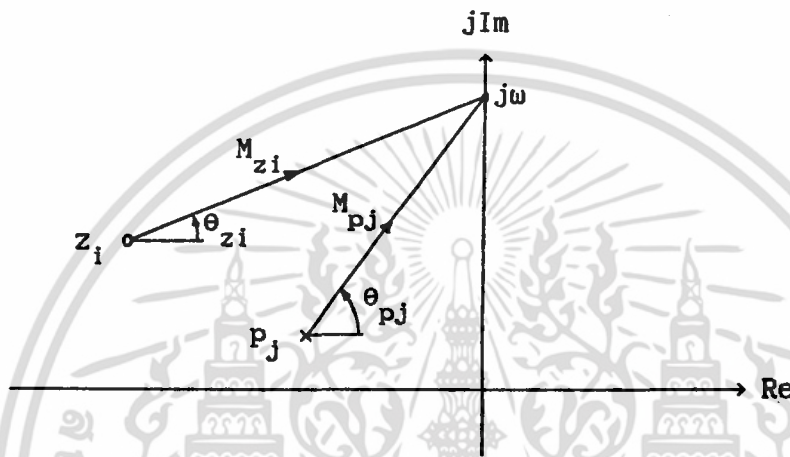
$$= M(\omega) e^{j\theta(\omega)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $M(\omega)$ เป็นขนาดของ $T(j\omega)$

$\theta(\omega)$ เป็นเฟสของ $T(j\omega)$

ใน S-Plane ค่าของแฟคเตอร์ $(j\omega - z_i)$ สามารถแสดงด้วยเวกเตอร์จาก z_i ไปยัง $j\omega$ และแฟคเตอร์ $(j\omega - p_j)$ สามารถแสดงด้วยเวกเตอร์จาก p_j ไปยัง $j\omega$ ดังนั้นสามารถเขียนเวกเตอร์ซึ่งแสดงขนาด และเฟสได้ดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงเวกเตอร์ของซีโรและโพลใน S-Plane

จากสมการ (2.5) และรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางขนาด $M(\omega)$ คือค่าของ K คูณกับผลคูณของขนาดของเวกเตอร์ที่ลากจากตำแหน่งซีโรไปยังความถี่ ω บนแกนจินตภาพ M_{z_i} หารด้วยผลคูณของเวกเตอร์ที่ลากจากตำแหน่งโพลไปยังความถี่ ω บนแกนจินตภาพ M_{p_j} สำหรับผลตอบสนองเฟส $\theta(\omega)$ คือผลรวมของมุมเวกเตอร์ของซีโร θ_{z_i} ลบด้วยผลรวมของมุมเวกเตอร์ของโพล θ_{p_j}

ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) ได้จากการพิจารณาสัญญาณในโดเมนของเวลา โดยแสดงให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ เช่นเดียวกับกับผลตอบสนองทางขนาดและเฟส โดยสมมติสัญญาณอินพุต V_1 บ้อนไปยังเทปเวกซ์ที่มีค่ากรุปดีเลย์เท่ากับ D วินาที ดังนั้นสัญญาณทางเอาต์พุต V_2 จะได้

$$V_2(t) = V_1(t - D) \quad \dots(2.6)$$

เนื่องจากสัญญาณใด ๆ เกิดจากองค์ประกอบของสัญญาณรูปไซน์เสมอ ฉะนั้นสัญญาณอินพุตจะได้

$$V_1 = A \sin(\omega t + \phi) \quad \dots(2.7)$$

จากสมการ (2.6) จะได้สัญญาณเอาต์พุตคือ

$$V_2 = A \sin[\omega(t - D) + \phi]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $V_2 = A \sin [\omega t - \omega D + \phi]$... (2.8)

จากสมการ (2.7) และ (2.8) จะเห็นได้ว่าสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตมีเฟสต่างกันคือ

$$\theta = - \omega D \quad \dots (2.9)$$

ฟังก์ชันกรุปดีเลย์ (Group delay) จะได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.9) เทียบกับ ω ซึ่งจะได้

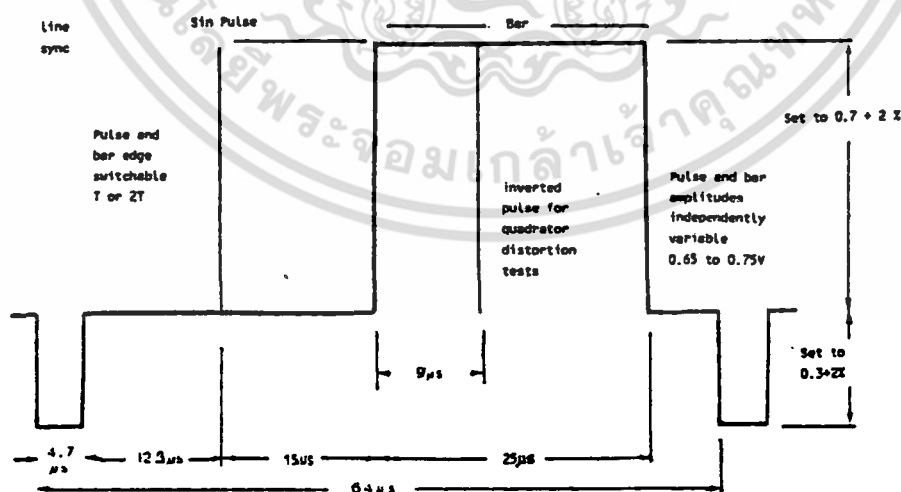
$$D = - \frac{d}{d\omega} \theta \quad \dots (2.10)$$

ดังนั้นผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ก็คือค่าลบการหาอนุพันธ์ผลตอบสนองทางเฟสนั่นเอง

2.2 ทฤษฎี ไซน์กำลังสองพัลส์

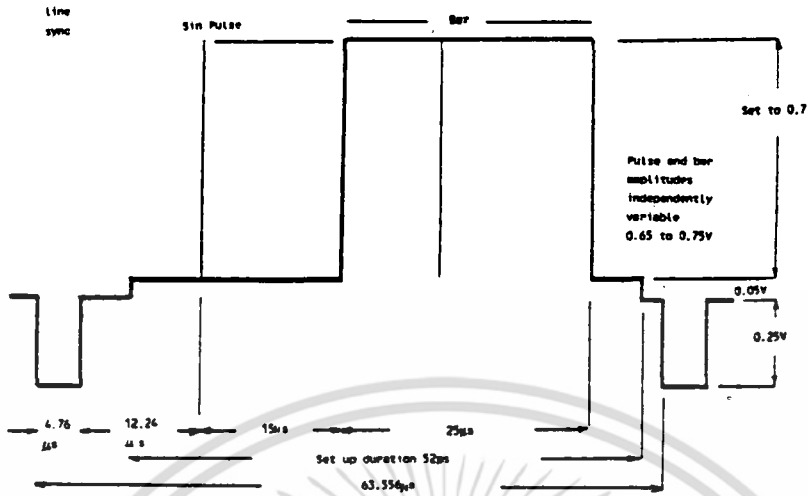
ไซน์กำลังสองพัลส์เป็นที่นิยมในการใช้ตรวจสอบข้อบกพร่อง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระบบ โทรทัศน์ [19] พัลส์ดังกล่าวนี้อาจเป็นแบบ T และ 2T สำหรับตรวจสอบโทรทัศน์ขาว-ดำ และแบบมอดดูเลข 20 T ไซน์กำลังสองใช้ในการตรวจสอบโทรทัศน์สี วิธีการตรวจสอบระบบใด ๆ ทำได้โดยการป้อน ไซน์กำลังสองพัลส์ให้กับระบบนั้น แล้วสังเกตการตอบสนองต่าง ๆ ของระบบดังกล่าวคือ การตอบสนองของขนาด (Amplitude Response) การตอบสนองของเฟส (Phase Response)

รูปลักษณะคลื่น ไซน์กำลังสอง ช่วงกว้างของพัลส์ที่ใช้ทดสอบมีการกำหนดขนาดของพัลส์ในช่วงตรงกลาง เช่น ขนาดความกว้างของพัลส์ช่วงตรงกลาง HAD (Half Amplitude Duration) เมื่อกำหนดให้ HAD เป็นสัญญาณ ไซน์กำลังสองของ T ช่วงความถี่ของพัลส์คือ $f = 1/T$

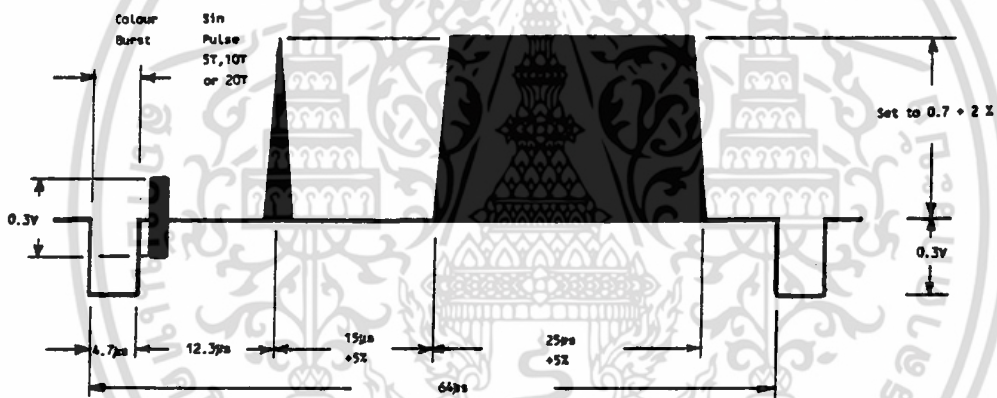


รูปที่ 2.2 รูปลักษณะของสัญญาณ ไซน์กำลังสองพัลส์และบาร์ในระบบ 625 เส้น

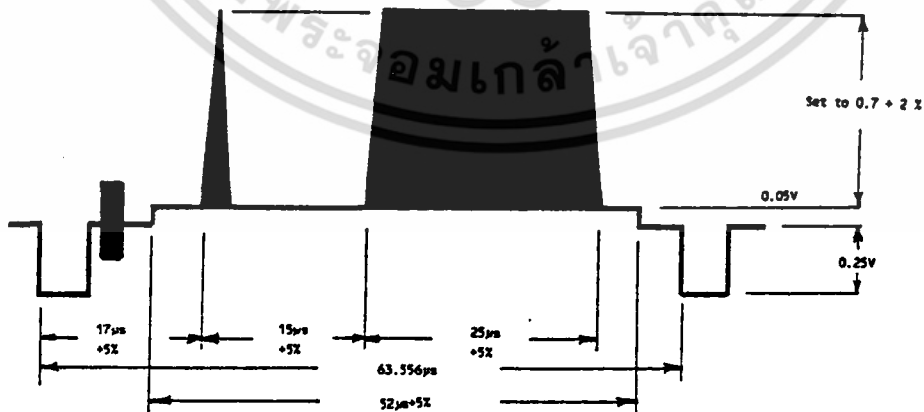
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รูปลักษณะสัญญาณไซน์กำลังสองพัลซ์และบาร์ในระบบ 525 เส้น



รูปที่ 2.4 รูปลักษณะสัญญาณเมื่อคูณเลข ไซน์กำลังสองพัลซ์และบาร์ในระบบ 625 เส้น



รูปที่ 2.5 รูปลักษณะสัญญาณเมื่อคูณเลข ไซน์กำลังสองพัลซ์และบาร์ในระบบ 525 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

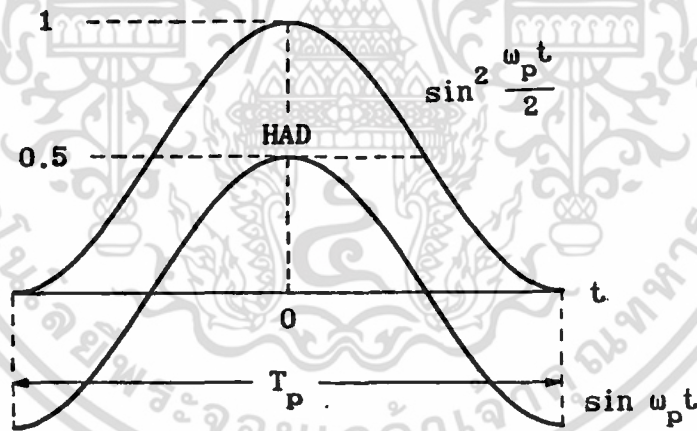
ถ้าสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์มี HAD เท่ากับ T เราเรียกพัลส์ดังกล่าวว่า T พัลส์ ถ้าพัลส์นั้นมีความกว้างเป็น 2 เท่าเราเรียกว่า 2 T พัลส์ ถ้ากว้างเป็นครึ่งหนึ่งก็เรียกว่า 1/2 T พัลส์ โดยที่สำหรับระบบ NTSC

$$2 \text{ T Pulse มี HAD} = 0.25 \mu\text{S}$$

$$T \text{ Pulse มี HAD} = 0.125 \mu\text{S}$$

$$1/2 \text{ T Pulse มี HAD} = 0.063 \mu\text{S}$$

การใช้ไซน์กำลังสองพัลส์จำเป็นต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะพิเศษของความถี่ใกล้จุดคัท-ออฟ และพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Bar) ซึ่งเป็นตัวกำหนดย่านความถี่ช่วงต่ำและตรงกลาง ในทางปฏิบัติจะใช้ 2T พัลส์ , T พัลส์ และ 1/2 T พัลส์ เมื่อต้องการตรวจสอบอุปกรณ์โทรทัศน์ขนาดความถี่ 4 MHz เช่น เครื่องบันทึกภาพ (VTR) , อุปกรณ์โทรทัศน์ขนาด 8 MHz และอุปกรณ์โทรทัศน์ที่มีความถี่สูงกว่าตามลำดับ ส่วนสัญญาณสี่เหลี่ยม (Bar) ได้ออกแบบเพื่อให้ตรวจสอบได้โดยใช้อินเตอร์เตอร์ เมื่อความถี่ช่วงตรงกลางมีการขยายไม่ดีจะเกิดภาพฉวหรือเป็นริ้วขาว ๆ ดังนั้นสัญญาณสี่เหลี่ยม (Bar) จึงมีประโยชน์มากในการกำหนดคุณลักษณะพิเศษของย่านความถี่ช่วงตรงกลาง



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของไซน์กำลังสองพัลส์

สมการของไซน์กำลังสองพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เขียนได้คือ

$$f(t) = \begin{cases} \sin^2 \frac{\omega_p t}{2} \\ \frac{1}{2} [1 - \cos \omega_p t] \end{cases} \dots(2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\omega_p = 2\pi f_p = 2\pi \frac{1}{T_p}$

เมื่อ T_p เป็นช่วงเวลาความกว้างของพัลส์

ส่วนสำคัญสำหรับสัญญาณทดสอบ ไซน์กำลังสองพัลส์คือ ช่วงเวลาที่ครึ่งหนึ่งของแอมป์ริจูด (T) จะมีค่าเท่ากับ $1/2$ ของช่วงเวลาของพัลส์ (T_p) ดังนั้น

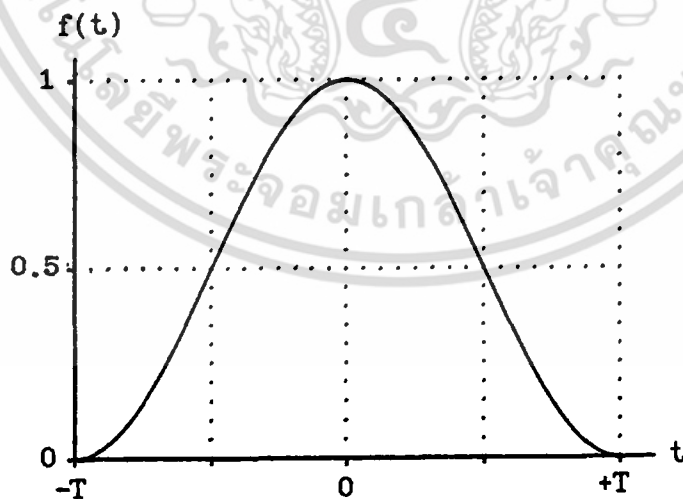
$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = \frac{2\pi}{2T} = \frac{\pi}{T} \quad \dots(2.12)$$

โดยที่ $f_p = \frac{1}{2T}$

ตัวอย่างเช่นในระบบ NTSC สำหรับ T พัลส์จะมีค่า $0.125 \mu\text{s}$ โดยมีสเปคตรัมกว้าง 8 MHz และ $2T$ พัลส์จะมีค่า $0.25 \mu\text{s}$ ซึ่งจะมีสเปคตรัมกว้าง 4 MHz ส่วนในระบบ PAL $2T$ พัลส์จะมีค่า $0.2 \mu\text{s}$ ซึ่งความถี่ความถี่สเปคตรัม 5 MHz แทนค่า ω_p จากสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.11) จะได้

$$f(t) = \begin{pmatrix} \sin^2 \frac{\pi t}{2T} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T} \right) \end{pmatrix} \dots(2.13)$$

จากสมการ (2.13) สามารถเขียนเป็น ไซน์กำลังสองพัลส์ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดง ไซน์กำลังสองแบบ T พัลส์

ฟังก์ชันของไซน์กำลังสองพัลส์ แบบ T, 2T, มีอดดูละ 12.5T และ มีอดดูละ 20T หาได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ฟังก์ชันของไซน์กำลังสองพัลส์แบบ T, 2T, มีอดดูละ 12.5T และ มีอดดูละ 20T

ไซน์กำลังสองพัลส์	คอมโพสิต ไซน์กำลังสองพัลส์
<p><u>แบบ T</u></p> $f_1(t) = \begin{cases} \sin^2 \frac{\pi t}{2T} & -T < t < T \\ 0 & t > T \end{cases}$	<p><u>แบบ 12.5T</u></p> $f_{12}(t) = f_1(t) + f_2(t)$ $f_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{25T} & -12.5T < t < 12.5T \\ 0 & t > 12.5T \end{cases}$ $f_2(t) = f_1(t) \cos \omega_c t$
<p><u>แบบ 2T</u></p> $f_1(t) = \begin{cases} \sin^2 \frac{\pi t}{4T} & -2T < t < 2T \\ 0 & t > 2T \end{cases}$	<p><u>แบบ 20T</u></p> $f_{12}(t) = f_1(t) + f_2(t)$ $f_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{40T} & -20T < t < 20T \\ 0 & t > 20T \end{cases}$ $f_2(t) = f_1(t) \cos \omega_c t$

สัญญาณ ไซน์กำลังสองพัลส์มีสมการคือ

$$A_T(t) = \begin{cases} A \sin^2 \frac{\pi t}{2T} & |t| \leq T \\ 0 & |t| > T \end{cases} \quad \dots(2.14)$$

โดยที่ A เป็นแอมพลิจูดของพัลส์

T เป็นช่วงเวลาของพัลส์

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

$$A_T(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_T(t) e^{-j\omega t} dt$$

ไซน์กำลังสองพัลส์เป็นจำนวนคู่ ดังนี้

$$A_T(\omega) = 2 \int_0^{\infty} A_T(t) \cos \omega t \, dt \quad \dots(2.15)$$

แทนค่าสมการ (2.14) ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$A_T(\omega) = 2 \int_0^T A \sin^2 \frac{\pi t}{2T} \cos \omega t \, dt$$

ซึ่งจะได้พีเค้นซีสเปคตรัมของแบบ T พัลส์ ดังนี้

$$A_T(f) = AT \frac{\sin 2\pi fT}{2\pi fT} \left(\frac{1}{1-(2fT)^2} \right) \quad \dots(2.16)$$

ในทำนองเดียวกันพีเค้นซีสเปคตรัมของพัลส์แบบ 2T คือ

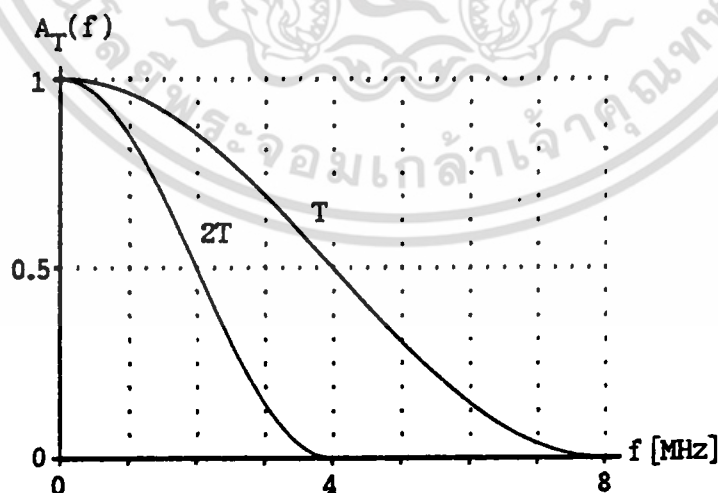
$$A_{2T}(f) = A 2T \frac{\sin 4\pi fT}{4\pi fT} \left(\frac{1}{1-(4fT)^2} \right) \quad \dots(2.17)$$

พีเค้นซีสเปคตรัมตามอุดมคติของแบบ T พัลส์ และ 2T พัลส์ กำหนดได้ดังนี้

$$A_T(f) = \frac{1}{1-(2fT)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi fT}{2\pi fT} \quad \dots(2.18)$$

$$A_{2T}(f) = \frac{1}{1-(4fT)^2} \cdot \frac{\sin 4\pi fT}{4\pi fT} \quad \dots(2.19)$$

เอ็นวิไลปของพีเค้นซีสเปคตรัมของแบบ T พัลส์ และ 2T พัลส์ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พีเค้นซีสเปคตรัมตามอุดมคติของ T พัลส์ และ 2T พัลส์

พีริเควินซีสเปคตรัมของมอดดูเลข 20T พัลซ์และ 12.5T พัลซ์ ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้
 มอดดูเลข ไชน์กำลังสองพัลซ์ประกอบด้วย สัญญาณในย่านความถี่ต่ำ (สัญญาณที่ยังไม่ได้มอด) และ
 สัญญาณในย่านความถี่สูง (สัญญาณที่มีมอดแล้ว)
 สัญญาณในย่านความถี่ต่ำมีสมการคือ

$$V_1(t) = \frac{A}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{40T}$$

มีสเปคตรัมดังนี้

$$V_1(\omega) = \frac{A}{2} \cdot \frac{20T}{1 - \left(\frac{20\omega T}{\pi}\right)^2} \cdot \frac{\sin 20\omega T}{20\omega T}$$

$$V_1(f) = \frac{A}{2} \cdot \frac{20T}{1 - (40Tf)^2} \cdot \frac{\sin 40\pi f T}{40\pi f T} \dots (2.20)$$

สัญญาณมอดดูเลข ไชน์กำลังสองพัลซ์แบบ 20T มีสมการคือ

$$V_c(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{40T} \cos \omega_c t & |t| \leq 20T \\ 0 & |t| > 20T \end{cases}$$

มีสเปคตรัมดังนี้

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

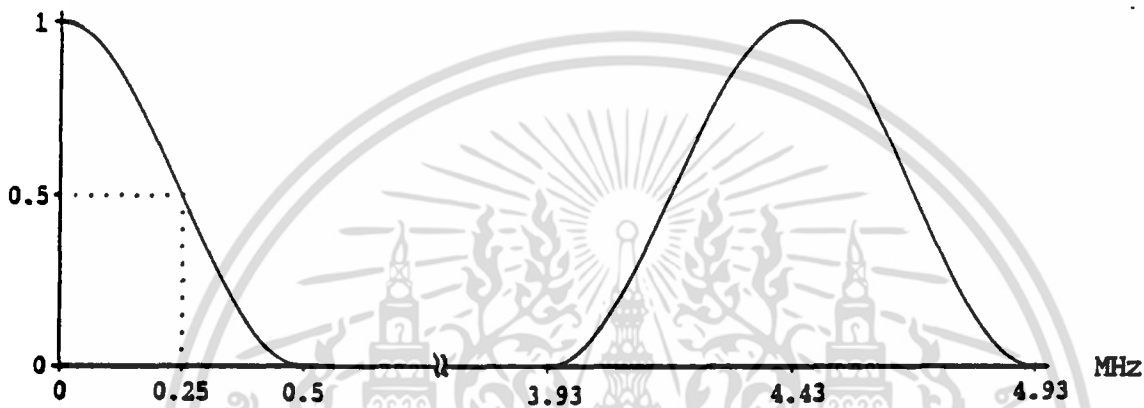
$$V_c(\omega) = \frac{A}{2} \left(\frac{20T}{1 - \left(\frac{20T(\omega - \omega_c)}{\pi}\right)^2} \frac{\sin (\omega - \omega_c) 20T}{(\omega - \omega_c) 20T} + \frac{20T}{1 - \left(\frac{20T(\omega + \omega_c)}{\pi}\right)^2} \frac{\sin (\omega + \omega_c) 20T}{(\omega + \omega_c) 20T} \right)$$

สมการของพีริเควินซีสเปคตรัมอาจเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$V_c(f)_{20T} = \frac{A}{2} \left(\frac{20T}{1 - [40T(f - f_c)]^2} \cdot \frac{\sin (f - f_c) 40\pi T}{(f - f_c) 40\pi T} + \frac{20T}{1 - [40T(f + f_c)]^2} \cdot \frac{\sin (f + f_c) 40\pi T}{(f + f_c) 40\pi T} \right) \dots (2.21)$$

ในการทำงานเดียวกันพีริเควินซีสเปคตรัมของมอดดูเลขแบบ 12.5T จะได้คือ

$$V_c(f)_{12.5T} = \frac{A}{2} \left(\frac{12.5T}{1-[25T(f-f_c)]^2} \cdot \frac{\sin (f-f_c)25\pi T}{(f-f_c)25\pi T} + \frac{12.5T}{1-[25T(f+f_c)]^2} \cdot \frac{\sin (f+f_c)25\pi T}{(f+f_c)25\pi T} \right) \dots(2.22)$$



รูปที่ 2.9 แสดงพีเค้นซีสเปคตรัมของมีอดคูลเลข 20T ไชน์กำลังสองพัลส์

พีเค้นซีสเปคตรัมของไชน์กำลังสองพัลส์แบบต่าง ๆ ในกรณีทีคิดเป็นเดซิเบล

ในกรณีของพีเค้นซีสเปคตรัมแบบ T พัลส์ Periodic Sequence ของไชน์กำลังสองพัลส์ คือ

$$A_T(t) = \begin{cases} A \sin^2 \frac{\pi t}{2T} & 0 < t < 2T \\ 0 & 2T < t < H \end{cases} \dots(2.23)$$

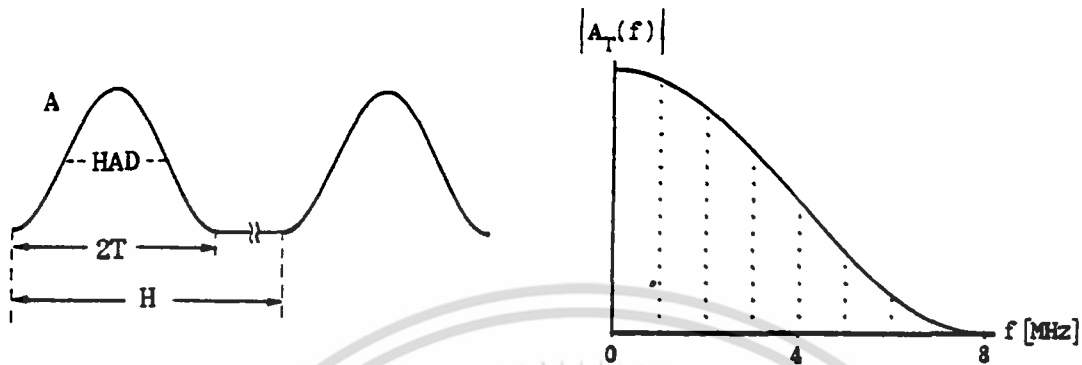
โดยที่ A เป็นขนาดของ T พัลส์

H เป็นช่วงเวลาของเส้นสแกนตามแนวนอนมีขนาดเท่ากับ 64 μ S

$$\text{ซึ่ง } |A_T(f)| = A \frac{2T}{H} \cdot \frac{1}{1-(2Tf)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi T f}{2\pi T f} \dots(2.24)$$

$$\text{และ } |A_T(0)| = A \frac{2T}{H} \lim_{f \rightarrow 0} \left(\frac{1}{1-(2Tf)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi T f}{2\pi T f} \right) \dots(2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Periodic Pulse Train ของ T พัลส์ และสเปกตรัม

ให้ $A_T(0) = 1$ เพื่อความสะดวกแทนค่า $T = 0.125 \mu\text{s}$, $H = 64 \mu\text{s}$

จะได้ $|A_T(0)| = A \cdot \frac{2 \times 0.125}{64} = 0.0039 \text{ A}$

อัตราขยาย (dB) จะได้

$$20 \log \frac{A_T(0)}{A} = 20 \log 0.0039 = -48 \text{ dB}$$

ดังนั้นพีเค้นซีสเปกตรัมของ T พัลส์ได้จากการหาค่า $A_T(f)$ กับความถี่ f MHz โดยใช้จำนวนเดซิเบลที่อ้างอิงกับขนาดของ A ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ขนาดของ T พัลส์ } |A_T(f)| &= 0.0039 \text{ A} \cdot \frac{1}{1-(2Tf)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi T f}{2\pi T f} \\ \frac{|A_T(f)|}{A} &= 0.0039 \cdot \frac{1}{1-(2Tf)^2} \cdot \frac{\sin 2\pi T f}{2\pi T f} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันเอ็นวีโวลของพีเค้นซีสเปกตรัมของ 2T พัลส์เป็น dB หาได้คือ

$$\begin{aligned} \frac{|A_{2T}(f)|}{A} &= 0.00781 \cdot \frac{1}{1-(4Tf)^2} \cdot \frac{\sin 4\pi T f}{4\pi T f} \\ \lim_{f \rightarrow 0} \frac{|A_{2T}(f)|}{A} &= -42 \text{ dB} \end{aligned}$$

ในการส่งสัญญาณภาพซึ่งมีความถี่ย่านกว้าง 5 MHz พัลส์ทดสอบที่เหมาะสมต้องมีความถี่ 5 MHz จากการทดลองทั่ว ๆ ไป กำหนดพัลส์ในเทอมของฮาร์ฟแอมปริจูดดูเลชั่น (T) (Half

Amplitude Duration) ความสัมพันธ์ระหว่างย่านความกว้าง ความถี่ และ T กำหนดได้คือ $f = 1/(2T)$ พัลส์สี่เหลี่ยม (Bar) ที่นำมาทดสอบจะมีส่วนเกินกว่าย่านที่ต้องการ ซึ่งเป็นเหตุหนึ่งของการเกิด Overshoot, Ringing และ Phase Shift ซึ่งธรรมดาจะไม่เกิดขึ้นในการสื่อสารด้วยภาพ ไม่เพียงแต่ไซน์กำลังสองพัลส์ที่นำมาทดสอบจะอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม แต่มันจะทำงานได้ดีกว่าดัง เช่น ในการทดสอบด้วยระบบเดียวกัน เมื่อใช้พัลส์สี่เหลี่ยม (Bar) ทดสอบจะเกิด Overshoot 8.9% และเมื่อใช้ไซน์กำลังสองพัลส์จะเกิด Overshoot 13% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพัลส์ไซน์กำลังสองมีความไวต่อการทดสอบมากกว่าพัลส์รูปสี่เหลี่ยม

2.3 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดูเลตไซน์กำลังสองพัลส์

สัญญาณมอดูเลตไซน์กำลังสองพัลส์ที่จะใช้เป็นสัญญาณทดสอบประกอบด้วยส่วนที่เป็นความถี่ต่ำหรือสัญญาณลูมิแนนซ์ ร่วมกับมอดูเลตความถี่ซันแคเรียร์หรือโครมิแนนซ์ [20] การหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี (Chrominance Signal) ทั้งอัตราขยาย (Gain) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ A และไทม์ดีเลย์ (τ) โดยผลจากการคำนวณหาความผิดเพี้ยนทั้ง A และ τ จะสัมพันธ์กับค่ายอดทั้งสองจากฐานของพัลส์ ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าทราบค่ายอดจากฐานของพัลส์ก็สามารถที่จะหาความผิดเพี้ยนของพัลส์ว่าในระบบทดสอบ (System Under Test) จะมีผลต่อสัญญาณสีทางด้านไหน เช่น ระบบทดสอบอาจมีผลทางด้านความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย (Gain Distortion) อย่างเดียว หรือความผิดเพี้ยนทางด้านไทม์ดีเลย์ (Time Delay Distortion) เพียงอย่างเดียว หรือมีผลของความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยายและไทม์ดีเลย์ ซึ่งในบทนี้จะแสดงผลการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยายและไทม์ดีเลย์ และการแสดงค่าโดยประมาณด้วยค่าที่กำหนดให้ของค่ายอดทั้งสองที่ฐานของพัลส์ และอัตราขยายที่ไม่เท่ากัน (A) และไทม์ดีเลย์ที่สัมพันธ์กัน (τ)

การคำนวณของอัตราขยายและดีเลย์ กำหนดสัญลักษณ์การคำนวณดังต่อไปนี้

$f(t)$ เป็นแอมพลิจูดฟังก์ชันของไซน์กำลังสองพัลส์

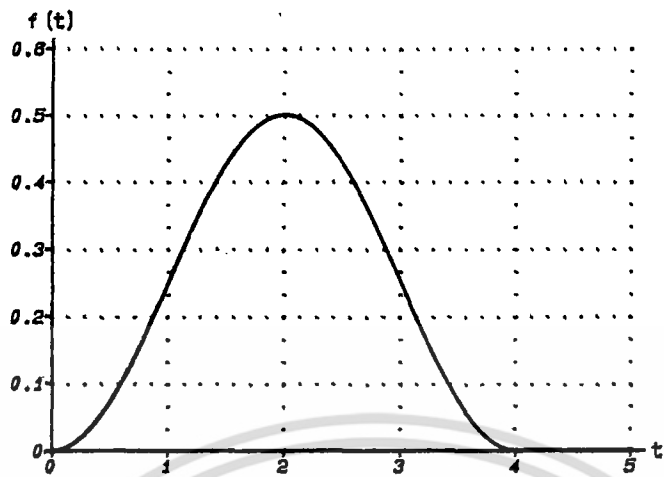
$U(t)$ เป็นแอมพลิจูดด้านบนของไซน์กำลังสองพัลส์

$L(t)$ เป็นแอมพลิจูดด้านล่างของไซน์กำลังสองพัลส์

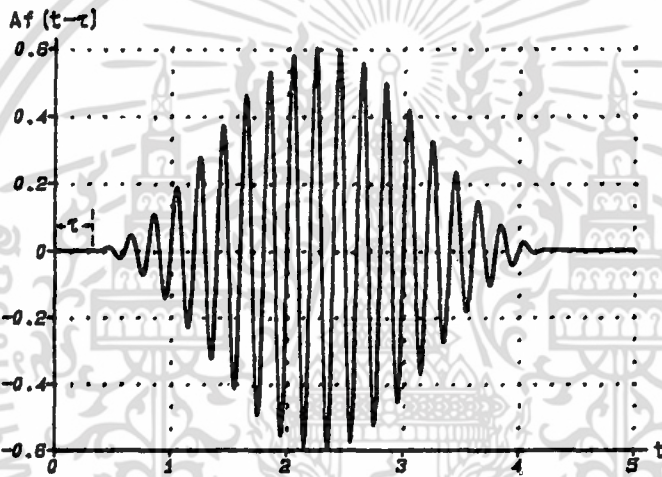
Y_1 และ Y_2 เป็นขนาดของแอมพลิจูดด้านล่างของไซน์กำลังสองพัลส์

A เป็นอัตราขยายของมอดูเลตไซน์กำลังสองพัลส์ที่สัมพันธ์กัน ระหว่างระดับของสัญญาณโครมิแนนซ์ต่อระดับของสัญญาณลูมิแนนซ์

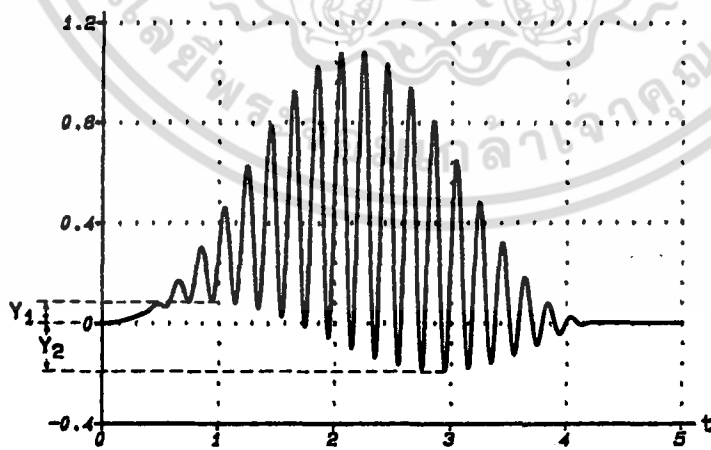
τ เป็นความผิดเพี้ยนของไทม์ดีเลย์ คือ ส่วนของสัญญาณโครมิแนนซ์ถูกหน่วงเข้าไป หรือนำหน้าสัญญาณลูมิแนนซ์



(ก) ไซน์กำลังสองพัลส์ที่ยังไม่ถูกมอด



(ข) ไซน์กำลังสองที่ถูกมอดแล้ว



(ค) สัญญาณรวม ไซน์กำลังสองพัลส์ (ก)+(ข)

รูปที่ 2.11 รูปแบบของความผิดเพี้ยนทั้งขนาดและดีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณให้พิจารณาจากรูปที่ 2.11 จะได้เอ็นวีไลปด้านบนและด้านล่างดังนี้

$$U(t) = f(t) + Af(t-\tau) \quad \dots(2.26)$$

$$L(t) = f(t) - Af(t-\tau) \quad \dots(2.27)$$

และค่าเบสแบนด์ (Baseband) ของไซน์กำลังสองพัลส์ก็คือ

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{2T_0} & |t| \leq T_0 \\ 0 & |t| > T_0 \end{cases} \quad \dots(2.28)$$

เมื่อ T_0 เป็นขนาดความกว้างของคลื่นช่วงตรงกลาง (HAD) ของพัลส์ ในระบบ PAL กรณีของ 20 T Pulse คือ $2 \mu\text{S}$ และ 12.5 T Pulse คือ $1.25 \mu\text{S}$ ส่วนในระบบ NTSC 20 T Pulse คือ $2.5 \mu\text{S}$

การหาค่าเอ็นวีไลปด้านบนและด้านล่างได้ด้วยการแทนค่าสมการ (2.28) ลงในสมการ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ จากเอ็นวีไลปด้านล่างจะทำให้เราทราบค่า Y_1 และ Y_2 ส่วนเอ็นวีไลปด้านบนจะทำให้เราทราบค่า Y_{\max} แต่จากการวัดค่าที่แน่นอนค่ายอดจากฐานของพัลส์ Y_1 และ Y_2 ควรจะวัดเทียบกับขนาดของพัลส์ที่สูงสุด Y_{\max} ซึ่งเอ็นวีไลปด้านล่างสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$L(t) = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \cos \frac{\pi t}{T_0} - \frac{A}{4} \cos \frac{\pi(t-\tau)}{T_0} - \frac{A}{4} \quad \dots(2.29)$$

ขนาดความสูงของเบสไลน์หาได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.29) เทียบกับ t และให้เท่ากับศูนย์ ซึ่งจะได้

$$\sin \frac{\pi t}{T_0} - A \sin \frac{\pi(t-\tau)}{T_0} = 0 \quad \dots(2.30)$$

จากสมการ (2.29) กำหนดให้

$$\cos \frac{\pi t}{T_0} - A \cos \frac{\pi(t-\tau)}{T_0} = Y_a \quad \dots(2.31)$$

ค่าของ Y_a เป็นฟังก์ชันของ A และ τ หาได้จากยกกำลังสมการ(2.30) บวกด้วยยกกำลังสมการ(2.31) จะได้

$$Y_a = \pm \sqrt{1 + A^2 - 2A \cos \frac{\pi\tau}{T_0}} \quad \dots(2.32)$$

ขนาดของเบสไลน์ด้านล่างของมอดดูเลท ไซน์กำลังสองพัลส์จะได้

$$Y_1 = \frac{1}{4} \left(1 - A + \sqrt{1 + A^2 - 2A \cos \frac{\pi\tau}{T_0}} \right) \quad \dots(2.33)$$

$$Y_2 = \frac{1}{4} \left(1 - A - \sqrt{1 + A^2 - 2A \cos \frac{\pi\tau}{T_0}} \right)$$

ในทำนองเดียวกันขนาดความสูงของเอ็นวีไลบ์ด้านบนสามารถหาได้คือ

$$Y_{\max} = \frac{1}{4} \left(1 + A + \sqrt{1 + A^2 + 2A \cos \frac{\pi\tau}{T_0}} \right) \quad \dots(2.34)$$

จากสมการ (2.33) และ (2.34) อัตราการขยายของมอดดูเลชันกำลังสองพัลส์ คือ

$$A = \frac{1 - (y_1 + y_2 + y_1 y_2)}{1 + (y_1 + y_2 - y_1 y_2)} \quad \dots(2.35)$$

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

จากเอ็นวีไลบ์ด้านล่างที่ฐานของพัลส์เราสามารถหาค่าดีเลย์ อินอควอลิตี้ (Delay Inequality) จากค่ายอดทั้งค่าบวกและค่าลบของ Y_1 และ Y_2 ตามลำดับ โดยให้

$$[1 - (y_1 + y_2 + y_1 y_2)] [1 + (y_1 + y_2 - y_1 y_2)] = \frac{16A}{1 + A\gamma_a}$$

โดยที่ $\gamma_a = \sqrt{1 + A^2 + 2A \cos \frac{\pi\tau}{T_0}}$

จะได้

$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} \left(1 + \frac{8y_1 y_2}{[1 - (y_1 + y_2 + y_1 y_2)] \cdot [1 + (y_1 + y_2 - y_1 y_2)]} \right) \quad \dots(2.36)$$

หรือ

$$\tau = \frac{2T_0}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{4y_1 y_2}{1 - (y_1 + y_2)^2} \right) \quad \dots(2.37)$$

ค่ายอดทั้งสองที่เกิดจากการผิดเพี้ยนของเอ็นวีไลบ์ด้านล่างจากฐานของพัลส์ Y_1 และ Y_2 ทำการ normalized ด้วยค่าสูงสุดของเอ็นวีไลบ์ด้านบน $y_1 = Y_1/Y_{\max}$ และ $y_2 = Y_2/Y_{\max}$ โดย

ที่ค่า Y_1 และ Y_2 จะเป็นพีชคณิตที่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน ซึ่ง Y_1 จะเป็นค่ายอดอันแรก และ Y_2 จะเป็นค่ายอดอันต่อมาในเบสไลน์

การผิดเพี้ยน โดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดี่ยว ในกรณีนี้แสดงว่าค่ายอด Y_1 และ Y_2 ค่าใดค่าหนึ่งมีค่าเป็น 0 ดังนั้นจะ ไม่มีความผิดเพี้ยนทางดีเลย์ เกิดขึ้นก็คือ $\tau = 0$ เพราะฉะนั้นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจึงมีแต่ความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดี่ยว ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นจริงได้ ดังนี้

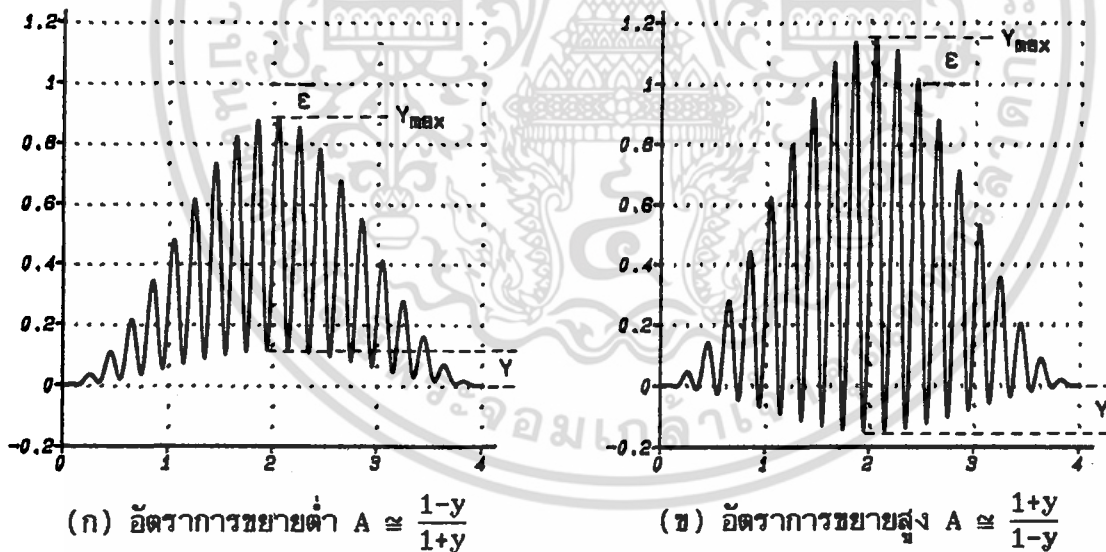
เมื่อ Y_1 หรือ Y_2 มีค่าเป็น 0 สมการ (2.36) จะกลายเป็น

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

และสมการ (2.35) จะกลายเป็น

$$A = \frac{1-(y_{1,2})}{1+(y_{1,2})} = \frac{1 - (Y/Y_{\max})}{1 + (Y/Y_{\max})} \quad \dots(2.38)$$

ซึ่ง $(y_{1,2})$ หรือ Y อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบ เนื่องจากขนาดของความผิดเพี้ยนที่สัมพันธ์กันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดี่ยว

ความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย (ϵ) พิจารณาจากสมการ (2.38) ดังนี้

$$\epsilon = 1 - A = \frac{2Y/Y_{\max}}{1+Y/Y_{\max}} \quad \dots(2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $1 \gg Y/Y_{\max}$ จะได้ $\epsilon \cong 2Y/Y_{\max}$ ซึ่ง $2Y/Y_{\max}$ จะถูกเรียกเป็น Relative Chrominance Level (RCL) และบางครั้งถูกเรียกว่า Relative Amplitude of the Color Sub-Carrier

การผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดี่ยว ในกรณี $Y_1 = -Y_2$ ซึ่งฐานของพัลส์มีรูปร่างเป็นคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเท่ากัน แต่อยู่ตรงข้ามแสดงว่าไม่มีความผิดเพี้ยนทางอัตราขยาย ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีแต่ความผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์เพียงอย่างเดียว

จากสมการ (2.35) แทนค่า $Y_1 = -Y_2$ จะได้ดังนี้

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

จากสมการ (2.36) จะได้เป็น

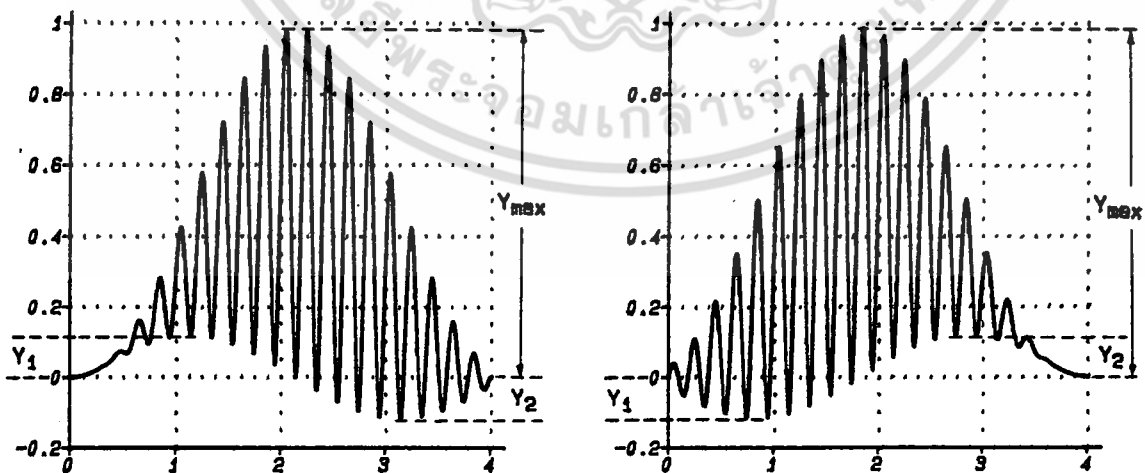
$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} \left(1 - \frac{8(Y/Y_{\max})^2}{[1 + (Y/Y_{\max})^2]^2} \right) \dots(2.40)$$

โดยอาศัยสูตรทางตรีโกณมิติสมการ (2.40) จะได้เป็น

$$\tau = \frac{2T_0}{\pi} \tan^{-1} \frac{2Y/Y_{\max}}{[1 - (Y/Y_{\max})^2]^2}$$

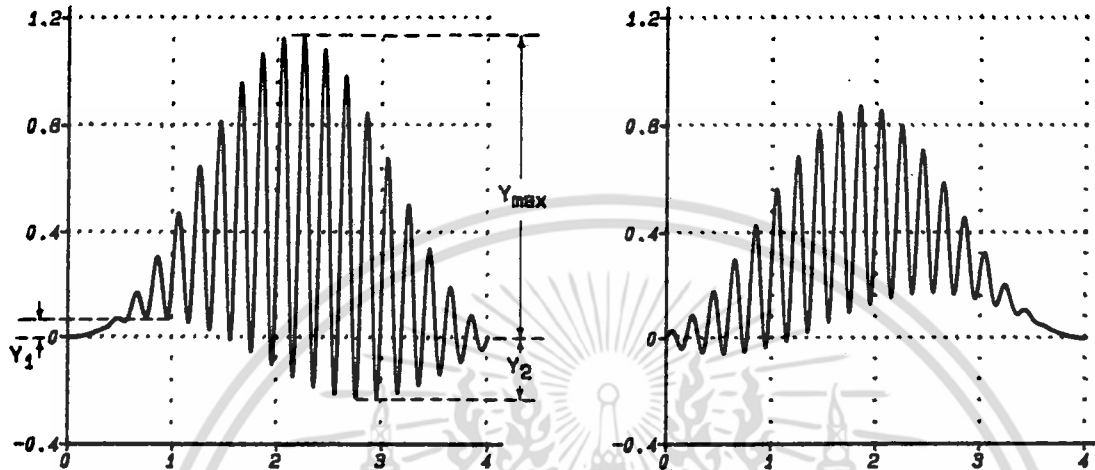
$$\tau = \frac{4T_0}{\pi} \tan^{-1} \frac{Y}{Y_{\max}} \dots(2.41)$$

ในกรณีที่เกิดการผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์ สามารถสังเกตฐานของพัลส์จะเกิดเป็นลักษณะของไซน์ (Sine) หรือโคไซน์ (Cosine) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการผิดเพี้ยนของดีเลย์เพียงอย่างเดียว

กรณีที่เกิดการผิดเฟสในทางอัตราขยายและดีเลย์พร้อมกัน ในกรณีที่เกิดความผิดเฟสทั้งสองแบบ ค่ายอดทั้งบวกและลบมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความผิดเฟสในทางอัตราขยายและดีเลย์พร้อมกัน

เมื่อความผิดเฟสมีค่าน้อย ดังนั้นผลคูณของ $y_1 y_2$ สามารถตัดทิ้งได้สมการ (2.35) และ (2.36) อาจเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$A \cong \frac{1 - (y_1 + y_2)}{1 + (y_1 + y_2)} \dots (2.42)$$

$$\tau \cong \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} \left(1 + \frac{8y_1 y_2}{1 - (y_1 + y_2)^2} \right) \dots (2.43)$$

และถ้า $(y_1 + y_2)^2 \ll 1$ ความผิดเฟสทางด้านดีเลย์อาจเขียนได้ใหม่ คือ

$$\tau \cong \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} (1 + 8y_1 y_2) \cong \frac{2T_0}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{-4y_1 y_2}$$

$$\tau \cong \frac{4T_0}{\pi} \sqrt{-y_1 y_2} \dots (2.44)$$

ความผิดเฟสในทางอัตราขยายคำนวณด้วยสมการ (2.35) และ (2.42) จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากและความผิดเฟสทางด้านดีเลย์เมื่อคำนวณด้วยสมการ (2.37) และ (2.44) ค่าที่ได้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อผลคูณ $y_1 y_2$ มีค่าน้อย ในกรณีที่ y_1 และ y_2 มีค่าไม่เกิน 10 %

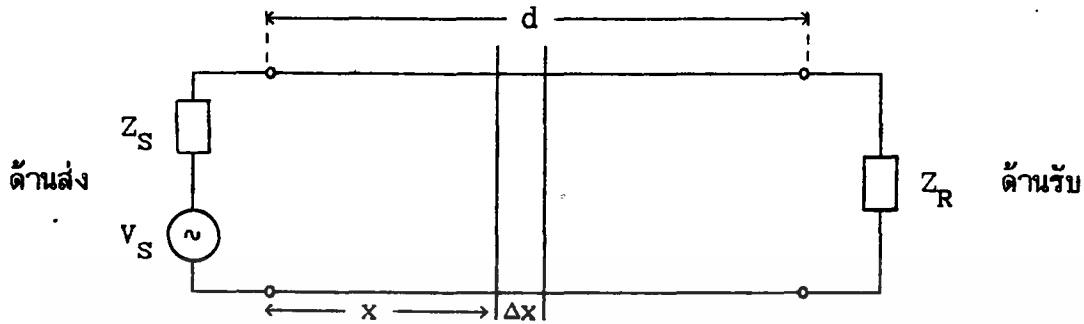
บทที่ 3 คิสรวิวิทอช

เทคโนโลยีสมัยใหม่ไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการออกแบบวงจรโดยใช้ลุ่มดอลิเมนต์ (Lumped Element) แบบพาสซีฟ (Passive) หรือแบบแอคทีฟ (Active) เท่านั้น แต่ยังนำไปใช้ในการออกแบบวงจรที่มีส่วนประกอบเป็นคิสรวิวิทอช (Distributed RC) [11,12,14] โดยใช้เทคโนโลยี Thick-Film หรือ Thin-Film ในการผลิตไอซี (Integrated Circuit) เนทเวอรแบบคิสรวิวิทอชยังมีคุณลักษณะทั่ว ๆ ไปที่ดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่าเนทเวอรแบบลุ่มดอช ซึ่งทำให้การออกแบบวงจรเนทเวอรคิสรวิวิทอชสามารถจะนำไปใช้ได้ง่ายและถูกต้องตามหลักเศรษฐศาสตร์

เนทเวอรแบบคิสรวิวิทอชมีด้วยกันหลายแบบ ตัวอย่างเช่นอาจจะเป็นโครงสร้าง Thin-Film แบบ Multi-Layer ที่มีชั้นของตัวนำ (Conductor), ความต้านทาน (Resistive) และฉนวน (Dielectrics) ประกอบติดเข้าด้วยกัน โดยชั้นของความต้านทานและตัวนำอาจจะมีจุดต่อออกมาหลายจุดที่ขอบทางด้านข้าง คิสรวิวิทอชอาจอยู่ในรูปแบบที่เป็น Multi-Contacted P-N Junction ซึ่งตัวความต้านทานจะใช้ส่วนประกอบของเซมิคอนดัคเตอร์ และตัวเก็บประจุจะใช้ผลของไบแอสที่จั้งคั้ง สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคิสรวิวิทอชใช้หลักการเดียวกันกับของสายส่ง (Transmission Line) พร้อมทั้งเปรียบเทียบโครงสร้างและพารามิเตอร์ระหว่างเนทเวอรแบบลุ่มดและแบบคิสรวิวิท

3.1 สายส่ง (Transmission Lines)

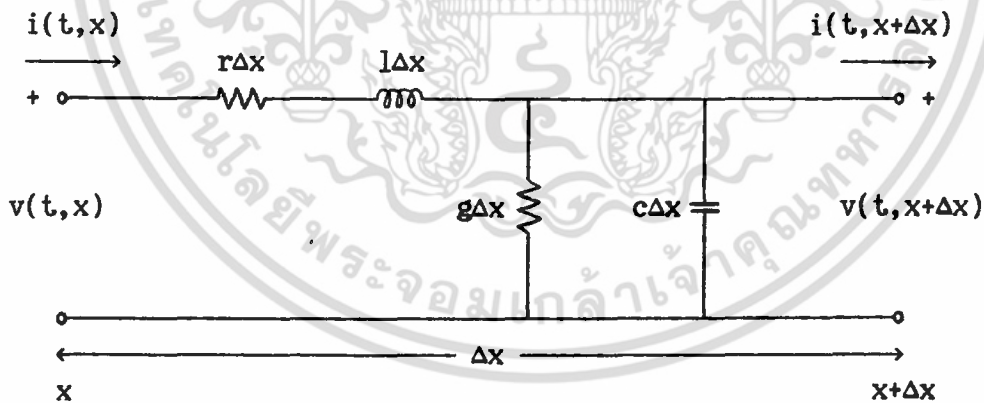
การส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า และการส่งสัญญาณข่าวสารต่าง ๆ จะใช้สายเคเบิล (Cable) สายเคเบิลหรือสายส่ง (Transmission Line) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านก็จะทำงานเหมือนกับว่ามีอินดัคแตนซ์ l , คาปาซิแตนซ์ c , รีซิสแตนซ์ r และ คอนดัคแตนซ์ g กระจายอยู่ตลอดภายในสาย สายส่งที่มีค่าพารามิเตอร์ l, c, r, g ไม่มีความสัมพันธ์กับระยะทางจากด้านส่งเรียกว่าสายส่งแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Transmission Line) ถ้าให้สายส่งสัญญาณจากด้านส่งไปยังด้านรับ ณ ที่ห่างจากด้านส่งเป็นระยะ x มีขนาดย่อย ๆ เป็น Δx ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สายส่งสัญญาณ

เมื่อขยาย Δx ออกไปจะได้วงจรเสมือน [14] ตามรูปที่ 3.2 ซึ่ง $v(t,x), i(t,x)$ จะเป็นศักดา และกระแสที่จุด x ตามลำดับ โดยมีค่า Distributed Parameter ต่าง ๆ ดังนี้

- r : Resistance [ohm/meter]
- l : Inductance [henries/meter]
- g : Conductance [mhos/meter]
- c : Capacitance [farads/meter]



รูปที่ 3.2 ส่วนขยายของ Δx ในสายส่ง

จากรูปที่ 3.2 โดยใช้กฎแรงดันและกระแสของ Kirchhoff's สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v(t, x + \Delta x) - v(t, x) \approx -\Delta x \left(l \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} + ri(t, x) \right) \quad \dots(3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i(t, x+\Delta x) - i(t, x) \approx \Delta x \left(c \frac{\partial v(t, x+\Delta x)}{\partial t} + gv(t, x+\Delta x) \right) \quad \dots(3.2)$$

จากสมการ (3.1) , (3.2) เมื่อกำหนดให้ลิมิตของ Δx เข้าใกล้ศูนย์ จะได้สมการ Partial Differential คือ

$$\frac{\partial v(t, x)}{\partial x} = -l \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} - ri(t, x) \quad \dots(3.3)$$

$$\frac{\partial i(t, x)}{\partial x} = -c \frac{\partial v(t, x)}{\partial t} - gv(t, x) \quad \dots(3.4)$$

จาก $v(t, x)$ และ $i(t, x)$ ทำการ Take Laplace Transform จะได้

$$V(s, x) = \mathcal{L} [v(t, x)] = \int_0^{\infty} v(t, x) e^{-st} dt \quad \dots(3.5)$$

$$I(s, x) = \mathcal{L} [i(t, x)] = \int_0^{\infty} i(t, x) e^{-st} dt$$

เมื่อหาอนุพันธ์สมการ (3.5) เทียบกับ x จะได้

$$\mathcal{L} \left(\frac{\partial v(t, x)}{\partial x} \right) = \int_0^{\infty} \frac{\partial v(t, x)}{\partial x} e^{-st} dt = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} v(t, x) e^{-st} dt = \frac{\partial V(s, x)}{\partial x} \quad \dots(3.6)$$

$$\mathcal{L} \left(\frac{\partial i(t, x)}{\partial x} \right) = \int_0^{\infty} \frac{\partial i(t, x)}{\partial x} e^{-st} dt = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} i(t, x) e^{-st} dt = \frac{\partial I(s, x)}{\partial x}$$

โดยการใช้ Laplace Transform สมการ (3.3) , (3.4) จะได้

$$\frac{\partial V(s, x)}{\partial x} = - (ls+r) I(s, x) \quad \dots(3.7)$$

$$\frac{\partial I(s, x)}{\partial x} = - (cs+g) V(s, x) \quad \dots(3.8)$$

เนื่องจากตัวแปรในสมการ (3.7), (3.8) มีเพียงตัวเดียวคือ x จึงเขียน dx แทน ∂x แล้วจะได้

$$\frac{d}{dx} V(s, x) = - (ls+r) I(s, x) \quad \dots(3.9)$$

$$\frac{d}{dx} I(s,x) = - (cs+g) V(s,x) \quad \dots(3.10)$$

ถ้าหาอนุพันธ์สมการ (3.9), (3.10) เทียบกับ x เมื่อ r, l, c และ g เป็นค่าคงที่จะได้

$$\frac{d^2}{dx^2} V(s,x) = - (ls+r) \frac{d}{dx} I(s,x) \quad \dots(3.11)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} I(s,x) = - (cs+g) \frac{d}{dx} V(s,x) \quad \dots(3.12)$$

โดยการแทนค่าสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.11) และแทนค่าสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.12) จะได้สมการของ Uniform Transmission Line คือ

$$\frac{d^2}{dx^2} V - (ls+r)(cs+g) V = 0 \quad \dots(3.13)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} I - (ls+r)(cs+g) I = 0 \quad \dots(3.14)$$

สมการ (3.13) , (3.14) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$V(s,x) = A_1 \cosh \Gamma x + A_2 \sinh \Gamma x \quad \dots(3.15)$$

$$I(s,x) = B_1 \cosh \Gamma x + B_2 \sinh \Gamma x \quad \dots(3.16)$$

เมื่อ Γ เป็นสภาวะการแพร่กระจายของคลื่น (Propagation Function) โดยมีค่าดังนี้

$$\Gamma = \sqrt{(ls+r)(cs+g)} \quad \dots(3.17)$$

สำหรับเทอม A_1, A_2, B_1, B_2 เป็นค่าคงที่ และสามารถกำหนดได้คือ สำหรับสายส่ง (Transmission Line) ที่มีความยาวเท่ากับ d ซึ่งจะเป็นเน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ต โดยทางอินพุตจะเป็น $V(s,0)$, $I(s,0)$ และทางเอาต์พุตเป็น $V(s,d)$, $I(s,d)$ จากสมการ (3.15), (3.16) ที่ $x = 0$ จะได้

$$A_1 = V(s,0) \quad \dots(3.18)$$

$$B_1 = I(s,0) \quad \dots(3.19)$$

ถ้าหาอนุพันธ์สมการ (3.15) , (3.16) เทียบกับ x และแทนค่าลงในสมการ (3.9) , (3.10) กำหนดให้ $x = 0$ จะได้

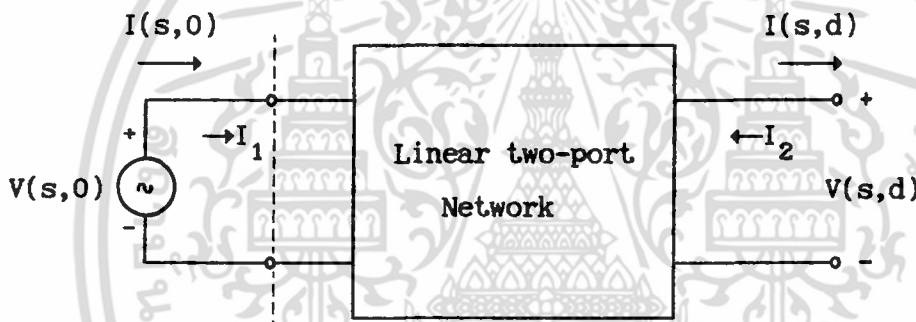
$$A_2 = - \sqrt{\frac{ls+r}{cs+g}} I(s,0) = - Z_0 I(s,0) \quad \dots(3.20)$$

$$B_2 = - \sqrt{\frac{cs+g}{ls+r}} V(s,0) = - \frac{V(s,0)}{Z_0} \quad \dots(3.21)$$

เมื่อ Z_0 เป็นคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของ Uniform Line

$$Z_0 = \sqrt{\frac{ls+r}{cs+g}} \quad \dots(3.22)$$

จะนำอินพุตและเอาต์พุตของสายส่งที่ได้จากสมการ (3.15) ถึงสมการ (3.22) สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.3

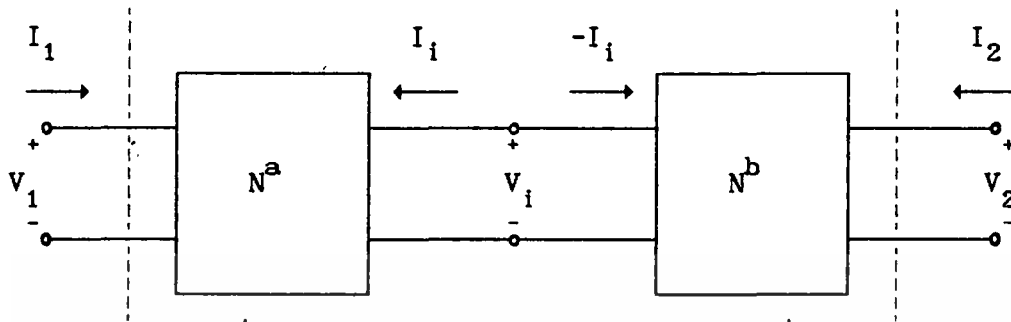


รูปที่ 3.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของสายส่ง

สำหรับเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.3 สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์ ABCD ในรูปของแมทริกซ์ได้ดังในสมการ (3.23) โดยที่ $V(s,0)$ และ $I(s,0)$ เป็นแรงดันและกระแสของพอร์ท 1 เขียนเป็น V_1, I_1 และ $V(s,d), I(s,d)$ เป็นแรงดันและกระแสของพอร์ท 2 เขียนเป็น $V_2, -I_2$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad \dots(3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงการคาส์เคดของเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.3

ถ้านำเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.3 สองชุดมาคาส์เคดกันดังในรูปที่ 3.4 ผลรวมทั้งหมดจะได้เป็นสมการ ABCD แมทริกซ์ คือ

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^a & B^a \\ C^a & D^a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^b & B^b \\ C^b & D^b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \dots(3.24)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A &= A^a A^b + B^a C^b & B &= A^a B^b + B^a D^b \\ C &= C^a A^b + D^a C^b & D &= C^a B^b + D^a D^b \end{aligned}$$

ถ้าแทนสมการ (3.18) ถึง (3.21) ลงในสมการ (3.15), (3.16) และแปลงค่าพหามิเตอร์ของแมทริกซ์เป็น Inverse Transmission Matrix จะได้สมการของ Uniform Line คือ

$$\begin{pmatrix} V(s,d) \\ -I(s,d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \Gamma d & Z_0 \sinh \Gamma d \\ \frac{\sinh \Gamma d}{Z_0} & \cosh \Gamma d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V(s,0) \\ -I(s,0) \end{pmatrix} \dots(3.25)$$

ในทำนองเดียวกัน โดยการแปลงค่าพหามิเตอร์ของแมทริกซ์ไปเป็นพหามิเตอร์ของ Open-Circuit Impedance และพหามิเตอร์ของ Short-Circuit Admittance จะได้ดังนี้

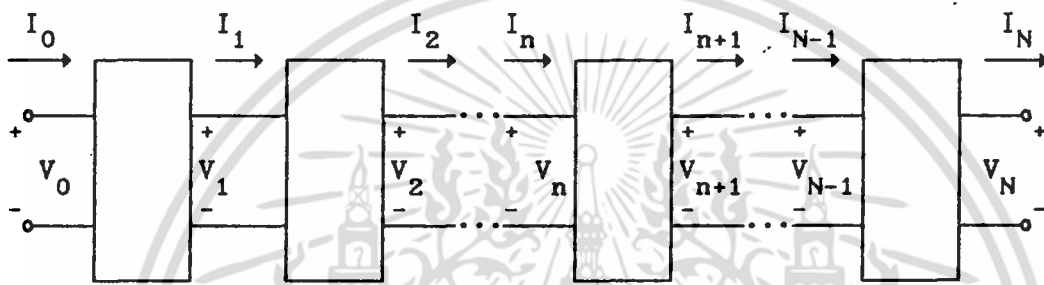
$$[Z] = Z_0 \begin{pmatrix} \coth \Gamma d & \operatorname{csch} \Gamma d \\ \operatorname{csch} \Gamma d & \coth \Gamma d \end{pmatrix} \dots(3.26)$$

$$[Y] = \frac{1}{Z_0} \begin{pmatrix} \coth \Gamma d & -\operatorname{csch} \Gamma d \\ -\operatorname{csch} \Gamma d & \coth \Gamma d \end{pmatrix} \dots(3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โครงสร้างของลัมด์พารามิเตอร์

การประมาณโครงสร้างแบบลัมด์ (Lumped) เทียบกับ โครงสร้างแบบดิสทริบิวท์ (Distributed) จะต้องใช้เน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ตที่เหมือนกันจำนวนหลายชุดประกอบเข้าด้วยกันดังในรูปที่ 3.5 โดยที่แต่ละชุดต้องมีขนาดเล็กและมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับ 1 หน่วยความยาว จำนวนชุดของลัมด์ที่พอเพียงที่จะแสดงคุณสมบัติของดิสทริบิวท์เน็ตเวิร์กขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงที่เราต้องการ และช่วงความถี่ที่ใช้ในเทอม Time Constant ของสาย ถ้าเป็นไปได้เราจะต้องใช้จำนวนชุดของลัมด์ให้มีจำนวนเข้าใกล้ Infinity จึงจะได้โครงสร้างแบบดิสทริบิวท์



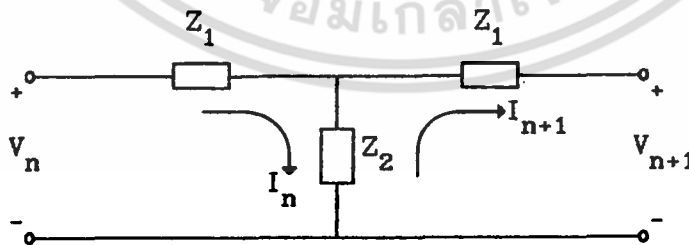
รูปที่ 3.5 2-Port Network Model

สำหรับสายส่งแบบ Uniform ที่มีความยาวจำกัดสามารถประมาณโดยใช้โครงสร้างของลัมด์แบบ 2 พอร์ตจำนวนหลาย ๆ ชุด ดังในรูปที่ 3.5 ในส่วนหนึ่งของสายโดยให้มีโครงสร้างแบบ T ซึ่งเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สมมติสภาวะเริ่มต้นให้เท่ากับศูนย์ จากวงจรโดยการหาสมการ Mesh จะได้

$$(Z_1 + Z_2)I_n - Z_2 I_{n+1} = V_n \quad \dots(3.28)$$

$$Z_2 I_n - (Z_1 + Z_2)I_{n+1} = V_{n+1} \quad \dots(3.29)$$

เมื่อ $n = 0, 1, \dots, N-1$



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของ T-Network

จากสมการ (3.28), (3.29) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูป Recurrence Form คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & - \left(\frac{Z_1^2}{Z_2} + 2Z_1 \right) \\ - \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} \quad \dots(3.30)$$

สมการ (3.30) สามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้คือ

$$[X_{n+1}] = [M] [X_n] \quad \dots(3.31)$$

เมื่อ

$$[M] = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & - \left(\frac{Z_1^2}{Z_2} + 2Z_1 \right) \\ - \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix} \quad \dots(3.32)$$

$$[X_{n+1}] = \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} \quad \text{และ} \quad [X_n] = \begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} \quad \dots(3.33)$$

จากสมการ (3.31) สามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$[X_n] = [M]^n [X_0] \quad \dots(3.34)$$

เมื่อกำหนดให้ $[M]^n$ หาได้จาก Eigenvalues ของ $[M]$ ค่า Eigenvalues เป็นรากของสมการคุณลักษณะ [21] นั่นคือ

$$\det [M] - \lambda [1] = \lambda^2 - 2\lambda \left(\frac{Z_1}{Z_2} + 1 \right) + 1 = 0 \quad \dots(3.35)$$

เมื่อ $[I]$ คือ Identity หรือ Unit Matrix

ค่า Eigenvalues ทั้ง 2 ค่า จากสมการ (3.35) สัมพันธ์กันดังนี้

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1 \quad \dots(3.36)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} + 1 \right) \quad \dots(3.37)$$

จากสมการ (3.36) , (3.37) กำหนดให้ $\lambda_1 = e^\zeta$, $\lambda_2 = e^{-\zeta}$ จะได้ $\cosh \zeta = (Z_1/Z_2)+1$ แล้วหา $[M]^n$ โดยใช้ทฤษฎีของ Cayley-Hamilton โดยให้

$$[M]^n = C_0[I] + C_1[M] \quad \dots(3.38)$$

จะได้

$$(e^\zeta)^n = C_0 + C_1(e^\zeta) \quad \dots(3.39)$$

$$(e^{-\zeta})^n = C_0 + C_1(e^{-\zeta}) \quad \dots(3.40)$$

จากสมการ (3.39),(3.40) จะได้

$$C_0 = -\frac{\sinh(n-1)\zeta}{\sinh \zeta}, \quad C_1 = \frac{\sinh n\zeta}{\sinh \zeta}$$

$$[M]^n = \begin{pmatrix} -\frac{\sinh(n-1)\zeta}{\sinh \zeta} + \frac{\sinh n\zeta \cosh \zeta}{\sinh \zeta} & -\left(\frac{Z_1^2}{Z_2} + 2Z_1\right) \frac{\sinh n\zeta}{\sinh \zeta} \\ -\frac{1}{Z_2} \frac{\sinh n\zeta}{\sinh \zeta} & -\frac{\sinh(n-1)\zeta}{\sinh \zeta} + \frac{\sinh n\zeta \cosh \zeta}{\sinh \zeta} \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

สมการ (3.41) สามารถเขียนได้เป็น

$$-\sinh(n-1)\zeta = -\sinh n\zeta \cosh \zeta + \cosh n\zeta \sinh \zeta \quad \dots(3.42)$$

และ

$$-\left(\frac{Z_1^2}{Z_2} + 2Z_1\right) = Z_2 - Z_2 \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}\right)^2 = Z_2(1 - \cosh^2 \zeta) = -Z_2 \sinh^2 \zeta \quad \dots(3.43)$$

ฉะนั้นจากสมการ (3.32) สามารถเขียนได้ใหม่

$$[M] = \begin{pmatrix} \cosh \zeta & -Z_2 \sinh^2 \zeta \\ -\frac{1}{Z_2} & \cosh \zeta \end{pmatrix} \quad \dots(3.44)$$

และ $[M]^n$ สามารถเขียนได้เป็น

$$[M]^n = \begin{pmatrix} \cosh n\zeta & -Z_2 \sinh \zeta \sinh n\zeta \\ -\frac{\sinh n\zeta}{Z_2 \sinh \zeta} & \cosh n\zeta \end{pmatrix} \quad \dots(3.45)$$

ดังนั้นสมการ (3.34) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh n\zeta & -Z_2 \sinh \zeta \sinh n\zeta \\ -\frac{\sinh n\zeta}{Z_2 \sinh \zeta} & \cosh n\zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ I_0 \end{pmatrix} \quad \dots(3.46)$$

แรงดันและกระแสในชุดที่ n สำหรับกรณีจุดต่อ Open Circuit และ Short circuit สามารถหาได้ดังนี้

สำหรับกรณีเอาที่หัดวงจรได้ $V_N = 0$ จากสมการ (3.46) โดยการแทน n ด้วย N จะได้

$$I_0 = \frac{\cosh N\zeta}{Z_2 \sinh \zeta \sinh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.47)$$

จากสมการ (3.46) และ (3.47) ค่ากระแสและแรงดันในชุดที่ n จะได้

$$I_n = \frac{\cosh (N-n)\zeta}{Z_2 \sinh \zeta \sinh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.48)$$

$$V_n = \frac{\sinh (N-n)\zeta}{\sinh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.49)$$

สำหรับกรณีเอาที่ทวงจรเปิดได้ $I_N = 0$ จากสมการ (3.46) โดยการแทน n ด้วย N จะได้

$$I_0 = \frac{\sinh N\zeta}{Z_2 \sinh \zeta \cosh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.50)$$

จากสมการ (3.46) และ (3.50) ค่ากระแสและแรงดันในชุดที่ n จะได้

$$I_n = \frac{\sinh (N-n)\zeta}{Z_2 \sinh \zeta \cosh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.51)$$

$$V_n = \frac{\cosh (N-n)\zeta}{\cosh N\zeta} V_0 \quad \dots(3.52)$$

สมการ (3.46) เป็น Inverse Transmission Matrix ของเน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ต ผลรวมทั้งหมดสำหรับแมทริกซ์ของเน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ต ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 ที่ชุดที่ N โดยการแทน n ด้วย N และเปลี่ยนเครื่องหมายเพื่อให้เหมือนกับเครื่องหมายพอร์ตทั้งสองในรูปที่ 3.3 จะได้

$$\begin{pmatrix} V_N \\ -I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh N\zeta & Z_2 \sinh \zeta \sinh N\zeta \\ \frac{\sinh N\zeta}{Z_2 \sinh \zeta} & \cosh N\zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ -I_0 \end{pmatrix} \quad \dots(3.53)$$

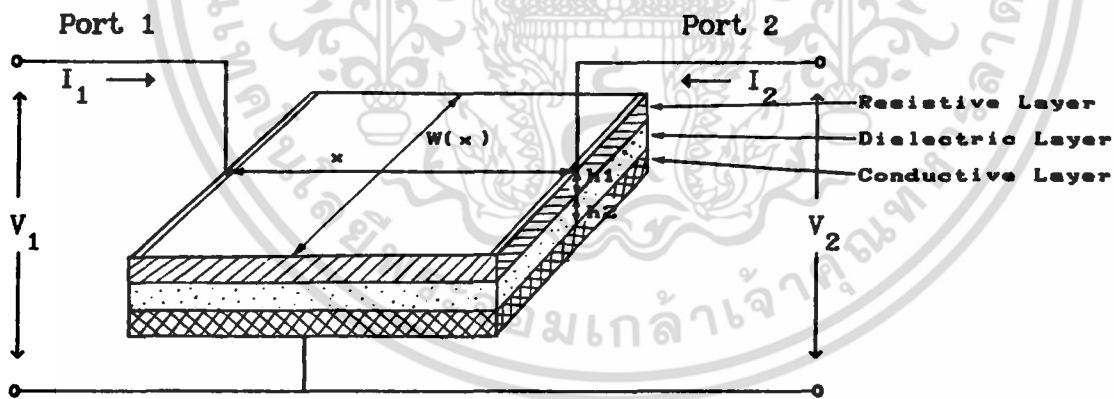
จากสมการ (3.53) ถ้าแปลงเมทริกซ์เป็นพารามิเตอร์ของ Short-Circuit Admittance ซึ่งจะได้

$$[Y] = \frac{1}{Z_2 \sinh \zeta} \begin{pmatrix} \coth N\zeta & -\operatorname{csch} N\zeta \\ -\operatorname{csch} N\zeta & \coth N\zeta \end{pmatrix} \dots(3.54)$$

จากสมการ (3.54) ที่ได้จะเห็นได้ว่าเหมือนกันกับสมการ (3.27) ของเน็ตเวิร์กในแบบ Distributed โดยที่ $Z_2 \sinh \zeta$ เป็นคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของสาย

3.3 โครงสร้างของดิสทริบิวต์อ่าซี

เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวต์อ่าซีสามารถทำให้อยู่ภายใน ไอซี (Passive Integrated Circuit) [11,13] โดยมี 2 พอร์ตและมีโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบกันขึ้นจากส่วนต่าง ๆ ดังนี้ คือ ส่วนบนสุดจะเป็นชั้นของความต้านทาน (Resistive Layer) รองลงมาเป็นชั้นของฉนวน (Dielectric Layer) และชั้นของตัวนำ (Conductive Layer) ความหนาของแต่ละชั้นประมาณ 10^{-5} นิ้ว จึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กมาก (Microcircuits) โดยมีโครงสร้าง 2 อย่างคือ โครงสร้าง Thin-Film และโครงสร้าง Monolithic



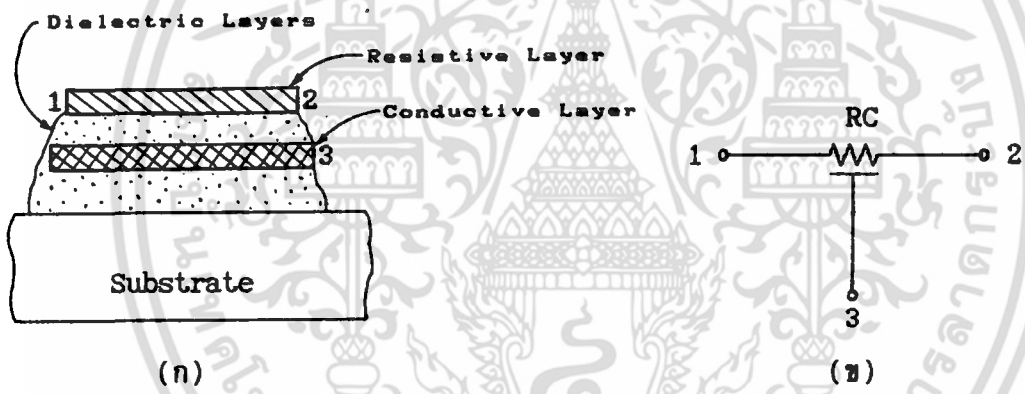
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของ 2 พอร์ต Distributed RC

โครงสร้าง Thin-Film ประกอบด้วยชั้นของวัสดุหลายอย่าง ซึ่งวางอยู่บนตัวกลางที่เหมาะสม (Substrate) ตัวอย่างเช่น แผ่นบาง ๆ ของสาร Dielectric อาจจะถูก Titanate ด้วยแผ่นบางของ Nichrome Resistive Film ซึ่งวางไว้ด้านบน และแผ่น Conductive Copper-Film ที่วางไว้ด้านล่าง หุ้มห่อด้วยสาร Dielectric และอยู่บน

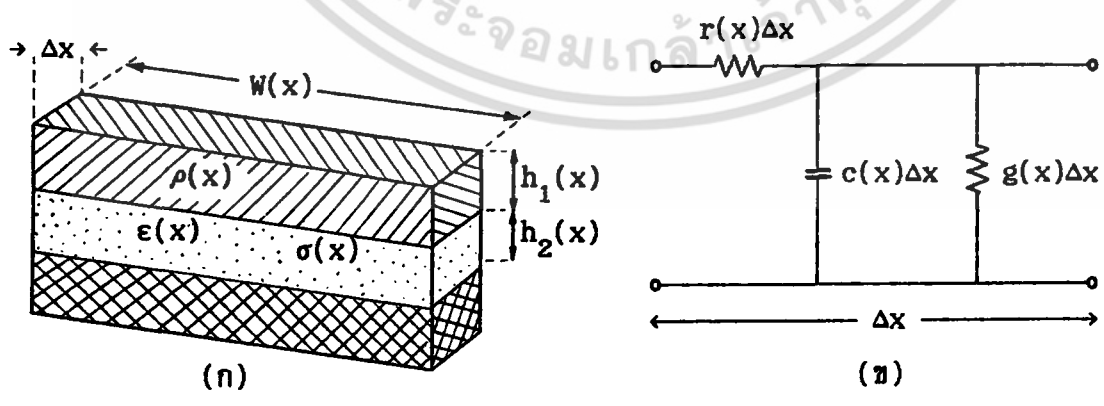
Passive Substrate ด้วยวิธี Vaporization หรือ Electrochemical Technique

โครงสร้าง Monolithic ประกอบด้วยชั้นของสารเซมิคอนดักเตอร์ถูกทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ เช่น Distributed Resistance ได้มาจาก Lightly Doped เซมิคอนดักเตอร์ และ Distributed Capacitance ได้มาจากการป้อนไบแอสกลับข้างของรอยต่อภายใน P-N จังก์ชัน

Microcircuit จะถูกนำมาใช้สำหรับ Distributed RC Active Network การทำงานทางไฟฟ้าจากโครงสร้างขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุและรูปทรงทางเรขาคณิต วิธีการที่จะใช้ในการผลิตขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดของโครงสร้างและคุณลักษณะการทำงาน ตัวอย่างโครงสร้างของวงจร Uniform Distributed RC [5] ซึ่งอยู่ภายในไอซีแสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) และมีสัญลักษณ์ของวงจรแสดงดังรูปที่ 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของ Uniform Distributed RC



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้าง และวงจรเน็ทเวิร์กของส่วนย่อย Δx ของ Distributed RC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวต์อาชีตามในรูปที่ 3.7 มี 2 พอร์ท ภายใต้เงื่อนไขของ One Dimensional Current Flow เน็ตเวิร์กสามารถถูกแบ่งออกได้เป็นส่วนย่อย ๆ จำนวนเพิ่มทีละส่วนของความยาวเป็น Δx ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ความต้านทานของอิลิเมนต์ที่อนุกรมกันแต่ละส่วนจะเป็นฟังก์ชันตามแผ่นความต้านทานและมิติของอิลิเมนต์ ค่าความต้านทานในแต่ละอิลิเมนต์ $r(x)\Delta x$ ถูกกำหนดให้คือ

$$r(x) \Delta x = \frac{\rho \Delta x}{W h_1} \quad \dots(3.55)$$

เมื่อ ρ และ h_1 คือความต้านทานจำเพาะและความหนาของแผ่นความต้านทานที่ x และ W คือ ความกว้างของอิลิเมนต์ที่ x

ส่วน Shunt Admittance ของอิลิเมนต์สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกัน มันประกอบด้วยค่าประจุและความนำของแผ่น Dielectric ของอิลิเมนต์นั้นคือ

$$c(x) \Delta x = \frac{\epsilon W \Delta x}{h_2} \quad \dots(3.56)$$

$$g(x) \Delta x = \frac{\sigma W \Delta x}{h_2} \quad \dots(3.57)$$

เมื่อ ϵ และ σ คือ Permittivity และ Conductivity ของแผ่น Dielectric และ h_2 คือความหนาของแผ่น Dielectric ที่ x

ถ้าให้ลิมิตของ Δx เข้าใกล้ศูนย์ ค่าความต้านทาน, ค่าประจุ และความนำ ต่อหน่วยความยาวจะได้

$$r(x) = \frac{\rho}{W h_1} \quad \dots(3.58)$$

$$c(x) = \frac{\epsilon W}{h_2} \quad \dots(3.59)$$

$$g(x) = \frac{\sigma W}{h_2} \quad \dots(3.60)$$

ค่าของ $r(x)$, $c(x)$ และ $g(x)$ จะเป็นจำนวนจริง (Real) มีเครื่องหมายเป็นบวกและมีค่าจำกัด (finite) ข้อกำหนดนี้มีความสำคัญในการพิจารณาถึงธรรมชาติของผลลัพธ์สำหรับสมการ Differential ซึ่งแสดงคุณสมบัติได้จากเน็ตเวิร์ก เน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ทของ Distributed RC โดยมีลักษณะเหมือนกับในรูปที่ 3.9(ข) ถ้าพิจารณาพารามิเตอร์ r, c และ g เราจะได้ว่าในขณะที่ความสูญเสียของการรั่วไหล (leakage) ของความนำ $g(x)$ ใน

Dielectric มีค่าน้อยเป็นที่ยอมรับได้ เมื่อค่า Conductance มีค่าน้อยกว่า Capacitance มาก ๆ จะสามารถตัดค่า g ทิ้งได้คือให้ g มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะได้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาซี ถ้า r และ c ไม่แปรเปลี่ยนตามความยาวของ x จะเป็นแบบ Uniform Distributed RC ในกรณีเดียวกันถ้า r และ c แปรเปลี่ยนตามความยาวของ x จะเป็นแบบ Nonuniform Distributed RC โดยสัญลักษณ์เน็ตเวิร์กแบบ Nonuniform Distributed RC แสดงในรูปที่ 3.10 (ก) ในขณะที่เส้นโค้งบ่งบอกถึงเป็น Nonuniform ถ้าเส้นได้ R เป็นเส้นตรงจะเป็นเน็ตเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ข)



รูปที่ 3.10 แสดงสัญลักษณ์ของ Distributed RC

สำหรับกรณีเน็ตเวิร์กที่เป็นแบบ Nonuniform Distributed RC ซึ่งภายในเป็นฟังก์ชันตามระยะความยาวของ x ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแส จากสมการ (3.9), (3.10) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{d}{dx} V(s,x) = -r(x) I(s,x) \quad \dots(3.61)$$

$$\frac{d}{dx} I(s,x) = -sc(x) V(s,x) \quad \dots(3.62)$$

ถ้าหาอนุพันธ์สมการ (3.61), (3.62) เทียบกับ x จะได้

$$\frac{d^2}{dx^2} V(s,x) = -r(x) \frac{d}{dx} I(s,x) - I(s,x) \frac{d}{dx} r(x) \quad \dots(3.63)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} I(s,x) = -sc(x) \frac{d}{dx} V(s,x) - sV(s,x) \frac{d}{dx} c(x) \quad \dots(3.64)$$

โดยการแทนค่าสมการ (3.61) และ (3.62) ลงในสมการ (3.63) และ (3.64) แล้วจัดสมการใหม่โดยพิจารณาเทอมต่าง ๆ ในรูปของแรงดันและกระแสจะได้

$$V'' - \frac{r' V'}{r} - r sc V = 0 \quad \dots(3.65)$$

$$I'' - \frac{c' I'}{c} - r sc I = 0 \quad \dots(3.66)$$

เมื่อเครื่องหมาย prime แสดงถึงการหาอนุพันธ์เทียบกับ x โดยที่ $r(x)$ และ $c(x)$ เป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของ x ดังนั้นสมการของ Nonuniform Distributed RC สามารถเขียนได้คือ

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{d}{dx} V \right) - sc(x) V = 0 \quad \dots(3.67)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{sc(x)} \frac{d}{dx} I \right) - r(x) I = 0 \quad \dots(3.68)$$

สำหรับกรณีเน็ทเวิร์กแบบ Uniform Distributed RC ซึ่งค่า r และ c ไม่แปรเปลี่ยนตามค่าของ x ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสจะเหมือนกันกับสมการ (3.25) ของ Uniform Line โดยให้ Inductance (l) และ Conductance (g) มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับสายที่มีช่วงความยาว d จะได้ผลรวมของความต้านทานทั้งหมด R เท่ากับ rd และ ผลรวมของค่าประจุทั้งหมด C เท่ากับ cd ฉะนั้นจากสมการ (3.26) และ (3.27) ตัว Uniform Distributed RC สามารถเขียนอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ความต้านทาน (Impedance Parameter) และพารามิเตอร์ความนำ (Admittance Parameter) ได้คือ

$$[Z] = \sqrt{\frac{R}{SC}} \begin{pmatrix} \coth \sqrt{SRC} & \operatorname{csch} \sqrt{SRC} \\ \operatorname{csch} \sqrt{SRC} & \coth \sqrt{SRC} \end{pmatrix} \quad \dots(3.69)$$

และ

$$[Y] = \sqrt{\frac{SC}{R}} \begin{pmatrix} \coth \sqrt{SRC} & -\operatorname{csch} \sqrt{SRC} \\ -\operatorname{csch} \sqrt{SRC} & \coth \sqrt{SRC} \end{pmatrix} \quad \dots(3.70)$$

บทที่ 4

การออกแบบวงจรแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาชี

การสังเคราะห์วงจรแอกทีฟ (Active) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยทั่วไปจะใช้ฮอปแอมป์ร่วมกับพาสซีฟอีลิเมนต์ R กับ C เราเรียกวางจรดังกล่าวนี้ว่าแอกทีฟอาชี เมื่อเปรียบเทียบกับการสังเคราะห์วงจรพาสซีฟ (Passive) ซึ่งใช้อีลิเมนต์ R, C และ L แล้ว จะเห็นได้ว่าวงจรแอกทีฟอาชีมีข้อดีที่ว่า มีน้ำหนักน้อย ไม่ต้องการพื้นที่มาก และสามารถทำเป็นรูปแบบย่อเล็ก ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีของ Integrated Circuit เมื่อทำเป็น Mass-Product แล้วราคาก็ไม่แพงมีขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งวงจรที่มี Inductor (L) ยังต้องทำเป็น Discrete Component ที่ราคายังแพง เมื่อใช้แอกทีฟอาชี เช่น วงจรแบบ Sallen and Key [10] ในการสร้างวงจรกรองความถี่ ถ้าหากนำไปผลิตเป็นไอซีแบบ LSI ที่มีขนาดเล็ก ผลของ Parasitic Capacitors [5] ระหว่างตัวความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) กับ Substrate ของไอซีอาจมีผลทำให้คุณลักษณะของวงจรเปลี่ยนแปลงไป จากที่กล่าวมาแล้ว ในบทนี้จะเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่ และวงจรอควอลไลเซอร์ โดยใช้ฮอปแอมป์ร่วมกับยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชี 2 ตัว ซึ่งเรียกวางจรแบบนี้ว่า วงจรแอกทีฟผลิตทวีบริบทอาชี (Active Distributed RC) โดยวงจรที่ออกแบบได้นั้นนอกจากจะมีข้อดีเหมือนวงจรแอกทีฟอาชีแล้ว ยังมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ดี สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็กโดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวท์อาชีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูง นอกจากนี้วงจรแอกทีฟผลิตทวีบริบทอาชีที่ออกแบบได้นี้ยังมีค่าพารามิเตอร์ α ซึ่งสามารถกำหนดค่าของผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาหาค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ในวงจรและช่วงเสถียรภาพของวงจรที่ออกแบบได้

4.1 เสถียรภาพของระบบ

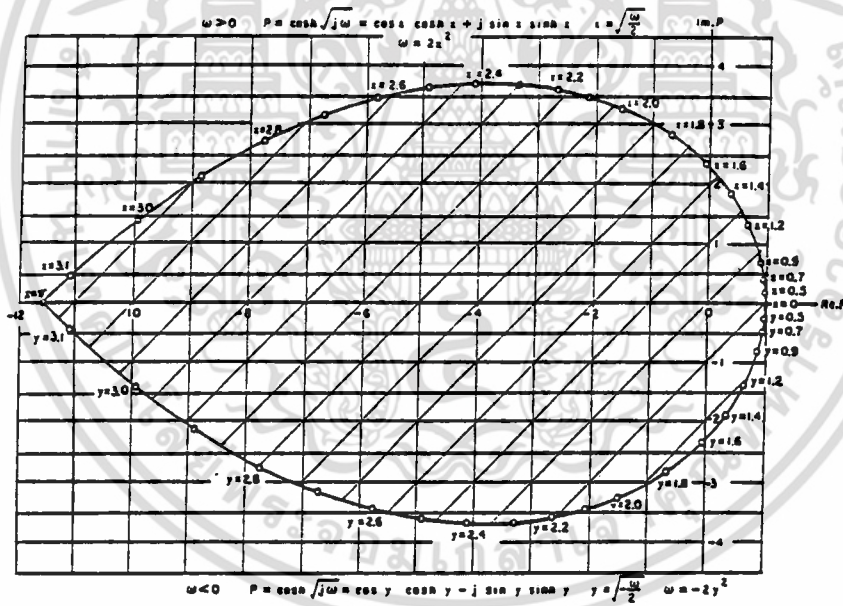
การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร Active Distributed RC โดยทั่วไปเสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับตำแหน่งรากของสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) วิธีที่สะดวกในการวิเคราะห์หาเสถียรภาพของ Active Distributed RC จะใช้เทคนิคของ Root-Locus [11] มาช่วย ในระบบที่ประกอบด้วย Active devices และ Uniform Distributed RC เพื่อความสะดวกอาจแปลงให้อยู่ในรูปของ P-Plane ซึ่งจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(P) = \frac{N(P)}{D(P)} = \frac{N_0 + N_1P + N_2P^2 + \dots + N_nP^n}{D_0 + D_1P + D_2P^2 + \dots + D_mP^m} \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ $N(P)$ และ $D(P)$ เป็นโพลีโนเมียลของตัวเศษ และโพลีโนเมียลของตัวส่วนตามลำดับ ซึ่งอยู่ในรูปของ P -Plane

ฉะนั้น โดยการแปลงทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน ในสมการ (4.1) ให้เป็นฟังก์ชันของ P เสถียรภาพของระบบจะสามารถหาได้จาก Root-Locus ใน P -Plane ข้อกำหนดในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบคือจะต้องมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน ในรูปของ $P = \cosh \sqrt{SRC}$ และอันดับของตัวเศษ (Numerator) จะต้องไม่มากกว่าอันดับของตัวส่วน (Denominator) และทุก ๆ โพล (All Poles) ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันจะต้องอยู่ภายใน Region ของ P -Plane [6,7] เมื่อ $P = \cosh \sqrt{SRC}$ โดยที่ $-20 \leq \omega \leq 20$ สำหรับใน $j\omega$ -axis ส่วนที่เสถียรภาพใน P -Plane จะแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนที่เสถียรภาพซึ่งอยู่ภายใน Region ของ P -Plane

สมมติพิจารณาระบบที่มีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันคือ

$$T(P) = \frac{1}{P + M} \quad \dots(4.2)$$

เมื่อ $P = \cosh \sqrt{SRC}$ และ M เป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยให้ $RC = 1$ และหา Root-Locus ในสมการ (4.2) เมื่อเปลี่ยนค่า ω ระหว่าง -20 ถึง 20 จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า กรณีที่ $M < 0$ ค่า Locus จะไปทางด้านขวาของ P-Plane และเมื่อ M มีค่าน้อยกว่า -1 ค่า Locus จะผ่านจุด (1,0) จึงทำให้อยู่ด้านนอกของ Region ทำให้ระบบจะไม่เสถียรภาพ กรณีที่ $M > 0$ ค่า Locus จะไปทางด้านซ้ายของ P-Plane และเมื่อ M มีค่ามากกว่า 11.59 ค่า Locus จะผ่านจุด (-11.59,0) ไปอยู่ด้านนอกของ Region ทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ ดังนั้นในระบบที่จะยังคงรักษาเสถียรภาพค่าของตัวแปร M จะต้องอยู่ในช่วง $-1 \leq M \leq 11.59$

ค่าราก (Dominant Poles) ของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.2) เมื่อแปลงให้อยู่ใน S-Plane จะเป็นในรูป Parabolic Locus [9] คุณสมบัติของวงจรถัดที่จะเสถียรภาพใน S-Plane นั้น ราก (Dominant Poles) ของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันจะต้องอยู่ในครึ่งซ้ายของ S-Plane การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร Active Distributed RC ใน S-Plane จะต้องทำการแปลงทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันให้อยู่ใน S-Plane [8] จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.2) สามารถทำได้โดยการกำหนดดังนี้

$$\cosh\sqrt{SRC} + M = 0 \quad \dots(4.3)$$

แทนค่า $\cosh\sqrt{SRC} = (e^{\sqrt{SRC}} + e^{-\sqrt{SRC}}) / 2$ ลงในสมการ (4.3) จะได้

$$(e^{\sqrt{SRC}})^2 + 2Me^{\sqrt{SRC}} + 1 = 0 \quad \dots(4.4)$$

จากสมการ (4.4) จะได้

$$e^{\sqrt{SRC}} = -M + \sqrt{M^2 - 1} = |r| e^{j(\theta + 2n\pi)} \quad \dots(4.5)$$

ฉะนั้นจากสมการ (4.3) จะได้ค่ารากใน S-Plane คือ

$$s_n = \frac{1}{RC} \left[\ln \left| -M + \sqrt{M^2 - 1} \right| + j \left(\frac{-M + \sqrt{M^2 - 1}}{|r|} + 2n\pi \right) \right]^2 \quad \dots(4.6)$$

เมื่อ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

จากสมการ (4.6) จะเห็นได้ว่าเมื่อแปลงให้อยู่ใน S-Plane ค่ารากที่ได้จะมีลักษณะกระจายเหมือนอนุกรมเลขคณิต โดยมีค่ารากเริ่มต้นจะอยู่ใกล้แกน $j\omega$ และค่ารากต่อมาจะห่างออกจากแกน $j\omega$ ไปตามลำดับ ถ้ากำหนดให้ $RC = 1$ จะได้ว่า กรณีที่ $M < -1$ ค่ารากใน S-Plane จะเป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นบวกคืออยู่ทางด้านขวาของ S-Plane และกรณีที่ $M > 11.59$ ค่ารากใน S-Plane จะเป็นจำนวนเชิงซ้อนและอยู่ทางด้านขวาของ S-Plane ซึ่งจะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ และเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 ก็คือจะอยู่ภายนอก Region ของ

P-Plane และสำหรับกรณีที่ $-1 \leq M \leq 11.59$ จะทำให้ค่ารากอยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-Plane ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 จะอยู่ใน Region ของ P-Plane โดยที่เมื่อ M อยู่ในช่วง 1 ถึง 11.59 จะได้ $-M + \sqrt{M^2 - 1}$ เป็นจำนวนจริงที่มีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งที่นั่น $\frac{-M + \sqrt{M^2 - 1}}{-M + \sqrt{M^2 - 1}} = -\pi$ และค่ารากที่ได้จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน และเมื่อ M อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 จะได้ $-M + \sqrt{M^2 - 1}$ เป็นจำนวนเชิงซ้อนที่มีเครื่องหมายเป็นลบที่ค่าเท่ากับ $-M + j\sqrt{1 - M^2}$ เพราะฉะนั้น $\ln|-M + \sqrt{M^2 - 1}| = \ln 1 = 0$ และ $\frac{-M + \sqrt{M^2 - 1}}{-M + \sqrt{M^2 - 1}} = \tan^{-1} \frac{-\sqrt{1 - M^2}}{M} = \cos^{-1} -M$ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ของค่ารากที่ได้เป็นจำนวนจริง

4.2 ความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity)

การออกแบบวงจรใด ๆ จะต้องพิจารณาถึงค่าอิลิเมนต์แต่ละตัว เพราะค่าอิลิเมนต์ที่ใช้ งานจริง ๆ แล้วจะไม่มีค่าตรงตามอุดมคติ ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากผลรวมของความคลาดเคลื่อน ของตัวอุปกรณ์ที่เกิดจากกรรมวิธีในการผลิตเอง และคุณลักษณะทางโครงสร้างของอิลิเมนต์ที่เกิด การเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น อุณหภูมิของห้อง, ความชื้น, ความเข้ม ของแสงสว่าง และ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ เหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของ อิลิเมนต์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่อาจเปลี่ยนแปลงไม่ตรงตามที่คำนวณ

เซ็นซิวิตี เป็นค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่เอาต์พุตของวงจรซึ่งเป็นผลมาจากการ แปรผันของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจรเช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวต้านทาน (Resistor), ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor), ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor), ค่าอัตราขยายของทรานซิส เตอร์ และค่าอัตราขยายของออปแอมป์ (Operation Amplifier) ซึ่งแน่นอนว่าวงจรที่มีค่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของเซ็นซิวิตีมากจะมีการแปรผันของพารามิเตอร์ภายในวงจรมีค่ามาก ซึ่ง จะทำให้ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ฉะนั้น โครงสร้างของวงจรที่ดีจึง ควรมีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์แต่ละตัวต่ำ จะทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและยังไม่ต้องเลือกใช้ ค่าของอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงมากเกินความจำเป็น ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

การหาเซ็นซิวิตีในวงจร [16] หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้

$$S_{x_i}^{T(s)} = \frac{x_i}{T(s)} \cdot \frac{\partial T(s)}{\partial x_i} \quad \dots(4.7)$$

เมื่อ x_i แทนค่าของอิลิเมนต์แต่ละตัวในวงจร ถ้าแทน s ด้วย $j\omega$ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $T(s)$ จะได้

$$T(j\omega) = |T(j\omega)| e^{j\theta(\omega)} \quad \dots(4.8)$$

แทนค่าสมการ (4.8) ลงในสมการ (4.7) ค่าฟังก์ชันของเซ็นซิวิตี้ สามารถเขียนได้เป็น

$$S_{x_i}^{T(j\omega)} = \frac{x_i}{|T(j\omega)| e^{j\theta(\omega)}} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(|T(j\omega)| e^{j\theta(\omega)} \right) \quad \dots(4.9)$$

จากสมการ (4.9) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์สามารถเขียนเป็นจำนวนเชิงซ้อนได้คือ

$$S_{x_i}^{T(j\omega)} = \frac{x_i}{|T(j\omega)|} \frac{\partial}{\partial x_i} |T(j\omega)| + jx_i \frac{\partial}{\partial x_i} \theta(\omega) \quad \dots(4.10)$$

จากสมการ (4.10) จะได้ว่า

$$S_{x_i}^{|T(j\omega)|} = \operatorname{Re} S_{x_i}^{T(j\omega)} \quad \dots(4.11)$$

$$S_{x_i}^{\theta(\omega)} = \frac{1}{\theta(\omega)} \operatorname{Im} S_{x_i}^{T(j\omega)} \quad \dots(4.12)$$

โดยที่สมการ (4.11) จะเป็นฟังก์ชันในการหาเซ็นซิวิตี้ของ Magnitude $|T(j\omega)|$ ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$\begin{aligned} S_{x_i}^{|T(j\omega)|} &= \operatorname{Re} \left(\frac{x_i}{T(s)} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} T(s) \right) \quad \dots(4.13) \\ &= \operatorname{Re} \left(x_i \left(\frac{N'(s)}{N(s)} - \frac{D'(s)}{D(s)} \right) \right) \end{aligned}$$

เมื่อ $N(s)$ เป็นโพลีโนเมียลเศษของ $T(s)$

$D(s)$ เป็นโพลีโนเมียลส่วนของ $T(s)$

$$\text{และ } N'(s) = \frac{d}{dx_i} N(s) \quad , \quad D'(s) = \frac{d}{dx_i} D(s)$$

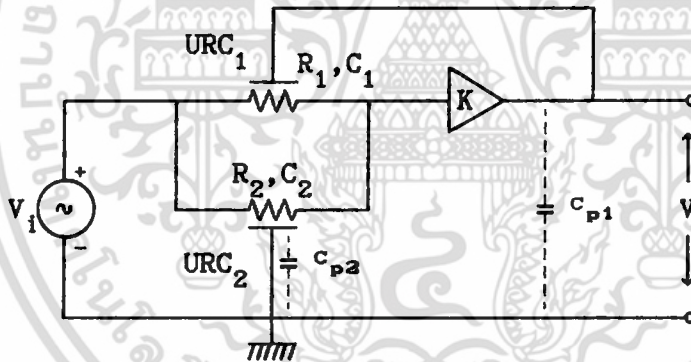
4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟฟิลเตอร์วีทท์ฮาซี

ตัว Uniform Distributed RC หรือใช้ชื่อย่อว่า URC ที่จะใช้ในการออกแบบซึ่งเขียนอยู่ในรูปพารามิเตอร์ความนำ (Admittance Parameter) ในสมการ (3.70) สามารถนำมาเขียนใหม่คือ

$$[Y] = \frac{\sqrt{SRC}}{R \sinh \sqrt{SRC}} \begin{pmatrix} \cosh \sqrt{SRC} & -1 \\ -1 & \cosh \sqrt{SRC} \end{pmatrix} \quad \dots(4.14)$$

เมื่อ R และ C เป็นผลรวมของค่าความต้านทานทั้งหมดและค่าประจุทั้งหมดของ URC S เป็นตัวแปรความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency Variable)

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่เราจะใช้ Op-Amp หรือตัว Amplifier อื่น ๆ เช่น Video Amp จำนวน 1 ตัว ร่วมกับ Uniform Distributed RC จำนวน 2 ตัว โดยในบทนี้จะเสนองานวงจรกรองความถี่ต่ำ 4 แบบ และวงจรกรองความถี่สูง 4 แบบ โดยวงจรกรองความถี่ต่ำในแบบแรกสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์วีทท์ฮาซีแบบที่ 1

เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.2 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots(4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้ว แทนค่าลงในสมการ (4.15) จะได้

$$T(P) = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} - K \right) \cosh P + 1} \quad \dots(4.16)$$

จากสมการ (4.16) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรของความถี่ต่ำดังสมการ (4.17)

$$T(P) = \frac{\alpha + 1}{\cosh P + \alpha} \quad \dots(4.17)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (4.16) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = \frac{\alpha + 1}{-\alpha \cosh P + \alpha} \quad \dots(4.18)$$

วงจรของความถี่ต่ำแบบแยกที่ผลิตสารวิวิทอาซีตามในรูปที่ 4.2 ถ้าจะพิจารณา C_{p1} และ C_{p2} ซึ่งเป็น Parasitic Capacitors [5] ระหว่างแผ่นล่าง (Conductor Plate) และ Substrate ของ URC ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่ Parasitic Capacitance ของแผ่นด้านบน (Top Plate) มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ ค่า Parasitic Capacitor C_{p1} จะอยู่ระหว่างเอาท์พุทของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

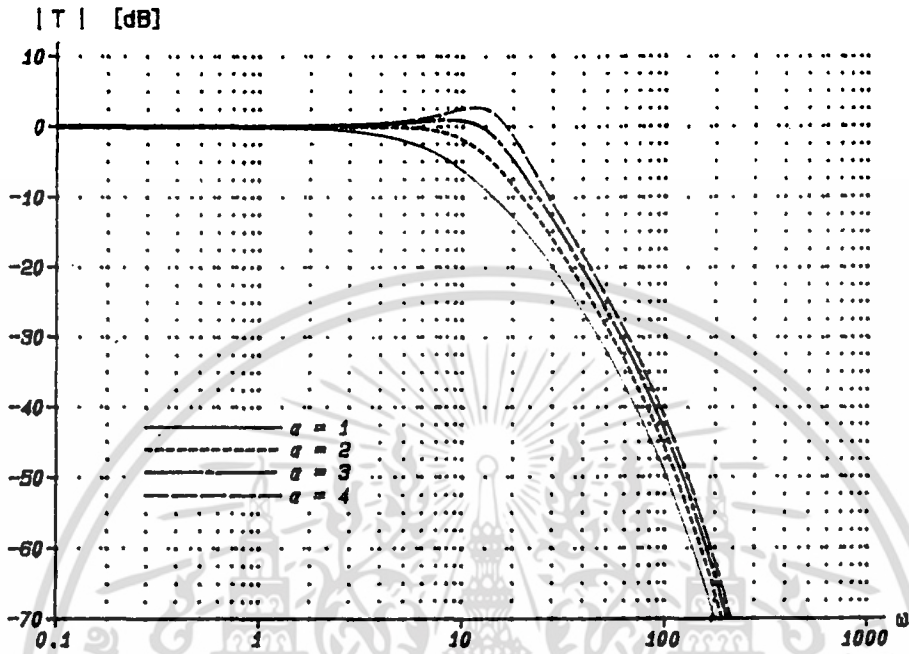
ผลตอบสนองทางความถี่ของสมการ (4.17) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\cosh P = \cosh (t+jt)$$

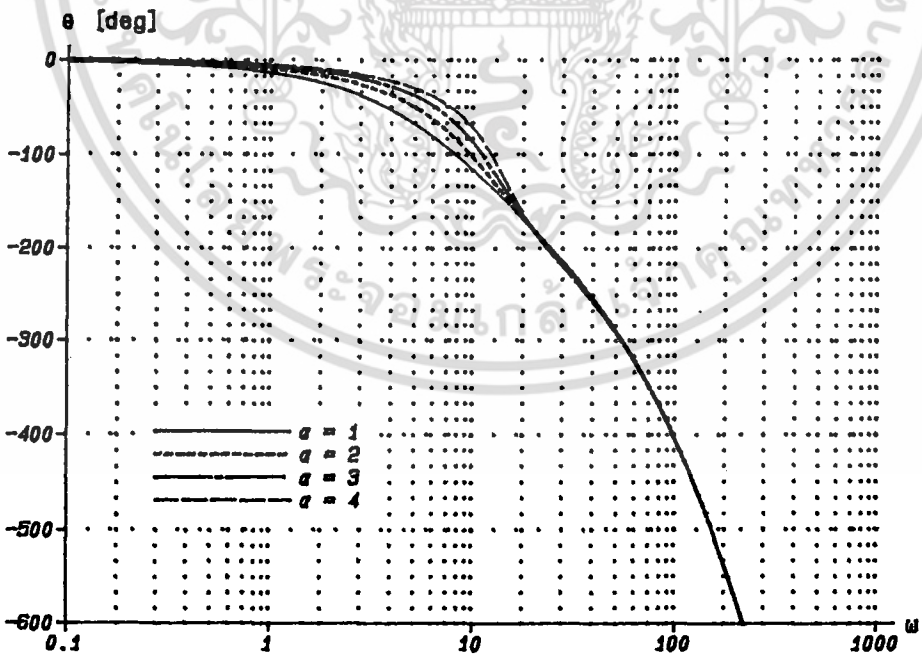
$$\text{โดยที่ } P = \sqrt{j\omega RC} \Big|_{RC=1} = \sqrt{\frac{\omega}{2} + j\sqrt{\frac{\omega}{2}}} = t + jt \quad \text{เมื่อ } t = \sqrt{\frac{\omega}{2}}$$

$$\text{จะได้ } \cosh P = \cosh t \cdot \cos t + j \sinh t \cdot \sin t \quad \dots(4.19)$$

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.17) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $\omega = 6.287, 11.51, 15.927$ และ 19.156 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนไป คือ

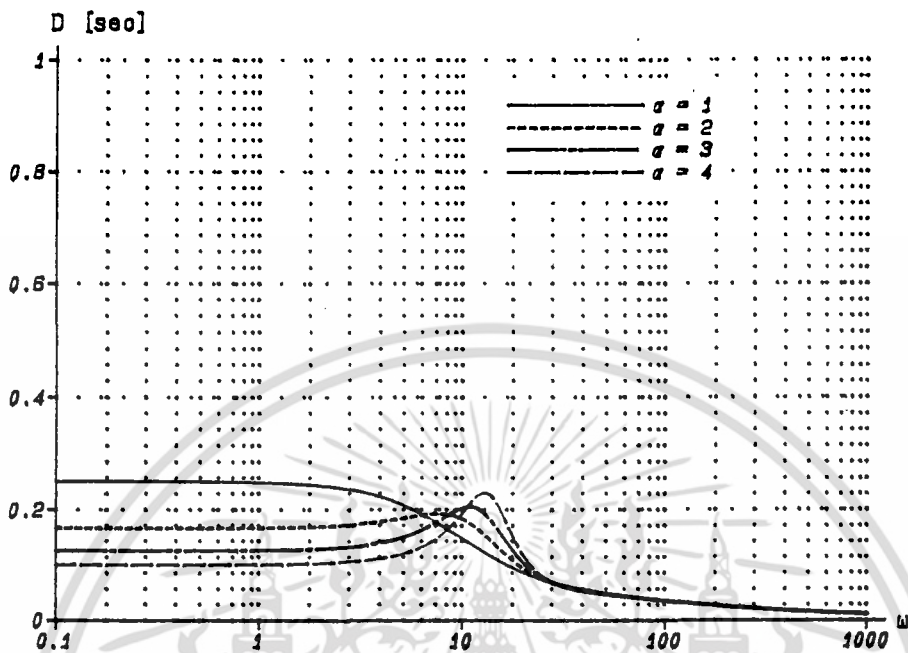


รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนององกร์พดีเลย์

เมื่อค่า α มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดที่ขึ้นในย่านคัทออฟ (Cut-off) และเมื่อ α มีค่ามากกว่า 2 จะทำให้ในช่วงความถี่ผ่าน (Passband) เกิด Ripple ซึ่งคล้าย Chebyshev หรือ Ultraspherical ฟิลเตอร์ [3] จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (4.17) เมื่อนำไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกร์พดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่ α มีค่าต่ำค่าผลตอบสนองของกร์พดีเลย์จะมีลักษณะราบเรียบ

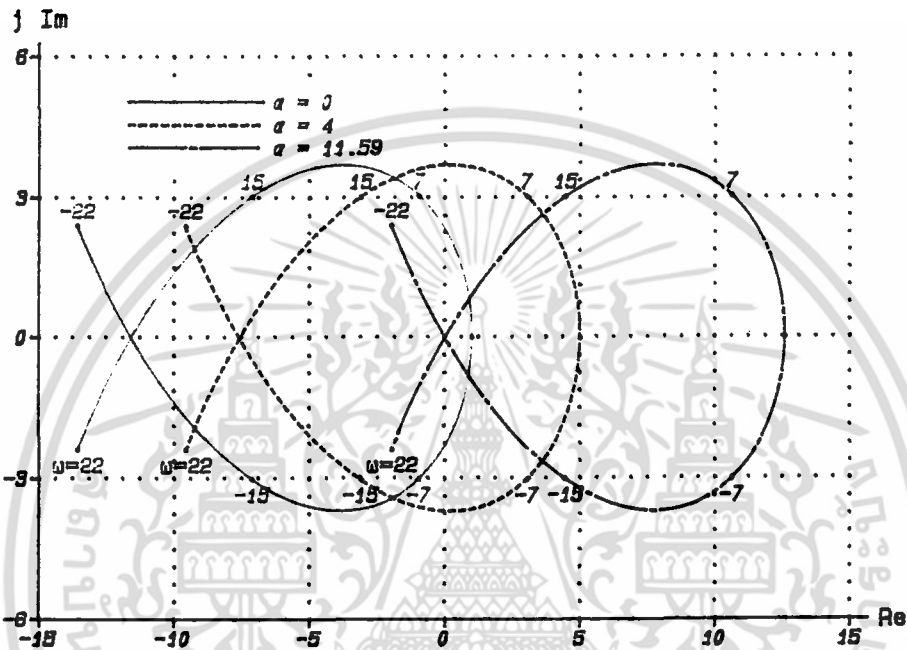
คุณลักษณะของวงจรถัดที่เสถียรภาพนั้นรากของตัวส่วน (Denominator) ของทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันจะต้องอยู่ในครึ่งซ้ายของ S-Plane จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (4.17) เราสามารถหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีในควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram)[7,11] โดยการกำหนด

$$D(P) = Re + j Im \quad \dots(4.20)$$

เมื่อ $D(P)$ เป็นโพลีโนเมียลของตัวส่วน

โดยที่ระบบจะเสถียรภาพเมื่อจุดศูนย์กลาง (Origin) ใน $D(P)$ -Plane ถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางของไนควิสต์พล็อต จากรูปที่ 4.6 แสดงไนควิสต์ไดอะแกรมของสมการ (4.17) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ α มีค่ามากกว่า 11.59 เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอก

จุด Origin ใน D(P)-Plane ในกรณีนี้ระบบจะไม่เสถียรภาพ และนั่นวงจรรองความถี่ต่ำ ในรูปที่ 4.2 ที่กำหนดอัตราขยาย K = 1 จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า α อยู่ระหว่าง 0 ถึง 11.59



รูปที่ 4.6 แสดงไนควิสต์ไดอะแกรม

ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรต่าง ๆ นั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้เมื่อค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์มีค่าสูงจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย และนั่นวงจรที่ตรงความถี่มีความไวของอุปกรณ์ต่ำ จากวงจรในรูปที่ 4.2 เราสามารถหาค่าความไวของอิลิเมนต์ [4, 12] แต่ละตัว R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยาย K มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.15) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh\sqrt{SR_2C_2} + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh\sqrt{SR_1C_1}}{\sinh\sqrt{SR_2C_2} + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh\sqrt{SR_1C_1} \cosh\sqrt{SR_2C_2}} \quad \dots(4.21)$$

จากฟังก์ชันหาเช่นชีวิตัวัดในสมการ (4.13) โดยการแทน X_1 ด้วย R_1 และนั่นจากสมการ(4.21) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{R1}^{T(s)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} (P_1 \cosh P_1 + \sinh P_1)}{\sinh P_2 + \frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} \sinh P_1} - \frac{\frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} \cosh P_2 (P_1 \cosh P_1 + \sinh P_1)}{\sinh P_2 + \frac{R_1 P_2}{R_2 P_1} \sinh P_1 \cosh P_2} \right) \quad (4.22)$$

จากสมการ (4.22) กำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์ R_1 คือ

$$S_{R1}^{T(s)} = - \left(\frac{P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P + 1)}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.23)$$

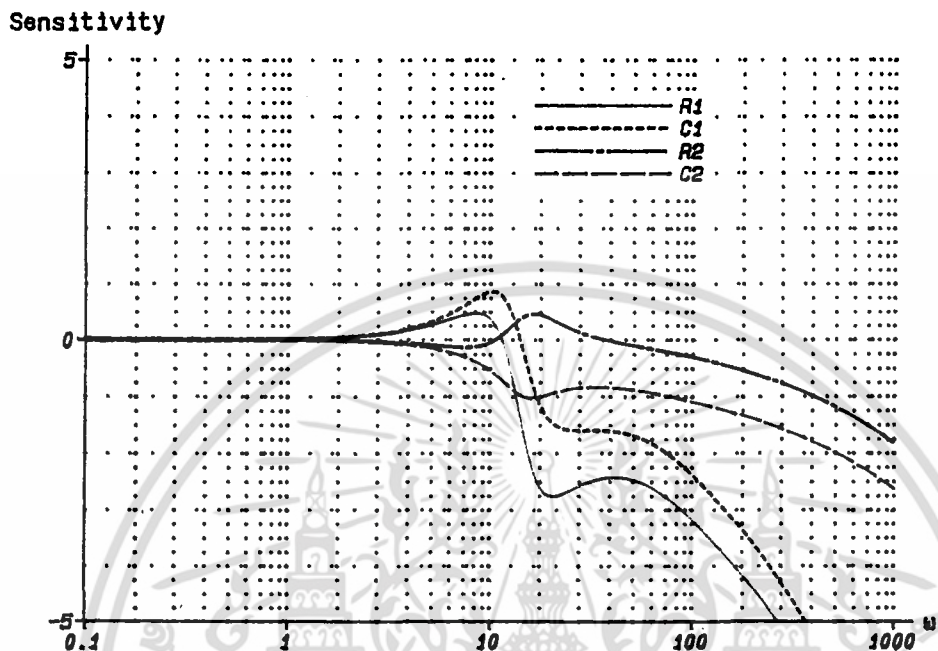
ส่วนค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์ C_1, R_2, C_2 ก็สามารถหาได้ในกรณีเดียวกัน ซึ่งจากสมการ(4.21) จะได้

$$S_{C1}^{T(s)} = - \left(\frac{P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P - 1)}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.24)$$

$$S_{R2}^{T(s)} = - \left(\frac{\alpha P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P - \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.25)$$

$$S_{C2}^{T(s)} = - \left(\frac{\alpha P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P + \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.26)$$

จากสมการ (4.23) - (4.26) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 4$ จะได้ค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 แสดงดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเช่นชีวิติตที่ได้จะมีค่าต่ำ โดยที่ $\omega = 0$ ค่าเช่นชีวิติตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเช่นชีวิติตของ R_2, C_2 จะมีค่าต่ำกว่าของ R_1, C_1 ค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K สามารถหาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.16) โดยการแทนค่า X_1 ด้วย K ในสมการ (4.13) จะได้



รูปที่ 4.7 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2

$$S_K^{T(s)} = \frac{1}{K} \left(\frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cosh P}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} - K\right) \cosh P + 1} \right) \dots(4.27)$$

จากสมการ (4.27) ถ้าให้อัตราขยาย $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_K^{T(s)} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{\cosh P + \alpha} \dots(4.28)$$

ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ที่ $\omega = 0$ จะได้ $\cosh P = 1$ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (4.28) จะได้

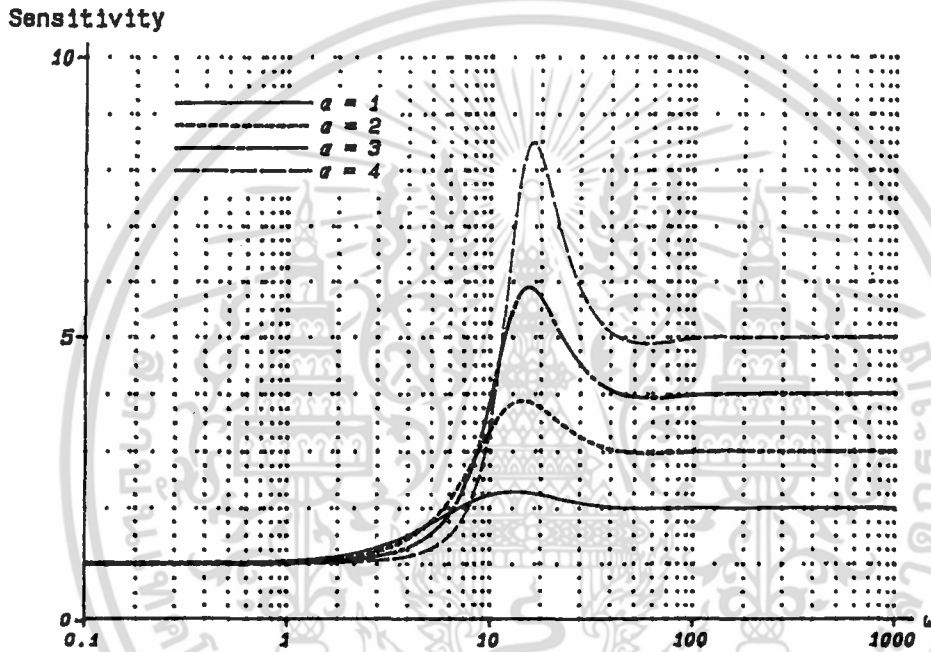
$$S_K^{T(s)} = 1$$

และที่ $\omega = \infty$ จะได้

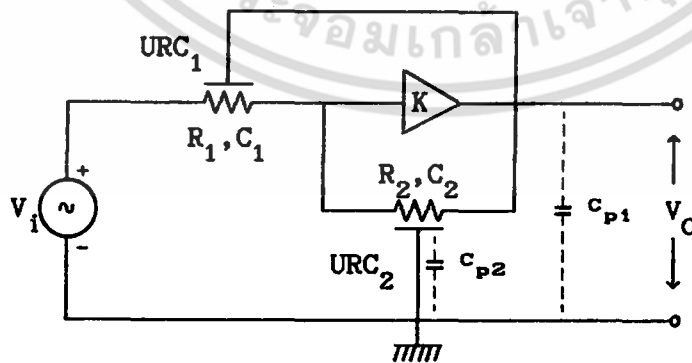
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T(S)}{S} = \alpha + 1$$

จากสมการ (4.28) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าต่ำคือมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$



รูปที่ 4.8 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K



รูปที่ 4.9 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอคทีฟอันดับที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริวอาซีในแบบที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 4.9 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.9 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ได้ดังนี้

$$T(P) = \frac{\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}} \quad (4.29)$$

กำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.29) จะได้

$$T(P) = \frac{1}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} - K \right) \cosh P + 1 - \frac{R_1}{R_2}} \quad \dots(4.30)$$

จากสมการ (4.30) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำคือ

$$T(P) = \frac{\alpha}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.31)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

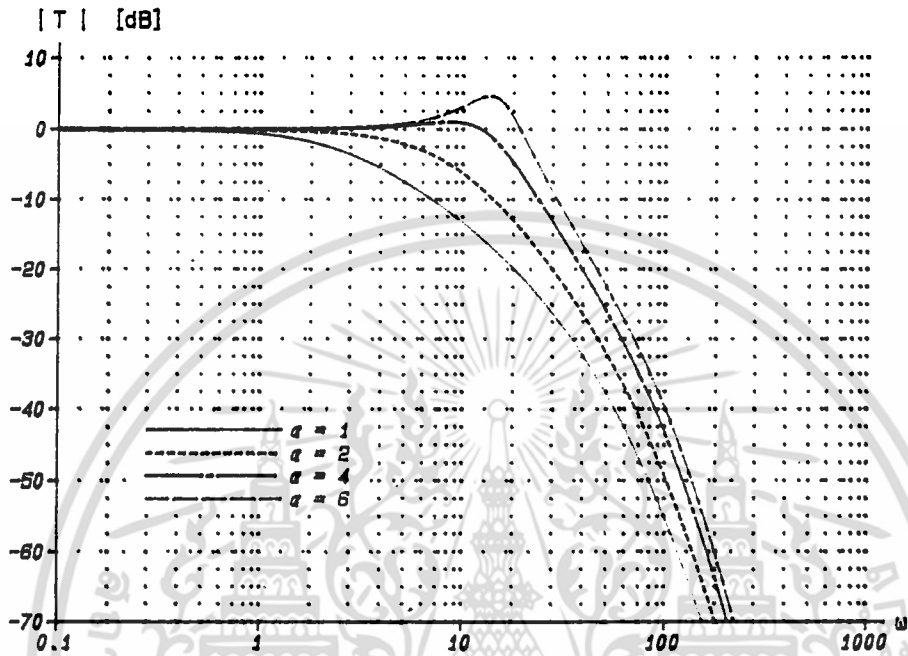
จากสมการ (4.30) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = \frac{-\alpha}{\alpha \cosh P + 1 - \alpha} \quad \dots(4.32)$$

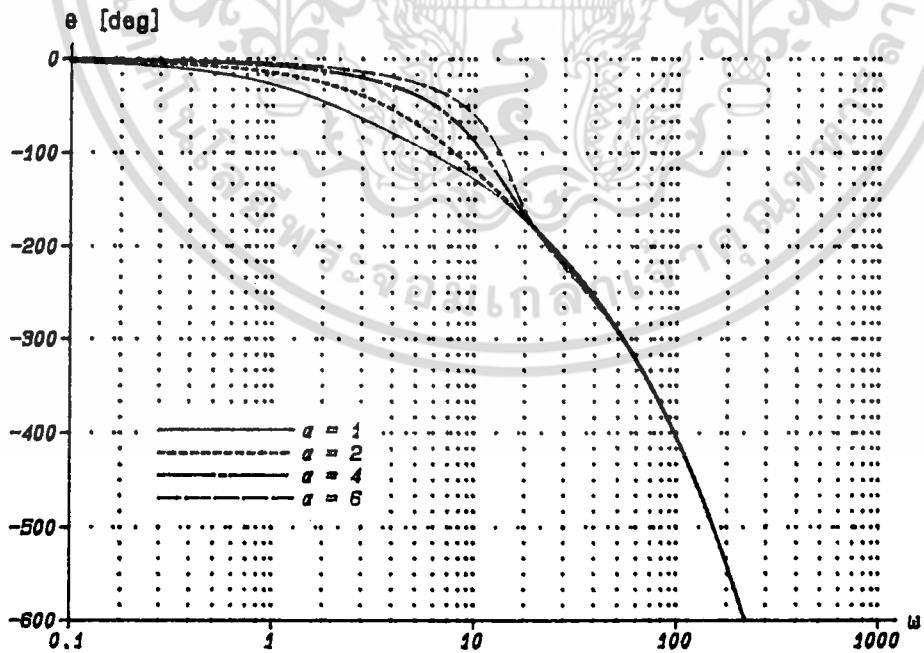
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors C_{p1} และ C_{p2} ของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริวอาซีตามในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า C_{p1} จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตมีอินแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.31) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 4$ และ 6 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $\omega = 2.432, 6.287, 15.927$ และ 21.611 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือเมื่อ α มีค่ามาก จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดที่ขึ้นในย่านคัทออฟ (Cut-off) และเมื่อนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.31) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่ α มีค่าต่ำผลตอบแทนของกรูฟด์เลย์จะมีลักษณะราบเรียบ

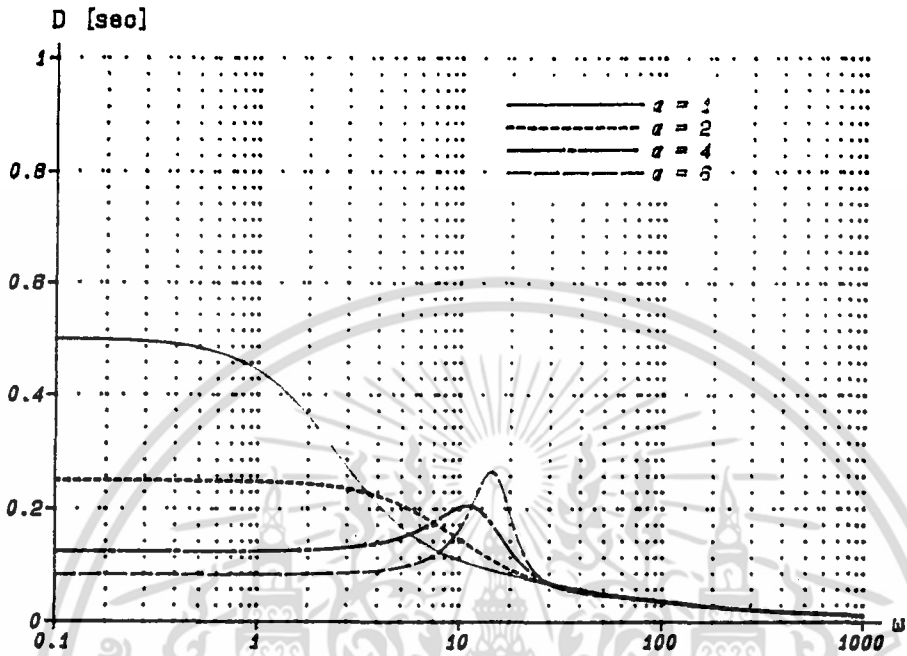


รูปที่ 4.10 แสดงตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองของกรุปตัวเลข



รูปที่ 4.13 แสดงไนควิสต์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.31) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ α มีค่ามากกว่า 12.59 เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอกจุด Origin ใน D(P)-Plane ในกรณีระบบจะไม่เสถียรภาพ และนั่นวงจรกรองความถี่ต่ำในรูปที่ 4.9 ที่กำหนดอัตราขยาย $K = 1$ จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า α อยู่ระหว่าง 0 ถึง 12.59

จากวงจรในรูปที่ 4.9 เราจะหาเซนต์วิตต์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ จะเห็นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.29) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh \sqrt{SR_2C_2}}{\frac{R_1C_2}{R_2C_1} \sinh \sqrt{SR_1C_1} (\cosh \sqrt{SR_2C_2} - 1) + \sinh \sqrt{SR_2C_2}} \quad \dots(4.33)$$

เมื่อหาเซนต์วิตต์ในสมการ (4.33) แล้วกำหนดให้ $R_1C_1 = R_2C_2$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซนต์วิตต์ของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

$$\frac{T(S)}{S_{R1}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(\cosh P - 1) (1 + P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.34)$$

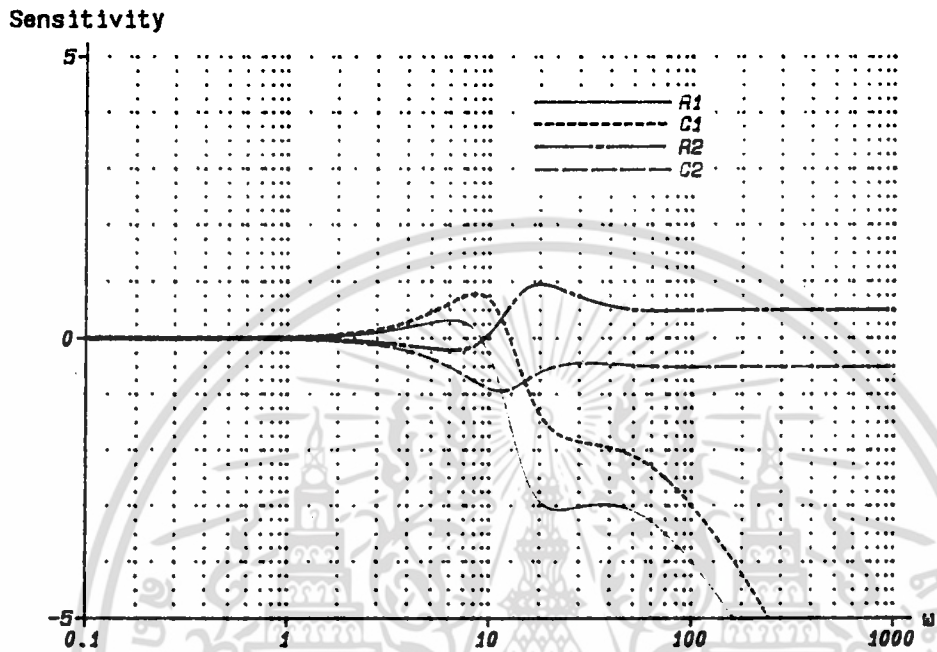
$$\frac{T(S)}{S_{C1}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(\cosh P - 1) (1 - P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.35)$$

$$\frac{T(S)}{S_{R2}} = -\frac{1}{2} \left(P \coth P - \frac{P \sinh P + \alpha P \coth P - \cosh P + 1}{\cosh P - 1 + \alpha} \right) \quad \dots(4.36)$$

$$\frac{T(S)}{S_{C2}} = -\frac{1}{2} \left(P \coth P - \frac{P \sinh P + \alpha P \coth P + \cosh P - 1}{\cosh P - 1 + \alpha} \right) \quad \dots(4.37)$$

จากสมการ (4.34) - (4.37) ถ้าให้ $\alpha = 4$ จะได้ค่าเซนต์วิตต์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2 และ C_2 แสดงดังในรูปที่ 4.14 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซนต์วิตต์ที่ได้จะมีค่าต่ำ โดยที่ $\omega = 0$ ค่าเซนต์วิตต์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซนต์วิตต์ของ R_2, C_2 จะมีค่าต่ำกว่าของ R_1, C_1 และเมื่อเทียบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.9 กับวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าวงจรกรองความถี่ต่ำในแบบที่ 2 มีค่าเซนต์วิตต์ของอิลิเมนต์ $R_1, C_1,$

R_2, C_2 ต่ำกว่าวงจรของความถี่ต่ำในแบบแรก

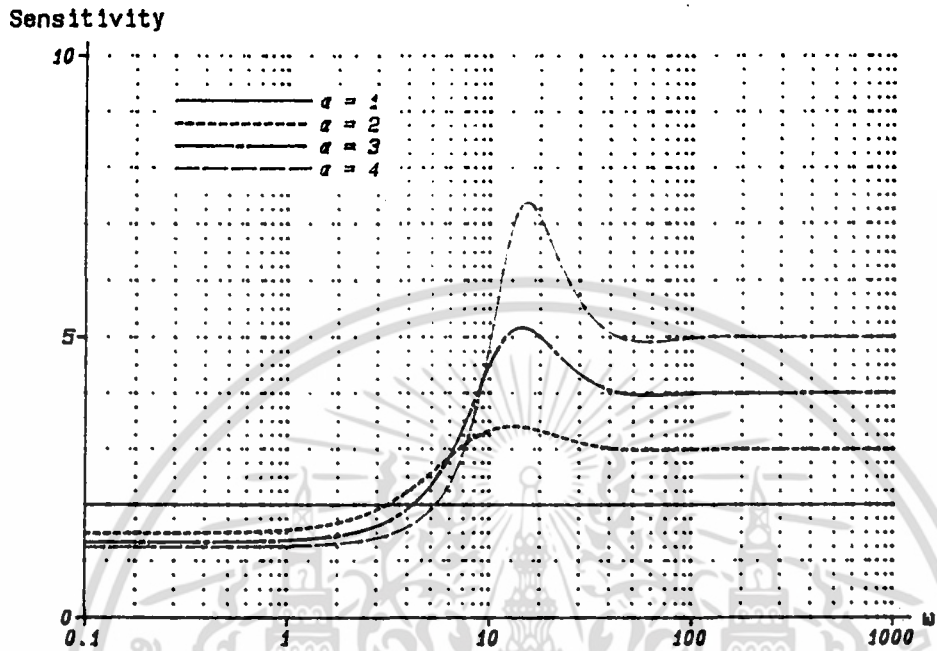


รูปที่ 4.14 แสดง Sensitivity ของอิมพีแดนซ์ R_1, C_1, R_2, C_2

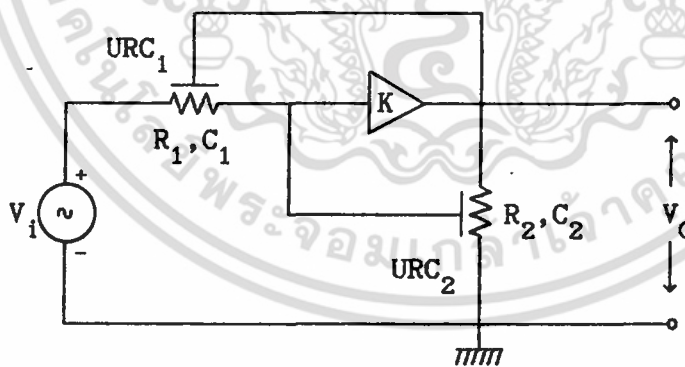
จากวงจรในรูปที่ 4.9 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.30) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ K คือ

$$\frac{T(S)}{K} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{\cosh P - 1 + \alpha} \dots(4.38)$$

จากสมการ (4.38) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ K แสดงดังในรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $(\alpha+1)/\alpha$ และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$



รูปที่ 4.15 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K



รูปที่ 4.16 วงจรรองความถี่แบบแยกที่ฟีดสทริบิวท์อ้าซีแบบที่ 3

วงจรรองความถี่แบบแยกที่ฟีดสทริบิวท์อ้าซีในแบบที่ 3 แสดงดังในรูปที่ 4.16 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.16 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T(P) = \frac{\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{2P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}} \quad (4.39)$$

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.39) จะได้

$$T(P) = \frac{1}{\left(\frac{1}{K} + \frac{2R_1}{KR_2} - \frac{R_1}{R_2} - 1 \right) \cosh P - \frac{2R_1}{KR_2} + \frac{R_1}{R_2} + 1} \quad \dots(4.40)$$

จากสมการ (4.40) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำคือ

$$T(P) = \frac{\alpha}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.41)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (4.40) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

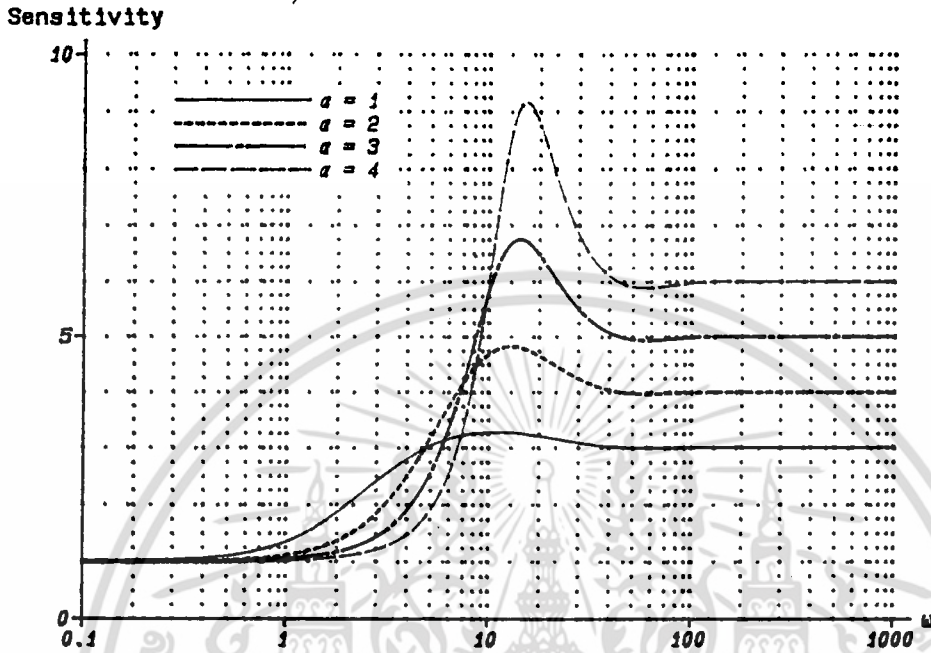
$$T(P) = \frac{-\alpha}{(\alpha+1) \cosh P - 1 - \alpha} \quad \dots(4.42)$$

ในกรณีที่ $K = 1$ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3 ในสมการ (4.41) จะเหมือนกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในสมการ (4.31) ซึ่งทำให้ผลตอบแทนทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเช่นขั้ววิตซ์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 ของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.16 เหมือนกับแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.9

จากวงจรในรูปที่ 4.16 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเช่นขั้ววิตซ์ของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $T(S)$ ในสมการ (4.40) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ ซึ่งจะได้เช่นขั้ววิตซ์ของอิลิเมนต์ K ดังนี้

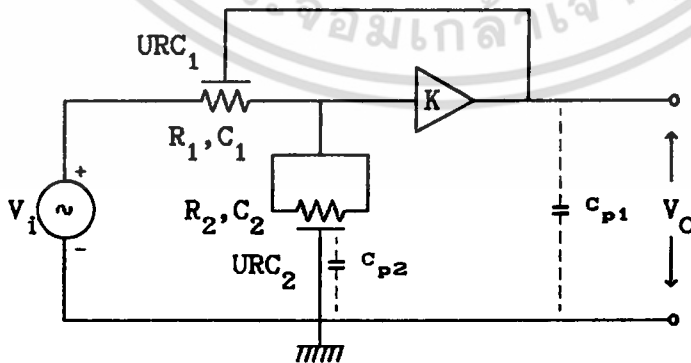
$$\frac{T(S)}{K} = \frac{(\alpha + 2) \cosh P - 2}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.43)$$

จากสมการ (4.43) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเช่นขั้ววิตซ์ของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเช่นขั้ววิตซ์ของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเช่นขั้ววิตซ์ของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+2$ และเมื่อเทียบวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.16 กับ



รูปที่ 4.17 แสดง Sensitivity ของอินเวอร์ต K

วงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าวงจรรองความถี่ต่ำในแบบที่ 3 มีค่าเซ็นซิวิตีของอินเวอร์ต K ต่ำกว่าแบบที่ 2 ในช่วงความถี่ต่ำ แต่ในช่วงความถี่สูงค่าเซ็นซิวิตีของวงจรรองความถี่ต่ำในแบบที่ 2 ต่ำกว่าในแบบที่ 3



รูปที่ 4.18 วงจรรองความถี่ต่ำแบบแยกที่ฟิลิปปินส์ที่อาศัยแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซีในแบบที่ 4 แสดงดังในรูปที่ 4.18 โดยให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.18 เขียนเป็นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{\frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}}{\frac{1}{K} \left[\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{2P_2(\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2} \right] - \frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots(4.44)$$

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.44) จะได้

$$T(P) = \frac{1}{\frac{1}{K} \left[\frac{2R_1}{R_2} + 1 + K \right] \cosh P - \frac{2R_1}{KR_2} + 1} \quad \dots(4.45)$$

จากสมการ (4.45) กำหนดให้ $\alpha = R_2/2R_1$ และให้อัตราขยายค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำคือ

$$T(P) = \frac{\alpha}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.46)$$

จากสมการ (4.45) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = \frac{-1}{\cosh P - 1} \quad \dots(4.47)$$

ในกรณีที่ $K = 1$ ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 ในสมการ (4.46) จะเหมือนกันกับทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ในสมการ (4.31) และสมการ (4.41) ตามลำดับ โดยที่ค่า R_1 ในวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแบบอื่น ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเช่นชีวิตัวต์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 ของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.18 เหมือนกันกับวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

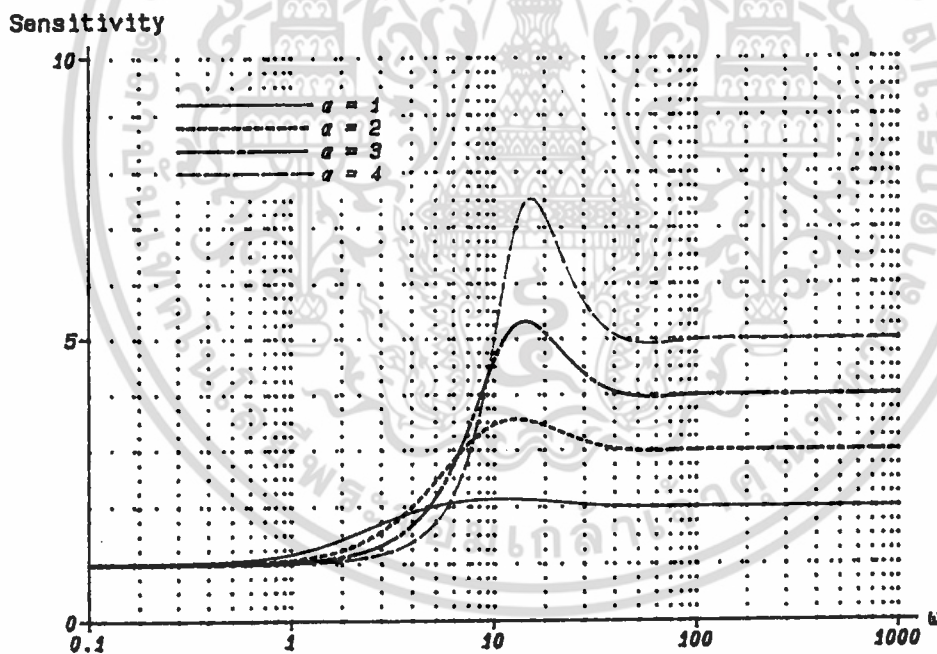
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors C_{p1} และ C_{p2} ของวงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซีในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า C_{p1} จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

จากวงจรในรูปที่ 4.18 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายเท่ากับ K ค่าเช่นชีวิตัวต์ของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.45) แล้วกำหนดให้

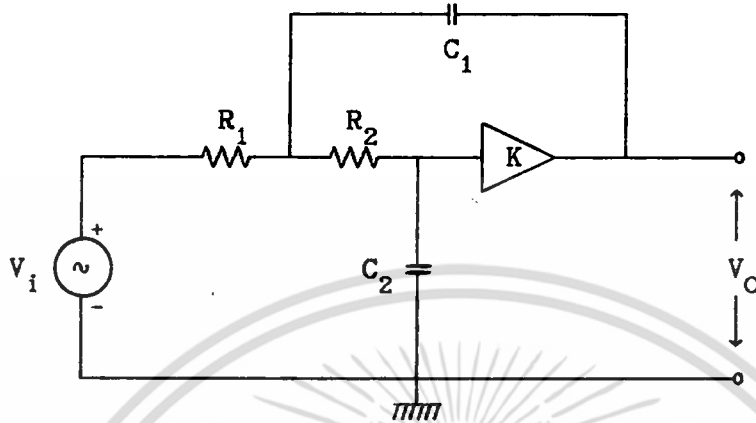
$K = 1$ และ $\alpha = R_2/2R_1$ ซึ่งจะได้เห็นชีวิติตซ์ของอิลิเมนต์ K คือ

$$\frac{T(s)}{S_K} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P - 1}{\cosh P - 1 + \alpha} \dots(4.48)$$

จากสมการ(4.48) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 จะได้ค่าเห็นชีวิติตซ์ของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเห็นชีวิติตซ์ของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเห็นชีวิติตซ์ของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$ และเมื่อเทียบวงจรของความถี่ต่ำแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.18 กับวงจรของความถี่ต่ำแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับจะเห็นได้ว่าวงจรของความถี่ต่ำในแบบที่ 4 มีค่าเห็นชีวิติตซ์ของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าทั้งวงจรของความถี่ต่ำในแบบที่ 2 และแบบที่ 3



รูปที่ 4.19 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K



รูปที่ 4.20 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบ Sallen and Key

จากรูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต่ำแบบ Sallen and key [10] ซึ่งสามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(S) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{K}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + [C_2(R_1 + R_2) + R_1 C_1(1-K)]S + 1} \quad \dots(4.49)$$

ถ้าแทน S ด้วย $j\omega$ ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน $T(S)$ จะได้

$$T(j\omega) = \frac{K}{-R_1 R_2 C_1 C_2 \omega^2 + [C_2(R_1 + R_2) + R_1 C_1(1-K)]j\omega + 1} \quad \dots(4.50)$$

จากสมการ (4.50) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ จะได้

$$T(j\omega) = \frac{1}{-R_1 R_2 C_1 C_2 \omega^2 + [C_2(R_1 + R_2)]j\omega + 1} \quad \dots(4.51)$$

เมื่อหาเส้นชีวิตตัดในสมการ (4.51) จะได้ค่าเส้นชีวิตตัดของอิมพีแดนซ์ R_1, R_2, C_1 และ C_2 ดังนี้

$$\frac{T(j\omega)}{S} = \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 - j\omega R_1 C_2}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega [C_2(R_1 + R_2)] + 1} \quad \dots(4.52)$$

$$\frac{T(j\omega)}{R_2} = \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 - j\omega R_2 C_2}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega [C_2(R_1 + R_2)] + 1} \quad \dots(4.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

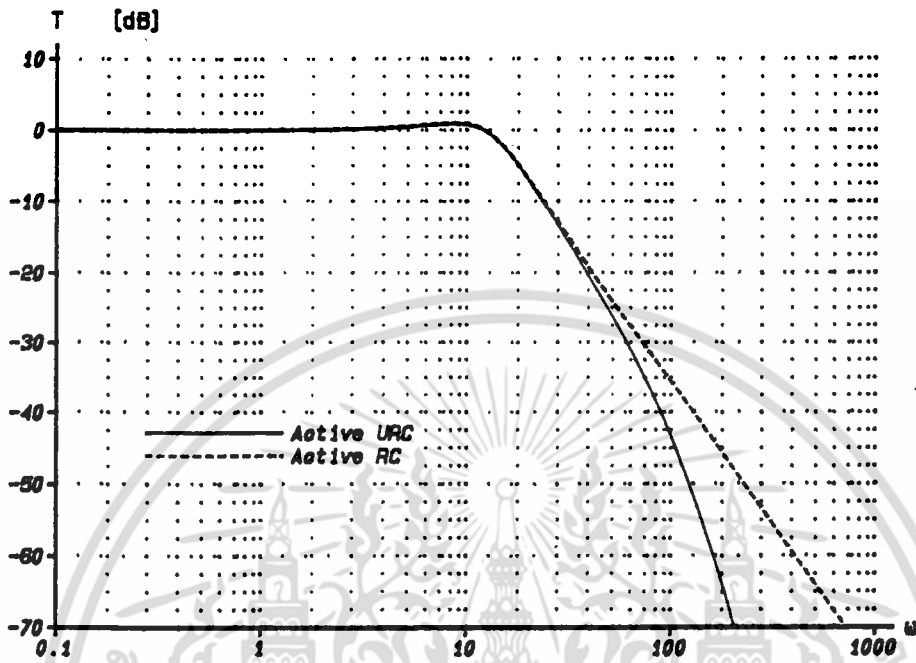
$$S_{c1}^{T(j\omega)} = \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega[C_2(R_1+R_2)] + 1} \quad \dots(4.54)$$

$$S_{c2}^{T(j\omega)} = \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 - j\omega C_2(R_1+R_2)}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega[C_2(R_1+R_2)] + 1} \quad \dots(4.55)$$

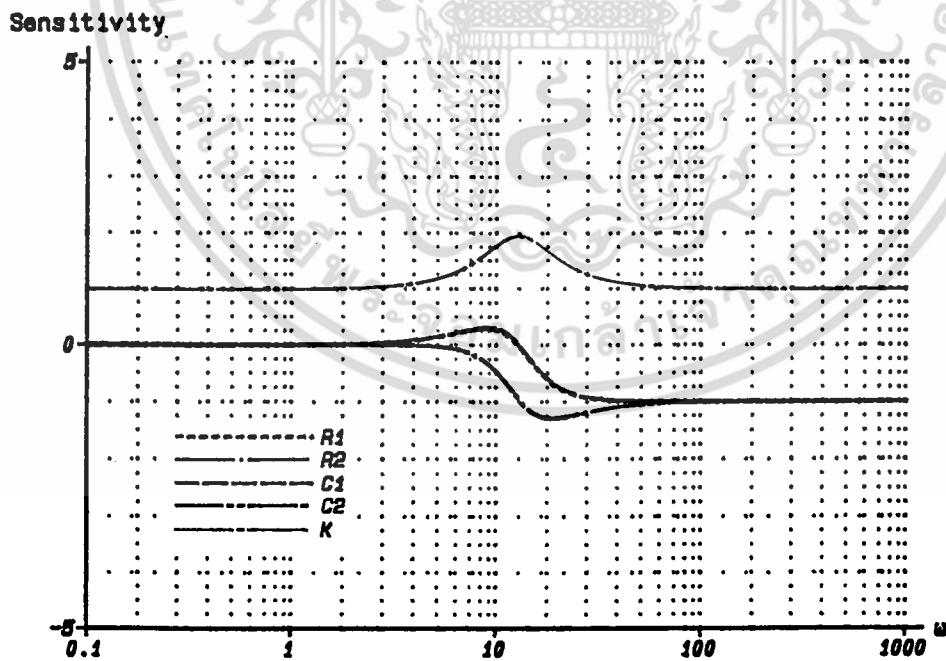
ค่าเซ็นซิวิตีของอัตราขยาย K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.50) ซึ่งจะได้

$$S_K^{T(j\omega)} = 1 + \frac{j\omega K R_1 C_1}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega[C_2(R_1+R_2) + R_1 C_1(1-K)] + 1} \quad \dots(4.56)$$

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวงความถี่ต่ำแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวีแบบที่ 4 ในสมการ (4.46) โดยสมมติค่า $\alpha = 4$ เมื่อนำไปหาค่ารากใน S-Plane ตามสมการ (4.6) จะได้ค่ารากเริ่มต้นที่ $n=0$ คือ $S = -6.762 \pm j11.076$ และค่ารากที่ได้เมื่อนำไปแทนค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.49) โดยกำหนดให้ $K=1$ จะได้ค่าอุปกรณ์คือ $R_1=0.077\Omega$, $R_2=1.83\Omega$, $C_1=1F$, $C_2=0.042F$ และจากค่าต่าง ๆ ที่ได้ของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.49) ซึ่งเป็นวงจรวงความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟอซี เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่เปรียบเทียบกับวงจรวงความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวีตามทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.46) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรวงความถี่แบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวีจะมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ดี และเมื่อแทนค่าของอุปกรณ์คือ R_1 , R_2 , C_1 , C_2 และอัตราขยาย K แล้วหาเซ็นซิวิตีตามสมการ (4.52) ถึงสมการ (4.56) จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรวงแอกทีฟฟอซีแบบ Sallen and Key ตามในรูปที่ 4.22 ซึ่งจากรูปเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรวงความถี่ต่ำแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวีแบบที่ 4 จะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ R_1, C_1 ในวงจรวงแอกทีฟฟอซีจะต่ำกว่าของวงจรวงแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวี แต่ค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ R_2, C_2 ในวงจรวงแอกทีฟฟิลเตอร์บีทอวีจะต่ำกว่าของวงจรวงแอกทีฟฟอซี ส่วนในช่วงความถี่ต่ำย่านผ่านสัญญาณค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์ R_1, R_2, C_1, C_2 และอัตราขยาย K ของวงจรวงทั้งสองแบบจะมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน



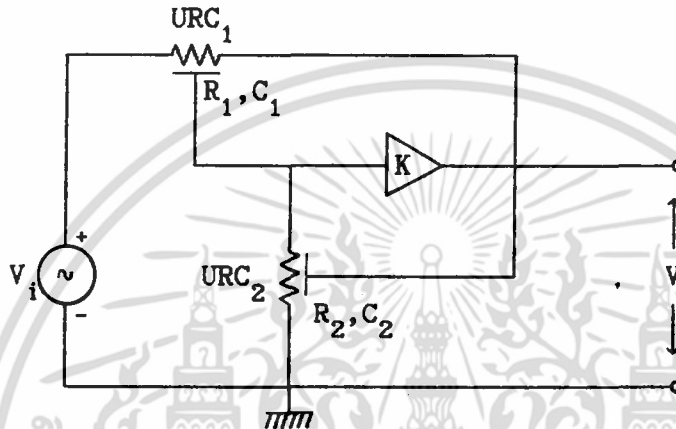
รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.22 แสดง Sensitivity ของวงจร Sallen and key

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรของความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีปที่อาซีในแบบแรกสามารถเขียนเป็นวงจรมีดังแสดงในรูปที่ 4.23 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรมีดังแสดงในรูปที่ 4.23 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ



รูปที่ 4.23 วงจรของความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีปที่อาซีแบบที่ 1

$$T(P) = \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} \left(\frac{1}{K} \left[\frac{2P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right] - \frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2} \right) \quad (4.57)$$

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.57) จะได้

$$T(P) = \frac{\cosh P - 1}{\left(\frac{2}{K} + \frac{R_1}{KR_2} - \frac{R_1}{R_2} - 1 \right) \cosh P - \frac{2}{K} + \frac{R_1}{R_2} + 1} \quad \dots(4.58)$$

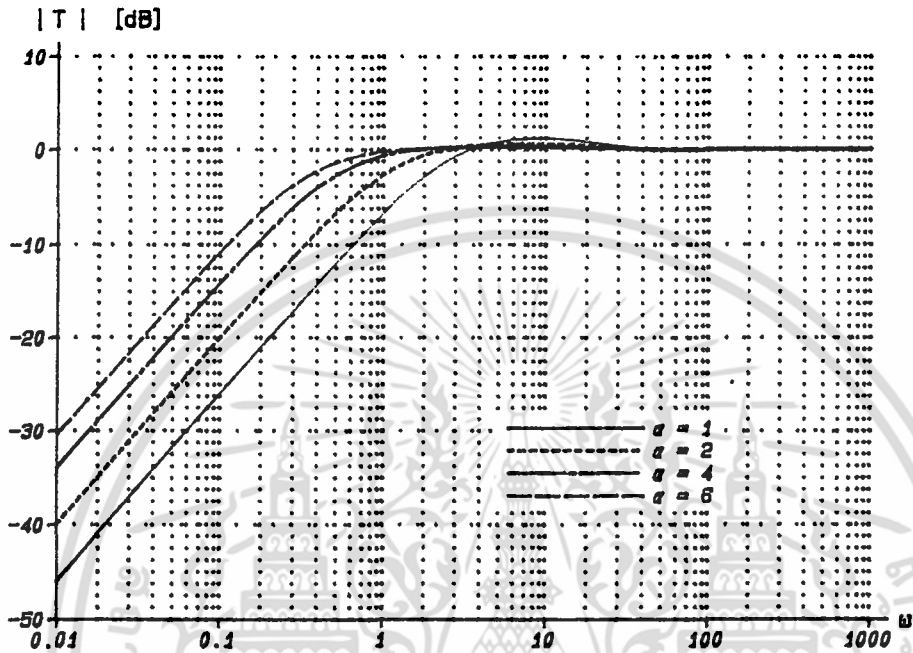
จากสมการ (4.58) กำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรความถี่สูงดังสมการ (4.59)

$$T(P) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots(4.59)$$

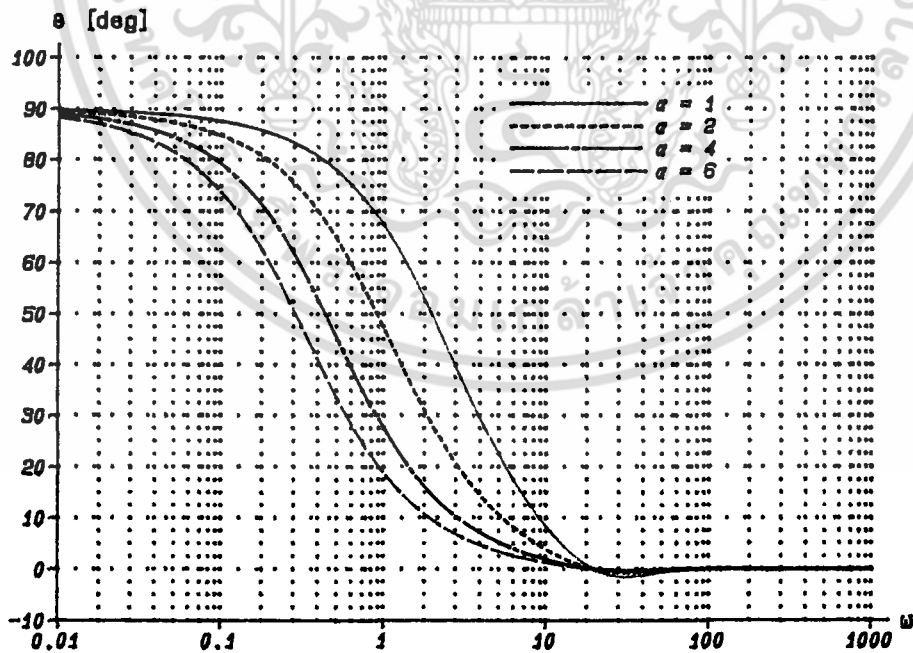
โดยที่ $\alpha = R_2/P_1$

จากสมการ (4.58) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = \frac{-\alpha \cosh P + \alpha}{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1} \dots(4.60)$$

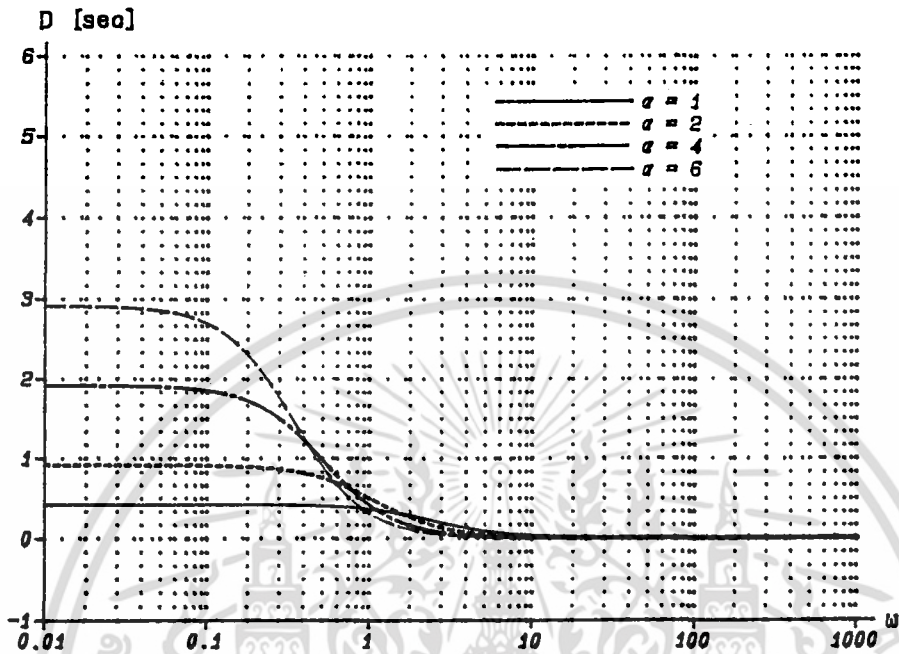


รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

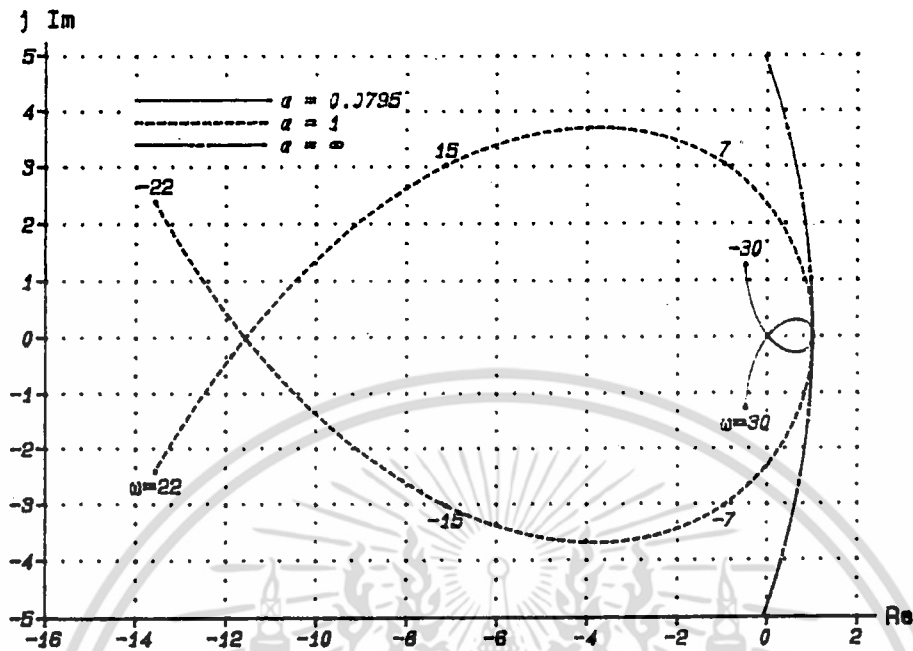
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองของกรุปดีเลย์

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.59) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 4$ และ 6 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $\omega = 1.73, 0.925, 0.48$ และ 0.324 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ α มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดที่ชันในย่านคัทออฟ และเมื่อนำทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.59) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ที่ได้จะมีลักษณะราบเรียบ

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.59) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์โคอะแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ α มีค่าน้อยกว่า 0.0795 เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอกจุด Origin ใน $D(P)$ -Plane ในกรณีที่ระบบจะไม่เสถียรภาพ ฉะนั้นวงจรของความถี่ต่ำในรูปที่ 4.23 ที่กำหนดให้อัตราขยาย $K = 1$ จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ α อยู่ระหว่าง 0.0795 ถึง ∞



รูปที่ 4.27 แสดงไนควิสต์ไดอะแกรม

จากวงจรในรูปที่ 4.23 เราจะหาค่าเช่นขั้วติดของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ จะนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.57) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh \sqrt{SR_2 C_2} (\cosh \sqrt{SR_1 C_1} - 1)}{\sinh \sqrt{SR_2 C_2} (\cosh \sqrt{SR_1 C_1} - 1) + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \sinh \sqrt{SR_1 C_1}} \quad \dots(4.61)$$

เมื่อหาเช่นขั้วติดในสมการ (4.61) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเช่นขั้วติดของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

$$\frac{T(S)}{S R_1} = - \left(\frac{P \sinh P}{2 (\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.62)$$

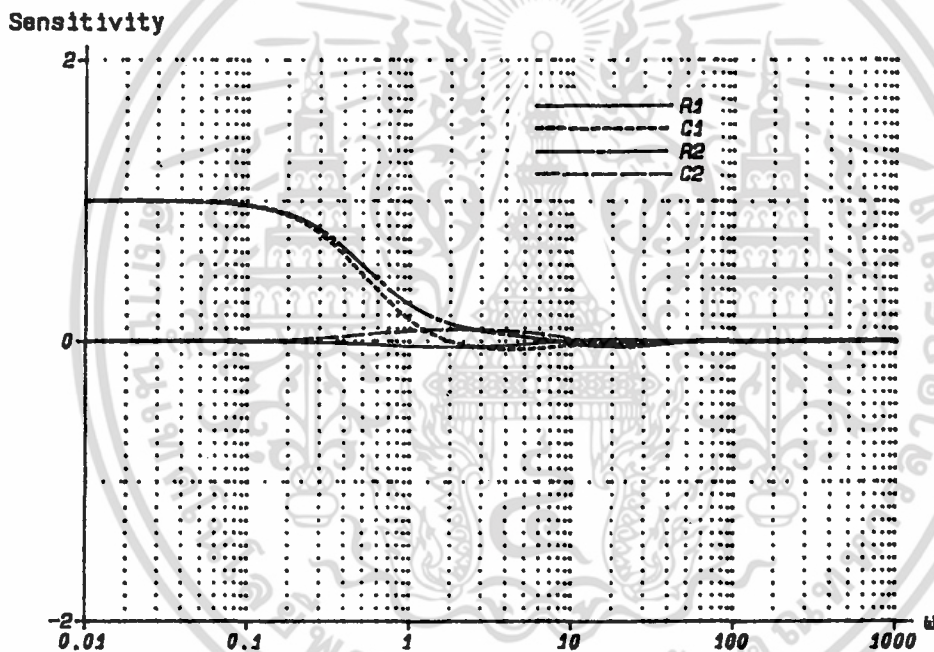
$$\frac{T(S)}{S C_1} = - \left(\frac{P \sinh P}{2 (\cosh P - 1)} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.63)$$

$$\frac{T(S)}{S R_2} = - \left(P \coth P - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{c2} = \frac{1}{2} \left(P \coth P - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.65)$$

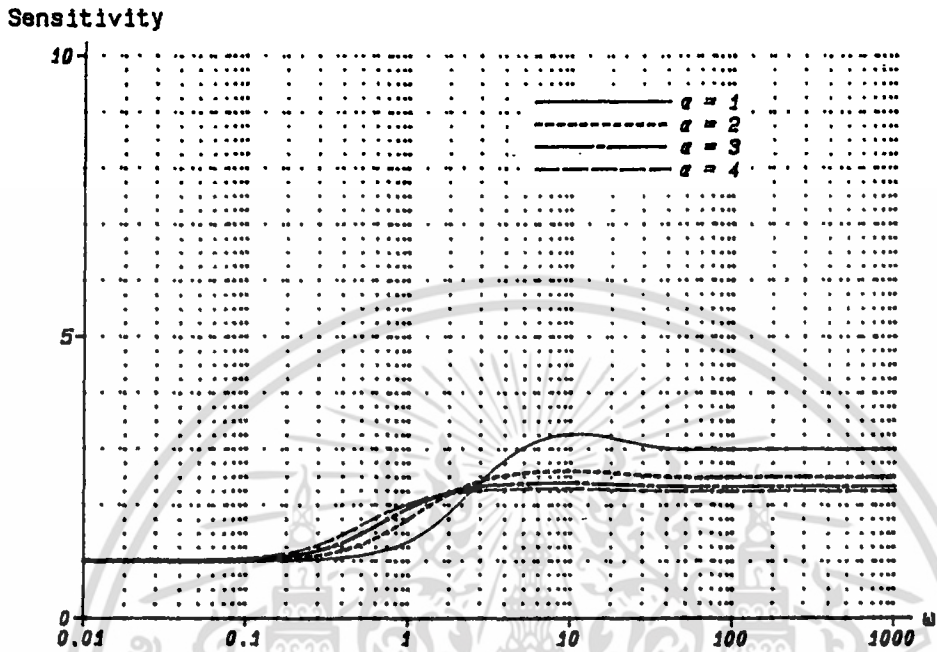
จากสมการ (4.62)-(4.65) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 4$ จะได้เส้นชีวิตวิตรีของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 แสดงดังในรูปที่ 4.28 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเส้นชีวิตวิตรีที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่ $\omega = \infty$ ค่าเส้นชีวิตวิตรีจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเส้นชีวิตวิตรีของ R_1, C_2 จะมีค่าต่ำกว่า C_1, R_2 โดยที่ $\omega = 0$ ค่าเส้นชีวิตวิตรีของ R_1, C_2 จะมีค่าเท่ากับศูนย์และ C_1, R_2 จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 4.28 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2

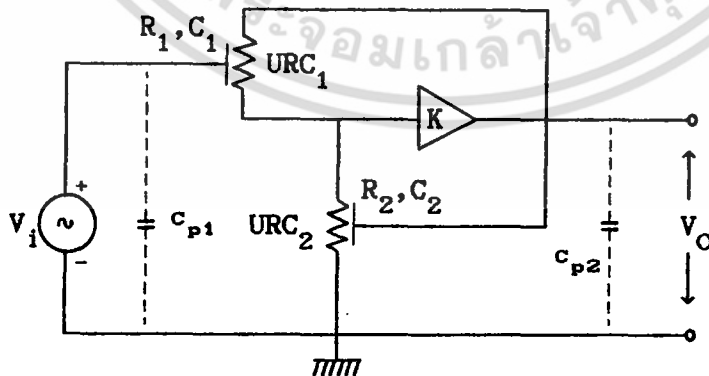
ค่าเส้นชีวิตวิตรีของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 4.23 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.58) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเส้นชีวิตวิตรีของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_K = \frac{(2\alpha + 1) \cosh P - 2\alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots(4.66)$$



รูปที่ 4.29 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

จากสมการ (4.66) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.29 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $(2\alpha+1)/\alpha$ และในช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ $\omega = 0$ ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 4.30 วงจรของความถี่สูงแบบแอกทีฟที่คิดสำหรับวิธที่อาศัยแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่สูงแบบแยกที่พหุสทริบิวท์อาซีในแบบที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 4.30 เมื่อให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.30 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{\frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_2(\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}} \quad \dots(4.67)$$

กำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.67) จะได้

$$T(P) = \frac{\cosh P - 1}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} - \frac{KR_1}{R_2} \right) \cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad \dots(4.68)$$

จากสมการ (4.68) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่สูงคือ

$$T(P) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots(4.69)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (4.68) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = \frac{-\alpha \cosh P + \alpha}{\cosh P + \alpha - 1} \quad \dots(4.70)$$

ในกรณีที่ $K = 1$ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2 ในสมการ (4.69) จะเหมือนกันกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 1 ในสมการ(4.59) ซึ่งทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเช่นชีวิติตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 ของวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.30 เหมือนกับแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.23

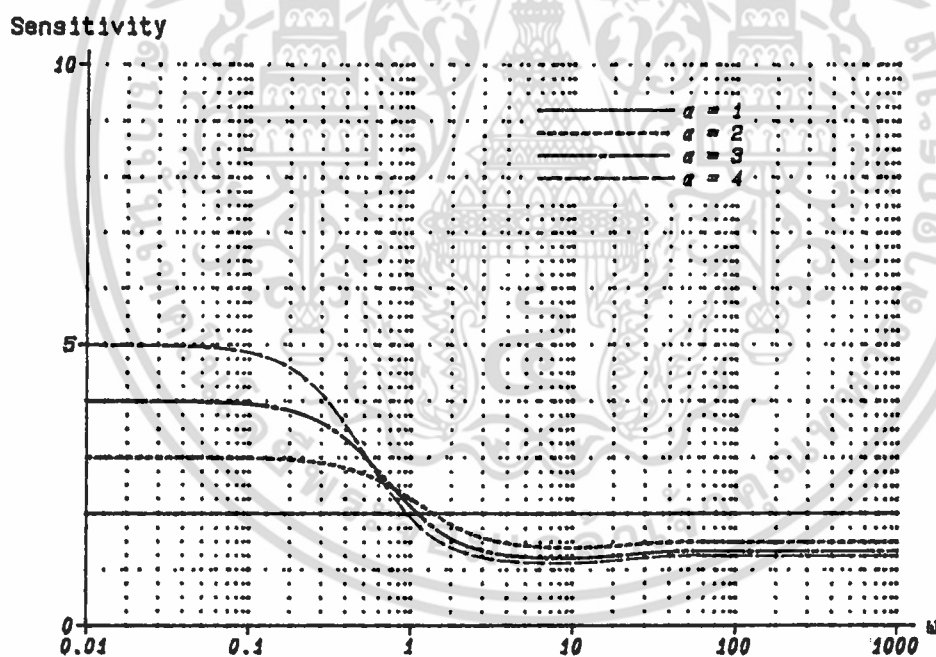
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors ของวงจรรองความถี่สูงแบบแยกที่พหุสทริบิวท์อาซีในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า C_{p1} จะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) กับกราวด์ ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ฉะนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

จากวงจรในรูปที่ 4.30 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเช่นชีวิติตีของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.68) แล้ว

กำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ ซึ่งค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ที่ได้คือ

$$\frac{r(s)}{S_K} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots(4.71)$$

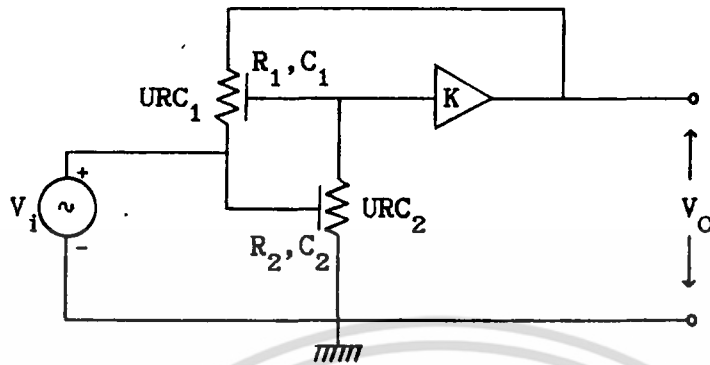
จากสมการ (4.71) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $(\alpha+1)/\alpha$ และในช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$ และเมื่อเทียบวงจรวงความถี่สูงแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.30 กับวงจรวงความถี่สูงแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าวงจรวงความถี่สูงในแบบที่ 2 มีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าแบบที่ 1 ในช่วงความถี่สูง แต่ในช่วงความถี่ต่ำเซ็นซิวิตีของวงจรวงความถี่สูงในแบบที่ 1 ต่ำกว่าแบบที่ 2



รูปที่ 4.31 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

วงจรวงความถี่สูงแบบแยกที่ผลิตทวีบริบทอาซีในแบบที่ 3 แสดงดังในรูปที่ 4.32 ถ้าให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และให้ $P_1 = \sqrt{SR_1 C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2 C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.31 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอคทีฟสามขั้วแบบที่ 3

$$T(P) = \frac{\frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2(\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}}{\frac{1}{K} \left(\frac{2P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots(4.72)$$

กำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.72) จะได้

$$T(P) = \frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cosh P - \frac{R_1}{R_2} - 1}{\frac{1}{K} \left(2 + \frac{R_1}{R_2} - K \right) \cosh P - \frac{2}{K} + 1} \quad \dots(4.73)$$

จากสมการ (4.73) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทราณส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงคือ

$$T(P) = \frac{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1}{(\alpha+1) \cosh P - \alpha} \quad \dots(4.74)$$

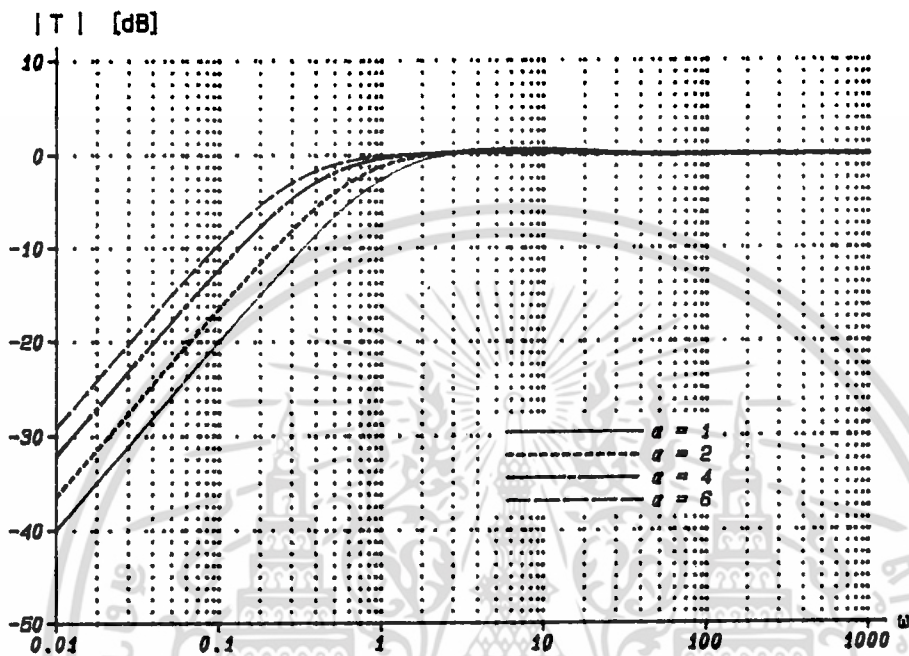
โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (4.73) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier)

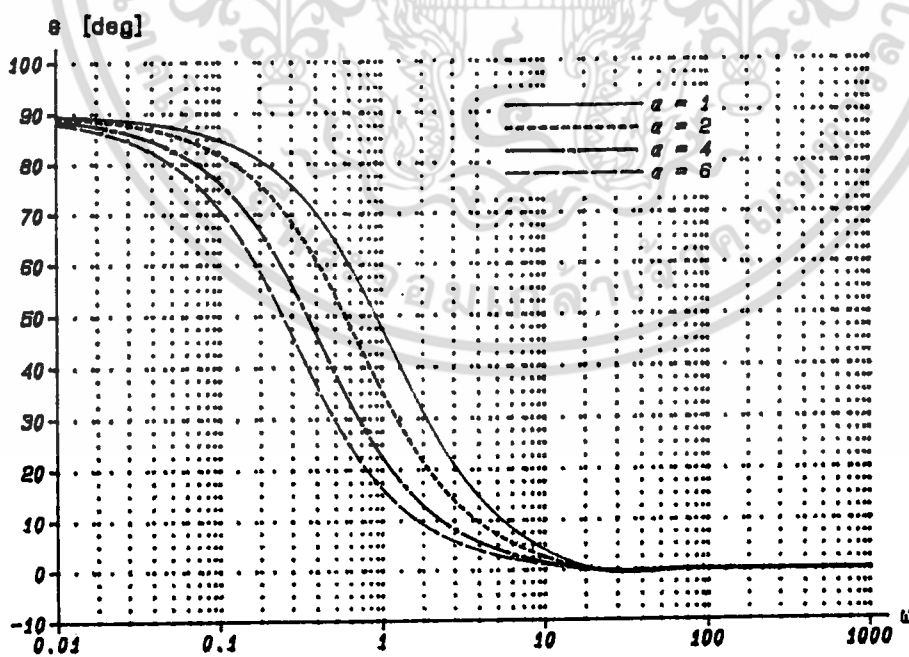
$$T(P) = \frac{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1}{-\alpha \cosh P + \alpha} \quad \dots(4.75)$$

จากทราณส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.74) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 1, 2, 4$ และ 6 เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดความถี่ (Magnitude Response) จะได้อ้างแสดงในรูปที่ 4.33 และได้ค่าจุดคัทออฟ -3 dB ที่ $\omega = 0.925, 0.632, 0.387$ และ 0.279 ตามลำดับ ซึ่งจาก

รูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ α จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ α มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดที่ชันในย่านคutoff และเมื่อนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใน

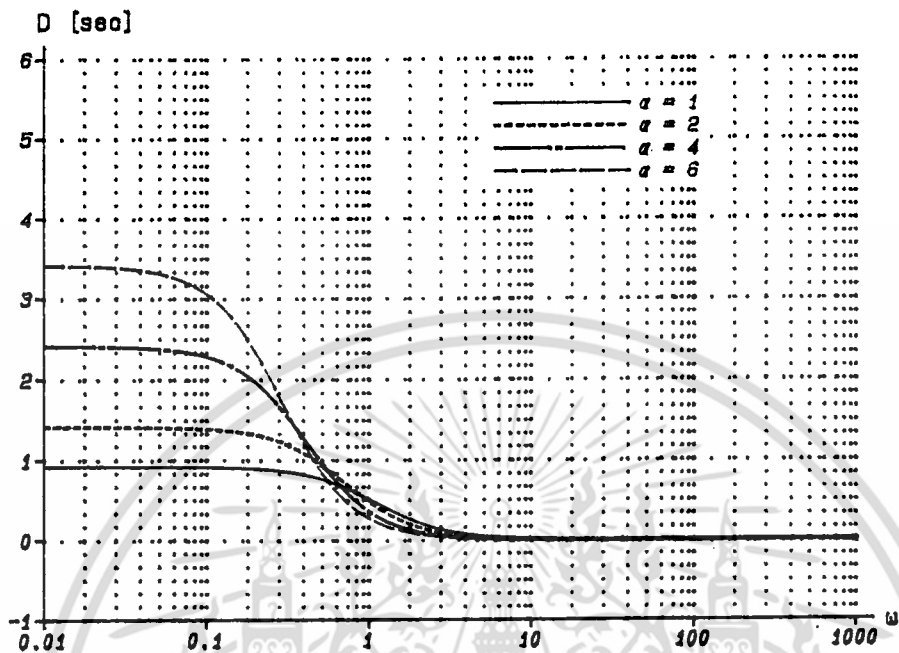


รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



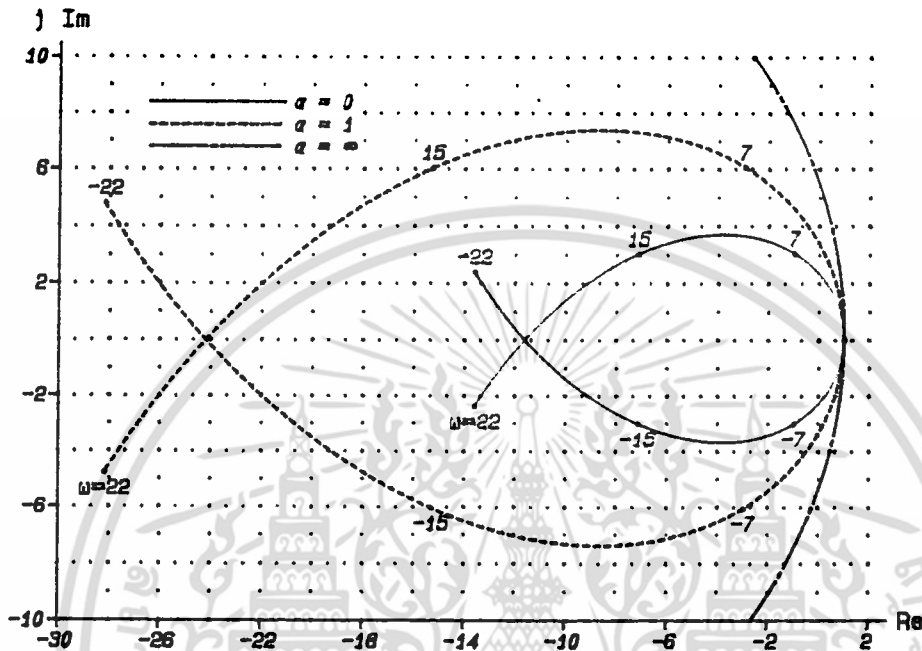
รูปที่ 4.35 แสดงผลตอบสนององกรูพิคัลเลย์

สมการ (4.74) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรูพิคัลเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าผลตอบสนองของกรูพิคัลเลย์ที่ได้จะมีลักษณะราบเรียบ

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.74) ถ้านำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.36 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อให้ α มีค่าระหว่าง 0 ถึง ∞ จุด Origin ใน D(P)-Plane จะถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อต ฉะนั้นวงจรรองความถี่สูงในรูปที่ 4.32 ที่กำหนดอัตราขยาย $K = 1$ จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า α อยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞

จากวงจรในรูปที่ 4.32 จะหาค่าเช่นชีวิติต์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ ฉะนั้นจากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.72) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh\sqrt{SR_2C_2}(\cosh\sqrt{SR_1C_1}-1) + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh\sqrt{SR_1C_1}(\cosh\sqrt{SR_1C_1}-1)}{\sinh\sqrt{SR_2C_2}(\cosh\sqrt{SR_1C_1}-1) + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh\sqrt{SR_1C_1} \cosh\sqrt{SR_2C_2}} \quad (4.76)$$



รูปที่ 4.36 แสดงในควิสต์โดอะนกรม

เมื่อหาเซตชีวิตในสมการ (4.76) แล้วกำหนดให้ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซตชีวิตของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

$$S_{R1} = - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha P \sinh P + (\cosh P - 1)(P \coth P + 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha P \sinh P + \cosh P (P \coth P + 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \quad (4.77)$$

$$S_{C1} = - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha P \sinh P + (\cosh P - 1)(P \coth P - 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha P \sinh P + \cosh P (P \coth P - 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \quad (4.78)$$

$$S_{R2} = - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) + P \sinh P - \cosh P + 1}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) + P \sinh P - \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \quad \dots(4.79)$$

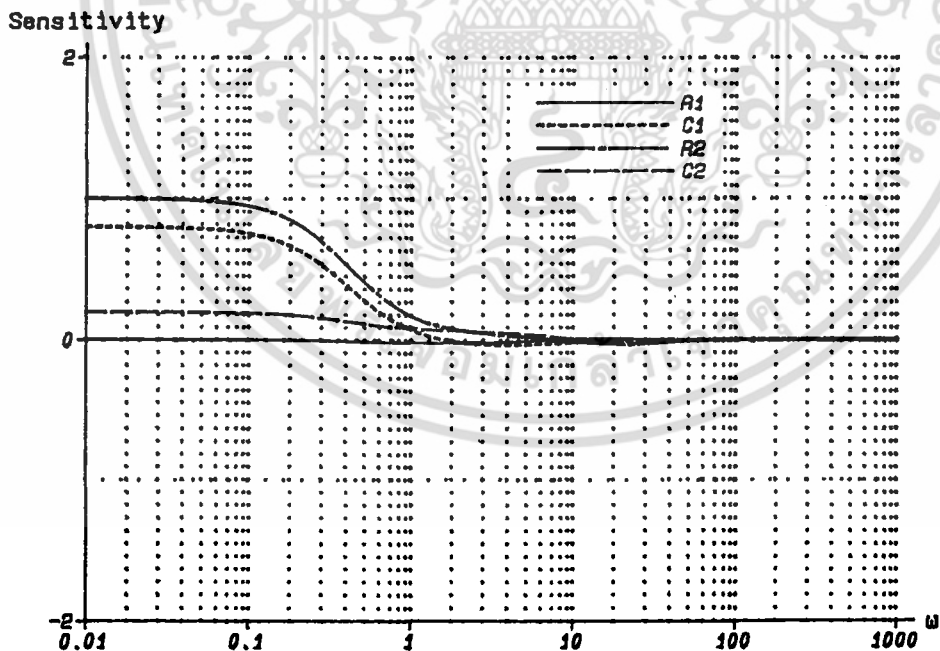
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T(S)}{S} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha \text{PcothP}(\cosh P - 1) + \text{PsinhP} + \cosh P - 1}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha \text{PcothP}(\cosh P - 1) + \text{PsinhP} + \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots(4.80)$$

จากสมการ (4.77)-(4.80) ถ้าให้ $\alpha = 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2 และ C_2 แสดงดังในรูปที่ 4.37 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่ $\omega = \infty$ ค่าเซ็นซิวิตีจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ R_1, C_2 จะมีค่าต่ำกว่า C_1, R_2

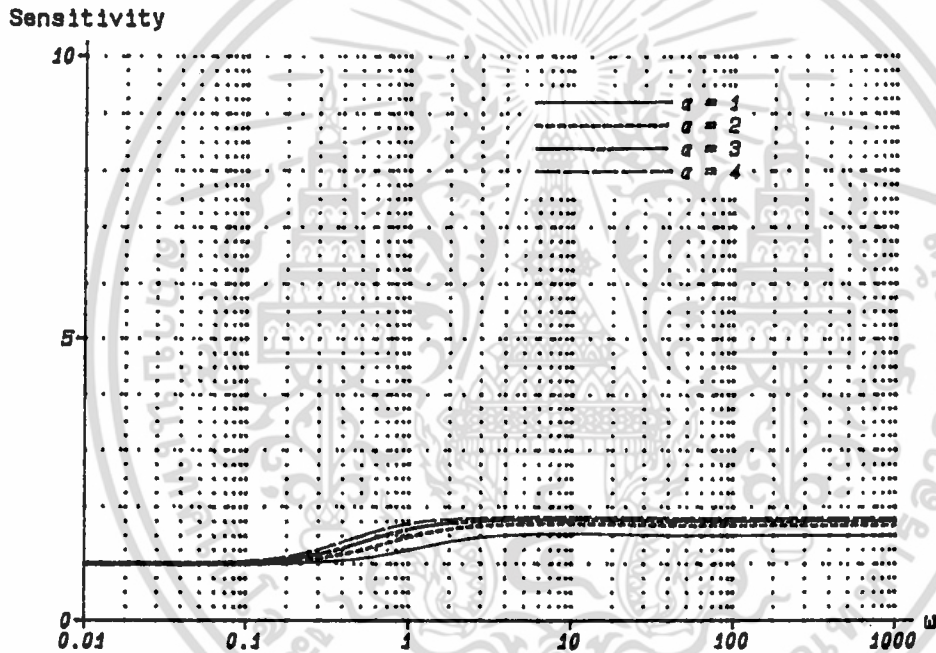
จากวงจรในรูปที่ 4.32 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.73) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K คือ

$$\frac{T(S)}{S} = \frac{(2\alpha + 1) \cosh P - 2\alpha}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \dots(4.81)$$



รูปที่ 4.37 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2

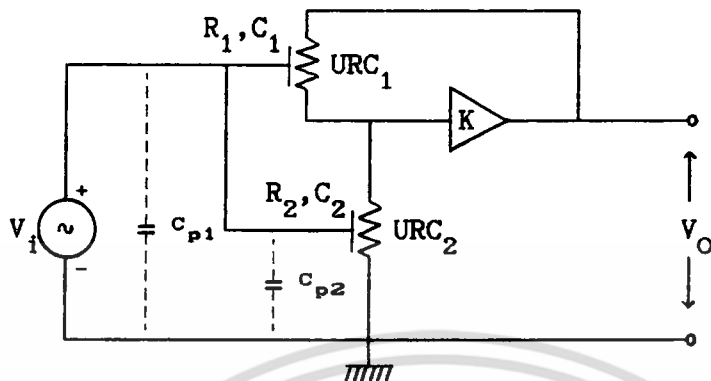
จากสมการ (4.81) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3, 4$ จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $(2\alpha+1)/(\alpha+1)$ และในช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และเมื่อเทียบวงจรของความถี่สูงแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.32 กับวงจรของความถี่สูงแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวงจรของความถี่สูงในแบบที่ 3 มีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าทั้งวงจรของความถี่สูงในแบบที่ 1 และแบบที่ 2



รูปที่ 4.38 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

วงจรของความถี่สูงแบบแรกที่ผลิตทวีปาร์ทอซซีในแบบที่ 4 แสดงดังในรูปที่ 4.39 โดยให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = \sqrt{SR_1 C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2 C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.39 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{\frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 (\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}}{\frac{1}{K} \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots(4.82)$$



รูปที่ 4.39 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซีแบบที่ 4

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1 C_1 = R_2 C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.82) จะได้

$$T(P) = \frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cosh P - \frac{R_1}{R_2} - 1}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cosh P - 1} \quad \dots(4.83)$$

จากสมการ (4.83) ถ้าให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงคือ

$$T(P) = \frac{(\alpha+1) \cosh P - \alpha - 1}{(\alpha+1) \cosh P - \alpha} \quad \dots(4.84)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

จากสมการ (4.83) ถ้าให้ $K = \infty$ (Infinity Gain Amplifier) จะได้

$$T(P) = -(\alpha+1) \cosh P + \alpha + 1 \quad \dots(4.85)$$

ในกรณีที่ $K = 1$ ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 4 ในสมการ (4.84) จะเหมือนกับทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 3 ในสมการ (4.74) ซึ่งทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และ เส้นชีวิตวิตซ์ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 ของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.39 เหมือนกับแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.32

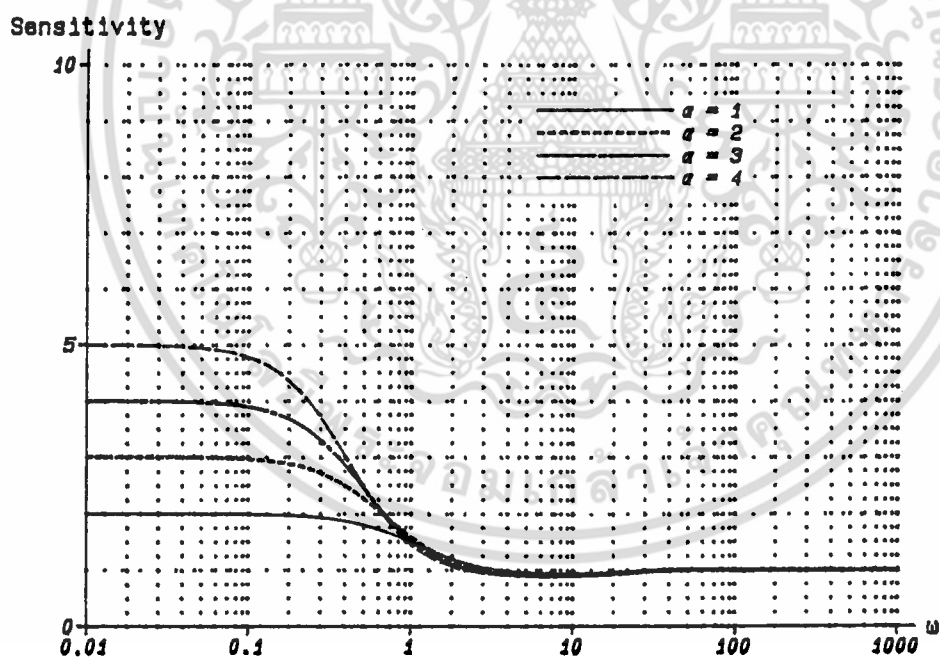
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors ของวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซีในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่า C_{p1} และ C_{p2} จะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) กับกราวด์ จึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

จากวงจรในรูปที่ 4.39 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K

ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.83) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ ซึ่งค่าเซ็นซิวิตี้ที่ได้คือ

$$\frac{T(S)}{S} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \quad \dots(4.86)$$

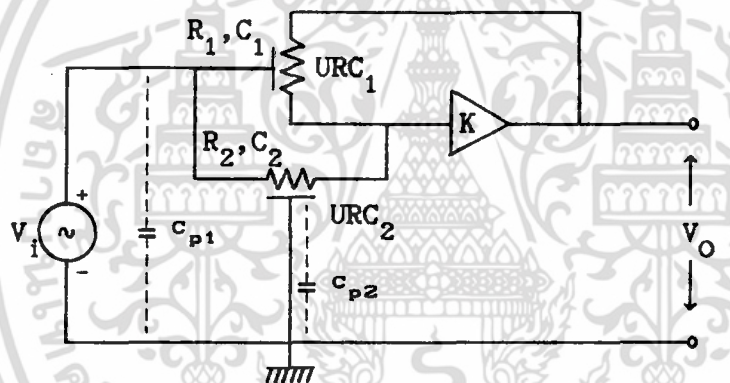
จากสมการ (4.86) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 จะได้ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.40 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตี้ของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตี้ของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$ และเมื่อเทียบวงจรของความถี่สูงแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.39 กับวงจรของความถี่สูงแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าวงจรของความถี่สูงในแบบที่ 4 มีค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าแบบที่ 3 ในช่วงความถี่สูง แต่ในช่วงความถี่ต่ำเซ็นซิวิตี้ของวงจรความถี่สูงในแบบที่ 3 ต่ำกว่าแบบที่ 4



รูปที่ 4.40 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

4.4 การออกแบบวงจรอควไลเซอร์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี

ในระบบการรับส่งสัญญาณโดยทั่วไปมักจะต้องการให้คุณลักษณะของขนาดต่อความถี่ของระบบราบเรียบที่สุด (Maximally Flat Amplitude Characteristic) แต่ในบางกรณีอาจต้องการยกระดับหรือลดระดับ (Equalize) ของสัญญาณบางช่วงความถี่ เช่น การยกหรือลดระดับความถี่สูงของ Tone Control ในระบบเสียง (Audio) [18] หรือการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสี (Chrominance) ในระบบการส่งสัญญาณภาพ (Video) [20] ในบทความนี้จะเสนอวิธีการใหม่ในการออกแบบอควไลเซอร์ (Equalizer) โดยใช้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชี คือ เราจะใช้ Op-Amp หรือตัว Amplifier อื่น ๆ เช่น Video Amp จำนวน 1 ตัวร่วมกับ Uniform Distributed RC 2 ตัว โดยในบทความนี้จะเสนอมวงจรอควไลเซอร์ 2 แบบ โดยมวงจรอควไลเซอร์ในแบบแรกสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 วงจรอควไลเซอร์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีแบบที่ 1

เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดัน (Positive Voltage Gain) เท่ากับ K และกำหนดให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรรูปที่ 4.41 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{P_1 (\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}}{K \left(\frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots (4.87)$$

ถ้ากำหนดให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.87) จะได้

$$T(P) = \frac{\cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \cosh P - 1} \dots(4.88)$$

จากสมการ (4.88) กำหนดให้อัตราขนาดมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรอควิลเซอ์ดังสมการ (4.89)

$$T(P) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha + 1}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \dots(4.89)$$

โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

วงจรอควิลเซอ์แบบแยกที่ผลิตบริษัทอาซีในรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors จะเห็นได้ว่า C_{p1} จะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) กับกราวด์ ส่วน C_{p2} จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

* จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.89) สมมติต้องการให้ลดระดับที่ความถี่สูงสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่า α เช่นเมื่อต้องการลดระดับที่ความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, 4dB ซึ่งทำได้โดยกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 8.2, 3.85, 2.42 และ 1.71 ตามลำดับ โดยที่ค่า α สามารถหาได้ด้วยความสัมพันธ์คือ

$$\frac{1}{\alpha} = 10^{dB/20} - 1 \dots(4.90)$$

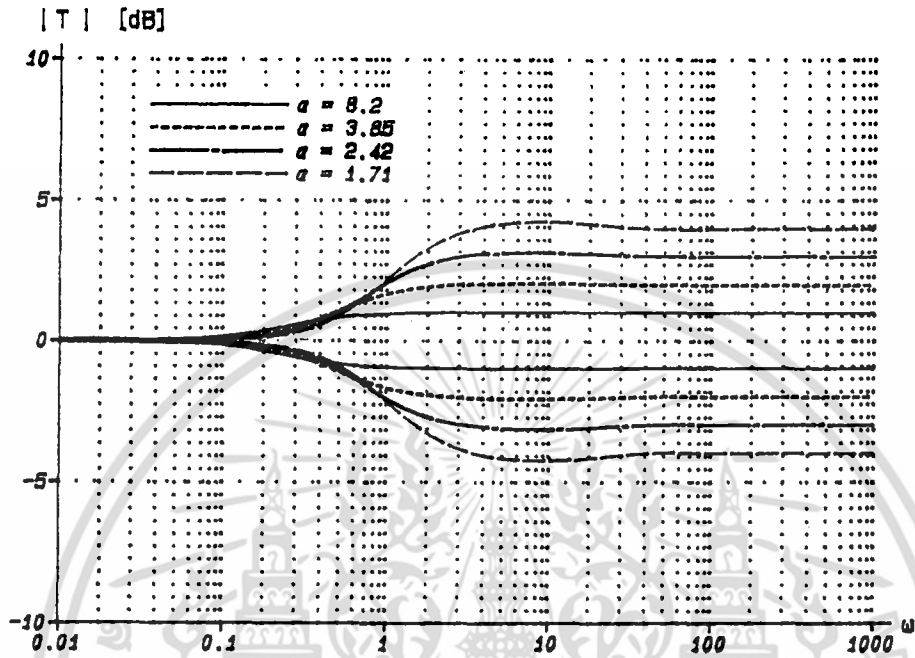
ถ้าต้องการยกระดับที่ความถี่สูง สามารถทำได้โดยเพิ่มออปแอมป์ขึ้น 1 ตัว และนำเอาสัญญาณอินพุตป้อนต่อเข้าขาบวกของออปแอมป์ และให้สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ต่อเข้าวงจรในรูปที่ 4.41 ป้อนกลับ (Feedback) เข้าออปแอมป์ทางขาลบ ซึ่งจะทำให้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันกลับกัน ~~(16.17)~~ คือ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{T(P)} \dots(4.91)$$

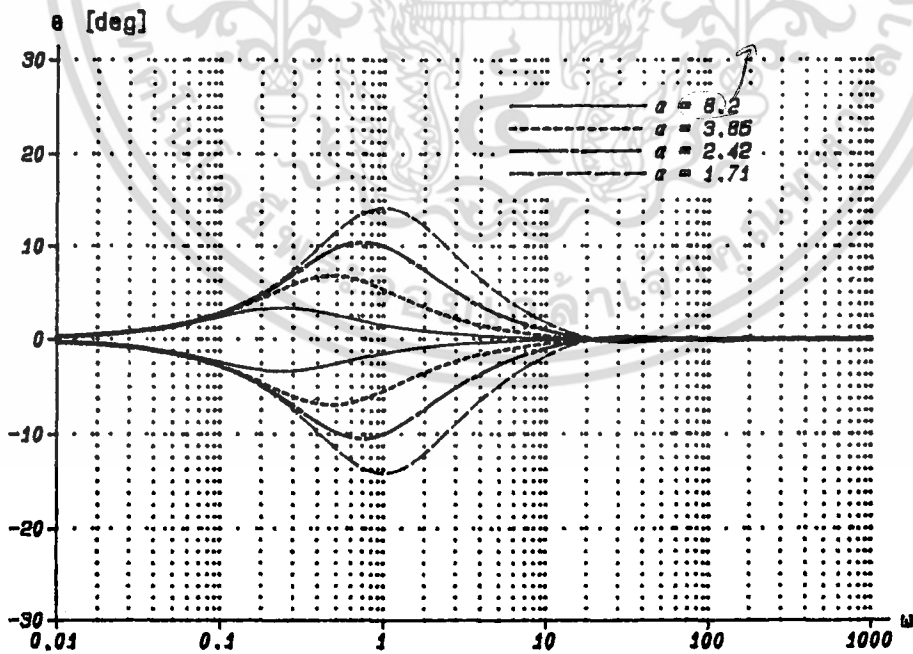
ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ (Magnitude Response) ของวงจรอควิลเซอ์ตามสมการ (4.89) และ (4.91) ที่สมมติให้ $\alpha = 8.2, 3.85, 2.42$ และ 1.71 แสดงดังในรูปที่ 4.42 ส่วนค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.43 และ รูปที่ 4.44 ตามลำดับ

3

4



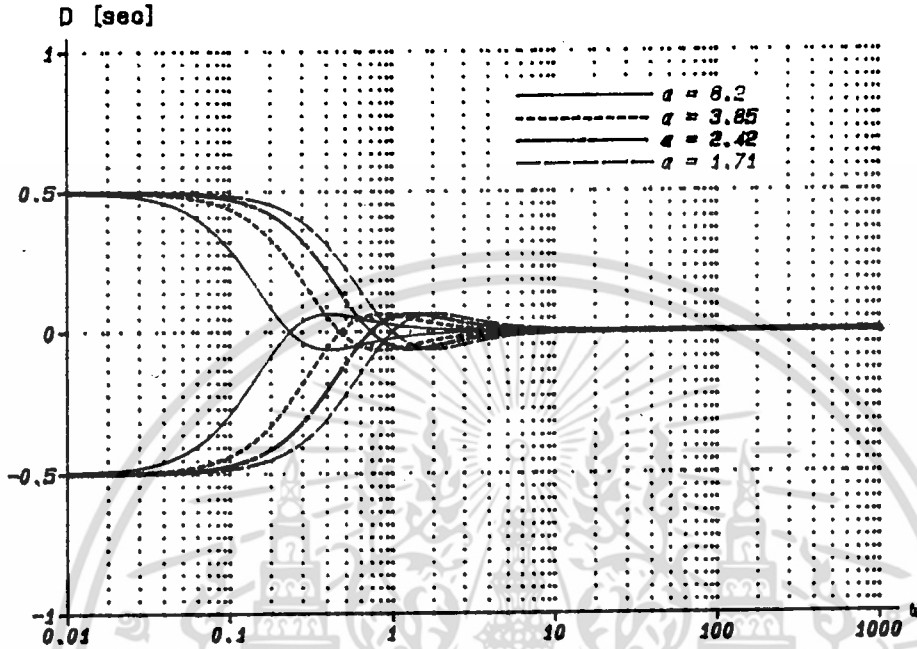
รูปที่ 4.42 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.43 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



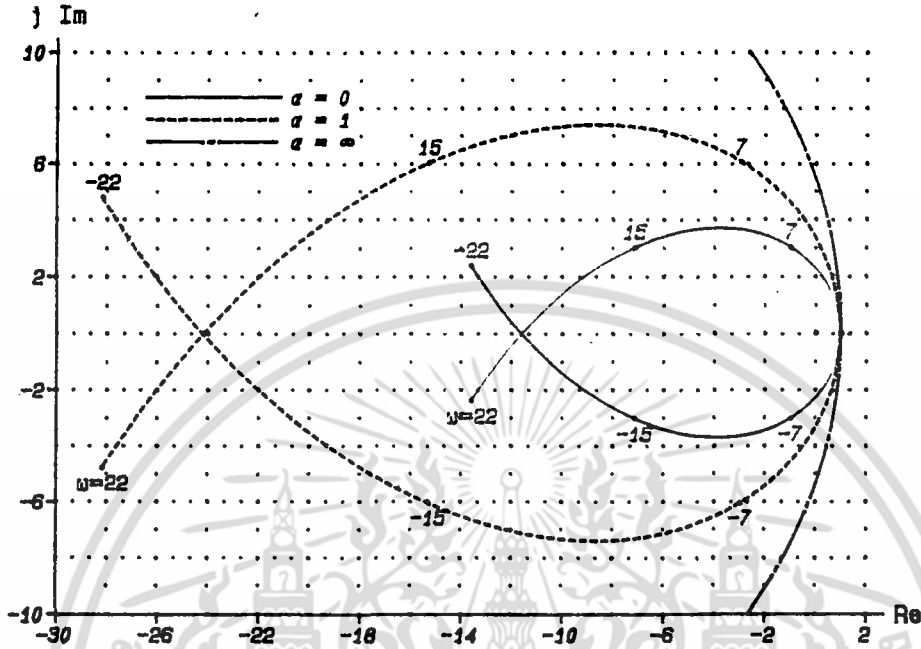
รูปที่ 4.44 แสดงผลตอบสนองแอมพลิจูด

จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (4.89) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์โดเนแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อให้ α มีค่าระหว่าง 0 ถึง ∞ จุด Origin ใน D(P)-Plane จะถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อต ฉะนั้นวงจรมีค่าของไลเชอร์ในรูปที่ 4.41 ที่กำหนดอัตราขยาย $K = 1$ จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า α อยู่ระหว่าง 0 ถึง ∞

จากวงจรมีค่า $K = 1$ ในรูปที่ 4.41 หาค่าเช่นขั้วตีตัวของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2 โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ ฉะนั้นจากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (4.87) จะได้

$$T(S) = \frac{\sinh \sqrt{SR_2C_2} (\cosh \sqrt{SR_1C_1} - 1) + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh \sqrt{SR_1C_1}}{\sinh \sqrt{SR_2C_2} (\cosh \sqrt{SR_1C_1} - 1) + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \sinh \sqrt{SR_1C_1} \cosh \sqrt{SR_2C_2}} \quad (4.92)$$

เมื่อกำหนดให้ $R_1C_1 = R_2C_2$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเช่นขั้วตีตัวของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้



รูปที่ 4.45 แสดงไนควิสต์ไดอะแกรม

$$S_{R1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha \text{PsinhP} + \text{PcothP} + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha \text{PsinhP} + (\text{PcothP} + 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.93)$$

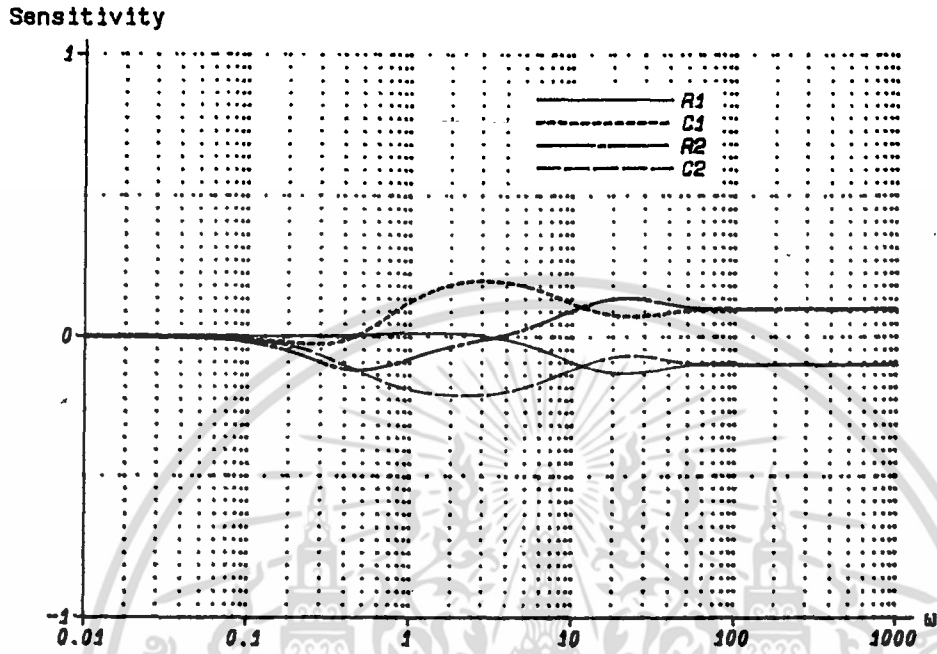
$$S_{C1} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha \text{PsinhP} + \text{PcothP} - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha \text{PsinhP} + (\text{PcothP} - 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.94)$$

$$S_{R2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{PcothP} - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{PcothP} + \text{PsinhP} - \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.95)$$

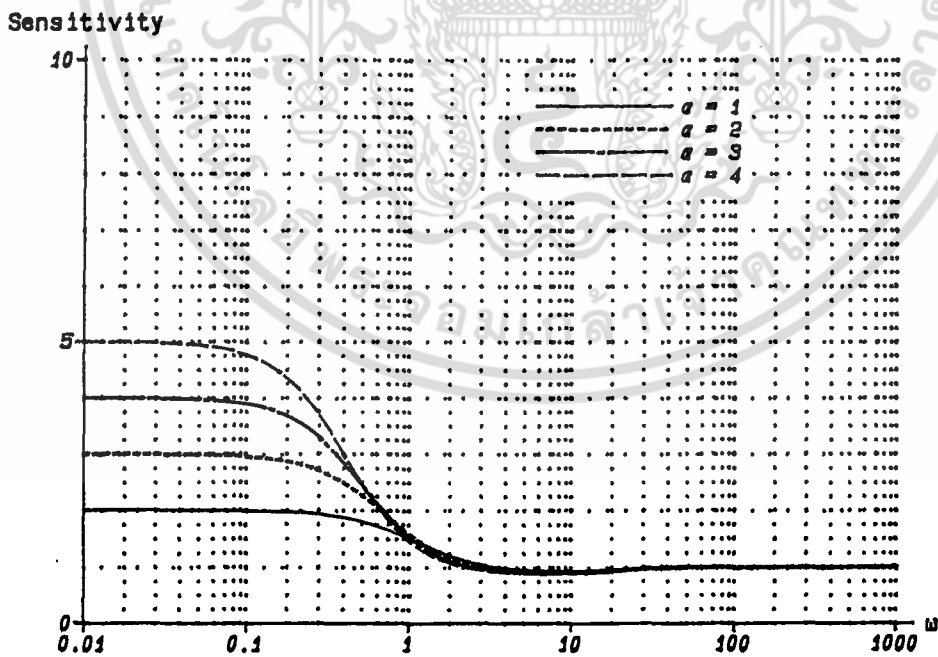
$$S_{C2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{PcothP} + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{PcothP} + \text{PsinhP} + \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.96)$$

จากสมการ (4.93) - (4.96) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 4$ จะได้ค่าเช่นขั้วตวัดของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2 และ C_2 แสดงดังในรูปที่ 4.46 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าเช่นขั้วตวัดที่หาค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ R_1, C_1, R_2, C_2



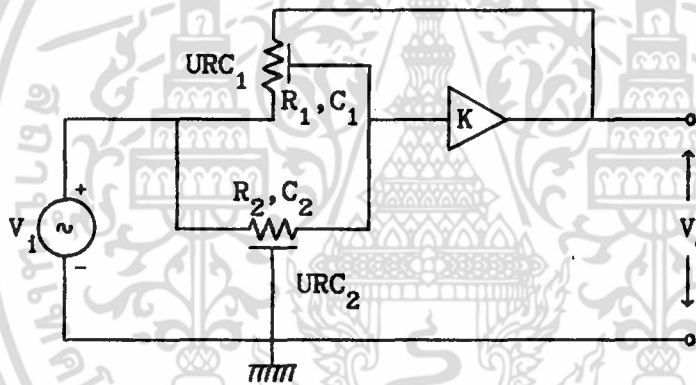
รูปที่ 4.47 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรในรูปที่ 4.41 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเช่นชีวิตวิบัติของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.88) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ค่าเช่นชีวิตวิบัติของอิลิเมนต์ K ดังนี้

$$\frac{T(S)}{K} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \quad \dots(4.97)$$

จากสมการ(4.97) ถ้าสมมติให้ $\alpha = 1, 2, 3$ และ 4 จะได้ค่าเช่นชีวิตวิบัติของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.47 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ $\omega = 0$ ค่าเช่นชีวิตวิบัติของ K จะมีค่าเท่ากับ $\alpha+1$ และในช่วงความถี่สูงที่ $\omega = \infty$ ค่าเช่นชีวิตวิบัติของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 4.48 วงจรอิลิเมนต์ไฮเซอร์แบบแยกที่ผลิตทวีตอาซีแบบที่ 2

ต่อจากหน้า 3

วิธี \Rightarrow วงจรอิลิเมนต์ไฮเซอร์แบบแยกที่ผลิตทวีตอาซีแบบที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 4.48 เมื่อให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และให้ $P_1 = \sqrt{SR_1C_1}$, $P_2 = \sqrt{SR_2C_2}$ จากวงจรในรูปที่ 4.48 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$T(P) = \frac{\frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2}{R_2 \sinh P_2}}{\frac{1}{K} \left(\frac{2P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1}} \quad \dots(4.98)$$

ถ้าให้ $P = P_1 = P_2$ หรือ $R_1C_1 = R_2C_2$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.98) จะได้

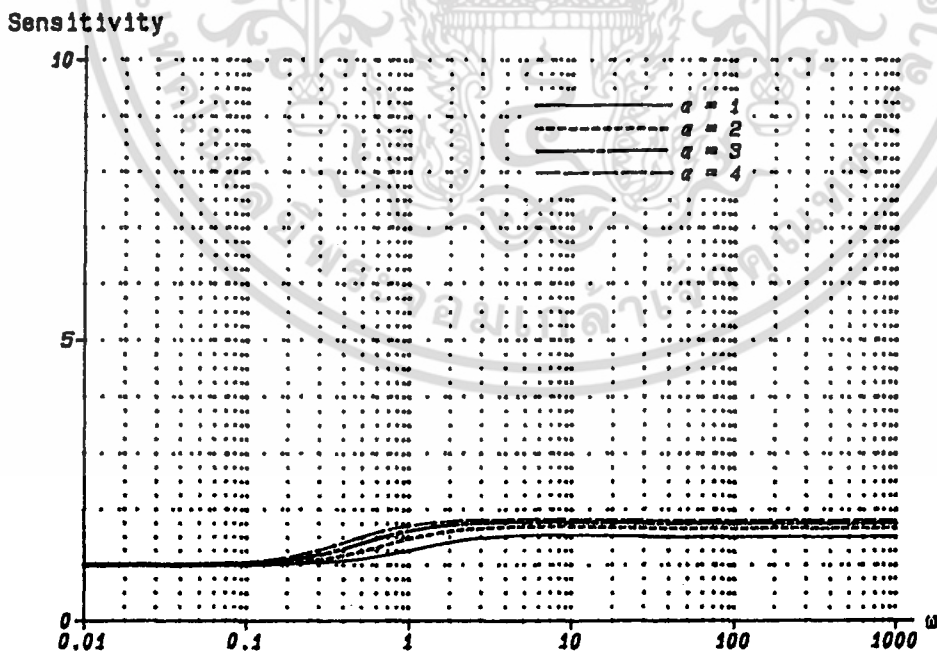
$$T(P) = \frac{\cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{K} \left(2 + \frac{R_1}{R_2} - K \right) \cosh P - \frac{2}{K} + 1} \quad \dots (4.99) \quad (2)$$

จากสมการ (4.99) ถ้ากำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ (Unity Gain Amplifier) และให้ $\alpha = R_2/R_1$ จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวอร์คโวลเทจคือ

$$T(P) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha + 1}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \quad \dots (4.100) \quad (3)$$

ในกรณีที่กำหนดให้ $K = 1$ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวอร์คโวลเทจที่ ~~2~~ ในสมการ (4.100) จะเหมือนกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวอร์คโวลเทจแบบที่ 1 ในสมการ (4.89) ซึ่งทำให้ผลตอบแทนของความถี่ เสถียรภาพของวงจรวอร์คโวลเทจ และเช่นชีวิตวิบัติของอิมพีแดนซ์ R_1, C_1, R_2, C_2 ของวงจรวอร์คโวลเทจแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.48 เหมือนกับแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.41

จากวงจรวอร์คโวลเทจในรูปที่ 4.48 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเช่นชีวิตวิบัติของอิมพีแดนซ์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $T(S)$ ในสมการ (4.99) แล้วกำหนดให้ $K = 1$ และ $\alpha = R_2/R_1$ ซึ่งจะได้ค่าเช่นชีวิตวิบัติ คือ



รูปที่ 4.49 แสดง Sensitivity ของอิมพีแดนซ์ K

$$\frac{r(s)}{S_K} = \frac{(2\alpha + 1) \cosh P - 2\alpha}{(\alpha + 1) \cosh(P) - \alpha} \quad (4) \dots(4.101)$$

(4)
 จากสมการ (4.101) ถ้าสมมติให้ α มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.49 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำที่ $\omega = 0$ ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงที่ $\omega = \infty$ ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ $(2\alpha+1)/(\alpha+1)$ และเมื่อเปรียบเทียบขั้ววางจรวดอควอไลเซอร์แบบที่ 2 ในรูปที่ 4.48 กับขั้ววางจรวดอควอไลเซอร์แบบที่ 1 ในรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าขั้ววางจรวดอควอไลเซอร์แบบที่ 2 มีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าขั้ววางจรวดอควอไลเซอร์แบบแรก ตั้งค่าไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบและการประยุกต์ใช้งาน

5.1 การทดสอบวงจรแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์

เพื่อเป็นการยืนยันให้เห็นว่า วงจรแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 สามารถนำไปใช้งานในเชิงปฏิบัติได้จริง จึงได้ทำการทดสอบวงจรในแต่ละแบบ คือ วงจรกรองความถี่ต่ำ 4 แบบ, วงจรกรองความถี่สูง 4 แบบ และวงจรอควอไลเซอร์ 2 แบบ โดยกำหนดให้อัตราขยายของแต่ละวงจรมีค่า $K = 1$ และกำหนดให้ $\alpha = 4$ วงจรกรองความถี่ที่ทดลองสมมติต้องการให้ได้จุดคัทออฟ -3 dB ที่ความถี่ 5 KHz ซึ่งทำได้โดยการสเกลทางความถี่ (Frequency Scaling) และเพื่อให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติจะต้องทำการสเกลทางขนาด (Magnitude Scaling) อีกด้วย

การสเกลทางความถี่จะมีผลต่อการเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์แอคทีฟ เช่น C และ L เท่านั้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์จะมีค่าแปรตามความถี่ และเพื่อที่จะให้อิมพีแดนซ์คงที่การเปลี่ยนแปลงความถี่ ω จะต้องถูกชดเชยด้วยค่าที่สอดคล้องกันดังนี้

$$|Z_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{K_f \omega (1/K_f) C} = \frac{1}{K_f \omega C_{new}}$$

$$|Z_L| = \omega L = K_f \omega \frac{1}{K_f} L = K_f \omega L_{new}$$

โดยที่ K_f เป็นตัวแปรของความถี่ที่สเกล

การสเกลทางขนาดคือ การเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทุกตัวในวงจรด้วยตัวประกอบ K_m โดยที่อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์พาสซีฟมีค่าเป็นดังนี้

$$Z_R = R, \quad |Z_C| = \frac{1}{\omega C}, \quad |Z_L| = \omega L$$

ทำการสเกลทางขนาดโดยคูณด้วยค่า K_m จะได้

$$K_m Z_R = K_m R, \quad K_m |Z_C| = \frac{1}{\omega C / K_m}, \quad K_m |Z_L| = K_m \omega L$$

สรุปรวมผลของการสเกลทางความถี่และทางขนาดที่มีผลต่ออุปกรณ์พาสซีฟได้ดังนี้

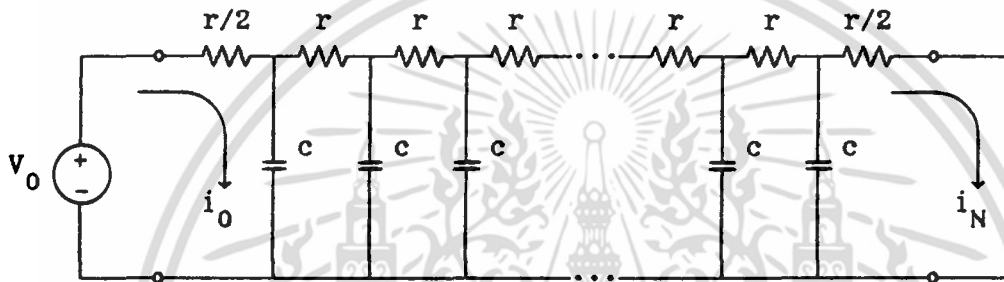
$$C_{new} = \frac{1}{K_m K_f} C_{old} \quad \dots(5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{\text{new}} = \frac{K_m}{K_f} L_{\text{old}} \quad \dots(5.2)$$

$$R_{\text{new}} = K_m R_{\text{old}} \quad \dots(5.3)$$

เนื่องจากตัว URC ที่ทดลองนี้ยังไม่สามารถหาได้ ฉะนั้นจึงใช้วิธีการประมาณ Uniform Distributed RC ด้วยเน็ตเวิร์กแบบ Lumped RC จากโครงสร้างของเน็ตเวิร์กแบบลัมด์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.5 สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของเน็ตเวิร์กแบบลัมด์ค่าซีตามที่แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงการประมาณ Uniform Distributed RC

เมื่อพิจารณา Short-circuited ของ Distributed RC ที่ถูกประมาณขึ้นด้วยจำนวนเซกชั่นที่เหมือนกันจำนวน N เซกชั่น ในสภาวะเริ่มต้นเมื่อป้อนแรงดันอินพุตเป็น Unit Step จะได้กระแส $i_n(t)$ ที่ n เซกชั่น จากที่กล่าวมาแล้วในสมการ (3.48) จะได้ $Z_1 = r/2$, $Z_2 = 1/cS$ และกระแสในกรณีเอากัฟท์ลัดวงจรสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$I_n(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{\frac{1}{cS} \sinh \zeta \sinh N\zeta} \cdot \frac{\cosh(N-n)\zeta}{\sinh \zeta \sinh N\zeta} = c \frac{\cosh(N-n)\zeta}{\sinh \zeta \sinh N\zeta} \quad \dots(5.4)$$

โดยที่ $\zeta = \cosh^{-1} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + 1 \right) = \cosh^{-1} \left(\frac{rc}{2} S + 1 \right)$

เมื่อแทนค่า Z_1, Z_2 ลงในสมการ (3.54) จะได้แมทริกซ์อยู่ในรูปของพารามิเตอร์แบบ Short-Circuit Admittance คือ

$$[Y] = \frac{cS}{\sinh \zeta} \begin{pmatrix} \coth N\zeta & -\operatorname{csch} N\zeta \\ -\operatorname{csch} N\zeta & \coth N\zeta \end{pmatrix} \quad \dots(5.5)$$

โดยที่

$$\cosh N\zeta = 2^{N-1} \prod_{n=1}^N \left(\cosh \zeta - \cos \frac{(2n-1)\pi}{2N} \right) \quad \dots(5.6)$$

$$\sinh N\zeta = 2^{N-1} \sinh \zeta \prod_{n=1}^{N-1} \left(\cosh \zeta - \cos \frac{n\pi}{N} \right) \quad \dots(5.7)$$

ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$Y_{11} = Y_{22} = \frac{cS \prod_{n=1}^N \left(\left(1 - \cos \frac{(2n-1)\pi}{2N} \right) + \frac{rcS}{2} \right)}{\left(\left(1 + \frac{rcS}{2} \right)^2 - 1 \right) \prod_{n=1}^{N-1} \left(\left(1 - \cos \frac{n\pi}{N} \right) + \frac{rcS}{2} \right)} \quad \dots(5.8)$$

และ

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{-cS}{2^{N-1} \left(\left(1 + \frac{rcS}{2} \right)^2 - 1 \right) \prod_{n=1}^{N-1} \left(\left(1 - \cos \frac{n\pi}{N} \right) + \frac{rcS}{2} \right)} \quad (5.9)$$

จากสมการ (5.4) สามารถหาโพลได้โดยกำหนดให้

$$\sinh \zeta \sinh N\zeta = 0 \quad \dots(5.10)$$

โดยการแทนค่าสมการ (5.7) ลงในสมการ (5.10) จะได้

$$2^{N-1} \sinh^2 \zeta \prod_{n=1}^{N-1} \left(\cosh \zeta - \cos \frac{n\pi}{N} \right) = 0$$

ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$2^N rcS \left(1 + \frac{rc}{2} S \right) \prod_{n=1}^{N-1} \left(1 + \frac{rc}{2} S - \cos \frac{n\pi}{N} \right) = 0$$

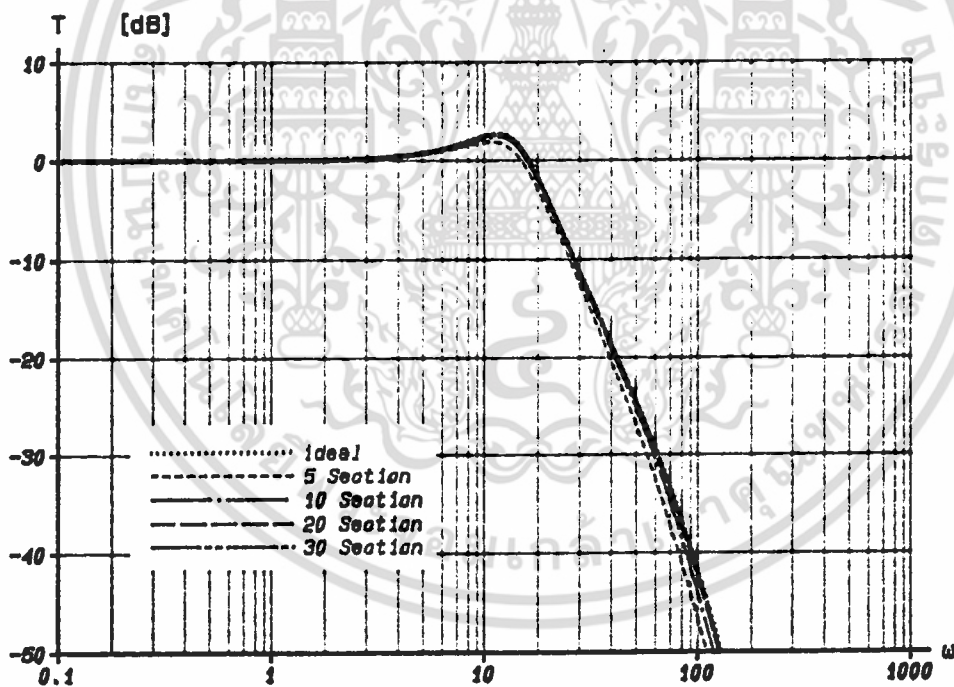
และจะได้ค่ารากคือ

$$S_k = -\frac{2}{rc} \left(1 - \cos \frac{k\pi}{N} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $K = 0, 1, \dots, N$

จะเห็นได้ว่าการประมาณดิสรีวิวิทอัสซีด้วยเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อัสซี ค่ารากที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนเซคชันคือจะมีค่ารากทั้งหมดเท่ากับ $N+1$ โดยมีค่ารากเริ่มต้นอยู่ใกล้แกน $j\omega$ และค่ารากต่อมาจะห่างออกจากแกน $j\omega$ ไปตามลำดับ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับค่ารากของดิสรีวิวิทอัสซี และเนื่องจากค่ารากของดิสรีวิวิทอัสซีมีลักษณะกระจายออกเหมือนอนุกรมเลขคณิตตามที่กล่าวมาแล้ว ฉะนั้นค่ารากที่มีผลกับคุณลักษณะของวงจรถึงเป็นค่ารากช่วงเริ่มต้นซึ่งจะอยู่ใกล้กับแกน $j\omega$ และการที่จะให้ได้รากช่วงเริ่มต้นจำนวนเท่าใดจะขึ้นอยู่กับจำนวนเซคชันของเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อัสซีที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสรีวิวิทอัสซีแบบที่ 1 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อใช้วิธีประมาณ URC ด้วย Lumped RC โดยใช้จำนวนเซคชันเท่ากับ 5, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณโดยการแทนค่าพารามิเตอร์แบบ Short-Circuit Admittance ตามสมการ (5.8) และ (5.9) เพื่อหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่จะได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองทางขนาดที่ได้จากการประมาณ URC ด้วย Lumped RC

จากผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่แสดงในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ Lumped RC จำนวนเซคชันตั้งแต่ 10 ขึ้นไปค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับของ URC โดยเมื่อใช้จำนวนเซคชันเท่ากับ 30 ค่าที่ได้ใกล้เคียงมาก ซึ่งตามในรูปจะทับเส้น Ideal ของ URC ฉะนั้นในการทดลองตัว URC จะ

ใช้โครงสร้างของเน็ทเวิร์กแบบลิมิตอาซีตามทีแสดงในรูปที่ 5.1 โดยต่อร่วมกัน 30 เซกชั้น โดยที่ค่าความต้านทานทั้งหมด $R=rN$ และค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด $C=cN$ เมื่อ N เป็นจำนวนเซกชั้น

จากวงจรของความถี่ต่ำแบบแอกทีฟลิสทรีวิวิทอาซีแบบที่ 1 ตามรูปที่ 4.2 ที่กำหนดให้อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง , $\alpha = R_2/R_1 = 4$ และต้องการให้เกิดความถี่คัทออฟที่ 5 KHz จะได้

$$RC = \frac{\omega_{-3dB}}{2\pi K_f} = \frac{19.156}{2\pi \times 5 \times 10^3} = 6.098 \times 10^{-4}$$

เมื่อทำการสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

$$R_1 = 305 \text{ K}\Omega , C_1 = 2000 \text{ pF} , R_2 = 1.22 \text{ M}\Omega , C_2 = 500 \text{ pF}$$

ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรแสดงดังในรูปที่ 5.3 ส่วนวงจรของความถี่ต่ำแบบแอกทีฟลิสทรีวิวิทอาซีแบบที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9, 4.16 และ 4.18 ตามลำดับ ที่กำหนดให้อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง และ $\alpha = 4$ จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเหมือนกัน เมื่อต้องการให้เกิดความถี่คัทออฟที่ 5 KHz จะได้

$$RC = \frac{15.927}{2\pi \times 5 \times 10^3} = 5.07 \times 10^{-4}$$

เมื่อทำการสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์ดังนี้

สำหรับวงจรของความถี่ต่ำแบบที่ 2 และ 3 โดยที่ $\alpha = R_2/R_1$

$$R_1 = 253 \text{ K}\Omega , C_1 = 2000 \text{ pF} , R_2 = 1.01 \text{ M}\Omega , C_2 = 500 \text{ pF}$$

สำหรับวงจรของความถี่ต่ำแบบที่ 4 โดยที่ $\alpha = R_2/2R_1$

$$R_1 = 127 \text{ K}\Omega , C_1 = 4000 \text{ pF} , R_2 = 1.01 \text{ M}\Omega , C_2 = 500 \text{ pF}$$

ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรของความถี่ต่ำแบบที่ 2, 3 และ 4 แสดงดังในรูปที่ 5.4, 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

จากวงจรของความถี่สูงแบบแอกทีฟลิสทรีวิวิทอาซีแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23, 4.30, 4.32 และ 4.39 ตามลำดับ ที่กำหนดให้อัตราขยายเท่ากับหนึ่ง , $\alpha = R_2/R_1 = 4$ และต้องการให้เกิดความถี่คัทออฟที่ 5 KHz จะได้ดังนี้

สำหรับวงจรของความถี่สูงแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเหมือนกันจะได้

$$RC = \frac{0.48}{2\pi \times 5 \times 10^3} = 1.528 \times 10^{-5}$$

เมื่อทำการสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

$$R_1 = 7.64 \text{ K}\Omega , C_1 = 2000 \text{ pF} , R_2 = 30.6 \text{ K}\Omega , C_2 = 500 \text{ pF}$$

สำหรับวงจรของความถี่สูงแบบที่ 3 และ 4 ซึ่งมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเหมือนกันจะได้

$$RC = \frac{0.387}{2\pi \times 5 \times 10^3} = 1.232 \times 10^{-5}$$

เมื่อทำการสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

$$R_1 = 6.16 \text{ K}\Omega, C_1 = 2000 \text{ pF}, R_2 = 24.6 \text{ K}\Omega, C_2 = 500 \text{ pF}$$

ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรของความถี่สูงแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังในรูปที่ 5.7, 5.8, 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ

ส่วนวงจรอควอไลเซอร์แบบแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาซีแบบที่ 1 และ 2 ตามในรูปที่ 4.41 และ 4.48 ตามลำดับ ซึ่งมีทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเหมือนกัน เมื่อกำหนดให้อัตราขยายมีค่า $K = 1$ สมมติต้องการให้ขหรือลดระดับที่ความถี่สูงเท่ากับ 2 dB ซึ่งจะได้ค่า $\alpha = 3.85$ และสเกลความถี่ไปที่ 5 KHz จะได้

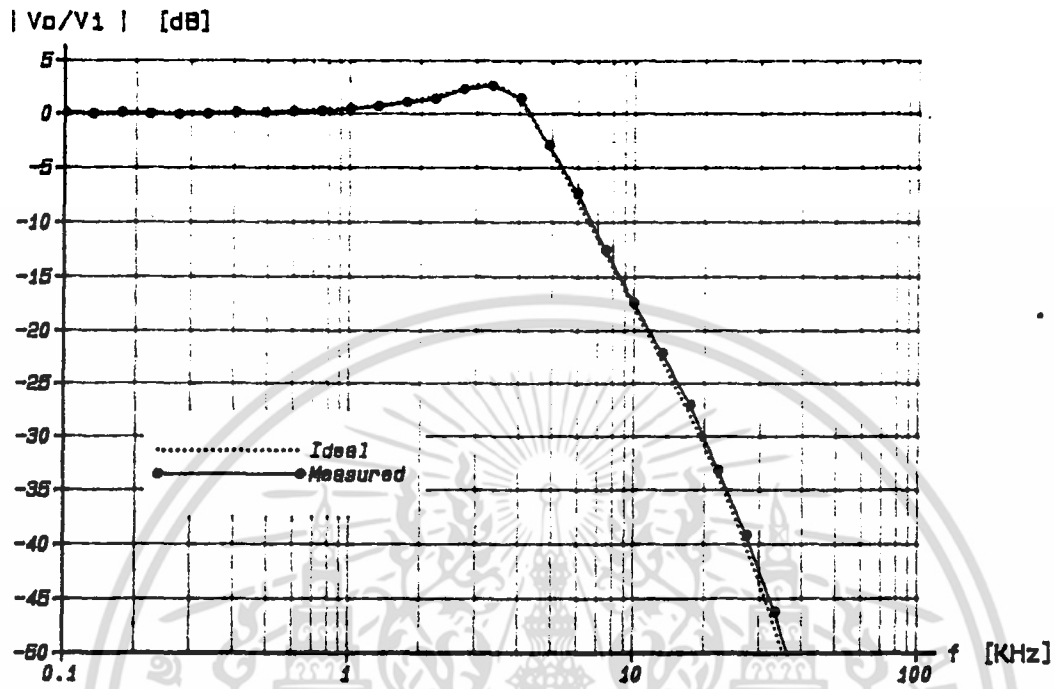
$$RC = \frac{1}{2\pi \times 5 \times 10^3} = 3.183 \times 10^{-5}$$

เมื่อสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

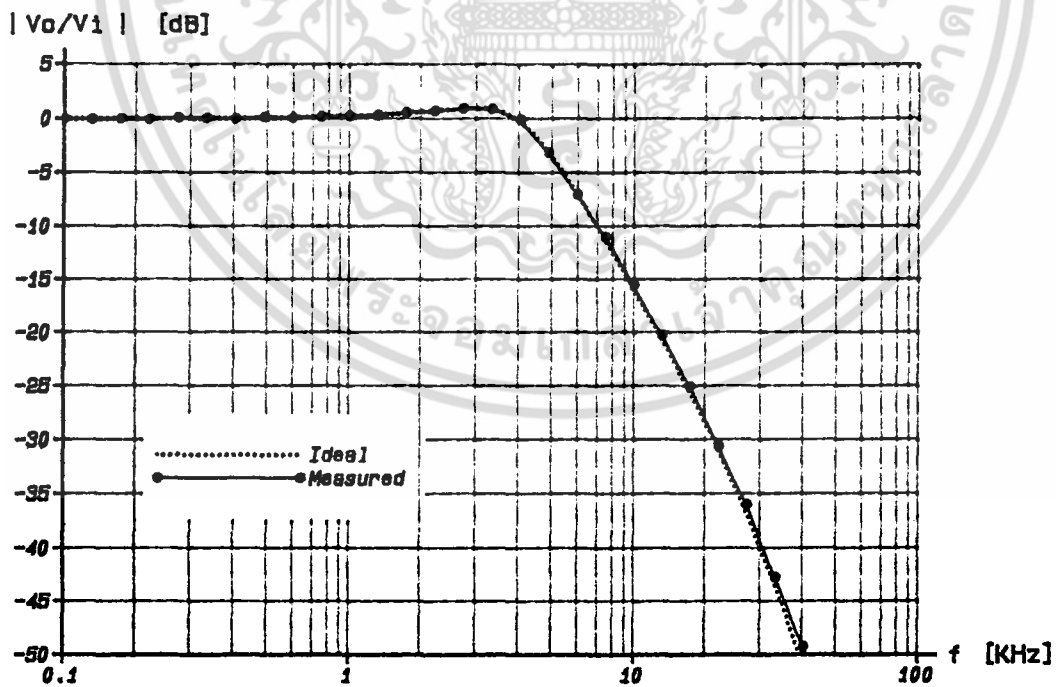
$$R_1 = 63.7 \text{ K}\Omega, C_1 = 500 \text{ pF}, R_2 = 245 \text{ K}\Omega, C_2 = 130 \text{ pF}$$

ซึ่งจะได้ค่าผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรอควอไลเซอร์แบบแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาซีแบบที่ 1 และ 2 แสดงดังในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบวัดค่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาซีตามที่ได้แสดงไว้แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติมาก สำหรับการทดลองเช่นชีวิตวัตของวงจร จากวงจรอควอไลเซอร์แบบแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาซีแบบที่ 2 ตามในรูปที่ 4.48 เมื่อสมมติต้องการให้ลดระดับที่ความถี่สูงเท่ากับ 2 dB ที่ได้ค่า $R_1 = 63.7 \text{ K}\Omega, C_1 = 500 \text{ pF}, R_2 = 245 \text{ K}\Omega, C_2 = 130 \text{ pF}$ การทดลองจะสมมติให้ค่าอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ คือ R และ C แต่ละตัวมีความคลาดเคลื่อน +10 % ผลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่แสดงดังในรูปที่ 5.13 และจากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาซีที่ได้จะมีเช่นชีวิตวัตของอุปกรณ์ต่ำ

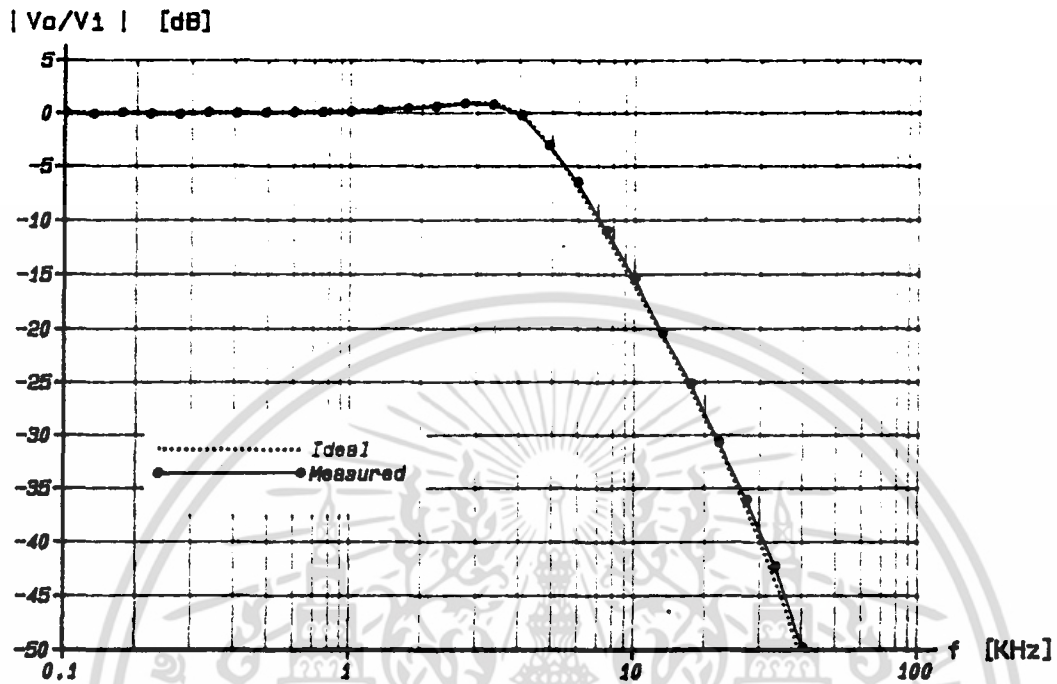


รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 1

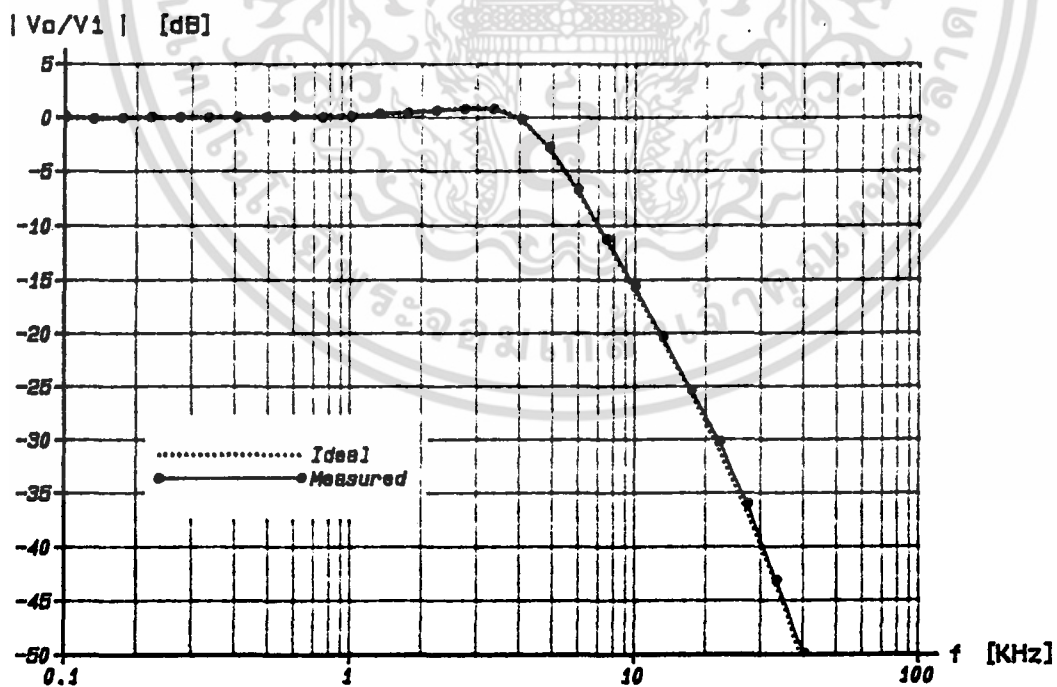


รูปที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

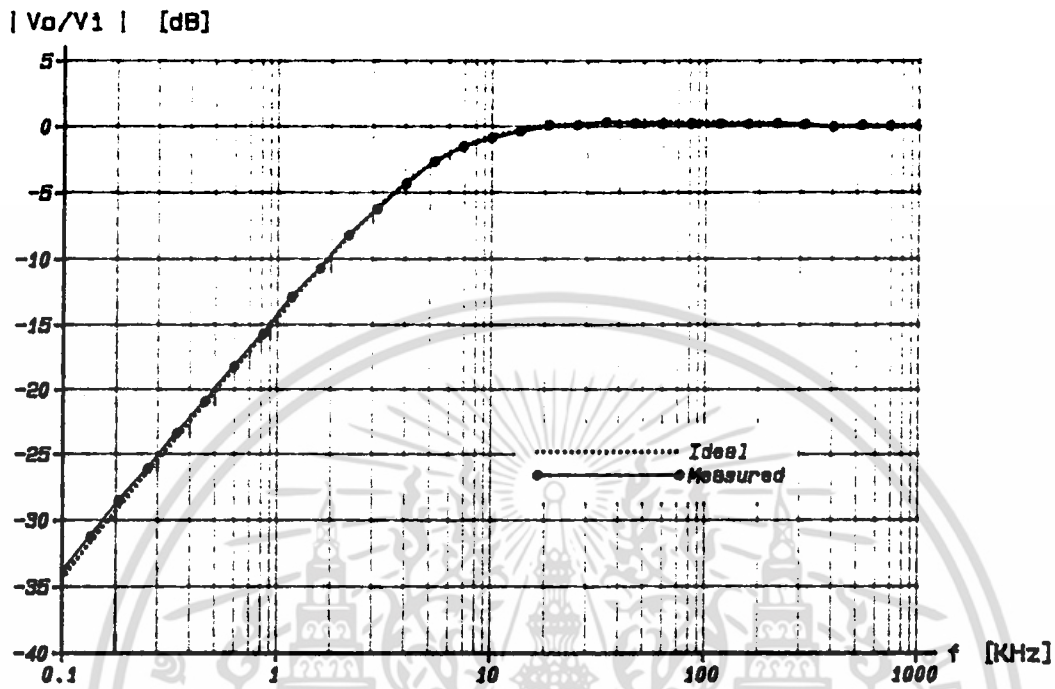


รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 3

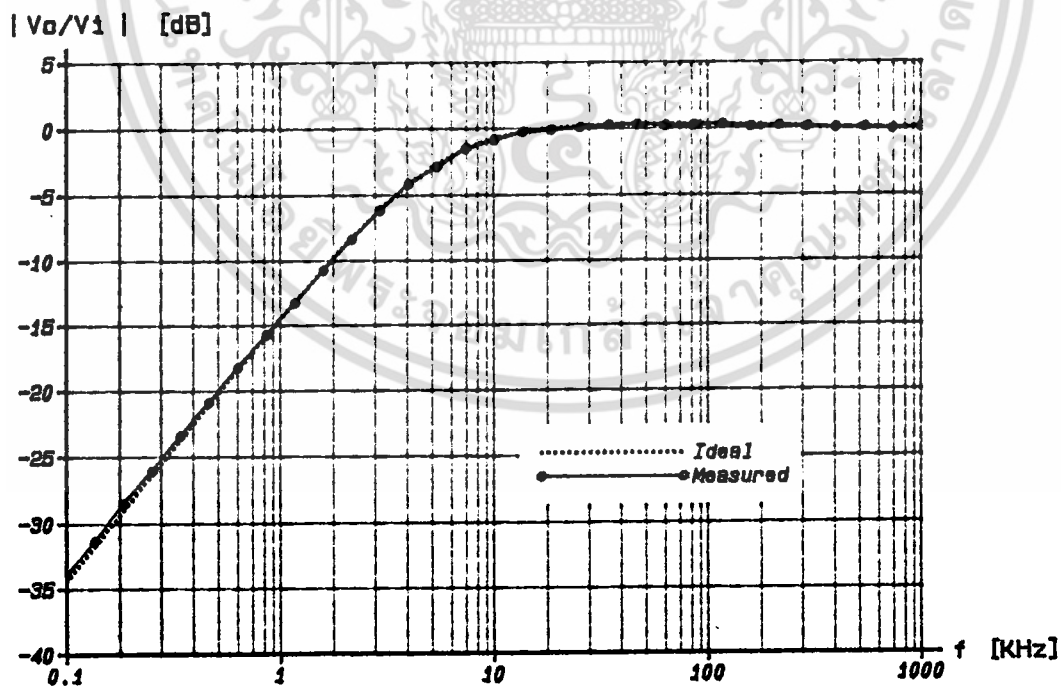


รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

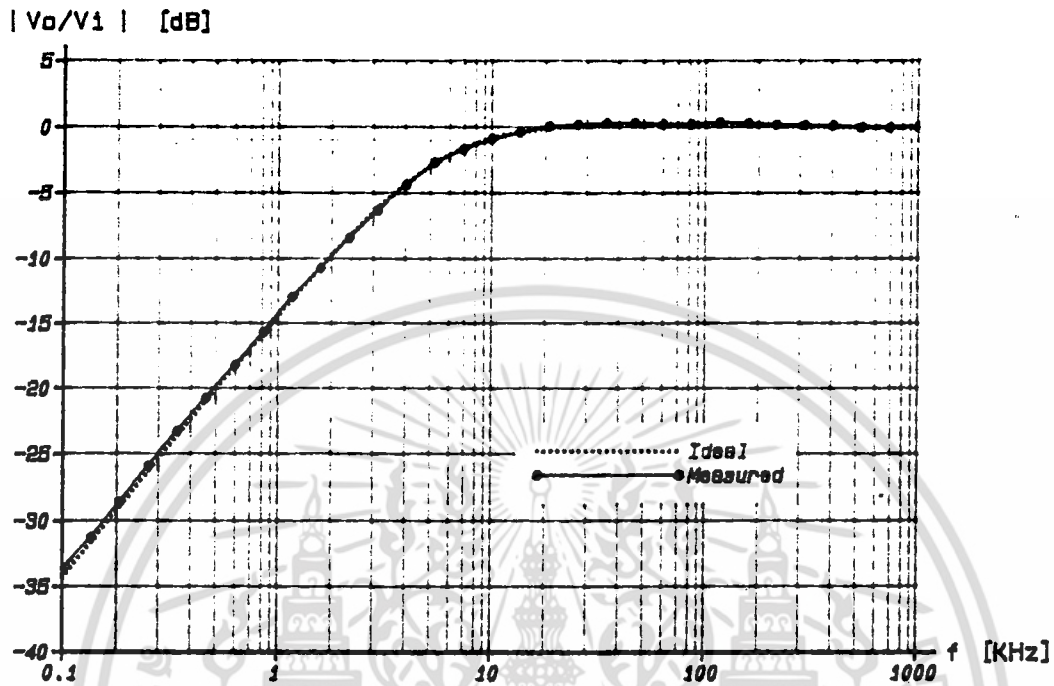


รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 1

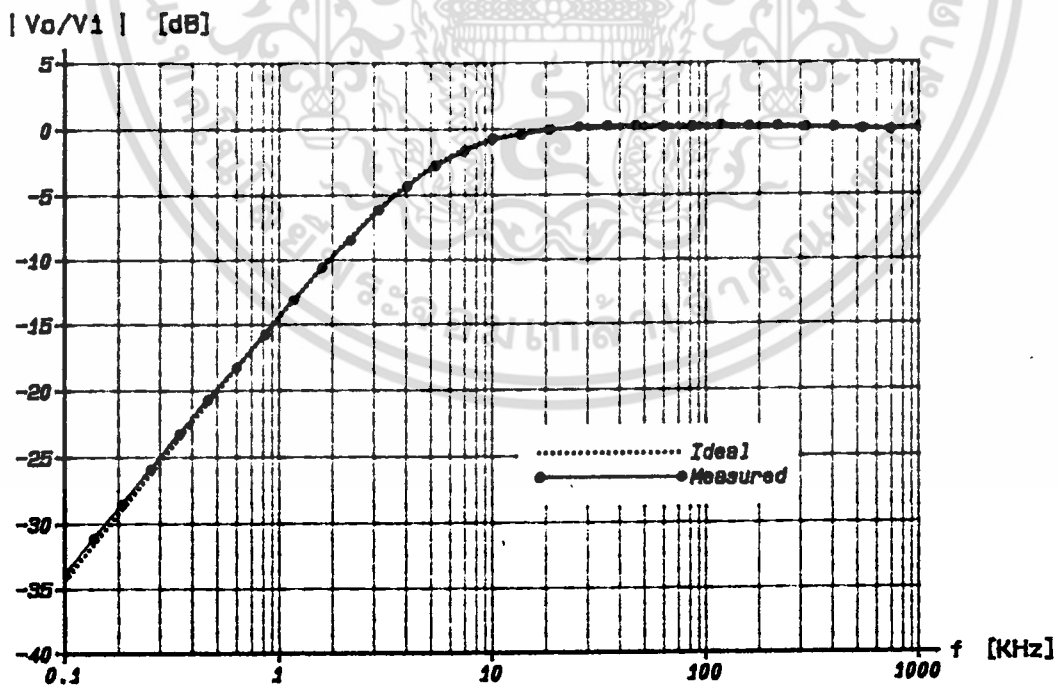


รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

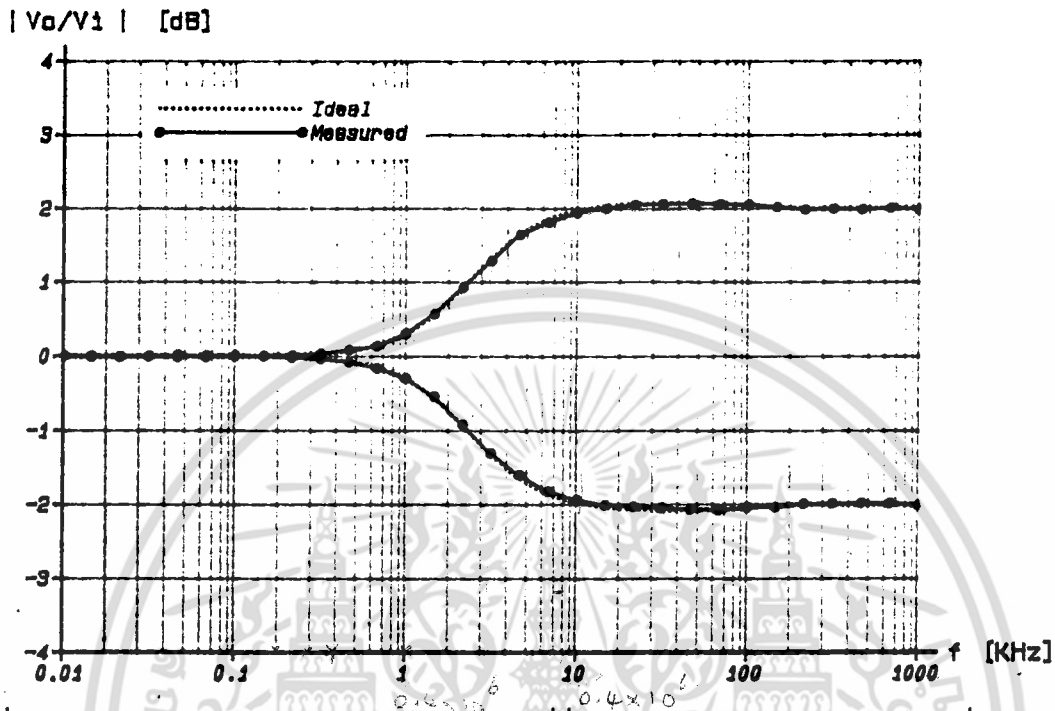


รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 3

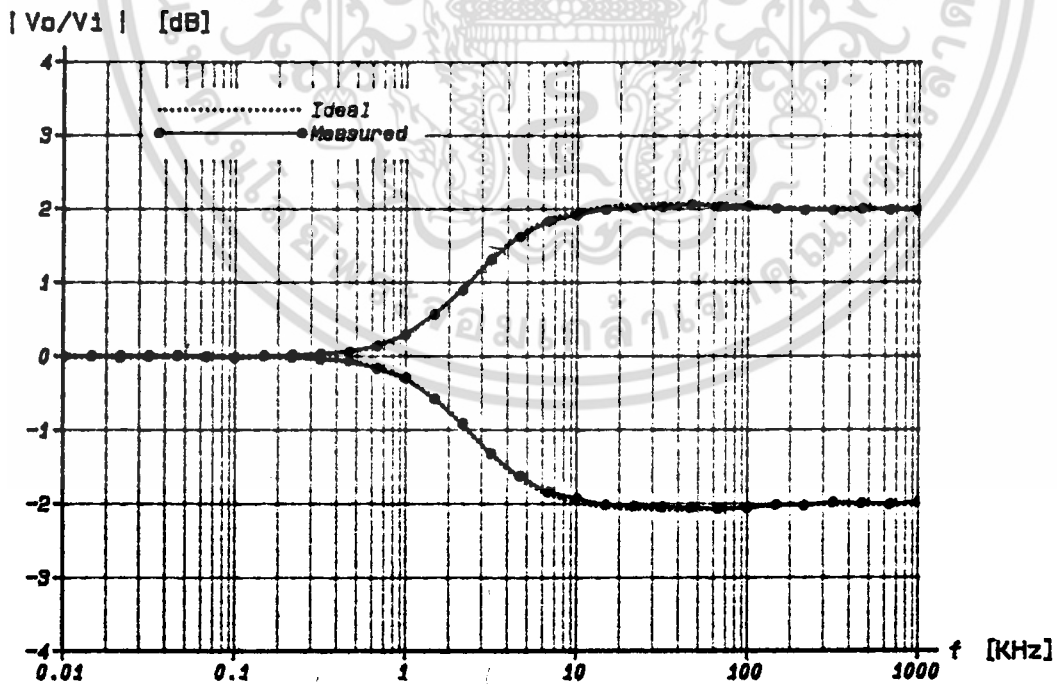


รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

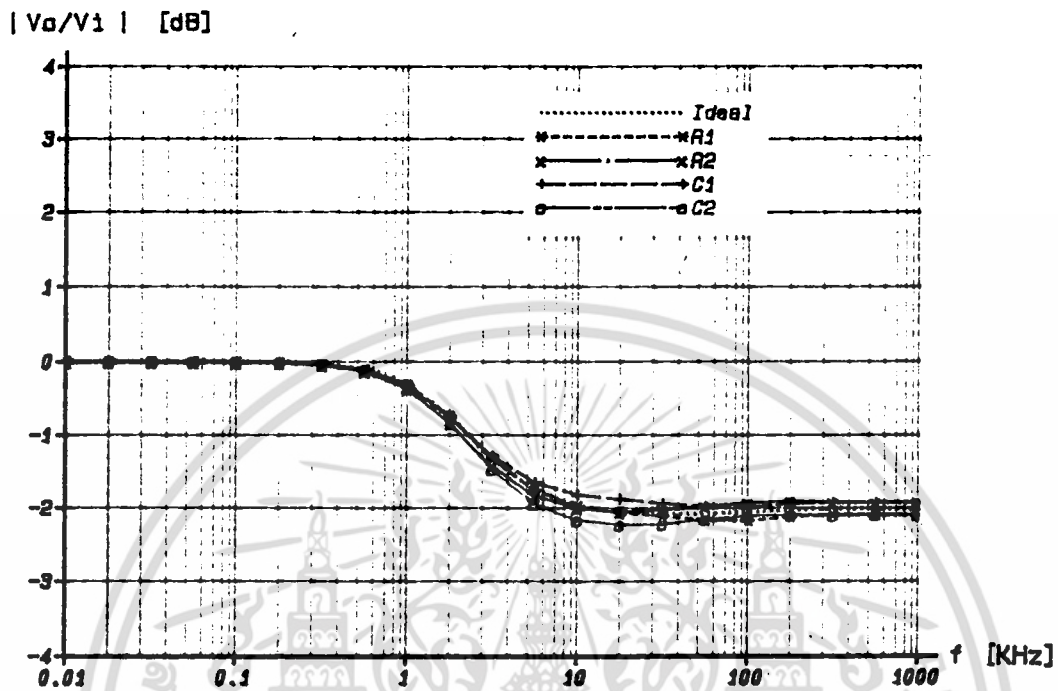


รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกิจวอไลเซอร์แบบที่ 1



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรกิจวอไลเซอร์แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



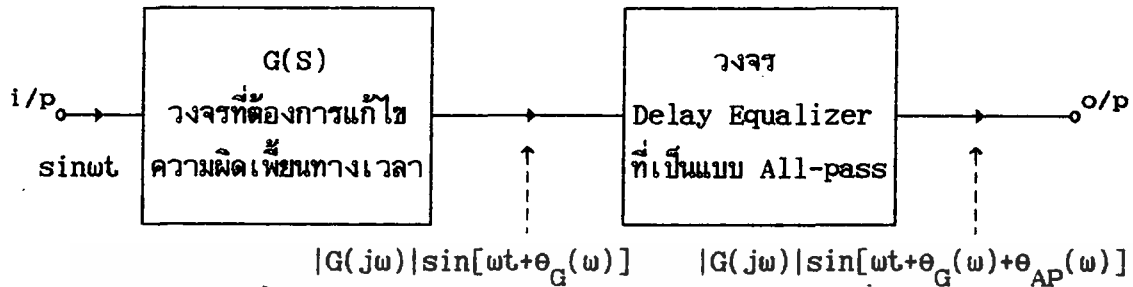
รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรอควอไลเซอร์แบบที่ 2 เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ R_1, R_2, C_1, C_2 มีความคลาดเคลื่อน +10 %

5.2 การออกแบบวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์ (Delay Equalizer)

ในระบบการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคม เช่น ระบบรับส่งของสัญญาณโทรทัศน์และพัลส์ทรานส์มิสชัน (Pulse Transmission) เรามักมีความจำเป็นที่จะต้องชดเชยทั้งทางเฟสและทางขนาดของสัญญาณ โดยทำให้เฟสที่ได้เป็นเชิงเส้นให้มากที่สุดตามที่ต้องการในช่วงทรานส์มิสชันแบนด์ (Transmission Band) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือทำให้กรุปดีเลย์ (Group Delay) คงที่นั่นเอง ในบทนี้จะเสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์ เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรุปดีเลย์คงที่ [21] โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยอิตเตอเรท (Iterate) ในการหาค่าตอบ ซึ่งเน็ตเวิร์กฟังก์ชันที่ได้จะต้องเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้หมดทุกความถี่ (All-pass Network) และทรานส์เฟอร์โคเอฟฟิเชียนของมันเป็นฟังก์ชันที่มีขั้วโรยอยู่ทางซีกขวา และมีโพลอยู่ทางซีกซ้าย ของแกนอิมเมจินารี (Imaginary Axis) ใน S-Plane

การแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลากระทำได้โดยการนำเอาวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์แบบ All-pass ที่สร้างขึ้นมาต่อคาสเคดเข้ากับวงจรที่ต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาตามในรูป

ที่ 5.14



รูปที่ 5/14 แสดงการนำดีเลย์อีควอไลเซอร์ไปใช้งานร่วมกับวงจร

การออกแบบดีเลย์อีควอไลเซอร์กำหนดให้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน

$$H(S) = \frac{P(-S)}{P(S)} \quad \dots(5.11)$$

โดยที่ P(S) เป็นเซอร์วิทซ์โพลีโนเมียล

เมื่อเขียนให้อยู่ในแกนของความถี่ (Real Frequency Axis) จะได้

$$H(j\omega) = Me^{j\theta} = \frac{P(-j\omega)}{P(j\omega)} \quad \dots(5.12)$$

เมื่อ M และ θ เป็นขนาดและเฟสตามลำดับ

โดยที่ $|P(j\omega)| = |P(-j\omega)|$

และ $-\arg P(j\omega) = \arg P(-j\omega)$

จากสมการ (5.12) จะได้ $M = 1$ และ $\theta = -2 \arg P(j\omega)$ และเมื่อเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับ (Order) ที่ 2 จะได้

$$H(S) = \frac{S^2 - as + b}{S^2 + as + b} \quad \dots(5.13)$$

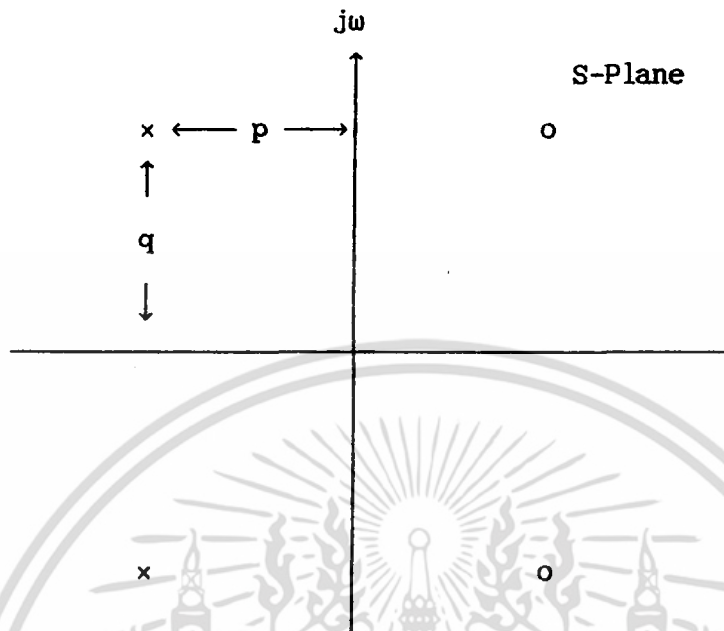
ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน H(S) ในสมการ (5.13) ซึ่งอยู่ในรูปความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency) สามารถเขียนตำแหน่งของโพลและซีโพลใน S-Plane แสดงได้ดังในรูปที่ 5.15

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (5.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$H(S) = \frac{S^2 - 2pS + p^2 + q^2}{S^2 + 2pS + p^2 + q^2} \quad \dots(5.14)$$

ค่าของเฟสในสมการ (5.14) จะได้

$$\theta = -2 \left(\tan^{-1} \frac{\omega - q}{p} + \tan^{-1} \frac{\omega + q}{p} \right) \quad \dots(5.15)$$



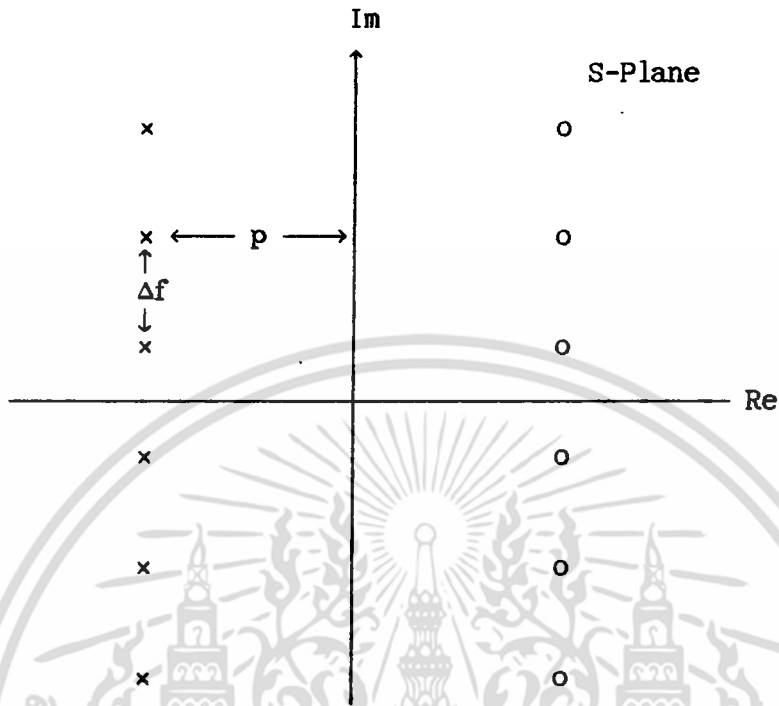
รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรของ All-pass Transfer Function อันดับที่ 2

จากสมการ (5.15) ค่ากรูฟต์เลย์สามารถเขียนได้คือ

$$T_d = \frac{2p}{p^2 + (\omega - q)^2} + \frac{2p}{p^2 + (\omega + q)^2} \dots (5.16)$$

จากสมการ (5.16) จะเห็นได้ค่ากรูฟต์เลย์ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของโพลหรือซีโรใน S-Plane คือตัวแปร p และ q จะเป็นการประมาณเน็ทเวอร์ฟังก์ชันเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาของวงจรที่ต้องการนั่นคือการบังคับหาตำแหน่งของโพลหรือซีโรที่ดีที่สุด ในวงจรดีเลย์อควอลไลเซอร์ เพื่อให้ได้ผลรวมของกรูฟต์เลย์ที่ได้คงที่ ซึ่งจำนวนของโพลหรือซีโร (อันดับของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน) ขึ้นอยู่กับช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ต้องการและขนาดค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ได้ในกรูฟต์เลย์ช่วงนั้น

ในการประมาณค่าเริ่มต้นของโพลและซีโรในทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ All-pass นั้น จะใช้วิธีการกำหนดค่าของโพลและซีโรกระจายขนานไปกับแกน Imaginary ใน S-Plane ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นของโพลและซีโร

ช่วงระยะห่างระหว่างโพลหรือซีโรนั้น สามารถกำหนดได้จากช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ต้องการกับจำนวนเซคชันของ All-pass อันดับที่ 2 คือ

$$\Delta f = \frac{\text{แบนด์วิธของความถี่}}{\text{จำนวนเซคชัน} - 0.5} \dots(5.17)$$

จากรูปที่ 5.16 จะได้ผลรวมของกรูฟเดิลย์คือ

$$T_d = \frac{1}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{p}{p^2 + \Delta f^2 (f-k)^2}$$

โดยจะปรากฏค่าจุดสูงสุดที่ $f = \pm k$ และจุดต่ำสุดที่ $f = \pm(k-1/2)$ เพราะฉะนั้นเมื่อกำหนดให้ $i = 2k$ จะได้ค่ากรูฟเดิลย์ที่จุดสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$T_{d_{max}} = \frac{2}{\pi \Delta f} \sum_{i=-1, -3, \dots}^{1, 3, \dots} \frac{(2p/\Delta f)}{(2p/\Delta f)^2 + i^2} = \frac{1}{\Delta f} \tanh \frac{p\pi}{\Delta f}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{d_{min}} = \frac{2}{\pi \Delta f} \sum_{i=0, -2, \dots}^{2, 4, \dots} \frac{(2p/\Delta f)}{(2p/\Delta f)^2 + i^2} = \frac{1}{\Delta f} \coth \frac{p\pi}{\Delta f}$$

ค่าเฉลี่ยของกรุปดีเลย์จะได้

$$T_{d_0} = \frac{1}{2\Delta f} \left(\coth \frac{p\pi}{\Delta f} + \tanh \frac{p\pi}{\Delta f} \right) = \frac{1}{\Delta f} \coth \frac{2p\pi}{\Delta f}$$

ซึ่งจะได้ขนาดค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดของกรุปดีเลย์คือ

$$\epsilon = \frac{2}{\Delta f} \left(\coth \frac{p\pi}{\Delta f} - 1 \right) \cong \frac{4}{\Delta f} e^{-2p\pi/\Delta f}$$

ฉะนั้นจะได้ระยะห่างของโพลหรือซีโรกับแกน Imaginary คือ

$$p = \frac{\Delta f}{2\pi} \ln \frac{4}{\Delta f \epsilon} \dots (5.18)$$

และจะได้ระยะห่างของโพลหรือซีโรกับแกน Real คือ

$$q_i = \Delta f \left(i - \frac{1}{2} \right) \dots (5.19)$$

โดยที่ i เป็นลำดับที่ของวงจร All-pass แต่ละชุด (Section)

ตำแหน่งของโพลหรือซีโรในเน็ทเวิร์กฟังก์ชันอันดับที่ 2 ที่ประมาณขั้นนั้น จะมีผลต่อกรุปดีเลย์ คือ ถ้า p มีค่าน้อยจะทำให้ยอดของกรุปดีเลย์มีค่าสูงและมีแบนด์วิธที่แคบ และถ้า p มีค่ามากจะทำให้ยอดของกรุปดีเลย์มีค่าต่ำและมีแบนด์วิธที่กว้าง ส่วนตัวแปร q จะมีผลต่อแกนทางความถี่คือ จะเป็นตำแหน่งของความถี่ ω ที่จุดยอดของกรุปดีเลย์นั้น จากค่าประมาณที่ได้จะเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อให้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ในการหาค่าต่อไป ซึ่งถ้าค่าเริ่มต้นที่ให้มาใกล้เคียงกับค่าโพลหรือซีโรที่ต้องการก็จะทำให้จำนวนครั้งในการวิเคราะห์น้อยลง ขั้นตอนต่อไปเริ่มจากการกำหนดให้ D เป็นผลรวมของกรุปดีเลย์ทั้งหมด คือ ของวงจรดีเลย์อควาไลเซอร์ และวงจรที่ต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลา และมีค่าเฉลี่ยคงที่เป็น D_0 ด้วยจุดสูงสุดและต่ำสุดเปลี่ยนแปลงจากค่านี้เท่ากับ $\pm \epsilon/2$ ฉะนั้นที่ความถี่ใด ๆ สมมติให้เป็น j จะได้

$$\text{ค่าต่ำสุด: } D_j + \epsilon/2 = D_0 \dots (5.20)$$

$$\text{ค่าสูงสุด: } D_j - \epsilon/2 = D_0$$

ค่าผลรวมของกรุปดีเลย์ที่กำหนดจากค่าเริ่มต้นนั้นจะมีความคลาดเคลื่อน สมมติให้เป็น ΔD ฉะนั้นจากสมการ (5.20) จะเป็น

ค่าต่ำสุด: $\Delta D_j + D_j + \epsilon/2 = D_0 \quad \dots(5.21)$

ค่าสูงสุด: $\Delta D_j + D_j - \epsilon/2 = D_0$

ผลรวมของกรูฟด์ิเลี่ยทั้งหมด D จะขึ้นอยู่กับโคออดิเนทของ (p, q) ในแต่ละส่วนของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน All-pass อันดับที่สอง การเปลี่ยนแปลงค่าใด ๆ ของ D ที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนค่า $(\Delta p, \Delta q)$ ในโคออดิเนทที่เหมาะสม ตัวอย่างเมื่อสมมติให้ (p_0, q_0) เป็นรากเริ่มต้นของระบบสมการ

$$\Delta D(p, q) = 0$$

ถ้า $(p_0 + \Delta p, q_0 + \Delta q)$ เป็นรากของระบบสมการแล้วจะได้

$$\Delta D(p_0 + \Delta p, q_0 + \Delta q) = 0$$

ฟังก์ชัน ΔD สามารถหาอนุพันธ์ได้เมื่อกระจายออกเป็นอนุกรม โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์หลายตัวแปรจะได้

$$\Delta D_0 + \Delta p \frac{\partial}{\partial p_0} \Delta D + \Delta q \frac{\partial}{\partial q_0} \Delta D + \dots = 0$$

เมื่อไม่คิดเทอมที่มีอนุพันธ์อันดับสองและสูงกว่าแล้วจะได้ระบบสมการเชิงเส้น

$$\Delta p \frac{\partial}{\partial p_0} \Delta D + \Delta q \frac{\partial}{\partial q_0} \Delta D = -\Delta D_0$$

ดังนั้นรากที่ประมาณได้ใหม่คือ

$$p_1 = p_0 + \Delta p$$

$$q_1 = q_0 + \Delta q$$

ถ้าต้องการหารากที่ดียิ่งขึ้น ต้องดำเนินการกระทำซ้ำหลายหนจนกระทั่งถูกต้องตามที่ต้องการ

จากหลักการดังกล่าวเราสามารถนำเอาวิธีนิวตัน-ราฟสันมาใช้แก้สมการเชิงโค้งทางพีชคณิต $2n$ ตัวแปรและ m สมการของวงจรีเลี่ยอควอไลเซอ์ ที่ความถี่ใด ๆ จะได้ผลต่างของกรูฟด์ิเลี่ย ΔD_j และนำไปหาความสัมพันธ์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของ $(\Delta p_1, \Delta q_1)$ ในโคออดิเนทซึ่งจะมีคุณสมบัติของการลู่อเข้าที่ดีหลักการเบื้องต้นของวิธีนิวตันอิตเตอเรชันก็คือใช้เทย์เลอร์กระจายแต่ละสมการออกเป็นอนุกรม เมื่อตัดเทอมที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งออกแล้วจะกลายเป็นการหารากของระบบสมการเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial D_1}{\partial p_1} + \frac{\partial D_1}{\partial p_i} + \dots + \frac{\partial D_1}{\partial p_n} + \frac{\partial D_1}{\partial q_1} + \frac{\partial D_1}{\partial q_i} + \dots + \frac{\partial D_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial D_j}{\partial p_1} + \frac{\partial D_j}{\partial p_i} + \dots + \frac{\partial D_j}{\partial p_n} + \frac{\partial D_j}{\partial q_1} + \frac{\partial D_j}{\partial q_i} + \dots + \frac{\partial D_j}{\partial q_n} \\ \dots \\ \frac{\partial D_m}{\partial p_1} + \frac{\partial D_m}{\partial p_i} + \dots + \frac{\partial D_m}{\partial p_n} + \frac{\partial D_m}{\partial q_1} + \frac{\partial D_m}{\partial q_i} + \dots + \frac{\partial D_m}{\partial q_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_i \\ \dots \\ \Delta p_n \\ \Delta q_1 \\ \Delta q_i \\ \dots \\ \Delta q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_j \\ \dots \\ \Delta D_m \end{pmatrix} \dots (5.22)$$

เมื่อ $\frac{\partial D_j}{\partial p_i}$ และ $\frac{\partial D_j}{\partial q_i}$ เป็นการหาอนุพันธ์ของ D เทียบกับ p_i และ q_i ที่ความถี่ j ซึ่งสามารถหาได้คือ

$$\frac{\partial D_j}{\partial p_i} = 2 \left(\frac{(\omega_j + q_i)^2 - p_i^2}{[p_i^2 + (\omega_j + q_i)^2]^2} + \frac{(\omega_j - q_i)^2 - p_i^2}{[p_i^2 + (\omega_j - q_i)^2]^2} \right) \dots (5.23)$$

$$\frac{\partial D_j}{\partial q_i} = 4p_i \left(\frac{\omega_j - q_i}{[p_i^2 + (\omega_j - q_i)^2]^2} - \frac{\omega_j + q_i}{[p_i^2 + (\omega_j + q_i)^2]^2} \right) \dots (5.24)$$

สมการ (5.22) เป็นสมการเชิงเส้นที่จะหาค่าของ Δp_i และ Δq_i เพื่อปรับปรุงค่าของ p_i และ q_i ใหม่ แล้วนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าผลรวมของกริฟฟิไลต์ และจะได้ค่า ΔD_j น้อยลงเรื่อยๆ โดยจะกระทำซ้ำหลายหนจนกระทั่ง ΔD_j มีค่าเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติกระบวนการจะกระทำจนกว่าจะได้

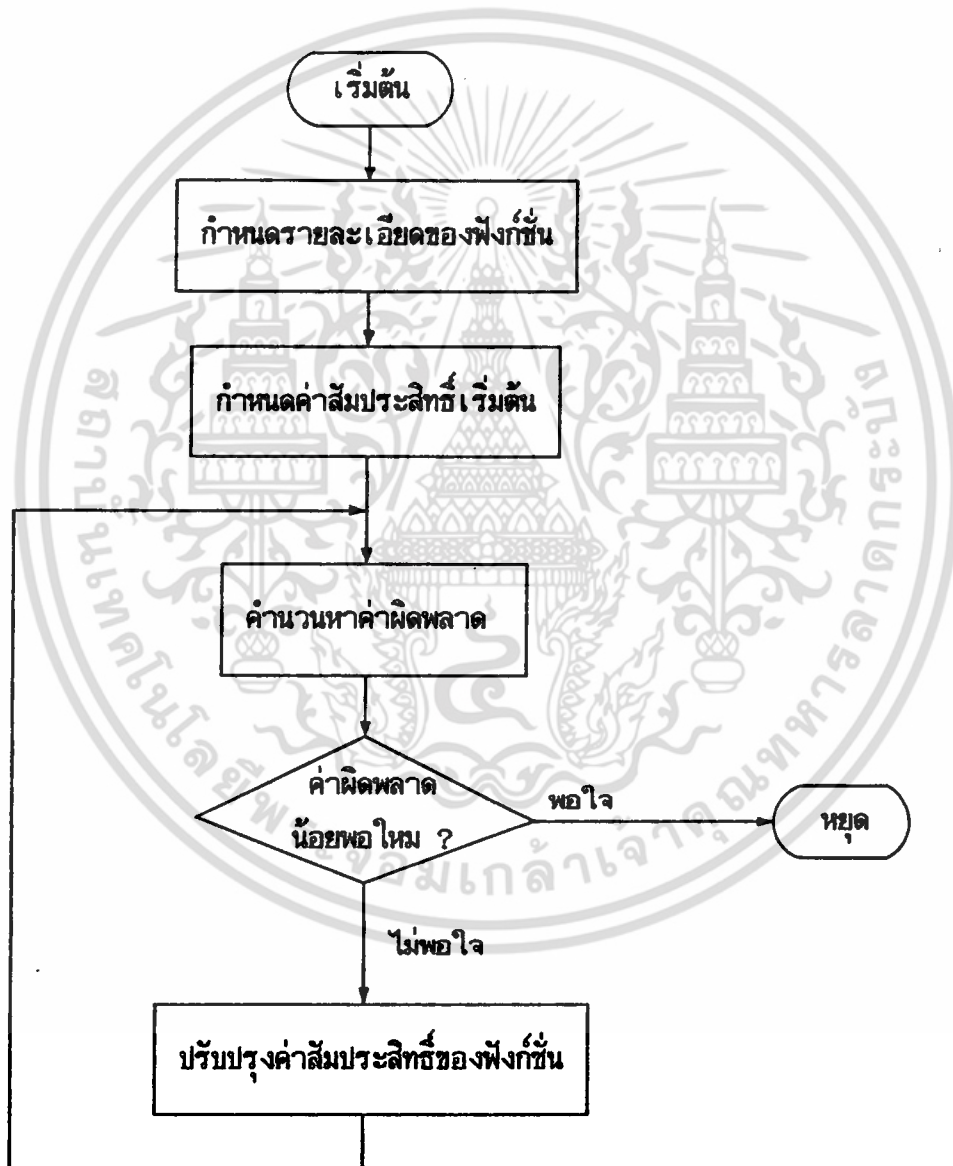
$$\text{ค่าต่ำสุด: } |D_j + \epsilon/2 - D_0| \leq \text{Tol} \dots (5.25)$$

$$\text{ค่าสูงสุด: } |D_j - \epsilon/2 - D_0| \leq \text{Tol}$$

เมื่อ Tol เป็นค่าตรวจสอบการลู่เข้าที่ยอมรับได้ (Tolerance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเซตของสมการที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ามีจำนวนของตัวแปรทั้งหมดเท่ากับ $2n + 3$ เมื่อ n เป็นจำนวนเน็ทเวิร์กของวงจร All-pass อันดับที่สองที่มีตัวแปรคือ p_i และ q_i และตัวแปรที่เหลือคือ D_0 , ϵ และช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ใช้ ถ้าวงจรดีเลย์อีควอไลเซอร์ที่ออกแบบมีช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่กว้างและต้องการให้หาค่าคลาดเคลื่อน (ϵ) ที่น้อย ก็จะต้องใช้จำนวนอันดับ (Order) ของเน็ทเวิร์กที่สูง ส่วนค่าเฉลี่ยคั้งของกรู๊ปดีเลย์ (D_0) นั้นถ้ามีค่าน้อยก็จะทำให้ช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ได้กว้างขึ้น และอาจทำให้หาค่าคลาดเคลื่อน (ϵ) ที่มากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.17 โพลีชาร์ทแสดงการหาสัมประสิทธิ์ของเน็ทเวิร์กฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อีควอไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับวงจรที่เราต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลามีความผิดเพี้ยนมากน้อยเพียงใด ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีความสัมพันธ์กันและสามารถเขียนเป็น โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวแปรหรือสัมประสิทธิ์ของเน็ตเวิร์กฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์ ได้ดังแสดงเป็น โพลีชาร์ท ในรูปที่ 5.17 และมีรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก

การทำงานของโปรแกรมเพื่อหาค่าผิดพลาดจะมี 2 ช่วง คือ ในตอนแรกจะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันจากค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้น เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของกรูฟิต์เลยใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจึงจะคำนวณหาจุดสูงสุดและต่ำสุดของผลรวมกรูฟิต์เลยทั้งหมด และปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันใหม่เพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรอควอไลเซอร์ เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมอแนลต่อ ลูมินแนนซ์ในระบบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์

ในระบบการส่งโทรทัศน์สีนั้นสัญญาณภาพรวมจะถูกส่งผ่านวงจรต่างๆ รวมทั้งสายส่งก่อนที่จะถูกส่งออกอากาศ ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับผลตอบสนองของความถี่ (Frequency Response) ของสัญญาณภาพที่ความถี่สูงคือ ทำให้สัญญาณโทรทัศน์มีอัตราขยายทางขนาดของสัญญาณโครมอแนลไม่เท่ากับของสัญญาณลูมินแนนซ์ ขณะเดียวกันอาจจะทำให้สัญญาณโครมอแนลถูกหน่วงเวลาต่างกับสัญญาณลูมินแนนซ์ ดังนั้นที่ปลายทางด้านรับจะเกิดผลตอบสนองที่ไม่คงที่ (Non Flat Response) ขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้สัญญาณสีผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเราสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณมอดดูเลท ไซน์กำลังสองพัลส์ โดยการป้อน ไซน์กำลังสองพัลส์ เข้าที่อินพุทของวงจรรขยายสัญญาณภาพ แล้วสังเกตสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากออสซิลโลสโคป การใช้ ไซน์กำลังสองพัลส์ จะให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าพัลส์สี่เหลี่ยม และมีความไวต่อความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ ดังนั้น ไซน์กำลังสองพัลส์จึงถูกนำมาใช้ทดสอบ ^{การวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี} โดยสมการของสัญญาณดังกล่าวเขียนได้ว่า

$$f_1(t) = 0.5 [m(t) + m(t) \cos \omega_c t] \quad \dots(5.26)$$

โดยที่ ω_c เป็นซันแคเรียร์ของสัญญาณสี ซึ่งเท่ากับ $2\pi \times 4.43 \text{ Mrad/sec}$

$$m(t) = \sin^2 \frac{\pi t}{2T_0} \quad |t| \leq T_0 \quad \dots(5.27)$$

เมื่อ T_0 เป็น Half Amplitude Duration ของ ไซน์กำลังสองพัลส์

ในการส่งสัญญาณทดสอบมอดดูเลท ไซน์กำลังสองพัลส์ผ่านระบบซึ่งมีผลต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณสีทั้งทางด้านขนาดและเวลานั้น ค่าเอาท์พุทจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_o(t) = \frac{1}{2} \left(f_1(t) \cos \omega_c t + f_2(t) \sin \omega_c t + f_3(t) \right) \quad \dots(5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

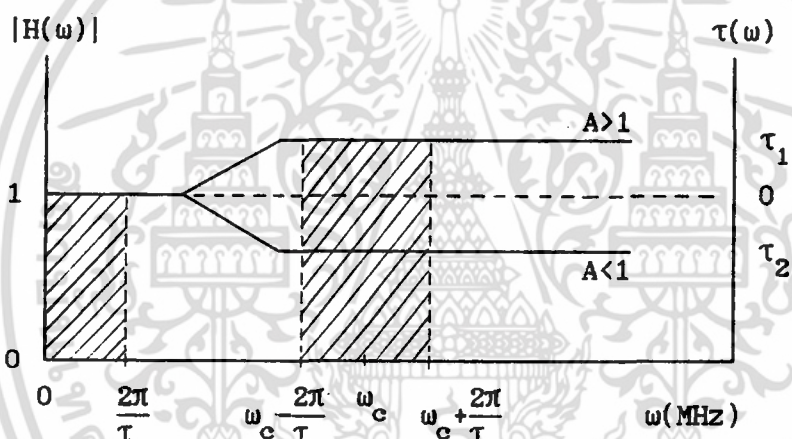
$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_r(\omega + \omega_c) \cos \omega t \, d\omega - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_i(\omega + \omega_c) \sin \omega t \, d\omega$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_r(\omega + \omega_c) \sin \omega t \, d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_i(\omega + \omega_c) \cos \omega t \, d\omega$$

$$f_3(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_r(\omega) \cos \omega t \, d\omega - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_i(\omega) \sin \omega t \, d\omega \quad \dots(5.29)$$

โดยที่ $A(\omega)$ เป็นสเปกตรัมของสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์

H_r, H_i เป็น Real System ฟังก์ชัน และ Imaginary System ฟังก์ชันตามลำดับ



รูปที่ 5.18 แสดงความผิดเพี้ยนทางขนาดและเวลาของสัญญาณสี่

โดยที่คุณลักษณะของ Transmission System ดังแสดงในรูปที่ 5.18 สามารถเขียนได้ว่า

$$H_r(\omega) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \omega \leq \frac{2\pi}{T_0} \\ A \cos(\omega - \omega_c)\tau & \omega_c \frac{2\pi}{T_0} \leq \omega \leq \omega_c + \frac{2\pi}{T_0} \end{cases} \quad \dots(5.30)$$

และ

$$H_i(\omega) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \omega \leq \frac{2\pi}{T_0} \\ -A \sin(\omega - \omega_c)\tau & \omega_c \frac{2\pi}{T_0} \leq \omega \leq \omega_c + \frac{2\pi}{T_0} \end{cases} \quad \dots(5.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (5.30) และ (5.31) ลงในสมการ (5.29) จะได้

$$\begin{aligned}
f_1(t) &= A m(t-\tau) \\
f_2(t) &= 0 \\
f_3(t) &= m(t)
\end{aligned}
\quad \dots(5.32)$$

โดยการแทนค่าสมการ (5.32) ลงในสมการ (5.28) จะได้

$$f_o(t) = \frac{1}{2} \left(m(t) + A m(t-\tau) \cos \omega_c t \right) \quad \dots(5.33)$$

การแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมมัทธันซ์ต่อลูมินนซ์ทำได้โดยการออกแบบวงจรชดเชยการขยายสัญญาณภาพในย่านความถี่สูง ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบการส่งและในระบบโทรทัศน์ การออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณโครมมัทธันซ์ต่อลูมินนซ์ เราสามารถใช้วงจรอควอไลเซอร์แบบแอกทีฟคิสทริบิวท์อาซีตาม ในรูปที่ 4.48 การทดสอบเราจะสมมติให้ต้องการลดขนาดของสัญญาณโครมมัทธันซ์ต่อลูมินนซ์เท่ากับ 2 dB ซึ่งคำนวณค่า α ได้จากสมการ (4.90) โดยจะได้ค่า α เท่ากับ 3.85 เมื่อทำการสเกลทางความถี่แล้วจะได้ค่า $C_1 = 120 \text{ pF}$, $R_1 = 464 \text{ } \Omega$ และ $C_2 = 31 \text{ pF}$, $R_2 = 1788 \text{ } \Omega$ ส่วนการออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์ของสัญญาณโครมมัทธันซ์ต่อลูมินนซ์ เราสามารถใช้วิธีตามที่กล่าวมาแล้วในเรื่องการออกแบบวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์ แต่ในที่นี้จะทดลองโดยแก้ไขความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์ของวงจรที่จะใช้นำมาทดสอบตามในรูปที่ 4.48 ซึ่งวงจรดังกล่าวยังมีค่ากรุปดีเลย์ไม่คงที่ในช่วงแบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณภาพรวม คือ มีค่าคลาดเคลื่อนรวมประมาณ 31 nS โดยจะแก้ไขความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์ให้มกรุปดีเลย์คงที่ในช่วงแบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณภาพ คือ ประมาณ 6 MHz จากสมการ (5.17) ถ้าใช้จำนวนเซกชั่นของวงจร All-pass ยันดับที่ 2 เท่ากับ 5 จะได้

$$\Delta f = \frac{6}{4.5} = 1.333$$

ถ้ากำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อน (ϵ) มีค่าไม่เกิน 5 nS จากสมการ (5.18) จะได้ระยะห่างของตำแหน่งโพลหรือซีโรว์ คือ

$$p = \frac{1.333}{2\pi} \ln \frac{4}{1.333 \times 0.005} = 1.358$$

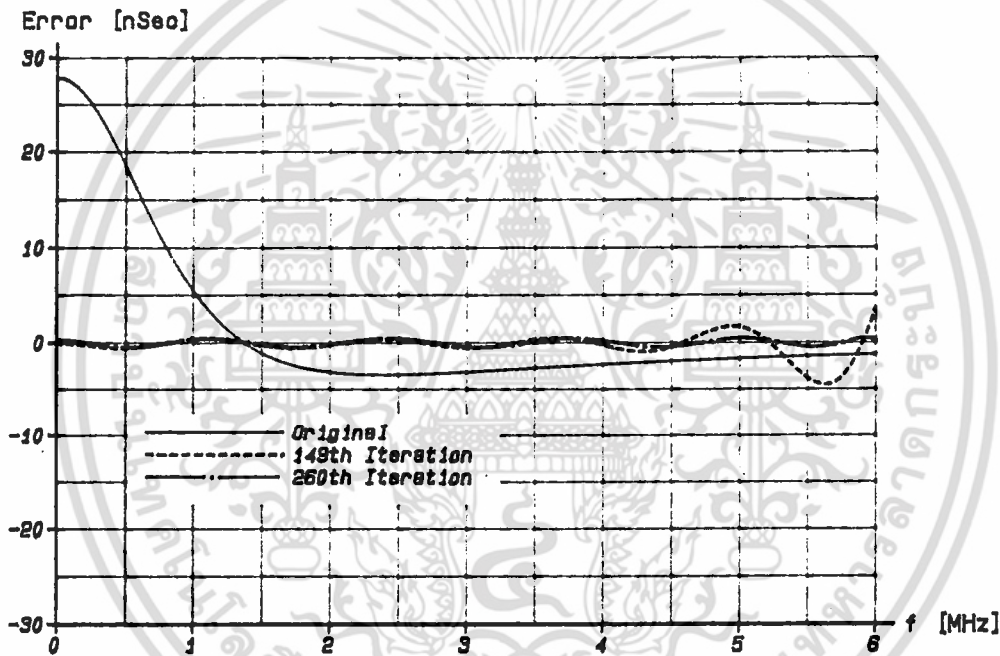
และ

$$q_{1-5} = 0.667, 2, 3.333, 4.667, 6$$

เพื่อลดจำนวนครั้งของการอิตอเรชันให้น้อยลง ซึ่งทำได้โดยจะลดค่าคู่ของโพลหรือซีโรว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

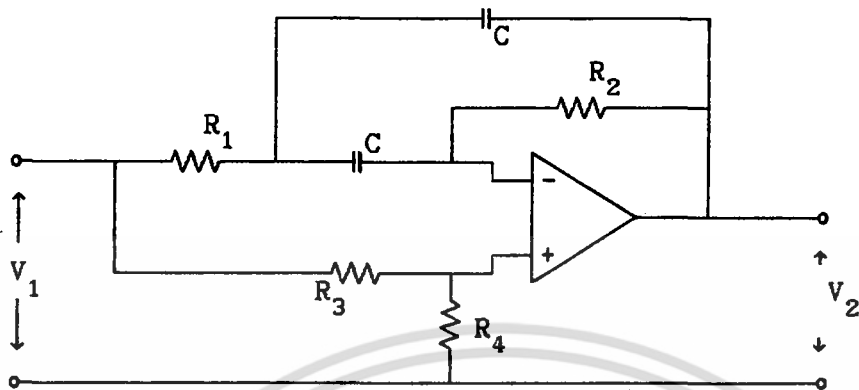
ไว้ที่เข้าใกล้ขอบของแบนด์ (band edge) ลง 20 % ฉะนั้นจะได้ผลลัพธ์ของโคออดิเนต (p,q) ดังนี้ (1.358,0.667), (1.358,2), (1.358,3.333), (1.358,4.667), (1.086,6) หลังจากการอิตอเรทโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะใช้จำนวนครั้งในการอิตอเรทช่วงแรกเท่ากับ 149 และช่วงหลังรวมเท่ากับ 260 ครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้จะให้รูพดีเลย์คงที่ในช่วงแบนด์วิธ 6 MHz และมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากคือไม่ถึง 1 nS ดังแสดงในรูปที่ 5.19 และได้โคออดิเนตของ (p,q) คือ (1.66, 0.988), (1.771, 2.415), (1.738, 3.832), (1.58, 5.179), (1.152, 6.478)



รูปที่ 5.19 แสดงค่าคลาดเคลื่อนเมื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์

วงจร All-pass อันดับที่ 2 สามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วงจรแบบพาสซีฟหรือแบบแอกทีฟ การทดลองวงจรดีเลย์อควาไลเซอร์จะใช้วงจรแบบแอกทีฟ [16] ดังในรูปที่ 5.20 ซึ่งสามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{S^2 - \frac{2}{R_2 C} S + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}}{S^2 + \frac{2}{R_2 C} S + \frac{1}{R_1 R_2 C^2}} \quad \dots(5.34)$$

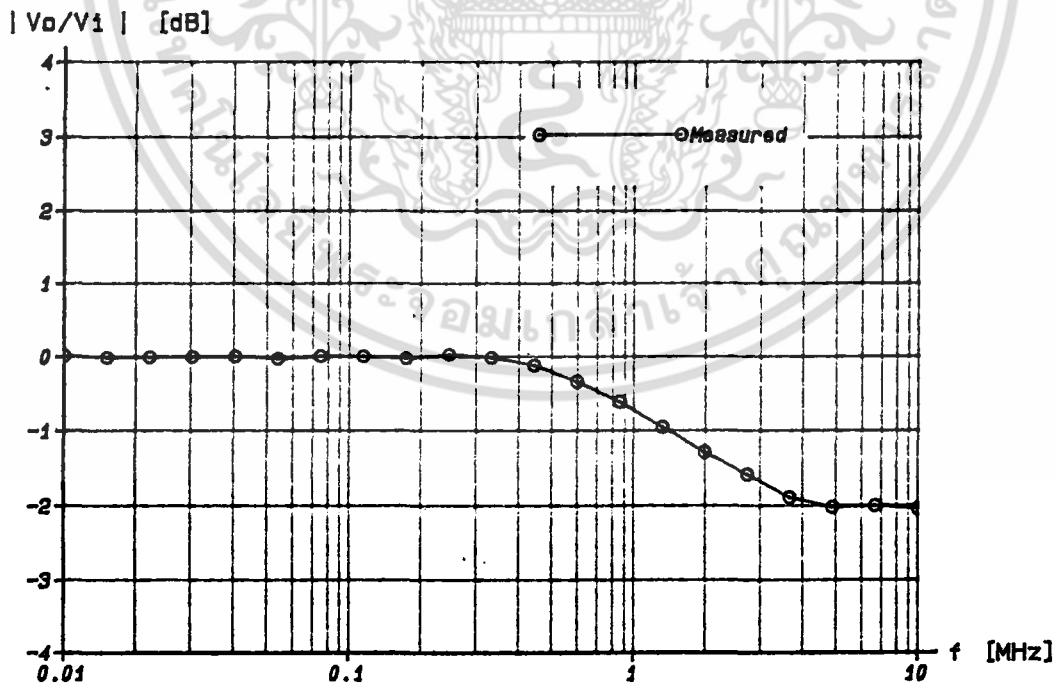


รูปที่ 5.20 วงจร All-pass อันดับที่ 2

จากค่า โพลและซีโรที่ได้จากการออกแบบวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์เมื่อแทนค่าลงในสมการ(5.14) และเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ที่ได้กับสมการ (5.34) แล้วทำการสเกลทั้งทางขนาดและความถี่ ซึ่งจะได้ค่าของอุปกรณ์แต่ละตัวของวงจร All-pass อันดับที่ 2 แต่ละชุดคือ

Section 1 $R_1 = 708\Omega$, $R_2 = 959\Omega$, $R_3 = 2K\Omega$, $R_4 = 677\Omega$, $C = 100pF$

Section 2 $R_1 = 314\Omega$, $R_2 = 899\Omega$, $R_3 = 1.6K\Omega$, $R_4 = 1.14K\Omega$, $C = 100pF$



รูปที่ 5.21 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรทดลอง

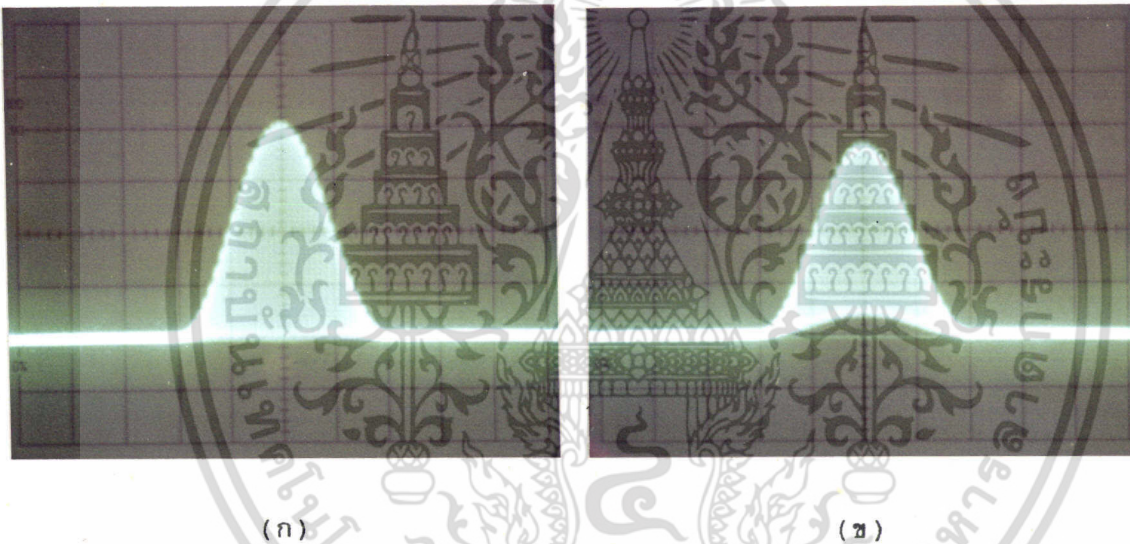
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Section 3 $R_1 = 156\Omega$, $R_2 = 916\Omega$, $R_3 = 1.5K\Omega$, $R_4 = 2.2K\Omega$, $C = 100pF$

Section 4 $R_1 = 170\Omega$, $R_2 = 2.01K\Omega$, $R_3 = 1.6K\Omega$, $R_4 = 4.72K\Omega$, $C = 50pF$

Section 5 $R_1 = 141\Omega$, $R_2 = 4.61K\Omega$, $R_3 = 1.5K\Omega$, $R_4 = 12.2K\Omega$, $C = 30pF$

จากวงจรที่ได้ทั้งหมด เราจะนำมาต่อคาส์เคดกันตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.14 ซึ่งจะได้ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรแสดงดังในรูปที่ 5.21 และเมื่อป้อนสัญญาณมีอดดูเลข 20 T ไช้ในกำลังสองพัลส์ที่ไม่มีความผิดเพี้ยนตามในรูปที่ 5.22(ก) เข้าทางอินพุต ส่วนทางด้านเอาต์พุตจะได้สัญญาณที่ออกมาตามในรูปที่ 5.22(ข)



รูปที่ 5.22 แสดงสัญญาณมีอดดูเลข ไช้ในกำลังสองพัลส์ที่ได้จากวงจรทดลอง
scale 10 mV/div , 1 μ S/div.

จากสัญญาณมีอดดูเลข ไช้ในกำลังสองพัลส์ในรูปที่ 5.22 ซึ่งสามารถใช้ในการทดสอบค่าความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยายและไทม์ดีเลย์ของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลุมิแนนซ์ จะได้ว่าเมื่อนำมาคำนวณหาความผิดเพี้ยนตามที่กล่าวมาแล้วจากสมการ (2.38) จะได้

$$A = \frac{1 - (2/18)}{1 + (2/18)} = 0.8 = -1.94 \text{ dB}$$

จะเห็นได้ว่าผลการแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลุมิแนนซ์ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีการคำนวณคือจะลดขนาดของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลุมิแนนซ์ประมาณ 2 dB และไม่มี ความผิดเพี้ยนทางด้าน ไทม์ดีเลย์ของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลุมิแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

วงจรแอกทีฟดิสรีบริวท์อาซีจะมีคุณลักษณะทั่วไปที่ดีกว่าและมีขนาดเล็กกว่าวงจรที่เป็นพาสซีฟอิลีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบวงจรรองความถี่ในจำนวนอิลีเมนต์ที่เท่ากันวงจรแบบแอกทีฟดิสรีบริวท์อาซีจะมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณที่ดีกว่าด้วย วงจรแอกทีฟดิสรีบริวท์อาซีที่เสนอมีวงจรรองความถี่ต่ำ 4 แบบ, วงจรรองความถี่สูง 4 แบบ และวงจรรีควอลไอเซอร์ที่ใช้ยกกระดับหรือลดระดับสัญญาณที่ย่านความถี่สูง 2 แบบ โดยที่ในแต่ละวงจรจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดค่าของคุณลักษณะผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามต้องการ ซึ่งในแต่ละแบบจะมีช่วงเสถียรภาพของวงจรที่ได้ต่างกัน และวงจรแอกทีฟดิสรีบริวท์อาซีที่ได้จะมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำโดยวงจรที่เสนอขึ้นในแต่ละแบบก็จะมีค่าความไวของอุปกรณ์ต่างกัน ส่วนค่า Parasitic Capacitors ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างตัวขั้วเฟิร์มดิสรีบริวท์อาซีกับ Substrate ของไอซีนั้นในวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 1, 2, 4, วงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2, 4 และวงจรรีควอลไอเซอร์แบบที่ 1 จะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร จึงสามารถนำวงจรดังกล่าวไปผลิตขึ้นตามกรรมวิธี LSI ที่มีขนาดเล็กมากได้ ซึ่งวงจรที่เป็นแบบแอกทีฟอาซีโดยทั่วไปเช่น แบบ Sallen & Key ไม่อาจแก้ไขได้ เนื่องจากวงจรรีควอลไอเซอร์สามารถนำไปใช้ได้ดีในช่วงความถี่สูงในปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาที่จะนำมาทำเป็นชิพ LSI ใช้ในย่าน RF

ส่วนในตอนท้ายได้เสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรรีควอลไอเซอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะผลตอบสนองของกรูฟด์เลี่ยตามที่ต้องการได้ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นให้ตำแหน่งของโพลและซีโรขนานไปกับแกน $j\omega$ ใน s -Plane และใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันมาทำการคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนและปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการอิตอเรทในการหาค่าตอบ ซึ่งจากวิธีดังกล่าวนี้ยังสามารถนำไปปรับปรุงเพื่อทำเป็นวงจรรีควอลไอเซอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองทางขนาดตามที่ต้องการได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีที่จะนำเอามอดดูเลทไซน์ก่าลิ่งสองพัลส์ ที่สามารถใช้ในการตรวจสอบความบกพร่องของระบบโทรทัศน ร่วมกับวิธีการออกแบบวงจรรีควอลไอเซอร์ข้างต้นมาประยุกต์ เพื่อใช้เป็นวงจรรีควอลไอเซอร์ที่แก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิตันซ์ต่อลุมิตันซ์ในระบบการส่งโทรทัศนส์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนก เจริญพงศ์เวช เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้เขียน ตลอดจนช่วยแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งผลงานวิจัยนี้แล้วเสร็จ ขอขอบคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรมที่มีส่วนช่วยเหลือและขอขอบคุณ Japan International cooperation agency (JICA) ที่ได้สนับสนุนในด้านเครื่องมือทดลองจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ไพศาล สิทธิโยภาสกุล, กนก เจนจิระพงศ์เวช, M. Teramoto, "การออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์โดยใช้วงจรมอดูลาร์สำหรับตัวกรอง", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 157-166, 8-9 พฤศจิกายน 2533
2. ไพศาล สิทธิโยภาสกุล, ชวลิต เบญจางคประเสริฐ, กนก เจนจิระพงศ์เวช, "การประมาณเน็ทเวิร์กฟังก์ชันสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ให้อัตราการบิดเบือนที่ต่ำ", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 202-215, 16-17 พฤศจิกายน 2532
3. ไพศาล สิทธิโยภาสกุล, กนก เจนจิระพงศ์เวช, "วงจรมอดูลาร์แบบบัตเตอร์เวิร์ค-อิมพีแดนซ์เพียวรีคัลโพลีโนเมียล", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เล่มที่ 2 หน้า 239-247, 24-25 พฤศจิกายน 2530
4. M.Teramoto, S.Sudou and K.Janchitrapongvej, "Realization of An Active Low Pass Filter using Uniform Distributed RC Lines", IECE, CAS 89-54, October 1989.
5. B.K.Ahuja, "Implementation of Active Distributed RC Anti-Aliasing Smoothing Filters", IEEE J.Solid-State Circuit, Vol.SC-17, pp.1076-1080, December 1982.
6. M.S.Ghausi and V.G.Bello, "Active Distributed RC Realization of Low Pass Magnitude Specifications", IEEE Trans. vol CT-16, pp.346-358, August 1969.
7. M.Teramoto, "Active Distributed RC Line Filters", JTC-CSCC, 88-C1-2, November 1988.
8. V.G.Bello and M.S.Ghausi, "Design of Linear Phase Active Distributed RC Networks", IEEE Trans.Circuit Theory, vol.CT-16, pp.526-530, November 1969.
9. H.Mahdi, "On Synthesis of Active Distributed RC Circuit", IEEE Trans.Circuit Theory, Vol.CT-17, pp.273-275, May 1970.
10. R.P.Sallen and E.L.Key, "A Practical method of Designing RC Active Filter", IRE Trans. vol.CT-2, no1, pp.74-85, March 1955.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. M.S.Ghausi and J.J.Kelley, "Introduction to Distributed-parameter Networks", Holt Rinehart and Winston, Inc., 1968.
12. L.P.Huelesman, "Active Filters, Lumped, Distributed, Integrated, Digital, Parametric", McGraw Book, 1970.
13. P.M.Chirlian, "Integrated and Active Network Analysis and Synthesis", Prentice-Hall, 1967.
14. G.C.Temes and S.K.Mitra, "Modern Filter Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., 1973.
15. A.Budak, "Passive and Active Network Analysis and Synthesis", Houghton Mifflin Company, 1974.
16. V.Valkenburg, "Analog Filter Design", Holt Saunders, 1982.
17. G.C.Temes and J.W.Lapatra "Introduction to Circuit Synthesis and Design", McGraw-Hill Inc., 1977.
18. "Audio Handbook", National Semiconductor Corp., PP.2.31-2.59, 1967.
19. R.Kennedy, "Sine Squared Pulse in Television System Analysis", RCA Review, Vol.21, No.2, p.253, June 1960.
20. C.A.Siocos, "Chrominance-to-Luminance Ratio and Timing Measurements", IEEE Trans., BC-14, 1, pp.1-4, March 1968.
21. A.Jeffrey, "Mathematics for Engineers and Scientists", ELBS.. Nelson, 1978.
22. J.Vlach and K.Singhal, "Computer Methodes for Circuit Analysis and Design", Van Nostrand Reinhold Company, 1983.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program Distributed_RC;

```
const XScreenMax = 720;      { Number of pixels in one screen line }
    YScreenMax = 350;      { Number of lines on the screen }
    ScreenSizeGlb = 16383; { Total size in integers of the screen }
    HardwareGrafBase = $B000; { Location of the hardware screen }
    SCF = 1.542857;      { Screen Scaling adjustment Factor }
    VRowsGlb = $58; {Change to $57 if monitor loses horizontal hold}
    RamScreenInCard : boolean = false;
    FontLoaded : boolean = false; { has the font been loaded yet }
    GrafModeGlb : boolean = false;
    EGA : boolean = false;
```

```
type ScreenType = array [0..ScreenSizeGlb] of integer;
    FontChar = array [0..13] of byte;
    GrfFont = array [0..255] of FontChar;
    RegType = record case integer of
        1 : (AX,BX,CX,DX,BP,SI,DI,DS,ES,Flags : integer);
        2 : (AL,AH,BL,BH,CL,CH,DL,DH : byte);
    end;
```

```
var Regs : RegType;
    ScreenGlb : ^ScreenType;
    GrafBase : integer;
    ColorGlb : byte;
    Font : GrfFont;
    ConOutPtrSave,
    XTextGlb,YTextGlb : integer;
```

```
procedure HerculesMode(Mode: integer); { 0=Text, 1=Graphics }
type ModeDescriptor = record
    CRTMode : byte;
    R6845 : array[0..11] of byte;
end;
```

```
const VRo = VRowsGlb;
    HercModes : array[0..1] of ModeDescriptor =
    ((CRTMode:32; R6845:($61,$50,$52,$0F,$19,$06,
        $19,$19,$02,$0D,$0B,$0C)),
    (CRTMode:2; R6845:($35,$2D,$2E,$07,$5B,$02,
        VRo,VRo,$02,$03,$00,$00)));
```

```
begin
    Delay(100);
    inline($8B/$B6/Mode/$81/$E6/$01/$00/$74/$03/$BE/$0D/$00/$81/$C6/
        HercModes/$BA/$BF/$03/$B0/$01/$EE/$2E/$8A/$04/$B2/$B8/$EE/
        $B9/$00/$00/$B2/$B4/$88/$C8/$EE/$46/$2E/$8A/$04/$42/$EE/
        $4A/$41/$80/$F9/$0C/$75/$F0/$83/$EE/$0C/$2E/$8A/$04/$0C/
        $08/$B2/$B8/$EE);
    if RAMScreenInCard then
        Port[$03BF] := 3;
end;
```

```
procedure ClearScreen;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  fillchar(mem[GrafBase:0000],ScreenSizeGlb Shl 1,0);
end;

procedure TextMode;
begin
  HerculesMode(0);
  ClrScr;
  if GrafModeGlb then ConOutPtr := ConOutPtrSave;
  GrafModeGlb := false;
end;

procedure DC(C : byte); { Draw the the character with ASCII code C }
var XShr3      : integer;
    RightBit  : boolean;
begin
  Inline($8A/$AE/ C /$8A/$C5/$24/$E0/$3C/$C0/$75/$02/$B0/$01/$24/$01/
    $88/$86/ RightBit /$8A/$1E/ XTextGlb /$8A/$3E/ YTextGlb /$8A/
    $C5/$32/$E4/$8B/$D0/$B1/$04/$D3/$E0/$D1/$E2/$2B/$C2/$8B/$F0/
    $A1/ GrafBase /$8E/$C0/$81/$EB/$01/$01/$32/$F6/$8A/$D3/$B1/
    $03/$D3/$E2/$02/$D3/$80/$D6/$00/$8B/$C2/$D3/$E8/$89/$86/
    XShr3 /$8A/$CA/$80/$E1/$07/$8A/$D7/$BB/$80/$FF/$D3/$EB/$F7/
    $D3/$80/$F1/$07/$32/$F6/$8B/$C2/$D1/$E2/$D1/$E2/$D1/$E2/$2B/
    $D0/$D1/$E2/$B5/$0D/$53/$51/$87/$D9/$32/$E4/$8A/$C7/$03/$C2/
    $8B/$D8/$80/$E3/$03/$B1/$0D/$D3/$E3/$D1/$E8/$D1/$E8/$B4/$5A/
    $F6/$E4/$03/$C3/$03/$86/ XShr3 /$8B/$F8/$59/$5B/$26/$8B/$05/
    $86/$C4/$23/$C3/$53/$8A/$DD/$32/$FF/$8A/$98/ Font /$50/$8A/
    $86/ RightBit /$22/$C3/$D1/$E3/$0A/$D8/$58/$D3/$E3/$0B/$C3/
    $86/$C4/$26/$89/$05/$5B/$FE/$CD/$79/$B1);
end;

procedure DisplayChar(C : byte);
{ Same as DC. Intended for internal use by the graphics system }
begin
  if C=8 then
  begin
    begin
      if XTextGlb>1 then XTextGlb := XTextGlb - 1;
    end
  else
    if C=10 then
    begin
      if YTextGlb<25 then YTextGlb := YTextGlb + 1;
    end
  else
    if C=13 then XTextGlb := 1
    else
    begin
      DC(C);
      if XTextGlb<80 then XTextGlb := XTextGlb + 1;
    end;
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
procedure GraphicsMode;
var FontFile : file of GrfFont;
begin
  GrafBase := HardwareGrafBase;
  if not FontLoaded then
    begin
      Assign(FontFile, '14x9.FON');
      {$I-} Reset(FontFile); {$I+}
      if IOresult=0 then
        begin
          Read(FontFile, Font);
          Close(FontFile);
        end
      else
        FillChar(Font, SizeOf(Font), 0);
        FontLoaded := true;
      end;
      HerculesMode(1);
      if not GrafModeGlb then ConOutPtrSave := ConOutPtr;
      ConOutPtr := Ofs(DisplayChar);
      ClearScreen;
      GrafModeGlb := true;
    end;

procedure AllocateRAMScreen;
var test : ^integer;
begin
  new(ScreenGlb);
  while ofs(ScreenGlb^) <> 0 do
    begin
      dispose(ScreenGlb);
      new(test);
      new(ScreenGlb);
    end;
end;

procedure SelectScreen(i:integer);
begin
  case I of
    1 : GrafBase := HardwareGrafBase;
    2 : GrafBase := Seg(ScreenGlb^);
  end;
end;

procedure CopyScreen;
var ToBase : integer;
begin
  GrafBase := Seg(ScreenGlb^);
  ToBase := HardwareGrafBase;
  move(mem[GrafBase:0000],mem[ToBase:0000],ScreenSizeGlb Shl 1);
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
procedure SwapScreen;
const SS = $4000; { ScreenSizeGlb+1 }
var G : integer;
begin
  G := Seg(ScreenGlb^);
  Inline($8B/$86/ G /$8E/$C0/$1E/$B8/ HardwareGrafBase /$8E/$D8/$B9/
    SS /$31/$DB/$8B/$07/$26/$87/$07/$89/$07/$43/$43/$E2/$F5/$1F);
end;

procedure DrawPoint(X,Y: integer);
begin
  Inline($8B/$96/ Y /$B8/$03/$00/$21/$D0/$B1/$0D/$D3/$E0/$D1/$EA/$81/
    $E2/$FE/$FF/$89/$D3/$D1/$E2/$01/$DA/$89/$D3/$B1/$04/$D3/$E2/
    $29/$DA/$01/$D0/$8B/$96/ X /$89/$D3/$FE/$C9/$D3/$EB/$01/$C3/
    $88/$D1/$80/$E1/$07/$A1/ GrafBase /$8E/$C0/$26/$8A/$07/$8A/
    $2E/ ColorGlb /$08/$ED/$74/$09/$BA/$80/$00/$D3/$EA/$08/$D0/
    $EB/$07/$BA/$7F/$FF/$D3/$EA/$20/$D0/$26/$88/$07);
end;

procedure GotoXYTurbo(X,Y: integer);
begin
  GotoXY(X,Y);
end;

procedure GotoXY(X,Y: integer);
begin
  if not GrafModeGlb then GotoXYTurbo(X,Y);
  XTextGlb:=X;
  YTextGlb:=Y;
end;

procedure hardcopy(inverse: boolean; mode: byte);
label exit;
var i,j,top : integer;
    ColorLoc,PrintByte : byte;

function BaseAddress(Y: integer): integer;
{ Calculate the address of scanline Y }
begin
  BaseAddress := (Y and 3) shl 13 + 90 * (Y shr 2);
end;

function PD(X,Y: integer): boolean;
{ Return true if the color of the pixel at (X, Y) matches ColorGlb }
begin
  PD := (ColorGlb = 0) xor (Mem[GrafBase:BaseAddress(Y) + X shr 3]
    and (128 shr (X and 7)) <> 0);
end;

procedure doline(top: integer);
function ConstructByte(j,i: integer): byte;
const Bits : array [0..7] of byte=(128,64,32,16,8,4,2,1);
```

```
var CByte,k : byte;
begin
  i :=i shl 3;
  CByte := 0;
  for k := 0 to top do
    if PD(j,i+k) then CByte := CByte or Bits[k];
    ConstructByte := CByte;
  end;
var a: integer;
begin
  for a := 1 to 2 do
    begin
      if a=1 then write(lst,^[ '3'#1)
        else write(lst,^[ '3'#23);
      if mode=1 then write(lst,^[ 'L')
        else write(lst,^[ '*',chr(mode));
      write(lst,chr(lo(XScreenMax)),chr(Hi(XScreenMax)));
      for j := 0 to XScreenMax-1 do
        begin
          PrintByte := ConstructByte(j,i);
          if inverse then PrintByte := not PrintByte;
          write(lst,chr(PrintByte));
        end;
      if mode<>4 then writeln(lst);
    end;
  end;
begin
  top := 7;
  ColorLoc := ColorGlb;
  ColorGlb := 255;
  mode := mode and 7;
  if (mode=5) or (mode=0) then mode := 4;
  for i := 0 to (YScreenMax shr 3)-1 do
    begin
      doline(7);
      regs.ah := 6;
      regs.dl := $ff;
      MsDos(Regs);
      if (regs.al=27) then goto exit;
    end;
    i := (YScreenMax shr 3);
    if YScreenMax and 7<>0 then doline(YScreenMax and 7);
  exit:
  writeln(lst,^[ '2');
  ColorGlb := ColorLoc;
end;

procedure Wait(mode: byte);
var ch : char;
begin
  repeat
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Read(kbd,ch);
if ch=^p then Hardcopy(false,mode);
until ch=^m;
end;
```

(*-----*)

```
const PScale = 2.5; { Plotter Scale (1-7) }
  XGlbMax = 2008; { Max. Number of pixels in Horizontal direction}
  YGlbMax = 1394; { Max. Number of pixels in Vertical direction }
  AxisX = 200; { Min. Number of pixels in Horizontal direction}
  AxisY = 150; { Min. Number of pixels in Vertical direction }
type complex = record
  Re,Im : real;
end;
st100 = string[100];
var LineStyle : byte;
ScreenDisp,freq : boolean;
OutFile : text;
RC,al : real;
fi,ni,xs : integer;
data : complex;
num,ch,typ : char;
stl : array[1..30] of st100;
Sx,Sy : array[0..50] of real;
X_min,X_max,Y_min,Y_max,
AxGlb,AyGlb,BxGlb,ByGlb : real;
AX,AY,XMax,YMax,x1,y1,
fn,AXX,expX,expY : integer;
dot : byte;
logs,dB_log : boolean;
OutName : String[5];
```

```
procedure SetLineStyle(m: byte);
begin
  case m of
    1 :if ScreenDisp then LineStyle := 1 {_____}
      else Write(OutFile,'LT;');
    2 :if ScreenDisp then LineStyle := 3 {_ _ _ _ _ _ _ _}
      else Write(OutFile,'LT2','0.15*PScale:6:4,','');
    3 :if ScreenDisp then LineStyle := 4 {_____}
      else Write(OutFile,'LT4','0.9*PScale:6:4,','');
    4 :if ScreenDisp then LineStyle := 7 {_____}
      else Write(OutFile,'LT3','0.36*PScale:6:4,','');
    5 :if ScreenDisp then LineStyle := 6 {_____}
      else Write(OutFile,'LT6','0.9*PScale:6:4,','');
    6 :if ScreenDisp then LineStyle := 5 {_____}
      else Write(OutFile,'LT5','0.9*PScale:6:4,','');
    7 :if ScreenDisp then LineStyle := 2 {.....}
      else Write(OutFile,'LT1','0.09*PScale:6:4,','');
    8 :if ScreenDisp then LineStyle := 8 {_____}
      else Write(OutFile,'LT;SM;');
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;

function log(x:real):real;
begin
  log := ln(x) / ln(10);
end;

function fact(n:integer):real;
var x : real;
begin
  x := 1;
  for n := n downto 1 do
    x := x*n;
  fact := x;
end;

function power(x,n:real):real; { function power(base,order) }
begin
  if x=0 then power := 0
  else
    if x>0 then power := exp(ln(x)*n)
    else
      if frac(n)=0 then
        begin
          if odd(trunc(n)) then power := -exp(ln(abs(x))*n)
          else power := exp(ln(abs(x))*n);
        end
      else
        begin
          writeln('*** error ***');
          read;
        end;
      end;
end;

function sinh(x:real):real;
begin
  sinh := (exp(x)-exp(-x))/2;
end;

function cosh(x:real):real;
begin
  cosh := (exp(x)+exp(-x))/2;
end;

procedure Add_C(  C1_Re,C1_Im,C2_Re,C2_Im : real;
                 var C3                    : complex);
begin
  C3.Re := C1_Re + C2_Re;
  C3.Im := C1_Im + C2_Im;
end;

procedure Sub_C(  C1_Re,C1_Im,C2_Re,C2_Im : real;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                var C3                : complex);
begin
  C3.Re := C1_Re - C2_Re;
  C3.Im := C1_Im - C2_Im;
end;

procedure Mul_C(  C1_Re,C1_Im,C2_Re,C2_Im  : real;
                  var C3                    : complex);
begin
  C3.Re := C1_Re * C2_Re - C1_Im * C2_Im;
  C3.Im := C1_Im * C2_Re + C1_Re * C2_Im;
end;

procedure Div_C(  C1_Re,C1_Im,C2_Re,C2_Im  : real;
                  var C3                    : complex);
var Dum : complex;
    E    : real;
begin
  Dum.Re := C1_Re * C2_Re + C1_Im * C2_Im;
  Dum.Im := C1_Im * C2_Re - C1_Re * C2_Im;
  E := Sqr(C2_Re) + Sqr(C2_Im);
  C3.Re := Dum.Re / E;
  C3.Im := Dum.Im / E;
end;

procedure InitCom;
(* 7 6 5 4 | 3 2 1 0 *)
(* -BAUD RATE- -PARITY- STOPBIT -WORD LENGTH- *)
(* 000 - 110 X0 - NONE 0 - 1 10 - 7 BITS *)
(* 001 - 150 01 - ODD 1 - 2 11 - 8 BIT *)
(* 010 - 300 11 - EVEN *)
(* 011 - 600 *)
(* 100 - 1200 *)
(* 101 - 2400 *)
(* 110 - 4800 *)
(* 111 - 9600 *)
begin
  regs.ax := $00FF;
  regs.dx := 0;
  intr($14,regs);
end;

procedure SendCom(c: byte);
begin
  regs.ah := $01;
  regs.al := c;
  regs.dx := 0;
  intr($14,regs);
end;

procedure ReceiveCom(var c: byte);
begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
regs.ah := $02;
regs.dx := 0;
intr($14,regs);
c := regs.al;
end;

function ReadyCom:boolean;
begin
  regs.ah := $03;
  regs.dx := 0;
  intr($14,regs);
  if (regs.ah and $01)=$01 then
    ReadyCom := true
  else
    ReadyCom := false;
  end;
end;

procedure InitPlotter;
var i : integer;
    ch : char;
begin
  if OutName='AUX' then InitCom;
  Write(OutFile,#27,'.K');
  Write(OutFile,'IN;PS3;SP0;');
  gotoxy(1,1);
  if PScale<=5 then
    begin
      Write('Paper size A4 ');
      Write(OutFile,'RO90;');
    end
  else
    Write('Paper size A3 ');
    Write(OutFile,'PA',AXX,'0;');
    for i := 1 to 3 do
      Write(OutFile,'PD;PU;CI1;');
      Write(OutFile,'PA',AXX+XMax+AX,' ',YMax+AY,' ');
    for i := 1 to 3 do
      Write(OutFile,'PD;PU;CI1;');
    Read(kbd,ch);
  end;
end;

procedure BufferReady;
var i : integer;
begin
  if OutName='AUX' then
    begin
      repeat
        Write(OutFile,#27,'.O');
        Read(AUX,i);
        Delay(1000);
      until (i and $8) = 8;
    end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;

procedure DefineWorld(X1W,Y2W,X2W,Y1W : real;
                     eX,eY           : integer);
var X_1,Y_1,X_2,Y_2 : integer;
    d               : real;
begin
  if ScreenDisp then
    begin
      X_1 := 3;
      Y_1 := 0;
      X_2 := XMax-1;
      Y_2 := YMax-4;
    end
  else
    begin
      X_1 := AX;
      Y_2 := AY;
      X_2 := XMax;
      Y_1 := YMax;
    end;
  if logs then
    begin
      X_min := Log(X1W*power(10,eX));
      X_max := Log(X2W*power(10,eX));
    end
  else
    begin
      X_min := X1W*power(10,eX);
      X_max := X2W*power(10,eX);
    end;
  Y_min := Y2W*power(10,eY);
  Y_max := Y1W*power(10,eY);
  BxGlb := (X_2-X_1)/(X_max-X_min);
  ByGlb := (Y_2-Y_1)/(Y_min-Y_max);
  AxGlb := X_1-X_min*BxGlb;
  AyGlb := Y_1-Y_max*ByGlb;
  expX := eX;
  expY := eY;
end;

procedure pset(x,y: real);
begin
  x1 := Round(AxGlb+BxGlb*x);
  y1 := Round(AyGlb+ByGlb*y);
  if ScreenDisp then
    begin
      if (y1>=0) and (y1<YMax-3) then DrawPoint(x1,y1);
      dot := 0;
    end
  else
    Write(OutFile,'PU;PA',AXX+x1,',',',',y1,',',PD;');
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;

procedure Line(x2,y2: integer);
var DeltaX,DeltaY,XStep,YStep,direction : integer;
begin
  if ScreenDisp then
    begin
      if x1>x2 then XStep := -1 else XStep := 1;
      if y1>y2 then YStep := -1 else YStep := 1;
      DeltaX := abs(x2-x1);
      DeltaY := abs(y2-y1);
      if DeltaX=0 then direction := -1
        else direction := 0;
      while not ((x1=x2) and (y1=y2)) do
        begin
          if (y1>=0) and (y1<YMax-3) then
            begin
              case LineStyle of
                1 :DrawPoint(x1,y1); { _____ }
                2 :case dot of { ..... }
                  1 : DrawPoint(x1,y1);
                  4 : Dot := -1;
                end;
                3 :case dot of { _ _ _ _ }
                  1..13 : DrawPoint(x1,y1);
                  16 : Dot := -1;
                end;
                4 :case dot of { _ . _ _ }
                  0..35,39,43..46 : DrawPoint(x1,y1);
                  47 : begin DrawPoint(x1,y1); Dot := -1; end;
                end;
                5 :case dot of { _ _ _ _ }
                  0..31,35..43 : DrawPoint(x1,y1);
                  47 : begin DrawPoint(x1,y1); Dot := -1; end;
                end;
                6 :case dot of { _ . . _ }
                  0..33,37,41,45,46 : DrawPoint(x1,y1);
                  47 : begin DrawPoint(x1,y1); Dot := -1; end;
                end;
                7 :case dot of { _ _ _ _ }
                  0..37,41..46 : DrawPoint(x1,y1);
                  47 : begin DrawPoint(x1,y1); Dot := -1; end;
                end;
                8 :DrawPoint(x1,y1); { _____ }
              end;
              dot := dot+1;
            end
          else
            dot := 0;
            if direction<0 then
              begin
                y1 := y1+YStep;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        direction := direction+DeltaX;
    end
else
    begin
        x1 := x1+XStep;
        direction := direction-DeltaY;
    end;
end;
end;
else
    Write(OutFile,'PD',AXX+x2,',',y2,',');
end;

procedure PlotLine(x,y: real);
begin
    Line(Round(AxGlb+BxGlb*x),Round(AyGlb+ByGlb*y));
end;

procedure Alarm;
var i,j : integer;
label exitA;

procedure Play(Octave,Note,Duration: integer);
var Frequency : real;
    i
    : integer;
begin
    Frequency := 32.625;
    for i := 1 to Octave do
        Frequency := Frequency * 2;
    for i := 1 to Note - 1 do
        Frequency := Frequency * 1.059463094;
    Sound(Round(Frequency));
    Delay(Duration);
    NoSound;
end;

begin
if ScreenDisp then
    begin
    for i := 1 to 2 do
        begin
            Play(4,9,80);
            Play(4,2,80);
        end;
    for i := 3 to 5 do
        begin
            Play(4,i,80);
            Play(i,4,80);
        end;
    end
else
    begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for j := 1 to 5 do
begin
  for i := 1 to 8 do
  begin
    Play(4,9,80);
    Play(4,2,80);
  end;
  Delay(500);
  regs.ah := 6;
  regs.dl := $ff;
  MsDos(Regs);
  if (regs.al=13) or (regs.al=27) then goto exitA;
end;
exitA:
for i := 1 to 8 do
begin
  Play(4,i,90);
  Play(i,4,90);
end;
end;
end;

overlay procedure Axis(ScaleX,ScaleY:integer; ScX,ScY:integer;
  pos,ws:byte; st,Xst,Yst:st100);

label exitS;
var xw1,xw2,yw1,yw2,
  i,j,k,xi,yi,x2 : integer;
  Xx,Yy,p1,p2 : real;
  sk : boolean;

function wxy(x,y:real):boolean;
begin
  wxy := true;
  if pos<>0 then
  begin
    x := Round(AxGlb+BxGlb*x);
    y := Round(AyGlb+ByGlb*y);
    if x>xw1 then
    if x<xw2 then
    if y>yw1 then
    if y<yw2 then
      wxy := false;
  end;
end;

begin
  xw1 := 30000;
  xw2 := -30000;
  yw1 := 30000;
  yw2 := -30000;
  SetLineStyle(8);
  Xx := X_max-X_min;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Yy := Y_max-Y_min;
if ScreenDisp then
begin
  pset(X_min,Y_min);
  PlotLine(X_max,Y_min);
  pset(X_min,Y_min);
  PlotLine(X_min,Y_max);
end
else
begin
  Write(OutFile,'SP8;VS5;CA8;SI',0.1+0.016*PScale:6:4,',',
    0.14+0.026*PScale:6:4,',');
  pset(X_min,Y_min);
  Write(OutFile,'PD',AXX+X1+Xmax-AX*0.8:6:4,',',Y1,',',AXX+X1,',',
    Y1,',',AXX+X1+Xmax-AX*0.8:6:4,',',Y1,';PU;');
  Write(OutFile,'PA',AXX+X1+Xmax-AX*0.65:6:4,',',Y1,';LO2;');
  Write(OutFile,'LB',Xst,^C);
  pset(X_min,Y_min);
  Write(OutFile,'PD',AXX+X1,',',Y1+Ymax-AY*0.8:6:4,',',AXX+X1,',',
    Y1,',',AXX+X1,',',Y1+Ymax-AY*0.8:6:4,';PU;');
  Write(OutFile,'PA',AXX+X1,',',Y1+Ymax-AY*0.55:6:4,';LO4;');
  Write(OutFile,'LB',Yst,^C);
  Write(OutFile,'SI',0.08+0.014*PScale:6:4,',',
    0.12+0.023*PScale:6:4,';SL0.2;');
  Write(OutFile,'PU;PA',AXX+X1+(Xmax-AX) shr 1,
    ',Y1-AY*0.7:6:4,';LO6;');
  Write(OutFile,'LB',st,^C);
end;
for j := 0 to ScaleX do
begin
  Sx[j] := X_min+Xx*j/ScaleX;
  pset(Sx[j],Y_min);
  if ScreenDisp then
    for i := 1 to 3 do DrawPoint(x1,y1+i)
  else
  begin
    Write(OutFile,'PD',AXX+x1,',',y1-AX*0.08:6:4,';PU;');
    Write(OutFile,'PA',AXX+x1,',',y1-AX*0.15:6:4,';LO6;');
    if logs then
    begin
      if frac(abs(power(10,Sx[j])*power(10,-expX))+0.001)<0.01 then
        Write(OutFile,'LB',power(10,Sx[j])*power(10,-expX):1:0,^C)
      else
        if frac(abs(power(10,Sx[j])*power(10,-expX))+0.01)<0.1 then
          Write(OutFile,'LB',power(10,Sx[j])*power(10,-expX):4:2,^C)
        else
          Write(OutFile,'LB',power(10,Sx[j])*power(10,-expX):3:1,^C);
        end
      else
        if frac(abs(Sx[j]*power(10,-expX))+0.001)<0.01 then
          Write(OutFile,'LB',Sx[j]*power(10,-expX):1:0,^C)
        else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if frac(abs(Sx[j]*power(10,-expX))+0.01)<0.1 then
  Write(OutFile,'LB',Sx[j]*power(10,-expX):4:2,^C)
else
  Write(OutFile,'LB',Sx[j]*power(10,-expX):3:1,^C);
end;
end;
for j := 0 to ScaleY do
begin
  Sy[j] := Y_min+Yy*j/ScaleY;
  pset(X_min,Sy[j]);
  if ScreenDisp then
    for i := 1 to 3 do DrawPoint(x1-i,y1)
  else
begin
  Write(OutFile,'PD',AXX+x1-AX*0.08:6:4,',',y1,';PU;');
  Write(OutFile,'PA',AXX+x1-AX*0.15:6:4,',',y1,';LO8;');
  if frac(abs(Sy[j]*power(10,-expY))+0.001)<0.01 then
    Write(OutFile,'LB',Sy[j]*power(10,-expY):1:0,^C)
  else
    if frac(abs(Sy[j]*power(10,-expY))+0.01)<0.1 then
      Write(OutFile,'LB',Sy[j]*power(10,-expY):4:2,^C)
    else
      Write(OutFile,'LB',Sy[j]*power(10,-expY):3:1,^C);
    end;
  end;
end;
if not ScreenDisp then
begin
  Write(OutFile,'PU;');
  if pos<>0 then
    for i:=1 to fn do
      begin
        SetLineStyle(i);
        Write(OutFile,'SP',i,';');
        case pos of
1,5: begin
      x1 := AX*2;
      y1 := Trunc(YMax-AY/3-AY/3*i);
      x2 := Trunc(AX*3.5);
    end;
2,6: begin
      x1 := (XMax shr 1)+AX;
      y1 := Trunc(YMax-AY/3-AY/3*i);
      x2 := (XMax shr 1)+Trunc(AX*2.5);
    end;
3,7: begin
      x1 := AX*2;
      y1 := Trunc((YMax shr 1)-AY/2-AY/3*i);
      x2 := Trunc(AX*3.5);
    end;
4,8: begin
      x1 := (XMax shr 1)+AX;
      y1 := Trunc((YMax shr 1)-AY/2-AY/3*i);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
x2 := (XMax shr 1)+Trunc(AX*2.5);
end;
end;
if xw1>x1 then xw1 := x1;
if xw2<x2 then xw2 := x2;
if yw1>y1 then yw1 := y1;
if yw2<y1 then yw2 := y1;
Write(OutFile,'PA',AXX+x1,',',y1,';PD;');
Line(x2,y1);
Write(OutFile,'SI',0.08+0.014*PScale:6:4,',',
0.12+0.023*PScale:6:4,';SL0.2;SM;');
Write(OutFile,'PU;PR',(AX shr 3),',',0,'LO2;LB',stl[i],^C);
end;
xw1 := xw1 - (AX shr 3);
xw2 := Round( xw2+(AX shr 2)+(0.08+0.014*PScale)*ws*400*1.3 );
yw1 := yw1 - (AY shr 2);
yw2 := yw2 + (AY shr 2);
Write(OutFile,'VS40;');
SetLineStyle(8);
end;
if (ScX<>0) and (ScY<>0) then
begin
if not ScreenDisp then Write(OutFile,'SP7;');
xi := ScaleX*ScX;
yi := ScaleY*ScY;
if xi>yi then yi := yi*Round(xi/yi)
else xi := xi*Round(yi/xi);
xi := xi*round(PScale * 20/xi);
yi := yi*round(PScale * 12/yi);
p2 := Yy/yi;
if logs then
for j := 1 to ScaleX do
for k := 1 to ScX do
begin
regs.ah := 6;
regs.dl := $ff;
MsDos(Regs);
if (regs.al=27) then
begin
if not ScreenDisp then Write(OutFile,#27,'.K');
goto exitS;
end;
sk := false;
p1 :=X_min+Xx*j/ScaleX-Xx/ScaleX*(power(10,-k/ScX)-0.1)/0.9;
for i := 0 to yi do
if ScreenDisp then
pset(p1,Y_min+p2*i)
else
if pos<=4 then
begin
if wxy(p1,Y_min+p2*i) then pset(p1,Y_min+p2*i);
end
end;
end;
end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
else
begin
  if wxy(p1,Y_min+p2*i) then
  begin
    if sk then
      Write(OutFile,'PD')
    else
      begin
        Write(OutFile,'PU;PA');
        sk := true;
      end;
    end
  else
  begin
    Write(OutFile,'PU;PA');
    sk := false;
  end;
  Write(OutFile,Axx+Round(AxGlb+BxGlb*p1),',');
  Write(OutFile,Round(AyGlb+ByGlb*(Y_min+p2*i)),',');
end;
end
else
for j := 1 to ScaleX*ScX do
begin
  regs.ah := 6;
  regs.dl := $ff;
  MsDos(Regs);
  if (regs.al=27) then
  begin
    if not ScreenDisp then Write(OutFile,#27,'.K');
    goto exitS;
  end;
  sk := false;
  p1 := X_min+Xx*j/(ScaleX*ScX);
  for i := 0 to yi do
  if ScreenDisp then
  pset(p1,Y_min+p2*i)
  else
  if pos<=4 then
  begin
    if wxy(p1,Y_min+p2*i) then pset(p1,Y_min+p2*i);
  end
  else
  begin
    if wxy(p1,Y_min+p2*i) then
    begin
      if sk then
        Write(OutFile,'PD')
      else
        begin
          Write(OutFile,'PU;PA');
          sk := true;
        end;
    end;
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        end;
      end
    else
      begin
        Write(OutFile,'PU;PA');
        sk := false;
      end;
      Write(OutFile,AXX+Round(AxGlb+BxGlb*p1),',');
      Write(OutFile,Round(AyGlb+ByGlb*(Y_min+p2*i)),',');
    end;
  end;
  p1 := Xx/xi;
  for j := 1 to ScaleY*ScY do
  begin
    regs.ah := 6;
    regs.dl := $ff;
    MsDos(Regs);
    if (regs.al=27) then
      begin
        if not ScreenDisp then Write(OutFile,#27,'.K');
        goto exitS;
      end;
      sk := false;
      p2 := Y_min+Yy*j/(ScaleY*ScY);
      for i := 0 to xi do
        if ScreenDisp then
          pset(X_min+p1*i,p2)
        else
          if pos<=4 then
            begin
              if wxy(X_min+p1*i,p2) then pset(X_min+p1*i,p2);
            end
          else
            begin
              if wxy(X_min+p1*i,p2) then
                begin
                  if sk then
                    Write(OutFile,'PD')
                  else
                    begin
                      Write(OutFile,'PU;PA');
                      sk := true;
                    end;
                end
              end
            end
          else
            begin
              Write(OutFile,'PU;PA');
              sk := false;
            end;
          Write(OutFile,AXX+Round(AxGlb+BxGlb*(X_min+p1*i)),',');
          Write(OutFile,Round(AyGlb+ByGlb*p2),',');
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end;
  end;
exitS:
SwapScreen;
gotoxy(1,1);
Write('ScaleX  ');
if expX=0 then Write(':')
  else Write('( *1e',expX,' )  :');
for i := 0 to ScaleX do
  begin
    if (i mod 7)=0 then writeln;
    if logs then Write(power(10,Sx[i])*power(10,-expX):9:2,' , ')
      else Write(Sx[i]*power(10,-expX):9:2,' , ');
  end;
writeln; writeln;
Write('ScaleY  ');
if expY=0 then Write(':')
  else Write('( *1e',expY,' )  :');
for i := 0 to ScaleY do
  begin
    if (i mod 7)=0 then writeln;
    Write(Sy[i]*power(10,-expY):9:2,' , ');
  end;
writeln; writeln; writeln;
Sound(1000);
Delay(200);
NoSound;
if ScreenDisp then
  begin
    Delay(1000);
    SwapScreen;
  end
else
  Write(OutFile,'SP0;');
end;

overlay procedure Q;
var r_r1,al,dw,w,fp,zm,z7,w1,w2,p1,p2 : real;
    ws,we : integer;
function Z(x:real):real;
var t : real;
begin
  t := sqrt(x);
  Z := r_r1*sqrt(
    sqr( cosh(t)*cos(t)-1 ) + sqr( sinh(t)*sin(t) ) )/sqrt(
    sqr( al+t*( sinh(t)*cos(t)-cosh(t)*sin(t) ) )
    +sqr( t*( sinh(t)*cos(t)+cosh(t)*sin(t) ) ) );
end;
begin
write('R/R1 = '); readln(r_r1);
write('alpha = '); readln(al);
write('w(start) = '); readln(ws);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
write('w(end) = '); readln(we);
writeln;
dw := (we-ws)/10;
w := (we-ws)/2;
fp := Z(w/2);
repeat
  w := w+dw;
  zm := Z(w/2);
  if zm<=fp then dw := -dw/2;
  fp := zm;
until abs(dw)<1e-11;
w := w+dw;
zm := Z(w/2);
writeln('Zmax = ',zm:8:8);
writeln('w0 = ',w:8:8);
z7 := zm/sqrt(2);
w1 := w;
dw := (we-ws)/1000;
repeat
  p1 := Z(w1/2);
  if p1>z7 then
    w1 := w1-dw
  else
    if p1<z7 then
      begin
        w1 := w1+dw;
        dw := dw/2;
      end;
until abs(z7-p1)<1e-10;
writeln('w1 = ',w1:8:8);
w2 := w;
dw := (we-ws)/1000;
repeat
  p2 := Z(w2/2);
  if p2>z7 then
    w2 := w2+dw
  else
    if p2<z7 then
      begin
        w2 := w2-dw;
        dw := dw/2;
      end;
until abs(z7-p2)<1e-10;
writeln('w2 = ',w2:8:8);
writeln('Q = ',w/(w2-w1):8:8);
read;
end;
```

```
overlay procedure other;
const ArraySize = 60;           { Maximum number of equations }
type complex = record
  Re,Im : real;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        end;
CompVector = array[0..ArraySize] of complex;
IntVector = array[0..ArraySize] of integer;
RealVector = array[1..ArraySize] of real;
matrix = array[1..ArraySize] of RealVector;
var DFile : text;

procedure Sort(var ary: CompVector; n: integer);

  procedure swapping(var first,second: complex);
    var tem : complex;
    begin
      tem := first;
      first := second;
      second := tem;
    end;

  var d,i : integer;
      Done : boolean;
  begin
    d := n;
    while d>1 do
      begin
        d := d div 2;
        repeat
          done := true;
          for i := 1 to (n-d) do
            if ary[i].Re>ary[i+d].Re then
              begin
                swapping(ary[i],ary[i+d]);
                done := false;
              end;
          until done;
        end;
      end;
    end;

  procedure Laguerre(var Degree      : integer;
                    var Poly        : CompVector;
                    InitGuess       : complex;
                    Tol             : real;
                    MaxIter         : integer;
                    var NumRoots    : integer;
                    var Roots       : CompVector;
                    var yRoots      : CompVector;
                    var Iter         : IntVector;
                    var Error       : byte);

  const NearlyZero = 1E-10;
  type quadratic = record
    A,B,C : real;
  end;

  var AddIter : integer;
      InitDegree : integer;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
InitPoly : CompVector;  
GuessRoot : complex;  
  
procedure Conjugate(var C1,C2 : complex);  
begin  
  C2.Re := C1.Re;  
  C2.Im := -C1.Im;  
end;  
  
function Modulus(var C1 : complex) : real;  
begin  
  Modulus := Sqrt(Sqr(C1.Re) + Sqr(C1.Im));  
end;  
  
procedure Add(var C1,C2,C3 : complex);  
begin  
  C3.Re := C1.Re + C2.Re;  
  C3.Im := C1.Im + C2.Im;  
end;  
  
procedure Sub(var C1,C2,C3 : complex);  
begin  
  C3.Re := C1.Re - C2.Re;  
  C3.Im := C1.Im - C2.Im;  
end;  
  
procedure Mult(var C1,C2,C3 : complex);  
begin  
  C3.Re := C1.Re * C2.Re - C1.Im * C2.Im;  
  C3.Im := C1.Im * C2.Re + C1.Re * C2.Im;  
end;  
  
procedure Divide(var C1,C2,C3 : complex);  
var Dum1,Dum2 : complex;  
  E : real;  
begin  
  Conjugate(C2,Dum1);  
  Mult(C1,Dum1,Dum2);  
  E := Sqr(Modulus(C2));  
  C3.Re := Dum2.Re / E;  
  C3.Im := Dum2.Im / E;  
end;  
  
procedure SquareRoot(var C1,C2 : complex);  
const NearlyZero = 1E-10;  
var R,Theta : real;  
begin  
  R := Sqrt(Sqr(C1.Re) + Sqr(C1.Im));  
  if ABS(C1.Re) < NearlyZero then  
    begin  
      if C1.Im < 0 then Theta := Pi / 2  
      else Theta := -Pi / 2;
```

```
end
else
  if C1.Re < 0 then Theta := ArcTan(C1.Im / C1.Re) + Pi
  else Theta := ArcTan(C1.Im / C1.Re);
  C2.Re := Sqrt(R) * Cos(Theta / 2);
  C2.Im := Sqrt(R) * Sin(Theta / 2);
end;

procedure InitAndTest(var Degree      : integer;
                     var Poly        : CompVector;
                     Tol             : real;
                     MaxIter        : integer;
                     InitGuess      : complex;
                     var NumRoots    : integer;
                     var Roots       : CompVector;
                     var yRoots      : CompVector;
                     var Iter        : IntVector;
                     var GuessRoot  : complex;
                     var InitDegree  : integer;
                     var InitPoly    : CompVector;
                     var Error       : byte);
var Term : integer;
begin
  Error := 0;
  if Degree <= 0 then Error := 2;
  if Tol <= 0 then Error := 3;
  if MaxIter < 0 then Error := 4;
  if Error = 0 then
    begin
      NumRoots := 0;
      GuessRoot := InitGuess;
      InitDegree := Degree;
      InitPoly := Poly;
      while (Degree > 0) and (Modulus(Poly[Degree]) < NearlyZero) do
        Degree := Pred(Degree);
      while (Modulus(Poly[0]) = 0) and (Degree > 0) do
        begin
          NumRoots := Succ(NumRoots);
          Roots[NumRoots].Re := 0;
          Roots[NumRoots].Im := 0;
          yRoots[NumRoots].Re := 0;
          yRoots[NumRoots].Im := 0;
          Iter[NumRoots] := 0;
          Degree := Pred(Degree);
          for Term := 0 to Degree do
            Poly[Term] := Poly[Term + 1];
          end;
        end;
      end;
    end;
end;

procedure FindOneRoot(Degree      : integer;
                      Poly         : CompVector;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

                GuessRoot : complex;
                Tol        : real;
                MaxIter   : integer;
    var Root      : complex;
    var yValue    : complex;
    var Iter      : integer;
    var Error     : byte);

var Found : boolean;
    Dif : complex;
    yPrime,yDoublePrime : complex;

procedure EvaluatePoly(Degree      : integer;
                      Poly        : CompVector;
                      X           : complex;
                      var yValue  : complex;
                      var yPrime  : complex;
                      var yDoublePrime : complex);
var Loop : integer;
    Dummy,yDPdummy : complex;
    Deriv,Deriv2 : CompVector;
begin
    Deriv[Degree] := Poly[Degree];
    for Loop := Degree - 1 downto 0 do
    begin
        Mult(Deriv[Loop + 1],X,Dummy);
        Add(Dummy,Poly[Loop],Deriv[Loop]);
    end;
    yValue := Deriv[0];
    Deriv2[Degree] := Deriv[Degree];
    for Loop := Degree - 1 downto 1 do
    begin
        Mult(Deriv2[Loop + 1],X,Dummy);
        Add(Dummy,Deriv[Loop],Deriv2[Loop]);
    end;
    yPrime := Deriv2[1];
    yDPdummy := Deriv2[Degree];
    for Loop := Degree - 1 downto 2 do
    begin
        Mult(yDPdummy,X,Dummy);
        Add(Dummy,Deriv2[Loop],yDPdummy);
    end;
    yDoublePrime.Re := 2 * yDPdummy.Re;
    yDoublePrime.Im := 2 * yDPdummy.Im;
end;

procedure ConstructDifference(Degree      : integer;
                              yValue     : complex;
                              yPrime     : complex;
                              yDoublePrime : complex;
                              var Dif    : complex);
var yPrimeSQR,yTimesyDPrime,Sum,
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SRoot, Numer1, Numer2, Numer, Denom : complex;
begin
  Mult(yPrime, yPrime, yPrimeSQR);
  yPrimeSQR.Re := Sqr(Degree - 1) * yPrimeSQR.Re;
  yPrimeSQR.Im := Sqr(Degree - 1) * yPrimeSQR.Im;
  Mult(yValue, yDoublePrime, yTimesyDPrime);
  yTimesyDPrime.Re := (Degree - 1) * Degree * yTimesyDPrime.Re;
  yTimesyDPrime.Im := (Degree - 1) * Degree * yTimesyDPrime.Im;
  Sub(yPrimeSQR, yTimesyDPrime, Sum);
  SquareRoot(Sum, SRoot);
  Add(yPrime, SRoot, Numer1);
  Sub(yPrime, SRoot, Numer2);
  if Modulus(Numer1) > Modulus(Numer2) then Numer := Numer1
  else Numer := Numer2;
  Denom.Re := Degree * yValue.Re;
  Denom.Im := Degree * yValue.Im;
  if Modulus(Numer) < NearlyZero then
  begin
    Dif.Re := 0;
    Dif.Im := 0;
  end
  else
    Divide(Denom, Numer, Dif);
  end;
end;

function TestForRoot(X, Dif, Y, Tol : real) : boolean;
begin
  TestForRoot := (ABS(Y) <= NearlyZero) or (ABS(Dif) < ABS(X * Tol))
end;

begin
  Root := GuessRoot;
  Found := false;
  Iter := 0;
  EvaluatePoly(Degree, Poly, Root, yValue, yPrime, yDoublePrime);
  while (Iter < MaxIter) and not(Found) do
  begin
    Iter := Succ(Iter);
    ConstructDifference(Degree, yValue, yPrime, yDoublePrime, Dif);
    Sub(Root, Dif, Root);
    EvaluatePoly(Degree, Poly, Root, yValue, yPrime, yDoublePrime);
    Found := TestForRoot(Modulus(Root),
      Modulus(Dif), Modulus(yValue), Tol);
  end;
  if not(Found) then Error := 1;
end;

procedure ReducePoly(var Degree : integer;
  var Poly : CompVector;
  Root : complex);
var Term : integer;
  NewPoly : CompVector;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Dummy : complex;
begin
  NewPoly[Degree - 1] := Poly[Degree];
  for Term := Degree - 1 downto 1 do
  begin
    Mult(NewPoly[Term],Root,Dummy);
    Add(Dummy,Poly[Term],NewPoly[Term - 1]);
  end;
  Degree := Pred(Degree);
  Poly := NewPoly;
end;

begin
  InitAndTest(Degree,Poly,Tol,MaxIter,InitGuess,NumRoots,Roots,
             yRoots,Iter,GuessRoot,InitDegree,InitPoly,Error);
  while (Degree > 0) and (Error = 0) do
  begin
    FindOneRoot(Degree,Poly,GuessRoot,Tol,MaxIter,
               Roots[NumRoots + 1],yRoots[NumRoots + 1],
               Iter[NumRoots + 1],Error);
    if Error = 0 then
    begin
      FindOneRoot(InitDegree,InitPoly,Roots[NumRoots + 1],
                 Tol,MaxIter,Roots[NumRoots + 1],
                 yRoots[NumRoots + 1],AddIter,Error);
      Iter[NumRoots + 1] := Iter[NumRoots + 1] + AddIter;
      NumRoots := Succ(NumRoots);
      ReducePoly(Degree,Poly,Roots[NumRoots]);
    end;
    GuessRoot := Roots[NumRoots];
  end;
end;

procedure Initial(var Poly : CompVector);
begin
  FillChar(Poly,SizeOf(Poly),0);
end;

procedure UserInput(var Degree : integer;
                   var Poly : CompVector;
                   var Guess : complex;
                   var Tol : real;
                   var MaxIter : integer);

var Ch : char;

procedure GetCoefficientsFromKeyboard(var Degree : integer;
                                      var Poly : CompVector);
var Term : integer;
begin
  Write('Degree of the polynomial = ');
  Readln(Degree);
  Writeln;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for Term := 0 to Degree do
begin
  Write(' Poly[' ,Term:2,']   Re : ',Poly[Term].Re,' = '); •
  Readln(Poly[Term].Re);
  Write('           Im : ',Poly[Term].Im,' = ');
  Readln(Poly[Term].Im);
end;
end;

begin
  GetCoefficientsFromKeyboard(Degree,Poly);
  Guess.Re := 1;
  Guess.Im := 1;
  Tol := 1E-10;
  MaxIter := 1000;
end;

procedure Results(NumRoots   : integer;
                  Answer      : CompVector;
                  MaxIter     : integer;
                  Error        : byte);

var Term : integer;
begin
  Writeln;
  Sound(3000);
  Delay(2);
  NoSound;
  case Error of
  1: Writeln('This will take more than ',MaxIter,' iterations.');
```



```
2: Writeln
   ('The degree of the polynomial must be greater than zero.');
```

```
3: Writeln('The tolerance must be greater than zero.');
```

```
4: Writeln
   ('The maximum number of iterations must be greater than zero.');
```

```
end;
if Error <= 1 then
begin
  for Term := 1 to NumRoots do
  begin
    Write(' Root ',Term:2,'   Re = ',Answer[Term].Re:15:8);
    Writeln('           Im = ',Answer[Term].Im:15:8);
  end;
  read;
end;
end;

procedure polmul(Poly1      : CompVector;
                 Poly2      : CompVector;
                 InitDegree1 : integer;
                 InitDegree2 : integer;
                 var Poly    : CompVector;
                 var Degree  : integer);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
var i,k,j :integer;
begin
  Degree := InitDegree1+InitDegree2;
  for i := 0 to Degree do
  begin
    poly[i].Re := 0; poly[i].Im := 0;
    for k := 0 to InitDegree2 do
    begin
      j := i-k;
      if (j>=0) and(j<=InitDegree1) then
      begin
        poly[i].Re := poly[i].Re+
          poly1[j].Re*poly2[k].Re-poly1[j].Im*poly2[k].Im;
        poly[i].Im := poly[i].Im
          +poly1[j].Re*poly2[k].Im+poly1[j].Im*poly2[k].Re;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure ResultPoly(NumRoots : integer;
  Answer : CompVector);
var a,b,c : CompVector;
  i,j,k,n : integer;
begin
  writeln;
  Sound(3000);
  Delay(2);
  NoSound;
  writeln('Result:');
  writeln;
  j := 0;
  n := -1;
  for i := 1 to NumRoots do
  if Answer[i].Re<0 then
  begin
    j := j+1;
    if j=1 then
    begin
      n := 1;
      a[1].Re := 1;
      a[1].Im := 0;
      a[0].Re := -Answer[i].Re;
      a[0].Im := -Answer[i].Im;
    end
  else
  begin
    b[1].Re := 1;
    b[1].Im := 0;
    b[0].Re := -Answer[i].Re;
    b[0].Im := -Answer[i].Im;
    polmul(a,b,n,1,c,n);
  end;
end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    for k := 0 to n do
      begin
        a[k].Re := c[k].Re; a[k].Im := c[k].Im;
      end;
    end;
  end;
  for i := 0 to n do
    begin
      write(' Poly[' ,i:2,']   Re = ',a[i].Re:15:8);
      writeln('           Im = ',a[i].Im:15:8);
    end;
  end;
end;

procedure MulPoly;
var a,b,c      : CompVector;
    n,n1,n2,i,j : integer;
begin
  n := 0;
  n1 := 0;
  Initial(a);
  Write('Number of polynomial = '); Readln(n);
  Writeln;
  Write('Degree of the polynomial 1 = '); readln(n1);
  for i := 0 to n1 do
    begin
      Write(' Poly[' ,i:2,']   Re = '); Readln(a[i].Re);
      Write('           Im = '); Readln(a[i].Im);
    end;
  writeln;
  for j := 2 to n do
    begin
      n2 := 0;
      Initial(b);
      Write('Degree of the polynomial ',j,' = '); readln(n2);
      for i := 0 to n2 do
        begin
          Write(' Poly[' ,i:2,']   Re = '); Readln(b[i].Re);
          Write('           Im = '); Readln(b[i].Im);
        end;
      polymul(a,b,n1,n2,c,n1);
      writeln;
      for i := 0 to n1 do
        begin
          a[i].Re := c[i].Re; a[i].Im := c[i].Im;
        end;
      end;
    end;
  Sound(3000);
  Delay(2);
  NoSound;
  writeln('Result:');
  writeln;
  for i := 0 to n1 do
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  write(' Poly[' ,i:2,']   Re = ',a[i].Re:15:8);
  writeln('           Im = ',a[i].Im:15:8);
end;
end;

procedure Linear_Slope_Delay(var Degree  : integer;
                             var Poly   : CompVector;
                             var Guess  : complex;
                             var Tol    : real;
                             var MaxIter : integer);

var W,M,N,a,b,da,db,ki : CompVector;
    i,j,Md,Nd           : integer;
    T0,Wd0,k            : real;
begin
  Initial(W);
  Initial(M);
  Initial(N);
  Initial(a);
  Initial(Poly);
  Degree := 8;
  T0 := 0.3;
  Wd0 := 0.1;
  for i := 1 to (Degree-1) do
    W[i].Re := Wd0*(sqrt(1+( i*pi)/(T0*Wd0) ))-1);
    ki[1].Re := sqrt(power( 1.3240690659E-01 ,1/4));
    ki[2].Re := sqrt(power(1/ 1.4988687223E-01 ,1/3));
    ki[3].Re := sqrt(power( 1.7538461547E-01 ,1/4));
    ki[4].Re := sqrt(power(1/ 1.7487009849E-01 ,1/3));
    ki[5].Re := sqrt(power( 1.9519799087E-01 ,1/4));
    ki[6].Re := sqrt(power(1/ 2.3941835154E-01 ,1/3));
    ki[7].Re := sqrt(power( 3.6460358025E-01 ,1/4));
  for i := 1 to (Degree-1) do
    Writeln('W[' ,i,'] = ',W[i].Re);
  writeln;
  M[2].Re := 1 * ki[1].Re;
  M[0].Re := sqr(W[1].Re) * ki[1].Re;
  Md := 2;
  N[1].Re := 1;
  Nd := 1;
  for i := 2 to (Degree-1) do
  begin
    Initial(b);
    a[2].Re := 1 * ki[i].Re;
    a[0].Re := sqr(W[i].Re) * ki[i].Re;
    if odd(i) then
    begin
      polymul(M,a,Md,2,b,Md);
      for j := 0 to Md do
        M[j].Re := b[j].Re;
      end
    else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  polmul(N,a,Nd,2,b,Nd);
  for j := 0 to Nd do
    N[j].Re := b[j].Re;
  end;
end;
Initial(a);
Initial(b);
Initial(da);
Initial(db);
k := 1;
writeln(DFile,'k = ',k:15:8); writeln(DFile);
for i := 0 to Degree do
  M[i].Re := k * M[i].Re;
  for i := 0 to (Degree div 2) do
    begin
      a[i*2].Re := power(-1,i)*M[i*2].Re;
      b[i*2+1].Re := power(-1,i)*N[i*2+1].Re;
    end;
  for i := 0 to Degree do
    begin
      da[i].Re := (i+1) * a[i+1].Re;
      db[i].Re := (i+1) * b[i+1].Re;
    end;
  for i := 0 to Degree do
    begin
      Poly[i].Re := M[i].Re + N[i].Re;
      writeln(' Poly[' ,i:2, ' ] = ',Poly[i].Re);
      writeln(DFile,'Poly[' ,i:2, ' ] := ',Poly[i].Re:15:8, ', ');
    end;
  writeln(DFile); write(DFile,'( ');
  for i := 0 to Degree do
    if a[i].Re <> 0 then
      if i <> 0 then
        begin
          if a[i].Re > 0 then
            write(DFile,' +',a[i].Re:16,'*power(w,' ,i, ')');
          else
            write(DFile,' ',a[i].Re:17,'*power(w,' ,i, ')');
          end
        end
      else
        if a[i].Re > 0 then write(DFile,' +',a[i].Re:16)
          else write(DFile,' ',a[i].Re:17);
        writeln(DFile,' )'); write(DFile,'*(');
  for i := 0 to Degree do
    if db[i].Re <> 0 then
      if i <> 0 then
        begin
          if db[i].Re > 0 then
            write(DFile,' +',db[i].Re:16,'*power(w,' ,i, ')');
          else
            write(DFile,' ',db[i].Re:17,'*power(w,' ,i, ')');
          end
        end
      else
        if db[i].Re > 0 then write(DFile,' +',db[i].Re:16)
          else write(DFile,' ',db[i].Re:17);
        writeln(DFile,' )'); write(DFile,'*(');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end
else
  if db[i].Re>0 then write(DFile,'+',db[i].Re:16)
                    else write(DFile,' ',db[i].Re:17);
writeln(DFile,' '); write(DFile,'-(');
for i := 0 to Degree do
  if b[i].Re<>0 then
    if i<>0 then
      begin
        if b[i].Re>0 then
          write(DFile,'+',b[i].Re:16,'*power(w,'i,')')
        else
          write(DFile,' ',b[i].Re:17,'*power(w,'i,')');
        end
      else
        if b[i].Re>0 then write(DFile,'+',b[i].Re:16)
                          else write(DFile,' ',b[i].Re:17);
        writeln(DFile,' '); write(DFile,'*(');
        for i := 0 to Degree do
          if da[i].Re<>0 then
            if i<>0 then
              begin
                if da[i].Re>0 then
                  write(DFile,'+',da[i].Re:16,'*power(w,'i,')')
                else
                  write(DFile,' ',da[i].Re:17,'*power(w,'i,')');
                end
              else
                if da[i].Re>0 then write(DFile,'+',da[i].Re:16)
                                  else write(DFile,' ',da[i].Re:17);
                writeln(DFile,' '); write(DFile,'/(sqr(');
                for i := 0 to Degree do
                  if a[i].Re<>0 then
                    if i<>0 then
                      begin
                        if a[i].Re>0 then
                          write(DFile,'+',a[i].Re:16,'*power(w,'i,')')
                        else
                          write(DFile,' ',a[i].Re:17,'*power(w,'i,')');
                        end
                      else
                        if a[i].Re>0 then write(DFile,'+',a[i].Re:16)
                                          else write(DFile,' ',a[i].Re:17);
                        writeln(DFile,' '); write(DFile,'+sqr(');
                        for i := 0 to Degree do
                          if b[i].Re<>0 then
                            if i<>0 then
                              begin
                                if b[i].Re>0 then
                                  write(DFile,'+',b[i].Re:16,'*power(w,'i,')')
                                else
                                  write(DFile,' ',b[i].Re:17,'*power(w,'i,')');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end
else
  if b[i].Re>0 then write(DFile,'+',b[i].Re:16)
    else write(DFile,' ',b[i].Re:17);
  writeln(DFile,' ');');
  Guess.Re := 1;
  Guess.Im := 1;
  Tol := 1E-10;
  MaxIter := 1000;
end;
```

```
procedure Phase_equalizer(var Degree : integer;
  var Poly : CompVector;
  var Guess : complex;
  var Tol : real;
  var MaxIter : integer);
var z1,z2,z3,p1,p2,p3,g1,g3,g5,k,q,w0_1,w0_2 : real;
begin
  z1 := 0.42738;
  p1 := 0.54367;
  z2 := 49.28777;
  z3 := 176.98871;
  p2 := 48.12094;
  p3 := 174.77134;
  g1 := ( 1/z1 + 1/z2 + 1/z3 ) - ( 1/p1 + 1/p2 + 1/p3);
  g3 := -( 1/(3*power(z1,3))+1/(3*power(z2,3))+1/(3*power(z3,3)) )
    + ( 1/(3*power(p1,3))+1/(3*power(p2,3))+1/(3*power(p3,3)) );
  g5 := + ( 1/(5*power(z1,5))+1/(5*power(z2,5))+1/(5*power(z3,5)) )
    - ( 1/(5*power(p1,5))+1/(5*power(p2,5))+1/(5*power(p3,5)) );
  K := power(g5,3) / power(g3,5);
  Q := 0.62715786;
  W0_1 := sqrt( (3*g3 * (5*power(Q,4) - 5*power(Q,2) + 1) ) /
    (5*g5*power(Q,2)*(3*power(Q,2)-1)) );
  W0_2 := sqrt( g3/g5 * (1 - 1/power(Q,2) + 1/(5*power(Q,4)) ) /
    (1 - 1/(3*power(Q,2)) ) );
  Writeln(' Z1 = ',z1:15:8,' Z2 = ',z2:15:8,' Z3 = ',z3:15:8);
  Writeln(' P1 = ',p1:15:8,' P2 = ',p2:15:8,' P3 = ',p3:15:8);
  Writeln('g1 = ',g1:15:8);
  Writeln('g3 = ',g3:15:8);
  Writeln('g5 = ',g5:15:8);
  Writeln('K = ',k:15:8);
  Writeln('Qap = ',q:15:8);
  Writeln('W0ap = ',w0_1:15:8);
  Writeln('W0ap = ',w0_2:15:8);
  Initial(Poly);
  Poly[12].Re := 1;
  Poly[10].Re := -(3 + 4*K);
  Poly[8].Re := (18/5 + 20/3*K);
  Poly[6].Re := -(11/5 + 40/9*K);
  Poly[4].Re := (18/25 + 40/27*K);
  Poly[2].Re := -(3/25 + 20/81*K);
  Poly[0].Re := (1/125 + 4/243*K);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Degree := 12;
Guess.Re := 1;
Guess.Im := 1;
Tol := 1E-10;
MaxIter := 1000;
end;

procedure Delay_equalizer;
var Coefficients          : matrix;
    Constants,Solution,a,b,w : RealVector;
    data,d1,d2            : complex;
    e,D0,D,Tol,min,max,mm : Real;
    Dimen,Row,Column,i,iter : integer;
    Error                  : byte;
    IterM                  : boolean;
label loop,exitd;

function EquF(w:real):real;
var D : real;
    i : integer;
begin
    { Function of Delay Equalization }
    D := 0;
    for i := 1 to (Dimen shr 1) do
        D := D + ( ( 2*a[i] ) / ( sqr(a[i])+sqr(w-b[i]) ) +
                   ( 2*a[i] ) / ( sqr(a[i])+sqr(w+b[i]) ) );
    EquF := D/(2*pi);
end;

function DifF(x: real):real;
const Tolerance = 1e-10;
type vector = array[1..100] of real;
var Term,Iter,TwoToTheIterMinus2,Extrap : integer;
    DeltaX,FourToTheExtrapMinus1       : real;
    OldEstimate,NewEstimate              : vector;

function EvaluateFirstDeriv(X : real;
                             DeltaX : real):real;
var LeftPoint,RightPoint : real;
begin
    LeftPoint := EquF(X - DeltaX);
    RightPoint := EquF(X + DeltaX);
    EvaluateFirstDeriv := (RightPoint - LeftPoint)/(2 * DeltaX);
end;

begin
    if ABS(X) < Tolerance then
        DeltaX := Sqrt(Tolerance)
    else
        DeltaX := ABS(X * Sqrt(Tolerance));
    OldEstimate[1] := EvaluateFirstDeriv(X,DeltaX);
    Iter := 1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
TwoToTheIterMinus2 := 1;
repeat
  Iter := Succ(Iter);
  DeltaX := DeltaX / 2;
  NewEstimate[1] := EvaluateFirstDeriv(X,DeltaX);
  TwoToTheIterMinus2 := TwoToTheIterMinus2 * 2;
  FourToTheExtrapMinus1 := 1;
  for Extrap := 2 to Iter do
    begin
      FourToTheExtrapMinus1 := FourToTheExtrapMinus1 * 4;
      NewEstimate[Extrap] :=
        (FourToTheExtrapMinus1 * NewEstimate[Extrap - 1]
        - OldEstimate[Extrap - 1]) / (FourToTheExtrapMinus1 - 1);
    end;
    OldEstimate := NewEstimate;
  until (ABS(NewEstimate[Iter - 1] - NewEstimate[Iter]) <=
    ABS(Tolerance * NewEstimate[Iter])) or
    (ABS(DeltaX) < Tolerance);
  Diff := NewEstimate[Iter];
end;

procedure MinMax(LeftEndPoint : real;
  RightEndPoint : real;
  var Answer : real;
  var Error : byte);

const NearlyZero = 1E-10;
var Tol,yLeft,yRight,MidPoint,yMidPoint : real;
  Iter, MaxIter : integer;
  Found : boolean;

function TestForRoot(X,OldX,Y,Tol : real) : boolean;
begin
  TestForRoot := (ABS(Y)<=NearlyZero)or(ABS(X-OldX)<ABS(OldX*Tol));
end;

begin
  Maxiter := 500;
  Tol := 1E-10;
  Error := 0;
  Found := false;
  yLeft := Diff(LeftEndpoint);
  yRight := Diff(RightEndpoint);
  if ABS(yLeft) <= NearlyZero then
    begin
      Answer := LeftEndpoint;
      Found := true;
    end;
  if ABS(yRight) <= NearlyZero then
    begin
      Answer := RightEndpoint;
      Found := true;
    end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if not Found then
begin
  if yLeft * yRight > 0 then
    Error := 2;
  if Tol <= 0 then
    Error := 3;
  if MaxIter < 0 then
    Error := 4;
end;
if (Error = 0) and (Found = false) then
begin
  Iter := 0;
  yLeft := Diff(LeftEndPoint);
  while not(Found) and (Iter < MaxIter) do
  begin
    Iter := Succ(Iter);
    MidPoint := (LeftEndPoint + RightEndPoint) / 2;
    yMidPoint := Diff(MidPoint);
    Found := TestForRoot(MidPoint, LeftEndPoint, yMidPoint, Tol);
    if (yLeft * yMidPoint) < 0 then
      RightEndPoint := MidPoint
    else
      begin
        LeftEndPoint := MidPoint;
        yLeft := yMidPoint;
      end;
  end;
  Answer := MidPoint;
  if Iter >= MaxIter then
    Error := 1;
end;
end;

procedure Partial_Pivoting(Dimen      : integer;
                          Coefficients : matrix;
                          Constants    : RealVector;
                          var Solution  : RealVector;
                          var Error     : byte);

const NearlyZero = 1E-10;
var Sum, Multiplier, Dummy      : real;
    Term, Row, ReferenceRow, PivotRow : integer;
    DummyRow                     : RealVector;

procedure EROmultAdd(Multiplier : real;
                    Dimen       : integer;
                    var ReferenceRow : RealVector;
                    var ChangingRow : RealVector);
var Term : integer;
begin
  for Term := 1 to Dimen do
    ChangingRow[Term] := ChangingRow[Term] +
      Multiplier*ReferenceRow[Term];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;

begin
  Error := 0;
  if Dimen < 1 then
    Error := 1
  else
    if Dimen = 1 then
      if ABS(Coefficients[1, 1]) < NearlyZero then
        Error := 2
      else
        Solution[1] := Constants[1] / Coefficients[1, 1];
      if Dimen > 1 then
        begin
          { Make Coefficients matrix upper triangular }
          ReferenceRow := 0;
          while (Error = 0) and (ReferenceRow < Dimen - 1) do
            begin
              ReferenceRow := Succ(ReferenceRow);
              { Find row with largest element in this column }
              { and switch this row with the ReferenceRow }
              PivotRow := ReferenceRow;
              for Row := ReferenceRow + 1 to Dimen do
                if ABS(Coefficients[Row, ReferenceRow]) >
                  ABS(Coefficients[PivotRow, ReferenceRow]) then
                  PivotRow := Row;
              if PivotRow <> ReferenceRow then
                begin
                  DummyRow := Coefficients[PivotRow];
                  Coefficients[PivotRow] := Coefficients[ReferenceRow];
                  Coefficients[ReferenceRow] := DummyRow;
                  Dummy := Constants[PivotRow];
                  Constants[PivotRow] := Constants[ReferenceRow];
                  Constants[ReferenceRow] := Dummy;
                end
              else { If the diagonal element is zero, no solution exists }
                if ABS(Coefficients[ReferenceRow, ReferenceRow]) <
                  NearlyZero then Error := 2;
              if Error = 0 then
                for Row := ReferenceRow + 1 to Dimen do
                  { Make the ReferenceRow element of these rows zero }
                  if ABS(Coefficients[Row, ReferenceRow]) > NearlyZero then
                    begin
                      Multiplier := -Coefficients[Row, ReferenceRow] /
                        Coefficients[ReferenceRow, ReferenceRow];
                      EROmultAdd(Multiplier, Dimen, Coefficients[ReferenceRow],
                        Coefficients[Row]);
                      Constants[Row] := Constants[Row] +
                        Multiplier * Constants[ReferenceRow];
                    end;
                end;
              if ABS(Coefficients[Dimen, Dimen]) < NearlyZero then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Error := 2;
if Error = 0 then
begin
  Term := Dimen;
  while Term >= 1 do
  begin
    Sum := 0;
    for Row := Term + 1 to Dimen do
      Sum := Sum + Coefficients[Term, Row] * Solution[Row];
    Solution[Term] := (Constants[Term] - Sum) /
      Coefficients[Term, Term];
    Term := Pred(Term);
  end;
end;
end;
end;
end;

begin
  Tol := 1E-10;
  iter := -1;
  IterM := false;
  FillChar(Coefficients, SizeOf(Coefficients), 0);
  FillChar(Constants, SizeOf(Constants), 0);
  Dimen := 10;
  e := 0.005;
  D0 := 0.55;
  a[1] := 1.3575;  b[1] := 0.66667;
  a[2] := 1.3575;  b[2] := 2;
  a[3] := 1.3575;  b[3] := 3.3333;
  a[4] := 1.3575;  b[4] := 4.6667;
  a[5] := 1.086;   b[5] := 6;
loop:
  iter := iter+1;
  gotoxy(25,1);  writeln('Iterate ',iter);  writeln;
  for i := 1 to (Dimen shr 1) do
    Writeln('a',i,' = ',a[i]:13:10,'b':15,i,' = ',b[i]:13:10);
  writeln;
  min := 0;
  max := 0;
  for Row := 1 to Dimen do
  begin
    if odd(Row) then
    begin
      if Row=1 then
      begin
        if not IterM then
          w[Row] := 0
        else
          begin
            w[Row] := b[1]/3;
            if DifF(w[Row])>=0 then
              MinMax(0,w[Row],mm,Error)
          end
        end
      end
    end
  end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    else
      MinMax(w[Row],b[1],mm,Error);
      if Error=0 then w[Row] := mm;
    end;
  end
else
  begin
    w[Row] := (b[(Row shr 1)]+b[(Row shr 1)+1])/2;
    if IterM then
      begin
        if Diff(w[Row])>=0 then
          MinMax(b[(Row shr 1)],w[Row],mm,Error)
        else
          MinMax(w[Row],b[(Row shr 1)+1],mm,Error);
          if Error=0 then w[Row] := mm;
        end;
      end;
    end
  end
else
  begin
    w[Row] := b[Row shr 1];
    if IterM then
      begin
        if Diff(w[Row])<=0 then
          MinMax((b[(Row shr 1)-1]+b[(Row shr 1)])/2,w[Row],mm,Error)
        else
          MinMax(w[Row],(b[(Row shr 1)]+b[(Row shr 1)+1])/2,mm,Error);
          if Error=0 then w[Row] := mm;
        end;
      end;
    end;
    D := EquF(w[Row]);
    if odd(Row) then
      begin
        if (Row=1) and not IterM then
          begin
            Constants[Row] := D-D;
            if min<abs(D-D0) then min := abs(D-D0);
          end
        else
          begin
            Constants[Row] := D-D-e/2;
            if min<abs(D-D0+e/2) then min := abs(D-D0+e/2);
          end;
        end
      end
    else
      begin
        Constants[Row] := D-D+e/2;
        if max<abs(D-D0-e/2) then max := abs(D-D0-e/2);
      end;
    end;
    Writeln('w',Row:2,' = ',w[Row],'delta D':15,
            ' = ',Constants[Row]);
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if (min<Tol) and (max<Tol) then
begin
  if IterM then
    goto exitd
  else
    begin
      gotoxy(1,1); write('First[,iter,']');
      IterM := true;
      read;
    end;
end;
for Row := 1 to Dimen do
begin
  for Column := 1 to Dimen do
    begin
      if Column<=(Dimen shr 1) then
        begin
          i := Column;
          Coefficients[Row, Column] :=
            2*( ( sqr(w[Row]-b[i]) - sqr(a[i]) )
              / sqr( sqr(a[i]) + sqr(w[Row]-b[i]) ) )
              + ( sqr(w[Row]+b[i]) - sqr(a[i]) )
              / sqr( sqr(a[i]) + sqr(w[Row]+b[i]) ) ) );
        end
      else
        begin
          i := Column - (Dimen shr 1);
          Coefficients[Row, Column] :=
            4*a[i]*( ( w[Row]-b[i] ) /
              sqr( sqr(a[i]) + sqr(w[Row]-b[i]) ) ) -
              ( w[Row]+b[i] ) / sqr( sqr(a[i]) + sqr(w[Row]+b[i]) ) ) );
        end;
      end;
    end;
  end;
  Partial_Pivoting(Dimen,Coefficients,Constants,Solution,Error);
  if Error=0 then
    begin
      for i := 1 to (Dimen shr 1) do
        begin
          a[i] := a[i]+Solution[i];
          b[i] := b[i]+Solution[(Dimen shr 1)+i];
        end;
      end;
    end
  else
    begin
      Writeln;
      Write('***** Error *****'); read;
    end;
    goto loop;
  exitd:
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
var Guess                : complex;
    InitDegree, Degree, MaxIter, NumRoots : integer;
    Tol                  : real;
    Iter                : IntVector;
    InitPoly, Poly, Answer, yAnswer      : CompVector;
    Error               : byte;
    ch                  : char;
begin
    InitDegree := 0;
    Initial(InitPoly);
    repeat
        ClrScr;
        gotoxy(24,9); write('1) Multiple Polynomial');
        gotoxy(24,10); write('2) Roots & Polynomial');
        gotoxy(24,11); write('3) Linear-Slope Delay ');
        gotoxy(24,12); write('4) Phase-equalizer');
        gotoxy(24,13); write('5) Delay-equalizer');
        gotoxy(23,14); write('ESC Quit');
        gotoxy(27,17); write('Select No. ');
        repeat
            gotoxy(38,17); read(kbd,ch); write(ch);
        until ch in [#27,'1'..'5'];
        if ch<>#27 then
            begin
                ClrScr;
                Assign(DFile,'SOLUTION');
                Rewrite(DFile);
                case ch of
                    '1': MulPoly;
                    '2': UserInput(InitDegree,InitPoly,Guess,Tol,MaxIter);
                    '3': Linear_Slope_Delay(InitDegree,InitPoly,Guess,Tol,MaxIter);
                    '4': Phase_equalizer(InitDegree,InitPoly,Guess,Tol,MaxIter);
                    '5': Delay_equalizer;
                end;
                if ch in ['2'..'4'] then
                    begin
                        Degree := InitDegree;
                        Poly := InitPoly;
                        Laguerre(Degree,Poly,Guess,Tol,MaxIter,
                            NumRoots,Answer,yAnswer,Iter,Error);
                        Sort(Answer,Numroots);
                        Results(NumRoots,Answer,MaxIter,Error);
                        if Error <= 1 then ResultPoly(NumRoots,Answer);
                    end;
                read;
                Close(DFile);
            end;
        until ch=#27;
    end;

overlay procedure Sensitivity(w : real);
var d1,d2,d3          : complex;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
t,r1,r2,c1,c2,k : real;
begin
  t := sqrt(w*RC/2);
  case typ of
    'A':
      case fi of
        1:begin
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , 1 + 1/al , 0 , d3 );
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1/al , 0 ,d2 );
          add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
          div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
          sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
        end;
        2:begin
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , 1 + 1/al , 0 , d3 );
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1/al , 0 ,d2 );
          add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
          div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
          sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
        end;
        3:begin
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          sub_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          div_c( d1.re , d1.im , 1 + 1/al , 0 , d3 );
          mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
          sub_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
          mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
          mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
          div_c( d2.re , d2.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
          add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
          mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1/al , 0 ,d2 );
        end;
      end;
    end;
  end;
```

```
add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
4:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , 1 + 1/al , 0 , d3 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d2.re , d2.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
end;
'B'..'D':
case fi of
1:begin
div_c( t*(cosh(t)*cos(t)-sinh(t)*sin(t)) ,
t*(cosh(t)*cos(t)+sinh(t)*sin(t)) ,
sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1+al , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , -1/2 , 0 , data );
end;
2:begin
div_c( -t*(cosh(t)*cos(t)-sinh(t)*sin(t)) ,
-t*(cosh(t)*cos(t)+sinh(t)*sin(t)) ,
sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1+al , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
3:begin
div_c( t*(cosh(t)*cos(t)-sinh(t)*sin(t)) ,
t*(cosh(t)*cos(t)+sinh(t)*sin(t)) ,
sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , al , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -cosh(t)*cos(t) +1 , -sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , t*(sinh(t)*cos(t) - cosh(t)*sin(t)) ,
t*(sinh(t)*cos(t)+cosh(t)*sin(t)) , d2 );
div_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1+al , sinh(t)*sin(t) , d2 );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
sub_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
4:begin
div_c( t*(cosh(t)*cos(t)-sinh(t)*sin(t)) ,
t*(cosh(t)*cos(t)+sinh(t)*sin(t)) ,
sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , a1 , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , t*(sinh(t)*cos(t) - cosh(t)*sin(t)) ,
t*(sinh(t)*cos(t)+cosh(t)*sin(t)) , d2 );
div_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1+a1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
sub_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
end;
'E','F':
case fi of
1:begin
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 + 1/a1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
2:begin
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 + 1/a1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
3:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

```
sub_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 + 1/al , 0 ,d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
4:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1);
add_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 + 1/al , 0 ,d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
end;
'G','H':
case fi of
1:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 -1/al , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
2:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 -1/al , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
3:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -cosh(t)*cos(t) +1 , -sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 -1/al , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
4:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 -1/al , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/a1 , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1 + 1/a1 , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
end;
'I','J':
case fi of
1:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
add_c( -1+1/a1 , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1/a1 , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
2:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , -1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
add_c( -1+1/a1 , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , -1 , 0 , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , d1 );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
3:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
sub_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
add_c( -1 +1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
sub_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
4:begin
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
add_c( d1.re , d1.im , 1/al , 0 , d1 );
add_c( -1 +1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d3 );
mul_c( t , t , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d1);
div_c( d1.re , d1.im , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d1 );
mul_c( t , t , sinh(t)*cos(t) , cosh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
mul_c( d2.re , d2.im , 1/al , 0 , d2 );
add_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( 1/al , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2);
add_c( d2.re , d2.im , cosh(t)*cos(t) -1 , sinh(t)*sin(t) , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
sub_c( d3.re , d3.im , d1.re , d1.im , d1 );
mul_c( d1.re , d1.im , 1/2 , 0 , data );
end;
end;
'a':begin
al := 1/fi;
mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+al , 0 , d1 );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , a1 , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'b':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+a1 , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , a1 , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -a1+1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'c':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+2*a1 , 0 , d1 );
  add_c( d1.re , d1.im , -2*a1 , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , a1 , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -a1+1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'd':begin
  a1 := fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , a1+1 , 0 , d1 );
  sub_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , d1 );
  div_c( d1.re , d1.im , cosh(t)*cos(t)-1+a1 , sinh(t)*sin(t) , data );
end;
'e':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 2+a1 , 0 , d1 );
  add_c( d1.re , d1.im , -2 , 0 , d1 );
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1+a1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'f':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+a1 , 0 , d1 );
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1+a1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'g':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 2+a1 , 0 , d1 );
  add_c( d1.re , d1.im , -2 , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+a1 , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'h':begin
  a1 := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+a1 , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+a1 , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;
'i':begin
  al := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+al , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+al , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'j':begin
  al := 1/fi;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 2+al , 0 , d1 );
  add_c( d1.re , d1.im , -2 , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+al , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
end;
end;

overlay procedure TargetF(w : real);
var k,al,t,t1,t2,r1,r2,
    c1,c2,Qap,w0ap,a,b : real;
    i,j,m,n : integer;
    d1,d2,d3 : complex;
begin
  if freq then
    case xs of
      3 : w := w/1e3;
      6 : w := w/1e6;
      9 : w := w/1e9;
    end;
  t := sqrt(abs(w)*RC/2);
  case typ of
    'K':begin
      m := 7;
      if fi<>1 then
        begin
          if fi<m then
            begin
              j := fi-1;
              n := j;
            end
          else
            begin
              j := 1;
              n := m-2;
            end;
          end;
        for i := j to n do
          begin
            case i of
              1: begin a := 1.66018; b := 0.98794; end;
              2: begin a := 1.77084; b := 2.41510; end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
3: begin a := 1.73841; b := 3.83236; end;
4: begin a := 1.58011; b := 5.19676; end;
5: begin a := 1.15152; b := 6.47771; end;
end;
w0ap := sqrt(sqr(a)+sqr(b));
Qap := w0ap/(2*a);
div_c( -sqr(w) + sqr(w0ap) , -w*(w0ap/Qap) ,
      -sqr(w) + sqr(w0ap) , w*(w0ap/Qap) , data );
if fi=m then
begin
  if i>1 then
    mul_c( data.re , data.im , d1.re , d1.im , data );
    d1 := data;
  end;
end;
end;
if (fi=1) or (fi=m) then
begin
  al := 3.85;
  if w>=0 then
  begin
    mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , al , 0 , d1);
    mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d2);
  end
  else
  begin
    mul_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , al , 0 , d1);
    mul_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d2);
  end;
  add_c( d1.re , d1.im , -al+1 , 0 , d1 );
  add_c( d2.re , d2.im , -al , 0 , d2 );
  if fi=1 then
    div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data )
  else
  begin
    div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , d1 );
    mul_c( data.re , data.im , d1.re , d1.im , data );
  end;
end;
end;
'@':begin
  case fi of
  1: begin
    al := 4;
    add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1+al , 0 , d1);
    div_c( al , 0 , d1.re , d1.im , data );
  end;
  2: begin
    w := w/15.92696274;
    div_c( 1 , 0 , -w*w + 1 , 1.41421356*w , data );
  end;
  3: begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
w := w/15.92696274*1.16877089;
div_c( 0.70710678, 0, -w*w+0.70710678, 0.64359425*w , data );
end;
end;
end;
'A':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 3;
    4: al := 4;
  end;
  k := 1;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al-k , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , 1 , 0 , d2 );
  div_c( 1+1/al , 0 , d2.re , d2.im , data );
end;
'B':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al-k , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , +1-1/al , 0 , d2 );
  div_c( 1 , 0 , d2.re , d2.im , data );
end;
'C':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  mul_c( cosh(t)*cos(t),sinh(t)*sin(t),1/k+2/k*1/al-1-1/al,0, d2);
  add_c( d2.re , d2.im , -2/k*1/al+1+1/al , 0 , d2 );
  div_c( 1 , 0 , d2.re , d2.im , data );
end;
'D':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1/al+1-k , 0 , d2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1/al+1 , 0 , d2 );
div_c( 1 , 0 , d2.re , d2.im , data );
end;
'E':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 , 0 , d1);
  mul_c( cosh(t)*cos(t),sinh(t)*sin(t),2/k+1/k*1/al-1-1/al,0 , d2);
  add_c( d2.re , d2.im , -2/k+1+1/al , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'F':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 , 0 , d1);
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al-k*1/al , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1+1/al , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'G':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
  end;
  k := 1;
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al , 0 , d1);
  add_c( d1.re , d1.im , -1-1/al , 0 , d1 );
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 2+1/al-k , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -2/k+1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'H':begin
  case fi of
    1: al := 1;
    2: al := 2;
    3: al := 4;
    4: al := 6;
```

```
end;
k := 1;
mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al , 0 , d1);
add_c( d1.re , d1.im , -1-1/al , 0 , d1 );
mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al , 0 , d2);
mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'I':begin
  case fi of
    1: al := 1.71;
    2: al := 2.42;
    3: al := 3.85;
    4: al := 8.2;
  end;
  k := 1;
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1+1/al , 0 , d1);
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 1+1/al , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
'J':begin
  case fi of
    1: al := 1.71;
    2: al := 2.42;
    3: al := 3.85;
    4: al := 8.2;
  end;
  k := 1;
  add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1+1/al , 0 , d1);
  mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , 2+1/al-k , 0 , d2);
  mul_c( d2.re , d2.im , 1/k , 0 , d2 );
  add_c( d2.re , d2.im , -2/k+1 , 0 , d2 );
  div_c( d1.re , d1.im , d2.re , d2.im , data );
end;
end;
end;

procedure Fre_3db(LeftEndPoint : real;
                  RightEndPoint : real;
                  var Answer      : real;
                  var Error      : byte);

const NearlyZero = 1E-10;
var Tol,yLeft,yRight,MidPoint,yMidPoint : real;
    Iter, MaxIter : integer;
    Found : boolean;

function TestForRoot(X, OldX, Y, Tol : real) : boolean;
begin
  TestForRoot := (ABS(Y) <= NearlyZero) or
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                (ABS(X - OldX) < ABS(OldX * Tol))
end;

begin
  MaxIter := 500;
  Tol := 1E-10;
  Error := 0;
  Found := false;
  TargetF(LeftEndpoint);
  yLeft := sqrt( sqr(data.re) + sqr(data.im) ) - 1/sqrt(2);
  TargetF(RightEndpoint);
  yRight := sqrt( sqr(data.re) + sqr(data.im) ) - 1/sqrt(2);
  if ABS(yLeft) <= NearlyZero then
  begin
    Answer := LeftEndpoint;
    Found := true;
  end;
  if ABS(yRight) <= NearlyZero then
  begin
    Answer := RightEndpoint;
    Found := true;
  end;
  if not Found then
  begin
    if yLeft * yRight > 0 then
      Error := 2;
    if Tol <= 0 then
      Error := 3;
    if MaxIter < 0 then
      Error := 4;
  end;
  if (Error = 0) and (Found = false) then
  begin
    Iter := 0;
    TargetF(LeftEndPoint);
    yLeft := sqrt( sqr(data.re) + sqr(data.im) ) - 1/sqrt(2);
    while not(Found) and (Iter < MaxIter) do
    begin
      Iter := Succ(Iter);
      MidPoint := (LeftEndpoint + RightEndpoint) / 2;
      TargetF(MidPoint);
      yMidPoint := sqrt( sqr(data.re) + sqr(data.im) ) - 1/sqrt(2);
      Found := TestForRoot(MidPoint, LeftEndpoint, yMidPoint, Tol);
      if (yLeft * yMidPoint) < 0 then
        RightEndpoint := MidPoint
      else
        begin
          LeftEndpoint := MidPoint;
          yLeft := yMidPoint;
        end;
    end;
    Answer := MidPoint;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if Iter >= MaxIter then
        Error := 1;
    end;
end;

procedure S_Plane(al : real);
var M,A,argA : real;
begin
    case typ of
        'A': M := al;
        'B'..'D': M := al-1;
        'E','F': M := (-al+1)/al;
        'G','H': M := -al/(al+1);
        'I','J': M := -al/(al+1);
        'e': M := 0;
    end;
    if sqrt(M)>=1 then
        begin
            A := abs (-M + sqrt( sqrt(M)-1 ) );
            argA := 0;
        end
    else
        begin
            A := abs( sqrt( sqrt(-M) + 1-sqrt(M) ) );
            if M<>0 then argA := ArcTan( sqrt( 1-sqrt(M) ) / -M )
            else argA := ArcTan( -1e30 );
        end;
    if M>=0 then
        if fi<=2 then argA := argA-pi
        else argA := argA+pi;
    data.re := sqrt( ln(A) ) - sqrt(argA + 2*ni*pi);
    data.im := 2 * ln(A) * (argA + 2*ni*pi);
end;

procedure pole(Guess1 : real;
                Guess2 : real;
                var Root : real;
                var Error : byte);
const NearlyZero = 1E-10;
var Found : boolean;
    OldX,OldY,X,Y,NewX,NewY,Tol : real;
    MaxIter,Iter : integer;

function TestForRoot(X, OldX, y, Tol : real) : boolean;
begin
    TestForRoot := (ABS(y) <= NearlyZero) or
        (ABS(X - OldX) < ABS(OldX*Tol))
end;

begin
    MaxIter := 500;
    Tol := 1E-10;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Found := false;
Iter := 0;
Error := 0;
OldX := Guess1;
X := Guess2;
S_Plane(OldX);
OldY := data.re;
S_Plane(X);
Y := data.re;
if ABS(OldY) <= NearlyZero then
begin
  X := OldX;
  Y := OldY;
  Found := true;
end
else
if ABS(Y) <= NearlyZero then
  Found := true
else
  if ABS(OldY - Y) <= NearlyZero then
    Error := 2; { Slope of line is zero; no intercept }
while not(Found) and (Error = 0) and (Iter < MaxIter) do
begin
  Iter := Succ(Iter);
  NewX := X - Y * (X - OldX) / (Y - OldY);
  S_Plane(NewX);
  NewY := data.re;
  Found := TestForRoot(NewX, OldX, NewY, Tol);
  OldX := X;
  OldY := Y;
  X := NewX;
  Y := NewY;
end;
Root := X;
if not(Found) and (Error = 0) and (Iter >= MaxIter) then
  Error := 1;
end;

procedure Nyquist(w : real);
var t : real;
    d1,d2 : complex;
begin
  t := sqrt(abs(w)/2);
  case typ of
  'A':begin
    if w>=0 then
    begin
      add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , a1 , 0 , data );
    end
    else
    begin
      add_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , a1 , 0 , data );
    end
  end
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;
end;
'B'..'D':begin
  if w>=0 then
    begin
      add_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , -1 +al , 0 , data );
    end
  else
    begin
      add_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , -1 +al , 0 , data );
    end;
  end;
end;
'E', 'F':begin
  if w>=0 then
    begin
      add_c( al*cosh(t)*cos(t), al*sinh(t)*sin(t), -al+1, 0, data );
    end
  else
    begin
      add_c( al*cosh(t)*cos(t), al*(-sinh(t)*sin(t)), -al+1, 0, data );
    end;
  end;
end;
'G', 'H':begin
  if w>=0 then
    begin
      mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d1);
      sub_c( dl.re , dl.im , al , 0 , data );
    end
  else
    begin
      mul_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d1);
      sub_c( dl.re , dl.im , al , 0 , data );
    end;
  end;
end;
'I', 'J':begin
  if w>=0 then
    begin
      mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d1);
      add_c( dl.re , dl.im , -al , 0 , data );
    end
  else
    begin
      mul_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , al+1 , 0 , d1);
      add_c( dl.re , dl.im , -al , 0 , data );
    end;
  end;
end;
end;
'@':begin
  if w>=0 then
    begin
      mul_c( cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , al -1 , 0 , d1);
      add_c( dl.re , dl.im , 1 , 0 , data );
    end
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
else
begin
mul_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , a1 -1 , 0 , d1);
add_c( d1.re , d1.im , 1 , 0 , data );
end;
end;
end;
end;

procedure Stable(Guess1 : real;
                 Guess2 : real;
                 var Root : real;
                 var Error : byte);
const NearlyZero = 1E-10;
var Found : boolean;
    OldX,OldY,X,Y,NewX,NewY,Tol : real;
    MaxIter,Iter : integer;

function TestForRoot(X, OldX, y, Tol : real) : boolean;
begin
TestForRoot := (ABS(y) <= NearlyZero) or
(ABS(X - OldX) < ABS(OldX*Tol))
end;

begin
MaxIter := 500;
Tol := 1E-10;
Found := false;
Iter := 0;
Error := 0;
OldX := Guess1;
X := Guess2;
Nyquist(OldX);
OldY := data.im;
Nyquist(X);
Y := data.im;
if ABS(OldY) <= NearlyZero then
begin
X := OldX;
Y := OldY;
Found := true;
end
else
if ABS(Y) <= NearlyZero then
Found := true
else
if ABS(OldY - Y) <= NearlyZero then
Error := 2;
while not(Found) and (Error = 0) and (Iter<MaxIter) do
begin
Iter := Succ(Iter);
NewX := X - Y * (X - OldX) / (Y - OldY);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Nyquist(NewX);
NewY := data.im;
Found := TestForRoot(NewX, OldX, NewY, Tol);
OldX := X;
OldY := Y;
X := NewX;
Y := NewY;
end;
Root := X;
if not(Found) and (Error = 0) and (Iter >= MaxIter) then
  Error := 1;
end;

function Differentiate(x: real):real;
const Tolerance = 1e-7;
type vector = array[1..100] of real;
var Term,Iter,TwoToTheIterMinus2,Extrap : integer;
    DeltaX,FourToTheExtrapMinus1 : real;
    OldEstimate,NewEstimate : vector;

function EvaluateFirstDeriv(X : real;
    DeltaX : real):real;
var LeftPoint,RightPoint : real;
begin
  TargetF(X - DeltaX);
  LeftPoint := ArcTan(data.im / data.re);
  TargetF(X + DeltaX);
  RightPoint := ArcTan(data.im / data.re);
  EvaluateFirstDeriv := (RightPoint - LeftPoint)/(2 * DeltaX);
end;

begin
  if ABS(X) < Tolerance then
    DeltaX := Sqrt(Tolerance)
  else
    DeltaX := ABS(X * Sqrt(Tolerance));
  OldEstimate[1] := EvaluateFirstDeriv(X,DeltaX);
  Iter := 1;
  TwoToTheIterMinus2 := 1;
  repeat
    Iter := Succ(Iter);
    DeltaX := DeltaX / 2;
    NewEstimate[1] := EvaluateFirstDeriv(X,DeltaX);
    TwoToTheIterMinus2 := TwoToTheIterMinus2 * 2;
    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;
  end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
OldEstimate := NewEstimate;
until (ABS(NewEstimate[Iter - 1] - NewEstimate[Iter]) <=
      ABS(Tolerance * NewEstimate[Iter])) or
      (ABS(DeltaX) < Tolerance);
Differentiate := NewEstimate[Iter];
end;
```

```
procedure plot_function;
```

```
label exit1;
```

```
var q,i,n,nn,point      : integer;
```

```
delta,w,aa,b,ww,w1,
```

```
dx_max,dx_min,t,ph0,
```

```
ph1,dy_max,dy_min,Root : real;
```

```
Error                  : byte;
```

```
err1,err2              : boolean;
```

```
d1,d2                  : complex;
```

```
dy,xx                  : string[11];
```

```
alp                    : array[0..20] of string[20];
```

```
wwi                    : array[0..20] of integer;
```

```
ali                    : array[0..20] of real;
```

```
begin
```

```
ClrScr;
```

```
n := 100;
```

```
RC := 1;
```

```
case num of
```

```
'2'..'5': begin
```

```
if freq then write(' 2πRC =',2*pi*rc:15:8,' ---> ');
```

```
write('RC =',rc:15:8,' : '); readln(rc);
```

```
if freq then rc := 2*pi*rc;
```

```
end;
```

```
'6': if (ord(typ)and$20)=0 then
```

```
begin
```

```
al := 1;
```

```
write(' alpha =',al:15:8,' : '); readln(al);
```

```
end;
```

```
'7': begin
```

```
w1 := 1;
```

```
ww := 4;
```

```
ni := 0;
```

```
write(' al 1 = '); readln(w1);
```

```
write(' al 2 = '); readln(ww);
```

```
write(' n = '); readln(ni);
```

```
end;
```

```
'8': begin
```

```
ali[0] := 1;
```

```
wwi[0] := 22;
```

```
for i := 1 to fn do
```

```
begin
```

```
ali[i] := ali[i-1];
```

```
write(' alpha[' ,i,'] = '); readln(ali[i]);
```

```
wwi[i] := wwi[i-1];
```

```
write(' w[' ,i,'] = '); readln(wwi[i]);
```

```
        end;
    end;
end;
GraphicsMode;
SelectScreen(2);
ClearScreen;
SelectScreen(1);
logs := false;
dB_log := false;
if not freq then
begin
    xx := ^N+'x'+^0;
    xs := 0;
end
else
case xs of
    0 : xx := 'F [Hz]';
    3 : xx := 'F [KHz]';
    6 : xx := 'F [MHz]';
    9 : xx := 'F [GHz]';
end;
if not ScreenDisp then
begin
    Assign(OutFile,OutName);
    Rewrite(OutFile);
    InitPlotter;
    gotoxy(1,1); Write('          Plot ... ');
end;
case num of
'2':begin
    stl[1] := ^N+'a'+^0+ = 1';
    stl[2] := ^N+'a'+^0+ = 2';
    stl[3] := ^N+'a'+^0+ = 4';
    stl[4] := ^N+'a'+^0+ = 6';
    logs := true;
    dB_log := true;
    DefineWorld(0.01,-70, 1000,10, xs,0);
    Axis(5,8, 9,1, 7,5, 'Fig. Magnitude response',
        xx,'|T| [dB]');
end;
'3':begin
    stl[1] := ^N+'a'+^0+ = 1';
    stl[2] := ^N+'a'+^0+ = 2';
    stl[3] := ^N+'a'+^0+ = 4';
    stl[4] := ^N+'a'+^0+ = 6';
    logs := true;
    DefineWorld(0.01,-500, 500,0 ,xs,0);
    Axis(5,10, 9,1, 6,5, 'Fig. Phase response',
        xx,^N+'h'+^0+ [deg]');
end;
'4','5':begin
    if num='4' then dy := 'Group Delay'
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        else dy := 'Phase Delay';
    stl[1] := ^N+'a'+^O+ = 1';
    stl[2] := ^N+'a'+^O+ = 2';
    stl[3] := ^N+'a'+^O+ = 4';
    stl[4] := ^N+'a'+^O+ = 6';
    logs := true;
    DefineWorld(0.01,-2, 1000,4, xs,-xs);
    Axis(5,3, 9,2, 6,5, 'Fig. '+dy,xx,'D [sec]');
end;
'6':begin
    Str(al:1:0,alp[0]);
    stl[1] := 'R1';
    stl[2] := 'C1';
    stl[3] := 'R2';
    stl[4] := 'C2';
    logs := true;
    DefineWorld(0.01,-5, 1000,5, 0,0);
    Axis(5,4, 9,5, 2,2, ' ',xx,'Sensitivity');
end;
'7':begin
    fn := 2;
    n := n*5;
    point := 3;
    ali[0] := 0;
    ali[1] := 0.5;
    ali[2] := 0.92058;
    ali[3] := 0.99;
    alp[0] := ^N+'a'+^O+ = 0';
    alp[1] := ^N+'a'+^O+ = 0.5';
    alp[2] := ^N+'a'+^O+ = 0.92058';
    alp[3] := ^N+'a'+^O+ = 0.99';
    DefineWorld(-40,-40, 40,40 ,0,0);
    Axis(2,2, 8,8, 0,0, 'Fig. S-Plane Root','Re','Im');
end;
'8':begin
    Str(ali[1]:1:0,alp[1]);
    Str(ali[2]:1:0,alp[2]);
    Str(ali[3]:1:0,alp[3]);
    Str(ali[4]:1:0,alp[4]);
    stl[1] := ^N+'a'+^O+ = '+alp[1];
    stl[2] := ^N+'a'+^O+ = '+alp[2];
    stl[3] := ^N+'a'+^O+ = '+alp[3];
    stl[4] := ^N+'a'+^O+ = '+alp[4];
    DefineWorld(-20,-10, 15,10 ,0,0);
    Axis(7,4, 1,1, 1,5, ' ','X','jY');
end;
end;
if not ScreenDisp then
begin
    BufferReady;
    Write(OutFile,'IW',Axx+AX,' ',AY,' ',Axx+XMax,' ',YMax,' ');
    n := n*5;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Write(OutFile,'CA8;');
Write(OutFile,'SI',0.08+0.014*PScale:6:4,
      ',,0.12+0.022*PScale:6:4,;');
end;
if num in ['7','8'] then
begin
  fn := fn shl 1;
  nn := n;
end
else
  delta := (X_max-X_min)/n;
for fi := 1 to fn do
begin
  case num of
'3','5':begin
  ph0 := 0;
  ph1 := 0;
  end;
'7':begin
  if odd(fi) then n := nn
  else n := point;
  delta := (ww-w1)/n;
  end;
'8':begin
  al := ali[(fi+1) shr 1];
  ww := wwi[(fi+1) shr 1];
  if odd(fi) then n := nn
  else n := 3 shl 1;
  delta := 2*ww/n;
  end;
end;
dx_min := 1e20;
dx_max := -1e20;
dy_min := 1e20;
dy_max := -1e20;
err1 := false;
err2 := false;
b := Y_min;
if num in ['2'..'6'] then
  SetLineStyle(fi)
else
  if num='8' then
    if odd(fi) then SetLineStyle((fi+1) shr 1)
    else SetLineStyle(8);
if not ScreenDisp then
  case num of
'2'..'6': Write(OutFile,'SP',fi,;');
'7': if odd(fi) then Write(OutFile,'SP1;')
     else Write(OutFile,'SP2;');
'8': Write(OutFile,'SP',(fi+1) shr 1,;');
  end;
for i := 0 to n do
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  case num of
    '2'..'6':begin
      aa := X_min+delta*i;
      if logs then w := power(10,aa) else w := aa;
      end;
    '7': w := w1+delta*i;
    '8':begin
      if odd(fi) then w := -ww+delta*i
      else w := Round(-ww+delta*i);
      end;
  end;
  case num of
    '2':begin
      TargetF(w);
      b := sqrt( sqr(data.re) + sqr(data.im) );
      end;
    '3','5':begin
      TargetF(w);
      ph0 := ph0-arctan(data.im / data.re);
      if ph0<(-pi/2) then ph1 := ph1-1
      else if ph0>(pi/2) then ph1 := ph1+1;
      ph0 := arctan(data.im / data.re);
      if num='3' then
        b := (ph1*pi + ph0) * 180/pi
      else
        begin
          if w<>0 then b := -(ph1*pi + ph0) / w
          else b := -(ph1*pi + ph0) / 1e-10;
          if freq then b := b/(2*pi);
          end;
        end;
    '4':begin
      b := -Differentiate(w);
      if freq then b := b/(2*pi);
      end;
    '6':begin
      Sensitivity(w);
      b:= data.re;
      end;
    '7':begin
      if (not ScreenDisp) and (not odd(fi)) then
        begin
          w := ali[i];
          S_plane(w);
          aa := data.re;
          b := data.im;
          pset(aa,b); Write(OutFile,'CI10;PU;');
          if b>=0 then
            Write(OutFile,'PR',-AY*0.07:6:4,
              ',','AX*0.12:6:4,','LO7;')
          else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Write(OutFile,'PR',-AY*0.07:6:4,
              ',','-AX*0.12:6:4,',';LO9;');
        Write(OutFile,'LBK = ',alp[i],^C);
    end
else
    begin
        S_plane(w);
        aa := data.re;
        b := data.im;
    end;
end;
'8':begin
    Nyquist(w);
    aa := data.re;
    b := data.im;

    if (not ScreenDisp) and (not odd(fi)) then
        begin
            pset(aa,b); Write(OutFile,'CI5;PU;');
            if b>=0 then
                Write(OutFile,'PR',0,',' ,',AX*0.15:6:4)
            else
                Write(OutFile,'PR',0,',' ,',-AX*0.15:6:4);
            if w<>0 then
                if i=n then
                    Write(OutFile,',';LO5;LB',^N,'x',^O,' = ',w:1:0,^C)
                else
                    Write(OutFile,',';LO5;LB',w:1:0,^C);
            end;
        end;
end;
if (b<-1e10) then
    begin
        err1 := true;
        goto exit1;
    end;
if (b>1e10) then
    begin
        err2 := true;
        goto exit1;
    end;
if dB_log then
    begin
        b := 20*log(b);
        if (b<-300) then
            begin
                err1 := true;
                goto exit1;
            end;
    end;
if num in ['2'..'6'] then
    begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if dy_min>b then
begin
dy_min := b;
dx_min := w;
end;
if dy_max<b then
begin
dy_max := b;
dx_max := w;
end;
if i=0 then pset(aa,b) else PlotLine(aa,b);
end
else
if odd(fi) then
begin
if dy_min>b then dy_min := b;
if dy_max<b then dy_max := b;
if dx_min>aa then dx_min := aa;
if dx_max<aa then dx_max := aa;
if i=0 then pset(aa,b) else PlotLine(aa,b);
end;
regs.ah := 6;
regs.dl := $ff;
MsDos(Regs);
if (regs.al=27) then
begin
if not ScreenDisp then Write(OutFile,#27,'.k');
goto exit1;
end;
end;
exit1:
Sound(2000);
Delay(150);
NoSound;
if ScreenDisp then SwapScreen;
if num in ['1'..'6'] then
begin
Write('function ',fi,' : YMin ');
if err1 then write('<') else write('=');
Writeln(dy_min,' X -->',dx_min);
Write('YMax ':21);
if err2 then write('>') else write('=');
Writeln(dy_max,' X -->',dx_max);
if num='2' then
if typ in ['A'..'H'] then
begin
Fre_3db(0, 1e3 , Root , Error );
if Error=0 then Writeln('W3db = ':23,Root:11:8);
end;
end;
end
else
if odd(fi) then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  if num='7' then
    begin
      S_plane(ww);
      if data.re<0 then
        begin
          Write('al =' :7,ww:12:5);
          Writeln('S = ' :29,data.re:12:5,'j':7,data.im:12:5);
        end
      else
        begin
          Pole(ww, ww-0.01 , Root , Error );
          if Error=0 then
            begin
              S_plane(Root);
              Write('al <' :7,Root:12:5);
              Writeln('S = ' :29,data.re:12:5,'j':7,data.im:12:5);
            end
          else
            Writeln('**** Error ****':31);
          end;
        end
      else
        begin
          Writeln('function ',(fi+1) shr 1,':');
          Write(' w 1 =');
          Stable(0, 0.1 , Root , Error );
          if Error=0 then
            begin
              Nyquist(Root);
              Write(Root:12:5,' Re 1 =',data.re:12:5);
            end
          else
            Write('**** Error ****':31);
          Write(' w 2 =');
          Stable(ww, ww+0.1 , Root , Error );
          if Error=0 then
            begin
              Nyquist(Root);
              Writeln(Root:12:5,' Re 2 =',data.re:12:5);
            end
          else
            Writeln('**** Error ****':31);
          end;
        end;
      Write(' Xmin =' ,dx_min:10:3);
      Write(' Xmax =' ,dx_max:10:3,' Ymin ');
      if err1 then write('<') else write('=');
      Write(dy_min:10:3,' Ymax ');
      if err2 then write('>') else write('=');
      Writeln(dy_max:10:3);
    end;
  Delay(1500);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if ScreenDisp and (fi<>fn) then SwapScreen;
end;
if not ScreenDisp then
begin
  Write(OutFile,'SP0;IN;');
  if PScale>5 then
    Write(OutFile,'PA16640,11400;')
  else
    Write(OutFile,'PA0,0;');
  Close(OutFile);
end;
Alarm;
Wait(1);
if ScreenDisp then
begin
  SwapScreen;
  Wait(1);
  SwapScreen;
  Wait(1);
end;
TextMode;
end;
begin
TextMode;
AllocateRAMScreen;
ColorGlb := 255;
repeat
  ClrScr;
  gotoxy(17,4); write('-----');
  gotoxy(25,5); write('Active distributed RC');
  gotoxy(17,6); write('-----');
  gotoxy(24,9); write('1) Display');
  gotoxy(24,10); write('2) Magnitude Response');
  gotoxy(24,11); write('3) Phase Response');
  gotoxy(24,12); write('4) Group Delay');
  gotoxy(24,13); write('5) Phase Delay');
  gotoxy(24,14); write('6) Sensitivity');
  gotoxy(24,15); write('7) S-Plane Root');
  gotoxy(24,16); write('8) Nyquist');
  gotoxy(24,17); write('9) other menu');
  gotoxy(24,18); write('ESC Quit');
  gotoxy(27,20); write('Select No. ');
  repeat
    gotoxy(38,20); read(kbd,num); write(num);
  until num in [#27,'1'..'9'];
  if num='9' then
    begin
      ClrScr;
      other;
    end;
  if num='1' then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
  GraphicsMode;
  SwapScreen;
  Wait(1);
  SwapScreen;
  TextMode;
end;
if num in ['2'..'8'] then
begin
  gotoXY(1,25);
  write('Output [A]: Screen & Printer (^P=PrintScreen)');
  write(' [B]: Plotter ');
  repeat
    read(kbd,ch);
    ch := UpCase(ch);
  until (ch='A') or (ch='B');
  if ch='A' then
  begin
    ScreenDisp := true;
    XMax := XScreenMax;
    YMax := YScreenMax;
  end
  else
  begin
    gotoXY(1,25);
    write('Output Port [A]: Serial');
    write(' [B]: Parallel ');
    repeat
      read(kbd,ch);
      ch := UpCase(ch);
    until (ch='A') or (ch='B');
    if ch='A' then OutName := 'AUX'
      else OutName := 'PRN';
    ScreenDisp := false;
    XMax := Round(XGlbMax * PScale);
    YMax := Round(YGlbMax * PScale);
    AX := Round(AxisX * PScale);
    AY := Round(AxisY * PScale);
    AXX := Round(AX*1.2);
  end;
  ClrScr;
  gotoxy(24,9); write('A Lowpass filter - 1');
  gotoxy(24,10); write('B Lowpass filter - 2');
  gotoxy(24,11); write('C Lowpass filter - 3');
  gotoxy(24,12); write('D Lowpass filter - 4');
  gotoxy(24,13); write('E Highpass filter - 1');
  gotoxy(24,14); write('F Highpass filter - 2');
  gotoxy(24,15); write('G Highpass filter - 3');
  gotoxy(24,16); write('H Highpass filter - 4');
  gotoxy(24,17); write('I Equalizer - 1');
  gotoxy(24,18); write('J Equalizer - 2');
  gotoxy(24,19); write('K Delay Equalizer');
```

```
gotoxy(27,22); write('Select No. ');
repeat
  gotoxy(38,22); Read(kbd,typ);
  typ := UpCase(typ); Write(typ);
until typ in ['A'..'K',^M];
if typ=^M then typ := 'e'
else
  if num='6' then
  begin
    gotoXY(1,25);
    write('Sensitivity      [A]: R1,C1,R2,C2');
    write('                    [B]: K ');
    repeat
      read(kbd,ch);
      ch := UpCase(ch);
      until (ch='A') or (ch='B');
      if ch='B' then typ := chr(ord(typ) or $20);
    end;
    fn := 4;
    freq := false;
    xs := 6;
    Plot_Function;
  end;
until num=#27;
end.
```