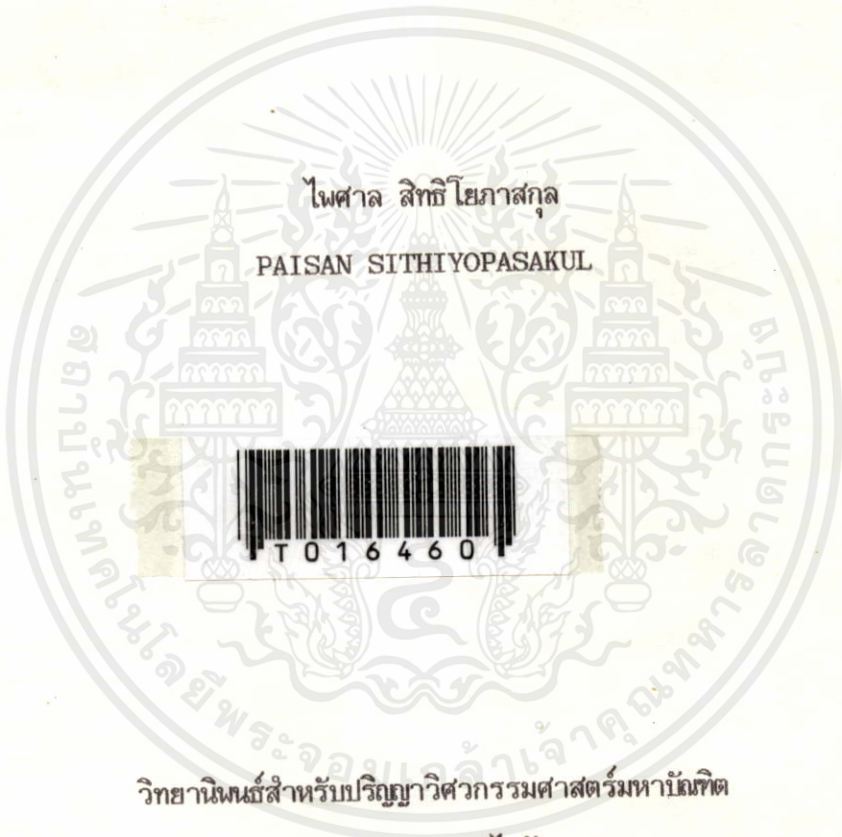




การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแยกที่ผิดสทริบิวท์อาซีไลน์ฟิลเตอร์

REALIZATION OF AN ACTIVE DISTRIBUTED RC LINE FILTERS AND ITS APPLICATION



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรม ไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

ISBN 974-8155-37-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและองค์ประกอบใดๆของเอกสารนี้เพื่อครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่

เลขทะเบียน

16460

วัน เดือน ปี ๑ ๑ ค.ศ. 2534

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานของวงจรแอกทีฟดีสทริบิวต์ อาชีไลน์  
ฟิลเตอร์

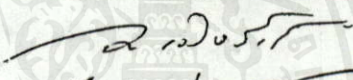
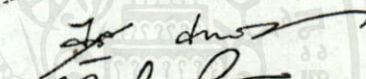
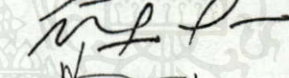


Realization of an Active Distributed RC Line Filters  
and its Application

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. พุศักรัตน์ ชิวสุวิทย์	
ผศ. วิชัย สุวพันธ์	

ค่าระดับคะแนนรวมที่เป็น เอกฉันท์จากคณะกรรมการสอบ GOOD

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

สถานที่สอบ ห้องประชุมภาคอิเล็กทรอนิกส์ (B-312)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(นายพงษ์ชัย วงศ์นิภาส)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... 17 ... เดือน... เมษายน... พ.ศ. 2534...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน...  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอหลักการออกแบบวงจรกรองความถี่ และวงจรอควอไลเซอร์ที่สามารถยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่ย่านความถี่สูงได้ โดยใช้วงจรแบบแอกทีฟคิรวิวิท้อซี พร้อมทั้งพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบและค่าความไวของอุปกรณ์ในวงจรที่ออกแบบได้

นอกจากนี้ยังเสนอหลักการในการประมาณฟังก์ชันของวงจรถ่ายอควอไลเซอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ตามที่ต้องการได้ ซึ่งสามารถใช้ในการชดเชยเฟสของสัญญาณหรือแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรุปดีเลย์คงที่ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นของโพลและซีโรแบบขนาน และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาค่าตอบของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ถูกประมาณขึ้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งของโพลและซีโรที่ดีที่สุด ในการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์ดังกล่าวข้างต้นนั้น ได้นำเอาสัญญาณทดสอบมีอดดูเลทไซน์กำลังสองพัลซ์มาช่วยในการออกแบบเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณสี่ในระบบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์ โดยไม่มีผลต่อความผิดเพี้ยนทางกรุปดีเลย์ของสัญญาณสี่ จากการทดลองวงจรถ่ายดังกล่าวนี้ให้ผลใกล้เคียงกับทฤษฎีการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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 เนทเวิร์กฟังก์ชัน	4
2.2 ทฤษฎีไซน์กำลังสองพัลส์	7
2.3 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์ โดย ใช้มอดดูเลท ไซน์กำลังสองพัลส์	16
บทที่ 3 ดิสทริบิวท์อาซี	23
3.1 สายส่ง	23
3.2 โครงสร้างของลิมิตพัลซารีเตอร์	29
3.3 โครงสร้างของดิสทริบิวท์อาซี	33
บทที่ 4 การออกแบบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี	38
4.1 เสถียรภาพของระบบ	38
4.2 ความไวของอุปกรณ์	41
4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี	43
4.4 การออกแบบวงจรอิควอไลเซอ์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี	80
บทที่ 5 การทดสอบและการประยุกต์ใช้งาน	89
5.1 การทดสอบวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซี	89
5.2 การออกแบบวงจรดีเลย์อิควอไลเซอ์	100
5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรอิควอไลเซอ์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของ สัญญาณ โครมอเมตริกซ์ต่อลูนินแนซในระบอบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์	108
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	114
กิตติกรรมประกาศ	115
เอกสารอ้างอิง	116
ภาคผนวก รายละเอียดของโปรแกรม	118

# บทที่ 1

## บทนำ

การออกแบบวงจรใด ๆ ในขอบข่ายของความถี่เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลตอบสนองทางขนาดแบบต่าง ๆ เช่น การออกแบบวงจรกรองความถี่ สามารถทำได้หลายวิธีและการสังเคราะห์วงจรก็ทำได้หลายแบบเช่น อาจจะเป็นแบบพาสซีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R, C และ L หรือเป็นแบบแอคทีฟที่ใช้โอลิเมนต์ R, C ร่วมกับออปแอมป์ ซึ่งวงจรถูกกล่าวจะใช้พวกลัมด์โอลิเมนต์ (Lumped Element) แต่เทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบวงจรที่มีส่วนประกอบเป็นดิสทริบิวต์อานซ์ [11, 12] ซึ่งเน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวต์อานซ์มีคุณลักษณะทั่วไปที่ต่ำกว่ามีขนาดเล็กกว่าเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อานซ์ วิทยานพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการใหม่ในการออกแบบวงจรกรองความถี่และวงจรอควอไลเซอร์ที่สามารถยกหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่ย่านความถี่สูง [1] โดยใช้วงจรแอคทีฟดิสทริบิวต์อานซ์ (Active Distributed RC Circuit) โดยวงจรถูกกล่าวมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำ สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็ก โดยที่ค่า Parasitic Capacitors [5] ระหว่างตัวยูนiformดิสทริบิวต์อานซ์กับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ในช่วงความถี่สูง

โดยทั่วไปในระบบการรับส่งสัญญาณติดต่อสื่อสาร จะต้องส่งผ่านสัญญาณเข้าวงจรต่าง ๆ ซึ่งอาจทำให้ผลตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้นและทำให้กรุปดีเลย์ที่ได้ไม่คงที่ ถ้าหากในระบบนั้นมีความจำเป็นที่ต้องให้เฟสเป็นเชิงเส้น เช่น ในระบบโทรทัศนหรือระบบรับส่งสัญญาณพัลส์ ฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องชดเชยเฟสของสัญญาณ โดยทำให้เฟสที่ได้เป็นเชิงเส้นและให้กรุปดีเลย์คงที่มากที่สุด และเพื่อให้การออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้งานมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในวิทยานพนธ์นี้จึงได้เสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรถ่ายอควอไลเซอร์ เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรุปดีเลย์คงที่ [2] และสามารถกำหนดคุณลักษณะของกรุปดีเลย์ตามที่ต้องการได้ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ในการหาค่าตอบ นอกจากนี้ยังได้นำวิธีการออกแบบวงจรที่ได้มาประยุกต์ เพื่อใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิตานซ์ต่อลุมิแนนซ์ในระบบการส่ง โทรทัศน โดยนำเอาสัญญาณมอดูเลต ไซน์กำลังสองพัลส์มาใช้ในการวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

1.1 วัตถุประสงค์ของวิทยานพนธ์ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1. เพื่อศึกษาวิธีการทางคณิตศาสตร์และนำมาประยุกต์ใช้งานของดิสทริบิวต์อานซ์ไลน์ฟิล

เตอร์

2. เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบวงจรรองความถี่และวงจรอิควอไลเซอร์ โดยใช้ วงจรแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์อ้าซี
3. เพื่อศึกษาการประมาณหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชันในการออกแบบวงจรดีเลย์อิควอไลเซอร์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของโพลและซีโรที่ดีที่สุด
4. เพื่อศึกษาการวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดดูเลทไซน์ กำลังสองพัลส์
5. เพื่อออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิกแนชต่อลูมิแนช ในระบบโทรทัศนส์

## 1.2 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเอาตัวดิสทริบิวต์อ้าซีไลน์ฟิลเตอร์ที่เป็นชนิดยูนิฟอร์ม ซึ่ง ภายในประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ จำนวน 2 ตัว ร่วมกับออปแอมป์ 1 ตัว มาใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำ, วงจรรองความถี่สูง และวงจรอิควอไลเซอร์ที่ใช้ในการชดเชยระดับของสัญญาณที่ความถี่สูง ซึ่งทั้งหมดจะเป็นการหาผลตอบสนองทางขนาดเป็นหลัก ส่วนในตอนหลังจะเป็นการประมาณหาเน็ตเวิร์กฟังก์ชัน เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลตอบสนองกรุปดีเลย์ตามที่กำหนด และในท้ายที่สุดจะนำเอาวิธีชดเชยผลตอบสนองทั้งทางขนาดและเฟส มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบการส่งโทรทัศนส์

ในบทที่ 2 กล่าวถึงผลตอบสนองของเน็ตเวิร์กฟังก์ชัน ทฤษฎีไซน์กำลังสองพัลส์ในการตรวจสอบข้อบกพร่องของระบบการส่งโทรทัศนส์ การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดดูเลทไซน์กำลังสองพัลส์

ในบทที่ 3 เป็นการแสดงโครงสร้างของดิสทริบิวต์อ้าซี การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของดิสทริบิวต์อ้าซีซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับของสายส่ง เปรียบเทียบโครงสร้างและพารามิเตอร์ระหว่างเน็ตเวิร์กแบบลัมด์และแบบดิสทริบิวต์

ในบทที่ 4 เป็นการออกแบบวงจรรองความถี่ต่ำ, วงจรรองความถี่สูง และวงจรอิควอไลเซอร์ที่ใช้การยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดของสัญญาณที่่านความถี่สูง โดยใช้วงจรแอกทีฟดิสทริบิวต์อ้าซี (Active Distributed RC Circuit) ซึ่งวงจรถูกออกแบบได้จะมีพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดค่าของผลตอบสนองทางความถี่เปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาถึงเสถียรภาพของระบบที่ออกแบบ และค่าความไว (Sensitivity) ของอิลิเมนต์แต่ละตัวในวงจร

ในบทที่ 5 แสดงผลการทดสอบวงจรแอกทีฟดิฟเฟอเรนเชียลที่ได้ออกมาที่ 4 และเสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อีควอไลเซอร์ ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะของกรุปดีเลย์ตามที่ต้องการได้ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นของโพลและซีโรที่ชานไปกับแกน  $j\omega$  ใน S-Plane แล้วให้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของโพลและซีโรที่เสถียรที่สุดด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน การประยุกต์นำวงจรที่ออกแบบได้ในบทที่ 4 และบทที่ 5 นี้ มาใช้เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิตีแอสซิมเมตริกในระบบการส่งโทรทัศนส์ โดยนำมอดดูเลทไซน์กำลังสองพัลส์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาใช้ตรวจสอบความบกพร่องและวัดความผิดเพี้ยนของอัตราการขยายและดีเลย์ของสัญญาณ

ในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะสรุปผลการวิจัย และวิจารณ์ถึงข้อดีข้อเสียของการออกแบบวงจรที่ได้เสนอไว้พร้อมทั้งข้อเสนอนี้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

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

### 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถนำวงจรแอกทีฟดิฟเฟอเรนเชียลไปใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ ที่สามารถกำหนดค่าผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ หรือใช้ในการออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์ที่สามารถยกระดับหรือลดระดับผลตอบสนองทางขนาดที่ย่านความถี่สูงได้ตามต้องการ

2. สามารถนำไปใช้ในการประมาณหาเท็เวอ์ฟังก์ชันในขอบข่ายของความถี่ เพื่อให้ได้คุณลักษณะทางขนาดหรือกรุปดีเลย์ใกล้เคียงกับคุณลักษณะทางขนาดหรือกรุปดีเลย์ที่ต้องการตามอุดมคติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในระบบการรับส่งสัญญาณโทรทัศนส์

4. หลักการและการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เขียนเป็นโปรแกรมไว้เพื่อเป็นการจำลองผลตอบสนอง และให้ตรวจสอบดูรายละเอียดที่ได้จนเป็นที่พอใจ แล้วจึงทำการสร้างวงจรเพื่อใช้งานจริง ซึ่งจะสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่  $K$  เป็นอัตราขยาย ซึ่งมีค่าคงที่

$z_i$  เป็นตำแหน่งซีโรว์อันดับที่  $i$

$p_j$  เป็นตำแหน่งโพลอันดับที่  $j$

เมื่อพิจารณาผลตอบสองทางความถี่ของเน็ตเวิร์ก โดยสมมติป้อนสัญญาณอินพุตเป็นรูปไซน์และเน็ตเวิร์กเป็นแบบลิเนียร์ ผลตอบสองของวงจรในสถานะเสถียรของสัญญาณรูปไซน์ ซึ่ง  $s$  มีค่าเท่ากับ  $j\omega$  ดังนั้นสมการ (2.2) จะได้

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

เมื่อพิจารณาแฟคเตอร์  $(j\omega-s_i)$  โดยให้  $s_i$  เป็นซีโรว์ คือ  $s_i = z_i$  หรือเป็นโพล คือ  $s_i = p_i$  ซึ่งค่า  $s_i$  จะเป็นตัวเลขเชิงซ้อนสมมติให้

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

ค่าแฟคเตอร์  $(j\omega - s_i)$  จะได้เป็น

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

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

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

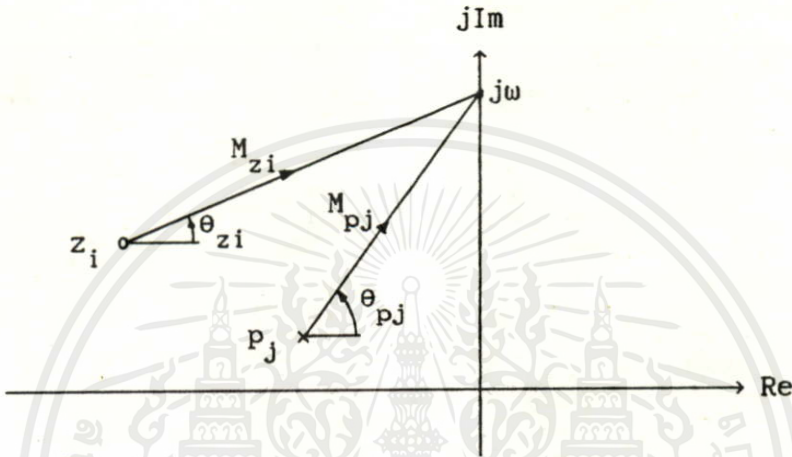
$$= K \frac{M_{z1} M_{zi} \dots M_{zm}}{M_{p1} M_{pj} \dots M_{pn}} e^{j(\theta_{z1} + \theta_{zi} + \dots + \theta_{zm} - \theta_{p1} - \theta_{pj} - \dots - \theta_{pn})} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ใน S-Plane ค่าของแพลคเตอร์  $(j\omega - z_i)$  สามารถแสดงด้วยเวกเตอร์จาก  $z_i$  ไปยัง  $j\omega$  และแพลคเตอร์  $(j\omega - p_j)$  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  $\omega$  บนแกนจินตภาพ  $M_{z_i}$  หารด้วยผลคูณของเวกเตอร์ที่ลากจากตำแหน่งโพลไปยังความถี่  $\omega$  บนแกนจินตภาพ  $M_{p_j}$  สำหรับผลตอบสนองเฟส  $\theta(\omega)$  คือผลรวมของมุมเวกเตอร์ของซีโร  $\theta_{z_i}$  ลบด้วยผลรวมของมุมเวกเตอร์ของโพล  $\theta_{p_j}$

ผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) ได้จากการพิจารณาสัญญาณในโดเมนของเวลา โดยแสดงให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ เช่นเดียวกับกับผลตอบสนองทางขนาดและเฟส โดยสมมติสัญญาณอินพุต  $V_1$  บ้อนไปยังเน็ทเวิร์กที่มีค่ากรุปดีเลย์เท่ากับ  $D$  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

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลึกทั้งนั้นมิให้คิดแปลเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการ (2.7) และ (2.8) จะเห็นได้ว่าสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตมีเฟสต่างกันคือ

$\theta = -\omega D$  ... (2.9)

ฟังก์ชันกรุปดีเลย์ (Group delay) จะได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (2.9) เกี่ยวกับ  $\omega$  ซึ่งจะได้

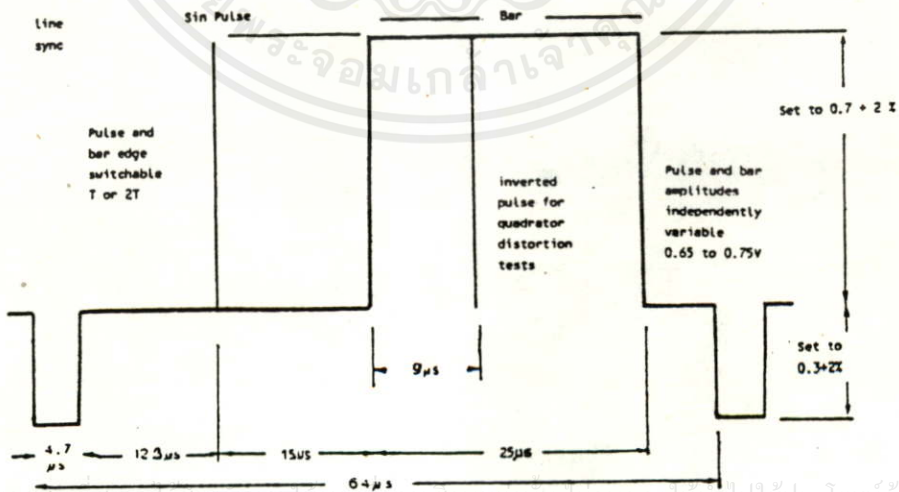
$D = -\frac{d}{d\omega} \theta$  ... (2.10)

ดังนั้นผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ก็คือค่าลบการหาอนุพันธ์ผลตอบสนองทางเฟสนั่นเอง

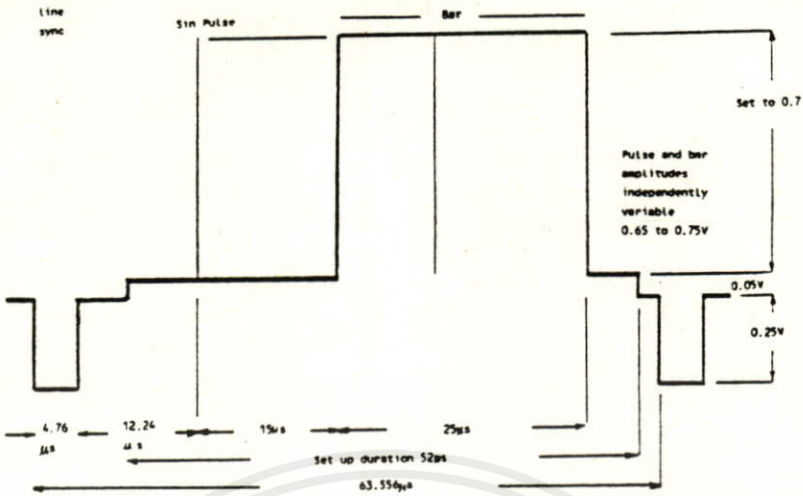
## 2.2 ทฤษฎี ไลน์ก้ำกลางสองพัลส์

ไลน์ก้ำกลางสองพัลส์เป็นที่นิยมในการใช้ตรวจสอบข้อบกพร่อง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในระบบ โทรทัศน์ [19] พัลส์ดังกล่าวนี้อาจเป็นแบบ T และ 2T สำหรับตรวจสอบโทรทัศน์ขาว-ดำ และแบบมอดดูเลข 20 T ไลน์ก้ำกลางสองพัลส์ใช้ในการตรวจสอบโทรทัศน์สี วิธีการตรวจสอบระบบใด ๆ ทำได้โดยการป้อนไลน์ก้ำกลางสองพัลส์ให้กับระบบนั้น แล้วสังเกตการตอบสนองต่าง ๆ ของระบบดังกล่าวคือ การตอบสนองของขนาด (Amplitude Response) การตอบสนองของเฟส (Phase Response)

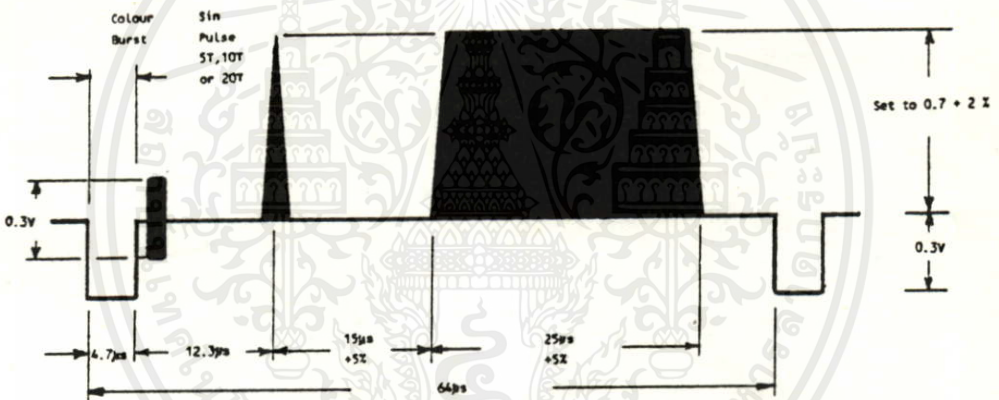
รูปลักษณะคลื่น ไลน์ก้ำกลางสอง ช่วงกว้างของพัลส์ที่ใช้ทดสอบมีการกำหนดขนาดของพัลส์ ในช่วงตรงกลาง เช่น ขนาดความกว้างของพัลส์ช่วงตรงกลาง HAD (Half Amplitude Duration) เมื่อกำหนดให้ HAD เป็นสัญญาณไลน์ก้ำกลางสองของ T ช่วงความถี่ของพัลส์คือ  $f = 1/T$



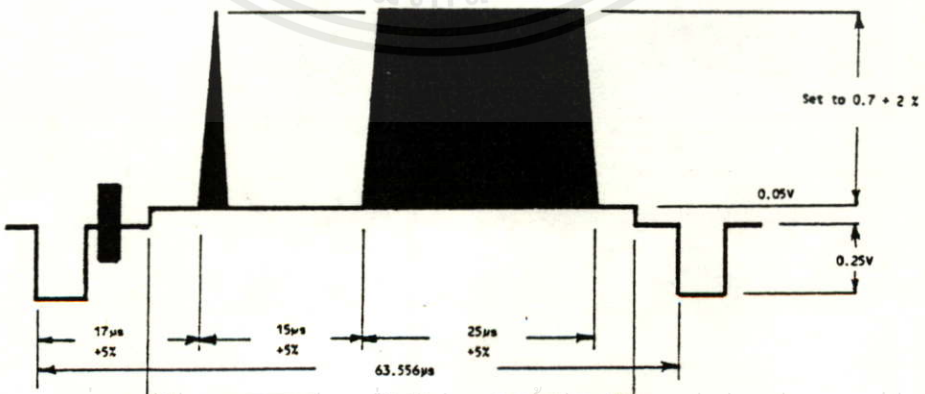
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร.ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.2** รูปลักษณะของสัญญาณไลน์ก้ำกลางสองพัลส์และบาร์ในระบบ 625 เส้น



รูปที่ 2.3 รูปลักษณะสัญญาณ ไลน์กำลังสองพัลส์และบาร์ในระบบ 525 เส้น



รูปที่ 2.4 รูปลักษณะสัญญาณเมื่อตัดดูเลข ไลน์กำลังสองพัลส์และบาร์ในระบบ 625 เส้น



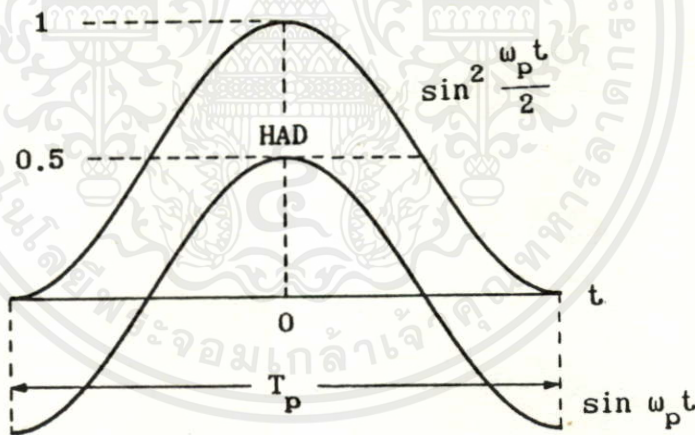
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.5 รูปลักษณะสัญญาณเมื่อตัดดูเลข ไลน์กำลังสองพัลส์และบาร์ในระบบ 525 เส้น

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

2 T Pulse	มี	HAD = 0.25 $\mu$ S
T Pulse	มี	HAD = 0.125 $\mu$ S
1/2 T Pulse	มี	HAD = 0.063 $\mu$ S

การใช้ไซน์กำลังสองพัลส์จำเป็นต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะพิเศษของความถี่ใกล้จุดคัท-ออฟ และพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Bar) ซึ่งเป็นตัวกำหนดย่านความถี่ช่วงต่ำและตรงกลาง ในทางปฏิบัติจะใช้ 2T พัลส์ , T พัลส์ และ 1/2 T พัลส์ เมื่อต้องการตรวจสอบอุปกรณ์โทรทัศน์ขนาดความถี่ 4 MHz เช่นเครื่องบันทึกภาพ (VTR) , อุปกรณ์โทรทัศน์ขนาด 8 MHz และอุปกรณ์โทรทัศน์ที่มีความถี่สูงกว่าตามลำดับ ส่วนสัญญาณสี่เหลี่ยม (Bar) ได้ออกแบบเพื่อให้ตรวจดูได้โดยใช้มอริเตอร์ เมื่อความถี่ช่วงตรงกลางมีการขยายไม่ดีจะเกิดภาพหมัวหรือเป็นริ้วขาว ๆ ดังนั้นสัญญาณสี่เหลี่ยม (Bar) จึงมีประโยชน์มากในการกำหนดคุณลักษณะพิเศษของย่านความถี่ช่วงตรงกลาง



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของไซน์กำลังสองพัลส์

สมการของไซน์กำลังสองพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เขียนได้คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนที่ออกการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $T_p$  เป็นช่วงเวลาความกว้างของพัลส์

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

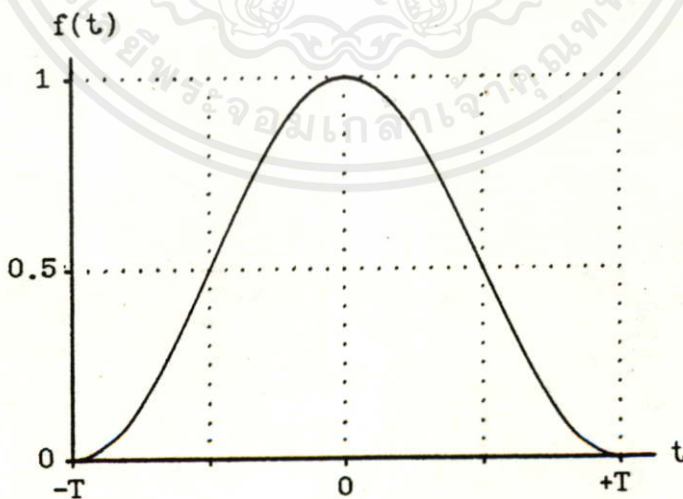
$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} = \frac{2\pi}{2T} = \frac{\pi}{T} \quad \dots(2.12)$$

โดยที่  $f_p = \frac{1}{2T}$

ตัวอย่างเช่นในระบบ NTSC สำหรับ T พัลส์จะมีค่า 0.125  $\mu$ S โดยมีสเปคตรัมกว้าง 8 MHz และ 2T พัลส์จะมีค่า 0.25  $\mu$ S ซึ่งจะมีสเปคตรัมกว้าง 4 MHz ส่วนในระบบ PAL 2T พัลส์จะมีค่า 0.2  $\mu$ S ซึ่งมีความถี่สเปคตรัม 5 MHz แทนค่า  $\omega_p$  จากสมการ (2.12) ลงในสมการ (2.11) จะได้

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

จากสมการ (2.13) สามารถเขียนเป็น ไซน์กำลังสองพัลส์ได้ดังรูปที่ 2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ **รูปที่ 2.7** แสดง ไซน์กำลังสองแบบ T พัลส์ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของไซน์กำลังสองพัลส์ แบบ T, 2T, มีมอดดูเลข 12.5T และมีมอดดูเลข 20T หาได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ฟังก์ชันของไซน์กำลังสองพัลส์แบบ T, 2T, มีมอดดูเลข 12.5T และมีมอดดูเลข 20T

ไซน์กำลังสองพัลส์	คอมโพสิตไซน์กำลังสองพัลส์
<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 ไซน์กำลังสองพัลส์ที่มีสมการคือ

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

โดยที่ A เป็นแอมพลิจูดของพัลส์

T เป็นช่วงเวลาหาแอมพลิจูดเลขหนึ่งของแบบ T พัลส์

ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สิทธิทั้งหมดมีให้โดยพลางนอก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ซึ่งจะได้พีเควินชีสเปคตรัมของแบบ T พัลส์ ดังนี้

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

ในทำนองเดียวกันพีเควินชีสเปคตรัมของพัลส์แบบ 2T คือ

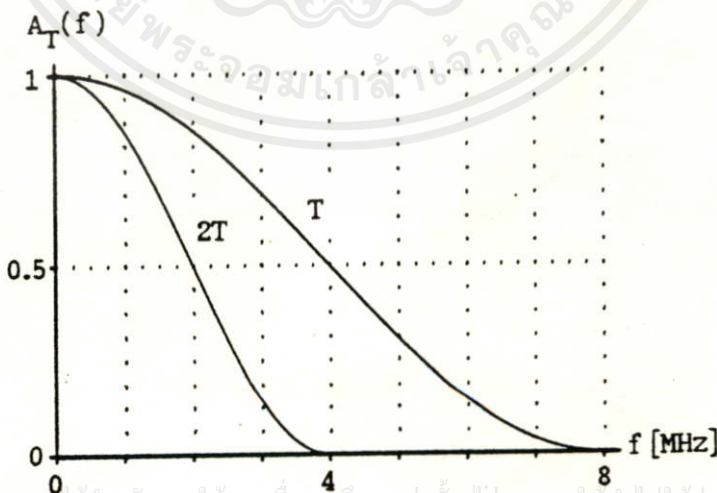
$$A_{2T}(f) = A \cdot 2T \frac{\sin 4\pi fT}{4\pi fT} \left( \frac{1}{1-(4fT)^2} \right) \quad \dots(2.17)$$

พีเควินชีสเปคตรัมตามอุดมคติของแบบ T พัลส์ และ 2T พัลส์ กำหนดได้ดังนี้

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

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

เอ็นวิโลปของพีเควินชีสเปคตรัมของแบบ T พัลส์ และ 2T พัลส์ แสดงดังรูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ทำการฉีกขาดรูปที่ 2.8 พีเควินชีสเปคตรัมตามอุดมคติของ T พัลส์ และ 2T พัลส์ นำไปใช้

พีริเควินซีสเปคตรัมของมอดดูเลข 20T พัลซ์และ 12.5T พัลซ์ ดังจะได้อกล่าวต่อไปนี้  
 มอดดูเลขไซน์กำลังสองพัลซ์ประกอบด้วย สัญญาณในย่านความถี่ต่ำ (สัญญาณที่ยังไม่ได้มอด) และ  
 สัญญาณในย่านความถี่สูง (สัญญาณที่มีมอดแล้ว)  
 สัญญาณในย่านความถี่ต่ำมีสมการคือ

$$v_1(t) = \frac{A}{2} \sin^2 \frac{\pi t}{40T}$$

มีสเปคตรัมดังนี้

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

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

สัญญาณมอดดูเลขไซน์กำลังสองพัลซ์แบบ 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

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

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

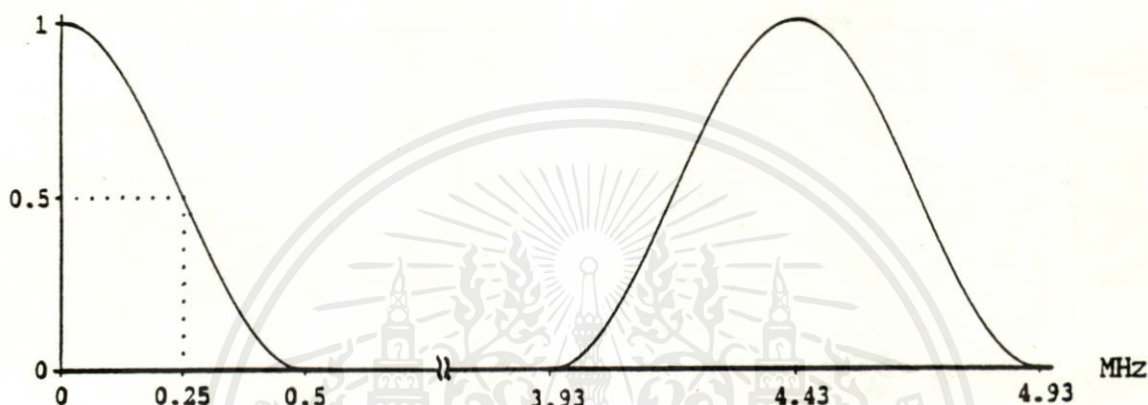
สมการของพีริเควินซีสเปคตรัมอาจเขียนได้ใหม่ดังนี้

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

ในการทำงานเดียวกันพีริเควินซีสเปคตรัมของมอดดูเลขแบบ 12.5T จะได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงนิเทศศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.9 แสดงพีเคเว็นซีสเปคตรัมของมอดดูเลข 20T ไซน์กำลังสองพัลส์

พีเคเว็นซีสเปคตรัมของไซน์กำลังสองพัลส์แบบต่าง ๆ ในกรณีทีคิดเป็นเดซีเบล

ในกรณีของพีเคเว็นซีสเปคตรัมแบบ T พัลส์ Periodic Sequence ของไซน์กำลังสองพัลส์ คือ

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

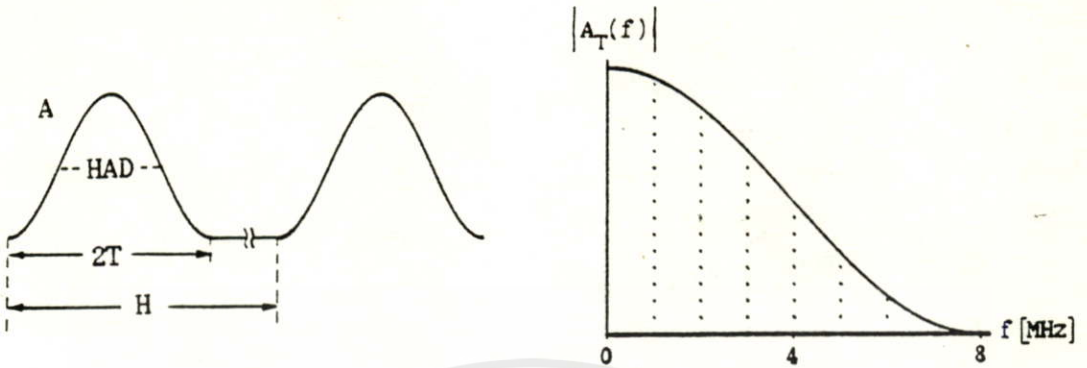
โดยที่ A เป็นขนาดของ T พัลส์

H เป็นช่วงเวลาของเส้นสแกนตามแนวนอนมีขนาดเท่ากับ 64  $\mu$ S

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 Periode Pulse Train ของ T พัลส์ และสเปคตรัม

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

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

อัตราขยาย (dB) จะได้

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

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

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

ในทำนองเดียวกันเอ็นวีโลปของพีเคิร์ฟ์เควินส์สเปคตรัมของ 2T พัลส์เป็น dB หาได้คือ

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

เอกสารนี้เป็น ในการส่งสัญญาณภาพซึ่งมีความถี่ย่านกว้าง 5 MHz พัลส์ทดสอบที่เหมาะสมต้องมีความถี่ 5 MHz จากการทดลองทั่ว ๆ ไป กำหนดพัลส์ในเทอมของฮาล์ฟแอมปริจูดดูเลชั่น (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% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพัลส์ ไซน์กำลังสองมีความไวต่อการทดสอบมากกว่าพัลส์รูปสี่เหลี่ยม

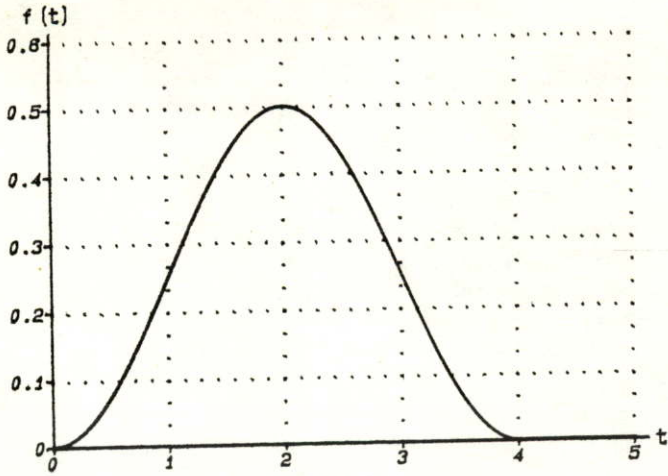
### 2.3 การวัดความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ โดยใช้มอดูเลต ไซน์กำลังสองพัลส์

สัญญาณมอดูเลต ไซน์กำลังสองพัลส์ที่จะใช้เป็นสัญญาณทดสอบประกอบด้วยส่วนที่เป็นความถี่ต่ำหรือสัญญาณลูมินนซ์ ร่วมกับมอดูเลตความถี่ซับแคเรียร์หรือโครมิแนนซ์ [20] การหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณสี (Chrominance Signal) ทั้งอัตราขยาย (Gain) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ A และไทม์ดีเลย์ ( $\tau$ ) โดยผลจากการคำนวณหาความผิดเพี้ยนทั้ง A และ  $\tau$  จะสัมพันธ์กับค่ายอดทั้งสองจากฐานของพัลส์ ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าทราบค่ายอดจากฐานของพัลส์ก็สามารถที่จะหาความผิดเพี้ยนของพัลส์ว่าในระบบทดสอบ (System Under Test) จะมีผลต่อสัญญาณสีทางด้านไหน เช่น ระบบทดสอบอาจมีผลทางด้านความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย (Gain Distortion) อย่างเดียว หรือความผิดเพี้ยนทางด้านไทม์ดีเลย์ (Time Delay Distortion) เพียงอย่างเดียว หรือมีผลของความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยายและไทม์ดีเลย์ ซึ่งในทันทีจะแสดงผลการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนทั้งอัตราขยายและไทม์ดีเลย์ และการแสดงค่าโดยประมาณด้วยค่าที่กำหนดให้ของค่ายอดทั้งสองที่ฐานของพัลส์ และอัตราขยายที่ไม่เท่ากัน (A) และไทม์ดีเลย์ที่สัมพันธ์กัน ( $\tau$ )

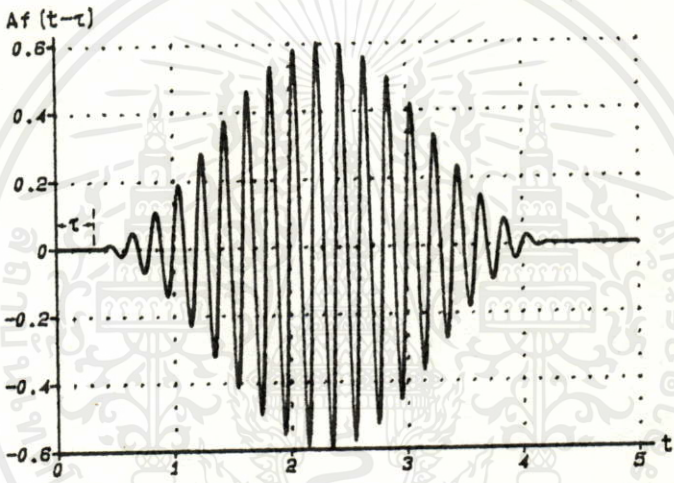
การคำนวณของอัตราขยายและดีเลย์ กำหนดสัญลักษณ์การคำนวณดังต่อไปนี้

- $f(t)$  เป็นเบสแบนด์ฟังก์ชันของ ไซน์กำลังสองพัลส์
- $U(t)$  เป็นเอ็นวีโวลต์ด้านบนของ ไซน์กำลังสองพัลส์
- $L(t)$  เป็นเอ็นวีโวลต์ด้านล่างของ ไซน์กำลังสองพัลส์
- $Y_1$  และ  $Y_2$  เป็นขนาดของเบสไลน์ด้านล่างของ ไซน์กำลังสองพัลส์
- A เป็นอัตราขยายของมอดูเลต ไซน์กำลังสองพัลส์ที่สัมพันธ์กัน ระหว่างระดับของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อระดับของสัญญาณลูมินนซ์
- $\tau$  เป็นความผิดเพี้ยนของไทม์ดีเลย์ คือ ส่วนของสัญญาณโครมิแนนซ์ถูกหน่วงเข้าไป หรือ

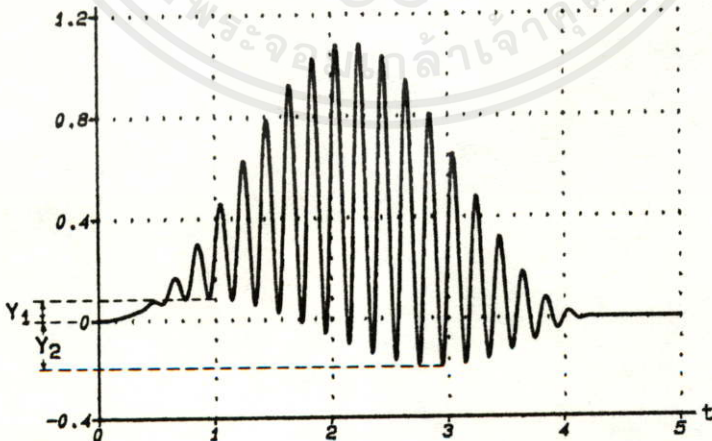
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 นำหน้าสัญญาณลูมินนซ์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไซน์กำลังสองพัลซที่ยังไม่ถูกมอด



(ข) ไซน์กำลังสองที่ถูกมอดแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (ค) สัญญาณรวม ไซน์กำลังสองพัลซ (ก)+(ข) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 2.11 รูปแบบของความผิดเพี้ยนทั้งขนาดและถี่เสียงรั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งจะได้อ

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

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  $\tau$  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  $Y_a$  หมายความว่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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) อัตราการขยายของมีอดดูละอ์ไซน์ก้ำลิ่งสองพัลส์ 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 อินอ์ควอลิตี้ (Delay Inequality) จากค่ายอดทั้งค้ำบวกและค้ำลบของ  $Y_1$  และ  $Y_2$  ตามล้ำดับ โดยให้

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

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

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

ค่ายอดทั้งสองที่เกิดการการผิดเพี้ยนของเอ็นวีไลบ์ด้านล่างจากฐานของพัลส์  $Y_1$  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

การผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว ในกรณีนี้แสดงว่าค่ายอด  $Y_1$  และ  $Y_2$  ค่าใดค่าหนึ่งมีค่าเป็น 0 ดังนั้นจะไม่มี ความผิดเพี้ยนทางดีเลย์เกิดขึ้นก็คือ  $\tau = 0$  เพราะฉะนั้นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจึงมีแต่ความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นจริงได้ ดังนี้

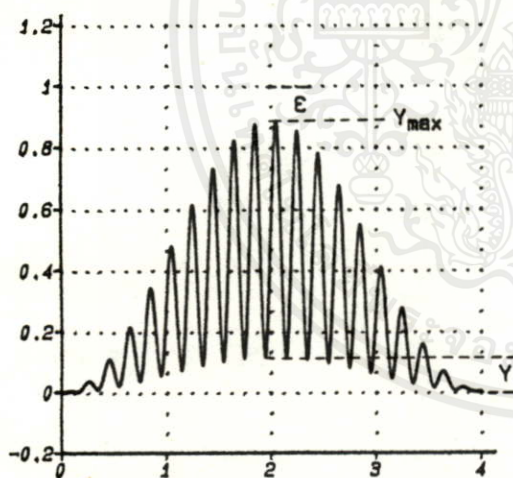
เมื่อ  $Y_1$  หรือ  $Y_2$  มีค่าเป็น 0 สมการ (2.36) จะกลายเป็น

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

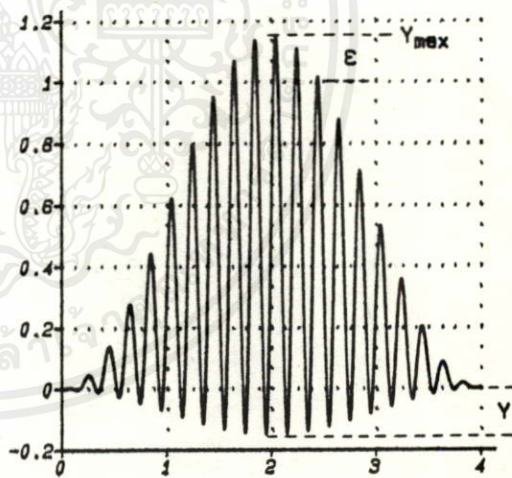
และสมการ (2.35) จะกลายเป็น

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

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



(ก) อัตราการขยายต่ำ  $A \approx \frac{1-y}{1+y}$



(ข) อัตราการขยายสูง  $A \approx \frac{1+y}{1-y}$

รูปที่ 2.12 แสดงความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว

ความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย ( $\epsilon$ ) พิจารณาจากสมการ (2.38) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดี่ยว ในกรณี  $Y_1 = -Y_2$  ซึ่งฐานของพัลซมีรูปร่างเป็นคลื่นไซน์ที่มอดูเลชันเท่ากัน 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

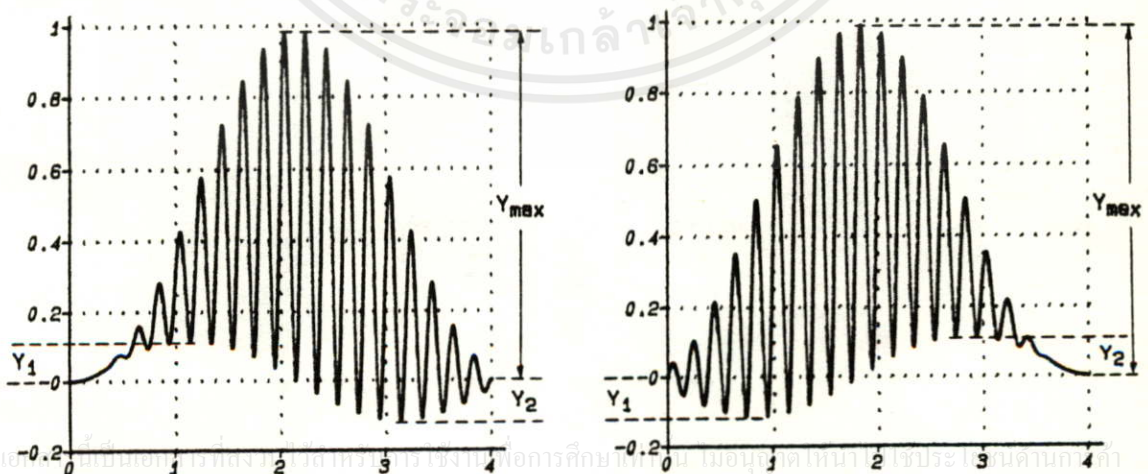
$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{8(Y/Y_{max})^2}{[1 + (Y/Y_{max})^2]^2} \right) \quad \dots(2.40)$$

โดยอาศัยสูตรทางตรีโกณมิติสมการ (2.40) จะได้เป็น

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

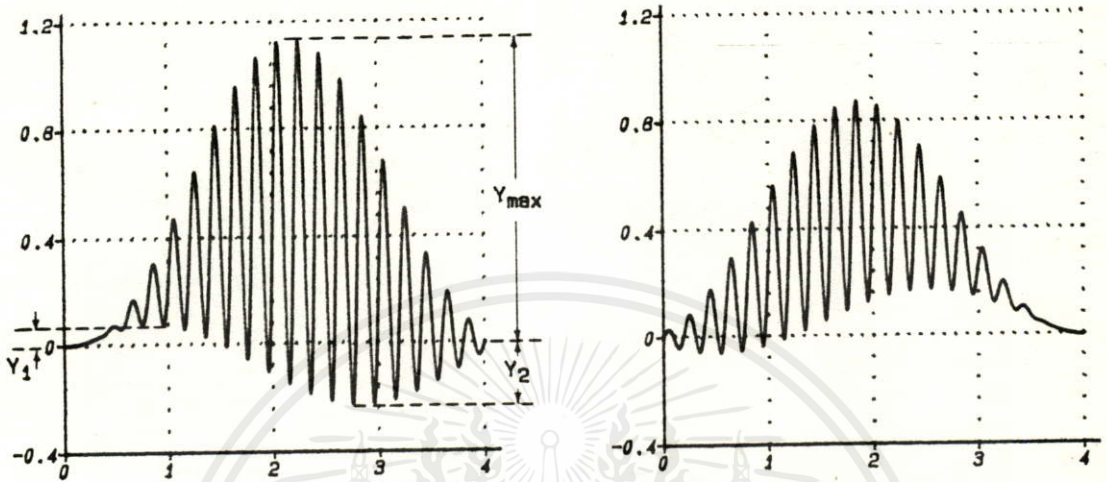
$$\tau = \frac{4T_0}{\pi} \tan^{-1} \frac{Y}{Y_{max}} \quad \dots(2.41)$$

ในกรณีที่เกิดการผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์ สามารถสังเกตฐานของพัลซจะเป็นลักษณะของไซน์ (Sine) หรือโคไซน์ (Cosine) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 2.13 แสดงการผิดเพี้ยนของดีเลย์เพียงอย่างเดียวที่มีการนำไปใช้

กรณีที่เกิดการผิดเฟสทางอัตราขยายและดีเลย์พร้อมกัน ในกรณีที่เกิดความผิดเฟสทั้งแบบ ค่ายอดทั้งบวกและลบมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความผิดเฟสทางอัตราขยายและดีเลย์พร้อมกัน

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

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

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

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

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

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

ความผิดเฟสทางอัตราขยายคำนวณด้วยสมการ (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 ดิสทริบิวท์อาชี

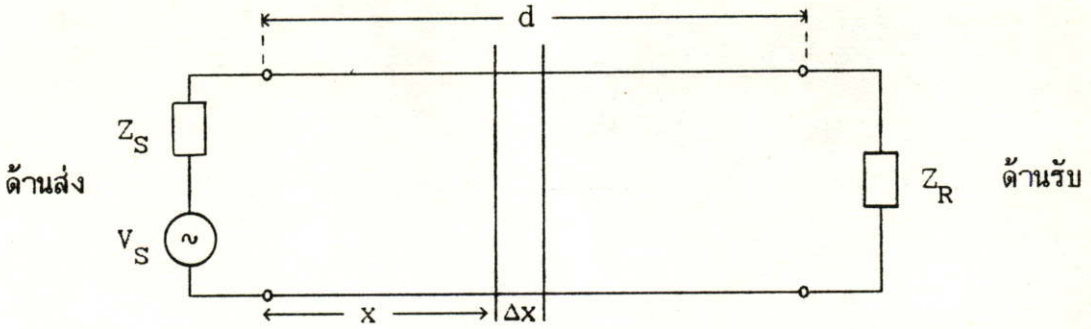
เทคโนโลยีสมัยใหม่ไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการออกแบบวงจร โดยใช้ลัมดอลิเมนต์ (Lumped Element) แบบพาสซีฟ (Passive) หรือแบบแอคทีฟ (Active) เท่านั้น แต่ยังนำไปใช้ในการออกแบบวงจรที่มีส่วนประกอบเป็นดิสทริบิวท์อาชี (Distributed RC)[11,12,14] โดยใช้เทคโนโลยี Thick-Film หรือ Thin-Film ในการผลิตไอซี(Integrated Circuit) เน็ทเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชียังมีคุณลักษณะทั่ว ๆ ไปที่ดีกว่า และมีขนาดเล็กกว่าเน็ทเวิร์กแบบลัมดอลิเมนต์ ซึ่งทำให้การออกแบบวงจรเน็ทเวิร์กดิสทริบิวท์อาชีสามารถจะนำไปใช้ได้ง่ายและถูกต้องตามหลักเศรษฐศาสตร์

เน็ทเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชีมีด้วยกันหลายแบบ ตัวอย่างเช่นอาจจะเป็นโครงสร้าง Thin-Film แบบ Multi-Layer ที่มีชั้นของตัวนำ (Conductor) , ความต้านทาน (Resistive) และฉนวน (Dielectrics) ประกอบติดเข้าด้วยกัน โดยชั้นของความต้านทานและตัวนำอาจจะมีจุดต่อออกมาหลายจุดที่ขอบทางด้านข้าง ดิสทริบิวท์อาชีอาจจะอยู่ในรูปแบบที่เป็น Multi-Contacted P-N Junction ซึ่งตัวความต้านทานจะใช้ส่วนประกอบของเซมิคอนดัคเตอร์ และตัวเก็บประจุจะใช้ผลของไบแอสที่จังก์ชัน สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของดิสทริบิวท์อาชีใช้หลักการเดียวกันกับของสายส่ง (Transmission Line) พร้อมทั้งเปรียบเทียบโครงสร้างและพารามิเตอร์ระหว่างเน็ทเวิร์กแบบลัมดอลิเมนต์และแบบดิสทริบิวท์

#### 3.1 สายส่ง (Transmission Lines)

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

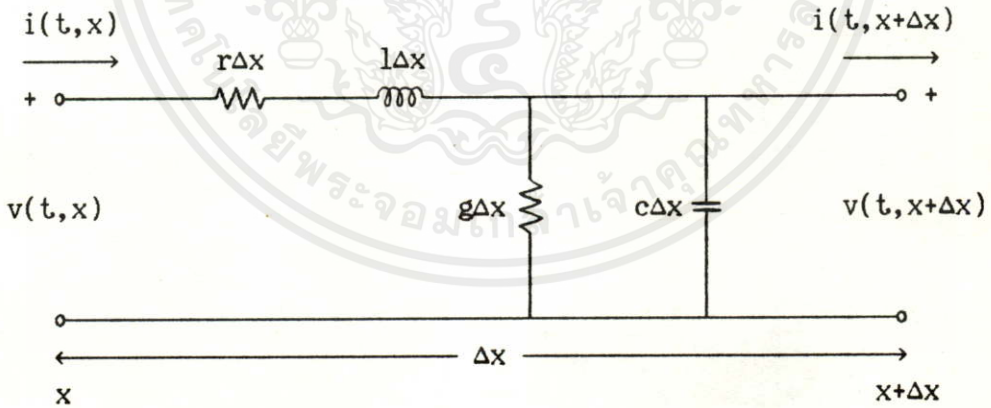
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 สายส่งสัญญาณ

เมื่อขยาย  $\Delta x$  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  $\Delta x$  ในสายส่ง

จากรูปที่ 3.2 โดยใช้กฎแรงดันและกระแสของ Kirchhoff's สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (เอกสารนี้) ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

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

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

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

โดยการนำ 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  $\partial x$  แล้วจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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  $\Gamma$  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

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

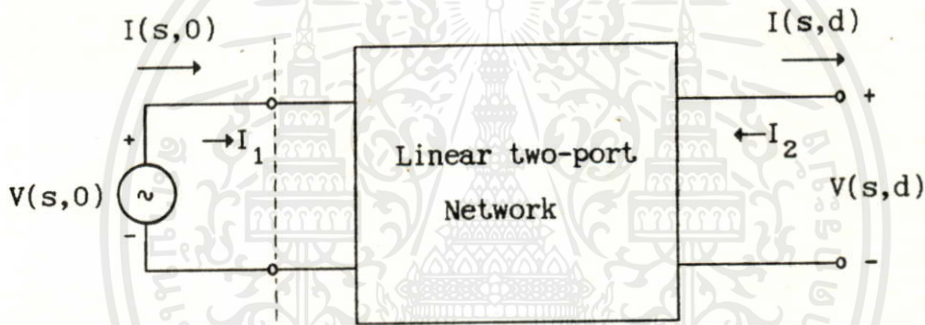
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ใช้ผลของเอกสารนี้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $Z_0$  เป็นคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance) ของ Uniform Line

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

ฉะนั้นอินพุตและเอาต์พุตพอร์ทของสายส่งที่ได้จากสมการ (3.15) ถึงสมการ (3.22) สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 3.3

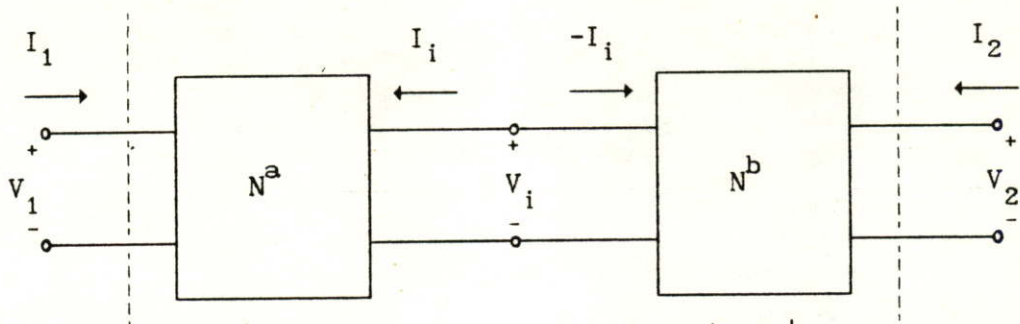


รูปที่ 3.3 แสดงอินพุตและเอาต์พุตพอร์ทของสายส่ง

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงการคาส์เคดของเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.3

ถ้านำเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.3 สองชุดมาคาส์เคดกันดังในรูปที่ 3.4 ผลรวมทั้งหมดจะได้เป็นสมการ ABCD แมทริกซ์ คือ

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

เมื่อ

$$A = A^a A^b + B^a C^b \quad B = A^a B^b + B^a D^b$$

$$C = C^a A^b + D^a C^b \quad D = C^a B^b + D^a D^b$$

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

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

ในทำนองเดียวกัน โดยการแปลงค่าพารามิเตอร์ของแมทริกซ์ไปเป็นพารามิเตอร์ของ Open-Circuit Impedance และพารามิเตอร์ของ Short-Circuit Admittance จะได้ดังนี้

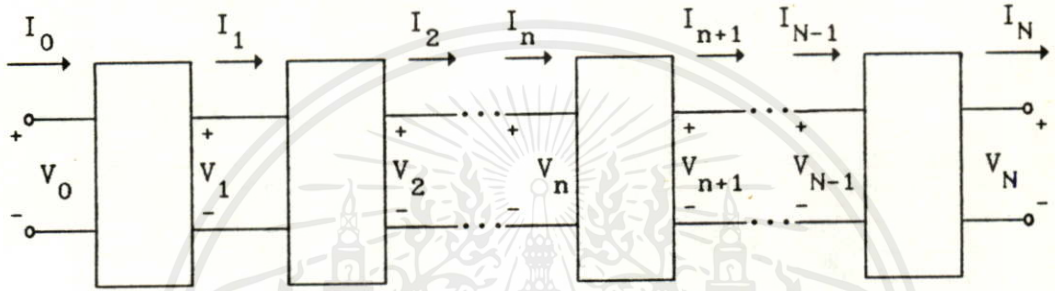
$$[Z] = Z_0 \begin{pmatrix} \coth \Gamma d & \operatorname{csch} \Gamma d \\ \operatorname{csch} \Gamma d & \coth \Gamma d \end{pmatrix} \quad \dots(3.26)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนับสนุนการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องแจ้งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 โครงสร้างของลัมด์พารามิเตอร์

การประมาณโครงสร้างแบบลัมด์ (Lumped) เทียบกับโครงสร้างแบบดิสทริบิวท์ (Distributed) จะต้องใช้เน็ตเวิร์กแบบ 2 พอร์ตที่เหมือนกันจำนวนหลายชุดประกอบเข้าด้วยกันดังในรูปที่ 3.5 โดยที่แต่ละชุดต้องมีขนาดเล็กและมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับ 1 หน่วยความยาว จำนวนชุดของลัมด์ที่พอเพียงที่จะแสดงคุณสมบัติของดิสทริบิวท์เน็ตเวิร์กขึ้นอยู่กับความถี่ตรงที่เราต้องการ และช่วงความถี่ที่ใช้ในเทอม Time Constant ของสาย ถ้าเป็นไปได้เราจะต้องใช้จำนวนชุดของลัมด์ให้มีจำนวนเข้าใกล้ Infinity จึงจะได้โครงสร้างแบบดิสทริบิวท์



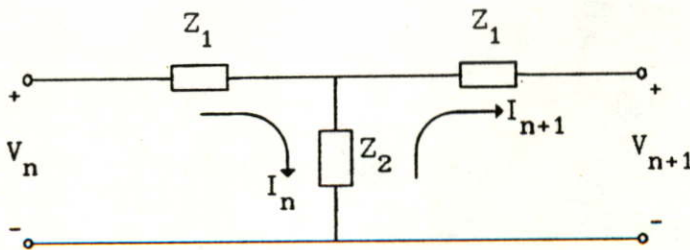
รูปที่ 3.5 2-Port Network Model

สำหรับสายส่งแบบ Uniform ที่มีความยาวจำกัดสามารถประมาณโดยใช้โครงสร้างของลัมด์แบบ 2 พอร์ตจำนวนหลาย ๆ ชุด ดังในรูปที่ 3.5 ในส่วนหนึ่งของสายโดยให้มีโครงสร้างแบบ T ซึ่งเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สมมติสถานะเริ่มต้นให้เท่ากับศูนย์ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด จากสมการ (3.28), (3.29) สามารถเขียนได้ใหม่ในรูป Recurrence Form คือ

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

สมการ (3.30) สามารถเขียนในรูปแบบแมทริกซ์ได้คือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ดังนั้นสมการ (3.34) จะได้

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

แรงดันและกระแสในชุดที่ n สำหรับกรณีจุดต่อ Open Circuit และ Short circuit สามารถหาได้ดังนี้

สำหรับกรณีเอาที่พหุลดวงจรได้  $V_N = 0$  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

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

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

สำหรับกรณีเอาที่พหวงจรเปิดได้  $I_N = 0$  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 ของเน็ทเวิร์กแบบ 2 พอร์ต ผลรวมทั้งหมดสำหรับแมทริกซ์ของเน็ทเวิร์กแบบ 2 พอร์ต ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 ที่ชุดที่ N โดยการแทน n ด้วย N และเปลี่ยนเครื่องหมายเพื่อให้เหมือนกับเครื่องหมายพอร์ททั้งสองในรูปที่ 3.3 จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามเผยแพร่สิ่งนี้หากและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

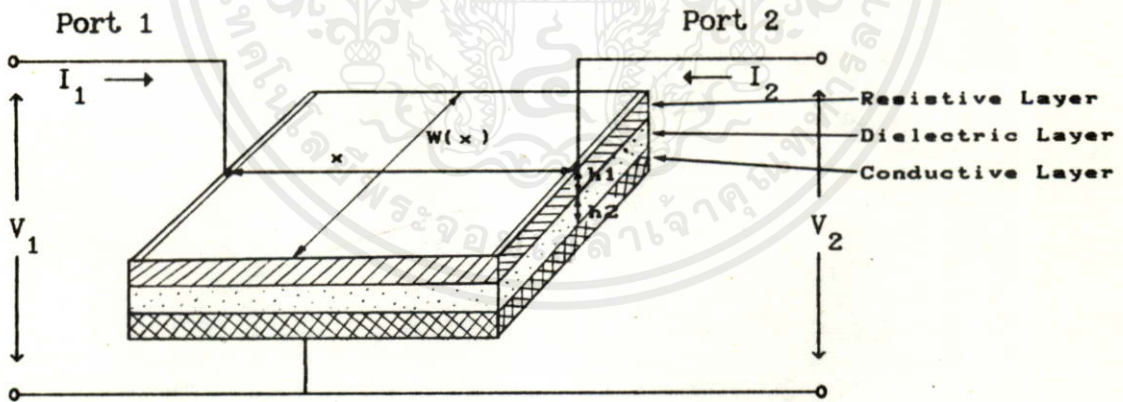
จากสมการ (3.53) ถ้าแปลงแมทริกซ์เป็นพารามิเตอร์ของ Short-Circuit Admittance ซึ่งจะได้

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

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

### 3.3 โครงสร้างของดิสทริบิวท์อาชี

เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์อาชีสามารถทำให้อยู่ภายในไอซี (Passive Integrated Circuit) [11,13] โดยมี 2 พอร์ตและมีโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบด้วยชั้นจากส่วนต่าง 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



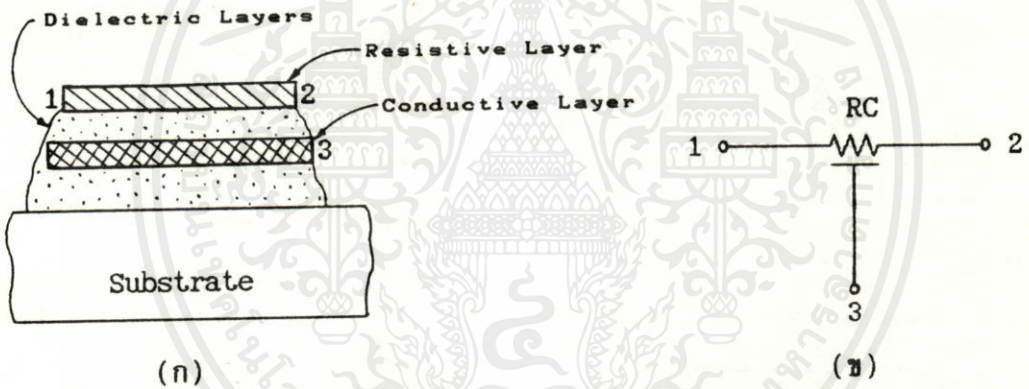
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของ 2 พอร์ต Distributed RC

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

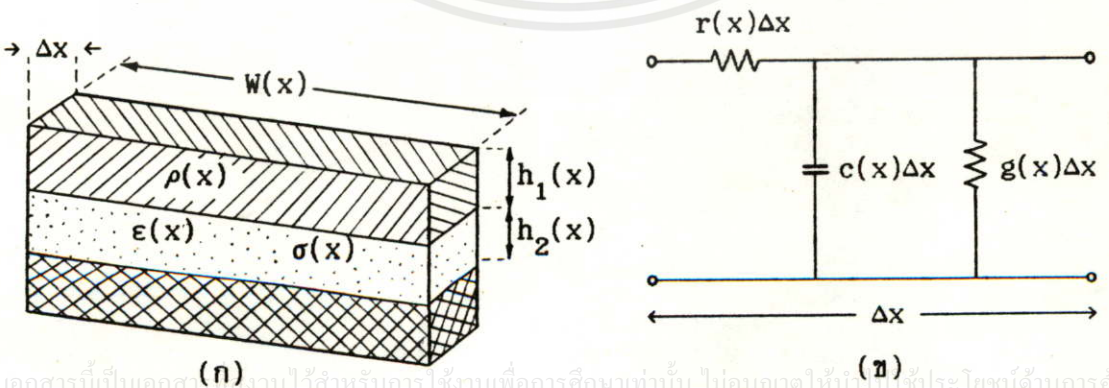
Passive Substrate ด้วยวิธี Vaporization หรือ Electrochemical Technique

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

Microcircuit จะถูกนำมาใช้สำหรับ Distributed RC Active Network การทำงานทางไฟฟ้าจากโครงสร้างขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัตถุและรูปทรงทางเรขาคณิต 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  $\Delta x$  ของ Distributed RC

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

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

เมื่อ  $\rho$  และ  $h_1$  คือความต้านทานจำเพาะและความหนาของแผ่นความต้านทานที่  $x$  และ  $W$  คือ ความกว้างของอิลิเมนต์ที่  $x$

ส่วน Shunt Admittance ของอิลิเมนต์ที่สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกัน มันประกอบด้วยค่าประจุและความนำของแผ่น Dielectric ของอิลิเมนต์นั้นคือ

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

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

เมื่อ  $\epsilon$  และ  $\sigma$  คือ Permittivity และ Conductivity ของแผ่น Dielectric และ  $h_2$  คือความหนาของแผ่น Dielectric ที่  $x$

ถ้าให้มิติของ  $\Delta x$  เข้าใกล้ศูนย์ ค่าความต้านทาน, ค่าประจุ และความนำ ต่อหน่วยความยาวจะได้

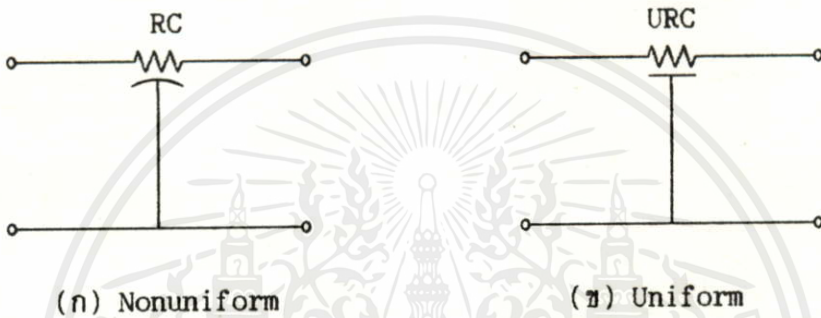
$$r(x) = \frac{\rho}{W h_1} \dots(3.58)$$

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

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

ค่าของ  $r(x)$ ,  $c(x)$  และ  $g(x)$  จะเป็นจำนวนจริง (Real) มีเครื่องหมายเป็นบวกและมีค่าจำกัด (finite) ข้อกำหนดนี้มีความสำคัญในการพิจารณาถึงธรรมชาติของผลลัพธ์สำหรับสมการ Differential ซึ่งแสดงคุณสมบัติที่ได้จากเน็ตเวิร์ก 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  $g$  ที่ทิ้งได้คือให้  $g$  มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะได้เน็ตเวิร์กแบบดิสทริบิวท์ถ้าซี 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 ถ้าเส้นใต้  $R$  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

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

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

เอกสารนี้เป็น โดยการแทนค่าสมการ (3.61) และ (3.62) ลงในสมการ (3.63) และ (3.64) แล้วจัดสมการใหม่ โดยพิจารณาเทอมต่าง ๆ ในรูปของแรงดันและกระแสจะได้ที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 4

## การออกแบบวงจรแอกทีฟที่ผลิตทวีต้อาซี

การสังเคราะห์วงจรแอกทีฟ (Active) จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน โดยทั่วไปจะใช้ออปแอมป์ร่วมกับพาสซีฟอีลิเมนต์ R กับ C เราเรียกวงจรดังกล่าวนี้ว่าแอกทีฟอาซี เมื่อเปรียบเทียบกับ การสังเคราะห์วงจรพาสซีฟ (Passive) ซึ่งใช้อิเล็กเมนต์ R, C และ L แล้ว จะเห็นได้ว่า วงจรแอกทีฟอาซีมีข้อดีที่ว่า มีน้ำหนักน้อย ไม่ต้องการพื้นที่มาก และสามารถทำเป็นรูปแบบย่อเล็ก ๆ โดยอาศัยเทคโนโลยีของ Integrated Circuit เมื่อทำเป็น Mass-Product แล้วราคาก็ไม่แพงมีขนาดเล็กกะทัดรัด ซึ่งวงจรที่มี Inductor (L) ยังต้องทำเป็น Discrete Component ที่ราคายังแพง เมื่อใช้แอกทีฟอาซี เช่น วงจรแบบ Sallen and Key [10] ในการสร้าง วงจรกรองความถี่ ถ้าหากนำไปผลิตเป็น ไอซีแบบ LSI ที่มีขนาดเล็ก ผลของ Parasitic Capacitors [5] ระหว่างตัวความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) กับ Substrate ของไอซีอาจมีผลทำให้คุณลักษณะของวงจรเปลี่ยนแปลงไป จากที่กล่าวมาแล้วในบทนี้จะเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองความถี่ และวงจรอควอไลเซอร์ โดยใช้ออปแอมป์ร่วมกับยูนิฟอร์มดิสทริบิวต์อาซี 2 ตัว ซึ่งเรียกวงจรแบบนี้ว่า วงจรแอกทีฟที่ผลิตทวีต้อาซี (Active Distributed RC) โดยวงจรที่ออกแบบได้นอกจากจะมีข้อดีเหมือนวงจรแอกทีฟอาซีแล้ว ยังมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่สามารถผลิตขึ้นตามกรรมวิธีผลิต LSI ที่มีขนาดเล็กโดยที่ค่า Parasitic Capacitors ระหว่างตัวยูนิฟอร์มดิสทริบิวต์อาซีกับ Substrate ของไอซีจะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้ได้ในช่วงความถี่สูง นอกจากนั้นวงจรแอกทีฟที่ผลิตทวีต้อาซีที่ออกแบบได้นี้ยังมีค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  ซึ่งสามารถกำหนดค่าของผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้ พร้อมทั้งพิจารณาหาค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ในวงจรและช่วงเสถียรภาพของวงจรที่ออกแบบได้

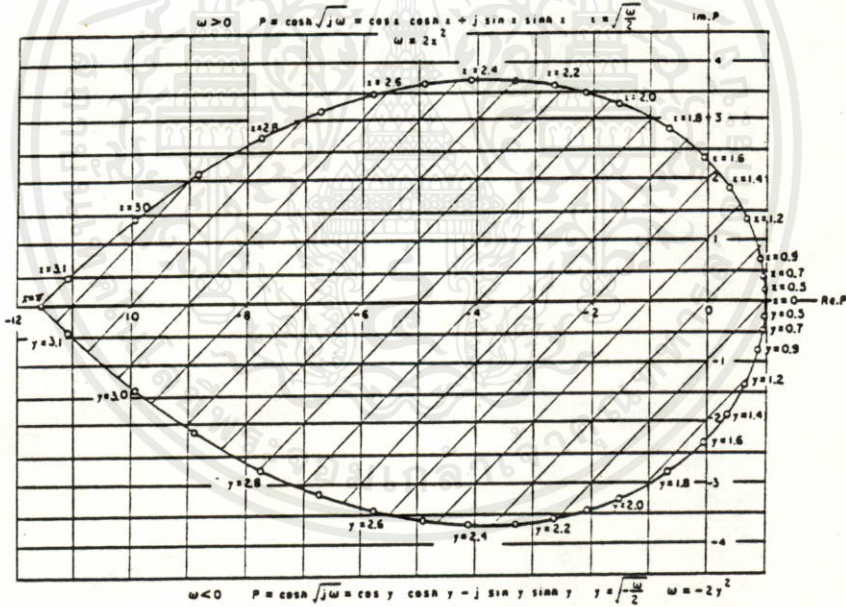
### 4.1 เสถียรภาพของระบบ

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

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

เมื่อ  $N(P)$  และ  $D(P)$  เป็นโพลิโนเมียลของตัวเศษ และโพลิโนเมียลของตัวส่วนตามลำดับ ซึ่งอยู่ในรูปของ P-Plane

ฉะนั้นโดยการแปลงทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.1) ให้เป็นฟังก์ชันของ P เสถียรภาพของระบบจะสามารถหาได้จาก Root-Locus ใน P-Plane ข้อกำหนดในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบคือต้องมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในรูปของ  $P = \cosh \sqrt{SRC}$  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

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

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

โดยให้  $RC = 1$  และหา Root-Locus ในสมการ (4.2) เมื่อเปลี่ยนค่า  $\omega$  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) ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.2) เมื่อแปลงให้อยู่ใน S-Plane จะเป็นในรูป Parabolic Locus [9] คุณลักษณะของวงจรถูกจะเสถียรภาพใน S-Plane นั้น ราก (Dominant Poles) ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันจะต้องอยู่ในครึ่งซ้ายของ S-Plane การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรถูก Active Distributed RC ใน S-Plane จะต้องทำการแปลงทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันให้อยู่ใน S-Plane [8] จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (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

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

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 และสำหรับกรณีที่มี  $-1 \leq M \leq 11.59$  จะทำให้ค่ารากอยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-Plane ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.1 จะอยู่ภายใน Region ของ P-Plane โดยที่เมื่อ M อยู่ในช่วง 1 ถึง 11.59 จะได้  $-M + \sqrt{M^2 - 1}$  เป็นจำนวนจริงที่มีเครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งที่นั่น  $\angle -M + \sqrt{M^2 - 1} = -\pi$  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  $\angle -M + \sqrt{M^2 - 1} = \tan^{-1} \frac{-\sqrt{1 - M^2}}{M} = \cos^{-1} M$  ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ของค่ารากที่ได้เป็นจำนวนจริง

### 4.2 ความไวของอุปกรณ์ (Sensitivity)

การออกแบบวงจรใด ๆ จะต้องพิจารณาถึงค่าอิลิเมนต์แต่ละตัว เพราะค่าอิลิเมนต์ที่ใช้งานจริง ๆ แล้วจะไม่มีค่าตรงตามอุดมคติ ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากผลรวมของความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์ที่เกิดจากกรรมวิธีในการผลิตเอง และคุณลักษณะทางโครงสร้างของอิลิเมนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น อุณหภูมิของห้อง , ความชื้น , ความเข้มของแสงสว่าง และ อายุการใช้งานของอุปกรณ์ เหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของอิลิเมนต์ต่าง ๆ ภายในวงจรที่อาจเปลี่ยนแปลงไม่ตรงตามที่คำนวณ

เซ็นซิวิตีเป็นค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่เอาท์พุทของวงจรซึ่งเป็นผลมาจากการแปรผันของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวต้านทาน (Resistor), ค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) , ค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor) , ค่าอัตราขยายของทรานซิสเตอร์ และค่าอัตราขยายของออปแอมป์ (Operation Amplifier) ซึ่งแน่นอนว่าวงจรที่มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของเซ็นซิวิตีมากจะมีการแปรผันของพารามิเตอร์ภายในวงจรมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองทางด้านเอาท์พุทเกิดความผิดเพี้ยนได้ง่าย ฉะนั้น โครงสร้างของวงจรที่ดีจึงควรมีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์แต่ละตัวต่ำ จะทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและยังไม่ต้องเลือกใช้ค่าของอุปกรณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงมากเกินความจำเป็น ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

การหาเซ็นซิวิตีในวงจร [16] หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้

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

เอกสารนี้ เมื่อ  $x_i$  แทนค่าของอิลิเมนต์แต่ละตัวในวงจรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ถ้าแทน  $s$  ด้วย  $j\omega$  ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน  $T(s)$  จะได้อิงถึงค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แทนค่าสมการ (4.8) ลงในสมการ (4.7) ค่าฟังก์ชันของเซ็นซิวิตี 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) จะเป็นฟังก์ชันในการหาเซ็นซิวิตีของ 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  $N(s)$  เป็นโพลิโนเมียลเศษของ  $T(s)$

$D(s)$  เป็นโพลิโนเมียลส่วนของ  $T(s)$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

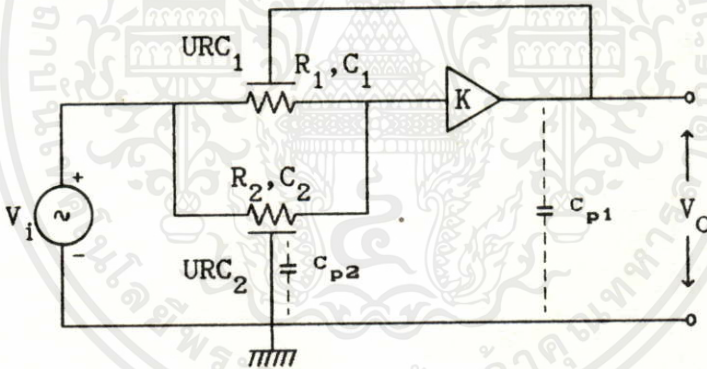
4.3 การออกแบบวงจรของความถี่แบบแอกทีฟที่ผลิตทวีวีทอาซี

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

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

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

ในการออกแบบวงจรของความถี่เราจะใช้ Op-Amp หรือตัว Amplifier อื่น ๆ เช่น Video Amp จำนวน 1 ตัว ร่วมกับ Uniform Distributed RC จำนวน 2 ตัว โดยในบทนี้จะเสนอวงจรของความถี่ต่ำ 4 แบบ และวงจรของความถี่สูง 4 แบบ โดยวงจรของความถี่ต่ำในแบบแรกสามารถเขียนเป็นวงจรได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรของความถี่ต่ำแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีวีทอาซีแบบที่ 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

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

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) จะได้  
ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำดังสมการ (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

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

วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีตามในรูปที่ 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  $C_{p1}$  จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน  $C_{p2}$  จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics)

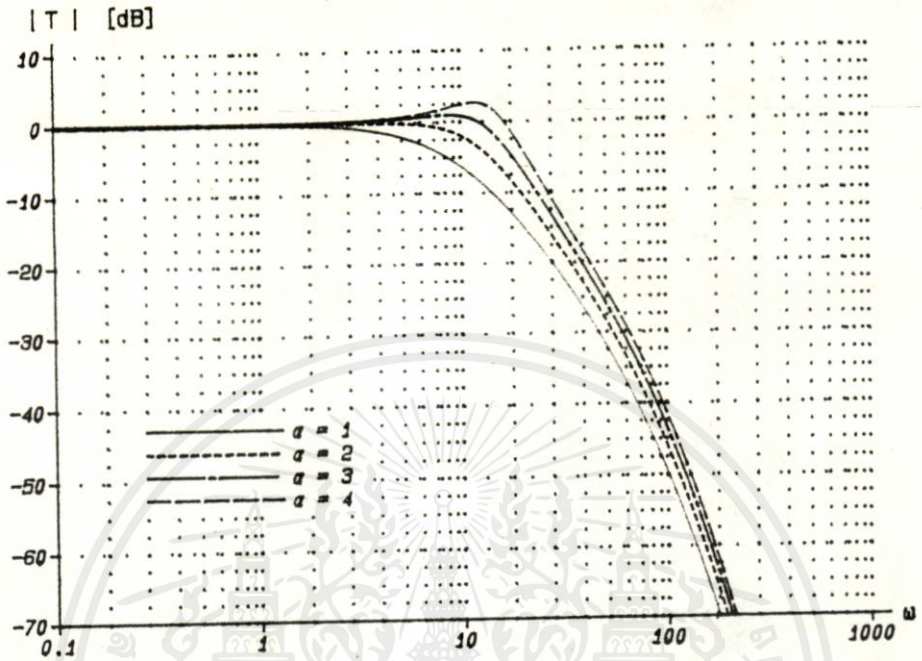
ผลตอบสนองทางความถี่ของสมการ (4.17) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

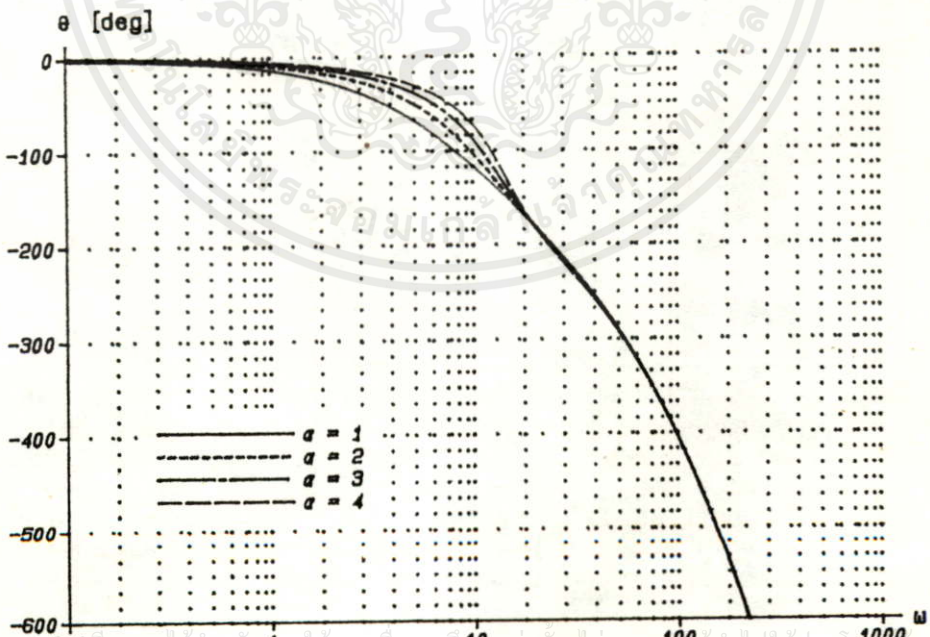
$$\text{โดยที่ } P = \sqrt{j\omega RC} \Big|_{RC=1} = \sqrt{\frac{\omega}{2}} + j \sqrt{\frac{\omega}{2}} = t + jt \quad \text{เมื่อ } t = \sqrt{\frac{\omega}{2}}$$

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

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  $\alpha$  จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนไป คือ



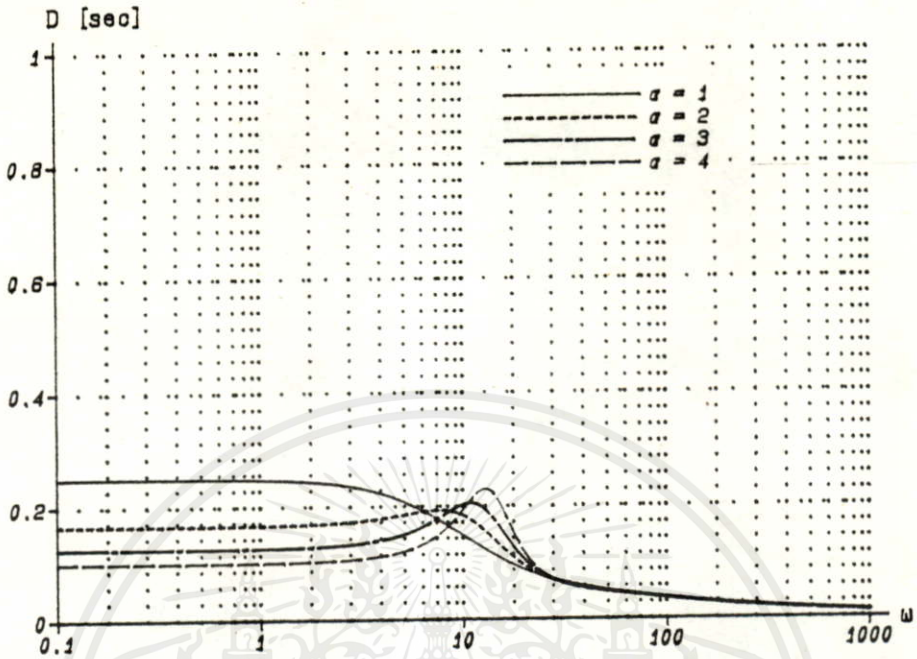
รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองของกรุปดีเลย์

เมื่อค่า  $\alpha$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดที่ขึ้นในย่านคัทออฟ (Cut-off) และเมื่อ  $\alpha$  มีค่ามากกว่า 2 จะทำให้ในช่วงความถี่ผ่าน (Passband) เกิด Ripple ซึ่งคล้าย Chebyshev หรือ Ultraspherical ฟิลเตอร์ [3] จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.17) เมื่อนำไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่  $\alpha$  มีค่าต่ำค่าผลตอบสนองของกรุปดีเลย์จะมีลักษณะราบเรียบ

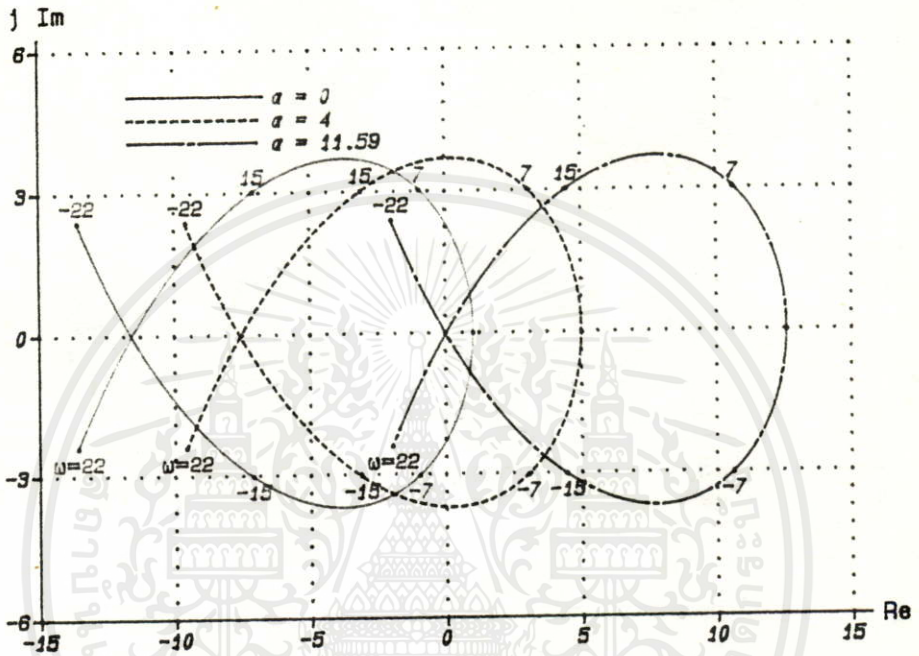
คุณลักษณะของวงจรที่เสถียรภาพเนืกรากของตัวส่วน (Denominator) ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันจะต้องอยู่ในครึ่งซ้ายของ S-Plane จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.17) เราสามารถหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีในควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram)[7,11] โดยการกำหนด

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

เมื่อ  $D(P)$  เป็นโพลีโนเมียลของตัวส่วน

โดยที่ระบบจะเสถียรภาพเมื่อจุดศูนย์กลาง (Origin) ใน  $D(P)$ -Plane ถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางของไนควิสต์พล็อต จากรูปที่ 4.6 แสดงในควิสต์ไดอะแกรมของสมการ (4.17) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่  $\alpha$  มีค่ามากกว่า 11.59 เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอก

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



รูปที่ 4.6 แสดง โนควิสต์ โดอะแกรม

ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถ่าง ๆ นั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งขึ้นอยู่กับอุปกรณ์  
 ต่าง ๆ ที่ใช้เมื่อค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์มีค่าสูงจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความ  
 คลาดเคลื่อนน้อย และนั่นวงจรที่แท้จริงควรมีค่าความไวของอุปกรณ์ต่ำ จากวงจรรูปที่ 4.2 เรา  
 สามารถหาค่าความไวของอิมพีแดนซ์ [4, 12] แต่ละตัว  $R_1, C_1, R_2, C_2$  โดยกำหนดให้อัตราขยาย  
 K มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.15) จะได้

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

จากฟังก์ชันหาเซ่นชีวิตัวในสมการ (4.13) โดยการแทน  $X_1$  ด้วย  $R_1$  และนั่นจากสมการ(4.21)  
 จะได้ ณีโคจทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$S_{R1}^{\tau(s)} = - \frac{1}{2} \left( \frac{P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P + 1)}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.23)$$

ส่วนค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์  $C_1, R_2, C_2$  ก็สามารถหาได้ในกรณีเดียวกัน ซึ่งจากสมการ(4.21) จะได้

$$S_{C1}^{\tau(s)} = - \frac{1}{2} \left( \frac{P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\cosh P (P \coth P - 1)}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.24)$$

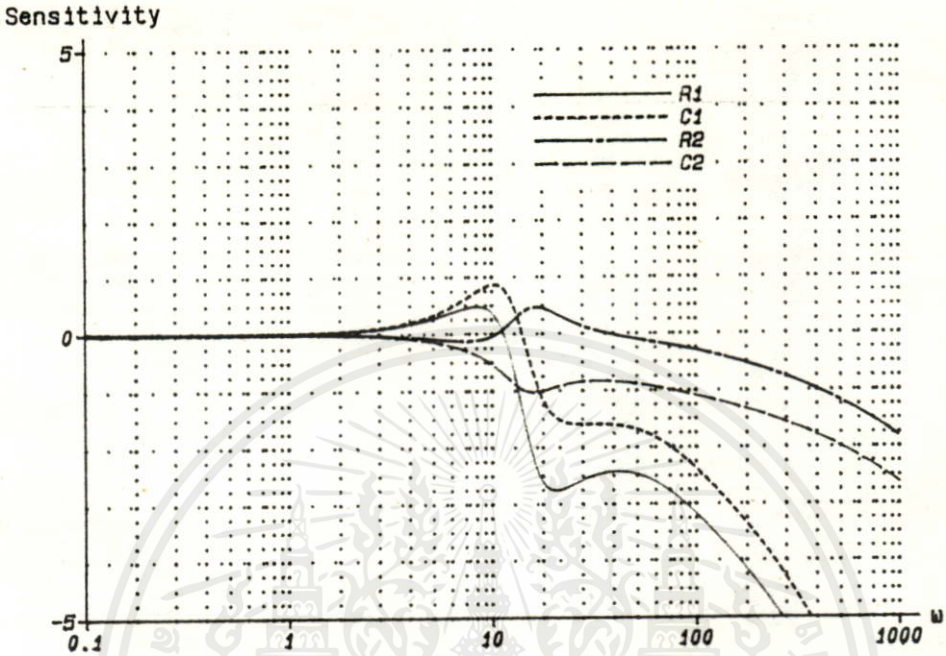
$$S_{R2}^{\tau(s)} = - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha P \coth P - 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P - \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.25)$$

$$S_{C2}^{\tau(s)} = - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha P \coth P + 1}{\alpha + 1} - \frac{\alpha P \coth P + P \sinh P + \cosh P}{\alpha + \cosh P} \right) \quad \dots(4.26)$$

จากสมการ (4.23) - (4.26) ถ้าสมมติให้  $\alpha = 4$  จะได้ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  แสดงดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ต่ำย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตี้ที่ได้จะมีค่าต่ำ โดยที่  $\omega = 0$  ค่าเซ็นซิวิตี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตี้ของ  $R_2, C_2$  จะมีค่าต่ำกว่าของ  $R_1, C_1$

ค่าเซ็นซิวิตี้ของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K สามารถหาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.16) โดยการแทนค่า  $X_1$  ด้วย K ในสมการ (4.13) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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

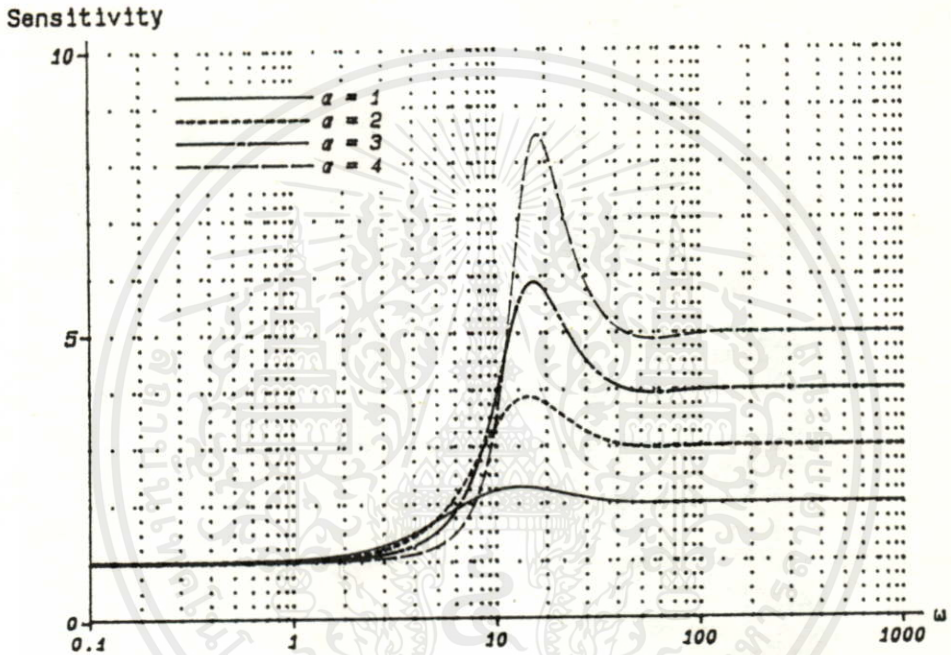
ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $K$  ที่  $\omega = 0$  จะได้  $\cosh P = 1$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ (4.28) จะได้

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

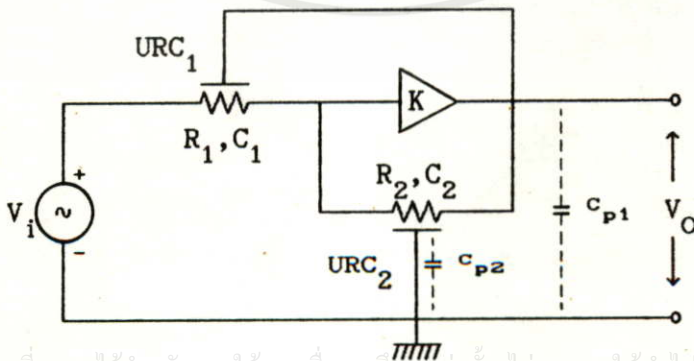
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ศึกษาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และที่  $\omega = \infty$  จะได้

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

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



รูปที่ 4.8 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น

รูปที่ 4.9 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์ที่อาศัยแบบที่ 2

วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวอาซีในแบบที่ 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 สามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้ดังนี้

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

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) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำคือ

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

โดยที่  $\alpha = R_2/R_1$

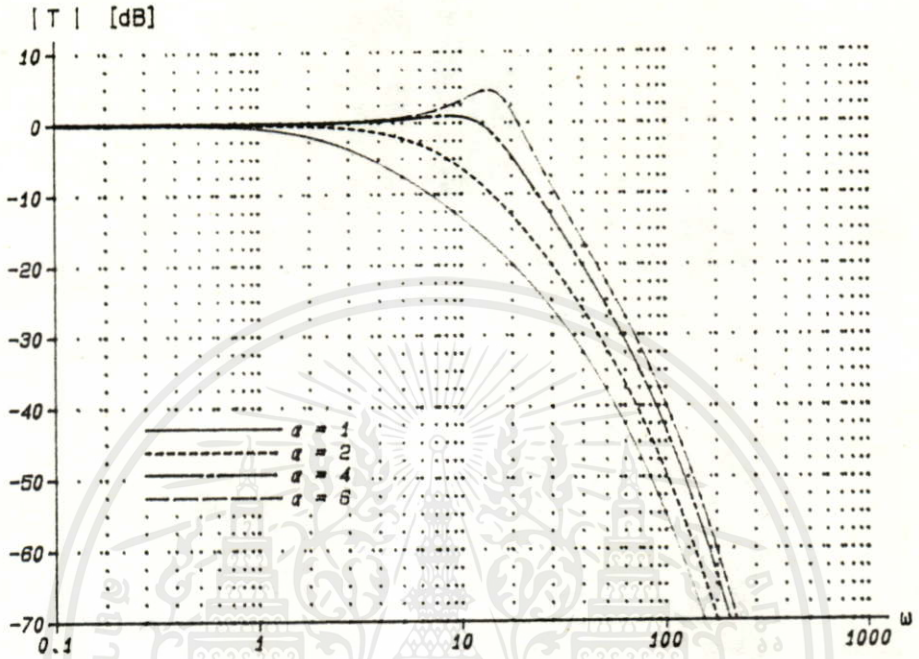
จากสมการ (4.30) ถ้าให้  $K = \infty$  (Infinity Gain Amplifier) จะได้

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

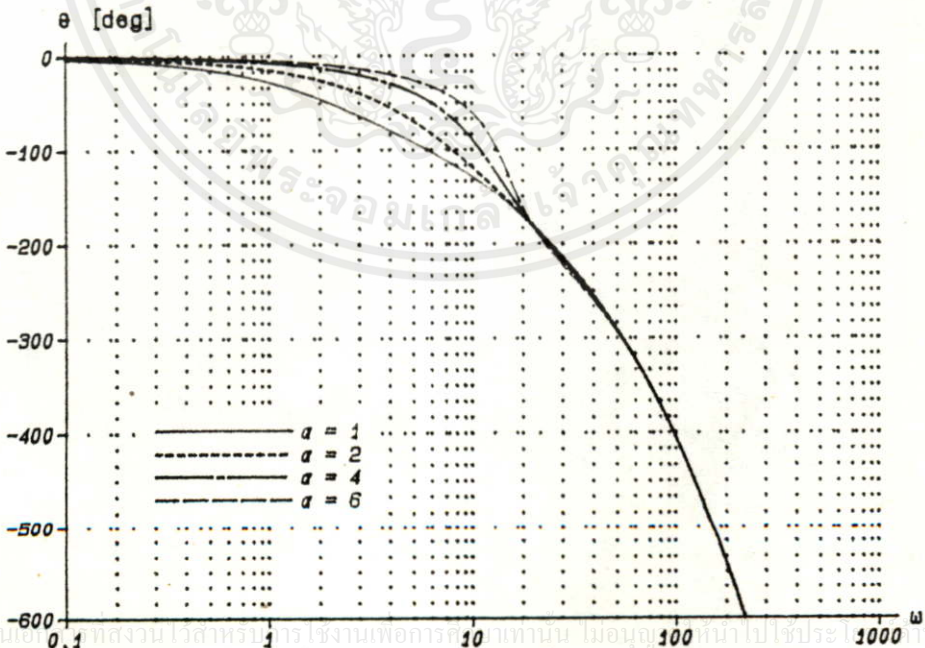
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors  $C_{p1}$  และ  $C_{p2}$  ของวงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสทริบิวอาซีตามในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า  $C_{p1}$  จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตมีพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน  $C_{p2}$  จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณลักษณะของวงจร (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  $\alpha$  จะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือเมื่อ  $\alpha$  มีค่ามาก จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดที่ขึ้นในย่านคัทออฟ (Cut-off) และเมื่อนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.31) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าที่  $\alpha$  มีค่าต่ำ ผลตอบสนองของกริฟต์เลย์จะมีลักษณะราบเรียบ

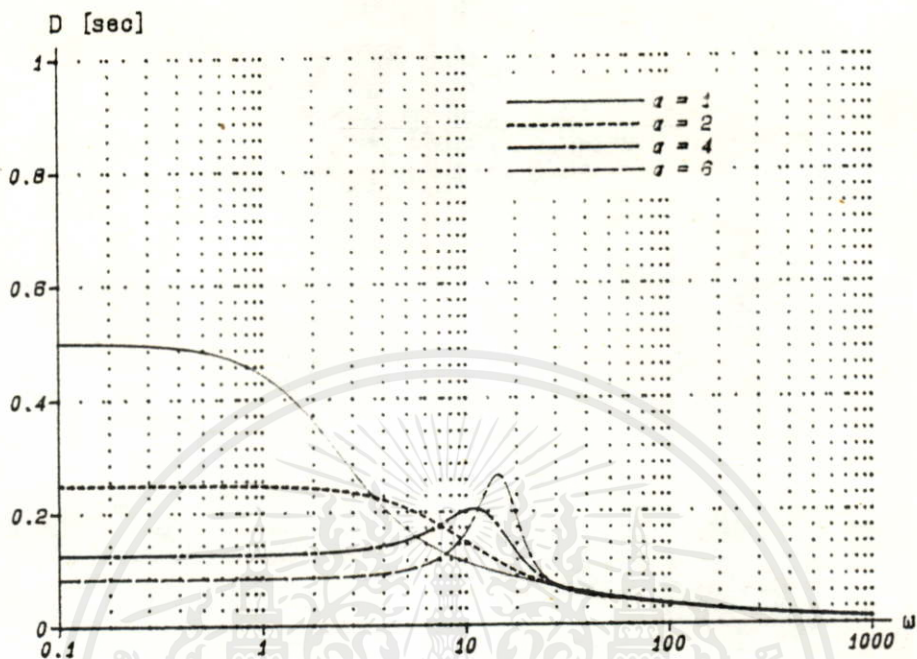


รูปที่ 4.10 แสดงตอบสนองทางขนาด

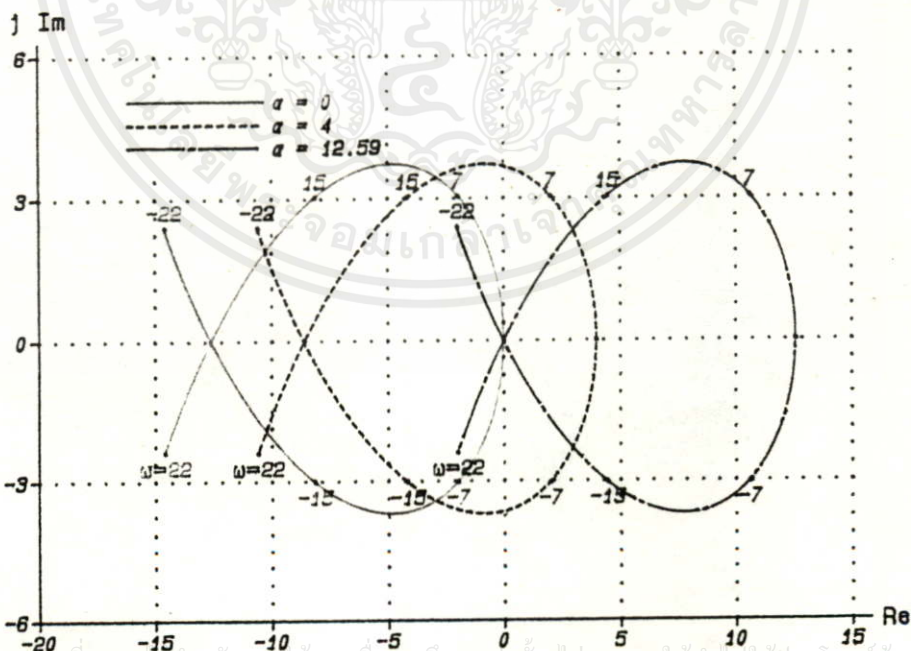


รูปที่ 4.11 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ วัฒนวิทย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.12 แสดงผลตอบสนองของกรฟิตเลย์



รูปที่ 4.13 แสดงในควิสต์ ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือหาผลประโยชน์ใดๆจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทรานส์เฟอริงก์ชันในสมการ (4.31) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปจะเห็นว่าที่  $\alpha$  มีค่ามากกว่า 12.59 เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอกจุด Origin ใน D(P)-Plane ในกรณีนี้ระบบจะไม่เสถียรภาพ และนั่นวงจกรองความถี่ต่ำในรูปที่ 4.9 ที่กำหนดอัตราขยาย  $K = 1$  จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0 ถึง 12.59

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

$$T(S) = \frac{\sinh \sqrt{SR_2 C_2}}{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} \sinh \sqrt{SR_1 C_1} (\cosh \sqrt{SR_2 C_2} - 1) + \sinh \sqrt{SR_2 C_2}} \quad \dots(4.33)$$

เมื่อหาเช่นซิวิตี้ในสมการ (4.33) แล้วกำหนดให้  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเช่นซิวิตี้ของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

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

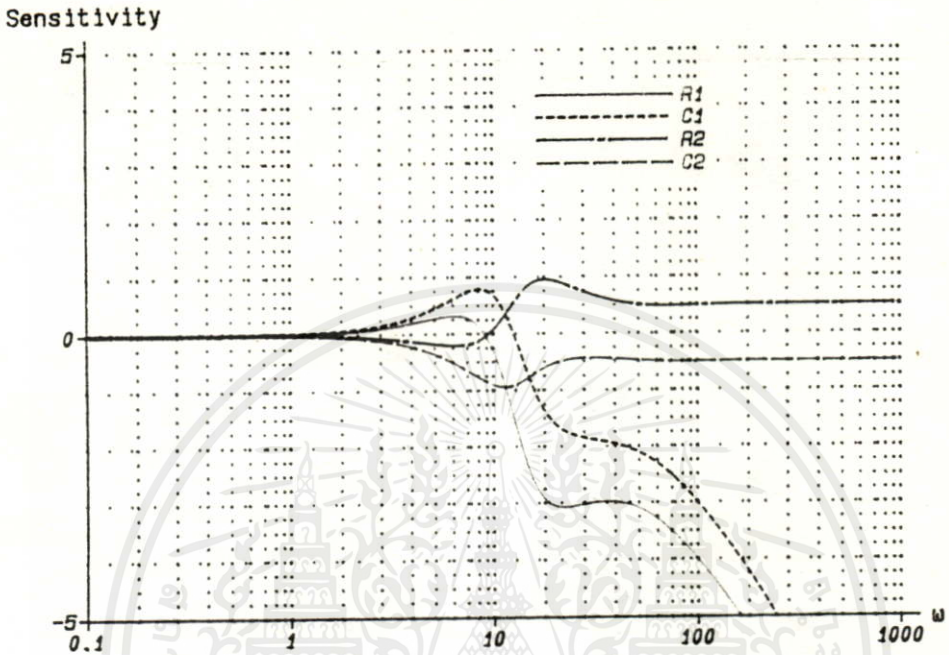
$$\frac{T(S)}{S_{C1}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\cosh P - 1) (1 - P \coth P)}{\cosh P - 1 + \alpha} \quad \dots(4.35)$$

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

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

จากสมการ (4.34) - (4.37) ถ้าให้  $\alpha = 4$  จะได้ค่าเช่นซิวิตี้ของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2$  และ  $C_2$  แสดงดังในรูปที่ 4.14 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเช่นซิวิตี้ที่ได้จะมีค่าต่ำ โดยที่  $\omega = 0$  ค่าเช่นซิวิตี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเช่นซิวิตี้ของ  $R_2, C_2$  จะมีค่าต่ำกว่าของ  $R_1, C_1$  และเมื่อเทียบวงจกรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.9 กับวงจกรองความถี่ต่ำแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าวงจกรองความถี่ต่ำในแบบที่ 2 มีค่าเช่นซิวิตี้ของอิลิเมนต์  $R_1, C_1,$

$R_2, C_2$  ต่ำกว่าวงจรรองความถี่ต่ำในแบบแรก



รูปที่ 4.14 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$

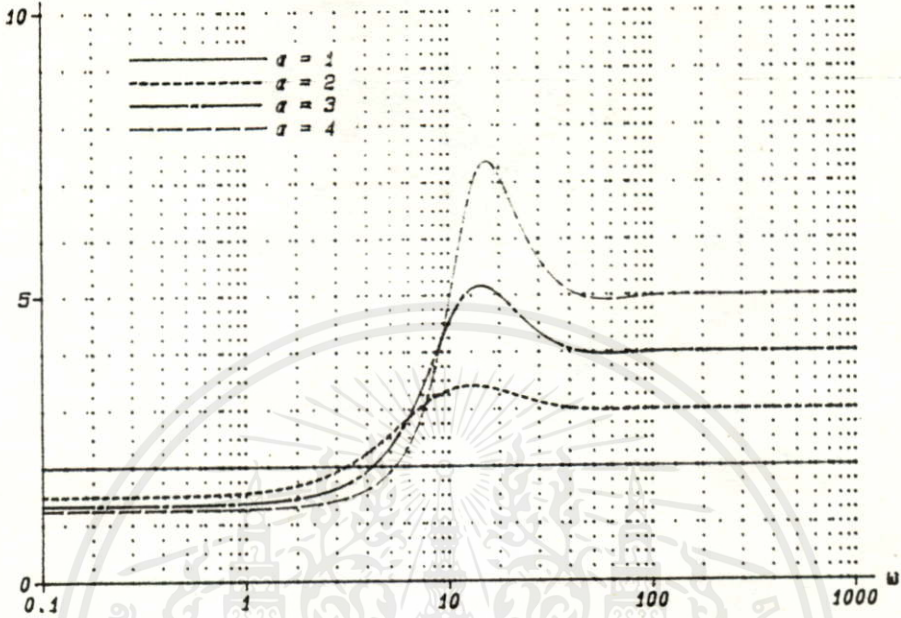
จากวงจรในรูปที่ 4.9 เมื่อ  $K$  เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ  $K$  ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $K$  หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน  $T(S)$  ในสมการ (4.30) แล้วกำหนดให้  $K = 1$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $K$  คือ

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

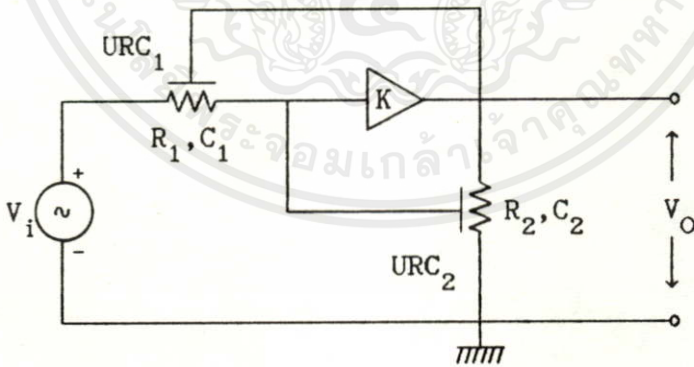
จากสมการ (4.38) ถ้าสมมติให้  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $K$  แสดงดังในรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเซ็นซิวิตีของ  $K$  จะมีค่าเท่ากับ  $(\alpha+1)/\alpha$  และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเซ็นซิวิตีของ  $K$  จะมีค่าเท่ากับ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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensitivity



รูปที่ 4.15 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K



รูปที่ 4.16 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทวอร์ธอันดับที่ 3

วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทวอร์ธอันดับที่ 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 เขียนเป็นทราเวลลิงเฟดแบ็คฟังก์ชันได้คือ

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

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

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

$$\text{โดยที่ } \alpha = R_2/R_1$$

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

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

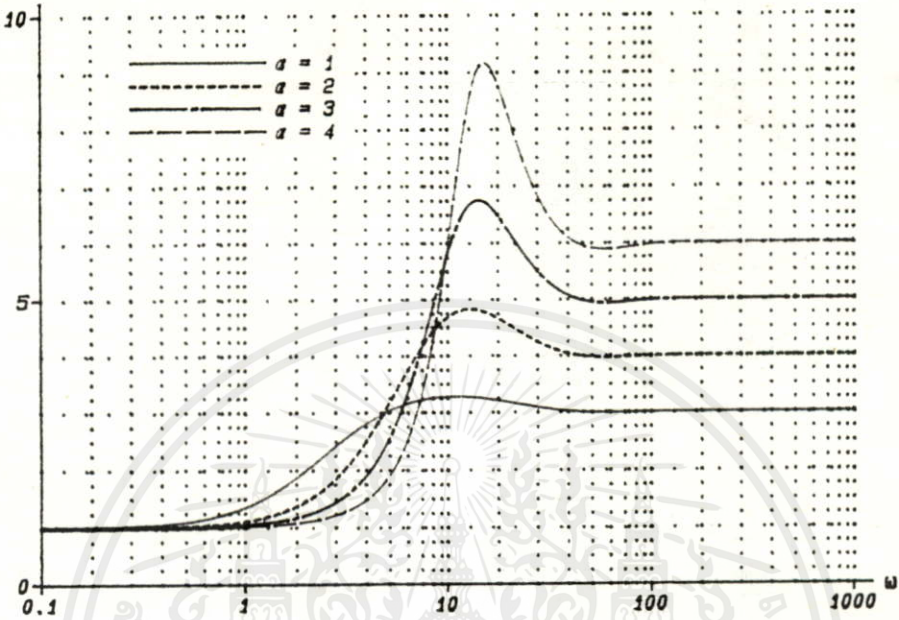
ในกรณีที่  $K = 1$  ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3 ในสมการ (4.41) จะเหมือนกันกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในสมการ (4.31) ซึ่งทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.16 เหมือนกับแบบที่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

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

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

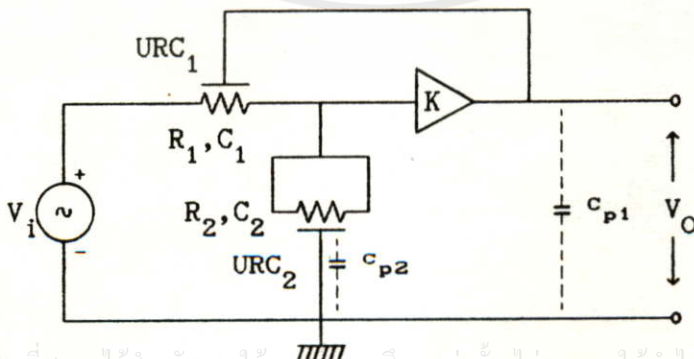
จากสมการ (4.43) ถ้าสมมติให้  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  จะได้ค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์  $K$  แสดงดังในรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเช่นชีวิติตของ  $K$  จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเช่นชีวิติตของ  $K$  จะมีค่าเท่ากับ  $\alpha+2$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

Sensitivity



รูปที่ 4.17 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

วงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าวงจรรองความถี่ต่ำในแบบที่ 3 มีค่าเช่นซีดีวีดีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าแบบที่ 2 ในช่วงความถี่ต่ำ แต่ในช่วงความถี่สูงค่าเช่นซีดีวีดีของวงจรรองความถี่ต่ำในแบบที่ 2 ต่ำกว่าในแบบที่ 3



รูปที่ 4.18 วงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์วีทอาซีแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

วงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทวี่อัสซีในแบบที่ 4 แสดงดังในรูปที่ 4.18 โดยให้ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K และกำหนดให้  $P_1 = \sqrt{SR_1 C_1}$ ,  $P_2 = \sqrt{SR_2 C_2}$  จากวงจรในรูปที่ 4.18 เขียนเป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

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

ถ้ากำหนดให้  $P = P_1 = P_2$  หรือ  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  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) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำคือ

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

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

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

ในกรณีที่  $K = 1$  ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 ในสมการ (4.46) จะเหมือนกันกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ในสมการ (4.31) และสมการ (4.41) ตามลำดับ โดยที่ค่า  $R_1$  ในวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแบบอื่น ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเช่นซิวิตีของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.18 เหมือนกันกับวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ

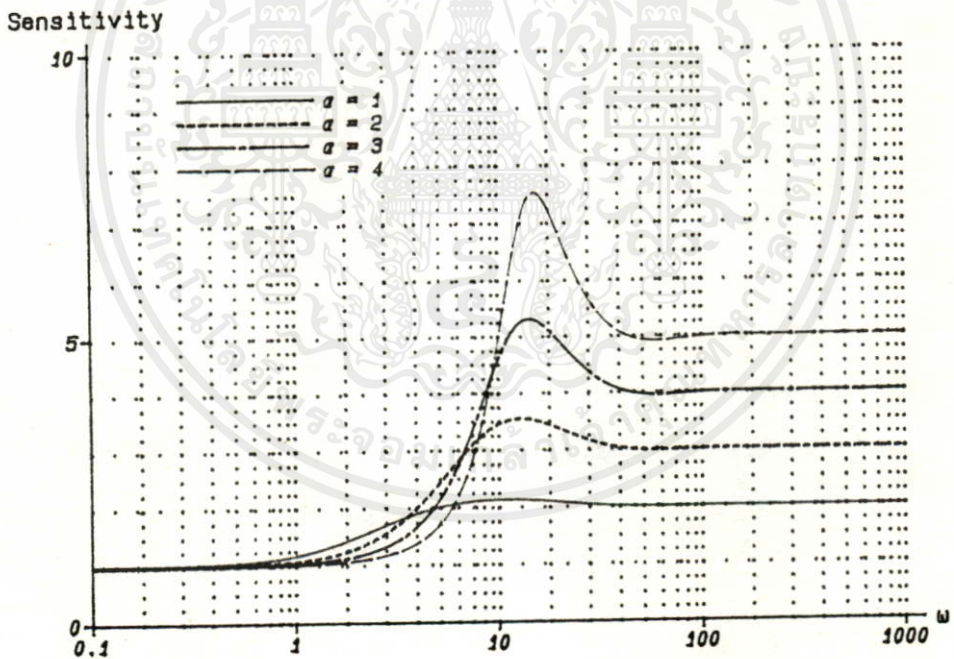
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors  $C_{p1}$  และ  $C_{p2}$  ของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บีทวี่อัสซีในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า  $C_{p1}$  จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ส่วน  $C_{p2}$  จะอยู่ระหว่างกราวด์ทั้งสองข้าง ฉะนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร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

จากวงจรในรูปที่ 4.18 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายเท่ากับ K ค่าเช่นซิวิตีของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.45) แล้วกำหนดให้

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

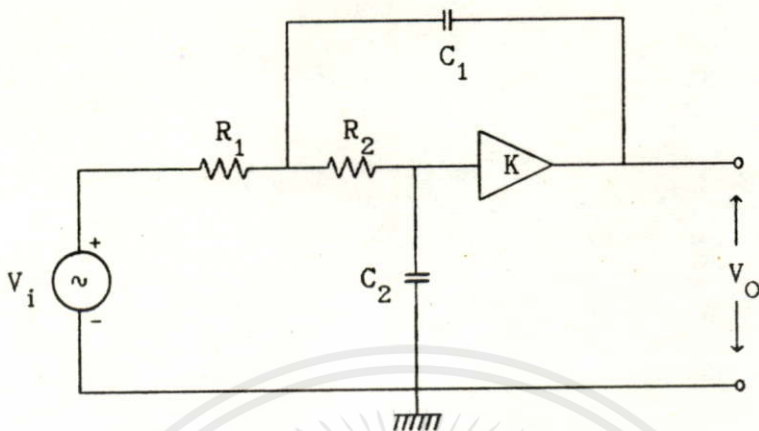
$$\frac{T(s)}{S} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P - 1}{\cosh P - 1 + \alpha} \dots(4.48)$$

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



รูปที่ 4.19 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์  $K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบ Sallen and Key

จากรูปที่ 4.20 เป็นตัวอย่างวงจรกรองความถี่ต่ำแบบ Sallen and key [10] ซึ่งสามารถเขียนเป็นทรานส์เฟอริงฟังก์ชันได้คือ

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

ถ้าแทน S ด้วย  $j\omega$  ทรานส์เฟอริงฟังก์ชัน  $T(S)$  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

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

เมื่อหาเช่นชีวิติตในสมการ (4.51) จะได้ค่าเช่นชีวิติตของอิลิเมนต์  $R_1, R_2, C_1$  และ  $C_2$  ดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

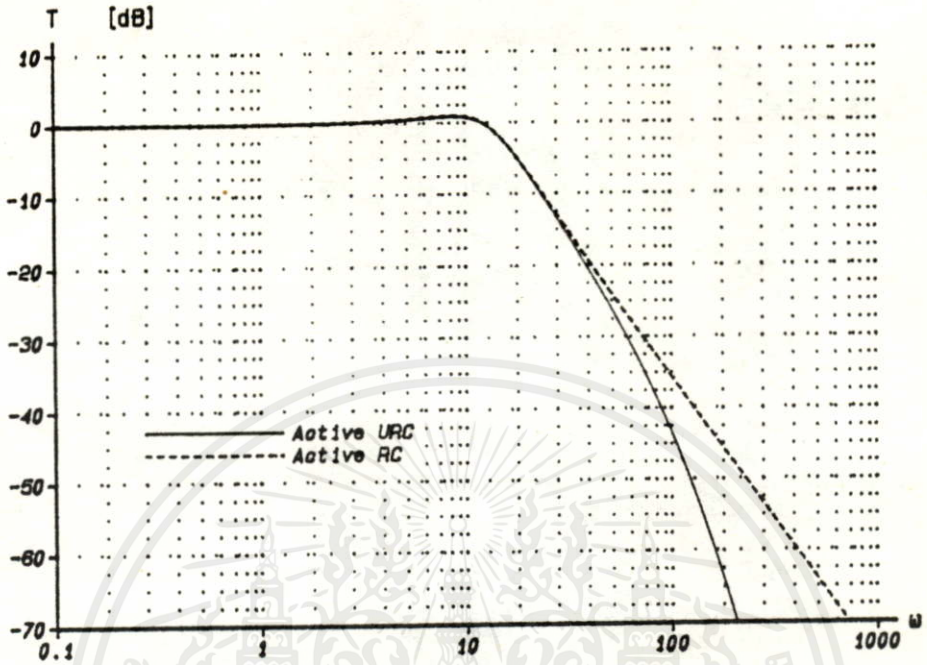
$$S_{c2} = \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 - j\omega C_2(R_1+R_2)}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega[C_2(R_1+R_2)] + 1} \quad \dots(4.55)$$

ค่าเซ็นซิวิตีของอัตราขยาย K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.50) ซึ่งจะได้

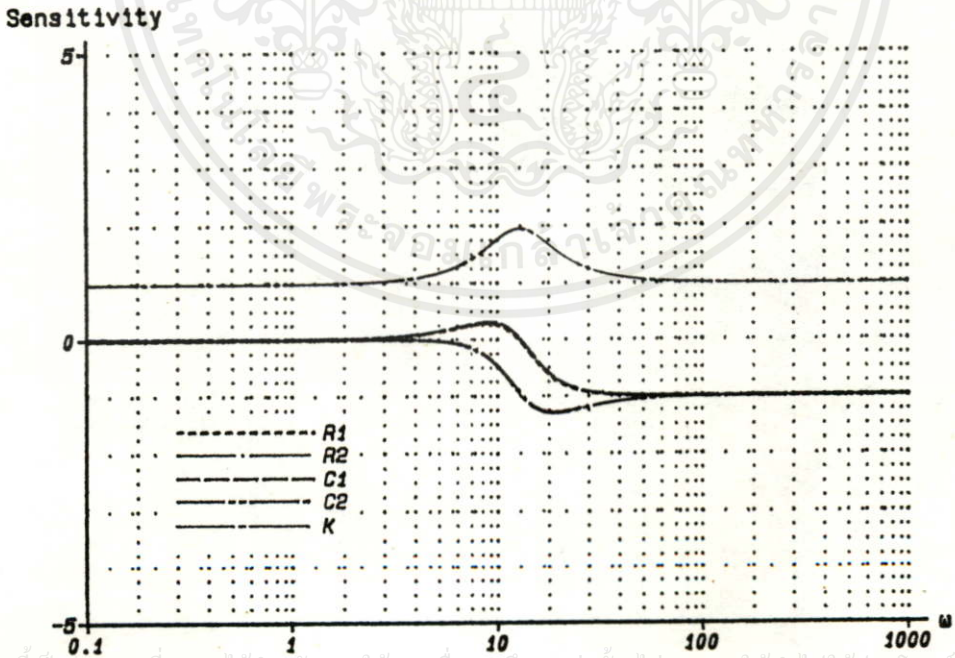
$$S_K = 1 + \frac{j\omega K R_1 C_1}{-\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega[C_2(R_1+R_2)+R_1 C_1(1-K)] + 1} \quad \dots(4.56)$$

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ต่ำแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชีแบบที่ 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) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟพาสซี เมื่อนำไปหาผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่เปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชีตามทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.46) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชีจะมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณในย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ที่ดี และเมื่อแทนค่าของอุปกรณ์คือ  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และอัตราขยาย K แล้วหาเซ็นซิวิตีตามสมการ (4.52) ถึงสมการ (4.56) จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแอกทีฟพาสซีแบบ Sallen and Key ตามในรูปที่ 4.22 ซึ่งจากรูปเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่ต่ำแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชีแบบที่ 4 จะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านหยุดสัญญาณค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์  $R_1, C_1$  ในวงจรแอกทีฟพาสซีจะต่ำกว่าของวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชี แต่ค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์  $R_2, C_2$  ในวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์บิวท์อาชีจะต่ำกว่าของวงจรแอกทีฟพาสซี ส่วนในช่วงความถี่ต่ำย่านผ่านสัญญาณค่าเซ็นซิวิตีของอิมพีแดนซ์  $R_1, R_2, C_1, C_2$  และอัตราขยาย K ของวงจรทั้งสองแบบจะมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองทางขนาด

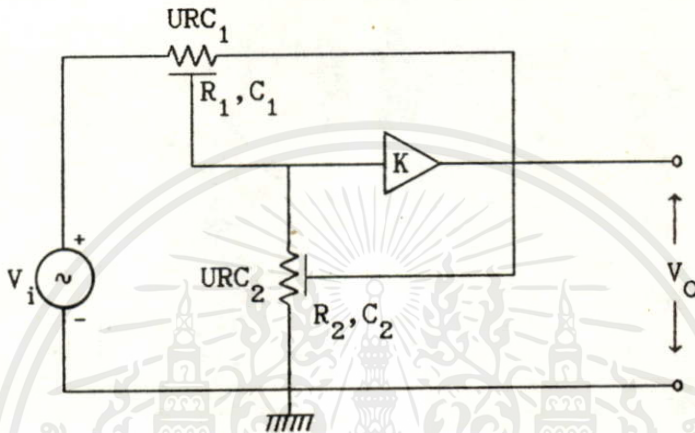


รูปที่ 4.22 แสดง Sensitivity ของวงจร Sallen and key

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ จากเอกสารนี้เพื่อการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.23 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตรีวิวิทอาซีแบบที่ 1

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

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

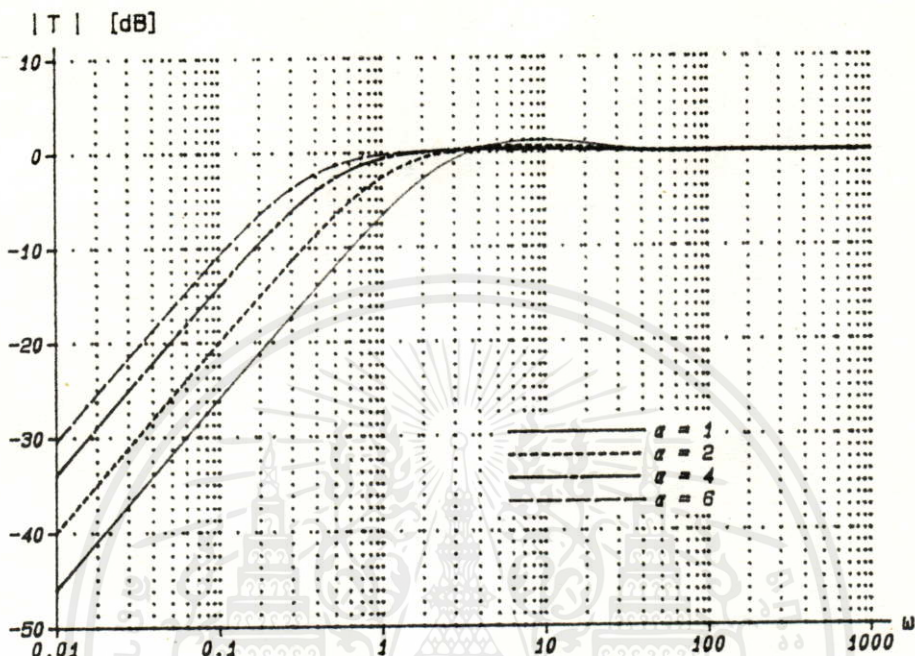
$$T(P) = \frac{\cosh P - 1}{\left( \frac{2}{K} + \frac{R_1}{KR_2} - \frac{R_1}{R_2} - 1 \right) \cosh P - \frac{2}{K} + \frac{R_1}{R_2} + 1} \quad \dots(4.58)$$

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

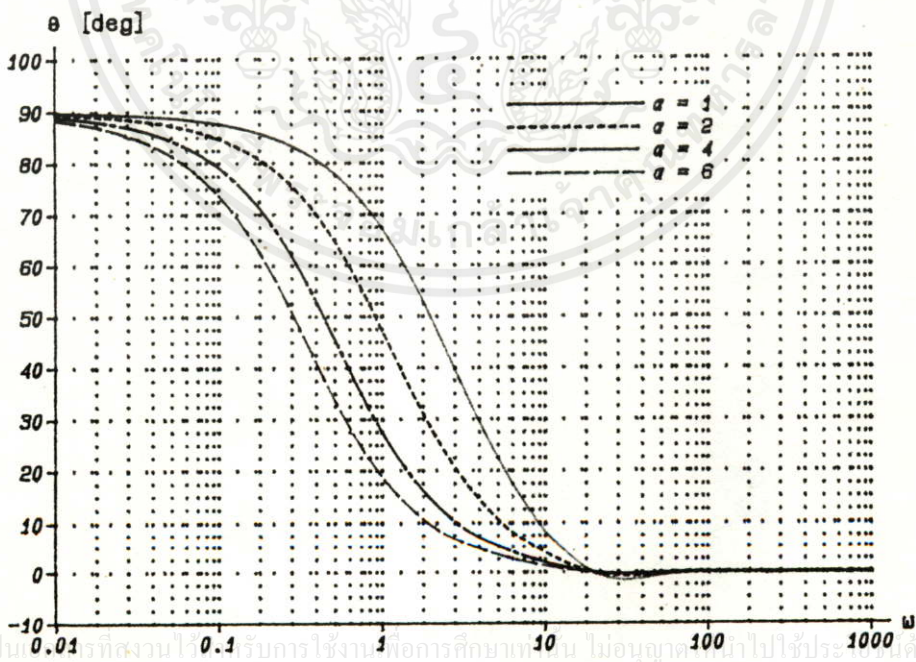
$$T(P) = \frac{\alpha \cosh P - \alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \quad \dots(4.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หรือการนำข้อมูลไปใช้ในการค้า การโฆษณา หรือการนำข้อมูลไปใช้  
จากสมการ (4.58) ถ้าให้  $K = \infty$  (Infinity Gain Amplifier) จะได้

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

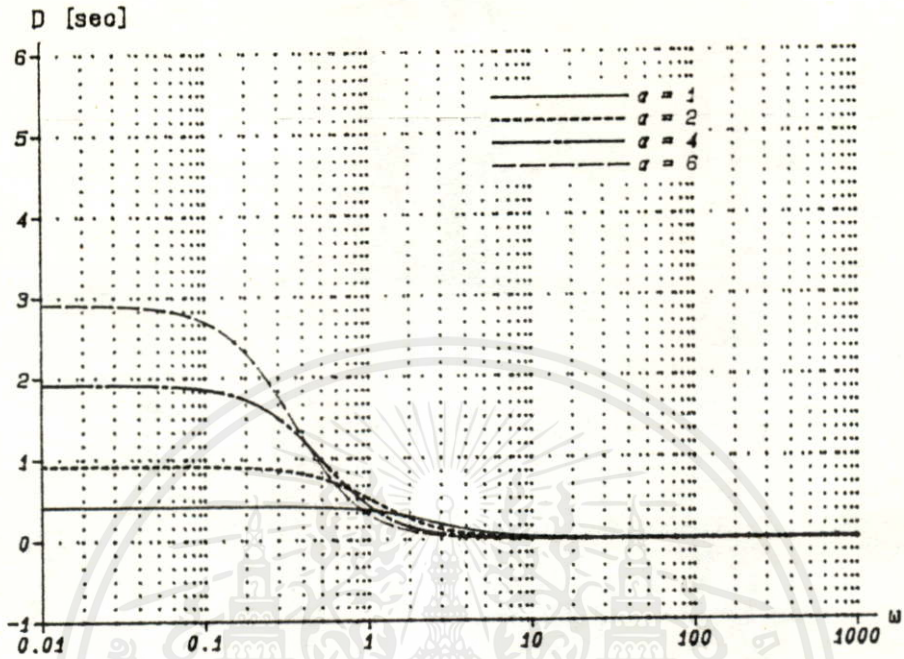


รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

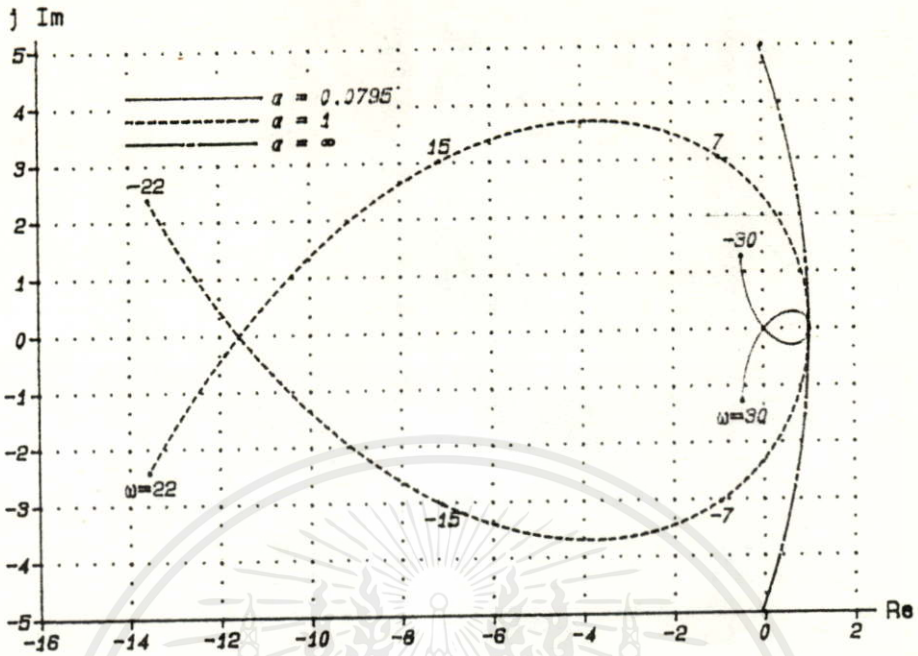
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดที่มิใช่เพื่อการศึกษาค้นคว้า



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  $\alpha$  จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ  $\alpha$  มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดที่ชันในย่านคัทออฟ และเมื่อนำทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.59) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ที่ได้จะมีลักษณะราบเรียบ

จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.59) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่า  $0.0795$  เส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อตจะผ่านและอยู่ภายนอกจุด Origin ใน  $D(P)$ -Plane ในกรณีนี้ระบบจะไม่เสถียรภาพ ฉะนั้นวงจรรองความถี่ต่ำในรูปที่ 4.23 ที่กำหนดให้อัตราขยาย  $K = 1$  จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้  $\alpha$  อยู่ระหว่าง  $0.0795$  ถึง  $\infty$



รูปที่ 4.27 แสดงในควิสต์ไดอะแกรม

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

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

เมื่อหาเช่นขั้วตีตัวในสมการ (4.61) แล้วกำหนดให้  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเช่นขั้วตีตัวของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

$$S_{R1} = \frac{1}{2} \left( \frac{P \sinh P}{\cosh P - 1} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.62)$$

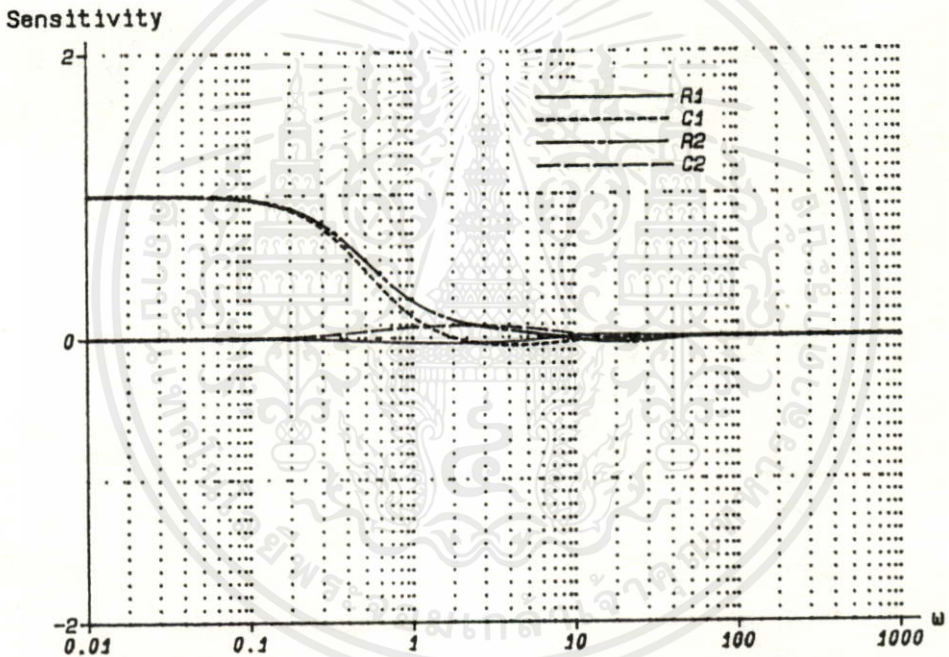
$$S_{C1} = \frac{1}{2} \left( \frac{P \sinh P}{\cosh P - 1} - \frac{\alpha P \sinh P + P \coth P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.63)$$

$$S_{R2} = \frac{1}{2} \left( P \coth P - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \quad \dots(4.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ในอนาคตให้นำไปใช้ประโยชน์  
ในการตีพิมพ์อื่น ๆ อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารนี้แก่บุคคลอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

$$S_{cz}^{\tau(s)} = \frac{1}{2} \left( P \coth P - \frac{\alpha P \coth P (\cosh P - 1) + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \right) \dots(4.65)$$

จากสมการ (4.62)-(4.65) ถ้าสมมติให้  $\alpha = 4$  จะได้เส้นชดิวัดของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  แสดงดังในรูปที่ 4.28 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าเส้นชดิวัดที่ได้จะมีค่าต่ำมากโดยที่  $\omega = \infty$  ค่าเส้นชดิวัดจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ช่วงความถี่ต่ำย่านหยุดสัญญาณ (Stopband) ค่าเส้นชดิวัดของ  $R_1, C_2$  จะมีค่าต่ำกว่า  $C_1, R_2$  โดยที่  $\omega = 0$  ค่าเส้นชดิวัดของ  $R_1, C_2$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์และ  $C_1, R_2$  จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



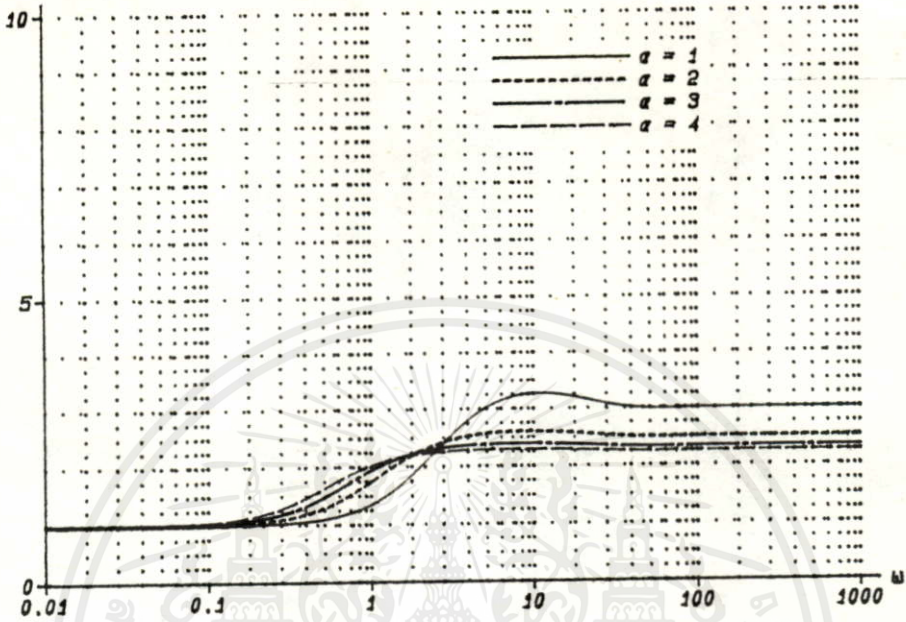
รูปที่ 4.28 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$

ค่าเส้นชดิวัดของอิลิเมนต์ K ในวงจรรูปที่ 4.23 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันในสมการ (4.58) แล้วกำหนดให้  $K = 1$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเส้นชดิวัดของอิลิเมนต์ K คือ

$$S_{cz}^{\tau(s)} = \frac{(2\alpha + 1) \cosh P - 2\alpha}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \dots(4.66)$$

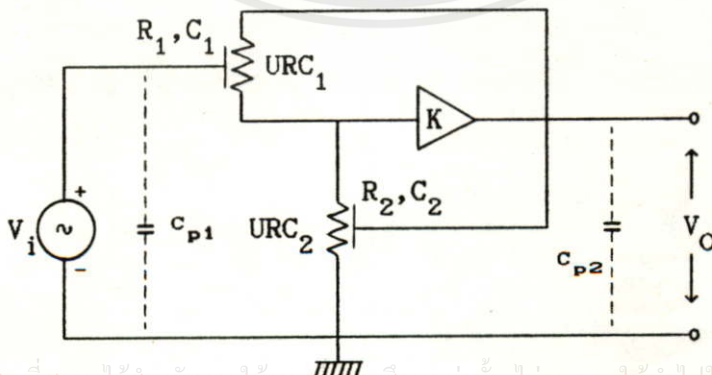
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensitivity



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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และจะรีบแก้ไขทันทีที่ทราบข่าว

รูปที่ 4.30 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟดิสทริบิวต์พาสแบบที่ 2

วงจรรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่พิลิสทริบิวท์อาซีในแบบที่ 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

$$T(P) = \frac{P_1(\cosh P_1 - 1)}{R_1 \sinh P_1} \dots (4.67)$$

$$\frac{1}{K} \left( \frac{P_1 \cosh P_1}{R_1 \sinh P_1} + \frac{P_2 \cosh P_2}{R_2 \sinh P_2} \right) - \frac{P_1}{R_1 \sinh P_1} - \frac{P_2(\cosh P_2 - 1)}{R_2 \sinh P_2}$$

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

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

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

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

โดยที่  $\alpha = R_2/R_1$

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

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

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

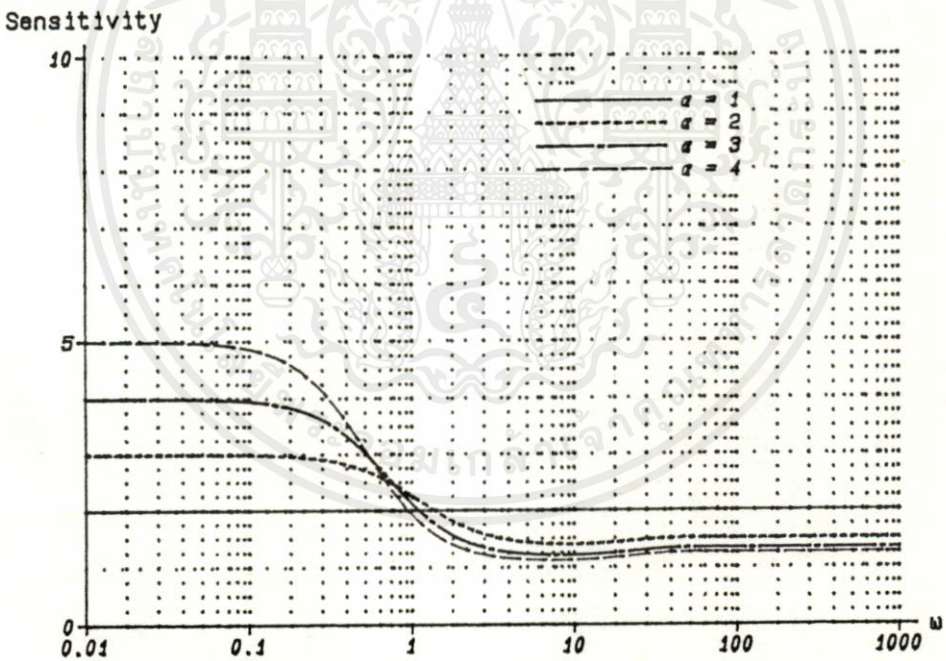
เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors ของวงจรรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่พิลิสทริบิวท์อาซีในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า  $C_{p1}$  จะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) กับกราวด์ ส่วน  $C_{p2}$  จะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของออปแอมป์กับกราวด์ (โดยที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์) ฉะนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร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

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

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

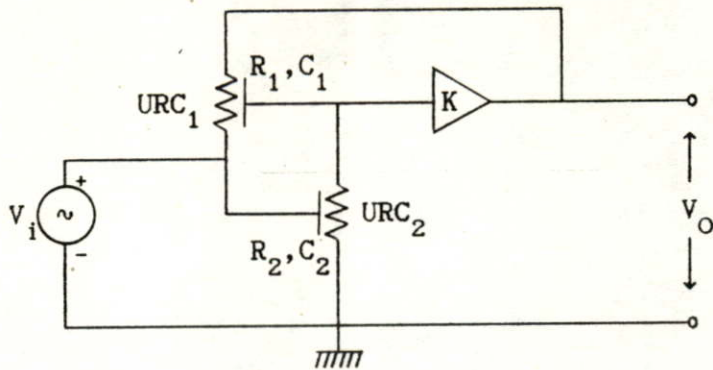
$$\frac{r(s)}{S_K} = \frac{(\alpha + 1) \cosh P}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} \dots(4.71)$$

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  $\alpha+1$  และเมื่อเทียบวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.30 กับวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าวงจรรองความถี่สูงในแบบที่ 2 มีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $K$  ต่ำกว่าแบบที่ 1 ในช่วงความถี่สูง แต่ในช่วงความถี่ต่ำเซ็นซิวิตีของวงจรรองความถี่สูงในแบบที่ 1 ต่ำกว่าแบบที่ 2



รูปที่ 4.31 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์  $K$

วงจรรองความถี่สูงแบบแยกที่ฟิสิกส์ทวิพหุอาซีในแบบที่ 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 สามารถเขียนเป็นทราנסเฟอร์ฟังก์ชันได้ดังนี้



รูปที่ 4.32 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีวีทอ์อัสซีแบบที่ 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) จะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงคือ

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

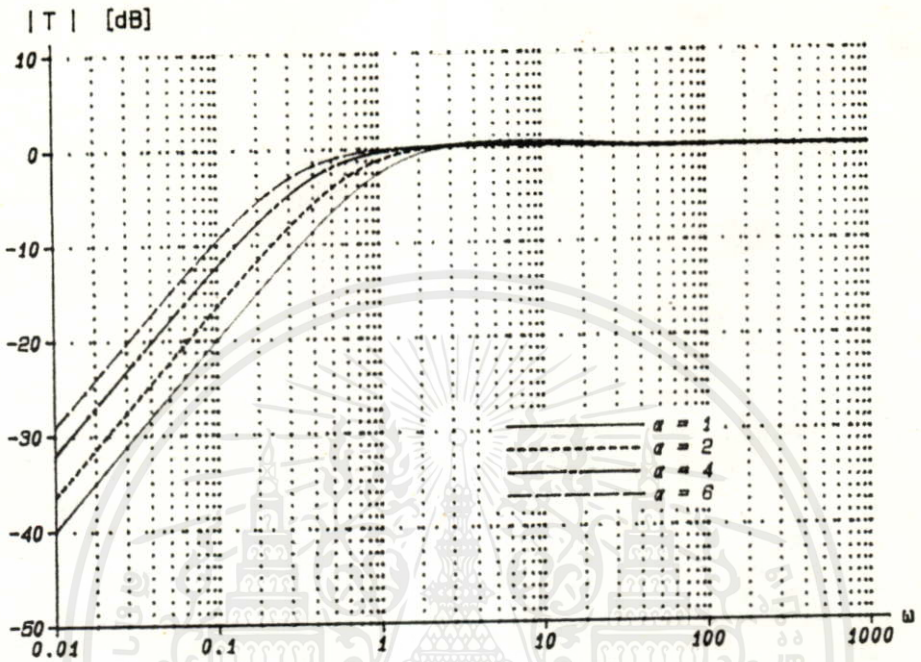
โดยที่  $\alpha = R_2/R_1$

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

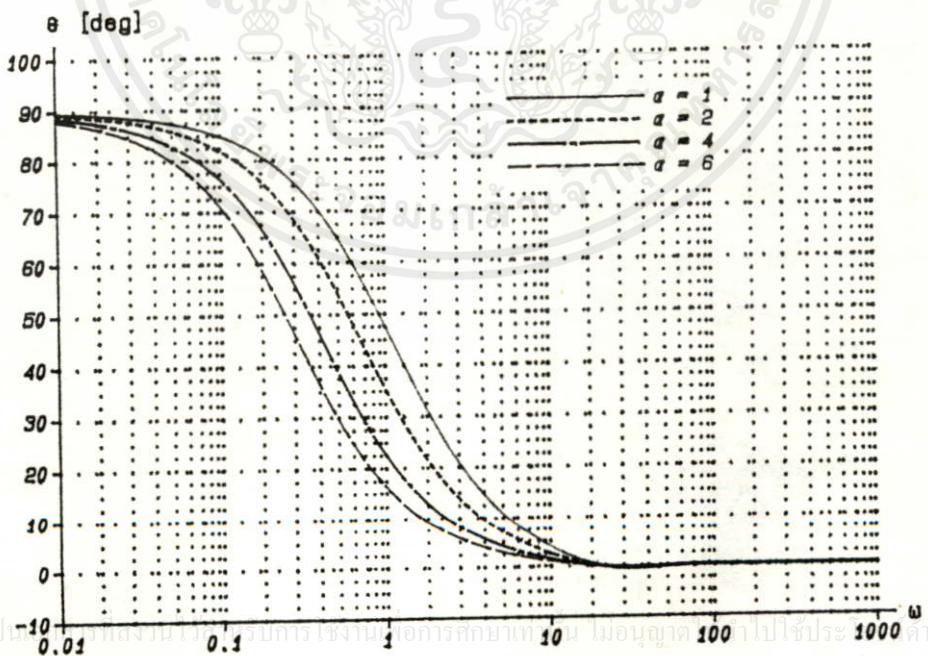
$$T(P) = \frac{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1}{-\alpha \cosh P + \alpha} \quad \dots(4.75)$$

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

รูปจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  จะทำให้ผลตอบสนองทางขนาดเปลี่ยนแปลงคือ เมื่อ  $\alpha$  มีค่าน้อยจะทำให้ได้ผลตอบสนองทางขนาดที่ชันในย่านคutoff และเมื่อนำทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันใน



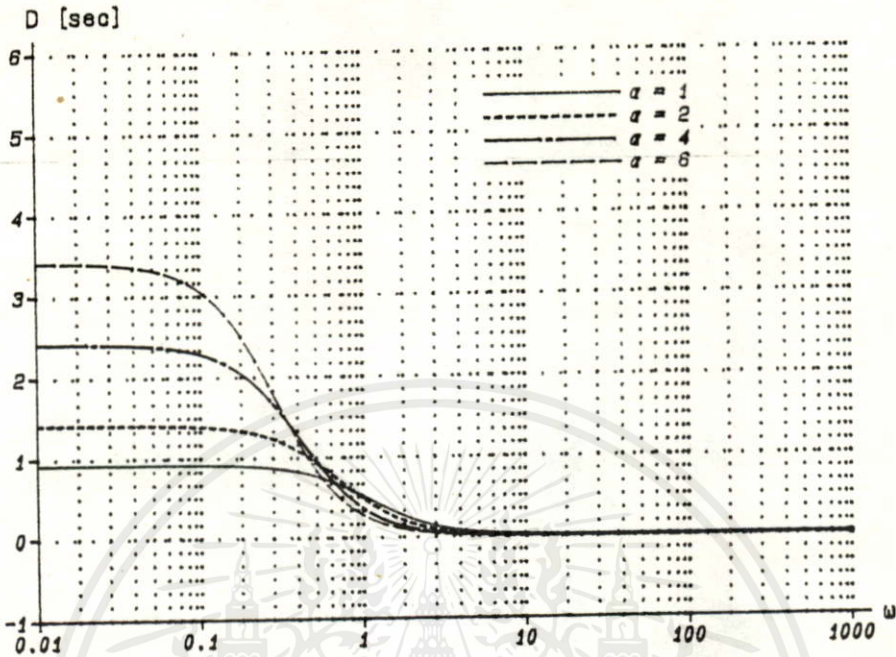
รูปที่ 4.33 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.34 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำออกนอกมหาวิทยาลัยโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงผลตอบสนองกรุปดีเลย์

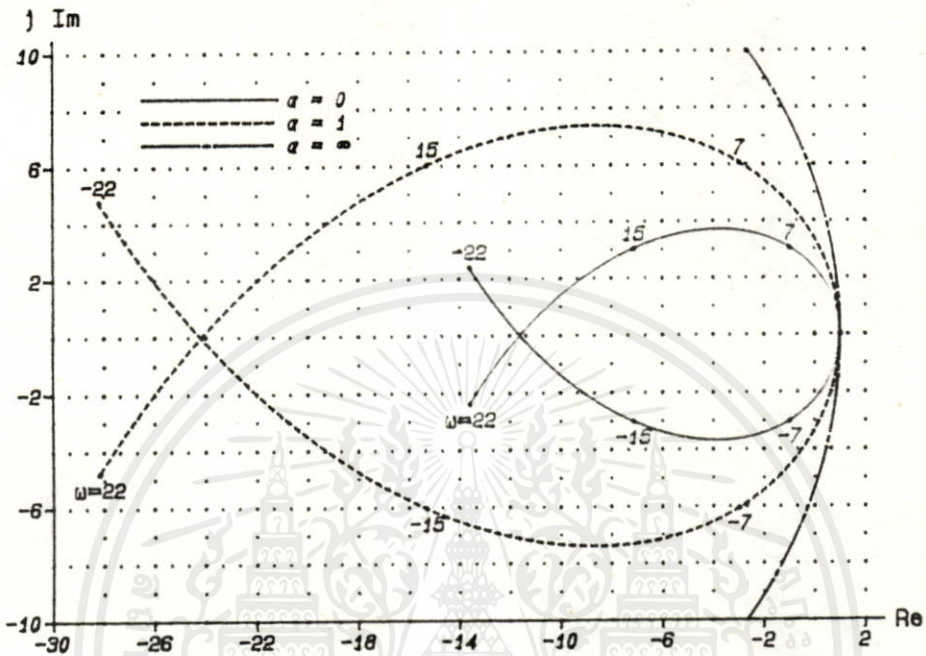
สมการ (4.74) ไปหาค่าผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response) และผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ (Group Delay) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าในช่วงความถี่สูงย่านผ่านสัญญาณ (Passband) ค่าผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ที่ได้จะมีลักษณะราบเรียบ

จากทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันในสมการ (4.74) ถ้านำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์ไดอะแกรม (Nyquist Diagram) จะได้ดังแสดงในรูปที่ 4.36 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อให้  $\alpha$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง  $\infty$  จุด Origin ใน D(P)-Plane จะถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อต ฉะนั้นวงจรวงความถี่สูงในรูปที่ 4.32 ที่กำหนดอัตราขยาย  $K = 1$  จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0 ถึง  $\infty$

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

$$T(S) = \frac{\sinh \sqrt{SR_2 C_2} (\cosh \sqrt{SR_1 C_1} - 1) + \frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} \sinh \sqrt{SR_1 C_1} (\cosh \sqrt{SR_1 C_1} - 1)}{\sinh \sqrt{SR_2 C_2} (\cosh \sqrt{SR_1 C_1} - 1) + \frac{R_1 C_2}{R_2 C_1} \sinh \sqrt{SR_1 C_1} \cosh \sqrt{SR_2 C_2}} \quad (4.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรการใช้งานที่ออก... ไม่ว่าการมีใดๆทางอื่น ออกทางอื่นให้คิดเปลี่ยนแปลง... และ... ขององค์การทุกครั้งที่จะให้นำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดงในควิสต์ไดอะแกรม

เมื่อหาเงื่อนไขวิกฤตในสมการ (4.76) แล้วกำหนดให้  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเงื่อนไขวิกฤตของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

$$\frac{T(s)}{S_{R1}} = - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha \text{Psinh}P + (\cosh P - 1)(\text{Pcoth}P + 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha \text{Psinh}P + \cosh P (\text{Pcoth}P + 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \quad (4.77)$$

$$\frac{T(s)}{S_{C1}} = - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha \text{Psinh}P + (\cosh P - 1)(\text{Pcoth}P - 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha \text{Psinh}P + \cosh P (\text{Pcoth}P - 1)}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \quad (4.78)$$

$$\frac{T(s)}{S_{R2}} = - \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha \text{Pcoth}P (\cosh P - 1) + \text{Psinh}P - \cosh P + 1}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha - 1} - \frac{\alpha \text{Pcoth}P (\cosh P - 1) + \text{Psinh}P - \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right)$$

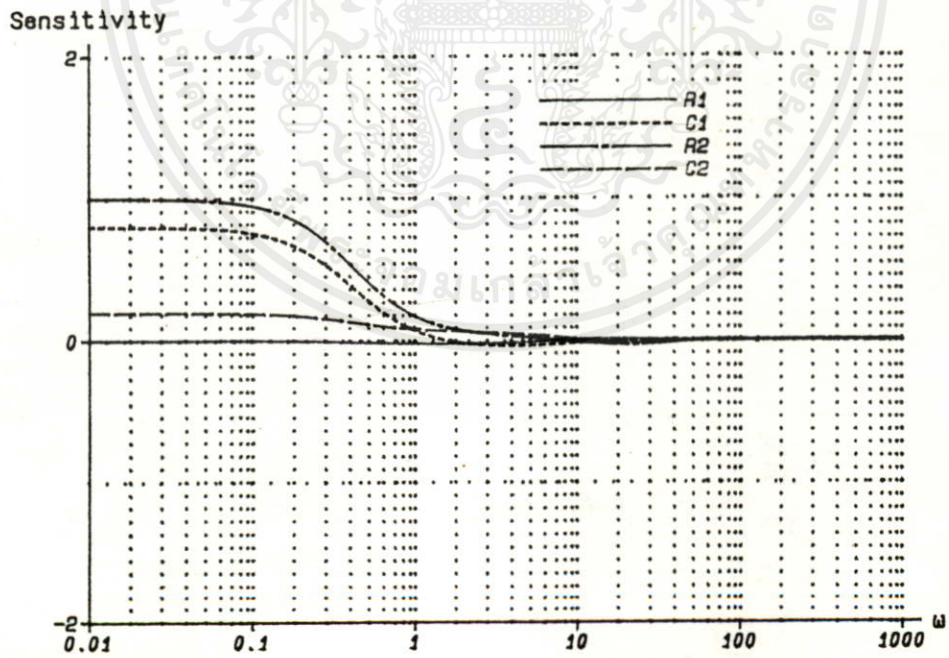
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์... (4.79)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

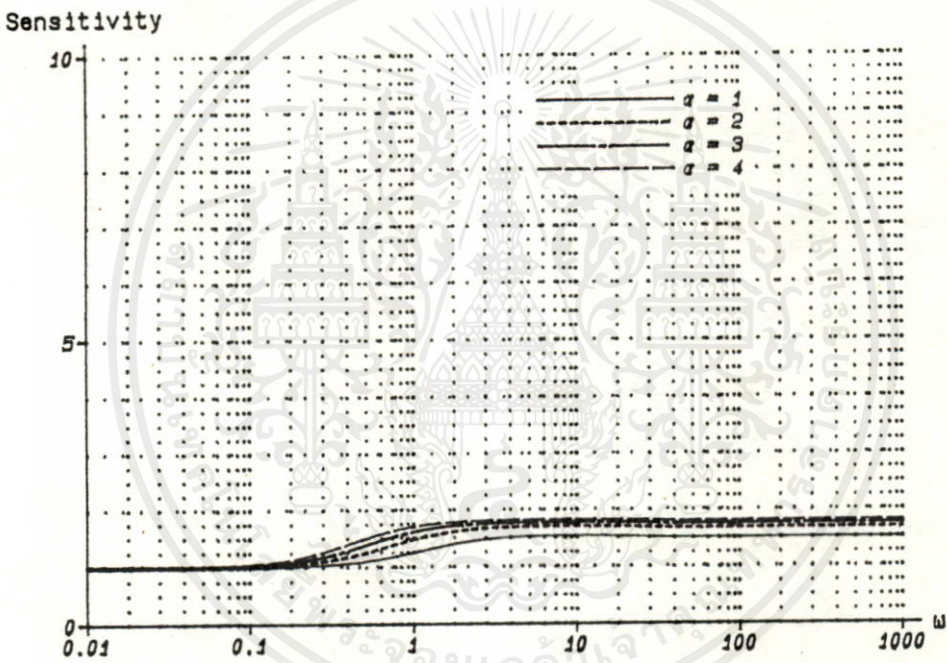
$$S_K = \frac{T(S)}{K} = \frac{(2\alpha + 1) \cosh P - 2\alpha}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \dots(4.81)$$



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และเมื่อเทียบวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 3 ในรูปที่ 4.32 กับวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวงจรรองความถี่สูงในแบบที่ 3 มีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าทั้งวงจรรองความถี่สูงในแบบที่ 1 และแบบที่ 2

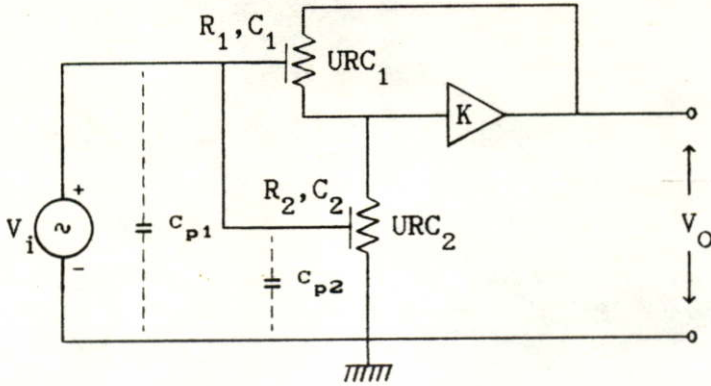


รูปที่ 4.38 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

วงจรรองความถี่สูงแบบแยกที่ฟิลส์ทริวิท์อาศัยในแบบที่ 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 เขียนเป็นทราנסเฟอร์ฟังก์ชันได้คือ

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

อีกสารนิพนธ์ (อธิบายเพิ่มเติม) สำหรับค่าของ P1 และ P2 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 วงจรกรองความถี่สูงแบบแอกทีฟที่ผลิตทวีวีทอาซีแบบที่ 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) จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงคือ

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

โดยที่  $\alpha = R_2/R_1$

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

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

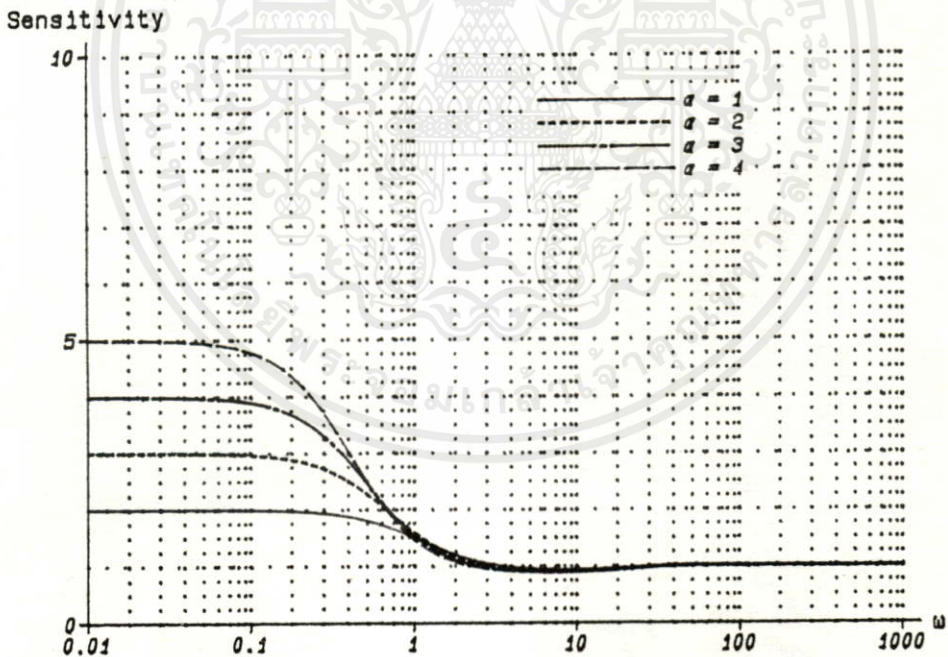
ในกรณีที่  $K = 1$  ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 4 ในสมการ (4.84) จะเหมือนกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 3 ในสมการ (4.74) ซึ่งทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และ เส้นชดิวัดของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 4 ในรูปที่ 4.39 เหมือนกับแบบที่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

เมื่อพิจารณา Parasitic Capacitors ของวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟที่ผลิตทวีวีทอาซีในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่า  $C_{p1}$  และ  $C_{p2}$  จะอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) กับกราวด์ จึงไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร (Circuit Characteristics) จากวงจรในรูปที่ 4.39 เมื่อ  $K$  เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ  $K$

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

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

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

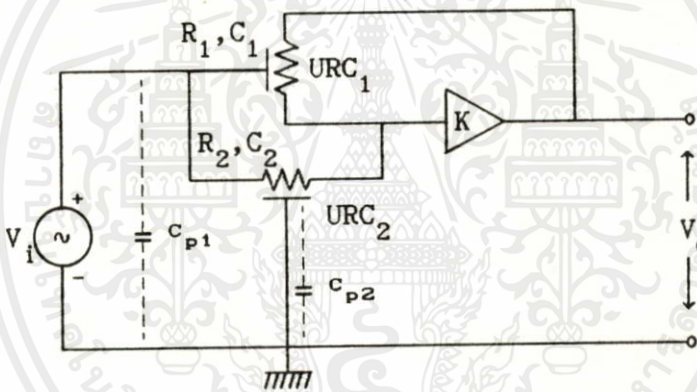


รูปที่ 4.40 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การออกแบบวงจรอควาไลเซอร์แบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซี

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



รูปที่ 4.41 มจรวจรอควาไลเซอร์แบบแอกทีฟที่ผลิตทวีบริบทอาซีแบบที่ 1

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

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

ถ้ากำหนดให้  $P = P_1 = P_2$  หรือ  $R_1C_1 = R_2C_2$  แล้วแทนค่าลงในสมการ (4.87) จะได้ว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

โดยที่  $\alpha = R_2/R_1$

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

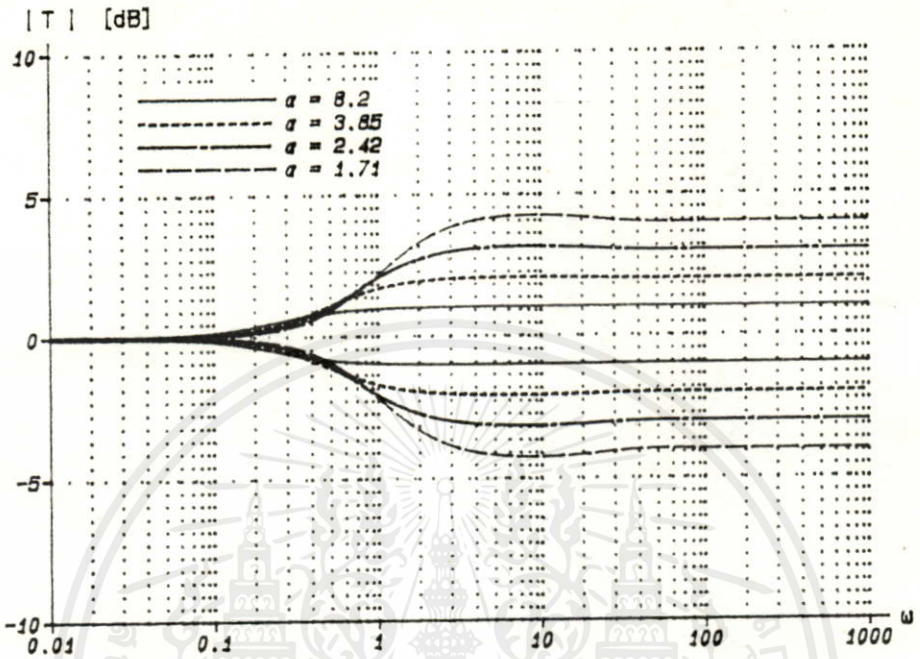
จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.89) สมมติต้องการให้ลดระดับที่ความถี่สูงสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่า  $\alpha$  เช่นเมื่อต้องการลดระดับที่ความถี่สูงมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, 4dB ซึ่งทำได้โดยกำหนดให้  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 8.2, 3.85, 2.42 และ 1.71 ตามลำดับ โดยที่ค่า  $\alpha$  สามารถหาได้ด้วยความสัมพันธ์คือ

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

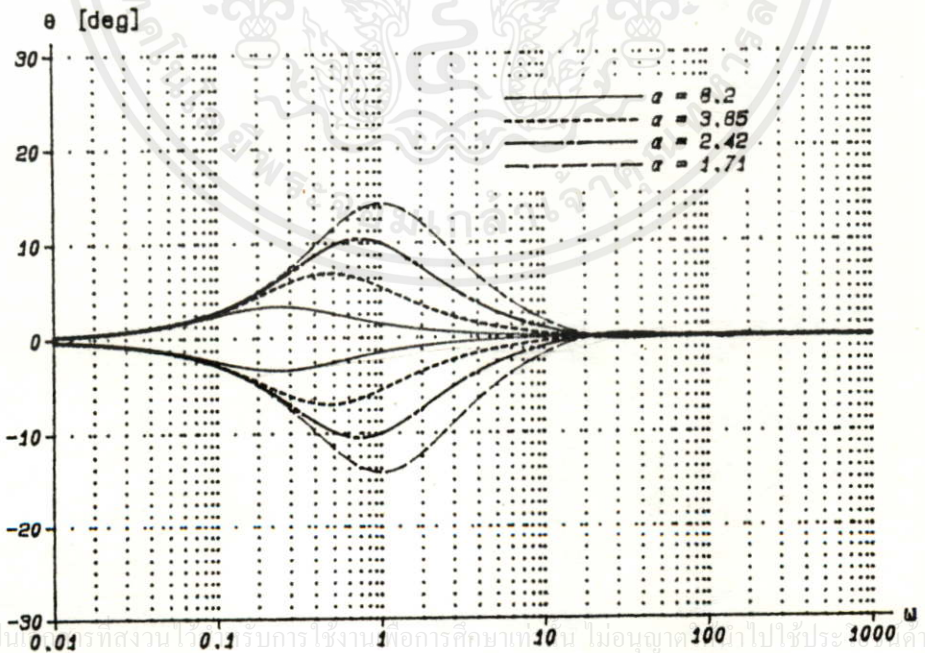
ถ้าต้องการยกระดับที่ความถี่สูง สามารถทำได้โดยเพิ่มออปแอมป์ขึ้น 1 ตัว และนำเอาสัญญาณอินพุตป้อนต่อเข้าขาบวกของออปแอมป์ และให้สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ต่อเข้าวงจรในรูปที่ 4.41 ป้อนกลับ (Feedback) เข้าออปแอมป์ทางขาลบ ซึ่งจะทำให้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันกลับกัน [16, 17] คือ

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

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



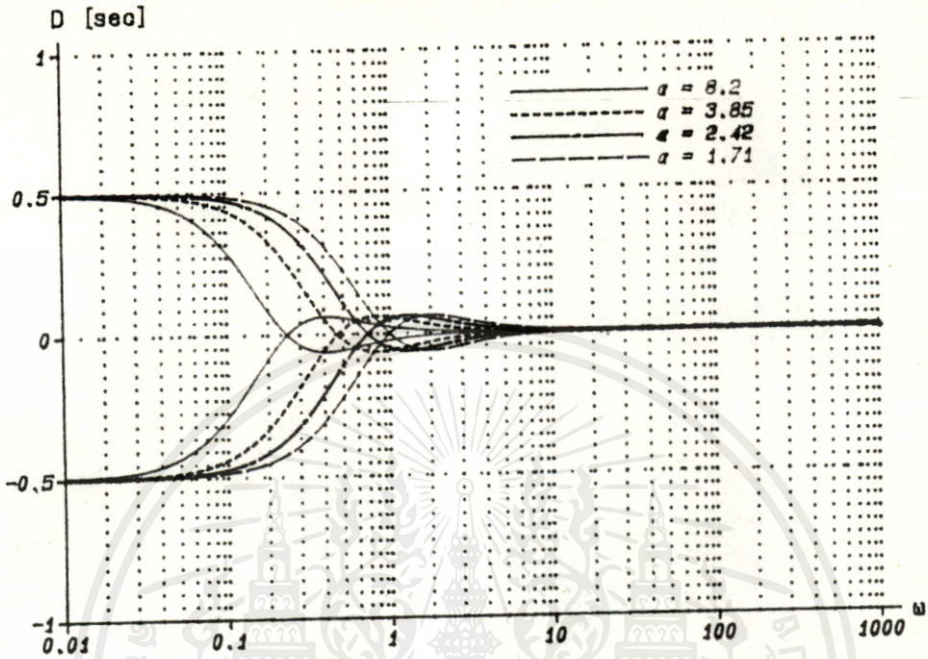
รูปที่ 4.42 แสดงผลตอบสนองทางขนาด



รูปที่ 4.43 แสดงผลตอบสนองทางเฟส

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำออกนอกสถาบันโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดงผลตอบสนองการพืดเลย

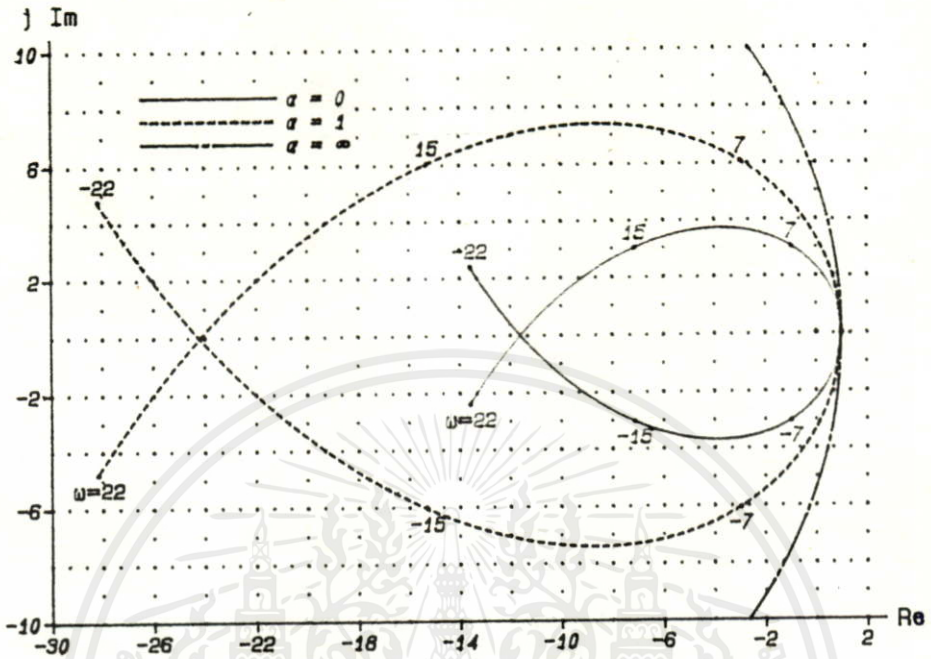
จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.89) เมื่อนำไปหาเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีไนควิสต์โคอะแกรม (Nyquist Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4.45 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อให้  $\alpha$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง  $\infty$  จุด Origin ใน D(P)-Plane จะถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางเดินของไนควิสต์พล็อต ฉะนั้นวงจรถือควอไลเซอร์ในรูปที่ 4.41 ที่กำหนดอัตราขยาย  $K = 1$  จะมีความเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้ค่า  $\alpha$  อยู่ระหว่าง 0 ถึง  $\infty$

จากวงจรในรูปที่ 4.41 หาค่าเช่นชีวิตตัวของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  โดยกำหนดให้อัตราขยายมีค่า  $K = 1$  ฉะนั้นจากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (4.87) จะได้

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

เมื่อหาเช่นชีวิตตัวในสมการ (4.92) แล้วกำหนดให้  $R_1C_1 = R_2C_2$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเช่นชีวิตตัวของอิลิเมนต์แต่ละตัวดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 แสดงในควิลท์โดอะแกรม

$$S_{R1} = \frac{T(s)}{R1} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha \text{Psinh}P + \text{Pcoth}P + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha \text{Psinh}P + (\text{Pcoth}P + 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.93)$$

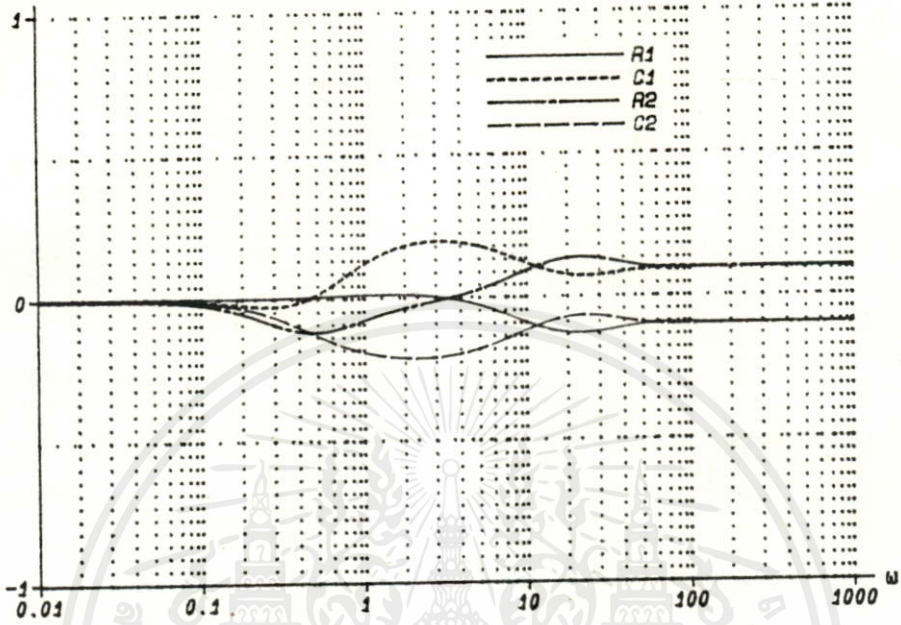
$$S_{C1} = \frac{T(s)}{C1} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha \text{Psinh}P + \text{Pcoth}P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha \text{Psinh}P + (\text{Pcoth}P - 1) \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.94)$$

$$S_{R2} = \frac{T(s)}{R2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{Pcoth}P - 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{Pcoth}P + \text{Psinh}P - \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.95)$$

$$S_{C2} = \frac{T(s)}{C2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{Pcoth}P + 1}{\alpha \cosh P - \alpha + 1} - \frac{\alpha (\cosh P - 1) \text{Pcoth}P + \text{Psinh}P + \cosh P}{(\alpha + 1) \cosh P - \alpha} \right) \dots (4.96)$$

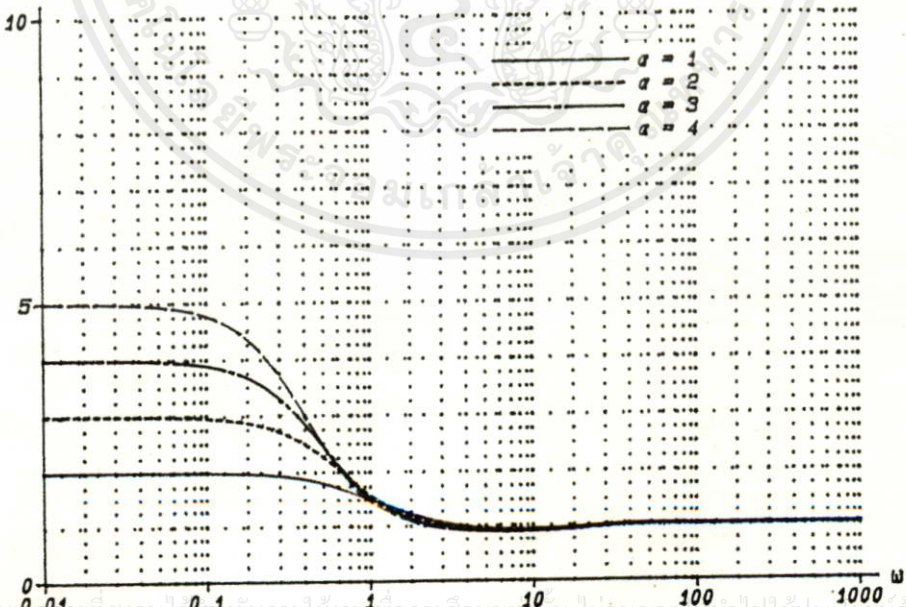
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นโดยระบบอัตโนมัติของห้องสมุด  
 จากสมการ (4.93) - (4.96) ถ้าสมมติให้  $\alpha = 4$  จะได้ค่าเช่นขีดวิตซ์ของอิลิเมนต์  
 $R_1, C_1, R_2$  และ  $C_2$  แสดงดังในรูปที่ 4.46 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าเช่นขีดวิตซ์ที่ได้นั้นค่าต่ำ

Sensitivity



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

Sensitivity



รูปที่ 4.47 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์ K

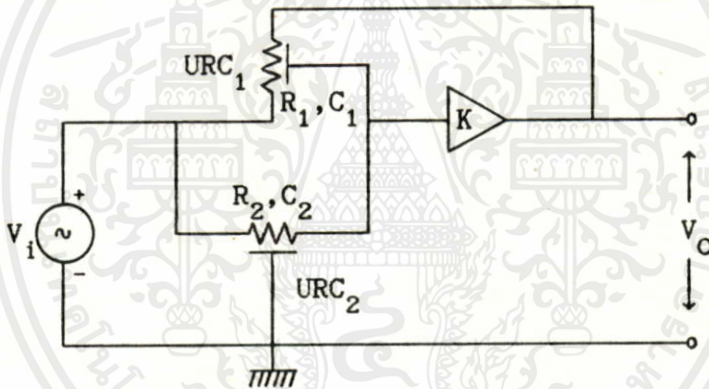
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตและห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

จากวงจรในรูปที่ 4.41 เมื่อ K เป็น Amplifier ที่มีอัตราขยายแรงดันเท่ากับ K ค่าเช่นชีวิติวต์ของอิลิเมนต์ K หาได้จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน T(S) ในสมการ (4.88) แล้วกำหนดให้  $K = 1$  และ  $\alpha = R_2/R_1$  จะได้ค่าเช่นชีวิติวต์ของอิลิเมนต์ 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 จะได้ค่าเช่นชีวิติวต์ของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.47 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำที่  $\omega = 0$  ค่าเช่นชีวิติวต์ของ K จะมีค่าเท่ากับ  $\alpha+1$  และในช่วงความถี่สูงที่  $\omega = \infty$  ค่าเช่นชีวิติวต์ของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 4.48 วงจรอิลิควอลไฮเซอร์แบบแอกทีฟดิสรวิวิทอซีในแบบที่ 2

วงจรอิลิควอลไฮเซอร์แบบแอกทีฟดิสรวิวิทอซีในแบบที่ 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

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

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

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

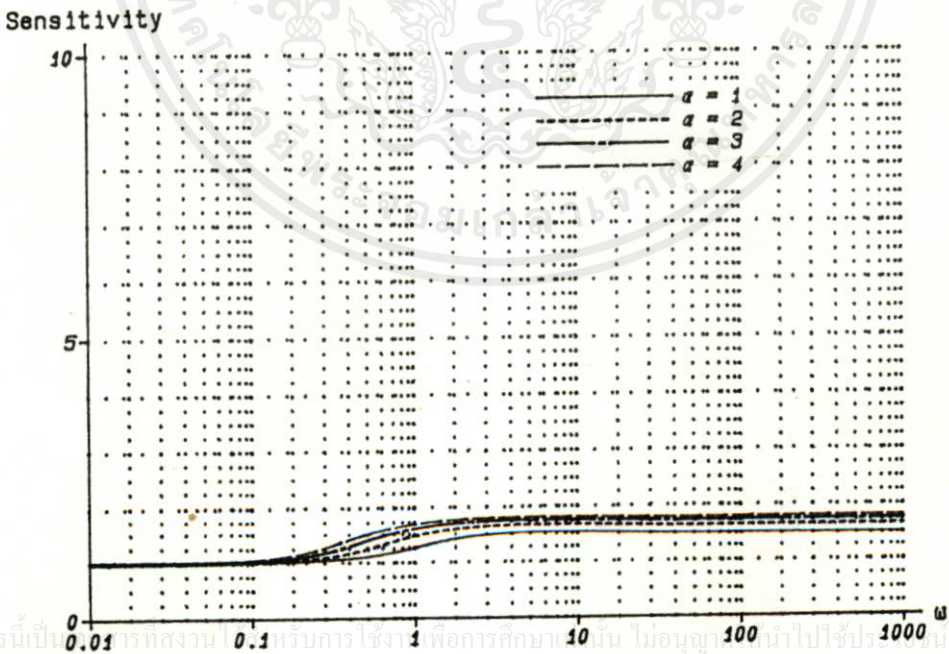
$$T(P) = \frac{\cosh P - 1 + \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{K} \left( 2 + \frac{R_1}{R_2} - K \right) \cosh P - \frac{2}{K} + 1} \quad \dots(4.99)$$

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

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

ในกรณีที่กำหนดให้  $K = 1$  ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวอร์คโวลเซอร์ที่ 2 ในสมการ (4.100) จะเหมือนกับทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรวอร์คโวลเซอร์แบบที่ 1 ในสมการ (4.89) ซึ่งทำให้ผลตอบสนองทางความถี่ เสถียรภาพของวงจร และเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรวอร์คโวลเซอร์แบบที่ 2 ในรูปที่ 4.48 เหมือนกับแบบที่ 1 ในรูปที่ 4.41

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ควรคัดลอกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงงานต้นฉบับทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 รูปที่ 4.49 แสดง Sensitivity ของอิลิเมนต์  $K$

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

จากสมการ (4.101) ถ้าสมมติให้  $\alpha$  มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 จะได้ค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K แสดงดังในรูปที่ 4.49 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ต่ำที่  $\omega = 0$  ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง และในช่วงความถี่สูงที่  $\omega = \infty$  ค่าเซ็นซิวิตีของ K จะมีค่าเท่ากับ  $(2\alpha+1)/(\alpha+1)$  และเมื่อเปรียบเทียบวงจรอิควอไลเซอร์แบบที่ 2 ในรูปที่ 4.48 กับวงจรอิควอไลเซอร์แบบที่ 1 ในรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าวงจรอิควอไลเซอร์แบบที่สองมีค่าเซ็นซิวิตีของอิลิเมนต์ K ต่ำกว่าวงจรอิควอไลเซอร์ในแบบแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบและการประยุกต์ใช้งาน

5.1 การทดสอบวงจรแอกทีฟที่พัลส์ทริบิวท์อาชี

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

การสเกลทางความถี่จะมีผลต่อการเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์รีแอคทีฟ เช่น C และ L เท่านั้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์จะมีค่าแปรตามความถี่ และเพื่อที่จะให้อิมพีแดนซ์คงที่การเปลี่ยนแปลงความถี่  $\omega$  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

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

ทำการสเกลทางขนาดโดยคูณด้วยค่า  $K_m$  จะได้

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

สรุปรวมผลของการสเกลทางความถี่และทางขนาดที่มีผลต่ออุปกรณ์พาสซีฟได้ดังนี้

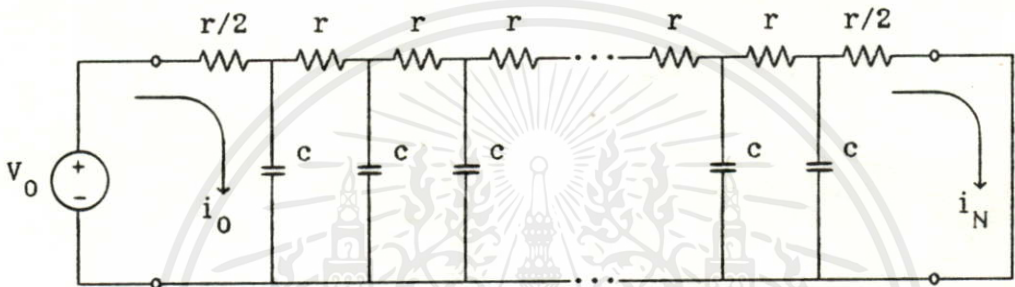
$$C_{new} = \frac{1}{K_m K_f} C_{old} \quad \dots(5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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 สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของเน็ตเวิร์กแบบลัมด์อาซี้ตามที่แสดงในรูปที่ 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  $Z_1 = r/2$ ,  $Z_2 = 1/cS$  และกระแสในกรณีเอาท์พุทลัดวงจรสามารถเขียนได้ใหม่คือ

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

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

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

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

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

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

และ

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{-cS}{\dots(5.9)}$$

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

จากสมการ (5.4) สามารถหาโพลโดยกำหนดให้

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

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

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

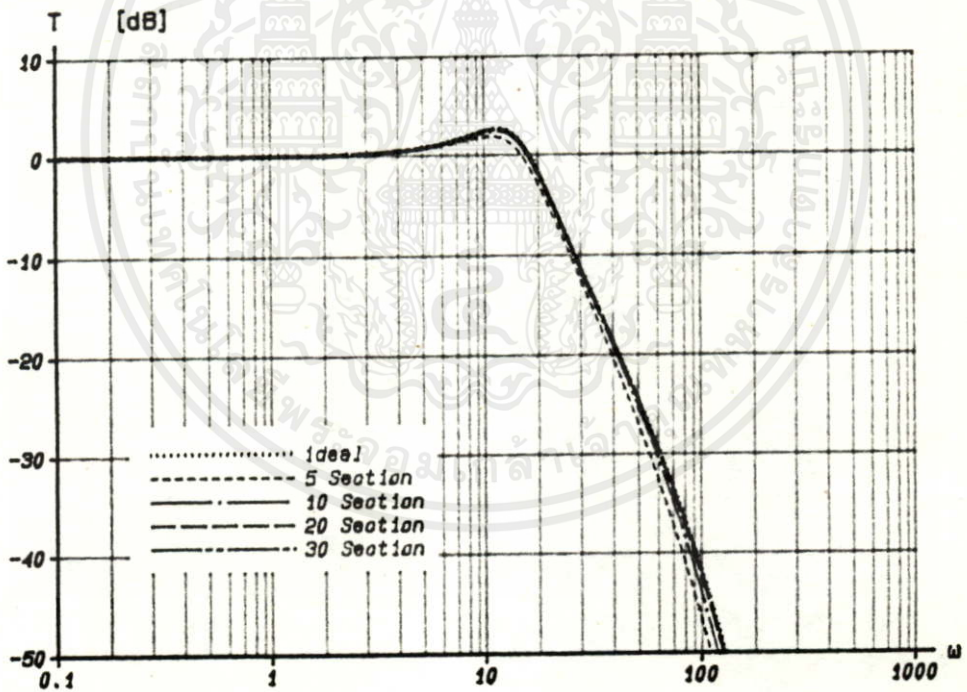
และจะได้ค่ารากคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

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

เมื่อ  $K = 0, 1, \dots, N$

จะเห็นได้ว่าการประมาณดิสรีวิวิท้อชีด้วยเน็ตเวิร์กแบบลัมด้อชี ค่ารากที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนเซคชั่นคือจะมีค่ารากทั้งหมดเท่ากับ  $N+1$  โดยมีค่ารากเริ่มต้นอยู่ใกล้แกน  $j\omega$  และค่ารากต่อมาจะห่างออกจากแกน  $j\omega$  ไปตามลำดับ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับค่ารากของดิสรีวิวิท้อชี และเนื่องจากค่ารากของดิสรีวิวิท้อชีมีลักษณะกระจายออกเหมือนอนุกรมเลขคณิตตามที่กล่าวมาแล้ว ฉะนั้นค่ารากที่มีผลกับคุณลักษณะของวงจรจึงเป็นค่ารากช่วงเริ่มต้นซึ่งจะอยู่ใกล้กับแกน  $j\omega$  และการที่จะให้ได้รากช่วงเริ่มต้นจำนวนเท่าใดจะขึ้นอยู่กับจำนวนเซคชั่นของเน็ตเวิร์กแบบลัมด้อชีที่นำมาต่อเข้าด้วยกัน จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบแอกทีฟดิสรีวิวิท้อชีแบบที่ 1 ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อใช้วิธีประมาณ URC ด้วย Lumped RC โดยใช้จำนวนเซคชั่นเท่ากับ 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 จำนวนเซคชั่นตั้งแต่ 10 ขึ้นไปค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับของ URC โดยเมื่อใช้จำนวนเซคชั่นเท่ากับ 30 ค่าที่ได้ใกล้เคียงมาก ซึ่งตามในรูปจะทับเส้น Ideal ของ URC ฉะนั้นในการทดลองตัว URC จะ

ใช้โครงสร้างของเน็ตเวิร์กแบบลัมต์อาซีตามที่แสดงในรูปที่ 5.1 โดยต่อร่วมกัน 30 เซกชั่น โดยที่ค่าความต้านทานทั้งหมด  $R=rN$  และค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด  $C=cN$  เมื่อ  $N$  เป็นจำนวนเซกชั่น

จากวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอททิวเอชันที่ 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 ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำแบบแอททิวเอชันที่ 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

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

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

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

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

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

จากวงจรกรองความถี่สูงแบบแอททิวเอชันที่ 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

สำหรับวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเหมือนกันจะได้

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

เมื่อทำการสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

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

สำหรับวงจรกรองความถี่สูงแบบที่ 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

ส่วนวงจรอควิลเซออร์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีแบบที่ 1 และ 2 ตามในรูปที่ 4.41 และ 4.48 ตามลำดับ ซึ่งมีทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันเหมือนกัน เมื่อกำหนดให้อัตราขยายมีค่า  $K = 1$  สมมติต้องการให้ยกหรือลดระดับที่ความถี่สูงเท่ากับ 2 dB ซึ่งจะได้ค่า  $\alpha = 3.85$  และสเกลความถี่ไปที่ 5 KHz จะได้

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

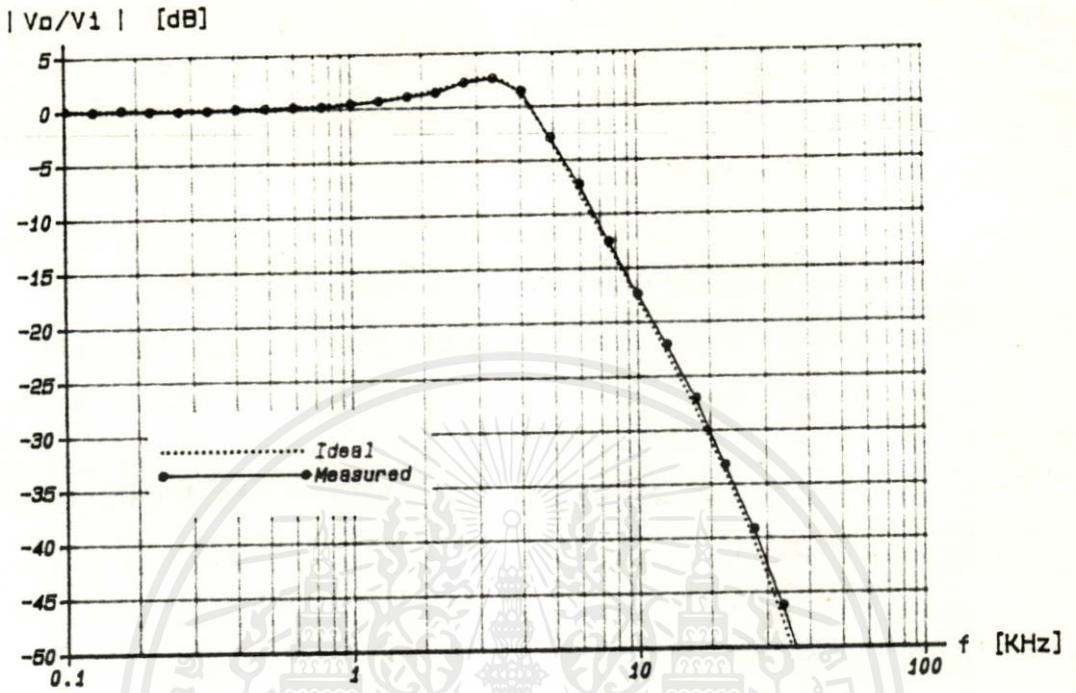
เมื่อสเกลทางขนาดแล้วจะได้ค่าอุปกรณ์คือ

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

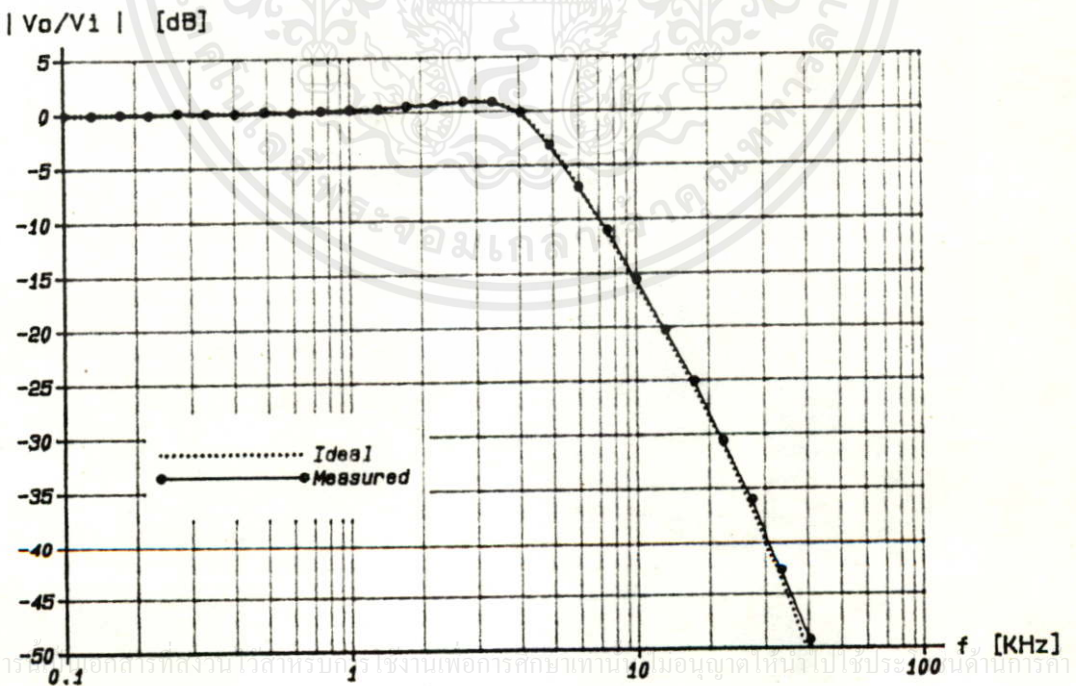
ซึ่งจะได้ค่าผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรอควิลเซออร์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีแบบที่ 1 และ 2 แสดงดังในรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบวัดค่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีตามที่ได้แสดงไว้แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติมาก สำหรับการทดลองเช่นชีวิติตีของวงจร จากวงจรอควิลเซออร์แบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีแบบที่ 2 ตามในรูปที่ 4.48 เมื่อสมมติต้องการให้ลดระดับที่ความถี่สูงเท่ากับ 2 dB ที่ได้ค่า  $R_1 = 63.7 \text{ K}\Omega, C_1 = 500 \text{ pF}, R_2 = 245 \text{ K}\Omega, C_2 = 130 \text{ pF}$  การทดลองจะสมมติให้ค่าอิลิเมนต์ต่าง ๆ คือ R และ C แต่ละตัวมีความคลาดเคลื่อน +10 % ผลที่ได้จากการวัดผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่แสดงดังในรูปที่ 5.13 และจากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาซีที่ได้จะมีเช่นชีวิติตีของอุปกรณ์ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



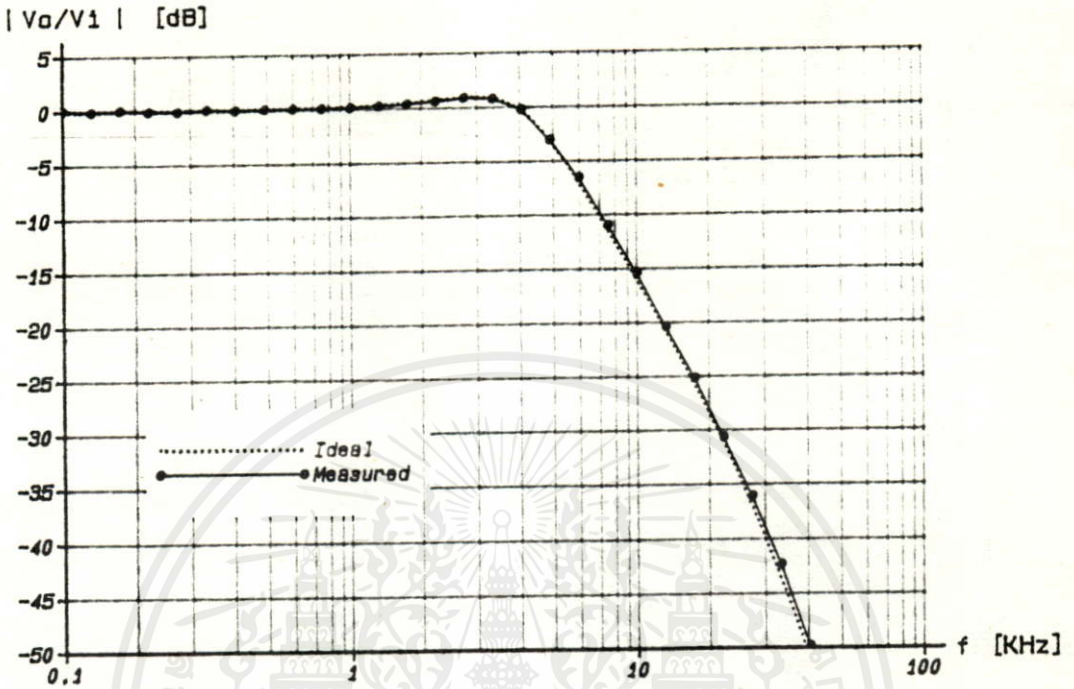
รูปที่ 5.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 1



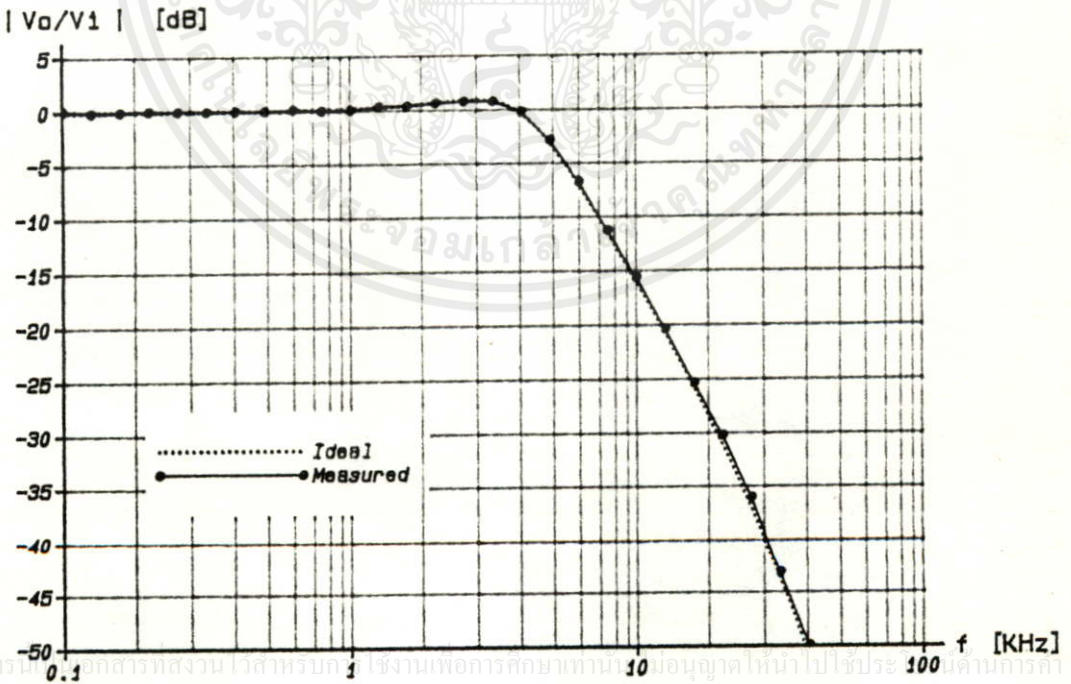
รูปที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม ลึกลงทั้งนี้ให้คัดลอกเพื่อการศึกษา และต้องระบุชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาขอใช้

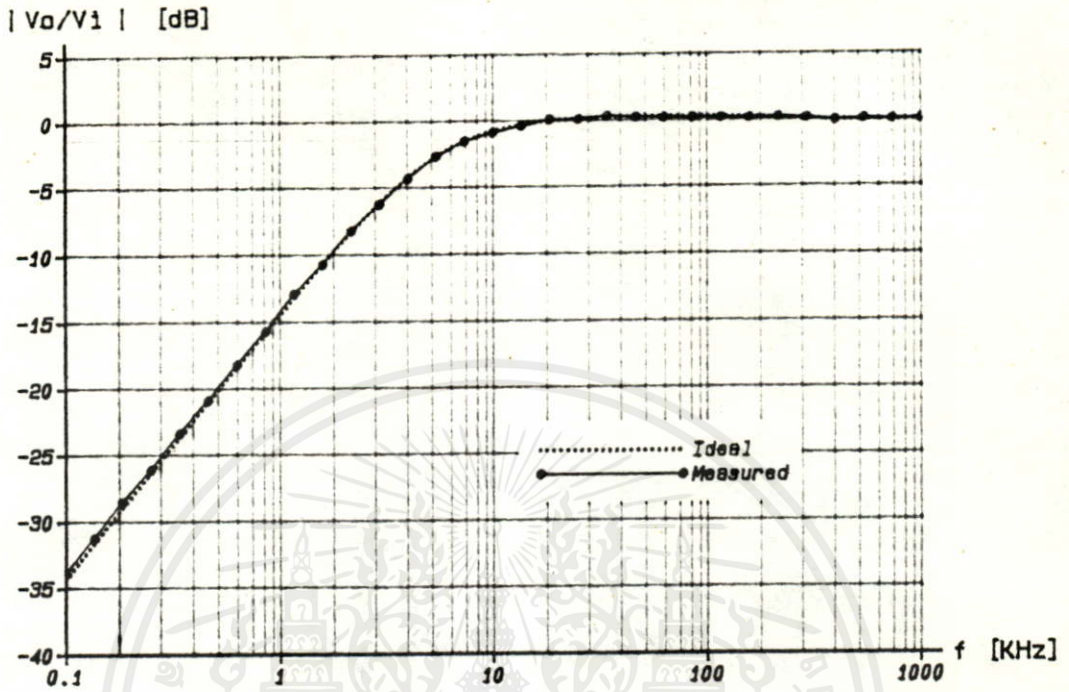


รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 3

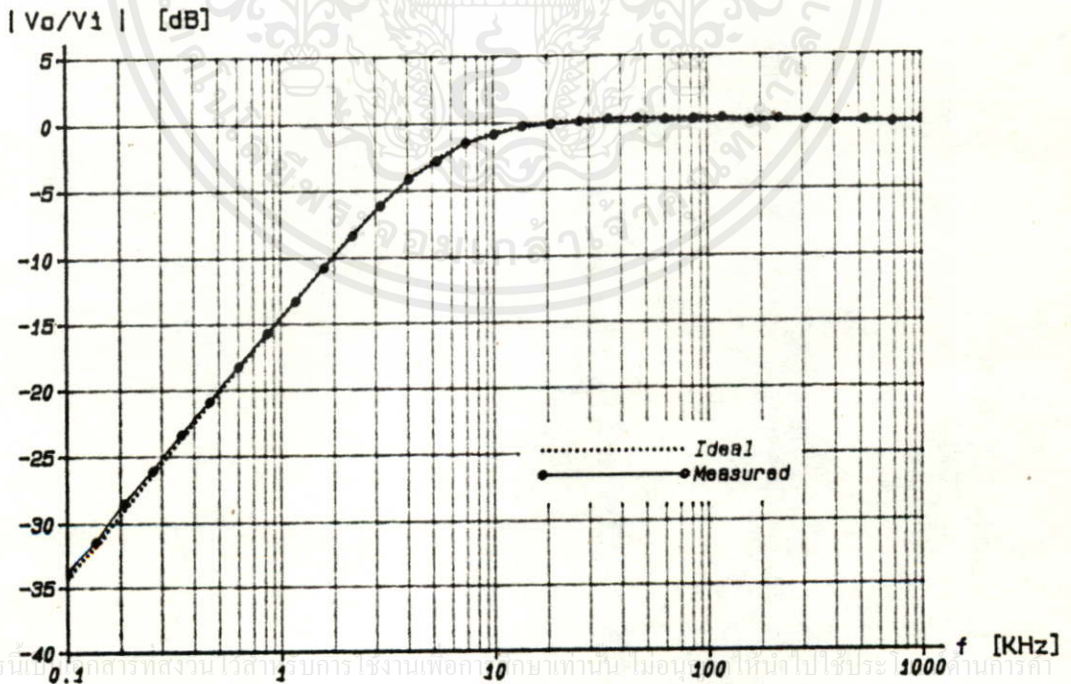


เอกสารนี้จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการศึกษาทางไกล มอนิเตอร์ให้มาใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษา

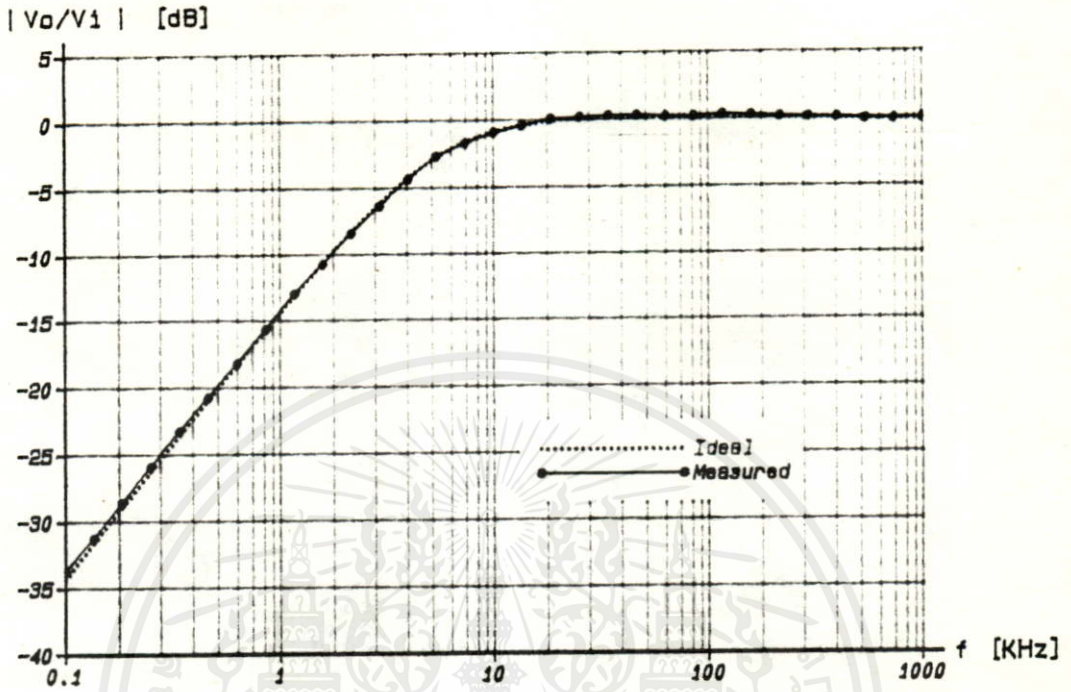
รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 4



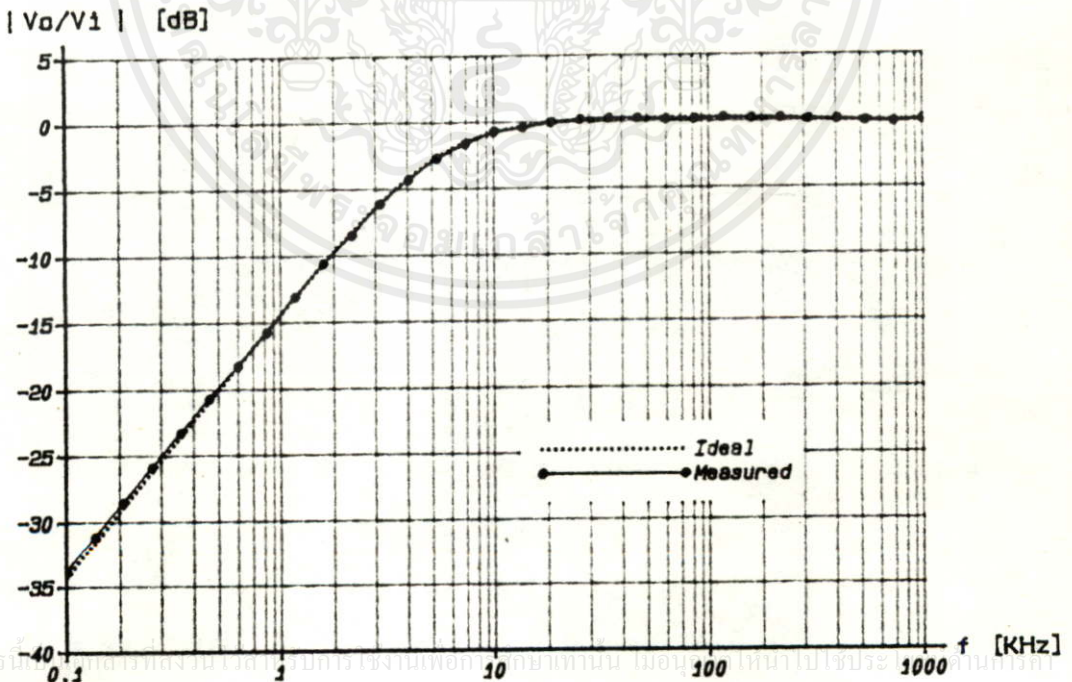
รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 1



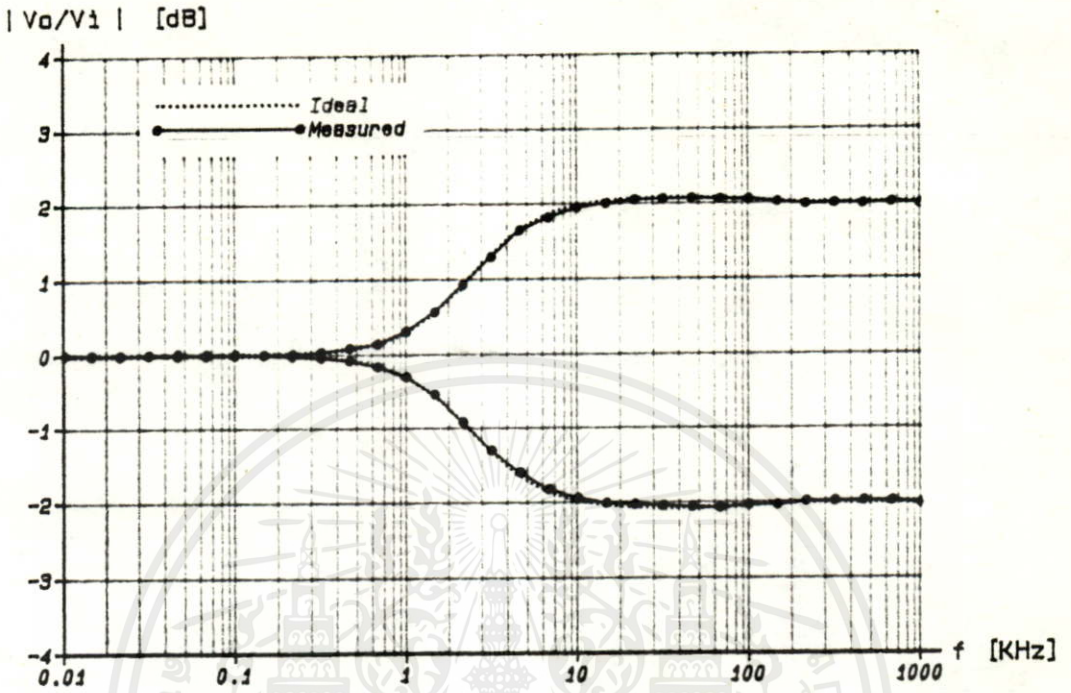
รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2



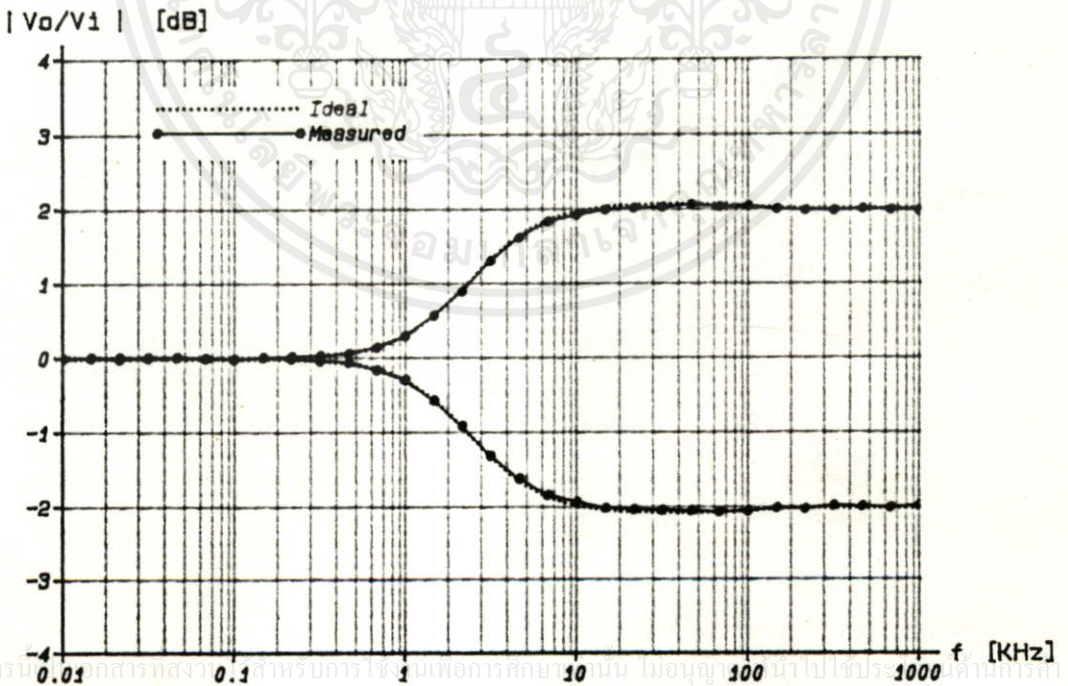
รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 3



รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรรองความถี่สูงแบบที่ 4

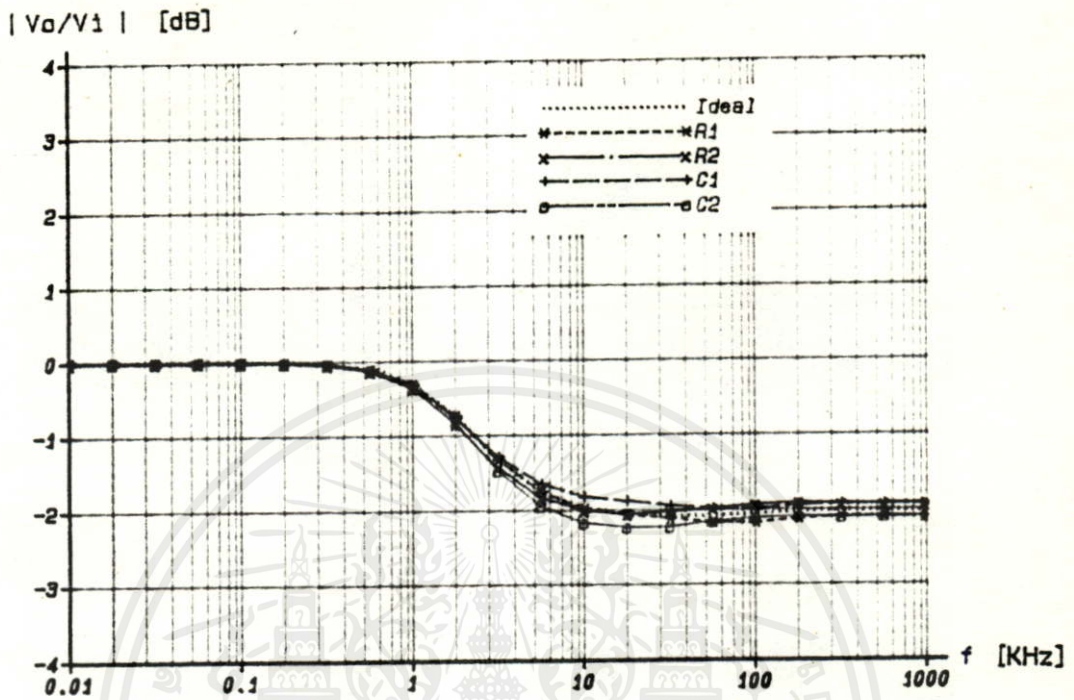


รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิลโลสโคปแบบที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่ได้จากวงจรออสซิลโลสโคปแบบที่ 2

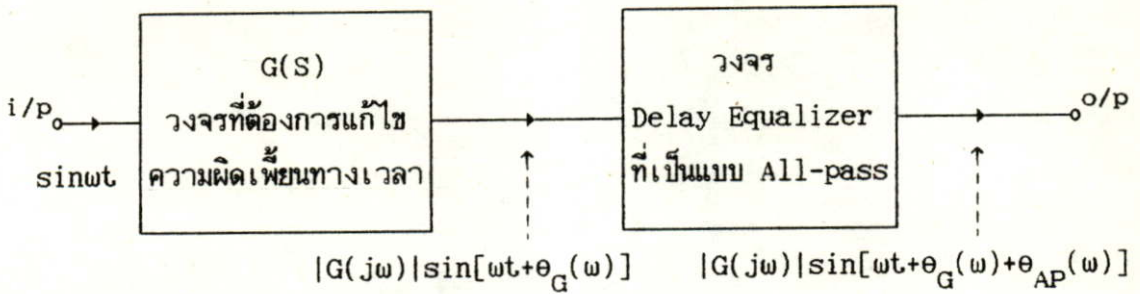


รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดได้จากวงจรอควไลเซอร์แบบที่ 2 เมื่อค่าอิมพีแดนซ์  $R_1, R_2, C_1, C_2$  มีความคลาดเคลื่อน +10 %

### 5.2 การออกแบบวงจรดีเลย์อควไลเซอร์ (Delay Equalizer)

ในระบบการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคม เช่น ระบบรับส่งของสัญญาณโทรทัศน์และพัลส์ทรานส์มิสชัน (Pulse Transmission) เรามีความจำเป็นที่จะต้องชดเชยทั้งทางเฟสและทางขนาดของสัญญาณ โดยทำให้เฟสที่ได้เป็นเชิงเส้นให้มากที่สุดตามที่ต้องการในช่วงทรานส์มิสชันแบนด์ (Transmission Band) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือทำให้กรุปดีเลย์ (Group Delay) คงที่นั่นเอง ในบทความนี้จะเสนอหลักการในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อควไลเซอร์ เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาเพื่อให้ได้กรุปดีเลย์คงที่ [2] โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยอิตอเรท (Iterate) ในการหาคำตอบ ซึ่งเน็ตเวิร์กฟังก์ชันที่ได้จะต้องเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้หมดทุกความถี่ (All-pass Network) และทรานส์เฟอว์โคเอฟฟิเคชันของมันเป็นฟังก์ชันที่มีซีโรอยู่ทางซีกขวา และมีโพลอยู่ทางซีกซ้าย ของแกนอิมเมจินารี (Imaginary Axis) ใน S-Plane

การแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลากระทำได้โดยการนำเอาวงจรดีเลย์อควไลเซอร์แบบ All-pass ที่สร้างขึ้นมาต่อคาสเคดเข้ากับวงจรที่ต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาตามในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงการนำดีเลย์อีควอลไลเซอร์ไปใช้งานร่วมกับวงจร

การออกแบบดีเลย์อีควอลไลเซอร์กำหนดให้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน

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

โดยที่ P(S) เป็นเซอร์วิทซ์โพลีโนเมียล

เมื่อเขียนให้อยู่ในแกนของความถี่ (Real Frequency Axis) จะได้

$$H(jw) = \frac{M e^{j\theta}}{P(jw)} = \frac{P(-jw)}{P(jw)} \quad \dots(5.12)$$

เมื่อ M และ  $\theta$  เป็นขนาดและเฟสตามลำดับ

โดยที่  $|P(jw)| = |P(-jw)|$

และ  $-\arg P(jw) = \arg P(-jw)$

จากสมการ (5.12) จะได้  $M = 1$  และ  $\theta = -2 \arg P(jw)$  และเมื่อเขียนเป็นทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันอันดับ (Order) ที่ 2 จะได้

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

ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน H(S) ในสมการ (5.13) ซึ่งอยู่ในรูปความถี่เชิงซ้อน (Complex Frequency) สามารถเขียนตำแหน่งของโพลและซีโรว์ใน S-Plane แสดงได้ดังในรูปที่ 5.15

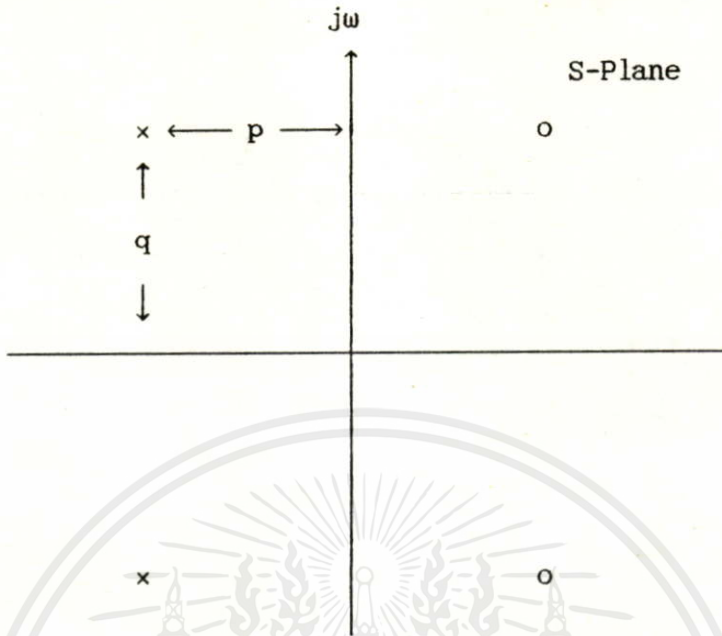
จากทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันในสมการ (5.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

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

ค่าของเฟสในสมการ (5.14) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น | อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ๓ ไม่ว่าการฉ้อโกงทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง (P) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งโพลและซีโรของ All-pass Transfer Function อันดับที่ 2

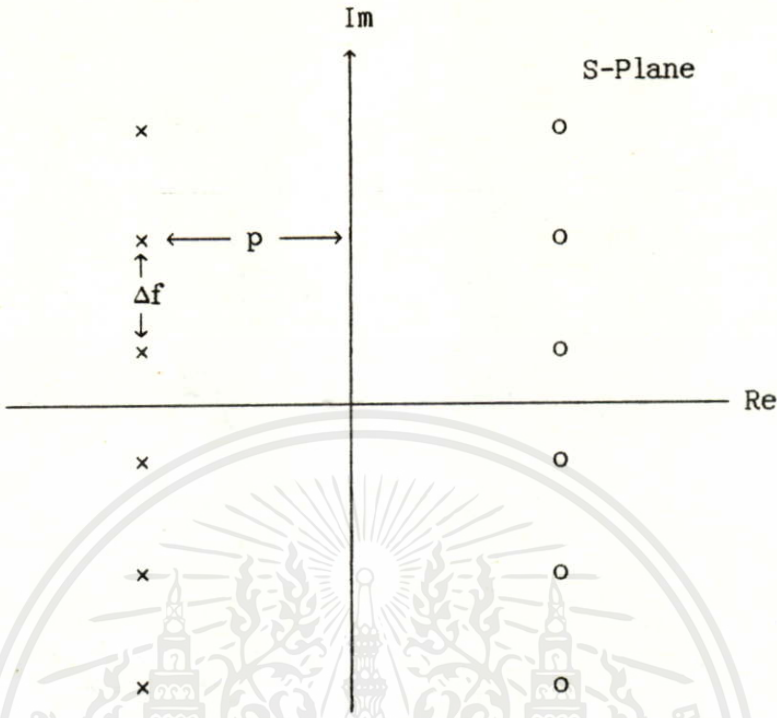
จากสมการ (5.15) ค่ากรูฟต์เลียสามารถเขียนได้คือ

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

จากสมการ (5.16) จะเห็นได้ค่ากรูฟต์เลียที่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของโพลหรือซีโรใน S-Plane คือตัวแปร  $p$  และ  $q$  จะเน้นการประมาณเน็ทเว็กร์ฟังก์ชันเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาของวงจรที่ต้องการนั้นก็คือการบังคับค่าตำแหน่งของโพลหรือซีโรที่ตที่สุด ในวงจรดีเลย์อควอไลเซอร์ เพื่อให้ได้ผลรวมของกรูฟต์เลียที่ไดคองที่ ซึ่งจำนวนของโพลหรือซีโร (อันดับของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน) ขึ้นอยู่กับช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ต้องการและขนาดค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ได้ในกรูฟต์เลียช่วงนั้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 แสดงการกำหนดค่าเริ่มต้นของ โพลและซีโรว์

ช่วงระยะห่างระหว่างโพลหรือซีโรว์นั้น สามารถกำหนดได้จากช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ต้องการกับจำนวนเซคชันของ All-pass อันดับที่ 2 คือ

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

จากรูปที่ 5.16 จะได้ผลรวมของกรูฟตี้อยู่คือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงานเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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

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

และจะได้ระยะห่างของโพลหรือซีโรกับแกน Real คือ

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

โดยที่  $i$  เป็นลำดับที่ของวงจร All-pass แต่ละชุด (Section)

ตำแหน่งของโพลหรือซีโรในเน็ตเวิร์กฟังก์ชันอันดับที่ 2 ที่ประมาณขั้นนั้น จะมีผลต่อกรุปดีเลย์ คือ ถ้า  $p$  มีค่าน้อยจะทำให้ยอดของกรุปดีเลย์มีค่าสูงและมีแบนด์วิธที่แคบ และถ้า  $p$  มีค่ามากจะทำให้ยอดของกรุปดีเลย์มีค่าต่ำและมีแบนด์วิธที่กว้าง ส่วนตัวแปร  $q$  จะมีผลต่อแกนทางความถี่คือ จะเป็นตำแหน่งของความถี่ ณ. ที่จุดยอดของกรุปดีเลย์นั้น จากค่าประมาณที่ได้จะเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อให้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ในการหาค่าต่อไป ซึ่งถ้าค่าเริ่มต้นที่หิมค่าใกล้เคียงกับค่าโพลหรือซีโรที่ต้องการก็จะทำให้จำนวนครั้งในการวิเคราะห์น้อยลง ขั้นตอนต่อไปเริ่มจากการกำหนดให้  $D$  เป็นผลรวมของกรุปดีเลย์ทั้งหมด คือ ของวงจรดีเลย์อิควอไลเซอร์ และวงจรที่ต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลา และมีค่าเฉลี่ยคงที่เป็น  $D_0$  ด้วยจุดสูงสุดและต่ำสุดเปลี่ยนแปลงจากค่านี้นเท่ากับ  $\pm \epsilon/2$  ฉะนั้นที่ความถี่ใด ๆ สมมติให้เป็น  $j$  จะได้

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

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

ค่าผลรวมของกรุปดีเลย์ที่กำหนดจากค่าเริ่มต้นนั้นจะมีความคลาดเคลื่อน สมมติให้เป็น  $\Delta D$  ฉะนั้นจากสมการ (5.20) จะเป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ผลรวมของกรูฟด์ิเลขทั้งหมด  $D$  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  $\Delta D$  สามารถหาอนุพันธ์ได้เมื่อกระจายออกเป็นอนุกรมโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์หลายตัวแปรจะได้

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

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  $m$  สมการของวงจรวจรดีเลย์อีควอลไลเซอร์ ที่ความถี่ใด ๆ จะได้ผลต่างของกรูฟด์ิเลข  $\Delta D_j$  และนำไปหาความสัมพันธ์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของ  $(\Delta p_i, \Delta q_i)$  ในโคออดิเนทซึ่งจะมีคุณสมบัติของการลู่อู่เข้าที่หลักการเบื้องต้นของวิธีนิวตันอิตเดอเรชันก็คือใช้เทย์เลอร์กระจายแต่ละสมการออกเป็นอนุกรม เมื่อตัดเทอมที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งออกแล้วจะกลายเป็นการหารากของระบบสมการเชิงเส้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

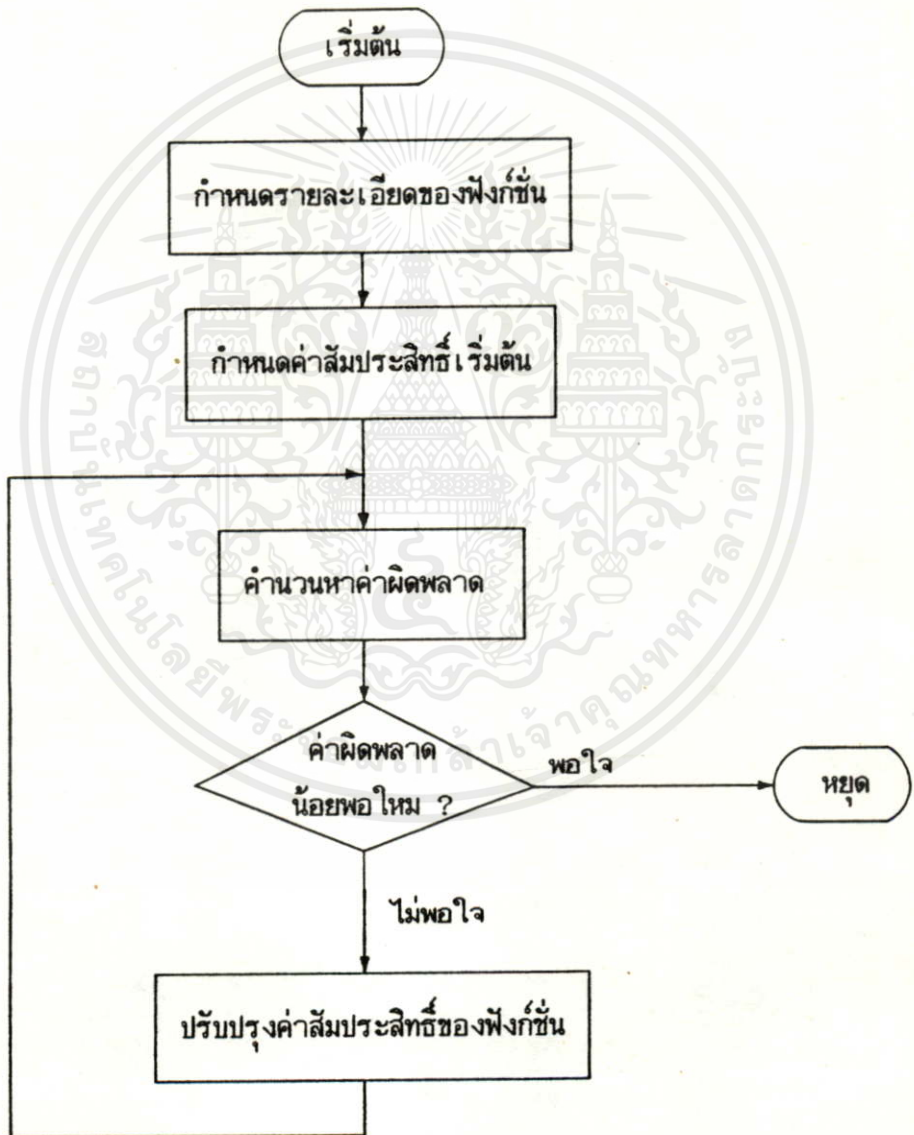
สมการ (5.22) เป็นสมการเชิงเส้นที่จะหาค่าของ  $\Delta p_i$  และ  $\Delta q_i$  เพื่อปรับปรุงค่าของ  $p_i$  และ  $q_i$  ใหม่ แล้วนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าผลรวมของกริฟต์เลย์ และจะได้ค่า  $\Delta D_j$  น้อยลงเรื่อย ๆ โดยจะกระทำซ้ำหลายหนจนกระทั่ง  $\Delta D_j$  มีค่าเป็นศูนย์ ในทางปฏิบัติกระบวนการจะกระทำจนกว่าจะได้

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

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

เมื่อ Tol เป็นค่าตรวจสอบการลู่เข้าที่ยอมรับได้ (Tolerance)

จากเซตของสมการที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ามีจำนวนของตัวแปรทั้งหมดเท่ากับ  $2n + 3$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนเน็ทเวิร์กของวงจร All-pass อันดับที่สองที่มีตัวแปรคือ  $p_i$  และ  $q_i$  และตัวแปรที่เหลือคือ  $D_0$ ,  $\epsilon$  และช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ใช้ ถ้าวงจรดีเลย์อิกควอลไลเซอร์ที่ออกแบบมีช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่กว้างและต้องการให้มีค่าคลาดเคลื่อน ( $\epsilon$ ) ที่น้อย ก็จะต้องใช้จำนวนอันดับ (Order) ของเน็ทเวิร์กที่สูง ส่วนค่าเฉลี่ยคงที่ของกรุปดีเลย์ ( $D_0$ ) นั้นถ้ามีค่าน้อยก็ จะทำให้ช่วงแบนด์วิธของความถี่ที่ได้กว้างขึ้น และอาจทำให้มีค่าคลาดเคลื่อน ( $\epsilon$ ) ที่มากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.17 โพลีชาร์ตแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์ของเน็ทเวิร์กฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อิกควอลไลเซอร์

แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับวงจรที่เราต้องการแก้ไขความผิดเพี้ยนทางเวลาว่ามีความผิดเพี้ยนมากน้อยเพียงใด ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีความสัมพันธ์ต่อกันและสามารถเขียนเป็นโปรแกรมเพื่อหาค่าตัวแปรหรือสัมประสิทธิ์ของเน็ตเวิร์กฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อิกควอลไลเซอร์ได้ดังแสดงเป็นโพลีชาร์ทในรูปที่ 5.17 และมีรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก

การทำงานของโปรแกรมเพื่อหาค่าผิดพลาดจะมี 2 ช่วง คือ ในตอนแรกจะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันจากค่าสัมประสิทธิ์เริ่มต้น เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของกรูฟตีเลเย์ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจึงจะคำนวณหาจุดสูงสุดและต่ำสุดของผลรวมกรูฟตีเลเย์ทั้งหมด และปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันใหม่เพื่อให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

### 5.3 การประยุกต์ใช้งานวงจรอิกควอลไลเซอร์ เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณโครมิกแนชต่อ ลูมินแนนซ์ ในระบบการส่งสัญญาณภาพของโทรทัศน์

ในระบบการส่งโทรทัศน์สีนั้นสัญญาณภาพรวมจะถูกส่งผ่านวงจรต่างๆ รวมทั้งสายส่งก่อนที่จะถูกส่งออกอากาศ ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับผลตอบสนองของความถี่ (Frequency Response) ของสัญญาณภาพที่ความถี่สูงคือ ทำให้สัญญาณโทรทัศน์มีอัตราขยายทางขนาดของสัญญาณโครมิกแนชไม่เท่ากับของสัญญาณลูมินแนนซ์ ขณะเดียวกันอาจจะทำให้สัญญาณโครมิกแนชถูกหน่วงเวลาต่างกับสัญญาณลูมินแนนซ์ ดังนั้นที่ปลายทางด้านรับจะเกิดผลตอบสนองที่ไม่คงที่ (Non Flat Response) ขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้สัญญาณสีผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเราสามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณมอดดูเลทไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์ โดยการป้อนไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์เข้าที่อินพุทของวงจรขยายสัญญาณภาพ แล้วสังเกตสัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากออสซิลโลสโคป การใช้ไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์จะให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าพัลส์สี่เหลี่ยม และมีความไวต่อความผิดเพี้ยนของอัตราขยายและดีเลย์ ดังนั้นไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์จึงถูกนำมาใช้ทดสอบอยู่เสมอ โดยสมการของสัญญาณดังกล่าวเขียนได้ว่า

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

โดยที่  $\omega_c$  เป็นขั้วแคเรียร์ของสัญญาณสี ซึ่งเท่ากับ  $2\pi \times 4.43$  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 ของไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์

ในการส่งสัญญาณทดสอบมอดดูเลทไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์ผ่านระบบซึ่งมีผลต่อความผิดเพี้ยนของสัญญาณสีทั้งทางด้านขนาดและเวลานั้น ค่าเอาต์พุทจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_0(t) = \frac{1}{2} \left( f_1(t) \cos \omega_c t + f_2(t) \sin \omega_c t + f_3(t) \right) \quad \dots(5.28)$$

เมื่อ

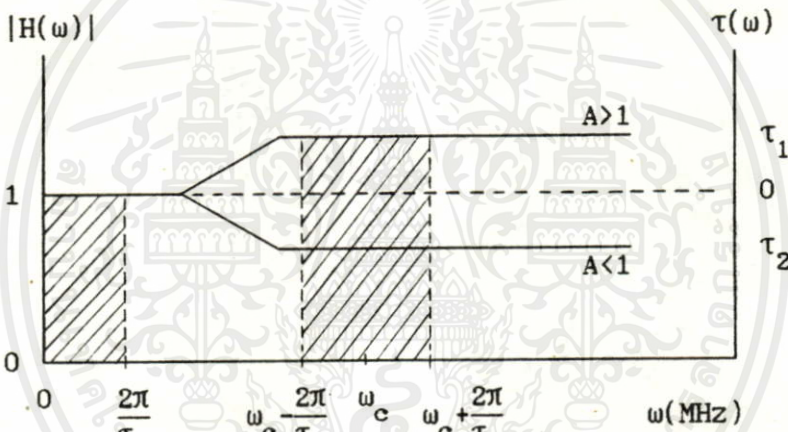
$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_r(\omega + \omega_c) \cos \omega t \, d\omega - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) H_i(\omega + \omega_c) \sin \omega t \, d\omega$$

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร  
 ไม่ควรพิมพ์ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเอกสารต้นฉบับทุกครั้ง

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

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

การแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลูมิแนนซ์ทำได้โดยการออกแบบวงจรชดเชยการขยายสัญญาณภาพในย่านความถี่สูง ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบการส่งและในระบบโทรทัศน์ การออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลูมิแนนซ์ เราสามารถใช้วงจรอิกควอลไลเซอร์แบบแอกทีฟที่พัลส์ทริวิต์อาซีตามในรูปที่ 4.48 การทดสอบเราจะสมมติให้ต้องการลดขนาดของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลูมิแนนซ์เท่ากับ 2 dB ซึ่งคำนวณหาค่า  $\alpha$  ได้จากสมการ (4.90) โดยจะได้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 3.85 เมื่อทำการสเกลทางความถี่แล้วจะได้ค่า  $C_1 = 120$  pF,  $R_1 = 464$   $\Omega$  และ  $C_2 = 31$  pF,  $R_2 = 1788$   $\Omega$  ส่วนการออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทาง ไทม์ดีเลย์ของสัญญาณ โครมิแนนซ์ต่อลูมิแนนซ์ เราสามารถใช้วิธีตามที่กล่าวมาแล้วในเรื่องการออกแบบวงจรดีเลย์อิกควอลไลเซอร์ แต่ในที่นี้จะทดลองโดยแก้ไขความผิดเพี้ยนทาง ไทม์ดีเลย์ของวงจรที่จะใช้นำมาทดสอบตามในรูปที่ 4.48 ซึ่งวงจรดังกล่าวยังมีค่ากรุปดีเลย์ไม่คงที่ในช่วงแบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณภาพรวม คือ มีค่าคลาดเคลื่อนรวมประมาณ 31 ns โดยจะแก้ไขความผิดเพี้ยนทาง ไทม์ดีเลย์ ให้มีกรุปดีเลย์คงที่ในช่วงแบนด์วิธทั้งหมดของสัญญาณภาพ คือ ประมาณ 6 MHz จากสมการ (5.17) ถ้าใช้จำนวนเซกชั่นของวงจร All-pass อันดับที่ 2 เท่ากับ 5 จะได้

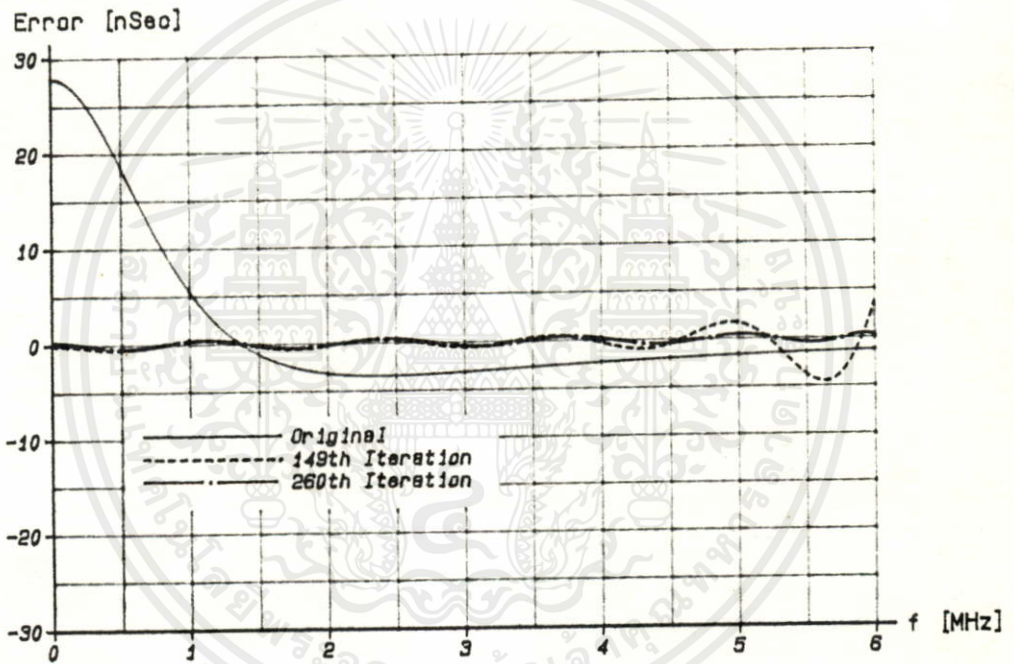
$$\Delta f = \frac{6}{4.5} = 1.333$$

ถ้ากำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อน ( $\epsilon$ ) มีค่าไม่เกิน 5 ns จากสมการ (5.18) จะได้ระยะห่างของตำแหน่งโพลหรือซีโพล คือ

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

และ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ถ้าท่านต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งให้ติดต่อขอทราบก่อนทุกครั้ง ซึ่งทำได้โดยจะลดค่าคู่ของโพลหรือซีโพล  
เพื่อลดจำนวนครั้งของการโอเวอร์ซันให้น้อยลง ซึ่งทำได้โดยจะลดค่าคู่ของโพลหรือซีโพล

โพรที่เข้าใกล้ขอบของแบนด์ (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 ผลลัพธ์ที่ได้จะให้รูปร่างที่เลเย่คงที่ในช่วงแบนด์ด้วย 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)

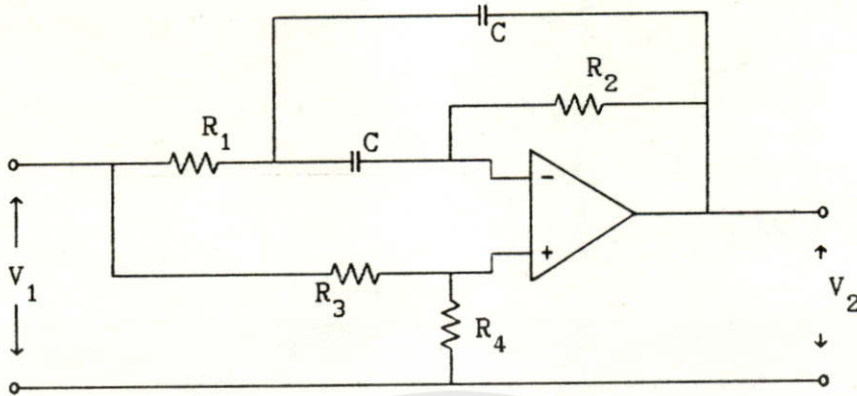


รูปที่ 5.19 แสดงค่าคลาดเคลื่อนเมื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะมิใช่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิง R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>C<sup>2</sup> เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

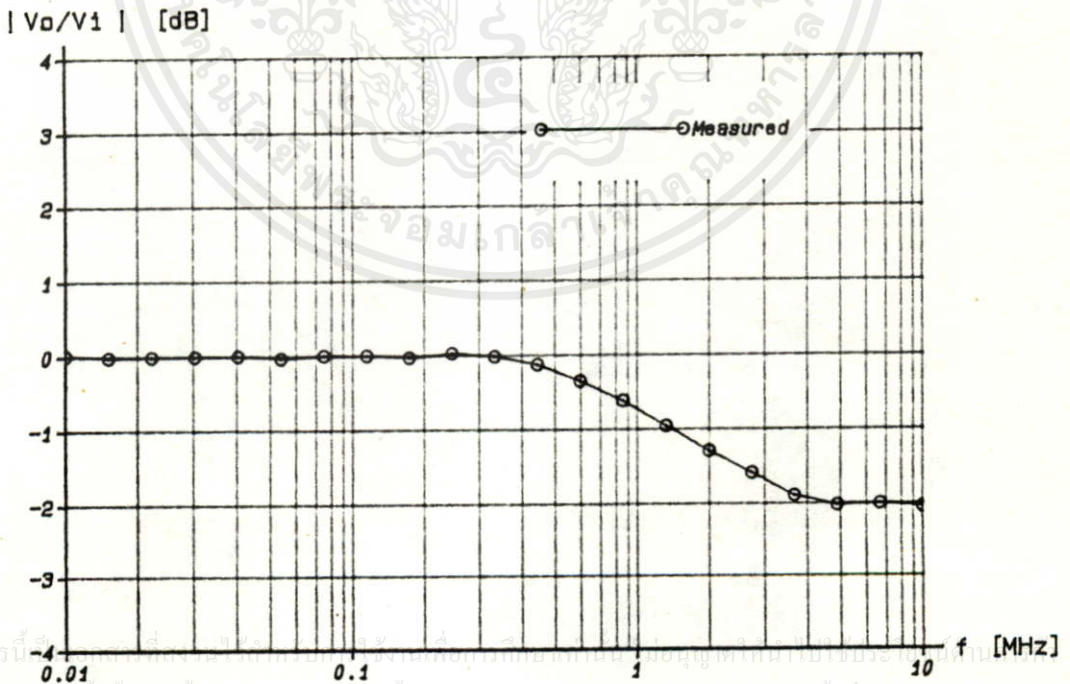


รูปที่ 5.20 วงจร All-pass อันดับที่ 2

จากค่าโพลและซีโรที่ได้จากการออกแบบวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางไทม์ดีเลย์เมื่อแทนค่าลงในสมการ (5.14) และเปรียบเทียบกับสมการที่ได้กับสมการ (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 แสดงผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่วัดได้จากวงจรทดลอง

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

จากวงจรที่ได้ทั้งหมดเรานำมาต่อค่าสเกดกันตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.14 ซึ่งจะได้ผลตอบสนองทางขนาดต่อความถี่ที่วัดค่าได้จากวงจรแสดงดังในรูปที่ 5.21 และเมื่อป้อนสัญญาณมีอดดูลเลข 20 T ไซน์กำลังสองพัลส์ที่ไม่มีความผิดเพี้ยนตามในรูปที่ 5.22(ก) เข้าทางอินพุท ส่วนทางด้านเอาท์พุทจะได้สัญญาณที่ออกมาตามในรูปที่ 5.22(ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.22 แสดงสัญญาณมีอดดูลเลข ไซน์กำลังสองพัลส์ที่ได้จากวงจรทดลอง scale 10 mV/div , 1  $\mu$ S/div.

จากสัญญาณมีอดดูลเลข ไซน์กำลังสองพัลส์ในรูปที่ 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

### บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีจะมีคุณลักษณะทั่วไปที่ดีกว่าและมีขนาดเล็กกว่าวงจรที่เป็นพาสซีฟธรรมดา เมื่อเปรียบเทียบวงจรรองความถี่ในจำนวนอิมพีแดนซ์ที่เท่ากันวงจรแบบแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีจะมีสมรรถนะในการลดทอนสัญญาณที่ดีกว่าด้วย วงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีที่เสนอมีวงจรรองความถี่ต่ำ 4 แบบ, วงจรรองความถี่สูง 4 แบบ และวงจรอิมพีแดนซ์ไอเซอร์ที่ช่วยยกระดับหรือลดระดับสัญญาณที่ย่านความถี่สูง 2 แบบ โดยที่ในแต่ละวงจรจะมีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถกำหนดค่าของคุณลักษณะผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามต้องการ ซึ่งในแต่ละแบบจะมีช่วงเสถียรภาพของวงจรที่ได้ต่างกัน และวงจรแอกทีฟดิสทริบิวท์อาชีที่ได้จะมีค่าความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ต่ำโดยวงจรที่เสนอขึ้นในแต่ละแบบก็จะมีค่าความไวของอุปกรณ์ต่างกัน ส่วนค่า Parasitic Capacitors ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างด้วยอินพุตดิสทริบิวท์อาชีกับ Substrate ของไอซีนั้นในวงจรรองความถี่ต่ำแบบที่ 1, 2, 4, วงจรรองความถี่สูงแบบที่ 2, 4 และวงจรอิมพีแดนซ์ไอเซอร์แบบที่ 1 จะไม่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของวงจร จึงสามารถนำวงจรดังกล่าวไปผลิตขึ้นตามกรรมวิธี LSI ที่มีขนาดเล็กมากได้ ซึ่งวงจรที่เป็นแบบแอกทีฟอาชีโดยทั่วไปเช่น แบบ Sallen & Key ไม่อาจแก้ไขได้ เนื่องจากวงจรดิสทริบิวท์อาชีสามารถนำไปใช้ได้ในช่วงความถี่สูงในปัจจุบันจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาที่จะนำมาทำเป็นชิพ LSI ใช้ในย่าน RF

ส่วนในตอนท้ายได้เสนอหลักในการประมาณฟังก์ชันของวงจรดีเลย์อิมพีแดนซ์ไอเซอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะผลตอบสนองของกรุปดีเลย์ตามที่ต้องการได้ โดยการประมาณค่าเริ่มต้นให้ค่าแห่งของโพลและซีโรขนานไปกับแกน  $j\omega$  ใน S-Plane และใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันมาทำการคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนและปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการอิมพีแดนซ์ในการหาค่าตอบ ซึ่งจากวิธีดังกล่าวนี้ยังสามารถนำไปปรับปรุงเพื่อทำเป็นวงจรอิมพีแดนซ์ไอเซอร์ที่สามารถกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองทางขนาดตามที่ต้องการได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีที่จะนำเอามอดดูเลทไซน์กำลังสองพัลส์ ที่สามารถใช้ในการตรวจสอบความบกพร่องของระบบโทรทัศน่วมกับวิธีการออกแบบวงจรดังกล่าวข้างต้นมาประยุกต์ เพื่อใช้เป็นวงจรที่แก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโคโรมิแนนซ์ต่อลุมิแนนซ์ในระบบการส่งโทรทัศนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. โทศกาล สิทธิโยภาสกุล, กนก เจนจิระพงศ์เวช, M. Teramoto, "การออกแบบวงจรอิควอลไลเซอร์โดยใช้วงจรมอดูลัสทริบิวท์อาชี", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 157-166, 8-9 พฤศจิกายน 2533
2. โทศกาล สิทธิโยภาสกุล, ชาลิต เบญจางคประเสริฐ, กนก เจนจิระพงศ์เวช, "การประมาณเน็ตเวิร์กฟังก์ชันสำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำแบบที่ให้การรูดิเลย์คิงที่", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 202-215, 16-17 พฤศจิกายน 2532
3. โทศกาล สิทธิโยภาสกุล, กนก เจนจิระพงศ์เวช, "วงจกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท-อูลตราสเฟียริคัลโพลีโนเมียล", 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.

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  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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

ออกสาร... Port[\$03BF] := 3; ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่คิด... end; มิได้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

procedure ClearScreen;

```
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
      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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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;
```

```
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);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
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  
ไม่var ch : char; ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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;

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทร. 0-2327-8141



```
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,'R090;');  
    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;
```

```
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;
```

เอกสารนี้เป็น  
ไม่ว่าการมีใคร  
เอกสารนี้เป็น  
สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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;
```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันส่งเสริมการเสงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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 หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        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;
else
begin
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ควรมีใครทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา 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
      begin
        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 หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต กรุณาแจ้งให้ทราบ

```

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;
if not ScreenDisp then
  begin
  Write(OutFile,'PU;'); (*position *)
  if pos<>0 then (* *)
    for i:=1 to fn do (* 1 2 *)
      begin (* *)
        SetLineStyle(i); (* 3 4 *)
        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);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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,';SLO.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;
pl :=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(pl,Y_min+p2*i)
else
if pos<=4 then
begin
if wxy(pl,Y_min+p2*i) then pset(pl,Y_min+p2*i);
end
end
end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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
    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;
      end;
    end;
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา 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;
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
            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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

```
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
  ออกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
  ไม่
  write('R/R1 = '); readln(r_r1);
  write('alpha = '); readln(al);
  write('w(start) = '); readln(ws);
```

```
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;
```

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

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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;
```

เอกสารนี้ end; สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
end; ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

```

        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 ไม่อนุญาติให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลของเอกสารนี้ไปใช้ในการนำไปใช้

```
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;
```

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลนี้ออกไป และต้องสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่รวม Write('Degree of the polynomial = '); ; ริงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามนำไปเผยแพร่ต่อสาธารณชนอีกด้วย

```
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;
    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;
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ทำการฉีกขาดหรือเปลี่ยนแปลงโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
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;

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;
      polmul(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;
      Sound(3000);
      Delay(2);
      NoSound;
      writeln('Result:');
      writeln;
      for i := 0 to n1 do
```



```
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
      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,')');

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

```
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,')');
                                end
                              end
                            end
                          end
                        end
                      end
                    end
                  end
                end
              end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
end
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ควรมีการนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

```
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);
```

```
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;
```

เอกสารนี้ (เอกสารฉบับนี้) เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าการพิมพ์ซ้ำหรือดัดแปลงใดๆ ทั้งสิ้นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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];
```

```
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
```

```
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 Dif(w[Row])>=0 then
              MinMax(0,w[Row],mm,Error)
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากท่านจำเป็นต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```
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  
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา 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;
```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่อาจซ้ำใครทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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;
```

```
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 );
```

```
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);
end;

```

```
sub_c( d1.re , d1.im , 1/a1 , 0 , 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;
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/a1 , 0 , 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;
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/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 + 1/a1 , 0 , cosh(t)*cos(t) , sinh(t)*sin(t) , d2 );
add_c( d2.re , d2.im , -1 -1/a1 , 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/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 + 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;
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/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 + 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 );
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ทำการตีพิมพ์หรือแจกจ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
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;
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/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 );
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 );
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/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;
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/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 );
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 );
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/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;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ใน 'a':begin ลื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
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) , 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 );
```

เอกสารนี้เป็นส่วนราชการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการพิมพ์หรือการเผยแพร่

```

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/le3;
      6 : w := w/le6;
      9 : w := w/le9;
    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;

```

```

          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;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า และต้องเข้าใจถึงจุดที่มีการนำไปใช้

```
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 , dl.re , dl.im , data );
dl := 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( dl.re , dl.im , -al+1 , 0 , d1 );
add_c( d2.re , d2.im , -al , 0 , d2 );
if fi=1 then
div_c( dl.re , dl.im , d2.re , d2.im , data )
else
begin
div_c( dl.re , dl.im , d2.re , d2.im , d1 );
mul_c( data.re , data.im , dl.re , dl.im , data );
end;
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 , dl.re , dl.im , data );
end;
2: begin
w := w/15.92696274;
div_c( 1 , 0 , -w*w+1 , 1.41421356*w , data );
end;
3: begin
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อศูนย์บริการวิชาการ โทร. 0-2562-1111

```
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);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีผู้ใดคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ตัดแปลงเนื้อหา 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;

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆโดยไม่ได้รับอนุญาตให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ function TestForRoot(X, OldX, Y, Tol : real) : boolean; ที่มีการนำไปใช้

```
begin
  TestForRoot := (ABS(Y) <= NearlyZero) or
```

(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;

if (Error = 0) and (Found = false) then

begin

Answer := MidPoint;

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด end; 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);
    '@': 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;
```

```
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) , al , 0 , data );
    end
    else
    begin
      add_c( cosh(t)*cos(t) , -sinh(t)*sin(t) , al , 0 , data );
    end
  end;
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากอธิการบดีของมหาวิทยาลัย

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

```
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);
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนเพื่อการศึกษาวิจัยไปเพื่อประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่หวังสิ่งอื่นใดทั้งนี้ให้มีให้ตีพิมพ์และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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;
```

```
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]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

```
        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'
```

```
        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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าการ BufferReady; งานนี้ให้คัดแปลงเนื้อหา 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-wl)/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
```

```
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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

```
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;
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
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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;
else
if odd(fi) then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า 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);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นโดยอัตโนมัติจากระบบคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามหากมีข้อผิดพลาดหรือข้อสงสัยใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    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;

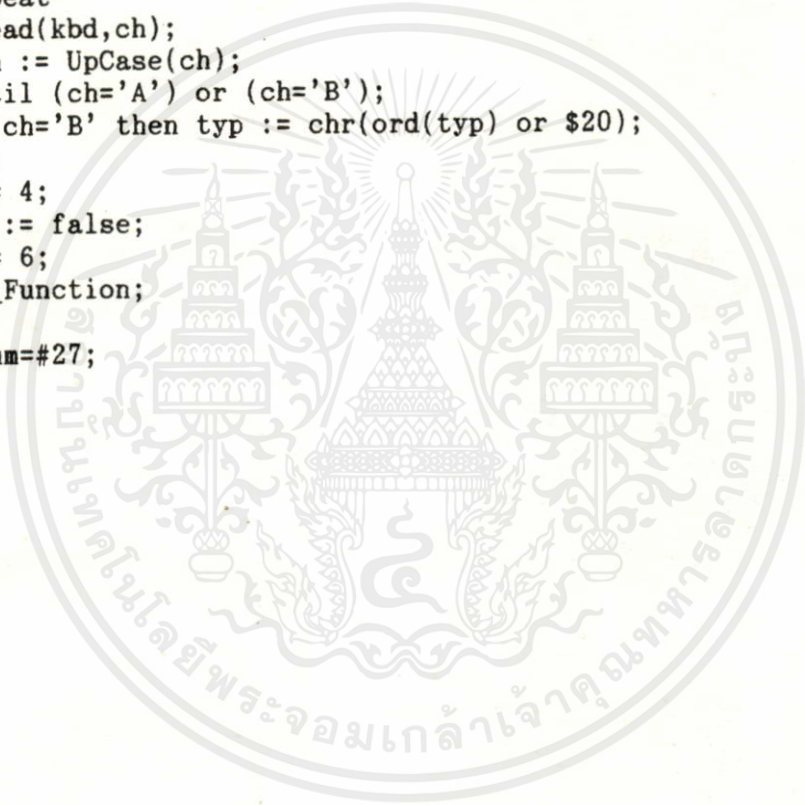
begin
  TextMode;
  AllocaterAMScreen;
  ColorGlb := 255;
  repeat
  ClrScr;
  gotoxy(17,4); write('-----');
  gotoxy(25,5); write('Active distributed RC');
  gotoxy(17,6); write('-----');
  gotoxy(24,9); write('1) Display');
  gotoxy(24,10); write('2) Magnitude Response');
  gotoxy(24,11); write('3) 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  
ไม่ว่าการพิมพ์หรืออื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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 := '@'
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.
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้