

การออกแบบเคเบิลอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดโดยใช้โพลีโนเมียล
แบบเบิร์นสไตน์

DESIGN OF CABLE EQUALIZER FOR GAIN DISTORTIONS BY USING BERNSTEIN
POLYNOMIALS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559
KMITL-2016- EN-M-230-221

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเคเบิลอีควอไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดโดยใช้โพลีโนเมียล
แบบเบิร์นสไตน์

DESIGN OF CABLE EQUALIZER FOR GAIN DISTORTIONS BY USING BERNSTEIN
POLYNOMIALS



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 148714
วันเดือนปี..... 23 พ.ย. 2560

..... 00265379
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-230-221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF CABLE EQUALIZER FOR GAIN DISTORTIONS BY USING BERNSTEIN
POLYNOMIALS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-230-221

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING






KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

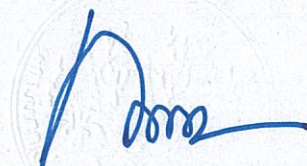
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบเคเบิลอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์
Thesis Title Design of Cable Equalizer for Gain Distortions by using Bernstein Polynomials
นักศึกษา นางสาวขวัญเรือน รัศมี
รหัสประจำตัว 56601448
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-230-221

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
ดร.พิกุลแก้ว	ตั้งติสานนท์	
ผศ.ดร.วันวิสา	ชัชวงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา **ฉบับดี คณะวิศวกรรมศาสตร์** ระเบียบด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ **วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2559** รังที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบเคเบิลอควิลิเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาด
โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

นักศึกษา

นางสาว ขวัญเรือน รัศมี

รหัสประจำตัว

56601448

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

พ.ศ.

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสา ชัชวงษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบเคเบิลอควิลิเซอร์เพื่อแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนทางขนาดในการส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเชียล ได้แก่ สาย RG-6 สาย RG-11 และ สาย RG-213 โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ ความผิดเพี้ยนดังกล่าวสามารถแสดงได้โดยผ่านสัญญาณทดสอบในที่นี้คือสัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์ เมื่อเกิดความผิดเพี้ยนทางขนาดขึ้นในการส่งผ่านระบบจะสังเกตได้ว่าสัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์จะมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการจำลองพบว่าวงจรเคเบิลอควิลิเซอร์ที่ได้นำเสนอสามารถชดเชยความผิดเพี้ยนทางขนาดที่เกิดขึ้นในระบบการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าสัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์จะกลับมามีรูปร่างเหมือนเดิมกับที่ภาคส่งส่งมา ดังนั้นวงจรเคเบิลอควิลิเซอร์ที่ได้ออกแบบสามารถแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนทางขนาดที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยปราศจากผลกระทบทางเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of Cable Equalizer for Gain Distortions by using Bernstein Polynomials
Student	Miss. Kwanruan Rusmee
Stdudent ID.	56601448
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vanvisa Chutchavong

ABSTRACT

This Thesis presents the design of cable equalizer for correcting the gain distortion in the transmission system via the coaxial that RG-6, RG-11 and RG-213 by using the Bernstein polynomials. The pulse test signal is provided in the cable transmission system which is the modulate 20T sine-squared pulse test signal. In addition, the appearance of the gain distortion can be illustrated with the shape of pulse test signal. As the simulation results, the proposed cable equalizer can compensate the gain distortion in the cable transmission system. It can be seen that the shape of pulse test signal is nearly the normal modulate 20T sine-squared pulse. Therefore, the design of video cable equalizer is also proved to be efficient in correcting the gain distortion without degrading its phase.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันวิสา ชัชวงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช ที่ให้คำแนะนำและให้แนวคิดในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ Signal Transmission System ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน รวมถึงให้กำลังใจเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ່านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ขวัญเรือน รัศมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สื่อกลาง.....	3
2.1.1 สื่อกลางประเภทมีสาย.....	3
2.1.1.1 สายแลน.....	3
2.1.1.2 RJ-45.....	4
2.1.1.3 สายโคแอกเชียล.....	5
2.1.2 สื่อกลางประเภทไร้สาย.....	10
2.1.2.1 คลื่นวิทยุ.....	10
2.1.2.2 สัญญาณไมโครเวฟ.....	10
2.1.2.3 แสงอินฟราเรด.....	11
2.1.2.4 ดาวเทียม.....	11
2.1.2.5 บลูทูธ.....	12
2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ.....	13
2.3 ชนิดของความผิดเพี้ยนเชิงเส้น.....	14
2.3.1 ความไม่เท่ากันทางขนาด.....	15
2.3.2 ความไม่เท่ากันทางเวลาประวิง.....	15
2.4 สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์.....	16
2.4.1 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว.....	17
2.4.2 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดียว.....	18
2.5 การคำนวณผลที่ได้จากบ่อนสัญญาณทดสอบในสายโคแอกเชียล.....	19
2.6 ทบทวนงานวิจัย.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล และการออกแบบอิกวอไลเซอร์.....	26
3.1 เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล.....	26
3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่แอนะล็อก โดยใช้เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล.....	30
3.2.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ϵ	32
3.2.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ k	36
3.3 การออกแบบเคเบิลอิกวอไลเซอร์แบบตั้งค่าได้ตามระยะทางของสายเคเบิล.....	38
บทที่ 4 การออกแบบวงจรอิกวอไลเซอร์และผลการทดลอง.....	41
4.1 การออกแบบอิกวอไลเซอร์ขนาดเชิงเส้น.....	41
4.2 ผลการทดลอง.....	46
4.3 เคเบิลอิกวอไลเซอร์.....	55
4.3.1 เคเบิลอิกวอไลเซอร์ชนิด RG-6.....	55
4.3.2 เคเบิลอิกวอไลเซอร์ชนิด RG-11.....	64
4.3.3 เคเบิลอิกวอไลเซอร์ชนิด RG-213.....	74
4.4 การทดสอบเสถียรภาพ.....	82
4.5 บทสรุป.....	83
บทที่ 5 สรุปและแนวทางการพัฒนา.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก ตัวอย่างโค้ดสำหรับการสร้างสัญญาณทดสอบและอิกวอไลเซอร์.....	89
ภาคผนวก ข ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของสายโคแอกเชียล.....	6
2.2 สมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล.....	8
2.3 การลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเชียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต.....	9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างการผิดเพี้ยนของสัญญาณ.....	1
2.1 สายชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ.....	3
2.2 รูปสายชนิดมีฉนวนหุ้ม.....	4
2.3 หัวต่อตัวผู้ RJ-45.....	4
2.4 หัวต่อตัวเมีย RJ-45.....	4
2.5 สายโคแอกเชียล.....	5
2.6 ตัวอย่างสาย RG-6.....	6
2.7 ตัวอย่างสาย RG-11.....	7
2.8 ตัวอย่างสาย RG-58 / U.....	7
2.9 ตัวอย่างสาย RG-59.....	7
2.10 ตัวอย่างสาย RG-213.....	8
2.11 เส้นใยแก้วนำแสง.....	9
2.12 การทำงานของสื่อกลางประเภทไร้สาย.....	10
2.13 การทำงานของสัญญาณไมโครเวฟ.....	11
2.14 แสงอินฟราเรด.....	11
2.15 ดาวเทียม.....	12
2.16 การทำงานของบลูทูธ.....	13
2.17 การจำแนกชนิดของความผิดเพี้ยนแบบเชิงเส้น.....	14
2.18 ความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสี่และสัญญาณสองสว่าง.....	15
2.19 ความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสี่และสัญญาณสองสว่าง.....	15
2.20 การผสมกันระหว่างสัญญาณสี่กับสัญญาณสองสว่าง.....	16
2.21 ความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว.....	17
2.22 ความแตกต่างของความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงอย่างเดียว.....	18
2.23 สัญญาณทดสอบที่ผิดเพี้ยนที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	23
2.24 ผลการตอบสนองทางความถี่.....	24
2.25 การขยายและดีเลย์ที่ 20 dB ของสายเคเบิล.....	24
2.26 ผลการตอบสนองทางความถี่.....	24
2.27 ผลการตอบสนองทางความถี่ของอิกวอไลเซอร์ที่สร้าง.....	25
3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน.....	26
3.2 การแปลงแกนความถี่จาก $\Omega \rightarrow \omega$	28
3.3 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	30
3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	31
3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	31
3.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε	34
3.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε	35
3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K	36
3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K	37
3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K	37
3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน	38
3.13 รูปวงจรถู Bode Type Equalizer ที่ตั้งค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิล	39
4.1 แนวคิดของอิกวอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น	41
4.2 อิกวอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้นในอุดมคติ	41
4.3 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +1 เดซิเบล	46
4.4 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -1 เดซิเบล	47
4.5 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 1 เดซิเบล	47
4.6 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ +1 เดซิเบล	48
4.7 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ -1 เดซิเบล	48
4.8 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +2 เดซิเบล	49
4.9 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -2 เดซิเบล	49
4.10 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 2 เดซิเบล	50
4.11 ผลตอบสนองทางรูปร่างเฟสและดีเลย์ที่ +2 เดซิเบล	50
4.12 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ -2 เดซิเบล	51
4.13 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +3 เดซิเบล	51
4.14 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -3 เดซิเบล	52
4.15 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 3 เดซิเบล	52
4.16 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ +3 เดซิเบล	53
4.17 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ -3 เดซิเบล	53
4.18 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 3 เมื่อเทียบกับรูปในอุดมคติ	54
4.19 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	55
4.20 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	56
4.21 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	57
4.22 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	57
4.23 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	58
4.24 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	59
4.25 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	60
4.26 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	60
4.27 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	62
4.29 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	63
4.30 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	63
4.31 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	64
4.32 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	65
4.33 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	66
4.34 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	66
4.35 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	67
4.36 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	68
4.37 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	69
4.38 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	69
4.39 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	70
4.40 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	71
4.41 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	72
4.42 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	72
4.43 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	73
4.44 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz	74
4.45 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	75
4.46 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz	75
4.47 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	76
4.48 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz	77
4.49 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	78
4.50 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz	78
4.51 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	79
4.52 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz	80
4.53 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	81
4.54 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz	81
4.55 เสถียรภาพที่ใช้ไฮโดรกราฟของมิไฮลอฟ	82

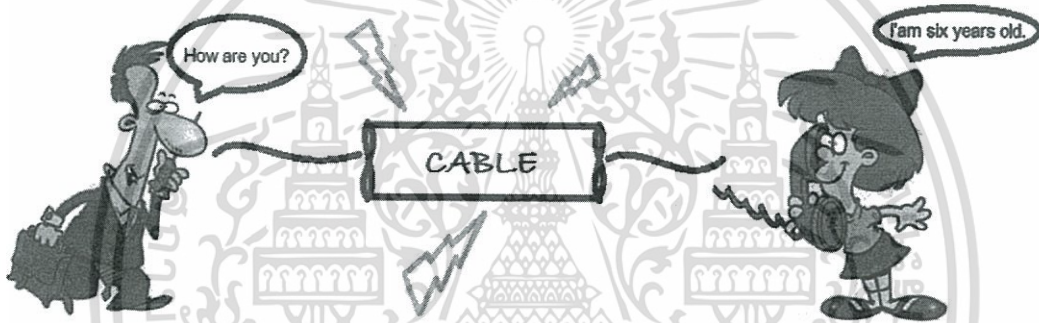
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในระบบสื่อสารจำเป็นต้องมีการส่งสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพผ่านสายเคเบิล (Coaxial Cable) ซึ่งคุณภาพของสัญญาณในการส่งส่วนใหญ่จะเกิดความผิดเพี้ยน เนื่องจากกระบวนการส่งสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 1.1 และตัวอย่างของการเกิดความผิดเพี้ยน เช่น ผลที่ทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และขนาดความกว้างของรูปสัญญาณเพิ่มขึ้น รวมถึงอาจมีสัญญาณอื่นเข้ามารบกวนสัญญาณข้อมูลที่ต้องการส่ง ซึ่งสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพจะมีผลผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับจึงเกิดพัลส์ก้อง (Echo Pulse) เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการผิดเพี้ยนของสัญญาณ

ดั่งนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาและออกแบบอิกควอไลเซอร์โดยใช้เบิร์นสไตน์โพลิโนเมียล (Bernstein Polynomials) ซึ่งวงจรอิกควอไลเซอร์มีคุณสมบัติในการปรับแต่งสัญญาณข้อมูล หรือสัญญาณภาพ ให้มีความสมมูลมากที่สุดตามที่ต้องการ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาวงจรอิกควอไลเซอร์มาออกแบบเป็นวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณในสายเคเบิลตามความยาวของสายเคเบิลที่ต้องการ ส่งผลให้มีความสะดวกในการประยุกต์เพื่อนำมาใช้งานในด้านต่างๆมากยิ่งขึ้น

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. เพื่อแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนในกระบวนการส่งสัญญาณภาพ หรือสัญญาณข้อมูลผ่านสายเคเบิลให้ได้สัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด
2. เพื่อออกแบบวงจรอิกควอไลเซอร์ที่สามารถปรับค่าได้ตามระยะทางของสายเคเบิล
3. เพื่อนำวงจรที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน และปรับระดับสัญญาณต่าง ๆ ให้มีความสมมูลได้ตามความต้องการ เช่น สัญญาณภาพ สัญญาณเสียง สัญญาณข้อมูล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้มีลักษณะการทำงาน โดยมีองค์ประกอบทางซอฟต์แวร์ซึ่งใช้โปรแกรม Matlab ในการออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณทดสอบ โดยสามารถเลือกสัญญาณทดสอบเพื่อความเหมาะสมกับการทดสอบได้ เช่น สัญญาณไซน์ยกกำลังสองพัลส์ สัญญาณ 20T ไซน์ยกกำลังสองพัลส์ สัญญาณ Femto-Second Pulse อาทิ Gaussian Pulse เป็นต้น จากนั้นได้ทำการออกแบบ Cable Equalizer แบบตั้งค่าได้ตามระยะทางของสายเคเบิล โดยใช้วิธีการเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein Polynomials) ซึ่งได้คำนวณค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) แทนลงในสมการ Bode Type Equalizer โดยอาศัยทฤษฎีของ Bode จะได้เป็นวงจรเคเบิลอีควอลไลเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามความต้องการ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์โดยใช้เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลกับสายเคเบิล RG-6 RG-11 และ RG213 ที่ความถี่ 10 MHz 50 MHz และ 100 MHz
2. ออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์โดยใช้เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลกับสายเคเบิล RG-6 RG-11 และ RG213 ที่ความยาวสาย 500 เมตรและ 1 กิโลเมตร

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษานั้นเริ่มจากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกับงานวิจัยในออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์ในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงศึกษาหลักการเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลเพื่อทำความเข้าใจและนำมาใช้ในการออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์โดยใช้เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลกับสายเคเบิลและประมวลผลสัญญาณผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยคือ สื่อกลาง ซึ่งประกอบด้วยสื่อแบบมีสาย และแบบไร้สาย รวมถึงสิ่งบ่งชี้ของสื่อ เช่น สัญญาณรบกวน การลดทอนของสัญญาณและการหน่วงของเวลา อีกทั้งอธิบายถึงทฤษฎีของสายส่งที่ใช้ในการจำลองผลการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.1 สื่อกลาง

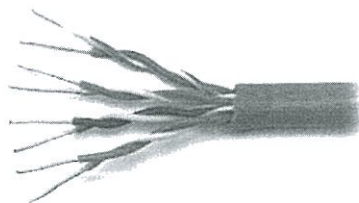
สื่อกลางหรือส่วนเชื่อมต่อ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน สื่อกลางที่ใช้ในการสื่อสารมีหลายประเภทโดยในที่นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สื่อกลางประเภทมีสาย และ สื่อกลางประเภทไร้สาย

2.1.1 สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media) [1-16]

สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media) หมายถึง สื่อกลางที่เป็นสายซึ่งใช้ในการเชื่อมต่อโดยอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์และ อุปกรณ์ในระยะทางที่ห่างกันไม่มากแต่แต่ละประเภทจะแตกต่างกันในด้านของปริมาณข้อมูลที่สื่อกลางตัวนั้น ๆ สามารถผ่านไปได้ในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง

2.1.1.1 สายแลน (Lan Cable)

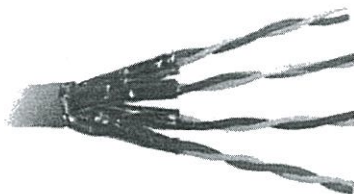
สายแลน คือ สายที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า Switch หรือ HUB สายแลนมีอยู่หลายประเภท แต่แต่ละประเภทจะมีความสามารถในการรับ-ส่งสัญญาณแตกต่างกันออกไป สายแลนเป็นลักษณะสายคู่บิดเกลียว ลักษณะของสายคู่บิดเกลียวแต่ละคู่จะทำด้วยเส้นทองแดง 2 เส้น แต่แต่ละเส้นจะมีฉนวนหุ้มพันกันเป็นเกลียวเพื่อป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทของสายคู่บิดเกลียวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ (Unshielded Twisted Pairs: UTP) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยสายคู่บิดเกลียว 4 คู่ (8 เส้น) เหมาะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ระยะทางไม่เกิน 30 เมตร และมีราคาถูก แต่ถูกรบกวนได้ง่ายและไม่ทนทาน อีกชนิดหนึ่งคือชนิดมีฉนวนหุ้ม



รูปที่ 2.1 สายชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

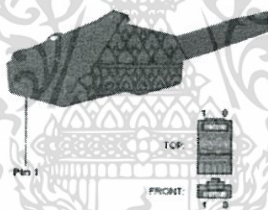
(Shield Twisted Pairs) ประกอบด้วยสายคู่บิดเกลียว 4 คู่ (8 เส้น) ดังรูปที่ 2.2 สายแต่ละเส้นมีฉนวนหุ้มโลหะเพื่อป้องกันการรบกวนจากภายนอก คุณภาพสูงกว่า และราคาแพงกว่าสาย UTP ถูกรบกวนทางไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2.2 รูปสายชนิดมีฉนวนหุ้ม

2.1.1.2 RJ-45

RJ-45 คือ หัวต่อที่ใช้กับสายสัญญาณเชื่อมต่อเครือข่ายแบบสายคู่บิดเกลียว (สายคือหัวต่อที่ใช้กับสายสัญญาณเชื่อมต่อเครือข่ายแบบสายคู่บิดเกลียว (สาย UTP หรือ STP) ตัวผู้ มี 2 ชนิด ได้แก่ หัวต่อตัวผู้ RJ-45 (หรือที่เรียกว่า RJ-45 Connector หรือ RJ-45 Jack Plug) ดังรูปที่ 2.3 เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ที่ปลายสาย UTP มีลักษณะเป็นพลาสติกสีเหลี่ยมคล้ายหัวต่อโทรศัพท์ มีช่องสำหรับเสียบสายที่ด้านหลัง ด้านล่างเรียบ ส่วนด้านบนมีตัวล็อก ถ้าหันหน้าเข้าด้านหน้าของหัวต่อขา 1 จะอยู่ทางด้านซ้ายมือ ในขณะที่ขา 8 จะอยู่ทางขวามือ



รูปที่ 2.3 หัวต่อตัวผู้ RJ-45

หัวต่อตัวเมีย RJ-45 (หรือเรียกว่า RJ-45 Jack Face) มีลักษณะเป็นเบ้าเสียบสำหรับหัวต่อ RJ-45 ตัวผู้ เมื่อมองจากด้านที่จะนำหัวต่อตัวผู้เสียบ ขา 8 จะอยู่ทางซ้าย ส่วนขา 1 จะอยู่ทางขวา หัวต่อตัวเมียจะมีลักษณะเป็นกล่องมีช่องสำหรับเสียบหัวต่อ ด้านในกล่องจะมีขั้วซึ่งจะเป็นส่วนที่เชื่อมกับสายนำสัญญาณ Hub หรือ Repeater อุปกรณ์ที่ใช้เป็นจุดศูนย์กลางในการกระจายสัญญาณ หรือข้อมูล

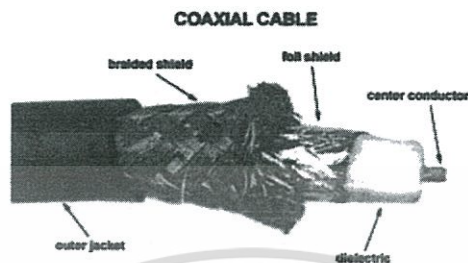


รูปที่ 2.4 หัวต่อตัวเมีย RJ-45

2.1.1.3 สายโคแอกเซียล (Coaxial)

สายโคแอกเซียลดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้ และเป็นที่นิยมมากในเครือข่ายคอมพิวเตอร์สมัยแรก ๆ แต่ในปัจจุบันสายโคแอกเซียล ถือได้ว่าเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายที่ล้ำสมัยสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามยังมีระบบเครือข่ายบางประเภทที่ยังใช้สายประเภทนี้อยู่ โดยข้อดีของโคแอกเชียล คือ ราคาถูก มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ติดตั้งง่าย และมีน้ำหนักเบา แต่ข้อเสียของโคแอกเชียล คือ ถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ง่าย ระยะทางจำกัด



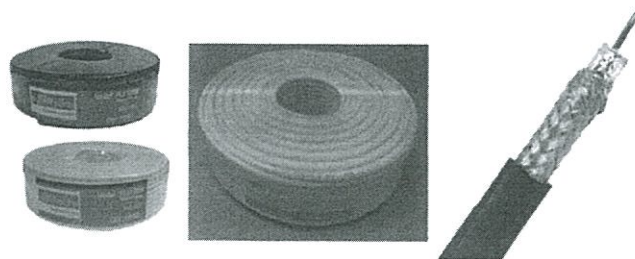
รูปที่ 2.5 สายโคแอกเชียล

โครงสร้างของสายโคแอกเชียล ประกอบด้วยสายทองแดงเป็นแกนกลาง แล้วห่อหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน ชั้นต่อมาจะเป็นตัวนำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเป็นแผ่นโลหะบาง ๆ หรืออาจจะเป็นใยโลหะที่ถักเปียอีกชั้นหนึ่ง สุดท้ายก็หุ้มด้วยฉนวนและวัสดุป้องกันสายสัญญาณ ส่วนแกนเป็นส่วนที่นำสัญญาณข้อมูล ส่วนชั้นใยตาข่ายเป็นชั้นที่ใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและเป็นสายดินในตัว ดังนั้นสองส่วนนี้จะต้องไม่เชื่อมต่อกันมิฉะนั้นอาจเกิดไฟช็อตได้ สายโคแอกเชียลถูกแยกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยใช้มาตรา RG (Radio Grade Scale) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียลดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสามารถแบ่งสายโคแอกเชียลได้เป็น 2 ประเภท คือ สายโคแอกเชียลแบบบาง (Thin Coaxial Cable หรือ Thinnet Cable) เป็นสายที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.64 เซนติเมตร เนื่องจากสายประเภทนี้มีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นสูงจึงสามารถใช้ได้กับการติดตั้งเครือข่ายเกือบทุกประเภท สายประเภทนี้สามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 185 เมตร ก่อนที่สัญญาณจะเริ่มอ่อนกำลังลง บริษัทผู้ผลิตสายโคแอกเชียลได้ลงความเห็นร่วมกันในการแบ่งประเภทของสายโคแอกเชียล ซึ่งสายโคแอกเชียลแบบบางได้ถูกรวมไว้ใน สายประเภท RG-58 ซึ่งสายประเภทนี้จะมีความต้านทาน (Impedance) ที่ 50 โอห์ม และอีกแบบคือสายโคแอกเชียลแบบหนา เป็นสายโคแอกเชียลที่ค่อนข้างแข็งและขนาดใหญ่กว่าสายโคแอกเชียลแบบบาง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.27 เซนติเมตร สายโคแอกซ์แบบหนานี้เป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้กับเครือข่ายแบบอินเทอร์เน็ตส่วนแกนกลางที่เป็นสายทองแดงของสายโคแอกเชียลแบบหนานี้จะมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นสายโคแอกเชียลแบบหนานี้จึงสามารถนำสัญญาณได้ไกลกว่าแบบบาง โดยสามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 500 เมตร ด้วยความสามารถนี้สายโคแอกเชียลแบบหนานี้จึงนิยมใช้ ในการเชื่อมต่อเส้นทางหลักของข้อมูลหรือแบ็คโบน (Backbone) ของเครือข่ายสมัยแรก ๆ และมีตัวอย่างของสาย RG ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสายโคแอกเชียล

ประเภท	อิมพีแดนซ์	ขนาดแกน	Max attenuation @750MHz	คุณสมบัติทั่วไปและการใช้งาน
RG-6/U	75	1.0 mm	5.65 dB/100 ft	ความถี่สูง เช่น เคเบิล ทีวี ดาวเทียมและเคเบิลโมเด็ม
RG-7	75	1.30 mm	4.57dB/100 ft	ความถี่สูง เช่น เคเบิล ทีวี ดาวเทียมและเคเบิลโมเด็ม
RG-8/U	50	2.17 mm	-	วิทยุสมัครเล่นและ Thicknet (10base 5)
RG-11/U	75	1.63 mm	3.65dB/100 ft	สำหรับติดตั้งสายใต้ดิน
RG-59/U	75	0.81 mm	6.97dB/100 ft	สำหรับ CCTV หรือ VDO ระดับ HD
RG-60/U	50	1.024 mm	-	สำหรับ HD เคเบิลทีวีและ อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง
RG-174/U	50	70 x 0.16 mm	-	สำหรับ Wi-Fi pigtails และ NIM Electronics
RG-213/U	50	7x0.0296 in Cu	-	สำหรับวิทยุสื่อสาร
RG-214/U	50	7x0.0296 in Cu	-	สำหรับความถี่สูง

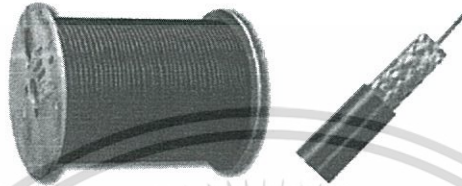
- สาย RG-6 ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สายชนิดนี้เป็นสายนำสัญญาณภาพ ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานในระบบนำสัญญาณภาพแบบต่างๆ ทั้ง โทรทัศน์ เคเบิล ดาวเทียม หรือ ระบบ เสียงหรือ วิดีโอ ส่วนใหญ่ก็นิยมนำสายชนิดนี้มาใช้งาน และสายชนิดนี้ยังนิยมนำมาใช้งานกับระบบกล้องวงจรปิด CCTV มากที่สุดอีกด้วย ซึ่งสาย RG-6 ในปัจจุบันมีอยู่หลายเกรดด้วยกัน แต่สาย RG6 ที่ควรนำมาใช้งานในระบบกล้องวงจรปิดนั้นควรจะเป็นสาย RG-6 ที่มีคุณภาพสูง มี Shield ป้องกันสัญญาณสูง 95% สาย RG-6 จะมีทั้งแบบที่เป็น Shield ทองแดง และแบบที่เป็น Shield อลูมิเนียม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานที่และตำแหน่งกล้องวงจรปิดที่จะใช้ในการติดตั้งว่าอยู่ ณ จุดใด หากเป็นจุดที่เดินสายในระยะไกลประมาณ 400-700 เมตรขึ้นไปก็ควรจะใช้สายที่เป็น Shield ทองแดง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสาย RG-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สาย RG-11 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สายชนิดนี้เป็นสายนำสัญญาณภาพที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 1000 เมตร เพราะสายมีขนาดใหญ่กว่าสาย RG6 และ RG59 จึงมีแกนกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ จึงนำสัญญาณได้ดีเหมาะกับใช้งานที่ต้องการเดินสายกล้องวงจรปิดระยะไกล ๆ ได้ดี ในกรณีที่ต้องเดินสายไกลเกินกว่า 1000 เมตร ก็จะต้องใช้อุปกรณ์เสริมเข้ามาช่วยเพื่อให้สัญญาณภาพได้ไกลยิ่งขึ้น นั่นก็คือ บูสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยขยายสัญญาณภาพและนำสัญญาณภาพไปได้ไกลกว่าเดิม



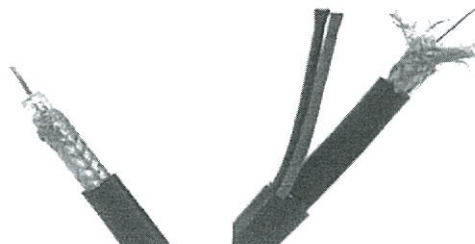
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสาย RG-11

- สาย RG-58 / U ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สายชนิดนี้เป็นประเภทของคู่สาย มักจะใช้สำหรับระบบการสื่อสาร เช่น วิทยุ CB, WLAN เสืออากาศ ฯลฯ



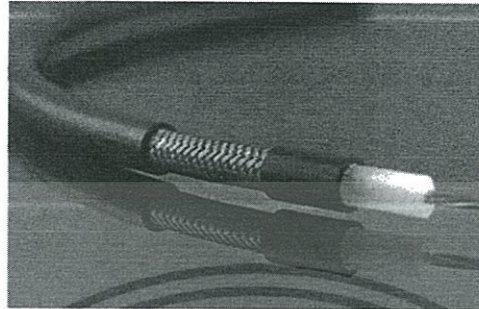
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสาย RG-58 / U

- สาย RG-59 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.9 สายชนิดนี้เป็นสายนำสัญญาณภาพเหมือนกันกับสาย RG6 แต่สาย RG59 จะมีขนาดเล็กกว่าสาย RG6 และมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเพราะสายเส้นเล็กกว่า แต่สาย RG59 จะนำสัญญาณภาพได้ในระยะที่สั้นกว่าสายคือสาย RG59 นำสัญญาณภาพได้ไกลไม่เกิน 200 เมตร เพราะสาย RG59 มีการลดทอนของสัญญาณภาพมากที่สุดเพราะสายมีขนาดเล็กสุดนั่นเอง สาย RG59 จะเหมาะกับใช้งานภายในอาคารในลิฟต์ เพราะมีสายมีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานที่ควรศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสาย RG-59
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สาย RG-213 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สายชนิดนี้เป็นสายสัญญาณที่เหมาะสมกับใช้เป็นเสาอากาศโทรทัศน์ CATV ชุมชน โทรทัศน์ซีซีทีวีวงจรปิด ดีบีเอสโดยตรงดาวเทียมกระจายเสียง และวิทยุสื่อสาร เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างสาย RG-213

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเซียล

รายการ		เกณฑ์ที่กำหนด	
ความต้านทานของตัวนำใน		ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางแสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเซียล	
ความทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกที่วัดได้ระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกในอากาศ		ต้องทนแรงดันไฟฟ้าทดสอบเป็นเวลา 1 นาที	
ความต้านทานของฉนวนวัดระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า (เมกกะโอห์มต่อกิโลเมตร)		1000	
ความจุไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอก		ตามที่กำหนดไว้ในตารางแสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเซียล	
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (โอห์ม)	ประเภท 50 โอห์ม	50 ± 2	-
	ประเภท 75 โอห์ม	75 ± 3	-
อัตราส่วนความเร็ว (ร้อยละ)		66 ± 2	
การลดทอนต่อหน่วยความยาว		ต้องไม่เกินร้อยละ 115 ของค่าที่กำหนดไว้ในตารางแสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเซียล	
แรงดึงของฉนวนและเปลือก	ฉนวน	ความต้านแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	10
		การยืดตัว (ร้อยละ) ไม่น้อยกว่า	400
	เปลือก	ความต้านแรงดึง (MPa) ไม่น้อยกว่า	10
		การยืดตัว (ร้อยละ) ไม่น้อยกว่า	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

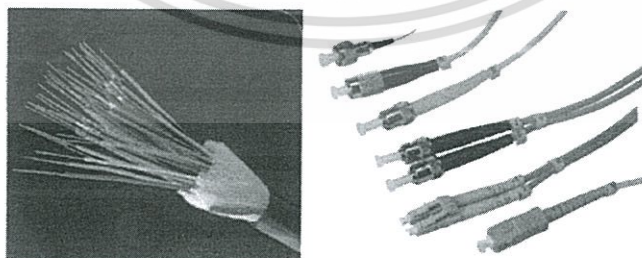
เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของสายแต่ละชนิดมีค่าลดทอนที่แตกต่างกันไปทำให้อัตราการลดทอนของสัญญาณแตกต่างกันไปซึ่งอัตราการลดทอนของสายแต่ละชนิดสามารถดูได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเซียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต

Coax Cable Signal (Attenuation) in dB per 100ft*									
Loss at	RG-174	RG-58	RG-8X	RG-213	RG-6	RG-8U	RG-11	RF-9914	RF-9913
1MHz	1.9dB	0.4dB	0.5dB	0.2dB	0.2dB	0.1dB	0.2dB	0.3dB	0.2dB
10MHz	3.3dB	1.4dB	1.0dB	0.6dB	0.6dB	0.4dB	0.4dB	0.5dB	0.4dB
50MHz	6.6dB	3.3dB	2.5dB	1.6dB	1.4dB	1.1dB	1.0dB	1.1dB	0.9dB
100MHz	8.9dB	4.9dB	3.6dB	2.2dB	2.0dB	1.5dB	1.6dB	1.5dB	1.4dB
200MHz	11.9dB	7.3dB	5.4dB	3.3dB	2.8dB	2.1dB	2.3dB	2.0dB	1.8dB
400MHz	17.3dB	11.2dB	7.9dB	4.8dB	4.3dB	3.2dB	3.5dB	2.9dB	2.6dB
700MHz	26.0dB	16.9dB	11.0dB	6.6dB	5.6dB	4.2dB	4.7dB	3.8dB	3.6dB
900MHz	27.9dB	20.1dB	12.6dB	7.7dB	6.0dB	5.7dB	5.4dB	4.9dB	4.2dB
1000MHz	22.0dB	21.5dB	13.5dB	8.3dB	6.1dB	5.9dB	5.6dB	5.3dB	4.5dB

2.4.1.4 เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)

เส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable) คือ สายนำสัญญาณข้อมูลที่ใช้หลักการทางแสงดังแสดงในรูปที่ 2.11 สัญญาณข้อมูลอยู่ในรูปของคลื่นแสงเท่านั้นตัวแก้วนำแสงอาจทำจากแก้วหรือพลาสติก โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแสงแล้วจึงส่งให้เดินทางสะท้อนภายในเส้นใยแก้วเรื่อยไปจนถึงผู้รับที่ปลายทาง เส้นใยแก้วมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายทั่วไปหลายประการ เช่น มีขนาดเล็ก ส่งผ่านข้อมูลได้ครั้งละมากๆ ข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงคือป้องกันการรบกวนจากสัญญาณไฟฟ้าได้มาก ส่งข้อมูลได้ระยะไกลโดยไม่ต้องมีตัวขยายสัญญาณ การดักสัญญาณทำได้ยาก ข้อมูลจึงมีความปลอดภัยมากกว่าสายส่งแบบอื่น ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงและสามารถส่งได้มาก ขนาดของสายเล็กและน้ำหนักเบา แต่ข้อเสียของใยแก้วนำแสงคือ มีราคาแพงกว่าสายคู่บิดเกลียวและสายโคแอกเซียล ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในกาติดตั้ง เส้นใยแก้วนำแสงมีความเปราะบาง มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้ง



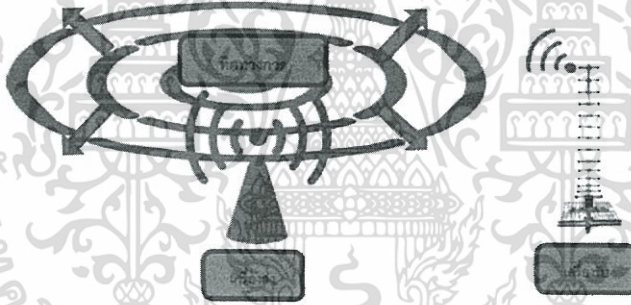
รูปที่ 2.11 เส้นใยแก้วนำแสง

สัญญาณข้อมูลมีโอกาสถูกลดทอนน้อยมาก ทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยข้อจำกัด คือ เมื่อเส้นใยแก้วขาด หักงอหรือแตกหัก จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษในการซ่อมแซม ซึ่งยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบอื่น และข้อมูลที่ส่งผ่านมันจะถูกเปลี่ยนจากข้อมูลปกติไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นแสง ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Converter แล้วก็ส่งไปตามแท่งแก้วที่วุ่นไปยังปลายทาง แล้วก็จะมี Converter อีกชุดหนึ่งที่ปลายทางเปลี่ยนมันกลับเป็นชุดข้อมูลแบบเดิมอีกที สาย Fiber Optic นี้ มันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้ Single mode Fiber Optic เป็นการนำแสงที่บีบลำแสงให้พุ่งตรงไปตามท่อแก้ว โดยมีการกระจายแสงออกทางด้านข้างน้อยที่สุด ซึ่งเกิดโหมดจึงเป็นเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีกำลังสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด เหมาะสำหรับการใช้กับระยะทางไกล ๆ การเดินเส้นใยแก้วนำแสงกับระยะทางไกลมาก เช่น เดินทาง ระหว่างประเทศ ระหว่างเมือง มักใช้แบบชิงเกิลโหมด และอีกชนิดหนึ่งคือแบบ Multimode Fiber Optic แยกได้อีกตามขนาดศูนย์กลางของแกนแท่งและ Cladding คือ โดยประมาณ 50 ไมครอน 62.5 ไมครอน โดยมี Cladding ขนาด 125 ไมครอน ราคาที่แตกต่างกันนิดหน่อยแล้วแต่จะเลือกใช้ ยิ่งใหญ่ก็ยิ่งดี แต่ยิ่งใหญ่ก็ยิ่งแพงตามไปด้วย หลักการทำงาน ให้เข้าใจว่ามันวิ่งสลับกันเป็นฟันปลาส่งสัญญาณออกเป็นกลุ่ม ทำให้ได้ความหนาแน่นของสัญญาณมากกว่าแบบชิงเกิลโหมดแต่ได้ระยะทางน้อยกว่า

2.1.2 สื่อกลางประเภทไร้สาย (Wireless Media) [17]

สื่อกลางประเภทไร้สาย หมายถึง การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายนี้สามารถส่งข้อมูลได้ทุกทิศทางโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การทำงานของสื่อกลางประเภทไร้สาย

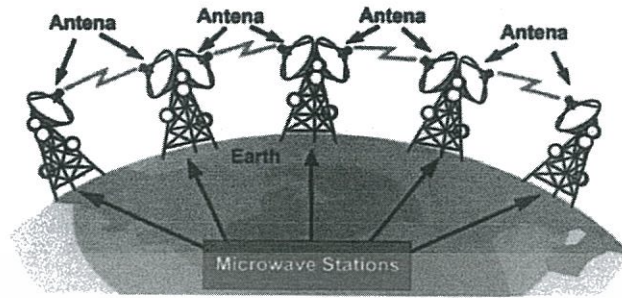
2.1.2.1 คลื่นวิทยุ (Radio Wave)

วิธีการสื่อสารประเภทนี้จะใช้การส่งคลื่นไปในอากาศ เพื่อส่งไปยังเครื่องรับวิทยุโดยรวมกับคลื่นเสียงมีความถี่เสียงที่เป็นรูป แบบของคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นการส่งวิทยุกระจายเสียงจึงไม่ต้องใช้สายส่งข้อมูล และยังสามารถส่งคลื่นสัญญาณไปได้ระยะไกล ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 10^4 - 10^9 เฮิรตซ์ ดังนั้น เครื่องรับวิทยุจะต้องปรับช่องความถี่ให้กับคลื่นวิทยุที่ส่งมา ทำให้สามารถรับข้อมูลได้อย่างชัดเจน

2.1.2.2 สัญญาณไมโครเวฟ (Microwave)

สัญญาณไมโครเวฟเป็นสื่อกลางในการสื่อสารที่มีความเร็วสูง ส่งข้อมูลโดยอาศัยสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในอากาศพร้อมกับข้อมูลที่ต้องการส่ง และจะต้องมีสถานีที่ทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูล และเนื่องจากสัญญาณไมโครเวฟจะเดินทางเป็นเส้นตรง ไม่สามารถเลี้ยวหรือโค้งตามขอบโลกที่มีความโค้งได้ จึงต้องมีการตั้งสถานีรับ - ส่งข้อมูลเป็นระยะ ๆ ไม่เว้นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

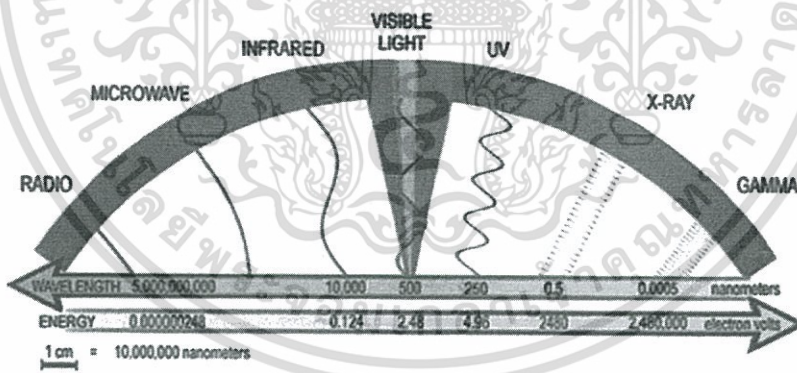
ระยะๆ และส่งข้อมูลต่อกันเป็นทอดๆ ระหว่างสถานีต่อสถานีจนกว่าจะถึงสถานีปลายทาง และแต่ละสถานีจะตั้งอยู่ในที่สูงดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ $10^8 - 10^{12}$ เฮิรตซ์



รูปที่ 2.13 การทำงานของสัญญาณไมโครเวฟ

2.1.2.3 แสงอินฟราเรด (Infrared)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง $10^{11} - 10^{14}$ เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่น $10^{-3} - 10^{-6}$ เมตร เรียกว่า รังสีอินฟราเรด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คลื่นความถี่สั้น (Millimeter waves) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะมีย่านความถี่คาบเกี่ยวกับย่านความถี่ของคลื่นไมโครเวฟอยู่บ้าง วัตถุร้อน จะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 10^{-4} เมตรออกมา ประชาชนสัมผัสทางผิวหนังของมนุษย์สามารถรับรังสีอินฟราเรด ถ้าแสงอินฟราเรดเดินทางเป็นเส้นตรง ไม่สามารถผ่านวัตถุทึบแสง และสามารถสะท้อนแสงในวัสดุผิวเรียบได้เหมือนกับแสงทั่วไปใช้มากในการสื่อสาร ระยะใกล้



รูปที่ 2.14 แสงอินฟราเรด

2.1.2.4 ดาวเทียม (Satellite)

ดาวเทียมดังแสดงในรูปที่ 2.15ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของสถานีรับ - ส่งไมโครเวฟบนผิวโลก วัตถุประสงค์ในการสร้างดาวเทียมเพื่อเป็นสถานีรับ - ส่งสัญญาณไมโครเวฟบนอวกาศ และทวนสัญญาณในแนวโคจรของโลก ในการส่งสัญญาณดาวเทียมจะต้องมีสถานีภาคพื้นดินคอยทำหน้าที่รับ และส่งสัญญาณขึ้นไปบนดาวเทียมที่โคจรอยู่สูงจากพื้นโลก 22,300 ไมล์ โดยดาวเทียมเหล่านั้น จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากับการหมุนของโลก จึงเสมือนกับดาวเทียมนั้นอยู่นิ่งอยู่กับที่ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง ทำให้การส่งสัญญาณไมโครเวฟจากสถานีหนึ่งขึ้นไปบนดาวเทียมและการกระจายสัญญาณ จากดาวเทียมลงมายังสถานีตามจุดต่างๆ บนผิวโลกทำได้ไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปอย่างแม่นยำ ดาวเทียมสามารถโคจรอยู่ได้ โดยอาศัยพลังงานที่ได้มาจากการเปลี่ยน พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วย แผงโซลาร์ (Solar panel)



รูปที่ 2.15 ดาวเทียม

2.4.2.5 บลูทูธ (Bluetooth)

ระบบสื่อสารของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสองทาง ด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้น (Short-Range Radio Links) โดยปราศจากการใช้สายเคเบิลดังแสดงในรูปที่ 2.16 หรือสายสัญญาณเชื่อมต่อ และไม่จำเป็นต้องใช้การเดินทางแบบเส้นตรงเหมือนกับอินฟราเรด ซึ่งถือว่าเพิ่มความสะดวกมากกว่าการเชื่อมต่อแบบอินฟราเรด ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือ กับอุปกรณ์ ในโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นก่อนๆ และในการวิจัย ไม่ได้มุ่งเฉพาะการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่ยังคงศึกษาถึงการส่งข้อมูลที่เป็นเสียง เพื่อใช้สำหรับ Headset บนโทรศัพท์มือถือด้วยเทคโนโลยี บลูทูธ เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบไร้สายที่น่าจับตามองเป็นอย่างมาก ยิ่งในปัจจุบัน ทั้งในเรื่องความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ทั่วไป และประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจาก เทคโนโลยีบลูทูธ มีราคาถูก ใช้พลังงานน้อย และใช้เทคโนโลยี short - range ซึ่งในอนาคต จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนา เพื่อนำไปสู่การแทนที่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สาย เคเบิล เช่น Headset สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น เทคโนโลยีการเชื่อมโยงหรือการสื่อสารแบบใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้น เป็นเทคโนโลยีของอินเทอร์เน็ตเฟสทางคลื่นวิทยุ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการสื่อสารระยะใกล้ที่ปลอดภัยผ่านช่องสัญญาณความถี่ 2.4 GHz โดยที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการใช้สายเคเบิลในการเชื่อมโยง โดยมี ความเร็วในการเชื่อมโยงสูงสุดที่ 1 Mbp ระยะครอบคลุม 10 เมตร เทคโนโลยีการส่งคลื่นวิทยุของบลูทูธจะทำการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency hop) เพราะเทคโนโลยีนี้เหมาะที่จะใช้กับการส่งคลื่นวิทยุที่มีกำลังส่งต่ำและ ราคาถูก โดยจะแบ่งออกเป็นหลายช่องความถี่ขนาดเล็ก ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนช่องความถี่ที่ไม่แน่นอนทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เข้ามาแทรกแซงได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่จะได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีบลูทูธ ต้องผ่านการทดสอบจาก Bluetooth SIG (Special Interest Group) เสียก่อนเพื่อยืนยันว่ามันสามารถที่จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์บลูทูธตัวอื่นๆ และอินเทอร์เน็ตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การทำงานของบลูทูธ

2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ

สายส่งสัญญาณเป็นอุปกรณ์ประเภทที่เป็นตัวนำและถ่ายทอดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ปลายทาง แต่ในทางด้านวิทยุ จะใช้สายนำสัญญาณเป็นตัวกลางนำสัญญาณความถี่วิทยุจากตัวเครื่องรับส่ง ไปสู่สายอากาศ และนำสัญญาณจากสายอากาศมาสู่เครื่องรับส่ง และจะต้องมีการสูญเสียกำลังงานในตัวสายให้น้อยที่สุดด้วยจึงจะเรียกได้ว่าสายส่งมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายส่งสัญญาณต้องมีความสำคัญในส่วนของกำลังงานและประสิทธิภาพการรับส่งด้วยอย่างแน่นอน จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสายส่งสัญญาณเพื่อที่จะสามารถนำไปทำการออกแบบวงจรเคเบิลอีควอลไลเซอร์ (Cable Equalizer) ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั่นเอง

สายส่งสัญญาณเป็นอุปกรณ์ประเภทที่เป็นตัวนำและถ่ายทอดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ปลายทาง สายส่งสัญญาณสามารถแบ่งได้หลายชนิดตามคุณสมบัติ หรือ วัสดุ ซึ่งแบ่งออกได้ใหญ่ๆ 2 ชนิด คือ

- สายนำสัญญาณแบบบาลานซ์ (Balance) เป็นสายนำสัญญาณประเภทที่มีตัวนำสองเส้นวางคู่ขนานกันไป โดยมีฉนวน หรือ ไดอิเล็กทริกเป็นตัวชั้นกลาง สัญญาณในตัวนำทั้งสองจะมีค่ากระแสเท่ากันทั้ง 2 เส้น แต่มีเฟสต่างกัน 180 องศาและไม่มีส่วนใดต่อลงกราวด์ของระบบ ส่วนใหญ่ที่เราเห็นและมักคุ้นเคยกันก็คือ สายส่งสัญญาณชนิดแบน 300 โอห์ม ที่นิยมใช้ติดตั้งกับระบบโทรทัศน์ สายนำสัญญาณประเภทนี้มีการรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย เพราะไม่มีส่วนในการห่อหุ้มที่เป็นส่วนป้องกันการรบกวน หรือการแพร่กระจายคลื่นออก ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายหาได้จากสมการที่ 2.1

$$Z_0 = 276 \log 2D/R \quad (2.1)$$

เมื่อ D = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง

R = รัศมีของเส้นลวดตัวนำ

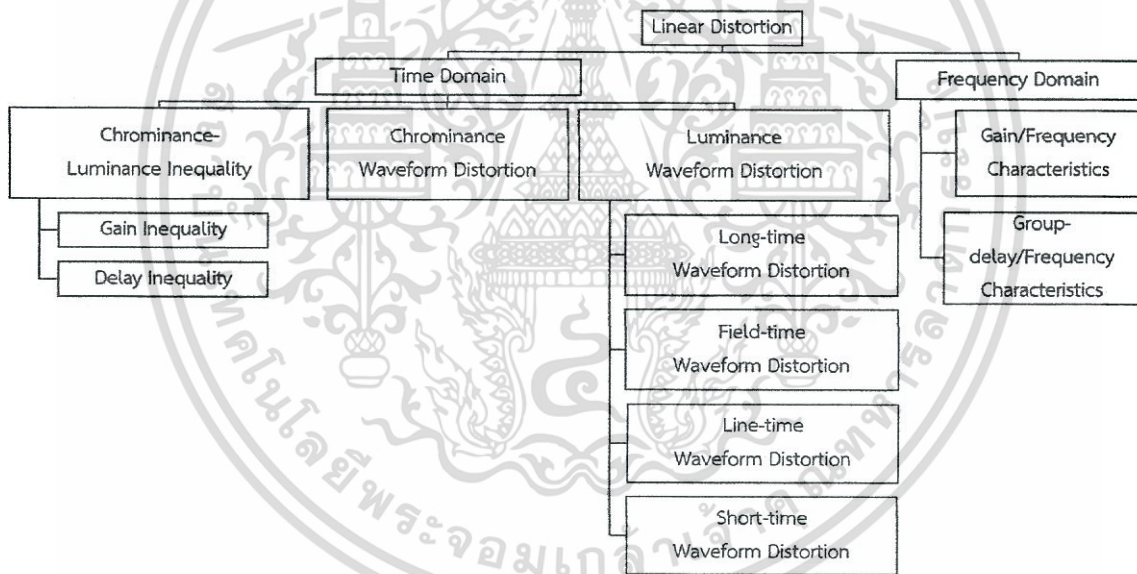
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สายนำสัญญาณแบบอับบาลานซ์ (Unbalance) เป็นสายนำสัญญาณที่เป็นส่วนของ สัญญาณ และ ส่วนของกราวด์ ที่พบเห็นและเกี่ยวข้องกับวิทยุสมัครเล่นก็คือ สายโคแอกเซียล คือสายนำสัญญาณ ที่เป็นตัวนำอยู่ตรงกลาง และมีส่วนของชีลด์เป็นตัวนำห่อหุ้มอยู่ในลักษณะทรงกระบอก โดยมีฉนวน หรือไดอิเล็กทริก ระหว่างกลางตัวนำทั้งสอง คุณสมบัติของสายนำสัญญาณประเภทนี้ คือ ในส่วนของ ชีลด์สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่จะเข้ารบกวนในส่วนสัญญาณได้ และสามารถป้องกันการ แพร่กระจายคลื่นที่เล็ดลอดออกมาจากสายนำสัญญาณได้ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายหาได้จาก สมการที่ 2.2

$$Z_0 = 138 \log D/d \quad (2.2)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชีลด์
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำใน

2.3 ชนิดของความผิดเพี้ยนเชิงเส้น



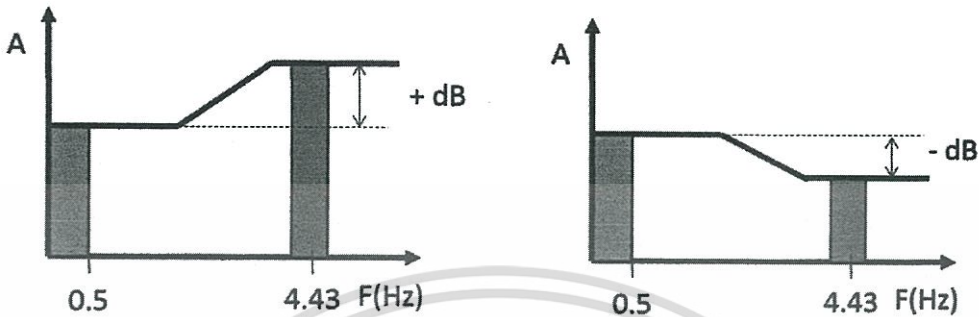
รูปที่ 2.17 การจำแนกชนิดของความผิดเพี้ยนแบบเชิงเส้น

ความผิดเพี้ยนของระบบการส่งสัญญาณภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือความผิดเพี้ยนแบบเชิงเส้น (Linear Distortion) และความผิดเพี้ยนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Distortion) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปในส่วนของความผิดเพี้ยนแบบเชิงเส้นซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งความผิดเพี้ยนเชิงเส้นนั้นเกิดจากคุณลักษณะของสายส่งไม่ราบเรียบ ซึ่งความผิดเพี้ยนเหล่านี้สามารถตรวจสอบได้ 2 วิธีคือ การใช้สัญญาณทดสอบตรวจวัดในขอบข่ายของเวลา (Time Domain) และการวัดคุณลักษณะทางขนาด เฟส ในขอบข่ายของความถี่ (Frequency Domain)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ความไม่เท่ากันทางขนาด (Gain Inequality)

ความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสีและสัญญาณส่องสว่าง หลังจากผ่านระบบที่ต้องการทดสอบแล้วเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งเรียกว่าความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายแสดงดังรูปที่ 2.18

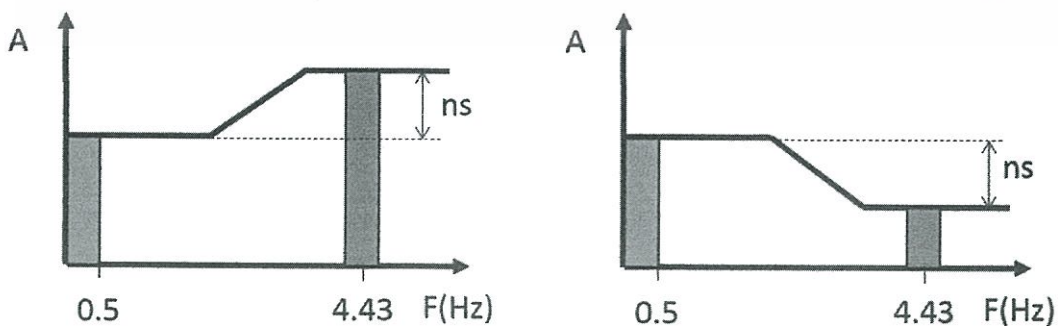


(ก) ความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายสูง (ข) ความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายต่ำ
รูปที่ 2.18 ความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสีและสัญญาณส่องสว่าง

ซึ่งความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสีกับสัญญาณส่องสว่าง โดยสัญญาณส่องสว่างจะอยู่ในย่านความถี่ต่ำ ประมาณ 0 - 0.5 MHz ส่วนสัญญาณสีจะอยู่ที่ความถี่พาห้สีย่อย (Color Sub-carrier) 4.43 MHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองมีขนาดไม่เท่ากันและในรูปที่ 2.18 ก จะมีขนาดของสัญญาณสีมากกว่าสัญญาณส่องสว่างซึ่งแสดงผลต่างในหน่วยเดซิเบลได้ค่าเป็นบวก หรือเรียกว่าความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายสูง (High-Gain Chrominance Distortion) ในทางกลับกันรูปที่ 2.18 ข จะมีขนาดของสัญญาณสีน้อยกว่าสัญญาณส่องสว่างซึ่งแสดงผลต่างในหน่วยเดซิเบลได้ค่าเป็นลบ หรือเรียกว่าความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายต่ำ (Low-Gain Chrominance Distortion) ซึ่งในการแก้ความผิดเพี้ยนดังกล่าวจะต้องใช้วงจรปรับเท่าทางขนาดของสัญญาณสี (Gain Chrominance Equalizer) เพื่อยกระดับหรือลดระดับทางขนาดของสัญญาณสีให้มีขนาดเท่ากับของสัญญาณส่องสว่าง

2.3.2 ความไม่เท่ากันทางเวลาประวิง (Delay Inequality)

ความไม่เท่ากันทางเวลาประวิงของสัญญาณสีกับสัญญาณส่องสว่าง หลังจากผ่านระบบที่ต้องการทดสอบแล้วเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งเรียกว่าความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแสดงดังรูปที่ 2.19



(ก) ความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ Advanced (ข) ความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ Delayed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.19 ความไม่เท่ากันทางขนาดของสัญญาณสีและสัญญาณส่องสว่าง ระโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความไม่เท่ากันทางเวลาประวิงของสัญญาณสีกับสัญญาณส่องสว่าง จะเห็นว่ารูปร่างที่ 2.19 สัญญาณทั้งสองมีเวลาประวิงไม่เท่ากันและมีผลต่างแสดงในหน่วย นาโนวินาที (ns) ในรูปที่ 2.19 ก จะมีค่าเวลาประวิงของสัญญาณสีมากกว่าสัญญาณส่องสว่าง หรือเรียกว่าความผิดเพี้ยนแบบนี้ว่าความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ (Advanced Chrominance) และในรูปที่ 2.19 ข จะมีค่าเวลาประวิงของสัญญาณสีน้อยกว่าสัญญาณส่องสว่าง หรือเรียกว่าความผิดเพี้ยนแบบนี้ว่าความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ (Delayed Chrominance) ซึ่งในการแก้ความผิดเพี้ยนดังกล่าวจะต้องใช้วงจรประเท่าทางประวิง (Delayed Chrominance Equalizer)

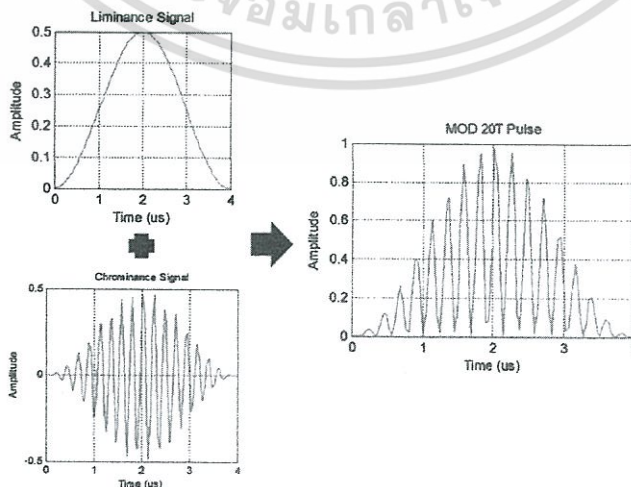
2.4 สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์

สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์ คือสัญญาณไชน์กำลังสองพัลส์ที่มีช่วงเวลาดำครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูด (Half Amplitude Duration H.A.D) เท่ากับ 20T หรือ $20 \times 0.1 \mu\text{s} = 2 \mu\text{s}$ ซึ่งสัญญาณทดสอบไชน์กำลังสอง 20T นั้นเองสามารถหาได้จากสมการ 2.3

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi t}{40T}\right) + \frac{A}{2} \sin^2\left(\frac{\pi(t-\tau)}{40T}\right) \cos \omega_c t & ; |t| \leq 20T \\ 0 & ; |t| > 20T \end{cases} \quad (2.3)$$

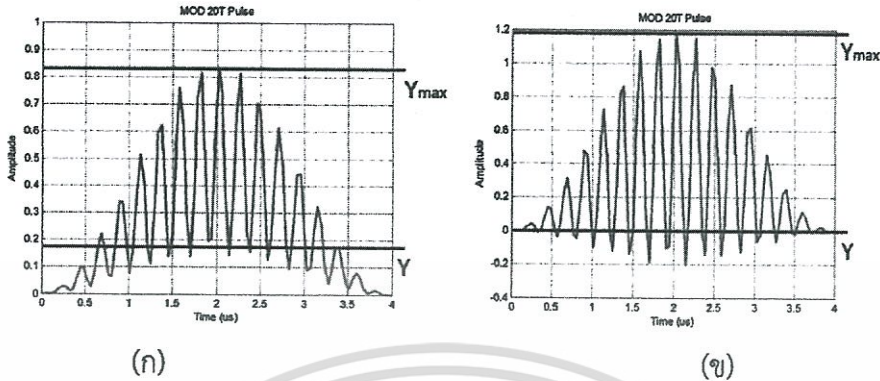
- เมื่อ A คือ อัตราการขยายของสัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์
 τ คือ เวลาประวิงที่ล่าหลัง หรือนำหน้าสัญญาณที่ยังไม่ได้มอดูเลต
 T คือ คาบเวลามีค่า $0.1 \mu\text{s}$ สำหรับโทรทัศน์ระบบ PAL
 t คือ เวลา
 ω_c คือ ความถี่เชิงมุมของพาหีสื่อซึ่งมีค่า 4.43 MHz

และจากสมการที่ 2.3 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งแสดงผลรวมระหว่างสัญญาณสีกับสัญญาณส่องสว่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.20 การผสมกันระหว่างสัญญาณสีกับสัญญาณส่องสว่างไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของอัตราขยายอย่างเดียว
(Distortion Cause by Gain Difference Only)



รูปที่ 2.21 ความแตกต่างของความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียว

จากรูปที่ 2.21 ในกรณีนี้แสดงว่าค่ายอด Y_1 และ Y_2 ค่าใดค่าหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นก็ไม่มี ความผิดเพี้ยนทางดีเลย์ (τ) เกิดขึ้นซึ่งมีความหมายว่าความผิดเพี้ยนทางดีเลย์มีค่าเท่ากับศูนย์ดัง สมการที่ 2.4 เพราะฉะนั้นความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจึงมีแต่ความผิดเพี้ยนของอัตราขยายอย่างเดียวซึ่ง สามารถแสดงให้เห็นจริงได้

$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1}(1) = 0 \tag{2.4}$$

และ

$$A = \frac{1-y}{1+y} = \frac{1-\frac{Y}{Y_{max}}}{1+\frac{Y}{Y_{max}}} \tag{2.5}$$

ซึ่ง y หรือ Y อาจเป็นค่าบวก หรือลบ เนื่องจากขนาดของความผิดเพี้ยนที่สัมพันธ์กัน เมื่ออัตราการ ขยายต่ำสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.6 รูป 2.20ก และเมื่ออัตราการขยายสูงสามารถแสดงได้ดัง สมการที่ 2.7 รูป 2.20ข

$$A = \frac{1-y}{1+y} \tag{2.6}$$

$$A = \frac{1+y}{1-y} \tag{2.7}$$

เมื่อ A คืออัตราการขยาย

y คือค่าขนาดของความผิดเพี้ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในรูปที่ 2.21 (ก) แสดงให้เห็นความผิดเพี้ยนทางสี่ต่ำ $A < 1$ ในขณะที่เส้นหลักจะอยู่ตรงส่วนที่มีลักษณะโค้งลง และจุดสูงสุดของลูกคลื่นจะน้อยกว่า 1 ในทางกลับกันรูปที่ 2.21 (ข) แสดงความผิดเพี้ยนทางสี่สูง $A > 1$ ในขณะที่เส้นหลักจะอยู่ตรงที่มีลักษณะโค้งขึ้น และจุดสูงสุดของลูกคลื่นจะมากกว่า 1 ค่า A สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยเดซิเบลได้จากสมการที่ 2.8

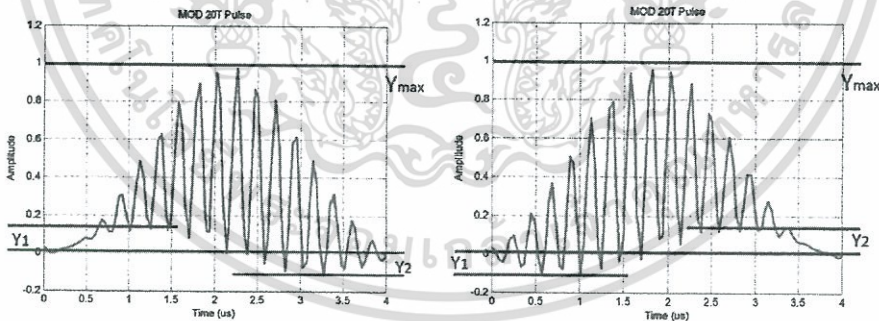
$$A(\text{dB}) = 20 \log(A) \quad (2.8)$$

ในกรณีที่ความผิดเพี้ยนทางอัตราขยายของรูปที่ 2.21 ก จะมีค่าของ A อยู่ที่ 0.7079 ซึ่งเมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ 2.8 จะมีค่าของ A เท่ากับ -3 เดซิเบล เช่นเดียวกันกับรูปที่ 2.21 ข จะมีค่าของ A อยู่ที่ 1.4125 ซึ่งเมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ 2.8 จะมีค่าของ A เท่ากับ $+3$ เดซิเบลโดยความผิดเพี้ยนของอัตราขยาย (ε) พิจารณาได้จากสมการที่ 2.9

$$\varepsilon = 1 - A = \frac{\frac{2Y}{Y_{\max}}}{1 - \frac{Y}{Y_{\max}}} \quad (2.9)$$

2.4.2 สาเหตุของการผิดเพี้ยนโดยความแตกต่างของดีเลย์อย่างเดียว (Distortion Cause by Delay Difference Only)

จากรูปที่ 2.22 ในกรณีที่ $Y_1 = Y_2$ ซึ่งพื้นฐานของพัลส์มีรูปร่างเป็นคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดเท่ากัน แต่อยู่ตรงข้ามแสดงว่าไม่มีความผิดเพี้ยนทางอัตราขยาย ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีแต่ความผิดเพี้ยนทางด้านดีเลย์เพียงอย่างเดียวจะได้สมการที่ 2.10



(ก) ความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ Advanced (ข) ความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงแบบ delay
รูปที่ 2.22 ความแตกต่างของความผิดเพี้ยนทางเวลาประวิงอย่างเดียว

$$\tau = \frac{T_0}{\pi} \cos^{-1} \left[1 - \frac{8 \left(\frac{Y}{Y_{\max}} \right)^2}{\left\{ 1 + \left(\frac{Y}{Y_{\max}} \right)^2 \right\}^2} \right] \quad (2.10)$$

และค่าของอัตราขยายมีค่าดังสมการที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{1 + \left(\frac{Y}{Y_{\max}}\right)^2}{1 + \left(\frac{Y}{Y_{\max}}\right)^2} \quad (2.11)$$

เมื่อแทนค่า $Y_1 = -Y_2$

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

จะเห็นได้ว่าเมื่อ $Y_1 = -Y_2$ จะได้ $A = 0dB$

2.5 การคำนวณผลที่ได้จากป้อนสัญญาณทดสอบในสายโคแอกเชียล

การส่งข้อมูลผ่านสายโคแอกเชียล (Coaxial Transmission Line) มีรูปสมการดังสมการที่ 2.12 กล่าวคือค่าที่ได้เท่ากับผลคูณระหว่างค่าเริ่มต้นและเอกโปเนนเชียลของค่าคงที่การแพร่ของสายกับระยะทางในการแพร่

$$V_{(x)} = V_{(0)} e^{-Pz} \quad (2.12)$$

เมื่อ P คือ ค่าคงที่การแพร่ (Propagation) ของสาย
 z คือ ระยะทางระหว่างเส้นทางของการแพร่ (Distance) สำหรับสายโคแอกเชียล
 ซึ่งค่าคงที่การแพร่ของสายมีค่าดังสมการที่ 2.13

$$P = jHf + (1+j)K\sqrt{f} \quad (2.13)$$

เมื่อ H และ K คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสายโคแอกเชียล
 f คือ ความถี่ของสัญญาณ
 หากแทนค่า P จากสมการที่ 2.13 ลงในสมการที่ 2.12 จะได้สมการที่ 2.14

$$V_{(x)} = V_{(0)} e^{-(1+j)k\sqrt{f}} \cdot e^{-jHf} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.15 ซึ่งเป็นสมการของการแพร่ของสาย

$$P_x = \frac{HX}{2\pi} + \frac{kX}{\sqrt{\pi}} \sqrt{S} \quad (2.15)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.15 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้ดังสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{(x)} = V_{(0)} e^{\frac{-kx}{\sqrt{\pi}} \sqrt{S}} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณา $\frac{-kx}{\sqrt{\pi}}$ เป็นค่าคงที่และแทนค่าด้วย α ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17

$$V_{(x)} = V_{(0)} e^{-\alpha \sqrt{S}} \cdot e^{-j\omega t} \quad (2.17)$$

ในการหาค่า \sqrt{S} เมื่อ $S = j\omega$ จะได้ดังสมการที่ 2.18

$$\sqrt{S} = \sqrt{j\omega} \quad (2.18)$$

ซึ่งกำหนดให้ $\sqrt{j\omega}$ มีค่าเท่ากับ $\alpha + j\beta$ โดยจะทำการคิดแบบจำนวนเชิงซ้อนและหากยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการจะได้ดังสมการที่ 2.19

$$\{(j\omega)^{\frac{1}{2}}\}^2 = (\alpha + j\beta)^2 \quad (2.19)$$

เมื่อการกระจายและจัดรูปของสมการจะได้ดังสมการที่ 2.20

$$j\omega = \alpha^2 - \beta^2 + 2j\alpha\beta \quad (2.20)$$

เมื่อจัดรูปของสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ 2.21

$$0 = \alpha^2 - \beta^2 + 2j\alpha\beta + j\omega \quad (2.21)$$

หากพิจารณาสมการจะแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ $\alpha^2 - \beta^2 = 0$ ซึ่งเป็นส่วนของจำนวนจริงและ $\omega - 2\alpha\beta = 0$ ซึ่งเป็นส่วนของจำนวนจินตภาพและจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2.22

$$(\alpha^2 - \beta^2) + j(\omega - 2\alpha\beta) = 0 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 ในส่วนของจำนวนจินตภาพจะได้ดังสมการที่ 2.23

$$\omega = 2\alpha\beta \quad (2.23)$$

เมื่อแทน $\alpha = \frac{\omega}{2\beta}$ ลงในส่วนจริงของสมการที่ 2.21 จะได้ดังสมการที่ 2.24 และเมื่อจัดรูปจะได้ดังสมการที่ 2.25

$$\left(\frac{\omega}{2\beta}\right)^2 - \beta^2 = 0 \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\frac{\omega^2}{4\beta^2} - \beta^2 &= 0 \\ \frac{\omega^2 - 4\beta^4}{4\beta^2} &= 0 \\ \omega^2 - 4\beta^4 &= 0 \\ \omega^2 &= 4\beta^4 \\ \omega^2 &= \sqrt{4\beta^4} \\ \omega &= 2\beta^2\end{aligned}\tag{2.25}$$

จากสมการที่ 2.25 เมื่อทำการย้ายข้างของตัวแปรจะได้ตั้งสมการที่ 2.26

$$\beta^2 = \frac{\omega}{2}\tag{2.26}$$

และจะได้ค่าของ β มีค่าเท่ากับสมการที่ 2.27

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2}}\tag{2.27}$$

เมื่อนำสมการที่ 2.27 แทนใน 2.23 จะได้ตั้งสมการที่ 2.28

$$\alpha = \frac{\omega}{2\sqrt{\frac{\omega}{2}}}\tag{2.28}$$

เพื่อไม่ให้ตัวส่วนของสมการ 2.28 ติดค่ารากดังนั้นจึงทำการคูณด้วย $\sqrt{\frac{\omega}{2}}$ ทั้งเศษและส่วนของสมการ ซึ่งจะได้ตั้งสมการที่ 2.29

$$\alpha = \frac{\omega}{2\sqrt{\frac{\omega}{2}}} \frac{\sqrt{\frac{\omega}{2}}}{\sqrt{\frac{\omega}{2}}}\tag{2.29}$$

ซึ่งสุดท้ายแล้วจะได้ว่าค่าของ α มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{\omega}{2}}$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.17 ผลที่ได้ของ \sqrt{S}

สามารถแสดงได้ตั้งสมการที่ 2.30

$$\sqrt{S} = \sqrt{\frac{\omega}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega}{2}}\tag{2.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.15 เมื่อแทน $\frac{kx}{\sqrt{\pi}}$ ด้วย α ซึ่งได้เป็นส่วนจริงของสมการที่ 2.16 เมื่อแทนค่าของ \sqrt{s} ลงในสมการส่วนจริงของ 2.16 แล้วนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.31

$$e^{-\alpha\sqrt{s}} = e^{-\alpha\left\{\sqrt{\frac{\omega}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega}{2}}\right\}} \quad (2.31)$$

จากนั้นแทนค่า $\omega = 2\pi f$ ลงในสมการที่ 2.31 และทำการจัดรูปของสมการจะได้ดังสมการที่ 2.32

$$e^{-\alpha\sqrt{s}} = e^{-\alpha\left\{\sqrt{\frac{2\pi f}{2}} + j\sqrt{\frac{2\pi f}{2}}\right\}}$$

$$e^{-\alpha\sqrt{s}} = e^{\alpha(\sqrt{\pi f} + j\sqrt{\pi f})} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.15 และ 2.16 จะได้ว่า $\frac{kx}{\sqrt{\pi}} = \alpha$ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 2.32 จะแสดงได้ดังสมการที่ 2.33

$$e^{\frac{kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{s}} = e^{\frac{kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\pi f} + j\frac{kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\pi f}} \quad (2.33)$$

และเมื่อทำการจัดรูปสมการที่ 2.33 แล้วนั้นจะได้ดังสมการที่ 2.34

$$e^{\frac{kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{s}} = e^{(1+j)kx\sqrt{f}} \quad (2.34)$$

ดังนั้นจะได้ว่า α มีค่าเท่ากับ $(1+j)k$ ซึ่งจากสมการที่ 2.15 สามารถเขียนอยู่ในสมการที่ 2.35

$$V_{0(s,x)} = V_{I(s,0)} e^{\frac{-kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{s}} \quad (2.35)$$

จาก Carslaw and Jaeger ผลที่ได้จากการกระตุ้นในสายโคแอกเซียลได้จากการอินเวอร์สทรานฟอร์มของ $e^{\frac{-kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{s}}$ จะได้ดังสมการที่ 2.36

$$h(t) = \frac{kx}{2\pi t} \left(\frac{3}{2}\right) e^{\frac{-k^2 x^2}{4\pi t}} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

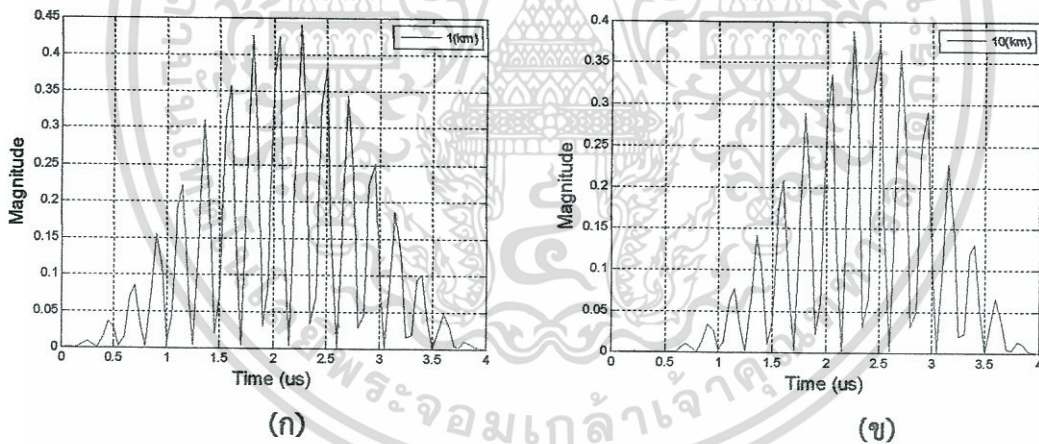
โดยสมการที่ใช้ทดสอบภายในสายนี้คือสมการไซน์กำลังสองพัลส์ (Sine-Squared Pulse) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.37

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi t}{40T}\right) + \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi(t-\tau)}{40T}\right) \cos \omega_c t & ; |t| \leq 20T \\ 0 & ; |t| > 20T \end{cases} \quad (2.37)$$

เมื่อนำสัญญาณทดสอบมาใช้กับสมการที่ 2.36 แล้วนั้นจะได้ค่าสัญญาณทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.38

$$V_{0(x)} = \frac{kx}{2\pi} \int_0^t \frac{1}{\tau} \left(\frac{3}{2}\right) e^{-\frac{k^2 x^2}{4\pi}} \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi t}{40T}\right) + \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi(t-\tau)}{40T}\right) \cos \omega_c t d\tau \quad (2.38)$$

ซึ่งสมการ 2.38 นี้จะนำมาใช้ในการพล็อตหาค่าความสูงพัลส์ต่อความยาวสายโคแอกเซียลในโปรแกรม Matlab หรือเรียกได้ว่าเป็นสมการสายโคแอกเซียลซึ่งแสดงผลของสัญญาณทดสอบในระยะทางที่ 1 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.23 ก และ ข ตามลำดับ

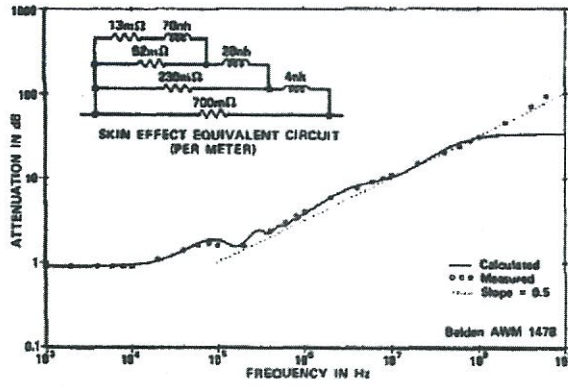


รูปที่ 2.23 สัญญาณทดสอบที่ผิดเพี้ยนที่ตำแหน่งต่าง ๆ

2.6 ทบทวนงานวิจัย

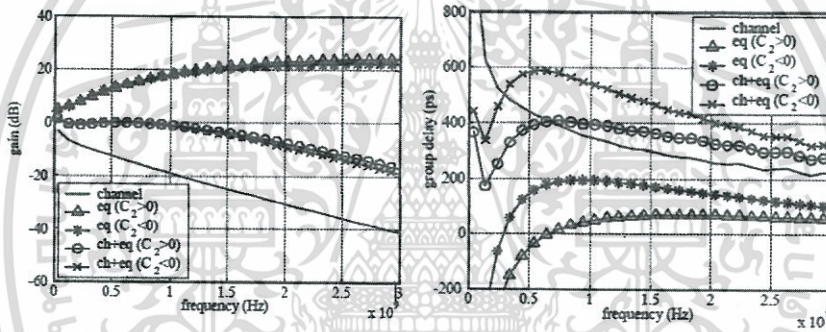
ในปี 1983 CHU-SUN YEN, และ RICHARD D. CRAWFORD ได้นำเสนองานวิจัย การกระจายและอิมพัลส์ของสัญญาณสำหรับสายโอแอกเซียลที่ใช้ความเร็ว 10 Mbit/s ในเบสแบนด์ซึ่งได้นำไปลองใช้กับสายโคแอกเซียลที่มีความยาว 500 เมตรซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.24 [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



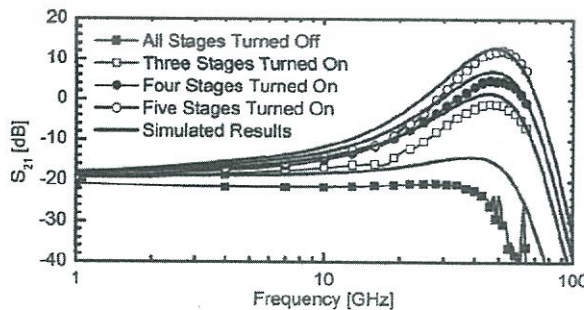
รูปที่ 2.24 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร

ในปี 2005 Yasuo Hidaka และคณะได้เผยแพร่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิกวอไลเซอร์ของสายเคเบิลความเร็วสูงซึ่งได้พัฒนาอิกวอไลเซอร์ที่มีเฟสน้อยที่สุดที่อันดับ 2 และได้จัดทำใส่ใน CMOS ซึ่งผลทดลองที่ได้ □ แสดงดังรูปที่ 2.25 แต่ยังมีกรประวิงเวลา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.26 [21]



รูปที่ 2.25 การขยายและดีเลย์ที่ 20 dB ของสายเคเบิล

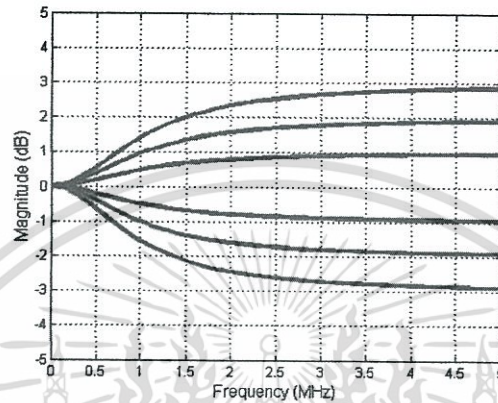
ในปี 2008 Andreea Balteanu and Sorin P. Voinigescu ได้ทำการเผยแพร่ผลงานการวิจัยอิกวอไลเซอร์อัตราการขยาย 31 dB ที่ความถี่ 52 GHz โดยเป้าหมายของทั้งคู่อยู่ที่การเพิ่มอัตราข้อมูลถึง 70 Gbps ซึ่งออกแบบทำลงบน SiGe BiCMOS ขนาด 0.13µm อิกวอไลเซอร์ ได้ถูกทดสอบที่ 70 Gbps สำหรับสายโคแอกเซียลและมีการสูญเสีย 7.2 dB ที่ความถี่ 35 GHz และที่ 59 GHz มีการสูญเสียอยู่ที่ 17.9 dB ที่ความถี่ 30 GHz ซึ่งผลที่ได้จากการทำงาานนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.26 [22]



รูปที่ 2.26 ผลการตอบสนองทางความถี่ที่ 70 Gbps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2010 วันวิสา ชัชวงษ์ ได้พัฒนาอิกวอไลเซอร์โดยใช้สมการเบียร์นสไตน์ซึ่งใช้กับสัญญาณสี่ที่ความถี่คลื่นพาหีสี่ย่อย 4.43 MHz ในโทรทัศน์ระบบ PAL เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณวิดีโอ ซึ่งใช้สัญญาณทดสอบมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์ โดยในการตรวจสอบและวัดความผิดเพี้ยนจะดูที่ฐานของพัลส์ จากผลการทดลองพบว่าวงจรปรับเท่าที่ได้นำเสนอสามารถแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณวิดีโอในระบบโทรทัศน์สีได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งผลลัพธ์ของการสร้างอิกวอไลเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.27 [23]



รูปที่ 2.27 ผลการตอบสนองทางความถี่ของอิกวอไลเซอร์ที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีเบียร์นสไตน์โพลีโนเมียล และการออกแบบอิกวอไลเซอร์

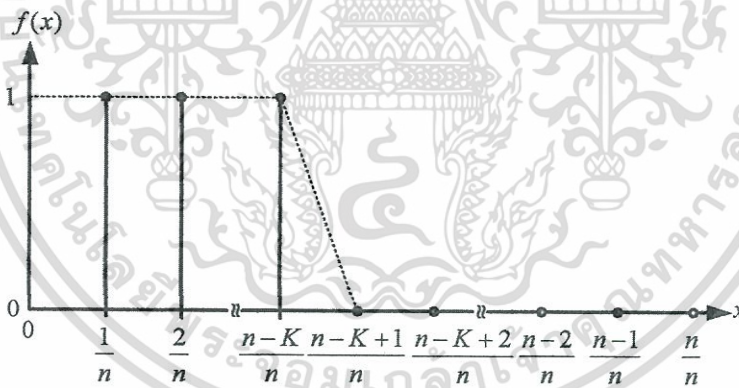
3.1 เบียร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein Polynomials)

เบียร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein Polynomials) เกิดขึ้นจากทฤษฎีการประมาณที่มีรูปแบบฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ($f(x)$) ในช่วงปิดที่ 0 ถึงปิดที่ 1 เบียร์นสไตน์โพลีโนเมียลอันดับที่ n^{th} ดังแสดงได้ในสมการที่ 3.1 โดยที่ n มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1

$$B_n(f; x) = \sum_{i=0}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (3.1)$$

เมื่อ $i=0,1,\dots,n$ และ $\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$

พิจารณาฟังก์ชัน $f(x)$ ในที่นี้ทำการประมาณฟังก์ชันให้เป็นแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Function) มีขอบเขตอยู่ที่ $[0, 1]$ เพราะฉะนั้นฟังก์ชัน $f\left(\frac{i}{n}\right)$ จึงมีค่าไม่เกิน n แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อ K คือจำนวนจุดที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ทำให้ฟังก์ชันการประมาณมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นเขียนฟังก์ชันการประมาณความถี่ต่ำผ่านได้เป็นสมการที่ 3.2

$$f\left(\frac{i}{n}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq i \leq n-K \\ 0, & n-K+1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (3.2)$$

แทนสมการที่ 3.2 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้ดังสมการที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_{n,K}(f;x) = \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 สามารถจัดรูปสมการใหม่โดยใช้พหุนามเมเยิลแบบ Herrmann ดังสมการที่ 3.4 และจัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 3.5 ตามลำดับ

$$B_{n,K}(f;x) = (1-x)^K \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} (1-x)^{-K} \quad (3.4)$$

$$B_{n,K}(f;x) = (1-x)^K \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i-K} \quad (3.5)$$

เมื่อจัดรูปให้เข้าใจง่ายขึ้นเพื่อการนำไปใช้ในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์จะได้ดังสมการที่ 3.6

$$B_{n,K}(f;x) = (1-x)^K \sum_{i=0}^{n-K} \binom{K+i-1}{i} x^i \quad (3.6)$$

จากนั้นทำการแปลง (Transformation) ของค่า x จากช่วง $[0, 1]$ ให้เป็น Ω ที่มีช่วงหรือขอบเขตอยู่ที่ $[0, \infty)$ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.7

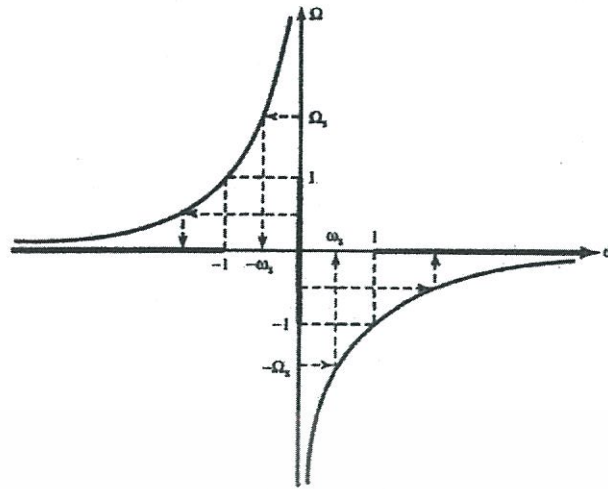
$$x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} \quad (3.7)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.7 แทนลงในสมการที่ 3.8 ได้เป็น

$$B_{n,K}(f;\Omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \Omega^{2i}}{(1 + \Omega^2)^n} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ 3.8 ค่า Ω เป็นแกนความถี่ (Ω -axis) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ (Low-pass Prototype Filter) ซึ่งสามารถแปลงเข้าสู่วงจรรองความถี่สูงผ่าน (Low-pass to High-pass Transformation) แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การแปลงแกนความถี่จาก $\Omega \rightarrow \omega$

จากรูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของการแปลงระหว่างแกนความถี่ Ω ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบกับแกนความถี่ ω ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน จะเห็นว่าแถบผ่าน (Pass-band) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบอยู่ที่ $-1 \leq \Omega \leq 1$ ส่วนแถบผ่านวงจรรองความถี่สูงผ่านจะอยู่ที่ $1 \leq \omega \leq -1$ ดังนั้นเขียนสมการการแปลงได้เป็นสมการที่ 3.9

$$\Omega = -\frac{1}{\omega} \quad (3.9)$$

นำสมการที่ 3.9 แทนลงในสมการที่ 3.8 จะได้ดังสมการที่ 3.10

$$B_{n,K}(\omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \quad (3.10)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) แทนด้วย $N(s)$ สามารถหาได้จากคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสอง (Magnitude-squared Characteristics) แทนด้วย $|N(s)|^2$ แสดงดังสมการ 3.11

$$|N(s)|^2 = N(s) \cdot N(-s) \quad (3.11)$$

เพราะฉะนั้นในที่นี้จะเริ่มหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากคุณลักษณะทางขนาดยกกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Magnitude-squared Characteristics) ด้วยเหตุเพราะสามารถทำการแปลงเป็นวงจรรองความถี่ชนิดต่าง ๆ ได้ด้วยวิธีการแปลงความถี่ (Frequency Transformation) แสดงดังสมการที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 B^2(\omega)} \quad (3.12)$$

โดยที่ $B(\omega)$ คือเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลในสมการที่ 3.10 นำไปแทนลงในสมการที่ 3.12 จะได้ตั้งสมการที่ 3.13

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \right]^2} \quad (3.13)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 3.14

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1 + \omega^2)^{2n}}{(1 + \omega^2)^{2n} + \varepsilon^2 \omega^{4n} \left(\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i} \right)^2} \quad (3.14)$$

สมการที่ 3.14 เรียกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดยกกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จากเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล จากนั้นนำสมการที่ได้มาหาค่าโพล (Poles) และซีโร (Zeros) โดยการแทนค่า $\omega = s/j$ แล้วแก้สมการเลือกค่าโพลและซีโร เป็นที่ทราบกันดีว่าถ้าต้องการให้ระบบมีความเสถียรภาพ (Stable System) และมีเฟสต่ำสุด (Minimum Phase) จะต้องเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ s (s -plane) ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเศษส่วน (Rational Function) ดังสมการที่ 3.15

$$N(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_{m-1} s^{m-1} + a_m s^m}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_{m-1} s^{m-1} + b_m s^m} \quad (3.15)$$

เมื่อ $m = 2n$ เป็นอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากสมการที่ 3.14 จะได้เศษเป็น $(s+1)^{2n}$ เพราะฉะนั้นเลือกค่าซีโร $s = -1$ นั้นเอง สำหรับค่าโพลสามารถเลือกได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ n K และ ε ของตัวส่วน สรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนหรือเลือกค่าพารามิเตอร์ n K และ ε นั้น สามารถปรับคุณลักษณะทางขนาดและเฟสที่ต้องการได้ โดยจะขอล่าถึงรายละเอียดของการปรับพารามิเตอร์ควบคุมทั้งสามในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อก โดยใช้เบรินสไตน์โพลีโนเมียล

การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อกความถี่ต่ำผ่านอันดับ 4 โดยใช้เบรินสไตน์โพลีโนเมียล ในเบื้องต้นได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ดังนี้ คือ $n=2$ $K=1$ และ $\varepsilon=10$ นำไปแทนลงในสมการที่ 3.14 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดยกกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านคือสมการที่ 3.16

$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^4}{(1+\varepsilon^2)s^8 + (-4-4\varepsilon^2)s^6 + (6+4\varepsilon^2)s^4 - 4s^2 + 1} \quad (3.16)$$

ในที่นี้เลือกค่า $\varepsilon=10$ จะได้ดังสมการที่ 3.17

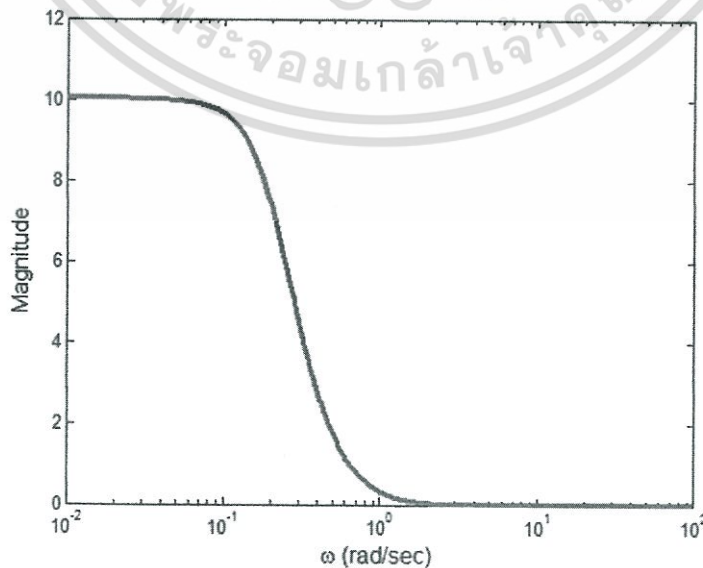
$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^4}{101s^8 - 404s^6 + 406s^4 - 4s^2 + 1} \quad (3.17)$$

ทำการเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ s จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4 ดังสมการที่ 3.18

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1532s^3 + 2.9714s^2 + 0.7941s + 0.0995} \quad (3.18)$$

เมื่อ H_0 คือค่าคงที่ที่ใช้กำหนดขนาด

นำสมการที่ 3.18 ทำการพล็อตกราฟผลตอบสนองทางความถี่ โดยสมมติให้ $H_0=1$ แสดงดังรูปที่ 3.3 รูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ

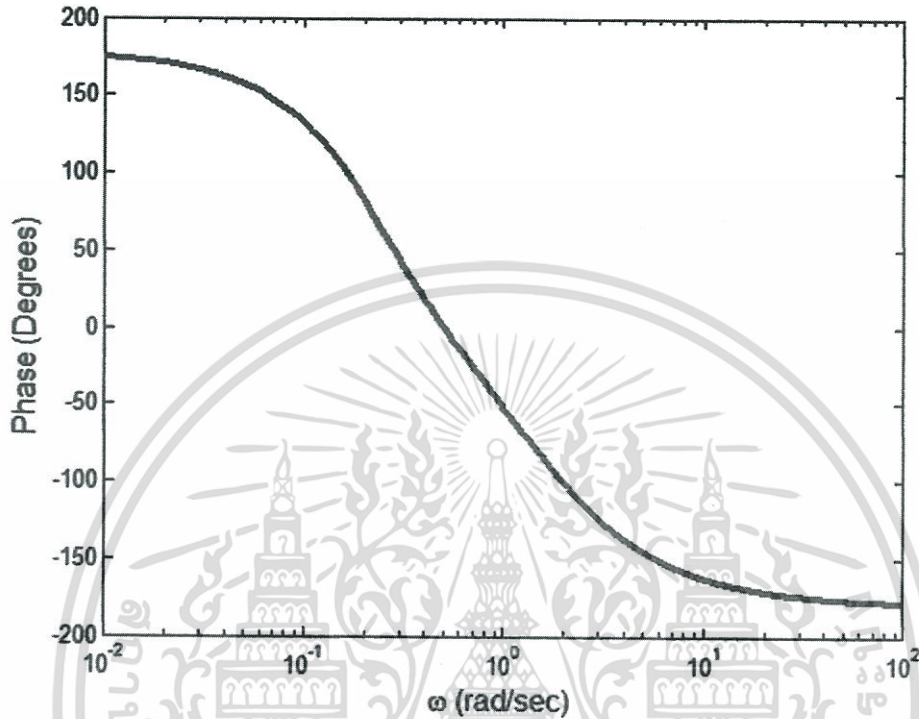


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4

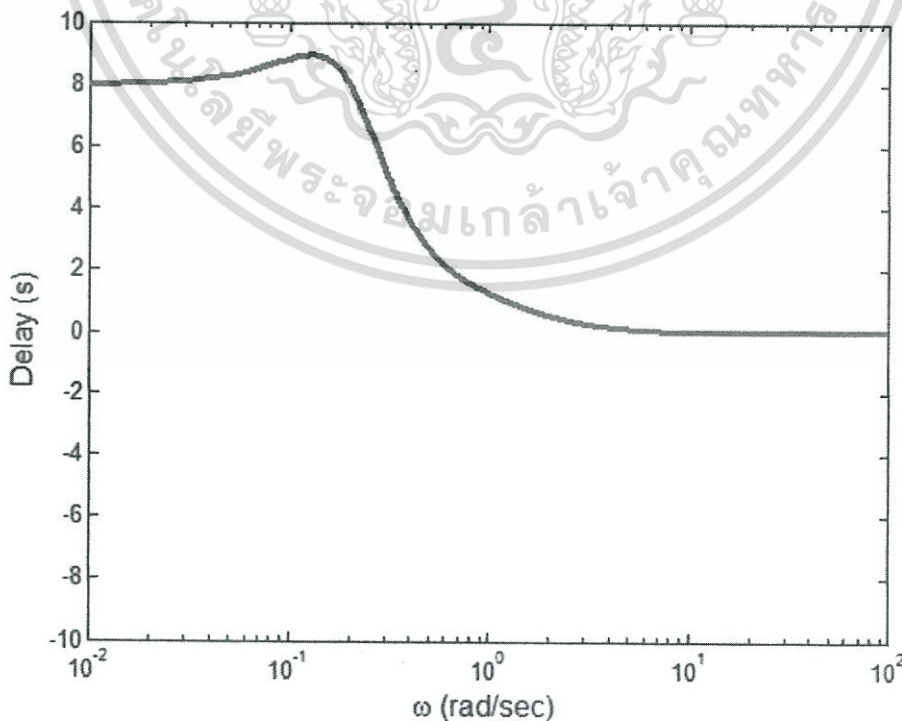
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 แสดงผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบที่สุดทางขนาด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แถบผ่าน (Pass-band) และความถี่แถบหยุด (Stop-band) ดังนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบได้ดี เช่น วงจรชดเชยสัญญาณ (Compensating Circuits)



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4



เอกสารรูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4 ในการคำนวณการคำนวณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีเฟสเชิงเส้น (Linear Phase) และรูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบทางเวลาประวิง (Maximally Flat Delay) และยังมีคุณลักษณะใกล้เคียงค่าคงที่ (Constant Delay Characteristics) เป็นผลต่อเนื่องจากการมีเฟสเชิงเส้นนั่นเอง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการใช้งานวงจรรองความถี่แบบแอนาล็อก เพราะฉะนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) นอกจากคุณลักษณะเด่นหลัก ๆ ทางขนาด เฟส และเวลาประวิงของวงจรรองความถี่แบบเบิร์ตสไตน์แล้ว

3.2.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4 โดยกำหนดให้ $n=2$ และ $K=1$ แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε จะได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.6 รูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε เป็นดังนี้ $\varepsilon=0.1$ $\varepsilon=1$ $\varepsilon=10$ และ $\varepsilon=100$ ส่วนค่าคงที่ H_0 จะกำหนดค่าให้มีขนาดสูงสุดเป็น 7.5 เท่ากันทุกเงื่อนไข ฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ 3.19 สมการที่ 3.20 สมการที่ 3.21 และสมการที่ 3.22 ตามลำดับ

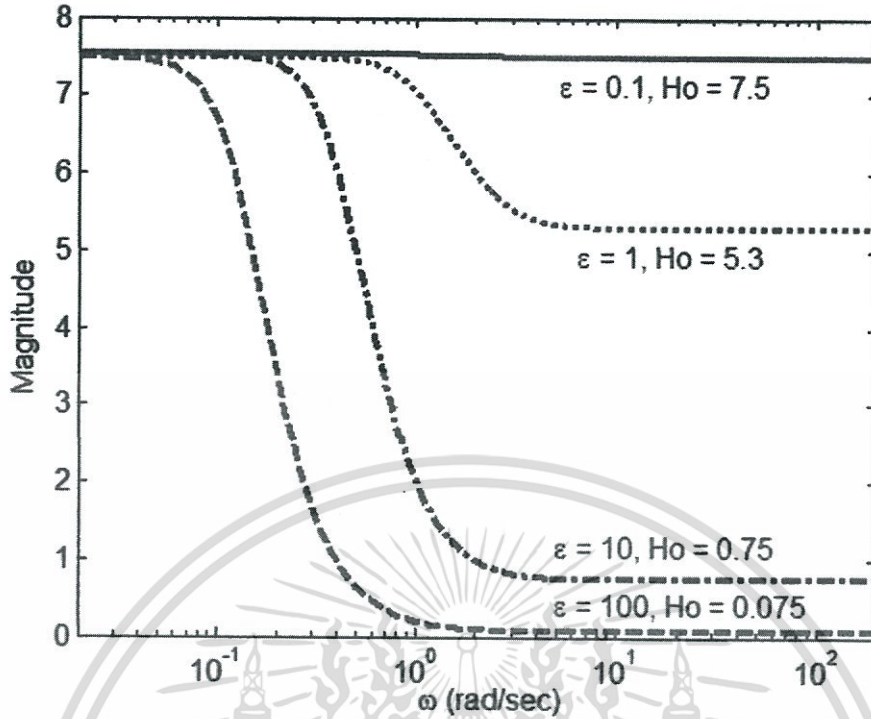
$$N(s) = \frac{(7.5) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.9966s^3 + 5.9864s^2 + 3.9842s + 0.995} \quad (3.19)$$

$$N(s) = \frac{(5.3) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.7856s^3 + 5.1654s^2 + 3.0504s + 0.7071} \quad (3.20)$$

$$N(s) = \frac{(0.75) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1532s^3 + 2.9714s^2 + 0.7941s + 0.0995} \quad (3.21)$$

$$N(s) = \frac{(0.075) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 2.9288s^3 + 2.2889s^2 + 0.2149s + 0.01} \quad (3.22)$$

นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดได้ดังรูปที่ 3.6 จากรูปจะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุดทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและแถบหยุด นอกจากนั้นการลดทอนในย่านความถี่แถบหยุดยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ε นั่นเอง



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε

รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε เป็นดังนี้ $\varepsilon=0.5$ $\varepsilon=1.5$ $\varepsilon=2.5$ $\varepsilon=3.5$ $\varepsilon=10$ และ $\varepsilon=15$ ส่วนค่าคงที่ $H_0 = 1$ พังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ 3.23 สมการที่ 3.24 สมการที่ 3.25 สมการที่ 3.26 สมการที่ 3.27 และสมการที่ 3.28 ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.9259s^3 + 5.7063s^2 + 3.6617s + 0.8944} \quad (3.23)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.6607s^3 + 4.7004s^2 + 2.5388s + 0.5547} \quad (3.24)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.4915s^3 + 4.0952s^2 + 1.8957s + 0.3714} \quad (3.25)$$

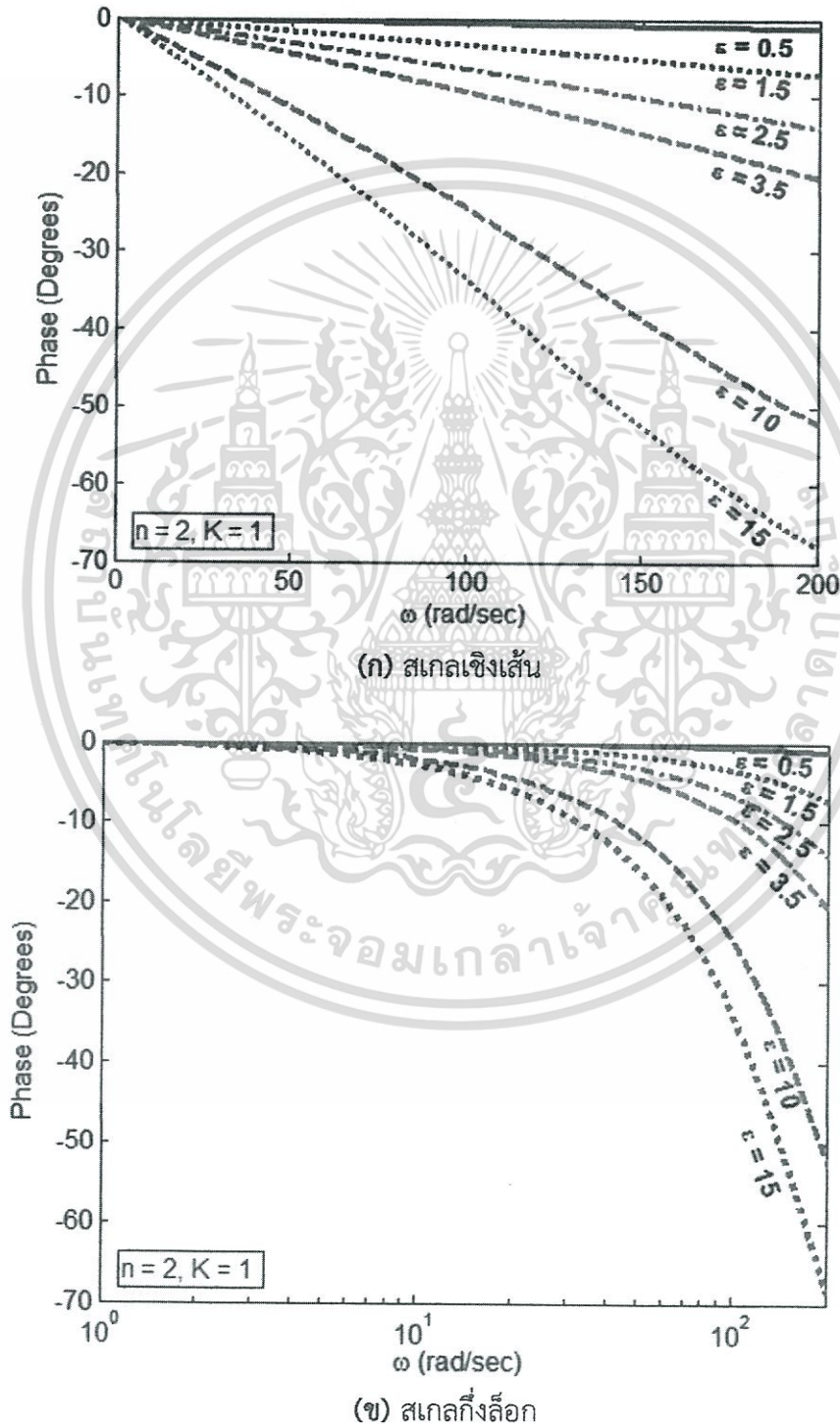
$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.3891s^3 + 3.7432s^2 + 1.5358s + 0.2747} \quad (3.26)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.1533s^3 + 2.9716s^2 + 0.7943s + 0.0995} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.0917s^3 + 2.7793s^2 + 0.6225s + 0.0665} \quad (3.28)$$

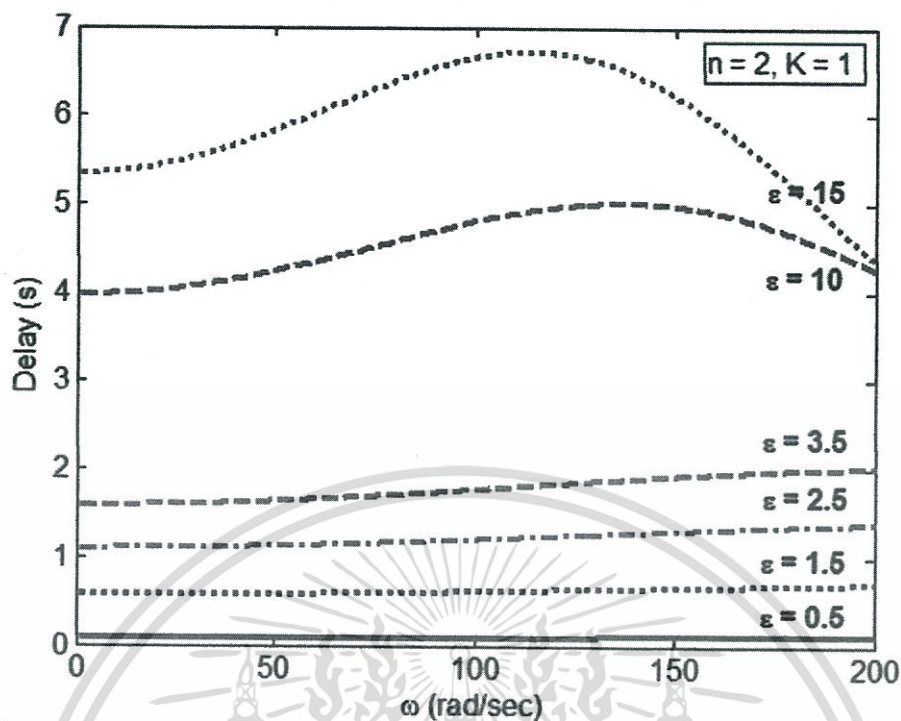
นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสได้ดังรูปที่ 3.7 (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น (Linear Scale) และรูปที่ 3.7 (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก (Semi-log Scale) จะเห็นได้ว่ามีเฟสเชิงเส้นทุกเงื่อนไข นอกจากนั้นสโลปของเฟสยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ ε



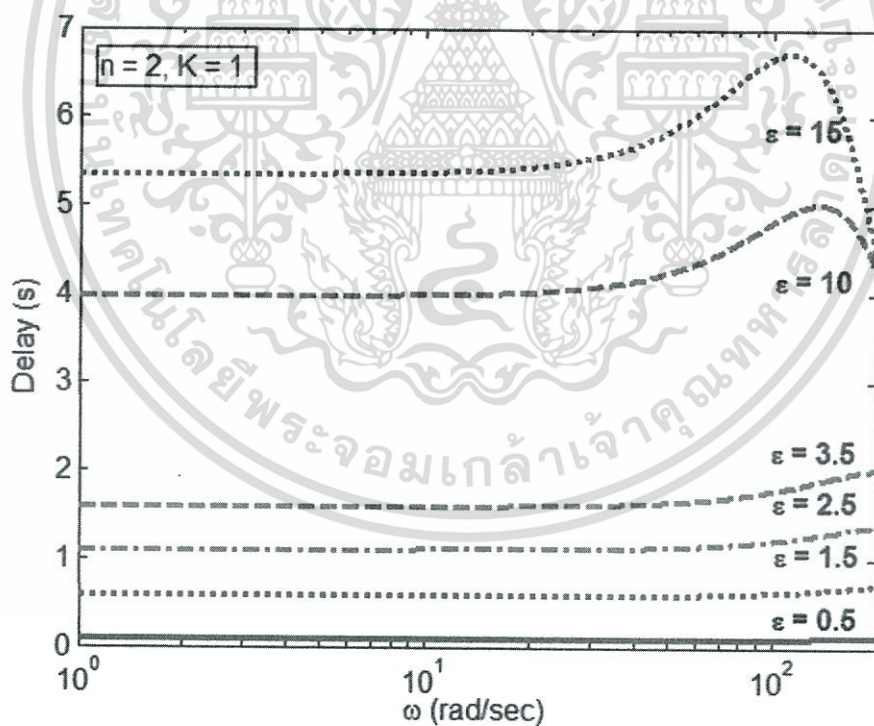
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สเกลเชิงเส้น



(ข) สเกลกึ่งล็อก

รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ϵ

รูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ϵ เป็นดังนี้ $\epsilon=0.5$ $\epsilon=1.5$ $\epsilon=2.5$ $\epsilon=3.5$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\varepsilon=10$ และ $\varepsilon=15$ ส่วนค่าคงที่ $H_0=1$ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนจะเหมือนกับในกรณีพิจารณาเฟสในรูปที่ 3.7 โดย รูปที่ 3.8 (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.8 (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก จะเห็นว่ามี ความราบเรียบที่สุดทางเวลาประวิง และยังมีคุณสมบัติเป็นค่าคงที่ทุกเงื่อนไข

สรุป ข้อดีของวงจรรองความถี่แบบเบรินสไตน์ คือ สามารถปรับเปลี่ยนการลดทอนในช่วง ความถี่แถบหยุด ปรับเปลี่ยนสโลปของเฟส และปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นตาม ต้องการโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ε

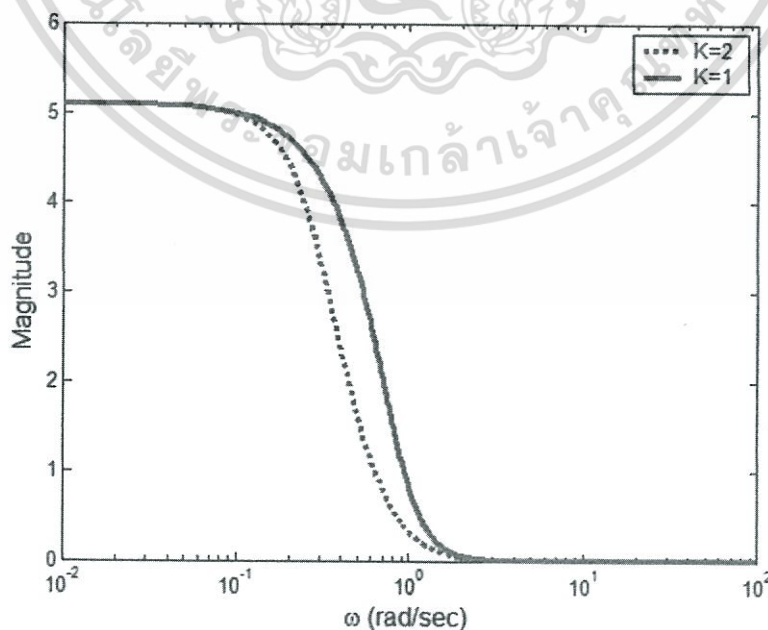
3.2.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบรินสไตน์ อันดับ 4 เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ $K=1$ และ $K=2$ โดยกำหนดให้ $n=2$ และ $\varepsilon=5$ เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ 3.29 และสมการ 3.30 ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.2948s^3 + 3.4280s^2 + 1.2241s + 0.1961} \quad (3.30)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 1.9883s^3 + 1.8997s^2 + 0.9481s + 0.1961} \quad (3.31)$$

รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบ เบริน สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K=1$ และ $K=2$ จะเห็นว่ามี ความราบเรียบที่สุดทาง ขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและแถบหยุด แต่จะแตกต่างกันในช่วงความถี่เปลี่ยน (Transition Band)

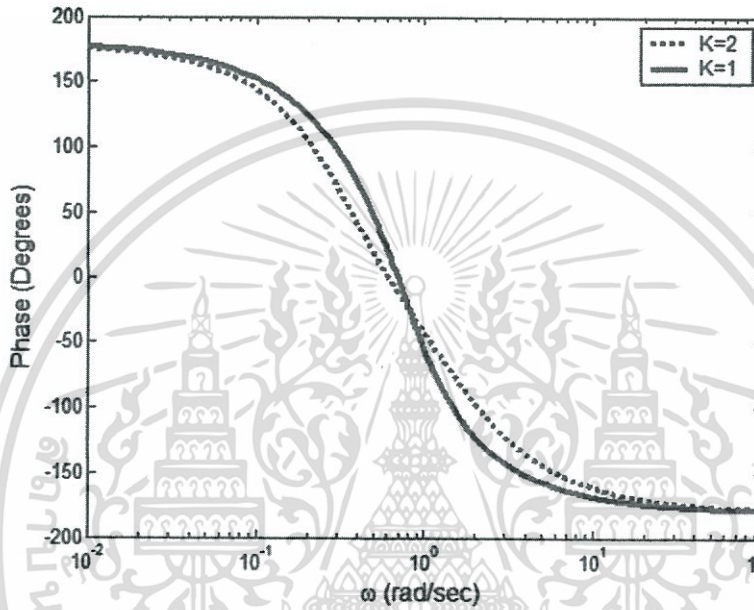


รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K

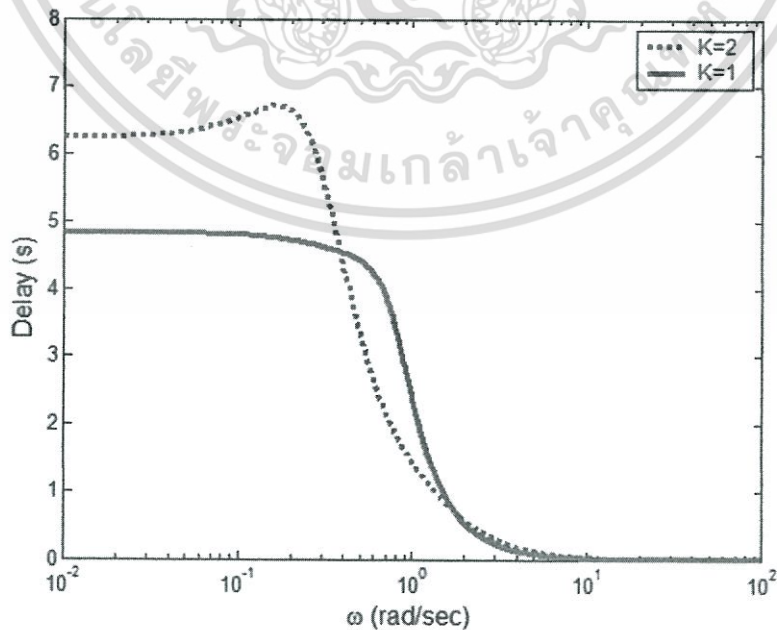
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K=1$ และ $K=2$ จะเห็นว่ามีเฟสเชิงเส้น แต่จะมีสโลปของเฟสแตกต่างกันเล็กน้อย

รูปที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K=1$ และ $K=2$ จะเห็นว่า การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K ทำให้เกิดความราบเรียบทางเวลาประวิงมากขึ้น



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K



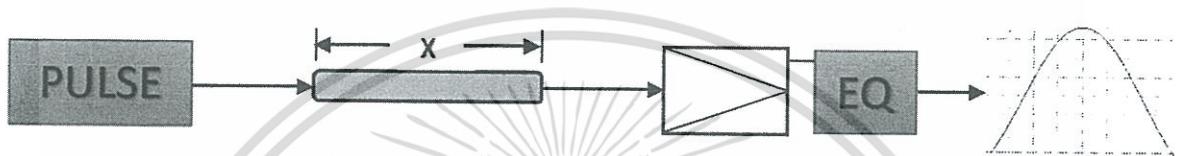
รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป ข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบเบรินสไตน์ คือสามารถปรับเปลี่ยนสโลปหรือความชันของขนาด และเฟสได้ตามการใช้งาน และสามารถปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นได้ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K

3.3 ออกแบบเคเบิลอิกวอลไลเซอร์แบบตั้งค่าได้ตามระยะทางของสายเคเบิล

การออกแบบวงจรอิกวอลไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณทดสอบดังบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

ซึ่งในการออกแบบได้อาศัยทฤษฎีของ Bode ดังสมการที่ 3.31

$$H(f; L) = \frac{L + T(f)}{LT(f) + 1} \quad (3.31)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของสาย Cable

$T(f)$ คือ ฟังก์ชันแสดงคุณสมบัติของสายเคเบิล

โดยฟังก์ชันแสดงคุณสมบัติของสายเคเบิลแสดงได้ดังสมการที่ 3.32

$$T(f) = e^{-P(f)} \quad (3.32)$$

ซึ่งค่าของฟังก์ชัน $P(f)$ ในคุณสมบัติของสายเคเบิลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.33

$$P(f) \cong K\sqrt{f} \quad (3.33)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิล

f เป็น ความถี่ โดย คุณลักษณะ loss จะแปรผันเป็น Square root ของความถี่ จากสมการที่ 3.32 เมื่อคูณด้วยค่าความยาวของสายเคเบิลแล้วสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.34

$$P(f)L = KL\sqrt{f} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขั้นตอนต่อไป ทำการประมาณ วงจรอควอไลเซอร์โดยใช้วิธีการใหม่ คือ เบิร์นสไตน์โพลิโนเมียล (Bernstein polynomials) ซึ่งคือสมการที่ 3.35

$$B_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \quad (3.35)$$

เมื่อ $f\left(\frac{k}{n}\right)$ คือ ฟังก์ชันที่ต้องการประมาณจากการสุ่มสัญญาณ (Sampling)

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

และ $0 \leq x \leq 1$

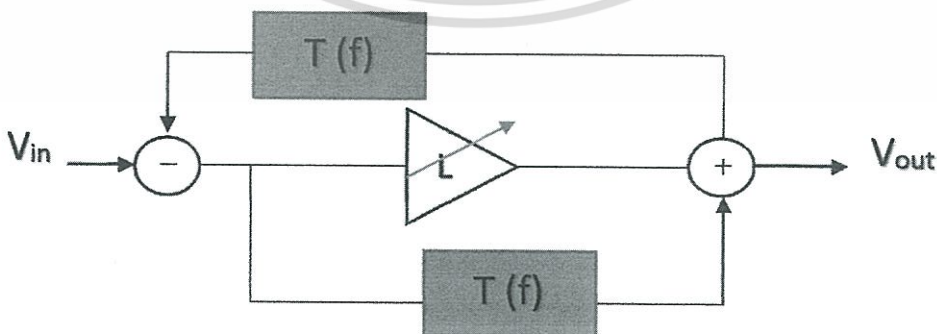
จากนั้นแทนค่า $f\left(\frac{k}{n}\right)$ ด้วย $e^{KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}}$ ซึ่งจะได้ตั้งสมการที่ 3.36

$$T(f) = \frac{1}{B(f; x)} = e^{-KL\frac{1}{2}} \quad (3.36)$$

แทนค่าสมการที่ 3.36 ลงในสมการที่ 3.35 จะได้ตั้งสมการที่ 3.37

$$T(f) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n e^{KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k}} \quad (3.37)$$

จากสมการที่ 3.37 ทำการตั้งค่าลำดับที่ต้องการ เช่น $n = 4, 5, 6, \dots$ และ L คือ ความยาวของสาย Cable ที่ต้องการอควอไลเซอร์หลังจากคำนวณค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) $T(f)$ แล้วแทนค่า $T(f)$ ลงในสมการที่ 3.34 ซึ่งเป็น Bode Type Equalizer จะได้เคเบิลอควอไลเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปวงจร Bode Type Equalizer ที่ตั้งค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ถ้าต้องการเพิ่มสัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากฝั่งด้านบวกจะมีสมการดังสมการที่ 3.38

$$T(f) = e^{P(f)L} \quad (3.38)$$

ในทางกลับกันถ้าต้องการลดสัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากทางด้านลบดังสมการที่ 3.39

$$T(f) = e^{-P(f)L} \quad (3.39)$$



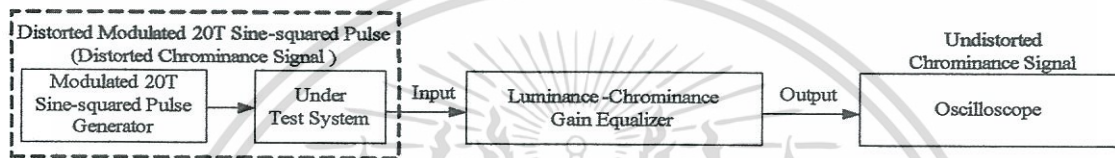
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

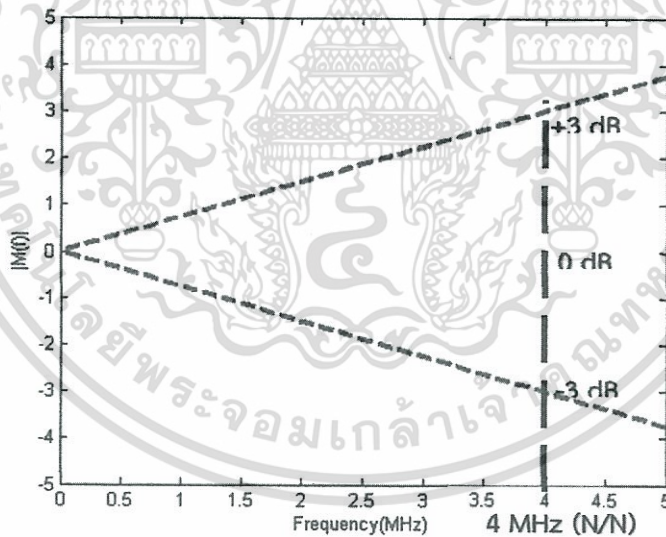
การออกแบบวงจรอ็ควอไลเซอร์และผลการทดลอง

4.1 การออกแบบอ็ควอไลเซอร์ขนาดเชิงเส้น (Design Linear Gain Slope Equalizer)

แนวความคิดอ็ควอไลเซอร์ของความผิดเพี้ยนของสีเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแก้ไขได้ทั้งความผิดเพี้ยนทางสีต่ำ และความผิดเพี้ยนทางสีสูงดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความคิดของ ขนาดสโลปเชิงเส้น สำหรับการออกแบบ อ็ควอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.1 แนวคิดของอ็ควอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.2 อ็ควอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้นในอุดมคติ

ในการออกแบบอ็ควอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้นใช้สมการที่ 4.1

$$|M(f)| = 10^{\frac{\alpha_0}{20} \left(\frac{k}{N} \right)} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย α_0 คือแอมพลิจูดที่ต้องการในหน่วยเดซิเบล ในกรณี $\alpha_0 = +1\text{dB}$ ที่ ตำแหน่ง 4 MHz จะมีค่าของขนาดดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$|M(f)| = 1.222 \quad (4.2)$$

จากสมการ 4.1 สามารถเขียนใน ลอการิทึมฐาน e (Napierian) หรือ ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Function) ดังสมการที่ 4.3

$$|M(f)| = e^{0.115\alpha_0\left(\frac{k}{N}\right)} \quad (4.3)$$

นำสมการที่ 4.3 นำมาทำในแบบเบียร์นส์ไตน์โพลีโนเมียลจากสมการที่ 3.1 และฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลถูกจำกัดดังสมการที่ 4.4

$$e^{\alpha x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\alpha x}{N}\right)^N \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 สามารถเป็นค่าประมาณในไบโนเมียล (Binomial) โพลีโนเมียล (Polynomial) โดยแสดงได้ดังสมการที่ 4.5

$$e^{\alpha x} \cong \left\{ x e^{\frac{\alpha}{N}} + (1-x) \right\}^N = \sum_{k=0}^N e^{\alpha\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \quad (4.5)$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของสมการที่ 4.5 สามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 4.6 และทำการจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ 4.7

$$H(f; x) = \frac{1}{B_n(f; x)} = e^{0.115\left(\frac{k}{N}\right)} \quad (4.6)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^N e^{-0.115\alpha_0\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $\alpha_0 = +1\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.8 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.8 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.9

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.115\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.8)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.889x(1-x)^2 + 2.781x^2(1-x) + 0.891x^3} \quad (4.9)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.9 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.10

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 2.889\Omega^2 + 2.781\Omega^4 + 0.891\Omega^6} \quad (4.10)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.10 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.11

$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 2.889s + 2.781s^2 + 0.891s^3} \quad (4.11)$$

กำหนดให้ $\alpha_0 = -1\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.12 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.12 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.13

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.115\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.12)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.117x(1-x)^2 + 3.237x^2(1-x) + 1.122x^3} \quad (4.13)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.13 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.14

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 3.117\Omega^2 + 3.237\Omega^4 + 1.122\Omega^6} \quad (4.14)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.14 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเว็บไซต์นี้โปรดอย่าเผยแพร่ข้อมูล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+3.117s+3.237s^2+1.122s^3} \quad (4.15)$$

กำหนดให้ $\alpha_0 = +2\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.16 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.16 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.17

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.23\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.16)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.781x(1-x)^2 + 2.574x^2(1-x) + 0.795x^3} \quad (4.17)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.17 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.18

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+2.781\Omega^2+2.574\Omega^4+0.795\Omega^6} \quad (4.18)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.18 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.19

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+2.781s+2.574s^2+0.795s^3} \quad (4.19)$$

กำหนดให้ $\alpha_0 = -2\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.20 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.20 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.21

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.23\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.20)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.237x(1-x)^2 + 3.495x^2(1-x) + 1.259x^3} \quad (4.21)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.21 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 3.237\Omega^2 + 3.495\Omega^4 + 1.259\Omega^6} \quad (4.22)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.22 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.23

$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 3.237 + 3.495s^2 + 1.259s^3} \quad (4.23)$$

โดยกำหนดให้ $\alpha_0 = +3\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.24 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.24 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.25

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.24)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.674x(1-x)^2 + 2.3835x^2(1-x) + 0.7082x^3} \quad (4.25)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 เป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0, \infty)$ ในสมการที่ 4.25 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.26

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 2.674\Omega^2 + 2.3835\Omega^4 + 0.7082\Omega^6} \quad (4.26)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.26 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.27

$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 2.674s + 2.3835s^2 + 0.7082s^3} \quad (4.27)$$

โดยกำหนดให้ $\alpha_0 = -3\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 ซึ่งจะได้ดังสมการที่ 4.28 และเมื่อจากนั้นทำการกระจายและแทนค่า $e = 2.71828$ สมการที่ 4.28 ดังนั้นจะได้สมการที่ 4.29

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.28)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.366x(1-x)^2 + 3.776x^2(1-x) + 1.412x^3} \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (1-x)³ + 3.366x(1-x)² + 3.776x²(1-x) + 1.412x³ โยชนด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.29 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.30

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+3.366\Omega^2+3.776\Omega^4+1.412\Omega^6} \quad (4.30)$$

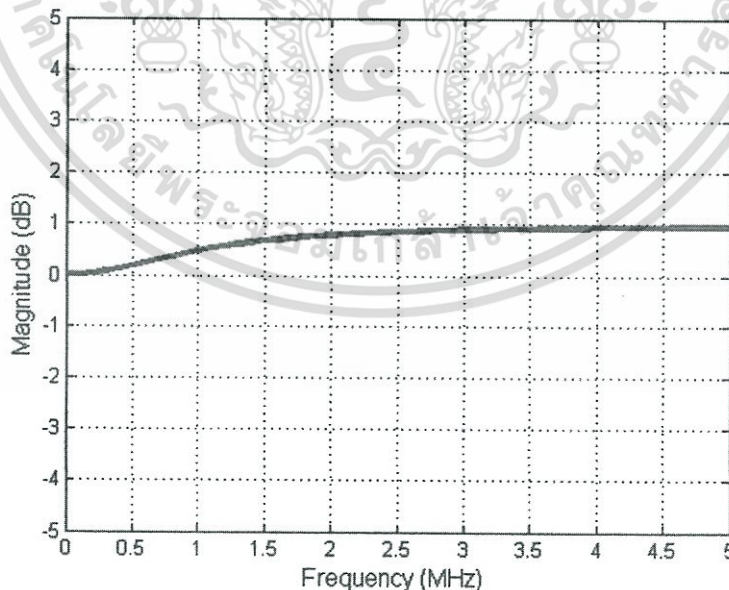
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.30 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.31

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+3.366s+3.776s^2+1.412s^3} \quad (4.31)$$

4.2 ผลการทดลอง (Simulation Results)

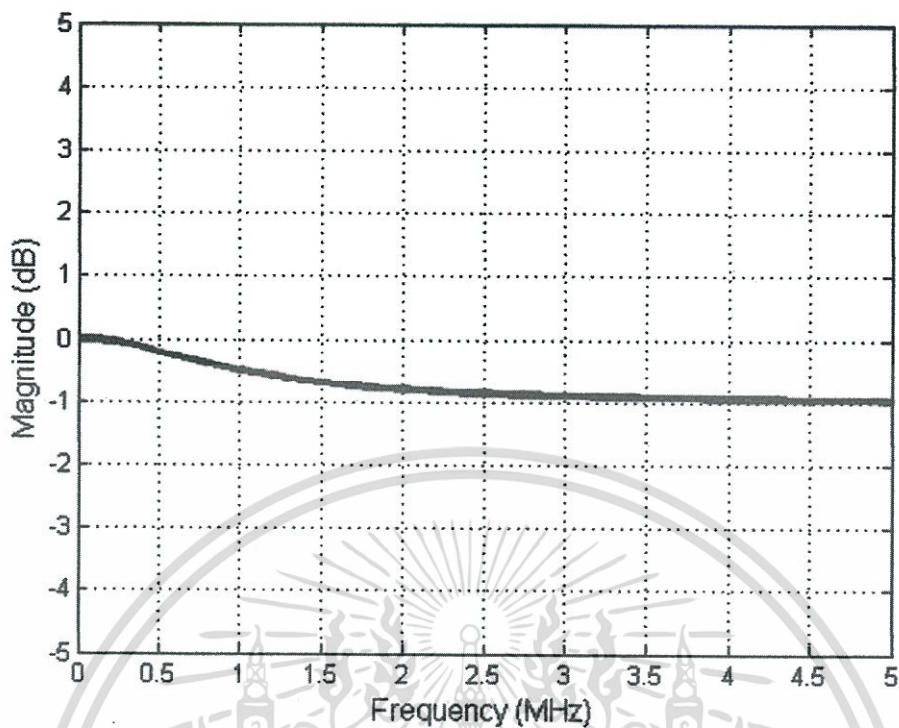
ในทางปฏิบัติขนาดระหว่าง สัญญาณแสง และสัญญาณสี จะต้องสมดุล เพื่อให้ส่งสัญญาณที่วิ่งไปยังที่รับสัญญาณโดยที่คุณภาพของสัญญาณภาพจะต้องไม่ด้อยลงไป อย่างไรก็ตาม หากสัญญาณแสง และสัญญาณสีไม่สมดุลนั้น สัญญาณจะต้องได้รับการปรับปรุงโดยผ่านอิกวอไลเซอร์ที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้

ในผลของการเปลี่ยนขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 1 เดซิเบล โดยรูปที่ 4.3 แสดงกราฟสมการที่ 4.11 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $+1$ เดซิเบล โดยรูปที่ 4.4 แสดงกราฟสมการที่ 4.15 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -1 เดซิเบล และรูปที่ 4.5 เป็นรูปที่แสดงขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 1 เดซิเบล ในรูปที่ 4.6 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ $+1$ เดซิเบลและในรูปที่ 4.7 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ -1 เดซิเบล

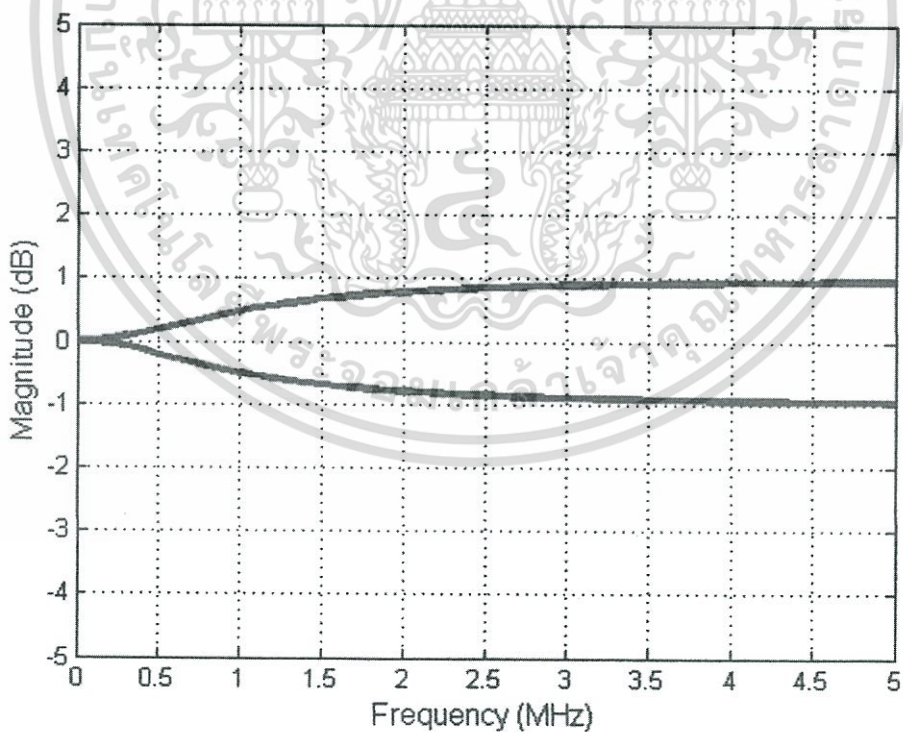


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $+1$ เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

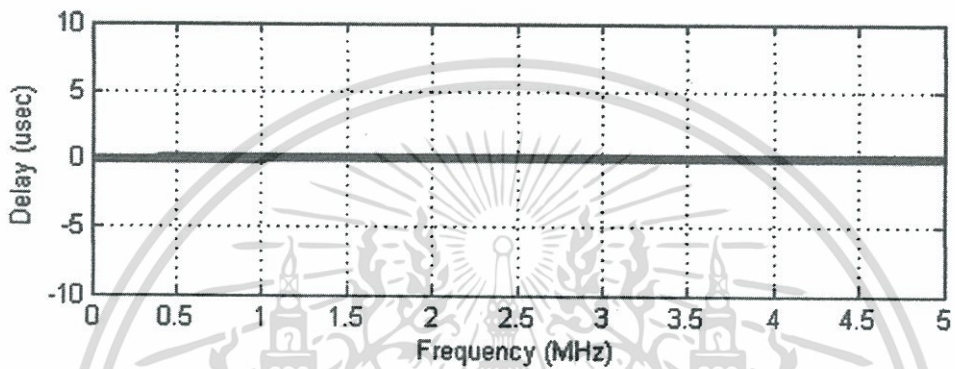
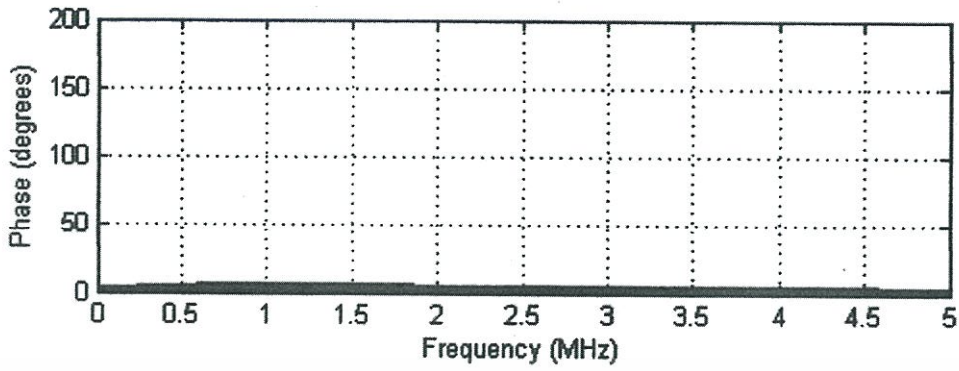


รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -1 เดซิเบล

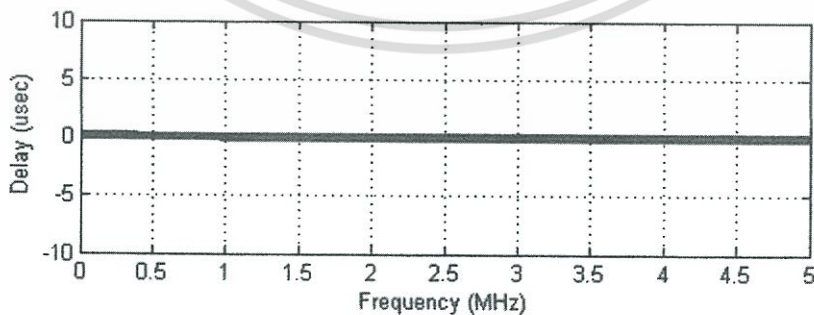
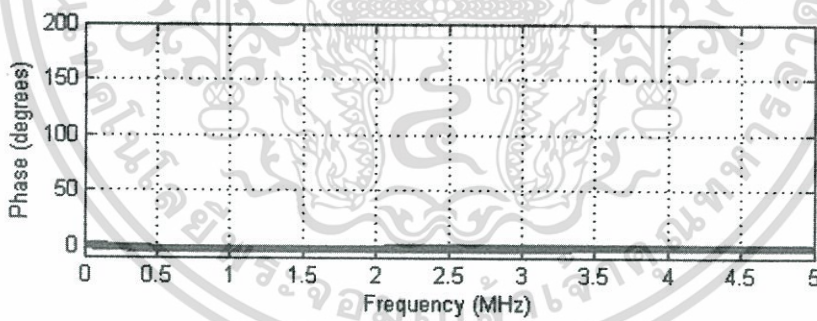


รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 1 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



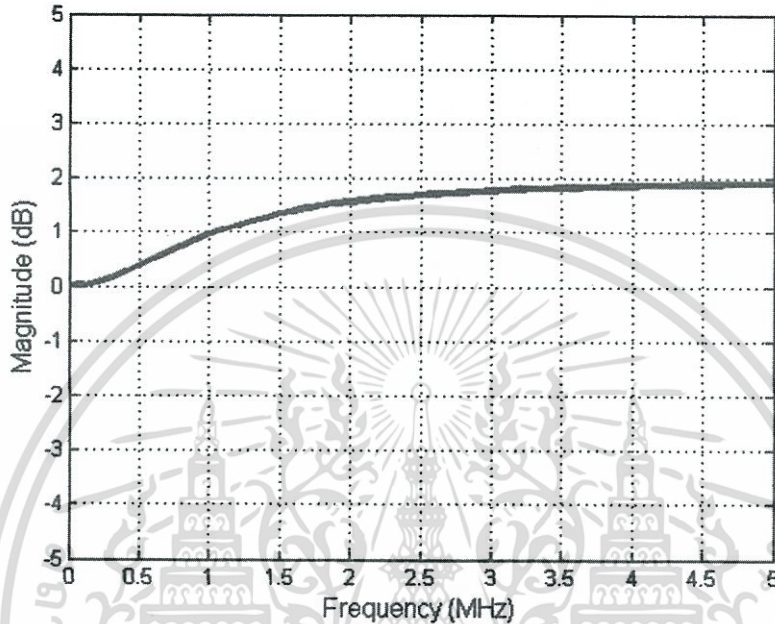
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ +1 เดซิเบล



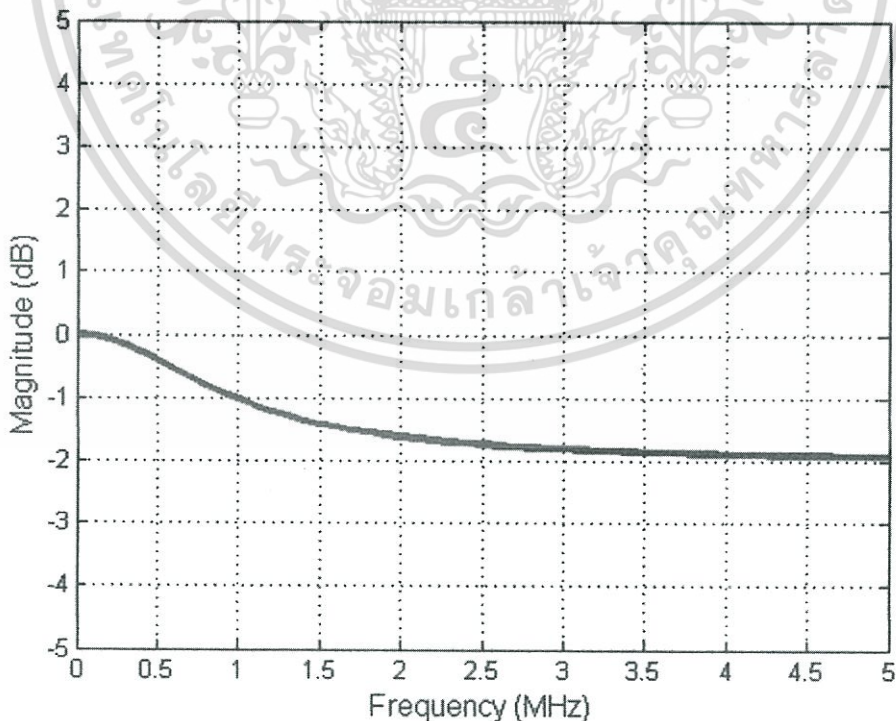
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ -1 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในผลของการเปลี่ยนขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 2 เดซิเบล โดยรูปที่ 4.8 แสดงกราฟสมการที่ 4.19 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +2 เดซิเบล โดยรูปที่ 4.9 แสดงกราฟสมการที่ 4.23 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -2 เดซิเบล และรูปที่ 4.10 เป็นรูปที่แสดงขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 2 เดซิเบล ในรูปที่ 4.11 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ +2 เดซิเบลและในรูปที่ 4.12 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ -2 เดซิเบล

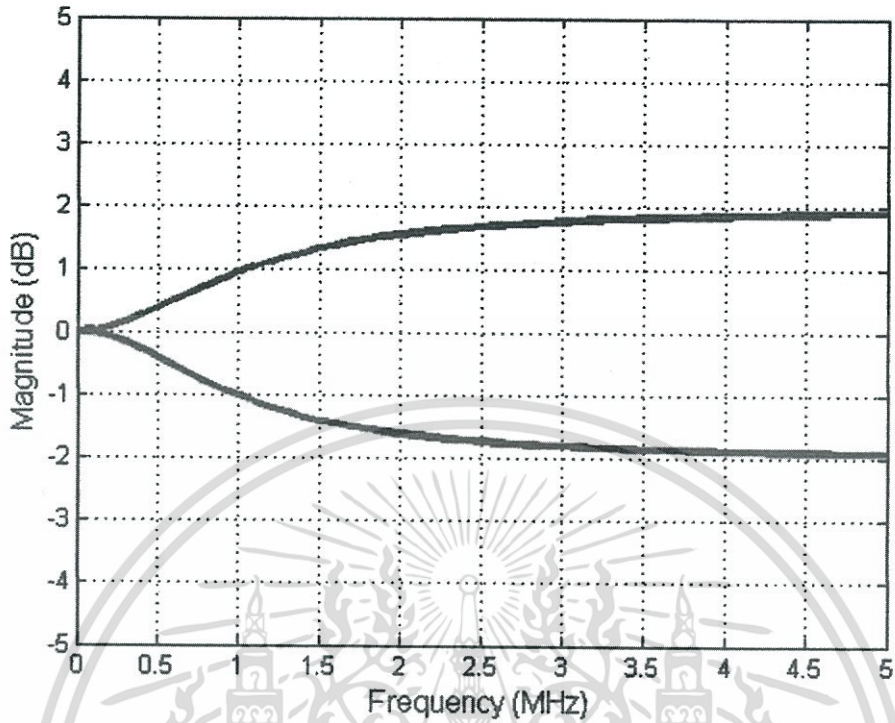


รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +2 เดซิเบล

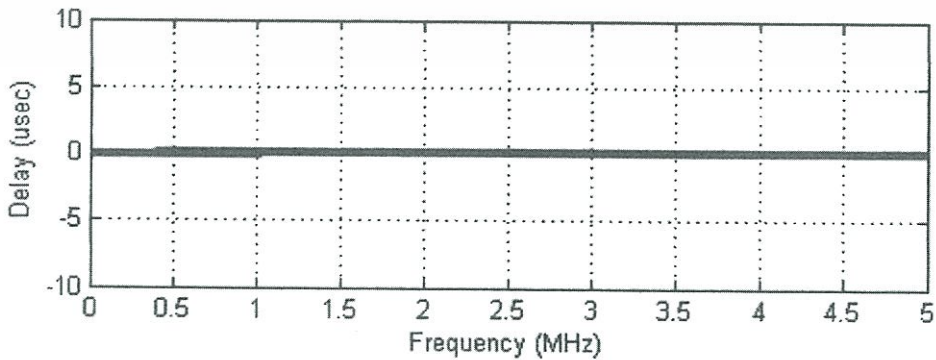
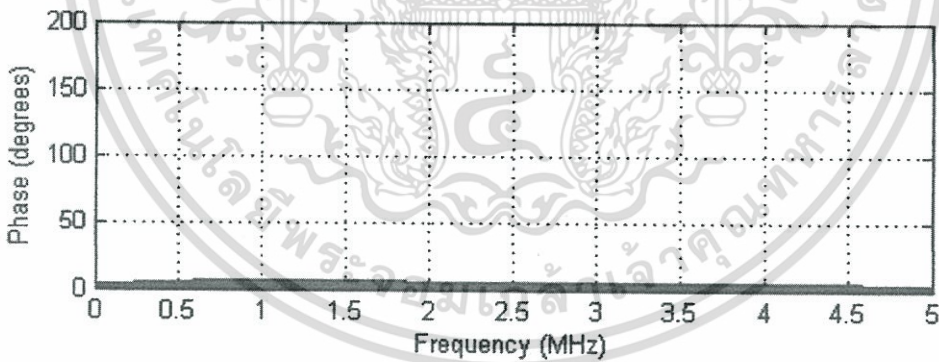


รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -2 เดซิเบล

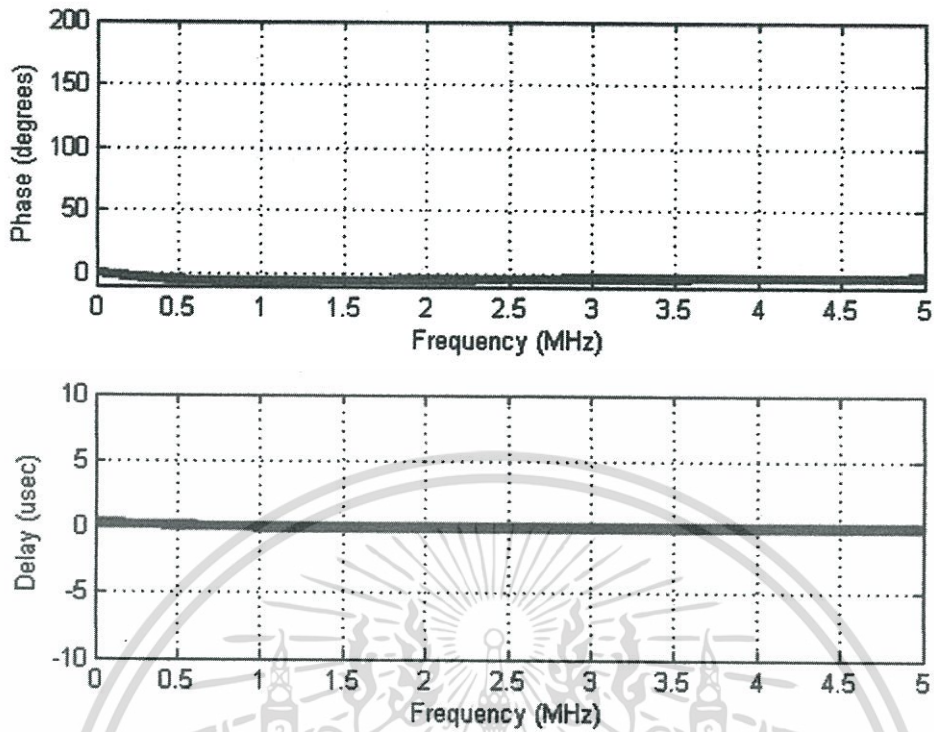
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 2 เดซิเบล

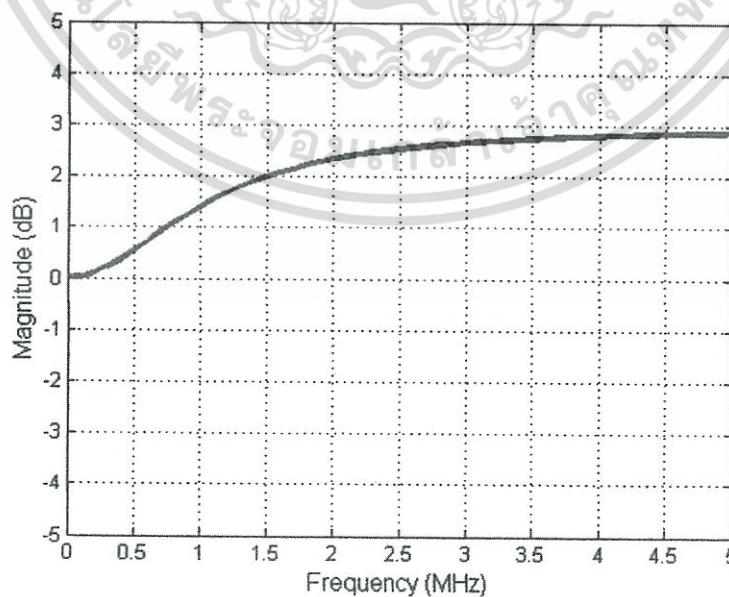


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ ± 2 เดซิเบล ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

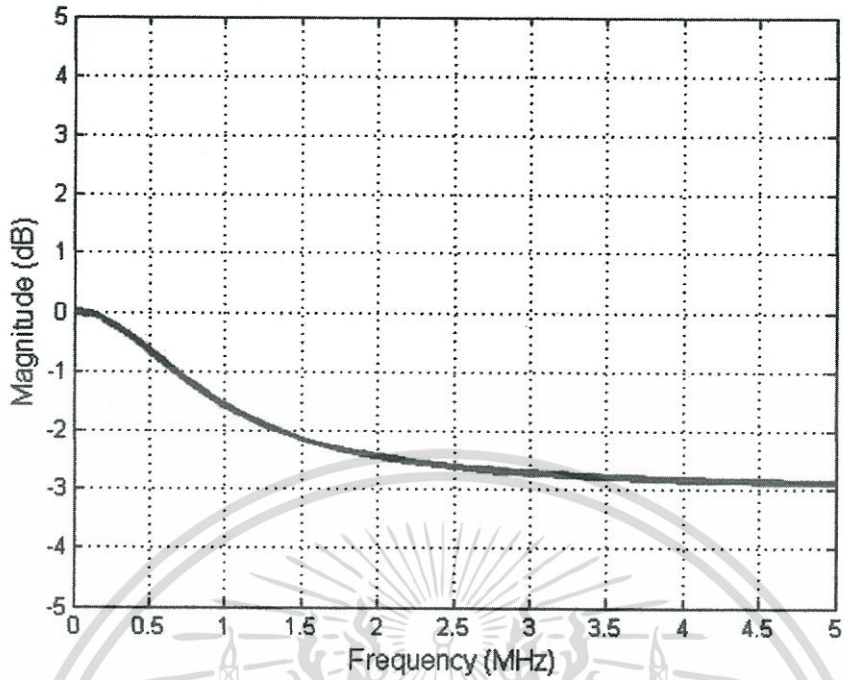


รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ -2 เดซิเบล

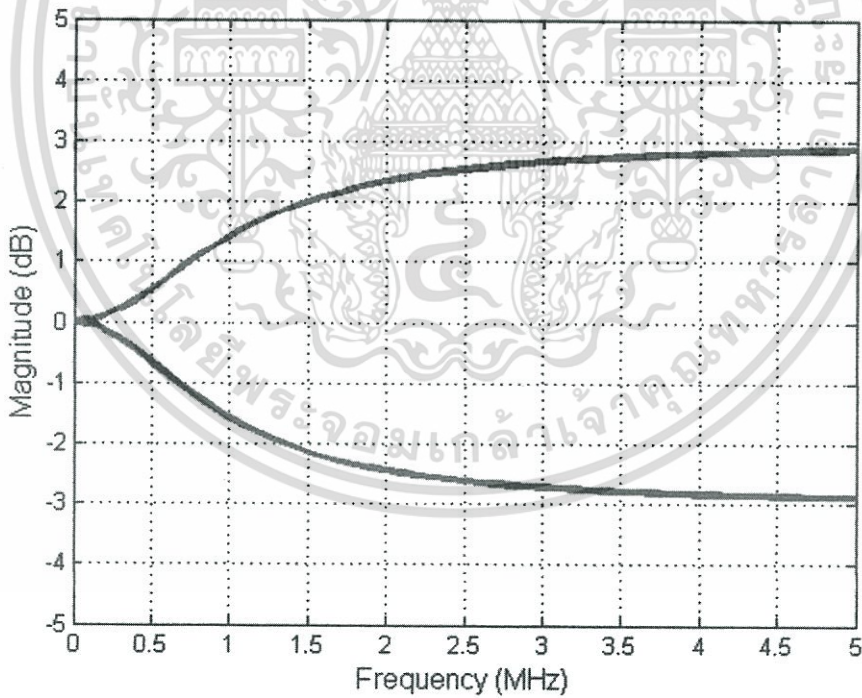
ในผลของการเปลี่ยนขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 3 เดซิเบล โดยรูปที่ 4.13 แสดงกราฟสมการที่ 4.27 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $+3$ เดซิเบล โดยรูปที่ 4.14 แสดงกราฟสมการที่ 4.31 ซึ่งเป็นขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -3 เดซิเบล และรูปที่ 4.15 เป็นรูปที่แสดงขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 3 เดซิเบล ในรูปที่ 4.16 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ $+3$ เดซิเบลและในรูปที่ 4.17 แสดงรูปเฟสและดีเลย์ที่ -3 เดซิเบล



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.13 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $+3$ เดซิเบล ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

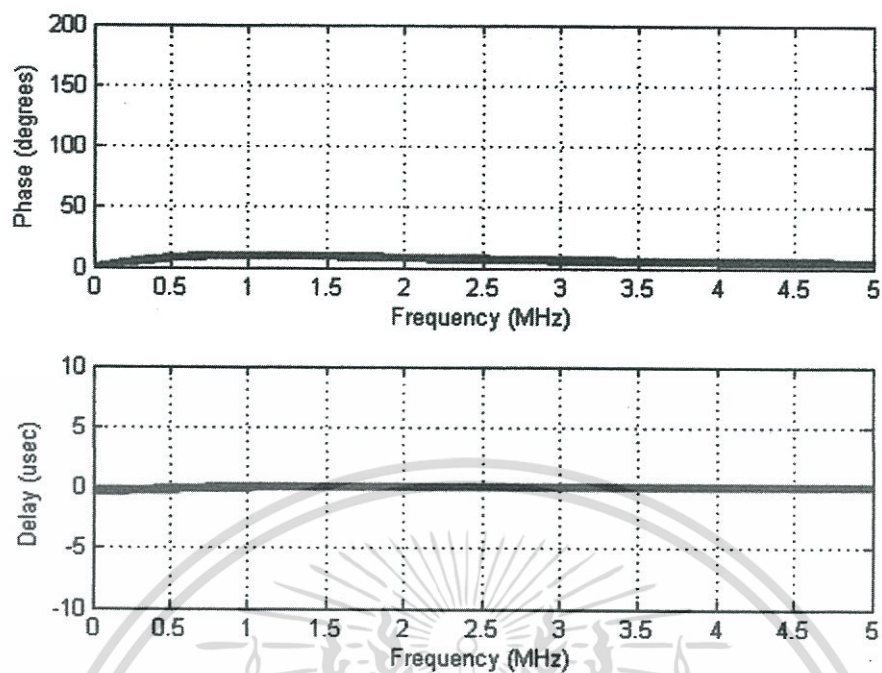


รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -3 เดซิเบล

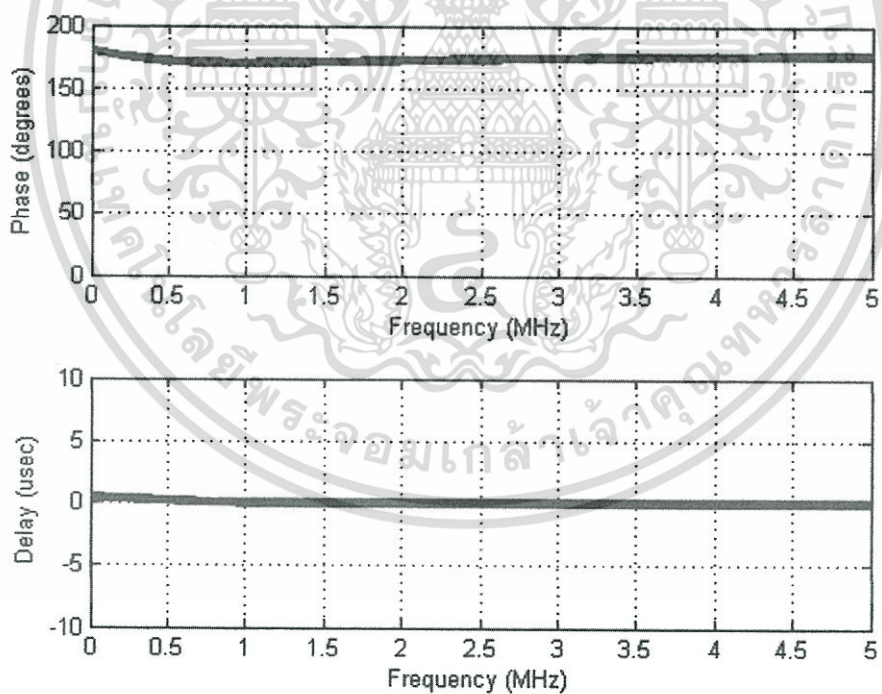


รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ ± 3 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



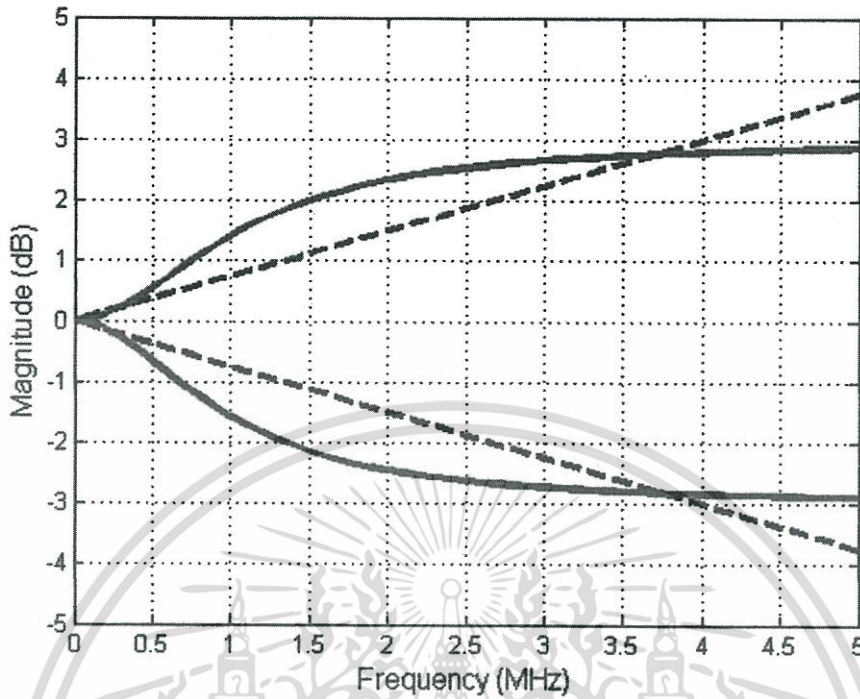
รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ + 3 เดซิเบล



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ที่ - 3 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.18 แสดงขนาดของอิกวไลเซอร์ที่ ± 3 เมื่อเทียบกับรูปในอุดมคติ



รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวไลเซอร์ที่ ± 3 เมื่อเทียบกับรูปในอุดมคติ

4.3 อิกวไลเซอร์ของสายส่งเคเบิล (Cable Equalizer)

ในระบบสื่อสาร เมื่อป้อนสัญญาณภาพ หรือข้อมูลผ่านสายเคเบิล (Coaxial Cable) จะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง (Decrease in Amplitude) และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น (Increase in the Effective width)

เป็นที่ทราบดีกันอยู่แล้วว่าสัญญาณ หรือข้อมูลจะมีผลผิดเพี้ยนเกิดขึ้นจากอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลทำให้เกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) เกิดพัลส์กว้าง (Echo pulse) ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างอิกวไลเซอร์ที่สามารถชดเชยสัญญาณที่ถูกลดทอนหายไป ซึ่งตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเซียล ในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต จะทำให้เราทราบได้ว่าสายเคเบิลชนิดต่างๆจะมีสัญญาณหายไปกี่เดซิเบลที่ความยาว 100 ฟุต ณ ตำแหน่งความถี่ต่างๆ ในหัวข้อนี้จะสร้างอิกวไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในสายเคเบิลชนิด RG-6 RG-11 และ RG-213 ณ ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz 50MHz และ 100MHz

4.3.1 อิกวไลเซอร์ของสายส่งเคเบิลชนิด RG-6

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-6 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -9.84 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอิกวไลเซอร์ที่มีขนาด +9.84 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไปโดยใช้เบิร์นสไตน์โพลี

โนเมียลในการสร้างวงจรเช่นเดียวกับอิกวไลเซอร์ของขนาดเชิงเส้น (Linear Gain Slope

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Equalizer) ดังนั้นเพื่อสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +9.84 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +9.84\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-1.1316\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.32)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.057x(1-x)^2 + 1.410x^2(1-x) + 0.323x^3} \quad (4.33)$$

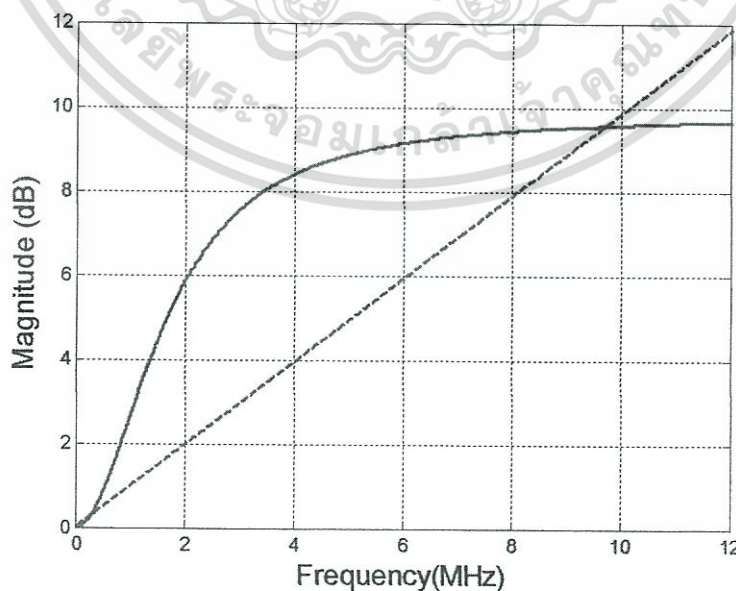
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.33 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.34

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 2.057\Omega^2 + 1.410\Omega^4 + 0.323\Omega^6} \quad (4.34)$$

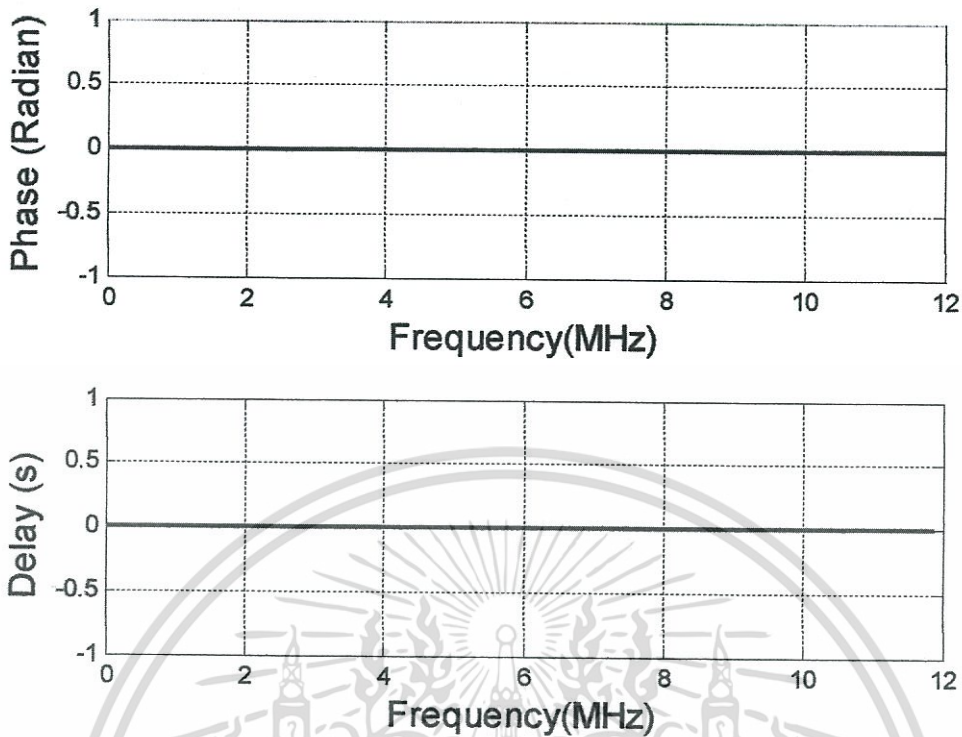
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.34 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้สมการที่ 4.35

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1 + 2.057s + 1.410s^2 + 0.323s^3} \quad (4.35)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.35 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



เอกสารนี้รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองทางขนาดของอีควอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิวโอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -22.96 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิวโอไลเซอร์ที่มีขนาด +22.96 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิวโอไลเซอร์ที่มีขนาด +22.96 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +22.96\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.640\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.36)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.244x(1-x)^2 + 0.516x^2(1-x) + 0.071x^3} \quad (4.37)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.37 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.38

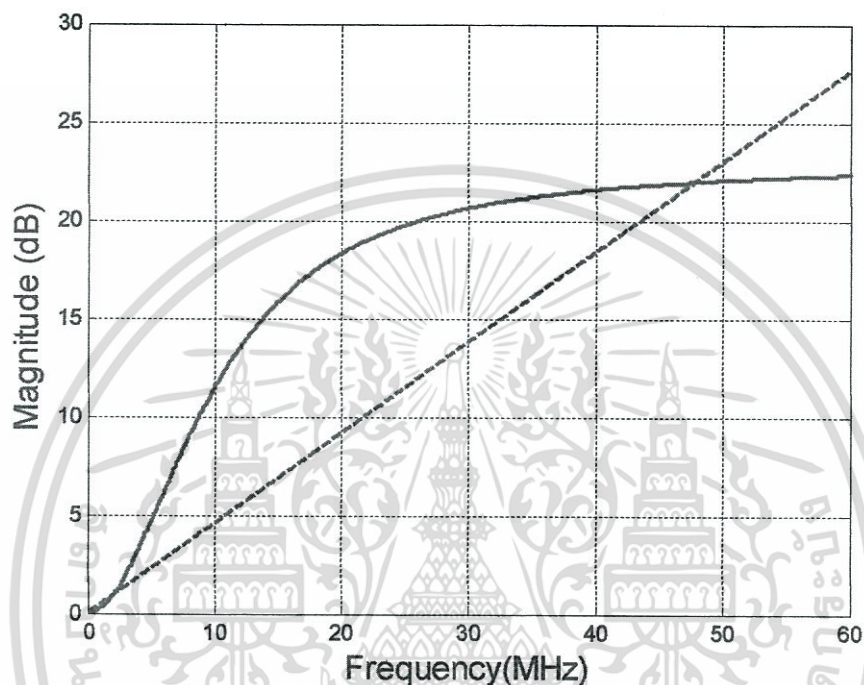
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{(1 + 0.516\Omega^2 + 0.089\Omega^4 + 0.005\Omega^6)} \quad (4.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ + 0.516 Ω^2 + 0.089 Ω^4 + 0.005 Ω^6 ทั่วไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

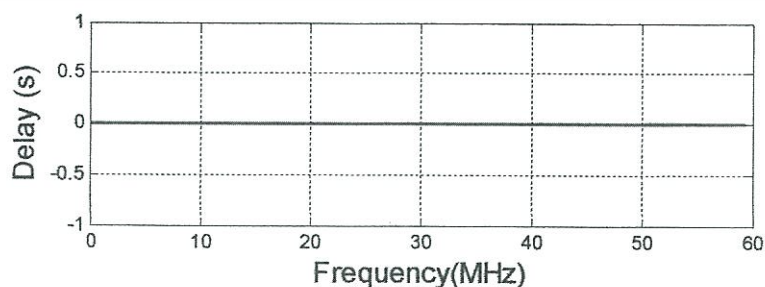
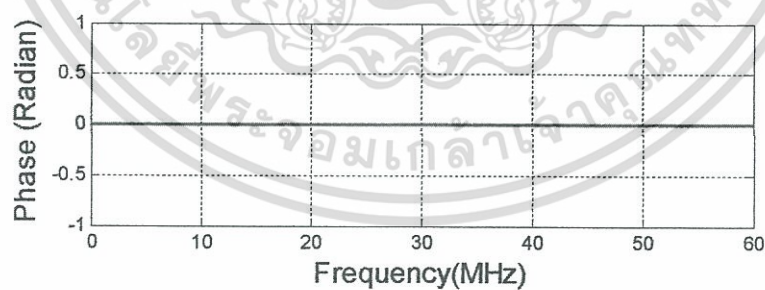
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.38 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.39

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+0.516s+0.089s^2+0.005s^3} \quad (4.39)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.39 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz



เอกสารรูปที่ 4.22 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -32.81 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +32.81 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +32.81 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +32.81\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.738 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.40)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.853x(1-x)^2 + 0.243x^2(1-x) + 0.023x^3} \quad (4.41)$$

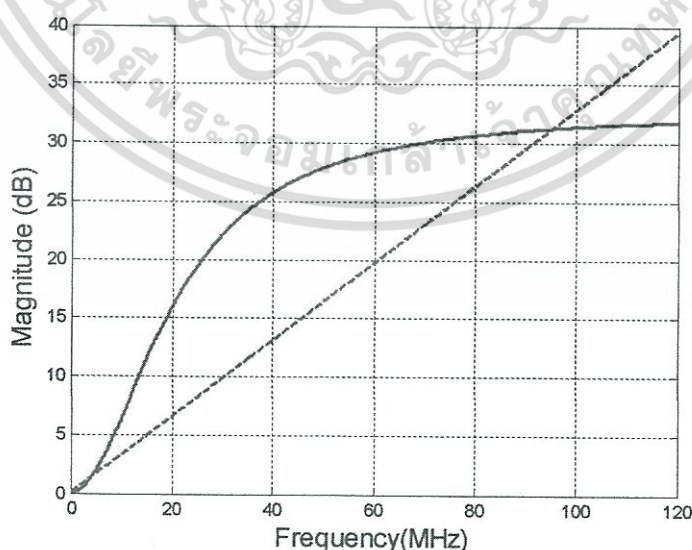
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.41 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.42

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 0.243\Omega^2 + 0.020\Omega^4 + 0.0005\Omega^6} \quad (4.42)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.42 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.43

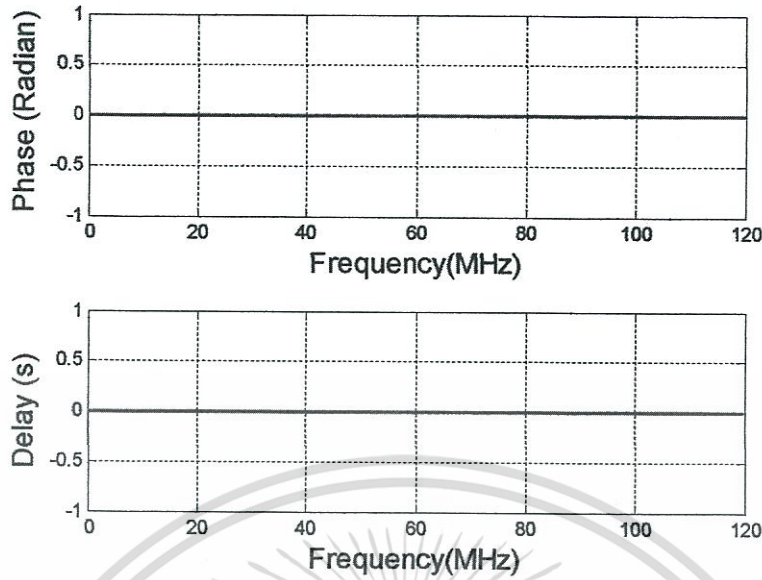
$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 0.243s + 0.020s^2 + 0.0005s^3} \quad (4.43)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.43 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอลไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-6 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -19.7 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบล ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +19.7\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.2655 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.44)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.410x(1-x)^2 + 0.663x^2(1-x) + 0.104x^3} \quad (4.45)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.45 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.46

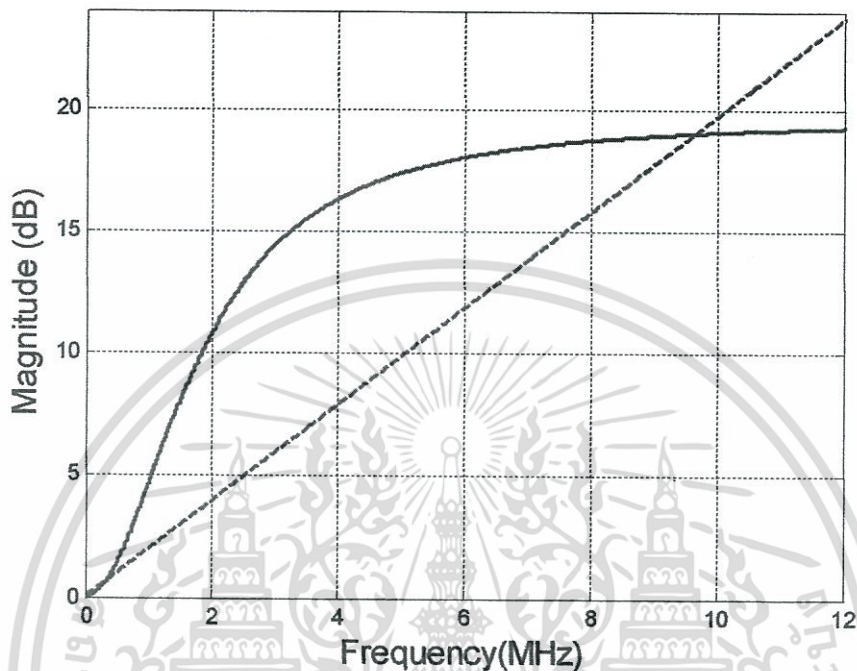
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 1.410\Omega^2 + 0.663\Omega^4 + 0.104\Omega^6} \quad (4.46)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.46 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.47

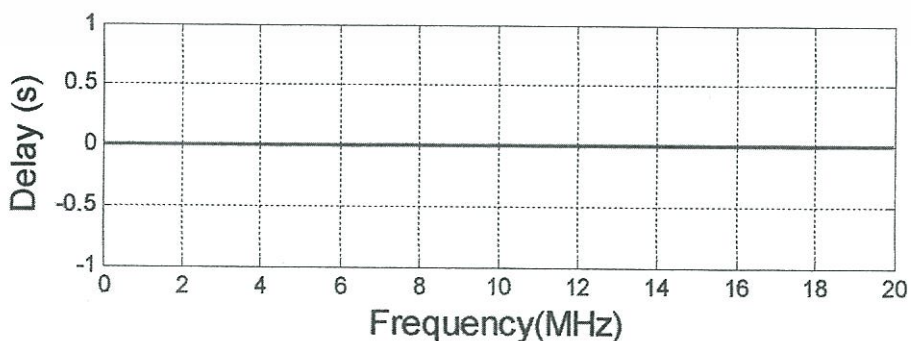
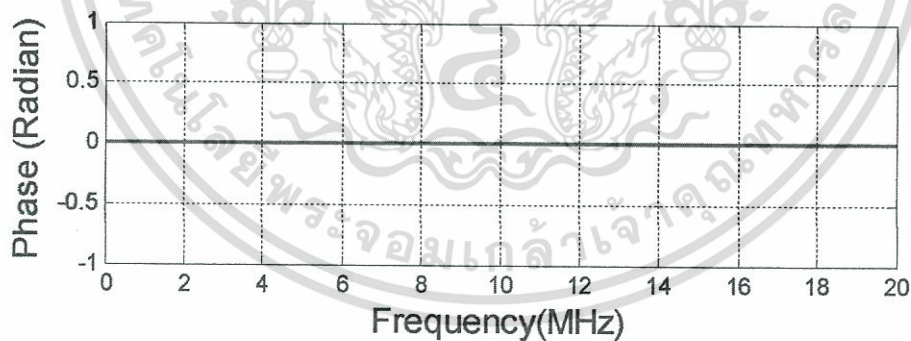
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+1.410s+0.663s^2+0.104s^3} \quad (4.47)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.37 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -45.9 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอควอไลเซอร์ที่มีขนาด +45.9 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอควอไลเซอร์ที่มีขนาด +45.9 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +45.9\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-5.279\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.48)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.516x(1-x)^2 + 0.089x^2(1-x) + 0.005x^3} \quad (4.49)$$

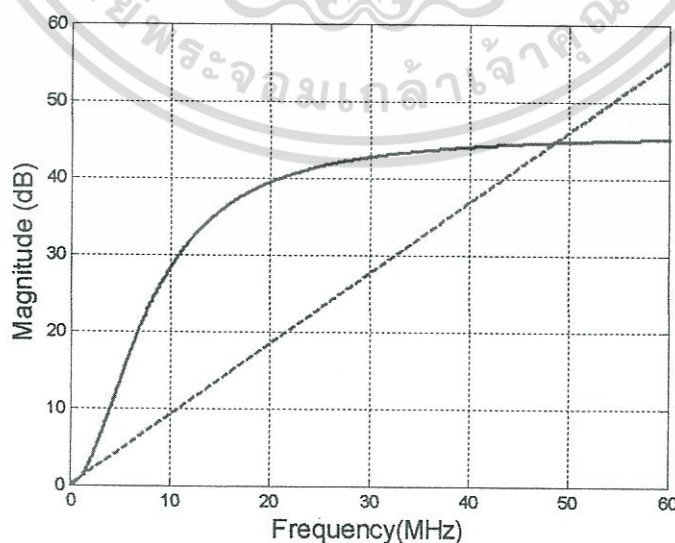
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.49 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.50

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 0.516\Omega^2 + 0.089\Omega^4 + 0.005\Omega^6} \quad (4.50)$$

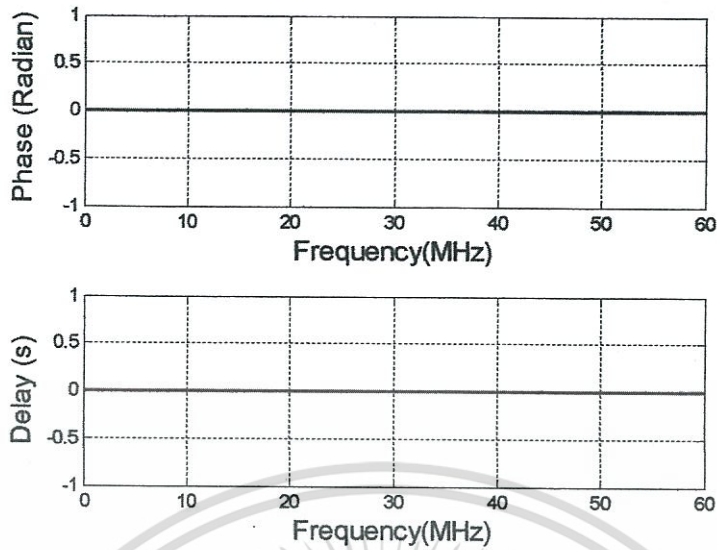
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.50 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ตั้งสมการที่ 4.51

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1 + 0.516s + 0.089s^2 + 0.005s^3} \quad (4.51)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.51 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



เอกสารรูปที่ 4.27 ผลตอบสนองทางขนาดของอควอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz ในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการสททอนไป -65.62 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +65.62 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกสททอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +65.62 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +65.62\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.52 และ 4.53 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-7.546\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.52)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.243x(1-x)^2 + 0.020x^2(1-x) + 0.0005x^3} \quad (4.53)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.53 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.54

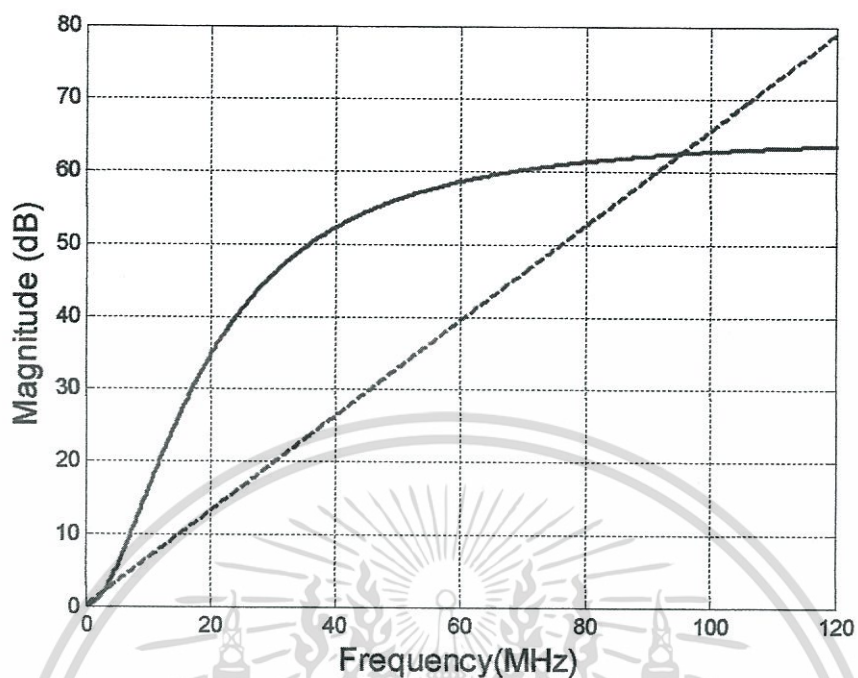
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 0.243\Omega^2 + 0.020\Omega^4 + 0.0005\Omega^6} \quad (4.54)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.54 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.55

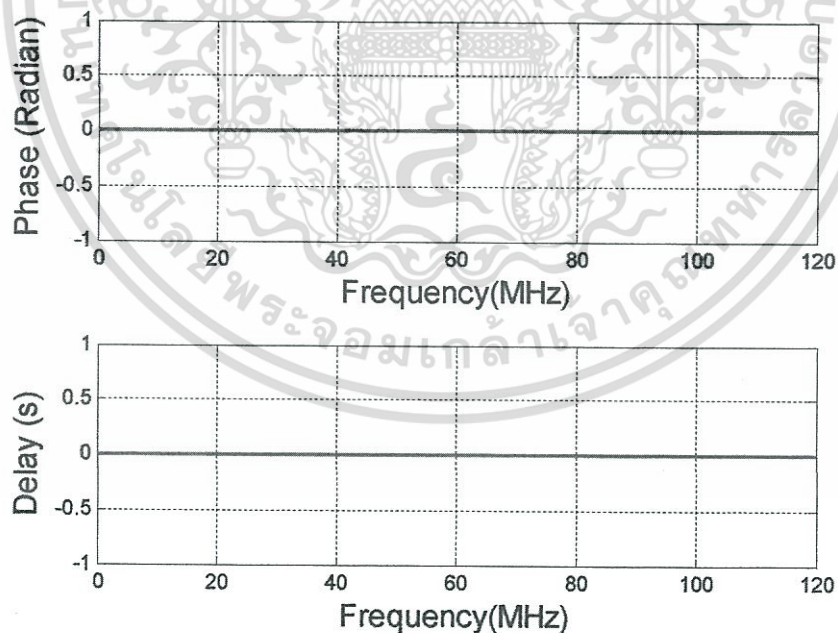
$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 0.243s + 0.020s^2 + 0.0005s^3} \quad (4.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.55 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz



รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-6 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 อีควอไลเซอร์ของสายส่งเคเบิลชนิด RG-11

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-11 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -6.56 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +6.56 เดซิเบล ดังนั้นเพื่อสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +6.56 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +6.56 \text{ dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.56 และ 4.57 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.754\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.56)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.333x(1-x)^2 + 1.814x^2(1-x) + 0.470x^3} \quad (4.57)$$

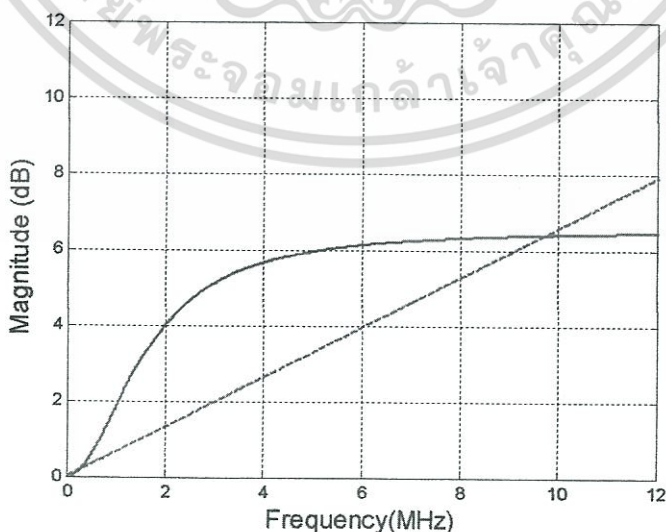
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.57 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.58

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 2.333\Omega^2 + 1.814\Omega^4 + 0.470\Omega^6} \quad (4.58)$$

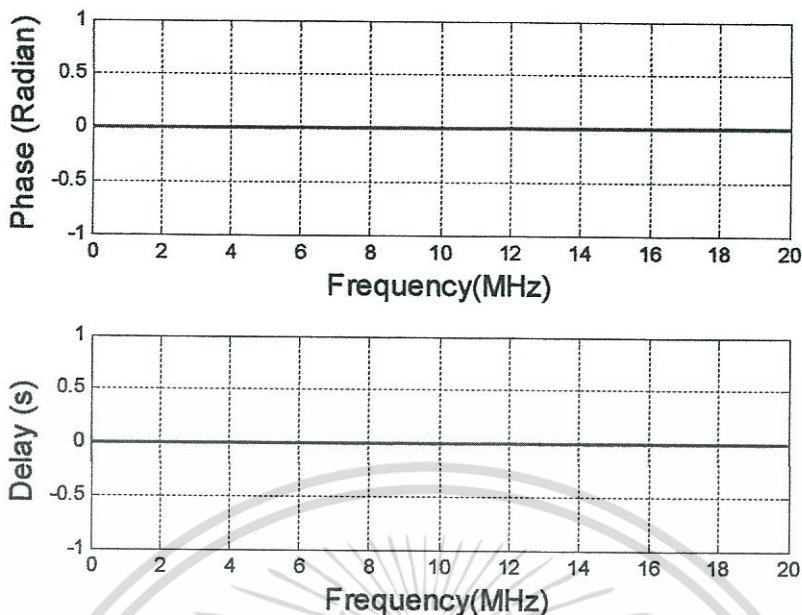
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.58 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้สมการที่ 4.59

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1 + 2.333s + 1.814s^2 + 0.470s^3} \quad (4.59)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.59 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองทางขนาดของอีควอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -16.40 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +16.40 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +16.40 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +16.40\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.60 และ 4.61 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-1.886\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \tag{4.60}$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.599x(1-x)^2 + 0.853x^2(1-x) + 0.152x^3} \tag{4.61}$$

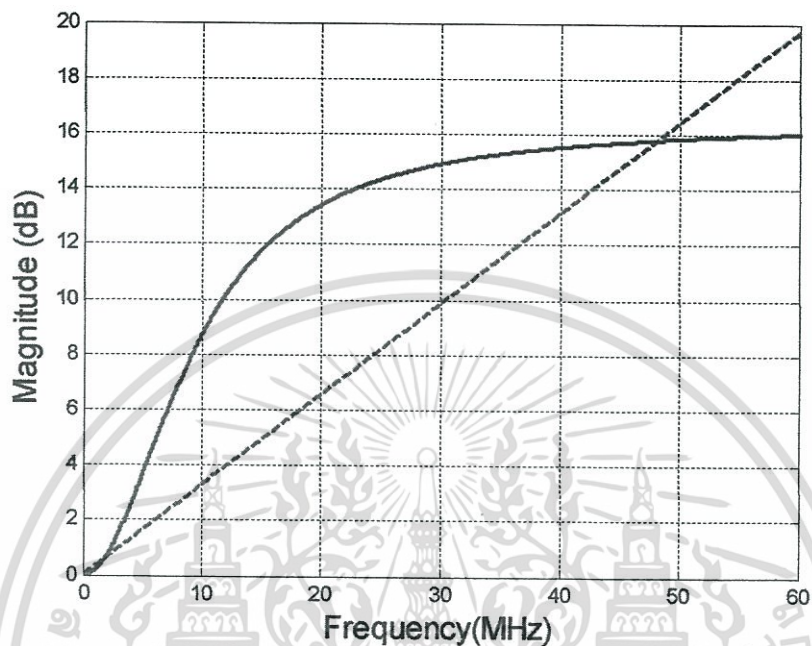
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.61 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.62

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 1.599\Omega^2 + 0.853\Omega^4 + 0.152\Omega^6} \tag{4.62}$$

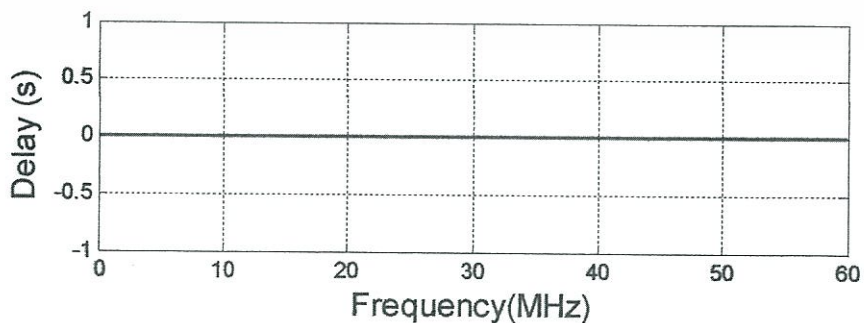
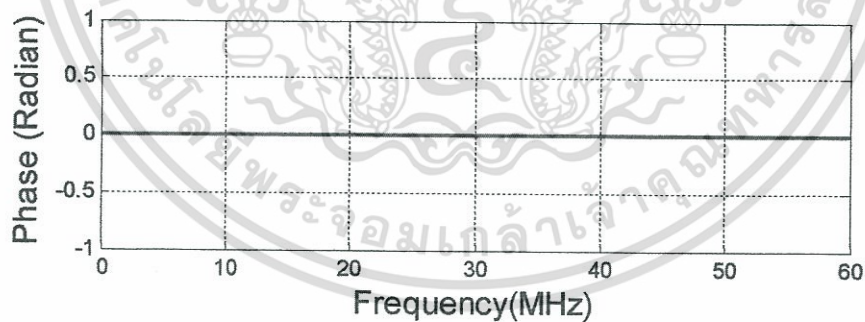
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.62 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.63 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+1.599s+0.853s^2+0.152s^3} \quad (4.63)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.63 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz



รูปที่ 4.34 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่เห็นประโยชน์เชิงวิชาการค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -26.25 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +26.25 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +26.25 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +26.25\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.64 และ 4.65 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-3.018\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.64)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.097x(1-x)^2 + 0.401x^2(1-x) + 0.049x^3} \quad (4.65)$$

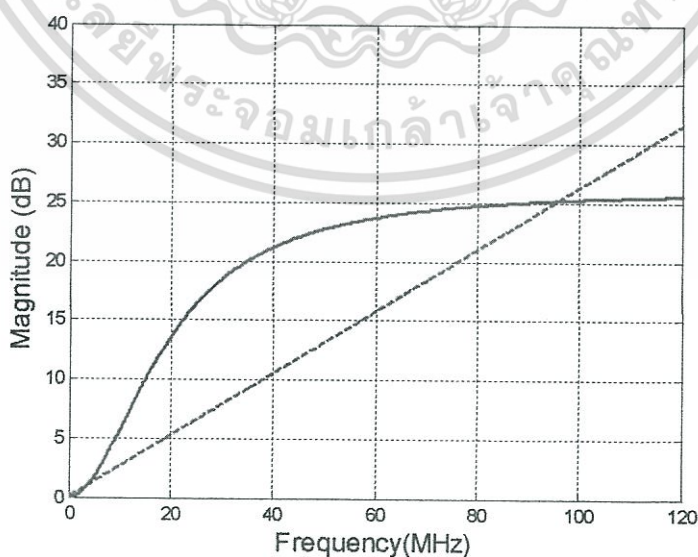
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.65 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.66

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.097\Omega^2 + 0.401\Omega^4 + 0.049\Omega^6} \quad (4.66)$$

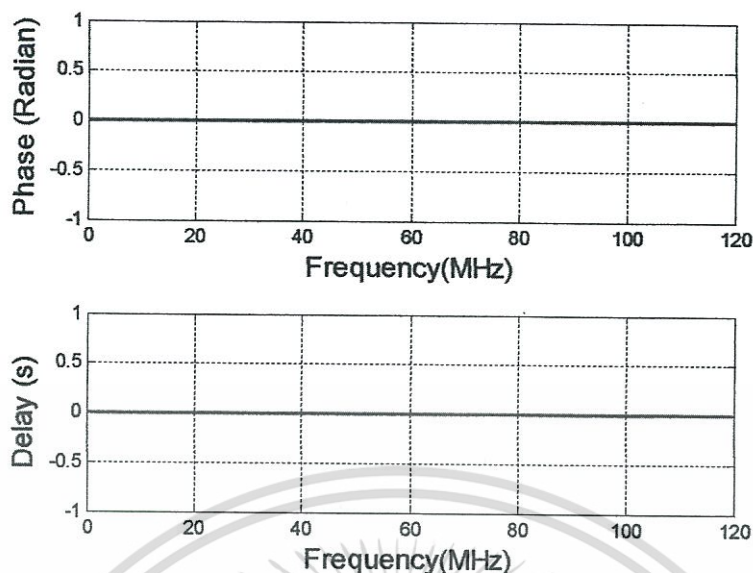
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.66 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้สมการที่ 4.67

$$H(f; s) = \frac{(1+s)^3}{1+1.097s + 0.401s^2 + 0.049s^3} \quad (4.67)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.67 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันหาไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวไลเซอร์ RG-11 ที่ 500 เมตร ความถี่

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-11 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -13.12 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอิกวไลเซอร์ที่มีขนาด +13.12 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไปโดยใช้เบิร์นสไตน์โพลิโนเมียลในการสร้างวงจรเช่นเดียวกับอิกวไลเซอร์ของขนาดเชิงเส้น (Linear Gain Slope Equalizer) ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวไลเซอร์ที่มีขนาด +13.12 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +13.12\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.68 และ 4.69 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-1.509\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.68)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.814x(1-x)^2 + 1.097x^2(1-x) + 0.221x^3} \quad (4.69)$$

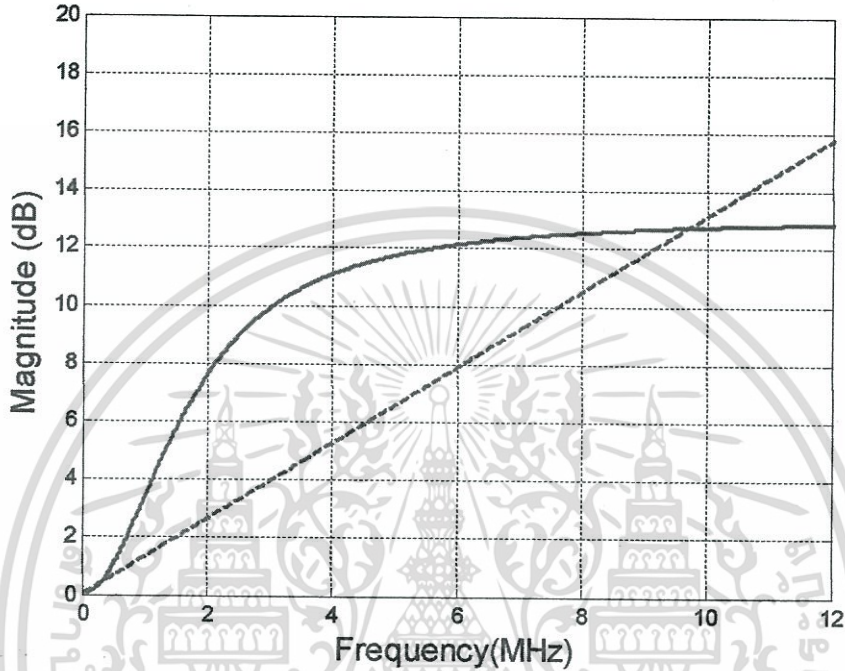
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.69 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.70

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 1.814\Omega^2 + 1.097\Omega^4 + 0.221\Omega^6} \quad (4.70)$$

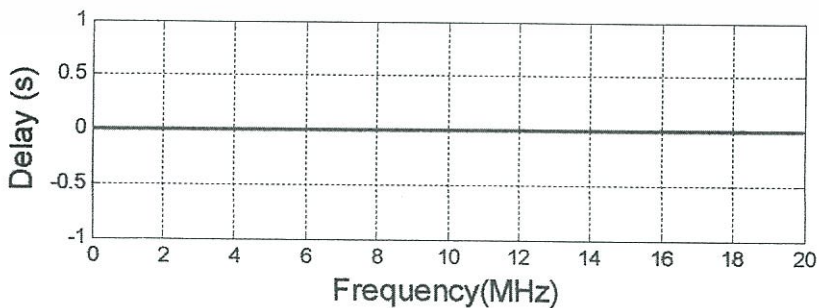
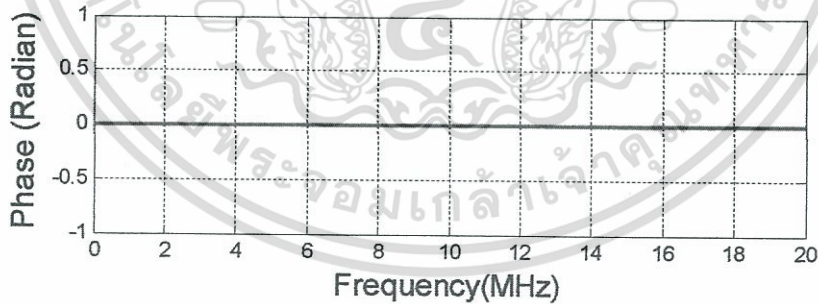
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.70 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.71 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+1.814s+1.097s^2+0.221s^3} \quad (4.71)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.71 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ



รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.38 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นใบนี้หรือเอกสารฉบับนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -32.80 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +32.80 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +32.80 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +32.80\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.72 และ 4.73 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-3.772\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.72)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.853x(1-x)^2 + 0.243x^2(1-x) + 0.023x^3} \quad (4.73)$$

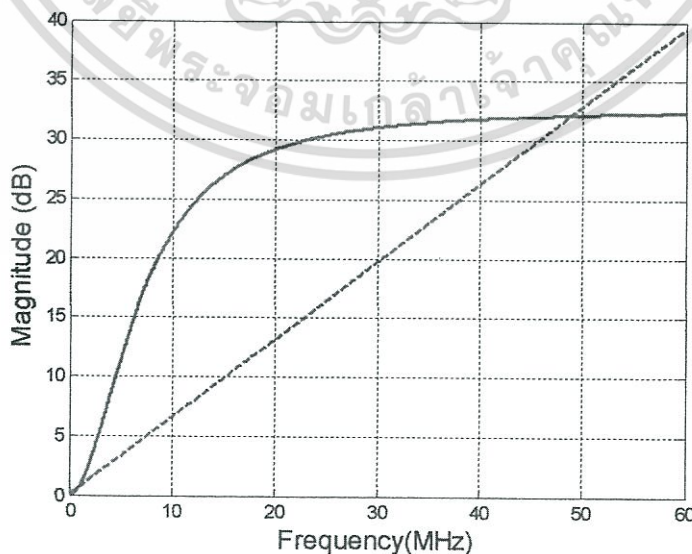
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.73 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.74

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 0.853\Omega^2 + 0.243\Omega^4 + 0.023\Omega^6} \quad (4.74)$$

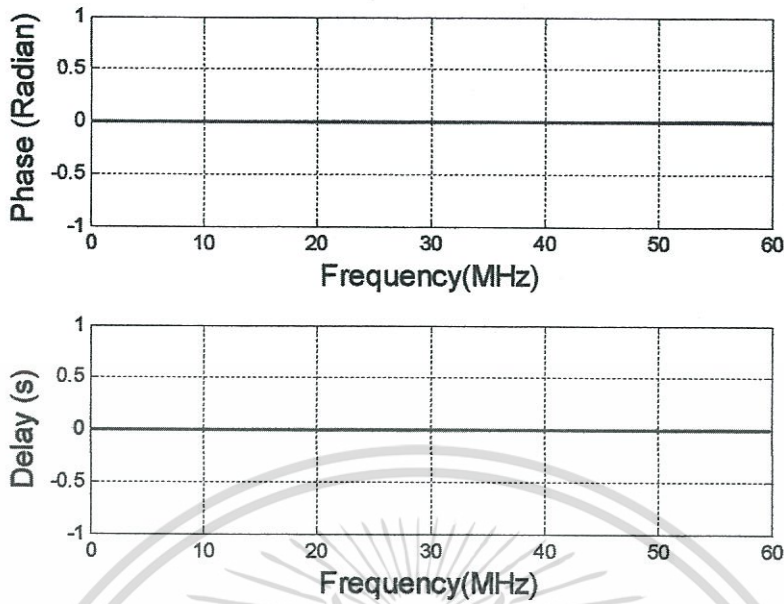
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.74 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.75

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1 + 0.853s + 0.243s^2 + 0.023s^3} \quad (4.75)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.75 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.39 และ 4.40 ตามลำดับ



เอกสารรูปที่ 4.39 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอลไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz ในการคำนวณการคำนวณนี้ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -52.49 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +52.49 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +52.49 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +52.49\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.76 และ 4.77 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-6.036\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.76)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.401x(1-x)^2 + 0.054x^2(1-x) + 0.0024x^3} \quad (4.77)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.77 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.78

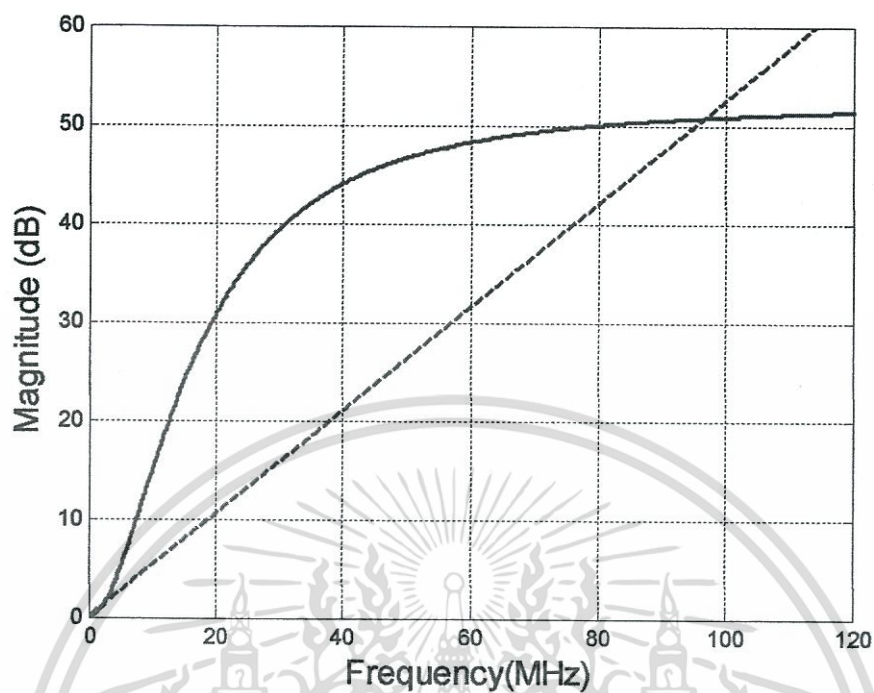
$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.401\Omega^2 + 0.054\Omega^4 + 0.0024\Omega^6} \quad (4.78)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.78 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.79

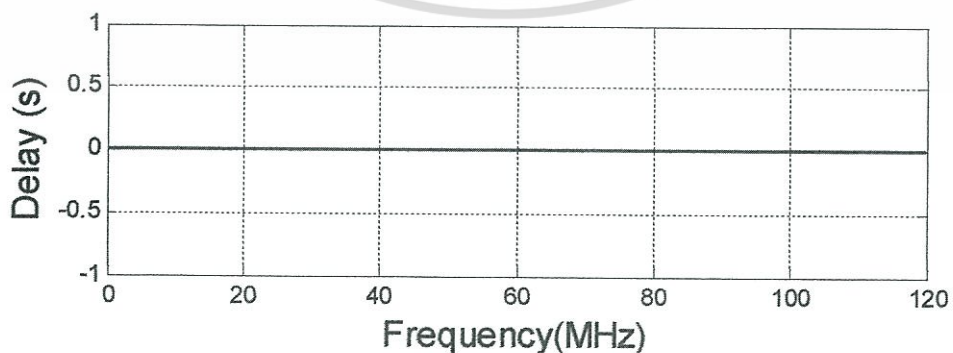
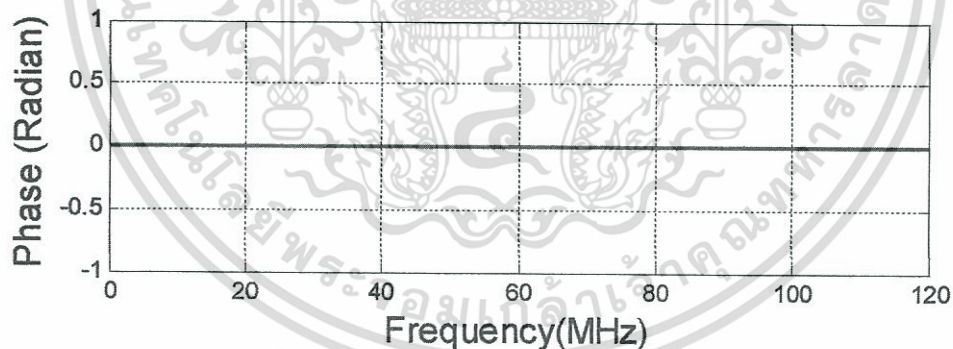
$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1+0.401s + 0.054s^2 + 0.0024s^3} \quad (4.79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.79 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 ตามลำดับ



รูปที่ 4.41 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz



รูปที่ 4.42 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์RG-11 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปเซบระเยชณดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อีควอไลเซอร์ของสายส่งเคเบิลชนิด RG-213

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-213 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -9.85 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +9.85 เดซิเบล ดังนั้นเพื่อสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +9.85 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +9.85\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.80 และ 4.81 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-1.1316\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.80)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.068x(1-x)^2 + 1.411x^2(1-x) + 0.323x^3} \quad (4.81)$$

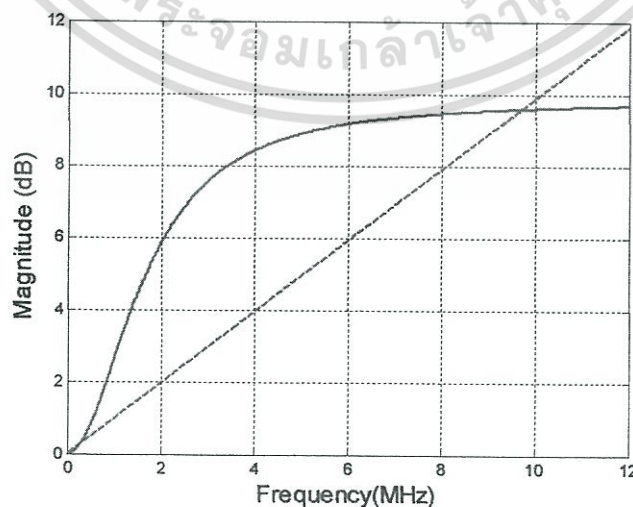
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.81 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.82

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 2.068\Omega^2 + 1.411\Omega^4 + 0.323\Omega^6} \quad (4.82)$$

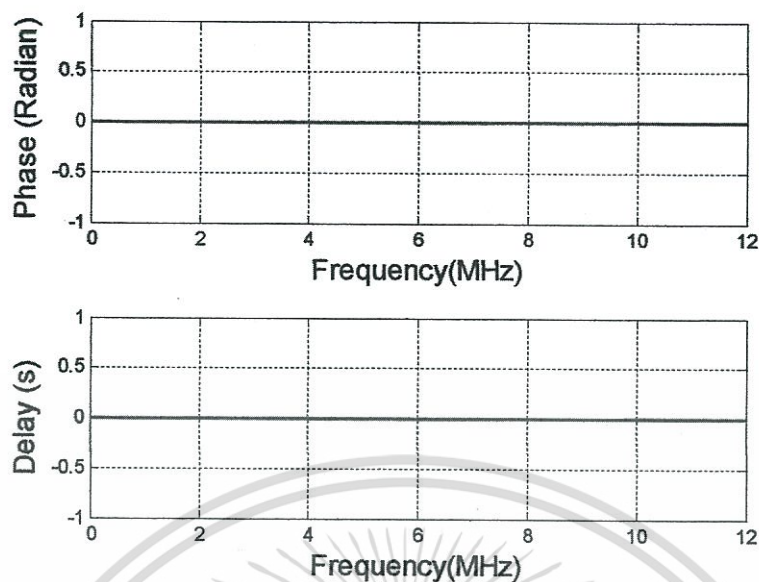
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.82 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.83

$$H(f;s) = \frac{(1+s)^3}{1 + 2.068s + 1.411s^2 + 0.323s^3} \quad (4.83)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.83 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ



เอกสารรูปที่ 4.43 ผลตอบสนองทางขนาดของอีควอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิวโวลูชัน RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 10 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -26.25 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิวโวลูชันที่มีขนาด +26.25 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิวโวลูชันที่มีขนาด +26.25 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +26.25\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.84 และ 4.85 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-3.018 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.84)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.097x(1-x)^2 + 0.401x^2(1-x) + 0.049x^3} \quad (4.85)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.85 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.86

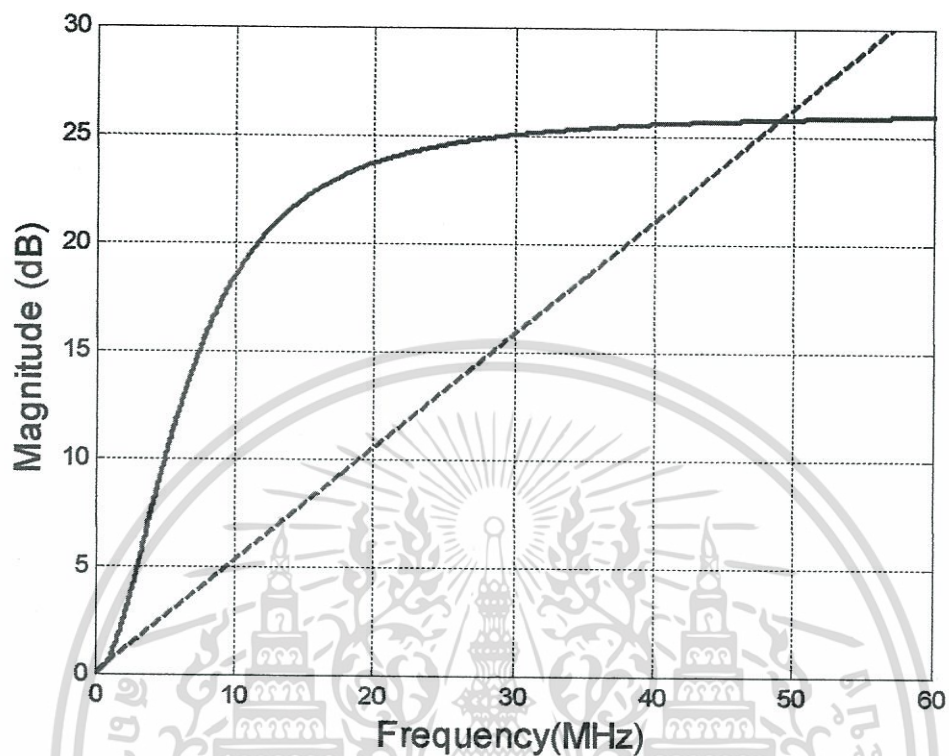
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 1.097\Omega^2 + 0.401\Omega^4 + 0.049\Omega^6} \quad (4.86)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.86 ให้อยู่ใน s โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.87

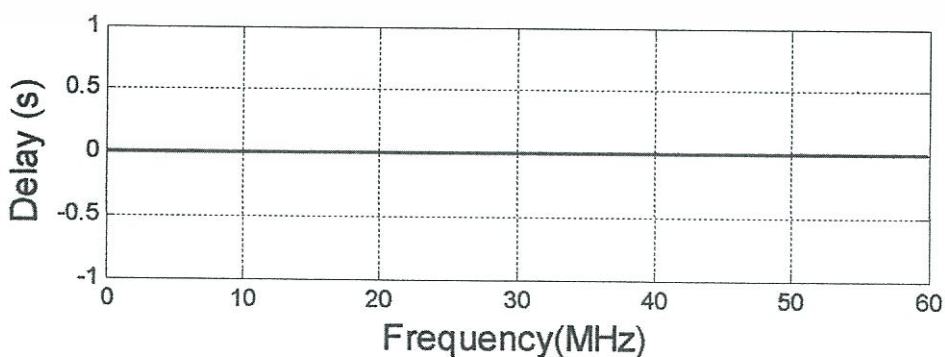
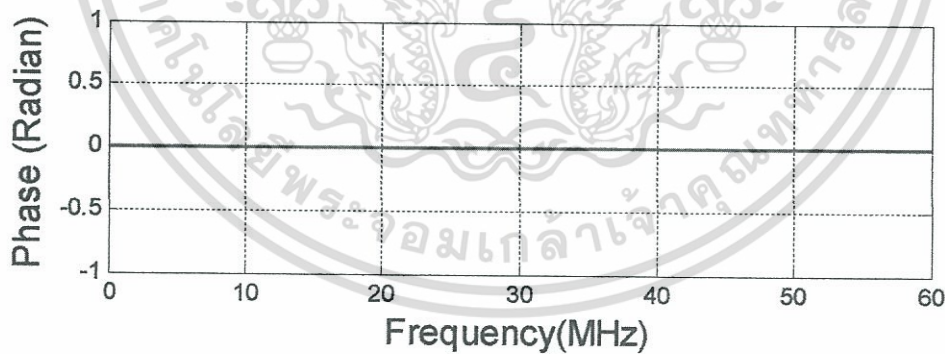
$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 1.097s + 0.401s^2 + 0.049s^3} \quad (4.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.87 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ



รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz



รูปที่ 4.46 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 50 MHz

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 500 เมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -36.09 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +36.09 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +36.09 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +36.09\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.88 และ 4.89 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-4.1503\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.88)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.752x(1-x)^2 + 0.189x^2(1-x) + 0.016x^3} \quad (4.89)$$

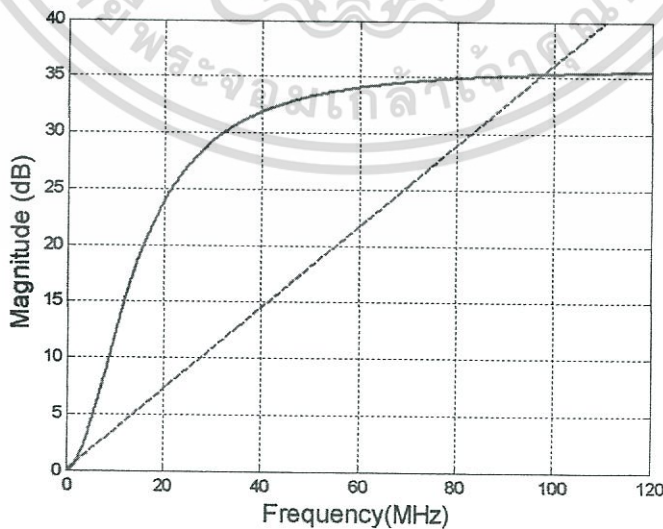
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.89 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.90

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.752\Omega^2+0.189\Omega^4+0.016\Omega^6} \quad (4.90)$$

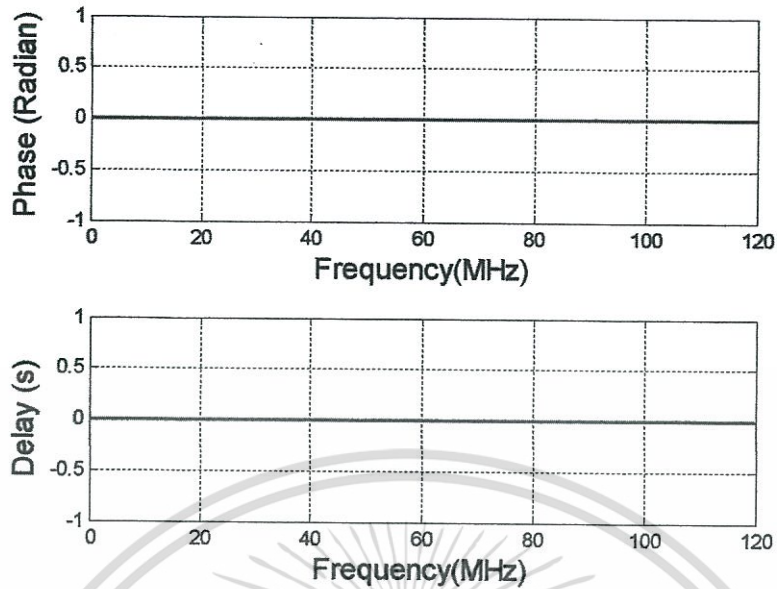
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.90 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ตั้งสมการที่ 4.91

$$H(f; s) = \frac{(1+s)^3}{1+0.752s+0.189s^2+0.016s^3} \quad (4.91)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.91 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 ตามลำดับ



รูปที่ 4.47 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอลไลเซอร์ RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นาเบเซปรีะเยชนทานการค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์RG-213 ที่ 500 เมตร ความถี่ 100 MHz

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-213 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -19.7 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสมการที่ 4.7 มาใช้เพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบล ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +19.7\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.92 และ 4.93 ตามลำดับ

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.2655 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.92)$$

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.410x(1-x)^2 + 0.663x^2(1-x) + 0.104x^3} \quad (4.93)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.93 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.94

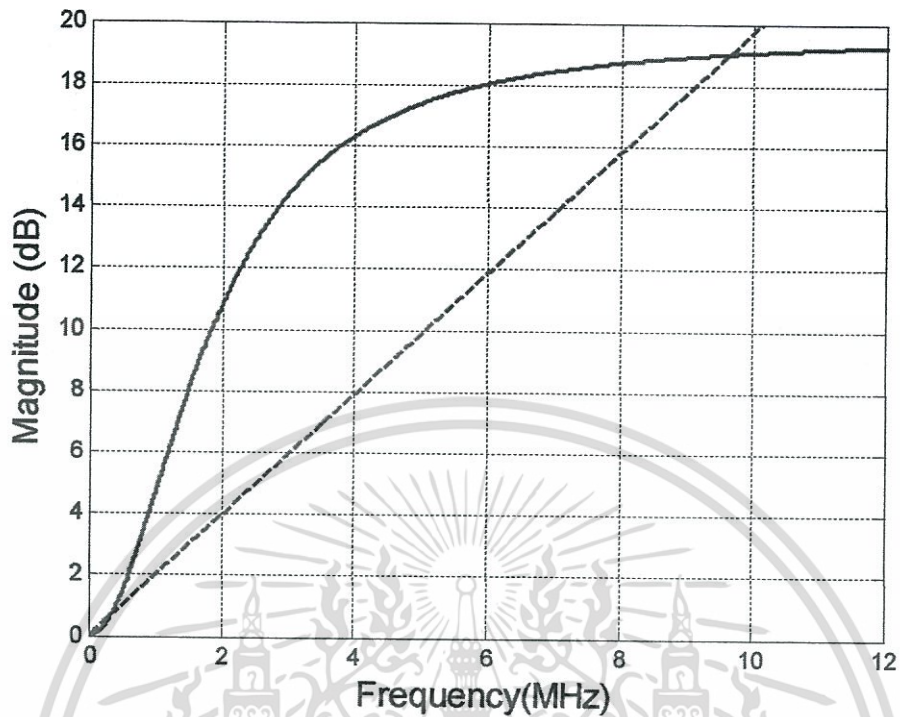
$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 1.410\Omega^2 + 0.663\Omega^4 + 0.104\Omega^6} \quad (4.94)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.94 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.95

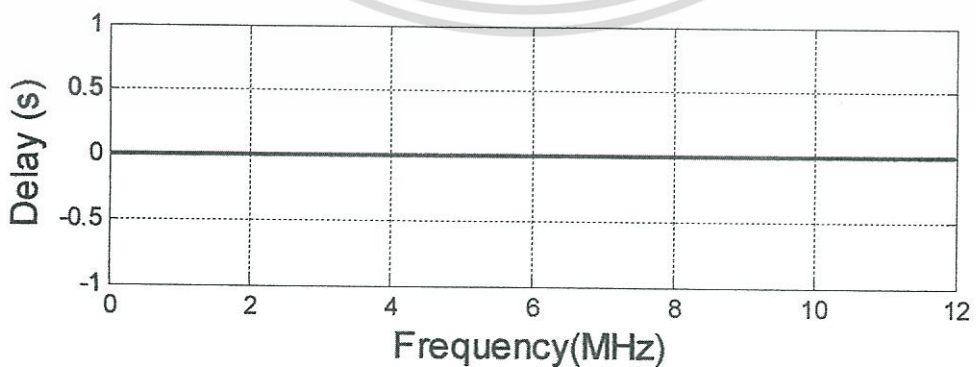
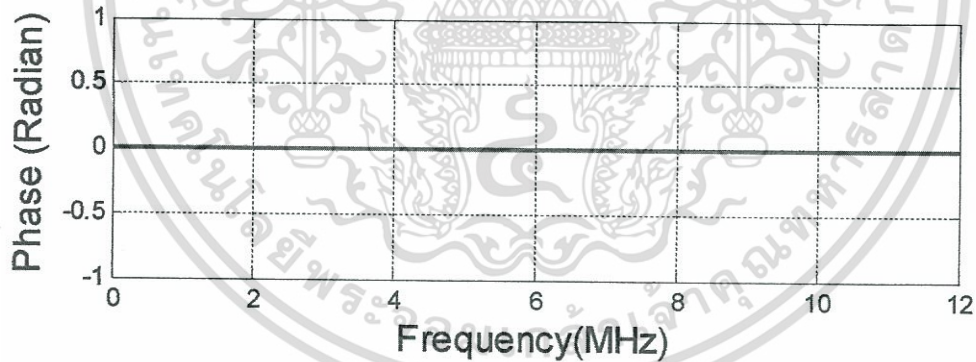
$$H(f;s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 1.410s + 0.663s^2 + 0.104s^3} \quad (4.95)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.95 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ



รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz



รูปที่ 4.50 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 10 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -52.49 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +52.49 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +52.49 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +52.49\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.96 และ 4.97 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-6.036\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.96)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.401x(1-x)^2 + 0.054x^2(1-x) + 0.0024x^3} \quad (4.97)$$

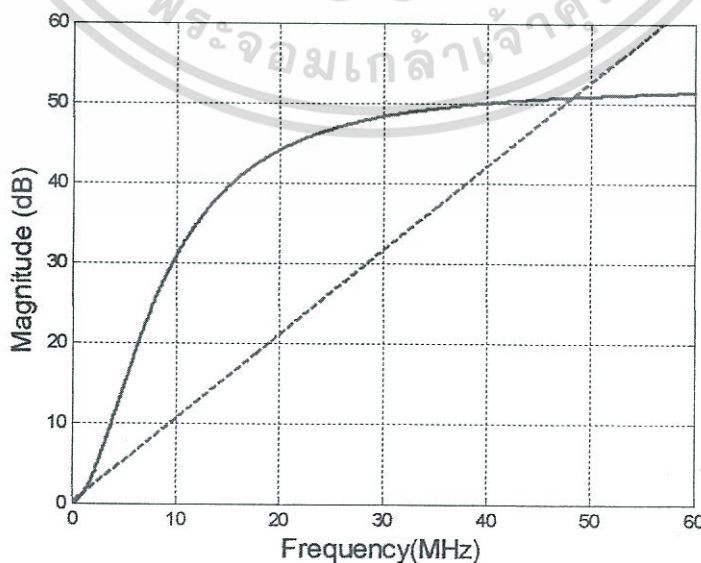
จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0,\infty)$ ในสมการที่ 4.97 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.98

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.401\Omega^2+0.054\Omega^4+0.0024\Omega^6} \quad (4.98)$$

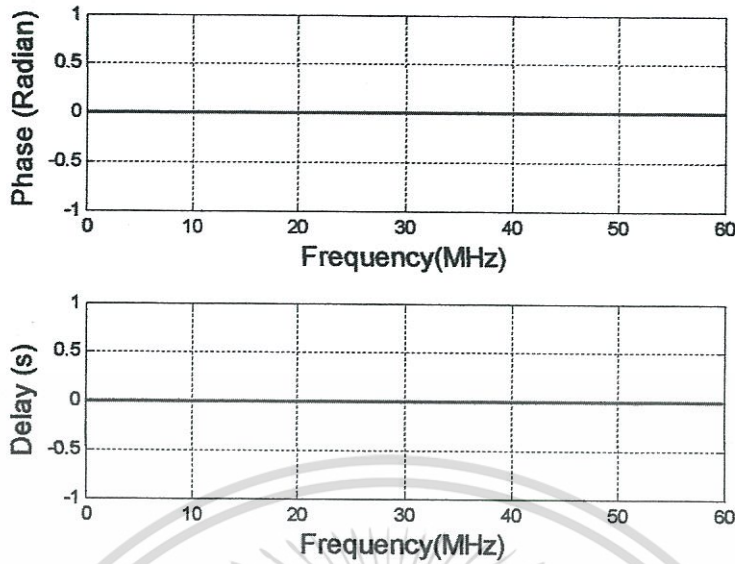
และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.98 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.99

$$H(f; s) = \frac{(1+s)^3}{1+0.401s+0.054s^2+0.0024s^3} \quad (4.99)$$

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.99 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.51 และ 4.52 ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอลไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 ผลตอบสนองทางเฟสและดีเลย์ของอิกวอไลเซอร์RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 50 MHz

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 100MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -72.18 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +72.18 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป ดังนั้นเพื่อสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +72.18 เดซิเบลจึงกำหนดให้ $\alpha_0 = +72.18\text{dB}$ และ $N = 3$ แทนลงในสมการที่ 4.7 จากนั้นกระจายสมการและแทนค่า $e = 2.71828$ ซึ่งจะได้สมการที่ 4.100 และ 4.101 ตามลำดับ

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-8.30\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.100)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.1886x(1-x)^2 + 0.0119x^2(1-x) + 0.0002x^3} \quad (4.101)$$

จากนั้นใช้การแปลงจากสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าของ x ในช่วง $[0,1]$ เป็น Ω ในช่วง $[0, \infty)$ ในสมการที่ 4.101 ซึ่งแสดงสมการที่ได้จากการแปลงที่สมการ 4.102

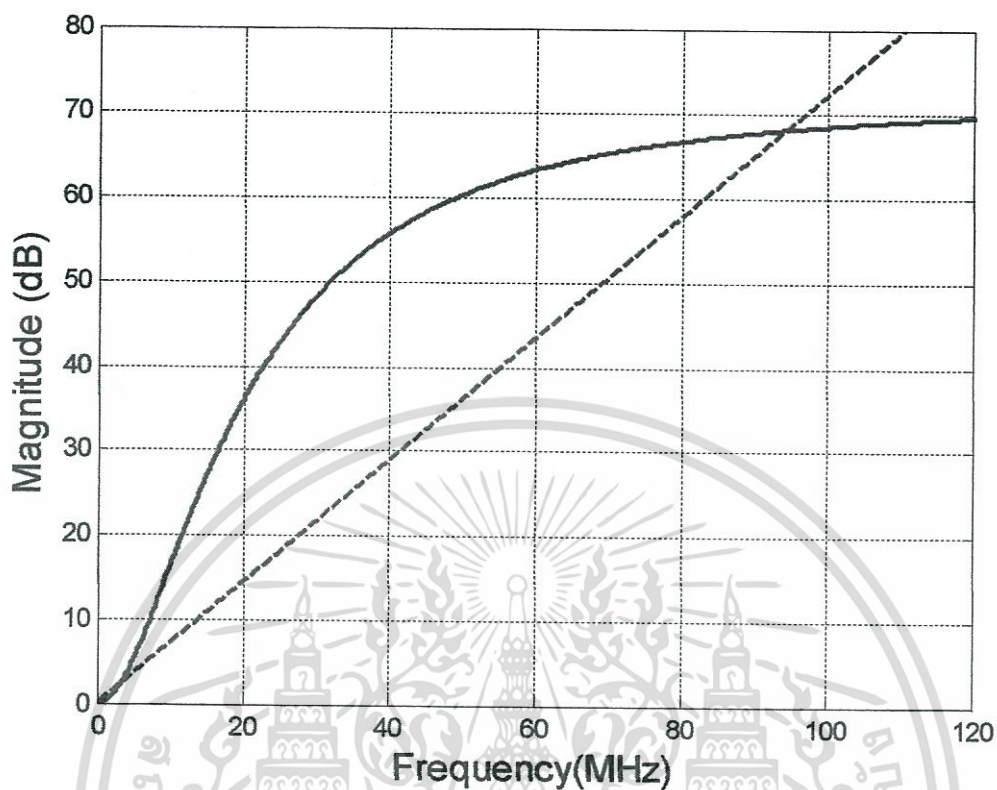
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 0.1886\Omega^2 + 0.0119\Omega^4 + 0.0002\Omega^6} \quad (4.102)$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนค่าของ Ω ในสมการที่ 4.103 ให้อยู่ใน S โดเมนจะได้ดังสมการที่ 4.103

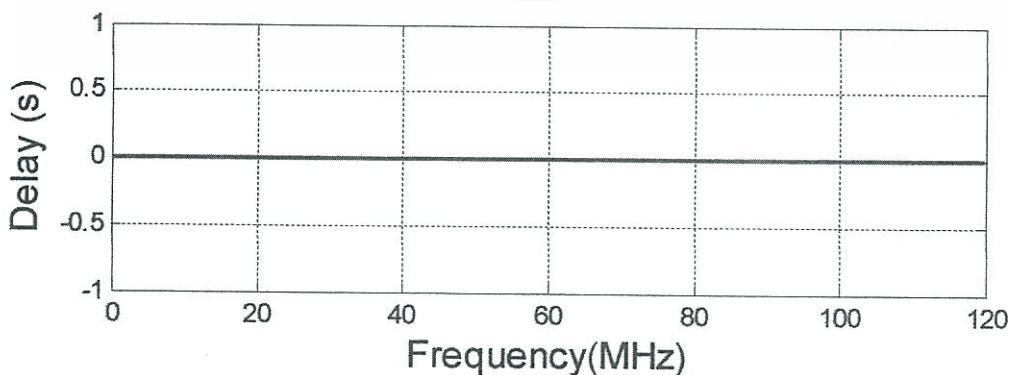
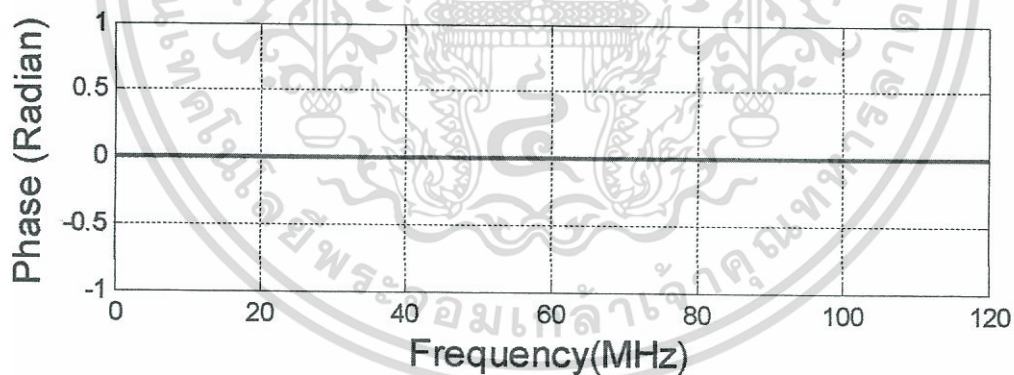
$$H(f; s) = \frac{(1 + s)^3}{1 + 0.1886s + 0.0119s^2 + 0.0002s^3} \quad (4.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิใช่เอกสารที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาด เฟสและดีเลย์ของสมการที่ 4.103 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.53 และ 4.54 ตามลำดับ



รูปที่ 4.53 ผลตอบสนองทางขนาดของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz



รูปที่ 4.54 ผลตอบสนองทางเฟสของอิกวอไลเซอร์ RG-213 ที่ 1 กิโลเมตร ความถี่ 100 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบเสถียรภาพ (Stability Test)

เสถียรภาพนั้นได้มาจากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน สามารถอธิบายได้โดยหลักการของมิไฮลอฟ (Mihailov's Criterion) ซึ่งหลักการของมิไฮลอฟจะระบุลำดับออดเดอร์ของโพลีโนเมียลดังสมการที่ 4.104 โดยกำหนดให้

$$D(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega) \quad (4.104)$$

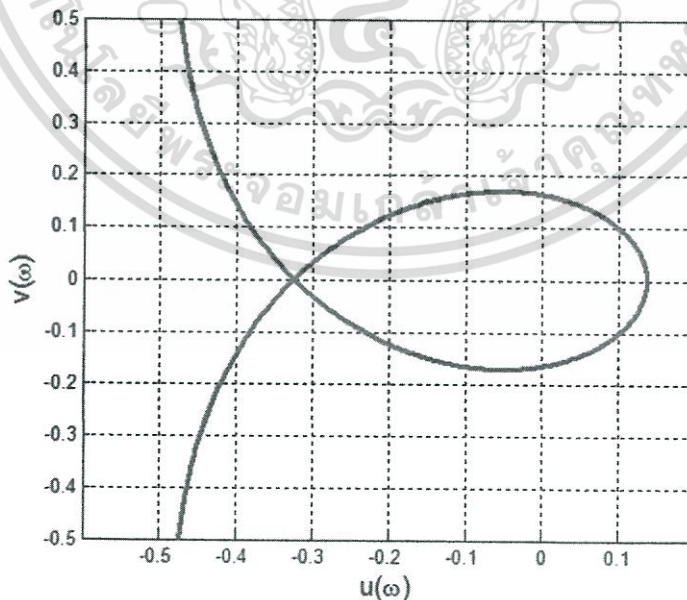
โดย $u(\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + \dots a_{2n}\omega^{2n}$

และ $v(\omega) = a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots a_{2n-1}\omega^{2n-1}$

เส้นโค้งที่ได้จะมีรูปแบบ พิกัดจุด และ ระยะจากแกน x ที่วัดขนานกับแกน y แตกต่างกัน โดยทิศทางจากจุดกำเนิดของเส้นจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีการพิสูจน์แล้วว่ามิไฮลอฟเสถียรภาพ ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมแบบแอนะล็อก และจะได้ดังสมการที่ 4.105

$$H(s) = \frac{(1+s)^3}{(s+\sigma_1)\{(s+\sigma_2)^2 + \omega_2^2\}} \quad (4.105)$$

โดยการเลือกด้านโพลีโนเมียลข้างบนของ s-plane ซึ่งไฮโดกราฟของมิไฮลอฟ (Mikhailov's Hodograph) ดูได้จากรูปที่ 4.55 จะเห็นได้ว่าการเดินทางจากจุดเริ่มต้นเป็นวงกลมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.55 เสถียรภาพที่ใช้ไฮโดกราฟของมิไฮลอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรอิกควอลไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลมาช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะแบ่งอิกควอลไลเซอร์ออกเป็น 2 แบบ คือ แบบขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี และแบบสายเคเบิล

-แบบขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี จะมีการออกแบบให้อิกควอลไลเซอร์มีทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบ เพราะความผิดเพี้ยนของแสง และสี ที่เกิดขึ้นนั้นมีเกิดได้ทั้งเพี้ยนต่ำ และเพี้ยนสูงนั่นเอง

-แบบสายเคเบิล จะมีการออกแบบให้อิกควอลไลเซอร์มีแต่ทางด้านบวกอย่างเดียว เพราะว่าคุณสมบัติสายเคเบิลที่ทราบกันดีอยู่แล้วนั้นเมื่อมีการใช้งานในระยะทางที่ไกลขึ้นสัญญาณก็จะยิ่งถูกลดทอนลงมากยิ่งขึ้น จึงไม่มีเหตุจำเป็นที่จะออกแบบอิกควอลไลเซอร์ทางด้านลบ

การที่นำอิกควอลไลเซอร์ที่ผลิตสัญญาณที่ต้องการเพื่อไปชดเชยสัญญาณส่วนที่ขาดหายไปนั้นช่วยแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณให้กลับมาอยู่ในสภาวะที่สมดุล และมีเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งวิธีการนั้นจะขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละประเภทนั่นเอง



บทที่ 5

สรุปและแนวทางการพัฒนา

5.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein Polynomials) ในขั้นตอนการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์ควรให้มีลักษณะเป็นเฟสเชิงเส้น (Linear Phase) ซึ่งพบว่าเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลมีข้อได้เปรียบที่สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาด และเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการควบคุม คือ n K และ ε ปรับเพื่อให้เฟสมีความราบเรียบมากที่สุด รวมถึงใช้สัญญาณมอดูเลต 20T ไชน์กำลังสองพัลส์เป็นสัญญาณทดสอบความผิดเพี้ยน

การออกแบบวงจรอควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้มีการออกแบบไว้สำหรับสายโอแอกเซียลทั้งหมด 3 ชนิดคือ RG-6, RG-11 และ RG-213 ซึ่งในสายแต่ละชนิดได้เลือกความถี่ในการใช้งานที่ 10 MHz, 50 MHz และ 100 MHz อีกทั้งความยาวที่แตกต่างกันที่ 500 เมตรและ 1000 เมตร รวมถึงใช้สมการของมิไฮลอฟในการทดสอบเสถียรภาพของการออกแบบวงจรอควอไลเซอร์ที่สร้างขึ้น

ผลของการวิจัยและออกแบบวงจรอควอไลเซอร์สามารถขจัดสัญญาณในส่วนที่มีการลดทอนซึ่งก็จะส่งผลให้มีการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณให้กลับมาอยู่ในสถานะที่สมดุล มีเสถียรภาพมากที่สุด และยังเป็นการพัฒนาให้การส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ที่ปัจจุบันนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ให้มีเสถียรภาพสูงขึ้น

5.2 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการวิจัย และได้ออกแบบวงจรอควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในการสื่อสารในรูปแบบที่ยังเป็นแนวคิด เป็นการจำลองที่ได้จากคอมพิวเตอร์ เท่านั้น ซึ่งในอนาคตนั้นสามารถพัฒนาให้มีการทดลองสร้างจริงได้ในรูปแบบของฮาร์ดแวร์ได้ โดยใช้หลักการแนวคิดที่ได้ออกแบบไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และยังสามารถนำแนวคิดนี้ไปใช้วิจัยเรื่องใหม่ในการสื่อสารได้อีก เช่น การสื่อสารแบบไร้สาย เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สภาวิศวกร COUNCIL OF ENGINEERS, มาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ เรื่อง ประมวลหลักปฏิบัติ วิชาชีพด้านการตรวจสอบและการทดสอบงานติดตั้งระบบสายเคเบิลเพื่อการสื่อสาร โทรคมนาคมและสื่อสารข้อมูล, พิมพ์ครั้งที่1, มกราคม2553
- [2] มอก. 2051-2543 สายเคเบิลเส้นใยแสง เล่ม1-2 ข้อกำหนดคุณสมบัติทั่วไป- ขั้นตอนการตรวจสอบ พื้นฐานของเคเบิล
- [3] Gary M. Miller, "Modern Electronic Communication" 3rd edition, Prentice-Hall Ltd., 1988
- [4] JIS C 3501-1987, Radio-Frequency Coaxial Cables
- [5] Coaxial cable. [Online]. เข้าได้จาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable.
- [6] Measurement of distortion. [Online]. เข้าได้จาก : http://users.tpg.com.au/users/ldbutler/Measurement_Distortion.htm.
- [7] Coaxial cable vademecum. [Online]. เข้าได้จาก : http://atx2000.altervista.org/English/EN_coax.html.
- [8] พื้นฐานสายส่งสัญญาณสำหรับการสื่อสาร. [Online]. เข้าได้จาก : http://thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Principle_Transmission_Linesfor_Communications/index.php.
- [9] Cabling. [Online]. เข้าได้จาก : <http://fcit.usf.edu/network/chap4/chap4.htm>.
- [10] RG213 คู่สาย. [Online]. เข้าได้จาก : <http://www.lancabletaiwan.com/th/rg213-coaxial-cable.html>
- [11] ข้อดีและข้อเสียของสายนำสัญญาณ 3 ชนิด. [Online]. เข้าได้จาก : <http://www.lancabletaiwan.com/th/rg213-coaxial-cable.html>
- [12] นายมนตรี รัตน์นิยมชัย นางสาวณัฐกานต์ ทารทา นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม. ตัวแบ่งกำลังงานและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งสำหรับสายอากาศแถวลำดับ. ปรียญยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสุรนารี. 2548
- [13] สายสัญญาณหรือสายส่งข้อมูล. [Online]. เข้าได้จาก : <http://apisithv210.blogspot.com/2010/12/blog-post.html>
- [14] Transmission line หรือสายส่งหรือสายนำสัญญาณ. [Online]. เข้าได้จาก : http://ham.9bkk.com/articles/transmission_line.html
- [15] สายสัญญาณ. [Online]. เข้าได้จาก : http://file.snru.ac.th/download.aspx?NFILE=TEACHER_146_17112012111354875.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] มาทำความเข้าใจกับสายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) กันเถอะ. [Online]. เข้าได้จาก :
<http://mvt.co.th/viewarticle.php?cid=7&nid=74&page=>
- [17] สื่อกลางประเภทไร้สาย (Wireless Media). [Online]. เข้าได้จาก :
<https://sites.google.com/site/41238pb/sux-klang-prapheth/sux-klang-prapheth-ri-say-wireless-media>
- [18] สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media). [Online]. เข้าได้จาก :
<https://sites.google.com/site/41238pb/sux-klang-prapheth/sux-klang-prapheth-mi-say-wired-media>
- [19] กนก เจนจิระพงศ์เวช, การตรวจสอบสัญญาณวีดีโอ
- [20] CHU-SUN YEN, RICHARD D. CRAWFORD, **Distribution and Equalization of Signal on Coaxial Cables Used in 10 Mbit/s Baseband Local Area Networks**, IEEE Transactions On Communications, Vol. COM-31, NO. 10, October 1983.
- [21] Hidaka, Weixin Gai, Hideki Oson, Yoichi Koyanagi, Jian Hong Jiang, Takeshi Horie, **Gain-Phase Co-Equalization for Widely-Used High-Speed Cables** Yasuo, Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, 2005, pp. 194-197.
- [22] Andreea Balteanu and Sorin P. Voinigescu, **A Cable Equalizer with 31 dB of Adjustable Peaking at 52 GHz**, IEEE BCTM 10.1, 2008, pp.154-157
- [23] วันวิสา ชัชวงษ์. การแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณวีดีโอในระบบโทรทัศน์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clc;
clear all;

t=linspace(0,4);
T=0.1;
A=1;
tt=0;
wc=2*pi*4.43;

y=0.5.*sin((pi*t)/(40*T)).*sin((pi*t)/(40*T));
% y=0;
% figure(1)
% plot(t,y,'Linewidth',2)
% title('Luminance Signal');
% xlabel('Time (us)');
% ylabel('Amplitude');
% grid on;
yy=A*0.5.*sin((pi*(t-tt))/(40*T)).*sin((pi*(t-tt))/(40*T)).*cos(wc*t);

% figure(2)
% plot(t,yy,'Linewidth',2)
% title('Chrominance Signal');
% xlabel('Time (us)');
% ylabel('Amplitude');
% grid on;
yyy=y+yy;
figure(3)
plot(t,yyy,'Linewidth',2)
% ylim([0 1])
title('MOD 20T Pulse');
xlabel('Time (us)');
ylabel('Amplitude');
grid on;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ขวัญเรือน รัศมี, พนิตพร อยู่อ่อน, กนก เจนจิระพงศ์เวช และ วันวิสา ชัชวงษ์, การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดต่อสายส่งเคเบิลโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์, การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7 7th ECTI-CARD 2015, Trang, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดต่อสายส่งเคเบิลโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์

Design of Cable Equalizer for Gain Distortion by using Bernstein Polynomials

ขวัญเรือน รัตมี¹ ทนิตพร อยู่อ่อน¹ ถนก เณจรังพงค์เวช² และ วันวิสา ชัชวงษ์¹¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ลอดกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์: 086-6230864 E-mail: kai_2521@hotmail.com

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสตาติก

298 ถนนสรรพาวุธ เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 02-3981356 E-mail: kjanok@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวีดีโออีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ปัญหาคอมพิวติงเพี้ยนทางขนาดของการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์ วงจรอีควอลไลเซอร์นี้จะถูกนำไปเชื่อมต่อกับงานกับกระบวนการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล โดยขึ้นอยู่กับระยะทาง และชนิดของสายเคเบิล โดยจะใช้สัญญาณทดสอบที่ป้อนให้กับระบบคือสัญญาณไซน์ยกกำลังสองพัลส์ นอกจากนั้นสามารถสังเกตสัญญาณทดสอบไซน์ยกกำลังสองพัลส์ที่มีรูปร่างที่เปลี่ยนไปเมื่อป้อนผ่านระบบที่มีความผิดเพี้ยนทางขนาด ในการทดลองนำวงจรอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดเข้าไปใช้งานในระบบส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลแล้ว พบว่าสัญญาณทดสอบไซน์ยกกำลังสองพัลส์ที่มีรูปร่างคล้ายกับที่ภาคส่งส่งมา สรุปได้ว่าวงจรอีควอลไลเซอร์ได้ออกแบบสามารถแก้ปัญหาคอมพิวติงเพี้ยนทางขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปราศจากผลกระทบทางเฟส

คำสำคัญ: โพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์, วงจรอีควอลไลเซอร์, ระบบการส่งผ่านสัญญาณ

Abstract

This paper presents the design of video cable equalizer for correcting the gain distortion in the transmission system via the cables by using Bernstein polynomial. This equalizer is used in the cable transmission system, depending on distance and the types of cable. The pulse test signal is provided in the cable transmission system which is the sine-squared pulse. In addition, the appearance of the gain distortion can be illustrated with the shape of pulse test signal. In the simulation, this equalizer can be equalized the gain distortion in the cable transmission system. It can be seen that the shape of pulse test signal is nearly the normal sine-squared pulse test signal. The simulation result, the design of video cable equalizer is also proved to be efficient in correcting the gain distortion without degrading its phase.

Keywords: Bernstein polynomials, equalizer, signal transmission system

1. บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลมีทั้งแบบมีสาย (wired) และไร้สาย (wireless) ซึ่งมีปัญหาที่พบในการส่งสัญญาณแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกส่งสัญญาณ หรือการสื่อสารข้อมูลแบบมีสายหรือไร้สายนั้น จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ [1] โดยในบทความวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะปัญหาที่เกิดขึ้นในการสื่อสารแบบมีสาย หรือผ่านสายเคเบิล ปัญหาส่วนใหญ่ของการสื่อสารแบบมีสายคือการลดทอนของสัญญาณ หรือความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากกระบวนการส่งสัญญาณนั่นเอง เช่น จะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลยังทำให้เกิดการสะท้อนกลับจึงเกิดการสะท้อน (Echo) ขึ้น เป็นต้น [2] [3] ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้พัฒนาและออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์เพื่อแก้ปัญหาคอมพิวติงเพี้ยนทางขนาดที่เกิดขึ้นการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล โดยที่สามารถปรับค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิลที่ต้องการ ส่งผลให้มีความสะดวกในการประยุกต์เพื่อนำไปใช้งานในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของวงจรอีควอลไลเซอร์สามารถปรับแต่งสัญญาณข้อมูล หรือสัญญาณภาพ ให้มีความสมดุลมากที่สุดตามที่ต้องการ

2. การลดทอนในสายเคเบิล

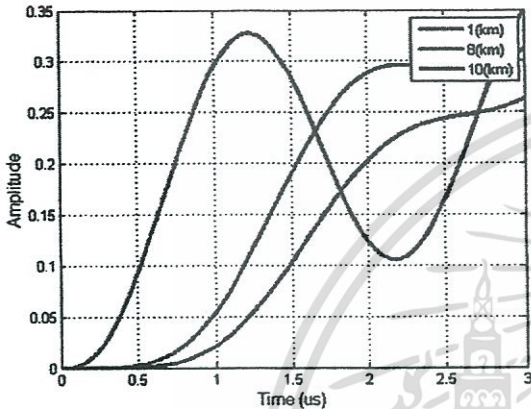
ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล คือการผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณ ดังนั้นก่อนการออกแบบวงจรอีควอลไลเซอร์ จึงควรวิเคราะห์หารูปแบบความผิดเพี้ยนทางขนาดของสายเคเบิลแบบต่าง ๆ โดยในที่นี้จะใช้สัญญาณทดสอบไซน์ยกกำลังสองพัลส์ (Sine-squared pulse test signal) ป้อนเข้าไปในระบบเพื่อจำลองความผิดเพี้ยนทางขนาดที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล ดังสมการ [4]

$$V_{0(s,x)} = V_{0(s,0)} e^{-\frac{kx}{\sqrt{\pi}} \sqrt{s}} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
7th ECTI-CARD 2015 “รู้ค่าพลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อก้าวสู่ศตวรรษที่ 21”
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_0(t) = \frac{kx}{2\pi} \int_0^t \frac{1}{\tau} \left(\frac{3}{2}\right) e^{-\frac{k^2 x^2}{4\pi\tau}} \sin^2 \frac{\pi(t-\tau)}{2T} d\tau \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) สามารถพล็อตหาผลลัพท์ตามคุณสมบัติของสายโคแอกเชียลเคเบิล เช่น ค่า k และ ระยะความยาวของสาย x กล่าวคือนำมาใช้พล็อตหาค่าความสูงพัลส์ต่อความยาวสายโคแอกเชียลเป็นต้น [5] แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์ที่เกิดในสายเคเบิล

จากรูปที่ 1 แสดงการเสียรูปของสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์เมื่อป้อนเข้าสู่ระบบการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลที่มีความยาวแตกต่างกัน (กำหนดให้ x เท่ากับ 1 กิโลเมตร 8 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร) ด้วยสาเหตุที่เกิดการความผิดเพี้ยนทางขนาดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนทางขนาดที่เกิดขึ้น ในบทความนี้จึงนำเสนอวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาดโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์

3. การออกแบบวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาด

3.1 โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์

โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials) [6] เกิดขึ้นจากทฤษฎีการประมาณที่มีรูปแบบฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ($f(x)$) ในช่วงปิดที่ $[0, 1]$ โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับที่ n^{th} ($n \geq 1$)

$$B_n(f; x) = \sum_{i=0}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (3)$$

เมื่อ $i = 0, 1, \dots, n$ และ $\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$

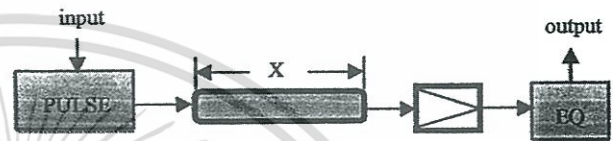
จากสมการที่ (3) ทำการแปลง (Transformation) x จากช่วง $[0, 1]$ ให้เป็น Ω ที่มีช่วงหรือขอบเขตอยู่ที่ $[0, \infty]$ โดย $x = \Omega^2 / (1 + \Omega^2)$

แทนลงในสมการที่ (3) ได้ดังสมการที่ (4) จากนั้นแทน $\Omega = -1/\omega$ ด้วย

$$B_{n,K}(\omega) = \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i} \left/ \left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n \right. \quad (4)$$

3.2 การออกแบบวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาดของสัญญาณผ่านสายเคเบิล

การออกแบบใช้งานวงจรออสซิลโลสโคปเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณผ่านสายเคเบิล แสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมกระบวนการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล

รูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมกระบวนการส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิล โดยวงจรออสซิลโลสโคปที่ได้ออกแบบจะวางอยู่ในระบบเมื่อระยะทางผ่านไประยะหนึ่ง (x) ซึ่งระยะทางนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสายเคเบิลที่ใช้งาน ในการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลโลสโคปที่ได้ออกแบบจะนำสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์ป้อนเข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นเมื่อสัญญาณเดินทางไปยังระยะเวลาหนึ่งด้วยระยะทาง สัญญาณจะเกิดการลดทอน และความคิดเพี้ยนทางขนาดขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขด้วยวงจรมหาสัญญาณ และวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาดที่ได้ออกแบบ ผลที่ได้คือสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์จะกลับป้อนมีรูปร่างคล้ายที่ภาคส่งส่งมา กล่าวคือปราศจากความผิดเพี้ยนทางขนาด หรือเขียนรูปนั่นเอง

แนวความคิดในการออกแบบวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 วงจรออสซิลโลสโคปทางขนาดที่สามารถตั้งค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิล โดยที่ถ้าต้องการเพิ่ม สัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากฝั่งด้านบวก $T(f) = e^{P(f)L}$ ในทางกลับกันถ้าต้องการลดสัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากทางด้านลบ $T(f) = e^{-P(f)L}$ ที่มีค่าที่แตกต่างกันไปตามความยาวของสายตามลำดับ แสดงผลตอบสนองของวงจรออสซิลโลสโคปทางขนาด เขียนได้ดังสมการ

$$H(f; L) = \frac{L + T(f)}{LT(f) + 1} \quad (5)$$

โดยที่ L คือความยาวของสายเคเบิล
 $T(f)$ คือฟังก์ชันแสดงคุณสมบัติของสายเคเบิล

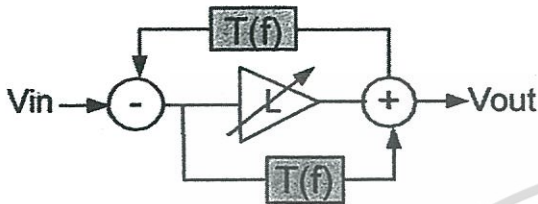
$$T(f) = e^{-P(f)} \quad (6)$$

เมื่อ $P(f)L = KL\sqrt{f}$

K คือค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิล

f คือความถี่ โดยคุณลักษณะความสูญเสีย หรือการลดทอนจะ

แปรผันเท่ากับรากของความถี่ (Square root)



รูปที่ 3 วงจรอิลอไลเซอร์ทางขนาดตามความยาวของสายเคเบิล

$$f\left(\frac{k}{n}\right) = e^{KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

ทำการหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ด้วยวิธีการใหม่คือ

$$T(f) = \frac{1}{B(f;x)} = e^{-KLf\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$T(f) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n e^{KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k}} \quad (9)$$

ยกตัวอย่างการออกแบบวงจรอิลอไลเซอร์ที่สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาด ที่ ± 3 dB เขียนสมการเพื่อไปแทนค่าฟังก์ชันของโพลีโนเมียลของเบร์นสไตน์ ได้คือ

$$|M(f)| = 10^{\frac{\alpha_0}{20} \left(\frac{k}{N}\right)} \quad (10)$$

โดย α_0 คือแอมพลิจูดที่ต้องการในหน่วยเดซิเบล

สมมติกรณี $\alpha_0 = +3$ dB ที่ตำแหน่งความถี่ 4 MHz ได้

$$|M(f)| = 1.4125 \quad (11)$$

สามารถเขียนในลอการิทึมฐาน e (Napierian) หรือ ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Function) ได้ดังสมการ

$$|M(f)| = e^{0.115\alpha_0\left(\frac{k}{N}\right)} \quad (12)$$

ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลถูกจำกัด ดังสมการที่ (13)

$$e^{\alpha x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\alpha x}{N}\right)^N = \sum_{k=0}^N e^{\alpha\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \quad (13)$$

เพราะฉะนั้นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยวิธีการใหม่ในสมการที่ (8)

$$H(f;x) = \frac{1}{B_n(f;x)} = e^{0.115\left(\frac{k}{N}\right)} \quad (14)$$

จัดรูปใหม่สมการฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ได้เป็น

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^N e^{-0.115\alpha_0\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (15)$$

กระจายสมการแล้วแทนค่า $e = 2.7182$ จากนั้นทำการแปลง x ด้วย $x = \Omega^2 / (1 + \Omega^2)$ [7] ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังนี้

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 2.674\Omega^2 + 2.3835\Omega^4 + 0.7082\Omega^6} \quad (16)$$

ในกรณี $\alpha_0 = -3$ dB จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 3.366\Omega^2 + 3.776\Omega^4 + 1.412\Omega^6} \quad (17)$$

4. ผลการจำลอง

ในระบบสื่อสาร เมื่อป้อนสัญญาณภาพ หรือข้อมูลผ่านสายเคเบิลจะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้นเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าสัญญาณ หรือข้อมูลจะมีผลผิดเพี้ยนเกิดขึ้นจากอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลทำให้เกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) เกิดพัลส์กว้าง (Echo pulse) ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างอิลอไลเซอร์ที่สามารถชดเชยสัญญาณที่ถูกลดทอนหายไป ในบทความนี้ยกตัวอย่างการใช้งานในสาย RG-6 และสาย RG-11 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10 MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตรจะมีการเกิดการลดทอนไป -19.7 dB และ -13.12 dB ส่วนที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50 MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตรจะมีการเกิดการ

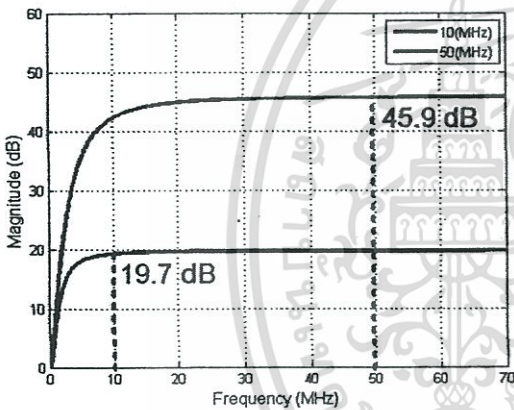
ลดทอนไป -45.9 dB และ -32.81 dB [8] ดังนั้นจึงต้องสร้างวงจรอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาดเดียวกับที่คิดขึ้นไป ทำการออกแบบได้ดังสมการที่ (18) ถึงสมการที่ (21) ตามลำดับ

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.410\Omega^2 + 0.663\Omega^4 + 0.104\Omega^6} \quad (18)$$

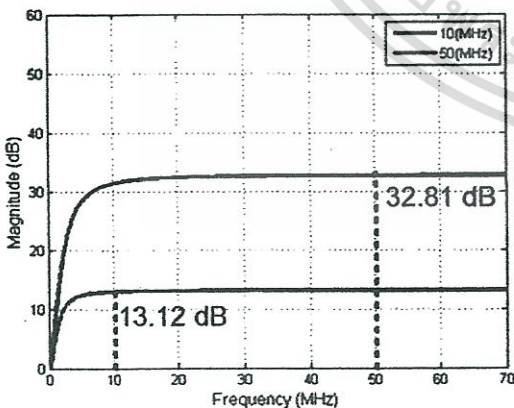
$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.516\Omega^2 + 0.089\Omega^4 + 0.005\Omega^6} \quad (19)$$

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.814\Omega^2 + 1.097\Omega^4 + 0.221\Omega^6} \quad (20)$$

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.853\Omega^2 + 0.243\Omega^4 + 0.023\Omega^6} \quad (21)$$



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรอิกวอลไลเซอร์ของสาย RG-6 ที่ 10MHz และ50MHz



รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรอิกวอลไลเซอร์ของสาย RG-11 ที่ 10MHz และ50MHz

5. สรุป

การออกแบบวงจรอิกวอลไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณในระบบการสื่อสารผ่านสายเคเบิล โดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ในการออกแบบ เพราะว่าโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์มีข้อได้เปรียบที่สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาด และเฟส มีเฟสเป็นเชิงเส้น ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พารามิเตอร์ และปรับเพื่อให้เฟสมีความราบเรียบมากที่สุดนั่นเอง ผลการจำลองวงจรอิกวอลไลเซอร์ที่ได้นำเสนอ พบว่าสามารถแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณหรืออกระดับของสัญญาณ เมื่อเดินทางผ่านสายเคเบิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่มีกระทบทางเฟส

เอกสารอ้างอิง

- [1] Behrouz A Forouzan, *Data Communications and Networks*, 4th Edition, McGrawHill, 2007.
- [2] Andrea, *Coaxial Cable Equalization Techniques at 50-110 Gbps*, University Of Toronto, 2010.
- [3] Y.F.Gui and W.B.Dou, "Phenomena of Paired Echoes and Transmission Characteristics of the Pulse Signal in Dispersive Transmission Lines with Discontinuities", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 5, pp.225-240, 2008.
- [4] Q. Kerns, F. Kirsten, and C. Winingstad, "Pulse Response of Coaxial Cables", Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Berkeley, 1964.
- [5] K. J. Kerpez, "Coaxial Cable Passive Mesh Networks", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, No. 8, August 1997.
- [6] V.Chutchavong, O.Sangaroon, C.Benjangkprasert, and K. Janchipongvej, "Luminance-Chrominance Gain Equalizer Based on Bernstein Polynomials" *IEEJ Trans. On Electronics, Information and Systems*. Japan, vol. 130, No. 8, pp. 1411-1422, August 2010.R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [7] V. Chutchavong, *Linear-Phase Bernstein Filter for Equalized the Distorted Chrominance*, LAP LAMBERT Academic Publishing: Germany, 2013.
- [8] BELDEN, *Coaxial Cables (Terms of Master Catalog)*, BELDEN Technical Support, Beldens Inc.,2001.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวขวัญเรือน รัศมี
วัน เดือน ปี เกิด	1 มิถุนายน 2521 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	38/3 หมู่ ต.คลองเจ็ด อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดอนเมือง 2547 บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาการจัดการทั่วไป มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
2548 – 2554	Sr.Er บริษัท MPM technology (Thailand) Ltd.
งานวิจัย	(2556) การพัฒนาทักษะในการซ่อมและการรักษาความปลอดภัย คอมพิวเตอร์เบื้องต้น กับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น : กรณีศึกษา นักเรียนมัธยมศึกษาปีที่ 2 อำเภอ บางคนที่ จ. สมุทรสงคราม (2557) การพัฒนาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนการเขียนสะกด คำสำหรับ นักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาตอนต้นที่มีภาวะ บกพร่องทางการเรียนรู้ (2558) การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 7 th ECTI-CARD 2015, Trang, Thailand การออกแบบอิคโลไล เซอร์เพื่อแก้ความผิดพลาดทางขนาดต่อสายส่งเคเบิลโดยใช้โพลีโน เมียลแบบเบรินสไตน์ (2558) การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปน้ำมันมะพร้าว และ ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าทางการเกษตร ในพื้นที่ อ. บางคนที่ จ.สมุทรสงคราม
ปัจจุบัน	อาจารย์สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้