

การออกแบบอีควอไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิล

DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR SIGNAL TRANSMISSION



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบอีควอไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิล

DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR SIGNAL TRANSMISSION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอีควอไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิล

DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR SIGNAL TRANSMISSION

โดย

พนิตพร อยู่อ่อน

พรพิมล นิมสาย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. วันวิสา ชัชวงษ์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

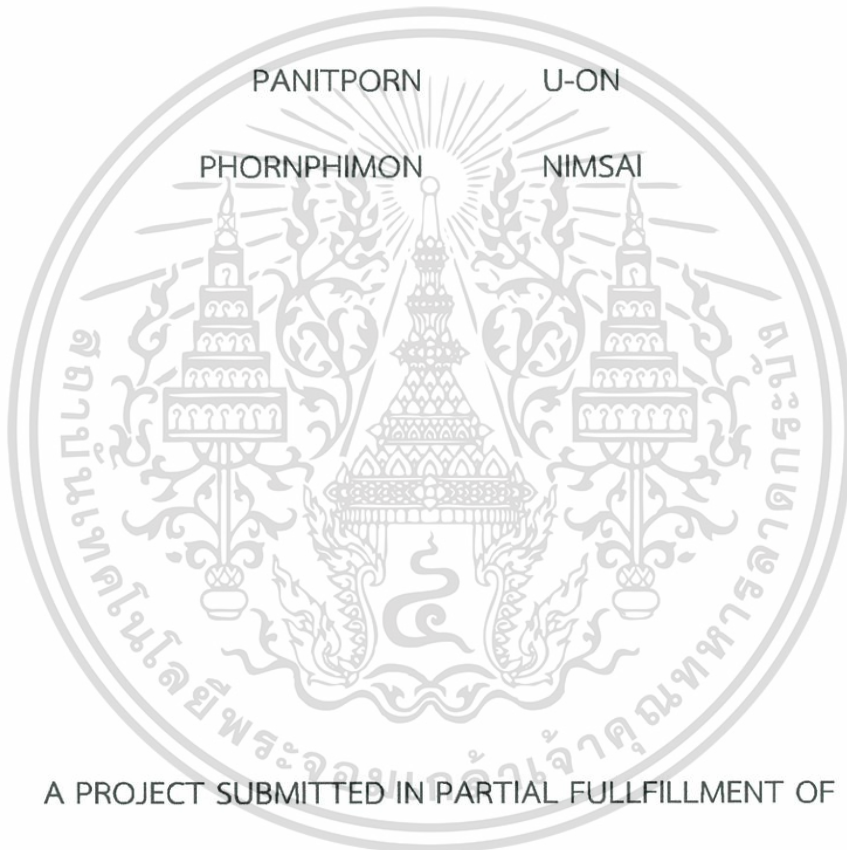
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR SIGNAL TRANSMISSION



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING PROGRAM IN INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบอิกวอลไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ  
ต่อสายส่งเคเบิล

Thesis Title DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR  
SIGNAL TRANSMISSION

ชื่อนักศึกษา นางสาวพนิตพร อยู่อ่อน

นางสาวพรพิมล นิมสาย

ระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

()

ดร.วันวิสา ชัยวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบอีควอไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสาย ส่งเคเบิล	
Thesis Title	DESIGN OF CABLE EQUALIZER USED FOR SIGNAL TRANSMISSION	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพนิตพร อยู่อ่อน	รหัสนักศึกษา 54010866
	นางสาวพรพิมล นิมสาย	รหัสนักศึกษา 54010876
ระดับปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2557	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร. วันวิสา ชัชวงษ์	

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการส่งข้อมูลผ่านสายเคเบิลซึ่งการส่งข้อมูล  
ต่างๆผ่านสายเคเบิลในปัจจุบันนี้จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเนื่องจากกระบวนการส่ง โดยการ  
พัฒนาระบบที่ได้ทำในปริญญานิพนธ์นี้ทำโดยการออกแบบวงจรเคเบิลอีควอไลเซอร์ (Cable  
Equalizer) โดยใช้วิธีการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials) ซึ่งได้คำนวณค่า  
ฟังก์ชันถ่ายโอนแทนลงในวงจรอีควอไลเซอร์แบบโบทโดยอาศัยทฤษฎีของโบทจะได้เป็นวงจรเคเบิล  
อีควอไลเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามความต้องการ เพื่อนำไปเชื่อมต่อกับกระบวนการส่งข้อมูลผ่านสายเคเบิล  
เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณ โดยการทำปริญญานิพนธ์นี้จะมีการเลือกใช้สัญญาณ  
ทดสอบ ไซน์ยกกำลังสองพัลส์ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบระบบการส่งสัญญาณว่าเมื่อส่งสัญญาณ  
ทดสอบผ่านเข้าไปในสายเคเบิลที่ความยาวต่างๆกันแล้ว สัญญาณที่ได้หลังจากกระบวนการส่งข้อมูล  
ผ่านสายเคเบิลแล้วจะมีหน้าตาออกมาอย่างไร และเกิดความผิดเพี้ยนมากน้อยเพียงใด จากนั้นนำผลที่  
ได้มาใช้ประกอบกับการออกแบบวงจรเคเบิลอีควอไลเซอร์นั่นเอง

<b>Title</b>	Design of Cable Equalizer used for Signal Transmission	
<b>Student</b>	Miss Panitporn U-on	Student ID. 54010866
	Miss Phornphimon Nimsai	Student ID. 54010876
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Information Engineering	
<b>Academic Year</b>	2014	
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Vanvisa Chutchavong	

## ABSTRACT

This thesis presents the development of systems for transmitting data over the cables, which transmit data via cable today due to distortion of the signal transmission process. By developing a system that has been done on this thesis by the design of Cable Equalizer is set by means of a Bernstein Polynomials was calculated. The transfer function of the Bode Type Equalizer circuit model using the theory of Bode. As a result, cable equalizer settings as desired. To be connect to the transmission via a cable to correct the distortion of the signal. By doing this thesis are using a test signal. Sine squared pulse. To be used in testing the signaling system that sends test signals through the cable in different lengths and then. Signals after the transmission through the cable and then looks away to distortion. The results will be used in conjunction with the circuit's cable equalizer.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จไม่ได้เลยถ้าขาดความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้ความรู้ต่างๆ และช่วยแก้ไขปัญหา รวมไปถึง ให้ความรัก ความอบอุ่น การดูแลเอาใจใส่ผู้จัดทำเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้อย่างมากมาย ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องของผู้จัดทำ ที่ให้กำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์มาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ช่วยให้กำลังใจ ให้ซึ่งกันและกัน ให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้แก่ผู้จัดทำเสมอมา ทางผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง



พนิตพร อยู่อ่อน

พรพิมล นิ่มสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ภาพรวม หรือโครงสร้างรวมของปริญญาโท.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานปริญญาโท.....	2
1.5 แผนผัง หรือตารางเวลาการดำเนินงานปริญญาโท.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ.....	4
2.2.1 สายนำสัญญาณแบบบาลานซ์ (Balance).....	4
2.2.2 สายนำสัญญาณแบบอับบาลานซ์ (Unbalance).....	5
2.3 สื่อกลาง.....	5
2.3.1 สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media).....	6
2.3.1.1 สายแลน (Lan Cable).....	6
2.3.1.2 RJ-45 .....	7
2.3.1.3 สายโคแอกเชียล (Coaxial).....	8
2.3.1.4 สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic).....	9
2.3.2 สื่อกลางประเภทไร้สาย (Wireless Media).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3.2.1 คลื่นวิทยุ (Radio Wave).....	11
2.3.2.2 สัญญาณไมโครเวฟ (Microwave).....	12
2.3.2.3 แสงอินฟราเรด (Infrared).....	13
2.3.2.4 ดาวเทียม (Satellite).....	13
2.3.2.5 บลูทูธ (Bluetooth).....	14
2.4 สายโคแอกเชียลเคเบิล (Coaxial Cable).....	15
2.4.1 สายโคแอกเชียลแบบบาง (Thin Coaxial Cable).....	16
2.4.2 สายโคแอกเชียลแบบหนา (Thick Coaxial Cable).....	16
2.4.3 ชนิดของสายโคแอกเชียล แบ่งตามอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสายโคแอกเชียล.....	19
2.5 สัญญาณรบกวน (Noise).....	28
2.5.1 การลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเชียล.....	29
2.6 สัญญาณทดสอบ (Signal Test).....	30
2.7 การคำนวณผลที่ได้จากป้อนสัญญาณทดสอบในสายโคแอกเชียล.....	32
2.7.1 ผลที่ได้จากการพล็อตกราฟ.....	34
2.8 บทสรุป.....	39
บทที่ 3 ทฤษฎีโพลิโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์.....	40
3.1 บทนำ.....	40
3.2 โพลิโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials).....	40
3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แอนาล็อก โดยใช้โพลิโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์.....	44
3.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\epsilon$ .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....	51
3.4 บทสรุป.....	54
บทที่ 4 การออกแบบวงจรอควอไลเซอร์แบบสโลปเชิงเส้น.....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 การออกแบบวงจรอควอไลเซอร์ทางขนาดแบบสโลปเชิงเส้น (Linear Gain Slope Equalizer).....	55
4.2.1 การแก้ไขความผิดเพี้ยนขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี (Linear Gain Slope Luminance-Chrominance Equalizer).....	56
4.2.1.1 ความผิดเพี้ยนของความเข้มแสง และสี (The Luminance-Chrominance Linear Distortion).....	56
4.2.1.2 การออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี.....	57
4.2.1.2.1 ออกแบบอควอไลเซอร์ทางขนาดแบบสโลปเชิงเส้น (Design Linear Gain Slope Equalizer).....	57
4.3 การออกแบบวงจรเคเบิลอควอไลเซอร์ทางขนาด (Design of Cable Equalizer).....	70
4.3.1 เคเบิลอควอไลเซอร์ของสายชนิด RG-6.....	74
4.3.2 เคเบิลอควอไลเซอร์ของสายชนิด RG-11.....	78
4.3.3 เคเบิลอควอไลเซอร์ของสายชนิด RG-213.....	81
4.4 การทดสอบเสถียรภาพ (Stability Test).....	84
4.5 บทสรุป.....	85

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุป และแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	86
5.1 สรุป.....	86
5.2 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	87
เอกสารอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก โปสเตอร์.....	91



# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของสายโคแอกเชียล.....	19
ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	20
ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	21
ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทและสัญลักษณ์ของสายโคแอกเชียลแต่ละประเภท.....	21
ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทและสัญลักษณ์ของสายโคแอกเชียลแต่ละประเภท (ต่อ).....	22
ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล.....	23
ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	24
ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	25
ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	26
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล.....	26
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	27
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล (ต่อ).....	28
ตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเชียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต.....	29
ตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเชียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต (ต่อ).....	30

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปสี่เหลี่ยมประเภทมีสาย.....	5
รูปที่ 2.2 รูปสายชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ.....	6
รูปที่ 2.3 รูปสายชนิดมีฉนวนหุ้ม.....	7
รูปที่ 2.4 รูปหัวต่อตัวผู้ RJ-45.....	7
รูปที่ 2.5 รูปหัวต่อตัวเมีย RJ-45.....	8
รูปที่ 2.6 รูปสายโคแอกเชียล.....	8
รูปที่ 2.7 รูปสายใยแก้วนำแสง.....	9
รูปที่ 2.8 รูป Fiber Optic Converter.....	10
รูปที่ 2.9 รูป Fiber Optic Connector.....	11
รูปที่ 2.10 รูปการทำงานของสี่เหลี่ยมประเภทไร้สาย.....	12
รูปที่ 2.11 รูปการทำงานของสัญญาณไมโครเวฟ.....	12
รูปที่ 2.12 รูปแสงอินฟราเรด.....	13
รูปที่ 2.13 รูปดาวเทียม.....	14
รูปที่ 2.14 รูปการทำงานของบลูทูธ.....	15
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างสายโคแอกเชียล.....	15
รูปที่ 2.16 รูปสาย RG ประเภทต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.17 รูปสาย RG-6.....	17
รูปที่ 2.18 รูปสาย RG-8.....	18
รูปที่ 2.19 รูปสาย RG-11.....	18
รูปที่ 2.20 แสดงสาย RG-58 / U.....	18
รูปที่ 2.21 รูปสาย RG-59.....	19
รูปที่ 2.22 รูปสาย RG-213.....	19
รูปที่ 2.23 การสื่อสารผ่านสายโคแอกเชียลแล้วเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจึงทำให้การสื่อสารมีความผิดพลาด.....	29
รูปที่ 2.24 รูปแสดงสัญญาณไซน์.....	30
รูปที่ 2.25 รูปแสดงสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์.....	31
รูปที่ 2.26 รูปแสดงสัญญาณไซน์เทียบกับไซน์กำลังสองพัลส์.....	31
รูปที่ 2.27 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 1-5 กิโลเมตร.....	34
รูปที่ 2.28 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 6 กิโลเมตร.....	35
รูปที่ 2.29 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 7 กิโลเมตร.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.30 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 8 กิโลเมตร.....	36
รูปที่ 2.31 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 9 กิโลเมตร.....	36
รูปที่ 2.32 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 10 กิโลเมตร.....	37
รูปที่ 2.33 รูปกราฟที่ได้จากการเปรียบเทียบผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่แตกต่างกัน.....	37
รูปที่ 2.34 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์	
(ก) 10MHz ของสาย RG-6.....	38
(ข) 50MHz ของสาย RG-6.....	38
รูปที่ 2.35 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์	
(ก) 10MHz ของสาย RG-11.....	38
(ข) 50MHz ของสาย RG-11.....	38
รูปที่ 2.36 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์	
(ก) 10MHz ของสาย RG-213.....	39
(ข) 50MHz ของสาย RG-213.....	39
รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน.....	41
รูปที่ 3.2 การแปลงแกนความถี่จาก $\Omega \rightarrow \omega$ .....	42
รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	45
รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	46
รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ อันดับ 4.....	46
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\epsilon$ .....	48
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\epsilon$	
(ก) สเกลเชิงเส้น.....	49
(ข) สเกลกึ่งล็อก.....	50
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\epsilon$	
(ก) สเกลเชิงเส้น.....	50
(ข) สเกลกึ่งล็อก.....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....	52
รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....	53
รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$ .....	53
รูปที่ 4.1 รูปความผิดเพี้ยนของสี .....	56
รูปที่ 4.2 แนวคิดของอิกวอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น .....	58
รูปที่ 4.3 รูปแนวคิดของอิกวอไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น .....	58
รูปที่ 4.4 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +3 เดซิเบล .....	60
รูปที่ 4.5 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +3 เดซิเบล .....	61
รูปที่ 4.6 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -3 เดซิเบล .....	62
รูปที่ 4.7 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ -3 เดซิเบล .....	62
รูปที่ 4.8 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $\pm 3$ เดซิเบล .....	63
รูปที่ 4.9 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +2 เดซิเบล .....	64
รูปที่ 4.10 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +2 เดซิเบล .....	64
รูปที่ 4.11 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -2 เดซิเบล .....	65
รูปที่ 4.12 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ -2 เดซิเบล .....	66
รูปที่ 4.13 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $\pm 2$ เดซิเบล .....	66
รูปที่ 4.14 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +1 เดซิเบล .....	67
รูปที่ 4.15 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +1 เดซิเบล .....	68
รูปที่ 4.16 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -1 เดซิเบล .....	69
รูปที่ 4.17 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ -1 เดซิเบล .....	69
รูปที่ 4.18 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $\pm 1$ เดซิเบล .....	70
รูปที่ 4.19 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ $\pm 1 \pm 2 \pm 3$ เดซิเบล .....	70
รูปที่ 4.20 รูปบล็อกไดอะแกรมการทำงาน .....	71
รูปที่ 4.21 รูปสัญญาณภาพที่ถูกส่งผ่านสายโคแอกเชียลที่ความยาว 1 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตรเมื่อมีการใส่ตัววงจรเคเบิลอิกวอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนแล้วจะทำให้ได้ภาพที่คมชัด .....	71
รูปที่ 4.22 รูปวงจรอิกวอไลเซอร์แบบโบทที่ตั้งค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิล .....	73
รูปที่ 4.23 รูปอิกวอไลเซอร์แบบโบทที่มีด้านบวก +3 dB และด้านลบ -3 dB ที่ความถี่ 4 MHz .....	73
รูปที่ 4.24 รูปแสดงค่าสัญญาณที่ถูกลดทอนของสายเคเบิลชนิด RG-6 RG-11 และ RG-213 .....	74
รูปที่ 4.25 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-6 .....	75
รูปที่ 4.26 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-6 .....	76
รูปที่ 4.27 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-6 .....	77
รูปที่ 4.28 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-6 .....	77

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-11.....	79
รูปที่ 4.30 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-11.....	79
รูปที่ 4.31 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-11.....	80
รูปที่ 4.32 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-11.....	81
รูปที่ 4.33 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-213.....	82
รูปที่ 4.34 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-213.....	82
รูปที่ 4.35 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-213.....	83
รูปที่ 4.36 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-213.....	84
รูปที่ 4.37 รูปเสถียรภาพที่ใช้ไฮโดรกราฟของมิโฮลอฟ.....	85



# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากระบบสื่อสารในปัจจุบันมีการบ่อนสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพผ่านสายเคเบิล (Coaxial Cable) และคุณภาพของสัญญาณส่วนใหญ่มักจะเกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากกระบวนการส่งสัญญาณนั่นเอง เช่น จะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น ซึ่งทราบกันดีอยู่แล้วว่าสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพจะมีผลผิดเพี้ยนเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลทำให้เกิดการสะท้อนกลับจึงเกิดพัลส์ก้อง (Echo Pulse) เป็นต้น

ดังนั้นปริญญาณิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาและออกแบบวงจรอโควโลเซอร์ ซึ่งวงจรอโควโลเซอร์มีคุณสมบัติในการปรับแต่งสัญญาณข้อมูล หรือสัญญาณภาพ ให้มีความสมดุลมากที่สุดตามที่ต้องการ ซึ่งปริญญาณิพนธ์นี้ได้มีการนำเอาวงจรอโควโลเซอร์มาออกแบบเป็นวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิลที่สามารถปรับค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิลที่ต้องการ ส่งผลให้มีความสะดวกในการประยุกต์เพื่อนำมาใช้งานในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น

## 1.2 ภาพรวม หรือโครงสร้างรวมของปริญญาณิพนธ์

ปริญญาณิพนธ์นี้ทำขึ้นเพื่อออกแบบวงจรเคเบิลอโควโลเซอร์ ที่มีคุณสมบัติสามารถปรับค่าได้เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณ โดยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีสายส่ง จากนั้นทำการพิสูจน์ข้อเท็จจริงที่ว่าสัญญาณจะถูกลดทอนมากขึ้นเมื่อส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียลในระยะทางที่ไกลขึ้น โดยการเลือกใช้สัญญาณทดสอบ ไซน์ยกกำลังสองพัลส์ และนำสมการสายโคแอกเซียลมาพล็อตในโปรแกรม Matlab เพื่อนำผลที่ได้นั้นมาวิเคราะห์ว่าเป็นจริงตามทฤษฎีสายส่งหรือไม่ จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรเคเบิลอโควโลเซอร์ โดยเลือกใช้วิธีโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ ซึ่งคำนวณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแทนลงในวงจรอโควโลเซอร์แบบโบท โดยอาศัยทฤษฎีของโบท เพื่อให้เป็นวงจรเคเบิลอโควโลเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามความต้องการ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดในกระบวนการส่งสัญญาณภาพ หรือสัญญาณข้อมูลผ่านสายเคเบิลให้ได้สัญญาณที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด
2. เพื่อออกแบบวงจรอิควอไลเซอร์ที่สามารถปรับค่าได้ตามระยะทางของสายเคเบิล
3. เพื่อนำวงจรที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน และปรับระดับสัญญาณต่างๆให้มีความสมดุลได้ตามความต้องการ เช่น สัญญาณภาพ สัญญาณเสียง สัญญาณข้อมูล เป็นต้น

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานปริญญาโท

#### โปรเจค 1

1. ศึกษาทฤษฎีสายส่ง (Transmission Line) และ ทฤษฎีของโบด
2. ศึกษาการออกแบบวงจรอิควอไลเซอร์ และโพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์
3. ศึกษาการทำงานของโปรแกรม Matlab
4. ทำการพิสูจน์สมการส่งข้อมูลผ่านสายโคแอกเซียล (Coaxial Transmission Line)
5. นำสมการที่พิสูจน์ได้มาทำการพล็อตกราฟในโปรแกรม Matlab
6. เปรียบเทียบผล และสรุปผล
7. จัดทำเอกสารปริญญาโท

#### โปรเจค 2

1. ศึกษา และสรุปงานที่จะต้องทำเพิ่มในเทอมที่ 2
2. คำนวณหาค่าสัญญาณที่หายไปจากโปรเจค 1
3. ใช้วิธีโพลีโนเมียลแบบเบรินสไตน์มาช่วยคำนวณหาค่าเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจร
2. ทำการออกแบบวงจรอิควอไลเซอร์เพื่อนำมาต่อกับผลที่ได้มาจากโปรเจค 1
3. นำวงจรที่ต่อกันแล้วมาพล็อตกราฟใน Matlab
4. นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ได้ใส่วงจรอิควอไลเซอร์เข้าไป
5. สรุปผลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. จัดทำต้นฉบับปริญญาบัตร

### 1.5 แผนผัง หรือตารางเวลาการดำเนินงานปริญญาบัตร

#### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ID	งานที่ดำเนินการ	ส.ค.2557	ก.ย.2557	ต.ค.2557	พ.ย.2557	ธ.ค.2557	ม.ค.2558	ก.พ.2558	มี.ค.2558	เม.ย.2558	พ.ค.2558	30
		14			17					20		
1	ศึกษาทฤษฎีสายส่ง (Transmission Line) และ ทฤษฎี Bode Type Equalizer											
2	ศึกษาการออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่ง และ โทลโนเมียลแบบเบิร์ตส์											
3	ศึกษาการทำงานของโปรแกรม Matlab											
4	ทำการพิสูจน์สมการส่งข้อมูลผ่านสายโคแอกเชียล (Coaxial Transmission Line)											
5	นำผลการพิสูจน์มาทำการหาค่ากราฟในโปรแกรม Matlab											
6	เปรียบเทียบผล และสรุปผล											
7	จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์											
8	ศึกษา และสรุปงานที่จะต้องทำเพิ่มในตอนที่ 2											
9	ทำการออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่งเพื่อนำมาต่อกับผลที่ได้มาจาก Project 1											
10	นำวงจรที่ต่อกันแล้วมาหาค่ากราฟใน Matlab											
11	นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ได้ใส่วงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่ง											
12	สรุปผลทั้งหมด											
13	จัดทำต้นฉบับปริญญาบัตร											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ

### 2.1 บทนำ

สายส่งสัญญาณเป็นอุปกรณ์ประเภทที่เป็นตัวนำและถ่ายทอดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ปลายทาง แต่ในทางด้านวิทยุ จะใช้สายนำสัญญาณเป็นตัวกลางนำสัญญาณความถี่วิทยุจากตัวเครื่องรับส่ง ไปสู่สายอากาศ และนำสัญญาณจากสายอากาศมาสู่เครื่องรับส่ง และจะต้องมีการสูญเสียกำลังงานในตัวสายให้น้อยที่สุดด้วยจึงจะเรียกได้ว่าสายส่งมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสายส่งสัญญาณต้องมีความสำคัญในส่วนของกำลังงานและประสิทธิภาพการรับส่งด้วยอย่างแน่นอน จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสายส่งสัญญาณเพื่อที่จะสามารถนำไปทำการออกแบบวงจรเคเบิลลิวคโวลเซอร์ให้มีความมีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั่นเอง

### 2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณ [1]

สายส่งสัญญาณเป็นอุปกรณ์ประเภทที่เป็นตัวนำและถ่ายทอดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ปลายทาง สายส่งสัญญาณสามารถแบ่งได้หลายชนิดตามคุณสมบัติ หรือ วัสดุ ซึ่งแบ่งออกได้ใหญ่ๆ 2 ชนิด คือ

**2.2.1 สายนำสัญญาณแบบบาลานซ์ (Balance)** เป็นสายนำสัญญาณประเภทที่มีตัวนำสองเส้นวางคู่ขนานกันไป โดยที่มีฉนวน หรือ ไดอิเล็กทริกเป็นตัวชั้นกลาง สัญญาณในตัวนำทั้งสองจะมีค่ากระแสเท่ากันทั้ง 2 เส้น แต่มีเฟสต่างกัน 180 องศาและไม่มีส่วนใดต่อลงกราวด์ของระบบ ส่วนใหญ่ที่เราเห็นและมักคุ้นเคยกันก็คือ สายส่งสัญญาณชนิดแบน 300 โอห์ม ที่นิยมใช้ติดตั้งกับระบบโทรทัศน์ สายนำสัญญาณประเภทนี้มีการรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย เพราะไม่มีส่วนในการต่อหุ้มที่เป็นส่วนป้องกันการรบกวน หรือการแพร่กระจายคลื่นออก

$$\text{ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายหาได้จาก } Z_0 = 276 \log 2D/R$$

D = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง

R = รัศมีของเส้นลวดตัวนำ

2.2.2 สายนำสัญญาณแบบอับบาลานซ์ (Unbalance) เป็นสายนำสัญญาณที่เป็นส่วนของสัญญาณ และส่วนของกราวด์ ที่พบเห็นและเกี่ยวข้องกับวิทยุสมัครเล่นก็คือ สายโคแอกเซียล คือสายนำสัญญาณ ที่เป็นตัวนำอยู่ตรงกลาง และมีส่วนของชีลด์เป็นตัวนำห่อหุ้มอยู่ในลักษณะทรงกระบอก โดยมีฉนวนหรือไดอิเล็กทริก ระหว่างกลางตัวนำทั้งสอง คุณสมบัติของสายนำสัญญาณประเภทนี้ คือ ในส่วนของ ชีลด์สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่จะเข้ารบกวนในส่วนสัญญาณได้ และสามารถป้องกันการแพร่กระจายคลื่นที่เล็ดลอดออกมาจากสายนำสัญญาณได้

ค่าอิมพีแดนซ์ประจำสายหาได้จาก  $Z_0 = 138 \log D/d$

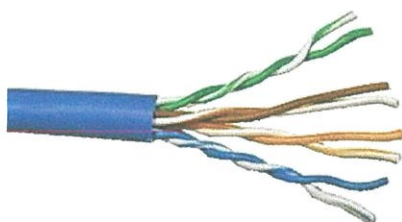
D = เส้นผ่านศูนย์กลางของชีลด์

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำใน

### ข้อพิจารณาการเลือกใช้สาย

1. การสูญเสียในสายภายในสายต่ำลือว่ามีคุณภาพดี มีข้อสังเกตว่าถ้าใช้โฟมเป็นไดอิเล็กทริกจะลดการสูญเสียได้มาก
2. การโค้งงอในสาย ในงานที่ถูกโค้งงอบ่อยเราควรใช้สายที่มีลวดตัวนำตรงกลางจำนวนหลายเส้นจะดีไม่ขาดเร็วเกินไป
3. สายชีลด์ ป้องกันไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวน

## 2.3 สื่อกกลาง



รูปที่ 2.1 รูปสื่อกกลางประเภทมีสาย

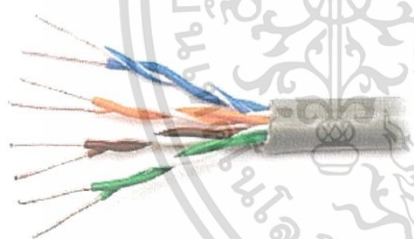
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.1 สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media) [2]** หมายถึง สื่อกลางที่เป็นสายซึ่งใช้ในการเชื่อมโยงโดยอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์และ อุปกรณ์ในระยะทางที่ห่างกันไม่มากนัก

ตัวกลางหรือสายเชื่อมโยง เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ต่างๆเข้าด้วยกัน สื่อกลางที่ใช้ในการสื่อสารมีหลายประเภท แต่ละประเภทจะแตกต่างกันในด้านของปริมาณข้อมูลที่สื่อกลางตัวนั้นๆสามารถผ่านไปได้ในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง การวัดปริมาณในการนำข้อมูล เรียกกันว่า แบนด์วิดท์ (Bandwidth) มีหน่วยเป็น จำนวนบิตข้อมูลต่อวินาที (bit per second : bps) สายเชื่อมโยงมีด้วยกันหลายประเภทคือ

**2.3.1.1 สายแลน (Lan Cable)** คือ สายที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า Switch หรือ HUB (แต่เราสามารถเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ได้ด้วยเช่นกัน) สายแลนมีอยู่หลายประเภท แต่ละประเภทจะมีความสามารถในการรับ-ส่งสัญญาณแตกต่างกันออกไป สายแลนเป็นลักษณะสายคู่บิดเกลียว ลักษณะของสายคู่บิดเกลียวแต่ละคู่จะทำมาด้วยเส้นทองแดง 2 เส้น แต่ละเส้นจะมีฉนวนหุ้มพันกันเป็นเกลียวเพื่อป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประเภทของสายคู่บิดเกลียวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

**ชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ (Unshielded Twisted Pairs: UTP)**



- ประกอบด้วยสายคู่บิดเกลียว 4 คู่ (8เส้น)
- เหมาะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ระยะห่างไม่เกิน 30 เมตร
- ราคาถูก แต่ถูกรบกวนได้ง่ายและไม่ทนทาน

รูปที่ 2.2 รูปสายชนิดไม่มีฉนวนหุ้มโลหะ

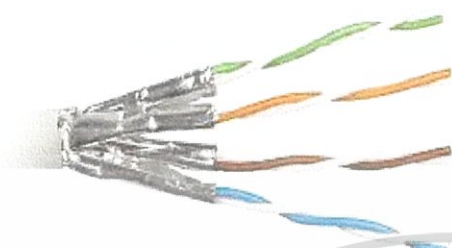
**ประเภทของสาย UTP**

- UTP CAT5 คือ สายแลน ที่เป็นสายทองแดงที่มีความเร็วที่ต่ำ ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 100 Mbps (ไม่เป็นที่นิยมใช้กันแล้ว)
- UTP CAT5e คือ สายแลนที่เป็นสายทองแดงที่มีความเร็วที่ต่ำ ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 1 Gbps
- UTP CAT6 คือ สายแลนที่เป็นสายทองแดงที่มีความเร็วที่ต่ำ ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 10 Gbps BANWIDTH อยู่ที่ 250MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- UTP CAT7 คือ สายแลนที่เป็นสายทองแดงที่มีความเร็วที่ต่ำ ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 10 Gbps BANWIDTH อยู่ที่ 600MHz

### ชนิดมีฉนวนหุ้ม (Shield Twisted Pairs)

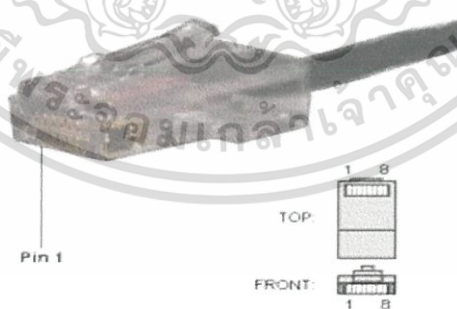


- ประกอบด้วยสายคู่บิดเกลียว 4 คู่ (8 เส้น)
- สายแต่ละเส้นมีฉนวนหุ้มโลหะเพื่อนป้องกัน การรบกวนจากภายนอก
- คุณภาพสูงกว่า และราคาแพงกว่าสาย UTP
- ถูกรบกวนทางไฟฟ้าต่ำ

รูปที่ 2.3 รูปสายชนิดมีฉนวนหุ้ม

2.3.1.2 RJ-45 คือ หัวต่อที่ใช้กับสายสัญญาณเชื่อมเครือข่ายแบบสายคู่บิดเกลียว (สายคือ หัวต่อที่ใช้กับสายสัญญาณเชื่อมเครือข่ายแบบสายคู่บิดเกลียว (สาย UTP หรือ STP) ตัวผู้ มี 2 ชนิด ได้แก่

หัวต่อตัวผู้ RJ-45 (หรือที่เรียกว่า RJ-45 Connector หรือ RJ-45 Jack Plug) เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ที่ปลายสาย UTP มีลักษณะเป็นพลาสติกสีเหลี่ยมคล้ายหัวต่อโทรศัพท์ มีช่องสำหรับเสียบสายที่ด้านหลัง ด้านล่างเรียบ ส่วนด้านบนมีตัวล็อก ถ้าหันหน้าเข้าด้านหน้าของหัวต่อพิน 1 จะอยู่ทางด้านซ้ายมือของเราขณะที่พิน 8 จะอยู่ทางขวามือ



รูปที่ 2.4 รูปหัวต่อตัวผู้ RJ-45

หัวต่อตัวเมีย RJ-45 (หรือเรียกว่า RJ-45 Jack Face) มีลักษณะเป็นบ้าเสียบสำหรับหัวต่อ RJ-45 ตัวผู้ เมื่อมองจากด้านที่จะนำหัวต่อตัวผู้เสียบ พิน 8 จะอยู่ทางซ้าย ส่วนพิน 1 จะอยู่ทางขวา หัวต่อตัวเมียจะมีลักษณะเป็นกล่องมีช่องสำหรับเสียบหัวต่อ ด้านในกล่องจะมีขั้วซึ่งจะเป็นส่วนที่เชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับสายนำสัญญาณ Hub หรือ Repeater อุปกรณ์ที่ใช้เป็นจุดศูนย์กลางในการกระจายสัญญาณ หรือ ข้อมูล



รูปที่ 2.5 รูปหัวต่อตัวเมีย RJ-45

ข้อดี ของสายคู่บิดเกลียวคือ

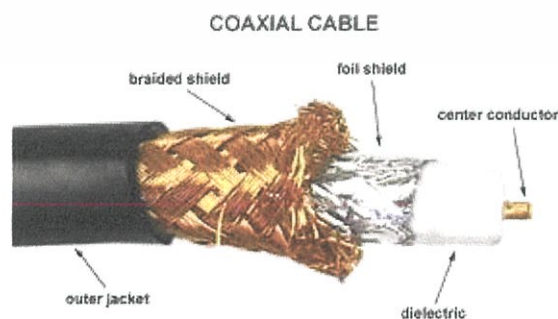
- ราคาถูก
- มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน
- ติดตั้งง่าย และมีน้ำหนักเบา

ข้อเสีย ของสายคู่บิดเกลียวคือ

- ถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ง่าย
- ระยะทางจำกัด

### 2.3.1.3 สายโคแอกเชียล (Coaxial)

เป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้ และเป็นที่ยอมรับมากในเครือข่ายคอมพิวเตอร์สมัย แรก ๆ แต่ในปัจจุบันสายโคแอก ถือได้ว่าเป็นสายที่ล้าสมัยสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามยังมีระบบเครือข่ายบางประเภทที่ยังใช้สายประเภทนี้อยู่



รูปที่ 2.6 รูปสายโคแอกเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

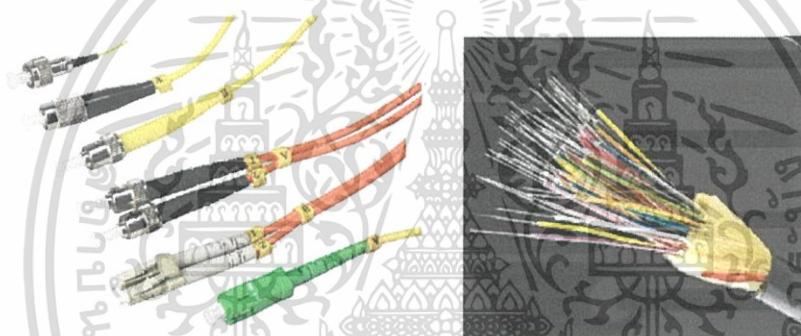
### ข้อดี ของโคแอกเชียลคือ

- ราคาถูก
- มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน
- ติดตั้งง่าย และมีน้ำหนักเบา

### ข้อเสีย ของโคแอกเชียลคือ

- ถูกรบกวนจากสัญญาณภายนอกได้ง่าย
- ระยะทางจำกัด

#### 2.3.1.4 สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic)



รูปที่ 2.7 รูปสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable) คือ สายนำสัญญาณข้อมูลที่ใช้หลักการทางแสง กล่าวคือ ใช้กับสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปของคลื่นแสงเท่านั้นตัวแก้วนำแสงอาจทำจากแก้วหรือพลาสติก โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแสงแล้วจึงส่งให้เดินทางสะท้อนภายในสายใยแก้ว เรื่อยไปจนถึงผู้รับที่ปลายทาง สายใยแก้ว มีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายทั่วไปหลายประการ เช่น มีขนาดเล็ก ส่งผ่านข้อมูลได้ครั้งละมากๆ สัญญาณข้อมูลมีโอกาสถูกลดทอนน้อยมาก ทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยข้อจำกัด คือ เมื่อสายใยแก้วขาด หักงอหรือแตกหัก จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษในการซ่อมแซม ซึ่งยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบอื่น และข้อมูลที่ส่งผ่านมันจะถูกเปลี่ยนจากข้อมูลปกติให้เป็นแสง ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Converter แล้วก็ส่งไปตามแท่งแก้วที่วางนี้ไปยังปลายทาง แล้วก็จะมี Converter อีกชุดหนึ่งที่ปลายทางเปลี่ยนมันกลับเป็นชุดข้อมูลแบบเดิมอีกที สายใยแก้วนำแสงนี้มันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Single mode Fiber Optic** เป็นการใช้ตัวนำแสงที่บีบลำแสงให้พุ่งตรงไปตามท่อแก้ว โดยมีการกระจายแสงออกทางด้านข้างน้อยที่สุด ซึ่งเกิลโหมดจึงเป็นเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีกำลังสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด เหมาะสำหรับในการใช้กับระยะทางไกล ๆ การเดินสายใยแก้วนำแสงกับระยะทางไกลมาก เช่น เดินทางระหว่างประเทศ ระหว่างเมือง มักใช้แบบซิงเกิลโหมด

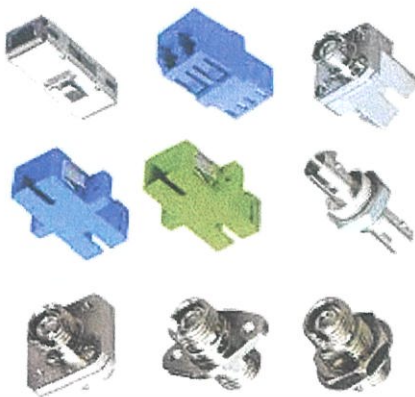
**Multimode Fiber Optic** แยกได้อีกตามขนาดศูนย์กลางของแกนแท่ง และ Cladding คือโดยประมาณ 50 ไมครอน 62.5 ไมครอน โดยมี Cladding ขนาด 125 ไมครอน ราคาที่แตกต่างกันนิดหน่อยแล้วแต่จะเลือกใช้ ยิ่งใหญ่ก็ยิ่งดี แต่ยิ่งใหญ่ก็ยิ่งแพงตามไปด้วย หลักการทำงาน ให้เข้าใจว่า มันวิ่งสลับกันเป็นฟันปลาส่งสัญญาณออกเป็นกลุ่ม ทำให้ได้ความหนาแน่นของสัญญาณมากกว่าแบบซิงเกิลโหมดแต่ได้ระยะทางน้อยกว่า

**Fiber Optic Converter** คืออุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณต่างที่เราต้องการส่ง ไม่ว่าจะเป็นภาพ เสียง หรือ LAN ให้อยู่ในรูปแบบของแสงแล้วส่งไปตามเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อถึงจุดหมายปลายทางก็จะมี Converter อีกตัวเปลี่ยนสัญญาณกลับมาเป็นแบบเดิม และ Fiber Optic Converter นี้ก็จะถูกแบ่งออกตามคุณลักษณะของสายใยแก้วนำแสง คือ แบบ ซิงเกิลโหมดและมัลติโหมด ซึ่งราคาก็จะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่คุณภาพแล้วแต่ยี่ห้อ



รูปที่ 2.8 รูป Fiber Optic Converter

**Fiber Optic Connector** คืออุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อตัวสายใยแก้วนำแสง ให้เข้ากับอุปกรณ์ต่อพ่วงหรือมีเดียชนิดต่างๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกันในระบบ เช่น Converter, F/O Connector Adapter เป็นต้น ซึ่งก็มีหลายประเภทแล้วแต่จะเลือกใช้



รูปที่ 2.9 รูป Fiber Optic Connector

**ข้อดี ของใยแก้วนำแสงคือ**

- ป้องกันการรบกวนจากสัญญาณไฟฟ้าได้มาก
- ส่งข้อมูลได้ระยะไกลโดยไม่ต้องมีตัวขยายสัญญาณ
- การดักสัญญาณทำได้ยาก ข้อมูลจึงมีความปลอดภัยมากกว่าสายส่งแบบอื่น
- ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงและสามารถส่งได้มาก ขนาดของสายเล็กและน้ำหนักเบา

**ข้อเสีย ของใยแก้วนำแสงคือ**

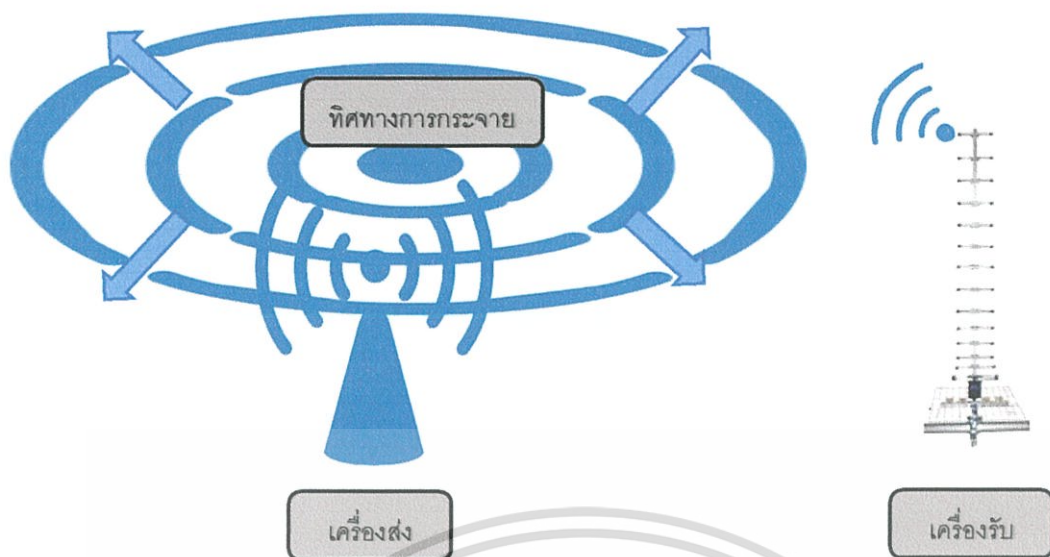
- มีราคาแพงกว่าสายคู่บิดเกลียวและสายโคแอกเชียล
- ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการติดตั้ง
- สายใยแก้วนำแสงมีความเปราะบาง
- มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้ง

### 2.3.2 สื่อกลางประเภทไร้สาย (Wireless Media) [3]

สื่อกลางประเภทไร้สาย หมายถึง การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย สามารถส่งข้อมูลได้ทุกทิศทาง โดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการสื่อสารดัง [รูปที่ 2.10]

**2.3.2.1 คลื่นวิทยุ (Radio Wave)** วิธีการสื่อสารประเภทนี้จะใช้การส่งคลื่นไปในอากาศ เพื่อส่งไปยังเครื่องรับวิทยุโดยรวมกับคลื่นเสียงมีความถี่เสียงที่เป็นรูปแบบของคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นการส่งวิทยุกระจายเสียงจึงไม่ต้องใช้สายส่งข้อมูล และยังสามารถส่งคลื่นสัญญาณไปได้ระยะไกล ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง  $10^4$ - $10^9$  เฮิร์ตซ์ ดังนั้น เครื่องรับวิทยุจะต้องปรับช่องความถี่ให้กับคลื่นวิทยุที่ส่งมา ทำให้สามารถรับข้อมูลได้อย่างชัดเจน

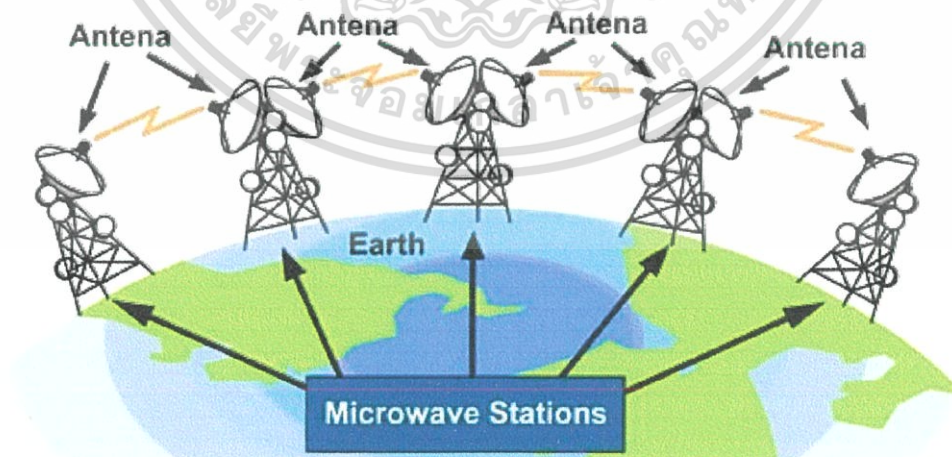
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 รูปการทำงานของสื่อกลางประเภทไร้สาย

### 2.3.2.2 สัญญาณไมโครเวฟ (Microwave)

เป็นสื่อกลางในการสื่อสารที่มีความเร็วสูง ส่งข้อมูลโดยอาศัยสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในอากาศพร้อมกับข้อมูลที่ต้องการส่ง และจะต้องมีสถานีที่ทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูล และเนื่องจากสัญญาณไมโครเวฟจะเดินทางเป็นเส้นตรง ไม่สามารถเลี้ยวหรือโค้งตามขอบโลกที่มีความโค้งได้ จึงต้องมีการตั้งสถานีรับ - ส่งข้อมูลเป็นระยะๆ และส่งข้อมูลต่อกันเป็นทอดๆ ระหว่างสถานีต่อสถานีจนกว่าจะถึงสถานีปลายทาง และแต่ละสถานีจะตั้งอยู่ในที่สูง ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่  $10^8 - 10^{12}$  เฮิร์ตซ์

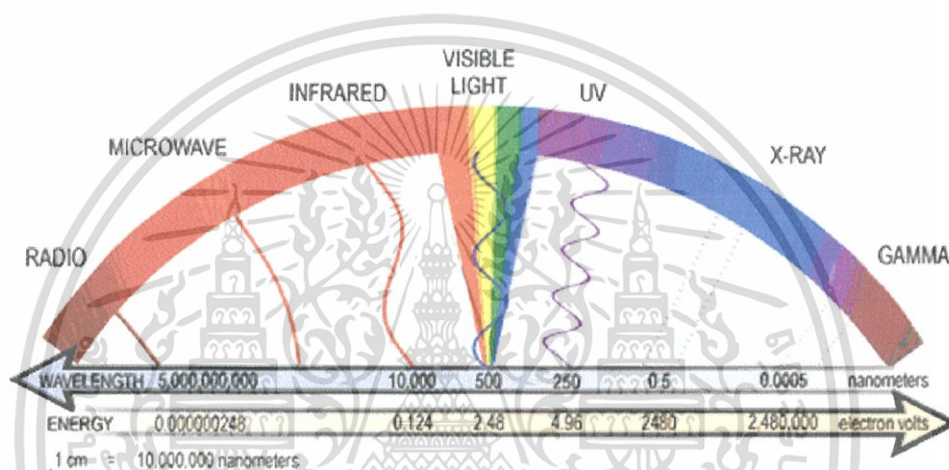


รูปที่ 2.11 รูปการทำงานของสัญญาณไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.3 แสงอินฟราเรด (Infrared)

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



รูปที่ 2.12 รูปแสงอินฟราเรด

### 2.3.2.4 ดาวเทียม (Satellite)

ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของสถานีรับ - ส่งไมโครเวฟบนผิวโลก วัตถุประสงค์ในการสร้างดาวเทียมเพื่อเป็นสถานีรับ - ส่งสัญญาณไมโครเวฟบนอวกาศ และทวนสัญญาณในแนวโคจรของโลก ในการส่งสัญญาณดาวเทียมจะต้องมีสถานีภาคพื้นดินคอยทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณขึ้นไปบนดาวเทียมที่โคจรอยู่สูงจากพื้นโลก 22,300 ไมล์ โดยดาวเทียมเหล่านั้น จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากับการหมุนของโลก จึงเสมือนกับดาวเทียมนั้นอยู่นิ่งอยู่กับที่ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง ทำให้การส่งสัญญาณไมโครเวฟจากสถานีหนึ่งขึ้นไปบนดาวเทียมและการกระจายสัญญาณ จากดาวเทียมลงมายังสถานีตามจุดต่างๆ บนผิวโลกเป็นไปอย่างแม่นยำ ดาวเทียมสามารถโคจรอยู่ได้ โดยอาศัยพลังงานที่ได้มาจากการเปลี่ยน พลังงานแสงอาทิตย์ ด้วย แผงโซลาร์ (Solar panel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปดาวเทียม

### 2.3.2.5 บลูทูธ (Bluetooth)

ระบบสื่อสารของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสองทาง ด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้น (Short-Range Radio Links) โดยปราศจากการใช้สายเคเบิล หรือ สายสัญญาณเชื่อมต่อ และไม่จำเป็นต้องใช้การเดินทางแบบเส้นตรงเหมือนกับอินฟราเรด ซึ่งถือว่าเพิ่มความสะดวกมากกว่าการเชื่อมต่อแบบอินฟราเรด ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือ กับอุปกรณ์ ในโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นก่อนๆ และในการวิจัย ไม่ได้มุ่งเฉพาะการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่ยังศึกษาถึงการส่งข้อมูลที่เป็นเสียง เพื่อใช้สำหรับ Headset บนโทรศัพท์มือถือด้วยเทคโนโลยี บลูทูธ เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบไร้สายที่น่าจับตามองเป็นอย่างมาก ยิ่งในปัจจุบัน ทั้งในเรื่องความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ทั่วไป และประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจาก เทคโนโลยี บลูทูธ มีราคาถูก ใช้พลังงานน้อย และใช้เทคโนโลยี short – range ซึ่งในอนาคต จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนา เพื่อนำไปสู่การแทนที่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สาย เคเบิล เช่น Headset สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น เทคโนโลยีการเชื่อมโยงหรือการสื่อสารแบบใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้น เป็นเทคโนโลยีของอินเทอร์เน็ตไร้สายทางคลื่นวิทยุ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการสื่อสารระยะใกล้ที่ปลอดภัยผ่านช่องสัญญาณความถี่ 2.4 GHz โดยที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการใช้สายเคเบิลในการเชื่อมโยงโดยมี ความเร็วในการเชื่อมโยงสูงสุดที่ 1 mbp ระยะเวลาครอบคลุม 10 เมตร เทคโนโลยีการส่งคลื่นวิทยุของบลูทูธจะใช้การกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency hop) เพราะว่าเทคโนโลยีนี้เหมาะที่จะใช้กับการส่งคลื่นวิทยุที่มีกำลังส่งต่ำและ ราคาถูก โดยจะแบ่งออกเป็นหลายช่องความถี่ขนาดเล็ก ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนช่องความถี่ที่ไม่แน่นอนทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เข้ามาแทรกแซงได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่จะได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีบลูทูธ ต้องผ่านการทดสอบจาก Bluetooth SIG (Special Interest Group) เสียก่อนเพื่อยืนยันว่ามันสามารถที่จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์บลูทูธตัวอื่นๆ และอินเทอร์เน็ตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

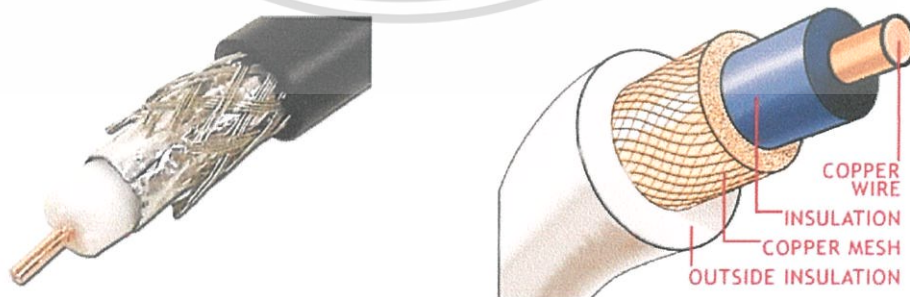


รูปที่ 2.14 รูปการทำงานของบลูทูธ

ซึ่งปริญญาบัตรนี้จะเน้นไปที่การทำงานแบบมีสายของสายโคแอกเชียลเคเบิลเท่านั้นเนื่องจากในปัจจุบันนี้ยังมีการใช้สายโคแอกเชียลเคเบิลใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ระบบนำสัญญาณภาพแบบต่างๆ ทั้ง TV เคเบิล ดาวเทียม ระบบ Audio/Video และระบบกล้องวงจรปิด CCTV เป็นต้น

## 2.4 สายโคแอกเชียลเคเบิล (Coaxial Cable) [4]

สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) เป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้และเป็นที่นิยมมากในเครือข่ายคอมพิวเตอร์สมัยแรกๆ แต่ในปัจจุบันสายโคแอกเชียลถือได้ว่าเป็นสายที่ล้าสมัยสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามยังมีระบบเครือข่ายบางประเภทที่ยังใช้สายประเภทนี้อยู่ สายโคแอกเชียลมีตัวนำไฟฟ้าอยู่สองส่วน คำว่า โคแอกซ์ มีความหมายว่า "มีแกนร่วมกัน"



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างสายโคแอกเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสายโคแอกเซียล ประกอบด้วยสายทองแดงเป็นแกนกลาง แล้วห่อหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน ชั้นต่อมาจะเป็นตัวนำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเป็นแผ่นโลหะบางๆ หรืออาจจะเป็นใยโลหะที่ถักเปียอีกชั้นหนึ่ง สุดท้ายก็หุ้มด้วยฉนวนและวัสดุป้องกันสายสัญญาณ ส่วนแกนเป็นส่วนที่นำสัญญาณข้อมูล ส่วนชั้นใยตาข่ายเป็นชั้นที่ใช้ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและเป็นสายดินในตัว ดังนั้นสองส่วนนี้จะต้องไม่เชื่อมต่อกันมิฉะนั้นอาจเกิดไฟช็อตได้ สายโคแอกเซียลถูกแยกเป็นประเภทต่างๆ โดยใช้มาตรา RG (Radio Grade Scale) ซึ่งสามารถแบ่งสายโคแอกเซียลได้เป็น 2 ประเภท คือ

**2.4.1 สายโคแอกเซียลแบบบาง (Thin Coaxial Cable หรือ Thinnet Cable)** เป็นสายที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.64 cm เนื่องจากสายประเภทนี้มีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถใช้ได้กับการติดตั้งเครือข่ายเกือบทุกประเภท สายประเภทนี้สามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 185 เมตร ก่อนที่สัญญาณจะเริ่มอ่อนกำลังลง บริษัทผู้ผลิตสายโคแอกเซียลได้ลงความเห็นร่วมกันในการแบ่งประเภทของสายโคแอกเซียล ซึ่งสายโคแอกเซียลแบบบางได้ถูกรวมไว้ใน สายประเภท RG-58 ซึ่งสายประเภทนี้จะมีค่าความต้านทาน (Impedance) ที่ 50 โอห์ม

**2.4.2 สายโคแอกเซียลแบบหนา (Thick Coaxial Cable)** เป็นสายโคแอกเซียลที่ค่อนข้างแข็งและขนาดใหญ่กว่าสายโคแอกเซียลแบบบาง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.27 cm สายโคแอกเซียลแบบหนานี้เป็นสายสัญญาณประเภทแรกที่ใช้กับเครือข่ายแบบอินเทอร์เน็ตส่วนแกนกลางที่เป็นสายทองแดงของสายโคแอกเซียลแบบหนานี้จะมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นสายโคแอกเซียลแบบหนานี้จึงสามารถนำสัญญาณได้ไกลกว่าแบบบาง โดยสามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 500 เมตร ด้วยความสามารถนี้สายโคแอกเซียลแบบหนาจึงนิยมใช้ ในการเชื่อมต่อเส้นทางหลักของข้อมูล หรือแบ็คโบน (Backbone) ของเครือข่ายสมัยแรก ๆ

### ตัวอย่างประเภทสายโคแอกเซียล

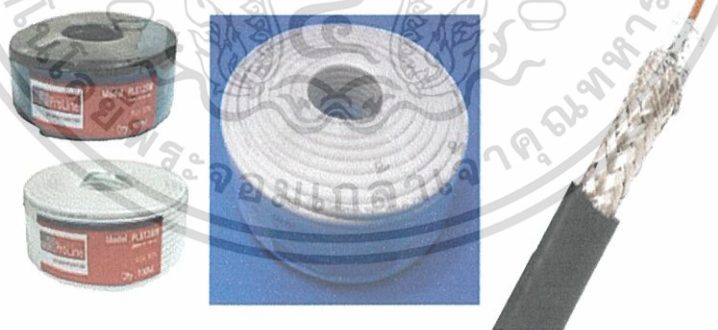
#### RG CABLE



รูปที่ 2.16 รูปสาย RG ประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

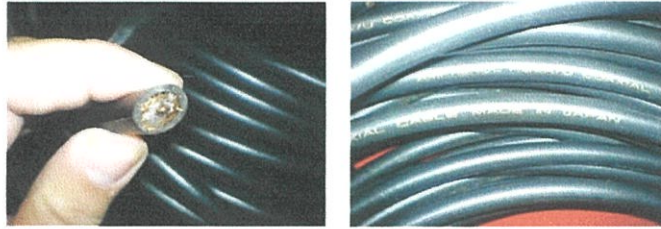
สาย RG-6 สายชนิดนี้เป็นสายนำสัญญาณภาพ ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานในระบบนำสัญญาณภาพแบบต่างๆ ทั้ง TV เคเบิล ดาวเทียม หรือ ระบบ Audio/Video ส่วนใหญ่ก็นิยมนำสายชนิดนี้มาใช้งาน และสายชนิดนี้ยังนิยมนำมาใช้งานกับระบบกล้องวงจรปิด CCTV มากที่สุดอีกด้วย ซึ่งสาย RG-6 ในปัจจุบันมีอยู่หลายเกรดด้วยกัน แต่สาย RG6 ที่ควรนำมาใช้งานในระบบกล้องวงจรปิดนั้นควรจะเป็นสาย RG-6 ที่มีคุณภาพสูง มี Shield ป้องกันสัญญาณสูง 95% เพราะหากนำสายที่มีคุณภาพต่ำ มี Shield แค่ 60%-80% มาใช้งานอาจจะทำให้ได้คุณภาพของภาพจากกล้องวงจรปิดออกมาไม่ดี และเมื่อใช้งานไปนานๆแล้วอาจจะทำให้เกิดปัญหาด้านสายสัญญาณภาพในภายหลังได้ สาย RG-6 จะมีทั้งแบบที่เป็น Shield ทองแดง และแบบที่เป็น Shield อลูมิเนียม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานที่และตำแหน่งกล้องวงจรปิดที่จะใช้ในการติดตั้งว่าอยู่ ณ จุดใด หากเป็นจุดที่เดินสายในระยะไกลประมาณ 400-700 เมตรขึ้นไปก็ควรจะใช้สายที่เป็น Shield ทองแดง แต่ถ้าหากกล้องวงจรปิด ในจุดนั้นเดินสายไกลไม่เกิน 400 เมตร ก็ใช้สายที่เป็น Shield อลูมิเนียมได้ สาย RG-6 จะมีทั้งสีแดงและสีขาว ซึ่งสายสีขาวจะนิยมใช้งานภายในอาคาร เพราะสายสีขาวไม่ทนทานต่อแสงแดด สาย RG-6 สีขาวส่วนใหญ่จะเป็นสายเกรดต่ำ ฉนวนหุ้มสายที่เป็นสีขาวนั้นเปื่อย-ขาดได้ง่าย ส่วนสาย RG-6 ที่เป็นสีดำนั้นจะเป็นสายที่มีเกรดสูงกว่าสายสีขาว ทนทานต่อแดดได้ดีไม่เปื่อย-ขาดง่าย ทนต่อความร้อนได้ แต่ก็จะมีราคาแพงกว่าสายสีขาว สายที่นิยมมาใช้ในระบบกล้องวงจรปิดนั้นจะใช้สายสีดำเป็นทั้งภายในและภายนอกอาคาร เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนทานมากกว่าสาย RG-6 สีขาว



รูปที่ 2.17 รูปสาย RG-6

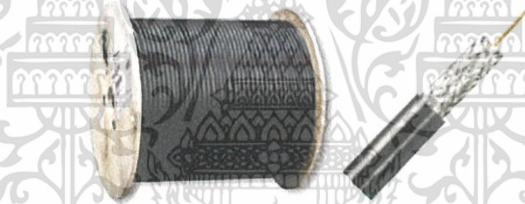
สาย RG-8 ใช้สำหรับการส่งวิทยุ เช่นในวิทยุสมัครเล่นหรือ CB สายชนิดนี้มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับสายอื่น ๆ เนื่องจากมี 50 โอห์มคู่สาย จึงไม่สามารถที่จะใช้สำหรับชนิดของการทำงาน วิทยุโอใด ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปสาย RG-8

สาย RG-11 สายชนิดนี้เป็นสายนำสัญญาณภาพที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถนำสัญญาณได้ไกลถึง 1000 เมตร เพราะตัวสายมีขนาดใหญ่กว่าสาย RG6 และ RG59 อยู่มาก จึงมีแกนกลางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ จึงนำสัญญาณได้ดีเหมาะกับใช้งานที่ต้องการเดินสายกัล้องวงจรปิดระยะไกลๆได้ดี ในกรณีที่ต้องเดินสายไกลเกินกว่า 1000 เมตร ก็จะต้องใช้อุปกรณ์เสริมเข้ามาช่วยเพื่อให้สัญญาณภาพได้ไกลยิ่งขึ้น นั่นก็คือ บูสเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยขยายสัญญาณภาพและนำสัญญาณภาพไปได้ไกลกว่าเดิม



รูปที่ 2.19 รูปสาย RG-11

สาย RG-58 / U สายชนิดนี้เป็นประเภทของคู่สาย มักจะใช้สำหรับระบบการสื่อสาร เช่น วิทยุ CB WLAN เส้าอากาศ ฯลฯ



รูปที่ 2.20 แสดงสาย RG-58 / U

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.21 รูปสาย RG-59

สาย RG-213 [5] สายชนิดนี้เป็นสายสัญญาณที่เหมาะสมกับใช้เป็นเสาอากาศโทรทัศน์ CATV ชุมชน โทรทัศน์ซีซีทีวีวงจรมัด ดีบีเอสโดยตรงดาวเทียมกระจายเสียง และวิทยุสื่อสาร เป็นต้น



รูปที่ 2.22 รูปสาย RG-213

#### 2.4.3 ชนิดของสายโคแอกเซียล แบ่งตามอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสายโคแอกเซียล [6]

สามารถแบ่งประเภทของสายโคแอกเซียลได้ตามคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

##### ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงประเภทของสายโคแอกเซียล

ประเภท	อิมพีแดนซ์	ขนาดแกน	Max attenuation @750MHz	คุณสมบัติทั่วไปและการใช้งาน
RG-6/U	75	1.0 mm	5.65 dB/100 ft	ใช้สำหรับความถี่สูง เช่น เคเบิลทีวี ทีวี ดาวเทียมและเคเบิลโมเด็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงประเภทของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

ประเภท	อิมพีแดนซ์	ขนาดแกน	Max attenuation @750MHz	คุณสมบัติทั่วไปและการใช้งาน
RG-6/UQ	75	-	5.65 dB/100 ft	เป็น RG-6 ที่มีซิลด์ 4 ชั้นเพิ่ม การป้องกันคลื่นรบกวนได้ดีกว่า
RG-7	75	1.30 mm	4.57dB/100 ft	ใช้สำหรับความถี่สูง เช่น เคเบิลทีวี ดาวเทียมและเคเบิลโมเด็ม
RG-8/U	50	2.17 mm	-	วิทยุสมัครเล่นและ Thicknet (10base 5)
RG-8X	50	1.0mm	-	ขนาดสายเล็กกว่า RG-8 ปกติ
RG-9/U	51	-	-	-
RG-11/U	75	1.63 mm	3.65dB/100 ft	สำหรับติดตั้งสายใต้ดิน
RG-58/U	50	0.81 mm	-	สำหรับวิทยุสมัครเล่น Thin Ethernet (10BASE5) และ NIM
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 เคเบิลทีวีและอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง
RG-62/U	92	-	-	สำหรับ ARCNET และสายอากาศวิทยุรถยนต์
RG-62A	93	-	-	สำหรับ NIM Electronics
RG-174/U	50	70 x 0.16 mm	-	สำหรับ Wi-Fi pigtails และ NIM Electronic
RG-178/U	50	7x0.1 (Ag plated Cu clad Steel)	-	สำหรับความถี่สูง
RG-179/U	75	7x0.1 (Ag plated Cu )	-	VGA RGBHV
RG-180B/U	95	0.0120 in7x0.1 (Ag plated Cu clad Steel)	-	VGA RGBHV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงประเภทของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

ประเภท	อิมพีแดนซ์	ขนาดแกน	Max attenuation @750MHz	คุณสมบัติทั่วไปและการใช้งาน
RG-213/U	50	7x0.0296 in Cu	-	สำหรับวิทยุสื่อสาร
RG-214/U	50	7x0.0296 in Cu	-	สำหรับความถี่สูง
RG-218	50	0.195 in Cu	-	-
RG-223/U	50	0.88	-	-
RG-316/U	50	7x0.0067 in	-	-
RG-400/U	50	19x0.20 mm	-	-

สายโคแอกเชียลถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆตามอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ได้ดังนี้

ประเภท 50 โอห์ม สีของเปลือกเป็นสีเทา แบ่งออกเป็น 8 แบบ

ประเภท 75 โอห์ม สีของเปลือกเป็นสีเทา แบ่งออกเป็น 9 แบบ

ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทและสัญลักษณ์ของสายโคแอกเชียลแต่ละประเภท

ประเภท	สัญลักษณ์
50 โอห์ม	0.8D – 2V
	1.5D – 2V
	2.5D – 2V
	3D – 2V
	5D – 2V
	5D – 2W
	8D – 2V
	10D – 2V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทและสัญลักษณ์ของสายโคแอกเชียลแต่ละประเภท (ต่อ)

ประเภท	สัญลักษณ์
75 โอห์ม	1.5C – 2V
	2.5C – 2V
	3C – 2V
	3C – 2VCS
	3C – 2VS
	5C – 2V
	5C – 2W
	7C – 2V
	10C – 2V

หมายเหตุ ความหมายของสัญลักษณ์มีดังต่อไปนี้

1) ตัวเลขจำนวนแรก หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวนำนอกโดยประมาณ เป็นมิลลิเมตร

2) อักษรตัวแรก

D หมายถึง สายโคแอกเชียลประเภท 50 โอห์ม

C หมายถึง สายโคแอกเชียลประเภท 75 โอห์ม

3) ตัวเลขจำนวนที่สอง

2 หมายถึง ฉนวนที่เป็นพอลิเอทิลีน

4) ตัวอักษรตัวที่สอง

V หมายถึง สายโคแอกเชียลที่มีตัวนำนอกชั้นเดียวหุ้มด้วยเปลือกพีวีซี

W หมายถึง สายโคแอกเชียลที่มีตัวนำนอก 2 ชั้นหุ้มด้วยเปลือกพีวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) ตัวอักษรตัวที่สามและตัวอักษรตัวที่สามกับสี่

S หมายถึง สายโคแอกเชียลที่มีตัวนำในหลายเส้นตีเกลียว (เพื่อให้แตกต่างจากสายโคแอกเชียลขนาดเดียวกัน แต่มีตัวนำในเส้นเดียว)

CS หมายถึง สายโคแอกเชียลที่มีตัวนำในเป็นลวดเหล็กกล้าเคลือบทองแดง (เพื่อให้แตกต่างจากสายโคแอกเชียลขนาดเดียวกัน แต่มีตัวนำในเป็นลวดทองแดงอ่อน)

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล

สัญลักษณ์	ตัวนำใน		ฉนวน	
	N/D เส้น/มิลลิเมตร	OD มิลลิเมตร	T มิลลิเมตร	OD มิลลิเมตร
0.8D – 2V	1/0.26	0.26	0.27	0.8
1.5D – 2V	7/0.18	0.54	0.53	1.6
2.5D – 2V	1/0.8	0.8	0.95	2.7
3D – 2V	7/0.32	0.96	1.02	3
5D – 2V	1/1.4	1.4	1.7	4.8
5D – 2W	1/1.4	1.4	1.7	4.8
8D – 2V	7/0.8	2.4	2.7	7.8
10D – 2V	1/2.9	2.9	3.4	9.7
1.5C – 2V	1/0.26	0.26	0.67	1.6
2.5C – 2V	1/0.4	0.4	1	2.4
3C – 2V	1/0.5	0.5	1.3	3.1
3C – 2VCS	1/0.5	0.5	1.3	3.1
3C – 2VS	7/0.18	0.54	1.28	3.1
5C – 2V	1/0.8	0.8	2.05	4.9
5C – 2W	1/0.8	0.8	2.05	4.9
7C – 2V	7/0.4	1.2	3.05	7.3
10C – 2V	7/0.5	1.5	3.95	9.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

สัญลักษณ์	ตัวนำนอก									
	ชั้นลึกลงใน					ชั้นลึกลงนอก				
	D มิลลิ เมตร	จำนวน เส้น ต่อมัด	S มัด	P สูงสุด มิลลิ เมตร	OD มิลลิ เมตร	D มิลลิ เมตร	จำนวน เส้น ต่อมัด	S มัด	P สูงสุด มิลลิ เมตร	OD มิลลิ เมตร
0.8D – 2V	0.1	3	16	16	1.3	-	-	-	-	-
1.5D – 2V	0.1	5	16	16	2.1	-	-	-	-	-
2.5D – 2V	0.12	7	16	24	3.3	-	-	-	-	-
3D – 2V	0.14	5	24	26	3.7	-	-	-	-	-
5D – 2V	0.14	7	24	42	5.5	-	-	-	-	-
5D – 2W	0.14	7	24	42	5.5	0.14	7	24	26	6.2
8D – 2V	0.18	8	24	40	8.7	-	-	-	-	-
10D – 2V	0.2	10	24	60	10.7	-	-	-	-	-
1.5C – 2V	0.2	5	16	16	2.1	-	-	-	-	-
2.5C – 2V	0.12	6	16	20	3	-	-	-	-	-
3C – 2V	0.14	5	24	26	3.8	-	-	-	-	-
3C – 2VCS	0.14	5	24	26	3.8	-	-	-	-	-
3C – 2VS	0.14	5	24	26	3.8	-	-	-	-	-
5C – 2V	0.14	7	24	42	5.6	-	-	-	-	-
5C – 2W	0.14	7	24	42	5.6	0.14	7	24	26	6.3
7C – 2V	0.18	8	24	45	8.2	-	-	-	-	-
10C – 2V	0.2	10	24	60	10.4	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

สัญลักษณ์	เปลือก		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของสายโคแอกเชียล (มิลลิเมตร)
	T (มิลลิเมตร)	OD (มิลลิเมตร)	
0.8D – 2V	0.35	2	2.0 ± 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

สัญลักษณ์	เปลือก		เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของสายโคแอกเชียล (มิลลิเมตร)
	T (มิลลิเมตร)	OD (มิลลิเมตร)	
1.5D – 2V	0.4	2.9	2.9 ± 0.4
2.5D – 2V	0.5	4.3	4.3 ± 0.5
3D – 2V	0.8	5.3	5.3 ± 0.5
5D – 2V	0.9	7.3	7.3 ± 0.5
5D – 2W	0.9	8	8.0 ± 0.5
8D – 2V	1.2	11.1	11.1 ± 0.5
10D – 2V	1.2	13.1	13.1 ± 0.5
1.5C – 2V	0.4	2.9	2.9 ± 0.4
2.5C – 2V	0.5	4	4.0 ± 0.5
3C – 2V	0.8	5.4	5.4 ± 0.5
3C – 2VCS	0.8	5.4	5.4 ± 0.5
3C – 2VS	0.8	5.4	5.4 ± 0.5
5C – 2V	0.9	7.4	7.4 ± 0.5
5C – 2W	1	8.3	8.3 ± 0.5
7C – 2V	1.1	10.4	10.4 ± 0.5
10C – 2V	1.3	13	13.0 ± 0.6

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความต้านทาน ของตัวนำ ที่ 20 องศา (เซลเซียส) โอห์มต่อ กิโลเมตร	แรงดัน ไฟฟ้า ทดสอบ (โวลต์)	ความจุไฟฟ้า ที่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (นาโนฟารัดต่อ กิโลเมตร)	การลดทอน ต่อหน่วย ความยาว ที่ 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ (เดซิเบลต่อกิโลเมตร)
0.8D – 2V	968	300	102 ± 8	180
1.5D – 2V	110	300	104 ± 5	85
2.5D – 2V	35.9	1000	100 ± 5	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความต้านทาน ของตัวนำ ที่ 20 องศา (เซลเซียส โอห์มต่อ กิโลเมตร)	แรงดัน ไฟฟ้า ทดสอบ (โวลท์)	ความจุไฟฟ้า ที่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (นาโนฟารัดต่อ กิโลเมตร)	การลดทอน ต่อหน่วย ความยาว ที่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ (เดซิเบลต่อกิโลเมตร)
3D - 2V	33.3	1000	100 ± 4	47
5D - 2V	11.7	1000	100 ± 4	27
5D - 2W	11.7	1000	100 ± 4	27
8D - 2V	5.13	1000	100 ± 4	20
10D - 2V	2.67	1000	100 ± 4	14
1.5C - 2V	968	1000	69 ± 4	96
2.5C - 2V	145	1000	69 ± 4	52
3C - 2V	91.4	1000	67 ± 3	42
3C - 2VCS	256	1000	67 ± 3	42
3C - 2VS	100	1000	67 ± 3	48
5C - 2V	35.9	1000	67 ± 3	27
5C - 2W	35.9	1000	67 ± 3	27
7C - 2V	20.7	1000	67 ± 3	22
10C - 2V	13.1	1000	67 ± 3	18

คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียลนั้น อย่างน้อยควรเป็นไปตาม ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนด
ความต้านทานของตัวนำใน	ต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตาราง แสดงขนาดและรายละเอียดของ สายโคแอกเชียล
ความทนแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกที่วัดได้ระหว่างตัวนำใน กับตัวนำนอกในอากาศ	ต้องทนแรงดันไฟฟ้าทดสอบเป็น เวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

รายการ			เกณฑ์ที่กำหนด
ความต้านทานของฉนวนวัดระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า (หน่วยคือเมกะโอมต่อกิโลเมตร)			1000
ความจุไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอก			ตามที่กำหนดไว้ในตารางแสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ(โอม)	ประเภท50 โอม	$50 \pm 2$	-
	ประเภท75 โอม	$75 \pm 3$	-
อัตราส่วนความเร็ว(ร้อยละ)			$66 \pm 2$
การลดทอนต่อหน่วยความยาว			ต้องไม่เกินร้อยละ115 ของค่าที่กำหนดไว้ในตารางแสดงขนาดและรายละเอียดของสายโคแอกเชียล
แรงดึงของฉนวนและเปลือก	ฉนวน	ความต้านแรงดึง (เมกะพาสคัล) ไม่น้อยกว่า	10
		การยืดตัว(ร้อยละ) ไม่น้อยกว่า	400
	เปลือก	ความต้านแรงดึง (เมกะพาสคัล) ไม่น้อยกว่า	10
		การยืดตัว(ร้อยละ) ไม่น้อยกว่า	200
การอบความร้อน (ร้อยละของค่าก่อนอบความร้อนไม่น้อยกว่า)	ฉนวน	ความต้านแรงดึง	10
		การยืดตัว	400
	เปลือก	ความต้านแรง	10
		การยืดตัว	200
แทนเจนต์ของการสูญเสียไดอิเล็กทริกไม่เกิน			$6 \times 10^{-4}$
ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก			2.2 -2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของสายโคแอกเชียล (ต่อ)

รายการ	เกณฑ์ที่กำหนด
การหดตัวเนื่องจากความร้อน(ร้อยละ)	$\pm 10$
การย้ายที่ของตัวเสริมสภาพพลาสติก(Migration of Plasticizer)	$0.2 \times 10^{-4}$

### หมายเหตุ

- 1) เฉพาะสายโคแอกเชียลที่มีสัญลักษณ์ 0.8D - 2V อิมพีแดนซ์คุณลักษณะต้องมีค่า  $50 \pm 4$  โอห์ม
- 2) เฉพาะสายโคแอกเชียลที่มีสัญลักษณ์ 0.8D - 2V การลดทอนต่อหน่วยความยาวต้องไม่เกิน ร้อยละ 125 ของค่าที่กำหนด

## 2.5 สัญญาณรบกวน (Noise) [7]

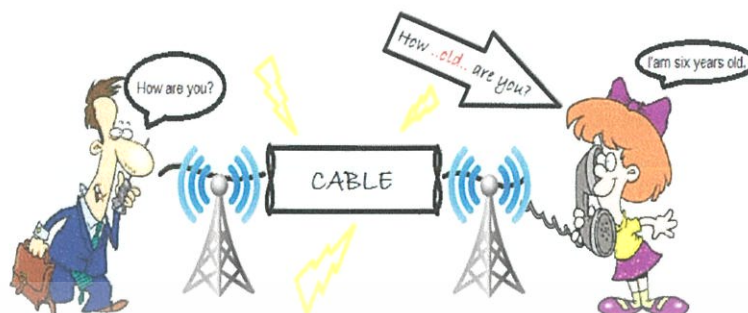
สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สิ่งที่ทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพลดน้อยลง ไม่ต้องการพลังงาน และแม่เหล็กไฟฟ้า จะพบได้ทั้งในระบบ Analog และ Digital โดยอาจเป็นตัวกลาง หรือสิ่งที่ยุบรบกวนการติดต่อสื่อสารก็ได้ ทำให้สัญญาณถูกลดทอน การติดต่อสื่อสารเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เช่น การสะดุด ชะงัก เป็นต้น หรือบางครั้งอาจถึงกับทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เลย

ในทำการการติดต่อสื่อสารนั้น เราจะถือว่าการติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อทั้ง ผู้ส่ง (Sender) และผู้รับ (Receiver) มีความเข้าใจในข้อมูลตรงกัน หรือมีรูปแบบข้อมูลข่าวสารที่เหมือนกัน ซึ่งหมายความว่าข้อมูลข่าวสาร (Message) ที่ผู้ส่งได้ทำการส่งไปนั้นจะต้องเป็นที่เข้าใจเป็นอย่างดีแก่ผู้รับ แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วการติดต่อสื่อสารของมนุษย์จะต้องประสบกับปัญหาและอุปสรรคหลายประการ ซึ่งจะทำให้การติดต่อสื่อสารมีประสิทธิภาพลดน้อยลง ส่งผลให้การสื่อสารยังไม่ดีเท่าที่ควร เราเรียกตัวการที่ทำให้การสื่อสารไม่มีประสิทธิภาพว่า “สัญญาณรบกวน” (Noise) ซึ่งเราควรหาทางป้องกัน และแก้ไขให้การสื่อสารของเรามีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้เพื่อให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

ในวงจรสายแข็ง เช่น โทรศัพท์อินเทอร์เน็ตแบบใช้สาย สัญญาณรบกวนภายนอก (External noise) เป็นผลจากเครื่องใช้ในตำแหน่งใกล้เคียง จากทรานส์ฟอร์มเมอร์ จากบรรยากาศ โดยปกติสัญญาณรบกวนชนิดนี้มีผลเพียงเล็กน้อย หรือไม่มี อย่างไรก็ตามในระยะพายุฟ้าคะนอง หรือในตำแหน่ง ที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าจำนวนมากกำลังใช้งาน สัญญาณรบกวนภายนอกมีผลกับการสื่อสาร ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดต่อทางอินเทอร์เน็ตสัญญาณรบกวนภายนอกจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลช้าลง เพราะระบบต้องปรับความเร็วให้ตรงกับเงื่อนไขบนสายนั้นเอง



รูปที่ 2.23 การสื่อสารผ่านสายโคแอกเซียลแล้วเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจึงทำให้การสื่อสารมีความผิดพลาด

จาก [รูปที่ 2.23] แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัญญาณเสียงเมื่อผ่านเข้าไปยังสายโคแอกเซียลแล้วเกิดสัญญาณรบกวนขึ้น ส่งผลให้การสื่อสารมีความผิดพลาด เช่น จากที่ด้านส่งพูด How are you? แต่ด้านรับกลับฟังเป็น How old are you? เป็นต้น

### 2.5.1 การลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเซียล (Coaxial Cable Signal Loss)

การที่สัญญาณเดินทางผ่านสายโคแอกเซียลเมื่อมีการเดินทางที่ไกลมากยิ่งขึ้นก็จะส่งผลให้มีการลดทอนของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งสามารถดูสัญญาณที่ถูกลดทอนได้ว่าลดทอนไปกี่เดซิเบลต่อ 100 ฟุต จากตารางที่ 2.5 ซึ่งตารางนี้จะถูกนำไปใช้ในบทต่อไป

ตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเซียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเซียลในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต (ต่อ)

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
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
Impedance	50ohm	50ohm	50ohm	50ohm	75ohm	50ohm	75ohm	50ohm	50ohm

## 2.6 สัญญาณทดสอบ (Signal Test)

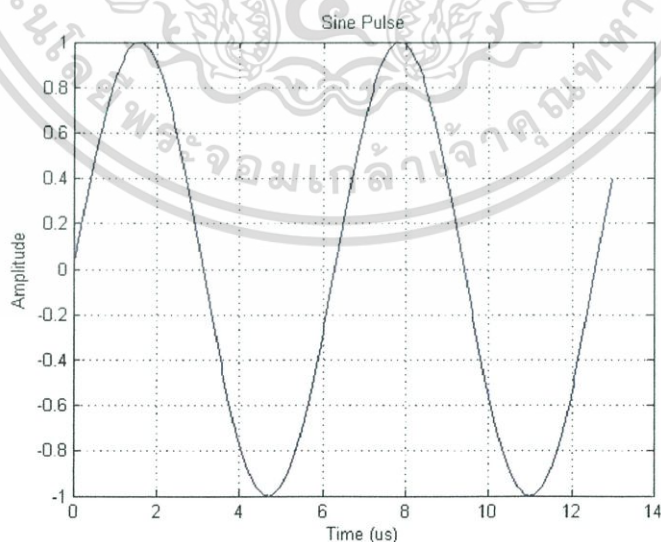
สัญญาณทดสอบ คือ สัญญาณความถี่เดียวกับระดับมาตรฐาน ที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการส่งผ่านพลังงานสูงสุด และสำหรับการวัดค่าความผิดเพี้ยนรวมของวงจร หรือบางส่วนของวงจรไฟฟ้า เช่น

### สัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์

สัญญาณทดสอบ ไซน์กำลังสองพัลส์ จะมีความไวต่อความผิดเพี้ยนสูงกว่าพัลส์รูปสี่เหลี่ยม และเมื่อเทียบกับสัญญาณไซน์พัลส์ จะเห็นได้ว่าสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์มีค่าเป็นบวกทุกค่าดัง [รูปที่ 2.26]

รูปสัญญาณไซน์พัลส์ได้จากสมการ

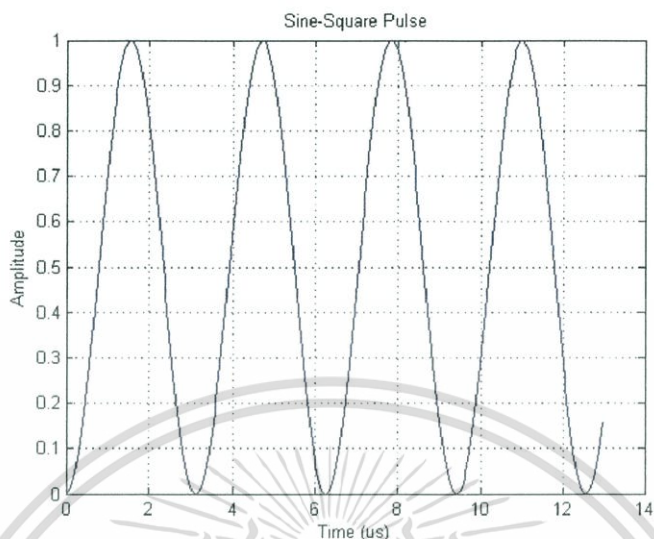
$$y = \sin(\omega t)$$



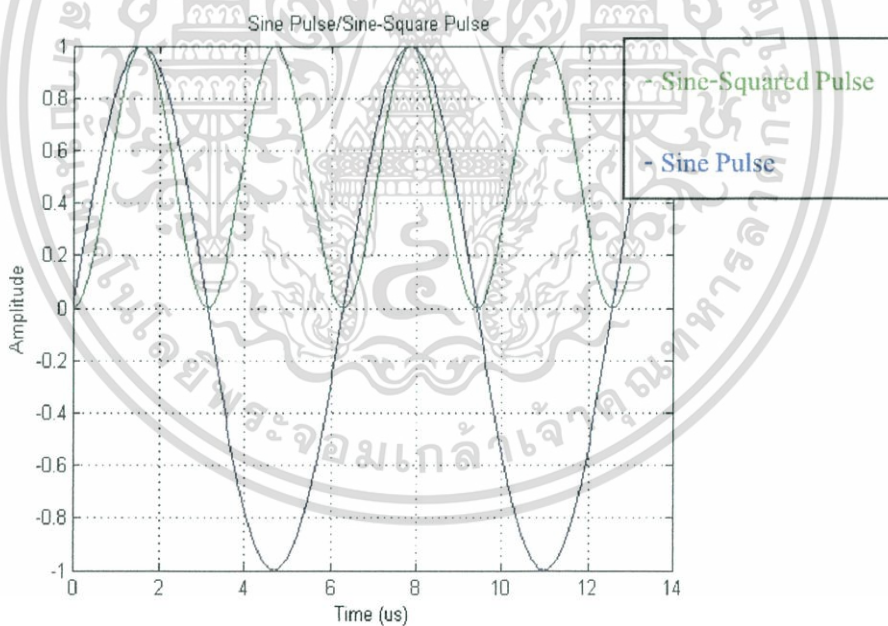
รูปที่ 2.24 รูปแสดงสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์ได้จากสมการ  $y = \sin^2(\omega t)$



รูปที่ 2.25 รูปแสดงสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์



รูปที่ 2.26 รูปแสดงสัญญาณไซน์เทียบกับไซน์กำลังสองพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การคำนวณผลที่ได้จากการป้อนสัญญาณทดสอบในสายโคแอกเซียล

จากการส่งข้อมูลผ่านสายโคแอกเซียล (Coaxial Transmission Line) ได้ให้

$$V_{(x)} = V_{(0)}e^{-Pz} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า P คือค่าคงที่การแพร่ (Propagation) ของสาย และ z คือระยะทางระหว่างเส้นทางของการแพร่ (Distance) สำหรับสายโคแอกเซียล

จาก

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

โดยที่ H และ K คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของสายโคแอกเซียล

จึงได้

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

จาก

$$Px = \frac{HX}{2\pi} + \frac{kX}{\sqrt{\pi}}\sqrt{S}$$

$$V_{(x)} = V_{(0)}e^{-\alpha\sqrt{S}z} \cdot e^{-j\omega z} \quad (2.2)$$

โดยค่าหาค่า  $\sqrt{S}$  เมื่อ  $S = j\omega = \sqrt{j\omega}$

$$\sqrt{j\omega} = \alpha + j\beta \quad (\text{โดยจะทำการคิดแบบจำนวนเชิงซ้อน})$$

$$(\alpha^2 - \beta^2) + j(\omega - 2\alpha\beta) = 0 \quad (2.3)$$

ส่วนของจำนวนจริง

$$\alpha^2 - \beta^2 = 0 \quad (2.4)$$

ส่วนของจำนวนจินตภาพ

$$\omega - 2\alpha\beta = 0 \quad (2.5)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{2\beta} \quad (2.6)$$

แทนสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{\omega}{2\beta}\right)^2 - \beta^2 = 0 \quad (2.7)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \quad (2.8)$$

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการ (2.6) จะได้

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \quad (2.9)$$

จากสมการ  $\sqrt{j\omega} = \alpha + j\beta$  จะได้  $\sqrt{S} = \sqrt{\frac{\omega}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega}{2}}$

คิดในส่วนจำนวนจริงจากสมการที่ (2.2)

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

$$e^{-\alpha\sqrt{S}} = e^{-\alpha\left[\sqrt{\frac{\omega}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega}{2}}\right]}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$e^{-\alpha\sqrt{S}} = e^{\alpha\sqrt{\pi} + j\sqrt{\pi}}$$

$$(2.10)$$

จาก

$$e^{\frac{-kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{S}} = e^{-\alpha\sqrt{S}}$$

จะได้

$$e^{\frac{kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{S}} = e^{(1+j)k\sqrt{\pi}}; \alpha = (1+j)k$$

$$(2.11)$$

ดังนั้น

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

$$(2.12)$$

ผลที่ได้จากการกระตุ้นในสายโคแอกเซียลได้จากการ อินเวอร์สทรานฟอร์มของ  $e^{\frac{-kx}{\sqrt{\pi}}\sqrt{S}}$

จะได้

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

ได้จาก Carslaw and Jaeger

จาก

$$f(t) = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi}{2T}\right) & ; 0 \leq t \leq 2T \\ 0 & ; t < 0, t > 2T \end{cases}$$

จะได้สมการสายโคแอกเซียล

$$V_{0(t)} = \frac{kx}{2\pi} \int_0^t \frac{1}{\tau} \left(\frac{3}{2}\right) e^{\frac{-k^2 x^2}{4\pi}} \sin^2 \frac{\pi(t-\tau)}{2T} d\tau \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

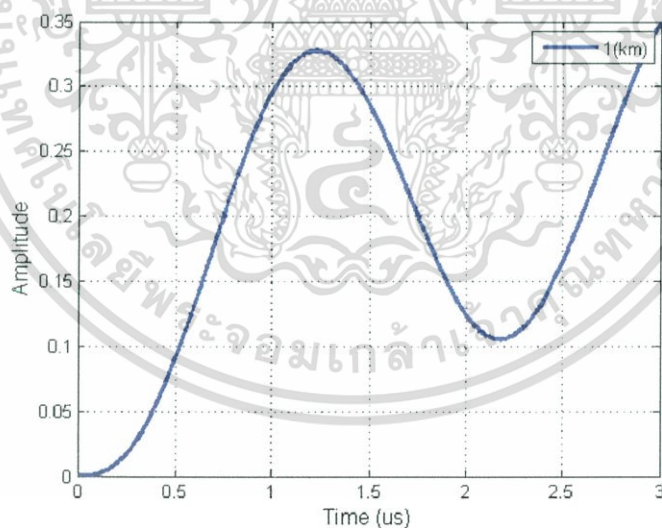
ซึ่งสมการ (2.13) นี้จะนำมาใช้ในการพล็อตหาค่าความสูงพัลส์ต่อความยาวสายโคแอกเชียลในโปรแกรม Matlab หรือเรียกได้ว่าเป็นสมการสายโคแอกเชียลนั่นเอง

### 2.7.1 ผลที่ได้จากการพล็อตกราฟ

จากหัวข้อที่ผ่านมา สมการสายโคแอกเชียล สมการที่ (2.13) จะสามารถนำพล็อตในโปรแกรม Matlab หาค่าความสูงพัลส์ต่อความยาวสายโคแอกเชียลได้ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ถูกลดทอนไปเมื่อส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเชียลที่ไกลมากขึ้น โดยจะยกตัวอย่างเป็นสาย Trunk Coaxial Cable ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.375 นิ้ว ค่า  $K = 4.375 \times 10^{-4}$  โดยค่า  $X$  คือความยาวของสายโคแอกเชียล เช่น สายโคแอกเชียลยาว 1 กิโลเมตร ค่า  $X = 1 \times 10^3$  ( $10^3$  คือหน่วยกิโลเมตร) เป็นต้น โดยใช้สัญญาณทดสอบเป็นสัญญาณไซน์กำลังสองพัลส์

#### ผลที่ได้

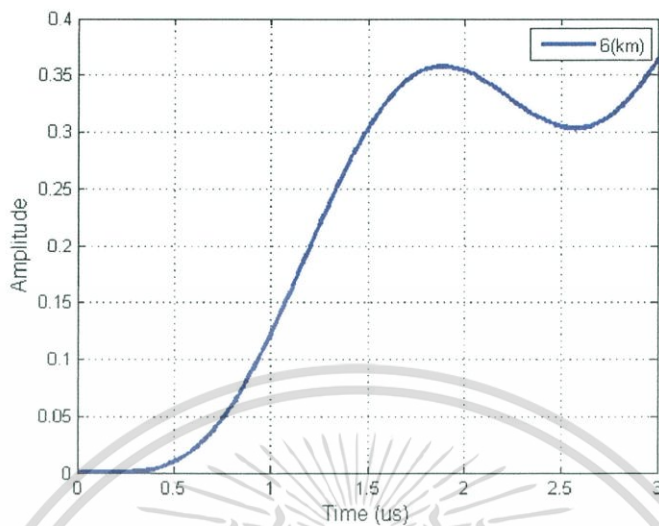
ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 1-5 กิโลเมตร



รูปที่ 2.27 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 1-5 กิโลเมตร

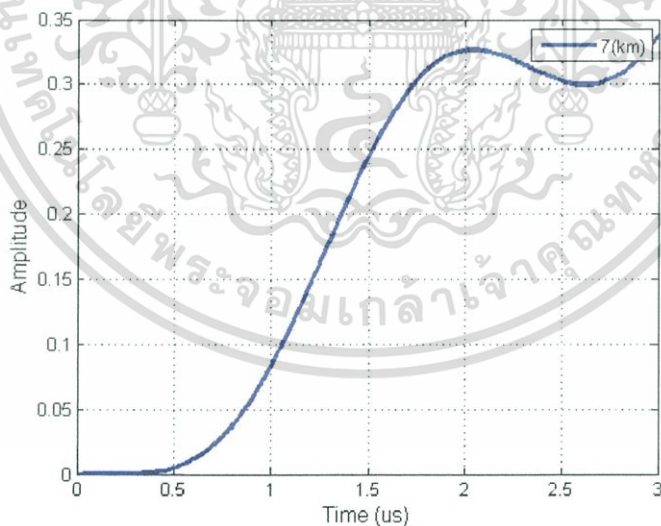
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 6 กิโลเมตร



รูปที่ 2.28 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 6 กิโลเมตร

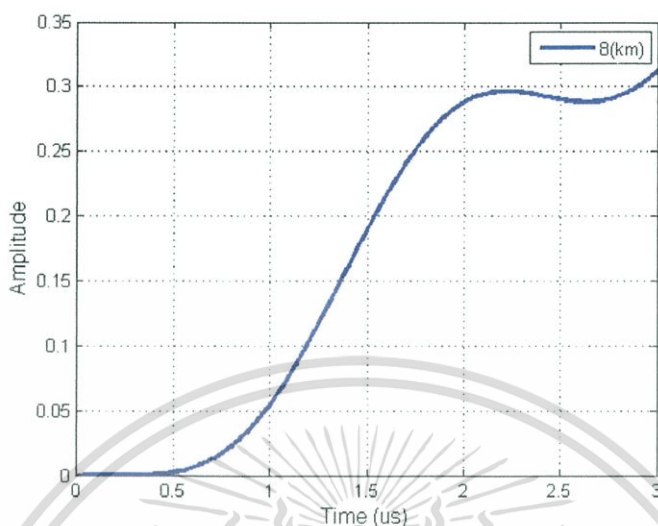
ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 7 กิโลเมตร



รูปที่ 2.29 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 7 กิโลเมตร

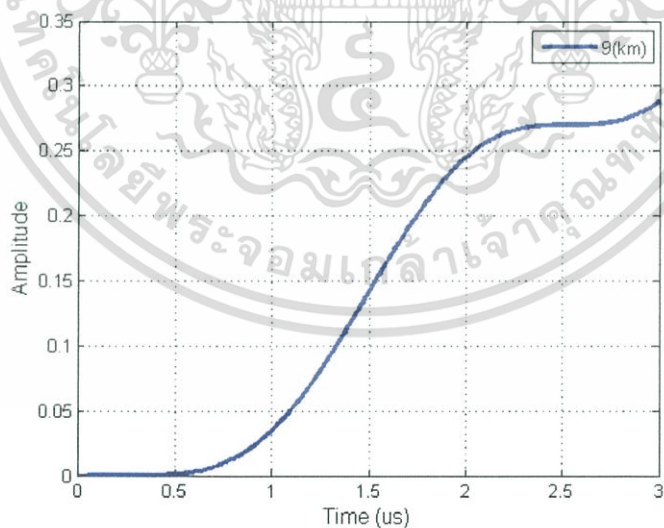
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 8 กิโลเมตร



รูปที่ 2.30 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 8 กิโลเมตร

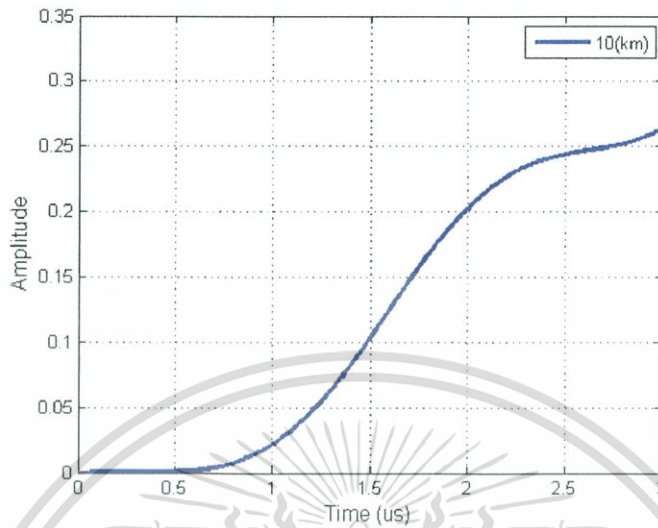
ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 9 กิโลเมตร



รูปที่ 2.31 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 9 กิโลเมตร

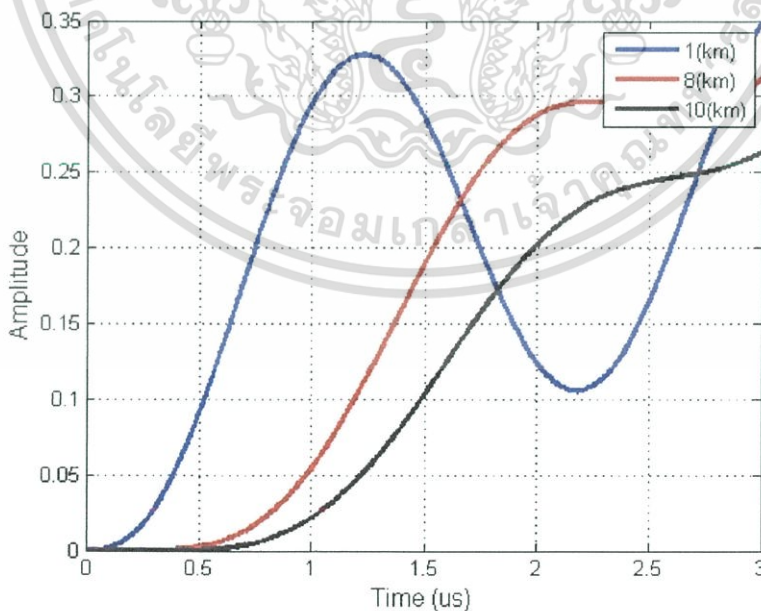
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวสายโคแอกเชียลเคเบิล (Trunk Coaxial Cable) ที่ใช้ทดสอบที่ 10 กิโลเมตร



รูปที่ 2.32 รูปกราฟผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่ 10 กิโลเมตร

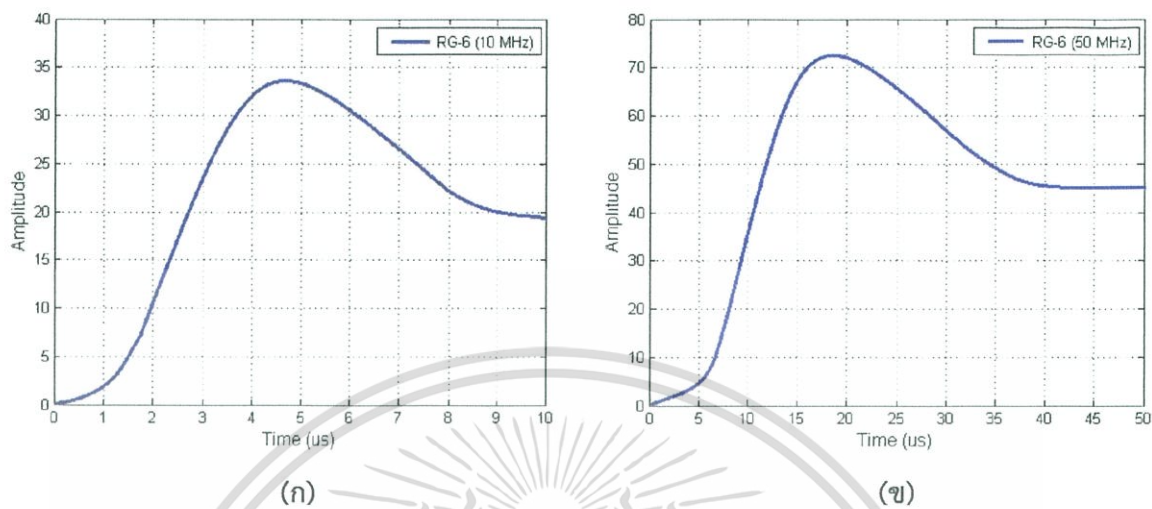
เมื่อกำหนดให้ความยาวของสายโคแอกเชียลมีความยาวที่แตกต่างกันในกราฟเดียวกัน (กำหนดให้  $x = 1$  กิโลเมตร 8 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร) จะได้ผลดัง [รูปที่ 2.33]



รูปที่ 2.33 รูปกราฟที่ได้จากการเปรียบเทียบผลของความยาวสายโคแอกเชียลที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสาย RG-6 ความยาวสาย 1 กิโลเมตร ที่ความถี่ 10MHz และ 50MHz ผ่านสัญญาณทดสอบ  
ไซน์กำลังสองพัลส์จากสมการสายโคแอกเซียลได้ดัง [รูปที่ 2.34]

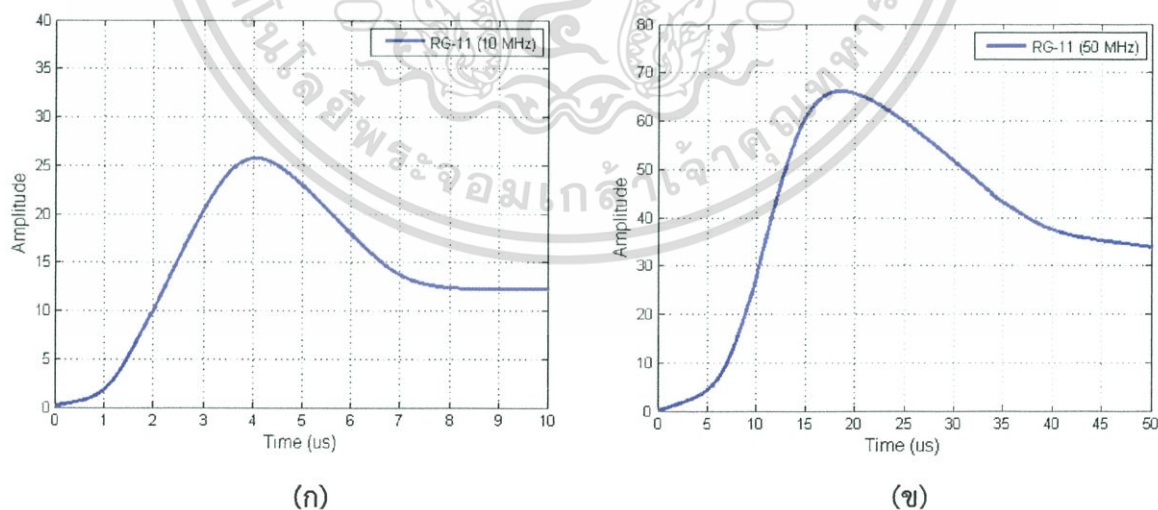


รูปที่ 2.34 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์

(ก) 10MHz ของสาย RG-6

(ข) 50MHz ของสาย RG-6

ตัวอย่างสาย RG-11 ความยาวสาย 1 กิโลเมตร ที่ความถี่ 10MHz และ 50MHz ผ่านสัญญาณทดสอบ  
ไซน์กำลังสองพัลส์จากสมการสายโคแอกเซียลได้ดัง [รูปที่ 2.35]



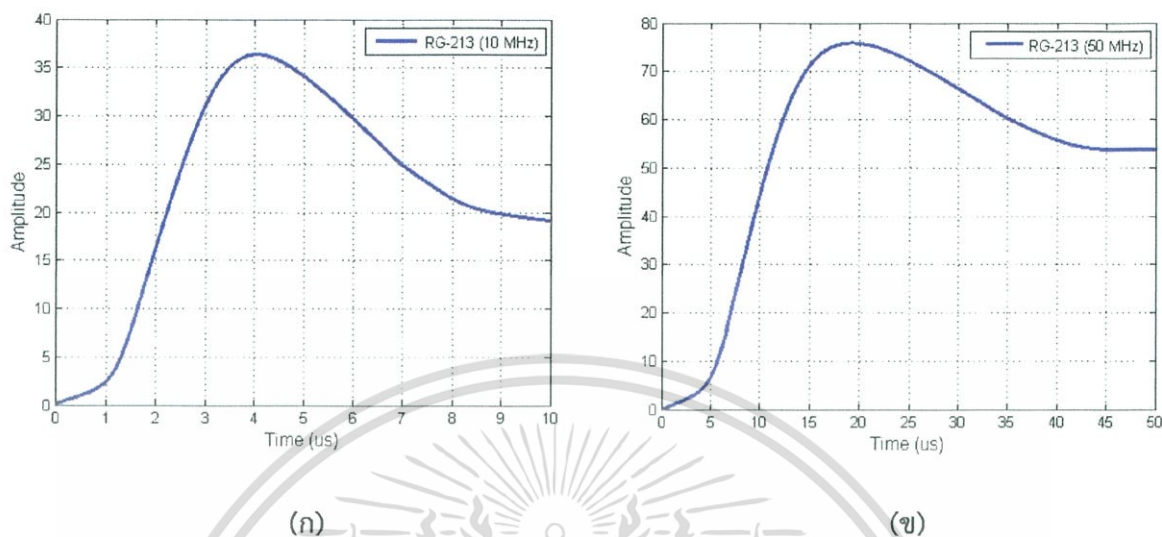
รูปที่ 2.35 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์

(ก) 10MHz ของสาย RG-11

(ข) 50MHz ของสาย RG-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสาย RG-213 ความยาวสาย 1 กิโลเมตร ที่ความถี่ 10MHz และ 50MHz ผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์จากสมการสายโคแอกเซียลได้ดัง [รูปที่ 2.36]



รูปที่ 2.36 รูปการลดทอนของสัญญาณในรูปแบบผ่านสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสองพัลส์

(ก) 10MHz ของสาย RG-213

(ข) 50MHz ของสาย RG-213

โดยผลที่ได้จะพบว่าเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียลที่มีระยะทางการส่งไกลขึ้น จะทำให้จุดยอดของลูกคลื่นนั้นต่ำลงเป็นระดับ และลูกคลื่นอ่อนแอไปเรื่อยๆ แสดงถึงการที่สัญญาณถูกลดทอนมากขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณที่ระยะไกลขึ้น

## 2.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสายส่งสัญญาณ โดยพบว่าเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียลยิ่งระยะทางไกลขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดการลดทอนของสัญญาณมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อได้มีการพิสูจน์สูตร และพล็อตกราฟที่ได้มาเปรียบเทียบกันจะเป็นข้อพิสูจน์ให้เห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียลที่มีความยาวเพิ่มมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้สัญญาณที่ส่งผ่านสายมีความอ่อนกำลังลงรวมถึงเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างกระบวนการส่งจึงทำให้ทางด้านรับได้รับสัญญาณที่อ่อนกว่าสัญญาณที่ถูกส่งมานั่นเอง

### บทที่ 3

## ทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ และขั้นตอนการออกแบบโดยการออกแบบวงจรจะต้องตระหนักถึงอย่างมากคือเฟสเชิงเส้น (Linear Phase) โดยเลือกใช้การคำนวณวิธีโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ เพราะ ซึ่งมีลักษณะเด่นในการออกแบบคือได้วงจรรองความถี่ที่มีความราบเรียบที่สุด (Maximally Flat) ประกอบกับข้อได้เปรียบ อื่น ๆ เช่น สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาด และเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการควบคุม คือ  $n$   $K$  และ  $\varepsilon$  เพื่อที่จะทำให้เป็นเฟสเชิงเส้นมากที่สุด รวมไปถึงแนวคิดที่จะออกแบบวงจรเคเบิลอิควอไลเซอร์โดยอาศัยทฤษฎีของโบท ทำให้วงจรเคเบิลอิควอไลเซอร์นั้นสามารถปรับค่าได้ตามความต้องการทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบ เพื่อให้สัญญาณผิดเพี้ยนน้อยที่สุด

### 3.2 โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials) [8]

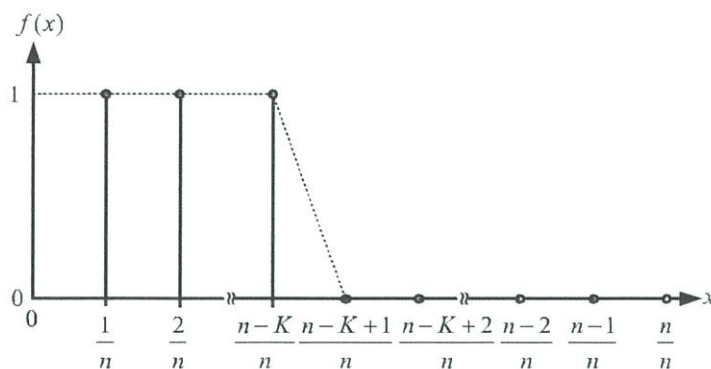
โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์เกิดขึ้นจากทฤษฎีการประมาณที่มีรูปแบบฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ( $f(x)$ ) ในช่วงปิดที่  $[0, 1]$  โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์อันดับที่  $n^{\text{th}}$  ( $n \geq 1$ )

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

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  $f\left(\frac{i}{n}\right)$   $i$  จึงมีค่าไม่เกิน  $n$  แสดงดัง [รูปที่ 3.1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันความถี่ต่ำผ่าน

เมื่อ  $K$  คือจำนวนจุดที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่ทำให้ฟังก์ชันการประมาณมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเขียนฟังก์ชันการประมาณความถี่ต่ำผ่านได้เป็น

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

แทนสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

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

จากสมการที่ (3.3) สามารถจัดรูปสมการใหม่โดยใช้พหุนามเบียร์แบบ Herrmann

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

จัดรูปให้เข้าใจง่ายขึ้นเพื่อการนำไปใช้ในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

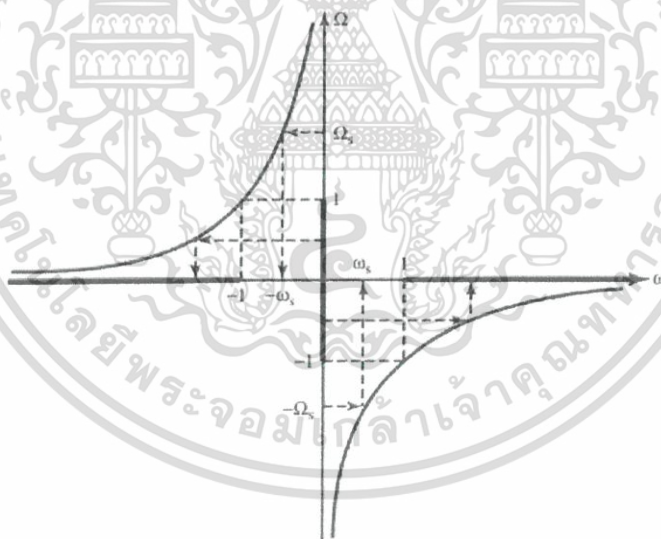
ทำการแปลง (Transformation)  $x$  จากช่วง  $[0, 1]$  ให้เป็น  $\Omega$  ที่มีช่วงหรือขอบเขตอยู่ที่  $[0, \infty]$

$$x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} \quad (3.6)$$

นำสมการที่ (3.6) แทนลงในสมการที่ (3.5) ได้เป็น

$$B_{n,K}(f; \Omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \Omega^{2i}}{(1 + \Omega^2)^n} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.9)  $\Omega$  เป็นแกนความถี่ ( $\Omega$ -axis) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ (Low-pass Prototype Filter) ซึ่งสามารถแปลงเข้าสู่จรรองความถี่สูงผ่าน (Low-pass to High-pass Transformation) แสดงดัง [รูปที่ 3.2]



รูปที่ 3.2 การแปลงแกนความถี่จาก  $\Omega \rightarrow \omega$

จาก [รูปที่ 3.2] แสดงความสัมพันธ์ของการแปลงระหว่างแกนความถี่  $\Omega$  ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบกับแกนความถี่  $\omega$  ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน จะเห็นว่าแถบผ่าน (Pass-band) ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบอยู่ที่  $-1 \leq \Omega \leq 1$  ส่วนแถบผ่านของวงจรรองความถี่สูงผ่านจะอยู่ที่  $1 \leq \omega \leq -1$  ดังนั้นเขียนสมการการแปลงได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Omega = -\frac{1}{\omega} \quad (3.8)$$

นำสมการที่ (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$B_{n,K}(\omega) = \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \quad (3.9)$$

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

$$|N(s)|^2 = N(s) \cdot N(-s) \quad (3.10)$$

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

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 B^2(\omega)} \quad (3.11)$$

โดยที่  $B(\omega)$  คือเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลในสมการที่ (3.9) นำไปแทนลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2}{1 + \varepsilon^2 \left[ \frac{\sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i}}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2}\right)^n} \right]^2} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$|N(j\omega)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1+\omega^2)^{2n}}{(1+\omega^2)^{2n} + \varepsilon^2 \omega^{4n} \left( \sum_{i=0}^{n-K} \binom{n}{i} \left(\frac{1}{\omega}\right)^{2i} \right)^2} \quad (3.13)$$

สมการที่ (3.13) เรียกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดยกกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จากเบิร์ตสไตน์โพลีโนเมียล จากนั้นนำสมการที่ได้มาหาค่าโพล (Poles) และซีโร (Zeros) โดยการแทนค่า  $\omega = s/j$  แล้วแก้สมการเลือกค่าโพลและซีโร เป็นที่ทราบกันดีว่าถ้าต้องการให้ระบบมีความเสถียรภาพ (Stable System) และมีเฟสต่ำสุด (Minimum Phase) จะต้องเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ  $s$  ( $s$ -plane) ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันเศษส่วน (Rational Function)

$$N(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_{m-1}s^{m-1} + a_ms^m}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_{m-1}s^{m-1} + b_ms^m} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $m = 2n$  เป็นอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน

จากสมการที่ (3.13) จะได้เศษเป็น  $(s+1)^{2n}$  เพราะฉะนั้นเลือกค่าซีโร  $s = -1$  นั้นเอง สำหรับค่าโพลสามารถเลือกได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ  $n$   $K$  และ  $\varepsilon$  ของตัวส่วน สรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนหรือเลือกค่าพารามิเตอร์  $n$   $K$  และ  $\varepsilon$  นั้น สามารถปรับคุณลักษณะทางขนาดและเฟสที่ต้องการได้ โดยจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของการปรับพารามิเตอร์ควบคุมทั้งสามในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อก โดยใช้เบิร์ตสไตน์โพลีโนเมียล

การออกแบบวงจรรองความถี่แอนาล็อกความถี่ต่ำผ่านอันดับ 4 โดยใช้เบิร์ตสไตน์โพลีโนเมียล ในเบื้องต้นได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ดังนี้ คือ  $n=2$   $K=1$  และ  $\varepsilon=10$  นำไปแทนลงในสมการที่ (3.13) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนทางขนาดยกกำลังสองของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านคือ

$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^4}{(1+\varepsilon^2)s^8 + (-4-4\varepsilon^2)s^6 + (6+4\varepsilon^2)s^4 - 4s^2 + 1} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้เลือกค่า  $\varepsilon = 10$  จะได้

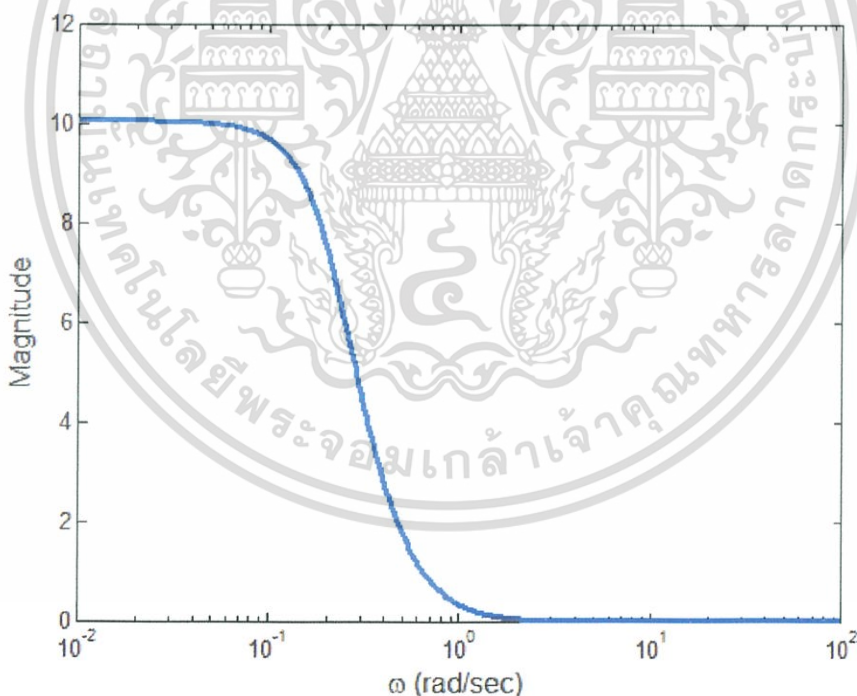
$$|N(s)|^2 = \frac{H_0^2 \cdot (1-s^2)^4}{101s^8 - 404s^6 + 406s^4 - 4s^2 + 1} \quad (3.16)$$

ทำการเลือกค่าโพลและซีโรทางซ้ายของระนาบ  $s$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 4 ดังนี้

$$N(s) = \frac{H_0 \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1532s^3 + 2.9714s^2 + 0.7941s + 0.0995} \quad (3.17)$$

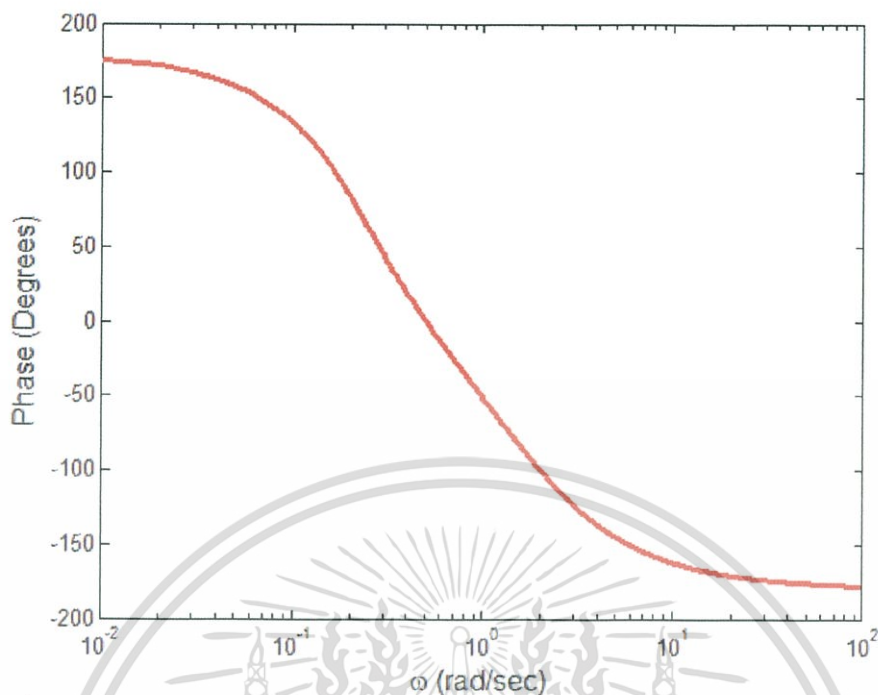
เมื่อ  $H_0$  คือค่าคงที่ที่ใช้กำหนดขนาด

นำสมการที่ (3.17) ทำการพล็อตกราฟผลตอบแทนทางความถี่ โดยสมมติให้  $H_0 = 1$  แสดงดัง [รูปที่ 3.3] [รูปที่ 3.4] และ [รูปที่ 3.5] ตามลำดับ

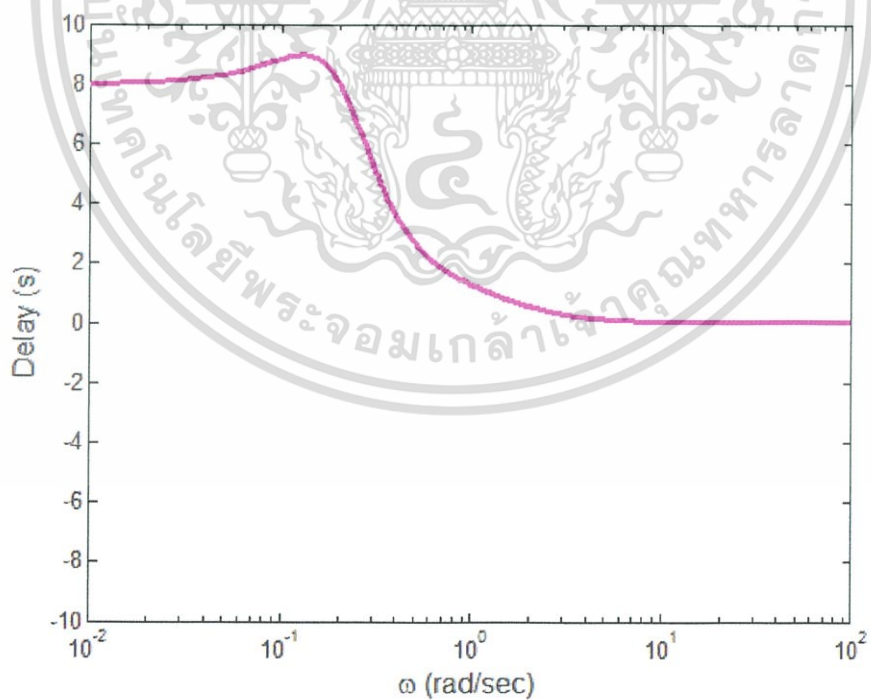


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นสไตน์ อันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตส์ไตร์น อันดับ 4



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตส์ไตร์น อันดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[รูปที่ 3.3] แสดงผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบที่สุดทางขนาด (Maximally Flat Magnitude) ทั้งในย่านความถี่แถบผ่าน (Pass-band) และความถี่แถบหยุด (Stop-band) ดังนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบได้ดี เช่น วงจรชดเชยสัญญาณ (Compensating Circuits) [รูปที่ 3.4] แสดงผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีเฟสเชิงเส้น (Linear Phase) และ [รูปที่ 3.5] แสดงผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ อันดับ 4 จะเห็นว่ากราฟมีความราบเรียบทางเวลาประวิง (Maximally Flat Delay) และยังมีคุณลักษณะใกล้เคียงค่าคงที่ (Constant Delay Characteristics) เป็นผลต่อเนื่องจากการมีเฟสเชิงเส้นนั่นเอง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการใช้งานวงจรกรองความถี่แบบแอนาล็อก เพราะฉะนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) และการประมวลผลภาพ (Image Processing) นอกจากคุณลักษณะเด่นหลัก ๆ ทางขนาด เฟส และเวลาประวิงของวงจรกรองความถี่แบบเบียร์นส์ไตน์แล้ว ยังมีข้อได้เปรียบอีกหลายประการเมื่อเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบอื่น ซึ่งจะกล่าวต่อไป

### 3.3.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $\epsilon$

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ อันดับ 4 โดยกำหนดให้  $n=2$  และ  $K=1$  แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  จะได้ผลแสดงดัง [รูปที่ 3.6] [รูปที่ 3.7] และ [รูปที่ 3.8] ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$  เป็นดังนี้  $\epsilon=0.1$   $\epsilon=1$   $\epsilon=10$  และ  $\epsilon=100$  ส่วนค่าคงที่  $H_0$  จะกำหนดค่าให้มีขนาดสูงสุดเป็น  $7.5$  เท่ากันทุกเงื่อนไข ฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (3.18) สมการที่ (3.19) สมการที่ (3.20) และสมการที่ (3.21) ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{(7.5) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.9966s^3 + 5.9864s^2 + 3.9842s + 0.995} \quad (3.18)$$

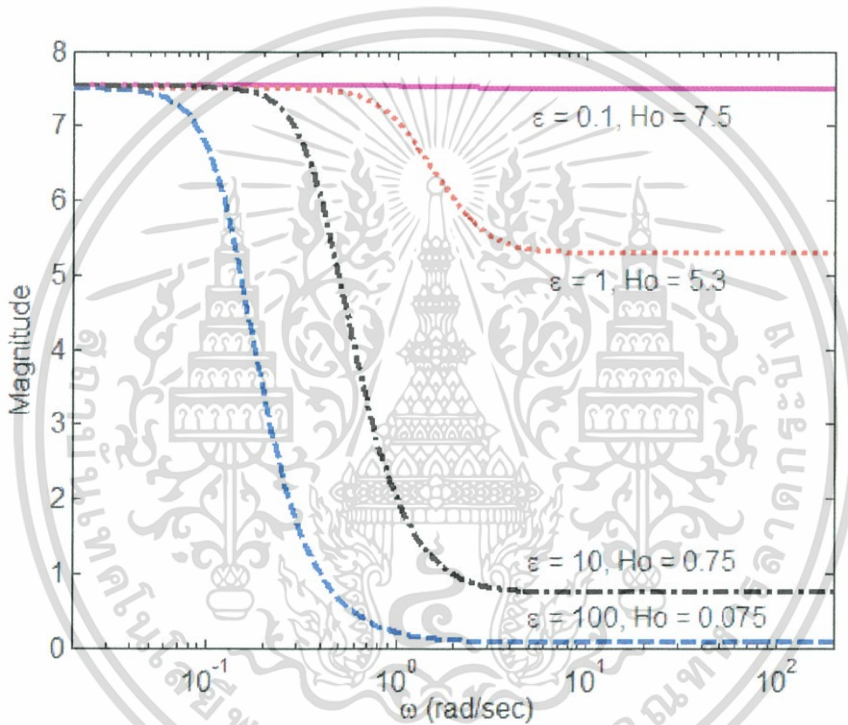
$$N(s) = \frac{(5.3) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.7856s^3 + 5.1654s^2 + 3.0504s + 0.7071} \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s) = \frac{(0.75) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 3.1532s^3 + 2.9714s^2 + 0.7941s + 0.0995} \quad (3.20)$$

$$N(s) = \frac{(0.075) \cdot (1+s)^4}{s^4 + 2.9288s^3 + 2.2889s^2 + 0.2149s + 0.01} \quad (3.21)$$

นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดได้ดัง [รูปที่ 3.6] จากรูปจะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุดทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและแถบหยุด นอกจากนี้การลดทอนในย่านความถี่แถบหยุดยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  นั้นเอง



รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$

[รูปที่ 3.7] แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ตสไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  เป็นดังนี้  $\varepsilon=0.5$   $\varepsilon=1.5$   $\varepsilon=2.5$   $\varepsilon=3.5$   $\varepsilon=10$  และ  $\varepsilon=15$  ส่วนค่าคงที่  $H_0=1$  ฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (3.22) สมการที่ (3.23) สมการที่ (3.24) สมการที่ (3.25) สมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.27) ตามลำดับ

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.9259s^3 + 5.7063s^2 + 3.6617s + 0.8944} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.6607s^3 + 4.7004s^2 + 2.5388s + 0.5547} \quad (3.23)$$

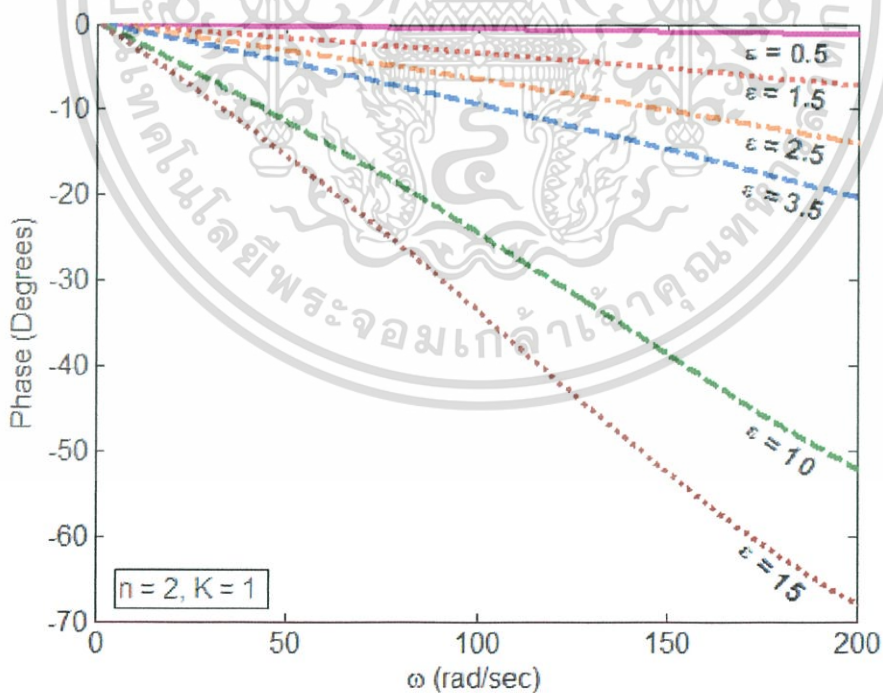
$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.4915s^3 + 4.0952s^2 + 1.8957s + 0.3714} \quad (3.24)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.3891s^3 + 3.7432s^2 + 1.5358s + 0.2747} \quad (3.25)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.1533s^3 + 2.9716s^2 + 0.7943s + 0.0995} \quad (3.26)$$

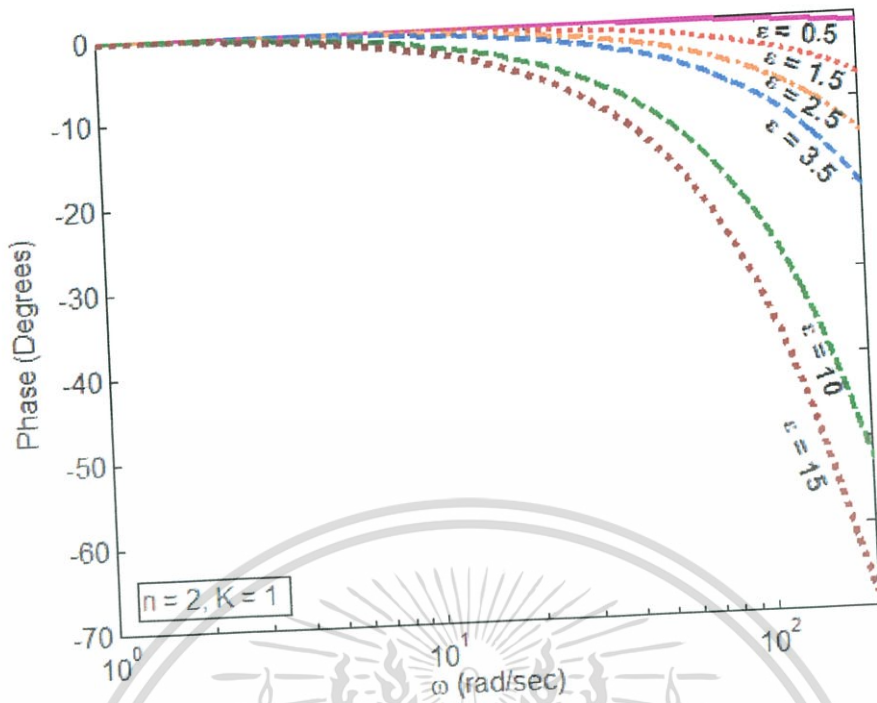
$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.0917s^3 + 2.7793s^2 + 0.6225s + 0.0665} \quad (3.27)$$

นำสมการที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสได้ดัง [รูปที่ 3.7] (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น (Linear Scale) และ [รูปที่ 3.7] (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก (Semi-log Scale) จะเห็นได้ว่ามีเฟสเชิงเส้นทุกเงื่อนไข นอกจากนี้สโลปของเฟสยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$



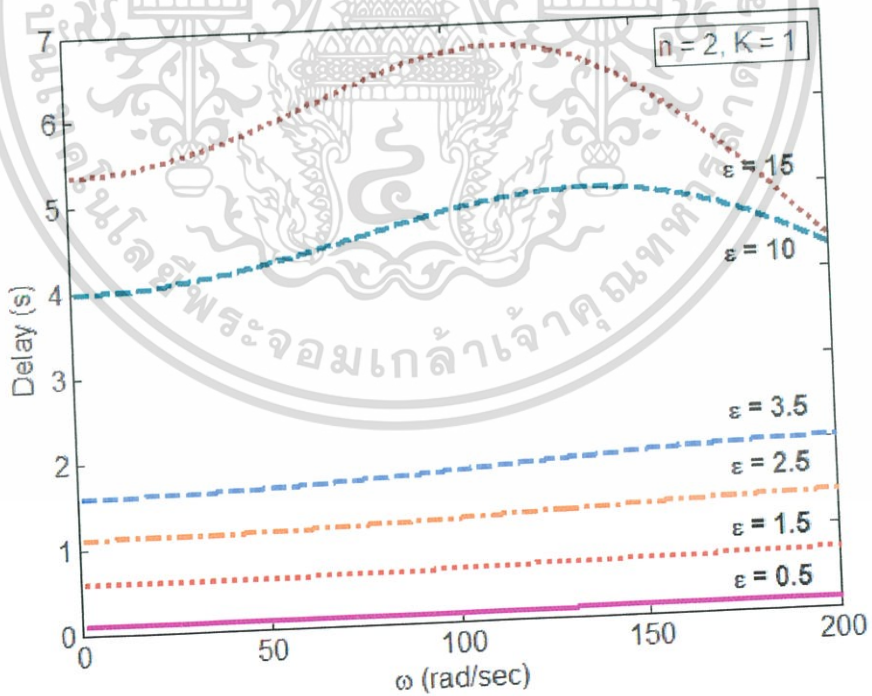
(ก) สเกลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



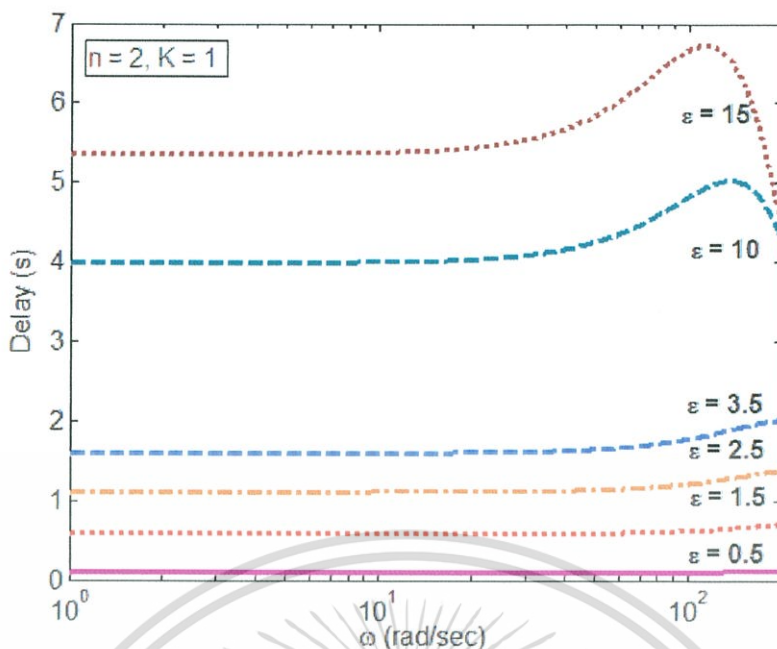
(ข) สเกลกึ่งล็อก

รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\epsilon$



(ค) สเกลเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) สเกลกึ่งล็อก

รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$ 

[รูปที่ 3.8] แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$  เป็นดังนี้  $\varepsilon=0.5$   $\varepsilon=1.5$   $\varepsilon=2.5$   $\varepsilon=3.5$   $\varepsilon=10$  และ  $\varepsilon=15$  ส่วนค่าคงที่  $H_0=1$  โดยฟังก์ชันถ่ายโอนจะเหมือนกับในกรณีพิจารณาเฟสใน [รูปที่ 3.7] นั้นเอง

โดย [รูปที่ 3.8] (ก) แสดงในสเกลเชิงเส้น และ [รูปที่ 3.8] (ข) แสดงในสเกลกึ่งล็อก จะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุทธทางเวลาประวิง และยังมีคุณสมบัติเป็นค่าคงที่ทุกเงื่อนไข

สรุป ข้อดีของวงจรรองความถี่แบบเบียร์นส์ไตน์ คือ สามารถปรับเปลี่ยนการลดทอนในช่วงความถี่แถบหยุด เปลี่ยนสโลปของเฟส และปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นตามต้องการโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $\varepsilon$

### 3.3.2 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ $K$

การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบียร์นส์ไตน์ อันดับ 4 เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้  $K=1$  และ  $K=2$  โดยกำหนดให้  $n=2$  และ  $\varepsilon=5$  เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (3.28) และสมการ (3.29) ตามลำดับ

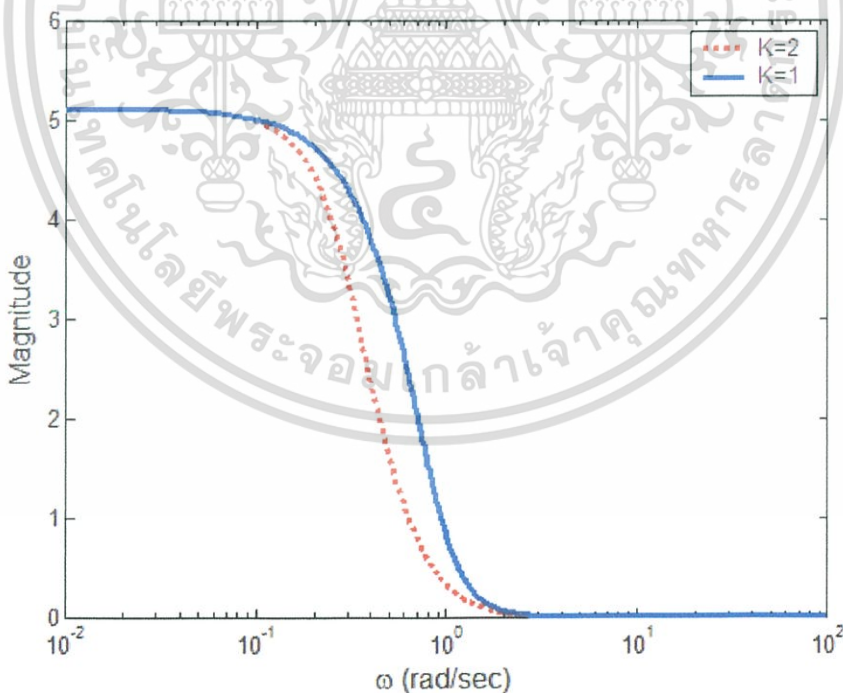
$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 3.2948s^3 + 3.4280s^2 + 1.2241s + 0.1961} \quad (3.28)$$

$$N(s) = \frac{(1+s)^4}{s^4 + 1.9883s^3 + 1.8997s^2 + 0.9481s + 0.1961} \quad (3.29)$$

[รูปที่ 3.9] แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K=1$  และ  $K=2$  จะเห็นว่ามีความราบเรียบที่สุดทางขนาดในย่านความถี่แถบผ่านและแถบหยุด แต่จะแตกต่างกันในช่วงความถี่เปลี่ยน (Transition Band)

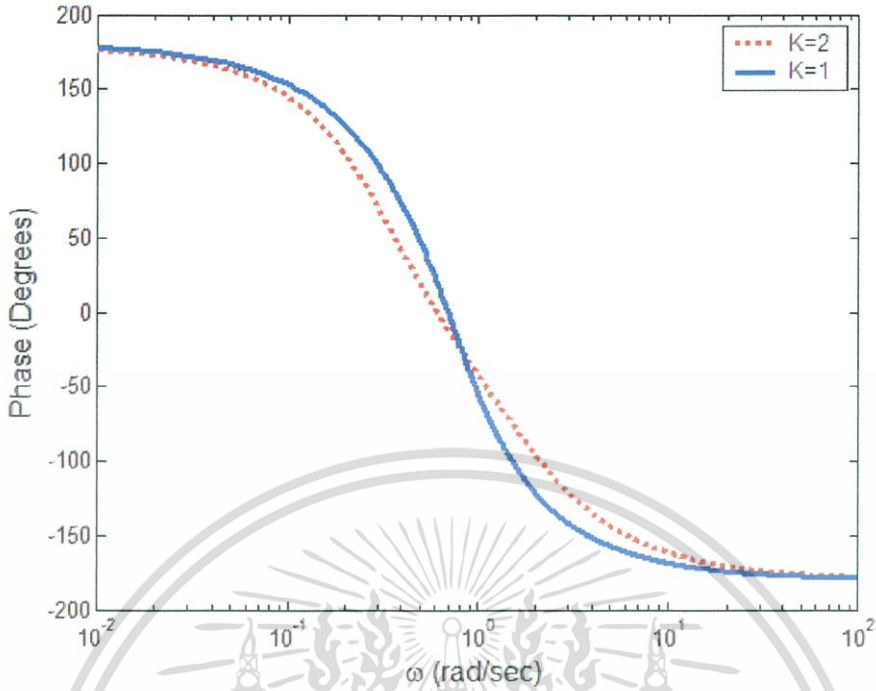
[รูปที่ 3.10] แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟสของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K=1$  และ  $K=2$  จะเห็นว่าเฟสเชิงเส้น แต่จะมีสโลปของเฟสแตกต่างกันเล็กน้อย

[รูปที่ 3.11] แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประจิงของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเบิร์ต สไตน์ เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K=1$  และ  $K=2$  จะเห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$  ทำให้เกิดความราบเรียบทางเวลาประจิงมากขึ้น

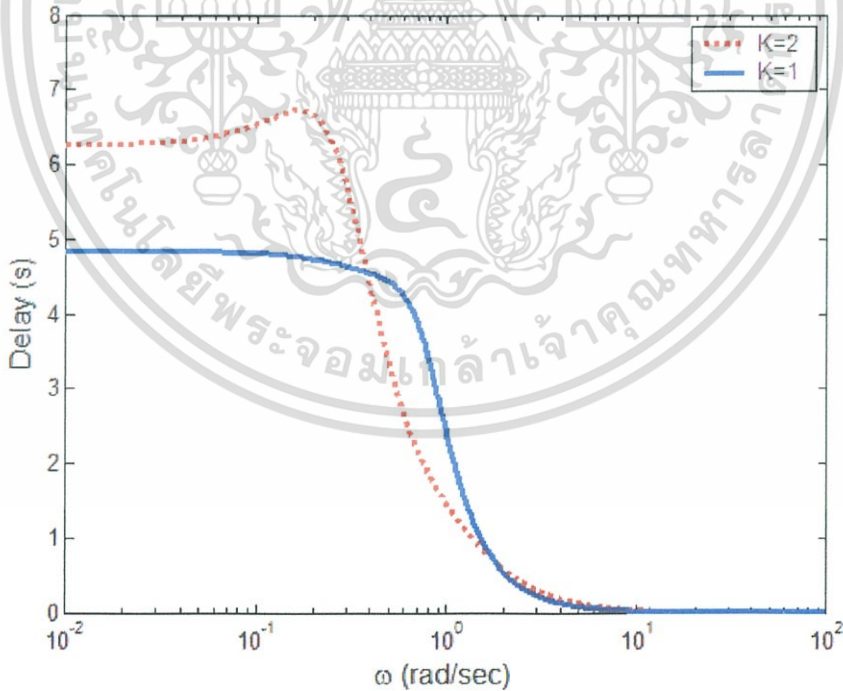


รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางขนาด เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$



รูปที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาประวิง เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป ข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบเบิร์ตส์ไดน์ คือสามารถปรับเปลี่ยนสโลปหรือความชันของขนาด และเฟสได้ตามการใช้งาน และสามารถปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้นได้ โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์  $K$

### 3.4 บทสรุป

จากทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตส์ไดน์ มีข้อได้เปรียบหลายประการ คือ ผลตอบสนองทางขนาดมีความราบเรียบที่สุดทั้งในย่านความถี่แถบผ่านและความถี่แถบหยุด ผลตอบสนองทางเฟสมีความเป็นเชิงเส้นส่งผลให้มีความราบเรียบทางเวลาประวิง และเวลาประวิงเป็นค่าคงที่ การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ควบคุม  $K$  และ  $\varepsilon$  จะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนการลดทอนในช่วงความถี่แถบหยุด ปรับเปลี่ยนสโลป หรือความชันของขนาดและเฟส ปรับความราบเรียบทางเวลาประวิงให้มากขึ้น ซึ่งการออกแบบวงจรเคเบิลอควิลิเซอร์นั้นจะต้องคำนึงถึงเฟสเชิงเส้นเป็นอย่างมาก จึงได้ใช้วิธีโพลีโนเมียลแบบเบิร์ตส์ไดน์ ซึ่งได้คำนวณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนแทนลงในวงจรอควิลิเซอร์แบบโบท โดยอาศัยทฤษฎีของโบทจะได้เป็นวงจรเคเบิลอควิลิเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามความต้องการที่มีทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบ เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และให้สัญญาณนั้นมีความสมดุลมากที่สุดนั่นเอง

## บทที่ 4

# การออกแบบวงจรอิกวอไลเซอร์แบบสโลปเชิงเส้น

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรอิกวอไลเซอร์ของขนาดเชิงเส้น และสายส่งเคเบิล อิกวอไลเซอร์ของขนาดเชิงเส้นนี้จะเน้นไปที่การออกแบบเพื่อแก้ไขสัญญาณผิดเพี้ยนทางโทรทัศน์ โดยเฉพาะ ซึ่งจะมีการออกแบบให้มีการแก้ไขสัญญาณทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบเพื่อปรับให้สัญญาณมีความสมดุลมากที่สุด ส่วนอิกวอไลเซอร์ของสายส่งเคเบิลนั้นจะเน้นไปที่การแก้ไขปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิล ซึ่งการส่งสัญญาณผ่านสายส่งเคเบิลนั้นจะพบว่าการเกิดสัญญาณผิดเพี้ยนแค่ทางด้านลบ (สัญญาณโดนสดทอน) เท่านั้น ดังนั้นอิกวอไลเซอร์แบบนี้จึงมีการออกแบบให้มีการแก้ไขปัญหาคือความผิดเพี้ยนแค่ทางด้านบวกเท่านั้นเพื่อแก้ไขสัญญาณที่โดนสดทอนหายไป และในบทนี้ยังมีหัวข้อการทดสอบเสถียรภาพ เพื่อทดสอบเสถียรภาพของสัญญาณที่ได้รับการแก้ไขไปแล้วด้วย

### 4.2 การออกแบบวงจรอิกวอไลเซอร์ทางขนาดแบบสโลปเชิงเส้น (Linear Gain Slope Equalizer)

ในระบบการส่งโทรทัศน์ สัญญาณโทรทัศน์ต้องทดสอบสัญญาณก่อนที่จะส่งไปยังเครื่องรับที่บ้าน เพราะภาพโทรทัศน์ของเครื่องรับที่บ้านจะต้องมีภาพที่มีคุณภาพที่ดีหรือมีความคล้ายคลึงกับภาพต้นฉบับที่ส่งสัญญาณออกมา ซึ่งระหว่างการส่งสัญญาณจะเกิดลักษณะของการบิดเบือนเชิงเส้นที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากสัญญาณโทรทัศน์ผ่านระบบส่งจะทำให้สีมีการบิดเบือนเกิดขึ้น [9] ปัญหานี้จะแก้ไขได้โดยการใช้สัญญาณทดสอบการสัญญาณที่เปลี่ยนไปจากสัญญาณต้นฉบับ [9] [10] หลายงานวิจัยได้ทำการแก้ไขแต่ผลที่ได้ออกมาแก้ไขความผิดเพี้ยนได้ แต่ยังใช้ระยะเวลาในการทำงานนาน มีความผิดพลาด ยังไม่สมบูรณ์ และมีวงจรที่มีขนาดใหญ่ [11] [12] ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบ Linear Gain Slope Luminance-Chrominance Equalizer ที่สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณเชิงเส้นโดยไม่มีผลกระทบทำให้เกิดความผิดพลาด และความล่าช้า

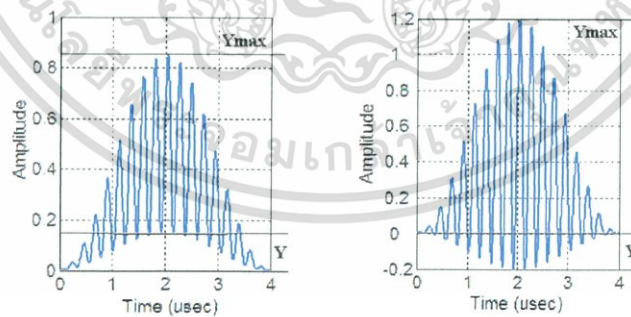
#### 4.2.1 การแก้ไขความผิดเพี้ยนขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี (Linear Gain Slope Luminance-Chrominance Equalizer)

##### 4.2.1.1 ความผิดเพี้ยนของความเข้มแสง และสี (The Luminance-Chrominance Linear Distortion)

มีการผิดเพี้ยนสองประเภทในระบบการส่งโทรทัศน์สี คือแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ซึ่งเราจะมุ่งเน้นไปที่ความผิดเพี้ยนแบบเชิงเส้น นอกจากนี้ความผิดเพี้ยนเหล่านี้จะใช้ในการวัดประสิทธิภาพการทำงานของสายส่งในระบบส่งโทรทัศน์สีได้ ในทางปฏิบัติความผิดเพี้ยนเหล่านี้จะสามารถวัดได้จากการใช้สัญญาณทดสอบไซน์กำลังสอง  $20T$  ซึ่งสัญญาณทดสอบไซน์กำลังสอง  $20T$  มีข้อดี ยกตัวอย่างเช่น ประการที่หนึ่ง สัญญาณทดสอบไซน์กำลังสอง  $20T$  มีความไวต่อความผิดพลาดของสัญญาณ ประการที่สองสามารถสร้างได้ง่าย ประการที่สาม สามารถวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเป็นหน่วยเดซิเบล (Decibel) ได้เลย สัญญาณทดสอบไซน์กำลังสอง  $20T$  [13] นั้นเองสามารถหาได้จากสมการ (4.1) และดูได้จาก [รูปที่ 4.1]

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\pi t}{40T}\right) + \frac{A}{2} \sin^2\left(\frac{\pi t}{40T}\right) \cos \omega_c t & ; |t| \leq 20T \\ 0 & ; |t| > 20T \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยค่า  $A$  คือ ค่าความผิดเพี้ยนของสี  $T_0 = 2 \mu\text{s}$ ,  $T = 0.1 \mu\text{s}$ ,  $\omega_c = 2\pi f_c$ , และ  $f_c = 4.43 \text{ MHz}$  ในระบบ PAL



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 รูปความผิดเพี้ยนของสี

(ก) แสดงให้เห็นความผิดเพี้ยนทางสีต่ำ  $A < 1$  ในขณะที่เส้นหลักจะอยู่ตรงส่วนที่มีลักษณะโค้งลง และจุดสูงสุดของลูกคลื่นจะน้อยกว่า 1 ในทางกลับกัน (ข) แสดงความผิดเพี้ยนทางสีสูง  $A > 1$  ในขณะที่เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักจะอยู่ตรงที่มีลักษณะโค้งขึ้น และจุดสูงสุดของลูกคลื่นจะมากกว่า 1 ค่า A สามารถเปลี่ยนเป็นหน่วยเดซิเบลได้จากสมการที่ (4.2)

$$A(\text{dB}) = 20 \log(A) \quad (4.2)$$

#### 4.2.1.2 การออกแบบวงจรเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และลีโพลีโนเมียลแบบเบร์นสไตน์

โพลีโนเมียลแบบเบร์นสไตน์ เกิดขึ้นจากทฤษฎีการประมาณที่มีรูปแบบฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง ( $f(x)$ ) ในช่วงปิดที่  $[0, 1]$  โพลีโนเมียลแบบเบร์นสไตน์อันดับที่  $n^{\text{th}}$  ( $n \geq 1$ ) [13] [14]

$$B_n(f; x) = \sum_{i=0}^n f\left(\frac{i}{n}\right) \binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (4.3)$$

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

พิจารณาช่วงของ  $x$  ซึ่ง ถูกกำหนดไว้ใน ช่วง  $[0, 1]$  ซึ่งจะต้องเปลี่ยนไปเป็น ช่วง  $[0, \infty]$  สำหรับ  $\Omega$  โดยใช้สมการการแปลงดังนี้

$$x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2} \quad (4.4)$$

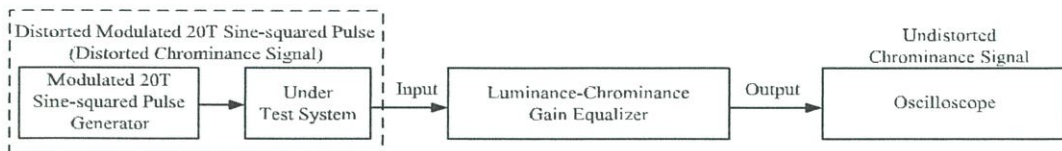
จะเห็นว่าตัวกรองเบร์นสไตน์ ที่มาจากโพลีโนเมียลแบบเบร์นสไตน์ จะได้ขนาด MAXFLAT ใน วงจรแถบความถี่ผ่าน (Pass band) วงจรแถบความถี่หยุด (Stop Band) เฟสเชิงเส้น และค่าเวลาประวิงคงที่ นอกจากนี้ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นมาตรฐานแรก ที่ใช้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของตัวกรองต่าง ๆ ดังนั้นจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพียงอย่างเดียวที่ประสบความสำเร็จในการใช้ตัวกรองแบบเบร์นสไตน์ [12] [13]

##### 4.2.1.2.1 ออกแบบอิกวอลไลเซอร์ทางขนาดแบบสโลปเชิงเส้น (Design Linear Gain Slope Equalizer)

แนวความคิดอิกวอลไลเซอร์ ของความผิดเพี้ยนของสี่เชิงเส้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้ทั้งความผิดเพี้ยนทางสี่ต่ำ และความผิดเพี้ยนทางสี่สูง ดังแสดงใน [รูปที่ 4.2] และ [รูปที่ 4.3] [รูปที่ 4.2] แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของ อิกวอลไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสี่แบบเชิงเส้น และ [รูปที่ 4.3] แสดง

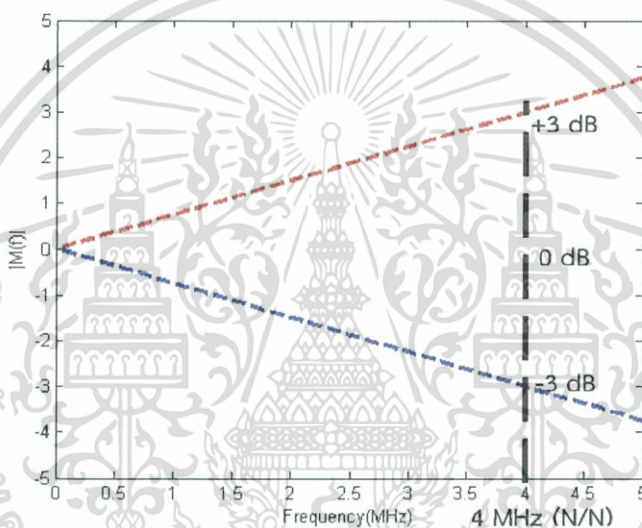
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นถึง ความคิดของ ขนาดสโลปเชิงเส้น สำหรับการออกแบบ อีควอลไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น ที่  $\pm 3$  เดซิเบล



รูปที่ 4.2 แนวคิดของอีควอลไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น

สามารถเขียนเป็นรูปแนวคิดในอุดมคติได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 รูปแนวคิดของอีควอลไลเซอร์แก้ไขความผิดเพี้ยนทางสีแบบเชิงเส้น

$$|M(f)| = 10^{\frac{\alpha_0}{20} \left( \frac{k}{N} \right)} \tag{4.5}$$

โดย  $\alpha_0$  คือแอมพลิจูดที่ต้องการในหน่วยเดซิเบล ที่ตำแหน่ง 4MHz. ในกรณี  $\alpha_0 = +1\text{ dB}$  ที่ตำแหน่ง 4 MHz.

$$|M(f)| = 1.222 \tag{4.6}$$

กรณี  $\alpha_0 = +3\text{ dB}$  โดย  $|M(f)| = 1.4125$  สมการ (4.5) สามารถเขียนใน ลอการิทึมฐาน e (Napierian) หรือ ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic Function) [15] ดังสมการที่ (4.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|M(f)| = e^{0.115\alpha_0 \left(\frac{k}{N}\right)} \quad (4.7)$$

นำสมการที่ (4.7) นำมาทำในแบบพหุนามทวินามแบบเบิร์นสไตน์

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

ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลถูกจำกัด ดังสมการที่ (4.9)

$$e^{\alpha x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{\alpha x}{N}\right)^N \quad (4.9)$$

สมการที่ (4.4) สามารถเป็นค่าประมาณใน โบนินเมียล (Binomial) พหุนามทวินาม (Polynomial) โดย

$$e^{\alpha x} \cong \left\{ x e^{\frac{\alpha}{N}} + (1-x) \right\}^N = \sum_{k=0}^N e^{\alpha \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k} \quad (4.10)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการที่ (4.10) สามารถเขียนได้โดย

$$H(f; x) = \frac{1}{B_n(f; x)} = e^{0.115 \left(\frac{k}{N}\right)} \quad (4.11)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^N e^{-0.115\alpha_0 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.12)$$

ทำให้ง่ายขึ้นโดยกำหนดให้  $\alpha_0 = +3 \text{ dB}$  และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-0.345 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-0.115}x(1-x)^2 + 3e^{-0.23}x^2(1-x) + e^{-0.345}x^3} \quad (4.14)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.14)

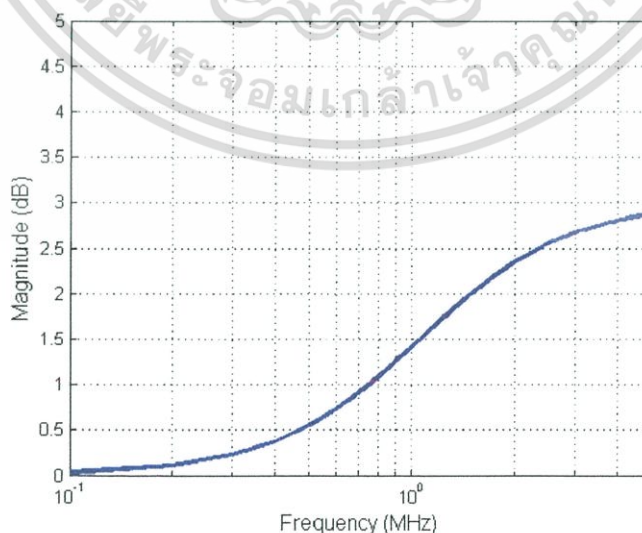
$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.674x(1-x)^2 + 2.3835x^2(1-x) + 0.7082x^3} \quad (4.15)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.15) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 2.674\Omega^2 + 2.3835\Omega^4 + 0.7082\Omega^6} \quad (4.16)$$

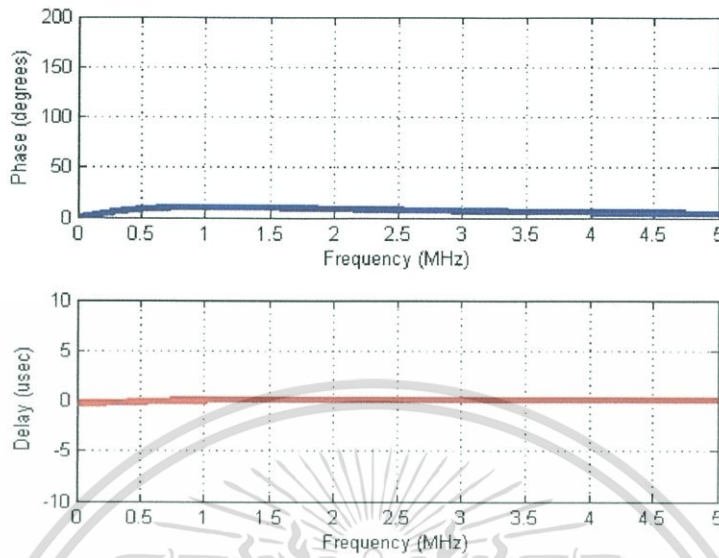
ในทางปฏิบัติ ขนาดระหว่างสัญญาณแสง และสัญญาณสี จะต้องสมดุล เพื่อให้ส่งสัญญาณที่วิ่งไปยังที่รับสัญญาณโดยที่คุณภาพของสัญญาณภาพจะต้องไม่ด้อยลงไป อย่างไม่รู้ก็ตาม หากสัญญาณแสง และสัญญาณสีไม่สมดุลนั้น สัญญาณจะต้องได้รับการปรับปรุงโดยผ่านอิกวอไลเซอร์ที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ 3 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.4]



รูปที่ 4.4 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +3 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาประวิง (Delay) ที่ +3 เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.5]



รูปที่ 4.5 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +3 เดซิเบล

ในกรณีที่กำหนด  $\alpha_0 = -3$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการที่ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.17)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.17)

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.366x(1-x)^2 + 3.776x^2(1-x) + 1.412x^3} \quad (4.18)$$

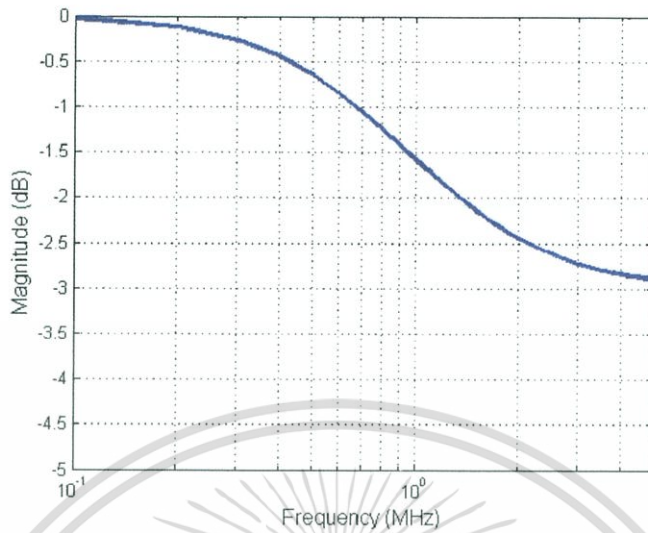
ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.18) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 3.366\Omega^2 + 3.776\Omega^4 + 1.412\Omega^6} \quad (4.19)$$

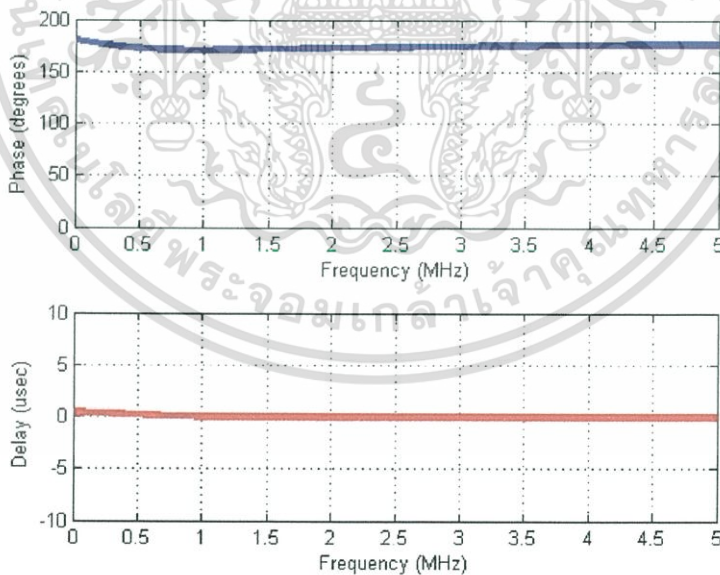
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ -3 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.6]



รูปที่ 4.6 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -3 เดซิเบล

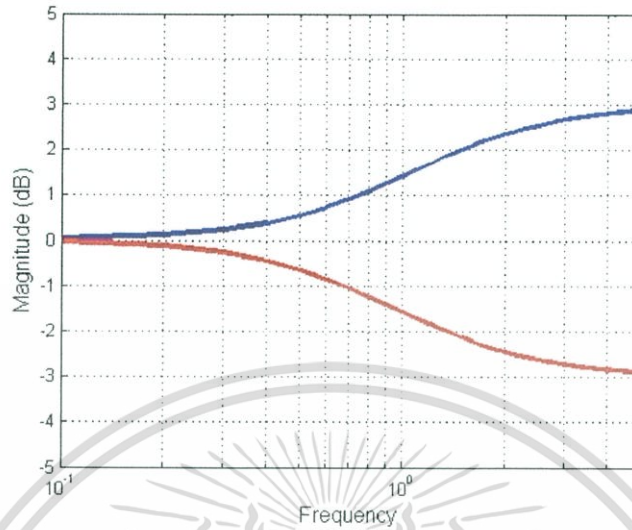
โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาประวิง (Delay) ที่ -3 เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.7]



รูปที่ 4.7 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ -3 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่  $\pm 3$  เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.8]



รูปที่ 4.8 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่  $\pm 3$  เดซิเบล

ในกรณีที่กำหนด  $\alpha_0 = +2$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการที่ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.20)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.20)

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.781x(1-x)^2 + 2.574x^2(1-x) + 0.795x^3} \quad (4.21)$$

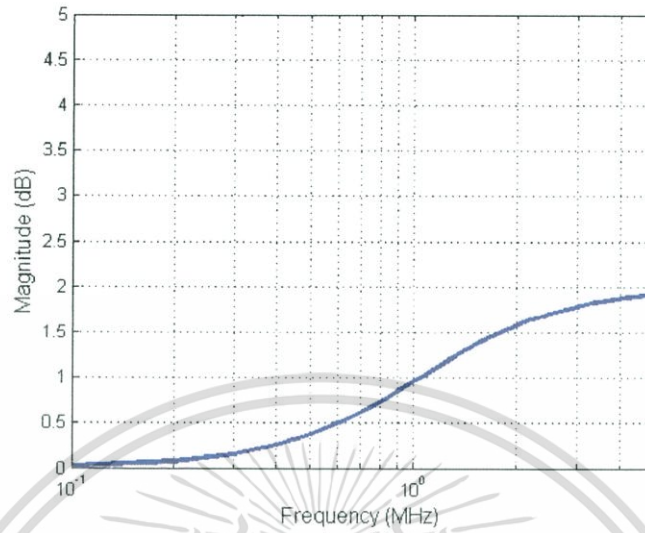
ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.21) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 2.781\Omega^2 + 2.574\Omega^4 + 0.795\Omega^6} \quad (4.22)$$

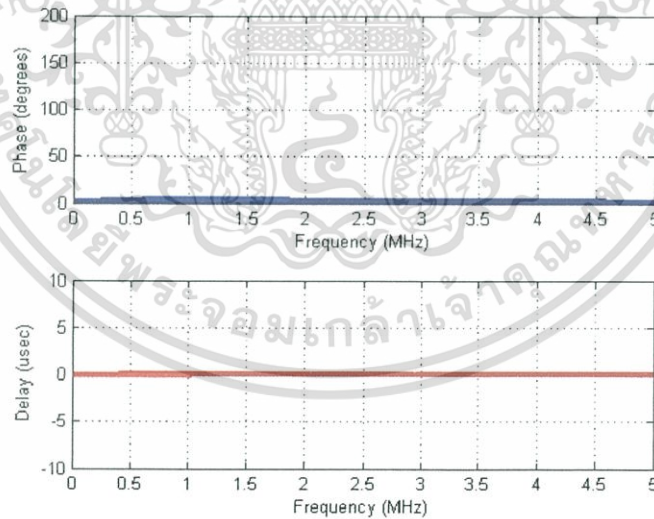
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ +2 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.9]



รูปที่ 4.9 ขนาดของอีควอไลเซอร์ที่ +2 เดซิเบล

โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาประวิง (Delay) ที่ +2 เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.10]



รูปที่ 4.10 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +2 เดซิเบล

ในกรณีที่กำหนด  $\alpha_0 = -2$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการที่ (4.12) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.23)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.23)

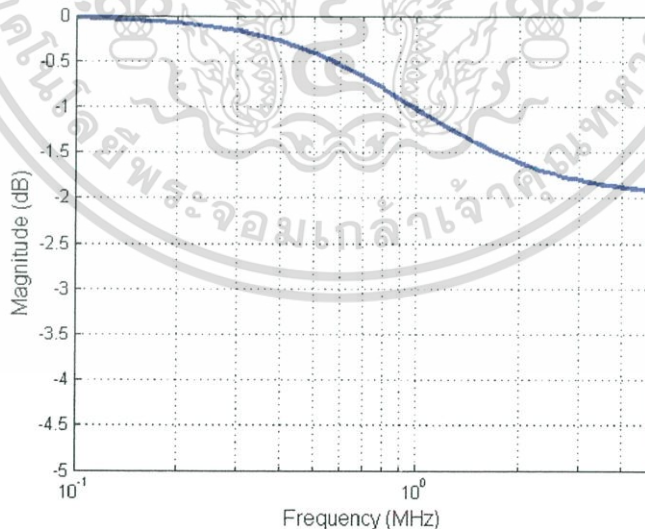
$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.237x(1-x)^2 + 3.495x^2(1-x) + 1.259x^3} \quad (4.24)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.24) สามารถเขียนได้

$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+3.237\Omega^2 + 3.495\Omega^4 + 1.259\Omega^6} \quad (4.25)$$

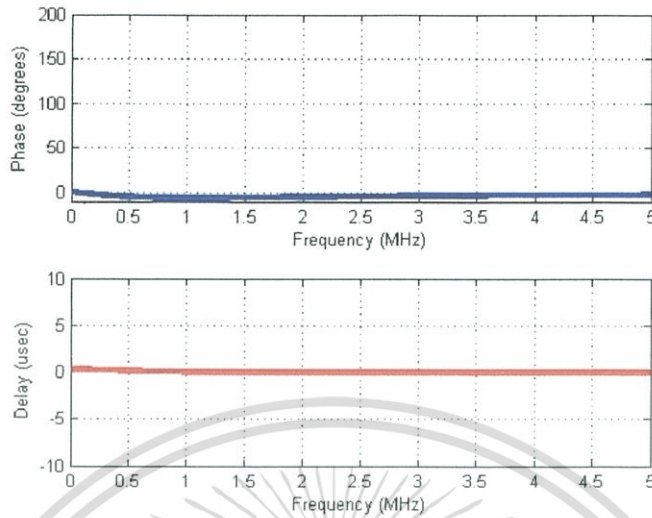
ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ -2 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.11]



รูปที่ 4.11 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ -2 เดซิเบล

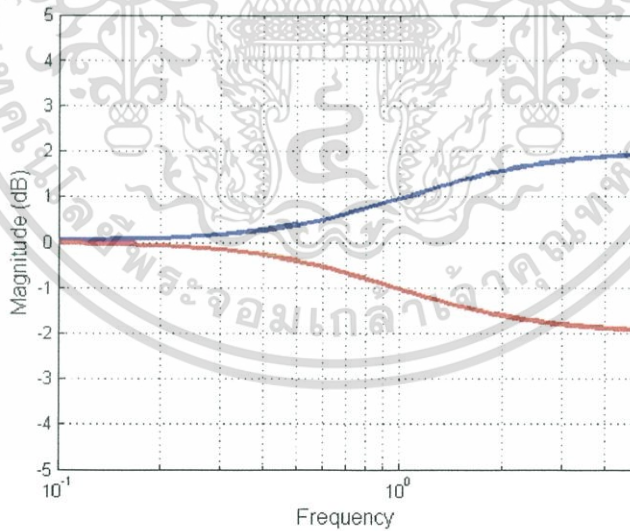
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาประวิง (Delay) ที่  $-2$  เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.12]



รูปที่ 4.12 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่  $-2$  เดซิเบล

ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่  $\pm 2$  เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.13]



รูปที่ 4.13 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่  $\pm 2$  เดซิเบล

ในกรณีที่กำหนด  $\alpha_0 = +1$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการที่ (4.12) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.26)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.26)

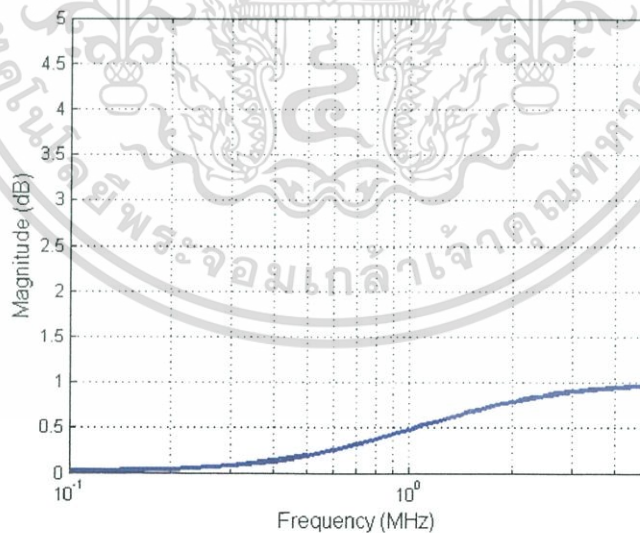
$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 2.889x(1-x)^2 + 2.781x^2(1-x) + 0.891x^3} \quad (4.27)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.27) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+2.889\Omega^2+2.781\Omega^4+0.891\Omega^6} \quad (4.28)$$

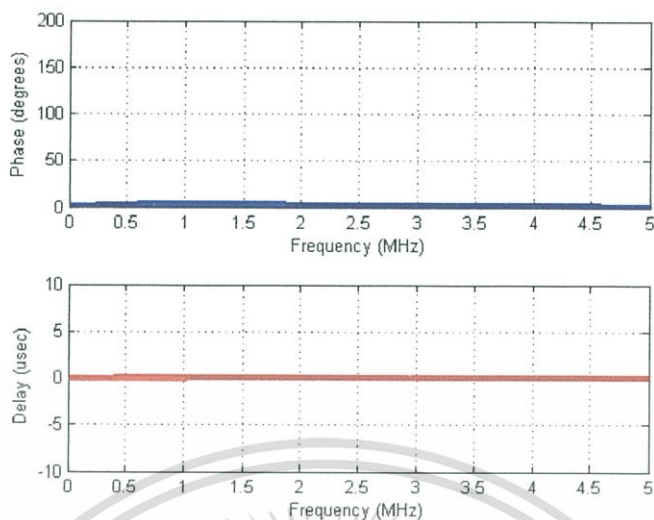
ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ +1 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.14]



รูปที่ 4.14 ขนาดของอิกวอไลเซอร์ที่ +1 เดซิเบล

โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาเวลาประวิง (Delay) ที่ +1 เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่ +1 เดซิเบล

ในกรณีที่กำหนด  $\alpha_0 = -1\text{dB}$  และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการที่ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{+0.345\left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.29)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.29)

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3.117x(1-x)^2 + 3.237x^2(1-x) + 1.122x^3} \quad (4.30)$$

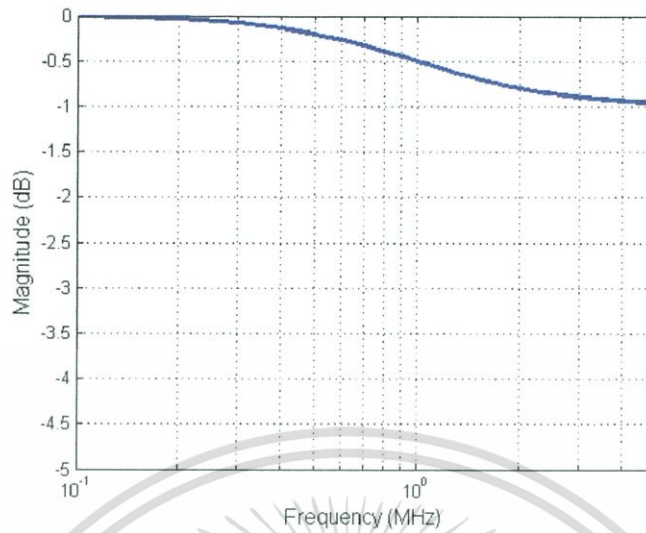
ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.30) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+3.117\Omega^2 + 3.237\Omega^4 + 1.122\Omega^6} \quad (4.31)$$

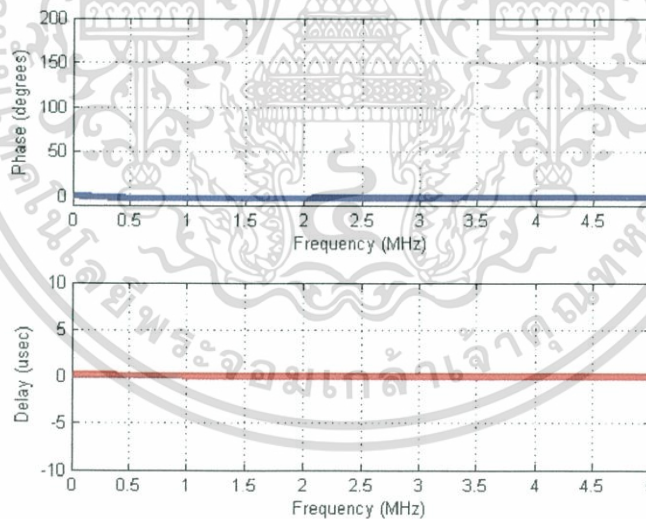
ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่ -1 เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ขนาดของอควอไลเซอร์ที่  $-1$  เดซิเบล

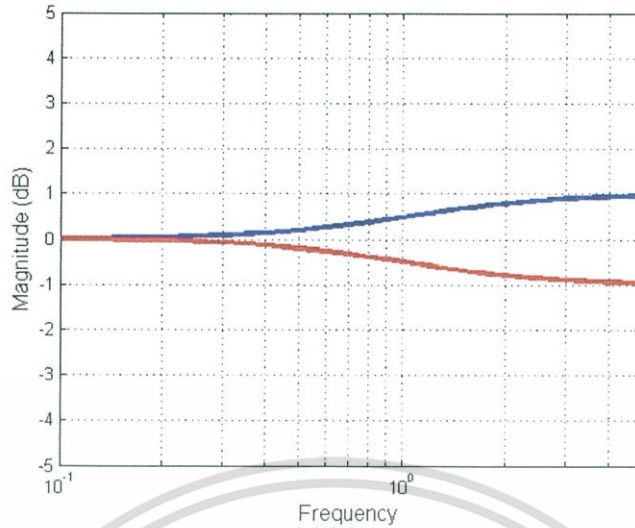
โดยจะมีค่าเฟส (Phase) และค่าเวลาประวิง (Delay) ที่  $-1$  เดซิเบลดัง [รูปที่ 4.17]



รูปที่ 4.17 รูปค่าเฟส และค่าเวลาประวิง ที่  $-1$  เดซิเบล

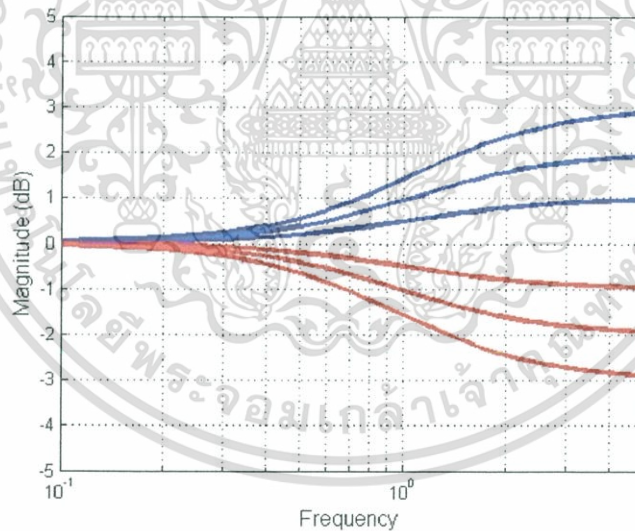
ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่  $\pm 1$  เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ขนาดของอีควอไลเซอร์ที่  $\pm 1$  เดซิเบล

ผลจากการศึกษาลักษณะสำคัญของการปรับขนาดเชิงเส้นจะได้ ที่  $\pm 1, \pm 2, \pm 3$  เดซิเบล ดังแสดงใน [รูปที่ 4.19]



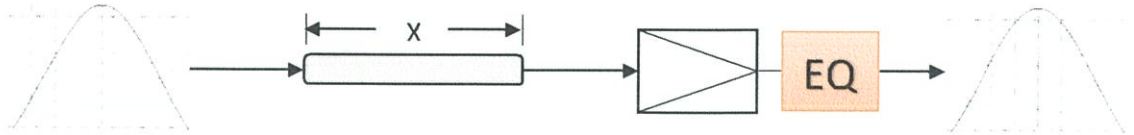
รูปที่ 4.19 ขนาดของอีควอไลเซอร์ที่  $\pm 1 \pm 2 \pm 3$  เดซิเบล

### 4.3 การออกแบบวงจรเคเบิลอีควอไลเซอร์ทางขนาด (Design of Cable Equalizer)

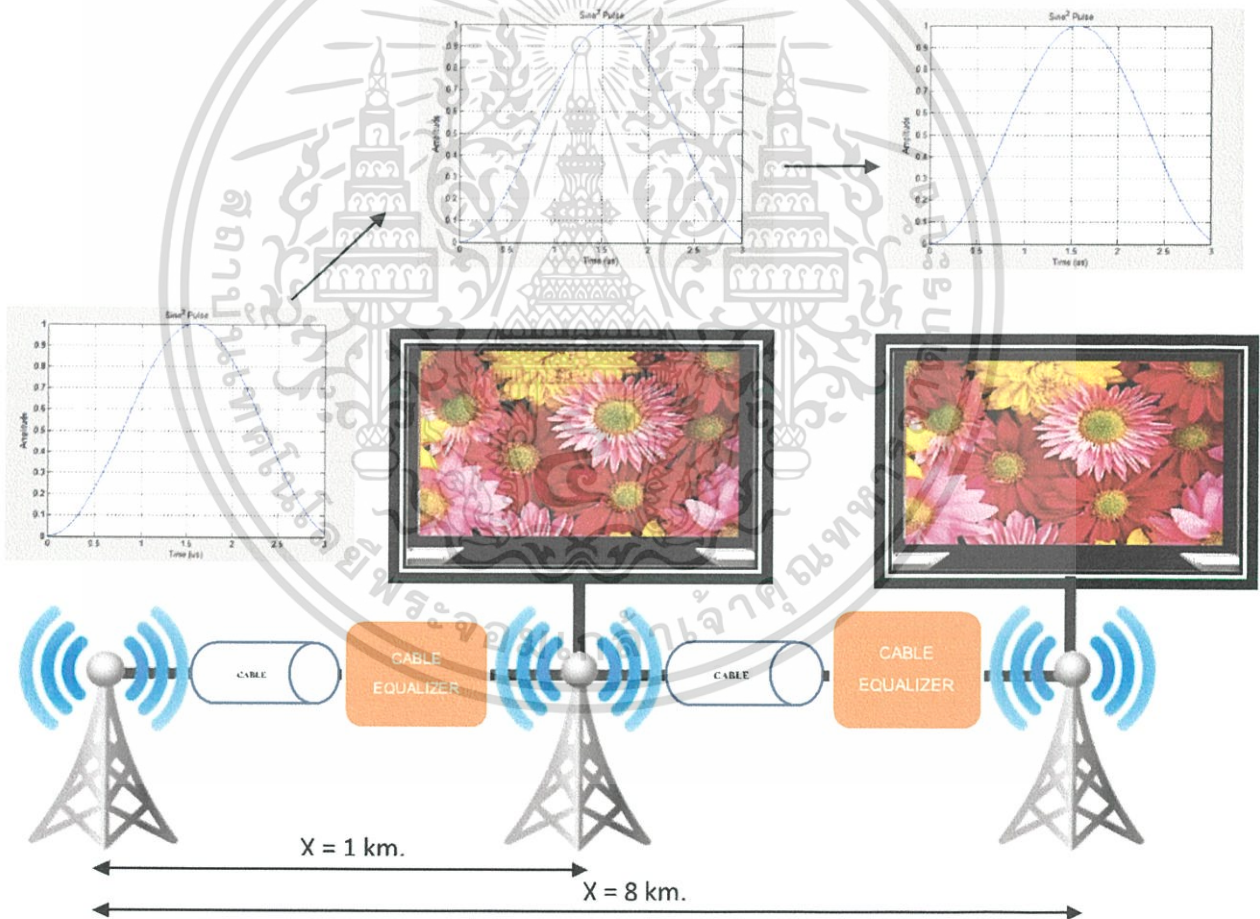
การออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณสามารถดูได้จาก บล็อกไดอะแกรม ดัง [รูปที่ 4.20] ซึ่งจะอาศัยทฤษฎีของโบทในการทำให้เป็นวงจรที่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับค่าได้ทั้งทางลบ และทางบวก เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนต่ำที่สุด และสัญญาณมีความสมดุลมากที่สุด



รูปที่ 4.20 รูปบล็อกไดอะแกรมการทำงานของ การส่งสัญญาณผ่านเคเบิลอควอไลเซอร์ และรูปจำลองระบบการทำงานของ การส่งสัญญาณผ่านเคเบิลอควอไลเซอร์ในระบบโทรทัศนเพื่อให้ เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ดัง [รูปที่ 4.21]



รูปที่ 4.21 รูปสัญญาณภาพที่ถูกส่งผ่านสายโคแอกเซียลที่มีความยาว 1 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร เมื่อมีการใส่ตัววงจรเคเบิลอควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนแล้วจะทำให้ได้ภาพที่คมชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอาศัยทฤษฎีของโบท ดังนี้

$$H(f;L) = \frac{L + T(f)}{LT(f) + 1} \quad (4.32)$$

โดยที่  $L$  : ความยาวของสาย Cable

$T(f)$  : เป็น ฟังก์ชัน แสดงคุณสมบัติของสายเคเบิล

โดย 
$$T(f) = e^{-P(f)} \quad (4.33)$$

โดย 
$$P(f) \cong K\sqrt{f}$$

ค่า  $K$  เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเคเบิล

$f$  เป็น ความถี่ โดย คุณลักษณะ loss จะแปรผันเป็น Square root ของความถี่

จากสมการที่ (4.33) จะได้ 
$$P(f)L = KL\sqrt{f} \quad (4.34)$$

ขั้นตอนต่อไป ทำการประมาณวงจรวอไลเซอร์โดยใช้วิธีการ โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์

$$B_n(f; x) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \quad (4.35)$$

โดยที่  $f\left(\frac{k}{n}\right)$  เป็นฟังก์ชันที่ต้องการประมาณ ซึ่งถูกแซมปลิง (Sampling)

โดย  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  ; โดย  $0 \leq x \leq 1$

แทนค่า  $f\left(\frac{k}{n}\right)$  ด้วย  $e^{-KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}}$

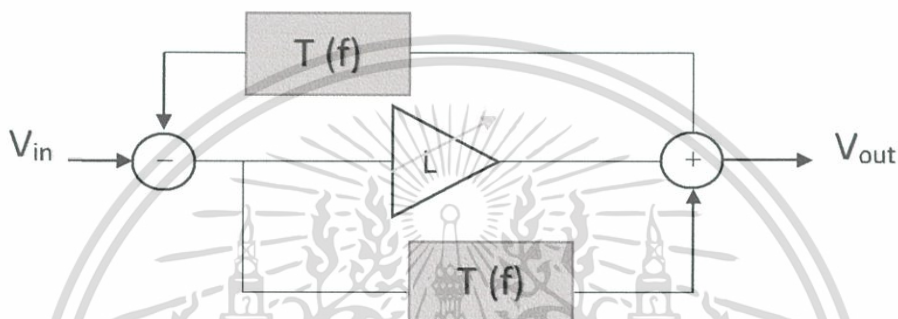
โดยกำหนดให้ 
$$T(f) = \frac{1}{B(f; x)} = e^{-KLf^{\frac{1}{2}}} \quad (4.36)$$

แทนค่าสมการที่ (4.35) ลงในสมการที่ (3.36) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

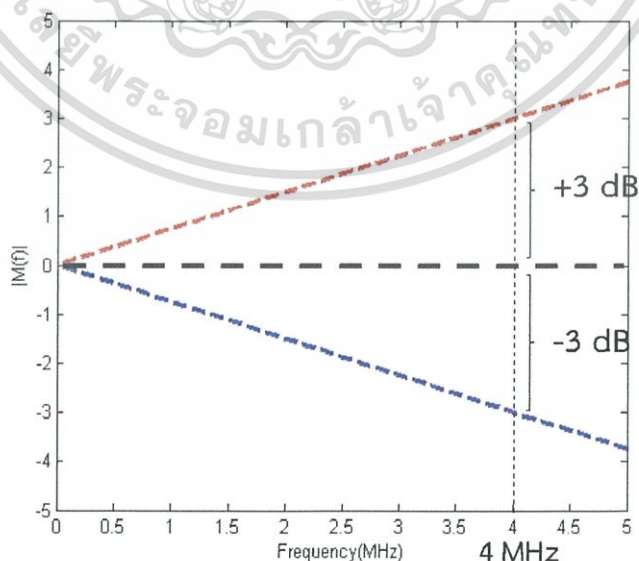
$$T(f) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n e^{KL\left(\frac{k}{n}\right)^{\frac{1}{2}}} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k}} \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.37) ทำการตั้งค่าลำดับที่ต้องการ เช่น  $n = 4, 5, 6, \dots$  และ  $L$  คือ ความยาวของสายเคเบิลที่ต้องการอิกวอไลเซอร์หลังจากคำนวณค่าฟังก์ชันถ่ายโอน  $T(f)$  แล้วแทนค่า  $T(f)$  ลงใน (4.35) ซึ่งเป็นอิกวอไลเซอร์แบบโบทจะได้เคเบิลอิกวอไลเซอร์ที่ตั้งค่าได้ตามต้องการ ดัง [รูปที่ 4.22]



รูปที่ 4.22 รูปร่างอิกวอไลเซอร์แบบโบทที่ตั้งค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิล

โดยที่ ถ้าต้องการเพิ่มสัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากฝั่งด้านบน  $T(f) = e^{P(f)L}$  ในทางกลับกันถ้าต้องการลดสัญญาณจะต้องใช้สัญญาณจากทางด้านลบ  $T(f) = e^{-P(f)L}$  ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามความยาวของสายตามลำดับ ดังตัวอย่าง [รูปที่ 4.23]



รูปที่ 4.23 รูปอิกวอไลเซอร์แบบโบทที่มีด้านบน +3 dB และด้านล่าง -3 dB ที่ความถี่ 4 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[รูปที่ 4.23] แสดงให้เห็นค่ามีทั้งทางด้านบวก +3 dB และด้านลบ -3 dB ที่ความถี่ 4 MHz ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าสัญญาณที่ใช้ในการทดแทนสัญญาณที่ ขาดหาย หรือมากเกินไป เช่น สัญญาณถูกลดทอนไป -3 dB ก็สามารถปรับเพิ่มขึ้น +3 dB ได้ ในทางกลับกัน สัญญาณที่มากเกินไปความสมดุลไป +3 dB ก็สามารถปรับลดลงมา -3 dB เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้มีความสมดุลได้ เป็นต้น

ในระบบสื่อสาร เมื่อป้อนสัญญาณภาพ หรือข้อมูลผ่านสายเคเบิลจะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง (Decrease in Amplitude) และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น (Increase in the Effective width) ซึ่งเป็นที่ทราบดีกันอยู่แล้วว่าสัญญาณ หรือข้อมูลจะมีผลผิดเพี้ยนเกิดขึ้นจากอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลทำให้เกิดการสะท้อนกลับ (Reflection) เกิดพัลส์กว้าง ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างอีควอไลเซอร์ที่สามารถชดเชยสัญญาณที่ถูกลดทอนหายไป

จากตารางที่ 2.5 แสดงการลดทอนของสัญญาณในสายโคแอกเชียล ในหน่วยเดซิเบลต่อ 100 ฟุต จะทำให้เราทราบได้ว่าสายเคเบิลชนิดต่างๆจะมีสัญญาณหายไปกี่เดซิเบลที่ความยาว 100 ฟุต ณ ตำแหน่งความถี่ต่างๆ ในหัวข้อนี้จะสร้างอีควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในสายเคเบิลชนิด RG-6 RG-11 และ RG-213 ณ ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz และ 50MHz

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

รูปที่ 4.24 รูปแสดงค่าสัญญาณที่ถูกลดทอนของสายเคเบิลชนิด RG-6 RG-11 และ RG-213

#### 4.3.1 เคเบิลอีควอไลเซอร์ของสายชนิด RG-6

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-6 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -19.7 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไปโดยใช้โพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ในการสร้างวงจร เช่นเดียวกับอีควอไลเซอร์ของขนาดเชิงเส้น (Linear Gain Slope Equalizer) ในหัวข้อที่ผ่านมา

โดยนำสมการที่ (4.12) มาใช้

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

กำหนดให้  $\alpha_0 = +19.7$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.226 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.38)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-0.755} x(1-x)^2 + 3e^{-1.510} x^2(1-x) + e^{-2.266} x^3} \quad (4.39)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.39)

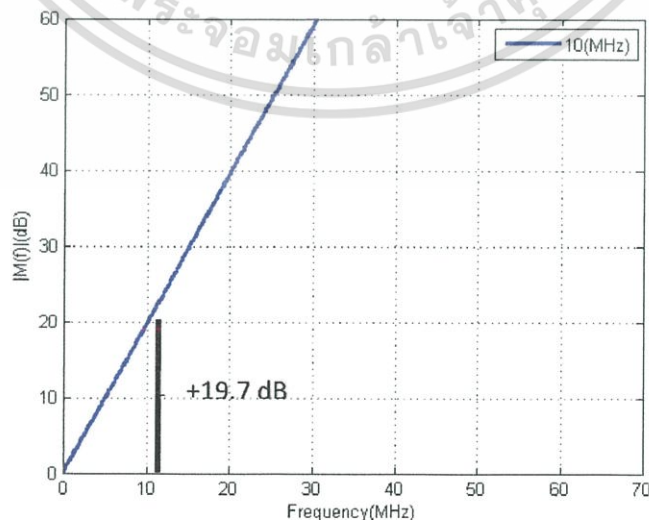
$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.410x(1-x)^2 + 0.663x^2(1-x) + 0.104x^3} \quad (4.40)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$

ผลจากสมการที่ (4.40) สามารถเขียนได้

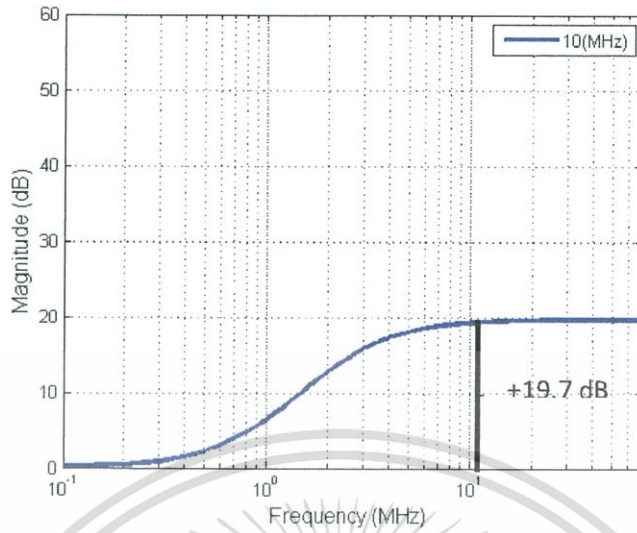
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.410\Omega^2 + 0.663\Omega^4 + 0.104\Omega^6} \quad (4.41)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.25] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.26]



รูปที่ 4.25 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-6

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -45.9 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +45.9 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

กำหนดให้  $\alpha_0 = +45.9 \text{ dB}$  และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-5.279 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.42)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-1.759} x(1-x)^2 + 3e^{-3.519} x^2(1-x) + e^{-5.279} x^3} \quad (4.43)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.43)

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.516x(1-x)^2 + 0.089x^2(1-x) + 0.005x^3} \quad (4.44)$$

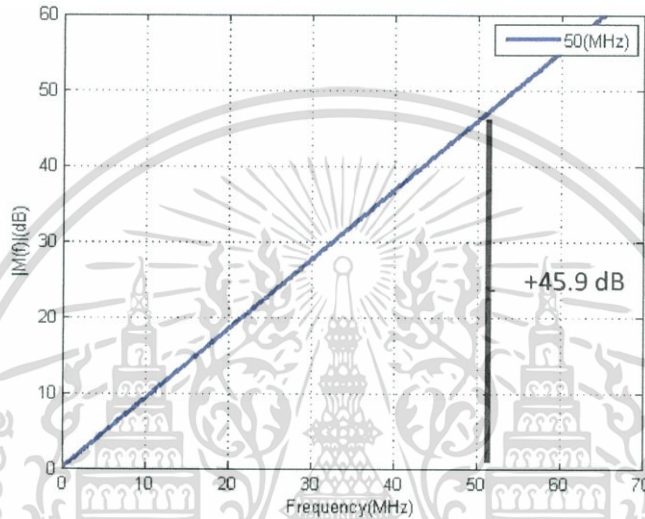
ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

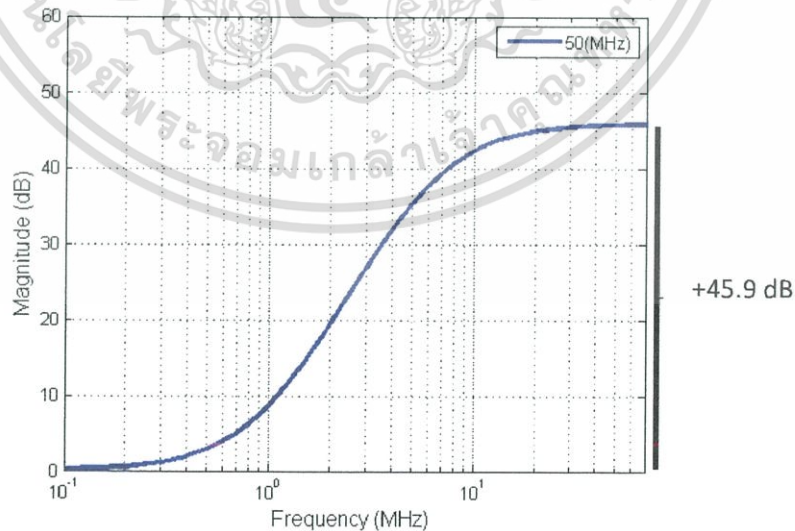
ผลจากสมการที่ (4.44) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1 + \Omega^2)^3}{1 + 0.516\Omega^2 + 0.089\Omega^4 + 0.005\Omega^6} \quad (4.45)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.27] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.28]



รูปที่ 4.27 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-6



รูปที่ 4.28 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 เคเบิลอควอไลเซอร์ของสายชนิด RG-11

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-11 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -13.12 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอควอไลเซอร์ที่มีขนาด +13.12 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

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

กำหนดให้  $\alpha_0 = +13.12$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-1.509 \binom{k}{3}} \binom{3}{k} x^k (1-x)^{3-k}} \quad (4.46)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-0.503} x(1-x)^2 + 3e^{-1.006} x^2(1-x) + e^{-1.509} x^3} \quad (4.47)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.47)

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.814x(1-x)^2 + 1.097x^2(1-x) + 0.221x^3} \quad (4.48)$$

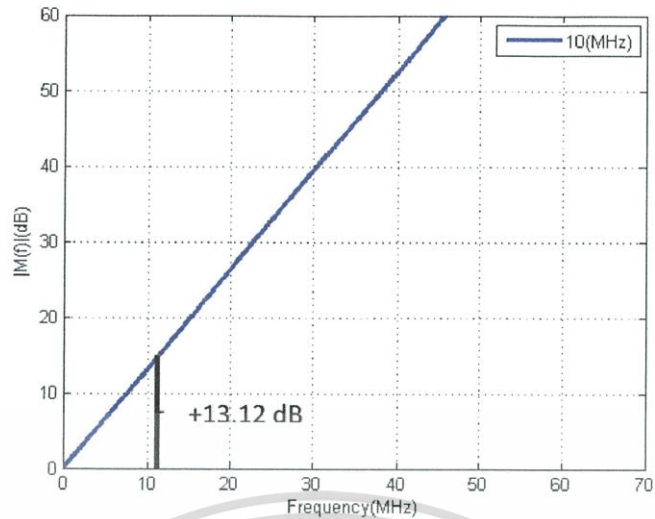
ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.48) สามารถเขียนได้

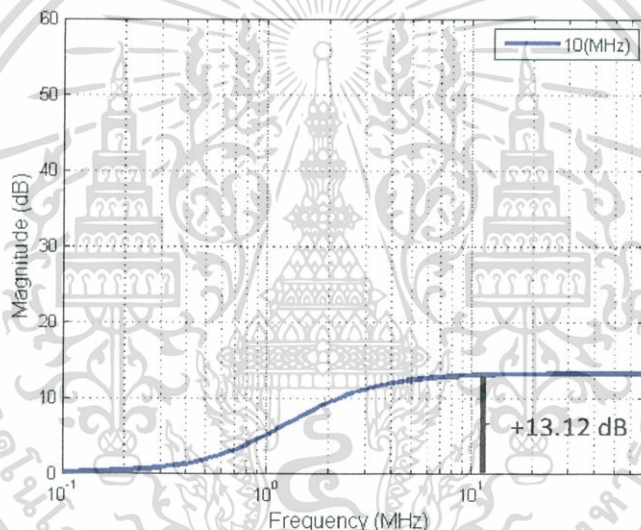
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.814\Omega^2 + 1.097\Omega^4 + 0.221\Omega^6} \quad (4.49)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.29] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-11



รูปที่ 4.30 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-11

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -32.808 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอลไลเซอร์ที่มีขนาด +32.808 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

กำหนดให้  $\alpha_0 = +32.808$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-3.773 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-1.256}x(1-x)^2 + 3e^{-2.515}x^2(1-x) + e^{-3.772}x^3} \quad (4.51)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.51)

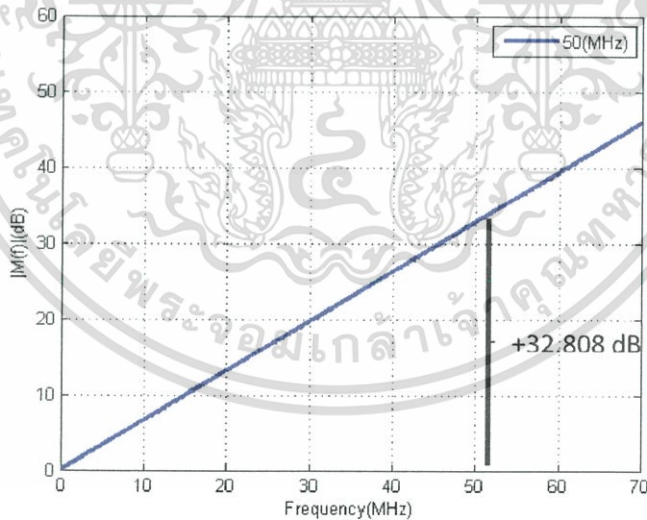
$$H(f;x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.853x(1-x)^2 + 0.243x^2(1-x) + 0.023x^3} \quad (4.52)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.52) สามารถเขียนได้

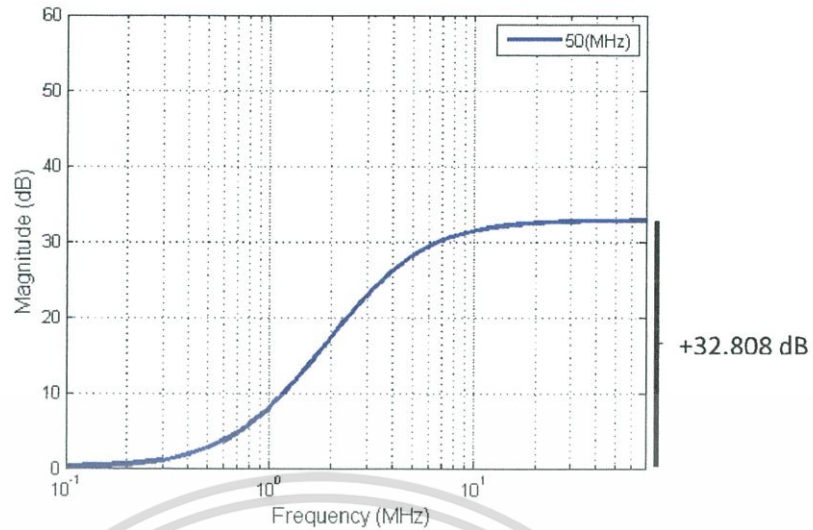
$$H(f;\Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1 + 0.853\Omega^2 + 0.243\Omega^4 + 0.023\Omega^6} \quad (4.53)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.31] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.32]



รูปที่ 4.31 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-11

#### 4.3.3 เคเบิลอิกวอไลเซอร์ของสายชนิด RG-213

จากตารางที่ 2.5 ทำให้ทราบว่า สาย RG-213 ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -19.68 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิกวอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.68 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

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

กำหนดให้  $\alpha_0 = +19.68$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-2.263 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.54)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-0.754} x(1-x)^2 + 3e^{-1.509} x^2(1-x) + e^{-2.263} x^3} \quad (4.55)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.55)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

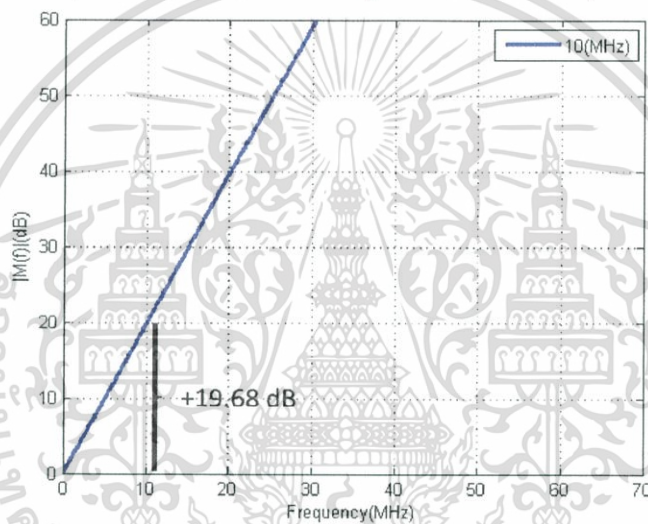
$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 1.411x(1-x)^2 + 0.663x^2(1-x) + 0.104x^3} \quad (4.56)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

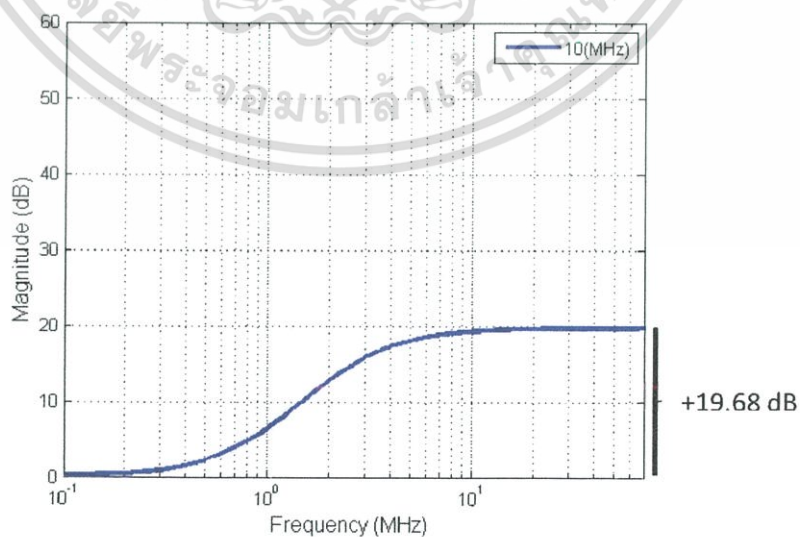
ผลจากสมการที่ (4.56) สามารถเขียนได้

$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+1.411\Omega^2 + 0.663\Omega^4 + 0.104\Omega^6} \quad (4.57)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.33] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.34]



รูปที่ 4.33 รูปกราฟในอุดมคติที่ 10MHz ของสาย RG-213



รูปที่ 4.34 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 10MHz ของสาย RG-213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความถี่ที่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -52.49 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอิมพีแดนซ์ที่มีขนาด +52.49 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

กำหนดให้  $\alpha_0 = +52.49$  dB และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการ (4.12) จะได้

$$H(f; x) = \frac{1}{\sum_{k=0}^3 e^{-6.03 \left(\frac{k}{N}\right)} \binom{N}{k} x^k (1-x)^{N-k}} \quad (4.58)$$

$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 3e^{-2.012} x(1-x)^2 + 3e^{-4.024} x^2(1-x) + e^{-6.036} x^3} \quad (4.59)$$

โดยแทนค่า  $e = 2.71828$  ในสมการ (4.59)

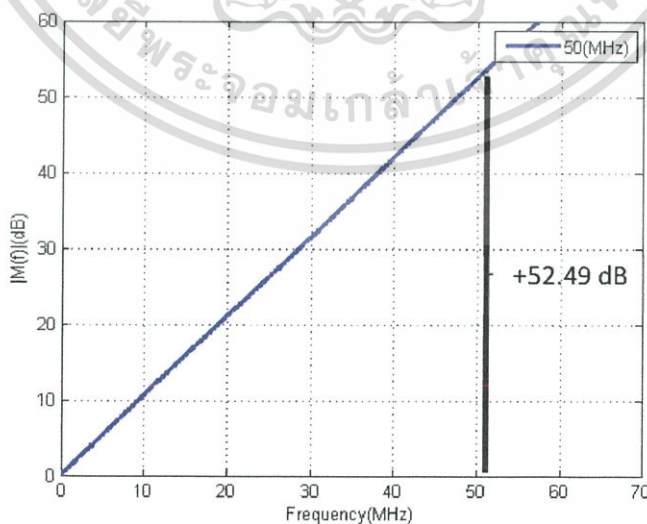
$$H(f; x) = \frac{1}{(1-x)^3 + 0.401x(1-x)^2 + 0.054x^2(1-x) + 0.002x^3} \quad (4.60)$$

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2}$  และอยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$ .

ผลจากสมการที่ (4.60) สามารถเขียนได้

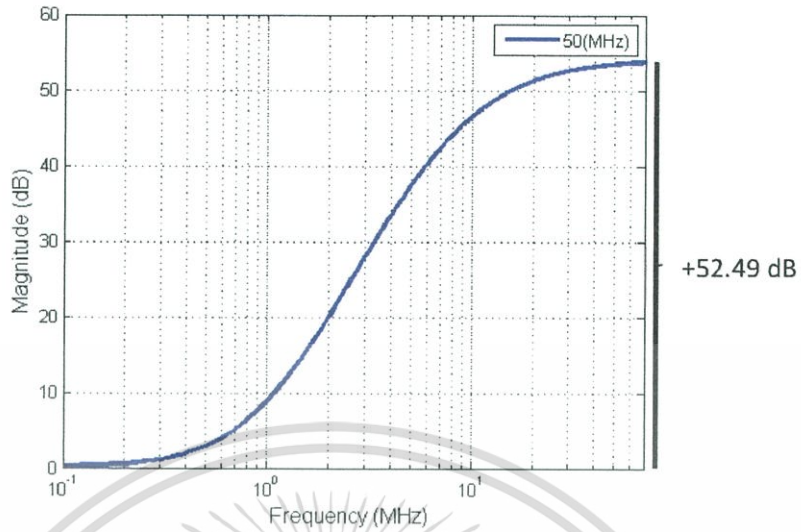
$$H(f; \Omega^2) = \frac{(1+\Omega^2)^3}{1+0.401\Omega^2+0.054\Omega^4+0.002\Omega^6} \quad (4.61)$$

จึงทำให้ได้ภาพกราฟในอุดมคติดัง [รูปที่ 4.35] และรูปขนาดเชิงเส้นดัง [รูปที่ 4.36]



รูปที่ 4.35 รูปกราฟในอุดมคติที่ 50MHz ของสาย RG-213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 รูปขนาดเชิงเส้นที่ 50MHz ของสาย RG-213

#### 4.4 การทดสอบเสถียรภาพ (Stability Test)

เสถียรภาพนั้นได้มาจากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน สามารถอธิบายได้โดยหลักการของมิไฮลอฟ (Mihailov's Criterion) ซึ่งหลักการของมิไฮลอฟจะระบุลำดับออดเตอร์ของโพลีโนเมียลโดยกำหนดให้ [16]

$$D(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega) \quad (4.62)$$

ที่  $u(\omega) = a_0 - a_2\omega^2 + \dots + a_{2n}\omega^{2n}$  และ  $v(\omega) = a_1\omega - a_3\omega^3 + \dots + a_{2n-1}\omega^{2n-1}$

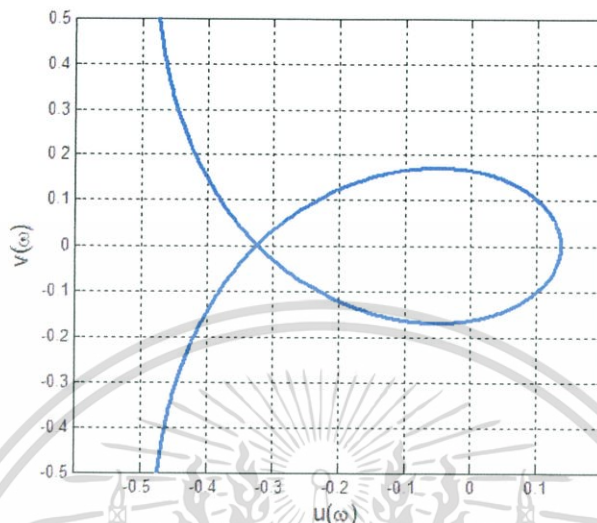
เส้นโค้งที่ได้จะมีรูปแบบ พิกัดจุด และ ระยะจากแกน x ที่วัดขนานกับแกน y แตกต่างกัน โดยทิศทางจากจุดกำเนิดของเส้นจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีการพิสูจน์แล้วว่ามิไฮลอฟ ซึ่งวิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบการควบคุมแบบอนาล็อก

จากสมการที่ (4.60) และ (4.61) จะได้

$$H(s) = \frac{(1+S)^3}{(S+\sigma_1)\{(S+\sigma_2)^2 + \omega_2^2\}} \quad (4.63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเลือกด้านโพลีทางฝั่งซ้ายมือ ของ s-plane ซึ่งโฮโดกราฟของมิไฮลอฟ ( Mikhailov's Hodograph ) ดูได้จาก [รูปที่ 4.37] จะเห็นได้ว่าการเดินทางจากจุดเริ่มต้นเป็นวงกลมในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 4.37 รูปเสถียรภาพที่ใช้โฮโดกราฟของมิไฮลอฟ

#### 4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรรีควอลิเซชันเพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณโดยใช้ทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์มาช่วยในการออกแบบ ซึ่งจะแบ่งอควอลิเซชันออกเป็น 2 แบบ คือ แบบขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี และแบบสายเคเบิล

-แบบขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี จะมีการออกแบบให้อควอลิเซชันมีทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบ เพราะความผิดเพี้ยนของแสง และสี ที่เกิดขึ้นนั้นมีเกิดได้ทั้งเพี้ยนต่ำ และเพี้ยนสูงนั่นเอง

-แบบสายเคเบิล จะมีการออกแบบให้อควอลิเซชันมีแต่ทางด้านบวกอย่างเดียว เพราะว่าคุณสมบัติสายเคเบิลที่ทราบกันดีอยู่แล้วนั้นเมื่อมีการใช้งานในระยะทางที่ไกลขึ้นสัญญาณก็จะมีสัญญาณลดลงมากยิ่งขึ้น จึงไม่มีเหตุจำเป็นที่จะออกแบบอควอลิเซชันทางด้านลบ

การที่นำอควอลิเซชันที่ผลิตสัญญาณที่ต้องการเพื่อไปชดเชยสัญญาณส่วนที่ขาดหายไปนั้นช่วยแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณให้กลับมาอยู่ในสภาวะที่สมดุล และมีเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งวิธีการนั้นจะขึ้นอยู่กับการใช้งานในแต่ละประเภทนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุป และแนวทางการพัฒนาต่อไป

#### 5.1 สรุป

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรรีควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งก่อนที่จะมีการออกแบบวงจรมันั้น ขั้นตอนเราจะต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านทฤษฎีสายส่งสัญญาณ ว่ามีการทำงานอย่างไร สายมีองค์ประกอบอย่างไร มีสายโคแอกเซียลเคเบิลก็ประเภท และแต่ละสายมีหน้าที่การทำงานต่างกันอย่างไร เป็นต้น หลังจากศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสายมาแล้วนั้น จากนั้นจะต้องทำการพิสูจน์ข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อสายมีการใช้งานในระยะทางที่ไกลมากขึ้นจะทำให้สัญญาณถูกลดทอนไปจริงหรือไม่ ซึ่งเมื่อพิสูจน์ออกมาแล้วมีผลปรากฏว่าเป็นจริงตามทฤษฎีสายส่งสัญญาณ จากนั้นจึงถึงขั้นตอนการออกแบบวงจรรีควอไลเซอร์ ขั้นตอนนี้จะต้องมีการหาทฤษฎีต่างๆ เพื่อมาช่วยในการออกแบบวงจรมีลักษณะเป็นเฟสเชิงเส้น ซึ่งในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกทฤษฎีโพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ มาช่วยในการออกแบบ เพราะว่า โพลีโนเมียลแบบเบียร์นสไตน์ มีข้อได้เปรียบที่สามารถควบคุมคุณลักษณะทางขนาด และเฟส ความเป็นเชิงเส้นของเฟส ความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการควบคุม คือ  $n$   $K$  และ  $\varepsilon$  ปรับเพื่อให้เฟสมีความราบเรียบมากที่สุด และยังอาศัยทฤษฎีของโบทเพื่อทำให้วงจรรีควอไลเซอร์นี้สามารถปรับค่าได้ตามความต้องการอีกด้วย

การออกแบบวงจรรีควอไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการออกแบบไว้สองแบบเพื่อใช้งานที่มีความแตกต่างกันโดยแบบแรกจะเป็นแบบขนาดเชิงเส้นของความเข้มของแสง และสี จะมีการออกแบบให้อิควอไลเซอร์มีทั้งทางด้านบวก และทางด้านลบ เพราะความผิดเพี้ยนของแสง และสี ที่เกิดขึ้นนั้นมีเกิดได้ทั้งเพี้ยนต่ำ และเพี้ยนสูง และแบบสายเคเบิลจะมีการออกแบบให้อิควอไลเซอร์มีแต่ทางด้านบวกอย่างเดียว เพราะว่าคุณสมบัติสายเคเบิลที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าเมื่อมีการใช้งานในระยะทางที่ไกลขึ้นสัญญาณก็จะยังถูกลดทอนลงมากยิ่งขึ้นนั่นเอง

ซึ่งการที่ทำการวิจัย และออกแบบวงจรรีควอไลเซอร์ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ก็เพื่อต้องการผลิตสัญญาณไปชดเชยสัญญาณในส่วนที่ขาดหายไป ซึ่งก็จะส่งผลให้มีการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณให้กลับมาอยู่ในสภาวะที่สมดุล มีเสถียรภาพมากที่สุด และยังเป็นการพัฒนาให้การส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ที่ปัจจุบันนี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ให้มีเสถียรภาพสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ประชาชนได้ใช้การสื่อสารที่มีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ในปฏิญญาพนธฉบับนี้ได้มีการวิจัย และได้ออกแบบวงจรอิควอลไลเซอร์เพื่อแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณในการสื่อสารในรูปแบบที่ยังเป็นแนวคิด เป็นการจำลองที่ทำได้จากคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งในอนาคตนั้นสามารถพัฒนาให้มีการทดลองสร้างจริงได้ในรูปแบบของฮาร์ดแวร์ได้ โดยใช้หลักการแนวคิดที่ได้ออกแบบไว้ในปฏิญญาพนธฉบับนี้ไว้แล้ว และยังสามารถนำแนวคิดนี้ไปใช้วิจัยเรื่องใหม่ๆในการสื่อสารได้อีก เช่น การสื่อสารแบบไร้สาย เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Transmission line หรือสายส่งหรือสายนำสัญญาณ. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
[http://ham.9bkk.com/articles/transmission\\_line.html](http://ham.9bkk.com/articles/transmission_line.html)
- [2] สื่อกลางประเภทมีสาย (Wired Media). [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
[http://www.serveasy4u.com/content-%E0%B8%AA%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A2\(WiredMedia\)-4-4658-103164-1.html](http://www.serveasy4u.com/content-%E0%B8%AA%E0%B8%B7%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B8%A1%E0%B8%B5%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A2(WiredMedia)-4-4658-103164-1.html)
- [3] สื่อกลางประเภทไร้สาย (Wireless Media). [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<https://sites.google.com/site/41238pb/sux-klang-prapheth/sux-klang-prapheth-ri-say-wireless-media>
- [4] มาทำความเข้าใจกับสายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) กันเถอะ. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://mvt.co.th/viewarticle.php?cid=7&nid=74&page=>
- [5] RG213 คู่สาย. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.lancabletaiwan.com/th/rg213-coaxial-cable.html>
- [6] สภาวิศวกร COUNCIL OF ENGINEERS. มาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ เรื่อง ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพด้านการตรวจสอบและการทดสอบงานติดตั้งระบบสายเคเบิลเพื่อการสื่อสารโทรคมนาคมและสื่อสารข้อมูล. พิมพ์ครั้งที่1. มกราคม2553
- [7] พื้นฐานสายส่งสัญญาณสำหรับการสื่อสาร. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
[http://thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Principle\\_of\\_Transmission\\_Lines\\_for\\_Communications/index.php](http://thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Principle_of_Transmission_Lines_for_Communications/index.php)
- [8] วันวิสา ชัชวงษ์. การแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณวีดีโอในระบบโทรทัศน์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553
- [9] An American National Standard : “IEEE Standard on Video Signal Transmission Measurement of Linear Waveform Distortion”, IEEE, Inc. , 1979.
- [10] P. WOLF : “Modification of the Pulse-and-bar Test Signal with Special Reference to Application in Color Television”, Journal of the SMPTE, 75, pp. 15-19, 1966.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] L. Yue, N. P. J. Greer, and J. I. Sewell: "Efficient Design of Ladder-Based Transconductor-Capacitor Filters and Equaliser", IEE Proc. Circuits, Devices and Systems, 142, 1995.
- [12] M. N. Neelakantan : "Design of Elliptic Function Filters using a Double-Layer RC Distributed-Active Circuit", IEEE Trans. on Circuits Theory, 19, No.4, pp. 403-406, 1972.
- [13] V. Chutchavong, O. Sangaroon, C. Benjangkprasert and K. Janchitrapongvej, "Luminance-Chrominance Gain Equalizer Based on Bernstein Polynomials," IEEJ Trans. On Electronics, Information and System. Japan, Vol. 130, No. 8, pp. 1411-1422, August 2010
- [14] V. Chutchavong, **Linear-Phase Bernstein Filter for Equalized the Distorted Chrominance**, LAP LAMBERT Academic Publishing Germany, 2013.
- [15] N.L Carolhers, **A short Course on Approximation Theory**, Bowling Green State University.
- [16] V.L. Pekar, and Prokop, "Stabiligation of Delay System by a Proportioned Controller," International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 4, 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบอีควอไลเซอร์แก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิล

## Design of Cable Equalizer used for Signal Transmission

นักศึกษาลัทธิวิศวกรรมสารสนเทศ

1. นางสาวพนิตพร อยู่อ่อน รหัสนักศึกษา 54010866

2. นางสาวพรทิมล นิมสย รหัสนักศึกษา 54010876

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. วันวิสา ชัชวงษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



### บทคัดย่อ

ปัญหาคุณภาพสัญญาณที่ส่งมาโดยสายเคเบิลที่มีการส่งข้อมูลผ่านสายเคเบิลซึ่งการส่งข้อมูลต่าง ๆ ผ่านสายเคเบิลในปัจจุบันนี้จะเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เนื่องจากกระบวนการส่งสัญญาณโดยการพัฒนาระบบที่ได้ทำให้ในสัญญาณที่รับเข้าโดยการออกแบบวงจรเบรคอีควอไลเซอร์ (Cable Equalizer) โดยใช้วิธีการโพลีโนเมียลแบบเบิร์นสไตน์ (Bernstein Polynomials) ซึ่งได้คำนวณค่าฟังก์ชันถ่ายโอน แพลนลงในวงจรอีควอไลเซอร์แบบโพลีโนเมียลของโพลีโนเมียลได้เป็นวงจรเบรคอีควอไลเซอร์ที่ใช้งานได้ตามความต้องการ เพื่อนำไปเชื่อมต่อกับกระบวนการส่งข้อมูลผ่านสายเคเบิลเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนทางขนาดของสัญญาณ โดยการนำสัญญาณที่รับเข้าจะมีการเลือกใช้สัญญาณทดสอบ ไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์ เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบระบบการส่งสัญญาณว่าเมื่อส่งสัญญาณทดสอบผ่านเข้าไปในสายเคเบิลที่ความยาวต่างๆแล้ว สัญญาณที่ได้หลังจากกระบวนการส่งข้อมูลผ่านสายเคเบิลแล้วจะมีหน้าตาออกมาอย่างไร และเกิดความผิดเพี้ยนมากน้อยเพียงใด จากนั้นนำผลที่ได้มาใช้ประกอบกับการออกแบบวงจรเบรคอีควอไลเซอร์นั่นเอง

### ขั้นตอนการออกแบบ

ออกแบบเบรคอีควอไลเซอร์แบบดังกล่าวได้ตามระบอบทางของสายเคเบิลคือทฤษฎีของ Bode ดังนี้

$$H(f, \Omega) = \frac{1 + T(f)}{1 + T(f) + \Omega^2}$$

ขั้นตอนต่อไป ทำการประมาณวงจรอีควอไลเซอร์โดยใช้วิธีการใหม่ คือ เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein polynomials)

$$B_n(f, \Omega) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}$$

โดย  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  โดย  $0 \leq x \leq 1$

จะได้ว่า  $T(f) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}}$

ทำการตั้งค่าที่ได้ออกมา เช่น  $n = 4, 5, 6, \dots$  และ  $f$  คือ ความยาวของสาย Cable ที่ต้องการอีควอไลเซอร์หลังจากคำนวณค่าทราบเพื่อฟังก์ชัน (Transfer function)  $T(f)$  แล้วแทนค่าลงในสมการซึ่งเป็น Bode Type Equalizer จะได้เบรคอีควอไลเซอร์ที่ได้ออกมา  $T(f)$  ได้ตามต้องการ



### การออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์

เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล (Bernstein Polynomials)

$$B_n(f, \Omega) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}$$

พิจารณาช่วงของ  $x$  ซึ่ง ถูกกำหนดไว้ใน ช่วง  $[0, 1]$  ซึ่งจะต้องเปลี่ยนไปเป็น ช่วง  $[0, \infty)$  สำหรับ  $\Omega$  โดยใช้สมการการแปลง

$$x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2}$$

การออกแบบอีควอไลเซอร์ขนาดเชิงเส้นจะใช้สมการ

$$|M(f, \Omega)| = \frac{\alpha_0}{20(N)} \text{ และ สามารถเขียนในรูปลอการิทึมฐาน e ดังสมการ } |M(f, \Omega)| = e^{-0.1150 \alpha_0 \left(\frac{f}{\Omega}\right)^N}$$

นำมาทำในแบบเบิร์นสไตน์โพลีโนเมียล

$$B_n(f, \Omega) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}$$

และสามารถเป็นค่าประมาณใน โพลีโนเมียล (Binomial) โพลีโนเมียล (Polynomial) โดย

$$e^{-0.1150 \alpha_0 \left(\frac{f}{\Omega}\right)^N} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}$$

สามารถเขียนในรูปทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ได้ดังนี้

$$H(f, \Omega) = \frac{1 - 0.1150 \alpha_0 \left(\frac{f}{\Omega}\right)^N}{\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}}$$

### อีควอไลเซอร์ของสายส่งเคเบิลชนิด RG-6

สาย RG-6 ที่ตำแหน่งความถี่ 10MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -19.7 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +19.7 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไปโดยใช้เบิร์นสไตน์โพลีโนเมียลในการสร้างวงจรโดยใช้สมการ

$$H(f, \Omega) = \frac{1}{\sum_{k=0}^n e^{-0.1150 \alpha_0 \left(\frac{f}{\Omega}\right)^N} \binom{n}{k} \left(\frac{f}{\Omega}\right)^k (1 - \frac{f}{\Omega})^{n-k}}$$

กำหนดให้  $\alpha_0 = +19.7 \text{ dB}$ ,  $e = 2.71828$  และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการจะได้

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

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2}$  และทำให้อยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$

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

ที่ตำแหน่งความถี่ 50MHz ความยาวสาย 1 กิโลเมตร จะมีการเกิดการลดทอนไป -45.9 เดซิเบล ดังนั้นจึงต้องสร้างอีควอไลเซอร์ที่มีขนาด +45.9 เดซิเบลเพื่อชดเชยสัญญาณส่วนที่ถูกลดทอนไป

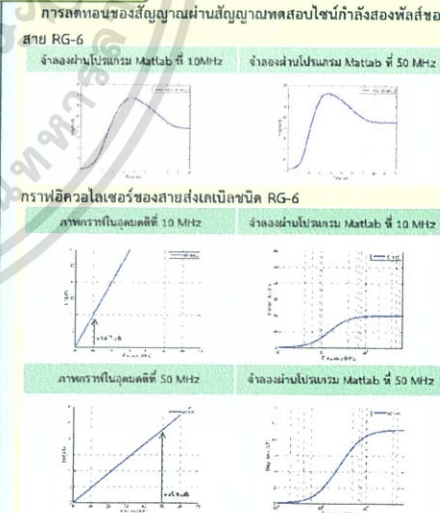
กำหนดให้  $\alpha_0 = +45.9 \text{ dB}$ ,  $e = 2.71828$  และ  $N = 3$  ดังนั้นสมการจะได้

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

ใช้การแปลง  $x = \frac{\Omega^2}{1 + \Omega^2}$  และทำให้อยู่ในช่วง  $0 \leq x \leq 1 \rightarrow 0 \leq \Omega \leq \infty$

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

### ผลการทดลอง



### ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากระบบสื่อสารในปัจจุบันมีการป้อนสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพผ่านสายเคเบิล (Coaxial Cable) และคุณภาพของสัญญาณส่วนใหญ่จะเกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากระบบการส่งสัญญาณนั่นเอง เช่น จะมีผลทำให้ขนาดของสัญญาณลดลง และขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น ซึ่งรับกับคือสัญญาณข้อมูลหรือสัญญาณภาพจะมีผลผิดเพี้ยนเนื่องจากข้อบกพร่องของสายเคเบิลทำให้เกิดการสะท้อนกลับจึงเกิดพัลส์ก้อง (Echo Pulse) เป็นต้น

ดังนั้นปัญหาป้อนสัญญาณนี้จึงได้พัฒนาและออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์ ซึ่งวงจรอีควอไลเซอร์มีคุณสมบัติในการปรับแต่งสัญญาณข้อมูล หรือสัญญาณภาพ ให้มีความสมดุลมากที่สุดตามที่ต้องการ ซึ่งปัญหาป้อนสัญญาณนี้ได้มีการนำเอาวงจรอีควอไลเซอร์มาออกแบบเป็นวงจรเพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่อสายส่งเคเบิลที่สามารถปรับค่าได้ตามความยาวของสายเคเบิลที่ต้องการ ส่งผลให้มีความสะดวกในการประยุกต์เพื่อนำมาใช้งานในด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น

### ขั้นตอนการออกแบบ

การคำนวณผลที่ได้จากป้อนสัญญาณทดสอบในสายเคเบิลเชิงเส้น โดยการประยุกต์ใช้พัลส์ทดสอบไซน์กึ่งกำลังสองพัลส์วิเคราะห์ผลของสัญญาณทดสอบต่อระบบสายส่ง

$$V_{t(s, x)} = V_{t(s, 0)} e^{-\frac{kx}{\sqrt{m}}}$$

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

เมื่อกำหนดให้ความยาวของสายเคเบิลเชิงเส้นความยาวที่แตกต่างกัน (กำหนดให้  $x = 1$  กิโลเมตร, 8 กิโลเมตร) จะได้ผลดังนี้

การออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

### สรุป

การออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์เพื่อแก้ความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในสัญญาณที่รับเข้าไม่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าเพื่อใช้ในการทำงานที่มีความแตกต่างกันโดยแบบแรกจะเป็นแบบขนาดเชิงเส้นของความถี่ของสาย และ จะมีการออกแบบให้อีควอไลเซอร์มีทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ เพราะความผิดเพี้ยนของสาย และสัญญาณที่เข้ามีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า และแบบแรกจะเป็นแบบที่อีควอไลเซอร์มีแต่ทางด้านบวกอย่างเดียว เพราะว่าแบบที่สายเคเบิลที่ทราบกันคือสัญญาณที่เข้ามีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า ดังนั้นถ้าหากจะออกแบบให้ชดเชยสัญญาณที่ต่ำกว่าและสูงกว่าก็จะต้องมีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า

ซึ่งการที่ได้ทำการวิจัยและออกแบบวงจรอีควอไลเซอร์ในสัญญาณที่รับเข้าไม่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าเพื่อใช้ในการทำงานที่มีความแตกต่างกัน โดยแบบแรกจะเป็นแบบขนาดเชิงเส้นของความถี่ของสาย และ จะมีการออกแบบให้อีควอไลเซอร์มีทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ เพราะความผิดเพี้ยนของสาย และสัญญาณที่เข้ามีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า และแบบแรกจะเป็นแบบที่อีควอไลเซอร์มีแต่ทางด้านบวกอย่างเดียว เพราะว่าแบบที่สายเคเบิลที่ทราบกันคือสัญญาณที่เข้ามีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า ดังนั้นถ้าหากจะออกแบบให้ชดเชยสัญญาณที่ต่ำกว่าและสูงกว่าก็จะต้องมีทั้งที่ต่ำกว่าและสูงกว่า