

วงจรรองความถี่ต่ำย่านอาร์เอฟ
LOWPASS FILTER RF RANGE

โดย

นายวัชระ	อาคันทुकานนท์
นางสาวโสธยา	เชื้อบุญ
นางสาวอมรา	จันบรรจง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

วงจรรองความถี่ต่ำย่านอาร์เอฟ

LOWPASS FILTER RF RANGE

โดย

นายวัชระ

นางสาวโสธยา

นางสาวอมรา

อัครันตुकานนท์

เชื้อบุญ

จันบรรจง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่ต่ำย่านอาร์เอฟ

LOWPASS FILTER RF RANGE

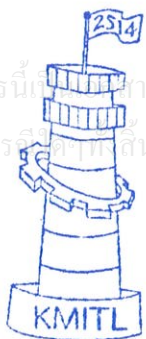
โดย

นายวัชระ	อาคันตุกานนท์	52011089
นางสาวโสธยา	เชื้อบุญ	52011358
นางสาวอมรา	จันบรรจง	52011401

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สิรภาพ	ตู้ประกาย
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

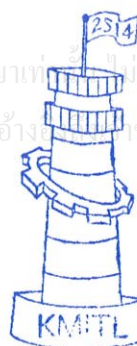


ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

(Signature)
.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering



ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(Signature)
.....

กรรมการผู้ตรวจชิ้นงาน

วิศวกรรมโทรคมนาคม
Telecommunications Engineering

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง วงจรกรองความถี่ต่ำย่านอาร์เอฟ

LOWPASS FILTER RF RANGE

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------|---------------|----------|
| 1. นายวัชร | อาคันตุกานนท์ | 52011089 |
| 2. นางสาวโสธยา | เชื้อบุญ | 52011358 |
| 3. นางสาวอมรา | จันบรรจง | 52011401 |



(ดร.สิรภพ ตูประภาย)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ดำเนินการจนเสร็จตามวัตถุประสงค์ที่ผู้จัดทำตั้งใจไว้ทุกประการโดยได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการศึกษาการออกแบบ การสร้าง และทดสอบงานวิจัย จากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ดร.สิริภพ ตู้ประกาย และรองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ ที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำที่ดีเสมอมาในการทำโครงการและช่วยเหลือสนับสนุนในทุกด้าน ตลอดจนรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทที่ให้คำแนะนำที่ดีและเทคนิคต่างๆ รวมทั้งทฤษฎีการออกแบบวงจรองความถี่แบบต่างๆ ที่นำมาใช้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงข้อมูลการใช้โปรแกรมในการจำลองการทำงาน และเพื่อนๆ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาโทรคมนาคมทุกคนที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมดที่คอยให้คำปรึกษา ให้การช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งใจไว้ ซึ่งกลุ่มผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

นายวัชระ

อาคันตุกานนท์

นางสาวโสธยา

เชื้อบุญ

นางสาวอมรา

จันบรรจง

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่ต่ำย่านอาร์เอฟ
LOWPASS FILTER RF RANGE

โดย นายวัชระ อาคันทุกานนท์ 52011089
นางสาวโสรยา เชื้อบุญ 52011358
นางสาวอมรา จันบรรจง 52011401

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สิริภพ ตู้ประกาย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS) เพื่อออกแบบฟิลเตอร์รองความถี่ต่ำในย่านความถี่วิทยุ เพื่อศึกษาการทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการได้โดยจำลองการทำงาน ให้สามารถเปลี่ยนแปลงวงจรที่ต้องการได้โดยสะดวก

ABSTRACT

THIS PROJECT USED ADVANCED DESIGN SYSTEM TO DESIGN FILTER FOR LOW FREQUENCY RF RANGE. THIS EDUCATION SYSTEM TO FUNCTION IN THE DESIRED FREQUENCY. THE SIMULATION TO BE ABLE CHANGE EASILY.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วิวัฒนาการของวงจรกรองความถี่	3
2.2 วงจรกรองความถี่	5
2.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่	6
2.3.1 นิยาม	6
2.3.2 โพลและซีโรบนระนาบเชิงซ้อน	8
2.3.3 ผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ท	8
2.3.4 ผลตอบสนองแบบเชฟปีเซฟ	9
2.4 องค์ประกอบต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	10
2.4.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท	11
2.4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบเชฟปีเซฟ	12
2.5 การแปลงองค์ประกอบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่	13
2.5.1 การแปลงวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (LOWPASS TRANSFORMATION)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 หลักการทำงานของโปรแกรม ADS	14
2.6.1 S-PARAMETER	14
2.3.2 ADS (ADVANCE DESIGN SYSTEM)	17
2.7 สายนำสัญญาณที่ใช้โครงสร้างไมโครสตริป	22
2.7.1 สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ	23
2.8 คลื่นความถี่วิทยุ	24
2.9 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	25
2.10 วงจรกรองความถี่แบบสเต็ปอิมพีแดนซ์	26
บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์	30
3.1 การออกแบบ	30
3.1.1 การคำนวณ	30
3.1.1.1 การคำนวณ LOW-PASS FILTER 800 MHZ	30
3.1.1.2 การคำนวณ LOW-PASS FILTER 900 MHZ	33
3.1.1.3 การคำนวณ LOW-PASS FILTER 1 GHZ	34
3.1.1.4 การคำนวณ LOW-PASS FILTER 2 GHZ	35
3.1.2 การสร้างไมโครสตริปจำลองในโปรแกรม ADS	36
3.1.3 ไมโครสตริปจำลอง	41
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	45
4.1 ผลการทดลองวงจร LOW-PASS FILTER 800 MHZ	45
4.1.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้	45
4.1.2 ผลการ SIMULATE วงจรจากโปรแกรม ADS	45
4.1.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป	46
4.1.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองวงจร LOW-PASS FILTER 900 MHZ	48
4.2.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้	48
4.2.2 ผลการ SIMULATE วงจรจากโปรแกรม ADS	48
4.2.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป	49
4.2.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน	50
4.3 ผลการทดลองวงจร LOW-PASS FILTER 1 GHZ	51
4.3.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้	51
4.3.2 ผลการ SIMULATE วงจรจากโปรแกรม ADS	51
4.3.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป	52
4.3.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน	53
4.4 ผลการทดลองวงจร LOW-PASS FILTER 2 GHZ	54
4.4.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้	54
4.4.2 ผลการ SIMULATE วงจรจากโปรแกรม ADS	54
4.4.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป	55
4.4.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน	56
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผล	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก MICROSTRIP FILTERS FOR RF/MICROWAVE APPLICATIONS	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

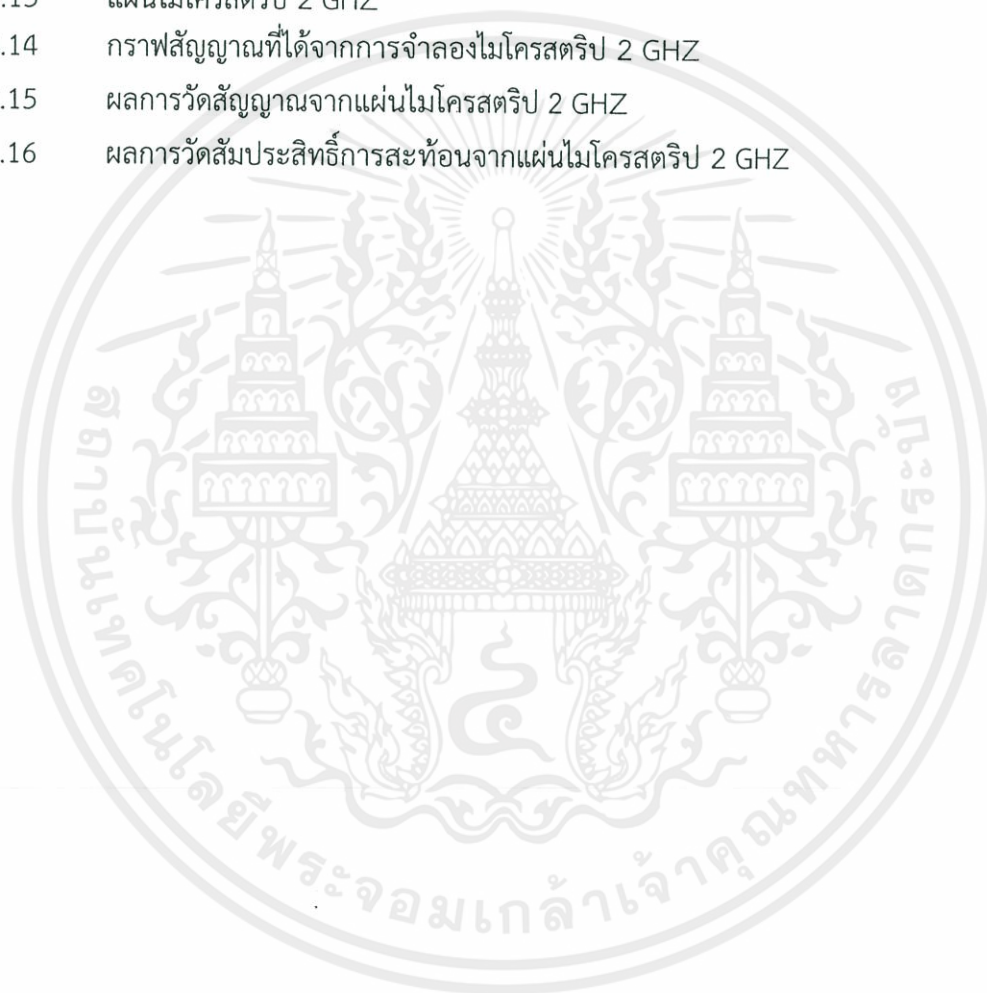
รูปที่		หน้า
2.1	ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองในรูปแบบต่างๆ	6
2.2	ผลตอบสนองผ่านตัวบัตเตอร์เวิร์ท	9
2.3	การกระจายของโพลสำหรับผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ท	9
2.4	ผลตอบสนองผ่านตัวเชฟปีเซฟ	10
2.5	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบสำหรับวงจรกรองทุกโพล (ก) โครงสร้างวงจรข่ายบันได (ข) โครงสร้างวงจรข่ายคู่เสมือน	11
2.6	การแปลงองค์ประกอบพื้นฐานจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบไปยัง วงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ	14
2.7	BOX CIRCUIT	15
2.8	พฤติกรรมของสัญญาณเมื่อทำการส่งสัญญาณในเน็ตเวิร์ค	15
2.9	IMPEDANCE ของ SOURCE และ LOAD ในเน็ตเวิร์ค	17
2.10	หน้าตาหลักของโปรแกรม ADS (ซ้าย) และหน้าตาตั้งชื่อเพื่อสร้าง โครงการใหม่ (ขวา)	17
2.11	แสดงหน้าตาสำหรับออกแบบ SCHEMATIC วงจร	18
2.12	การสร้าง S-PARAMETER	19
2.13	แสดงการตั้งค่าพื้นฐานของ S-PARAMETER	20
2.14	ปุ่ม SIMULATE	20
2.15	หน้าตา SIMULATE (ซ้าย) และหน้าตาแสดงกราฟ (ขวา)	21
2.16	การตั้งค่ากราฟผลการจำลอง	21
2.17	ผลจากการจำลองและวงจร SCHEMATIC (BAND PASS FILTER)	22
2.18	แสดงกราฟ S(21) และ SCHEMATIC ของ LOW PASS FILTER	22
2.19	โครงสร้างของไมโครสตริป	23
2.20	รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	23
2.21	(ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90° (ข) สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90° และมีการตัดมุม	24
2.22	วงจรสมมูลของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ	24
2.23	วงจรสมมูลของวงจรกรองอิมพีแดนซ์แบบขั้น	26
2.24	วงจรสมมูลของโครงข่ายรูปที่	27
2.25	วงจรสมมูลของวงจรเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่อ BL มีค่าต่ำ	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.26	วงจรรองสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบอิมพีแดนซ์แบบชั้น	28
3.1	หน้าต่างโปรแกรม ADS สำหรับออกแบบวงจร	36
3.2	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ	37
3.3	การออกแบบค่าตัวต้านทาน	37
3.4	การกำหนดค่าพารามิเตอร์	38
3.5	การ SIMULATE วงจร	38
3.6	หน้าต่างการออกแบบไมโครสตริป	39
3.7	การกำหนดค่าไมโครสตริป	39
3.8	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในไมโครสตริป	40
3.9	กราฟที่ได้จากการ SIMULATE วงจรไมโครสตริป	40
3.10	LAYOUT ของไมโครสตริปจำลอง	41
3.11	ไมโครสตริปจำลอง 800 MHZ	41
3.12	LAYOUT 800 MHZ	41
3.13	ไมโครสตริปจำลอง 900 MHZ	42
3.14	LAYOUT 900 MHZ	42
3.15	ไมโครสตริปจำลอง 1 GHZ	42
3.16	LAYOUT 1 GHZ	43
3.17	ไมโครสตริปจำลอง 2 GHZ	43
3.18	LAYOUT 2 GHZ	43
4.1	แผ่นไมโครสตริป 800 MHZ	45
4.2	กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 800 MHZ	46
4.3	ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 800 MHZ	47
4.4	ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 800 MHZ	47
4.5	แผ่นไมโครสตริป 900 MHZ	48
4.6	กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 900 MHZ	49
4.7	ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 900 MHZ	50
4.8	ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 900 MHZ	50
4.9	แผ่นไมโครสตริป 1 GHZ	51
4.10	กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 1 GHZ	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 1 GHZ	53
4.12	ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 1 GHZ	53
4.13	แผ่นไมโครสตริป 2 GHZ	54
4.14	กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 2 GHZ	55
4.15	ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 2 GHZ	56
4.16	ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 2 GHZ	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุ	25
3.1	DESIGN PARAMETERS OF MICROSTRIP LINES FOR A STEPPED IMPEDANCE LOWPASS FILTER	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการสื่อสารไร้สายได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วและได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตมนุษย์มากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายต่าง ๆ ให้ความหลากหลายในการใช้งานในหลายย่านความถี่ ย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical) โดยในปัจจุบันความถี่ช่วง 2 GHz ในย่านความถี่ ISM เป็นย่านความถี่ที่นิยมใช้ในระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network) ซึ่งในช่วงความถี่นี้เป็นที่นิยมในการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ในระบบเครือข่ายไร้สาย อีกทั้งในการหาอุปกรณ์และสืบค้นข้อมูลเพื่อที่จะพัฒนาโครงการทำได้ไม่ยากนัก ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานในย่านความถี่นี้ได้แก่ วิทยุพาย (WiFi) บลูทูธ (Bluetooth) โทรศัพท์ไร้สาย (Cordless Phones) เป็นต้น แต่ประเทศไทยยังเป็นประเทศหนึ่งที่ต้องคอยพึ่งพาอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ จากต่างประเทศ โดยปราศจากความรู้ในการพัฒนาเพื่อนำไปต่อยอดในการสร้างเทคโนโลยีไร้สายแบบอื่นๆ

เพื่อส่งเสริมให้เกิดการเรียนรู้ในการพัฒนาเครื่องมือทางการสื่อสารไร้สาย นักศึกษาจำเป็นต้องได้รับการฝึกอบรม การทดลอง เพื่อให้ทราบถึงการทำงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สื่อสาร และเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการทำงานจริงว่ามีความผิดพลาดหรือมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่จากการคำนวณ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว โครงการนี้ จึงเกิดขึ้นเพื่อพัฒนาชุดทดลองต้นแบบ ที่มีความถี่ 900 MHz โดยเป้าหมายเพื่อศึกษาและเรียนรู้การทำงานของเครื่องรับและเครื่องส่งทางด้าน การสื่อสารไร้สาย

ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อยและมีลักษณะแบนราบ ซึ่งเหมาะกับการติดตั้งที่แบนราบไปกับพื้นผิว สามารถใช้ร่วมกับกับ Microwave Integrated Circuit (MICs) ทำงานได้ 2 ถึง 3 ความถี่พร้อมๆกัน มีความแข็งแรง เมื่อนำมายึดกับพื้นผิว ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและหาทฤษฎีที่เหมาะสมในการออกแบบฟิลเตอร์
2. ศึกษาการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยโปรแกรม Advanced Design System (ADS)
3. ออกแบบและสร้างไมโครสตริปวงจรกรองความถี่ต่ำ ที่ย่านความถี่วิทยุ

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานและการพัฒนาโครงการนี้ ผู้จัดทำโครงการได้วางแผนขอบเขตของโครงการไว้ว่า สามารถออกแบบและสร้างไมโครสตริปวงจรกรองความถี่ต่ำย่านความถี่วิทยุ ได้ด้วยโปรแกรม Advanced Design System (ADS)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิวัฒนาการของวงจรกรองความถี่

ความสนใจในทฤษฎีและการออกแบบวงจรกรอง ได้เริ่มมีขึ้นพร้อมกับการพัฒนาการในช่วงเริ่มแรกของอุตสาหกรรมโทรคมนาคมในยุโรปและอเมริกาในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาาระบบสื่อสารแบบมัลติเพล็กซ์ทางความถี่ เพื่อที่จะขยายโครงข่ายของระบบโทรศัพท์ออกไปเป็นตัวกระตุ้นที่สำคัญที่ทำให้เกิดการวิจัยในเรื่องวงจรกรองอย่างแพร่หลาย

ในช่วงทศวรรษ 1920 และ 1930 การพัฒนาทฤษฎีวงจรกรองได้มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยได้มีการแบ่งทฤษฎีวงจรออกเป็นส่วนสองส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนการประมาณ (approximation) และส่วนการสังเคราะห์ โดยการประมาณในที่นี้หมายถึงการเลือกฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนดคุณสมบัติ และการสังเคราะห์ คือ การเลือกโครงสร้างของวงจร และค่าอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้วงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณในลักษณะที่ต้องการตามประมาณได้

ในช่วงเวลาเดียวกันนี้เอง ความต้องการวงจรกรองคุณภาพสูงก็กระตุ้นให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์พาสซีฟ (passive element) สำหรับใช้ในวงจรกรองคือขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน วงจรกรองสัญญาณเสียงโดยมากถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์เหล่านี้จนถึงทศวรรษ 1960 วงจรกรองเหล่านี้ยังถูกใช้งานอย่างมาก ปัจจุบันในงานเฉพาะด้าน โดยเฉพาะในงานที่ต้องการพิสัยวัตต์ (dynamic range) ที่กว้าง และสัญญาณรบกวนต่ำ

ต่อมาในช่วงระยะเวลาหลังสงครามโลกครั้งที่สอง เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้งานที่ความถี่ต่ำจะมีความสูญเสียมาก จึงมีการพัฒนาวงจรกรองที่ปราศจากขดลวดเหนี่ยวนำ (inductorless filter) ขึ้นมา โดยวงจรเหล่านี้จะประกอบด้วยวงจรแอคทีฟ (active element) ซึ่งในยุคแรก คือ หลอดสุญญากาศ (vacuum) และต่อมา คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) หรือวงจรย่อยที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ออปแอมป์ (op-amp) ต่อมารวมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยเราเรียกววงจรประเภทนี้ว่า วงจรกรอง active-RC อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าคงที่ที่เวลา (timeconstant) ของวงจรประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับผลคูณของค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC products) ซึ่งเราไม่สามารถสร้างให้มีความแม่นยำมากได้

อย่างไรก็ตามในทศวรรษ 1970 ได้มีการเริ่มใช้งานวงจรกรองประเภทใหม่ที่เรียกว่าวงจรกรองตัวเก็บประจุสวิตช์ (switched capacitor filter) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ออปแอมป์ป้อนร่วมกับตัวเก็บประจุ และสวิตช์ โดยวงจรกรองประเภทนี้จะมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับวงจรกรอง active-RC แต่จะใช้วิธีการประมวลสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signal) เพื่อให้ค่าเวลาคงที่ของวงจรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวเก็บประจุและความถี่ของสัญญาณ

นาฬิกา (clock) ที่ป้อนให้วงจร ซึ่งเราสามารถทำให้มีความแม่นยำมากๆ ได้ วงจรกรองตัวเก็บประจุสวิทช์สามารถนำไปสร้างวงจรรวม (integrated circuit : IC) ได้ง่ายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการกรองสัญญาณความถี่ต่ำเช่นความถี่เสียง กล่าวโดยสรุปเราสามารถแบ่งวงจรรอานาล็อกได้ตามลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรดังนี้

วงจรกรองพาสซีฟ (passive filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ วงจรกรองประเภทนี้สามารถใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่สัญญาณไฟตรง (DC) ไปจนถึงประมาณ 300 MHz อย่างไรก็ตามเราไม่นิยมใช้วงจรพาสซีฟในย่านความถี่ต่ำ เนื่องจากจะต้องใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่มีความสูญเสียมาก ดังนั้นโดยทั่วไปวงจรพาสซีฟจะถูกใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่สัญญาณเสียง (audio frequency) ความถี่สัญญาณภาพ (video frequency) ขึ้นไปจนถึงความถี่วิทยุสูงมาก (VHF)

วงจรกรองแบบแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟร่วมกับตัวต้านทานและหรือตัวเก็บประจุ วงจรกรองแบบแอคทีฟที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ วงจรกรอง active-RC และวงจรกรองตัวเก็บประจุสวิทช์ (ซึ่งทั้งสองสามารถใช้งานในย่านความถี่ไฟตรง 0-500 kHz)

อย่างไรก็ตาม ในระบบที่ต้องการลักษณะการกรองสัญญาณที่มีการลดทอน (attenuation) สัญญาณที่คมมาก เราอาจจะต้องใช้งานวงจรกรองพาสซีฟที่เรียกว่า วงจรกรองกลไฟฟ้า (electromechanical filter) โดยวงจรกรองประเภทนี้ใช้การกำธ (resonance) ของการสั่นเชิงกล (mechanical/acoustic vibration) ในการกรองสัญญาณไฟฟ้า นอกจากนี้วงจรกรองประเภทนี้ยังมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีมาก ซึ่งถูกนำไปใช้อย่างมากในระบบสื่อสารวิทยุซึ่งปัญหาด้านความถี่สูง สัญญาณรบกวน และพิสัยทำให้ไม่สามารถใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟได้ อย่างไรก็ตามวงจรกลไฟฟ้าไม่สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่า 1 GHz ได้ ทั้งนี้ในย่านความถี่ดังกล่าวเราจะต้องใช้วงจรกรองไมโครเวฟ (microwave filter) แทน

อย่างไรก็ตามตั้งแต่ทศวรรษ 1980 เป็นต้นมาวงจรดิจิทัล (digital filter) ก็ได้รับความนิยมมากขึ้นตามลำดับ โดยทั้งนี้วงจรกรองแบบดิจิทัลมีข้อดี คือ มีความแม่นยำที่สูงมาก และสามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ กินกำลังไฟสูง และไม่สามารถกรองสัญญาณความถี่สูงๆ ได้ดีเท่าวงจรแบบอนาล็อก

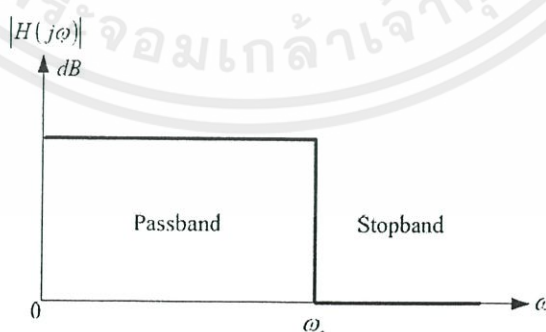
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรกรองความถี่

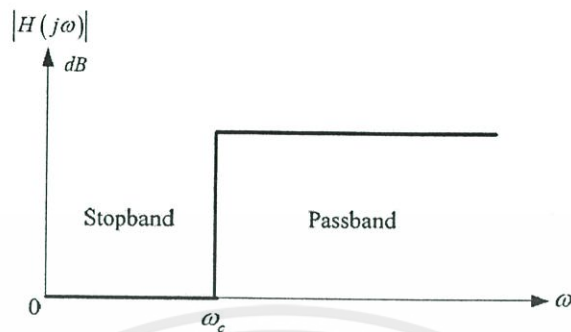
วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive) และวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active filter) ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ไม่มีการขยายทางไฟฟ้า ได้แก่ ตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ซึ่งอุปกรณ์แบบพาสซีฟสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ส่วนวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีการขยายทางไฟฟ้า ได้แก่ ออปแอมป์ มอสเฟต เป็นต้น ซึ่งต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะขับเคลื่อนให้ทำงานได้ ซึ่งวงจรกรองความถี่ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ ซึ่งจะได้อธิบายทฤษฎีและหลักการต่อไป

รูปแบบพื้นฐานของวงจรกรองความถี่ (Filter) มีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ

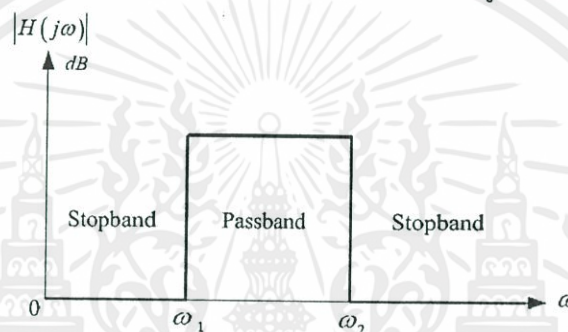
1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter : LPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านไปได้ และมีการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่สูงออกไป แสดงดังรูป 2.1 (ก)
2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass Filter : HPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ และมีการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำออกไป แสดงดังรูป 2.1 (ข)
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass Filter : BPF) เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงความถี่บางช่วงผ่านไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำและสูงออกไป แสดงดังรูป 2.1 (ค)
4. วงจรกรองแถบความถี่หยุดผ่าน (Band-stop Filter : BSF) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าผ่านออกไปได้ดี และทำการลดทอนสัญญาณในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดไว้ แสดงดังรูป 2.1 (ง)



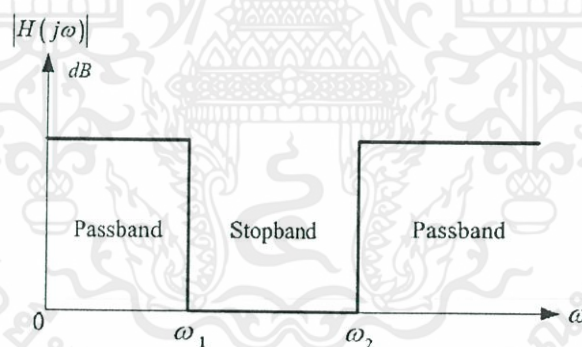
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ (ก) ผลิตตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ



(ค) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ



(ง) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ

รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองในรูปแบบต่างๆ

2.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่

2.3.1 นิยาม

ฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายวงจรกรองแบบสองทางเข้าออกเป็นการอธิบายทางสมการคณิตศาสตร์ของคุณลักษณะการตอบสนองโครงข่าย ซึ่งก็คือ สมการคณิตศาสตร์ของ s_{21} ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนยกกำลังสองของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ไม่มีการสูญเสีย ถูกกำหนดได้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 F_n^2(\Omega)} \quad (2-1)$$

โดย ε คือ ค่าคงที่ของความพลัว (Ripple Constant) และ $F_n(\Omega)$ คือ ฟังก์ชันคุณลักษณะของวงจรกรอง และ Ω คือ ตัวแปรความถี่ ในที่นี้จะกำหนดให้ Ω แทนตัวแปรความถี่ในหน่วยเรเดียนต่อวินาทีของวงจรกรองต้นแบบผ่านต่ำ (Lowpass Prototype Filter) มีความถี่ตัดที่ $\Omega = \Omega_c$ เมื่อ $\Omega_c = \Omega$ เรเดียนต่อวินาที

สำหรับโครงข่ายที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเป็นเชิงเส้นแล้ว (Linear-time Invariant-networks) ฟังก์ชันถ่ายโอนอาจจะกำหนดในรูปของอัตราส่วน ได้ดังนี้

$$S_{21}(p) = \frac{N(p)}{D(p)} \quad (2-2)$$

โดย $N(p)$ และ $D(p)$ คือ โพลีโนเมียลของตัวแปรความถี่เชิงซ้อน $p = \sigma + j\Omega$ สำหรับโครงข่ายพาสซีฟที่ไม่มีการสูญเสีย $\sigma = 0$ และ $p = j\Omega$

จากสมการที่ (2-1) สามารถหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกของวงจรกรองได้เป็น

$$L_A(\Omega) = 10 \log \frac{1}{|S_{21}(j\Omega)|^2} \text{ dB} \quad (2-3)$$

เมื่อ $|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2 = 1$ สำหรับโครงข่ายพาสซีฟที่ไม่มีการสูญเสีย การสูญเสียย้อนกลับของวงจรกรองหาได้จาก

$$L_R(\Omega) = 10 \log[1 - |S_{21}(j\Omega)|^2] \quad (2-4)$$

ผลตอบสนองทางเฟสของวงจรกรองหาได้จาก

$$\Phi_{21} = S_{21}(j\Omega) \quad (2-5)$$

ผลตอบสนองการหน่วงเวลากลุ่ม (Group Delay) ของโครงข่ายคำนวณได้จาก

$$\tau_d(\Omega) = \frac{d\Phi_{21}(\Omega)}{-d\Omega} \quad \text{seconds} \quad (2-6)$$

เมื่อ $\Phi_{21}(\Omega)$ มีหน่วยเป็น เรเดียน และ Ω มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โพลและซีโรบนระนาบเชิงซ้อน

ระนาบ (σ, Ω) คือ อัตราส่วนของการถ่ายโอนซึ่งเรียกว่า ระนาบเชิงซ้อน หรือ ระนาบ p (p - plane) แกนนอนของระนาบเรียกว่าแกนจริงหรือแกน σ และแกนตั้งเรียกว่าแกนจินตภาพ หรือแกน $j\Omega$ ค่าของ p ที่ฟังก์ชันกลายเป็นศูนย์ คือ ซีโรของฟังก์ชัน ค่าของ p ที่ฟังก์ชันกลายเป็นอนันต์ คือ เอกฐาน(โพล)ของฟังก์ชัน ดังนั้นซีโรของ $S_{21}(p)$ เป็นรากของเศษ $N(p)$ และโพลของ $S_{21}(p)$ เป็นรากของส่วน $D(p)$

โพลจะเป็นความถี่ธรรมชาติของวงจรกรอง ซึ่งผลตอบสนองอธิบายด้วย $S_{21}(p)$ ในกรณีที่วงจรกรองเสถียรความถี่ธรรมชาติต้องอยู่ครึ่งซ้ายของระนาบ p หรืออยู่บนแกนจินตภาพ ถ้าไม่เป็นตามนี้ ก็จะทำให้เกิดการออสซิลเลต เงื่อนไขนั้นเป็นไปได้ในโครงข่ายแบบพาสซีฟ เนื่องจากเหตุนี้ $D(p)$ เป็นโพลิโนเมียล Hurwitz ที่รากของค่าตอบจะอยู่ด้านซ้ายของระนาบ p หรืออยู่บนแกน $j\Omega$ เท่านั้น

2.3.3 ผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ท

ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนยกกำลังสองของวงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท ที่มีค่าสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก $L_{Ar} = 3.01$ dB ที่ความถี่ตัด $\Omega_c = 1$ สามารถเขียนได้เป็น

$$|s_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1+\Omega^{2n}} \quad (2-7)$$

เมื่อ n คือ ดีกรีหรืออันดับของวงจรกรองความถี่ ซึ่งจะสอดคล้องกับจำนวนองค์ประกอบจินตภาพที่ต้องการในวงจรกรองต้นแบบผ่านต่ำ การตอบสนองของวงจรกรองชนิดนี้เป็นชนิดที่มีการตอบสนองราบเรียบมากที่สุด เพราะว่าขนาดยกกำลังสองฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (2-7) มีจำนวนของซีโรสูงสุด คือ $(2n - 1)$ ที่ $\Omega = 0$ และจะแย่งเมื่อ Ω เข้าใกล้ความถี่ตัด Ω_c ดังแสดงในรูปที่ 2.2

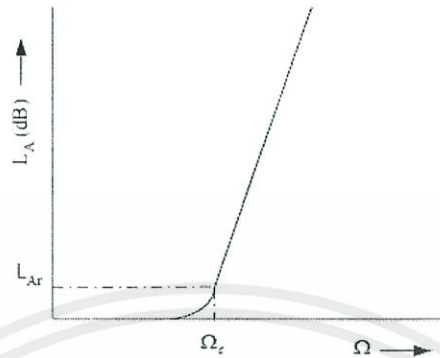
จากสมการที่ (2-7) สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$S_{21}(p) = \frac{1}{\prod_{i=1}^n (p - p_i)} \quad (2-8)$$

เมื่อ

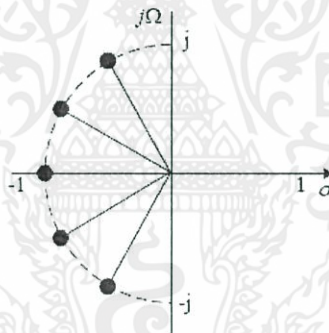
$$p_i = j \exp \left[\frac{(2i-1)\pi}{2n} \right] \quad (2-9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองผ่านตัวบัตเตอร์เวิร์ท

โดยไม่มีตำแหน่งขั้วที่ที่เกิดจากความถี่ค่าใดค่าหนึ่งแต่จะเกิดขั้วทั้งหมดที่อนันต์ และจำนวนโพล p จะอยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วยที่ระนาบด้านซ้ายที่มุมต่างๆ ที่ซึ่ง $|p_i|=1$ และมุมของ $p_i = (2i-1)\pi/2n$ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายของโพลสำหรับผลตอบสนองแบบบัตเตอร์เวิร์ท

2.3.4 ผลตอบสนองแบบเชฟบีเชฟ

การตอบสนองแบบเชฟบีเชฟ จะแสดงถึงการกระเพื่อมในแถบผ่านที่เท่ากันและมีความราบเรียบมากที่สุดในช่วงแถบหยุดซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 โดยขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนยกกำลังสองมีรูปแบบผลการตอบสนองจาก

$$|s_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1+\epsilon^2 T_n^2(\Omega)} \quad (2-10)$$

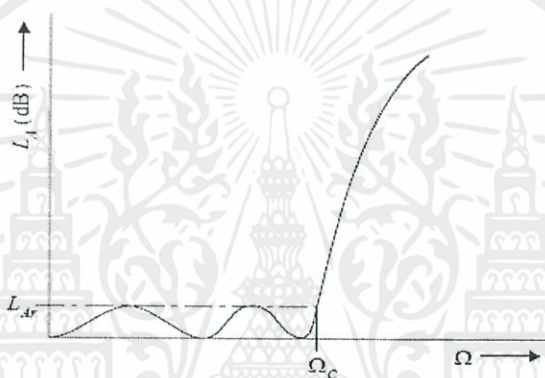
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เมื่อค่าคงที่ความพลิว ϵ มีความสัมพันธ์กับค่าการกระเพื่อมในแถบผ่าน L_{Ar} dB โดยที่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1} \quad (2-11)$$

$T_n(\Omega)$ คือ ฟังก์ชันเชฟปีเซฟแบบแรกของอันดับ n ซึ่งกำหนดได้จาก

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1} \Omega) & |\Omega| \leq 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1} \Omega) & |\Omega| > 1 \end{cases} \quad (2-12)$$

ดังนั้น วงจรกรองที่ได้จากสมการที่ (2-10) โดยทั่วไปเรียกว่า วงจรกรองเชฟปีเซฟ

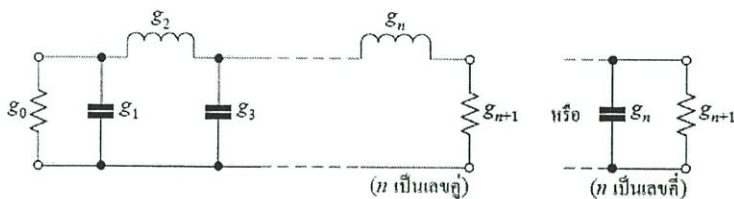


รูปที่ 2.4 ผลตอบสนองผ่านต่ำเชฟปีเซฟ

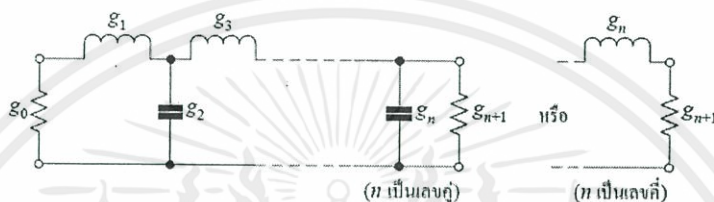
2.4 องค์ประกอบต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่เพื่อที่จะหาการถ่ายโอนที่แท้จริง ส่วนใหญ่แล้วจะเริ่มต้นจากการใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ (Lowpass Prototype Filters) เพื่อช่วยในการออกแบบ โดยที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบนี้จะใช้องค์ประกอบ (Element) ซึ่งถูกนอร์มอลไลซ์จากความต้านทานหรือตัวนำแหล่งจ่าย ให้มีค่าเท่ากับ 1 โดยในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ด้วย $g_0=1$ และความถี่ตัดจะเท่ากับ 1 คือ $\Omega_c=1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบสำหรับวงจรกรองทุกโพล

(ก) โครงสร้างวงจรขายบันได (ข) โครงสร้างวงจรขายคู่เสมียน

2.4.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท

สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทที่มีความราบเรียบของสัญญาณมากที่สุด จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (2-7) โดยที่การสูญเสียแทรกสอดคล้อง $L_{Ar} = 3.01$ dB ที่ความถี่ตัด $\Omega_c = 1$ โดยอ้างอิงตามรูปที่ 2.5 ค่าต่าง ๆ คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} g_0 &= 1 \\ g_i &= 2 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \quad \text{สำหรับ } i=1 \text{ ถึง } n \\ g_{n+1} &= 1 \end{aligned} \tag{2-13}$$

อันดับของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทสามารถคำนวณจากค่าลดทอนที่ต่ำที่สุดของช่วงแถบหยุด, L_{As} dB ที่ $\Omega = \Omega_s$ เมื่อ $\Omega_s \geq 1$ ดังนั้น

$$n \geq \frac{\log(10^{0.1L_{As}} - 1)}{2 \log \Omega_s} \tag{2-14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของวงจรกรองความถี่แบบเชฟบีเชฟ
จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 g_0 &= 1 \\
 g_1 &= \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \\
 g_i &= \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \sin\left(\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right)}{\gamma^2 + \sin^2\left(\frac{(i-1)\pi}{n}\right)} \quad i=2,3,\dots,n \\
 g_{n+1} &= \begin{cases} 1.0 & , n \text{ odd} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{2}\right) & , n \text{ even} \end{cases} \quad (2-15)
 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \beta &= \ln\left[\coth\left(\frac{L_{Ar}}{17.37}\right)\right] \\
 \gamma &= \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right)
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าอันดับของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบของเชฟบีเชฟสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-16) เมื่อ L_{Ar} คือ ระดับของความพลัวในแถบความถี่ผ่าน (Passband Ripple) ในหน่วย dB, L_{As} คือ ค่าลดทอนที่ต่ำที่สุดของช่วงแถบหยุดที่ $\Omega=\Omega_s$

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1L_{As}} - 1}{10^{0.1L_{Ar}} - 1}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (2-16)$$

ในบางครั้งสามารถแทนค่า L_{Ar} ด้วยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำที่สุด (Minimum Return Loss, L_R) หรือค่า VSWR สูงสุดได้ ถ้าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับถูกกำหนดตามสมการที่ (2-4) คือค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ต่ำที่สุด L_R dB ($L_R < 0$) ดังนั้น L_{Ar} สามารถหาได้จาก

$$L_{Ar} = -10 \log(1 - 10^{0.1L_R}) \quad \text{dB} \quad (2-17)$$

และ VSWR หาได้จาก

$$\text{VSWR} = \frac{1+|s_{11}|}{1-|s_{11}|} \quad (2-18)$$

จากสมการที่ (2-18) แทนค่าในสมการที่ (2-17) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเน็ตใด ๆ ของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{Ar} = -10 \log\left[1 - \left(\frac{\text{VSWR}-1}{\text{VSWR}+1}\right)^2\right] \quad \text{dB} \quad (2-19)$$

2.5 การแปลงองค์ประกอบพื้นฐานของวงจรองความถี่

จากที่ผ่านมาจะพบว่าเราพิจารณาเพียงวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบโดยปกติค่าความต้านทานหรือค่าความนำของแหล่งจ่ายจะมีค่าเท่ากับ 1 ($g_0 = 1$) ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 1 เรเดียนต่อวินาที ($\Omega_c = 1$) ซึ่งในทางปฏิบัติค่าคุณลักษณะทางความถี่และค่าขององค์ประกอบต่าง ๆ จะขึ้นกับวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบโดยการทำการแปลงความถี่และองค์ประกอบ

ในการแปลงความถี่ บางครั้งอาจเรียกว่า การแมปปิงความถี่ (Frequency Mapping) ซึ่งก็คือการแมปจากผลตอบสนองของวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบที่อยู่ในโดเมนของ Ω ไปยังโดเมนทางด้านความถี่ ω ซึ่งในทางปฏิบัติผลตอบสนองทางด้านความถี่อาจเป็นวงจรองผ่านต่ำ วงจรองผ่านสูง วงจรองผ่านแถบ หรือวงจรองแถบหยุด ผลของการแปลงความถี่จะมีผลกระทบต่อค่าองค์ประกอบรีแอคทีฟ (Reactive Element) ทั้งหมด แต่ไม่กระทบต่อองค์ประกอบของความต้านทาน (Resistive Element)

ในการทำงานเดียวกันการแมปปิงทางความถี่ค่าอิมพีแดนซ์จะถูกสเกลด้วยค่าองค์ประกอบการแปลง (Element Transformation) ในการสเกลนั้นจำเป็นต้องนำค่า $g_0 = 1$ ออกจากวงจรองที่จะทำการสเกลและปรับค่าวงจรองความถี่โดยจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย (Source Impedance) ซึ่งก็คือ Z_0 โดยสามารถเขียนในรูปของ γ_0 ได้เป็น

$$\gamma_0 = \begin{cases} Z_0/g_0 & \text{สำหรับ } g_0 \text{ เป็นค่าความต้านทาน} \\ g_0/Y_0 & \text{สำหรับ } g_0 \text{ เป็นค่าความนำ} \end{cases} \quad (2-20)$$

เมื่อ $Y_0 = 1/Z_0$ ซึ่งก็คือ แอดมิตแตนซ์แหล่งจ่าย (Source Admittance) โดยสรุปแล้วสามารถสเกลค่าอิมพีแดนซ์ของโครงข่ายวงจรองความถี่ได้เป็น

$$\begin{aligned} L &\rightarrow \gamma_0 L \\ C &\rightarrow C/\gamma_0 \\ R &\rightarrow \gamma_0 R \\ G &\rightarrow G/\gamma_0 \end{aligned} \quad (2-21)$$

ถ้า g_0 คือ เทอมทั่ว ๆ ไปสำหรับวงจรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ เนื่องจาก g จะไม่ขึ้นกับค่าในการแปลง นั่นคือ ค่าองค์ประกอบความต้านทานก็ยังคงอยู่สำหรับวงจรองความถี่ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $R = \gamma_0 g$ ซึ่งงานเพื่อสำหรับ g ที่แสดงค่าเป็นความต้านทาน ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ $G = g/\gamma_0$ เนื้อหา สำหรับ g ที่แสดงค่าเป็นความนำ ทุกครั้งที่มีการใช้ (2-22) ไปใช้

2.5.1 การแปลงวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ (Lowpass Transformation)

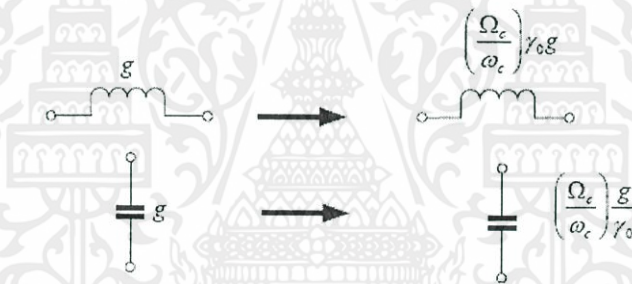
ในการแปลงความถี่จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบไปยังวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำที่มีความถี่ตัดที่ ω_c (rad) บนแกน ω สามารถแปลงได้

$$\Omega = \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c}\right)\omega \quad (2-23)$$

จากสมการที่ (2-23) สามารถสเกลอิมพีแดนซ์ต่าง ๆ ได้เป็น

$$\begin{aligned} L &= \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c}\right)\gamma_0 g && \text{สำหรับ } g \text{ ค่าความเหนี่ยวนำ} \\ C &= \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c}\right)g/\gamma_0 && \text{สำหรับ } g \text{ ค่าความจุ} \end{aligned} \quad (2-24)$$

โครงสร้างองค์ประกอบการแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



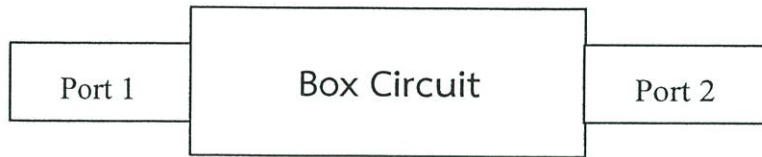
รูปที่ 2.6 การแปลงองค์ประกอบพื้นฐานจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบไปยังวงจรกรองความถี่ผ่านต่ำ

2.6 หลักการทำงานของโปรแกรม ADS

2.6.1 S-Parameter

เอส-พารามิเตอร์ เป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์ในการแสดงการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบคล้ายกล่องของวงจร (Box Circuit) ซึ่งในกล่องวงจรสามารถเป็นได้หลายอย่าง เช่น ตัวต้านทาน ขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ หรืออาจจะเป็นวงจรรวมต่างๆ โดยจะสนใจแค่เพียงข้อมูลขาเข้า (Input) และผลรับของข้อมูลที่ขาออก (Output) เท่านั้น โดยไม่สนใจว่าของในกล่องจะเป็นวงจรแบบใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

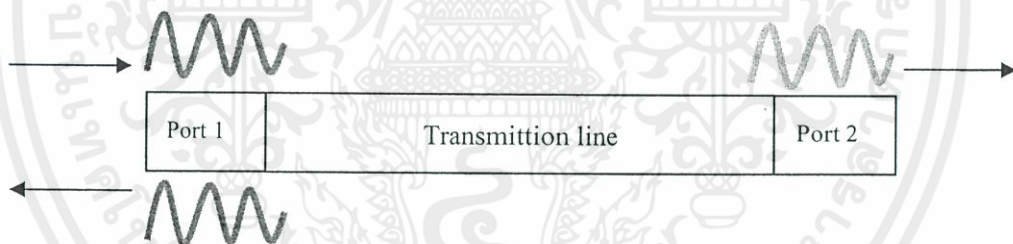


รูปที่ 2.7 Box Circuit

กล่องวงจรหรือเรียกอีกอย่างว่าเน็ตเวิร์ค(Network) จะมีพอร์ตที่เชื่อมต่อเข้ากับสัญญาณภายนอกโดยที่ 1 เนตเวิร์คสามารถมีหลายพอร์ต จากรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างกล่องวงจรที่มีเพียง 2 พอร์ต (แต่ละพอร์ตจะมี 1 คู่สาย)

S-Parameter เป็นวิธีการวัดประสิทธิภาพการทำงาน โดยส่งสัญญาณเพียงความถี่เดียวเข้าไปในเน็ตเวิร์คจากนั้นจะตรวจสอบการตอบสนองต่อคลื่นสัญญาณของแต่ละพอร์ต โดยที่ค่ากระแส กำลัง ศักย์ทางไฟฟ้าจะพิจารณาในรูปแบบของคลื่นที่เดินทางไปทั้งสองทาง (พอร์ต 1 และ พอร์ต 2)

สมมติให้กล่องวงจรเป็นเพียงสายส่งสัญญาณธรรมดา เมื่อมีสัญญาณส่งเข้าให้กล่องวงจรที่พอร์ต 1 (ต้นสาย) จะมีสัญญาณบางส่วนที่สะท้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 และมีสัญญาณที่สามารถส่งผ่านไปที่พอร์ต 2 (ปลายสาย)



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมของสัญญาณเมื่อทำการส่งสัญญาณในเน็ตเวิร์ค

จากรูปที่ 2.8 แสดงการพฤติกรรมของสัญญาณ โดยเมื่อป้อนสัญญาณที่พอร์ต 1 เพื่อทำการส่งสัญญาณไปที่พอร์ต 2 จะมีสัญญาณบางส่วนที่ผ่านไปที่พอร์ต 2 และบางส่วนสะท้อนกลับออกมา

โดยสามารถอธิบายรูปแบบของ S-Parameter ได้ดังนี้

1. $S(11)$ คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับ โดยสามารถหาค่าได้เท่ากับ อัตราส่วนของสัญญาณที่สะท้อนที่พอร์ต 1 ต่อสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเน็ตเวิร์คที่พอร์ต 1
2. $S(21)$ คือ สัญญาณสามารถส่งออกเทียบกับสัญญาณที่ส่งเข้า โดยสามารถหาค่าได้เท่ากับ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งออกที่พอร์ต 2 ต่อสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเน็ตเวิร์ค ที่พอร์ต 1 ในทางกลับกันเมื่อส่งเข้าสัญญาณที่พอร์ต 2 สามารถอธิบายรูปแบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... S-Parameter ได้ดังนี้

3. $S(22)$ คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับ โดยสามารถหาค่าได้เท่ากับ อัตราส่วนของสัญญาณที่สะท้อนที่พอร์ต 2 ต่อสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเนตเวิร์คที่พอร์ต 2
4. $S(12)$ คือ สัญญาณสามารถส่งออกเทียบกับสัญญาณที่ส่งเข้า โดยสามารถหาค่าได้เท่ากับ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งออกที่พอร์ต 1 ต่อสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเนตเวิร์คที่พอร์ต 2

จากที่กล่าวไปแล้วสามารถแสดงการคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S(11) = P1 \text{ out} / P1 \text{ in}$$

$$S(21) = P2 \text{ out} / P1 \text{ in}$$

$$S(22) = P2 \text{ out} / P2 \text{ in}$$

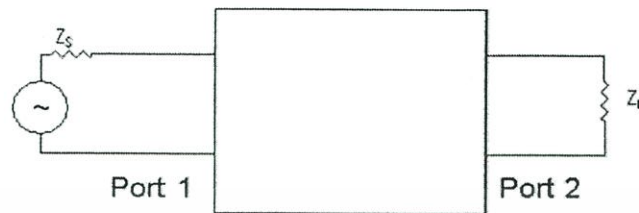
$$S(12) = P1 \text{ out} / P2 \text{ in}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า S-Parameter เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง Output และ Input ในแต่ละ พอร์ตที่ต้องการวัดค่า

ค่าต่างๆของ S-Parameter จะขึ้นกับเนตเวิร์ค โดยปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ค่าต่างๆของ S-Parameter เปลี่ยนคือลักษณะเฉพาะของ Impedance ใน Source และ Load รวมถึงความถี่ของสัญญาณที่ส่งในเนตเวิร์คนั้นๆ โดยสามารถแบ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของ S-Parameter ได้ดังนี้

1. เมื่อเนตเวิร์คเปลี่ยนไปค่า S-Parameter จะเปลี่ยนด้วย คือ เมื่อมีหลายเนตเวิร์คที่ต่างชนิดกันค่า S-Parameter ไม่ว่าจะ เป็น $S(11)$, $S(21)$, $S(22)$ และ $S(12)$ ของแต่ละเนตเวิร์คจะต่างกันไปด้วย
2. เมื่อความถี่เปลี่ยนไปค่า S-Parameter จะเปลี่ยนด้วย คือ เมื่อความถี่ของสัญญาณส่งเข้าเปลี่ยนไปจากเดิม ค่า S-Parameter ไม่ว่าจะ เป็น $S(11)$, $S(21)$, $S(22)$ และ $S(12)$ จะเปลี่ยนไปตามการตอบสนองต่อความถี่ของแต่ละเนตเวิร์ค
3. เมื่อค่าความต้านทานของ Load เปลี่ยนไปค่า S-Parameter จะเปลี่ยนด้วย คือ เมื่อค่าความต้านทานของ Load เปลี่ยนไปจากเดิม ค่า S-Parameter ไม่ว่าจะ เป็น $S(11)$, $S(21)$, $S(22)$ และ $S(12)$ จะเปลี่ยนไปตามการลักษณะเฉพาะของเนตเวิร์ค
4. เมื่อค่าความต้านทานของ Source เปลี่ยนไปค่า S-Parameter จะเปลี่ยนด้วย คือ เมื่อค่าความต้านทานของ Source เปลี่ยนไปจากเดิม ค่า S-Parameter ไม่ว่าจะ เป็น $S(11)$, $S(21)$, $S(22)$ และ $S(12)$ จะเปลี่ยนไปตามการลักษณะเฉพาะของเนตเวิร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



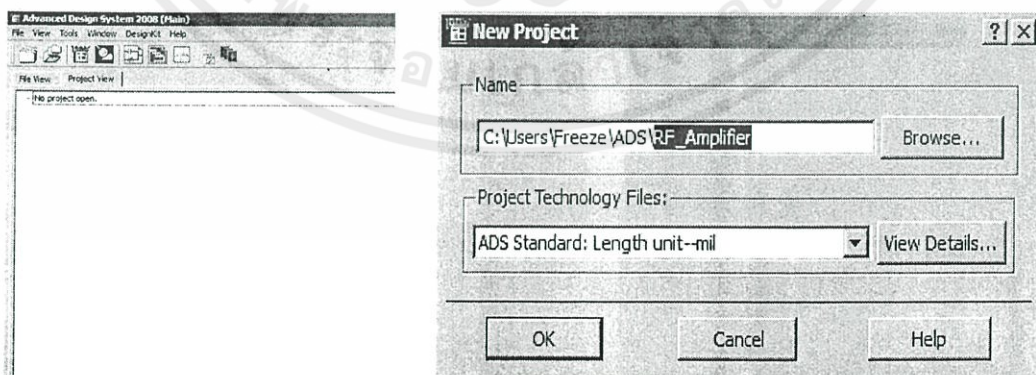
รูปที่ 2.9 Impedance ของ Source และ Load ในเน็ตเวิร์ค

จากรูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ Impedance ของ Source และ Load ในเน็ตเวิร์คที่อยู่ในด้านส่งเข้า และส่งออก โดย Z_s เป็นความต้านทานที่อยู่ในแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Source) และ Z_i เป็นความต้านทานของ Load โดยค่ามาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการออกแบบ RF Amplifier คือ $Z_i = 50 \text{ Ohm}$

2.6.2 ADS (Advance Design System)

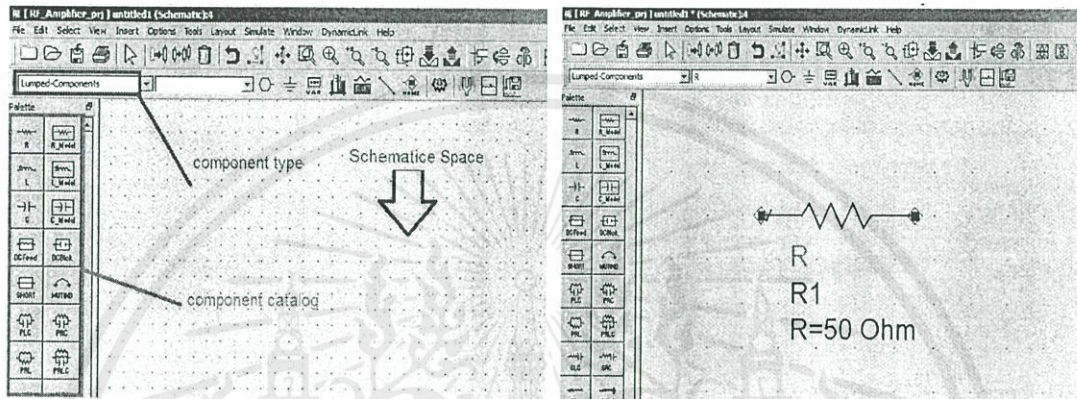
ADS เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และช่วยในการทดสอบการทำงานของวงจรจากการจำลองวงจรที่ออกแบบไว้ก่อนการผลิตวงจรออกมาจริงโดยการทำงานของซอฟต์แวร์สามารถอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

1. เริ่มต้นเมื่อเปิดโปรแกรม ADS จะอยู่ที่หน้าต่างหลักดังรูปที่ 2.10 สังเกตได้ว่า บนหน้าต่างหลักของโปรแกรมยังไม่มีข้อมูลใดๆ สามารถโปรแกรมโครงการโดย เลือกที่ File >> New Project จากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างเพื่อใหตั้งชื่อของโครงการ ในที่นี้ใช้เป็น "RF_Amplifier" เมื่อเสร็จแล้วกดที่ปุ่ม "OK"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีรูป 2.10 หน้าต่างหลักของโปรแกรม ADS (ซ้าย) และหน้าต่างตั้งชื่อเพื่อสร้างโครงการใหม่ (ขวา) ำใช้

2. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างที่ใช้สำหรับออกแบบวงจร โดยใช้สัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ต่างๆในวงจร เรียกว่า “Schematic” โดยในหน้าต่างนี้มีอุปกรณ์ที่แบ่งตามชนิด ให้เลือกใช้ในการออกแบบมากมายโดยการนำอุปกรณ์จากทางด้านซ้ายของหน้าต่างมาวางบนพื้นที่ว่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



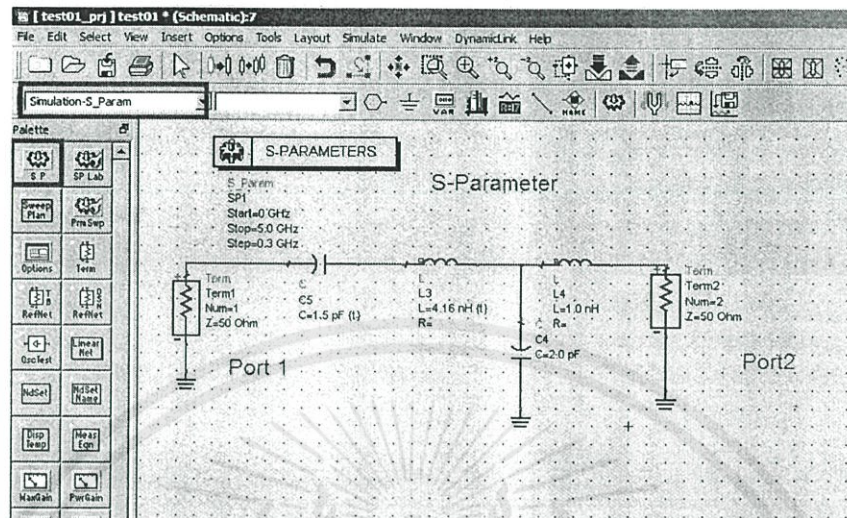
รูปที่ 2.11 แสดงหน้าต่างสำหรับออกแบบ Schematic วงจร

จากรูปที่ 2.11 (ขวา) แสดงตัวอย่างของสัญลักษณ์ (Symbol) ที่สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ตัวต้านทาน (Resistor)
2. ค่าความต้านทานคือ 50 Ohm
3. ชื่อของอุปกรณ์คือ “R1”

3. จากนั้น เมื่อสร้าง Schematic ของวงจรเสร็จแล้วในการทดสอบการทำงานที่เกี่ยวกับ Radio Frequency จำเป็นต้องทำการทดสอบการทำงานของสัญญาณที่ส่งเข้าไปในวงจร และผลจากการส่งสัญญาณที่ออกมาในแต่ละพอร์ต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดการทำงานของ S-Parameter โดยเลือกที่ Simulation-S_Param แล้วเลือก SP นำไปวางที่ Schematic Space เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดการทดสอบการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การสร้าง S-Parameter

จากรูปที่ 2.12 เป็นการกำหนด S-Parameter เพื่อกำหนดการทดสอบการทำงานของวงจรเลือกจากกล่องทางด้านซ้าย แล้วนำไปวางไว้ใน Schematic ซึ่ง S-Parameter เป็นการทดสอบการตอบสนองของวงจรต่อสัญญาณในแต่ละความถี่หรือเรียกว่า "Frequency domain" ตัวอย่างในรูปเป็นวงจร Band pass Filter โดยสัญลักษณ์ต่างๆสามารถอธิบายได้ดังนี้

S_Para กำหนดการทำงานของ S-Parameter

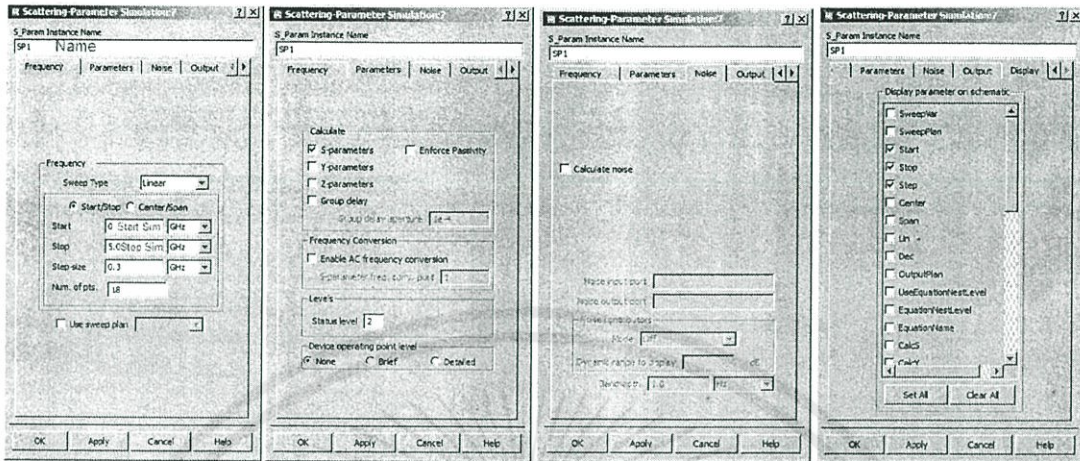
Term แทนพอร์ตต่างๆ จากรูปที่ 6 มี 2 พอร์ต คือ พอร์ต 1 และ พอร์ต 2 แทนโดย Term 1 และ Term 2 ตามลำดับ

C แทนตัวเก็บประจุ

L แทนขดลวดเหนี่ยวนำ

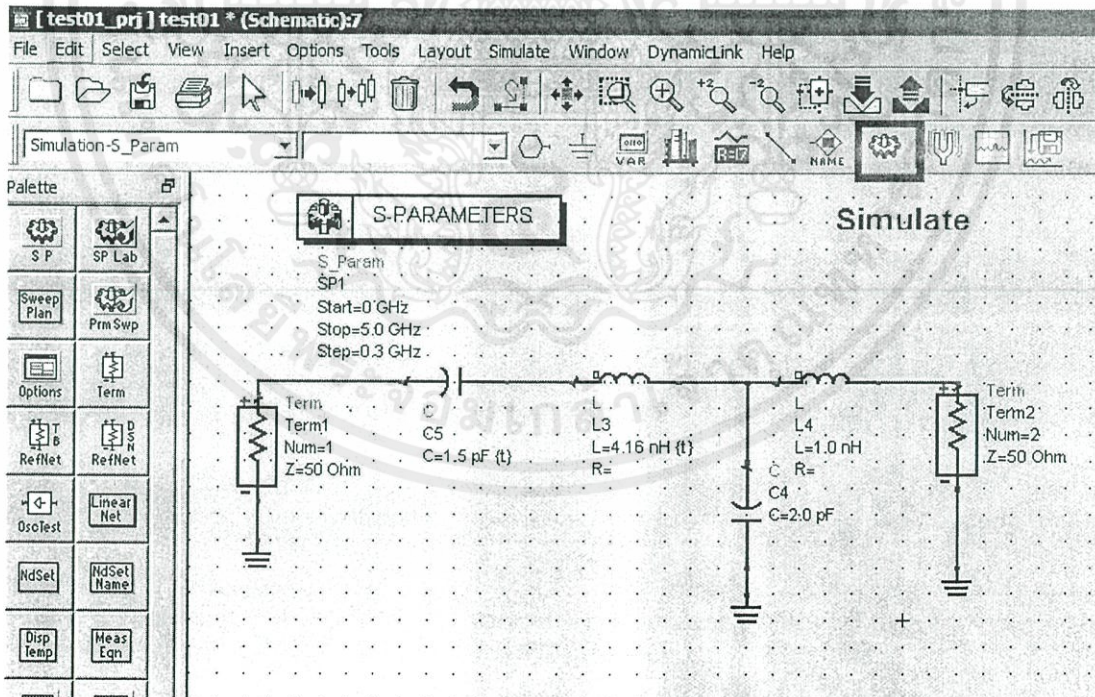
เมื่อนำ S_Para มาวางที่ Schematic แล้ว สามารถตั้งค่าการทำงานได้ดังรูปที่ 2.13 จากรูปค่าต่างๆจะตั้งค่ามาเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

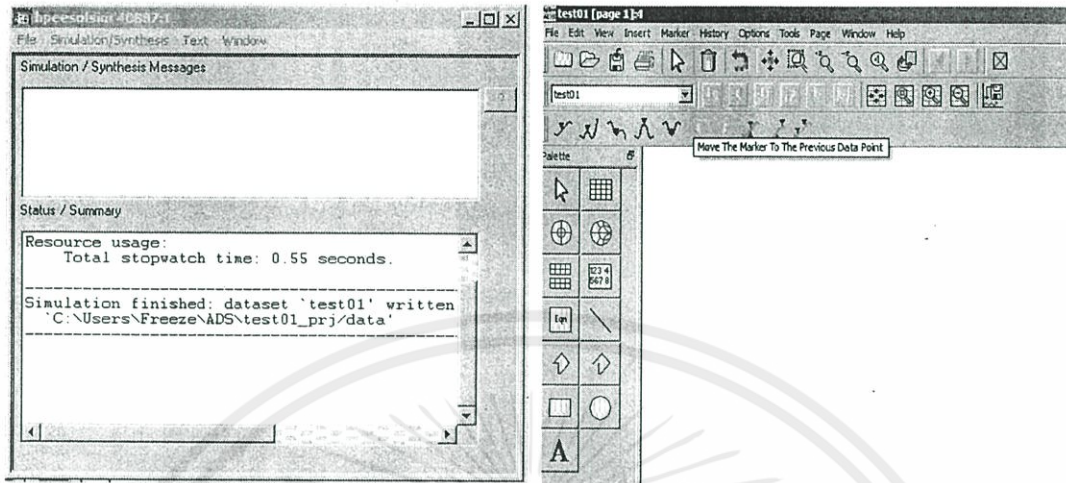


รูปที่ 2.13 แสดงการตั้งค่าพื้นฐานของ S-Parameter

4. จากนั้นทำการทดสอบการทำงานโดยการกดที่ปุ่ม Simulate ดังรูปที่ 2.14 ที่ด้านบนของหน้าต่างหรือเลือกที่ Simulate>>Simulate หรือกดปุ่ม F7 หากไม่มีข้อผิดพลาดโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Simulate และหน้าต่างแสดงกราฟค่าต่างๆของวงจรที่ทดสอบ ดังรูปที่ 2.15




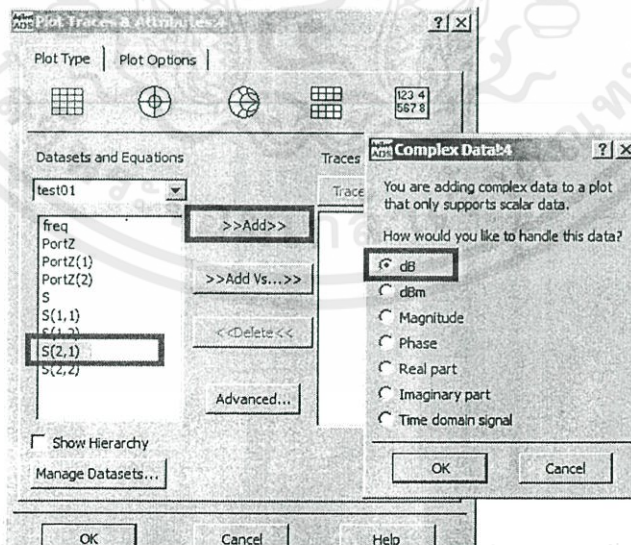
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.14 ปุ่ม Simulate
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



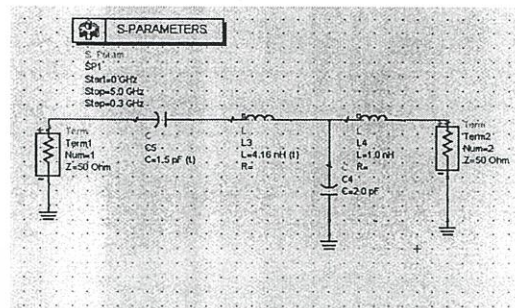
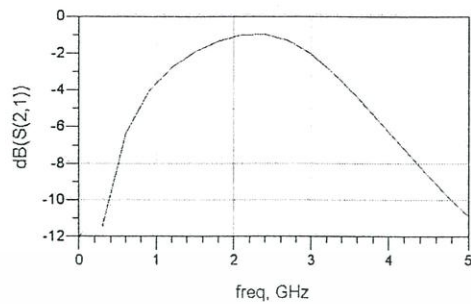
รูปที่ 2.15 หน้าต่าง Simulate (ซ้าย) และหน้าต่างแสดงกราฟ (ขวา)

จากรูปที่ 2.15 ที่หน้าต่างแสดงกราฟจะยังไม่มีกราฟใดๆ จำเป็นต้องสร้างกราฟเพื่อตรวจสอบผลการจำลองการทำงานของวงจร โดยสามารถสร้างกราฟได้หลากหลายแบบตามต้องการ

5. กดที่ปุ่ม  (Rectangular Plot) จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างให้เลือก S-Parameter ที่ต้องการสร้างกราฟเพื่อดูค่าของ S-Parameter นั้นๆจากการจำลองการทำงาน เลือก S(2,1) เพื่อดูผลการจำลองการส่งสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 ของวงจร โดยให้แกน y เป็นหน่วย dB ดังรูปที่ 2.16

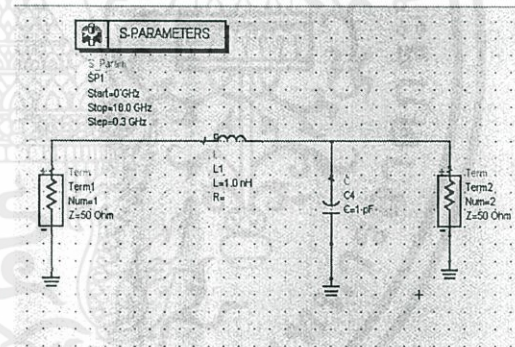
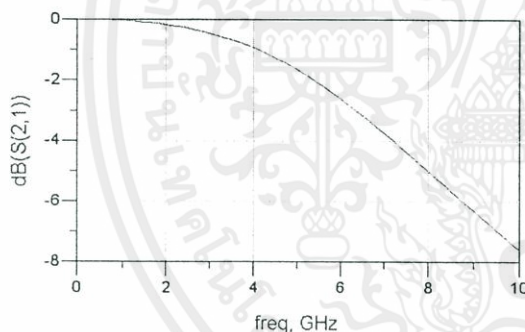


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.16 การตั้งค่ากราฟผลการจำลอง



รูปที่ 2.17 ผลจากการจำลองและวงจร Schematic (Band pass filter)

จากรูปที่ 2.17 เป็นผลจากการจำลองการทำงานของวงจรที่สร้างขึ้นโดยเลือก S-Parameter เป็น $S(21)$ คือการดูผลการส่งสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 จากกราฟเนื่องจากเป็นกราฟของ Band Pass Filter จะเห็นได้ว่าอัตราการลดทอนของสัญญาณจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดสูงสุดของกราฟ จากนั้น อัตราการลดทอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในการออกแบบสามารถออกแบบวงจรแบบอื่นได้อีกมากมาย เช่นรูปที่ 2.18 เป็นจำลอง Low Pass Filter



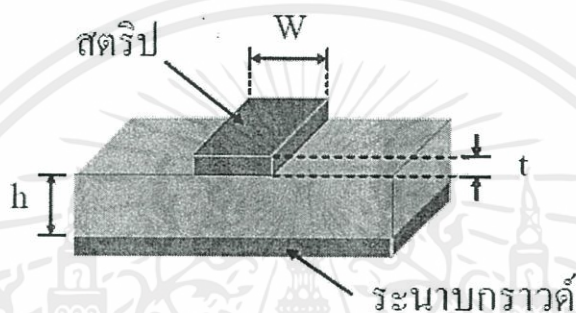
รูปที่ 2.18 กราฟ $S(21)$ และ Schematic ของ Low Pass Filter

2.7 สายนำสัญญาณที่ใช้โครงสร้างไมโครสตริป

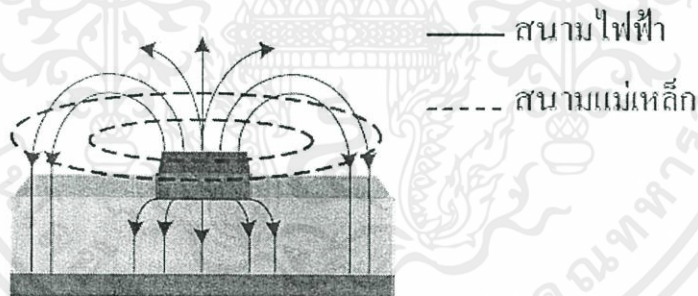
ลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 ประกอบด้วยสตริป (Strip) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณ มีความกว้างเป็น w และมีความหนาเป็น t ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการออกแบบโดย สตริปจะอยู่บนชั้นของแผ่นไมโครสตริปที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Relative Dielectric Constant) ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϵ_r และมีความหนาเป็น h สำหรับแผ่นโลหะที่อยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ (Ground Plane) ของวงจร

พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะส่งผ่านไมโครสตริปบริเวณที่อยู่ระหว่างสตริปกับระนาบกราวด์ โดยลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กบนสายนำสัญญาณไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ 2.20 จะเป็นการแพร่กระจายของคลื่นที่ใกล้เคียงโหมด TEM เพราะ มีสนามในแนวแกนอยู่ด้วยจึงเรียกการกระจายสนามแบบนี้ว่าเป็นแบบ Quasi TEM



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของไมโครสตริป

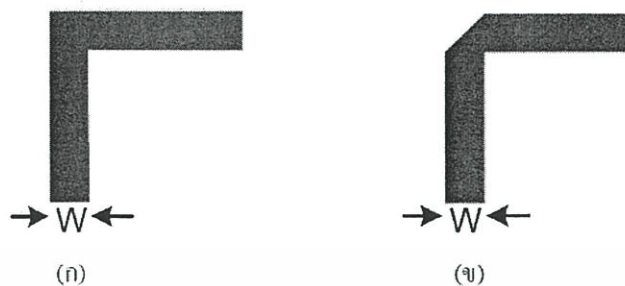


รูปที่ 2.20 รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

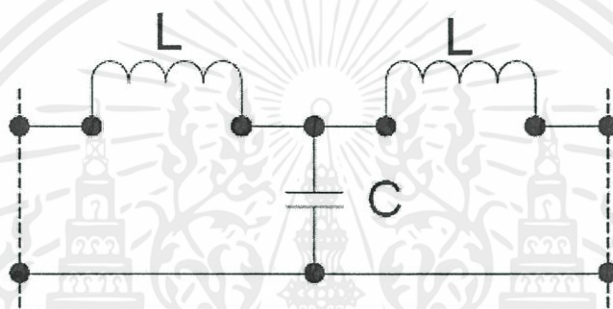
2.7.1 สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ

ความไม่ต่อเนื่องของสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ จากรูปที่ 2.21 (ก) แสดงถึงสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90° และในรูปที่ 2.21 (ข) แสดงถึงสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90° และมีการตัดมุม และส่วนในรูปที่ 2.22 จะแสดงวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 (ก) สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90°
 (ข) สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ 90° และมีการตัดมุม



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่มีมุมหักงอ

2.8 คลื่นความถี่วิทยุ

Radio Frequency (RF) คือ คลื่นความถี่วิทยุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกิจการด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการสื่อสารทางไกล โดยแต่ละย่านความถี่จะมีความเหมาะสมกับกิจการแต่ละชนิด คลื่นความถี่วิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติสามารถนำข้อมูลภาพ เสียง และข้อมูลอื่นๆ เดินทางผ่านชั้นอากาศได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์ต่อการสื่อสารโทรคมนาคมในหลายด้าน เช่น ระบบวิทยุสื่อสารเอเอ็มและเอฟเอ็ม (Amplitude Modulation: AM and Frequency Modulation: FM) การสื่อสารทางเรือดำน้ำ การสื่อสารทางทะเล การสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ การแพร่ภาพโทรทัศน์และการสื่อสารผ่านดาวเทียม เป็นต้น การแบ่งย่านความถี่ของคลื่นวิทยุตามกฎหมายของสหพันธ์โทรคมนาคมนานาชาติ (International Telecommunication Union: ITU) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุ

ชื่อย่านความถี่ (Frequency Band)	ความถี่ (Frequency)	ความยาวคลื่น (Wave Length)
VLF (very low frequency)	3 - 30 kHz	100 - 10 km
LF (low frequency)	30 - 300 kHz	10 - 1 km
MF (medium frequency)	0.3 - 3 MHz	1 - 0.1 km
HF (high frequency)	3 - 30 MHz	100 - 10 m
VHF (very high frequency)	30 - 300 MHz	10 - 1 m
UHF (ultra high frequency)	300 - 3000 MHz	100 - 10 cm
SHF (super high frequency)	3 - 30 GHz	10 - 1 cm
EHF (extremely high frequency)	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

ปัจจุบันย่านความถี่สำหรับการใช้งานกันทั่วโลก จะอยู่ในย่านความถี่ ISM Band (Industrial Scientific Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่หลายประเทศกำหนดไว้สอดคล้องกัน ในการอนุญาตให้ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสารโดยทั่วไป โดยมี 4 ย่านความถี่ คือ

1. ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ต่ำกว่า 150 kHz
2. ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) 13.56/27.125 MHz
3. ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF) 433/868/915 MHz
4. ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) 2.45/5.8 GHz

2.9 ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์วงจรองค์ความถี่ต่ำผ่านไมโครสตริปในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) ที่ประกอบด้วยคลื่นตกกระทบ $A_{1,2}$ และคลื่นสะท้อนกลับ $B_{1,2}$ บนโครงสร้างของวงจรคลื่นระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ S_T ที่อยู่ภายในกล่องตัวนำ และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ฝากล่องทั้งสองเท่ากับ $\Gamma_{1,2}$

กำหนดให้พื้นที่ใดๆ ที่มีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านและอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับดังสมการที่ (2-25) สามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้า E_i และสนามแม่เหล็ก H_i ในแนวสัมผัสผิวส่วนโค้งของรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง ดังสมการที่ (2-26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

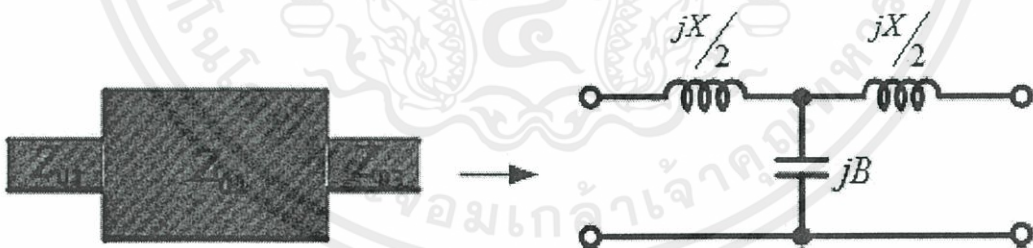
$$\begin{aligned} \vec{A}_i &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{oi}}} (\vec{E}_i + Z_{oi}\vec{H}_i) \\ \vec{B}_i &= \frac{1}{2\sqrt{Z_{oi}}} (\vec{E}_i - Z_{oi}\vec{H}_i) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \vec{A}_i \\ \vec{B}_i \end{aligned}} \right\} (2-25)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= \sqrt{Z_{oi}}(\vec{A}_i + \vec{B}_i) \\ \vec{H}_i &= \frac{1}{\sqrt{Z_{oi}}}(\vec{A}_i - \vec{B}_i) \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \vec{E}_i \\ \vec{H}_i \end{aligned}} \right\} (2-26)$$

เมื่อ i คือตัวกลางที่ 1 และ 2
 Z_{oi} คืออิมพีแดนซ์ของคลื่น

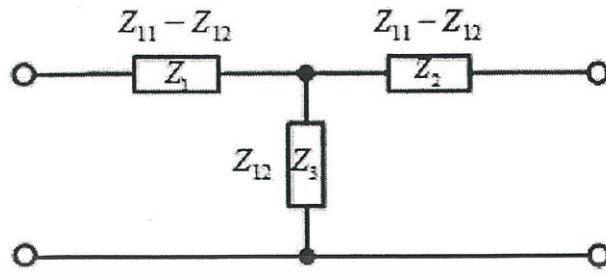
2.10 วงจรกรองความถี่แบบสเต็ปอิมพีแดนซ์

วงจรกรองที่ใช้สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีลักษณะเป็นขั้น จะมีค่าของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities Characteristic Impedance) ซึ่งจะเรียกว่าวงจรกรองอิมพีแดนซ์แบบขั้น (Step-Impedance Filter) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลของวงจรกรองอิมพีแดนซ์แบบขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของโครงข่ายรูปที่

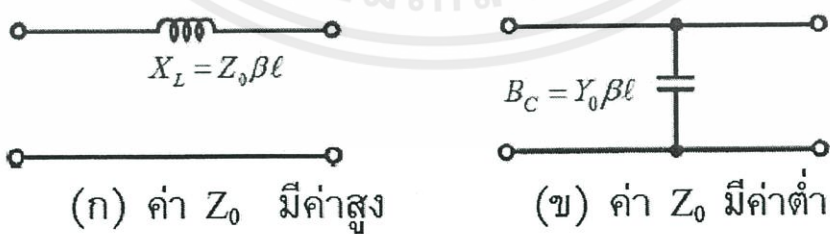
เมื่อ Z_{11} คืออิมพีแดนซ์ทางอินพุต (Impedance Input)
 Z_{12} คืออิมพีแดนซ์ถ่ายโอนย้อนกลับ (Revers Transfer Impedance)

การหาค่าโดยประมาณของวงจรสมมูลของสายนำสัญญาณในรูปที่ 2.20 ถ้าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่ำความกว้างของสายนำสัญญาณจะมีขนาดใหญ่ และถ้าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าสูง ความกว้างของสายนำสัญญาณจะมีขนาดเล็ก ตามคุณสมบัติสายนำสัญญาณแบบไม่โครสตริป จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.20 จะมีลักษณะเหมือนโครงข่ายรูปที่ (T-Network) ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์จากความสัมพันธ์ของ ABCD พารามิเตอร์ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2-27) และ (2-28)

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{A}{C} = -jZ_0 \cot \beta l \quad (2-27)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{C} = -jZ_0 \csc \beta l \quad (2-28)$$

ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_1 ของวงจรสมมูลรูปที่ (T-Equivalent Circuit) หาได้ดังสมการที่ (2-29)



รูปที่ 2.25 วงจรสมมูลของวงจรเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้นเมื่อ βl มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12} = -jZ_0 \frac{\cos \beta l - 1}{\sin \beta l} = -jZ_0 \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right) \quad (2-29)$$

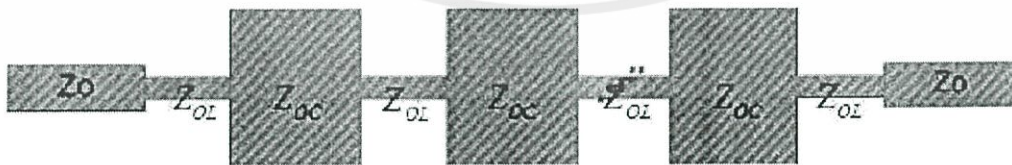
สำหรับส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_3 ของวงจรสมมูลโครงข่ายรูปที่มีค่าเท่ากับ Z_{12} ดังนั้นถ้าค่าของเฟส $\beta l < \pi/2$ ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_1 จะมีค่ารีแอกแตนซ์เป็นบวก (แสดงผลเป็นตัวเหนี่ยวนำ) ขณะที่ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ Z_3 จะมีค่ารีแอกแตนซ์เป็นลบ (แสดงผลเป็นตัวเก็บประจุ) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรในรูปที่ 2.23 สามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังสมการที่ (2-30)

$$\frac{x}{2} = Z_0 \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right) \text{ และ } B = \frac{1}{Z_0} \sin \beta l \quad (2-30)$$

ถ้าสมมติว่าความยาวของสายนำสัญญาณมีขนาดสั้นลงโดยที่ $\beta l < \pi/4$ และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าสูง ซึ่งจะแสดงลักษณะเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.25(ก) (ตัวเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรม) ดังนั้นสมการที่ (2-30) จะประมาณได้ว่าค่าของซบเซบแดนซ์ของ $B=0$

ถ้าความยาว l ของสายนำสัญญาณมีขนาดยาวขึ้นและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าต่ำ ซึ่งจะแสดงลักษณะเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.25 (ข) (ตัวเก็บประจุแบบขนาน) ดังนั้นสมการที่ (2-30) จะประมาณค่าได้เท่ากับ $X=0$ และค่าของ $B = Y_0 \beta l$

การออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์แบบขั้น โดยกำหนดคุณสมบัติของวงจรรองความถี่ต่ำ ผ่านที่ต้องการตามตารางต้นแบบ โดยวงจรรองความถี่ต้นแบบมีความถี่คutoff Ω_c ที่ 1 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งสัมพันธ์กับค่าเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในตารางต้นแบบความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ต่ำซึ่งในสภาพความเป็นจริงมีความจำเป็นต้องออกแบบใช้งานให้ได้ตามความถี่ที่ต้องการ เช่น ความถี่อาจอยู่ในหน่วยกิโลเฮิรตซ์ (KHz) เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) หรืออาจจะเป็นกิกะเฮิรตซ์ (GHz) ดังนั้นการปรับค่าสเกลความถี่ (Frequency Scaling) ไปยังความถี่ที่ต้องการจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนั้นแล้วการปรับค่าสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance Scaling) จะมีความสำคัญเช่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด อิมพีแดนซ์ของโหลดและความถี่ใช้งานสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.26 วงจรกรองสัญญาณที่มีโครงสร้างแบบอิมพีแดนซ์แบบขั้น ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \left(\frac{Z_0}{g_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_1, C = \left(\frac{g_0}{Z_0}\right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c}\right) g_2 \quad (2-31)$$

การคำนวณหาค่าความยาว (L) ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปอิมพีแดนซ์แบบชั้นโดยมีองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำ (L) มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็น Z_{0c} และตัวเก็บประจุ (C) มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.26 จะต้องคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ (ϵ_r) คุณสมบัติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ ค่าความยาวคลื่นของสตริป (λ_g) ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย (Propagation Constant) และค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) ซึ่งต้องเลือกค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะให้อยู่ในเงื่อนไข $Z_{0c} < Z_0 < Z_{0L}$ เมื่อ Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นซึ่งมีค่า 50 โอห์ม จากนั้นคำนวณหาค่าความยาว (L) ได้ดังสมการที่ (2-32)

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right), l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} \omega_c C Z_{0C} \quad (2-32)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริยญาณิพนธ์

ที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องของทฤษฎีและหลักการของวงจรกรองความถี่ ต่อไปจะเป็นวิธีการนำเอาทฤษฎีและหลักการเหล่านั้นมาทำการสังเคราะห์สร้างวงจร เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

3.1 การออกแบบ

หน้าที่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter: LPF) คือ จะยอมให้ความถี่ต่ำผ่าน และจะไม่ยอมให้ความถี่สูงผ่านไปได้ ซึ่งจะช่วยในการลดทอนค่าความถี่ฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกที่ 1 ซึ่งอาจไปรบกวนย่านความถี่อื่น ดังนั้นจึงต้องทำการลดทอนสัญญาณในส่วนนี้ให้มีค่าน้อยที่สุดด้วย LPF

3.1.1 การคำนวณ

โครงการนี้เป็นวงจรกรองแบบอเนกหรือวงจรกรองแบบพาสซีฟ ตามวิธีของ Chebyshev ซึ่งเป็นแบบ All-Pole Filter LC Low-pass filter สามารถออกแบบโดยตรงจากตารางที่เตรียมไว้ในภาคผนวก วงจรกรองที่เหมาะสมอันดับแรกจะต้องเลือกใช้หลักเกณฑ์ที่แน่นอนที่กำหนดไว้ในภาคผนวก แล้วจึงค่อยทำการสเกลค่าความถี่ค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้ตามที่ต้องการ แล้วจึงนำมาคำนวณการสร้างเป็นไมโครสตริป

3.1.1.1 การคำนวณ Low-pass filter 800 MHz

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นด้วยการคำนวณวงจรต้นแบบโดยหาค่า frequency scaling factor (FSF) ของความถี่ที่ต้องการตามสมการที่ (3-1)

$$FSF = 2\pi f_c \quad (3-1)$$

ต่อไปต้องเลือกค่า element values for Chebyshev lowpass prototype filter จากตารางที่ 3.2 ในภาคผนวก โดยพิจารณาจากกราฟแล้วว่าที่ passband ripple (L_A) มีค่า 0.1dB จึงจะได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ วงจรกรองความถี่ที่ต้องการใช้ตรงกับ n ลำดับที่ 9 ($n=9$) ซึ่งมีค่า

ความต้านทานของแหล่งจ่ายและภาระ เท่ากันที่ 1Ω ($R_S = R_L = 1\Omega$) เพื่อทำการ normalize low-pass โดยใช้ $Z = 50\Omega$ และ frequency scaling factor (FSF) ตามสมการที่(3-1) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ(C) ตามสมการที่ (3-2) และค่าขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ตามสมการที่ (3-3)

$$C = \frac{C}{FSF \times Z} \quad (F) \quad (3-2)$$

$$L = \frac{L \times Z}{FSF} \quad (H) \quad (3-3)$$

เราสามารถแทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

$$FSF = 2\pi f_c = 2\pi \times 800 \times 10^6 = 5.0265 \times 10^9$$

$$C_1 = \frac{1.1957}{5.0265 \times 10^9 \times 50} = 4.7575 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{1.4426 \times 50}{5.0265 \times 10^9} = 14.3499 \text{ nH}$$

$$C_3 = \frac{2.1346}{5.0265 \times 10^9 \times 50} = 8.4933 \text{ pF}$$

$$L_4 = \frac{1.6167 \times 50}{5.0265 \times 10^9} = 16.0817 \text{ nH}$$

$$C_5 = \frac{2.2054}{5.0265 \times 10^9 \times 50} = 8.7750 \text{ pF}$$

$$L_6 = \frac{1.6167 \times 50}{5.0265 \times 10^9} = 16.0817 \text{ nH}$$

$$C_7 = \frac{2.1346}{5.0265 \times 10^9 \times 50} = 8.4933 \text{ pF}$$

$$L_8 = \frac{1.4426 \times 50}{5.0265 \times 10^9} = 14.3499 \text{ nH}$$

$$C_9 = \frac{1.1957}{5.0265 \times 10^9 \times 50} = 4.7575 \text{ pF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Normalize low-pass filter ที่ใช้ในการออกแบบที่แสดงในตารางนั้น จะมีแหล่งจ่ายกระแสเป็นอินพุตต่อแบบขนานอยู่กับตัวต้านทาน 1Ω ซึ่งสมมูลกับวงจรที่ใช้แหล่งจ่ายแรงดันเป็นอินพุตที่มีตัวต้านทานอนุกรมอยู่ ผู้อ่านสามารถกลับไปศึกษาทฤษฎีของเทวินิน (Thevenin's Theorem)

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าองค์ประกอบของไมโครสตริปได้จากสมการที่ (3-4) และ (3-5) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Design parameters of microstrip lines for a stepped-impedance lowpass filter

Characteristic impedance (ohms)	$Z_{OC} = 24$	$Z_O = 50$	$Z_{OL} = 93$
Guided wavelengths (mm)	$\lambda_{gC} = 105$	$\lambda_{gO} = 112$	$\lambda_{gL} = 118$
Microstrip line width (mm)	$W_C = 4.0$	$W_O = 1.1$	$W_L = 0.2$

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{\omega_c L}{Z_{OL}}\right) \quad (m) \quad (3-4)$$

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1}(\omega_c C Z_{OC}) \quad (m) \quad (3-5)$$

สามารถแทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

$$C_1 = 10.2149 \quad mm \quad L_2 = 16.6676 \quad mm$$

$$C_3 = 26.2500 \quad mm \quad L_4 = 19.7827 \quad mm$$

$$C_5 = 26.2500 \quad mm \quad L_6 = 19.7827 \quad mm$$

$$C_7 = 26.2500 \quad mm \quad L_8 = 16.6676 \quad mm$$

$$C_9 = 10.2149 \quad mm$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การคำนวณ Low-pass filter 900 MHz

การคำนวณมีวิธีเหมือนกันกับ filter 800 MHz

ขั้นตอนที่ 1 ผลการคำนวณวงจรต้นแบบได้ค่าตัวเก็บประจุ(C) และค่าขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ดังนี้

$$FSF = 2\pi f_c = 2\pi \times 900 \times 10^6 = 5.60 \times 10^9$$

$$C_1 = \frac{1.1957}{5.60 \times 10^9 \times 50} = 4.20 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{1.4426 \times 50}{5.60 \times 10^9} = 12.80 \text{ nH}$$

$$C_3 = \frac{2.1346}{5.60 \times 10^9 \times 50} = 7.62 \text{ pF}$$

$$L_4 = \frac{1.6167 \times 50}{5.60 \times 10^9} = 14.40 \text{ nH}$$

$$C_5 = \frac{2.2054}{5.60 \times 10^9 \times 50} = 7.87 \text{ pF}$$

$$L_6 = \frac{1.6167 \times 50}{5.60 \times 10^9} = 14.40 \text{ nH}$$

$$C_7 = \frac{2.1346}{5.60 \times 10^9 \times 50} = 7.62 \text{ pF}$$

$$L_8 = \frac{1.4426 \times 50}{5.60 \times 10^9} = 12.80 \text{ nH}$$

$$C_9 = \frac{1.1957}{5.60 \times 10^9 \times 50} = 4.20 \text{ pF}$$

ขั้นตอนที่ 2 ผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของไมโครสตริปได้ดังนี้

$$C_1 = 10.1355 \text{ mm} \quad L_2 = 14.8977 \text{ mm}$$

$$C_3 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_4 = 17.8048 \text{ mm}$$

$$C_5 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_6 = 17.8048 \text{ mm}$$

$$C_7 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_8 = 14.8977 \text{ mm}$$

$$C_9 = 10.1355 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การคำนวณ Low-pass filter 1 GHz

การคำนวณมีวิธีเหมือนกันกับ filter 800 MHz

ขั้นตอนที่ 1 ผลการคำนวณวงจรต้นแบบได้ค่าตัวเก็บประจุ(C) และค่าขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ดังนี้

$$FSF = 2\pi f_c = 2\pi \times 1 \times 10^9 = 6.2830 \times 10^9$$

$$C_1 = \frac{1.1957}{6.2830 \times 10^9 \times 50} = 3.8060 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{1.4426 \times 50}{6.2830 \times 10^9} = 11.4800 \text{ nH}$$

$$C_3 = \frac{2.1346}{6.2830 \times 10^9 \times 50} = 6.7940 \text{ pF}$$

$$L_4 = \frac{1.6167 \times 50}{6.2830 \times 10^9} = 12.8656 \text{ nH}$$

$$C_5 = \frac{2.2054}{6.2830 \times 10^9 \times 50} = 7.0200 \text{ pF}$$

$$L_6 = \frac{1.6167 \times 50}{6.2830 \times 10^9} = 12.8656 \text{ nH}$$

$$C_7 = \frac{2.1346}{6.2830 \times 10^9 \times 50} = 6.7940 \text{ pF}$$

$$L_8 = \frac{1.4426 \times 50}{6.2830 \times 10^9} = 11.4800 \text{ nH}$$

$$C_9 = \frac{1.1957}{6.2830 \times 10^9 \times 50} = 3.8060 \text{ pF}$$

ขั้นตอนที่ 2 ผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของไมโครสตริปได้ดังนี้

$$C_1 = 10.2149 \text{ mm} \quad L_2 = 16.6706 \text{ mm}$$

$$C_3 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_4 = 19.7865 \text{ mm}$$

$$C_5 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_6 = 19.7865 \text{ mm}$$

$$C_7 = 26.2500 \text{ mm} \quad L_8 = 16.6706 \text{ mm}$$

$$C_9 = 10.2149 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.4 การคำนวณ Low-pass filter 2 GHz

การคำนวณมีวิธีเหมือนกันกับ filter 800 MHz

ขั้นตอนที่ 1 ผลการคำนวณวงจรต้นแบบได้ค่าตัวเก็บประจุ(C) และค่าขดลวดเหนี่ยวนำ(L) ดังนี้

$$FSF = 2\pi f_c = 2\pi \times 2 \times 10^9 = 1.2560 \times 10^{10}$$

$$C_1 = \frac{1.1957}{1.2560 \times 10^{10} \times 50} = 1.9000 \text{ pF}$$

$$L_2 = \frac{1.4426 \times 50}{1.2560 \times 10^{10}} = 5.7400 \text{ nH}$$

$$C_3 = \frac{2.1346}{1.2560 \times 10^{10} \times 50} = 3.3990 \text{ pF}$$

$$L_4 = \frac{1.6167 \times 50}{1.2560 \times 10^{10}} = 6.4300 \text{ nH}$$

$$C_5 = \frac{2.2054}{1.2560 \times 10^{10} \times 50} = 3.5110 \text{ pF}$$

$$L_6 = \frac{1.6167 \times 50}{1.2560 \times 10^{10}} = 6.4300 \text{ nH}$$

$$C_7 = \frac{2.1346}{1.2560 \times 10^{10} \times 50} = 3.3990 \text{ pF}$$

$$L_8 = \frac{1.4426 \times 50}{1.2560 \times 10^{10}} = 5.7400 \text{ nH}$$

$$C_9 = \frac{1.1957}{1.2560 \times 10^{10} \times 50} = 1.9000 \text{ pF}$$

ขั้นตอนที่ 2 ผลการคำนวณค่าองค์ประกอบของไมโครสตริปได้ดังนี้

$$C_1 = 2.3306 \text{ mm} \quad L_2 = 16.6706 \text{ mm}$$

$$C_3 = 5.6256 \text{ mm} \quad L_4 = 19.7714 \text{ mm}$$

$$C_5 = 6.0000 \text{ mm} \quad L_6 = 19.7714 \text{ mm}$$

$$C_7 = 5.6256 \text{ mm} \quad L_8 = 16.6706 \text{ mm}$$

$$C_9 = 2.3306 \text{ mm}$$

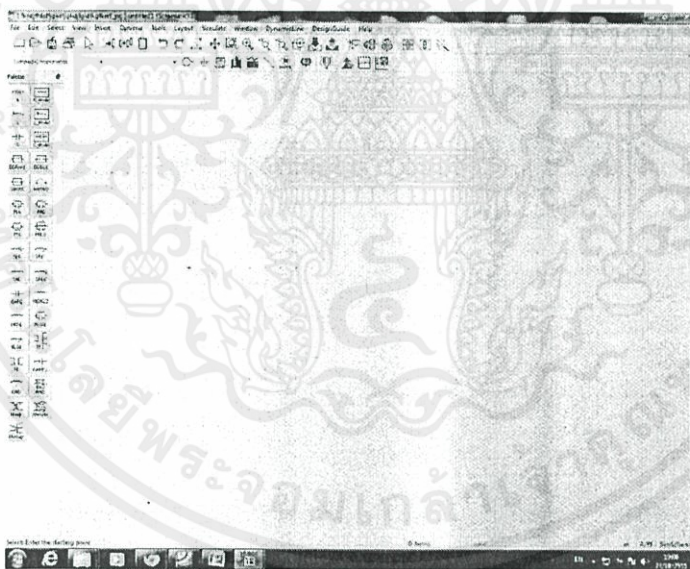
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การสร้างไมโครสตริปจำลองในโปรแกรม ADS

ในขั้นตอนการสร้างนี้เมื่อทำการออกแบบวงจรองความถี่ คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรเสร็จสมบูรณ์ จะรู้ว่าสิ่งที่ทำมานั้นถูกต้องหรือไม่ก็ต้องทำการ simulate ดูในโปรแกรมก่อนว่าผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจหรือไม่ แล้วจึงค่อยประกอบวงจรตามค่าอุปกรณ์ที่ได้ให้ครบถ้วน แล้วจึงจะนำฮาร์ดแวร์ที่ได้นั้นนำมาปรับแต่งให้ได้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ต้องการโดยเครื่องมือปรับแต่งต่างๆ ดังจะได้กล่าวต่อไป

การออกแบบโดยใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS)

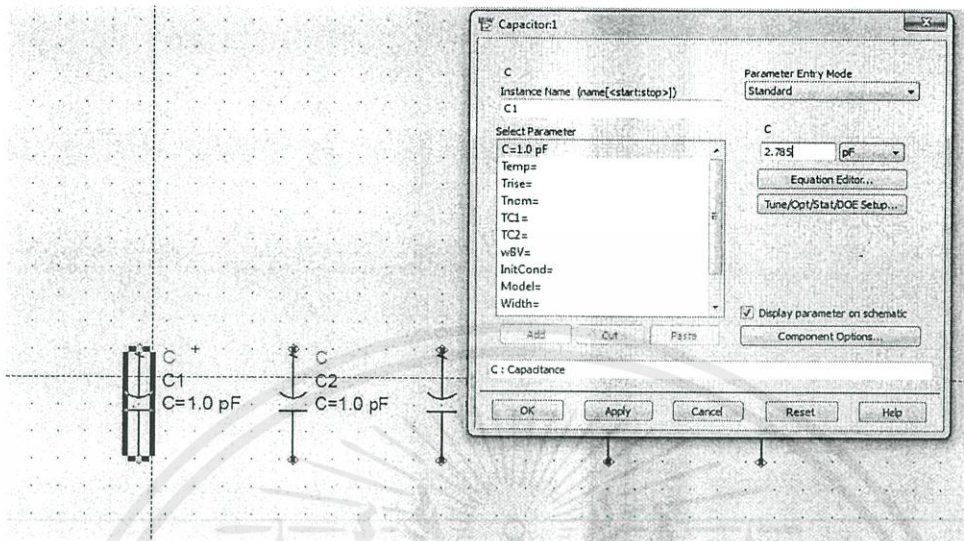
โปรแกรม Advanced Design System (ADS) จะแสดงหน้าต่างที่ใช้สำหรับออกแบบวงจร โดยใช้สัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ต่างๆในวงจร เรียกว่า “Schematic” โดยในหน้าต่างนี้มีอุปกรณ์ที่แบ่งตามชนิด ให้เลือกใช้ในการออกแบบมากมายโดยการนำอุปกรณ์จากทางด้านซ้ายของหน้าต่างมาวางบนพื้นที่ว่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม ADS สำหรับออกแบบวงจร

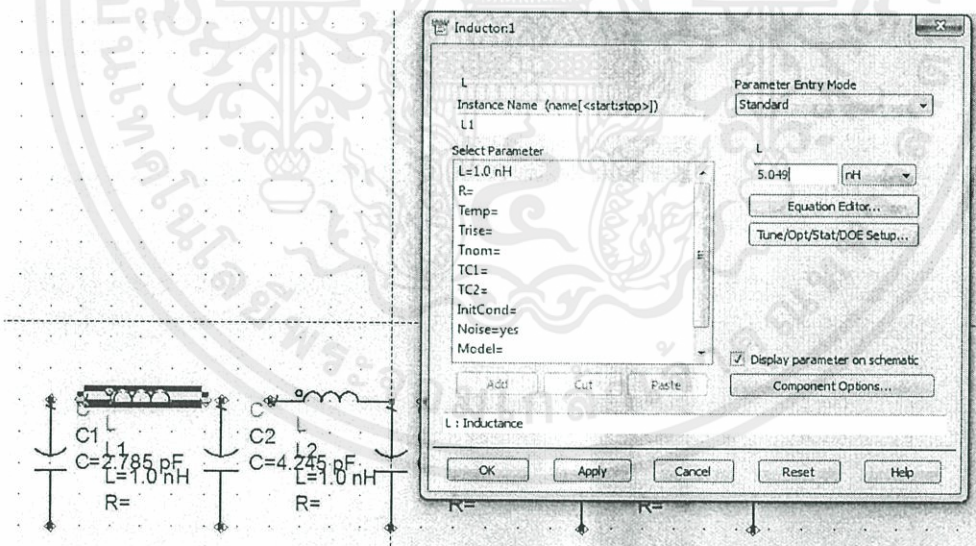
ต่อมาเป็นการนำตัวเก็บประจุจาก Schematic มาออกแบบตามวงจรที่ต้องการ โดยค่าที่ใส่ลงนั้นได้มาจากการคำนวณก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ

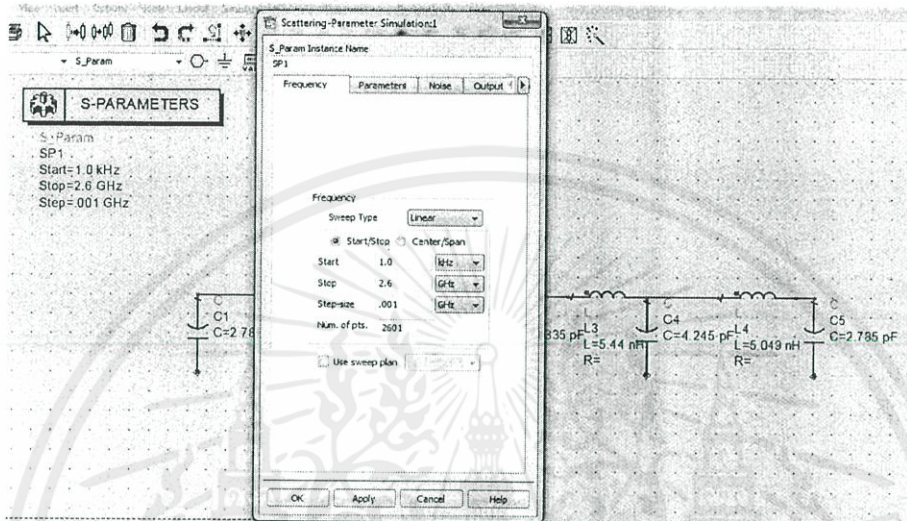
เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุได้ตามต้องการแล้ว หลังจากนั้นก็นำตัวด้านทานมาใส่ต่อ โดยค่าต่างๆ ที่กำหนดนั้นได้มาจากการคำนวณเช่นเดียวกับกับค่าตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 3.3




รูปที่ 3.3 การออกแบบค่าตัวต้านทาน

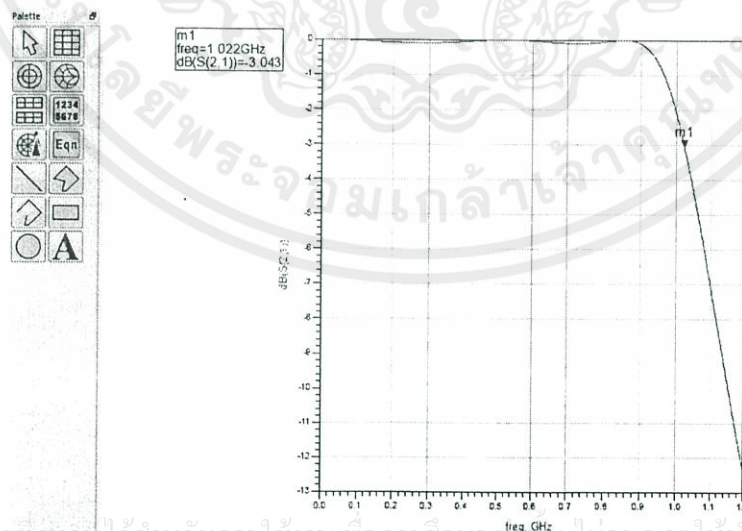
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนำตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาออกแบบตามวงจรที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นและค่ายุติ ตามวงจรที่ต้องการ แสดงตามรูปที่ 3.4



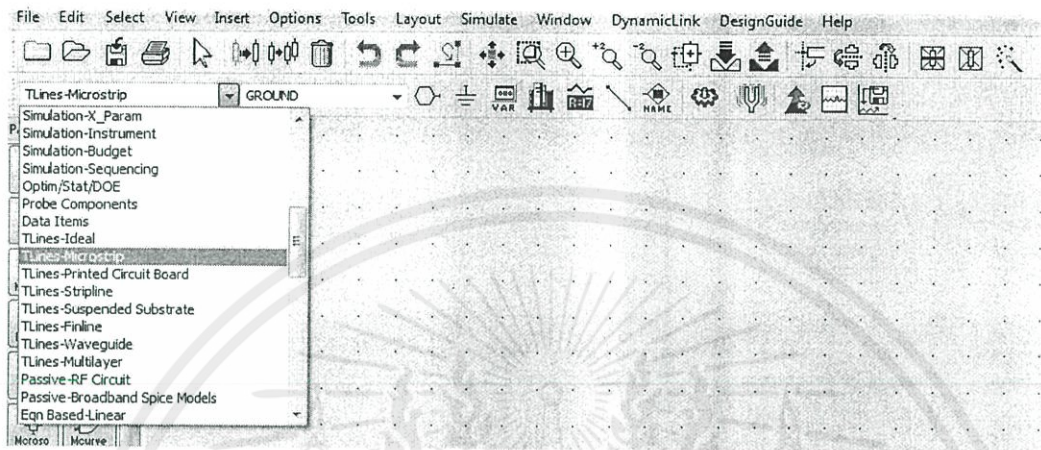
รูปที่ 3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

หลังจากนั้นทำการ simulate วงจร โดยเลือกที่ปุ่ม  ที่กล่องด้านบนของหน้าต่างหรือเลือกที่ Simulate>>Simulate หรือกดปุ่ม F7 หากไม่มีข้อผิดพลาดโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง Simulate และหน้าต่างแสดงกราฟค่าต่างๆของวงจรที่ทดสอบ ดังรูปที่ 3.5



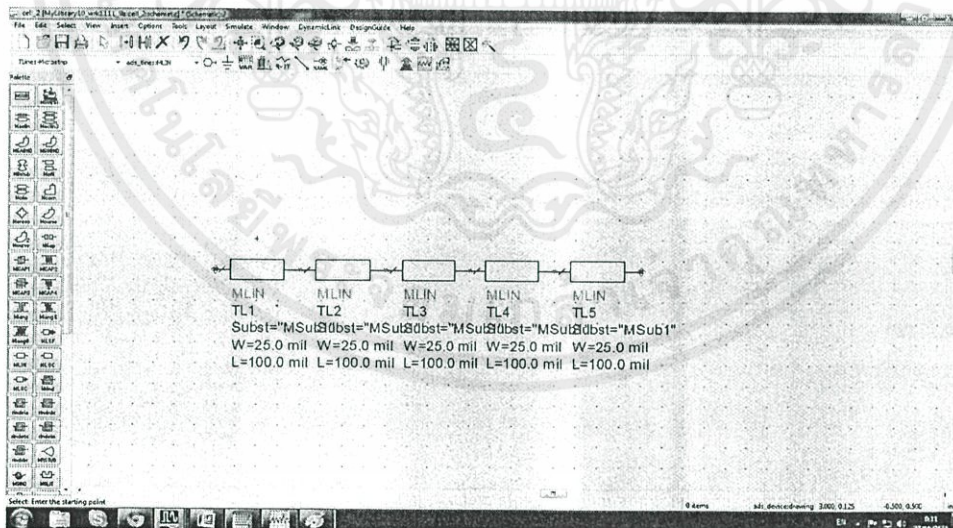
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.5 การ simulate วงจร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อดำเนินการออกแบบวงจรเรียบร้อยแล้ว ได้ค่าและกราฟที่ต้องแล้ว ก็นำวงจรที่ออกแบบได้นั้นมาออกแบบเป็นไมโครสตริปต่อ โดยเลือกที่ TLines-Microstrip ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หน้าต่างการออกแบบไมโครสตริป

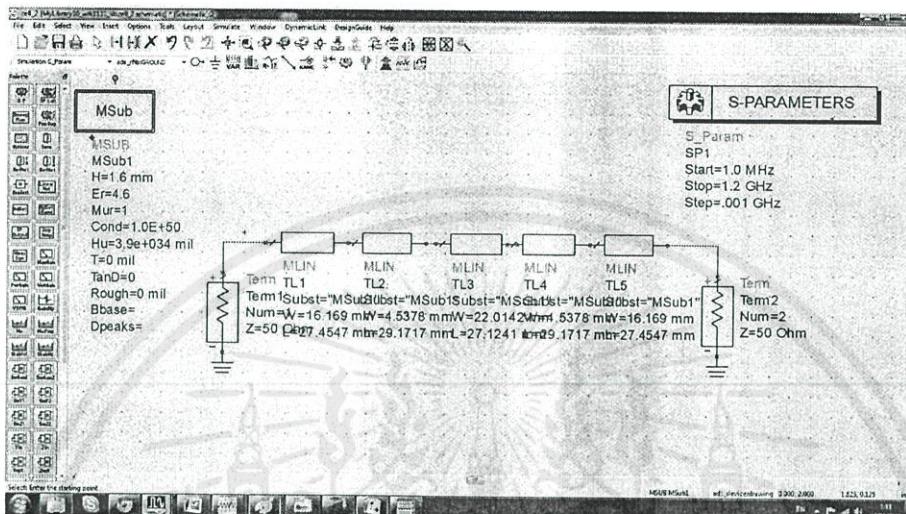
การออกแบบไมโครสตริปในเบื้องต้นสามารถทำได้โดยเลือกที่ MLIN จากอุปกรณ์ด้านซ้ายมือ นำมาเรียงกันตามจำนวนที่ต้องการ และกำหนดค่าตามที่สามารถคำนวณได้จากค่าก่อนหน้า โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกำหนดค่าไมโครสตริป

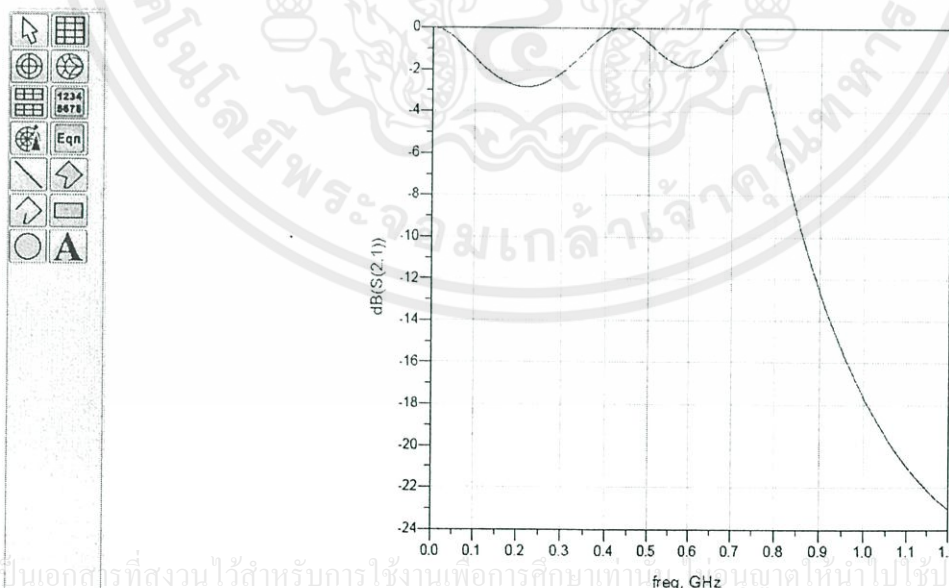
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ ตามค่าที่กำหนดไว้ในข้างต้น โดยค่าที่กำหนด คือ ค่าเริ่มต้นที่ต้องการจะให้เห็น และค่าสุดท้ายที่ให่วงจรหยุด แสดงดังรูปที่ 3.8



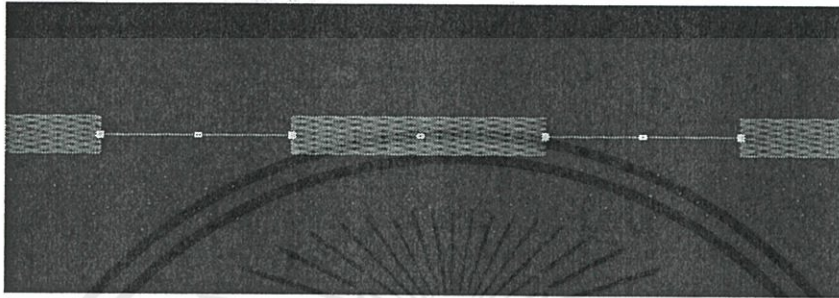
รูปที่ 3.8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในไมโครสตริป

เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของไมโครสตริปเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการ simulate วงจรไมโครสตริปว่าสามารถทำงานได้ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ โดยวิธีการเหมือนกับการ simulate ในวงจรปกติ โดยกราฟที่ได้จากการ simulate นี้ แสดงดังรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกที่รูปที่ 3.9 กราฟที่ได้จากการ simulate วงจรไมโครสตริป การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

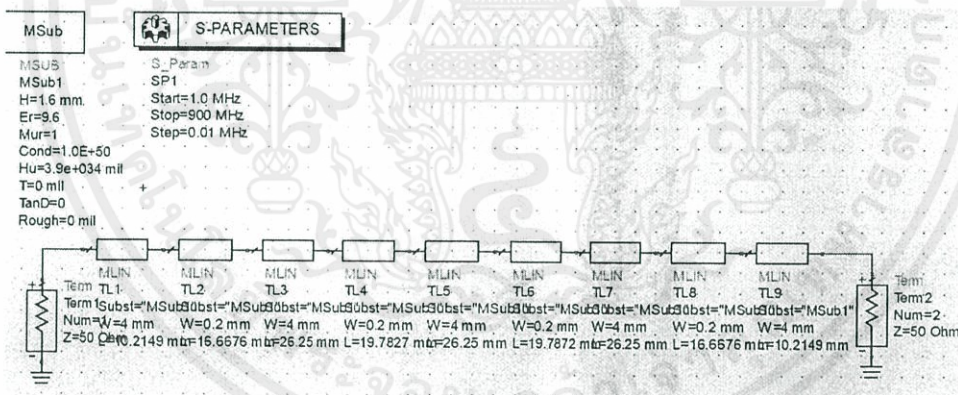
เมื่อ simulate เพื่อได้กราฟที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปสร้างไมโครสตริปจำลองโดยการดึง Layout ของวงจรที่เราสร้างไว้ออกมาโดยเลือกที่ Layout>>Generate/Update Layout โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.10



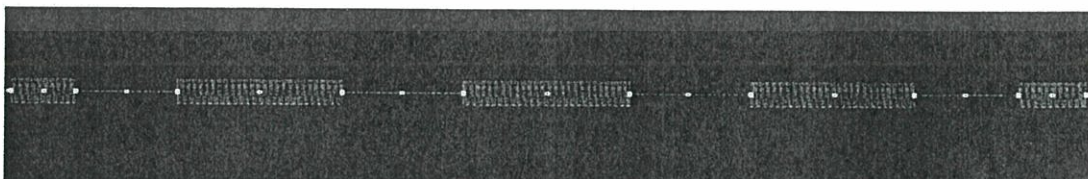
รูปที่ 3.10 Layout ของไมโครสตริปจำลอง

3.1.3 ไมโครสตริปจำลอง

ไมโครสตริปจำลองและLayout 800 MHz แสดงดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12

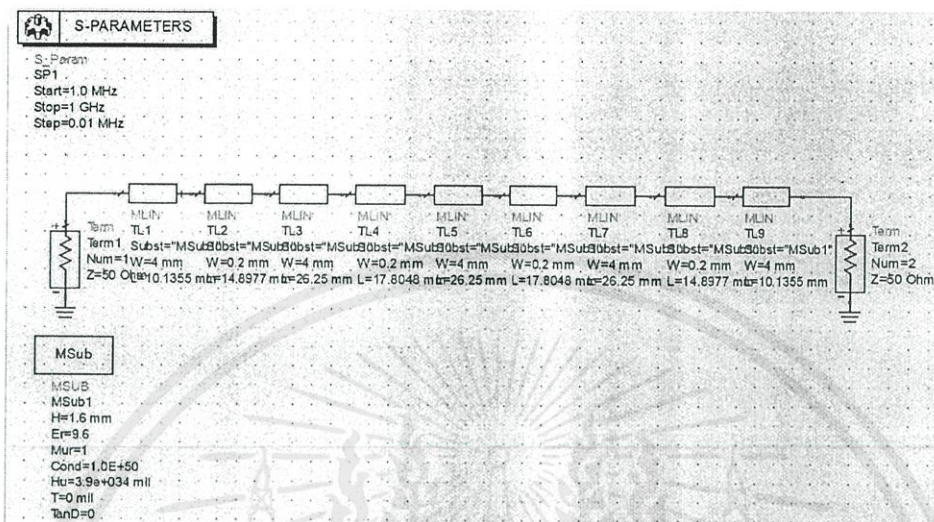


รูปที่ 3.11 ไมโครสตริปจำลอง 800 MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดรูปที่ 3.12 Layout 800 MHz นี้ไปใช้

ไมโครสตริปจำลองและLayout 900 MHz แสดงดังรูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.14

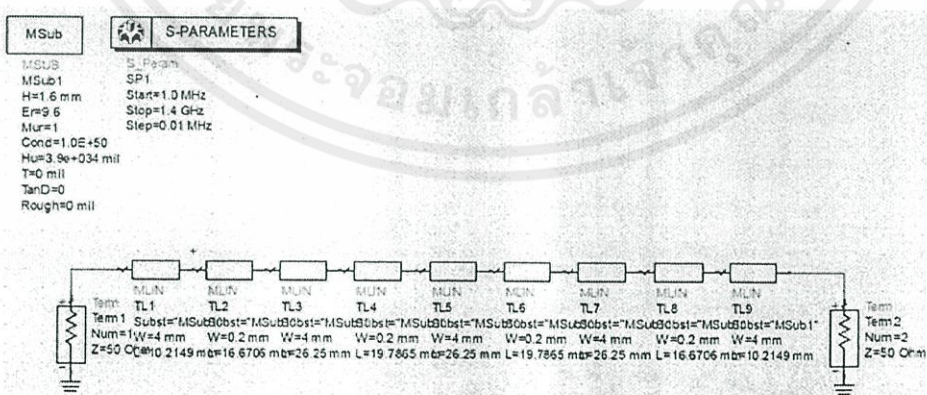


รูปที่ 3.13 ไมโครสตริปจำลอง 900 MHz



รูปที่ 3.14 Layout 900 MHz

ไมโครสตริปจำลองและLayout 1 GHz แสดงดังรูปที่ 3.15 และ รูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ไมโครสตริปจำลอง 1 GHz

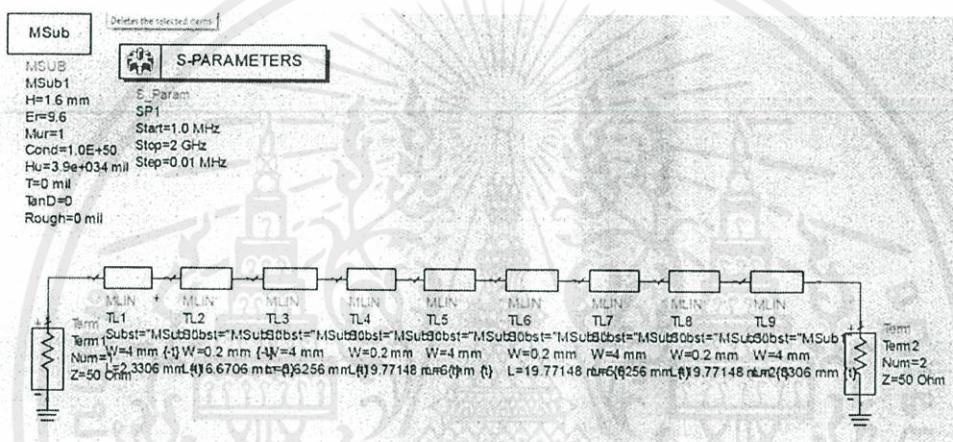
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 3.15 ไมโครสตริปจำลอง 1 GHz ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

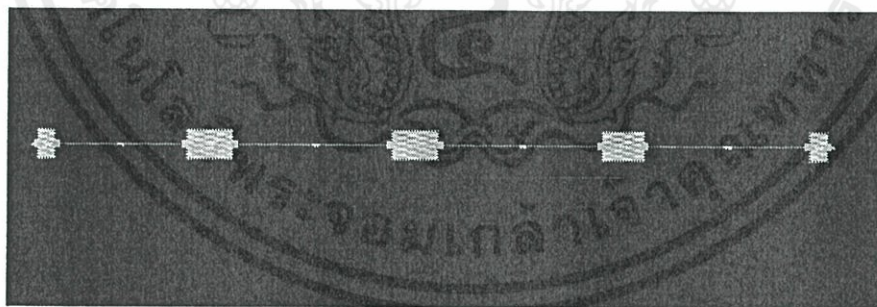


รูปที่ 3.16 Layout 1 GHz

ไมโครสตริปจำลองและLayout 2 GHz แสดงดังรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ไมโครสตริปจำลอง 2 GHz



รูปที่ 3.18 Layout 2 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้การทดลองมีดังต่อไปนี้

1. โปรแกรม Advanced Design System (ADS) จากบริษัท Agilent Technology
2. แผ่นพีซีบี ชนิด Epoxy ทองแดงสองหน้า สำหรับกัดวงจรไมโครสตริป
3. หัวคอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม จำนวน 2 หัว
4. แผ่นฟิล์มสำหรับกัดปรินต์
5. น้ำยาคัดปรินต์
6. สปอตไลท์สำหรับส่องลายลงแผ่นปรินต์
7. น้ำยาเคลือบแผ่นปรินต์ สำหรับเคลือบแผ่นไมโครสตริปหลังจากกัดลายเสร็จ
8. หัวแรงและตะกั่วสำหรับเชื่อมระหว่างหัวคอนเนกเตอร์เอสเอ็มเอ กับแผ่นไมโครสตริป
9. เครื่อง RF Analyzer สำหรับเก็บผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

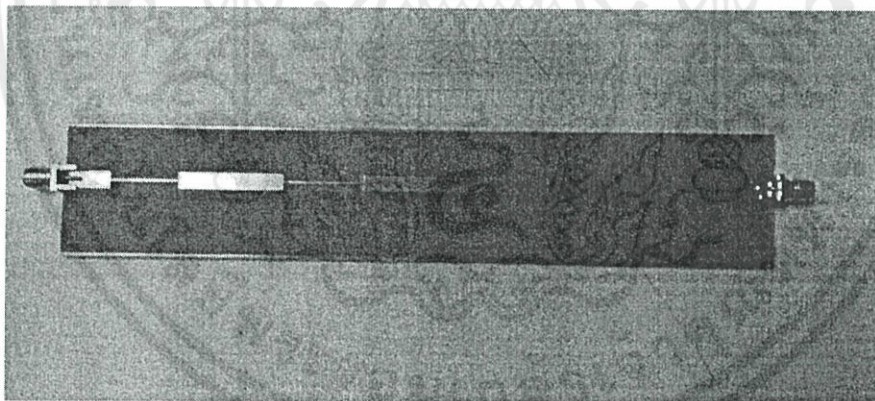
ผลการทดลอง

ต้นแบบของวงจรได้ทำการออกแบบบนโปรแกรม ADS โดยทำการทดสอบการทำงานแต่ละส่วน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี และผลจากการจำลองสามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถวางจรรวมต้นแบบขึ้นมาได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองวงจร Low-pass filter 800 MHz

4.1.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้

การสร้างแผ่นไมโครสตริปจากวงจรที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยนำวงจรที่ออกแบบได้ นำไปกัดลงแผ่นพีซีบี ชนิด Epoxy ทองแดงสองหน้า โดยวงจรจะถูกกัดลงหนึ่งหน้า ส่วนอีกหน้าของแผ่นพีซีบีที่เหลือจะปล่อยให้เป็นกราวด์ของวงจร แผ่นไมโครสตริปที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.1



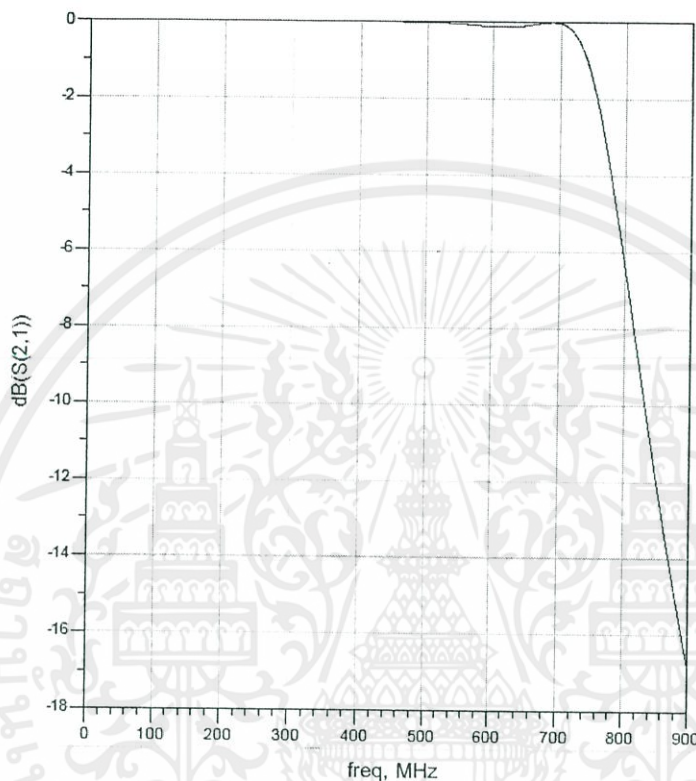
รูปที่ 4.1 แผ่นไมโครสตริป 800 MHz

4.1.2 ผลการ simulate วงจรจากโปรแกรม ADS

การ simulate วงจรที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) ในการจำลองกราฟ โดยค่าที่ต้องการ คือ 800 MHz เมื่อทำการ simulate วงจรแล้ว ทำให้ได้กราฟจำลองที่มีความถี่คutoff อยู่ที่ 780 MHz เนื่องจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรต้นแบบใช้การคำนวณแบบเซปป์เซฟจึงมีrippleของสัญญาณอยู่ในแถบความถี่ผ่านแสดงดังรูปที่ 4.2

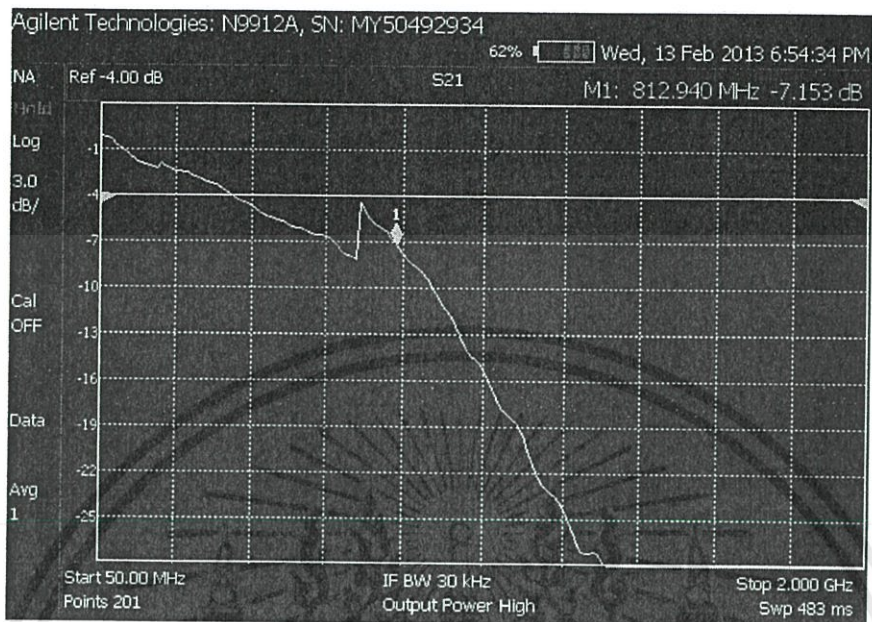


รูปที่ 4.2 กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 800 MHz

4.1.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป

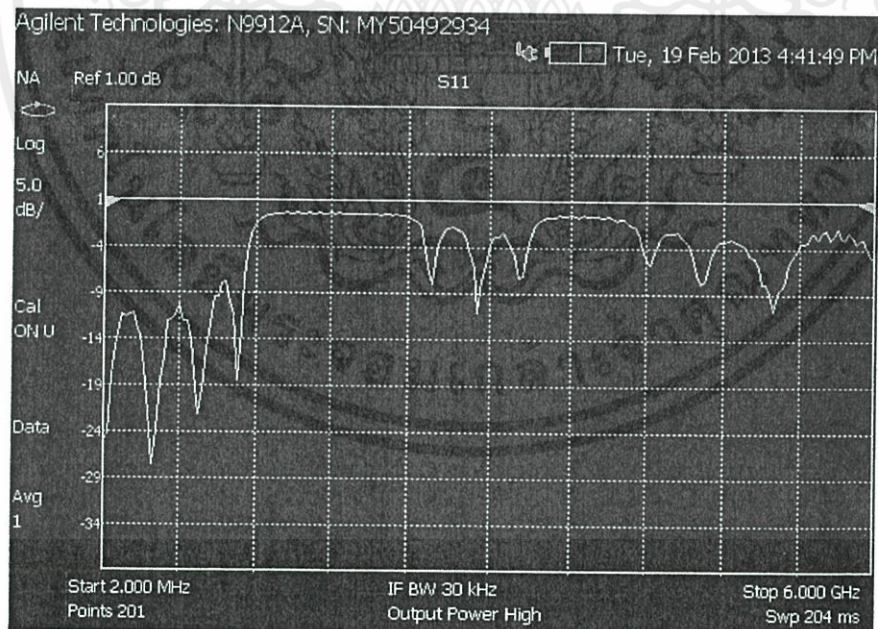
นำแผ่นไมโครสตริป (รูปที่4.1) ที่สร้างไว้มาวัดสัญญาณ โดยใช้เครื่อง RF Analyzer ซึ่งสัญญาณที่วัดได้มีความถี่คutoffอยู่ที่ 895.360 MHz แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 800 MHz

4.1.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน

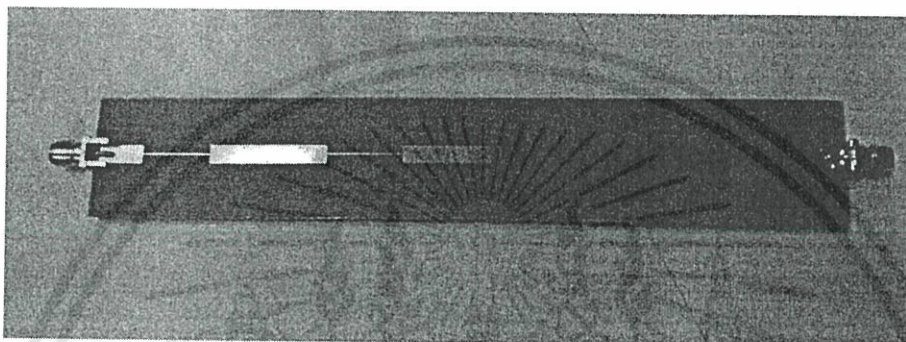


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 800 MHz ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองวงจร Low-pass filter 900 MHz

4.2.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้

เมื่อสามารถออกแบบวงจรได้แล้ว หลังจากนั้นนำวงจรที่สามารถออกแบบได้นั้นมา ออกแบบวงจรไมโครสตริปต่อไป โดยสามารถแสดงดังรูปที่ 4.5

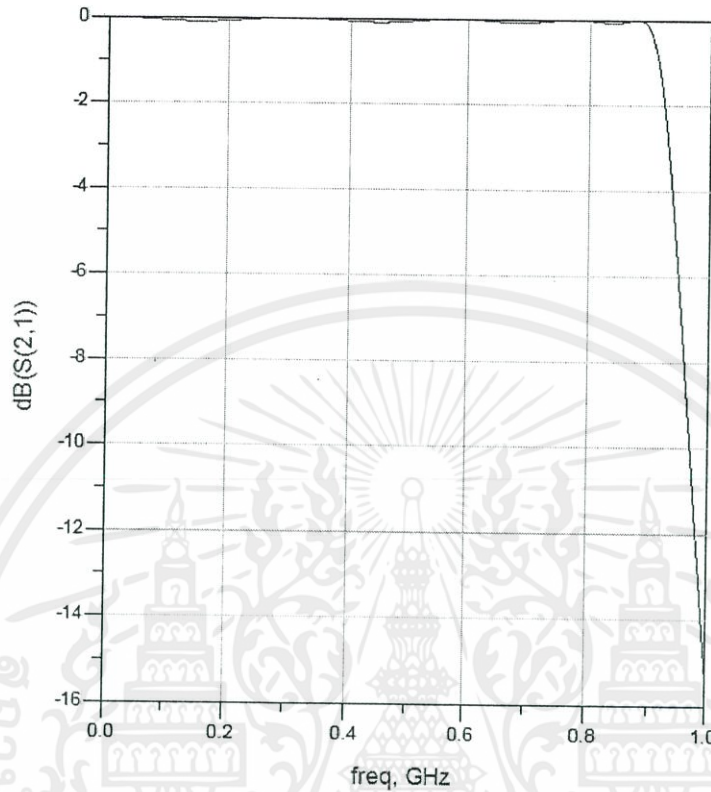


รูปที่ 4.5 แผ่นไมโครสตริป 900 MHz

4.2.2 ผลการ simulate วงจรจากโปรแกรม ADS

การ simulate วงจรที่ได้จากการคำนวณ ได้ใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) ในการจำลองกราฟ โดยค่าที่ต้องการ คือ 900 MHz เมื่อทำการ simulate วงจรแล้ว ทำให้ได้กราฟจำลองที่มีความถี่คutoff อยู่ที่ 900 MHz เนื่องจากการคำนวณ วงจรต้นแบบใช้การคำนวณแบบเซปป์เซฟจึงมี ripple ของสัญญาณอยู่ในแถบความถี่ผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

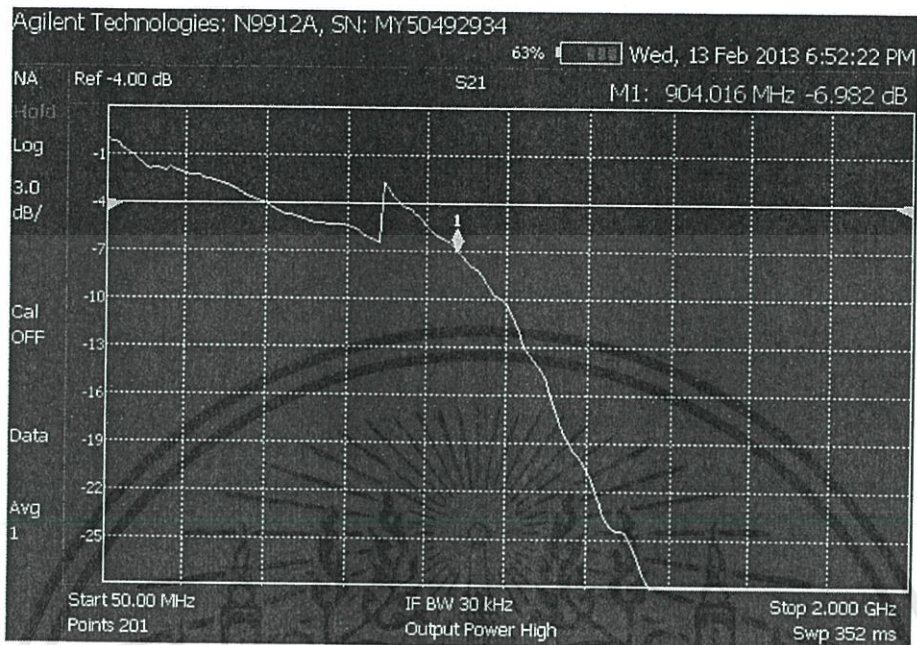


รูปที่ 4.6 กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 900 MHz

4.2.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป

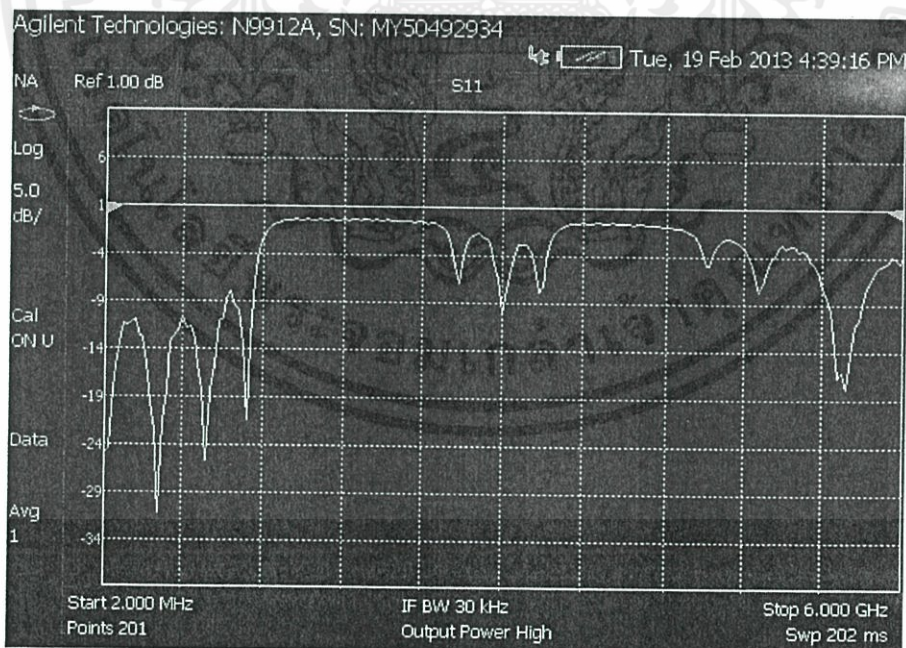
นำแผ่นไมโครสตริป (รูปที่ 4.5) ที่สร้างไว้มาวัดสัญญาณ โดยใช้เครื่อง RF Analyzer ซึ่งสัญญาณที่วัดได้มีความถี่คutoff อยู่ที่ 900.609 MHz แสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 900 MHz

4.2.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน



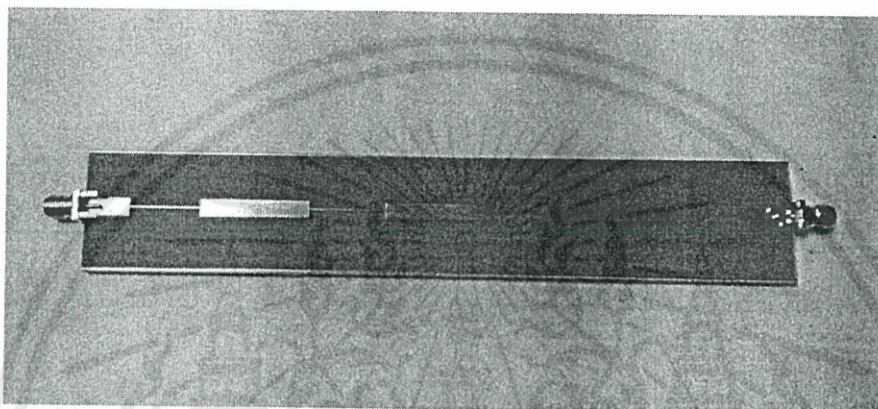
รูปที่ 4.8 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 900 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ตรงที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองวงจร Low-pass filter 1 GHz

4.3.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้

เมื่อสามารถออกแบบวงจรได้แล้ว หลังจากนั้นนำวงจรที่สามารถออกแบบได้นั้นมา ออกแบบวงจรไมโครสตริปต่อไป โดยสามารถแสดงดังรูปที่ 4.9

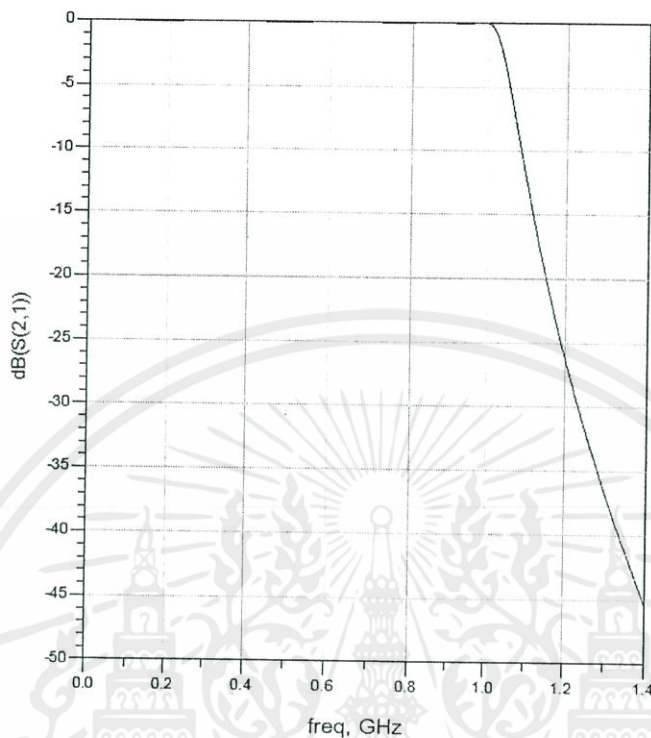


รูปที่ 4.9 แผ่นไมโครสตริป 1 GHz

4.3.2 ผลการ simulate วงจรจากโปรแกรม ADS

การ simulate วงจรที่ได้จากการคำนวณ ได้ใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) ในการจำลองกราฟ โดยค่าที่ต้องการ คือ 1 GHz เมื่อทำการ simulate วงจรแล้ว ทำให้ได้กราฟจำลองที่มีความถี่ตัดออฟอยู่ที่ 1.05 GHz เนื่องจากการคำนวณ วงจรต้นแบบใช้การคำนวณแบบเซมิคอนดัคเตอร์จึงมี ripple ของสัญญาณอยู่ในแถบความถี่ผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

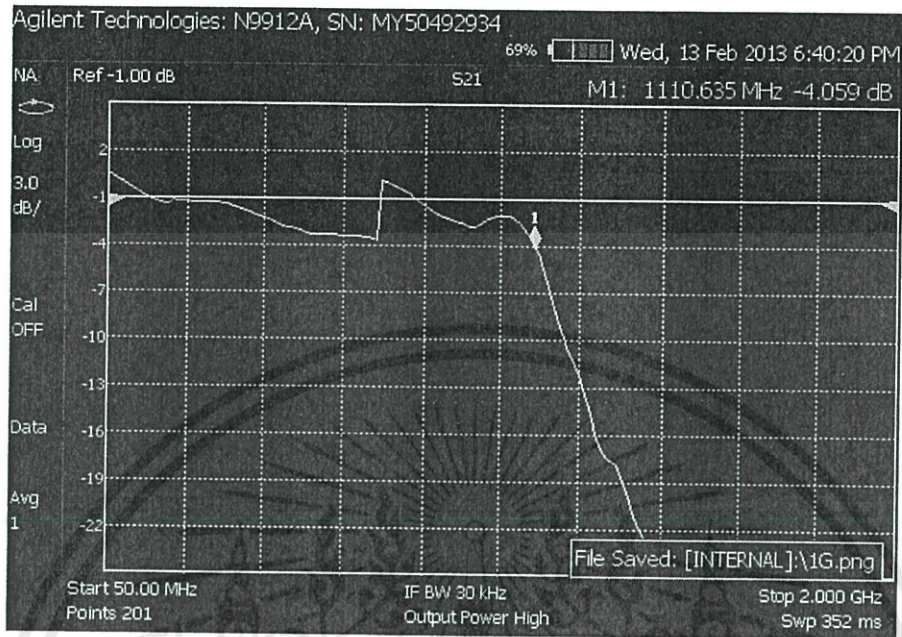


รูปที่ 4.10 กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 1 GHz

4.3.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป

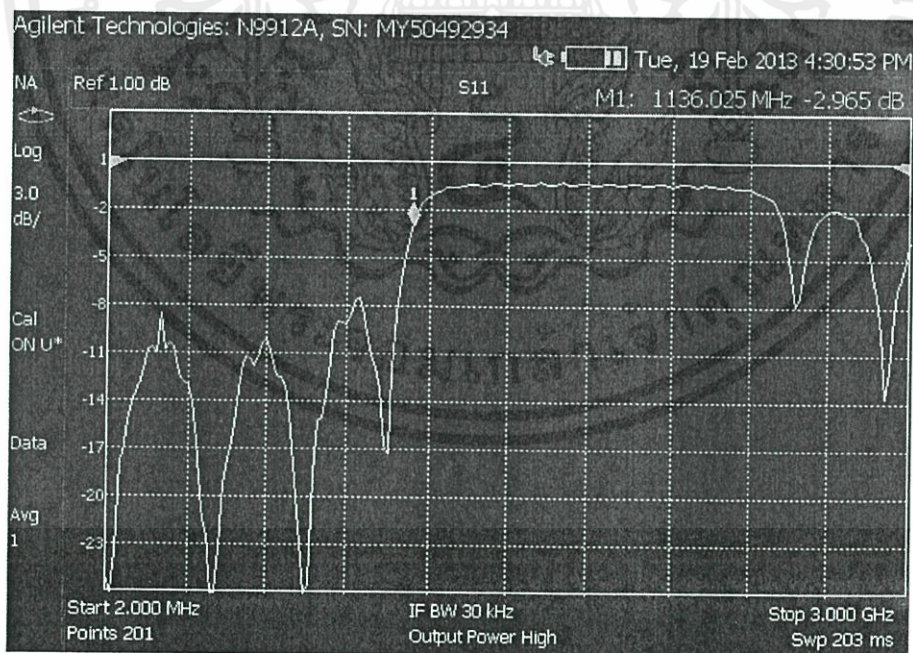
นำแผ่นไมโครสตริป (รูปที่ 4.9) ที่สร้างไว้มาวัดสัญญาณ โดยใช้เครื่อง RF Analyzer ซึ่งสัญญาณที่วัดได้มีความถี่คutoff อยู่ที่ 1.140158 GHz แสดงดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 1 GHz

4.3.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

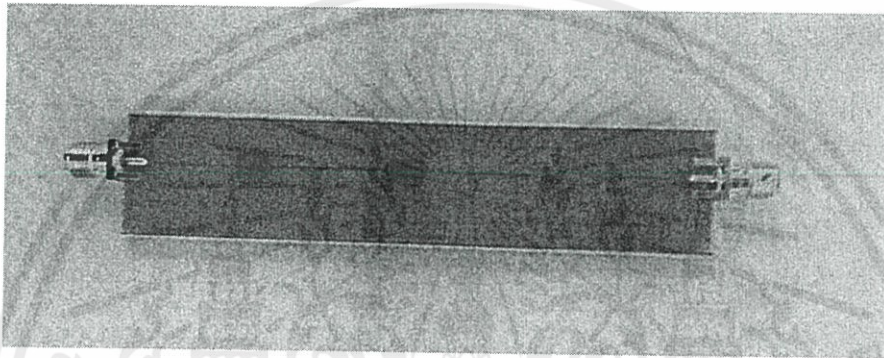
รูปที่ 4.12 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 1 GHz

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดเบสลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองวงจร Low-pass filter 2 GHz

4.4.1 แผ่นไมโครสตริปที่สร้างได้

เมื่อสามารถออกแบบวงจรได้แล้ว หลังจากนั้นนำวงจรที่สามารถออกแบบได้นั้นมา ออกแบบวงจรไมโครสตริปต่อไป โดยสามารถแสดงดังรูปที่ 4.13

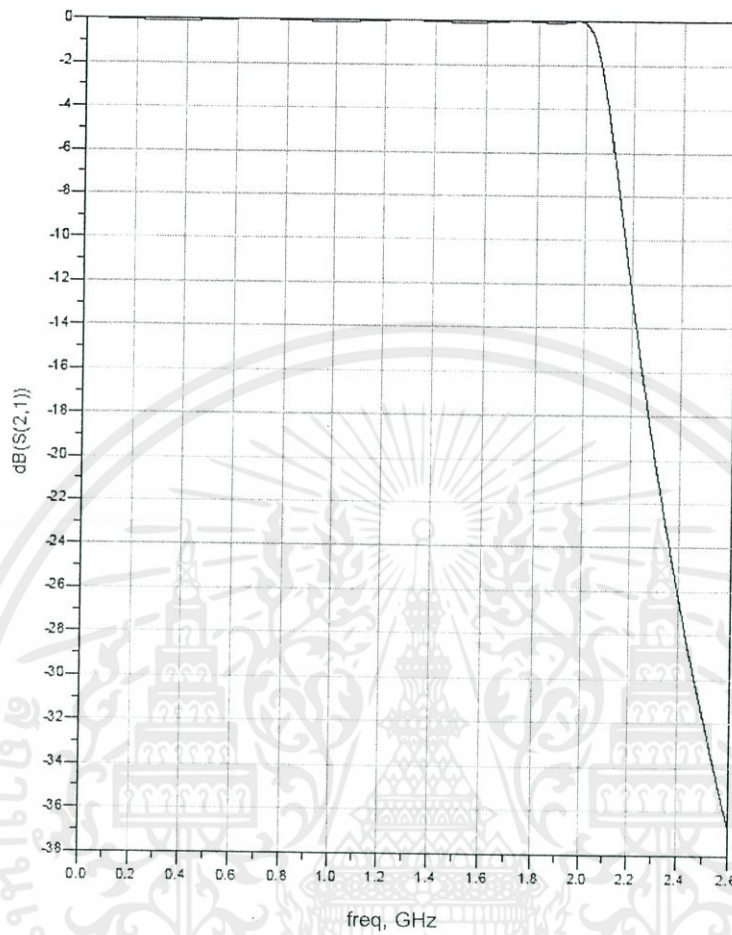


รูปที่ 4.13 แผ่นไมโครสตริป 2 GHz

4.4.2 ผลการ simulate วงจรจากโปรแกรม ADS

การ simulate วงจรที่ได้จากการคำนวณ ได้ใช้โปรแกรม Advanced Design System (ADS) ในการจำลองกราฟ โดยค่าที่ต้องการ คือ 2 GHz เมื่อทำการ simulate วงจรแล้ว ทำให้ได้กราฟจำลองที่มีความถี่ตัดอยู่ที่ 2.10 GHz เนื่องจากการคำนวณ วงจรต้นแบบใช้การคำนวณแบบเซมิคอนดัคเตอร์จึงมี ripple ของสัญญาณอยู่ในแถบความถี่ผ่าน แสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

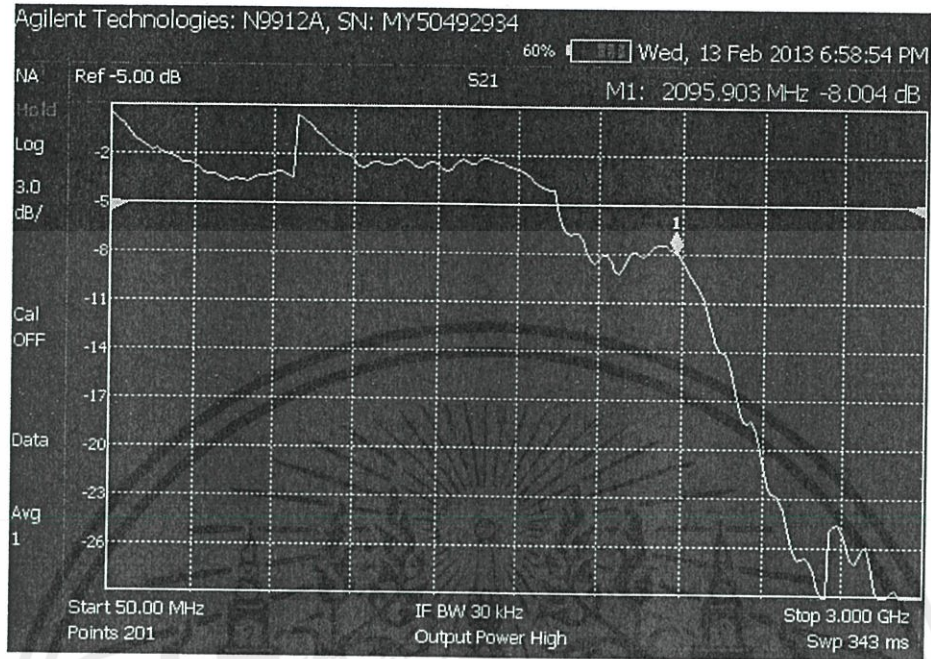


รูปที่ 4.14 กราฟสัญญาณที่ได้จากการจำลองไมโครสตริป 2 GHz

4.4.3 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป

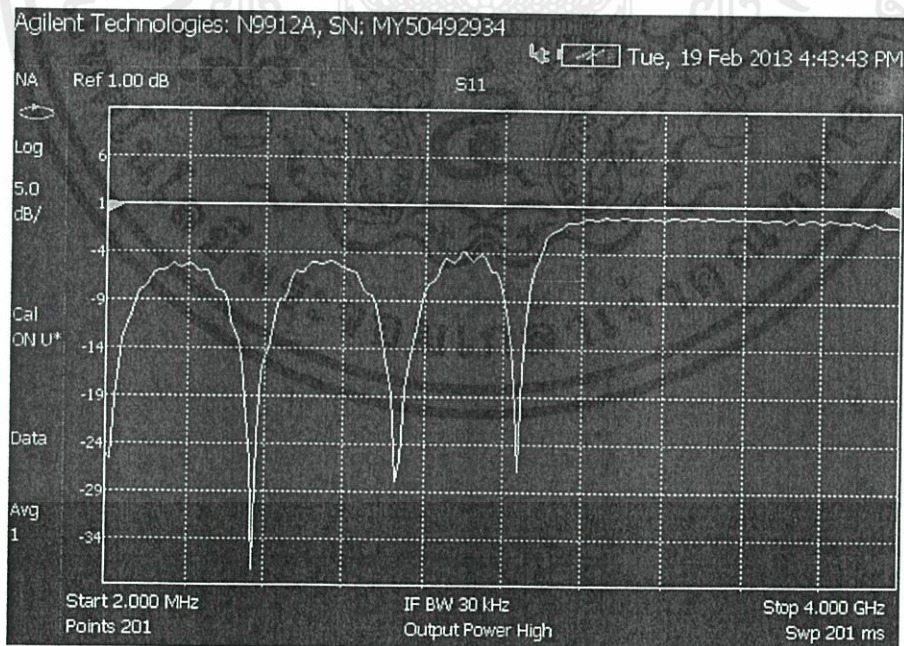
นำแผ่นไมโครสตริป (รูปที่ 4.13) ที่สร้างไว้มาวัดสัญญาณ โดยใช้เครื่อง RF Analyzer ซึ่งสัญญาณที่วัดได้มีความถี่คutoff อยู่ที่ 2.138796 GHz แสดงดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลการวัดสัญญาณจากแผ่นไมโครสตริป 2 GHz

4.4.4 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.16 ผลการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแผ่นไมโครสตริป 2 GHz รังที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและออกแบบวงจรความถี่ต่ำ ในโปรแกรม Advanced Design System (ADS) เพื่อนำมาสร้างแผ่นไมโครสตริป เมื่อนำค่าจากการคำนวณตามทฤษฎีมาทำการ simulate จะได้กราฟผลตอบแทนทางความถี่ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟในอุดมคติแต่เมื่อนำมาสร้างเป็นแผ่นไมโครสตริปจะเกิดการคลาดเคลื่อนมากขึ้นดังต่อไปนี้

Low-pass filter 800 MHz วัดค่าความถี่คutoffของสัญญาณได้ที่ 895.360 MHz
คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 11.8750%

Low-pass filter 900 MHz วัดค่าความถี่คutoffของสัญญาณได้ที่ 900.609 MHz
คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 0.0677%

Low-pass filter 1 GHz วัดค่าความถี่คutoffของสัญญาณได้ที่ 1.140158 GHz
คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 14.0158%

Low-pass filter 2 GHz วัดค่าความถี่คutoffของสัญญาณได้ที่ 2.138796 GHz
คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ 6.9398%

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่สูงสามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายกว่าความถี่ต่ำ เนื่องจากที่ความถี่สูงมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ถ้าเกิดการรบกวนหรือผิดพลาดเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากหลายประการ เช่น การรบกวนจากสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าใกล้เคียง การสัมผัสกับแผ่นไมโครสตริปโดยตรง การคำนวณที่มีการปัดทศนิยม ขั้นตอนการกัดแผ่นไมโครสตริป ความหนาของแผ่นทองแดงที่ไม่ทราบค่าแน่นอน ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการคำนวณควรใช้ค่าทศนิยมที่มีความละเอียดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง การกัดแผ่นไมโครสตริปควรใช้เครื่องมือที่ได้มาตรฐาน ด้วยวิธีที่ถูกต้อง และปัญหาของผู้ศึกษาคือขาดความเชี่ยวชาญในการใช้โปรแกรมจึงควรเรียนรู้และฝึกฝนให้เกิดความชำนาญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] วิวัฒน์ กิรานนท์. วิศวกรรมการสื่อสาร. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2546.
- [2] จิรยุทธ์ มหัทธนกุล. การออกแบบวงจรแอนะล็อก. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล, 2544.
- [3] บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. วิศวกรรมไมโครเวฟ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539
- [4] Wiley, John and Sons. Handbook of filter Synthesis. New York, 1967
- [5] Hong, Jia-Sheng M.J.Lancaster. Microstrip Filters for RF/Microwave Application. New York : ISBN, 2001
- [6] Gupta, K.C., Garg, B.I. and Bhartia, P. Microstrip Lines and slotlines. Norwood : Artech House, 1996
- [7] Edwards, T. Foundations for Microstrip Circuit Design. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1992



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

Microstrip Filters for RF/Microwave Applications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 Butterworth Lowpass Prototype Filters

For Butterworth or maximally flat lowpass prototype filters having a transfer function given in (3.7) with an insertion loss $L_{Ar} = 3.01$ dB at the cutoff $\Omega_c = 1$, the element values as referring to Figure 3.10 may be computed by

$$\begin{aligned}
 g_0 &= 1.0 \\
 g_i &= 2 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n \\
 g_{n+1} &= 1.0
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

For convenience, Table 3.1 gives element values for such filters having $n = 1$ to 9. As can be seen, the two-port Butterworth filters considered here are always symmetrical in network structure, namely, $g_0 = g_{n+1}$, $g_1 = g_n$ and so on.

To determine the degree of a Butterworth lowpass prototype, a specification that is usually the minimum stopband attenuation L_{As} dB at $\Omega = \Omega_s$ for $\Omega_s > 1$ is given. Hence

$$n \geq \frac{\log(10^{0.1L_{As}} - 1)}{2\log\Omega_s}
 \tag{3.25}$$

For example, if $L_{As} = 40$ dB and $\Omega_s = 2$, $n \geq 6.644$, i.e., a 7-pole ($n = 7$) Butterworth prototype should be chosen.

3.2.2 Chebyshev Lowpass Prototype Filters

For Chebyshev lowpass prototype filters having a transfer function given in (3.9) with a passband ripple L_{Ar} dB and the cutoff frequency $\Omega_c = 1$, the element values for the two-port networks shown in Figure 3.10 may be computed using the following formulas:

TABLE 3.1 Element values for Butterworth lowpass prototype filters ($g_0 = 1.0$, $\Omega_c = 1$, $L_{Ar} = 3.01$ dB at Ω_c)

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	2.0000	1.0								
2	1.4142	1.4142	1.0							
3	1.0000	2.0000	1.0000	1.0						
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0					
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0				
6	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0			
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0		
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902	1.0	
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์หรือการที่มิใช่เพื่อการศึกษาโดยไม่มุ่งหมายเพื่อการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_0 = 1.0$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right)$$

$$g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right] \cdot \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right]}{\gamma^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{n}\right]} \quad \text{for } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.26)$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1.0 & \text{for } n \text{ odd} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & \text{for } n \text{ even} \end{cases}$$

where

$$\beta = \ln\left[\coth\left(\frac{L_{Ar}}{17.37}\right)\right]$$

$$\gamma = \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right)$$

Some typical element values for such filters are tabulated in Table 3.2 for various passband ripples L_{Ar} , and for the filter degree of $n = 1$ to 9.

For the required passband ripple L_{Ar} dB, the minimum stopband attenuation L_{As} dB at $\Omega = \Omega_s$, the degree of a Chebyshev lowpass prototype, which will meet this specification, can be found by

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1L_{As}} - 1}{10^{0.1L_{Ar}} - 1}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (3.27)$$

Using the same example as given above for the Butterworth prototype, i.e., $L_{As} \geq 40$ dB at $\Omega_s = 2$, but a passband ripple $L_{Ar} = 0.1$ dB for the Chebyshev response, we have $n \geq 5.45$, i.e., $n = 6$ for the Chebyshev prototype to meet this specification. This also demonstrates the superiority of the Chebyshev design over the Butterworth design for this type of specification.

Sometimes, the minimum return loss L_R or the maximum voltage standing wave ratio $VSWR$ in the passband is specified instead of the passband ripple L_{Ar} . If the return loss is defined by (3.4) and the minimum passband return loss is L_R dB ($L_R < 0$), the corresponding passband ripple is

$$L_{Ar} = -10 \log(1 - 10^{0.1L_R}) \text{ dB} \quad (3.28)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3.2 Element values for Chebyshev lowpass prototype filters ($g_0 = 1.0, \Omega_c = 1$)

For passband ripple $L_{Ar} = 0.01$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.0960	1.0								
2	0.4489	0.4078	1.1008							
3	0.6292	0.9703	0.6292	1.0						
4	0.7129	1.2004	1.3213	0.6476	1.1008					
5	0.7563	1.3049	1.5773	1.3049	0.7563	1.0				
6	0.7814	1.3600	1.6897	1.5350	1.4970	0.7098	1.1008			
7	0.7970	1.3924	1.7481	1.6331	1.7481	1.3924	0.7970	1.0		
8	0.8073	1.4131	1.7825	1.6833	1.8529	1.6193	1.5555	0.7334	1.1008	
9	0.8145	1.4271	1.8044	1.7125	1.9058	1.7125	1.8044	1.4271	0.8145	1.0
For passband ripple $L_{Ar} = 0.04321$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.2000	1.0								
2	0.6648	0.5445	1.2210							
3	0.8516	1.1032	0.8516	1.0						
4	0.9314	1.2920	1.5775	0.7628	1.2210					
5	0.9714	1.3721	1.8014	1.3721	0.9714	1.0				
6	0.9940	1.4131	1.8933	1.5506	1.7253	0.8141	1.2210			
7	1.0080	1.4368	1.9398	1.6220	1.9398	1.4368	1.0080	1.0		
8	1.0171	1.4518	1.9667	1.6574	2.0237	1.6107	1.7726	0.8330	1.2210	
9	1.0235	1.4619	1.9837	1.6778	2.0649	1.6778	1.9837	1.4619	1.0235	1.0
For passband ripple $L_{Ar} = 0.1$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.3052	1.0								
2	0.8431	0.6220	1.3554							
3	1.0316	1.1474	1.0316	1.0						
4	1.1088	1.3062	1.7704	0.8181	1.3554					
5	1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468	1.0				
6	1.1681	1.4040	2.0562	1.5171	1.9029	0.8618	1.3554			
7	1.1812	1.4228	2.0967	1.5734	2.0967	1.4228	1.1812	1.0		
8	1.1898	1.4346	2.1199	1.6010	2.1700	1.5641	1.9445	0.8778	1.3554	
9	1.1957	1.4426	2.1346	1.6167	2.2054	1.6167	2.1346	1.4426	1.1957	1.0

For example if $L_R = -16.426$ dB, $L_{Ar} = 0.1$ dB. Similarly, since the definition of $VSWR$ is

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \tag{3.29}$$

we can convert $VSWR$ into L_{Ar} by

$$L_{Ar} = -10 \log \left[1 - \left(\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right)^2 \right] \text{ dB} \tag{3.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้