การออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

วิทยานิพนธ์

ของ

สมควร ศรีสวัสดิ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

วิทยานิพนธ์

ของ

สมควร ศรีสวัสดิ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Design and Improvement of Microstrip Branch-Line Coupler with Bandstop Filter Based on Microstrip Parallel Coupled Lines

Somkuan Srisawat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)
Academic Year 2018
Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสมควร ศรีสวัสดิ์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. ระวี พรหมหลวงศรี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผศ. ดร. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์)

.... กรรมการ
(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

.... กรรมการ
(อ. ดร. นวรัตน์ พิลาแดง)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

....	....
(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)	(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
	วัน.........เดือน......ปี...........

ชื่อเรื่อง การออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

ผู้วิจัย สมควร ศรีสวัสดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิวัตร์ อังควิศิษฐพันธ์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีการศึกษา** 2561

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ การออกแบบและการเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยเทคนิคการแทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแทนที่สายส่งไมโครสตริปแบบดั้งเดิม ประสิทธิภาพของวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์ที่นำเสนอนี้ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม วงจรนี้ถูกออกแบบและสร้างชิ้นงานที่ความถี่ทำงาน 900 เมกะเฮิรตซ์ บนวัสดุฐานรอง AD260 จากผลการทดลองวงจรบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอนี้พบว่า การสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกต่ำกว่า -3 เดซิเบล ขณะที่การสูญเสียย้อนกลับอินพุตและเอาต์พุตน้อยกว่า -36 เดซิเบล สามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 มากกว่า 40 เดซิเบล ตามลำดับ

คำสำคัญ : วงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ไมโครสตริป, วงจรควอเดรเจอร์ไฮบริด, วงจรเลื่อนเฟส

TITLE	Design and Improvement of Microstrip Branch-Line Coupler with Bandstop Filter Based on Microstrip Parallel Coupled Lines		
AUTHOR	Somkuan Srisawat		
ADVISORS	Assistant Professor Niwat Angkawisittpan , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	**MAJOR**	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Mahasarakham University	**YEAR**	2018

ABSTRACT

The thesis presents the design and improvement of Branch-Line Coupler (BLC). The technique is achieved by using the Band Stop Filter (BSF) based on microstrip parallel coupled lines instead of the conventional transmission lines.The performances of proposed BLC are compared with the conventional BLC in the thesis. The BLC is designed and fabricated for operating frequency of 900 MHz on the AD260 substrate. From the results, it found that the insertion loss was below -3 dB and the return loss was less than -36 dB. The second harmonic suppression could be reduced more than 40 dB.

Keyword : Microstrip branch line coupler, Quadrature hybrid circuit, Phase shifter

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัยจากบุคคลต่างๆ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระวี พรหมหลวงศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ประธานหลักสูตรและดร.นวรัตน์ พิลาแดง กรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงชิ้นงานและรูปเล่มวิทยานิพนธ์ รวมถึงเจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปปฏิบัติการ คุณวรินญา ชื่นใจ ที่ช่วยดำเนินการประสานงานในการแก้ไขปัญหาต่างๆและส่งข่าวสารผ่านระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้ทราบเป็นระยะ ขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ได้ให้โอกาสกระผมได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโทและเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ต่างๆ อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยและสร้างชิ้นงาน ขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณพงศ์ สุมสุข ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ยูสเซอร์เนมและพาสเวิดสำหรับใช้ในการดาวน์โหลดบทความทางวิชาการ IEEE

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณบิดามารดา และ ภรรยาที่สนับสนุนกำลังทรัพย์และเป็นกำลังใจในยามเหนื่อยล้า

สมควร ศรีสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ค

สารบัญ .... ง

สารบัญตาราง .... ฉ

สารบัญภาพประกอบ .... ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและขอบเขตของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์การวิจัย 3

บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล 4

2.1 สายส่งไมโครสตริป 5

2.2 สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป 5

2.3. วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน 10

2.4 วงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน 12

2.5 วงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์ 13

2.6 วงจรแบ่งกำลังงานแบบบาลัน 16

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16

2.8 การพัฒนาประสิทธิภาพด้วยรูปแบบโครงสร้างแบบต่าง 20

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....23
3.1 ปัญหาของสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์.....23
3.2 วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม.....23
3.3 สายส่งแบบขั้นบันได (Step Impedance Transmission Lines: SITLs).....26
3.4 การชดเชยค่าไดเร็กติวิตี้ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดหนึ่งชุด.....27
3.5 เทคนิคการนำเสนอใหม่.....28
3.6 สรุป.....32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....33
4.1 ผลการจำลองวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป.....33
4.2 ชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ.....36
4.3 ผลการวัดและเปรียบเทียบวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ.....38
4.4 การอภิปรายผลการทดลอง.....43
บทที่ 5 สรุปผลอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....44
5.1 สรุปผลและอภิปราย.....44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....44
บรรณานุกรม.....47
ประวัติผู้เขียน.....50

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 1 32

ตาราง 2 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 2 32

ตาราง 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้สร้างวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอ 37

ตาราง 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งขั้นบันไดแบบสองส่วนสำหรับวงจรกรองความถี่หยุดแถบ . 37

ตาราง 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ 42

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 โครงสร้างสายส่งไมโครสตริป[1] 5

ภาพประกอบ 2 โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป [1]...7

ภาพประกอบ 3 วงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน [13] 7

ภาพประกอบ 4 หน้าที่ของพอร์ตต่างๆ [13]...7

ภาพประกอบ 5 (ก) วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน และ (ข) หมายเลขพอร์ตที่สัมพันธ์กับหน้าที่ [1]..10

ภาพประกอบ 6 ลักษณะลักษณะความสัมพันธ์การทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน [13] 11

ภาพประกอบ 7 วงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน (Hybrid ring coupler) [1] 12

ภาพประกอบ 8 วงจรบรานซ์ไลน์ [1]..13

ภาพประกอบ 9 หมายเลขพอร์ตที่สัมพันธ์กับหน้าที่ [1] 14

ภาพประกอบ 10 วงจรสมมูลสายส่งเชื่อมต่อแบบลานจ์ [1, 13]..16

ภาพประกอบ 11 ลักษณะโครงสร้างการต่อสายส่ง (ก) วงจรข่ายรูปแบบพาย [15, 20] (ข) วงจรข่ายรูปแบบที T-Shape [8] (ค) วงจรข่ายรูปร่างพายแบบต่อตัวเก็บประจุ และ (ง) วงจรข่ายรูปร่างแบบทีแบบต่อตัวเก็บประจุ [20]..20

ภาพประกอบ 12 แสดงผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดในแนวแกน Y และความถี่ ในแนวแกน X 21

ภาพประกอบ 13 แสดงโครงสร้างแบบหลายส่วน (Multi section) [10, 23].....................................21

ภาพประกอบ 14 แสดงผลการวัดวงจรบรานซ์ไลน์แบบเพิ่มส่วน (Multi section) [10]....................22

ภาพประกอบ 15 วงจรแบ่งกำลังงานสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม [1].....................23

ภาพประกอบ 16 ลักษณะโครงสร้างวงจรแบ่งกำลังงานแบบสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม [1] 24

ภาพประกอบ 17 ผลการจำลองขนาดของวงจรแบ่งกำลังแบบสายส่งเชื่อมต่อบรานไลน์แบบดั้งเดิม 24

ภาพประกอบ 18 ผลการจำลองผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม.....25

ภาพประกอบ 19 วงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อแบบขั้นบันไดสองส่วน [24]....................................27
ภาพประกอบ 20 สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบชดเชยด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดแบบหนึ่งชุด [24].....27
ภาพประกอบ 21 โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ 28
ภาพประกอบ 22 โครงสร้างนำเสนอด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ 29
ภาพประกอบ 23 วงจรสมมูลสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ 29
ภาพประกอบ 24 แสดงผลการจำลองผลต่างเฟสของสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ 30
ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบผลการจำลองของขนาด ระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ 30
ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบผลการจำลองของผลต่างเฟส ระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ ...31
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่การสูญเสียย้อนกลับ 34
ภาพประกอบ 28 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบการใส่แทรก (Insertion loss).....................34
ภาพประกอบ 29 แสดงผลการจำลองผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อ.......................................35
ภาพประกอบ 30 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบการแยกโดด (Isolation)..............................35
ภาพประกอบ 31 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม 36
ภาพประกอบ 32 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ 36
ภาพประกอบ 33 ผลการวัดทดสอบการสูญเสียย้อนกลับเปรียบเทียบแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ ..38
ภาพประกอบ 34 ผลการวัดทดสอบการใส่แทรกและการลดทอนสัญญาณ 39
ภาพประกอบ 35 แสดงผลการวัดและเปรียบผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อ 40
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงผลการวัดการแยกโดด (Isolation) แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ.........40
ภาพประกอบ 37 ผลการวัดค่า S-parameters สำหรับใช้คำนวณแบนด์วิดท์.................................41

พหูนํ ปณฺ ฑิโต ชีเว

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและขอบเขตของปัญหา

เทคโนโลยีการผลิตวงจร อุปกรณ์ ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย (Communication wireless system) ยังได้รับความนิยมในหมู่นักศึกษา นักวิชาการ และ นักวิจัย เพื่อพัฒนา ปรับปรุง วงจรอุปกรณ์การสื่อสารผ่านคลื่นความถี่ย่านวิทยุ และคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ โดยลักษณะวงจรที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีหลากหลายรูปแบบมีทั้งวงจรแบบพาสซีฟและวงจรแบบแอคทีฟ โดยส่วนใหญ่เลือกพัฒนาวงจรแบบพาสซีฟ เพราะไม่ต้องใช้ไฟเลี้ยงก็สามารถทำงานได้ ผลิตได้ง่าย ต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา วงจรแบบพาสซีฟที่พบเห็นบ่อยมากคือ [1] วงจรกรองความถี่แถบผ่านแบบต่างๆ วงจรเลื่อนเฟส วงจรเชื่อมต่อแบบลานจ์ วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน วงจรแบ่งกำลังงานแบบไดเพล็กเซอร์ วงจรแบ่งกำลังงานแบบควอเดรเจอร์ไฮบริดหรือวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ [2-5]

อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของวงจร ประสิทธิภาพการทำงาน และการเลือกใช้วัสดุฐานรอง (ซับสเตรต) ที่นำมาสร้างเป็นวงจรเพื่อให้ได้ขนาดวงจรที่เล็กกะทัดรัดและมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือ มีหลายตัวเลือกในหนึ่งวงจร [6-9] เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ในระบบเครื่องรับเครื่องส่ง การสื่อสารแบบไร้สายต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่รวมกำลังงาน (มีสัญญาณเข้ามาสองอินพุตสัญญาณออกหนึ่งเอาต์พุตสัญญาณ) และแบ่งกำลังงาน (มีสัญญาณเข้ามาหนึ่งอินพุตสัญญาญออกสองเอาต์พุตสัญญาณ) วงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์เป็นวงจรหนึ่งที่คุณลักษณะรวมและแยกสัญญาณอยู่ภายในตัวเดียวกัน แบนด์วิดท์กว้าง [10] และ มีเฟสระหว่างเอาต์พุตต่างกัน 90 องศาที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล นิยมนำมาใช้ในภาครับภาคส่งของเครื่องรับเครื่องส่งเหมาะสำหรับระบบบรอดแบนด์ นอกจากวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์สามารถรวมและแยกสัญญาณได้แล้วยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น เช่นการการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานแบบหลายแถบความถี่ (Multi-band) [6-9] ในย่านความถี่วิทยุ ใช้ในระบบบาลานซ์แอมพลิไฟเออร์ (Balanced amplifier) บาลานซ์มิกเซอร์ (Balance mixer) [3] บีมฟอร์มิงเนตเวิร์ค (Beam forming network) [8] และเป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave device) สำหรับระบบสื่อสารแบบไร้สาย [9]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ด้วยยังไม่มีใครนำเสนอเรื่อง การลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ในวงจรสายส่งเชื่อมต่อบรานซ์ไลน์ จากผลการจำลองการทำงานของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ส่งผลให้วงจรมีขนาดพื้นที่เล็กลง

ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น การสูญเสียย้อนกลับมีค่าต่ำ และยังสามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้อีกด้วย โดยสร้างขึ้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวงจรสายส่งเชื่อมต่อบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบ และ สร้างวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

1.2.2 วงจรมีขนาดเล็กกว่าวงจรสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม และ สามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษา ออกแบบ และ สร้างวงจรแบ่งกำลังงานสายส่งแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่แถบหยุดบนสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบนำเสนอ อย่างละ 1 วงจรด้วยวัสดุ AD260 ที่ความถี่ใช้งาน 900 เมกะเฮิรตซ์

1.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจรสายส่งเชื่อมต่อบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอดังนี้

1.3.2.1 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) $|S_{11}|$

1.3.2.2 การใส่แทรก (Insertion Loss) ของเอสพารามิเตอร์ (S-parameters) $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$

1.3.2.3 การแยกโดด (Isolate) $|S_{41}|$

1.3.2.4 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

1.3.2.5 ผลต่างเฟส (Difference phase) ของค่าเอสพารามิเตอร์

$$\Delta\phi = |S_{31}| - |S_{21}|$$

1.3.2.6 ขนาดของวงจร

1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์

1.4.2 โปรแกรมการจำลองทางแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4.3 โปรแกรมออกแบบลายวงจร

1.4.4 แผ่นวงจรไมโคร (Microwave PCB)

1.4.5 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายงานแบบเวกเตอร์

1.5 ประโยชน์การวิจัย

ผู้สนใจสามารถศึกษาการออกแบบและสร้างวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปอย่างง่ายด้วยสมการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานและต่อยอดเป็นอุปกรณ์อย่างอื่นสำหรับใช้ในระบบสื่อสารแบบไร้สายย่านไมโครเวฟ หรือเพิ่มแบนด์วิดท์ด้วยเทคนิคการเพิ่มส่วนต่อขยายวงจรแบบอนุกรมได้อีกด้วย

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

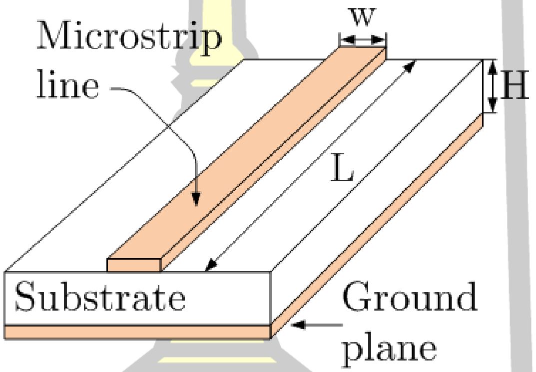
ระบบการสื่อสารไร้สายผ่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟ จากอดีตถึงปัจจุบันมีวิวัฒนาการของการออกแบบและสร้างวงจรแตกต่างกันตามเทคโนโลยี อดีตอุปกรณ์ที่นำมาสร้าง หรือ ประกอบวงจรเป็นอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lump implement) [1, 11, 12] คำนวณด้วยมือต้องใช้ระยะเวลาในการออกแบบ วิเคราะห์ ค่อนข้างยาวนาน วงจรมีขนาดใหญ่ ยิ่งต้องการสัญญาณที่มีคุณภาพสูงวงจรยิ่งมีขนาดใหญ่ วงจรซับซ้อนมาก โดยมีข้อจำกัดเรื่องขนาด ความซับซ้อนของวงจร และ ระยะเวลาในการออกแบบ ทำให้เกิดความล้าช้าต่อการแก้ไขปรับปรุง พัฒนา ปัจจุบันการลดขนาดของวงจรหรือการสร้างอุปกรณ์ด้วยวิธีการสังเคราะห์อุปกรณ์แอคทีฟผ่านลายวงจรพิมพ์ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ ทำให้เกิดความสะดวก ช่วยลดระยะเวลาลงได้ และรวดเร็วต่อการพัฒนา ประกอบกับเทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถช่วยลดขนาดของวงจรได้จริง แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดบางประการซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวงจรซึ่งเกิดจากหลายองค์ประกอบด้วยกัน อาทิเช่น รูปแบบของวงจร วัสดุที่นำมาใช้ [13] เพื่อเพิ่มค่าไดเร็กติวิตี้ ในช่วงความถี่สูง รวมถึงข้อจำกัดเรื่องเทคโนโลยีภายในประเทศ เป็นต้น ดังนั้นผู้ศึกษาต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงข้อจำกัด รูปแบบการสร้าง การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพวงจรที่ดีและเป็นที่ยอมรับได้ ในส่วนนี้ผู้ศึกษามีความสนใจในวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์หรือวงจรควอเดรเจอร์ไฮบริด เนื่องจากเป็นวงจรซึ่งได้รับความนิยมและนำไปใช้งานได้หลากหลาย ในระบบสื่อสารไร้สาย รายละเอียดเบื้องต้นก่อนการพัฒนาหรือปรับปรุงวงจรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์แบบพลาสซีฟ มีดังต่อไปนี้

1. สายส่งไมโครสตริป
2. สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสริป
3. วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน
4. วงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน
5. วงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์
6. วงจรแบ่งกำลังงานแบบบาลัน
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
8. การพัฒนาประสิทธิภาพด้วยรูปแบบโครงสร้างแบบต่าง

พหุ ปณฺ ฑิโต ชีเว

2.1 สายส่งไมโครสตริป

สายส่งไมโครสตริปประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำซึ่งเป็นโลหะทองแดงสองแผ่น ขั้นกลางด้วยวัสดุฐานรอง หรือ ซับสเตรต (Substrate) มีความหนา (High: H) ความกว้าง (Width: W) ความยาว (Length: L) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซับสเตรตมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับโรงงานผู้ผลิต และ คุณสมบัติที่แตกต่างกันไป แผ่นโลหะส่วนบนเป็นลายวงจรเรียกว่า สายส่งไมโครสตริป เมื่อเทียบกับแผ่นโลหะด้านล่างของซับสเตรตทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ (Ground plane) ของวงจร [1]



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างสายส่งไมโครสตริป[1]

นอกจากองค์ประกอบพื้นฐานโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปจากภาพประกอบ 1 ยังมีคุณสมบัติสำคัญบางประการ ในการเลือกวัสดุฐานรองสำหรับการออกแบบ และ สร้างวงจร ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Dielectric permittivity : ε_r) ค่าความหนาของซับสเตรต (Height: H) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ค่าความหนาของทองแดงสัญลักษณ์ (Thickness: T) มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร หรือ ค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) มีหน่วยเป็นซีเมนต่อเมตร และ ค่าความสูญเสีย ($tan\delta$)

2.2 สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป มีความแตกต่างไปจากสายส่งไมโครสตริป โดยประกอบด้วยสายส่งแบบแผ่น (Strip) เป็นตัวนำว่างขนานกันสองเส้น ซึ่งมีความกว้าง (Width: W) มีระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (Space: S) ความยาวของแผ่นตัวนำ (Length: L) ว่างอยู่บนซับสเตรตที่มีความหนา (Height: H) ซึ่งวัสดุไม่เป็นเนื้อเดียวกันและวัสดุฐานรองอีกด้านหนึ่งเป็นระนาบกราวน์

จากภาพประกอบ 3 และภาพประกอบ 4 คุณลักษณะการทำงานของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานสามารถนิยามได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ดังนี้

โดยสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (Coupling factor :C) ได้จากสมการที่ 2.1

เมื่อ S_{11} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างพอร์ตหมายเลข1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 2

V_1 คือ แรงดันอินพุตของพอร์ตหมายเลข 1 ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเส้นที่ 1

V_2 คือ แรงดันอินพุตของพอร์ตหมายเลข 2 ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเส้นที่ 2

$$\text{C(dB)=Coupling factor} = S_{11} = 20\log\left|\frac{V_2}{V_1}\right| \qquad (2.1)$$

ซึ่งประสิทธิภาพของการทำงานของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปสำหรับอัตราการรั่วไหลของสัญญาณระหว่างพอร์ตหมาย 1 ของสายส่งเส้นที่ 1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 3 ของสายส่งเส้นที่ 2 ไม่ควรมี หรือ ให้มีค่าน้อยที่สุดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ไอโซเลชั่น หรือสัมประสิทธิ์การแยกสัญญาณ (Isolation factor: I) ได้จากสมการที่ 2.2

เมื่อ S_{31} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยกโดดสัญญาณระหว่างพอร์ตหมายเลข 1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 3

V_1 คือ แรงดันอินพุตของพอร์ตหมายเลข 1 ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเส้นที่ 1 เมื่อเทียบกับแรงดันเอาต์พุตของพอร์ตหมายเลข 3 ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเส้นที่ 2

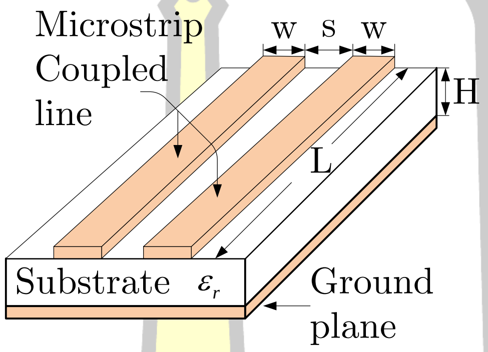
V_3 คือ แรงดันเอาต์พุตของพอร์ตหมายเลข 3 ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเส้นที่ 2

$$\text{I(dB)} = \text{Isolation} = S_{31} = 20\log\left|\frac{V_3}{V_1}\right| \qquad (2.2)$$

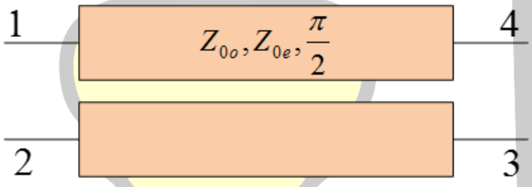
พหุปัญญา ศึกโต ชีโว

และสามารถคำนวณหาค่าไดเร็กติวิตี้ (Directivity: D) หรือความสามารถในการแยกสัญญาณระหว่างพอร์ตหมายเลข 2 และพอร์ตหมาย 3 ได้จากสมการที่ 2.3

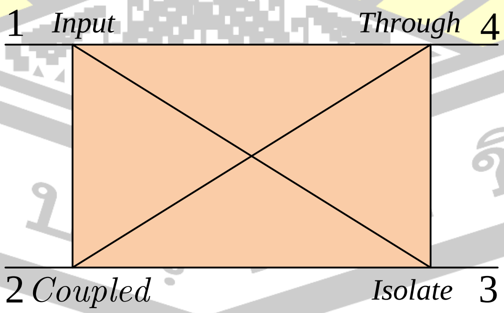
$$D(dB) = 20\log\left|\frac{V_2}{V_3}\right| = \mathit{Directivity} = C(dB) - I(dB) \qquad (2.3)$$



ภาพประกอบ 2 โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป [1]



ภาพประกอบ 3 วงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน [13]



ภาพประกอบ 4 หน้าที่ของพอร์ตต่างๆ [13]

จากนิยามค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป เราสามารถที่จะเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้กับตัวแปรทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานได้ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และออกแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานจากค่าตัวแปรทางไฟฟ้าเหล่านี้ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อแรงดัน (Voltage coupling coefficient : k) รวมทั้งอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นในโมดคู่และโมดคี่ที่เดินทางบนสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานซึ่งค่าต่างๆ มีนิยามดังนี้

- สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อแรงดัน (Voltage coupling coefficient)

$$\mathrm{k} = 10^{-C/20} \tag{2.4}$$

- สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อที่ความถี่กลาง (coupling coefficient at f_0)

$$C = \left| \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \right| \tag{2.5}$$

หรือ $$\mathrm{C(dB)} = 20\log_{10} \left| \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \right| \tag{2.6}$$

ส่วนสมการอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของคลื่นในโมดคู่และโมดคี่ $(Z_{0e}\ Z_{0o})$ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อที่ต้องการจะอยู่ในรูปสมการ

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \tag{2.7}$$

และ $$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \tag{2.8}$$

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_0 จะเชื่อมโยงกับค่า Z_{0e} และ Z_{0o} ในรูปสมการ

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} \tag{2.9}$$

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

เนื่องจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานเป็นโครงข่ายไฟฟ้าแบบสี่พอร์ต เมทริกซ์ของพารามิเตอร์กระจัดกระจาย ซึ่งมีขนาดและสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$[S]_P = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

ในกรณีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานในอุดมคติซึ่งเป็นสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบสมมาตรที่สามารถรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบตั้งฉากและปราศจากการสูญเสีย (Symmetrical lossless TEM coupler) เราจะได้พารามิเตอร์กระจัดกระจายเป็น

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0 \tag{2.11}$$

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0 \tag{2.12}$$

ในขณะที่

$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = \frac{jC\sin\theta}{\sqrt{1-C^2}\cos\theta + j\sin\theta} \tag{2.13}$$

และ

$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = \frac{jC\sin\theta}{\sqrt{1-C^2}\cos\theta + j\sin\theta} \tag{2.14}$$

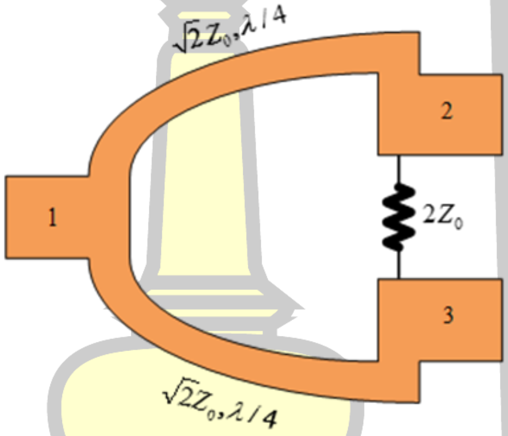
ในกรณีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีความยาวเชิงมุมเป็น $\theta = \frac{\pi}{2}$ ค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจายของสายส่งคือ

$$[S]_P = \begin{bmatrix} 0 & C & 0 & -j\sqrt{1-C^2} \\ C & 0 & -j\sqrt{1-C^2} & 0 \\ 0 & -j\sqrt{1-C^2} & 0 & C \\ -j\sqrt{1-C^2} & 0 & C & 0 \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

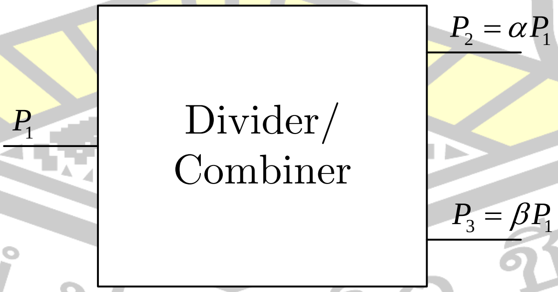
พหุน ปณฺ ฯ ชีวา

จากสมการที่ 2.15 จะได้ค่าอัตราไอโซเลชั่นมีค่าเป็นศูนย์ $S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0$ อย่างไรก็ตาม กรณีอัตราไอโซเลชั่นมีค่าเป็นศูนย์จะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีที่สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบอุดมคติเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วผลกระทบหลายกรณี อาทิเช่น การออกแบบ การวาดลายวงจร เทคโนโลยีสายส่งที่ใช้สังเคราะห์เป็นต้น ล้วนแล้วแต่ทำให้อัตราไอโซเลชั่นไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่สามารถจำลองพฤติกรรมของสายส่งแบบคู่ขนานในทางปฏิบัติได้คือ (กรณีความยาวเชิงมุมเป็น $\theta = \dfrac{\pi}{2}$)

2.3. วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน



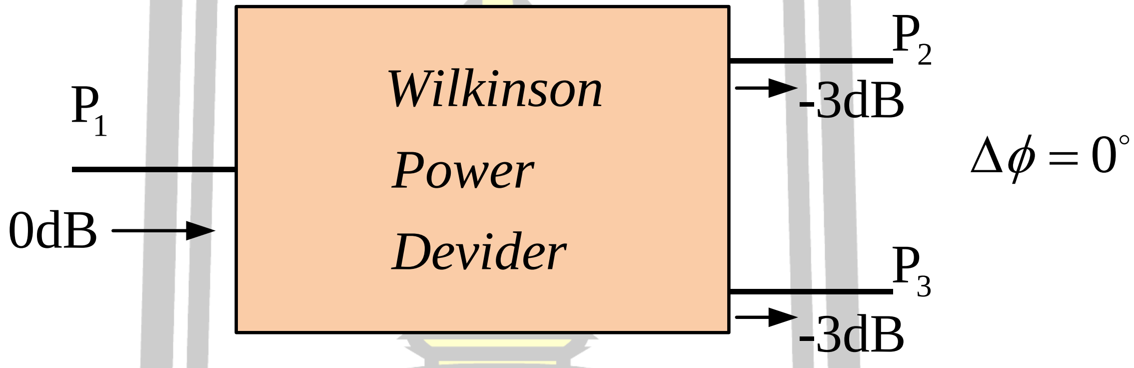
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 5 (ก) วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน และ (ข) หมายเลขพอร์ตที่สัมพันธ์กับหน้าที่ [1]

วงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน (Wilkinson power divider) มีลักษณะของโครงสร้างวงจรแบบสามพอร์ตดังภาพประกอบ 5 มีความยาวทางไฟฟ้า 90 องศา ค่าความต้านทานของสายส่งเชื่อมต่อเท่ากับ $\sqrt{2}Z_0$ หรือ 70.7 โอห์มและมีค่าความต้านทานต่อคร่อมอยู่ระหว่างพอร์ตเอาต์พุตเท่ากับ $2Z_0$ หรือมีค่าความต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม เพื่อทำหน้าแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรให้มีค่าเข้าใกล้ค่าความต้านทาน 50 โอห์ม และมีขนาดของการส่งผ่านกำลังงานเป็น 3 เดซิเบล โดยไม่มีผลต่างเฟสระหว่างเอาต์พุตหรือเฟสสมดุล 0 องศา เนื่องจากวงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสันเป็นโครงข่ายไฟฟ้าแบบสามพอร์ต เมทริกซ์พารามิเตอร์กระจัดกระจายจึงมีขนาด 3x3 และ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปเป็น



ภาพประกอบ 6 ลักษณะลักษณะความสัมพันธ์การทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน [13]

$$[S]_D = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

กรณีวงจรแบ่งกำลังงานเป็นอุปกรณ์แบบอุดมคติ เราจะได้พารามิเตอร์กระจัดกระจายดังนี้

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0 \tag{2.17}$$

ใขณะที่

$$S_{12} = S_{21} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \tag{2.18}$$

และ

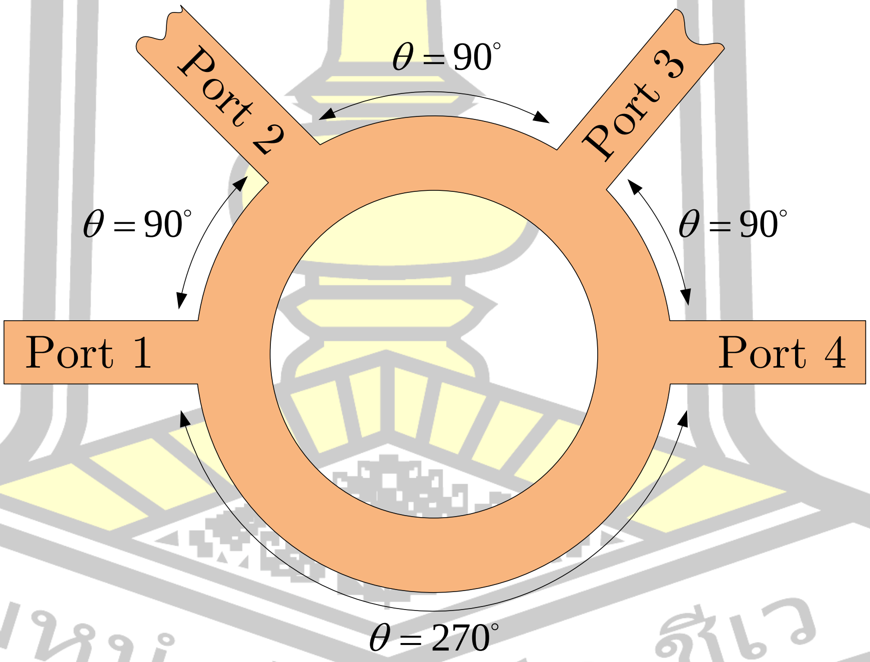
$$S_{13} = S_{31} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \tag{2.19}$$

ซึ่งจะมีเมทริกซ์อยู่ในรูปสมการ

$$[S]_D = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 0 & -j & -j \\ -j & 0 & 0 \\ -j & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

2.4 วงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน

จากภาพประกอบ 7 หลักการทำงานของวงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน เมื่อพอร์ตหมายเลข 1 คืออินพุตของสัญญาณ และพอร์ตหมายเลข 2 กับ พอร์ตหมายเลข 4 คือเอาต์พุตของวงจรทำหน้าที่แบ่งหรือร่วมกำลังงานมีเฟสเอาต์พุตต่างกัน 180 องศา และ พอร์ตหมายเลข 3 ทำหน้าที่แยกสัญญาณระหว่างพอร์ตหมายเลข 2 กับพอร์ตหมายเลข 4 ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนกันหรือป้องกันการรั่วไหลของสัญญาให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์



ภาพประกอบ 7 วงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน (Hybrid ring coupler) [1]

จากสมการที่ 2.21 คือสมการการกระจัดกระจายแบบเมทริกซ์ ในทางอุดมคติที่ใช้ในการออกแบบที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล ของวงจรเชื่อมต่อแบบแรทเลซ (Rat-Race coupler) หรือ รู้จักกันในนามของวงจรไฮบริดเชื่อมต่อแบบวงแหวน (Hybrid ring coupler)

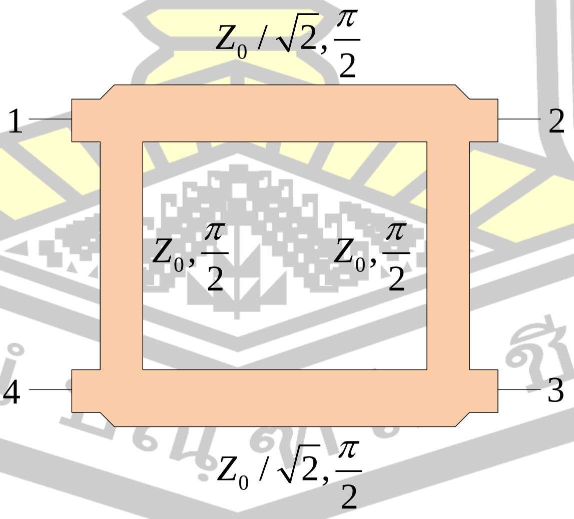
พหูน ปณฺ ทิโต ชีเว

โดยสายส่งตัวนำซึ่งมีความยาวทางไฟฟ้าครึ่งวงกลมด้านบนต่างกัน 90 องศา ระหว่าง พอร์ตหมายเลข 1 2 3 4 และความยาวทางไฟฟ้าระหว่างพอร์ตหมายเลข 1 ถึง พอร์ตหมายเลข 4 เท่ากับ 270 องศา โดยแต่ละพอร์ตที่ต่อใช้งานจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 50 โอห์ม

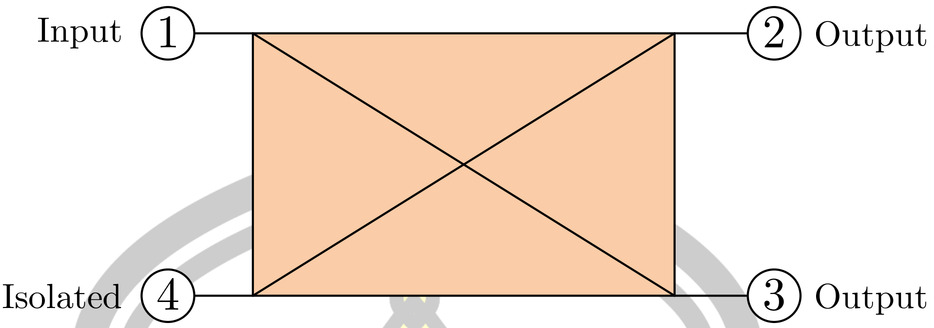
$$S = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

2.5 วงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์

วงจรบรานซ์ไลน์หรือวงจรควอเดรเจอร์ไฮบริด (Quadrature hybrid) ดังแสดงในภาพประกอบ 8 เป็นวงจรแบ่งกำลังงานที่มีผลต่างเฟส 90 องศา ระหว่างพอร์ตเอาต์พุตหมายเลข 2 และพอร์ตหมายเลข 3 ซึ่งมีขนาดการส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล จากภาพประกอบ 9 สามารถอธิบายหมายเลขพอร์ตที่สัมพันธ์กับหน้าที่หรือลักษณะในการทำงานจะประกอบไปด้วยพอร์ตหมายเลข 1 คือพอร์ตอินพุต (Input port) พอร์ตที่ 2 คือพอร์ตเอาต์พุต (Output port) พอร์ตหมายเลข 3 คือพอร์ตเอาต์พุต (Output port) และพอร์ตหมายเลข 4 คือพอร์ตไอโซเลต (Isolate port)



ภาพประกอบ 8 วงจรบรานซ์ไลน์ [1]



ภาพประกอบ 9 หมายเลขพอร์ตที่สัมพันธ์กับหน้าที่ [1]

ซึ่งจะแตกต่างกับกรณีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างพอร์ตต่างๆ ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานจะได้นิยามของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานดังนี้

- ไอโซเลชั่น (Isolation factor: I)

$$\mathrm{I(dB)} = \mathrm{Isolation} = \mathrm{S}_{41} = 20\log\left|\frac{\mathrm{V}_4}{\mathrm{V}_1}\right| \qquad (2.22)$$

- ค่าไดเร็กติวิตี้ (Directivity: D) หรือความสามารถในการแยกสัญญาณ ระหว่างพอร์ต หมายเลข 3 และ 4

$$\mathrm{D(dB)} = 20\log\left|\frac{\mathrm{V}_3}{\mathrm{V}_4}\right| = \mathit{Directivity} = \mathrm{C(dB)} - \mathrm{I(dB)} \qquad (2.23)$$

เนื่องจากสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานเป็นโครงข่ายไฟฟ้าแบบสี่พอร์ต ดังนั้นเมทริกซ์กระจัดกระจายจึงมีขนาด 4x4 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$[S]_P = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \qquad (2.24)$$

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

กรณีอุปกรณ์บรานซ์ไลน์มีความสมมาตร ดังนั้นลักษณะของพารามิเตอร์กระจัดกระจายสำหรับอุปกรณ์แบบสมมาตรคือ

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0 \quad (2.25)$$

$$S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = 0 \quad (2.26)$$

กรณีอุปกรณ์เป็นแบบอุดมคติ

$$S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \quad (2.27)$$

และ

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = \frac{-1}{\sqrt{2}} \quad (2.28)$$

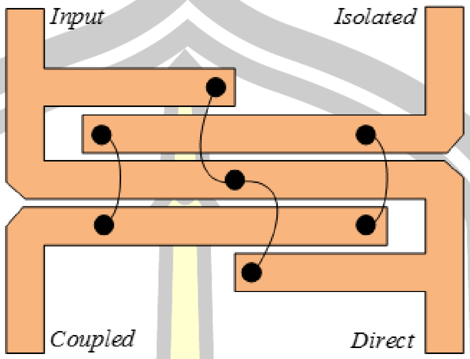
ในกรณีของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีความยาวเชิงมุมเป็น $\theta = \frac{\pi}{2}$ จะได้

$$[S]_Q = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

สังเกตจากผลลัพธ์ที่ได้ในสมการ 2.29 ค่าอัตราไอโซเลชั่นของอุปกรณ์บรานซ์ไลน์ในอุดมคติจะมีค่าเป็นศูนย์ $S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} = 0$ อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติ ค่าอัตราไอโซเลชั่นของอุปกรณ์จะไม่เท่ากับศูนย์ $(S_{14} = S_{41} = S_{23} = S_{32} \neq 0)$ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการจัดวางลายวงจรพิมพ์ การสูญเสียทางไฟฟ้าเป็นต้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจายของอุปกรณ์ บรานซ์ไลน์ในทางปฏิบัติจะเป็นดังนี้

วงจรเรโซเนเตอร์แบบบรานไลน์เป็นวงจรแบ่งหรือรวมกำลังงานอีกแบบหนึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากสายส่งเชื่อมต่อไมโครสตริป หรืออุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lumped) เป็นวงจรแบบ 4 พอร์ต มีส่วนประกอบดั้งนี้ หนึ่งพอร์ตอินพุต Input จำนวน 1 พอร์ต สองพอร์ตเอาต์พุต Output จำนวน 2 พอร์ต สามพอร์ตแยกสัญญาณ Isolate จำนวน 1 พอร์ต เมื่อมีสัญญาณเข้ามาพอร์ต 1 คือพอร์ตอินพุตจะมีการหน่วงสัญญาณหรือแยกสัญญาณออกเป็นสองส่วนโดยมีผลสัญญาณต่างเฟสหระว่างเอาต์พุตพอร์ตเท่ากับ 90 องศา

2.6 วงจรแบ่งกำลังงานแบบบาลัน



ภาพประกอบ 10 วงจรสมมูลสายส่งเชื่อมต่อแบบลานจ์ [1, 13]

สายส่งเชื่อมต่อแบบลานจ์คิดค้นโดย ดร. จูเลียส ลานจ์ แห่งบริษัทเทกซัส อินสตูเมนต์ เมื่อปี 1969 [12, 14] เพื่อใช้ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณด้วยเทคโนโลยีแบบฟิล์มบางและเพื่อแก้ปัญหาเรื่องระยะห่าง s ระหว่างแผ่นตัวนำที่มีขนาดแคบมากของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบแผ่นตัวนำสองเส้น ในกรณีที่ต้องการใช้งานสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานที่มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อสูงๆ เช่น 3 เดซิเบล เพื่อนำไปสร้างวงจรสายส่งแปลงอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นส่วนประกอบพาสซีฟที่สำคัญในวงจรขยายสัญญาณแบบบาลานซ์ จากภาพประกอบ 10 ลักษณะการทำงานของวงจรบาลัน เมื่อมีสัญญาณเข้ามาพอร์ตอินพุตคือพอร์ต 1 จะมีการแยกสัญญาณหรือแบ่งกำลังงานออกเป็นสองแหล่ง แหล่งที่ 1 ออกไปทางพอร์ต Direct แหล่งที่ 2 ออกไปทางพอร์ต Coupled ซึ่งมีเฟสต่างกัน 180 องศา และมีพอร์ต Isolate สำหรับแยกสัญญาณรบกวนระหว่างพอร์ต Direct และพอร์ต Coupled ด้วย

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกเหนือจากการปรับปรุงจุดเด่นด้านประสิทธิภาพการทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานในอดีต ปัจจุบันในหนึ่งวงจรมีความสามารถหรือตัวเลือกมากขึ้น วงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบหลายย่านความถี่ และ การลดขนาดวงจร เป็นที่นิยมมากในช่วงปัจจุบัน

Lin F และ คณะ [2] นำเสนอวิธีการควบคุมความถี่ทำงานสายส่งแบบบรานซ์ไลน์จำนวน 3 ย่านความถี่โดยใช้สมการสำเร็จรูป ในการปรับปรุงโดยการแมตซ์อิมพีแดนซ์ในวงจรที่ละพอร์ต ตรวจสอบย่านความถี่ทำงานที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล ที่ความถี่ใช้งาน 0.9 2.0

และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สร้างและวัดผลได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และอัตราการแยกโดดดีกว่า 15 เดซิเบล และ 20 เดซิเบล แบนด์วิดท์ 40 เมกะเฮิรตซ์ ผลต่างเฟสระหว่างเอาต์พุตเท่ากับ 90 องศา มีค่าคลาดเคลื่อน ±3 องศา

Arriola WA และ คณะ [3] นำเสนอวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แถบกว้าง ที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล บนสายเชื่อมต่อแบบวงจรเปิด 90 องศา พิสัยความถี่ทำงาน 4.5 ถึง 7.4 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยวิธีนำสายเชื่อมต่อแบบวงจรเปิดมาต่อเข้ากับบริเวณขั้วทั้ง 4 พอร์ตของวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและใช้โปรแกรมจำลอง (High Frequency Structure Simulator: HFSS) พร้อมสร้างชิ้นงานจริงด้วยวัสดุฐานรอง จากบริษัท Chukoh ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 2.6$ ความหนา 0.5 มิลลิเมตร ลักษณะการประกอบวงจรเป็นแบบแขวนลอยในบล็อค เปรียบเทียบผลกับการจำลอง ผลปรากฏว่าความสูญเสียที่เกิดจากการแทรกสอดดีกว่า 3.6 เดซิเบล ด้วยกำลังงานไม่สมดุลอยู่ที่ 0.5 เดซิเบล สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและอัตราการแยกโดดดีกว่า 20 เดซิเบล แบนด์วิดท์เท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์

Jung Y-K และ Lee B [4] นำเสนอการแพร่กระจ่ายคลื่นวงกลมแบบ 2 แถบความถี่ โดยใช้สายอากาศไมโครสตริปแบบอ่านอาร์เอ็ฟไอดี ด้วยอภิวัสดุ (Metamaterial) ในวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ ออกแบบและสร้างบนวัสดุฐานรอง FR4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 4.6$ ความหนา 1.6 มิลลิเมตร สำหรับการแพร่กระจ่ายคลื่นวงกลม ทำงานในย่านความถี่ 2 แถบความถี่ผ่านสายอากาศแบบอ่านอาร์เอ็ฟไอดี แยกพอร์ตการรับ-ส่ง ผ่านย่าน ยูเอชเอ็ฟ และ ไอเอสเอ็ม ด้วยอภิวัสดุสำหรับใช้ในวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ ค่าอัตราการขยายที่วัดได้สูงสุดของเสาอากาศการแพร่กระจายคลื่นเป็นวงกลมเวียนซ้าย (Lefthanded Circular Polarization: LHCP) คือ 6.6 เดซิเบลไอซี ที่ย่าน ยูเอชเอ็ฟ ความถี่ทำงาน 920 เมกะเฮิรตซ์ และการแพร่กระจายคลื่นเป็นวงกลมเวียนขวา (Righthand Circular Polarization: RHCP) อัตราการขยายคือ 7.9 เดซิเบลไอซี ที่ย่านไอเอสเอ็ม ความถี่ทำงาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ การแพร่กระจ่ายคลื่นข้ามขั้ว (Cross-polar) และ อัตราการขยายใกล้เสาอากาศแบบอ่านอาร์เอ็ฟไอดี น้อยกว่าประมาณ 20 เดซิเบล เปรียบเทียบกับอัตราขยายการแพร่กระจ่ายแบบรวมขั้ว (Co-polar) ทั้งสองแถบ อัตราการแยกโดดระหว่างสองพอร์ตเท่ากับ 25 เดซิเบล และ 38 เดซิเบล ที่ความถี่ทำงาน 920 เมกะเฮิรตซ์ และ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ผลวัดอัตราการขยายน้อยกว่า 0.7 เดซิเบล ในแถบความถี่ยูเอชเอ็ฟ ตั้งแต่ความถี่ 917 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 923 เมกะเฮิรตซ์ และ 1.5 เดซิเบล (Industrial Sciences Medicine :ISM) ในแถบไอเอชเอ็ม ตั้งแต่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.48 กิกะเฮิรตซ์

Lin T-W และ คณะ [5] นำเสนอวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ด้วยวงจกรองขนาดกระชับบนพื้นฐานสายส่งทรานสมิตชันซีโร่ (Transmission zero) ด้วยวิธีการวงจรลัด (Short ended) ทั้งสี่ด้านของปลายสายส่งของวงจรแบ่งกำลังงานแบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม ที่ผลสนองแบบครึ่งคลื่น

สำหรับอินพุต/เอาต์พุต แมตซ์ด้วยสายส่งรูปร่างสมมาตรเอียง (Tapped line) ระหว่างการเชื่อมต่อเรโซเนเตอร์แม่เหล็กของทรานสมิตชันซีโร่ วิเคราะห์วงจรตัวเหนี่ยวนำบนพื้นฐานของทฤษฎีสายส่งที่ความถี่ทำงาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ผลทำให้ได้แบนด์วิดท์ 61 เมกะเฮิรตซ์ และ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} น้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 เดซิเบล สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล น้อยกว่า 19 เดซิเบล ผลต่างเฟสเอาต์พุตพอร์ต 88 องศา แต่ไม่ได้ระบุขนาดในบทความและไม่มีการสร้างวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมขึ้นมาวัดเปรียบเทียบผล

Elesela BS และ Chiang Y-C [6] นำเสนอวิธีการปรับจูนเครือข่ายแบบ 2 ย่านความถี่ด้วยการเชื่อมต่อวาแลคเตอร์ไดโอดและอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped element) เข้ากับวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม เพื่อจูนค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่าง 2 ย่านความถี่ทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าแอดมิตแตนซ์ของการปรับจูนเครือข่ายที่ความถี่ทำงานซึ่งแตกต่างกันพบว่า สอดคล้องกับการควบคุมแรงดันในย่านความถี่ทำงานสูงขึ้นคือ 2 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่ทำงานความถี่ต่ำคือ 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยสามารถเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อด้วยการปรับพิสัยแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีพื้นที่ขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม

Gai C และ คณะ [15] นำเสนอวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ ที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล แบบ 2 ย่านความถี่และมีขนาดกระชับ ด้วยโครงสร้างวงจรข่ายรูปร่างพาย ด้วยการต่อสายส่งขนานกัน 2 เส้น ใช้สำหรับการปรับเลื่อนเฟส (Phase shifter) 90 องศา ซึ่งมีวิธีการออกแบบด้วยสมการวิเคราะห์แบบเมทริกซ์ เอ บี ซี ดี และ สมการเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ โดยการสร้างชิ้นงานจริง วัดเปรียบเทียบผลกับวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตามมีพื้นที่วงจรขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีอื่น

Maktoomi MA และ คณะ [8] นำเสนอเทคนิคระบบการออกแบบวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบ 2 ย่านความถี่ ด้วยการใช้โครงสร้างวงจรข่ายรูปร่างที (T) [16] และโครงสร้างวงจรข่ายรูปพาย (Pi networks) [16] สำหรับนำไปใช้งานคลอสโอเวอร์ อัตราส่วนแถบความถี่กว้างบนพื้นฐานของสายส่งที่นำมาสร้างเป็นวงจรข่ายรูปทีและวงจรข่ายรูปร่างพาย มีคุณสมบัติ 2 แบบ คือ แบบสายส่งแบบวงจรเปิด (Open circuit) และสายส่งแบบวงจรลัด (Short circuit) การออกแบบการเท่ากันและไม่เท่ากันของอัตราส่วนการแบ่งกำลังงานและอัตราส่วนแถบ (band) ที่ความถี่ทำงาน 1/2 กิกะเฮิรตซ์ และ 1/4 กิกะเฮิรตซ์ จำลองการทำงานด้วยสมการแม่เหล็กไฟฟ้าและสร้างชิ้นงานจากวัสดุฐานรอง RT/Duroid 5880 ประสิทธิภาพดี วงจรไม่มีความซับซ้อน สร้างง่าย แต่อย่างไรก็ตามวงจรมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น

Wang Q และ คณะ [9] นำเสนอการออกแบบวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ขนาดกระชับแบบ 2 ย่านความถี่ ด้วยการใช้ส่วนประกอบของสายส่งแบบ Right/left-handed โดยการสร้างต้นแบบด้วยการเลือกค่าพารามิเตอร์ของ (Composite Right/Left-handed : CRLH) จากโครงสร้างที่นำเสนอประกอบไปด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองความถี่สูงใส่แทรกกลางระหว่างสายส่งไมโครสตริป และ มีผลตอบสนองของเฟสเท่ากับ 94.7 องศา และ 87.4 องศา ที่ความถี่ทำงาน 0.93 กิกะเฮิรตซ์ และ 1.78 กิกะเฮิรตซ์ ลดขนาดวงจรได้ 34.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม ด้วยวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ε_r = 3.2 ความหนาของซับสเตรต เท่ากับ 31 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตามนอกจากการขยายย่านความถี่เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของวงจรยังไม่เพียงพอต้องคำนึงการนำไปใช้งานวงจรมีขนาดเล็กกะทัดประสิทธิภาพยังคงเดิมหรือดีกว่าเดิมซึ่งมีผู้นำเสนอวิธีการลดพื้นที่ด้วยวิธีการทำลายวงจรพิมพ์แบบหลายชั้น (Multi-Layer) หรือหลายแผ่นวางทับซ้อน [7, 17, 18]

Wang Y และ คณะ [17] นำเสนอวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์การสูญสูญเสียย้อนกลับต่ำบนพื้นฐานวัสดุฐานรองรวม (Substrate Integrated Suspended Line: SISL) และ Double – sided ด้วยเทคโนโลยีแบบหลายชั้น โดยแบบเดิมสร้างขึ้นจากแบบ SISL และแบบนำเสนอใหม่เป็นแบบ DSISL การออกแบบเพื่อลดขนาดของวงจรด้วยลายวงจรพิมพ์แบบหลายชั้น ใช้วัสดุฐานรอง FR4 ในบทความนี้มีจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น ผลตอบสนองความถี่ดี ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำ แต่อย่างไรก็ตามมี ความยุ่งยากในการสร้างชิ้นงานสำหรับภายประเทศไทยเรา ยังไม่มีเทคโนโลยีขั้นสูงและมีราคาแพง Wang Y และ คณะ [7] นำเสนอวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ขนาดกระชับโดยใช้เทคโนโลยีวงจรรวมวัสดุฐานรอง เทคโนโลยีวัสดุฐานรองรวม (Substrate Integrated Suspended Line: SISL) เพิ่มอันดับของวงจรและลดขนาดด้วยการทำลายวงจรพิมพ์แบบหลายชั้น โครงสร้างคลื่นแบบช้า (Slow wave) ด้วยการต่อวงจรของตัวสายมีนเดอร์ (Meander line) แบบอนุกรม เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์สูงต่ำและใช้วัสดุฐานรอง 2 ชนิดคือ FR4 และ Rogers 400C ในการสังเคราะห์เป็นลายวงจรพิมพ์ ซึ่งมีจำนวนชั้นของลายวงจรพิมพ์ว่างซ้อนทับกัน 5 แผ่น ผลทำให้ประสิทธิภาพดี แบนด์วิดท์กว้างและผลต่างเฟสเอาต์พุตเท่ากับ 90 องศา โดยมีค่าคลาดเคลื่อน ± 1 องศา จากความถี่ทำงาน 1.38 ถึง1.7 กิกะเฮิรตซ์

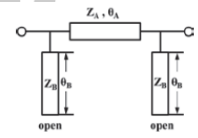
Amado-Rey B และ คณะ [18] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยโครงสร้างโลหะขนาดกระชับแบบหลายชั้นในวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ย่านจี ด้วยความแตกต่างของระนาบกราวด์บน (Gallium arsenide: GaAs) จำลองการทำงานด้วยสมการแม่เหล็กไฟฟ้า (EM simulated) เพื่อพิสูจน์กระบวนการความถี่การใช้งานย่านจี (G band) ตั้งแต่ความถี่ 140 ถึง 220 กิกะเฮิรตซ์ บนพื้นฐานความแตกต่างของวัสดุที่เชื่อมต่อแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้น เพื่อรวมเป็นวงจรเดียวกัน

โดยใช้วิธีการโอห์มมิค (Ohmic) ผลทำให้ลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกสอดเท่ากับ 1.3 เดซิเบล ผลแบนด์วิดท์เท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ ผลต่างเฟสเอาต์พุตเท่ากับ 89 องศา นำไปใช้ในงานรีเจ็คมิกเซอร์และบาลานซ์วงจรขยายกำลังที่ความถี่ทำงานย่านมิลลิมิเตอร์เวฟ

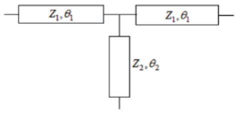
อย่างไรก็ตามจุดเด่นของวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์คือเรื่องแบนด์วิดท์และผลต่างเฟสเอาต์พุต 90 องศา

Yao J และคณะ [19] การประยุกต์ใช้งานคลอสโอเวอร์สำหรับวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์ การออกแบบวงจรบรานซ์ไลน์ใหม่ด้วยการปรับปรุงแบนด์วิดท์ และการต่อวงจรเพิ่มเติมแบบ 3 ส่วน และ 4 ส่วน เพื่อเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพพบว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับดีกว่า 20 เดซิเบล แบนด์วิดท์ 22 เปอร์เซ็นต์ และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

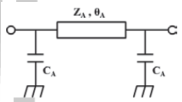
2.8 การพัฒนาประสิทธิภาพด้วยรูปแบบโครงสร้างแบบต่าง



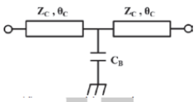
(ก)



(ข)

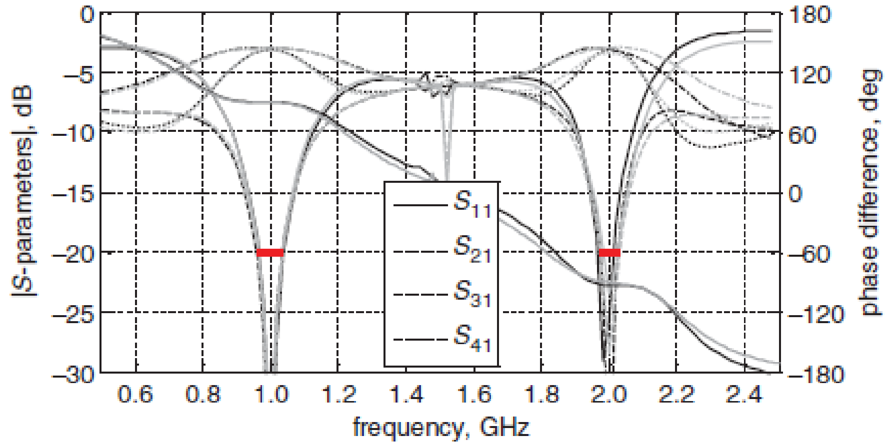


(ค)



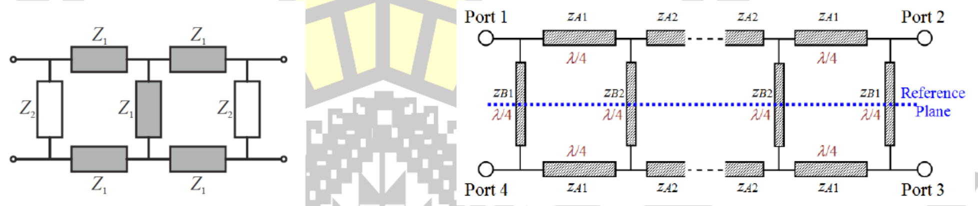
(ง)

ภาพประกอบ 11 ลักษณะโครงสร้างการต่อสายส่ง (ก) วงจรข่ายรูปแบบพาย [15, 20] (ข) วงจรข่ายรูปแบบที T-Shape [8] (ค) วงจรข่ายรูปร่างพายแบบต่อตัวเก็บประจุ และ (ง) วงจรข่ายรูปร่างแบบทีแบบต่อตัวเก็บประจุ [20]



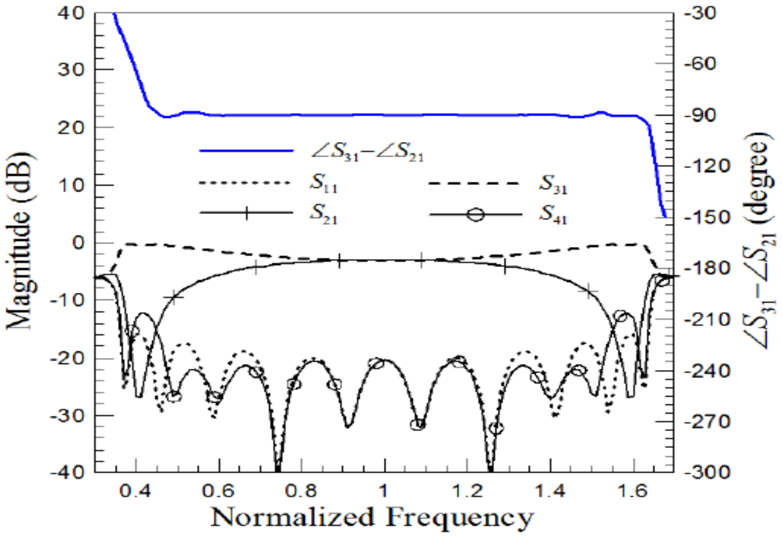
ภาพประกอบ 12 แสดงผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดในแนวแกน Y และความถี่ ในแนวแกน X รวมรูปร่างผลต่างเฟสในช่วงความถี่ใช้งานแสดงผลในรูปของ S-Parameters [4, 21, 22]

จากภาพประกอบ 12 ลักษณะการต่อวงจรข่ายรูปแบบพายและรูปแบบที ได้รับความนิยมอย่างมากทั้งแบบสายส่งเส้นเดี่ยวหรือสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน โดยพฤติกรรมของการลักษณะการต่อทั้ง 2 แบบ มาจากเทคนิคพื้นฐานด้วยวงจรลัด (Short circuit) [16] และสายส่งแบบวงจรเปิด (Open circuit) [16] รวมถึงการต่อตัวเก็บประจุ (Capacitor) แบบนานกับวงจรในรูปแบบ T-Shape ส่วนใหญ่นิยมนำเทคนิคดังกล่าวมาช่วยในการลดขนาดวงจร และสร้างวงจรแบ่งกำลังงานแบบ 2 แถบความถี่ (Dual Band) [16, 17] ดังแสดงผลกราฟในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงโครงสร้างแบบหลายส่วน (Multi section) [10, 23]

จากภาพประกอบ 13 ลักษณะวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมที่พัฒนาด้วยสายส่งแบบหนึ่งส่วนต่อมาได้มีแนวคิดในการเพิ่มแบนด์วิดท์ด้วยการต่อวงจรแบบอุกรม (Cascade circuits) แต่ข้อเสียคือวงจรมีพื้นที่ขนาดวงจรใหญ่ขึ้นแต่ประสิทธิภาพดีที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล แสดงดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 แสดงผลการวัดวงจรบรานซ์ไลน์แบบเพิ่มส่วน (Multi section) [10]

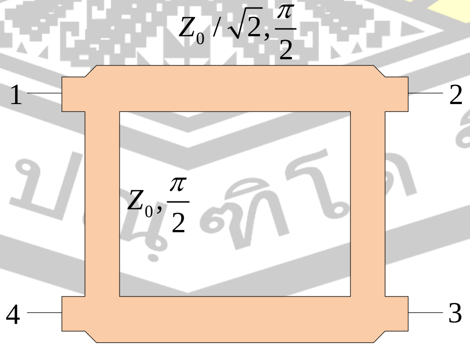
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ปัญหาของสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์

จากอดีตวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์บนพื้นฐานอุปกรณ์พาสซีฟ โดยทั่วไปใช้สายส่งเชื่อมต่อแบบเส้นเดี่ยว และยังมีวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์อีกหลายรูปแบบที่มีผู้คิดค้นพัฒนา ปรับปรุง อย่างต่อเนื่อง ในหลายเทคนิค อาทิเช่น เทคนิคโหลดสตับ ด้วยพฤติกรรมของรีแอคแตนซ์ คาปาซิแตนซ์ เทคนิคโหลดตัวต้านทาน เทคนิคการลัดวงจร เทคนิคการเปิดวงจร การใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูง (High relative dielectric permittivity: ε_r) วัตถุประสงค์ส่วนใหญ่เพื่อลดขนาดของวงจร ปรับปรุงประสิทธิภาพ แต่ด้วยโครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อทั่วไป ให้ประสิทธิภาพดีแต่วงจรมีพื้นที่ขนาดใหญ่ หรือวงจรมีพื้นที่ขนาดเล็กแต่ประสิทธิภาพต่ำ

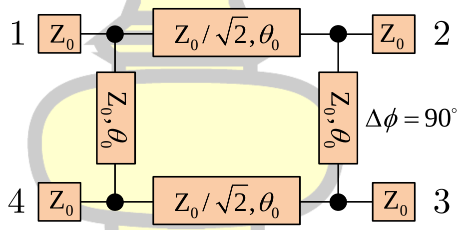
จากข้อดีข้อด้อย ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขอนำเสนอเทคนิคสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ทำให้วงจรมีขนาดเล็กกว่าวงจรแบบดั้งเดิม ประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับและยังสามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้ และงานในวิทยานิพนธ์นี้ยังใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งส่วนใหญ่การใช้วัสดุฐานรอง หรือซับสเตรตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์สูง จะส่งผลให้ค่าไดเร็กติวิตี้ (Directivity : D) ในแถบความถี่เหนือความถี่ทำงาน (f_0) ของสายส่งเชื่อมต่อลดลงอย่างรวดเร็ว [13] สาเหตุเกิดขึ้นเพราะความแตกต่างของความเร็วเฟส (Unequal phase velocities) ของคลื่นโมดคู่และโมดคี่

3.2 วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม

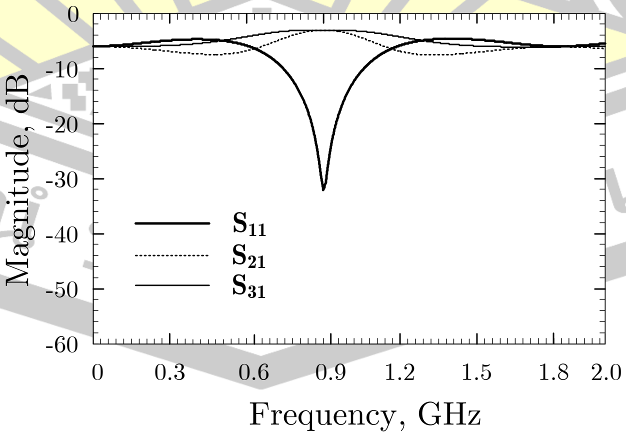


ภาพประกอบ 15 วงจรแบ่งกำลังงานสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม [1]

ลักษณะวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 เป็นวงจรแบ่งกำลังงานแบบ 4 พอร์ต ประกอบไปด้วย พอร์ตหมายเลข 1 คือ อินพุต พอร์ตหมายเลข 2 และพอร์ตหมายเลข 3 คือ เอาต์พุต โดยที่พอร์ตหมายเลข 4 คือพอร์ตอัตราการแยกโดด การทำงานเหมาะสำหรับระบบความถี่แถบกว้างและมีเฟสต่างกัน 90 องศา คุณลักษณะทั่วไปของสายส่งแบบบรานซ์ไลน์สายส่งเชื่อมต่อมี 4 เส้น ประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์สองส่วนคืออิมพีแดนซ์ส่วนที่ 1 เท่ากับ 35.35 โอห์ม สายส่งมีความยาวทางไฟฟ้า 90 องศา หรือ $Z_0/\sqrt{2},\frac{\pi}{2}$ ส่วนที่ 2 สายส่งจากพอร์ตหมายเลข 1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 2 และพอร์ตหมายเลข 3 ไปยังพอร์ตหมายเลข 4 มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม หรือ $Z_0,\frac{\pi}{2}$ ของสายส่งจากพอร์ตหมายเลข 1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 4 และพอร์ตหมายเลข 2 ไปยังพอร์ตหมายเลข 3 ดังภาพประกอบ 16 และภาพประกอบ 17 คือผลการจำลอง จากการออกแบบเพื่อสร้างชิ้นงานของวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมขึ้นมาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ทั้งเรื่องของขนาดวงจร ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่การส่งผ่านกำลังงานที่ 3 เดซิเบล ในรูปของเอสพารามิเตอร์ (S - Parameter) ด้วยวัสดุฐานรองชนิดเดียวกัน



ภาพประกอบ 16 ลักษณะโครงสร้างวงจรแบ่งกำลังงานแบบสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม [1]



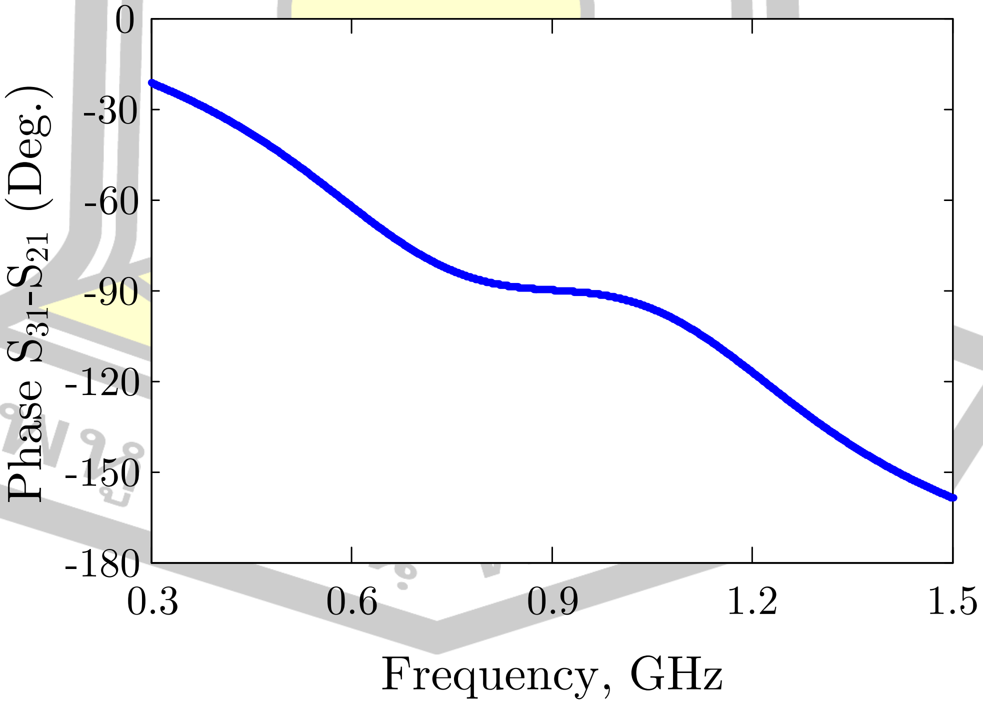
ภาพประกอบ 17 ผลการจำลองขนาดของวงจรแบ่งกำลังแบบสายส่งเชื่อมต่อบรานไลน์แบบดั้งเดิม

โดยที่ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

$Z_0/\sqrt{2}$ คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะมีค่าเท่ากับ 35.35 โอห์ม

θ_0 คือ ความยาวทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 90 องศา หรือ $\frac{\pi}{2}$

จากการจำลองการเลื่อนแบบการทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ โดยใช้วัสดุฐานรอง AD260 ซึ่งมีค่าจำเพาะของวัสดุคือ ค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 2.6$ ค่าความสูง $H = 1$ มิลิเมตร ค่าความนำทางไฟฟ้า (Conductivity) 5.88×10^7 ซีเมนต์ต่อมิลลิเมตร ค่า t ความหนาของทองแดงหรือแผ่นตัวนำสตริปไลน์ 35 ไมโครเมตร และค่าความสูญเสีย $Tran\delta = 0.0017$ จากการพิสูจน์ด้วยซอฟต์แวร์ได้ผลการจำลองดังภาพประกอบ 18 และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ จากภาพประกอบ 17 โดยแสดงความสัมพันธ์ด้านขนาดในแกนตั้ง Y มีหน่วยเป็น เดซิเบล และความถี่ในแกนนอน X มีหน่วยเป็นกิกะเฮิรตซ์ ของวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม แสดงผลรูปของค่า S-Parameters จำนวน 3 ค่า ได้แก่ S_{11} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับที่พอร์ตหมายเลข 1 มีค่าประมาณ 30 เดซิเบล ต่อมา S_{21} คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานจากพอร์ตหมายเลข 1 ไปพอร์ตหมายเลข 2 และ S_{31} คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานจากพอร์ตหมายเลข 1 ไปยังพอร์ตหมายเลข 3 ทั้งคู่มีค่าประมาณ 3.08 เดซิเบล



ภาพประกอบ 18 ผลการจำลองผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม

จากภาพประกอบ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสในแนวแกน Y มีหน่วยเป็นองศา และความถี่ในแนวแกน X มีหน่วยเป็นกิกะเฮิรตซ์ เมื่อมีสัญญาณเข้ามายังพอร์ตหมายเลข 1 ที่การส่งผ่านกำลังงานที่ 3 เดซิเบล ไปยังพอร์ตหมายเลข 2 มีเฟสเท่ากับ 90 องศา และสัญญาณจากพอร์ตหมายเลข 2 ส่งผ่านกำลังงาน ไปยังพอร์ตหมายเลข 3 มีค่าเท่ากับ 180 องศา เมื่อเทียบกับพอร์ตหมายเลข 1 ในทางอุดมคติเปรียบเทียบได้ว่าระหว่างพอร์ตหมายเลข 2 และพอร์ตหมายเลข 3 คือเอาต์พุตของวงจร มีเฟสต่างกัน 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก เนื่องจากมีตัวแปรแอบแฝงอันมาจากกระบวนการสร้าง วัสดุที่นำมาใช้ วงจรมีความซับซ้อน จากการจำลองนี้ ได้ค่าผลต่างเฟสที่เอาต์พุตพอร์ตหมายเลข 2 และพอร์ตหมายเลข 3 มีค่าเท่ากับ 89.96 องศา ที่ความถี่ทำงาน 900 เมกะเฮิรตซ์

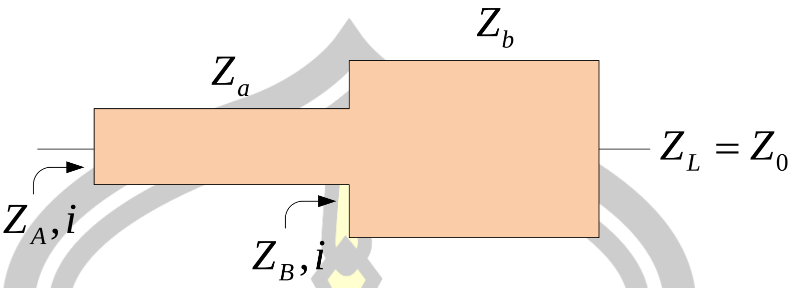
3.3 สายส่งแบบขั้นบันได (Step Impedance Transmission Lines: SITLs)

สายส่งแบบขั้นบันไดคือสายส่งที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) ที่ผ่านมาได้มีการนำสายส่งแบบขั้นบันไดไปสร้างเป็นวงจรรีโซเนเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่มีขนาดเล็ก [1] ซึ่งใช้กำจัดความถี่แปลกปลอมที่เป็นแถบความถี่สูงผ่านและทำการกดแถบความถี่ผ่านอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ [24] ในรูปแบบที่เป็นสายส่งแบบขั้นบันไดแบบสองท่อนที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะแตกต่างกันคือ Z_a และ Z_b และมีมุมทางไฟฟ้าเป็น θ_a และ θ_b ตามลำดับ พิจารณาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของส่วน b คือ $Z_{in}(\mathrm{b})$ ซึ่งมีโหลด $Z_L = Z_0$ ต่ออยู่ที่ส่วนปลายของสายส่งส่วนสายส่งท่อน a มีอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น $Z_{in}(\mathrm{a})$ ซึ่งมีโหลดที่เทอร์มิเนตที่ปลายอีกด้านหนึ่งเป็น $Z_L = Z_{in}(\mathrm{b})$ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอินพุตอิมพีแดนซ์ของแต่ละส่วนได้ดังนี้

$$Z_B(\mathrm{i}) = \frac{Z_b(\mathrm{Z_0} + \mathrm{j}\mathrm{Z}_b \tan\theta_b)}{Z_b + jZ_0 \tan\theta_b} \tag{3.1}$$

$$Z_A(\mathrm{i}) = \frac{Z_a(\mathrm{Z}_{in}(\mathrm{b}) + \mathrm{j}\mathrm{Z}_a \tan\theta_a)}{Z_a + jZ_{in}(\mathrm{b}) \tan\theta_a} \tag{3.2}$$

เทคนิคที่นำเสนอจะใช้ค่า $Z_a > Z_b$ ดังนั้นอัตราส่วน $R_s = Z_b / Z_a$ จึงมีค่า $0 \le R_s \le 1$ ในขั้นต้นของการวิจัยค่าตัวแปร $Z_a\, Z_b$ ได้จากการเลือกค่าในขณะที่มุม $\theta_a\, \theta_b$ ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเงื่อนไขไอโซเลชั่นมีค่าเป็นศูนย์



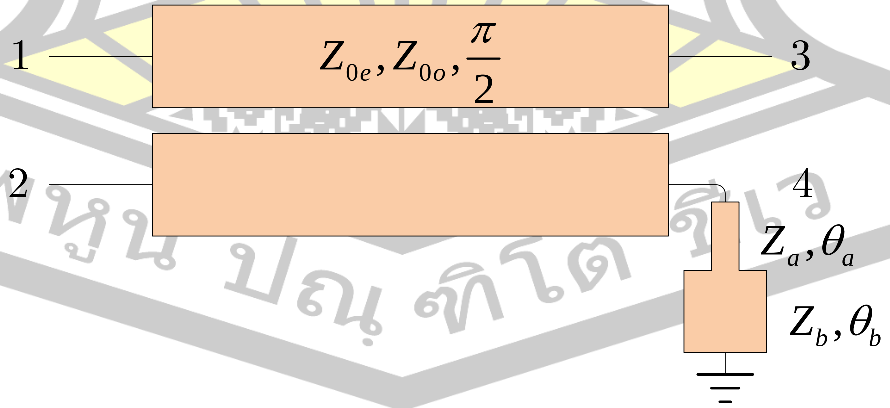
ภาพประกอบ 19 วงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อแบบขั้นบันไดสองส่วน [24]

เมื่อ $$Z_\alpha = jZ_0(\sin\theta_o - \sin\theta_e) \quad (3.3)$$

$$Z_\beta = Z_0^2(\cos\theta_o - \cos\theta_e) \quad (3.4)$$

$Z_{ST1}(f_0)$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งแบบขั้นบันไดที่นำมาเชื่อมต่อแบบอนุกรม
$\theta_e = \pi/2$ คือ ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานในโมดคู่
$\theta_o = (\pi/2)\Theta$ คือ ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานในโมดคี่
$\Theta = \sqrt{\varepsilon_{effo}/\varepsilon_{effe}}$

3.4 การชดเชยค่าไดเร็กติวิตี้ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดหนึ่งชุด



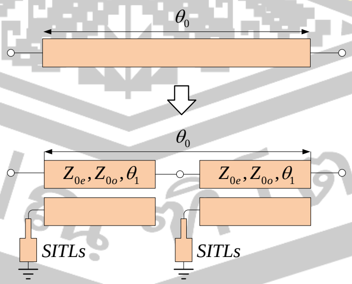
ภาพประกอบ 20 สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานแบบชดเชยด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดแบบหนึ่งชุด [24]

เทคนิคแรกที่นำเสนอนี้จะเป็นการชดเชยค่าไดเร็กติวิตี้ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดหนึ่งชุดที่พอร์ตเชื่อมต่อ เงื่อนไขที่ทำให้เกิดอัตราการแยกโดด S_{31} ของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานมีค่าเป็นศูนย์จะแปรตามตัวแปรทางไฟฟ้า ต่างๆ Z_0 Z_{0e} Z_{0e} ε_{effe} ε_{effo} การหาค่าสมการไอโซเลชั่นที่สอดคล้องกับตัวแปรของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานทำได้โดยใช้ทฤษฎีโครงข่ายทางไฟฟ้าด้วยการเชื่อมต่อที่พอร์ตหมายเลข 2 หมายเลข 3 และหมายเลข 4 ด้วยค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_0 ในขณะที่พอร์ตอินพุตจะเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เป็นขนาดของการส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตหมายเลข 1 และพอร์ตหมายเลข 3 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือ $S_{31}(\mathrm{f}_0 \approx 0)$ เมื่อทำการเทอร์มิเนตด้วยสายส่งแบบขั้นบันไดที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เป็น

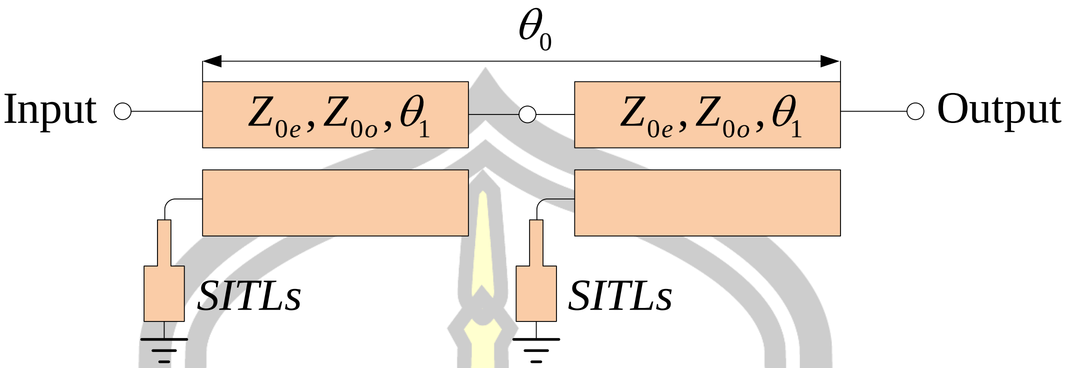
$$
\begin{aligned}
Z_{AS}(\mathrm{f}_0) &= \frac{j(Z_{0o}^2 Z_{0e}\sin\theta_0 - Z_{0e}^2 Z_{0o}\sin\theta_e) + 2Z_0 Z_\beta + Z_0 Z_\alpha}{Z_\alpha + Z_\beta} \\
&= Z_{in}(\mathrm{a})
\end{aligned} \qquad (3.5)
$$

3.5 เทคนิคการนำเสนอใหม่

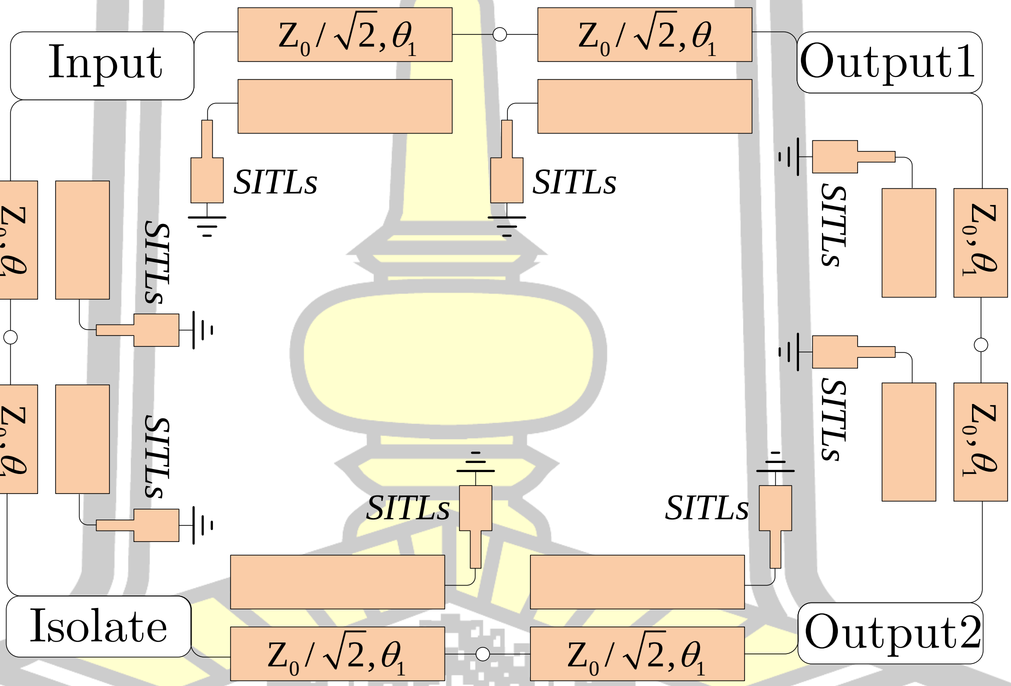
ด้วยโครงสร้างสายส่งบรานซ์ไลน์ทั่วไปมีทั้งข้อดีข้อด้อยที่ผ่านมามีผู้นำเสนอในหลายเทคนิค แต่เทคนิคส่วนใหญ่เน้นเรื่องการลดขนาดวงจร และประสิทธิภาพอยู่ในขั้นยอมรับได้ ซึ่งเป็นรูปแบบที่นำเสนอทั่วไป แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ มีข้อแตกต่างจากบทความอื่น นอกจากประสิทธิภาพและวงจรมีขนาดเล็กกว่าวงจรแบบดั้งเดิม ยังสามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้ จากการศึกษาพบว่า การใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์เป็นที่น่าพอใจ และสามารถสร้างขึ้นได้จริง ด้วยข้อดีของโครงสร้างวงจรแบ่งกำลังงานแบบบรานซ์ไลน์ที่นำเสนอ สร้างได้ง่ายและต้นทุนต่ำ



ภาพประกอบ 21 โครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแทนที่สายส่งไมโครสตริปแบบดั้งเดิม



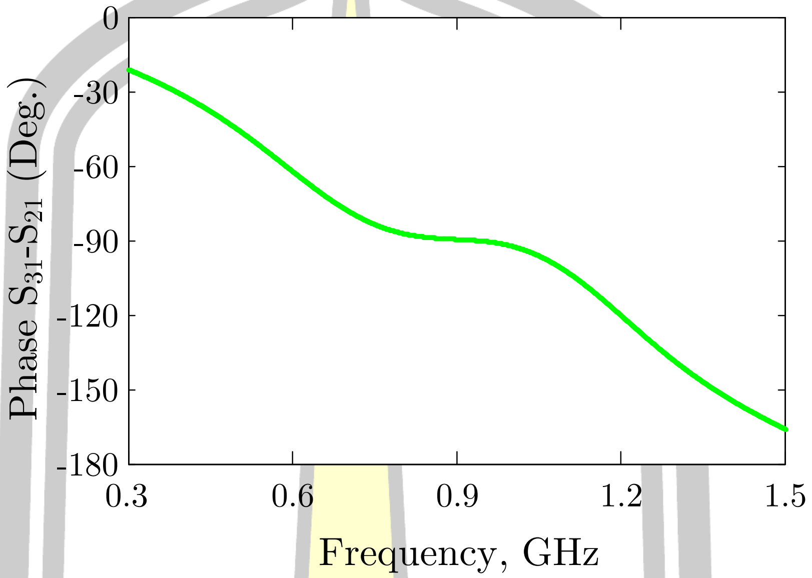
ภาพประกอบ 22 โครงสร้างนำเสนอด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ
แบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป



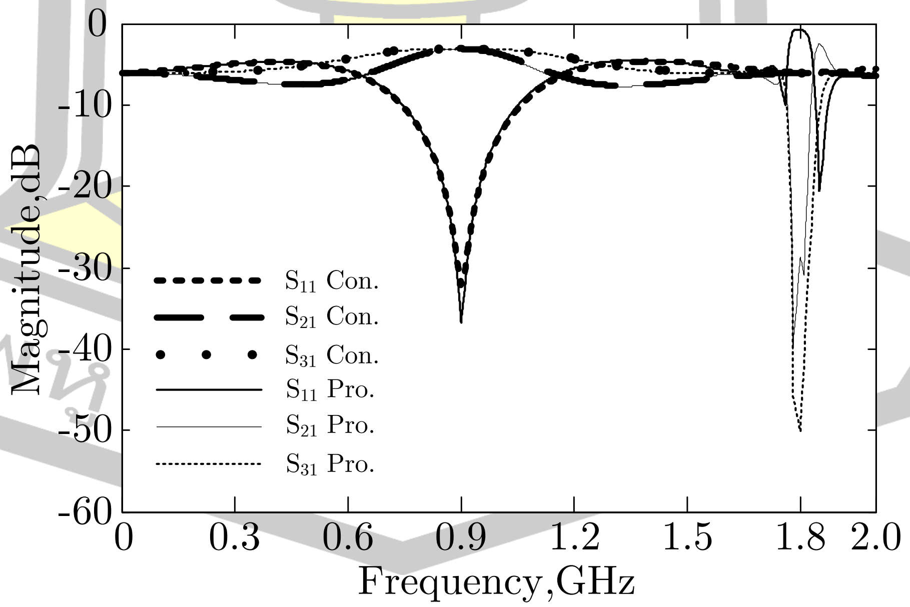
ภาพประกอบ 23 วงจรสมมูลสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบ

จากภาพประกอบ 22 แสดงลักษณะวงจรสายส่งเชื่อมต่อไมโครสตริปหนึ่งส่วนจากเค้าโครงวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปลี่ยนจากสายส่งสตริปไลน์มาเป็นสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรมพบว่าสายส่งที่นำเสนอมีความยาวทางไฟฟ้าใกล้เคียงกับสายส่งเส้นเดี่ยว แต่ด้วยลักษณะเด่นของวงจรกรองความถี่หยุดแถบ เมื่อใส่แทนที่สายส่งแบบดั้งเดิม

จะเห็นได้ว่าสามารถลดทอนความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้ และทำให้วงจรมีพื้นที่ขนาดเล็กลง พิสูจน์ได้จากผลการจำลอง



ภาพประกอบ 24 แสดงผลการจำลองผลต่างเฟสของสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

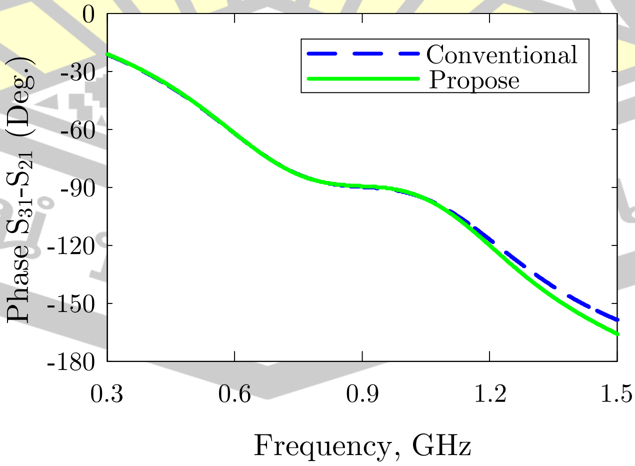


ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบผลการจำลองของขนาด ระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ

จากภาพประกอบ 23 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ลักษณะของอิมพีแดนซ์ในวงจรมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จากพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตเอาต์พุต 1 และ พอร์ตเอาต์พุต 2 ไปยังพอร์ตไอโซเลต จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 35.35 โอห์ม หาได้จาก $Z_0/\sqrt{2}$ เมื่อ Z_0 มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มหารด้วยค่า 1.414 เท่ากับ 35.35 โอห์ม และส่วนที่ 2 จากพอร์ตอินพุตไปยังพอร์ตไอโซเลต และพอร์ตเอาต์พุต 1 ไปยังพอร์ตเอาต์พุต 2 มีค่าเท่ากับ Z_0 คือ 50 โอห์ม ซึ่งสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปทั้ง 2 ส่วนมีความยาวทางไฟฟ้าเท่ากันคือ 90 องศา เป็นคุณสมบัติพื้นฐานจากแบบแบบดั้งเดิม ในส่วนของสายส่งแบบขั้นบันได (Step Impedance Transmission Lines: SITLs) ที่ต่อตรงปลายสายส่งมีคุณสมบัติเพื่อลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 และมีผลต่อการลดขนาดวงจรให้เล็กลงด้วยการปรับยาวทางไฟฟ้าให้ได้ 90 องศา

จากภาพประกอบ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสและความถี่จากผลการจำลองพบว่า ผลต่าง $|S_{31}|$-$|S_{21}|$ มีเฟสเข้าใกล้ 90 องศาที่ความถี่ทำงาน 900 เมกะเฮิร์ต โดยประสิทธิภาพที่ได้ยังคงเข้าใกล้ค่าเดิมในขณะที่ขนาดของวงจรลดลง และ ค่าความสูญเสียดีขึ้นตามลำดับ

จากภาพประกอบ 25 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการจำลองเสมือนจริงของความสัมพันธ์ด้านขนาดและความถี่ ของวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม กับ แบบนำเสนอ เมื่อแบบดั้งเดิม (Conventional: Con) และ แบบนำเสนอ (Propose: Pro) ผลพิสูจน์จากการจำลองพบว่าค่าความสูญเสียหรือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ S_{11} แบบนำเสนอดีกว่า จุดเด่นที่นำเสนอคือการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ซึ่งในการรับ-ส่งสัญญาณปฏิเสธไม่ได้ในเรื่องของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากวงจรที่เราสร้างขึ้นมา จึงน่าจะเป็นข้อดีอย่างหนึ่งในวงจรที่นำเสนอ



ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบผลการจำลองของผลต่างเฟส ระหว่างแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ

ตาราง 1 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 1

Compare	%BW @ -10dB	Return Loss (dB) f_c @ 900MHz	Insertion Loss (dB)		Isolation (dB)
			S_{21}	S_{31}	
Conventional	35.22	30.10	-3.08	-3.08	30.40
Propose	34.08	36.71	-3.08	-3.08	32.77

ตาราง 2 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 2

Compare	Suppression 2nd (dB)	Size (cm^2)	Phase (Degree)
Conventional	Non	42.18	89.96
Propose	40dB	38.92	89.57

จากภาพประกอบ 27 แสดงผลการเปรียบเทียบเฟสด้วยการจำลองการทำงานสายส่งทั้งแบบคือแบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ พบว่าผลต่างเฟสมีค่าใกล้เคียงกันโดยแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 89.96 องศา และแบบนำเสนอมีค่าเท่ากับ 89.57 องศา ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 90 องศา ที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล ที่ความถี่ทำงาน 900 เมกะเฮิรตซ์

3.6 สรุป

การออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ด้วยลักษณะเด่นทางด้านการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ดีกว่า 40 เดซิเบล และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ตอินพุตดีกว่า 36.71 เดซิเบล ที่การส่งผ่านกำลังงาน 3.08 เดซิเบล ของ $|S_{21}|$ และ $|S_{31}|$ ที่ความถี่ทำงาน 900 เมกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ด้วยวัสดุฐานรอง (Substrate) AD260 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ $\varepsilon_r = 2.6$ และความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จำลองและเปรียบเทียบผลการวัดกับวงจรแบ่งกำลัง บรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย

จากการศึกษาและจำลองการทำงานของวงจรแบ่งกำลังงานสายส่งบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับวงจรแบ่งกำลังงานบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปในบทที่ 3 สามารถแบ่งลำดับผลการวิจัยและการอภิปรายออกเป็นลำดับดังนี้

4.1 ผลการจำลองวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

4.2 ชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ

4.3 ผลการวัดและเปรียบเทียบวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบปรับปรุงประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

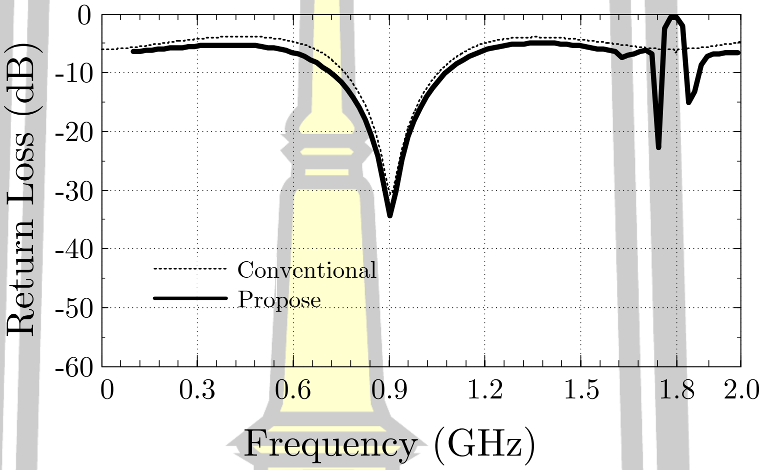
4.4 การอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

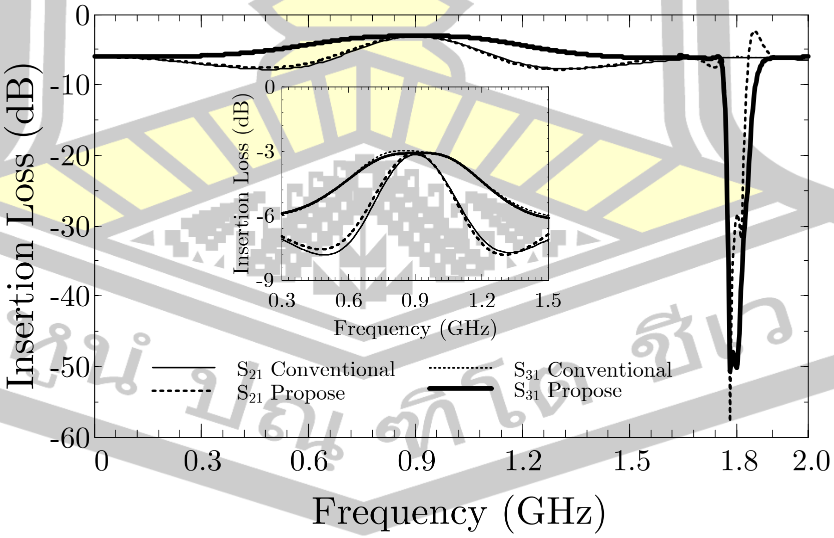
จากการจำลองผลตอบสนองความถี่ของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปที่ความถี่ใช้งาน 900 เมกะเฮิรตซ์ ในบทที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ โดยใช้วัสดุฐานรอง AD260 สร้างชิ้นงานจริงและทำการจำลองผลตอบสนองความถี่ด้วยโปรแกรม Sonnet Lite ด้วยการวิเคราะห์โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็ก (Momentum method) ตั้งแต่ความถี่ 0.1 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 27 เปรียบเทียบแสดงผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่การสูญเสียย้อนกลับวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมแสดงผลเป็นค่า S พารามิเตอร์ เปรียบเทียบในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.1 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ ที่ความถี่ใช้งาน 900 เมกะเฮิรตซ์ พบว่า การสูญเสียย้อนกลับของวงจรสายส่งเชื่อมต่อสายแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม (Conventional) เท่ากับ 30 เดซิเบล และการสูญเสียย้อนกลับของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป เท่ากับ 35 เดซิเบล

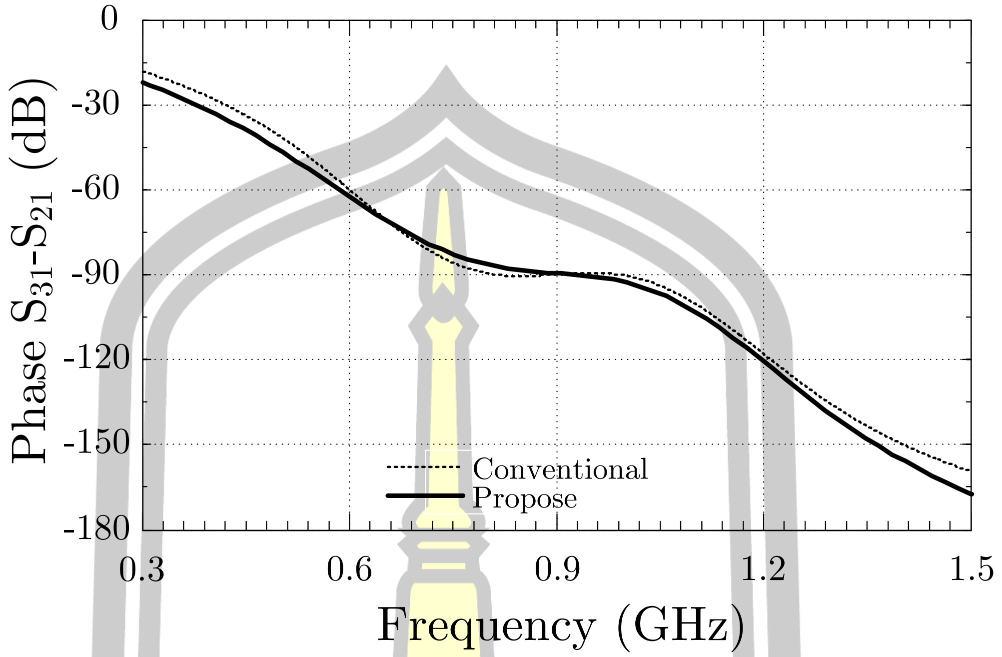
เมื่อเปรียบเทียบผลการสูญเสียย้อนกลับของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ ปรากฏผลการปรับปรุงประสิทธิภาพส่งผลให้การสูญเสียย้อนกลับดีขึ้น และในภาพประกอบ 28 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบ การใส่แทรก (Insertion loss) วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ ที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล ที่ความถี่ใช้งาน 900 เมกะเฮิรตซ์ ของค่าพารามิเตอร์ S_{21} และ S_{31} มีค่าเท่ากับ 3.1 เดซิเบล และมีค่าเท่ากันทั้งสองวงจรตามลำดับ



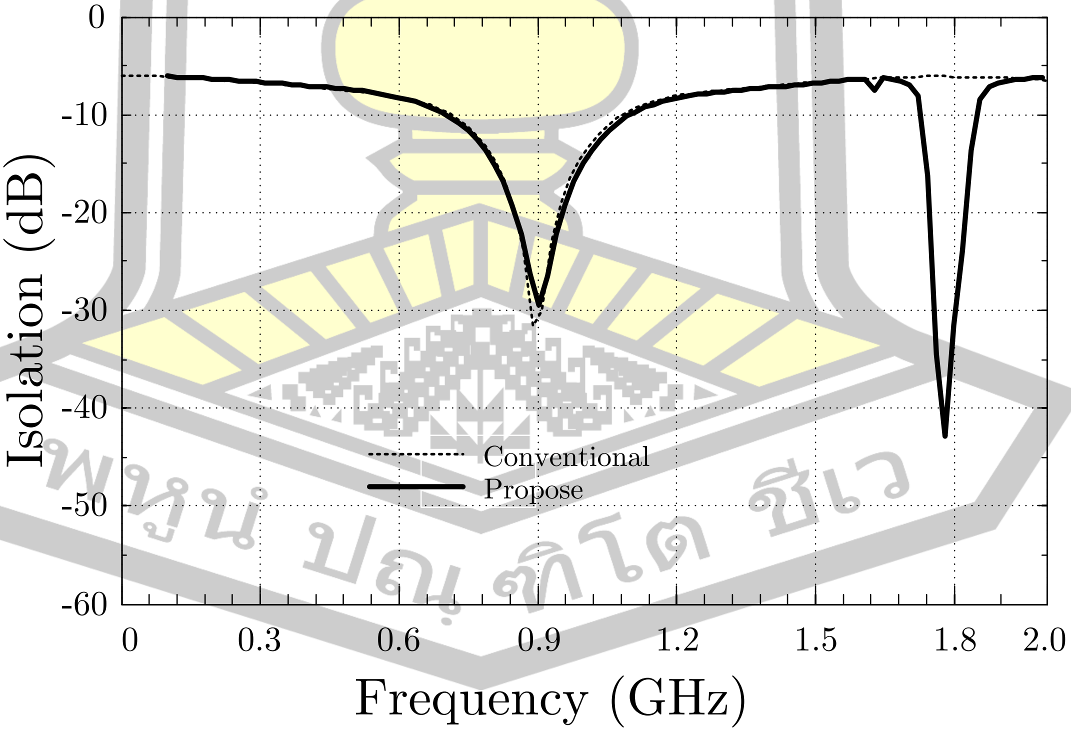
ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่การสูญเสียย้อนกลับ



ภาพประกอบ 28 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบการใส่แทรก (Insertion loss) วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ



ภาพประกอบ 29 แสดงผลการจำลองผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อ
แบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ

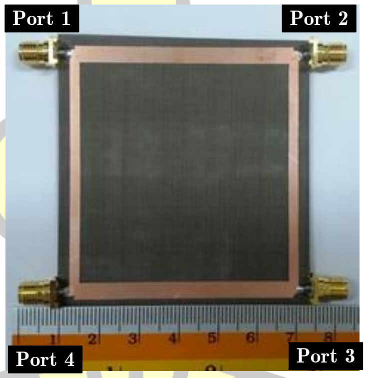


ภาพประกอบ 30 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบการแยกโดด (Isolation)

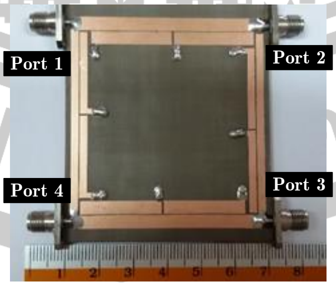
จากภาพประกอบ 29 แสดงผลการจำลองผลตอบสนองเชิงความถี่เฟส S_{31} – S_{21} ของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ จะเห็นได้ว่าผลต่างเฟสมีค่าใกล้เคียงกันของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล เท่ากับ 89.90 เดซิเบล และ 89.50 เดซิเบล ตามลำดับ โดยภาพประกอบ 30 แสดงผลการจำลองการเปรียบเทียบการแยกโดด (Isolation) จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราการแยกโดดมีค่าใกล้เคียงกันทั้งแบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอเท่ากับ 32 เดซิเบล และ 30 เดซิเบล ตามลำดับ

4.2 ชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ

จากบทที่ 3 ได้นำเสนอการออกแบบวงจรนำเสนอและทำการจำลองผลการทดลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม Sonnet Lite และสังเคราะห์ออกมาให้อยู่ในรูปแบบของลายวงจรพิมพ์โดยใช้วัสดุฐานรอง AD260 เพื่อสร้างวงจรจริงเพื่อวัดทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวไว้ในบทที่ 1



ภาพประกอบ 31 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม



ภาพประกอบ 32 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์
ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

โดยภาพประกอบ 31 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม สร้างขึ้นมีพื้นที่ของวงจรขนาด 42.18 ตารางเซนติเมตร และ ภาพประกอบ 32 แสดงภาพชิ้นงานวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป ซึ่งทำการประกอบคอนเนคเตอร์พอร์ตแบบเอสเอ็มเอ (SMA) ที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และเวียร์กราวด์ (Vai-ground) เรียบร้อย โดยมีพื้นที่วงจรขนาด 38.92 ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามรถลดขนาดพื้นที่ของวงจรแบบดั้งเดิมได้ 8 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้สร้างวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอ

วงจร	Z_0	Z_{oe}	Z_{oo}	W	S	L
ส่วนที่ 1	50 Ω	69.37	36.03	2.23	0.17	29.21
ส่วนที่ 2	35.35 Ω	49.05	25.46	3.59	0.07	28.88

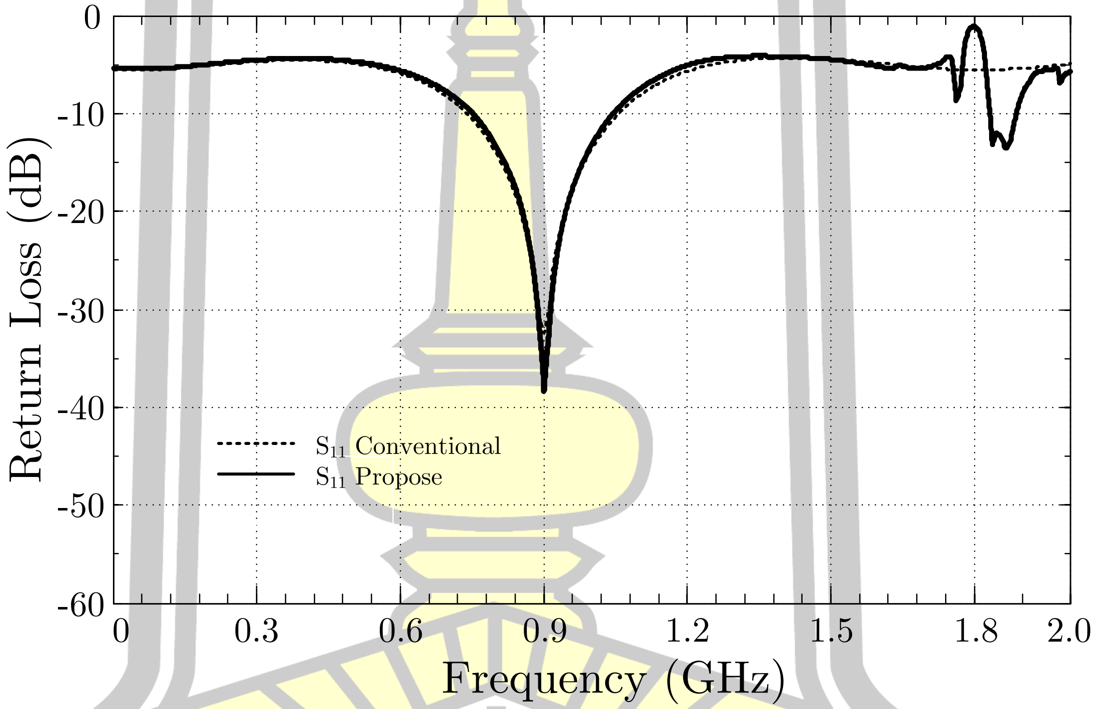
ตาราง 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งขั้นบันไดแบบสองส่วนสำหรับวงจรกรองความถี่หยุดแถบ

ส่วนที่ 1	50 Ω	Za=90 Ω $\theta = 8^\circ$ Zb=75 Ω $\theta = 8^\circ$	W=0.92 mm L=5.2 mm W=1.35 mm L=5.17 mm
ส่วนที่ 2	35.35 Ω	Za=90 Ω $\theta = 6^\circ$ Zb=68 Ω $\theta = 6^\circ$	W=0.9 mm L=3.92 mm W=1.6 mm L=3.86 mm

จากตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือส่วนของอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และ 35.35 โอห์ม ประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์ของความเร็วคลื่นโมดคู่ Z_{0e} อิมพีแดนซ์ของความเร็วคลื่นโมดคี่ Z_{0o} ค่าความกว้างของสายส่งเชื่อมต่อไมโครสตริป W ค่าระยะห่างระหว่างสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป S และค่าความยาวของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป L ค่า (W, S, L) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ในตารางที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ส่วนของสายส่งขั้นบันไดเป็นส่วนประกอบสำคัญซึ่งนำไปสร้างวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปเพื่อลดความยาวของสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนาน โดยประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ Za และ Zb ตัวแปรตามภาพประกอบ 19 โดยมีเงื่อนไข Za ต้องมากกว่า Zb ต่อมาคือความยาวทางไฟฟ้า θ และค่าความกว้างของสายส่งแบบขั้นบันไดแบบ 2 ท่อนคือ W และความยาวของสายส่งแบบขั้นบันไดแบบ 2 ท่อน ตามตารางที่ 4 ตามลำดับ

4.3 ผลการวัดและเปรียบเทียบวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ

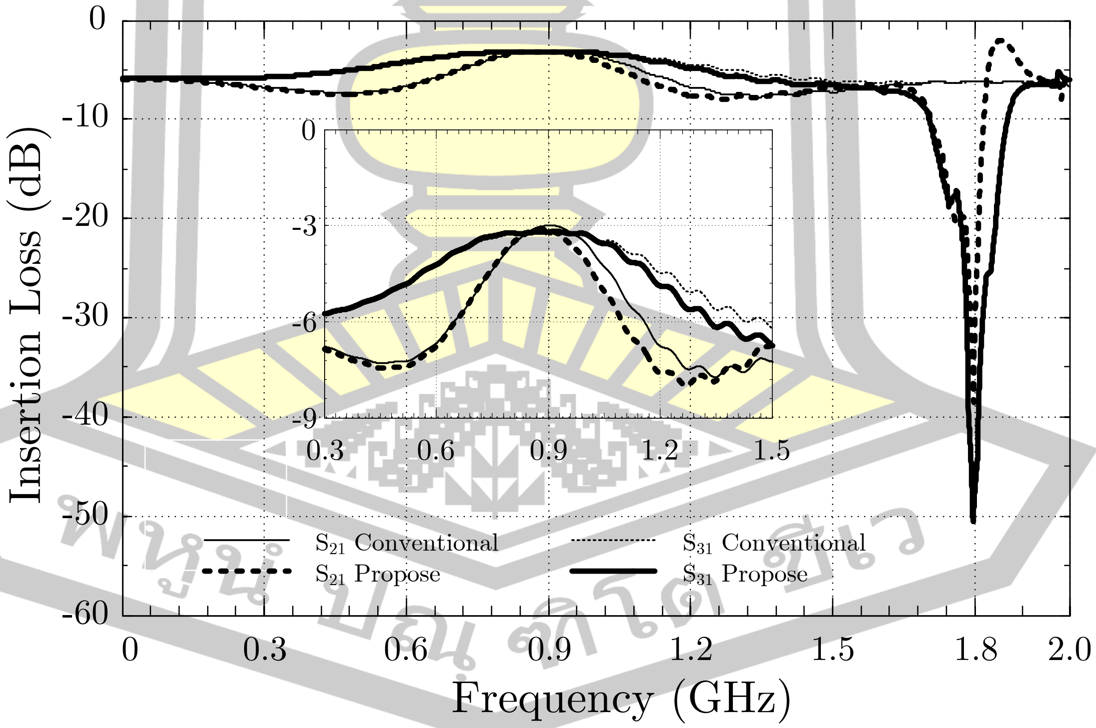
สำหรับการวัดทดสอบสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปโดยการวัดทดสอบประสิทธิภาพผลตอบสนองเชิงความถี่ ด้วยเครื่องมือวัดวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า รุ่น E571 B (Network analyzer) โดยทำการปรับเทียบก่อนวัดในช่วงความถี่แต่งแต่ 0.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งการวัดพารามิเตอร์ประกอบไปด้วยการสูญเสียย้อนกลับ การแยกโดด การใส่แทรก และ ผลต่างเฟสตามลำดับดังนี้



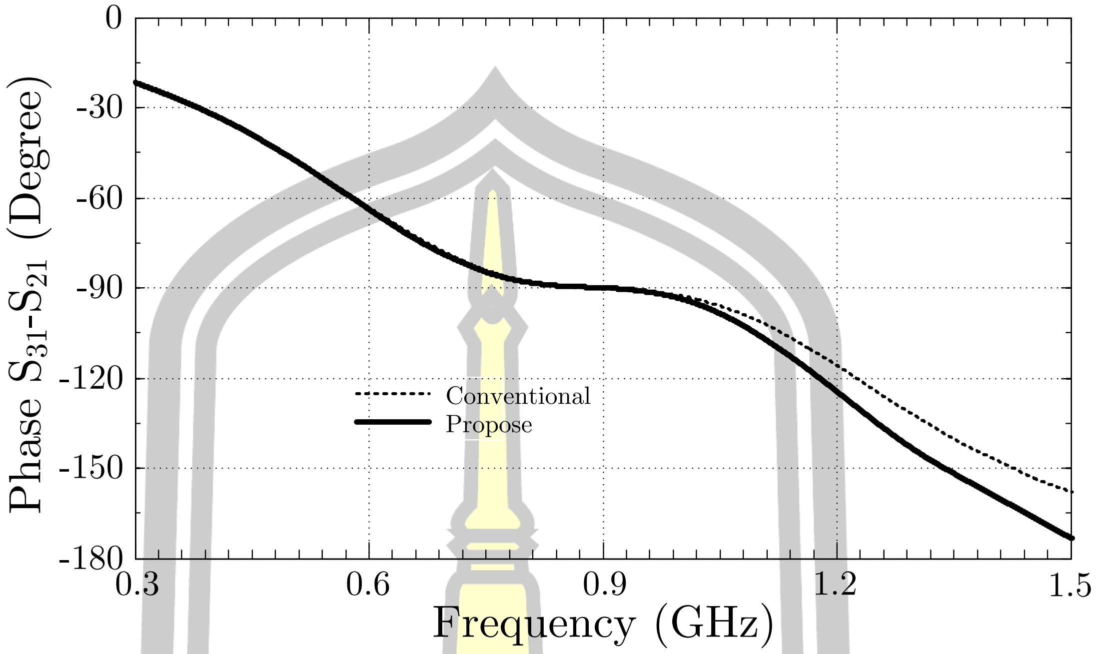
ภาพประกอบ 33 ผลการวัดทดสอบการสูญเสียย้อนกลับเปรียบเทียบแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ

จากภาพประกอบ 33 แสดงผลการวัดทดสอบการสูญเสียย้อนกลับเปรียบเทียบในช่วงความถี่ 0.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ ผลปรากฏกว่าที่ความถี่ใช้งาน 900 เมกะเฮิรตซ์ วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 32.39 เดซิเบล และการสูญเสียย้อนกลับของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป มีค่าเท่ากับ 38.29 เดซิเบล และภาพประกอบ 34 ที่ความถี่ $2f_0$ ของความความใช้งานหรือที่ความถี่ 1.8 กิกะเฮิรตซ์ พบว่ามีการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2

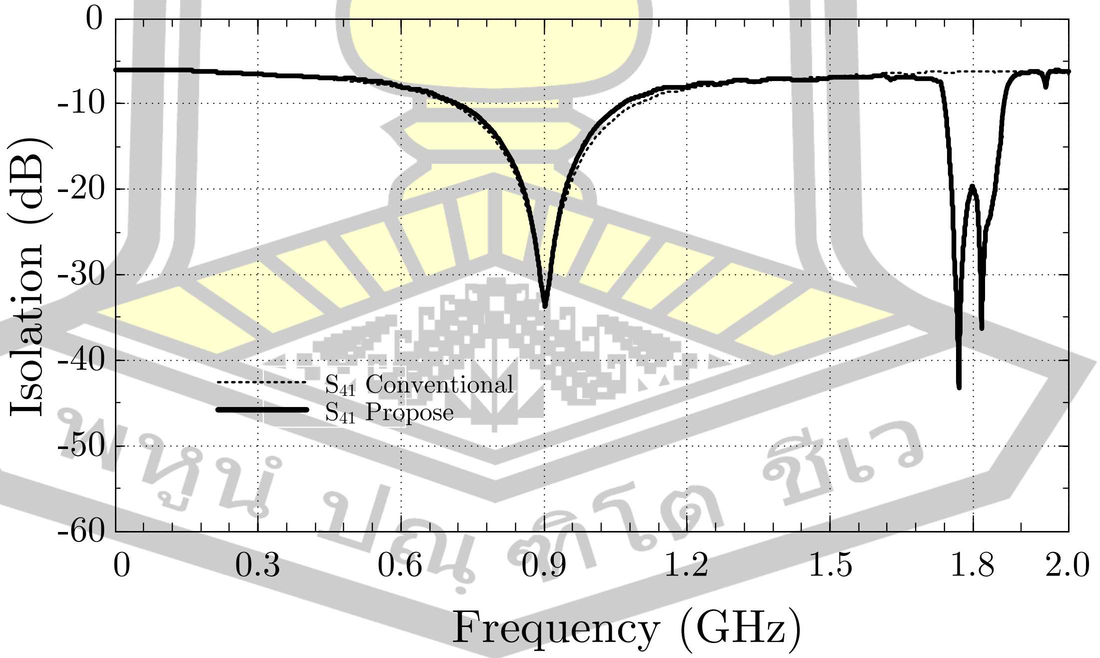
มีค่าเท่ากับ 38.47 เดซิเบลและ 50.54 เดซิเบล ของพารามิเตอร์ S_{21} และ S_{31} ตามลำดับ จากผลวัดเกิดการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์ไม่เท่ากันของค่าพารามิเตอร์ S_{21} และ S_{31} สามารถอธิบายได้ว่า S_{21} เมื่อสัญญาณอินพุตที่พอร์ตหมายเลข 1 และสัญญาณออกเอาต์พุตพอร์ตหมายเลข 2 สัญญาณผ่านวงจรกรองความถี่ 1 อันดับ ถัดมา S_{31} สัญญาณผ่านวงจร 2 อันดับ ส่งผลให้ผลการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมอันดับที่ 2 ดีกว่า ซึ่งจากภาพประกอบ 34 วงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมนั้น ไม่มีการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 นอกจากนี้ผลการวัดทดสอบยังได้เปรียบเทียบการใส่แทรก (Insertion loss) โดยผลปรากฏว่าค่าพารามิเตอร์ S_{21} และ S_{31} ของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมเท่ากับ 3.0 เดซิเบล และ 3.26 เดซิเบล ในส่วนค่าพารามิเตอร์ S_{21} และ S_{31} ของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 3.12 เดซิเบล และ 3.20 เดซิเบล ตามลำดับ ภาพประกอบ 35 แสดงผลการวัดทดสอบเปรียบระหว่างวงจรแบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ โดยพบว่า ผลต่างเฟสวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 90.27 องศา และวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 89.95 องศา



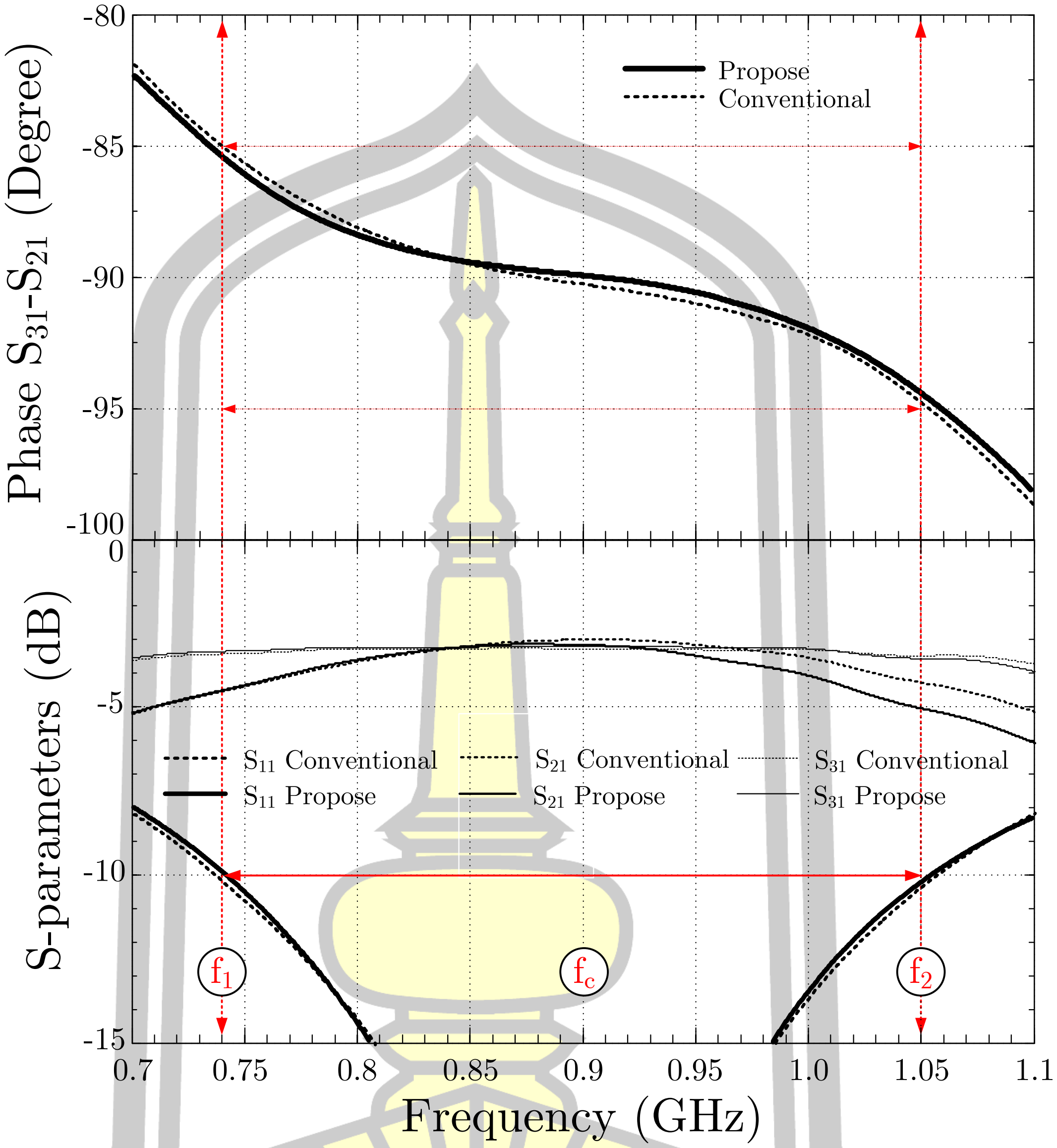
ภาพประกอบ 34 ผลการวัดทดสอบการใส่แทรกและการลดทอนสัญญาณ
ความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2



ภาพประกอบ 35 แสดงผลการวัดและเปรียบผลต่างเฟสของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอ



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงผลการวัดการแยกโดด (Isolation) แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ



ภาพประกอบ 37 ผลการวัดค่า S-parameters สำหรับใช้คำนวณแบนด์วิดท์

จากภาพประกอบที่ 37 สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและแบบนำเสนอที่ขนาด 10 เดซิเบล ได้ดังสมการ 4.1 และเพื่อให้เห็นความชัดเจนยิ่งขึ้นจากภาพประกอบ 37 ยังสามารถเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของผลต่างเฟสระหว่างเอาต์พุต 90 องศา ที่ขนาด 10 เดซิเบล จะเห็นได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมมีค่าผลต่างเฟสเท่ากับ 90 ± 5 องศา และวงจรบรานซ์ไลน์แบบนำเสนอมีค่าผลต่างเฟสเท่ากับ 90 ± 4 องศา

เมื่อ $\%BW$ คือเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

f_c คือความถี่ใช้งานหรือความถี่กลาง

f_1 คือความถี่ด้านล่างของความถี่ใช้งานหรือความถี่กลาง

f_2 คือความถี่ด้านบนของความถี่ใช้งานหรือความถี่กลาง

$$\%BW = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \qquad (4.1)$$

ตาราง 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์

ลำดับหัวข้อ		แบบดั้งเดิม	แบบนำเสนอ
1.การสูญเสียย้อนกลับ		32.39 เดซิเบล	38.29 เดซิเบล
2.การใส่แทรก	S_{21}	3.00 เดซิเบล	3.12 เดซิเบล
	S_{31}	3.26 เดซิเบล	3.20 เดซิเบล
3.การแยกโดด		32.8 เดซิเบล	33.78 เดซิเบล
4.แบนด์วิดท์		35.75%	35.22%
5.ผลต่างเฟส		90.27 องศา	89.95 องศา
6.ขนาดวงจร (cm^2)		42.27	38.95
7.ลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2	S_{21}	ไม่มี	38.47 เดซิเบล
	S_{31}	ไม่มี	50.54 เดซิเบล

จากภาพประกอบที่ 36 แสดงผลการวัดทดสอบการแยกโดดของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมกับแบบนำเสนอ ผลปรากฏว่าการแยกโดดมีค่าใกล้เคียงกันแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 32.8 เดซิเบล และแบบนำเสนอมีค่าเท่ากับ 33.79 เดซิเบล โดยจากงานวิจัยซึ่งปรับปรุงจากโครงสร้างเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพ 7 ด้าน จากที่ได้ศึกษาจากบทความวิจัยก่อนหน้าในบทที่ 2 และ ได้สังเคราะห์วงจรขึ้นมา เพื่อวัดทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า (Network analyzer) รุ่น E571 B โดยใช้วัสดุฐานรองAD260 สามารถแสดงผลการเปรียบประสิทธิภาพตามตารางที่ 5 พบว่าการปรับปรุงสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ดังกล่าวมีผลการสูญเสียย้อนกลับดีขึ้น สามารถลดขนาดพื้นที่ของวงจรได้จริง และมีการลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้จริงตามขอบเขตงานวิจัย

4.4 การอภิปรายผลการทดลอง

สำหรับการออกแบบการปรับปรุงการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์ด้วยวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป จากผลการจำลองและผลวัดทดสอบสมรรถนะการสูญเสียย้อนกลับดีกว่าวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานไลน์แบบดั้งเดิม จากเดิมมีค่าเท่ากับ 32.39 เดซิเบล เพิ่มเป็น 38.29 เดซิเบล นอกจากนี้ยังสามารถลดทอนสัญญาณความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้ดีกว่า 40 เดซิเบล และสามารถลดขนาดพื้นที่ของวงจรได้ 8 เปอร์เซ็นต์ โดยการนำวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปมาประยุกต์ร่วมหรือสังเคราะห์คุณสมบัติของวงจรที่เราต้องการนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรแบบอื่นในระบบสื่อสารไร้สายย่านความถี่ไมโครเวฟ เช่น วงจรแบ่งกำลังงาน วงจรเลื่อนเฟส เป็นต้น

พหูน ปญฺญา ชีเว

บทที่ 5 สรุปผลอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

โดยทั่วไปทราบดีว่าวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมนั้นทำงานได้ดีที่การส่งผ่านกำลังงานที่ 3 เดซิเบล มีการแบ่งหรือรวมกำลังงานและมีผลต่างเฟสที่เอาต์พุต 90 องศา จากจุดเด่นดังกล่าวจึงมีแนวความคิดเพื่อจะเพิ่มสมรรถนะของวงจรสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม โดยลดจุดด้อยในเรื่องพื้นที่ขนาดใหญ่จากย่านใช้งานความถี่ต่ำและยังสามรถลดทอนความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 โดยใช้เทคนิคการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริป

5.1 สรุปผลและอภิปราย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอเทคนิคการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแทนในโครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมโดยใช้วัสดุฐานรอง AD260 จากการทดสอบสร้างวงจรจริงและทำการวัดทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะที่ความถี่ใช้งาน 0.9 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า (Network analyzer) รุ่น E571 B เปรียบเทียบการวัดตั้งแต่ 0.1 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่การส่งผ่านกำลังงาน 3 เดซิเบล มีค่ามากกว่า 40 เดซิเบล นอกจากนี้ยังสามารถลดขนาดพื้นที่วงจรได้ 8 เปอร์เซ็นต์และสามารถลดทอนความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ได้ดีกว่า 40 เดซิเบล เมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิม โดยยังพบว่าค่าอัตราการแยกโดดผลต่างเฟส และการใส่แทรกของการส่งผ่านกำลังงานของ S_{21} และ S_{31} มีค่าใกล้เคียงกันแบบดั้งเดิมอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอเทคนิคการใส่แทรกวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปในโครงสร้างสายส่งเชื่อมต่อแบบบรานซ์ไลน์แบบดั้งเดิมและยังสามารถนำจุดเด่นในการลดทอนความถี่ปลอมเทียมฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ไปใช้งานในวงจรในลักษณะอื่น โดยทั่วไปความถี่ที่ไม่พึ่งประสงค์ซึ่งเกิดขึ้นจากการสร้างวงจรหรือองค์ประกอบอื่น ความถี่สำคัญที่ถัดจากความถี่ใช้งานคือความถี่อันดับที่ 2 เราสามารถนำวงจรกรองความถี่หยุดแถบแบบสายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปดังกล่าวนี้

เมื่อนำไปแทรกหรือสังเคราะห์คุณสมบัติให้เป็นไปตามลักษณะโครงสร้างของวงจรตามต้องการ โดยนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับอุปกรณ์ในระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างหลากหลาย

จากผลการวัดทดสอบสมรรถนะในบทที่ 4 นั้น การปรับเทียบเครื่องมือวัดนั้นมีความสำคัญยิ่ง ถ้าการปรับเทียบเครื่องมือวัดไม่ถูกต้อง ผลที่ได้จากการวัดก็คลาดเคลื่อน เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ วิธีการสังเกตผู้วิจัยสามารถเปรียบเทียบผลวัดจริงกับผลการจำลองเสมือนจริงได้ ซึ่งได้รับคำแนะนำจากกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ให้ทำการวัดทดสอบและเก็บผลใหม่อีกครั้ง ผลปรากฏว่าเป็นไปตามคำแนะนำของกรรมการสอบ

พหูนำ ปณฺ ฑิโต ชีเว

บรรณานุกรม

พหูน ปณฺ ฑิโต ชีเว

บรรณานุกรม

1. Pozar, D.M., *Microwave engineering*. 2009: John Wiley & Sons.
2. Lin, F., Q.-X. Chu, and Z. Lin, *A novel tri-band branch-line coupler with three controllable operating frequencies.* IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010. **20**(12): p. 666-668.
3. Arriola, W.A., J.Y. Lee, and I.S. Kim, *Wideband 3 dB branch line coupler based on open circuited coupled lines.* IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2011. **21**(9): p. 486-488.
4. Jung, Y.-K. and B. Lee, *Dual-band circularly polarized microstrip RFID reader antenna using metamaterial branch-line coupler.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012. **60**(2): p. 786-791.
5. Lin, T.-W., et al. *Compact branch-line coupler filter with transmission zeros*. in *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. 2015. IEEE.
6. Elesela, B.S. and Y.-C. Chiang. *Design of reconfigurable dual-band branch-line coupler*. in *2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*. 2016. IEEE.
7. Wang, Y., K. Ma, and S. Mou, *A Compact Branch-Line Coupler Using Substrate Integrated Suspended Line Technology.* IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016. **26**(2): p. 95-97.
8. Maktoomi, M.A., M.S. Hashmi, and F.M. Ghannouchi, *Systematic Design Technique for Dual-Band Branch-Line Coupler Using T-and Pi-Networks and Their Application in Novel Wideband-Ratio Crossover.* IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016. **6**(5): p. 784-795.
9. Wang, Q., J. Lim, and Y. Jeong, *Design of a compact dual-band branch line coupler using composite right/left-handed transmission lines.* Electronics Letters, 2016. **52**(8): p. 630-631.
10. Tang, C.-W., C.-T. Tseng, and K.-C. Hsu, *Design of wide passband microstrip branch-line couplers with multiple sections.* IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2014. **4**(7): p. 1222-1227.

11. Arriola, W. and I.S. Kim. *Wideband branch line coupler with arbitrary coupling ratio*. in *Asia-Pacific Microwave Conference 2011*. 2011. IEEE.

12. Phromloungsri, R., V. Chamnanphrai, and M. Chongcheawchamnan, *Quadruply-Inductive Compensated Parallel-Coupled Lines.* in 2006 Asia Pacific Microwave Con., 2006: p. 2840-2843.

13. ระวี พรหมหลวงศรี. "สายส่งเชื่อมต่อคู่ขนานไมโครสตริปแบบเชื่อมต่อด้วยตัวเหนี่ยวนำและการประยุกต์ใช้งาน" [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต]. 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร: กรุงเทพฯ.

14. Alexopoulos, N.G. and C.M. Krowne, *Characteristics of single and coupled microstrips on anisotropic substrates.* IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978. **26**(6): p. 387-393.

15. Gai, C., Y.-C. Jiao, and Y.-L. Zhao, *Compact Dual-Band Branch-Line Coupler With Dual Transmission Lines.* IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016. **26**(5): p. 325-327.

16. ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร. 2541, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์(ว.ส.ท.): กรุงเทพฯ. p. 1-274.

17. Wang, Y., et al. *A low loss branch line coupler based on substrate integrated suspended line (SISL) technology and double-sided interconnected strip line (DSISL)*. in *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. 2015. IEEE.

18. Amado-Rey, B., et al., *Impact of Metallization Layer Structure on the Performance of G-Band Branch-Line Couplers.* IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015. **25**(12): p. 793-795.

19. Yao, J., C. Lee, and S.P. Yeo, *Microstrip branch-line couplers for crossover application.* IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2011. **59**(1): p. 87-92.

20. Wu, S.-J., et al. *Mixed type branch line coupler designs*. in *2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*. 2015. IEEE.

21. Bekasiewicz, A. and S. Koziel, *Miniaturised dual-band branch-line coupler.* Electronics Letters, 2015. **51**(10): p. 769-771.

22. Koziel, S. and A. Bekasiewicz. *Efficient design optimization of compact dual-band microstrip branch-line coupler using response features*. in *2015 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*. 2015. IEEE.

23. Kurgan, P., S. Koziel, and J.W. Bandler. *Surrogate-based miniaturization-oriented design of two-section branch-line couplers*. in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2016. IEEE.

24. Phromloungsri, R. *An improvement of Wilkinson power divider with SITLs compensated microstrip bandstop filter*. in *Electrical Engineering Congress (iEECON), 2014 International*. 2014. IEEE.

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสมควร ศรีสวัสดิ์
วันเกิด	วันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	ตำบลดงมะไฟ อำเภอสุวรรณคูหา จังหวัดหนองบัวลำภู ประเทศไทย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 44 หมู่ที่ 11 บ้านนาเจริญ ตำบลดงมะไฟ อำเภอสุวรรณคูหา จังหวัดหนองบัวลำภู รหัสไปรษณีย์ 39270
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี รหัสไปรษณีย์ 41000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2541 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนดงมะไฟวิทยาคม ตำบลดงมะไฟ อำเภอสุวรรณคูหา จังหวัดหนองบัวลำภู
	พ.ศ. 2544 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนดงมะไฟวิทยาคม ตำบลดงมะไฟ อำเภอสุวรรณคูหา จังหวัดหนองบัวลำภู
	พ.ศ. 2551 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคหนองบัวลำภู ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง จังหวัดหนองบัวลำภู
	พ.ศ. 2554 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
	พ.ศ. 2561 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม