

การประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับ
การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

EXPERIMENTAL AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE IN
TRANSFORMER FOR PD DETECTION



โดย

นายณัฐวุฒิ

นายทินภัทร

นายธนกฤต

ศุภวิโรจน์เลิศ

ผงสูงเนิน

ภูแหรศรี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับ

การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

EXPERIMENTAL AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE IN
TRANSFORMER FOR PD DETECTION

โดย

นายณัฐวุฒิ	ศุภวิโรจน์เลิศ	61010361
นายทินภัทร	ผงสูงเนิน	61010409
นายธนกฤต	ภูแหรศรี	61010417

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับ
ดิสชาร์จบางส่วน

EXPERIMENTAL AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE IN
TRANSFORMER FOR PD DETECTION

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------|----------------|----------|
| 1. นายณัฐวุฒิ | ศุภวิโรจน์เลิศ | 61010361 |
| 2. นายทินภัทร | ผงสูงเนิน | 61010409 |
| 3. นายธนกฤต | ภูแหรศรี | 61010417 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้ทำปริญญานิพนธ์ตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอก นายธนดล เตียงทอง ในห้องปฏิบัติการวิจัยของ ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่คอยชี้แนะและความช่วยเหลือต่าง ๆ และขอขอบคุณคณะอาจารย์ ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ยืมเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดสอบและสถานที่เอื้อเอื้อสำหรับการใช้อุปกรณ์และเครื่องวัดในการทำการทดลองจนกระทั่งปริญญานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอแสดงความกตัญญูต่เวทิตาคุณแต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น คณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอน้อมรับผิด และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาปริญญานิพนธ์ต่อไป

นายณัฐวุฒิ	ศุภาวิโรจน์เลิศ
นายทินภัทร	ผงสูงเนิน
นายธนกฤต	ภูเรศรี
	ผู้จัดทำ

การประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับ
การตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน
EXPERIMENTAL AND EVALUATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE
IN TRANSFORMER FOR PD DETECTION

โดย นายณัฐวุฒิ	ศุภวิโรจน์เลิศ	61010361
นายทินภัทร	ผงสูงเนิน	61010409
นายธนภุต	ภูแหรศรี	61010417

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

ปัญหาใหญ่การระเบิดของหม้อแปลงไฟฟ้า อันเนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเหตุทำให้เกิดการสูญเสียในเชิงธุรกิจเป็นอย่างมาก ซึ่งก่อนหน้านี้ได้ใช้วิธีการตรวจสอบและประเมินผลแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และแบบคลื่นอะคูสติก (Acoustic Wave) สำหรับปริมาณนี้ได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญจึงได้ทำการศึกษาและทำการทดสอบการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ในการทดลองวัดและบันทึกผล ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบในการประเมินผลการทดลองวัดตามตำแหน่งต่าง ๆ บนผนังหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบไว้ และจะนำผลที่ได้จากการทดลองวัดมาวิเคราะห์ประเมินผลและเปรียบเทียบฟังก์ชันการถ่ายโอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง โดยพิจารณา ฟังก์ชันการถ่ายโอน ภาพหน้าตัดข้างประวิงกำลังงาน และการสูญเสียเชิงวิถี ในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง จากการประเมินผลและพิจารณาเปรียบเทียบจะเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและการทดลองวัดคุณลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแนวทางอย่างมากในการศึกษาและวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าและเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต

ABSTRACT

The explosion of the transformer due to the partial discharge of the transformer is a big problem, which caused huge business losses. Previously, there were methods of examination and evaluation using ultrasonic and acoustic waves, for this thesis saw the importance of having studied and done. Test the transmission of electromagnetic waves in a power transformer. The vector network analyzer was used to measure and record the results. A microstrip patch antenna was used to evaluate the experimental measurements on the designed transformer wall at different locations. The results obtained from the experiments will be analyzed, evaluated, and compared to the transfer function of the electromagnetic wave in the transformer. Considering the transfer function, power delay profile, and path loss, in the cases of no obstruction and obstruction from the evaluation and comparative consideration. Studies and experiments show that the data obtained measuring electromagnetic wave characteristics in transformers are guidelines in the study and analysis of partial discharges in the transformer. And basic data for analysis of partial discharges in the transformer in the future.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XVI
บทที่ 1	บทนำ
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2	วัตถุประสงค์ 2
1.3	ขอบเขตของโครงการ 2
1.4	สรุป 3
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง
2.1	การเกิดการดิสชาร์จบางส่วน 4
2.2	มาตรฐาน IEC TS 62478 9
2.3	ย่านความถี่สูงยิ่ง 10
2.4	หลักการของสายอากาศ 11
2.5	คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ 12
2.6	ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป 24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีมีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า	
3.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	28
3.2 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	34
3.3 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	38
3.4 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	40
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการจัดเก็บผลการทดลอง	43
3.6 ขั้นตอนการจัดเก็บผลการทดลอง	45
3.7 หลักการการประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	55
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	61
4.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่มีด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	65
4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	87
4.4 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	114
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	133
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	138

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การดำเนินงานในอนาคต	138
บรรณานุกรม	140
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการสูญเสียเชิงวิถิ	144
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ	156



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน	5
2.2 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ	6
2.3 การเกิดดิสชาร์จตามผิว	7
2.4 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนผิวฉนวน	9
2.5 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ	12
2.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	13
2.7 ระบบพิกัดแสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ	14
2.8 แบบรูปหลักระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	15
2.9 แบบรูปไอโซทรอปิก	16
2.10 แบบรูปชี้ทิศทาง	17
2.11 แบบรูปรอบทิศทาง	17
2.12 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงขั้วแบบ 3 มิติ	18
2.13 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงเส้นแบบ 2 มิติ	18
2.14 โครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	27
3.1 แบบจำลองโครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปโดยการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	30
3.2 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์	31
3.3 สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์	32
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	33
3.5 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	33
3.6 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง โดยที่กำหนด ด้านส่งคือ Tx13 และด้านรับคือ Rx6	34
3.7 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่ง 16×16 ตำแหน่ง	35
3.8 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ช่อง โดยที่กำหนดด้านส่งคือ Tx21 และด้านรับคือ Rx33	36
3.10 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่ง 40×40 ตำแหน่ง	37
3.11 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง	37
3.12 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	38
3.13 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดกรณีมีสิ่งกีดขวาง	39
3.14 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	40
3.15 การกำหนดตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	41
3.16 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีมีสิ่งกีดขวาง	42
3.17 การกำหนดตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	42
3.18 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B	43
3.19 ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐาน	44
3.20 สายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด อาจี142	44
3.21 สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้ทำการสร้างขึ้น	45
3.22 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน หม้อแปลงไฟฟ้าของการทดลองที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง	47
3.23 การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	47
3.24 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านส่งและด้านรับ	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	50
3.26 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	51
3.27 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับและทำการติดตั้งแกนกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวาง	51
3.28 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี	53
3.29 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	54
3.30 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง	55
3.31 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์ช่องสัญญาณการแพร่กระจายย่านความถี่สูงยิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า	58
4.1 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $ S_{11} $ ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง	62
4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง	63
4.3 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง	64
4.4 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปในระนาบ XZ ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง	65
4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	67
4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	67
4.8 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	68
4.9 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx23 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	68
4.10 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	69
4.11 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	70
4.12 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	70
4.13 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	71
4.14 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	72
4.15 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx23 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	72
4.16 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	73
4.17 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	75
4.18 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	80
4.20 อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	83
4.21 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	84
4.22 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	85
4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง	86
4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง	86
4.25 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	88
4.26 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	88
4.27 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	89
4.28 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	90
4.29 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	90
4.30 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	91
4.31 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	92
4.33 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	93
4.34 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	94
4.35 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	94
4.36 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	95
4.37 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	96
4.38 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	97
4.39 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	98
4.40 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	99
4.41 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณกรณีพิจารณา Tx1 เป็นฝั่งส่งสัญญาณ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	100
4.42 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	100
4.43 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	101
4.44 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	102
4.46 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	103
4.47 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	104
4.48 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	104
4.49 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	105
4.50 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	106
4.51 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	106
4.52 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	107
4.53 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	108
4.54 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	109
4.55 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	110
4.56 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	111
4.57 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 ด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	115
4.59 การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	116
4.60 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	117
4.61 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	117
4.62 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	118
4.63 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิธีแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	119
4.64 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ แบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	120
4.65 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของการสูญเสียเชิงวิธีแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	121
4.66 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ แบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง	121
4.67 การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	122
4.68 การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	123
4.69 การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.70 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	124
4.71 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	125
4.72 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นตัวส่งสัญญาณ แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง	125
4.73 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการสูญเสียเชิงวิถีแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	127
4.74 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้แบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	127
4.75 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของการสูญเสียเชิงวิถีแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	128
4.76 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้แบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง	129
4.77 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นตัวส่งสัญญาณ แสดงในรูปแบบคอนทัวร์	130
4.78 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นตัวส่งสัญญาณ แสดงในรูปแบบคอนทัวร์	131
5.1 แบบจำลองการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลง ไฟฟ้าสำหรับการทดลอง แบบ 3 มิติ	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป	30
3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองที่กำหนดการตั้งค่าในเครื่องวิเคราะห์ โครงข่ายแบบเวกเตอร์	46
4.1 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง	74
4.2 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง	76
4.3 ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง	79
4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง	81

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะชี้ให้เห็นถึงประเด็นสำคัญของเรื่อง การประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน ทั้งในแง่ของความสำคัญของปัญหา ในแง่ของวัตถุประสงค์ และขอบเขตของปริญญานิพนธ์ของคณะผู้ทำวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่กำลังใช้งานอยู่บริเวณนอกอาคาร (Outdoor) หุ้มด้วยวัสดุฉนวน เช่น สายส่ง ลูกถ้วย ที่ครอบลูกถ้วยเพื่อป้องกันสัตว์ เป็นต้น จะต้องได้รับผลกระทบจากมลภาวะมากมายเป็นเวลานานไม่ว่าจะเป็นความชื้น สิ่งสกปรก สัตว์ที่มาก่อสร้างบนอุปกรณ์ไฟฟ้าพวกลูกถ้วย มลสัตว์ และแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งมลภาวะเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย มีผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งานลดลงจนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร สร้างความเดือดร้อนให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าและทำให้ระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพในการจ่ายไฟฟ้า การเกิดรอยไหม้ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จำกัดความปลอดภัยทางไฟฟ้าให้แก่ฉนวนในระบบไฟฟ้ากำลังและเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายที่ฉนวน โดยเริ่มต้นจากเกิดปรากฏการณ์ดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิว ความรู้ทางด้านปัจจัยต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงและความเสียหายของฉนวนจากการเกิดรอยไหม้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การออกแบบที่เหมาะสมและการนำไปใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้พิจารณาใช้อัลตราโซนิกและการส่งออกแบบอะคูสติก (Acoustic Emission) ในการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

วิธีการส่งออกแบบอะคูสติกจะทำการวัดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharges: PD) ในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้งแบบเรซิน และทำนายคลื่นบนขดลวดแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงการแพร่กระจายของสัญญาณอะคูสติก โดยใช้ขดลวดกับเซ็นเซอร์วัดการส่งออกแบบอะคูสติก มีการเสนอทำนายคลื่นเพื่อปรับปรุงการลดทอนสัญญาณอย่างรวดเร็ว และยังเป็นวิธีที่ปลอดภัยสำหรับการวัดอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำนายคลื่นก็ถูกติดตั้งบนหม้อแปลงชนิดแห้งแบบหล่อเรซิน การวัดและการหาตำแหน่งของสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าจะดำเนินการแสดงให้เห็นถึงการระบุตำแหน่ง PD ในหม้อแปลงไฟฟ้า [2]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เห็นความสำคัญกับการประเมินผลทดลองวัดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน โดยมีการออกแบบจำลองและการวัดจริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปในการประเมินผลการทดลองวัด สำหรับการวิเคราะห์ได้พิจารณาพารามิเตอร์ฟังก์ชันการถ่ายโอนและการสูญเสียเชิงวิถี ในกรณีมีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า นำผลที่ได้จากการวัดนำมาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน
- 2) ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปย่านความถี่สูงยิ่ง สำหรับทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า
- 3) ออกแบบจำลองและการวัดจริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง
- 4) ประเมินผลและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีมีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

- 1) ศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูงยิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 630 kVA โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์และสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านรับและด้านส่ง
- 2) ออกแบบจำลองและทำการวัดจริงการแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า
- 3) ประเมินและวิเคราะห์ผลการทดลองวัดจริงของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหม้อแปลง โดยพิจารณาพารามิเตอร์ฟังก์ชันการถ่ายโอนและการสูญเสียเชิงวิถี ในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า

1.4 สรุป

โครงการในครั้งนี้จะแยกออกเป็นทั้งหมด 5 บท ซึ่งแต่ละบทนั้นจะมีใจความที่สำคัญของโครงการที่ต่างกันไป โดยในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 จะเป็นการกล่าวถึงบทนำของโครงการ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของโครงการ และขอบเขตของโครงการ

บทที่ 2 จะเป็นกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้และปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้ ในบทนี้ยังกล่าวถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องด้วย

บทที่ 3 ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป การออกแบบโมเดลจำลองการทดลอง ขั้นตอนในการจัดเก็บผลการทดลอง และหลักการประเมินผลการทดลอง

บทที่ 4 บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งจะทำการการวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ และทำการสรุปผลการทดลองของแต่ละพารามิเตอร์

บทที่ 5 บทนี้จะจบท้ายซึ่งจะกล่าวถึงการสรุปและวิจารณ์โครงการนี้ ข้อเสนอแนะและสิ่งที่จะทำในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบ่งออกเป็น ส่วน ในส่วนแรกเป็นเรื่องการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ส่วนที่สองเป็นเรื่องมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ส่วนที่สามเป็นเรื่องเทคโนโลยีความสูงยิ่ง ส่วนที่สี่เป็นเรื่องทฤษฎีและโครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป และส่วนที่ห้าเป็นเรื่องการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) คือการเกิดการเสียสภาพการเป็นฉนวนเพียงบางส่วนของระบบการฉนวนและจะมีลักษณะคล้ายเป็นตัวเก็บประจุแฝง ซึ่งจะทำให้เกิดการดิสชาร์จที่ไม่ได้เชื่อมโยงถึงกันระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) ดังวงจรสมมูล ซึ่งถือว่าไม่ได้เป็นการเสียสภาพการเป็นฉนวนสมบูรณ์ทั้งระบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะเช่น สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีสิ่งเจือปน ที่ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดสูงกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต

โดยการดิสชาร์จบางส่วนในแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวนในลักษณะชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุดมีผลทำให้ฉนวนเสียเป็นจุด ๆ และเกิดความผิวดินขยายตัวมากขึ้น อาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวอย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเกิดความเสียหายและอายุการใช้งานของฉนวนจะลดลง ซึ่งในการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะให้สัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ เช่น แสง เสียง รั่วสปีปฏิริยาเคมี คลื่นความถี่วิทยุและผลทางไฟฟ้า เป็นต้น [3]

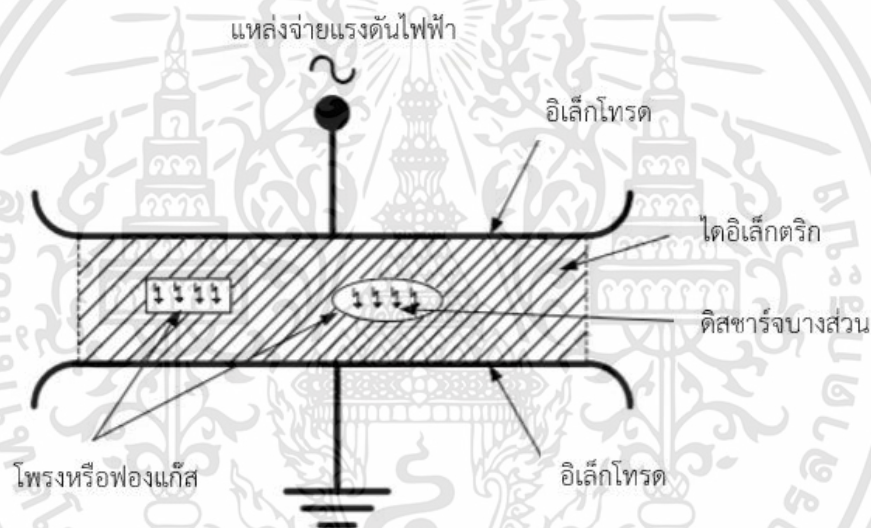
2.1.1 ประเภทของการดิสชาร์จบางส่วน

การดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักคือ

2.1.1.1 ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน

ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน (Internal Discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสิ่งเจือปนนั้นมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำและความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่นจึงทำให้บริเวณนี้เกิดเบรกดาวก่อน ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในเกิดขึ้นเนื่องมาจากมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าสภาพยอมต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลักเจือปนอยู่ในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว (น้ำมันหม้อแปลง) ดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศหรือสิ่งเจือปนดังกล่าว

มีค่าสูงกว่าฉนวนรอบ ๆ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในสามารถเกิดในพลาสติก กระดาษฉนวน และ น้ำมันฉนวนเรซิน เป็นต้น ขนาดของแรงดันที่ดิสชาร์จเริ่มเกิดได้ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าใน โพรงอากาศและความคงทนต่อการเบรกดาว์นของโพรงอากาศ โดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรง อากาศขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันสูง รูปร่าง ของโพรงอากาศ และทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าความทนต่อแรงดัน เบรกดาว์นของโพรงอากาศขึ้นอยู่กับขนาดของโพรงอากาศ นอกจากนี้ความทนต่อแรงดันเบรกดาว์น ถูกกำหนดโดยชนิดของแก๊สและความดันแก๊สในโพรงอากาศ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายในสามารถ ทำความเสียหายแก่ฉนวนได้ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและขนาดของดิสชาร์จ

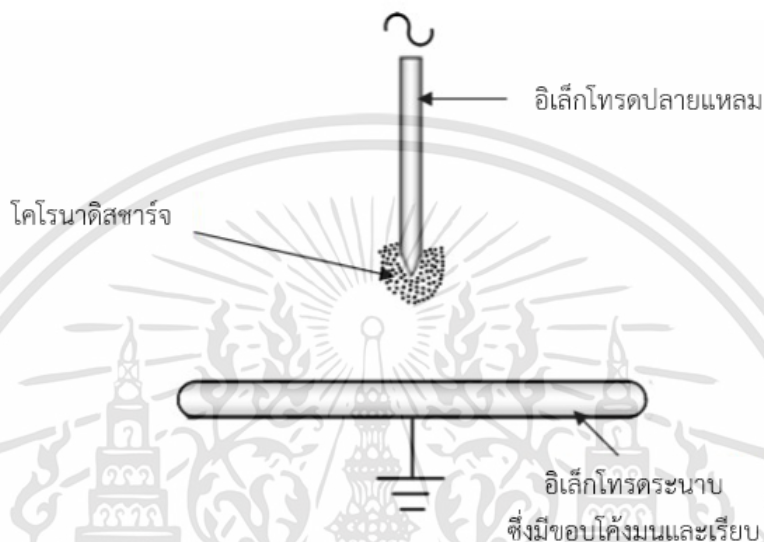


รูปที่ 2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน [4]

2.1.1.2 โคโรนาดิสชาร์จ

โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge) เกิดขึ้นได้ในอากาศหรือแก๊ส บริเวณอิลเล็กโทรดปลายแหลมหรือลักษณะขอบคม ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง นอกจากนี้โคโร- นาดิสชาร์จสามารถเกิดในน้ำมันได้เช่นกัน โคโรนาดิสชาร์จสามารถจำลองได้โดยใช้อิลเล็กโทรดปลาย แหลมกับอิลเล็กโทรดระนาบ โดยในการจำลองถ้าให้อิลเล็กโทรดปลายแหลมเป็นด้านแรงสูงและให้อิลเล็กโทรดระนาบเป็นด้านต่อลงดินดังรูปที่ 2.2 ดิสชาร์จจะเกิดขึ้นด้านครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดัน และถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกก็จะเกิดทั้งครึ่งลบและครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดัน ถ้าอิลเล็กโทรดปลายแหลม

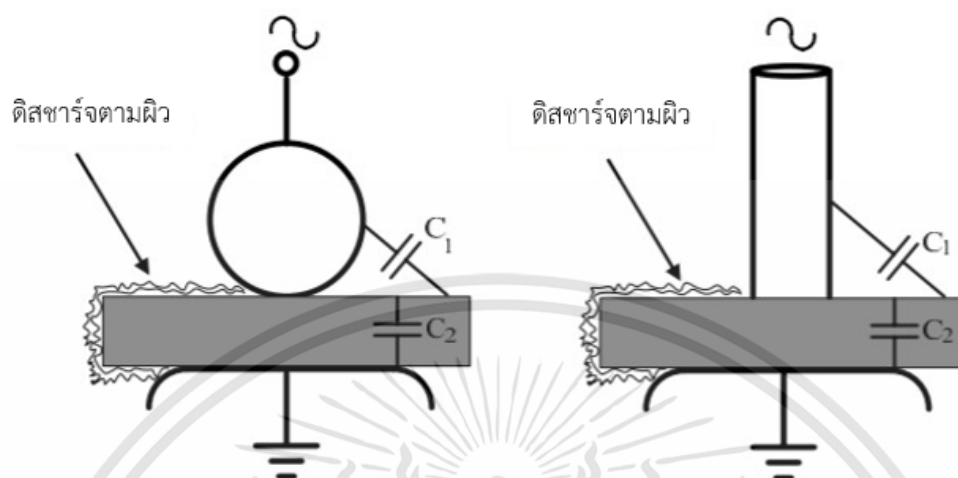
เป็นด้านต่อลงดินและให้อิเล็กโตรดระนาบเป็นด้านแรงสูง ดิสชาร์จก็จะเกิดขึ้นที่ครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดันก่อน



รูปที่ 2.2 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ [4]

2.1.1.3 ดิสชาร์จตามผิว

ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge) มักจะเกิดขึ้นถ้าผิวฉนวนบริเวณนั้นมีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานหรือแนวเดียวกันกับผิวฉนวน ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นได้กับปลอกฉนวนนำสาย และปลายสายเคเบิล เป็นต้น ดิสชาร์จส่งผลต่อสนามไฟฟ้าเป็นผลให้ดิสชาร์จแผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิว (บริเวณแรกที่ดิสชาร์จเริ่มเกิด) ที่องค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศ ในน้ำมันฉนวน และในซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride: SF_6) ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน (ของแข็งกับแก๊สหรือของแข็งกับของเหลว) เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างในการศึกษาการเกิดดิสชาร์จตามผิวทำ โดยการนำแผ่นฉนวนวางคั่นระหว่างอิเล็กโตรดดังรูปที่ 2.3

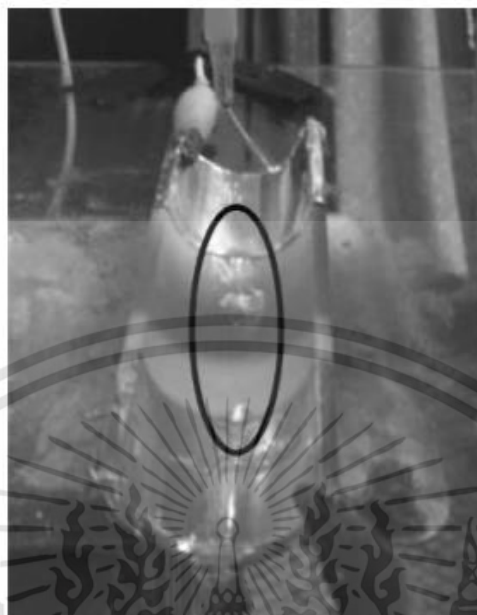


รูปที่ 2.3 การเกิดดิสชาร์จตามผิว [4]

จากรูปที่ 2.3 ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นบริเวณที่อิเล็กโทรดทรงกระบอกหรืออิเล็กโทรดทรงกลมสัมผัสกับแผ่นฉนวน เพราะบริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นตาม ดิสชาร์จจะขยายตัวออกไปยังขอบของแผ่นฉนวน ถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดจุดวาบไฟข้ามแผ่นฉนวนไปหาอิเล็กโทรดตรงนั้นได้หรือแผ่นฉนวนมีความหนาน้อยและแผ่นกว้างมาก ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดเป็นบริเวณกว้างในระดับหนึ่งแล้วเกิดเบรกตัวนำเจาะทะลุแผ่นฉนวนได้ เมื่อทำการพิจารณาค่าสภาพยอมของฉนวนแข็งที่มีค่าสูงกว่าค่าสภาพยอมของอากาศหลายเท่าทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวน C_2 มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ C_1 ดังนั้นตามหลักการของโวลเตจไดวิเดอร์ (Voltage Dividers) แบบตัวเก็บประจุแรงดันตกคร่อม C_1 จึงมากกว่า ซึ่งหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นมีค่าสูงกว่าและเมื่อเพิ่มแรงดันมากพอที่จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวเกินค่าวิกฤต ก็จะเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนและเมื่อเพิ่มแรงดันสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (Inception Voltage) ก็จะทำให้เกิดดิสชาร์จไปตามผิวฉนวน ความเข้มของดิสชาร์จตามผิวจะขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนแข็ง C_2 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับความหนาและค่าสภาพยอมของแผ่นฉนวน [4]

2.1.2 ผลของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

โดยผลจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนนั้นได้กลายเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวฉนวนนั้นคือ การเกิดรอยไหม้ (Tracking) บนผิวฉนวน การเกิดรอยไหม้จากฉนวนที่ต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่ภายนอกอาคาร บริเวณผิวของฉนวนนั้นนับว่าเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกทั้งหลาย ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบทำให้เกิดเป็นชั้นบาง ๆ ที่เปียกและกลายเป็นคราบสิ่งสกปรกเกาะอยู่ตามพื้นผิวฉนวน คราบสิ่งสกปรกเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดส่วนที่นำไฟฟ้าขึ้นบริเวณผิว ดังนั้นกระแสจึงสามารถวิ่งไหลผ่านไบนผิวฉนวนระหว่างด้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดินได้หรือที่เรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage Current) ค่าความต้านทานของผิวฉนวนจึงลดลงอย่างมากเมื่อมีสิ่งสกปรกและความชื้น ความต้านทานที่ต่ำลงนั้นในทางกลับกันจะทำให้กระแสรั่วบนผิวยิ่งมีค่าสูงขึ้น มีการขยายตัวเร็วขึ้นและมีพลังงานมากพอที่จะทำให้ลายผิววัสดุ เนื่องจากการสูญเสียความชื้นของผิวฉนวนโดยความร้อนของกระแสรั่วที่ไหลผ่านนั้นจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ทำให้นำไปสู่การสร้างพื้นที่แห้งขนาดเล็ก ในหลายบริเวณเมื่อพื้นที่แห้งขนาดเล็กเหล่านี้ได้ก่อตัวขึ้นการไหลของกระแสรั่วก็就会被ขัดขวางจึงเปรียบเสมือนเป็นความต้านทานที่มีค่าสูงมากส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าบริเวณพื้นที่แห้งดังกล่าวสูงตามไปด้วย เมื่อค่าความเครียดที่บริเวณพื้นที่แห้งขนาดเล็กสูงขึ้นจนทำให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือเกิดปรากฏการณ์ไอออไนเซชัน (Ionization) ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าจนมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดเส้นประกายไฟขึ้นที่บริเวณพื้นที่แห้งที่กระจายอยู่ในหลายบริเวณบนผิวฉนวนเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนดังรูปที่ 2.4 ส่งผลให้พื้นที่นั้นมีความร้อนสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของดิสชาร์จไฟฟ้าจนกระทั่งทำให้วัสดุไม่สามารถทนได้จึงเกิดเป็นรอย [1]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนผิวฉนวน [1]

2.2 มาตรฐาน IEC TS 62478

การดิสชาร์จบางส่วนจะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง ปล่อยแสง และก่อให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของวัสดุฉนวน ผลกระทบทางกายภาพและทางเคมีเหล่านี้สามารถตรวจพบได้โดยวิธีการวินิจฉัยที่หลากหลายและองค์ประกอบการตรวจจับ (Sensor) ที่เหมาะสม นอกจากวิธีการทางไฟฟ้าที่เรียกว่า "แบบธรรมดา" แล้วยังสามารถตรวจจับการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีที่ต่าง ๆ ได้ และมาตรฐาน IEC TS 62478 เป็นมาตรฐานที่ใช้สำหรับการตรวจหาและวินิจฉัยการดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้กำหนดให้ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในย่านความถี่สูง ความถี่สูงมาก และความถี่สูงยิ่ง

เหตุการณ์การดิสชาร์จบางส่วนปล่อยสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะที่อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ามีสเปกตรัมความถี่ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วน และตัวกลางของข้อบกพร่องโดยรอบ ข้อบกพร่องสามารถสร้างพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้นถึง ~ 0.9 นาโนวินาที ในน้ำมัน เวลาที่เพิ่มขึ้นเร็วที่สุดสำหรับข้อบกพร่องในการวัดที่ไม่ดีคือ ~ 17 นาโนวินาที พัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนเหล่านี้มีสเปกตรัมในช่วงความถี่ 300 – 3000 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงความถี่นี้เรียกว่า ช่วงความถี่สูงยิ่ง ดังนั้นวิธีการตรวจจับสัญญาณการดิสชาร์จบางส่วนในช่วงความถี่นี้จึงเรียกว่าวิธี UHF PD

มาตรฐาน IEC TS 62478 เหมาะสำหรับการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (HF/VHF/UHF) และการวัดแบบอะคูสติก (Acoustic) ของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า ข้อมูลจำเพาะนี้เกี่ยวข้องกับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น เซอร์ที่มีช่วงความถี่ต่างกัน และความไวที่แตกต่างกัน งานที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จและการสอบเทียบระบบการวัดหรือการตรวจสอบความไวจะถูกนำมาพิจารณาด้วย [5]

2.3 ย่านความถี่สูงยิ่ง

ความถี่สูงยิ่ง (Ultra-High Frequency: UHF) หมายถึงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) กำหนดไว้สำหรับคลื่นวิทยุในช่วงระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 กิกะเฮิร์ตซ์ หรือที่เรียกว่า ย่านเดซิเมตร (Decimetre Band) เนื่องจากมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 เมตร ถึง 0.1 เมตร (1 เดซิเมตร) ความถี่สูงยิ่งมักส่งแบบคลื่นตรงเป็นหลัก ซึ่งมักจะโดนปิดกั้นด้วยเนินเขาและอาคารขนาดใหญ่แม้ว่าการส่งผ่านกำแพงอาคารจะมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการรับสัญญาณในร่มก็ตาม ความถี่สูงยิ่งใช้สำหรับการออกอากาศโทรทัศน์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ การสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งรวมถึงจีพีเอส บริการวิทยุส่วนบุคคล รวมถึงไวไฟ บลูทูธ เครื่องส่งรับวิทยุ โทรศัพท์ไร้สาย และแอปพลิเคชันอีกมากมาย

2.3.1 ข้อได้เปรียบของการส่งความถี่สูงยิ่ง

คลื่นวิทยุความถี่สูงยิ่งมีความยาวสั้นกว่าความถี่สูงมาก (Very-High Frequency: VHF) มากประมาณ 12 ถึง 24 นิ้ว ส่งผลให้ความยาวของสายอากาศลดลงรวมถึงช่วงคลื่นวิทยุ สิ่งใดจากอาคารไปยังร่างกายมนุษย์สามารถบวกรวมการส่งสัญญาณความถี่สูงยิ่ง การรบกวนมีแนวโน้มที่จะไกลกว่านี้ แต่อนุญาตให้ใช้แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่มากกว่าได้ ดังนั้นอาจพบช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นรวมถึงช่วงสัญญาณเสียงที่กว้างขึ้น อนุญาตสูงสุด 250 มิลลิวัตต์ เกินขีดจำกัดพลังงาน 50 มิลลิวัตต์ ที่ใช้กับความถี่สูงมาก

สัญญาณวิทยุความถี่สูงยิ่งใช้ในหลายด้านรวมถึงการสื่อสารผ่านดาวเทียม GPS Wi-Fi บลูทูธ เครื่องส่งรับวิทยุ โทรศัพท์ไร้สาย โทรศัพท์มือถือ และการแพร่ภาพโทรทัศน์ ข้อได้เปรียบอย่างมากของการส่งความถี่สูงยิ่งคือ ความยาวคลื่นสั้นที่สร้างโดยความถี่สูง ขนาดของคลื่นวิทยุเกี่ยวข้องโดยตรงกับความยาวของการส่งสัญญาณเช่นเดียวกับสายอากาศรับสัญญาณ โดยทั่วไปสายอากาศความถี่สูงยิ่งจะสั้นและกว้าง [6]

2.4 หลักการของสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพิเศษได้ ในวงจรไฟฟ้าธรรมดา ขนาดของขดลวด ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของค่าความถี่ที่ใช้และพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็ยังคงอยู่ภายในวงจร เพื่อนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพหรือแปลงออกมาในรูปความร้อนแต่ถ้าขนาดของตัวนำหรืออุปกรณ์มีขนาดพอเหมาะ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นพบว่ามีความยาวบางส่วนออกไปจากวงจรในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและถ้าวงจรนั้นถูกออกแบบให้พลังงานส่วนใหญ่ของวงจรถูกแผ่ออกไป จะแทนวงจรชนิดนี้ว่าสายอากาศ (Antenna) โดยทั่วไปสายอากาศประกอบด้วยตัวนำในหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่แล้วมักใช้ลวดตัวนำ (Wire) มีบางแบบที่ใช้แท่งตัวนำ (Rod) หรือท่อตัวนำ (Rube)

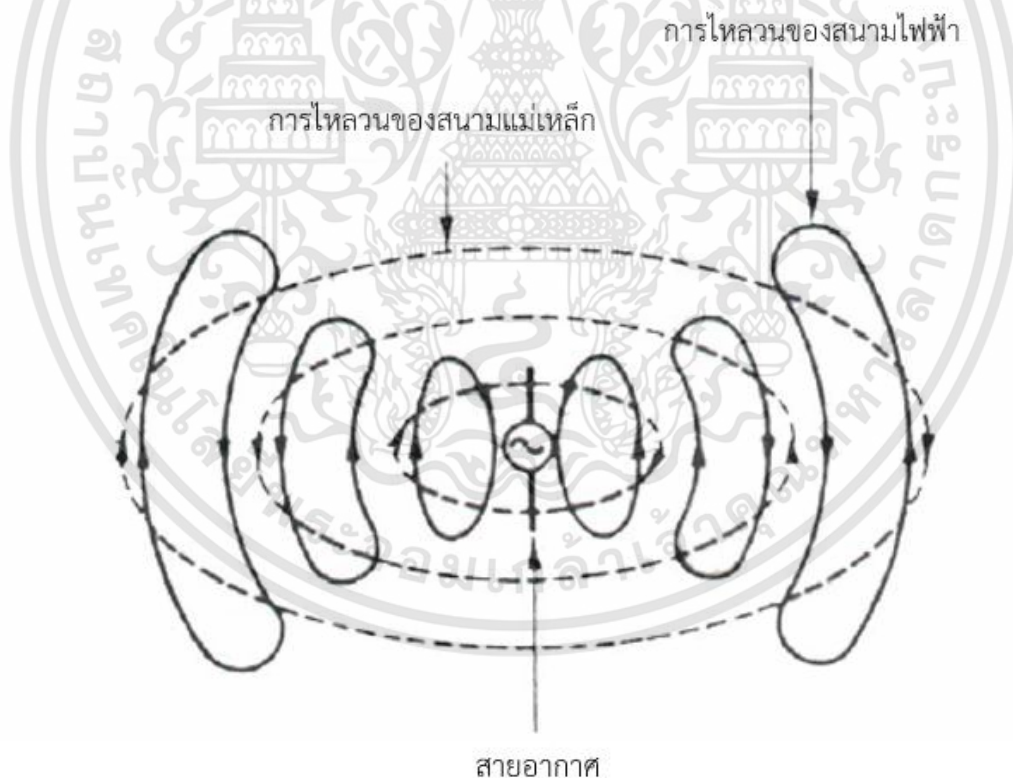
ในบทนี้ ความหมายของลวดตัวนำ (Wire) หมายถึง ตัวนำชนิดที่มีขนาดของภาคตัดขวางเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาว ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากลวดตัวนำมีค่าขึ้นกับความยาวของลวดตัวนำกับขนาดของกระแสที่ไหลอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมลวดตัวนำ แต่จะเป็นการสะดวกมากกว่าถ้าวัดในรูปของกระแส อาจกล่าวได้ว่าความเข้มสนามเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของกระแส ดังนั้นจึงต้องให้มีกระแสในขนาดมากเท่าที่เป็นไปได้ผ่านลวดตัวนำเพื่อให้เกิดกำลังส่งปริมาณมากขึ้น

ในวงจรทั่วไปจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ (Reactance) เป็นค่าทางเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ในวงจรกระแสสลับ พบว่าถ้าค่ารีแอ็กแตนซ์มีน้อยลงจนหมดไป ทำให้ปริมาณกระแสในวงจรมีค่ามากที่สุดหรือในอีกแง่หนึ่งเรียกว่า รีโซแนนซ์ (Resonant) ที่ความถี่ใช้งานเช่นเดียวกับกรณีของสายอากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากที่สุดทำให้มีการแผ่กระจายคลื่นมากที่สุดนั่นคือสายอากาศถูกรีโซแนนซ์ สำหรับวงจรธรรมดาแล้วค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) มักมีอยู่ในขดลวดหรือคอยล์ ค่าประจุไฟฟ้า (Capacitance) มีอยู่ในตัวเก็บประจุ และค่าความต้านทานมีอยู่ในตัวต้านทานเรียก วงจรลักษณะนี้ว่ามีค่าคงที่แบบเอกเทศ (Lumped Constant) แต่ในสายอากาศค่าความเหนี่ยวนำ ค่าประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานมีอยู่กระจายผสมไปทั่วลวดตัวนำเรียกววงจรลักษณะนี้ว่ามีค่าคงที่แบบกระจาย (Distributed Constant) ซึ่งวงจรที่มีค่าคงที่แบบนี้มักใช้ตัวนำที่เป็นเส้นตรงและมักนิยมเรียกกันว่า วงจรลิเนียร์ (Linear Circuits) [7]

2.5 คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ

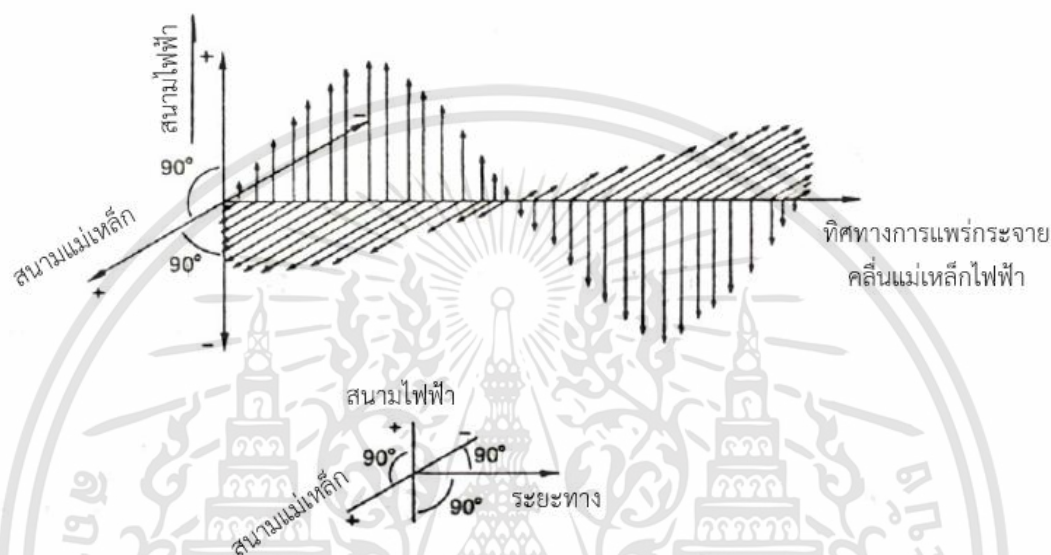
2.5.1 การแพร่กระจายสัญญาณจากสายอากาศ

เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำที่มีทิศทางตามทิศทางของกระแส ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนตามไปด้วยและพบว่าสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามไฟฟ้าให้ขึ้นมา ซึ่งถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าจะไม่เกิดขึ้น ส่วนทิศทางของสนามไฟฟ้าพิจารณาจากกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) หรือกฎมือขวา ทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้พิจารณาได้ว่าถ้าป้อนกระแสไฟสลับผ่านลวดตัวนำจะทำให้เกิดทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กขึ้น กำหนดให้ใช้กระแสสัญญาณไซน์ผ่านเข้าลวดตัวนำ พบว่าทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามคลื่นไซน์ด้วย โดยทั้งสองสนามแพร่ออกมาจากลวดตัวนำด้วยความเร็วแสง (ประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที) ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 การแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศ [7]

พลังงานที่แพร่กระจายไปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มในค่าความถี่เรียกพลังงานส่วนนี้ว่า สนามพลังงานที่แพร่กระจาย ซึ่งอยู่ในรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าทำมุมฉากซึ่งกันและกัน รวมทั้งยังทำมุมฉากกับทิศทางการแพร่กระจายดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [7]

ระนาบที่มีสนามไฟฟ้าและมีทิศตามการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า ระนาบโพลาริเซชันของคลื่น ส่วนคลื่นในโพลาริเซชันแนวตั้งจะเหนี่ยวนำให้ลวดตัวนำที่อยู่แนวตั้ง เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กตัวผ่านลวดตัวนำและไม่มีผลต่อลวดตัวนำ ในแนวราบ เมื่อวิเคราะห์ถึงภายในสายอากาศพบว่ามีสนามพลังงานเกิดขึ้นดังนี้

- สนามพลังเหนี่ยวนำ แทนพลังงานส่วนที่ไหลอยู่ภายในสายอากาศและไม่แพร่กระจายออกไป
- สนามพลังที่แพร่กระจาย แทนส่วนที่แพร่จากสายอากาศไป ที่มีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่นและเป็นสัดส่วนกลับกันของระยะทางที่ไกลจากสายอากาศออกไป

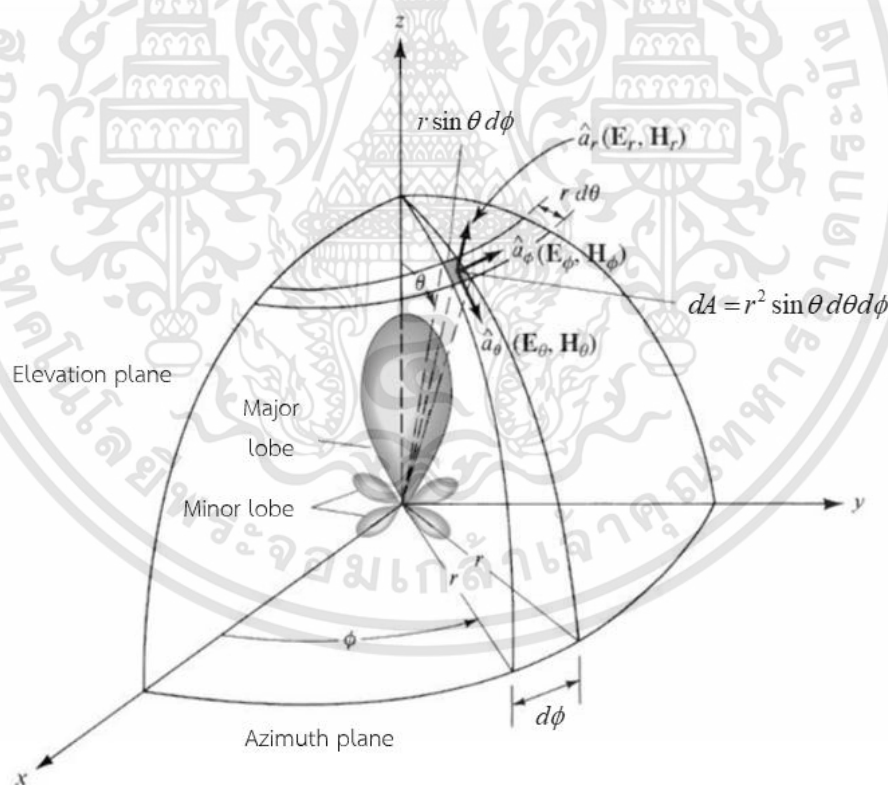
พบว่าในระยะใกล้กับสายอากาศมีปริมาณของสนามพลังเหนี่ยวนำมากกว่า แต่ที่ระยะทางไกลกว่า $\frac{\lambda}{2\pi}$ จากสายอากาศนั้น ค่าสนามพลังที่แพร่กระจายมีมากกว่า (λ แทนความยาวคลื่นของสัญญาณ

จากสายอากาศ) เมื่อ E เป็นขนาดหรือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า/เมตร) H เป็นขนาดหรือแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก (แอมแปร์/เมตร) และค่าอัตราส่วนระหว่างความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของภาวะสูญญากาศ คำนวณดังสมการ 2.1

$$\frac{E}{H} = 120\pi = 377\Omega \quad (2.1)$$

2.5.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

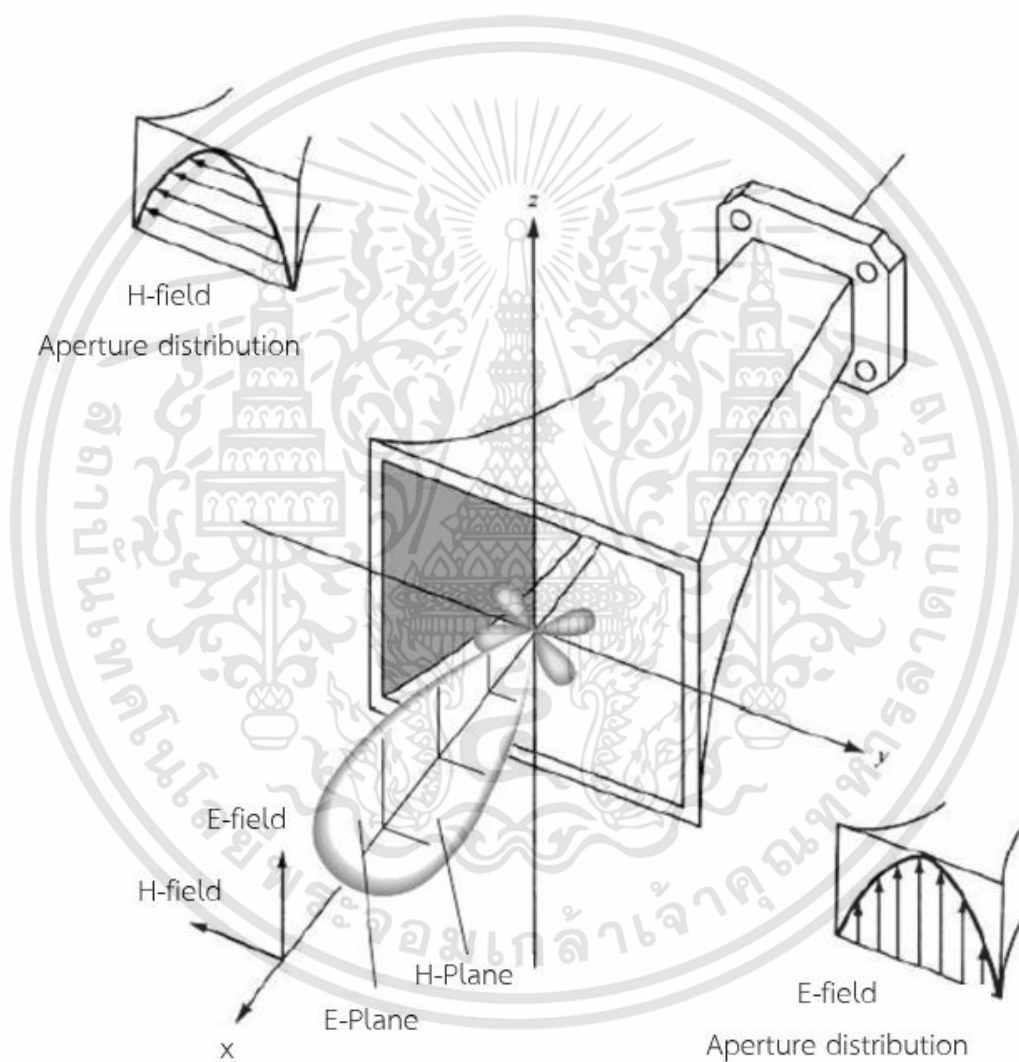
รูปภาพแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนใหญ่มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field) ดังรูปที่ 2.7 แบบรูปกำลังของสายอากาศแบบรีดิมิ่งที่ดังรูปที่ 2.8 แบบรูปสนาม (Field Pattern) เป็นกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่มีรีดิมิ่งที่ในทิศทางต่าง ๆ



รูปที่ 2.7 ระบบพิกัดแสดงคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ [8]

2.5.2.1 แบบรูปหลัก (Principal Pattern)

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย สำหรับสายอากาศโพลาริซเซชันแบบรูปประธานสนามไฟฟ้าคือระนาบที่มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่ใหญ่ที่สุด ดังรูปที่ 2.8 แบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็กคือระนาบที่ประกอบด้วยเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางที่เหมาะสมที่สุดของการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 2.8 แบบรูปหลักระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร [8]

2.5.2.2 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น

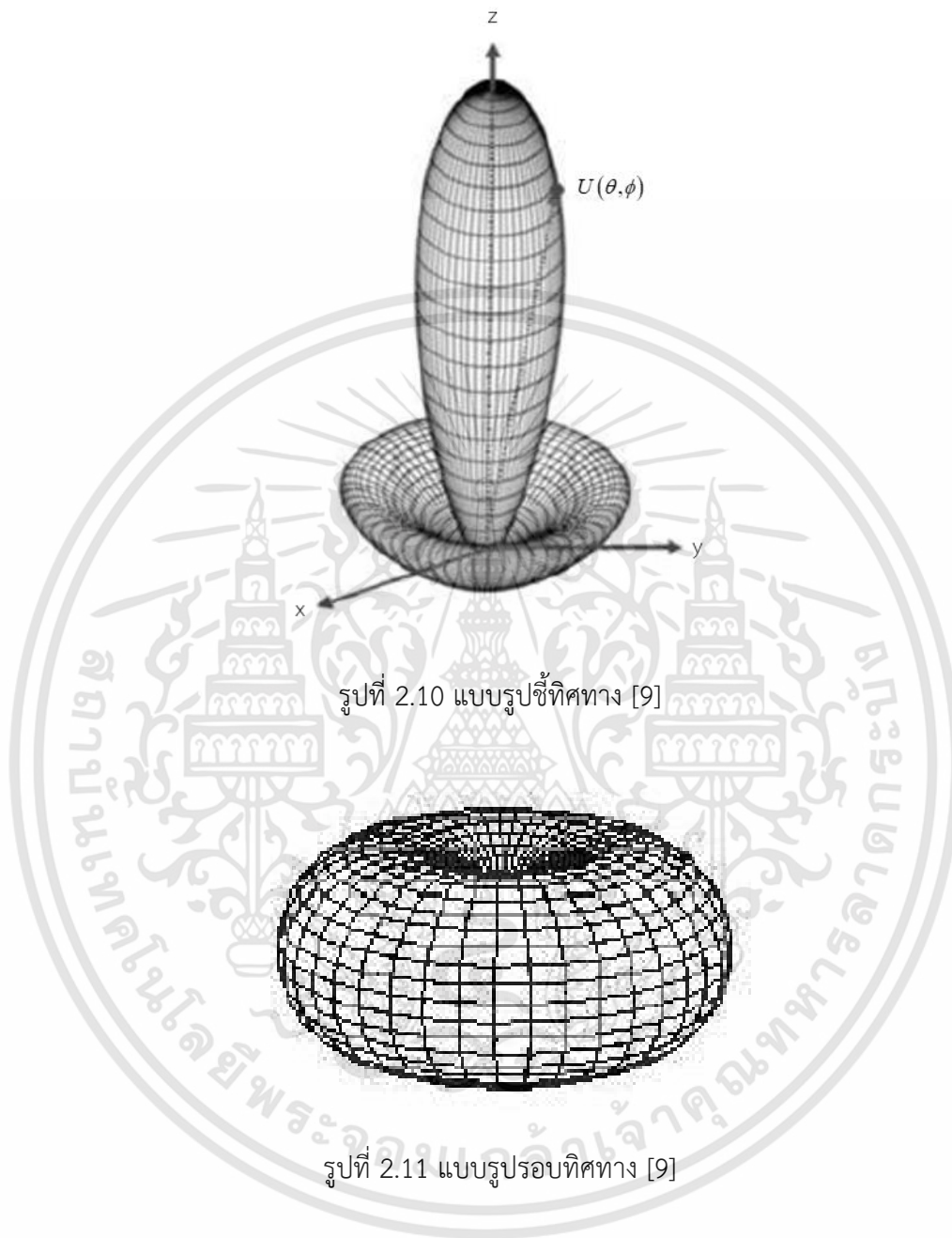
แบบรูปไอโซทรอปิก (Isotropic Pattern) สายอากาศที่ใช้ในทางทฤษฎี โดยมีการแพร่กระจายของคลื่นทุกทิศทางที่พร้อมกันด้วยความเข้มสนามที่เท่ากัน เป็นสายอากาศที่ไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง แต่จะใช้ในการเปรียบเทียบหรือกำหนดเป็นมาตรฐานนำไปเทียบกับสายอากาศแบบอื่น เพื่อดูลักษณะคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบรูปไอโซทรอปิก [9]

แบบรูปการแผ่กระจายแบบมีทิศทางเฉพาะทิศทาง (Directional Pattern) เป็นรูปแบบการแผ่กระจายในสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional Antenna) ซึ่งสายอากาศแบบมีทิศทางนี้เป็นสายอากาศที่มีทิศทางในการรับ – ส่ง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในทิศทางที่กำหนดไว้เท่านั้น กล่าวคือในทิศทางที่กำหนดไว้นั้นจะมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่าทิศทางอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.10

แบบรูปรอบทิศทาง เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นรอบทิศทางหรือไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (Azimuth Plane) แต่มีทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (Elevation Pattern) ดังรูปที่ 2.11

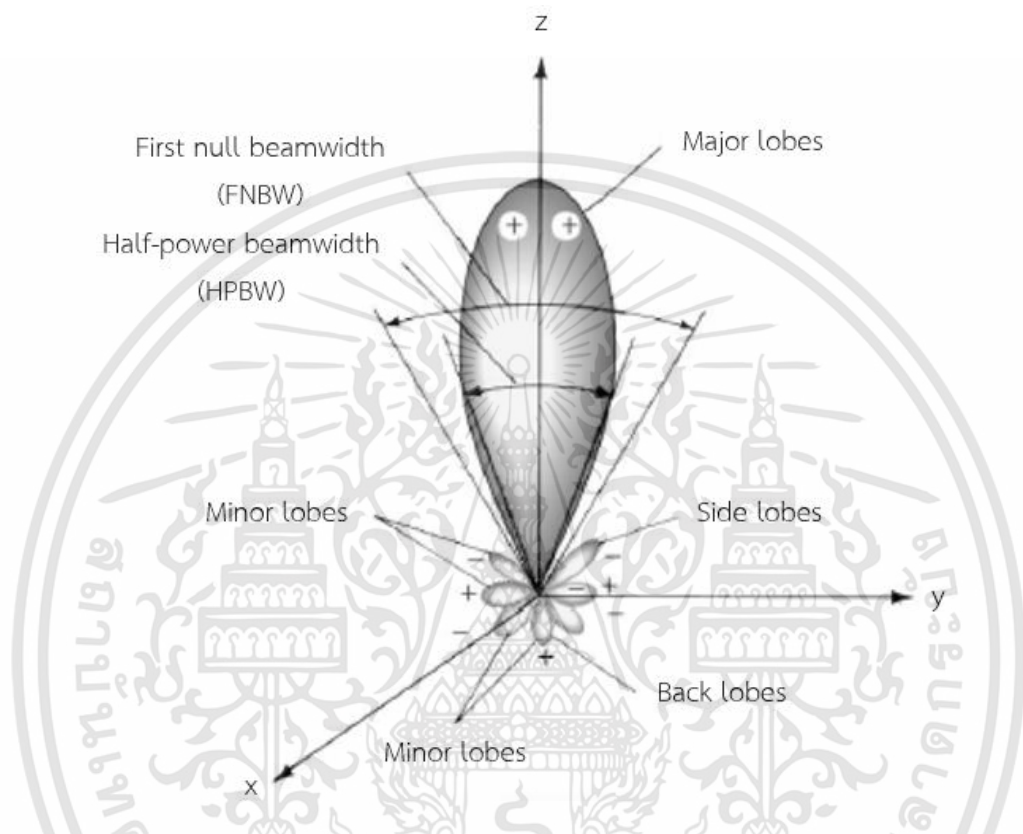


รูปที่ 2.11 แบบรูปรอบทิศทาง [9]

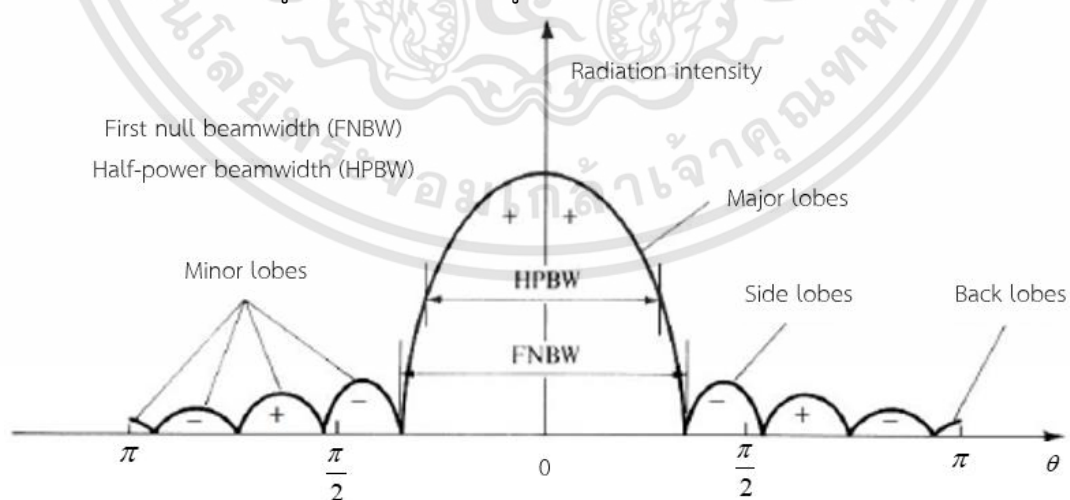
2.5.2.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern Lobes)

ลำคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการแผ่รังสีที่ตัดผ่านโซนการแผ่รังสีความเข้มต่ำ ลำคลื่นหลัก ลำคลื่นรอง ลำคลื่นด้านข้าง และลำคลื่นด้านหลัง ประกอบขึ้นเป็นการออกแบบโดยทั่วไปบ่งบอกถึงการแผ่รังสีในทิศทางที่ไม่เอื้ออำนวย และควรหลีกเลี่ยงในทุกกรณี ลำคลื่นข้าง

เป็นส่วนที่โดดเด่นที่สุดของลำคลื่นย่อย อัตราส่วนของลำคลื่นข้างหรือที่เรียกว่าระดับลำคลื่นด้านข้าง คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานที่แสดงระดับของลำคลื่นข้างเล็กน้อย (Side Lobe Level) ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13



รูปที่ 2.12 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงขั้วแบบ 3 มิติ [9]



รูปที่ 2.13 ลำคลื่นในรูปแบบเชิงเส้นแบบ 2 มิติ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 จะประกอบไปด้วยลำคลื่นแบบต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นที่มีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นแรงมากที่สุด
- 2) ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) เป็นลำคลื่นที่มีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นแรงน้อยกว่าลำคลื่นหลัก
- 3) ลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลักและอยู่ในระนาบเดียวกับลำคลื่นหลัก
- 4) ลำคลื่นย่อยด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ตรงข้ามกับระนาบลำคลื่นหลัก

2.5.3 ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Power Density)

ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นคือ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นต่อพื้นที่ใน 1 ตารางเมตร สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.2

$$W_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[E \times H^*] \quad (2.2)$$

เมื่อ W_{av} คือ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (วัตต์ต่อตารางเมตร)

2.5.4 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นคือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อมุมตัน สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.3

$$U = r^2 W_{av} \quad (2.3)$$

เมื่อ U คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

r คือ รัศมีการแผ่กระจายคลื่น (เมตร)

2.5.5 กำลังงานการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Power)

กำลังงานการแผ่กระจายคลื่น คือ กำลังงานของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวปิด สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.4

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (2.4)$$

เมื่อ P_{rad} คือ กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (วัตต์)

2.5.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดคือ อัตราส่วนของค่าความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางนั้น ๆ เทียบกับค่าความเข้มการแผ่พลังงานที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง โดยทั่วไปจะมีการกำหนดค่าสภาพเจาะจงทิศทางในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุดเสมอ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางแสดงดังสมการที่ 2.5 ถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางให้ จะถือว่าทิศทางที่มีความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานสูงที่สุดคือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) ที่ต้องการหาดังสมการที่ 2.6

$$D = \frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \quad (2.5)$$

$$D_{\text{max}} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.6)$$

เมื่อ D คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

D_{max} คือ ค่าของสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด

U_{max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (วัตต์ต่อสเตอเรเดียน)

โดยทั่วไปจะแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด เป็นหน่วย dB สามารถหาดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$D(\text{dBi}) = 10 \log(D) = 10 \log \left(\frac{4\pi U}{P_{\text{rad}}} \right) \quad (2.7)$$

$$D_{\text{max}}(\text{dBi}) = 10 \log(D_{\text{max}}) = 10 \log \left(\frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} \right) \quad (2.8)$$

2.5.7 อัตราขยายกำลัง (Power Gain)

อัตราขยายกำลังของสายอากาศ เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง โดยรวมค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามามีด้วย ที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.9

$$G = e_r D \quad (2.9)$$

เมื่อ G คือ อัตราขยาย
 e_r คือ ประสิทธิภาพของอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแสดงค่าอัตราขยายเป็นหน่วย dB สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.10

$$G(\text{dB}) = 10 \log(e_r D) \quad (2.10)$$

2.5.8 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศจะคำนึงถึงการสูญเสียที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วยสาเหตุมาจากการสะท้อนกลับเนื่องมาจากความไม่แมตช์ (Mismatch) ระหว่างสายส่ง (Transmission Line) กับสายอากาศและการสูญเสียทั้งในตัวนำและฉนวน โดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพทั้งหมดของสายอากาศ สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.11

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.11)$$

- เมื่อ e_t คือ ประสิทธิภาพทั้งหมด
 e_r คือ ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ $= (1 - |\Gamma|^2)$
 e_c คือ ประสิทธิภาพของตัวนำ
 e_d คือ ประสิทธิภาพของฉนวน
 Γ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อน (Complex Reflection Coefficient)

2.5.9 อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

อัตราส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดต่อค่าน้อยที่สุดในระบบสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดันเท่ากับ 1 สายอากาศไม่เกิดการสะท้อนกลับถือว่าเป็นสายอากาศที่ดี แต่ถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของแรงดันเป็นอนันต์สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับ สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.12

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}, \quad 1 \leq VSWR \leq \infty \quad (2.12)$$

เมื่อ $V_{\max}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด (โวลต์)

$V_{\min}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยที่สุด (โวลต์)

สามารถหาได้จากอัตราส่วนผลต่างและผลรวมระหว่างอินพุทอิมพีแดนซ์กับคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ ถ้าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเป็น 0 นั่นคือสายอากาศจะไม่เกิดการสะท้อนกลับถือว่าเป็นสายอากาศที่ดี แต่ถ้าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเชิงซ้อนเป็น 1 สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.13

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (2.13)$$

เมื่อ Z_{in} คือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)

Z_o คือ คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ (โอห์ม)

2.5.10 การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแสดงค่ากำลังที่สูญเสียที่โหลด เมื่ออิมพีแดนซ์ของสายส่งและสายอากาศไม่แมตช์กัน การสูญเสียย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ถ้าสายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็น 0 สายอากาศจะเกิดการสะท้อนกลับแต่ถ้าสายอากาศมีค่าการสูญเสียย้อนกลับเป็นอนันต์สายอากาศไม่เกิดการสะท้อนกลับ ถือว่าเป็นสายอากาศที่ดีสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.14

$$RL(dB) = -20 \log |\Gamma|, \quad 0 \leq RL \leq \infty \quad (2.14)$$

เมื่อ RL คือ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (dB)

2.5.11 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)

อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยพื้นฐานแล้วอิมพีแดนซ์ที่มีให้ที่ขั้วจะถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนแรงดันต่อกระแสผ่านขั้วอินพุตสองขั้วของสายอากาศ อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.15

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad (2.15)$$

เมื่อ R_{in} คือ ความต้านทาน $= R_r + R_L$ (โอห์ม)

R_r คือ ความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ (โอห์ม)

R_L คือ ความต้านทานการสูญเสียของสายอากาศ (โอห์ม)

X_{in} คือ ความต้านทานเชิงจินตภาพ (โอห์ม)

2.5.12 แบนด์วิดท์ (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศเป็นช่วงของความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้ดี ซึ่งช่วงความถี่ถูกกำหนดโดยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันประมาณ 2 หรือพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน คุณสมบัติของสายอากาศที่ระดับ -10 dB สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.16 [8]

$$BW(\%) = \frac{f_h}{f_l} \times 100\% \quad (2.16)$$

เมื่อ BW คือ แบนด์วิธของสายอากาศ

f_h คือ ขอบความถี่สูงของย่านความถี่ (เฮิร์ตซ์)

f_l คือ ขอบความถี่ต่ำของย่านความถี่ (เฮิร์ตซ์)

2.6 ทฤษฎีและการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีลักษณะที่ดี บาง น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ และเข้ากันได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปขึ้นพื้นฐาน มีข้อบกพร่องหลายประการรวมถึงแบนด์วิธที่แคบมาก การสูญเสียครีเอซ่าย พีดสูง การข้ามโพลาไรซ์สูงและความสามารถในการจัดการพลังงานต่ำ ด้วยความก้าวหน้าทั้งในด้านทฤษฎีและเทคโนโลยีข้อบกพร่องบางประการเหล่านี้ได้รับการแก้ไขหรืออย่างน้อยก็บรรเทาลงได้ในระดับหนึ่ง ตลาดที่พัฒนาอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการสื่อสารส่วนบุคคล (Personal Communication Systems: PCS) การสื่อสารผ่านดาวเทียมเคลื่อนที่ การออกอากาศโดยตรง (Direct Broadcast: DBS) ระบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLAN) และระบบขนส่งและจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Vehicle Highway Systems: IVHS) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความต้องการสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะเพิ่มขึ้นอีก ในขณะเดียวกันความต้องการที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการพัฒนาต่อไป องค์ประกอบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีประโยชน์มาก ในบทนี้จะเน้นไปที่คำอธิบายหลักการของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปการ วิเคราะห์วิธีการออกแบบที่ดีพอสำหรับการใช้งานทางวิศวกรรมบางประเภท [10]

โครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปแบบแพตช์สี่เหลี่ยม จะมีองค์ประกอบ ได้แก่ ความยาว และความกว้างของแพตช์ โดยที่ความยาวเป็นตัวกำหนดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ และความกว้างเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แพตช์แบบสี่เหลี่ยมสามารถทำการป้อนสัญญาณได้หลายวิธี ในบทความนี้กำหนดให้จุดที่ทำการป้อนสัญญาณ (Feeding Point) อยู่ที่ด้านหนึ่งของด้านที่มีการกระจายของคลื่น (Radiating Edge) ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งการป้อนสัญญาณที่ถูกกำหนดให้อยู่ตรงกลางของแพตช์เมื่อเทียบจากความกว้างของตัวแพตช์ ถ้าเลื่อน

ตำแหน่งของการป้อนสัญญาณตามแนวความยาวของแพทช์ จะทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าลดลง [11]

สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปต้องการเลือกความถี่เรโซแนนซ์และสื้ออิเล็กทรอนิกส์ที่จะออกแบบสายอากาศ พารามิเตอร์ที่จะคำนวณอยู่ภายใต้ ความกว้าง (W) ความกว้างของแพทช์คำนวณดังสมการที่ 2.17

$$W = \frac{C_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.17)$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของแพทช์

C_0 คือ ค่าความเร็วแสง

ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่มีประสิทธิภาพของแพทช์เป็นพารามิเตอร์สำคัญในขั้นตอนการออกแบบของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป การแผ่รังสีที่เดินทางจากแผ่นไปยังพื้นดินจะผ่านอากาศและบางส่วนผ่านวัสดุพิมพ์ (Fringing) ทั้งอากาศและสารตั้งต้นมีค่าอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่างกัน ดังนั้นเราจึงพบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพ (ϵ_{reff}) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพคำนวณดังสมการที่ 2.18

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad \frac{W}{h} > 1 \quad (2.18)$$

เมื่อ ϵ_{reff} คือ Effective Relative Permittivity

h คือ ความหนาของซับสเตรต

เนื่องจากการเชื่อมต่อไฟฟ้าขนาดของสายอากาศจึงเพิ่มขึ้นตามจำนวน (ΔL) ดังนั้นความยาวที่เพิ่มขึ้นจริง (ΔL) ของแพทช์จะคำนวณดังสมการที่ 2.19

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \left[\frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (2.19)$$

โดยที่ h = ความสูงของวัสดุพิมพ์ ตอนนี้จะคำนวณความยาว (L) ของแพทช์ดังสมการที่ 2.20

$$L = \frac{C_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (2.20)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของสายอากาศ
ค่าความต้านทานลักษณะเฉพาะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปสามารถกำหนดโดยได้ 2 กรณี
ดังสมการที่ 2.21 และ 2.22

สำหรับ $\frac{W_0}{h} \leq 1$

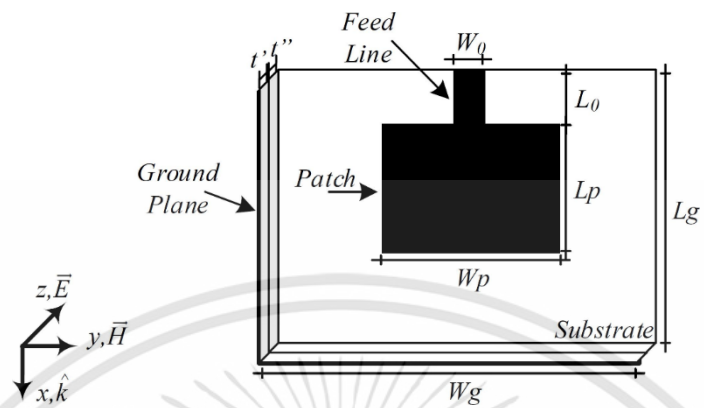
$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left[\ln \left(\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right) \right] \quad (2.21)$$

สำหรับ $\frac{W_0}{h} > 1$

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right] \quad (2.22)$$

ตอนนี้ทราบขนาดของแพทช์แล้ว ความยาวและความกว้างของวัสดุพิมพ์เท่ากับระนาบพื้น ความยาวของระนาบกราวด์ (L_g) และความกว้างของระนาบกราวด์ (W_g) คำนวณโดยใช้สมการที่ 2.23 และโครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะแสดงดังรูปที่ 2.17 [12]

$$\begin{aligned} L_g &= 6h + L \\ W_g &= 6h + W \end{aligned} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.14 โครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป [12]

บทที่ 3

การทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีมีสิ่งกีดขวาง

และไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า

บทนี้จะทำการกล่าวถึงการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป การจำลองการวัดสัญญาณในหม้อไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนในการจัดเก็บผล และหลักการ การประเมินผลการทดลอง โดยในโครงการนี้ได้ใช้ย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐาน IEC TS 62478 ที่กำหนดโดยคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์เป็นมาตรฐานที่อนุญาตให้ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการหาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งกำหนดย่านความถี่ไว้ทั้งหมด 3 ย่าน ได้แก่ ย่านความถี่สูง ความถี่สูงมาก และความถี่สูงยิ่ง

3.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

3.1.1 สาเหตุที่เลือกใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

เหตุผลที่เลือกใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปเพราะสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนั้นมีขนาดที่เล็กมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากที่จะนำไปติดตั้งในตัวถังหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่สายอากาศชนิดนี้จะมีการคำนวณและมีการออกแบบที่ง่าย สามารถสร้างได้ง่าย มีการใช้ต้นทุนที่ต่ำ และสายอากาศชนิดนี้ยังสามารถรองรับความถี่ได้หลายช่วงความถี่ [8]

3.1.2 การออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะต้องทำการเลือกความถี่เรโซแนนซ์ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศได้แก่ ความกว้างของแพทช์ (W) Effective Relative Permittivity (ϵ_{reff}) ความหนาของซับสเตรต (h) ความยาวของสายอากาศ (L) ความยาวของระนาบกราวด์ (L_g) และความกว้างของระนาบกราวด์ (W_g) ซึ่งในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะแสดงดังนี้ ในส่วนของการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.2.1 ความกว้างของแพทช์

$$W = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2(2.4 \times 10^9)} \left(\frac{4.3+1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 3.8393 \text{ cm}$$

3.1.2.2 ทาค่า Effective Relative Permittivity

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$= \frac{4.3+1}{2} + \frac{4.3-1}{2} \left(1 + 12 \frac{1.6 \times 10^{-8}}{3.8393 \times 10^{-2}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 3.9972$$

3.1.2.3 ความยาวของ ΔL

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.582)} \times \frac{\left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{\left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} h \quad (3.3)$$

$$= 0.412 \frac{(3.9972 + 0.3)}{(3.9972 - 0.582)} \times \frac{\left(\frac{3.8393 \times 10^{-2}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.264 \right)}{\left(\frac{3.8393 \times 10^{-2}}{1.6 \times 10^{-3}} + 0.8 \right)} (1.6 \times 10^{-3})$$

$$= 8.1151 \times 10^{-4} \text{ m}$$

3.1.2.4 ความยาวของสายอากาศ

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (3.4)$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.4 \sqrt{3.9972}} - 2(8.1151 \times 10^{-4})$$

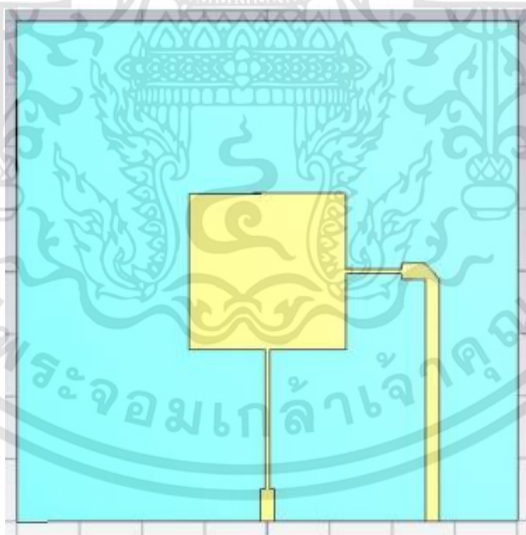
$$= 2.9019 \text{ cm}$$

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ
ความกว้างของแพทช์ (W)	4.5 เซนติเมตร
ความหนาของซับสเตรต (h)	0.16 เซนติเมตร
ความยาวของสายอากาศ (L)	4.5 เซนติเมตร
ความยาวของระนาบกราวด์ (L_g)	10 เซนติเมตร
ความกว้างของระนาบกราวด์ (W_g)	10 เซนติเมตร

3.1.3 การจำลองออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมาการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบ โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบนั้นจะใช้โปรแกรม CST Studio Suite ในการจำลองโครงสร้างของแผ่นสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบด้วยโปรแกรม CST Studio Suite จะแสดงดังรูปที่ 3.1



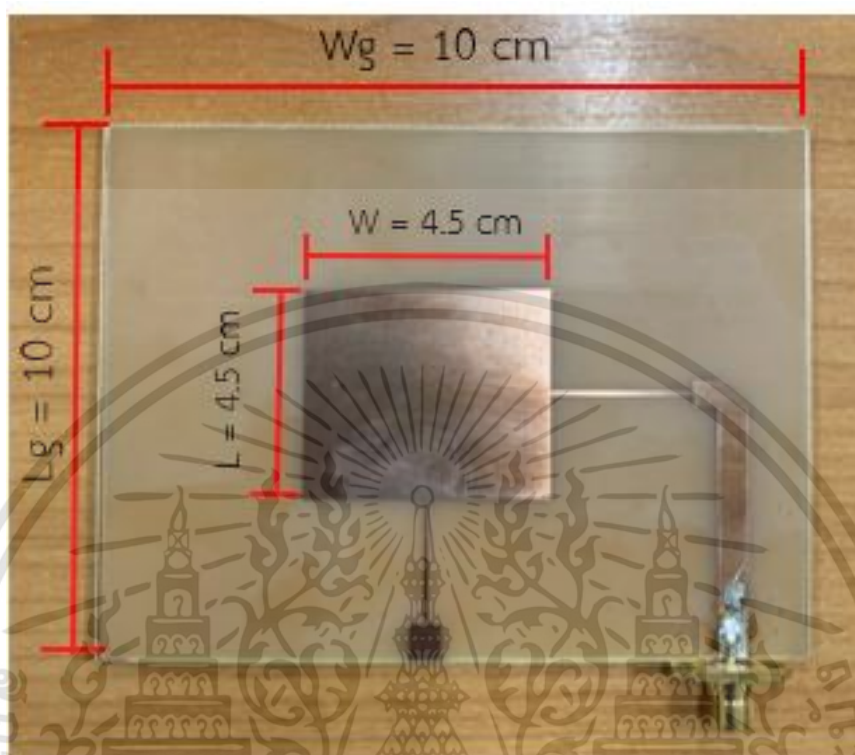
รูปที่ 3.1 แบบจำลองโครงสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบโดยการ
เลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1.4 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

สร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้วัสดุที่เตรียมไว้ นำมาสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้โดยมีขั้นตอนตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 เป็นสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้น



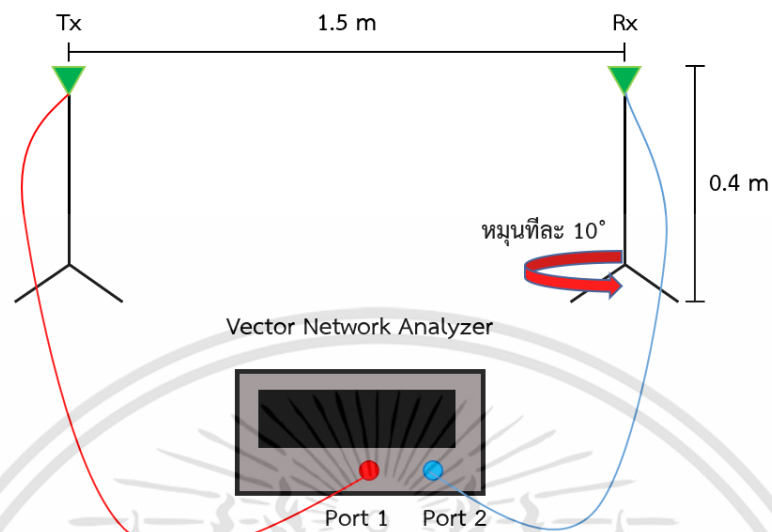
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 3.3 สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่สร้างขึ้นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

3.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

ในการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนั้นจะทำการนำสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ผ่านขั้นตอนการสร้างที่สำเร็จมาทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป โดยมีแบบจำลองการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปดังรูปที่ 3.4 เพื่อให้ทราบว่าสายอากาศมีคุณสมบัติที่สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่ออกแบบได้หรือไม่ โดยพารามิเตอร์ที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนั้นจะมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อัตราขยาย และการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยมีขั้นตอนที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป



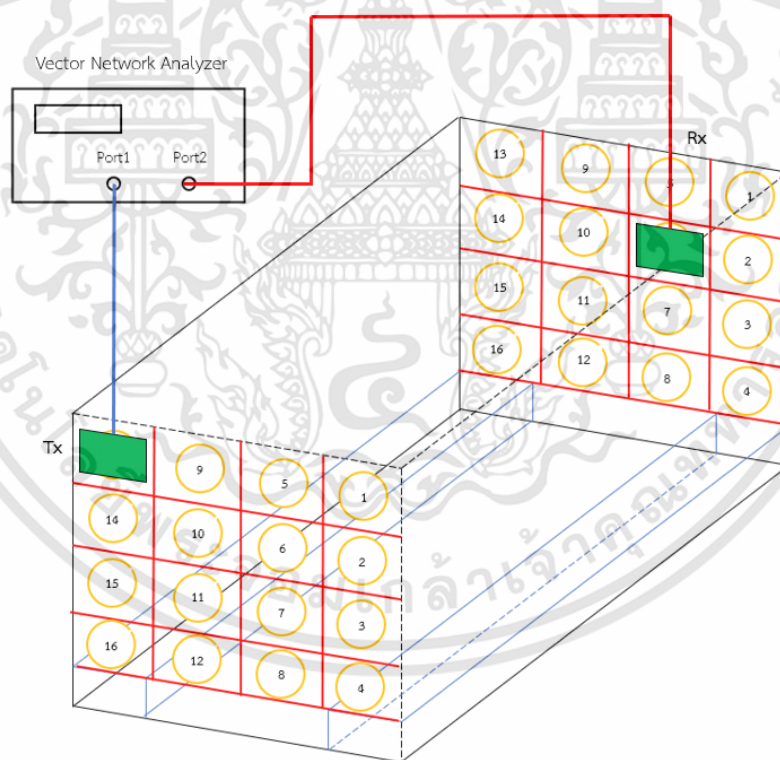
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

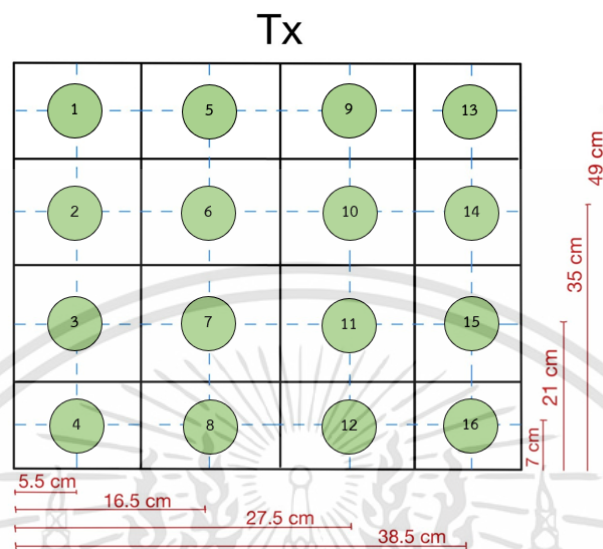
3.2 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

3.2.1 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง

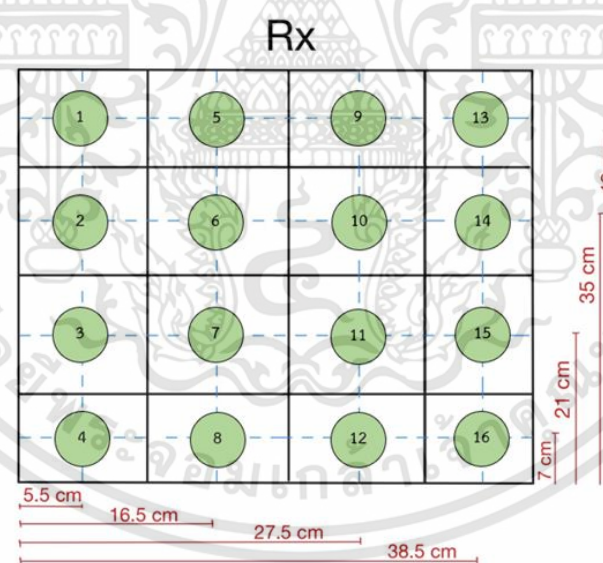
โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มาติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.6 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 16 ตัว จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งภาคส่ง ตำแหน่งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ โดยที่แบบจำลอง 16×16 ตำแหน่ง สายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx



รูปที่ 3.6 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง โดยที่กำหนด ด้านส่งคือ Tx13 และด้านรับคือ Rx6



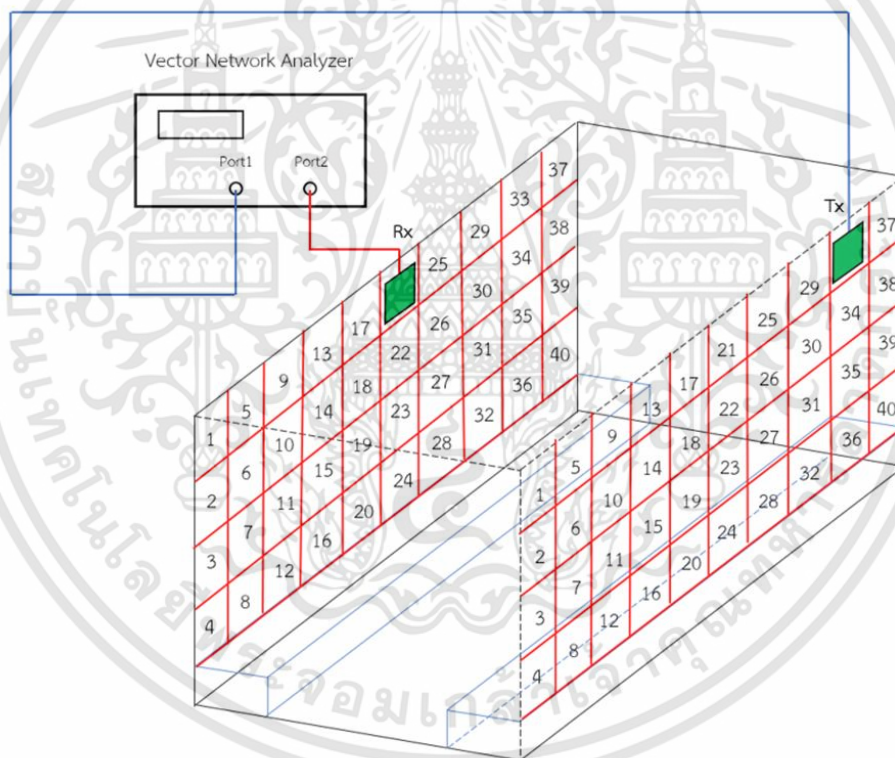
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่ง 16×16 ตำแหน่ง



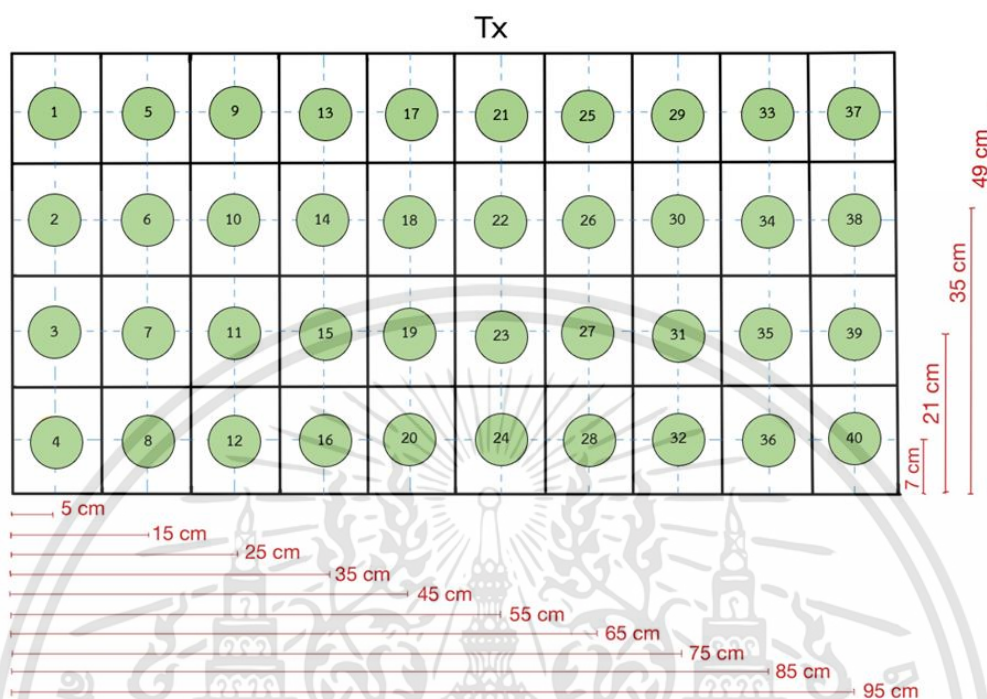
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง

3.2.2 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง

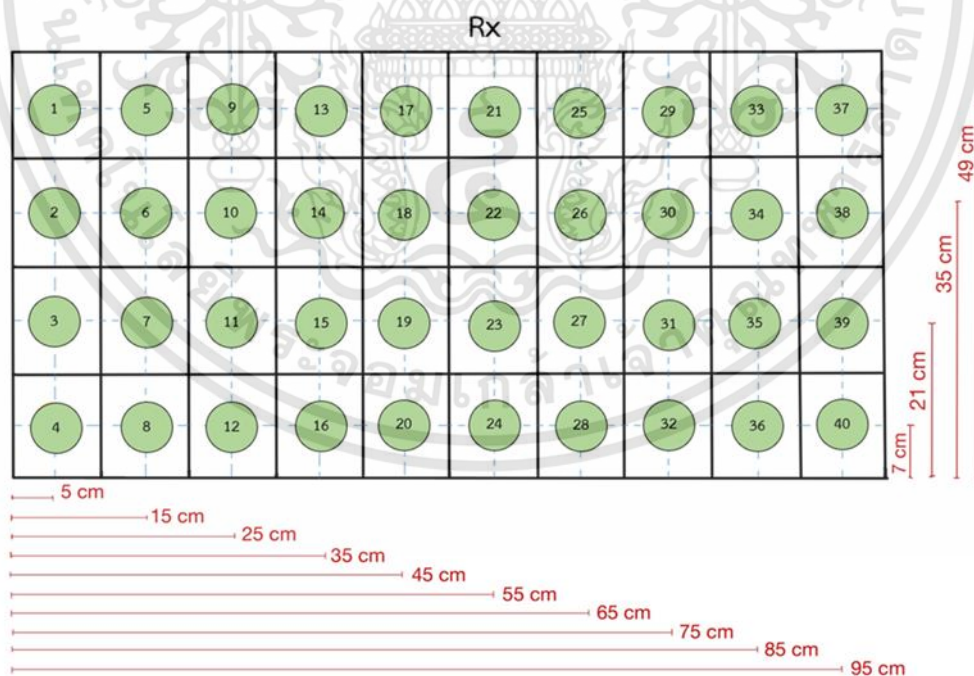
โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มาติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.9 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 40 ตัว จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งภาคส่ง ตำแหน่งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ โดยที่แบบจำลอง 40×40 ตำแหน่ง สายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx



รูปที่ 3.9 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ช่อง โดยที่กำหนดด้านส่งคือ Tx21 และด้านรับคือ Rx33



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านส่ง 40×40 ตำแหน่ง



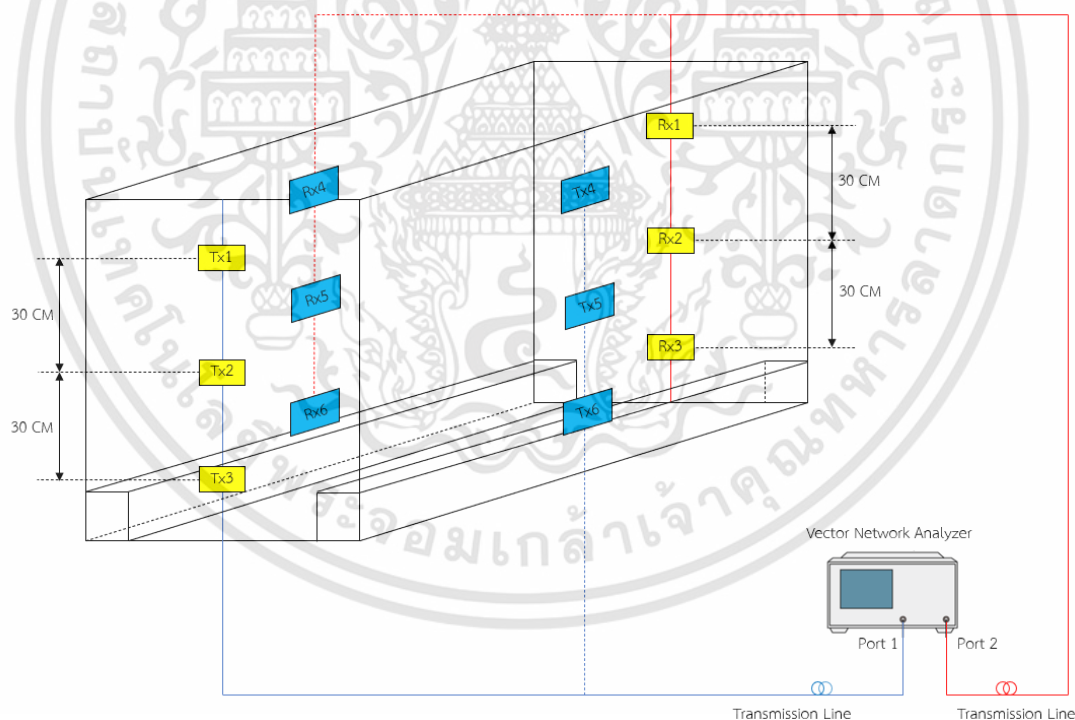
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการวางสายอากาศด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

3.3.1 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

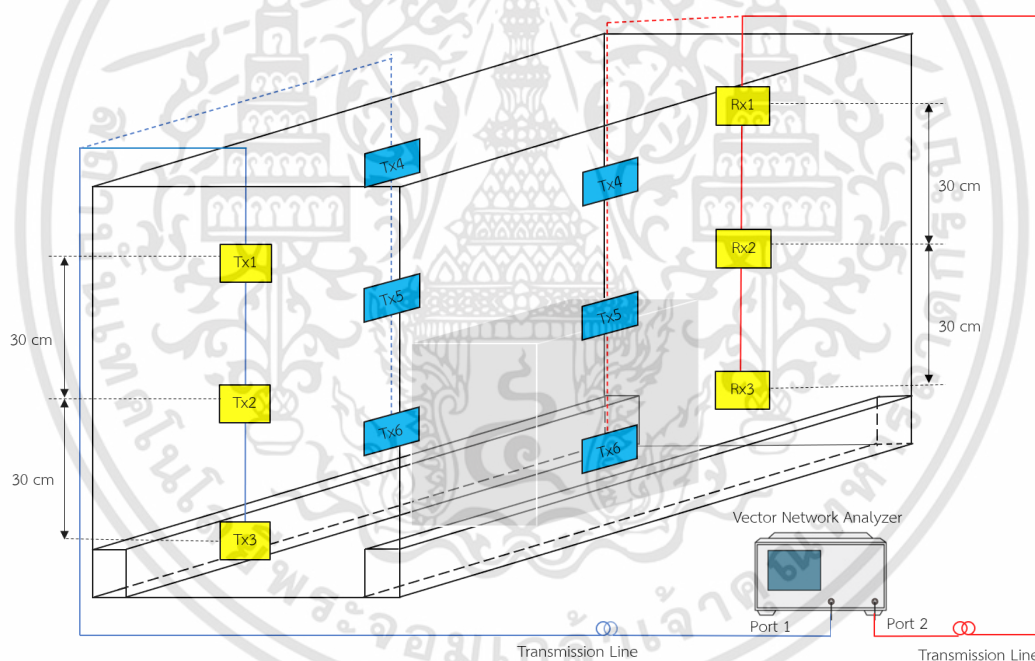
โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มาติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.12 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 3 ตัว จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งภาคส่ง โดยที่ Tx1 ถึง Tx3 ส่งสัญญาณให้ Rx1 ถึง Rx3 และ Tx4 ถึง Tx6 ส่งสัญญาณให้ Rx4 ถึง Rx6 ซึ่งสายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

3.3.2 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีมีสิ่งกีดขวาง

โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีมีคอยล์เป็น สิ่งกีดขวาง เพื่อศึกษาการส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโคร- สตริปในกรณีมีสิ่งกีดขวาง ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มา ติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งภาคส่งและภาครับดังรูปที่ 3.13 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 3 ตัว จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่ง ภาคส่ง โดยที่ Tx1 ถึง Tx3 ส่งสัญญาณให้ Rx1 ถึง Rx3 และ Tx4 ถึง Tx6 ส่งสัญญาณให้ Rx4 ถึง Rx6

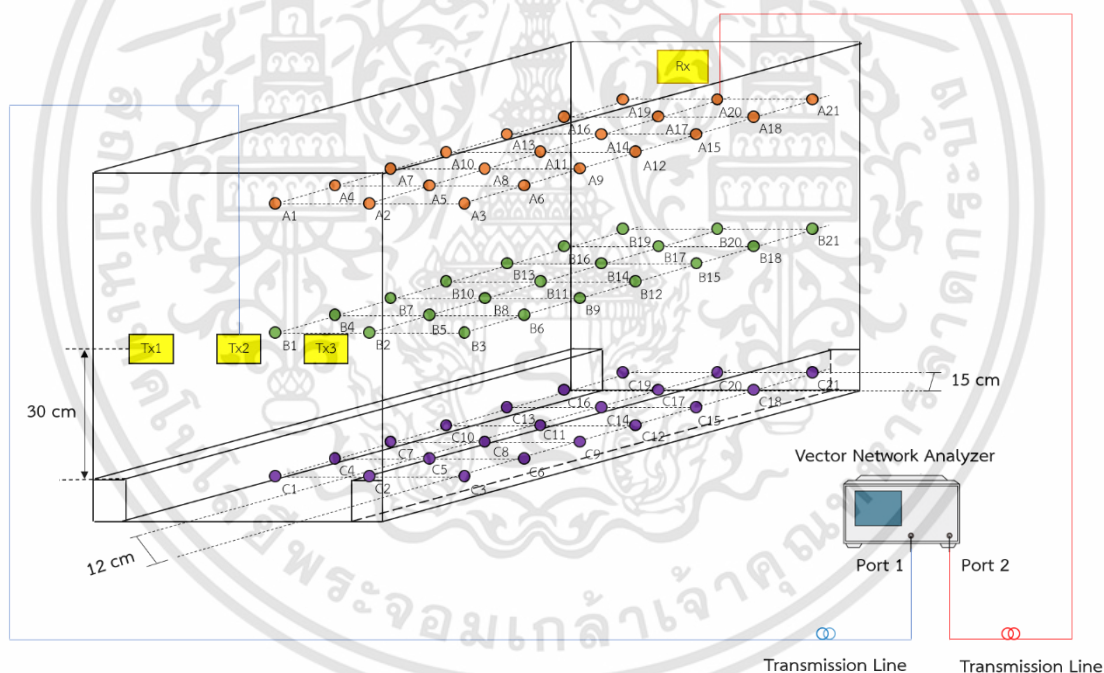


รูปที่ 3.13 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองวัดกรณีมีสิ่งกีดขวาง

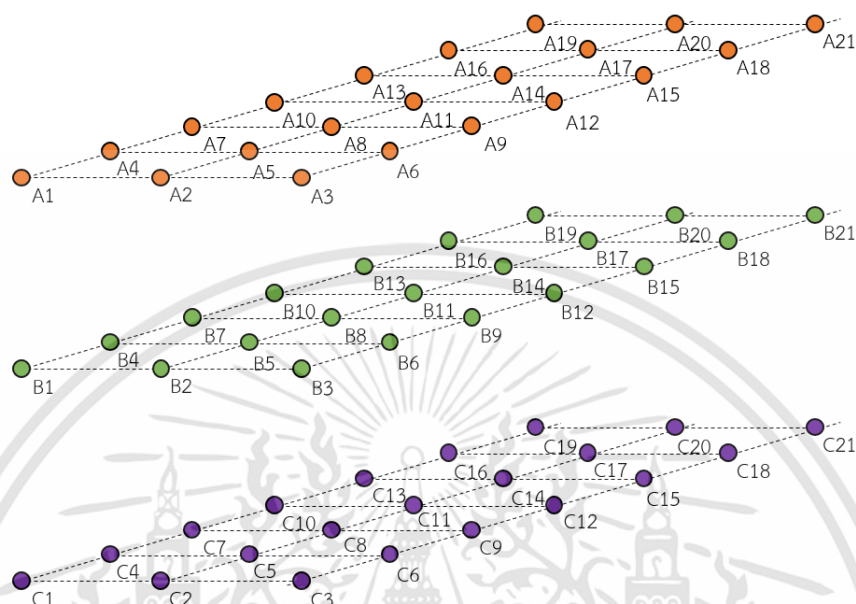
3.4 การออกแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

3.4.1 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มาติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดสายอากาศภาคส่งติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 3.14 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 3 เลเยอร์ โดยเริ่มจากเลเยอร์ A และสิ้นสุดที่เลเยอร์ C จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งภาคส่ง ซึ่งสายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx



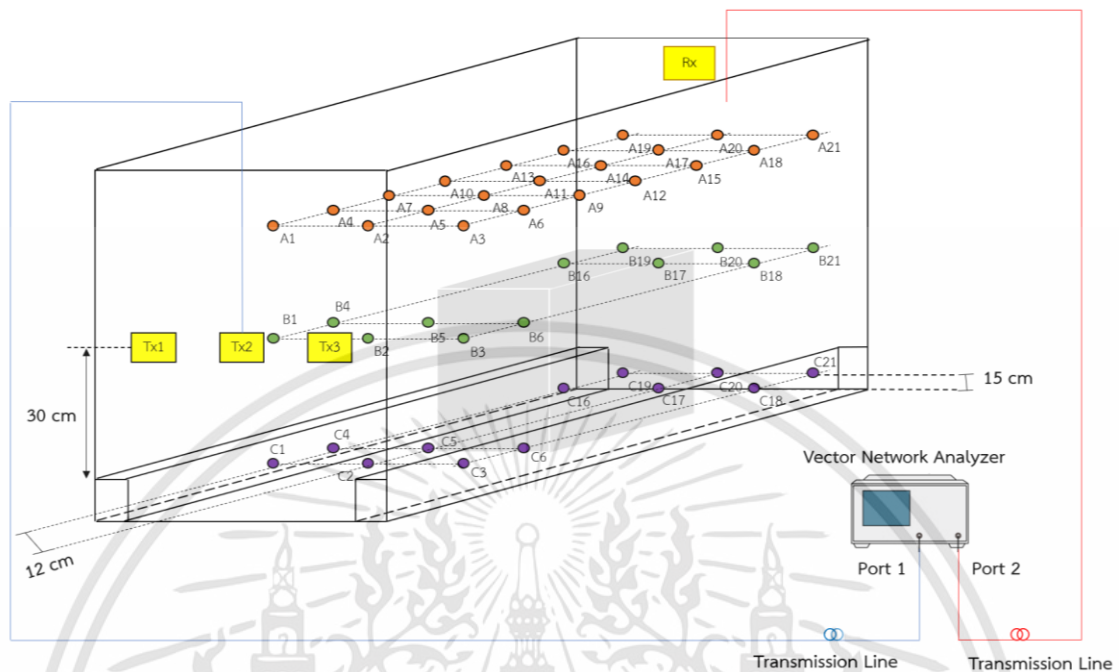
รูปที่ 3.14 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



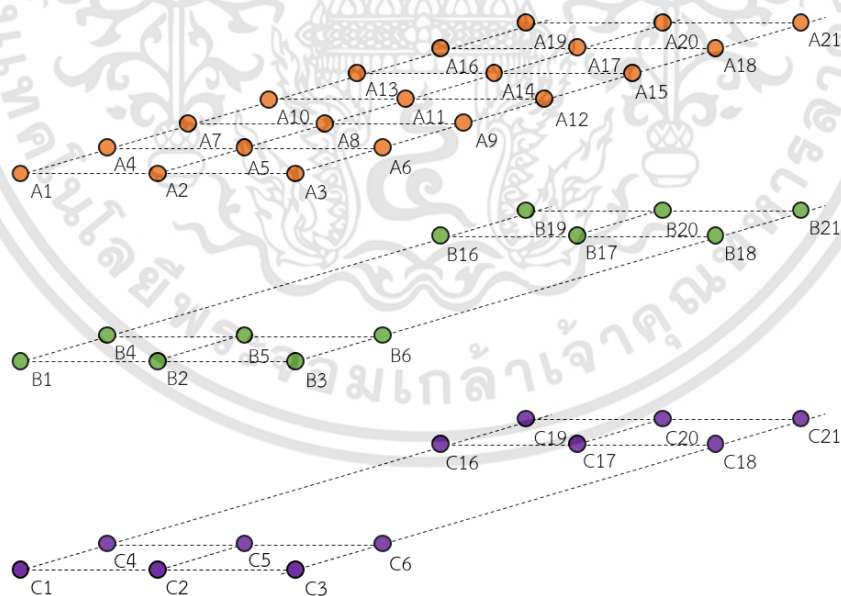
รูปที่ 3.15 การกำหนดตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี
กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

3.4.2 การออกแบบโมเดลจำลองการวัดที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันการถ่ายโอนของ สายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีแกนหม้อแปลงไฟฟ้าคือสิ่งกีดขวาง ใช้สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างมาก่อนหน้านี้มาติดตั้งในภาครับและภาคส่ง โดยยึดสายอากาศภาคส่งติดกับผนังหม้อแปลงไฟฟ้างดรูปที่ 3.16 แล้วจะทำการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อภาคส่ง 1 ตัว ส่งให้ภาครับครบทั้ง 3 เลเยอร์ โดยเริ่มจากเลเยอร์ A และสิ้นสุดที่เลเยอร์ C จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งภาคส่ง ซึ่งสายอากาศด้านส่งสัญญาณคือ Tx สายอากาศด้านรับสัญญาณคือ Rx



รูปที่ 3.16 แบบจำลอง 3 มิติ ในการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี กรณีมีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.17 การกำหนดตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับ สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถีกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการจัดเก็บผลการทดลอง

3.5.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer: VNA)

ใช้เพื่อการวิเคราะห์และทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่ทำงานกับคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ ไม่ต่ำกว่าย่านความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ์ และสามารถแสดงผลการวัดไม่ต่ำกว่าในรูปแบบต่อไปนี้ Data formats แบบ Log magnitude, linear magnitude, phase, expend phase, positive phase, group delay, SWR real, imaginary, Smith chart, polar

มีระบบ S-Parameter อยู่ภายในเครื่อง สามารถเปลี่ยนค่าไปเป็นค่า Reflection Impedance, Transmission Impedance, Reflection Admittance, Transmission Admittance และ $1/S$ ได้ [13]



รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ยี่ห้อ Agilent รุ่น E5061B

3.5.2 ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐาน (Calibration Kit)

ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐานเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด (Semi Rigid) ดังรูปที่ 3.19 ก่อนเริ่มการทดลอง โดยต้องดำเนินการตามขั้นตอน คือ Open Short Load ตามลำดับ เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนในสายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด



รูปที่ 3.19 ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐาน

3.5.3 สายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด อาจี142 (Semi Rigid RG142)

สายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด อาจี142 เป็นสายส่งสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม หรืออาจมีความเคลื่อนที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอยู่ที่ 4.95 มิลลิเมตร และฉนวนที่ห่อหุ้มตัวสายนำสัญญาณนั้นจะเป็นเทฟลอน ส่วนตัวนำศูนย์กลางนั้นจะเป็นทองแดงเคลือบด้วยเงิน ซึ่งสามารถใช้ได้สำหรับความถี่สูงจนถึง 8 กิกะเฮิรตซ์และส่วนใหญ่ใช้สายนำสัญญาณประเภทนี้สำหรับการทดสอบระบบความถี่วิทยุ [14]

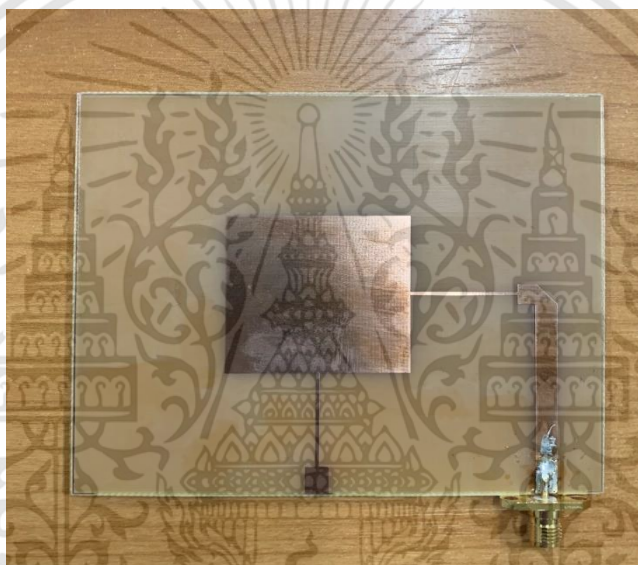


รูปที่ 3.20 สายนำสัญญาณที่ความสูญเสียต่ำแบบเซมิริจิด อาจี142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนั้นจะเป็นสายอากาศที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีการคำนวณและมีการออกแบบที่ง่ายซึ่งสามารถทำการสร้างได้ง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ และสายอากาศชนิดนี้สามารถรองรับความถี่ได้หลายความถี่และมีการโพลาริซชันได้แก่ เชิงเส้นและวงกลมทั้งคู่ สายอากาศชนิดนี้มีความเบาและแข็งแรงเมื่อติดตั้งบนพื้นผิวที่แข็งของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า [15] รูปแบบของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา

3.6 ขั้นตอนการจัดเก็บผลการทดลอง

3.6.1 การจัดเก็บผลแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าด้าน 16×16 ช่อง และด้าน 40×40 ช่อง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

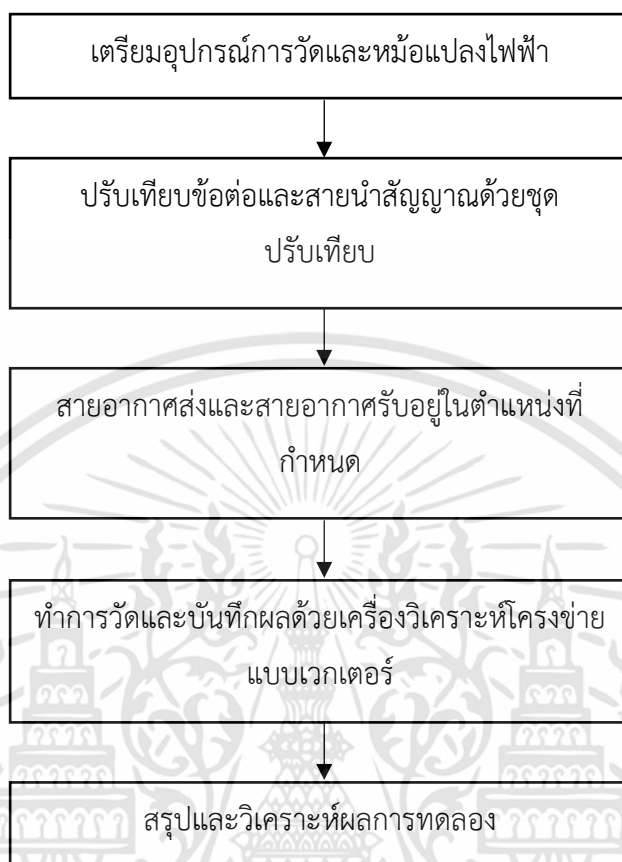
ในการทดลองนี้ได้ศึกษารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยมีบล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.22 มีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองหาการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้าน 16×16 ช่อง และด้าน 40×40 ช่อง ดังรูปที่ 3.23 โดยมีตำแหน่งการวางสายอากาศฝั่งส่งและรับสัญญาณด้าน 16×16 ช่อง ดังรูปที่ 3.7

และ 3.8 ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งการวางสายอากาศฝั่งส่งและรับสัญญาณด้าน 40×40 ช่อง จะแสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.23 เปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์การทดลองดังตารางที่ 3.2
2. ต่อสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์จับยึดสายอากาศ
3. ทำการปรับเทียบสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อโดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ และคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยให้ค่าไม่น้อยกว่า 20 dB
4. เชื่อมต่อสายอากาศ โดยติดตั้งสายอากาศฝั่งส่งที่ตำแหน่ง Tx1 และติดตั้งสายอากาศฝั่งรับที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.8 ทำการบันทึกค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับไปยังตำแหน่งถัดไปดังรูปที่ 3.9 และ 3.11 ทำซ้ำจนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับทั้งด้าน 16×16 ช่อง และด้าน 40×40 ช่อง
5. เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งไปยังตำแหน่งถัดไป และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 จนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศฝั่งรับ
6. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ในการทดลองที่กำหนดการตั้งค่าในเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

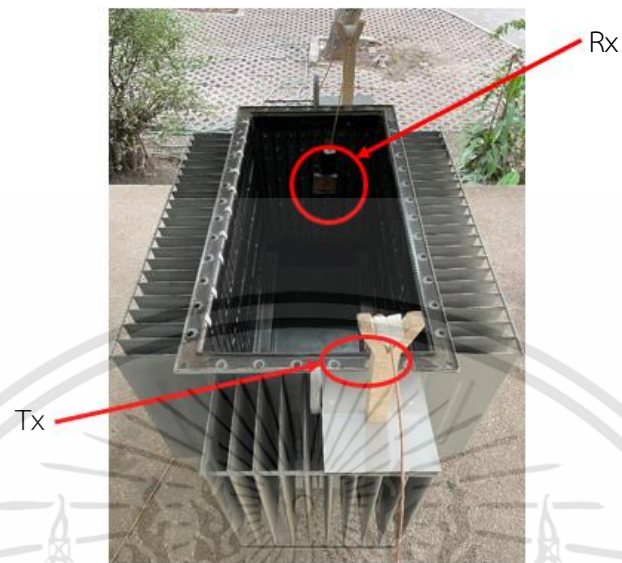
พารามิเตอร์	ค่า
ความถี่ที่ทดลอง	230 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 250 เมกะเฮิร์ตซ์
จำนวนจุดกวาด (Sweeping point)	801 จุด
กำลังส่ง	-20 dBm
ชนิดของสายอากาศ	สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป
รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว
ทิศทางการโพลาไรซ์	แนวตั้ง
ระยะห่างระหว่างสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ	44 เซนติเมตร ถึง 113.37 เซนติเมตร



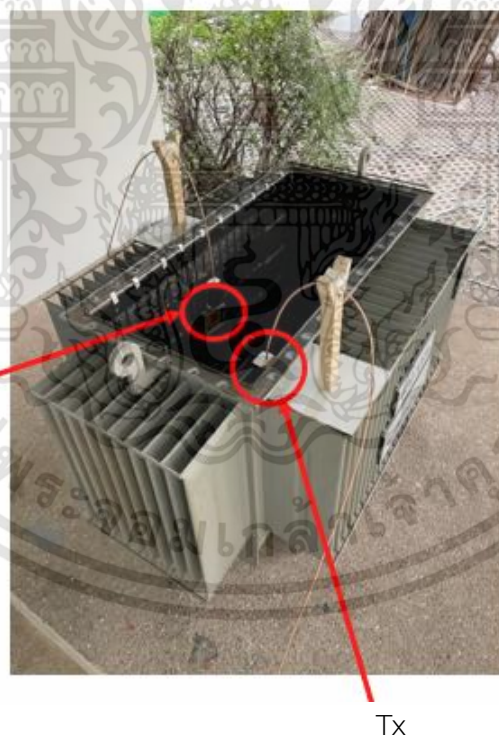
รูปที่ 3.22 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าของการทดลองที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.23 การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) 16×16 ตำแหน่ง



(ข) 40×40 ตำแหน่ง

รูปที่ 3.24 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งด้านส่งและด้านรับ

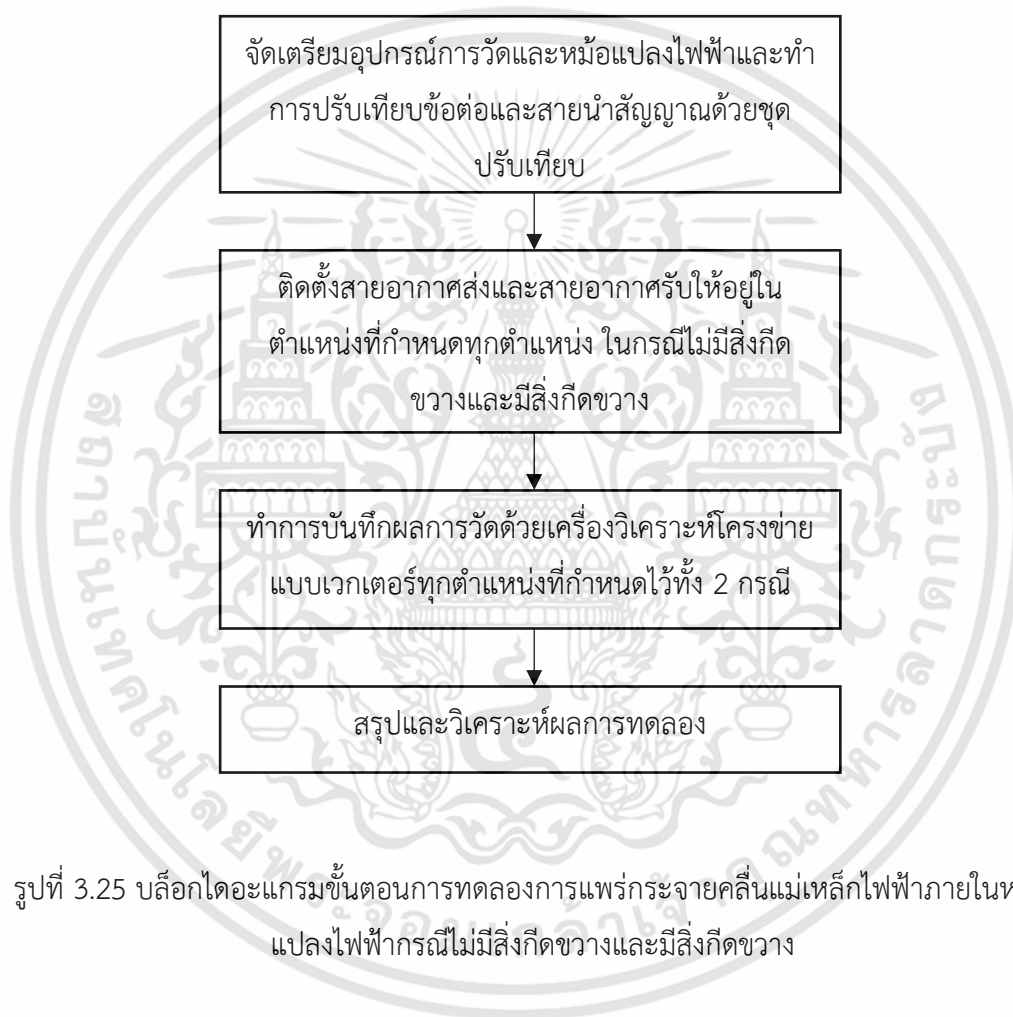
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 การจัดเก็บผลแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า 2 กรณีคือในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีบล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.25 และมีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองหาการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 3.12 และสำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวางจะต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองตามรูปที่ 3.13 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการเตรียมอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.26 และเปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์การทดลองดังตารางที่ 3.2
2. ต่อสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์จับยึดสายอากาศ
3. ทำการปรับเทียบสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อโดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ และคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยให้มีค่าไม่น้อยกว่า 20 dB เชื่อมต่อสายอากาศ โดยติดตั้งสายอากาศฝั่งส่งที่ตำแหน่ง Tx1 และติดตั้งสายอากาศฝั่งรับที่ตำแหน่ง Rx1 ทำการบันทึกค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับไปยังตำแหน่งถัดไปดังรูปที่ 3.12 ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง และรูปที่ 3.13 ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยที่ Tx1 ถึง Tx3 จะทำการส่งสัญญาณไปแค่สามตำแหน่งเท่านั้นได้แก่ตำแหน่ง Rx1 Rx2 และ Rx3 ส่วนตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx6 จะทำการส่งสัญญาณไปที่ตำแหน่ง Rx4 Rx5 และ Rx6 จากนั้นทำซ้ำจนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับตามที่กำหนด
4. เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งไปยังตำแหน่งถัดไป และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 จนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศฝั่งรับตามที่กำหนด ทำการบันทึกผลในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง
5. นำแกนหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งลงในหม้อแปลง เพื่อทำการทดลองในกรณีมีสิ่งกีดขวางและหลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 ตามลำดับ นำผลการทดลองมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟังก์ชันการถ่ายโอนและการสูญเสียเชิงวิถีทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าและกรณีมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า

6. นำผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟังก์ชันการถ่ายโอนและการสูญเสียเชิงวิถีทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าและกรณีมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้ามาทำการเปรียบเทียบกัน
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



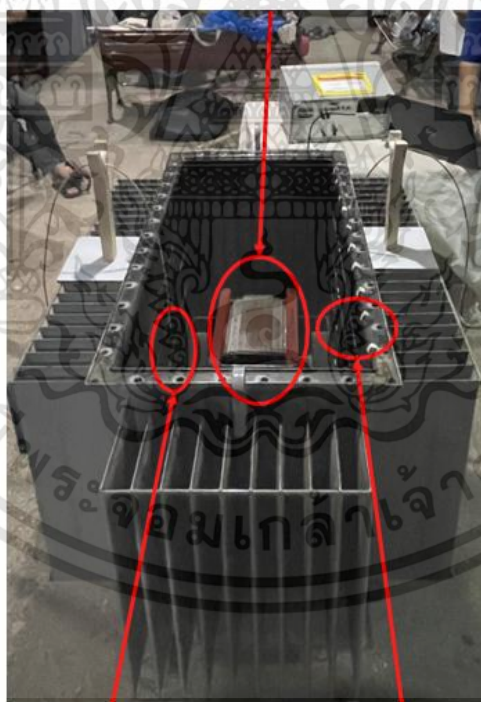
รูปที่ 3.25 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งส่ง สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งรับ



รูปที่ 3.26 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า
กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

แกนกลางหม้อแปลงไฟฟ้า



สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งส่ง สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งรับ

รูปที่ 3.27 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับและทำการ
ติดตั้งแกนกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 การจัดเก็บผลแบบจำลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาการสูญเสียเชิงวิถีและพลังงานที่รับมาภายหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง โดยมีบล็อกไดอะแกรมของขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.28 และมีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถีและพลังงานที่รับได้ของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 3.14 สำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวางจะต่ออุปกรณ์สำหรับการทดลองตามรูปที่ 3.16 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

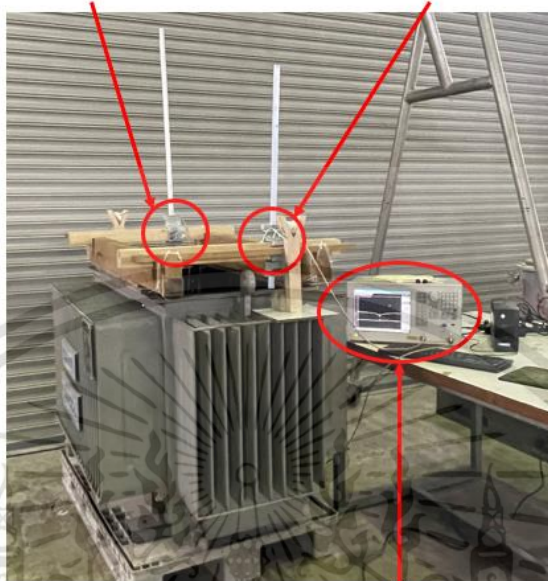
1. ทำการเตรียมอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 3.29 และเปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์การทดลองดังตารางที่ 3.2
2. ต่อสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์จับยึดสายอากาศ
3. ทำการปรับเทียบสายนำสัญญาณและเชื่อมต่อโดยใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเทียบ และคำนวณอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยให้มีค่าไม่น้อยกว่า 20 dB ถ้ามีค่าน้อยกว่า 20 dB ต้องทำการปรับเทียบสายนำสัญญาณใหม่จนกว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าไม่น้อยกว่า 20 dB
4. ทำการเชื่อมต่อสายอากาศ โดยติดตั้งสายอากาศฝั่งส่งที่ตำแหน่ง Tx1 และติดตั้งสายอากาศฝั่งรับที่ตำแหน่ง A1 ทำการบันทึกค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับไปยังตำแหน่งถัดไปดังรูปที่ 6 โดยที่สายอากาศฝั่งส่งต้องส่งสัญญาณครบทั้ง 3 เลเยอร์ เริ่มจากเลเยอร์ A ไป B และสุดท้าย C ทำซ้ำจนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งรับตามที่กำหนด เลื่อนตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งไปยังตำแหน่งถัดไป และทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 จนครบทุกตำแหน่งของตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศฝั่งรับตามที่กำหนด ทำการบันทึกผลในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง
5. นำแกนหม้อแปลงไฟฟ้าติดตั้งลงในหม้อแปลง เพื่อทำการทดลองในกรณีมีสิ่งกีดขวางและหลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 4 และ ขั้นตอนที่ 5 ตามลำดับ
6. นำผลการทดลองมาวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีและพลังงานที่รับได้ของสัญญาณทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าและกรณีมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า

7. นำผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ฟังก์ชันการถ่ายโอนและการสูญเสียเชิงวิถีทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้าและกรณีมีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้ามาทำการเปรียบเทียบกัน
8. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.28 บล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับการทดลองหาการสูญเสียเชิงวิถี

สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งรับ สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งส่ง



เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

รูปที่ 3.29 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

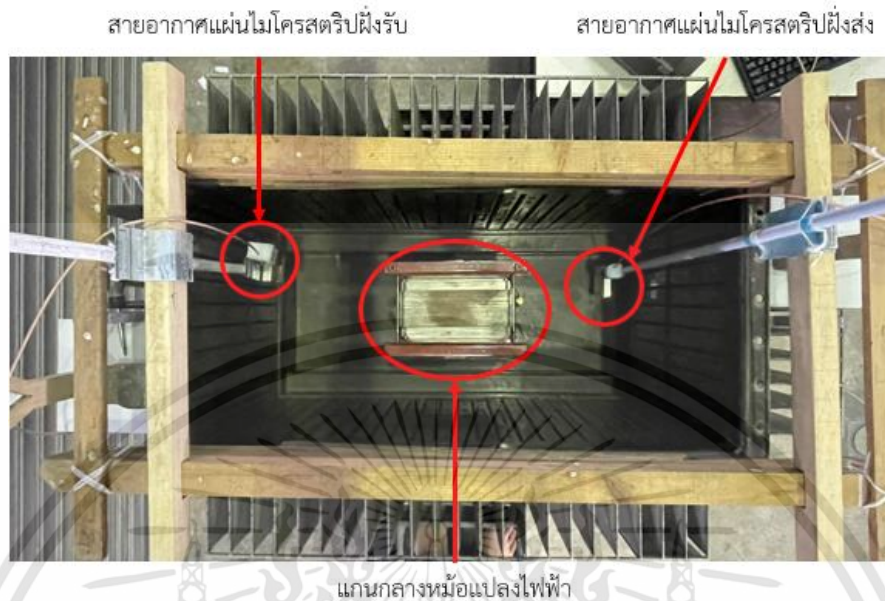
สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งรับ

สายอากาศแผ่นไมโครสตริบฝั่งส่ง



(ก) กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) กรณีมีสิ่งกีดขวาง

รูปที่ 3.30 หม้อแปลงที่ทำการติดตั้งสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับ
แบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

3.7 หลักการการประเมินผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการใช้วิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้องค์ความรู้ของการเชื่อมโยงไมโครเวฟ โดยจะประกอบไปด้วยกำลังของสัญญาณส่ง สายอากาศส่ง ช่องสัญญาณ สายอากาศรับ และกำลังของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีสตังสมการที่ 3.1 [16]

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r P_t \quad (3.1)$$

เมื่อ P_t คือ กำลังของสัญญาณส่ง

P_r คือ กำลังของสัญญาณรับ

G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

λ คือ ความยาวคลื่น

d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ

แต่อย่างไรก็ตามในการตรวจหาและวินิจฉัยการดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่สามารถนำสูตรการส่งผ่านของฟรีสมาใช้ได้โดยตรง เนื่องจากคุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเกิดดิสซาร์จบางส่วนจะเป็นรูปแบบอิมพัลส์ ดังนั้นจะต้องมีการปรับสูตรการส่งผ่านของฟรีสเพื่อให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการปรับปรุงสูตรการส่งผ่านของฟรีสได้ถูกนำเสนอในสมการที่ 3.2 [17]

$$H_{e\text{-Friis}}(f, d) = H_f(f, d) H_r(f, d, \Omega_r) \cdot H_t(f, d, \Omega_t) \quad (3.2)$$

เมื่อ $H_f(f, d)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนในพื้นที่ว่าง, $H_r(f, d, \Omega_r)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนฝั่งรับและ $H_t(f, d, \Omega_t)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนฝั่งส่งโดยฟังก์ชันการถ่ายโอนในพื้นที่ว่างสามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$H_f(f, d) = \frac{c}{4\pi f d} e^{(-jkd)} \quad (3.3)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($k = 2\pi f/c$)

c คือ ความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

f คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยสามารถหารูปคลื่นของสัญญาณที่รับ $v_r(t, d)$ ได้จากคอนโวลูชันของรูปคลื่นสัญญาณส่ง $v_t(t, d)$ และผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ $h_{e\text{-Friis}}(t, d)$ ดังสมการที่ 3.4 และ 3.5

$$v_r(t, d) = v_t(t) \otimes h_{e\text{-Friis}}(t, d) \quad (3.4)$$

$$h_{e\text{-Friis}}(t, d) = \int_{-\infty}^{\infty} H_{e\text{-Friis}}(f, d) df \quad (3.5)$$

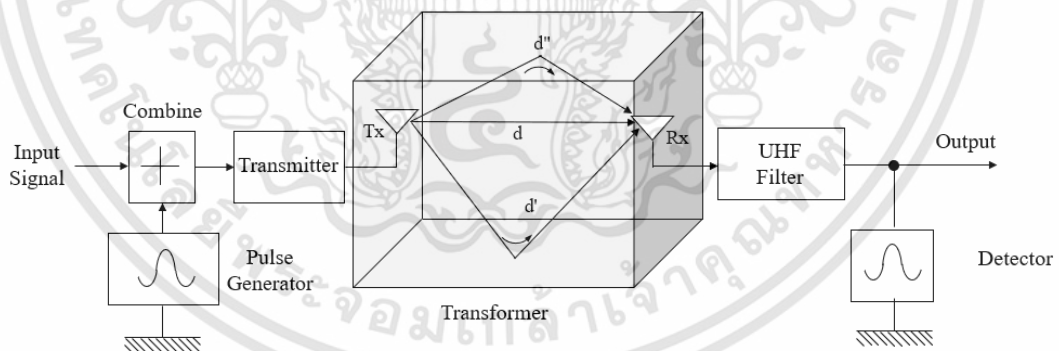
เมื่อ $\otimes$ คือเครื่องหมายคอนโวลูชัน และสามารถหาความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ $V_r(f,d)$ ได้จากสมการที่ 3.6

$$V_r(f,d) = V_t(f) H_{e\text{-Friis}}(f,d) \quad (3.6)$$

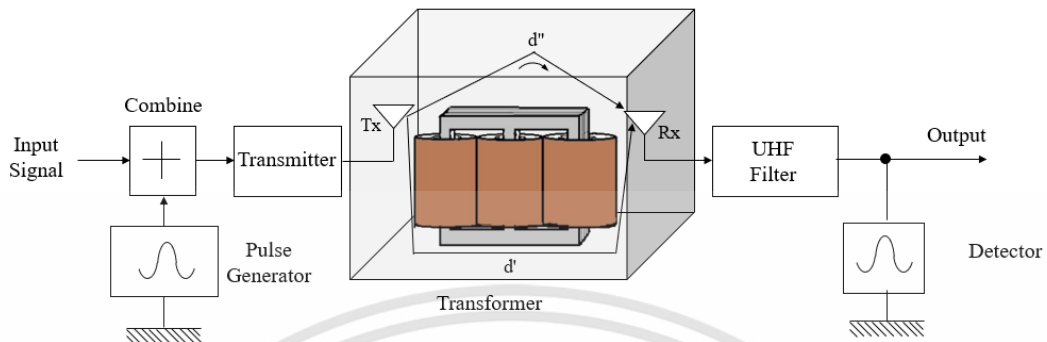
เมื่อ $V_t(f)$ คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง
การทดลองนี้จะกำหนดให้ใช้รูปคลื่นของสัญญาณส่งเป็นพัลส์แบบเกาส์ (Modulated Gaussian Pulse) [18] โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ 475 เมกะเฮิร์ตซ์ และสามารถหารูปคลื่นส่งได้จากสมการที่ 3.7

$$v_t(t,d) = v_0 \exp\left[-\left((t-t_c)/t_d\right)^2\right] \sin(2\pi f_c t) \quad (3.7)$$

โดยที่การทดลองนี้จะแบ่งกรณีการทดลองออกเป็นสองกรณีคือ กรณีที่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า และกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะมีระบบการวิเคราะห์ของสัญญาณการแพร่กระจายความถี่สูงดังรูปที่ 3.16



(ก) กรณีไม่มีแกนหม้อแปลงไฟฟ้า



(ข) กรณีมีแกนหม้อแปลงไฟฟ้า

รูปที่ 3.31 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์ช่องสัญญาณการแพร่กระจายย่านความถี่สูงยิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า

การวิเคราะห์ช่องสัญญาณที่วัดได้สามารถทำได้โดยพิจารณาจากขนาดฟังก์ชันการส่งผ่านของช่องสัญญาณ (Magnitude) เฟสฟังก์ชันการถ่ายโอน (Phase) การสูญเสียเชิงวิถี (Pathloss: PL) [19] ภาพตัดขวางการประวิงกำลัง (Power Delay Profile: PDP) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) [20] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ ตามลำดับ

$$\text{Magnitude} = |H_{e\text{-Friis}}(f)| \quad (3.8)$$

$$\text{Phase} = \angle H_{e\text{-Friis}}(f) \quad (3.9)$$

$$\text{PL (dB)} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} \quad (3.10)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3.11)$$

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (3.12)$$

จากฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณการแพร่กระจายย่านยูเอชเอฟของเครื่องรับสัญญาณจะนำเข้าสู่ตัวกรองที่ตรงกับ $H_{MF}(f)$ ถึงขยายอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อการรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) ให้สูงสุดดังสมการ 3.13

$$H_{MF}(f) = \frac{H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*|^2 df}} \quad (3.13)$$

ในกรณีไอโซโทรปิกดังสมการ 3.14

$$H_{MF,Iso}(f) = \frac{H_{e-Friis}^*(f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}^*|^2 df}}, \quad (3.14)$$

ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของกำลังสัญญาณรบกวนที่ส่งออกดังสมการ 3.15

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H_{MF}(f)|^2 df = 1 \quad (3.15)$$

ในการยกตัวอย่างนี้ ฟังก์ชันการถ่ายโอนช่องสัญญาณของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้รับคือ $H_{e-Friis}(f)$ และ $H_{e-Friis}(f)$ และ $E_i = 1$ เอาต์พุตของรูปคลื่น โดยรูปคลื่นเอาต์พุตใช้ตัวกรองกับ $v_{MF}(t)$ ที่ตรงกันดังสมการ 3.16

$$\begin{aligned} v_{MF}(t) &= h_{e-Friis}(t) \times h_{MF}(t) \\ &= \frac{h_{e-Friis}(t) \times h_{MF}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis}^2(t) dt}}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

และในกรณีไอโซโทรปิกดังสมการ 3.17

$$\begin{aligned}
 v_{MF,Iso}(t) &= h_{e-Friis,Iso}(t) \times h_{MF,Iso}(t) \\
 &= \frac{h_{e-Friis,Iso}(t) \times h_{MF,Iso}(-t)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h_{e-Friis,Iso}^2(t) dt}},
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

ในรูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตตัวกรองที่ตรงกับ $v_{MF}(t)$ ดังสมการ 3.18

$$\begin{aligned}
 v_{MF}(t) &= H_{e-Friis,Iso}(f) H_{MF}(f) \\
 &= \frac{|H_{e-Friis}(f)|^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} H_{e-Friis}(f) df}},
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

และอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อการรบกวนสูงสุดดังสมการ 3.19

$$\begin{aligned}
 \max_t v_{MF}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_{MF}(f) df \\
 &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_{e-Friis}(f)|^2 df}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

สมการที่ 3.19 คือสมการของฟรีสในเชิงซ้อนย่านความถี่สูงมาก ซึ่งรวมถึงคุณลักษณะของสายอากาศ การสูญเสียเชิงวิถีในพื้นที่ว่าง และรูปคลื่นสัญญาณที่เข้ามา เป็นที่ชัดเจนว่าการขยายสายอากาศในพื้นที่ว่างไม่สามารถอธิบายได้ในแง่ของอัตราขยายความถี่สูงมาก ในอีกทางหนึ่ง ผลกระทบรูปคลื่นที่มีอัตราขยายของการส่งสัญญาณสามารถหาได้ดังสมการ 3.19 การทำให้เป็นมาตรฐานด้วย $H_{Iso}(f) = 1$ ถูกประเมินสำหรับสายอากาศแบบไอโซโทรปิกอ้างอิง [21]

บทที่ 4

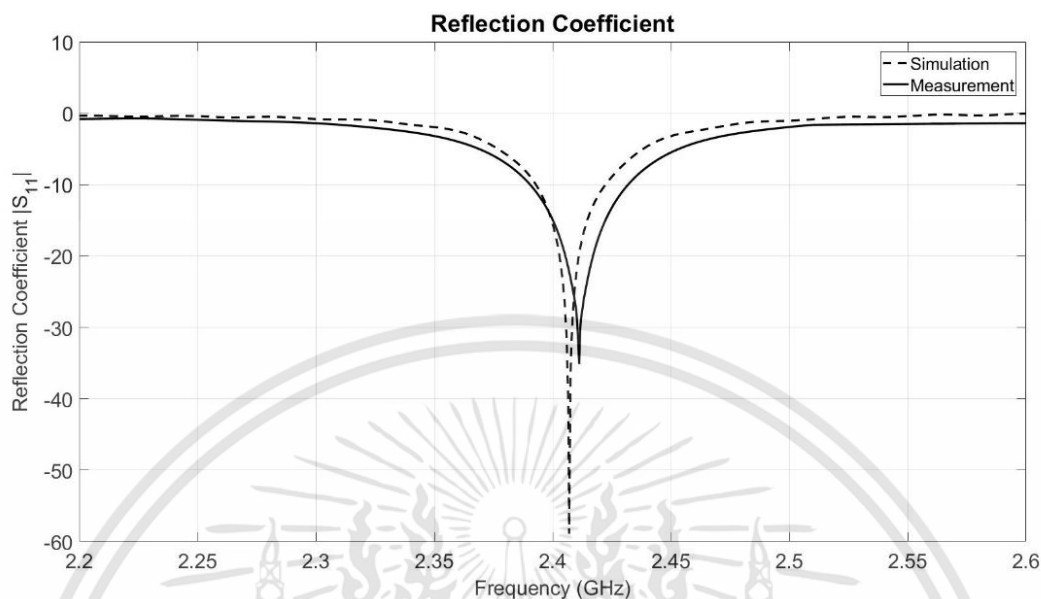
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ส่วน คือผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป จะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น ในส่วนของผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณ กล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบวัดและวิเคราะห์โดยแสดงให้เห็นถึงค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณโดยแบ่งออกเป็นทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ดังนี้ ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ อัตราการขยายการส่งผ่าน ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

4.1.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$

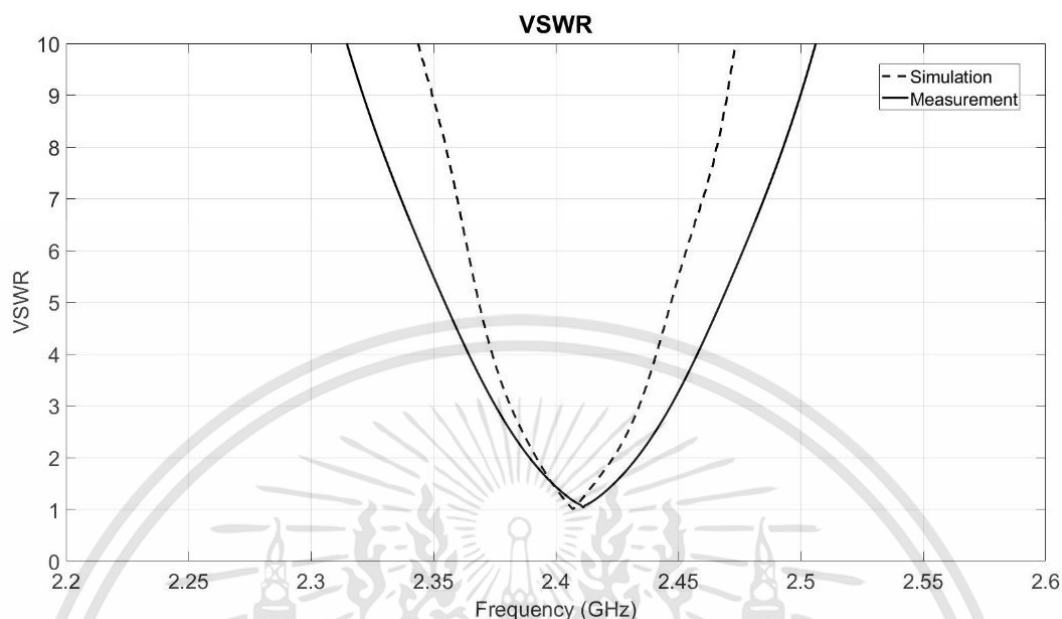
ในการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศนั้น จะบ่งชี้ให้เห็นว่าช่วงความถี่ที่จะนำไปใช้งานนั้นสามารถใช้งานได้หรือไม่ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศนั้นจะควรมีค่าที่ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ระหว่างผลการจำลองการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบการวัดคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลจากการทดสอบการวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ อยู่ที่ -35.1196 dB ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB จึงสามารถใช้งานได้ โดยมีช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า -10 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ที่ 2.39 กิกะเฮิรตซ์ จนถึง 2.43 กิกะเฮิรตซ์และมีขนาดแบนด์วิดท์ 40 เมกะเฮิรตซ์ โดยที่เส้นประคือผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนเส้นทึบคือผลที่ได้จากการทดสอบการวัดคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง

4.1.2 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

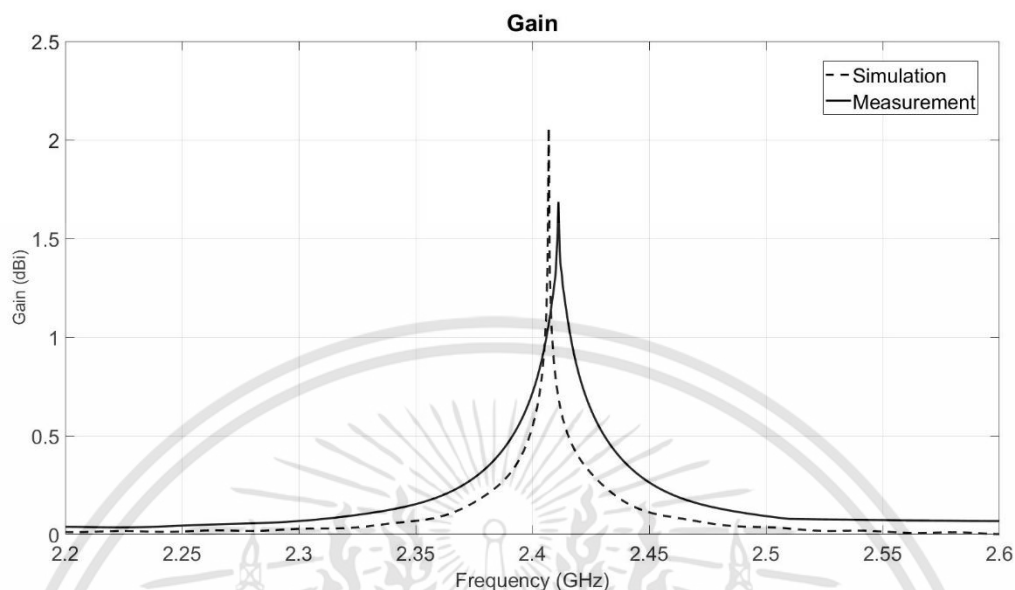
ในการพิจารณาอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนั้นจะบ่งบอกว่าคุณสมบัติที่จะสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ได้นั้น ซึ่งค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนั้นควรจะมีความต่ำกว่า 2 ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป ระหว่างผลการจำลองการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดสอบการวัดคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยการทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งในผลการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนั้นจากรูปที่ 4.2 จะให้เห็นได้ว่าผลการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันนั้นมีความต่ำกว่า 2 จึงสามารถนำสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนี้ไปใช้งานได้ โดยมีช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 ตั้งแต่ช่วงความถี่ที่ 2.39 กิโลเฮิรตซ์ จนถึง 2.43 กิโลเฮิรตซ์ โดยที่เส้นประคือผลการจำลองค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนเส้นทึบคือผลที่ได้จากการทดสอบการวัดคุณสมบัติค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง

4.1.3 อัตราขยาย

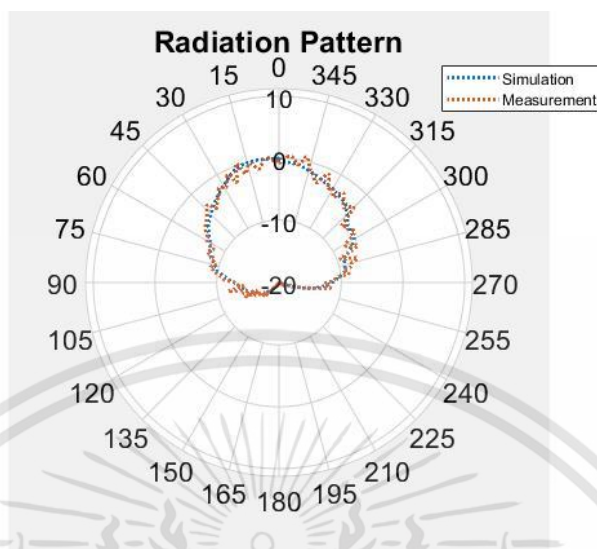
อัตราขยายคือกำลังการส่งของสายอากาศโดยเทียบกับสายอากาศแบบไอโซทรอปิก โดยอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบตามคุณสมบัตินั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบแบบจำลองการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในช่วงความถี่ที่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ จนถึง 2.6 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าอัตราขยายต่ำสุดอยู่ที่ 0.064 dBi และมีค่าอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 1.6857 dBi โดยที่เส้นประคือผลการจำลองค่าอัตราขยายที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเส้นทึบคือผลที่ได้จากการทดสอบการวัดคุณสมบัติค่าอัตราขยายภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริประหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง

4.1.4 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) หรือระนาบ XZ การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ทำได้โดยการนำสายอากาศมาวางตั้งฉากกับพื้นโลก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ มีลักษณะเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยจะมีความใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในการทดสอบจริงจะมีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ เครื่องมือวัด และสภาพแวดล้อม โดยที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะมีการแผ่กระจายคลื่นดีที่สุดเพราะว่าทิศทางการแผ่พลังงานมีความเข้ากันตามรูปทรงของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปและมีอัตราขยายที่เหมาะสม โดยที่เส้นสีฟ้าคือผลการจำลองแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนเส้นสีส้มคือผลที่ได้จากการทดสอบการวัดคุณสมบัติแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริบในระนาบ XZ ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดสอบวัดจริง

4.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่มีด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

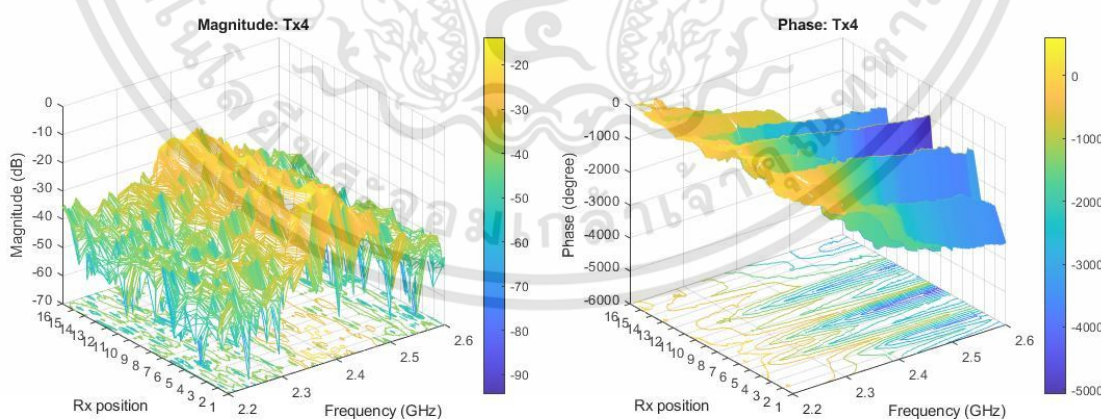
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทดสอบวัดและวิเคราะห์โดยแสดงให้เห็นถึงค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณโดยใช้สายอากาศที่ติดตั้งในหม้อแปลง ด้วยการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ อัตราการขยายการส่งผ่าน ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ด้าน 16×16 ช่อง และด้าน 40×40 ช่อง โดยที่ด้าน 16×16 ช่อง มีตัวอย่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณดังนี้ Tx4 อยู่ตำแหน่งมุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า Tx6 อยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx13 อยู่ตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ด้าน 40×40 ช่อง มีตัวอย่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณดังนี้ Tx4 อยู่ตำแหน่งมุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า Tx23 อยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx37 อยู่ตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่เลือกตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งดังกล่าวเพื่อดูคุณลักษณะของช่องสัญญาณด้าน 16×16 ช่อง และด้าน 40×40 ช่อง แต่ละตำแหน่งของฝั่งส่งสัญญาณทั้งมุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า ขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้า และจุดกึ่งกลางของผนังหม้อ

แปลงไฟฟ้า ในผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ได้จากการทดลองวัดจริงและนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยแสดงเป็นค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณดังนี้

4.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน

คุณลักษณะของช่องสัญญาณจากฟังก์ชันการถ่ายโอนจะสามารถพิจารณาได้จากค่าขนาด เฟส และภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยที่ขนาดนั้นจะเป็นการบ่งบอกถึงระดับความแรงของสัญญาณในฟังก์ชันการถ่ายโอนในโดเมนความถี่ที่ต้องการพิจารณา ซึ่งถ้าขนาดมีระดับความแรงของสัญญาณสูงนั้นหมายถึงสัญญาณมีการจางหายไปน้อยมาก แต่ถ้ามีระดับความแรงของสัญญาณที่ต่ำนั้นหมายความว่าเกิดการจางหายของสัญญาณสูงหรือเกิดการสะท้อนแล้วสัญญาณเกิดการหักล้างกันจึงทำให้ระดับของสัญญาณนั้นมีค่าต่ำ เฟสจะบอกถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ โดยที่เฟสที่มีความเป็นเชิงเส้นจะมีความเป็นช่องสัญญาณที่ดี และการประวิงกลุ่มจะมีผลขึ้นกับเฟส เพราะหากเฟสไม่มีความเป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดการประวิงกลุ่มที่สูงขึ้น ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ กำหนดแกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ตำแหน่งของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปในฝั่งรับ แกน z คือ ขนาดหรือเฟส โดยที่ระดับพลังงานจะสังเกตได้จากแถบด้านข้าง ซึ่งในระดับพลังงานที่สูงนั้นจะอยู่ในช่วงแถบสีเหลือง และระดับพลังงานที่ต่ำนั้นจะอยู่ในช่วงแถบสีม่วง

4.2.1.1 ตัวอย่างผลของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง

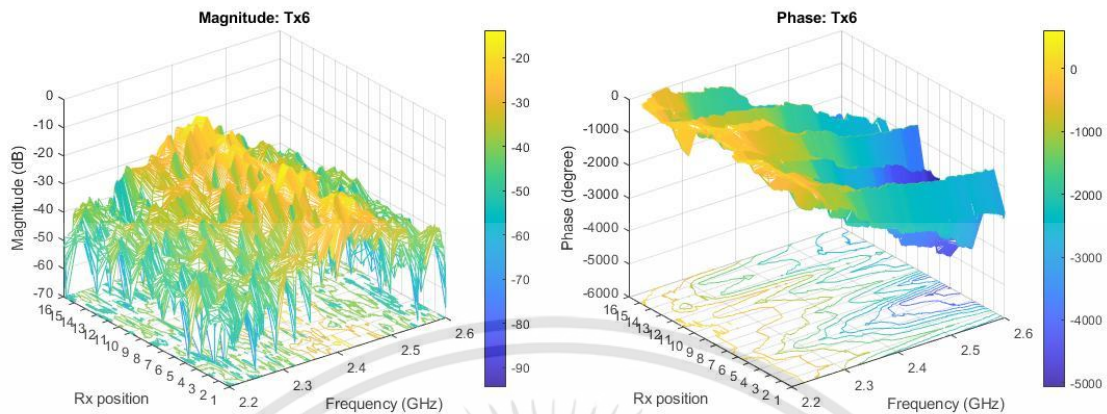


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.5 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx4 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

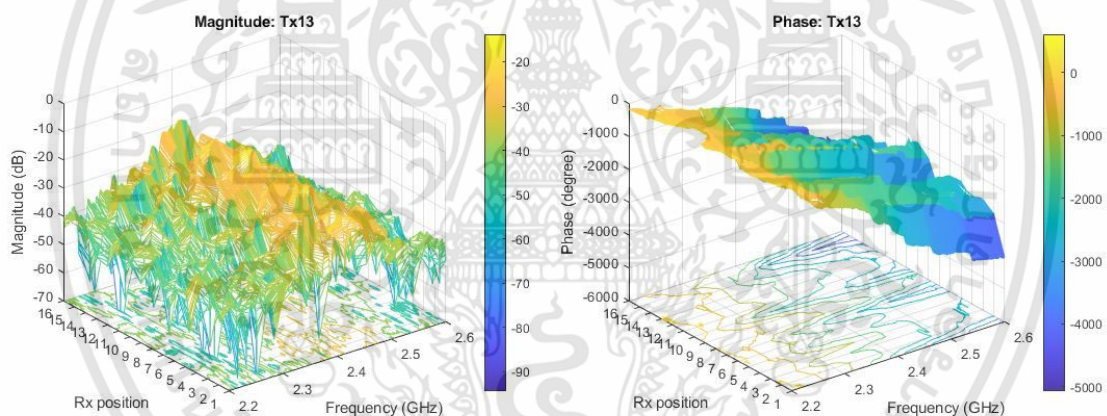


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.6 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx6 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

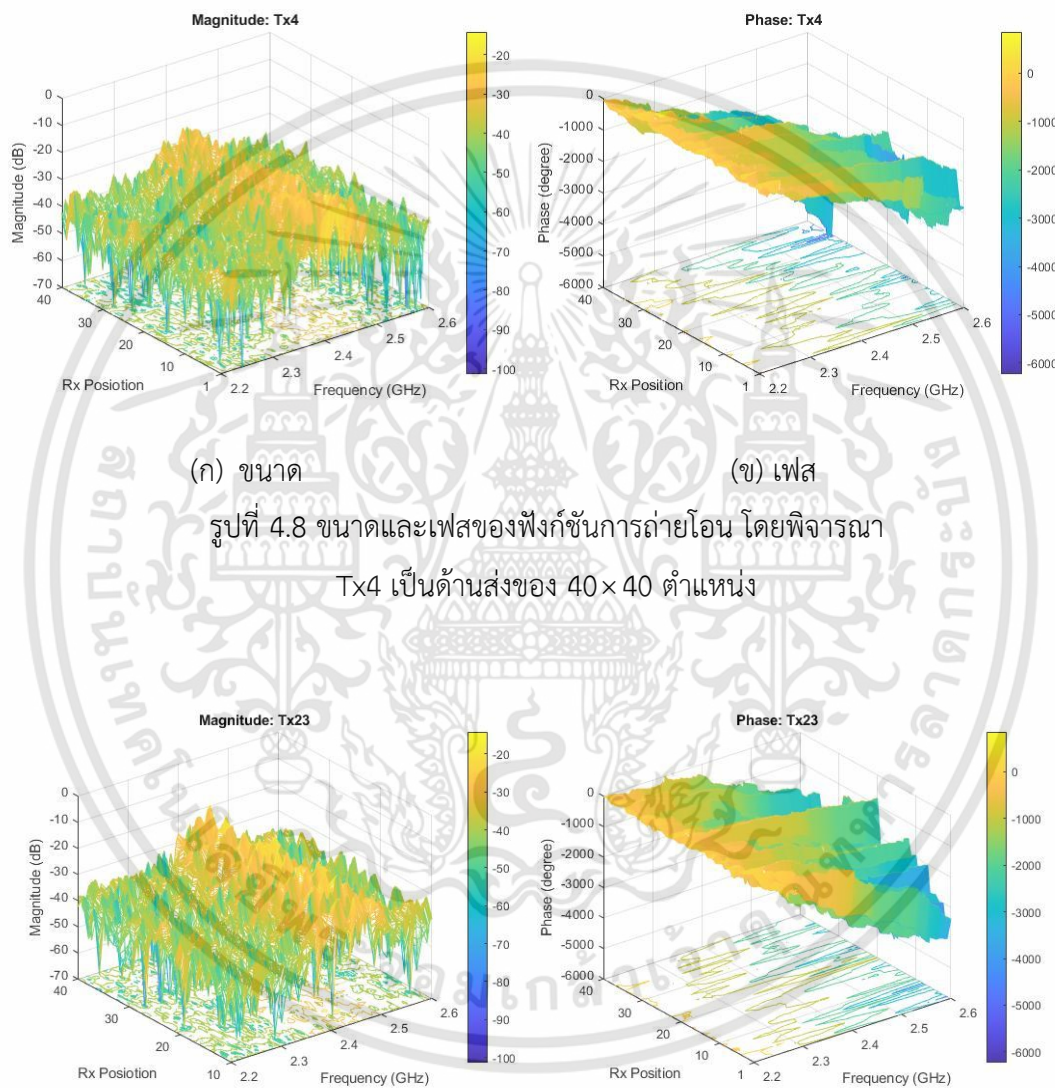
รูปที่ 4.7 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

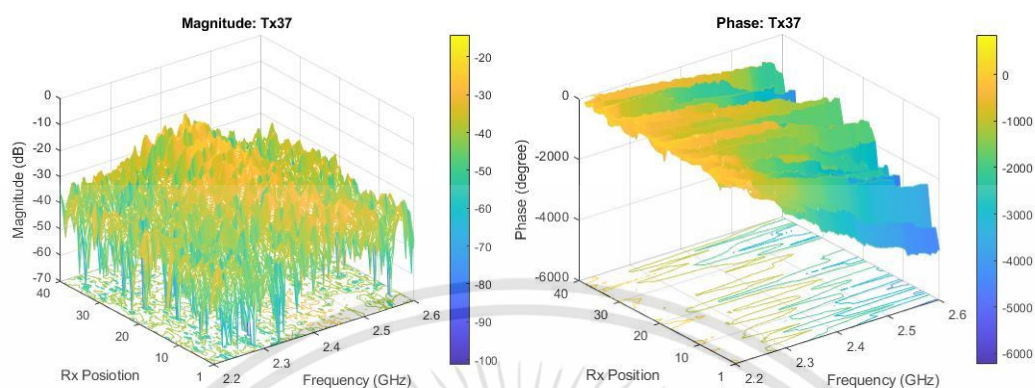
Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ได้ยกตัวอย่างผลของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าที่ Tx4 หรือตำแหน่งมุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณสูงที่สุด โดยมีค่า -15.2296 dB ส่วนที่ Tx13 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุด โดยมีค่า -17.4518 dB เพราะตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณไปในอากาศ

เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีฝาปิด ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นเกือบตลอดความถี่ที่ได้ทำการทดลอง

4.2.1.2 ตัวอย่างขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง





(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.10 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

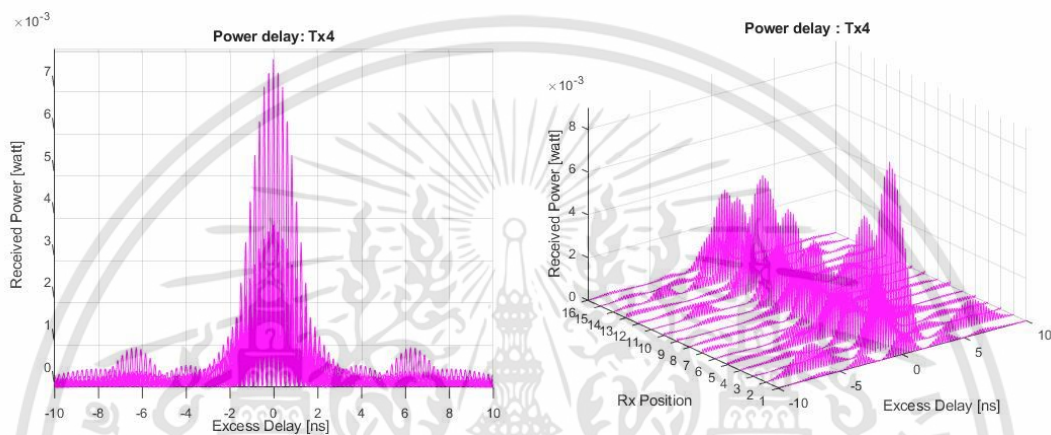
จากรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง โดยที่ Tx4 อยู่ตำแหน่งมุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า Tx23 อยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx37 อยู่ตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 3 ตำแหน่งจะแสดงดังรูปที่ 4 จากตัวอย่างผลของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง ทั้ง 3 รูปจะเห็นได้ว่าที่ Tx23 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -16.5361 dB ส่วนที่ Tx37 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุดโดยมีค่า -21.1018 dB เพราะตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณไปในอากาศ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีฝาปิด ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นเกือบตลอดความถี่ที่ได้ทำการทดลอง

4.2.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณเป็นการแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปรี่รับที่เวลาต่างกัน ซึ่งระดับกำลังที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสัญญาณที่เกิดการสะท้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยที่สัญญาณที่เกิดการสะท้อนนั้นอาจเกิดการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการเสริมกันของสัญญาณและมีการเกิดดีเลย์ของเวลาเกิดขึ้นจึง

ทำให้สัญญาณที่เข้ามามีระดับกำลังงานที่ไม่เท่ากันและมีเวลาที่รับสัญญาณได้นั้นจะแตกต่างกันออกไป ในโครงการนี้จึงใช้ตัวกรองสัญญาณชนิดแมตซ์ฟิลเตอร์ เพื่อทำการกรองดีเลย์เวลาของสัญญาณออก โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ

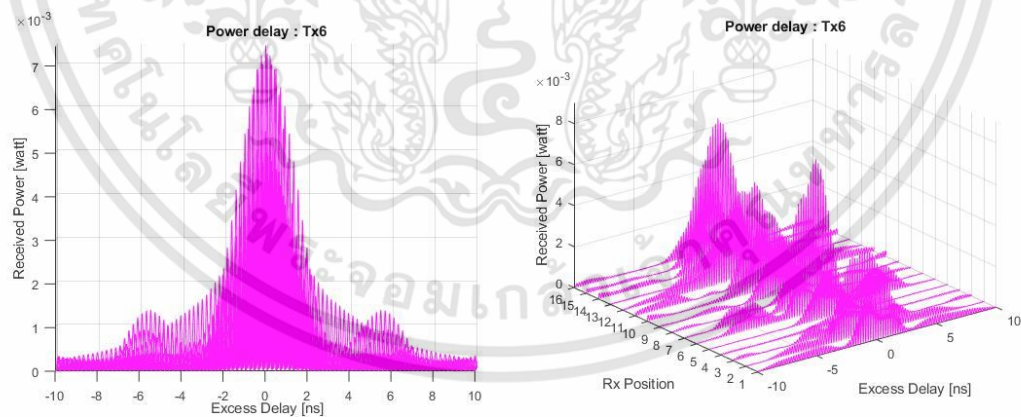
4.2.2.1 ตัวอย่างผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่
ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

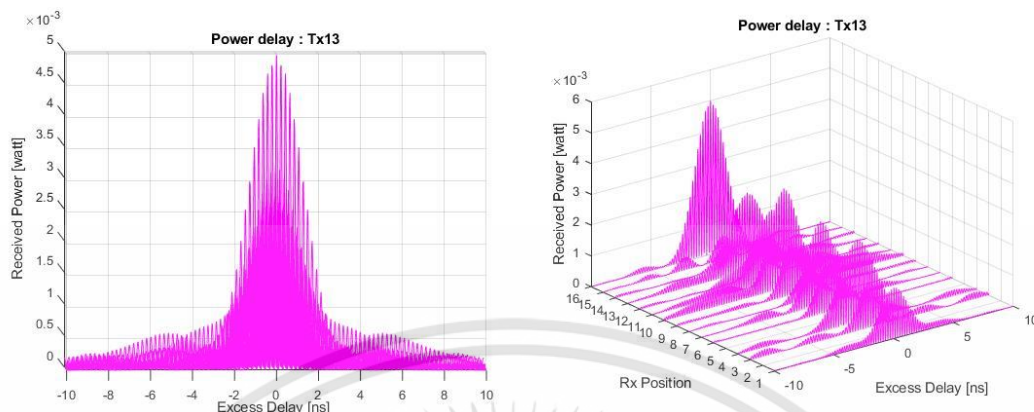
รูปที่ 4.11 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4
เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.12 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6
เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง



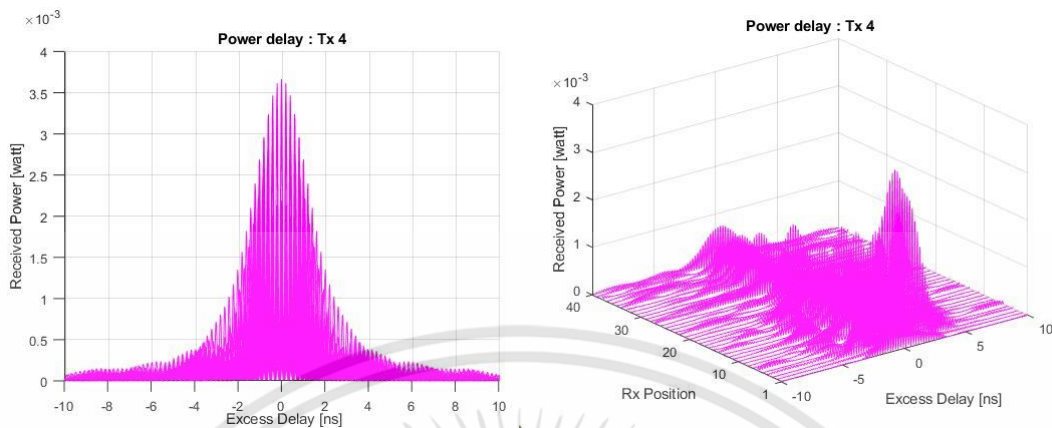
(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.13 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx13
เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

จากรูป 4.11 4.12 และ 4.13 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณ โดยใช้แมตซ์เตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดคะเนได้ อาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดจะอยู่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณ โดยที่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณจะได้รับกำลังงานค่อนข้างสูง จะเห็นได้ว่าที่ Tx6 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุด ส่วนที่ Tx13 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด เพราะตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณไปในอากาศ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีฝาปิด

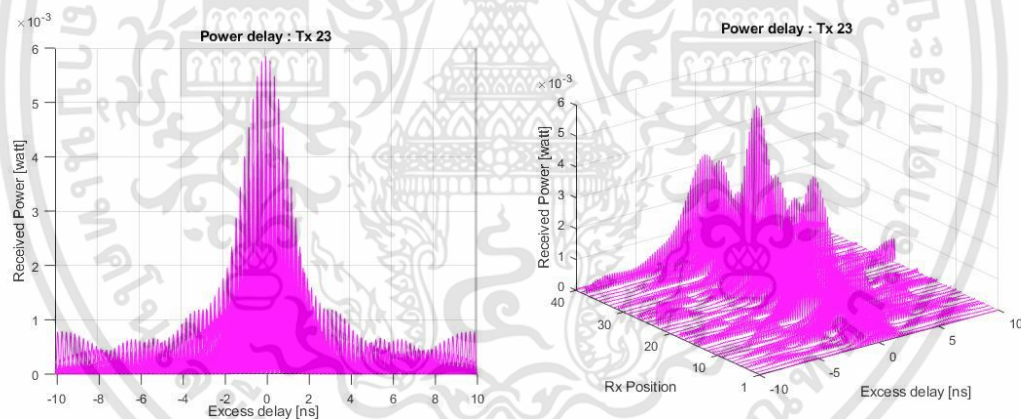
4.2.2.2 ตัวอย่างผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่
ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

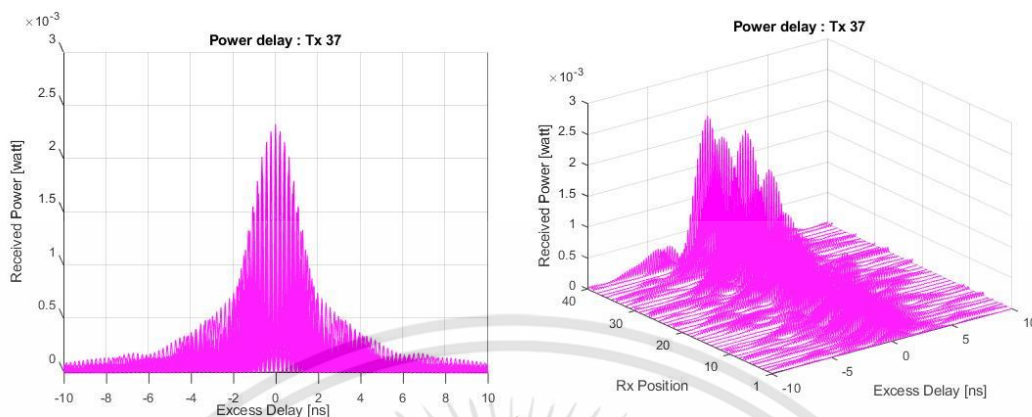
รูปที่ 4.14 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4
เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.15 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx23
เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.16 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx37
เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

จากรูป 4.14 4.15 และ 4.16 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณ โดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดคะเนได้ อาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดจะอยู่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณ โดยที่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณจะได้รับกำลังงานค่อนข้างสูง จะเห็นได้ว่าที่ Tx23 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุด ส่วนที่ Tx37 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด เพราะตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณไปในอากาศ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีฝาปิด

4.2.3 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ

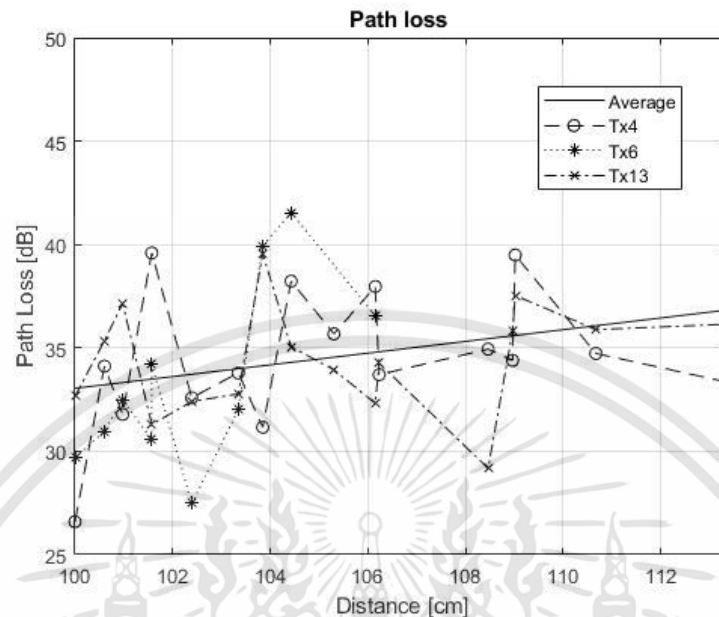
การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบลและระยะห่างระหว่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณถึงตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณในหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ

4.2.3.1 ตัวอย่างผลของการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 4.1 โดยที่ Tx เป็นด้านส่ง Rx เป็นด้านรับ เส้นตรงสีแดงคือ

ค่าเฉลี่ยการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ เส้นขีดวงกลมคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx4 จุดดอกจันคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดกากบาทคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx13

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx6	Tx13
Rx1	34.9410	30.5585	33.9404
Rx2	31.1619	30.9729	34.2574
Rx3	31.7864	31.5235	35.7905
Rx4	26.5939	41.5440	36.1452
Rx5	39.4910	32.4810	32.4060
Rx6	38.2290	29.6804	32.7719
Rx7	39.5904	30.5443	32.3116
Rx8	34.1131	39.9336	35.8842
Rx9	34.7294	34.1849	35.3408
Rx10	37.9672	32.4816	31.2997
Rx11	33.7863	29.9077	35.0508
Rx12	32.5874	32.6413	37.5288
Rx13	33.3384	32.0026	32.6607
Rx14	34.3915	27.4842	37.1561
Rx15	33.7048	28.5731	39.5513
Rx16	35.6757	36.5511	29.1679



รูปที่ 4.17 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13
เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.17 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx6 และ Tx13 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับสัญญาณ Rx7 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 39.5904 dB และที่ด้านรับสัญญาณ Rx4 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 26.5939 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับสัญญาณ Rx4 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 41.5440 dB และที่ด้านรับสัญญาณ Rx14 จะมีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 27.4842 dB ตำแหน่ง Tx13 ที่ด้านรับสัญญาณ Rx15 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 39.5513 dB และที่ด้านรับสัญญาณ Rx16 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 29.1679 dB ซึ่งจากตำแหน่งของด้านส่งสัญญาณทั้งหมดที่มีผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณของด้านรับสัญญาณที่น้อยสุด คือตำแหน่งที่ Tx4 ที่มีด้านรับสัญญาณ Rx4 โดยมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเท่ากับ 26.5939 dB เนื่องจากตำแหน่งด้านส่งสัญญาณและตำแหน่งด้านรับสัญญาณอยู่ในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน และมีระยะทางระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับน้อยที่สุด และมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ ตำแหน่ง Tx6 ที่มีด้านรับสัญญาณ Rx4 โดยมีการสูญเสียเท่ากับ 41.5440 dB

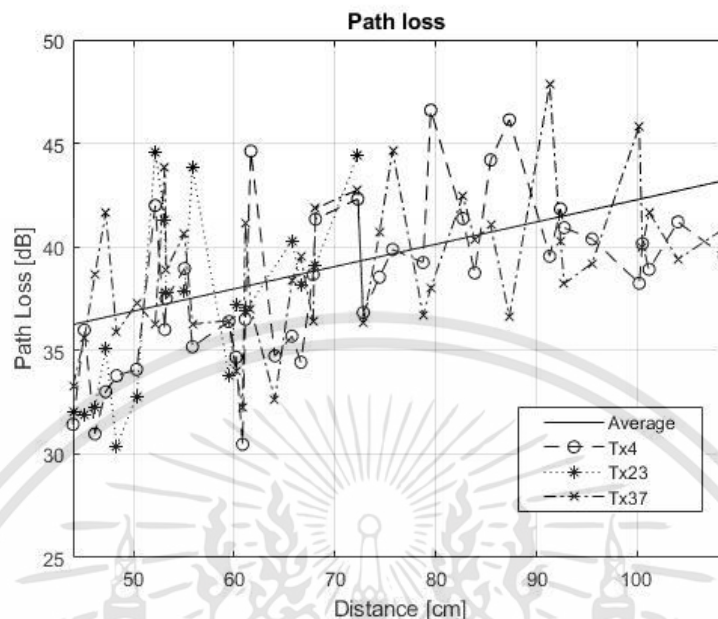
4.2.3.2 ตัวอย่างผลของการสูญเสียเชิงวิธีของช่องสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 4.2 โดยที่ Tx เป็นด้านส่งสัญญาณ Rx เป็นด้านรับสัญญาณ เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ เส้นขีดวงกลมคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx4 จุดดอกจันคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx23 และเส้นจุดกากบาทคือการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณด้านส่ง Tx37

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx23	Tx37
Rx1	30.4616	44.4199	45.8087
Rx2	42.0003	39.1310	41.6704
Rx3	30.9697	38.1838	39.4023
Rx4	31.4348	40.9525	40.8900
Rx5	44.6245	40.2950	47.8542
Rx6	36.0091	36.8816	40.3002
Rx7	33.0079	33.7910	39.2110
Rx8	35.9849	48.4974	39.9812
Rx9	34.7358	37.2293	42.4571
Rx10	35.1829	37.8477	40.3476
Rx11	34.0874	37.7705	36.6337
Rx12	33.7802	39.4370	38.2201
Rx13	38.6694	43.8049	40.6784
Rx14	34.6740	32.7950	44.6425
Rx15	38.9552	30.3857	38.0114
Rx16	37.5040	35.0722	41.0382
Rx17	36.8343	41.3170	39.5052

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ
40×40 ตำแหน่ง (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx23	Tx37
Rx18	35.6905	35.0832	41.8553
Rx19	36.5030	31.9211	42.7610
Rx20	36.3947	33.3074	36.6955
Rx21	39.2484	44.5733	36.4348
Rx22	42.3138	32.2575	41.1147
Rx23	41.3396	32.0413	38.3763
Rx24	34.4309	36.7557	36.3413
Rx25	44.1957	39.9655	38.8926
Rx26	46.6030	33.6017	40.6376
Rx27	39.8734	38.6223	33.9894
Rx28	38.5380	32.3989	36.3826
Rx29	40.9240	39.4727	35.8695
Rx30	46.1386	37.7746	37.2720
Rx31	38.7442	32.5548	36.2763
Rx32	41.3670	36.5225	32.6526
Rx33	40.1578	40.1664	35.5750
Rx34	40.3831	34.1346	41.6541
Rx35	41.8317	32.1266	43.8073
Rx36	39.5500	41.1390	37.0033
Rx37	39.5422	37.7509	33.2864
Rx38	41.2043	32.5902	38.6515
Rx39	38.9140	38.7568	36.2490
Rx40	38.2409	37.2429	32.2261



รูปที่ 4.18 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37
เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.18 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx23 และ Tx37 จะเห็นได้ว่า ตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx26 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 46.6030 dB และที่ด้านรับ Rx1 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 30.4616 dB ตำแหน่ง Tx23 ที่ด้านรับ Rx8 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 44.5733 dB และที่ด้านรับ Rx15 จะมีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 30.3857 dB ตำแหน่ง Tx37 ที่ด้านรับ Rx5 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 47.8542 dB และที่ด้านรับ Rx40 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 32.2261 dB ซึ่งจากตำแหน่งที่มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือตำแหน่งด้านส่ง Tx37 ที่มีสายอากาศด้านรับอยู่ในตำแหน่ง Rx5

4.2.4 อัตราการขยายการส่งผ่าน

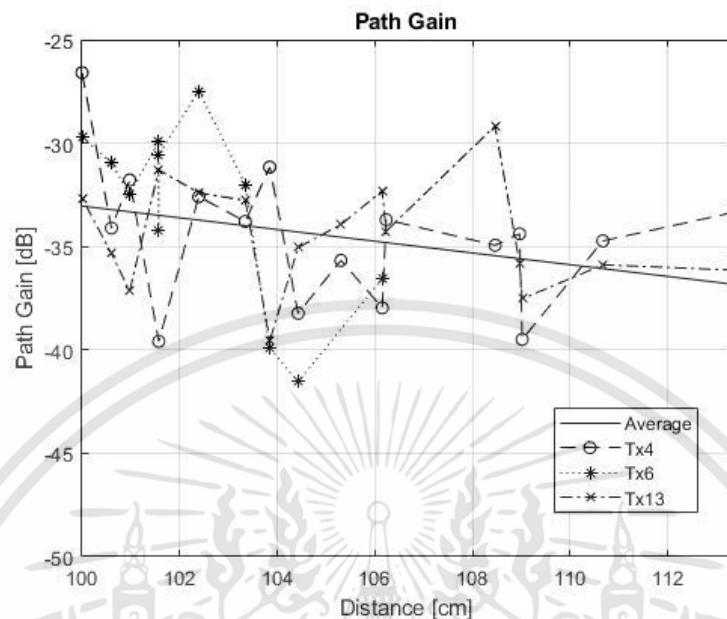
อัตราการขยายการส่งผ่านแถบกว้างยิ่งสำหรับโครงข่ายไร้สายในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละจุดของสายอากาศที่ทำการวัด โดยเปรียบเทียบกับค่าอัตราการขยายของสายอากาศแบบไอโซโทรปิก

4.2.4.1 ตัวอย่างผลของอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 4.3 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยอัตราการขยายการส่งผ่าน

เส้นขีดวงกลมคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx4 จุดดอกจันคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดกากบาทคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx13

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx6	Tx13
Rx1	-34.9410	-30.5585	-33.9404
Rx2	-31.1619	-30.9729	-34.2574
Rx3	-31.7864	-31.5235	-35.7905
Rx4	-26.5939	-41.5440	-36.1452
Rx5	-39.4910	-32.4810	-32.4060
Rx6	-38.2290	-29.6804	-32.7719
Rx7	-39.5904	-30.5443	-32.3116
Rx8	-34.1131	-39.9336	-35.8842
Rx9	-34.7294	-34.1849	-35.3408
Rx10	-37.9672	-32.4816	-31.2997
Rx11	-33.7863	-29.9077	-35.0508
Rx12	-32.5874	-32.6413	-37.5288
Rx13	-33.3384	-32.0026	-32.6607
Rx14	-34.3915	-27.4842	-37.1561
Rx15	-33.7048	-28.5731	-39.5513
Rx16	-35.6757	-36.5511	-29.1679



รูปที่ 4.19 อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13
เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.19 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง โดยจะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไปของแต่ละตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx6 และ Tx13 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx7 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -26.5939 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -39.5904 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับ Rx12 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -27.4842 dB และที่ด้านรับ Rx14 จะมีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -41.5440 dB ตำแหน่ง Tx13 ที่ด้านรับ Rx6 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -29.1679 dB และที่ด้านรับ Rx16 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -39.5513 dB

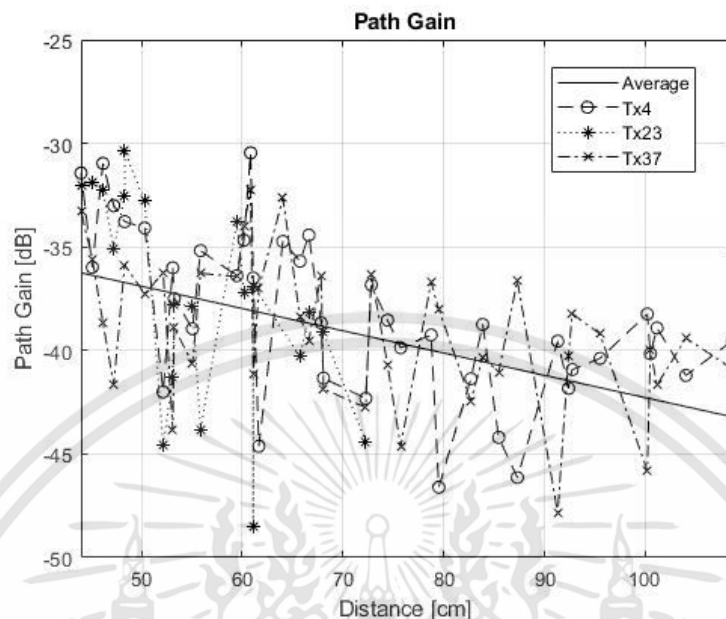
4.2.4.2 ตัวอย่างผลของอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง ดังตารางที่ 4.4 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยอัตราการขยายการส่งผ่านเส้นขีดวงกลมคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx4 จุดดอกจันคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx23 และเส้นจุดกากบาทคือค่าอัตราการขยายการส่งผ่านด้านส่ง Tx37

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับ
ด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx23	Tx37
Rx1	-30.4616	-44.4199	-45.8087
Rx2	-42.0003	-39.1310	-41.6704
Rx3	-30.9697	-38.1838	-39.4023
Rx4	-31.4348	-40.9525	-40.8900
Rx5	-44.6245	-40.2950	-47.8542
Rx6	-36.0091	-36.8816	-40.3002
Rx7	-33.0079	-33.7910	-39.2110
Rx8	-35.9849	-48.4974	-39.9812
Rx9	-34.7358	-37.2293	-42.4571
Rx10	-35.1829	-37.8477	-40.3476
Rx11	-34.0874	-37.7705	-36.6337
Rx12	-33.7802	-39.4370	-38.2201
Rx13	-38.6694	-43.8049	-40.6784
Rx14	-34.6740	-32.7950	-44.6425
Rx15	-38.9552	-30.3857	-38.0114
Rx16	-37.5040	-35.0722	-41.0382
Rx17	-36.8343	-41.3170	-39.5052
Rx18	-35.6905	-35.0832	-41.8553
Rx19	-36.5030	-31.9211	-42.7610
Rx20	-36.3947	-33.3074	-36.6955

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับ
ด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)		
	Tx4	Tx23	Tx37
Rx21	-39.2484	-44.5733	-36.4348
Rx22	-42.3138	-32.2575	-41.1147
Rx23	-41.3396	-32.0413	-38.3763
Rx24	-34.4309	-36.7557	-36.3413
Rx25	-44.1957	-39.9655	-38.8926
Rx26	-46.6030	-33.6017	-40.6376
Rx27	-39.8734	-28.6223	-33.9894
Rx28	-38.5380	-32.3989	-36.3826
Rx29	-40.9240	-39.4727	-35.8695
Rx30	-46.1386	-37.7746	-37.2720
Rx31	-38.7442	-32.5548	-36.2763
Rx32	-41.3670	-36.5225	-32.6526
Rx33	-40.1578	-40.1664	-35.5750
Rx34	-40.3831	-34.1346	-41.6541
Rx35	-41.8317	-32.1266	-43.8073
Rx36	-39.5500	-41.1390	-37.0033
Rx37	-39.5422	-37.7509	-33.2864
Rx38	-41.2043	-32.5902	-38.6515
Rx39	-38.9140	-38.7568	-36.2490
Rx40	-38.2409	-37.2429	-32.2261



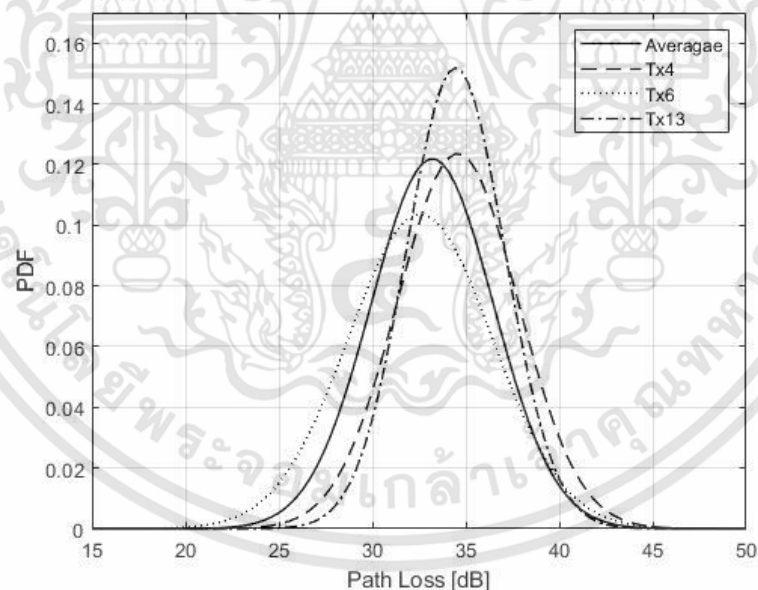
รูปที่ 4.20 อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37
เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.20 ได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง โดยจะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไปของแต่ละตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx23 และ Tx37 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx26 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -30.4616 dB และที่ด้านรับ Rx14 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -46.6030 dB ตำแหน่ง Tx23 ที่ด้านรับ Rx26 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -31.4258 dB และที่ด้านรับ Rx4 จะมีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -44.4730 dB ตำแหน่ง Tx37 ที่ด้านรับ Rx33 มีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -32.2261 dB และที่ด้านรับ Rx13 มีระดับสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -47.8542 dB

4.2.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

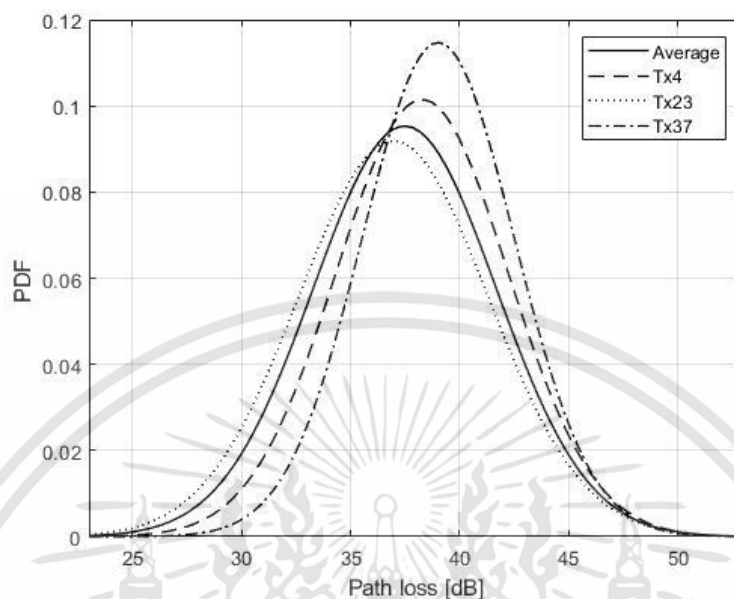
ถ้าตัวแปรสุ่ม X มีการแจกแจง (Continuous Distribution) จะเรียกฟังก์ชันนี้ว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) โดยพิจารณา ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นสะสมที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง กรณีตำแหน่งที่ Tx4 Tx6 และ Tx13 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.21 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชัน

ความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx13 ส่วนผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ด้านส่งกับด้านรับ 40x40 ตำแหน่ง โดยพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ด้านส่งกับด้านรับ Tx4 Tx23 และ Tx37 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.22 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ย ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx23 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx37 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณแต่ละด้าน โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฝั่งด้าน Tx13



รูปที่ 4.21 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิธี โดยพิจารณา

Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง

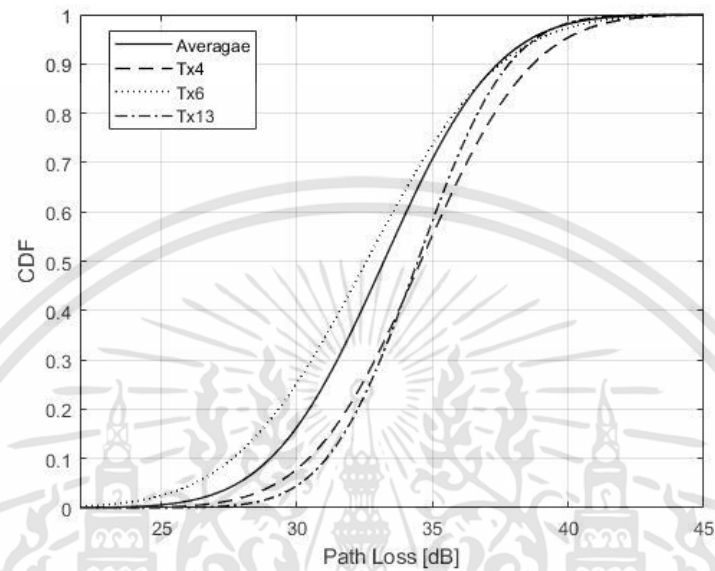


รูปที่ 4.22 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

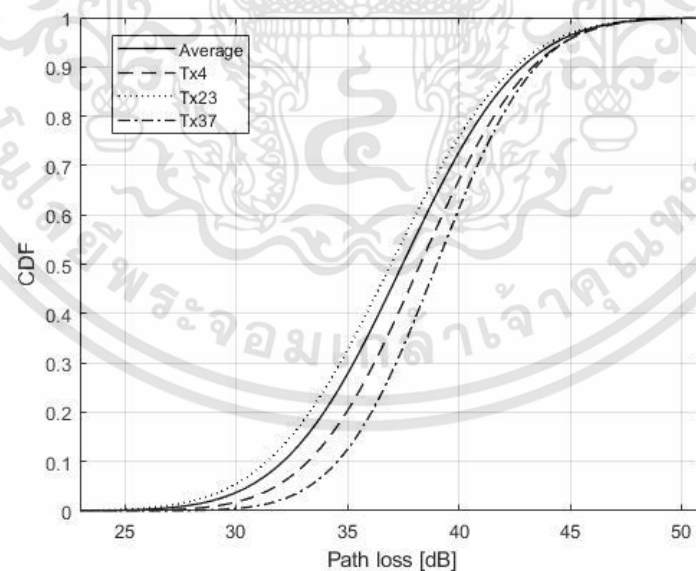
4.2.6 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) หรือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Distribution Function) ของตัวแปรสุ่ม X คือฟังก์ชันที่นิยามนี้กับทั้งตัวแปรสุ่มต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยพิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง กรณีตำแหน่งที่ Tx4 Tx6 และ Tx13 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.23 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx13 ส่วนการพิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง กรณีตำแหน่งที่ Tx4 Tx23 และ Tx37 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.24 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx23 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx37 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแต่ละด้าน โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบ

สะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx4 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx6 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx13



รูปที่ 4.23 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx6 และ Tx13 เป็นด้านส่งของ 16×16 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.24 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมการสูญเสียเชิงวิถี โดยพิจารณา Tx4 Tx23 และ Tx37 เป็นด้านส่งของ 40×40 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

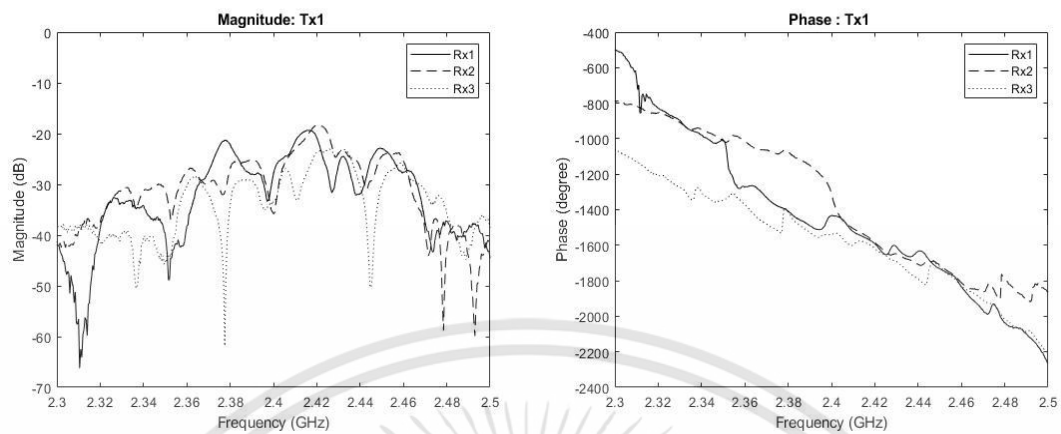
หัวข้อนี้จะเป็นผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณจากฟังก์ชันการถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยจะสามารถพิจารณาได้จากค่า ขนาด เฟส ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณและการสูญเสียเชิงวิถี ซึ่งในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นจะมีตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งด้านแนวยาวและด้านแนวกว้างของหม้อแปลงไฟฟ้าตามรูปที่ 3.12 ส่วนในกรณีที่มียกีดขวางจะมีการวางตำแหน่งของสายอากาศฝั่งส่งสัญญาณเหมือนกับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางตามรูปที่ 3.13 ในผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ได้จากการทดลองวัดจริงและนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยแสดงเป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณดังนี้

4.3.1 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

4.3.1.1 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

ขนาดนั้นจะเป็นการบ่งบอกถึงระดับความแรงของสัญญาณในฟังก์ชันการถ่ายโอนในโดเมนความถี่ที่ต้องการพิจารณา ซึ่งถ้าขนาดมีระดับความแรงของสัญญาณสูงนั้นหมายถึงสัญญาณมีการจางหายไปน้อยมาก แต่ถ้ามีระดับความแรงของสัญญาณที่ต่ำนั้นหมายความว่าเกิดการจางหายของสัญญาณสูงหรือเกิดการสะท้อนแล้วสัญญาณเกิดการหักล้างกันจึงทำให้ระดับของสัญญาณนั้นมีค่าต่ำ เฟสจะบอกถึงคุณภาพของช่องสัญญาณ โดยที่เฟสที่มีความเป็นเชิงเส้นจะมีความเป็นช่องสัญญาณที่ดี และการประวิงกลุ่มจะมีผลขึ้นกับเฟส เพราะหากเฟสไม่มีความเป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดการประวิงกลุ่มที่สูงขึ้น ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนจะแสดงในรูปแบบของกราฟ 2 มิติ กำหนดแกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ขนาดหรือเฟส โดยระดับความแรงของสัญญาณนั้นสามารถอ่านได้จากกราฟ

ตัวอย่างผลการทดลองของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่ง $Tx1$ ถึง $Tx3$

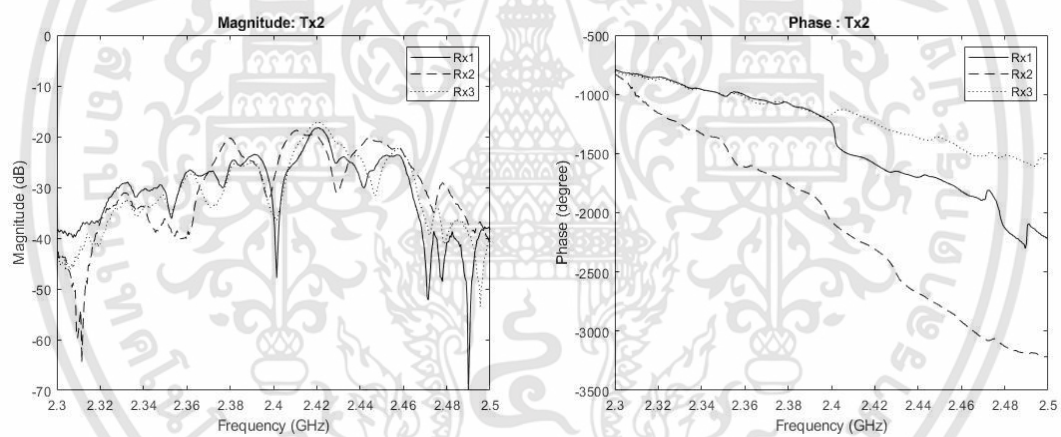


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.25 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

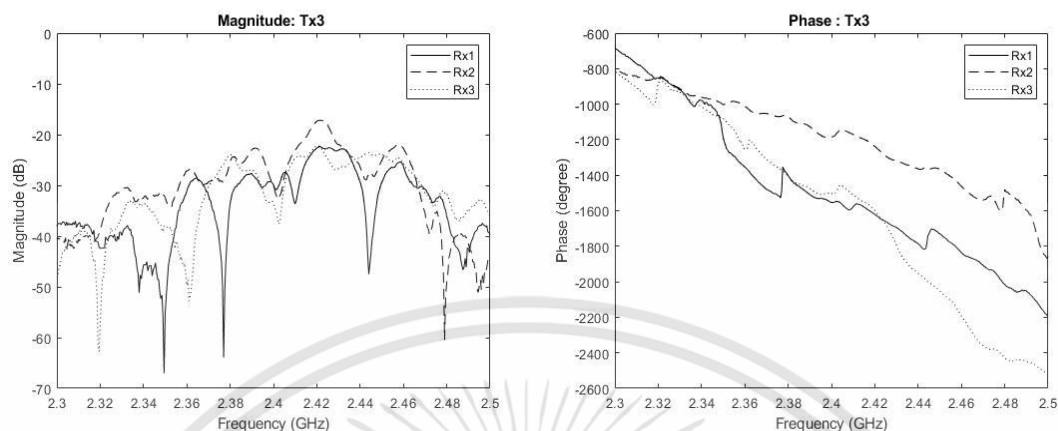


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.26 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



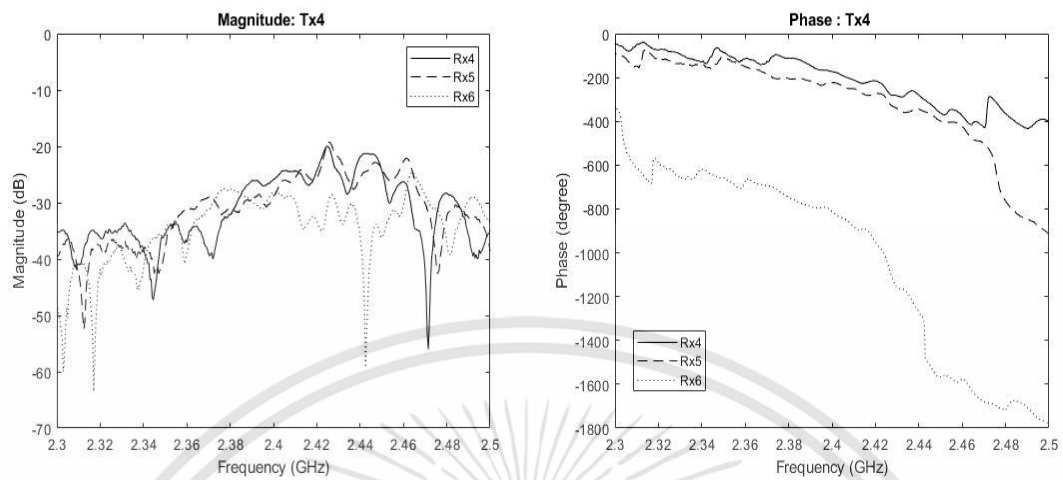
(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.27 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.25 4.26 และ 4.27 เป็นผลการวิเคราะห์ของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยที่ Tx1 อยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า Tx2 จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx3 อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าที่ Tx2 หรือตำแหน่งกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณสูงที่สุด โดยมีค่า -17.1876 dB ส่วนที่ Tx1 หรือตำแหน่งด้านบนสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุด โดยมีค่า -18.5438 dB เพราะตำแหน่งด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าไปในอากาศเนื่องจากการทดลองวัดจริงนั้นไม่ได้ทำการปิดฝาหม้อแปลงไฟฟ้า

ตัวอย่างผลการทดลองขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx6

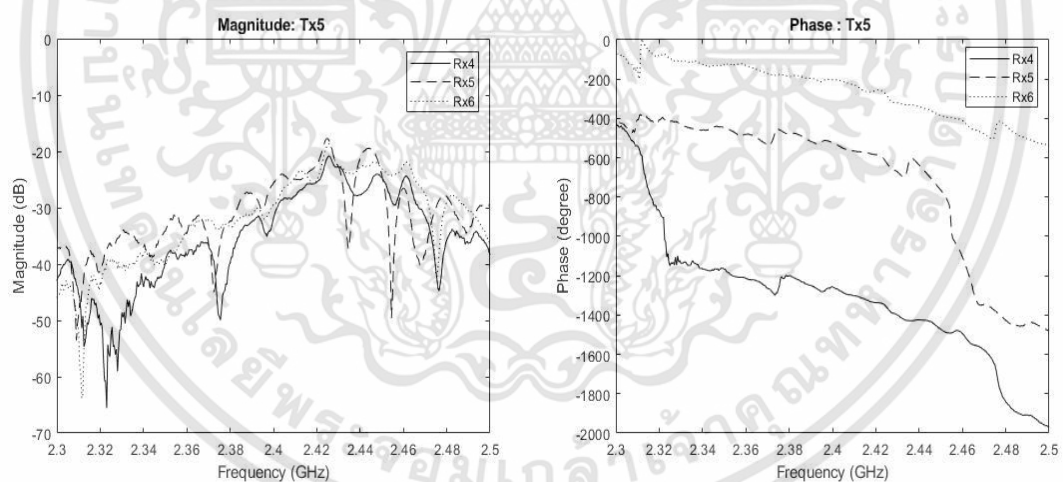


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.28 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



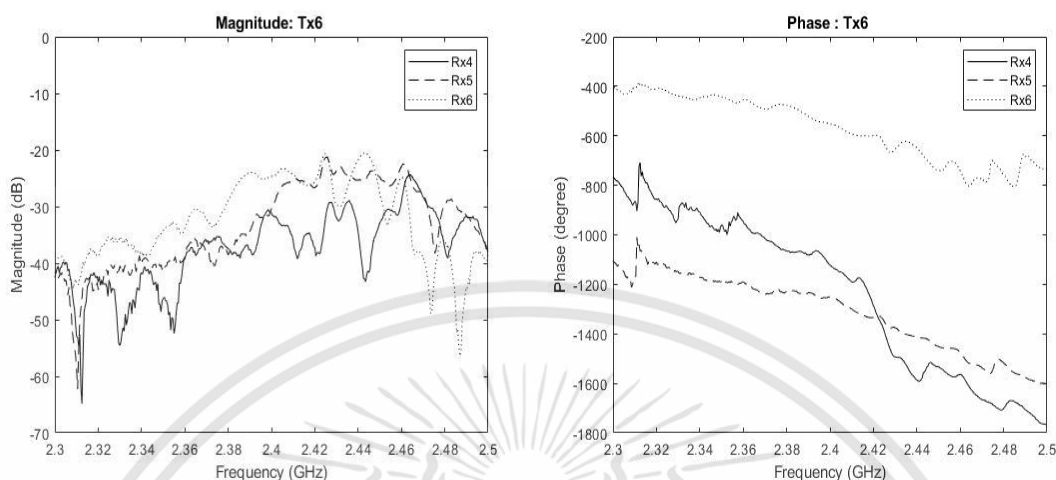
(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.29 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.30 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา

Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

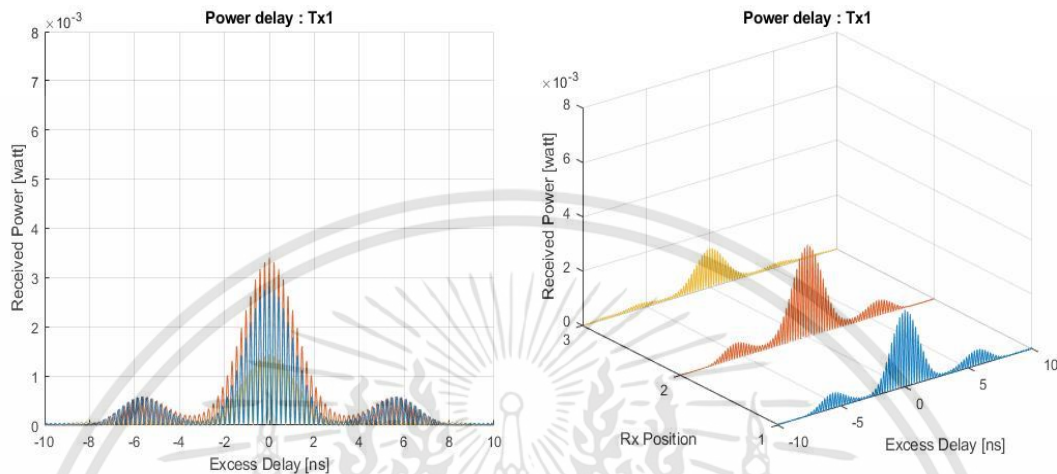
จากรูปที่ 4.28 4.29 และ 4.30 เป็นผลการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยที่ Tx4 อยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า Tx5 จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าและ Tx6 อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าที่ Tx5 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า -17.9792 dB ส่วนที่ Tx6 หรือตำแหน่งด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุดโดยมีค่า -20.6755 dB เพราะตำแหน่งขอบด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการสะท้อนของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกัน จึงทำให้มีระดับความแรงของสัญญาณน้อยที่สุด

4.3.1.2 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณเป็นการแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปฝั่งรับที่เวลาต่างกัน และจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทาง โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ

ผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ตำแหน่ง

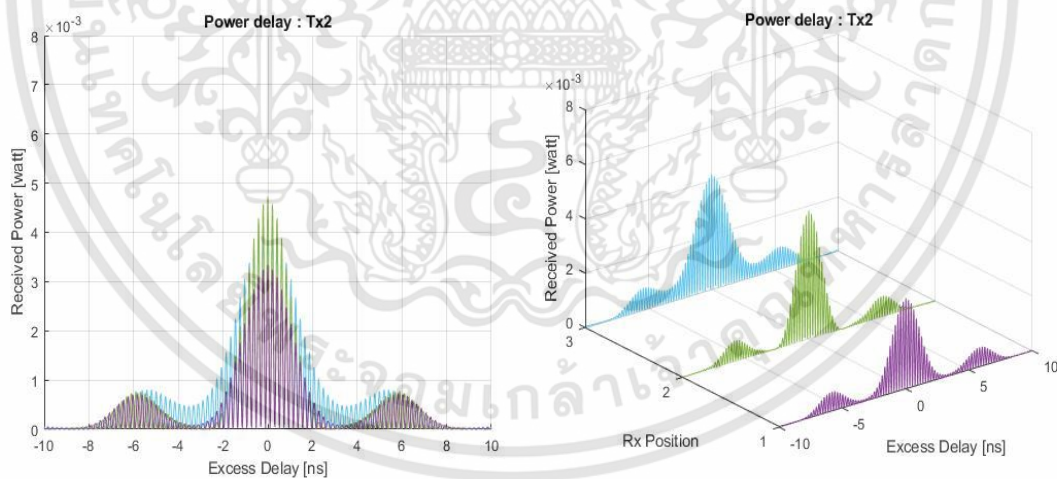
Tx1 ถึง Tx3



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

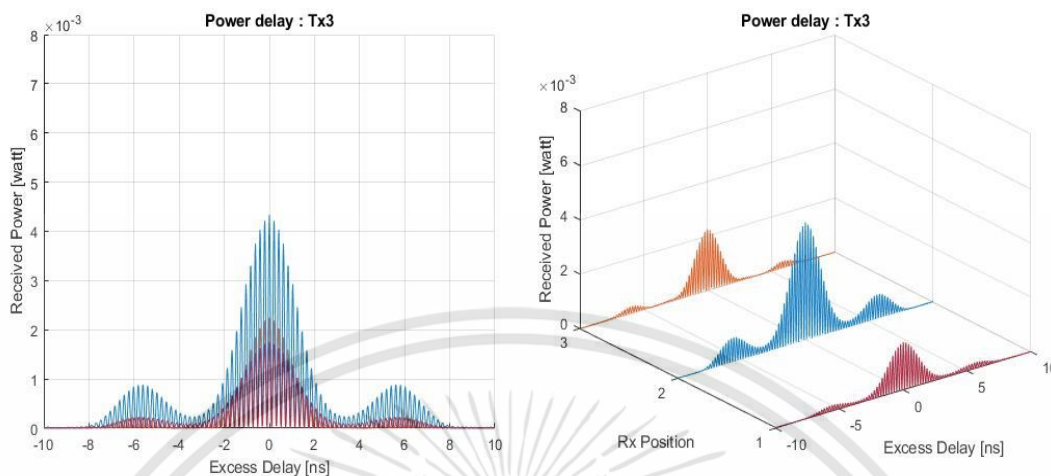
รูปที่ 4.31 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.32 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



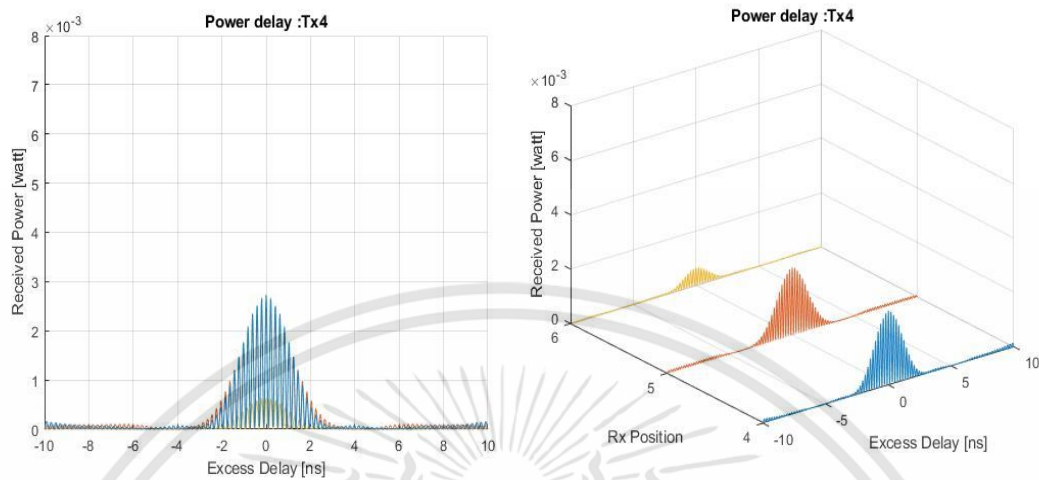
(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.33 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูป 4.31 4.32 และ 4.33 เป็นผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งอาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ Tx2 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีระดับพลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่จุดรับสัญญาณที่ตำแหน่ง Rx2 ส่วนที่ Tx1 หรือตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด เพราะเนื่องจากในตำแหน่ง Tx1 นั้น เป็นตำแหน่งขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งพอเวลาส่งสัญญาณออกไปนั้นสัญญาณอาจเกิดการจางหายไปในอากาศ แต่ใน Tx3 นั้นจะมีจุดรับที่สัญญาณได้มากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง Rx2 เพราะเนื่องจากตำแหน่ง Tx3 นั้น อยู่ที่ยอดด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณขึ้น ซึ่งการสะท้อนของสัญญาณนั้นอาจจะทำให้สัญญาณเกิดการเสริมกันจึงทำให้มีระดับสัญญาณที่มากขึ้น

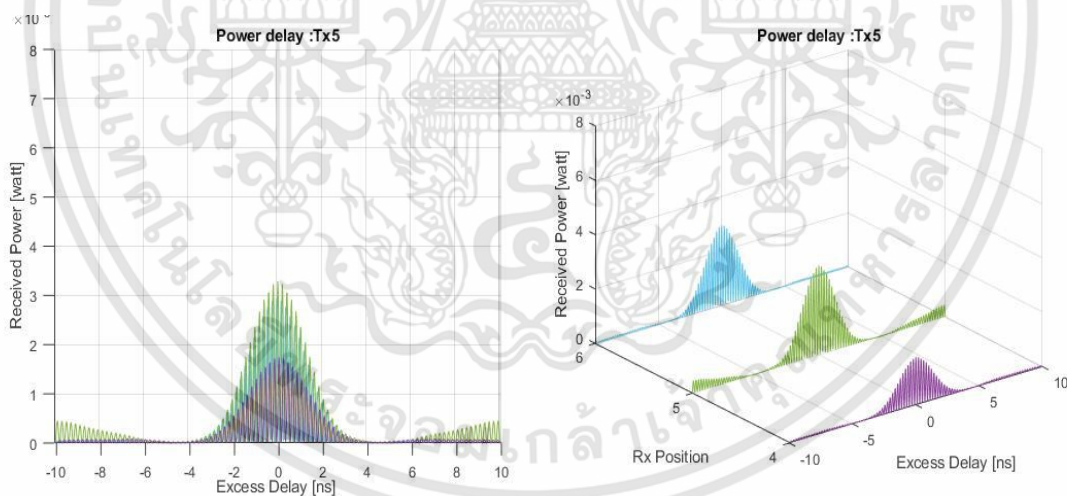
ผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx5



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

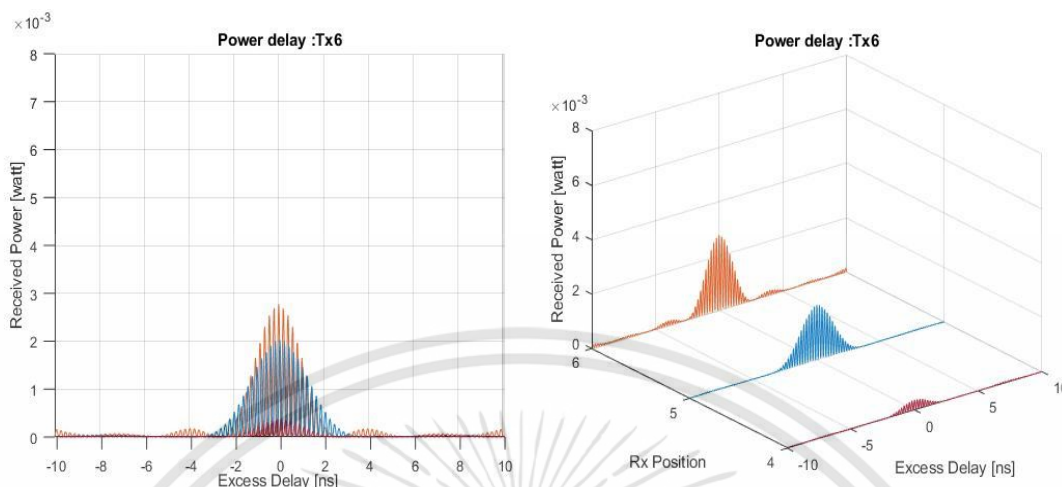
รูปที่ 4.34 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.35 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

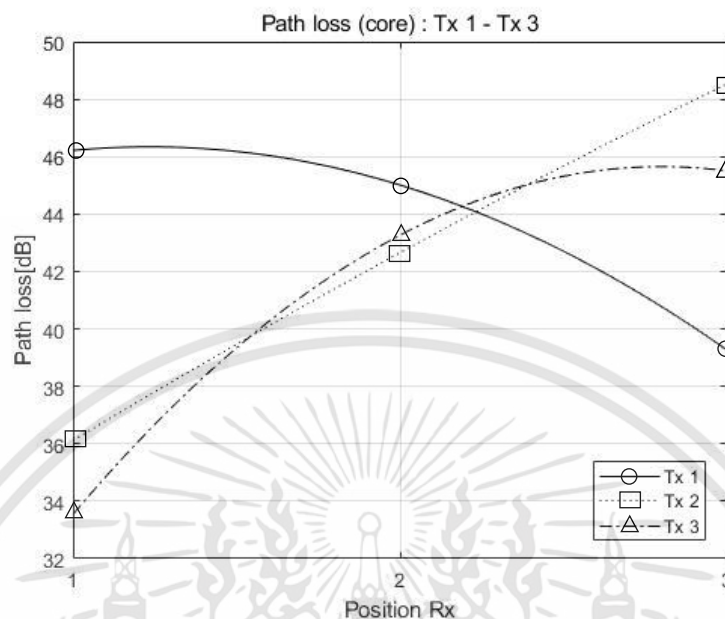
รูปที่ 4.36 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูป 4.34 4.35 และ 4.36 จะเป็นผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ อาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ Tx5 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุด ส่วนที่ Tx6 หรือตำแหน่งด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด เนื่องจากตำแหน่ง Tx6 ที่ขอบด้านล่างหม้อแปลงนั้นมีการสะท้อนของสัญญาณที่สูง ซึ่งทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณเกิดขึ้น

4.3.1.3 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบลและระยะห่างระหว่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณถึงตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณในหม้อแปลงที่ทำการทดสอบ จะแสดงในกราฟ 2 มิติ โดยที่แกน x จะแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถี ส่วนแกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ

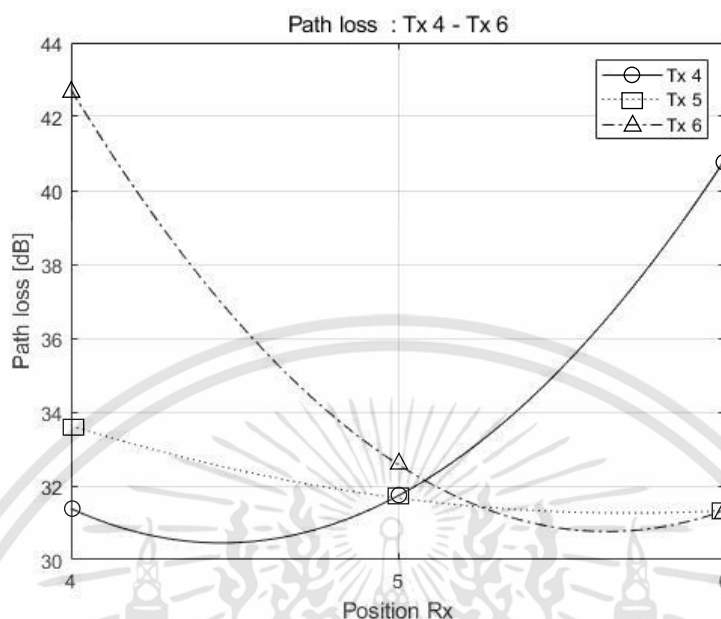
ผลของการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ Tx เป็นด้านส่งและ Rx เป็นด้านรับ กรณีที่ตำแหน่ง Tx1 ถึง Tx3



รูปที่ 4.37 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.37 เป็นผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx1 ที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 35.1821 dB และที่ด้านรับ Rx2 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 32.2049 dB ตำแหน่ง Tx2 ที่ด้านรับ Rx1 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 31.5196 dB และที่ด้านรับ Rx2 จะมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 30.0681 dB ตำแหน่ง Tx3 ที่ด้านรับ Rx3 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 34.1629 dB และที่ด้านรับ Rx2 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 30.0122 dB

การสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ Tx เป็นด้านส่งและ Rx เป็นด้านรับ กรณีที่ตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx6



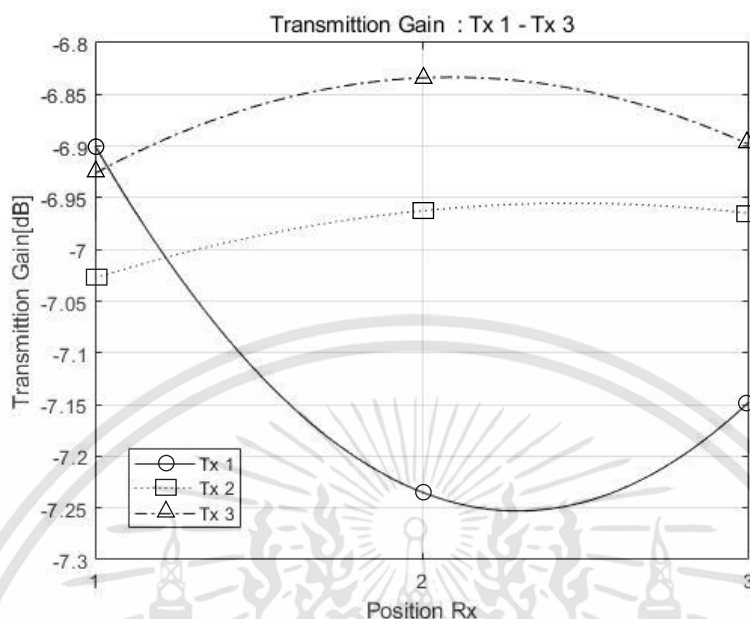
รูปที่ 4.38 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.38 เป็นผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx5 และ Tx6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx6 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 40.8426 dB และที่ด้านรับ Rx4 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 31.3824 dB ตำแหน่ง Tx5 ที่ด้านรับ Rx4 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 33.6292 dB และที่ด้านรับ Rx6 จะมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 31.3320 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับ Rx4 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณสูงที่สุดโดยมีค่า 42.7302 dB และที่ด้านรับ Rx6 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 31.3410 dB

4.3.1.4 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

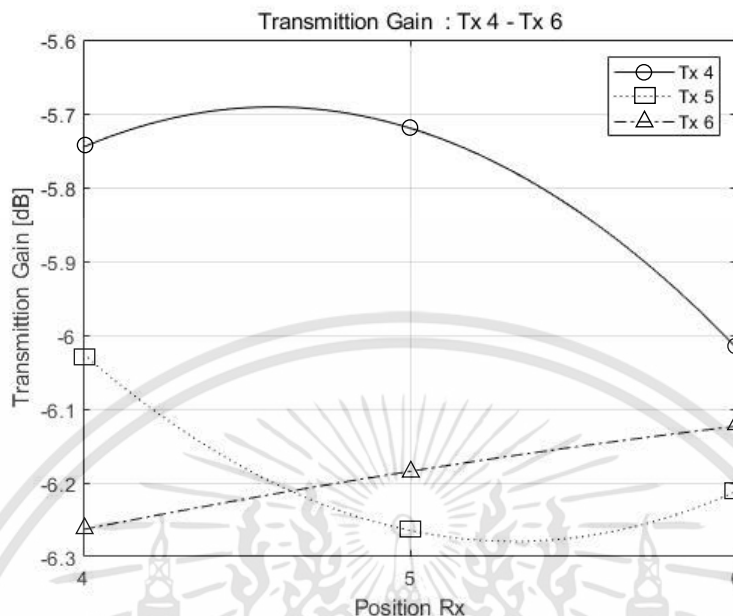
อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการส่งผ่านในหน่วยเดซิเบลและระยะห่างระหว่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณถึงตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณในหม้อแปลงที่ทำการทดสอบจะแสดงในกราฟ 2 มิติ โดยที่แกน x จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ ส่วนแกน y จะแสดงถึงอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณ

ผลของอัตราการส่งผ่านข้อมูลของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ Tx เป็นด้านส่งและ Rx เป็นด้านรับ กรณีที่ตำแหน่ง Tx1 ถึง Tx3



รูปที่ 4.39 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.39 เป็นผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx1 ที่ด้านรับ Rx1 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.8995 dB และที่ด้านรับ Rx2 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -7.2347 dB ตำแหน่ง Tx2 ที่ด้านรับ Rx2 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.926 dB และที่ด้านรับ Rx1 จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -7.0277 dB ตำแหน่ง Tx3 ที่ด้านรับ Rx2 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.8340 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -6.964 dB



รูปที่ 4.40 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

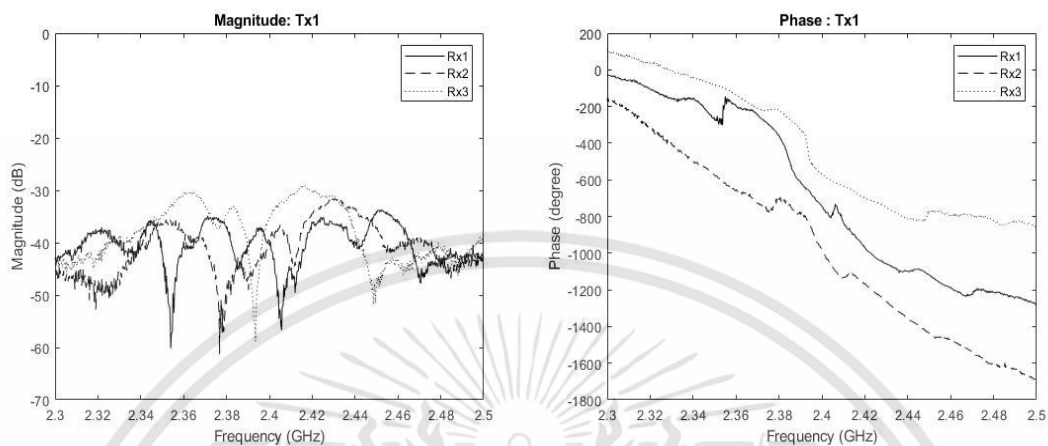
จากรูปที่ 4.40 เป็นผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx5 และ Tx6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx5 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -5.7197 dB และที่ด้านรับ Rx6 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -6.0180 dB ตำแหน่ง Tx5 ที่ด้านรับ Rx4 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.0252 dB และที่ด้านรับ Rx5 จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -6.2645 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับ Rx6 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.1233 dB และที่ด้านรับ Rx4 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -6.2633 dB

4.3.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีมีสิ่งกีดขวาง

4.3.2.1 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ขนาดและเฟสจะถูกแสดงในรูปแบบของกราฟ 2 มิติ โดยที่กำหนดแกน x คือ ความถี่ แกน y คือ ขนาดหรือเฟส

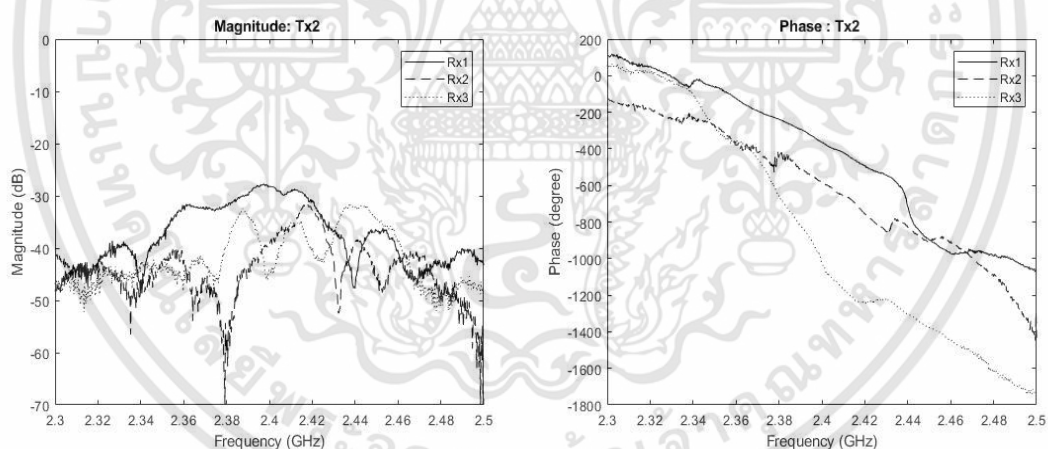
ผลของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่ง Tx1 ถึง Tx3



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.41 ขนาดและเฟสฟังก์ชันการถ่ายโอนของสัญญาณกรณีพิจารณา
Tx1 เป็นฝั่งส่งสัญญาณ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

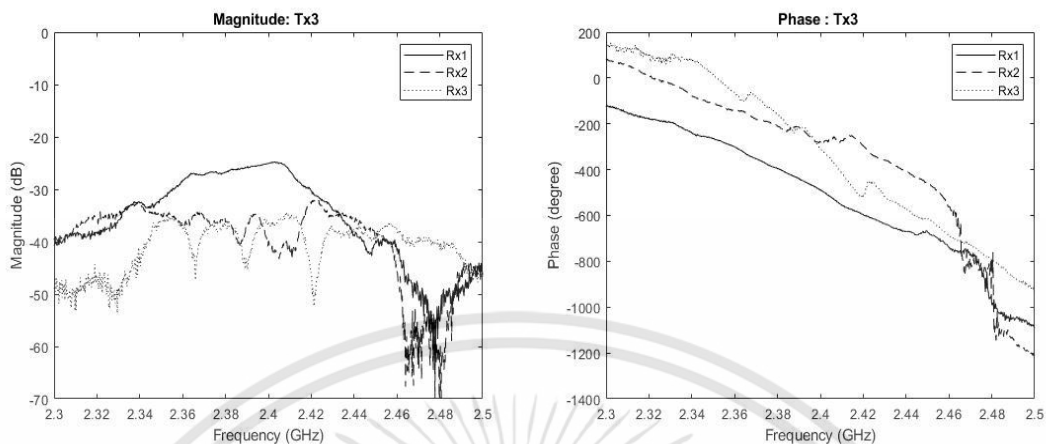


(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.42 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

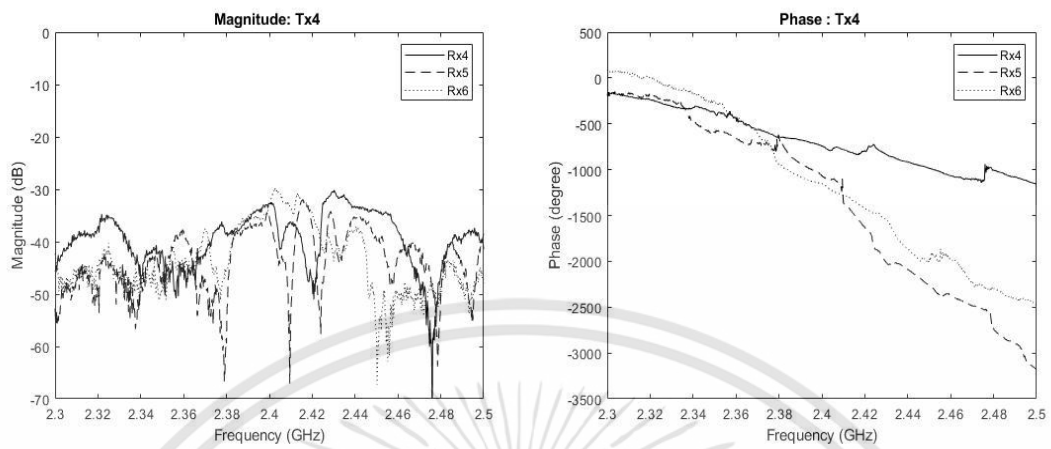
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ขนาด (ข) เฟส
รูปที่ 4.43 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.41 4.42 และ 4.43 เป็นผลการวิเคราะห์ของขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยที่ Tx1 อยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า Tx2 จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx3 อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง ซึ่งทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าที่ Tx1 หรือตำแหน่งด้านบนสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุด โดยมีค่า -29.4045 dB ส่วนที่ Tx3 หรือตำแหน่งด้านล่างสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณมากที่สุด โดยมีค่า -24.8824 dB เพราะตำแหน่งด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการสะท้อนของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มากขึ้น เนื่องจากการทดลองวัดคุณลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าในครั้งนี้ได้มีสิ่งกีดขวางเข้ามาด้วยจึงทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณมีเพิ่มมากขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดการเสริมกันของสัญญาณมากขึ้น ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

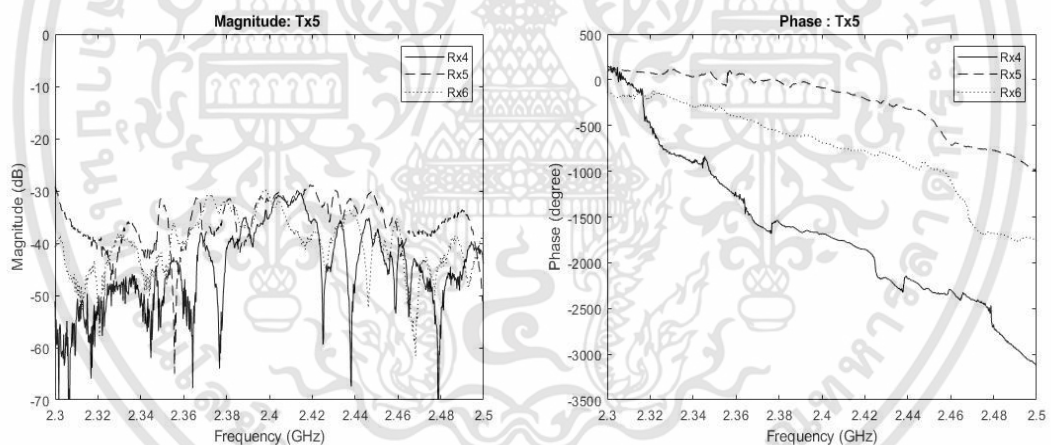
ผลขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx6



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

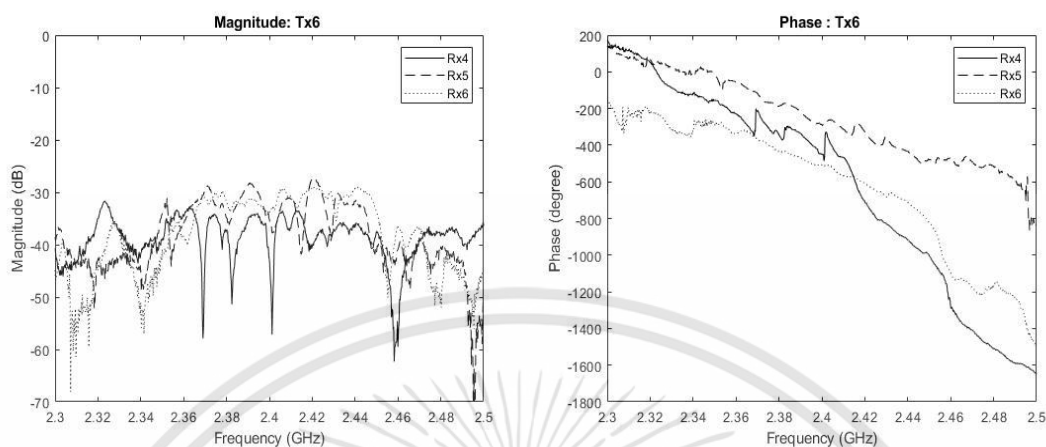
รูปที่ 4.44 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.45 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) ขนาด

(ข) เฟส

รูปที่ 4.46 ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน โดยพิจารณา
Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

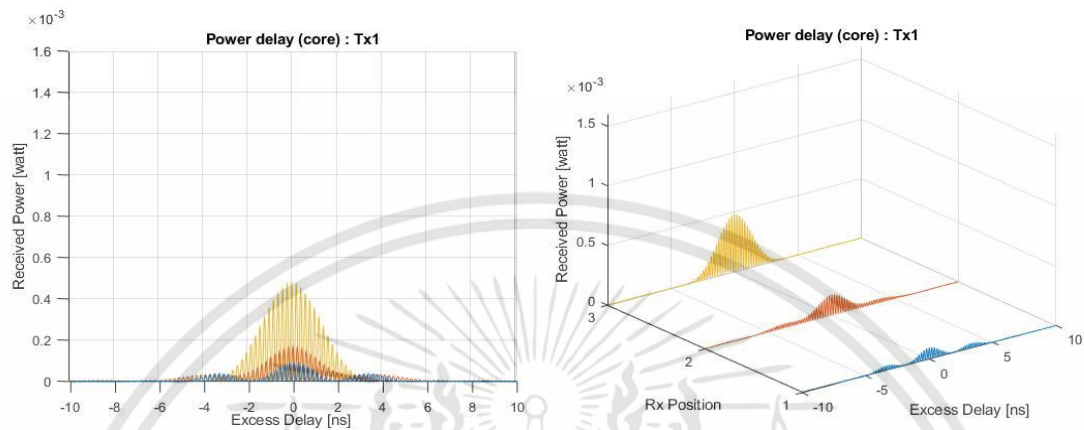
จากรูปที่ 4.44 4.45 และ 4.46 เป็นผลการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยที่ Tx4 อยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า Tx5 จะอยู่ประมาณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า และ Tx6 อยู่ตำแหน่งด้านล่างของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีมีสิ่งกีดขวาง ซึ่งทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าที่ Tx4 หรือตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณน้อยที่สุดโดยมีค่า -30.2055 dB ส่วนที่ Tx6 หรือตำแหน่งด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -27.8737 dB เพราะตำแหน่งขอบด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการสะท้อนของสัญญาณไปในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากการทดลองวัดคุณลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้าในครั้งนี้ได้มีสิ่งกีดขวางเข้ามาด้วยจึงทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณมีเพิ่มมากขึ้น ส่วนเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

4.3.2.1 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณเป็นการแสดงถึงระดับกำลังงานของสัญญาณที่เข้ามายังสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปฝั่งรับที่เวลาต่างกัน และจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่มีการสะท้อนในหลายทิศทาง โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟ 2 มิติ และ 3 มิติ

ผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ตำแหน่ง Tx1 ถึง

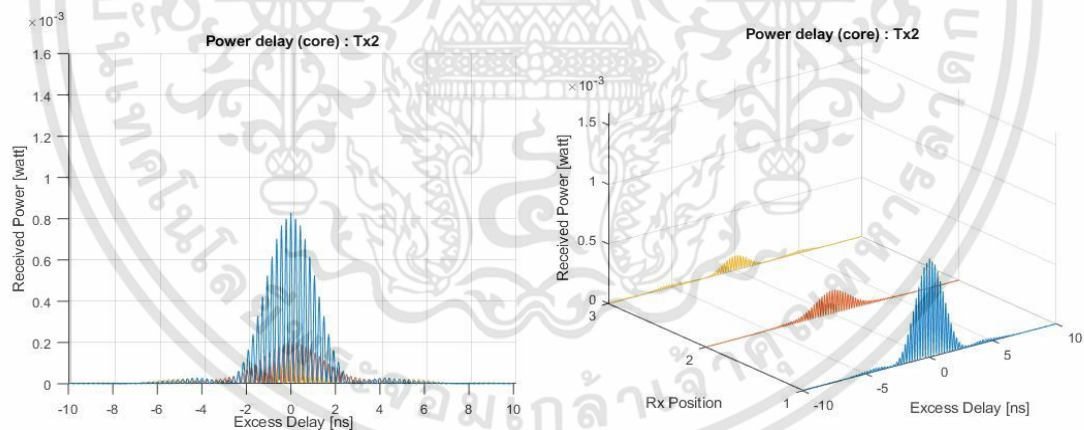
Tx3



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

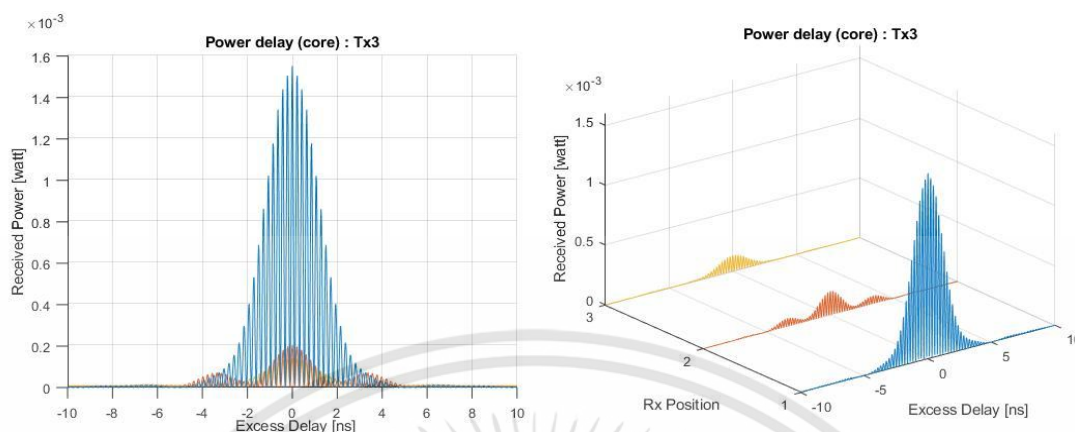
รูปที่ 4.47 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx1 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.48 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx2 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



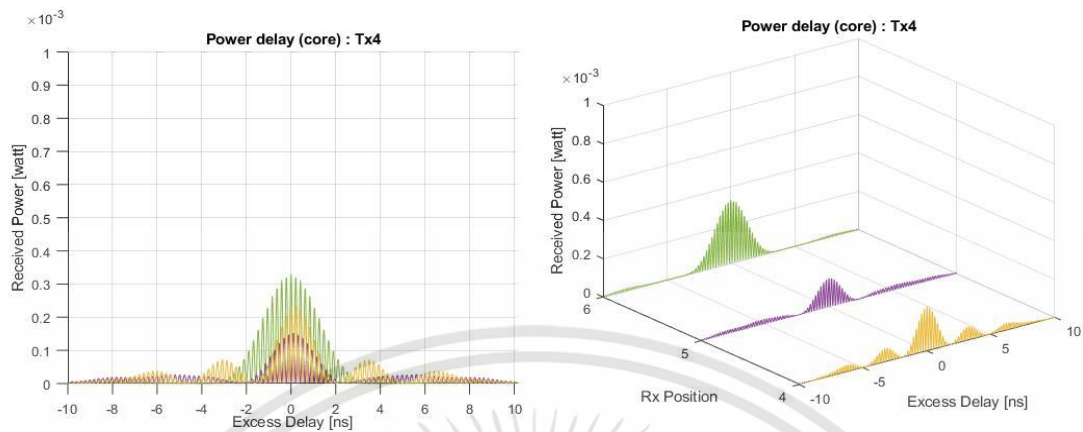
(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.49 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากรูป 4.47 4.48 และ 4.49 เป็นผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งอาจมีการหักล้างกันของสัญญาณ เกิดการจางหายของสัญญาณ และอาจเกิดการเสริมกันของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ Tx1 หรือตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีระดับพลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่จุดรับสัญญาณที่ตำแหน่ง Rx3 ที่ตำแหน่ง Tx2 หรือตำแหน่งตรงกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานที่รับได้ที่สูงที่สุดที่ตำแหน่ง Rx1 ส่วนในตำแหน่ง Tx3 หรือตำแหน่งด้านล่างสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานที่รับได้ที่สูงที่สุดที่ตำแหน่ง Rx1

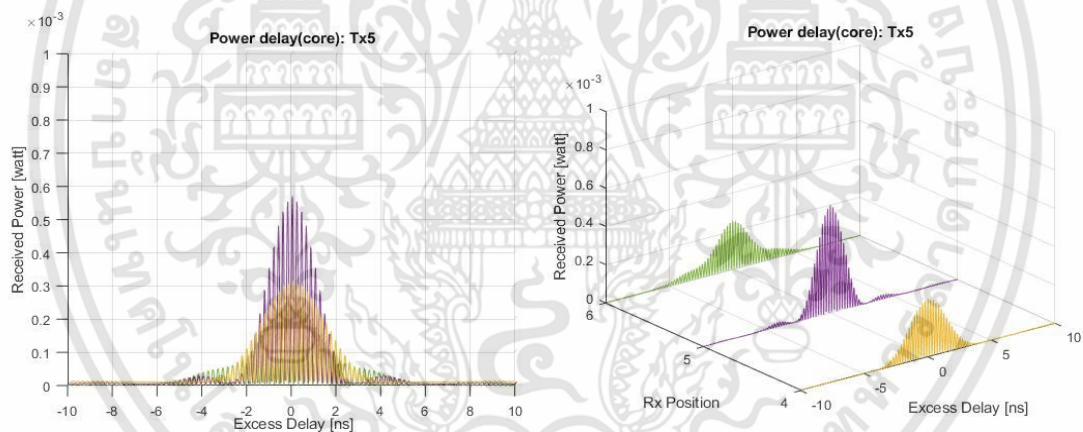
ผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ตำแหน่ง Tx4 ถึง Tx6



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

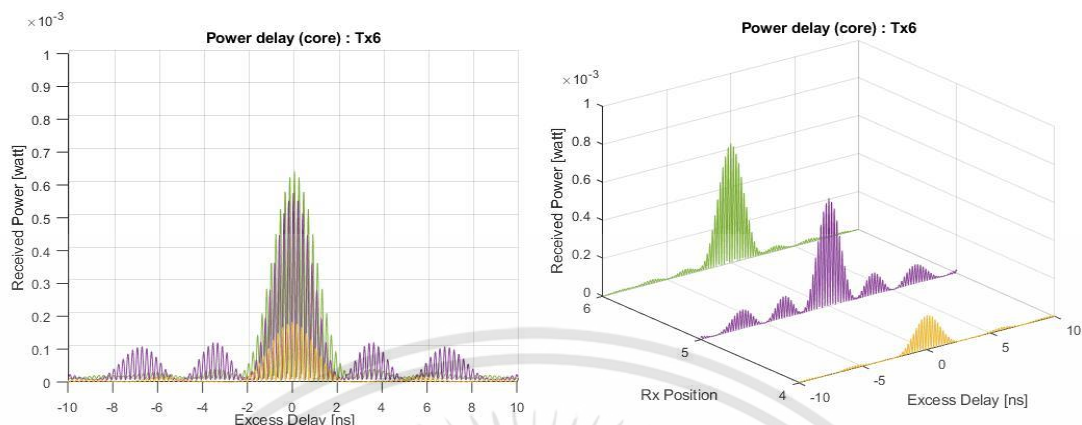
รูปที่ 4.50 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา
Tx4 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.51 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา
Tx5 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) 2 มิติ

(ข) 3 มิติ

รูปที่ 4.52 ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ โดยพิจารณา Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

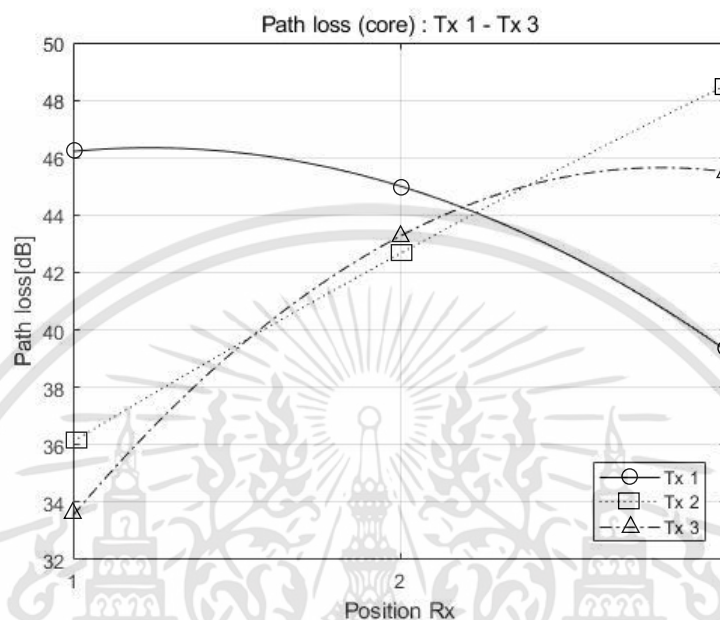
จากรูป 4.50 4.51 และ 4.52 เป็นผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่รับได้แตกต่างกันออกไป เพราะเนื่องจากการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งอาจมีการหักล้างกันของสัญญาณ เกิดการจางหายของสัญญาณ และอาจเกิดการเสริมกันของสัญญาณ จากรูปทั้ง 3 รูป จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดต่างกันออกไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ Tx4 หรือตำแหน่งด้านบนของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีระดับพลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่จุดรับสัญญาณที่ตำแหน่ง Rx6 ที่ตำแหน่ง Tx5 หรือตำแหน่งตรงกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานที่รับได้ที่สูงที่สุดที่ตำแหน่ง Rx5 ส่วนในตำแหน่ง Tx6 หรือตำแหน่งด้านล่างสุดของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานที่รับได้ที่สูงที่สุดที่ตำแหน่ง Rx6

4.3.2.1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียในหน่วยเดซิเบลและระยะห่างระหว่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณถึงตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณในหม้อแปลงที่ทำการทดสอบจะแสดงในกราฟ 2 มิติ โดยที่แกน x จะแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถี ส่วนแกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ

ผลของการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ตำแหน่ง Tx1

ถึง Tx3

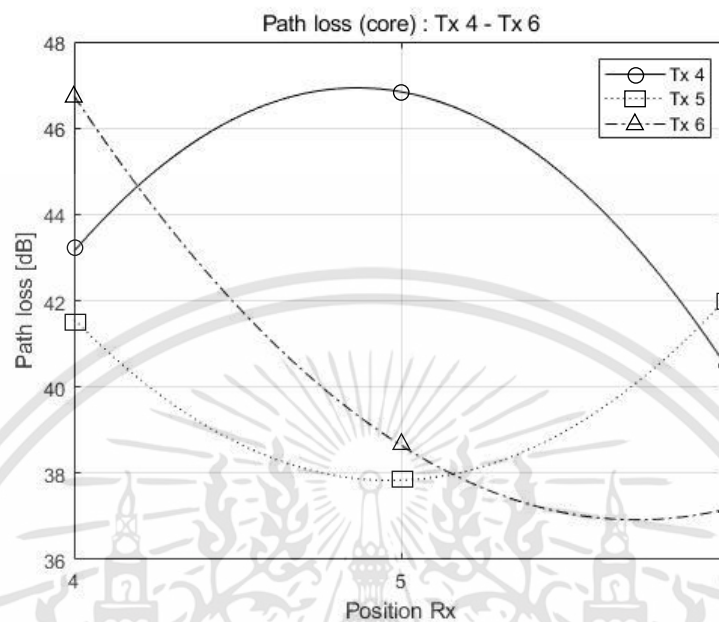


รูปที่ 4.53 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง
กรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.53 เป็นผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx1 ที่ด้านรับ Rx1 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 46.2160 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 39.2595 dB ตำแหน่ง Tx2 ที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 48.5294 dB และที่ด้านรับ Rx1 จะมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 36.1127 dB ตำแหน่ง Tx3 ที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 45.4993 dB และที่ด้านรับ Rx1 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 33.5427 dB

ผลของการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ตำแหน่ง

Tx4 ถึง Tx6



รูปที่ 4.54 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

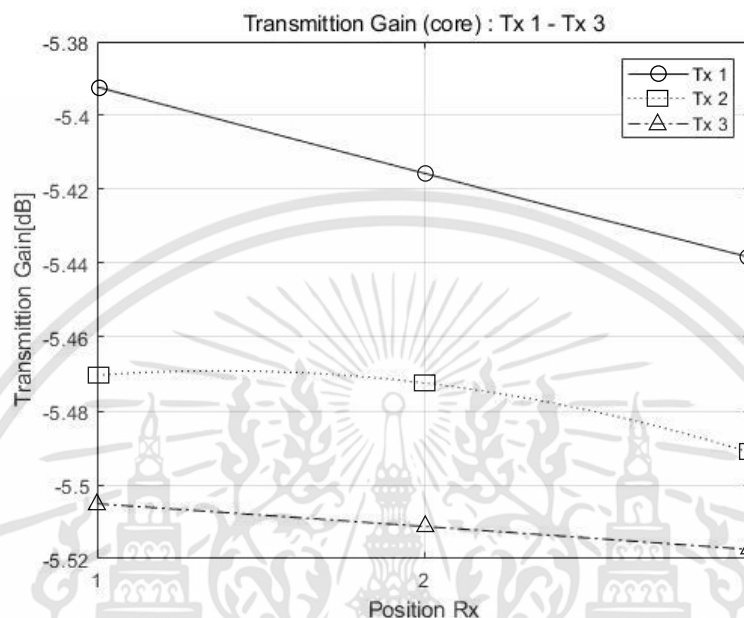
จากรูปที่ 4.54 เป็นผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx5 และ Tx6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx5 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 46.8403 dB และที่ด้านรับ Rx6 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 40.4150 dB ตำแหน่ง Tx5 ที่ด้านรับ Rx6 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 42.0959 dB และที่ด้านรับ Rx5 จะมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 37.8393 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับ Rx4 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า 46.7466 dB และที่ด้านรับ Rx6 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า 37.1801 dB

4.3.2.4 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณกรณีมีสิ่งกีดขวาง

อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการส่งผ่านในหน่วยเดซิเบลและระยะห่างระหว่างตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณถึงตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณในหม้อแปลงที่ทำการทดสอบจะแสดงในกราฟ 2 มิติ โดยที่แกน x จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ ส่วนแกน y จะแสดงถึงอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณ

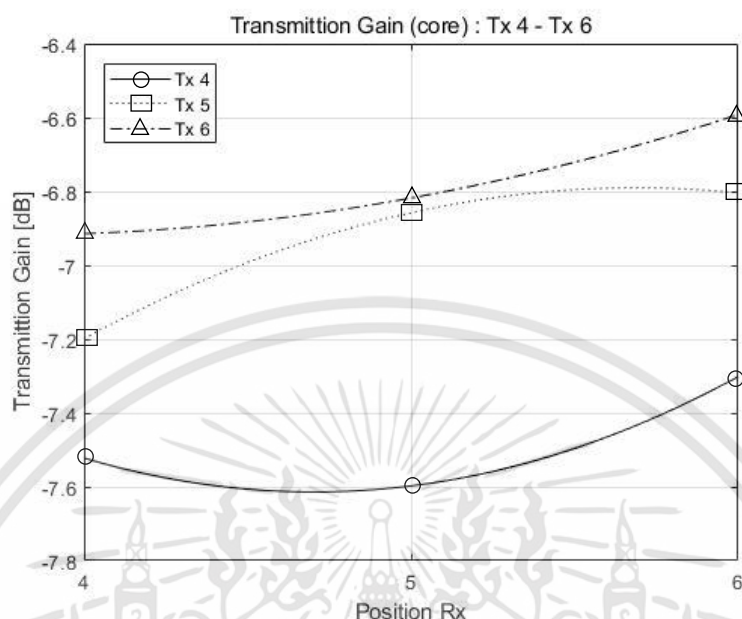
ผลของอัตราการส่งผ่านข้อมูลของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ตำแหน่ง

Tx1 ถึง Tx3



รูปที่ 4.55 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.54 เป็นผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx1 Tx2 และ Tx3 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx1 ที่ด้านรับ Rx1 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -5.3923 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -5.4385 dB ตำแหน่ง Tx2 ที่ด้านรับ Rx1 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -5.4703 dB และที่ด้านรับ Rx3 จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -5.4913 dB ตำแหน่ง Tx3 ที่ด้านรับ Rx1 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -5.5051 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -5.5175 dB



รูปที่ 4.56 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณโดยที่ Tx4 Tx5 และ Tx6 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.56 เป็นผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าได้แก่ ตำแหน่ง Tx4 Tx5 และ Tx6 จะเห็นได้ว่าตำแหน่ง Tx4 ที่ด้านรับ Rx6 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -7.3017 dB และที่ด้านรับ Rx5 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -7.5975 dB ตำแหน่ง Tx5 ที่ด้านรับ Rx6 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.8042 dB และที่ด้านรับ Rx4 จะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -7.1988 dB ตำแหน่ง Tx6 ที่ด้านรับ Rx6 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดโดยมีค่า -6.5918 dB และที่ด้านรับ Rx4 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณน้อยสุดโดยมีค่า -6.9144 dB

4.3.3 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะนำผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทุกตัวที่ได้ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ขนาดกับเฟส ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณ การสูญเสียเชิงวิถีของ

สัญญาณและอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมาทำการเปรียบเทียบซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางตามรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับและสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.3.3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอน กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ขนาดและเฟสของฟังก์ชันการถ่ายโอนกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะเห็นได้ว่าในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นสัญญาณที่สามารถรับได้นั้นจะมีรูปสัญญาณที่สวยงามสามารถดูได้ง่ายซึ่งแตกต่างจากกรณีมีสิ่งกีดขวางที่สัญญาณที่สามารถรับได้นั้นจะมีรูปสัญญาณที่ไม่สวยงามและสามารถดูได้ยากในส่วนของเฟสในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นจะมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่ากรณีมีสิ่งกีดขวาง เหตุผลที่เป็นแบบนี้เพราะโดยปกติแล้วในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นก็เกิดการสะท้อนของสัญญาณอยู่แล้วแต่พอได้ทำการติดตั้งแกนกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าไปแล้วนั้นจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการเสริมกันของสัญญาณ และอาจจะมี การจางหายของสัญญาณ ทำให้สัญญาณที่รับได้ทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางนั้นแตกต่างกัน

4.3.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะเป็นผลการวิเคราะห์ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ได้ผ่านการกรองสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง โดยการที่ใช้แมตซ์ฟิลเตอร์เพื่อที่จะทำการกรองเวลาให้สัญญาณที่รับเข้าได้มาอยู่ในช่วงเวลาเดียวกันเนื่องจากสัญญาณที่สามารถรับได้นั้นจะอยู่ในช่วงเวลาแตกต่างกันออกไปเพราะการสะท้อนกันของสัญญาณจะทำให้สัญญาณที่สามารถรับได้นั้นอยู่ในช่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน ซึ่งระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้นั้นก็มีระดับความแรงของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน เพราะการสะท้อนสัญญาณนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ อาจมีการหักล้างกันของสัญญาณหรือเกิดการจางหายของสัญญาณ จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นจะมีระดับความแรงของสัญญาณที่มากกว่ากรณีที่ มีสิ่งกีดขวาง ในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นตำแหน่งที่สามารถรับพลังงานได้สูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งส่งสัญญาณ Tx2 ที่มีตำแหน่งรับสัญญาณ Rx2 และตำแหน่งที่สามารถรับพลังงานได้ต่ำที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งส่งสัญญาณ Tx6 ที่มีตำแหน่งรับสัญญาณ Rx4 ส่วนในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางตำแหน่งที่สามารถ

พลังงานที่รับได้สูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งส่งสัญญาณ Tx3 ที่มีตำแหน่งรับสัญญาณ Rx1 และตำแหน่งที่สามารถรับพลังงานได้ต่ำที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งส่งสัญญาณ Tx1 ที่มีตำแหน่งรับสัญญาณ Rx1

4.3.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะทำการยกตัวอย่างที่ตำแหน่งที่ฝั่งส่งสัญญาณอยู่ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นก็คือที่ตำแหน่ง Tx2 ซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง Tx2 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง จะเห็นได้ว่าที่ด้านรับ Rx1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 31.5196 dB ที่ด้านรับ Rx2 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 30.0681 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 30.7144 dB ส่วนที่ตำแหน่ง Tx2 กรณีมีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่าที่ด้านรับ Rx1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 36.1127 dB ที่ด้านรับ Rx2 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 42.6527 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมีค่า 48.5294 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางนั้นจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางเหตุผลที่กรณีมีสิ่งกีดขวางนั้นมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีมากกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางเพราะสัญญาณที่ถูกส่งออกไปนั้นมีการสะท้อนกันของสัญญาณที่รุนแรงมากจึงอาจทำให้สัญญาณเกิดการหักล้างกัน

4.3.3.4 วิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะทำการยกตัวอย่างที่ตำแหน่งที่ฝั่งส่งสัญญาณอยู่ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นก็คือที่ตำแหน่ง Tx2 ซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง จากผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง Tx2 กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง จะเห็นได้ว่าที่ด้านรับ Rx1 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -7.0277 dB ที่ด้านรับ Rx2 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -6.9626 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -6.9651 dB ส่วนที่ตำแหน่ง Tx2 กรณีมีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่าที่ด้านรับ Rx1 อัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -5.4703 dB ที่

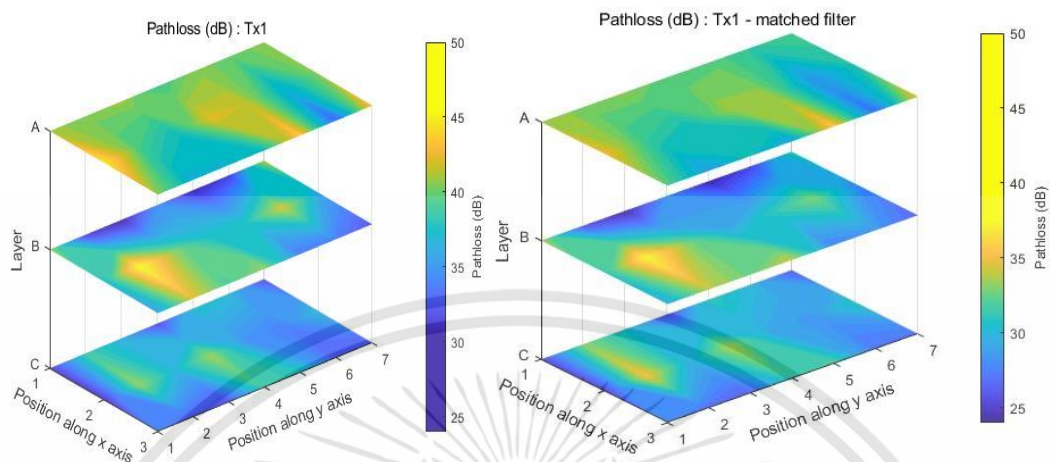
ด้านรับ Rx2 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -5.4724 dB และที่ด้านรับ Rx3 มีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมีค่า -5.4913 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางนั้นจะมีอัตราการส่งผ่านข้อมูลของสัญญาณมากกว่ากรณีที่มีสิ่งกีดขวาง

4.4 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

หัวข้อนี้จะเป็นผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณจากฟังก์ชันการถ่ายโอนในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ การสูญเสียเชิงวิถีและพลังงานที่รับได้ ซึ่งจะมีการวางตำแหน่งสายอากาศฝั่งส่งและสายอากาศฝั่งรับสำหรับการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางแสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.16 ตามลำดับ ในผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ได้จากการทดลองวัดจริงและนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ โดยแสดงเป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณในรูปแบบคอนทัวร์ดังนี้

4.4.1 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

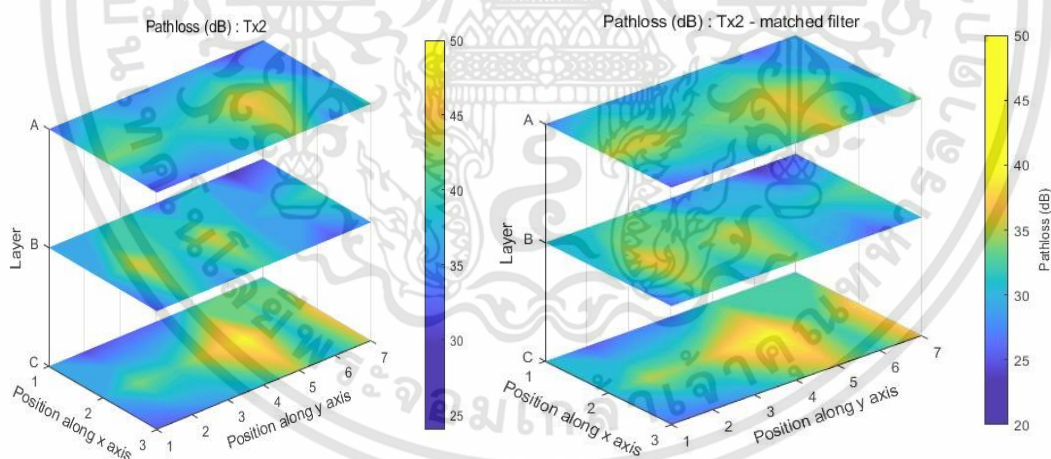
4.4.1.1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง
การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปของกราฟแบบคอนทัวร์ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถีทั่วพื้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าตามระดับพลังงานที่วิเคราะห์ได้ โดยที่ค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะอยู่ในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน x จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งส่งสัญญาณแกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ แกน z จะบ่งบอกถึงเลเยอร์ ส่วนแถบสีด้านข้างจะเป็นการแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถี



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

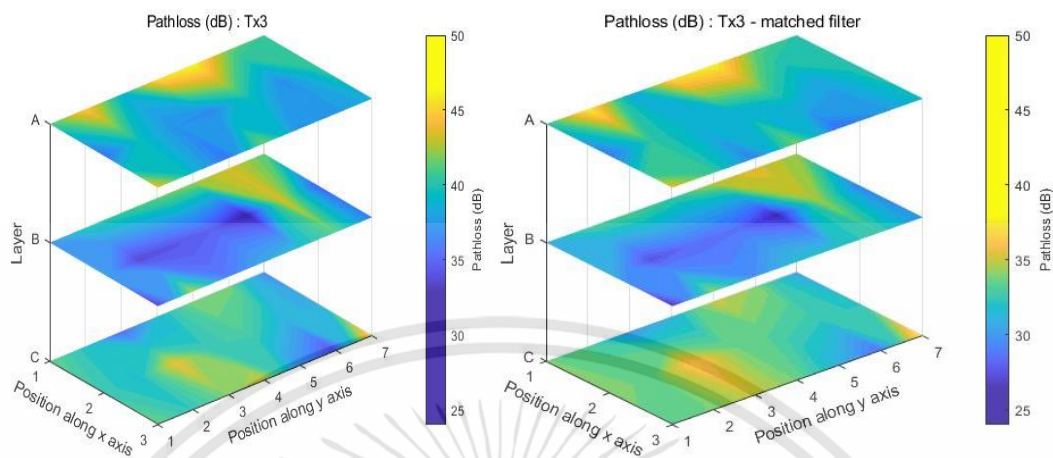
รูปที่ 4.57 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.58 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 ด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

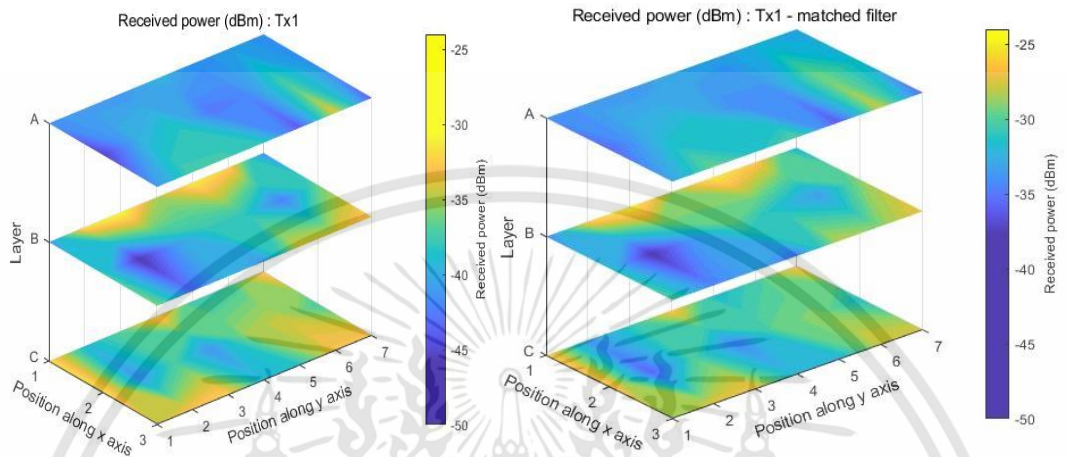
รูปที่ 4.59 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.57 4.58 และ 4.59 จะเป็นรูปผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยในผลการวิเคราะห์นั้นจะแยกย่อยได้อีกเป็นสองกรณี ได้แก่ ไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนและผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ จากผลการวิเคราะห์ในกรณีที่สัญญาณไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนนั้นจะมีการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงกว่าการผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแถบสีด้านข้างที่บ่งบอกถึงการสูญเสียเชิงวิถี การที่ระดับการสูญเสียเชิงวิถีในแต่ละจุดนั้นไม่เท่ากันเพราะว่าในการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นเราไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน

4.4.1.2 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปแบบของกราฟคอนทัวร์ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงระดับของพลังงานที่สามารถรับได้ทั่วพื้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ โดยที่ระดับพลังงานของสัญญาณที่สามารถรับได้จะอยู่ในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน x จะแสดงถึง

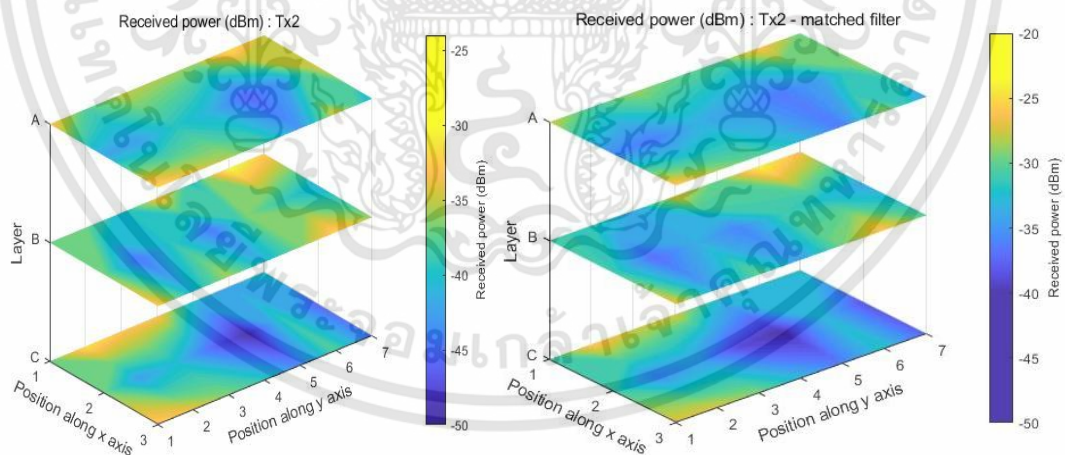
ตำแหน่งของฝั่งส่งสัญญาณแกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ แกน z จะบ่งบอกถึงเลเยอร์ ส่วนแถบสีด้านข้างจะเป็นการบ่งบอกถึงค่าระดับพลังงานที่สามารถรับได้



(ก) ไม่ผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

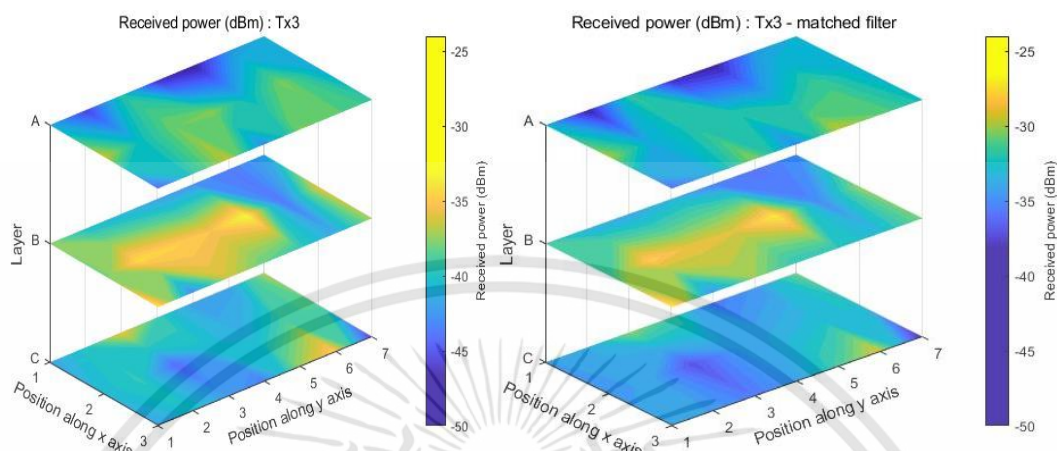
รูปที่ 4.60 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.61 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

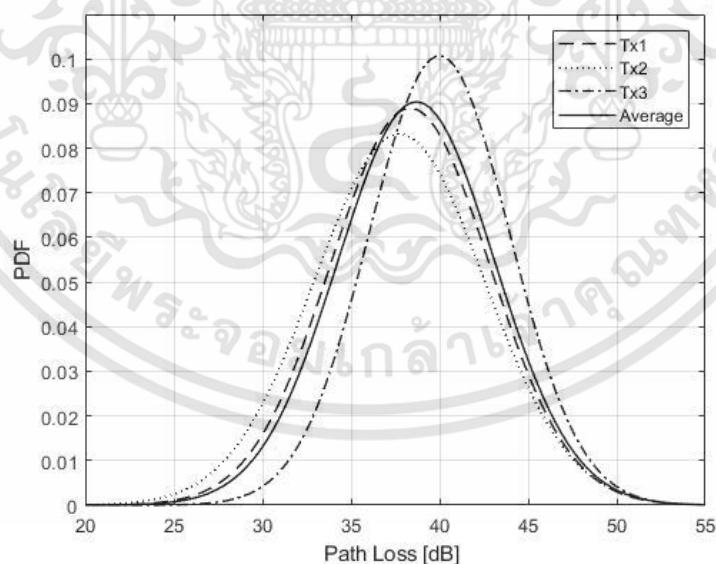


(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ (ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์
รูปที่ 4.62 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

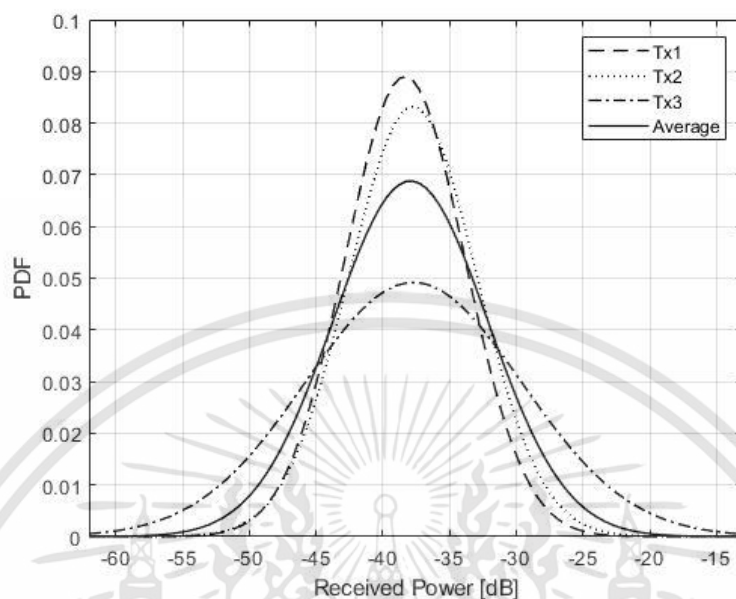
จากรูปที่ 4.60 4.61 และ 4.62 เป็นผลการวิเคราะห์พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีผลที่ไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนและผ่านการกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ จากผลการวิเคราะห์กรณีไม่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนนั้นจะมีพลังงานที่สามารถรับได้สูง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแถบสีด้านข้างที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สามารถรับได้ แต่เมื่อนำสัญญาณไปผ่านการกรองสัญญาณรบกวนนั้นจะมีพลังงานที่สามารถรับได้น้อยลง ซึ่งสามารถสังเกตแถบสีด้านข้างที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สามารถรับได้ การที่ระดับพลังงานที่สามารถรับได้ในแต่ละจุดไม่เท่ากันเพราะว่าในการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทาง ซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีระดับพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน

4.4.1.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมแบบการสูญเสียเชิงวิถิและพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น โดยวิเคราะห์ผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ผลของการสูญเสียเชิงสถิติของสัญญาณจะพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.63 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฝั่งส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฝั่งส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฝั่งส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงสถิติของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงสถิติของสัญญาณแต่ละด้าน ส่วนผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ โดยพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.64 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอน เป็นค่าผลของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแต่ละด้าน

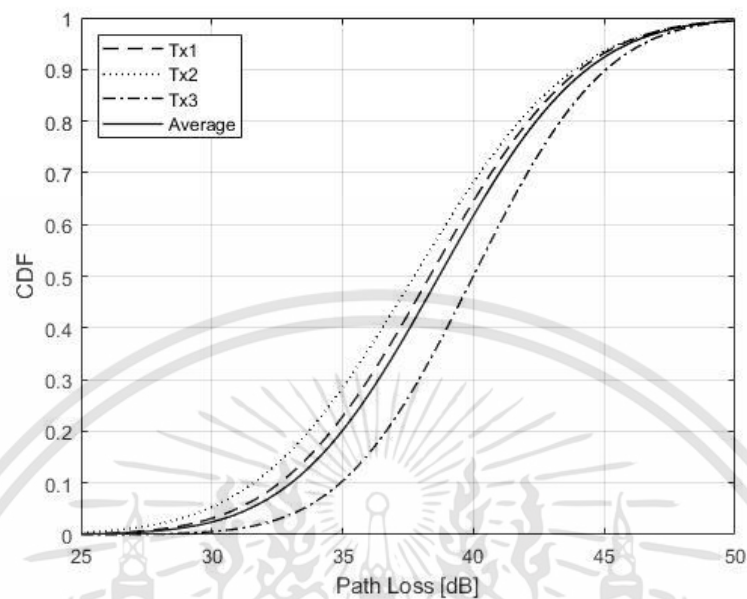


รูปที่ 4.63 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงสถิติแบบ 3 เลเยอร์
โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

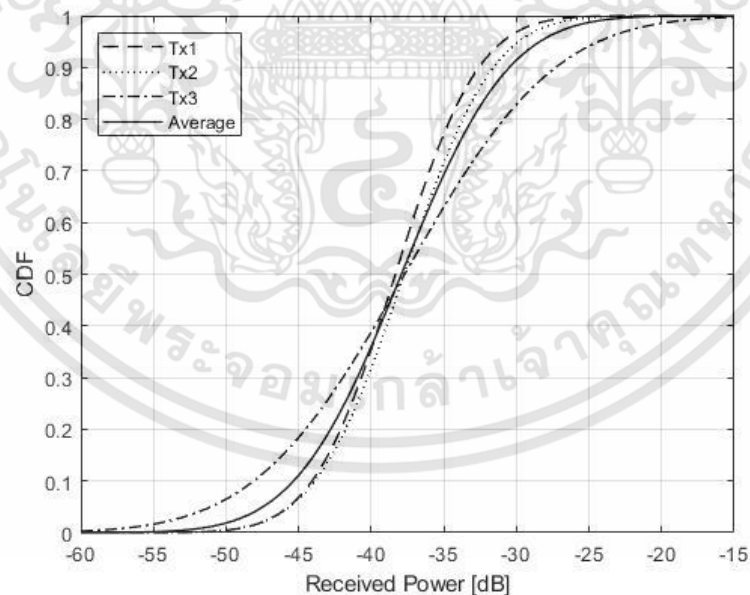


รูปที่ 4.64 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะเหมาะสม โดยวิเคราะห์ผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ผลของการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณจะพิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.65 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ฝั่งส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ฝั่งส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ฝั่งส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแต่ละด้าน ส่วนผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ โดยพิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ในกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.66 โดยที่เส้นตรงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ด้านส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอน เป็นผลของพลังงานที่สามารถรับได้และแกนแนวตั้งเป็นผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้



รูปที่ 4.65 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของการสูญเสียเชิงวิถีแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

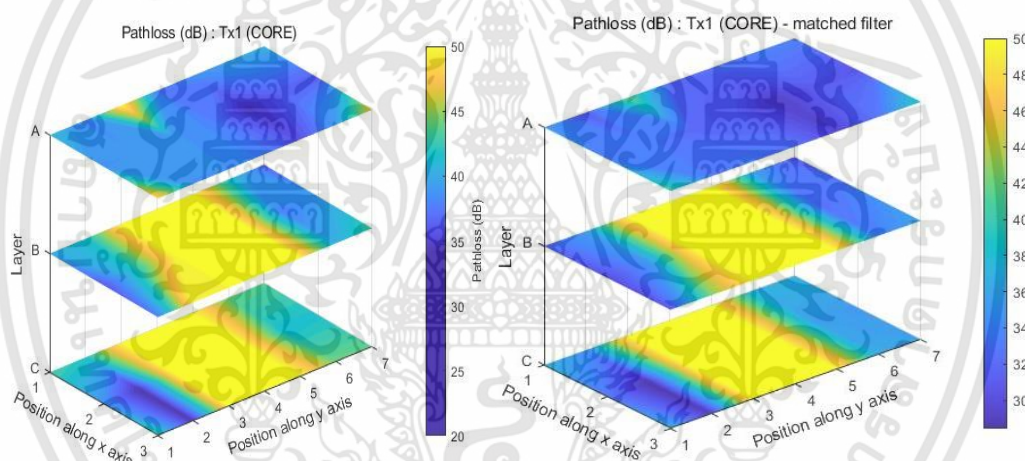


รูปที่ 4.66 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

4.4.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

4.4.2.1 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

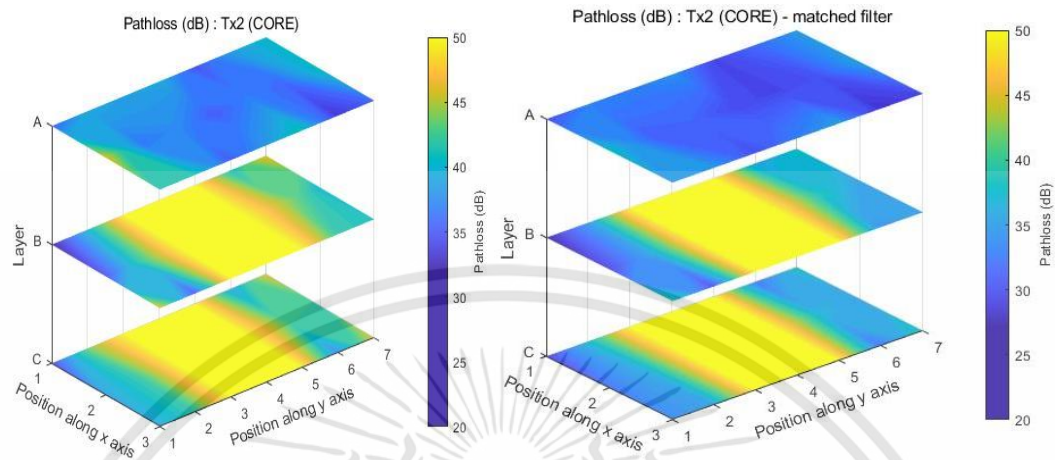
การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปของกราฟแบบคอนทัวร์ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถีทั่วพื้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าตามระดับพลังงานที่วิเคราะห์ได้ โดยที่ค่าการสูญเสียเชิงวิถีจะอยู่ในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน x จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งส่งสัญญาณแกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของฝั่งรับสัญญาณ แกน z จะบ่งบอกถึงเลเยอร์ ส่วนแถบสีด้านข้างจะเป็นการแสดงถึงการสูญเสียเชิงวิถี และแกน x ที่ 1 ถึง 3 แกน y ที่ 3 ถึง 5 เป็นสิ่งกีดขวาง โดยกำหนดให้มีการสูญเสียเชิงวิถีมากที่สุด



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

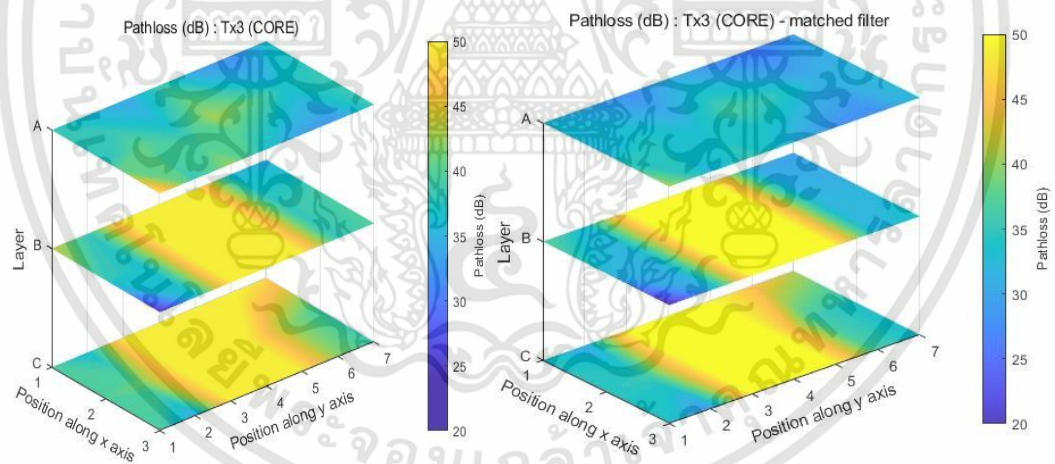
รูปที่ 4.67 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.68 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีสี่สิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

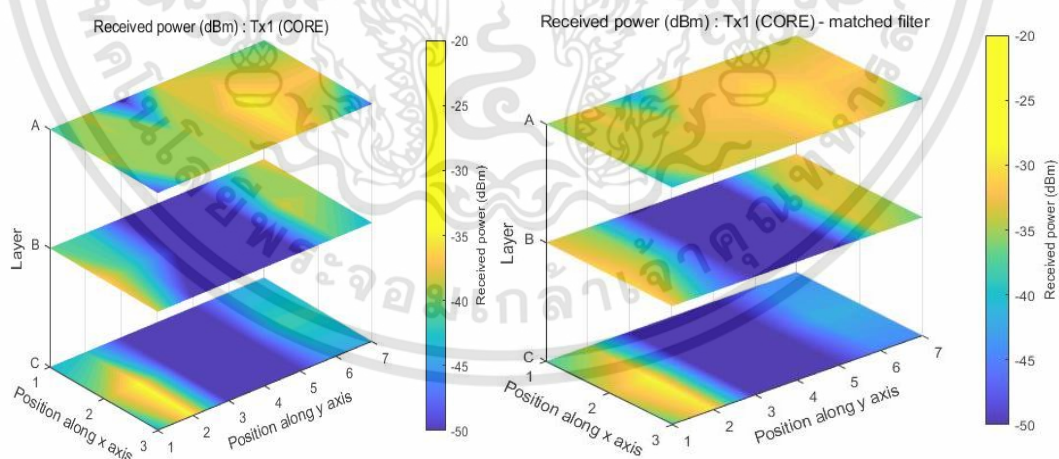
รูปที่ 4.69 การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีสี่สิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.67 4.68 และ 4.69 จะเป็นรูปผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถี
ของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีสี่สิ่งกีดขวาง โดยในผลการวิเคราะห์นั้นจะแยก

ย่อยได้อีกเป็นสองกรณี ได้แก่ ไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนและผ่านการกรองสัญญาณรบกวน ออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ จากผลการวิเคราะห์ในกรณีที่สัญญาณไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน นั้นจะมีการสูญเสียเชิงวิถีที่สูงกว่าผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแถบสีด้านข้างที่บ่งบอกถึงการสูญเสียเชิงวิถี การที่ระดับการสูญเสียเชิงวิถีในแต่ละจุดนั้นไม่เท่ากันเพราะว่าในการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นเราไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน

4.4.2.2 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

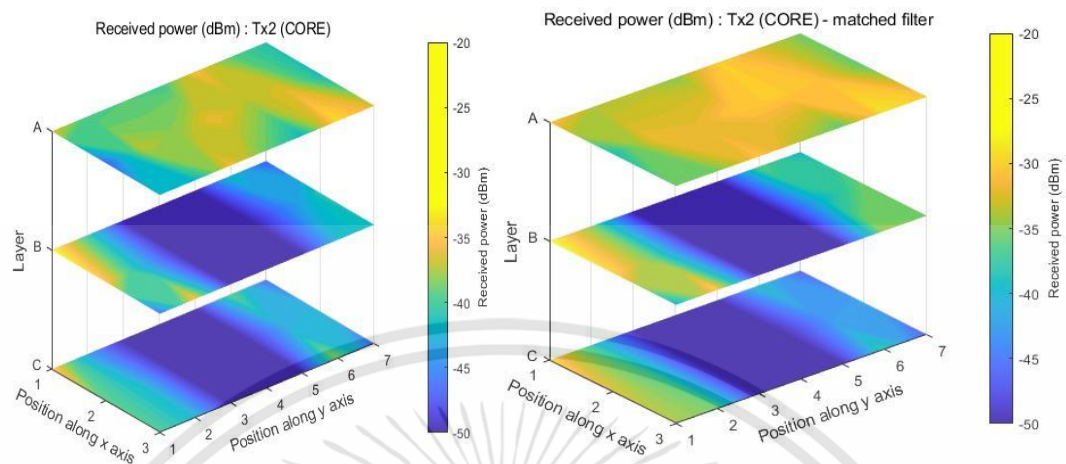
พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณนั้นจะแสดงในรูปของกราฟแบบ คอนทัวร์ซึ่งจะเป็นการแสดงถึงระดับของพลังงานที่สามารถรับได้ทั่วพื้นที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ โดยที่ระดับพลังงานของสัญญาณที่สามารถรับได้จะอยู่ในหน่วยเดซิเบล โดยที่แกน x จะแสดงถึงตำแหน่งของด้านส่ง แกน y จะแสดงถึงตำแหน่งของด้านรับ แกน z จะบ่งบอกถึงเลเยอร์ ส่วนแถบสีด้านข้างจะเป็นการบ่งบอกถึงค่าระดับพลังงานที่สามารถรับได้ และแกน x ที่ 1 ถึง 3 แกน y ที่ 3 ถึง 5 เป็นสิ่งกีดขวาง โดยกำหนดให้มีพลังงานที่สามารถรับได้น้อยที่สุด



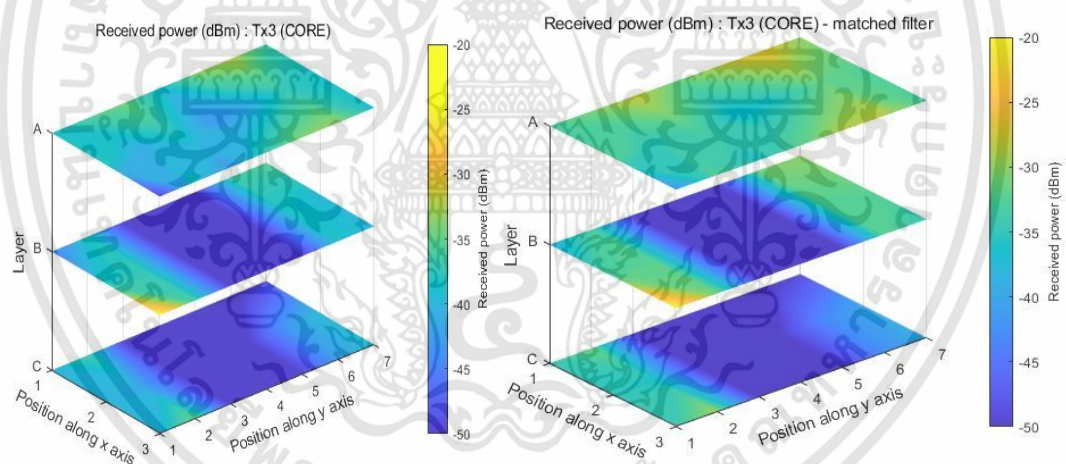
(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

(ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์

รูปที่ 4.70 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx1 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง



(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ (ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์
รูปที่ 4.71 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง



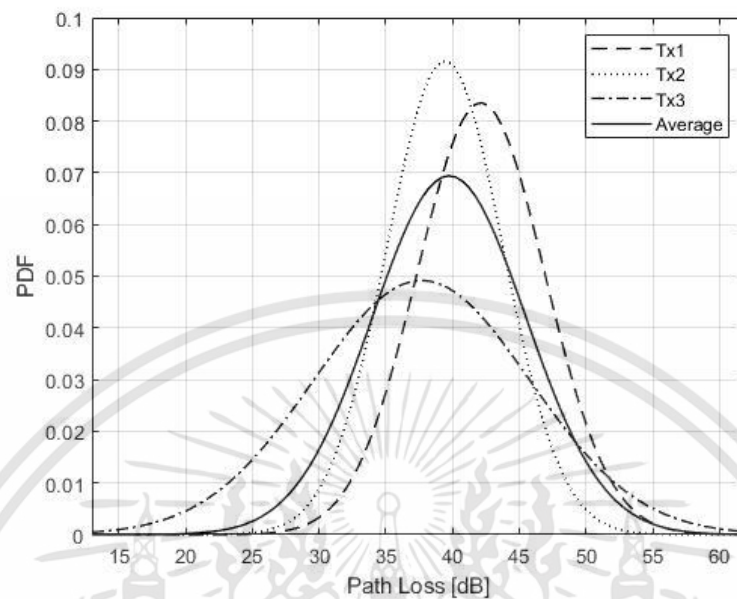
(ก) ไม่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ (ข) ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์
รูปที่ 4.72 พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx3 เป็นด้านส่ง
แสดงในรูปแบบคอนทัวร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 4.70 4.71 และ 4.72 จะเป็นรูปผลการวิเคราะห์พลังงานที่สามารถ
รับได้ของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยในผลการวิเคราะห์นั้น
จะแยกย่อยได้อีกเป็นสองกรณี ได้แก่ ไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนและผ่านการกรองสัญญาณ

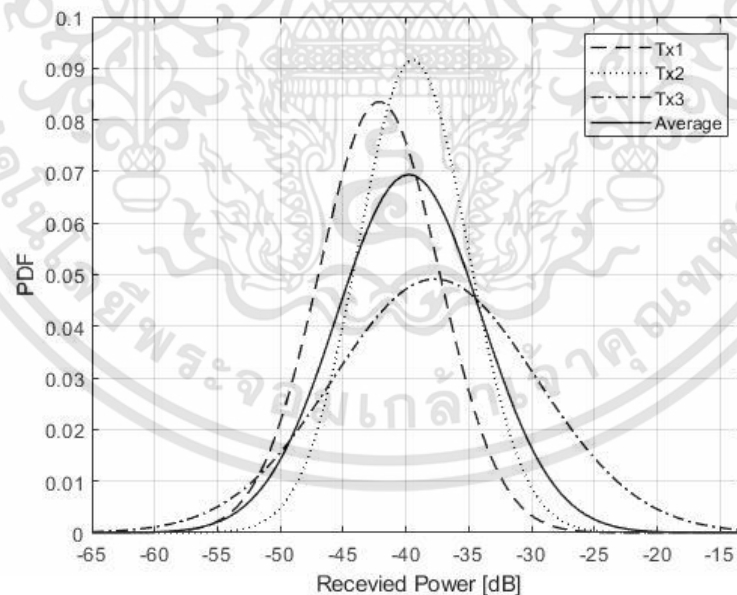
รบกวนออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ จากผลการวิเคราะห์ในกรณีที่สัญญาณไม่ได้ผ่านการกรองสัญญาณ นั้นจะมีพลังงานที่สามารถรับได้ที่สูงกว่าผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกโดยใช้แมตซ์ฟิลเตอร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแถบสีด้านข้างที่บ่งบอกถึงพลังงานที่สามารถรับได้ การที่ระดับพลังงานที่สามารถรับได้ในแต่ละจุดนั้นไม่เท่ากันเพราะว่าในการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นเราไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีระดับพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน

4.4.2.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นและฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมแบบการสูญเสียเชิงวิถีและพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ กรณีมีสิ่งกีดขวาง

พิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในกรณีตำแหน่งที่ $Tx1$ $Tx2$ และ $Tx3$ เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.73 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นฝั่งส่ง $Tx1$ จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง $Tx2$ และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นด้านส่ง $Tx3$ ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ แต่ละด้าน ส่วนผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ โดยพิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในกรณีตำแหน่งที่ $Tx1$ $Tx2$ และ $Tx3$ เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.74 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง $Tx1$ จุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง $Tx2$ และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฝั่งส่ง $Tx3$ ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอน เป็นค่าผลของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแต่ละด้าน

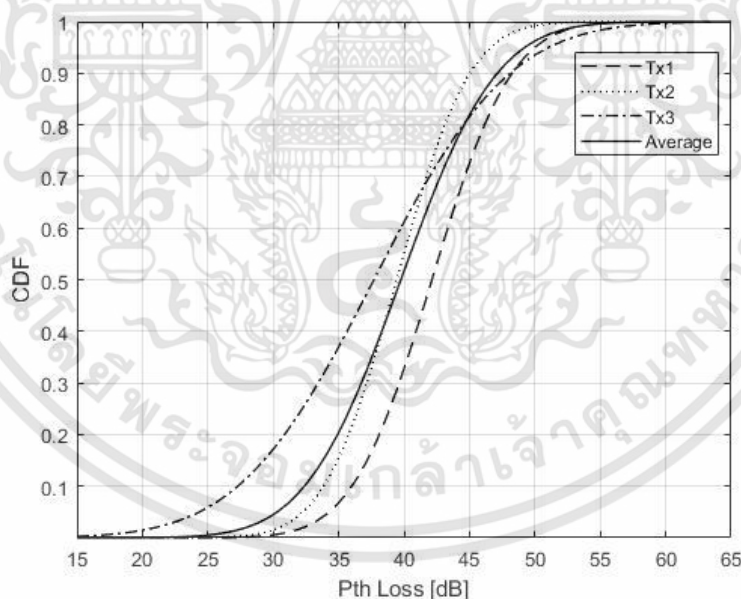


รูปที่ 4.73 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการสูญเสียเชิงวิถีแบบ 3 เลเยอร์
โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

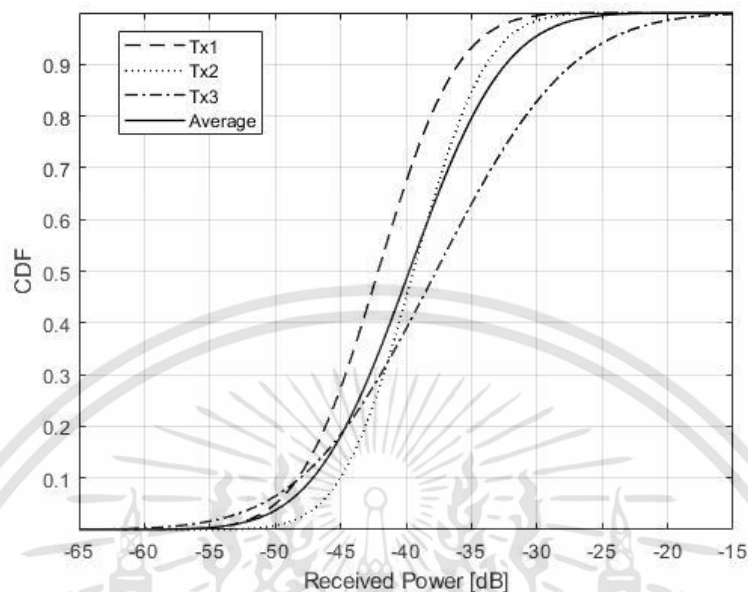


รูปที่ 4.74 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของพลังงานที่สามารถรับได้แบบ 3 เลเยอร์
โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง

พิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ในกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.75 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอนเป็นค่าผลของการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแต่ละด้าน ส่วนผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้ โดยพิจารณาฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม ในกรณีตำแหน่งที่ Tx1 Tx2 และ Tx3 เปรียบเทียบกับกรณีทุกตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.76 โดยที่เส้นตรงสีแดงคือค่าเฉลี่ยฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสม เส้นขีดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx1 จุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx2 และเส้นจุดคือค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมด้านส่ง Tx3 ซึ่งจะพิจารณาให้แกนแนวนอน เป็นค่าผลของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณ และแกนแนวตั้งเป็นค่าผลของฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแต่ละด้าน



รูปที่ 4.75 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของการสูญเสียเชิงวิถีแบบ 3 เลเยอร์
โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีมีสิ่งกีดขวาง



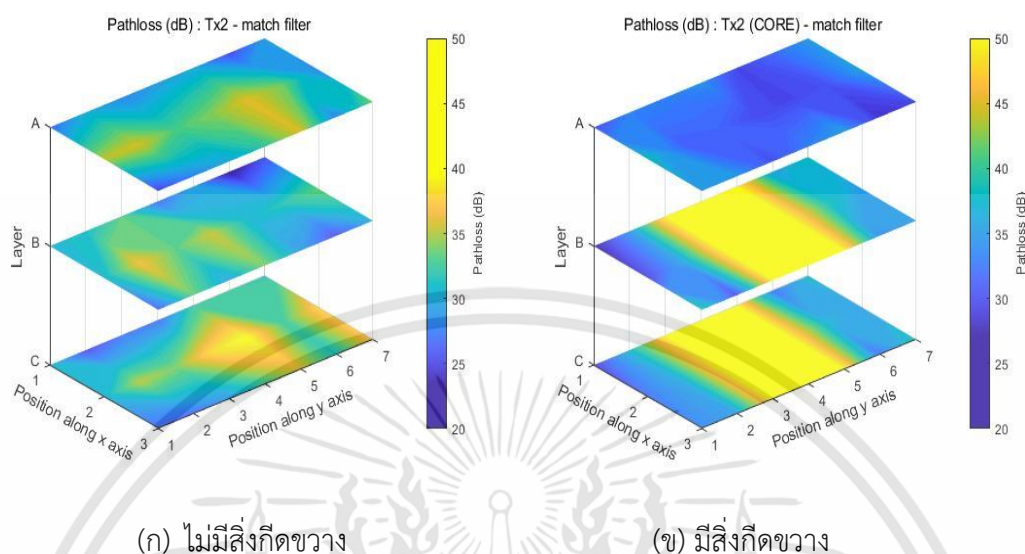
รูปที่ 4.76 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานที่สามารถรับได้แบบ 3 เลเยอร์
โดยพิจารณา Tx1 Tx2 และ Tx3 เป็นด้านส่ง กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

4.4.3 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง

จากผลการวิเคราะห์การทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวาง จะนำผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งสองตัวได้แก่ การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณและพลังงานที่สามารถรับได้มาทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

4.4.3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะทำการยกตัวอย่างที่ตำแหน่งที่ฝั่งส่งสัญญาณอยู่ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้านั้นก็คือที่ตำแหน่ง Tx2 ซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ ทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางตามรูปที่ 3.14 และ 3.16 ตามลำดับ



(ก) ไม่มีสิ่งกีดขวาง

(ข) มีสิ่งกีดขวาง

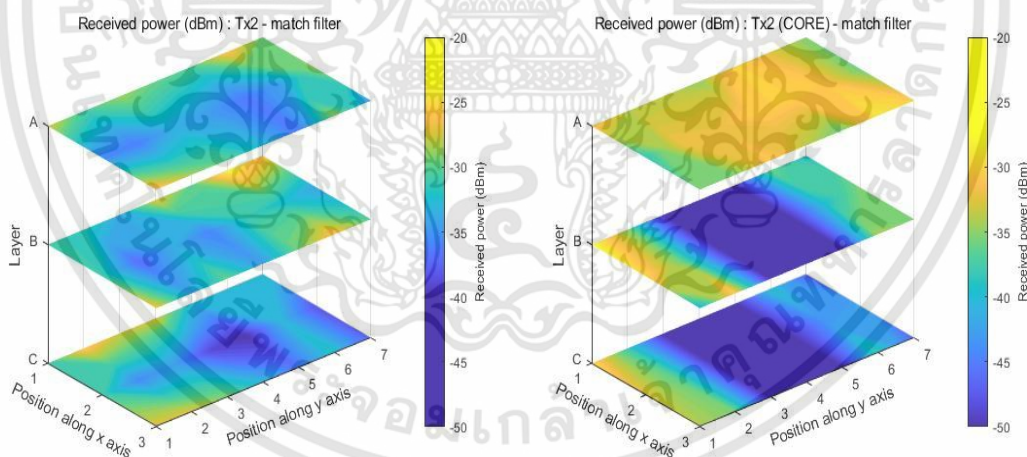
รูปที่ 4.77 ผลการเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์

จากรูปที่ 4.77 ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง ที่บริเวณเลเยอร์ A เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่ามีค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่มากกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางแต่ก็จะมีบางพื้นที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เลเยอร์ A มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ที่บริเวณเลเยอร์ B เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางที่สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะใกล้กับตำแหน่งที่ส่งสัญญาณจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยแต่พอตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะไกลออกไปนั้นจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางส่วนในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทั่วพื้นที่ในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ไม่เท่ากันแต่ที่สามารถเห็นได้ชัดคือบริเวณพื้นที่ที่ตรงมุมของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยกว่าบริเวณพื้นที่ตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าที่บริเวณเลเยอร์ C เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางที่สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะใกล้กับตำแหน่งที่ส่งสัญญาณจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณน้อยแต่พอตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะไกลออกไปนั้นจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางส่วนในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทั่วพื้นที่ในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าการสูญเสียเชิง

วิธีของสัญญาณที่ไม่เท่ากันแต่ที่สามารถเห็นได้ชัดคือบริเวณพื้นที่ที่ตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณน้อยกว่าบริเวณพื้นที่ตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้า จากข้อความที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการที่ค่าสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณนั้นมีค่าไม่เท่า เพราะเนื่องจากในการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นเราไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีระดับการสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน

4.4.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะทำการยกตัวอย่างที่ตำแหน่งที่ฝั่งส่งสัญญาณอยู่ตำแหน่งตรงกึ่งกลางของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นก็คือที่ตำแหน่ง Tx2 ซึ่งจะมีแบบจำลองการวัดฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ ทั้งกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวางตามรูปที่ 3.14 และ 3.16 ตามลำดับ



(ก) ไม่มีสิ่งกีดขวาง

(ข) มีสิ่งกีดขวาง

รูปที่ 4.78 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณแบบ 3 เลเยอร์ ที่ Tx2 เป็นด้านส่ง แสดงในรูปแบบคอนทัวร์

จากรูปที่ 4.78 ที่แสดงที่ในข้างต้นทั้งสองรูปในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง ที่บริเวณเลเยอร์ A เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่ามีค่าพลังงานที่สามารถรับได้ที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางแต่ก็จะมีบางพื้นที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เลเยอร์ A มีค่าพลังงานที่สามารถรับได้ที่มากกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ที่บริเวณเลเยอร์ B เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางที่สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะใกล้กับตำแหน่งที่ส่งสัญญาณจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้มากแต่พอตำแหน่งที่รับสัญญาณมีระยะไกลออกไปนั้นจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้ลดลงตามระยะทางส่วนในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทั่วพื้นที่ในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้ที่ไม่เท่ากันแต่ที่สามารถเห็นได้ชัดคือบริเวณพื้นที่ที่ของตรงมุมของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้มากกว่าบริเวณพื้นที่ตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่บริเวณเลเยอร์ C เนื่องจากเป็นตำแหน่งรับสัญญาณที่บริเวณด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเห็นได้ว่าในกรณีมีสิ่งกีดขวางที่สามารถสังเกตได้จากตำแหน่งที่รับสัญญาณเมื่อมีระยะใกล้กับตำแหน่งที่ส่งสัญญาณจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้มากแต่พอตำแหน่งที่รับสัญญาณมีระยะไกลออกไปนั้นจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้ลดลงตามระยะทางส่วนในกรณีที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทั่วพื้นที่ในหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้ที่ไม่เท่ากันแต่ที่สามารถเห็นได้ชัดคือบริเวณพื้นที่ที่ของตรงมุมของผนังหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าของพลังงานที่สามารถรับได้มากกว่าบริเวณพื้นที่ตรงกลางของหม้อแปลงไฟฟ้า จากข้อความที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการที่ค่าของพลังงานที่สามารถรับได้นั้น ที่มีค่าไม่เท่ากัน เพราะเนื่องจากการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นเราไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมีการจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละจุดนั้นมีระดับพลังงานที่สามารถรับได้ที่ไม่เท่ากัน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้ได้สร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เพราะความถี่นี้เป็นย่านความถี่ ISM Band ซึ่งสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องทำการขออนุญาตในการใช้งานเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการหาคุณลักษณะของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า ในโครงการนี้จึงเลือกสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปให้สามารถใช้งานได้ที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีขนาดแบนด์วิดท์ประมาณ 29 เมกะเฮิรตซ์ และยังสามารถนำสายอากาศที่สร้างขึ้นไปใช้งานได้จริงโดยการนำสายอากาศที่สร้างขึ้นมาใช้ในการวัดทดสอบคุณลักษณะของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากการทดสอบคุณลักษณะของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าจะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และประเมินผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) โดยใช้แมตช์ฟิลเตอร์ (Matched filter) ในการกรองสัญญาณ ซึ่งวิธีก่อนหน้านี้มีการใช้วิธีการตรวจสอบแบบอัลตราโซนิกและแบบคลื่นอะคูสติก สำหรับโครงการนี้ได้ใช้วิธีการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบ

จากการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะอาศัยหลักการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศขั้นพื้นฐาน และการทดสอบการวัดคุณลักษณะของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

เนื่องจากสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปที่ได้จากการสร้างตามแบบจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ค่าพารามิเตอร์มาจากการคำนวณ ซึ่งในการจำลองการออกแบบตามค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นทำให้คุณสมบัติของสายอากาศลดน้อยลง โครงการนี้จึงได้มีการแก้ไขปรับปรุงโดยการปรับขนาดของแพทช์ตามความเหมาะสมในการเลียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งส่งผลให้สายอากาศมีคุณสมบัติและการรับสัญญาณดีขึ้นทำให้สามารถสรุปผลการทดสอบดังนี้

การทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|S_{11}|$ พบว่าคุณสมบัติของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ยอมรับได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะอยู่ในช่วงความถี่ 2.2 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 2.6 กิกะเฮิรตซ์ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพของ

สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปจะมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถยอมรับได้

การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ยอมรับได้จะอยู่ในช่วงความถี่ที่ 2.2 กิกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบจึงมีความแม่นยำที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดสอบอัตราขยาย เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะพบว่าผลการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์กับผลการทดสอบจากการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ความถี่ 2.2 กิกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะมีค่าอัตราขยายจากผลการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปต่ำสุดเท่ากับ 0.0251 ดีบีไอ และอัตราขยายจากผลการทดสอบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปสูงสุดเท่ากับ 1.945 ดีบีไอ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้ง 3 ความถี่ประกอบไปด้วยความถี่ที่ 2.2 กิกะเฮิร์ตซ์ ความถี่ที่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ที่ 2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ พบว่าผลการทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่งและ 40×40 ตำแหน่ง

จากการนำสายอากาศที่สร้างมาใช้งานจริงโดยนำไปทดสอบวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $|S_{21}|$ ซึ่งนำผลการทดสอบดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถแสดงให้เห็นถึงผลที่เกิดในลักษณะต่าง ๆ และได้้นำผลตำแหน่งของสายอากาศในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีตำแหน่งอ้างอิงเป็นด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง ซึ่งจะมีตำแหน่งที่เท่ากันในฝั่งส่งและฝั่งรับของสัญญาณ โดยทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกับกันจะได้ผลดังนี้

ค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่น้อยกว่าที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง โดยที่ด้านส่งกับด้านรับ

16×16 ตำแหน่ง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ 41.5440 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 26.5939 dB ซึ่งใน 40×40 ตำแหน่ง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ 47.8542 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 30.3857 dB ซึ่งกรณีด้าน 16×16 ช่อง ตำแหน่งที่มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx6 ที่มีด้านรับ Rx4 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศและการสะท้อนกลับหมดของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะตำแหน่งด้านรับ Rx4 มีตำแหน่งอยู่ที่มุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx37 ที่มีด้านรับ Rx5 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศหรือการสะท้อนกลับหมดของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า และการจางหายของสัญญาณเนื่องจากตำแหน่งฝั่งส่งและตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณมีตำแหน่งอยู่ที่ขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงทำให้มีการจางหายของสัญญาณมากกว่าที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง โดยจะมีผลต่อค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง และ 40×40 ตำแหน่ง จะมีผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากพลังงานที่รับได้สูงสุดจะอยู่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณ โดยที่บริเวณคอลัมน์ตรงข้ามกับฝั่งส่งสัญญาณจะได้รับกำลังงานค่อนข้างสูง จะเห็นได้ว่าด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่ง Tx6 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุด ส่วนที่ตำแหน่ง Tx13 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด และที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง จะแสดงให้เห็นถึงพลังงานที่รับได้สูงสุดเช่นเดียวกับที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง โดยจะมีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุดที่ตำแหน่ง Tx23 หรือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของผนังหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนที่ตำแหน่ง Tx37 หรือตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุด และจากทั้ง 2 กรณีที่มีระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้น้อยที่สุดเนื่องจากตำแหน่งขอบด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อส่งสัญญาณออกไป อาจมีการจางหายของสัญญาณไปในอากาศ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีฝาปิด

ค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง มีค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณที่น้อยกว่าที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่ง โดยที่แบบ 16×16 ตำแหน่ง มีค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณน้อยที่สุดคือ -41.5440 dB และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ -26.5939 dB ซึ่งในกรณีด้าน 40×40 ตำแหน่ง มีค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณน้อยที่สุดคือ -47.8542 dB และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ -30.3857 dB ซึ่งกรณีด้าน 16×16

ตำแหน่ง ตำแหน่งที่มีค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณน้อยที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx6 ที่มีด้านรับ Rx4 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศและการสะท้อนกลับหมดของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะตำแหน่งด้านรับ Rx4 มีตำแหน่งอยู่ที่มุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่กรณีด้าน 40×40 ตำแหน่ง ตำแหน่งตำแหน่งที่มีค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณน้อยที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx37 ที่มีด้านรับ Rx5 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศหรือการสะท้อนกลับหมดของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้า และการจางหายของสัญญาณเนื่องจากตำแหน่งด้านส่งและตำแหน่งด้านรับมีตำแหน่งอยู่ที่ขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงทำให้มีการจางหายของสัญญาณมากกว่ากรณีด้าน 16×16 ตำแหน่ง โดยจะมีผลต่อค่าอัตราการขยายการส่งผ่านของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

5.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่น้อยกว่ากรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ 42.7302 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 30.0122 dB ซึ่งในกรณีมีสิ่งกีดขวาง มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ 48.5294 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 33.5427 dB ดังนั้นกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งที่มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx6 ที่มีด้านรับ Rx4 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศและการสะท้อนกลับหมดของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าเพราะตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณ Rx4 มีตำแหน่งอยู่ที่มุมล่างของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งที่มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณมากที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx2 ที่มีด้านรับ Rx3 เพราะตำแหน่งด้านรับมีตำแหน่งอยู่ที่ขอบล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงทำให้อาจมีการสะท้อนกลับของสัญญาณมากกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยจะมีผลต่อค่าการสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าได้

ภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง จะมีผลของภาพหน้าตัดข้างการประวิงกำลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะมีผลของระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุดมากกว่ากรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยกรณีมีสิ่งกีดขวางมีค่าระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุดที่ตำแหน่งด้านส่ง Tx3 และด้านรับ Rx1 และกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางจะมีค่าของระดับพลังงานเฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุดที่ตำแหน่งด้านส่ง Tx2 และด้านรับ Rx2 เนื่องจากตำแหน่งฝั่งส่งสัญญาณและตำแหน่งรับสัญญาณอยู่ในระดับเดียวกัน ส่วนกรณีมีสิ่งกีดขวางมีค่าระดับพลังงาน

เฉลี่ยที่รับได้สูงที่สุดน้อยกว่าเพราะมีสิ่งกีดขวางและตำแหน่งฝั่งรับสัญญาณอยู่ตำแหน่งขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงอาจเกิดการจางหายของสัญญาณได้

อัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณที่น้อยกว่ากรณีมีสิ่งกีดขวาง โดยที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง มีค่าอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดคือ -5.7197 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ -7.2347 dB ซึ่งในกรณีมีสิ่งกีดขวาง มีค่าอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณมากที่สุดคือ -5.3923 dB และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ -7.5975 dB ดังนั้นกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งที่มีค่าอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณน้อยที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx1 ที่มีด้านรับ Rx2 เนื่องจากตำแหน่งด้านส่ง Tx1 อยู่ขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้ามีโอกาสเกิดการจางหายของสัญญาณได้ง่ายเพราะหม้อแปลงไม่มีฝาปิด และกรณีมีสิ่งกีดขวาง ตำแหน่งที่มีค่าอัตราการส่งข้อมูลของสัญญาณน้อยที่สุดคือ ตำแหน่งด้านส่ง Tx4 ที่มีด้านรับ Rx5 เนื่องจากตำแหน่งของสายอากาศด้านส่งอยู่ในตำแหน่งขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้มีโอกาสเกิดการจางหายของสัญญาณได้

5.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เลเยอร์ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและกรณีมีสิ่งกีดขวาง

ในการวิเคราะห์พลังงานที่สามารถรับได้ของสัญญาณในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางกับกรณีมีสิ่งกีดขวางที่บริเวณเลเยอร์ A เป็นตำแหน่งด้านรับที่บริเวณด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีมีสิ่งกีดขวางจะมีค่าพลังงานที่สามารถรับได้ที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง เนื่องจากตำแหน่งด้านรับอยู่ที่บริเวณขอบบนของหม้อแปลงไฟฟ้า อาจเกิดการจางหายของสัญญาณและสูญเสียพลังงานได้ บริเวณเลเยอร์ B เป็นตำแหน่งด้านรับที่บริเวณกึ่งกลางของหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีมีสิ่งกีดขวางจะมีค่าพลังงานที่สามารถรับได้ที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง เพราะตำแหน่งด้านรับกรณีมีสิ่งกีดขวางจะเกิดการสูญเสียพลังงานโดยสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะทำให้เกิดการบดบังและลดทอนพลังงานไปยังด้านรับที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของฝั่งตรงข้ามหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ที่บริเวณเลเยอร์ C เป็นตำแหน่งด้านรับที่บริเวณด้านล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีมีสิ่งกีดขวางจะมีค่าพลังงานที่สามารถรับได้ที่น้อยกว่ากรณีไม่มีสิ่งกีดขวางเพราะ ตำแหน่งด้านรับอยู่ที่บริเวณขอบล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการสูญเสียพลังงานโดยสิ่งกีดขวางซึ่งทำให้เกิดการบดบังและลดทอนพลังงานไปยังฝั่งรับสัญญาณที่อยู่บริเวณขอบล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ และอาจเกิดการรับสัญญาณสะท้อนมาก เนื่องจากตำแหน่งด้านรับอยู่ที่บริเวณขอบล่างของหม้อแปลงไฟฟ้าในการสะท้อนของสัญญาณอาจมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานได้ จากข้อความที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการที่ค่าของพลังงานที่สามารถรับได้นั้น ที่มีค่าไม่เท่ากัน เพราะเนื่องจากการส่งสัญญาณภายในหม้อแปลง

ไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนของสัญญาณหลายทิศทางซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ในการสะท้อนของสัญญาณนั้นไม่สามารถระบุได้ว่าสัญญาณมีการหักล้างกันหรือสัญญาณมีการเสริมกัน และอาจจะมี การจางหายของสัญญาณเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้ในแต่ละบริเวณของฝั่งรับสัญญาณนั้นมีระดับพลังงาน ที่สามารถรับได้ที่ไม่เท่ากัน

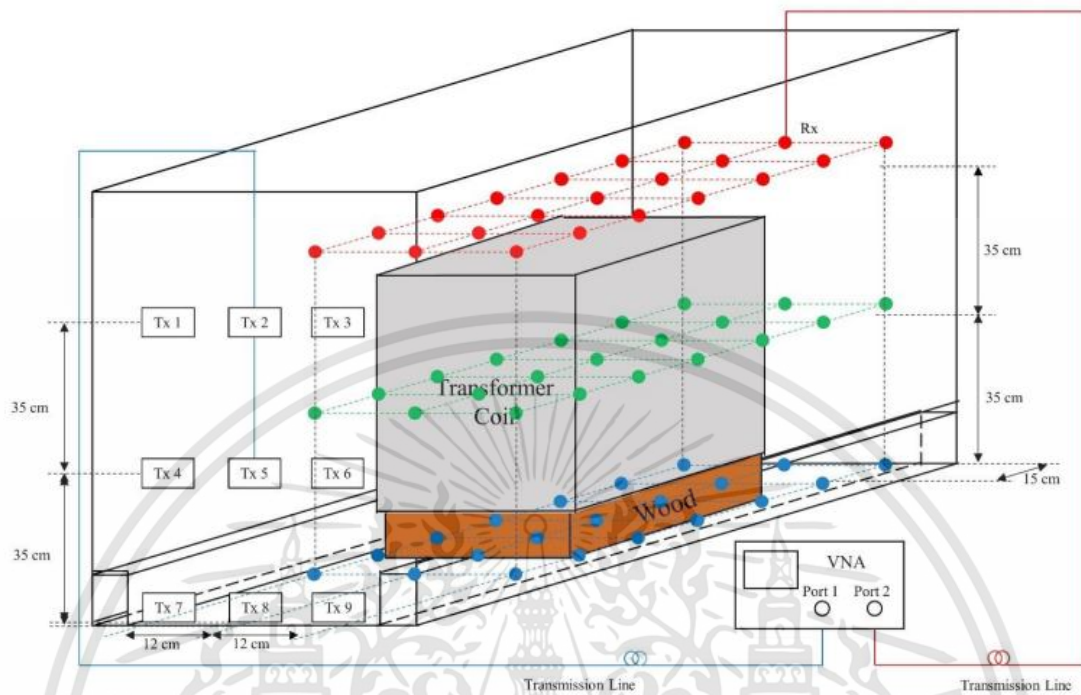
การทดสอบการวัดสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ามีประโยชน์ต่อการนำไปทดสอบ ดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนทำให้เกิดความเสียหายได้ และสำหรับงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการถ่ายโอนโดยใช้การประยุกต์ทฤษฎีการส่งผ่านของฟรีส เพื่อนำ ผลที่ได้จากการวัดนำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของ สายอากาศให้มีความเหมาะสมจนกระทั่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงและเป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัย ต่อไปในอนาคต

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการสรุปผลการทดสอบข้างต้นจะพบว่ายังมีข้อผิดพลาดมากมายหลายประการ เช่น ในการสร้างสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปให้มีผลใกล้เคียงกับการจำลองการออกแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นทำได้ยาก เนื่องจากผู้จัดทำโครงงานยังขาดประสบการณ์ในการสร้างชิ้นงาน ขึ้นมาและผู้จัดทำยังขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ และในการทำการทดลอง นั้นอาจจะมีข้อผิดพลาดอยู่หลายจุดที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองเนื่องจากตัวผู้ทำอาจจะยังไม่มี ความชำนาญในการทำการทดลองจึงทำการวัดผลการทดสอบเกิดความผิดพลาดขึ้น

5.3 การดำเนินงานในอนาคต

ทั้งนี้ในอนาคตผู้จัดทำโครงงานเชื่อว่าถ้าผู้จัดทำโครงงานสามารถออกแบบและสร้าง สายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปให้มีผลใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้มาก ยิ่งขึ้น และมีประสบการณ์ในการใช้งานเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างชำนาญจะสามารถทำให้เกิด การวัดผลการทดสอบที่แม่นยำยิ่งขึ้น และโครงงานนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณในหม้อ แปลงไฟฟ้าโดยจะสังเกตว่าแต่ละตำแหน่งในการส่งและรับสัญญาณมีคุณลักษณะเป็นอย่างไร เพื่อ นำไปต่อยอดในการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำการตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในหม้อ แปลงไฟฟ้า และเพิ่มตำแหน่งการวัดให้มากขึ้นดังรูป 5.1 เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการทดลองการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้า
สำหรับการทดลอง แบบ 3 มิติ

บรรณานุกรม

- [1] อนงค์พันธุ์ แม้นอิมและคนอื่น ๆ, “การศึกษาการเกิดรอยไหม้ เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวน.” หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 2553.
- [2] Ching-Chau Su, Cheng-Chi Tai, Chien-Yi Chen, Ju-Chu Hsieh, and Jiann-Fuh Chen, “Partial Discharge Detection Using Acoustic Emission Method for A Waveguide Functional High-Voltage Cast-Resin Dry-Type Transformer,” IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [3] รฐนนท์ ศรีเผือก, ศุภกิตต์ โชติโก, และกิตติมศักดิ์ ดิเกะโกศล. “การประยุกต์ใช้การตรวจวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทย.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (มกราคม - มีนาคม 2559).
- [4] S. Boonpoke. “Development of Partial Discharges Pattern Recognition Systems by Using Artificial Intelligence Techniques.” A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, 2010.
- [5] IEC/TS Standard 62478, “High voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.
- [6] F.H. Raab and others, "HF, VHF, and UHF Systems and Technology," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.50, No. 3, March 2002.
- [7] วิชัย นระมัตย์, “การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบสร้างจากอลูมิเนียมและทองแดง,” สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, 2559.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] C.A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Cannada, 2005.
- [9] M. Mathur, A. Vats and A. Agarwal, “A New Design Formulae for Feed Line Dimensions of the Rectangular Microstrip Patch Antenna by using Equivalent Design Concept,” Electronics & Communication Department, 2015.
- [10] D.G. Fang, Antenna Theory and Microstrip Antennas, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [11] D. Worasawate and R. Muangkaew, “A Study of Relationships Between Antenna Length and Impedance Banwidth for a Meandered Rectangular Microstrip Antenna,” Proceedings of 42nd Kasetsart University Annual Conference, 2004.
- [12] M. Mathur, A. Vats and A. Agarwal, “A New Design Formulae for Feed Line Dimensions of the Rectangular Microstrip Patch Antenna by using Equivalent Design Concept,” Electronics & Communication Department, 2015.
- [13] Agilent Technologies. E5061B ENA Series Network Analyzer.
- [14] Specifications, E.; Specifications, M. Flexible RG214 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket RG214 / U Flexible RG214 Coax Cable Double Shielded with Black PVC Jacket. 1–3
- [15] “Advantages and Disadvantages of Microstrip Patch Antenna.” <https://www.rfwirelessworld.com/Terminology/AdvantagesandDisadvantages-of-Microstrip-Patch-Antenna.html>
- [16] H. T. Friis, “A Note on a Simple Transmission Formula,” in Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [17] S. Promwong and J. Takada, “Free Space Link Budget Estimation Scheme For Ultra Wideband Impulse Radio With Imperfect Antennas,” in IEICE Electronics Express, vol. 1, no. 7, pp. 188–192, 2004.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] S. Promwong, J. Takada, P. Supanakoon, M. Chamchoy, A. Pradabphon, and P. Tangtisanon, "Distortion Analysis of UWB Pulse Caused by Trapezoidal Antenna," in the 26th Electrical Engineering Conference, Cha-am, Phetchaburi, Thailand, Nov. 2003, pp. 1494-1499.
- [19] T. S. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice," 2nd ed. New Jersey: prentice hall PTR., 2002.
- [20] R. D. Yates and D. J. Goodman, "Probability and stochastic processes: a friendly introduction for electrical and computer engineers," John Wiley & Sons, 2014.
- [21] A. Chaisang and S. Promwong, "Experimental Evaluation Scheme of Ultra-wideband Human Body Transmission Model for Wireless Body Area Network," Sensors and Materials, Vol. 30, No. 10 (2018).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ที่ Tx1 ถึง Tx8

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx1	35.97	34.83	37.80	31.16	35.28	30.56	35.35	38.16
Rx2	38.43	29.12	26.71	31.79	31.86	30.97	29.27	39.03
Rx3	39.31	30.19	35.17	26.59	32.30	31.52	34.24	29.27
Rx4	36.18	38.08	28.12	39.49	39.49	41.54	34.58	41.18
Rx5	37.19	31.26	30.87	38.23	33.75	32.48	30.95	30.57
Rx6	34.33	28.59	34.99	39.59	31.03	29.68	28.58	34.29
Rx7	41.11	32.86	34.40	34.11	30.40	30.54	30.45	29.47
Rx8	38.62	37.65	30.42	34.73	29.97	39.93	30.00	32.56
Rx9	33.74	35.13	34.72	37.97	31.02	34.18	38.16	31.15
Rx10	34.72	26.61	29.26	33.79	33.40	32.48	29.95	31.72
Rx11	30.79	30.66	36.19	32.59	35.24	29.91	35.43	32.03
Rx12	32.72	34.11	28.56	33.34	30.54	32.64	31.78	37.41
Rx13	35.17	29.94	37.78	34.39	32.97	32.00	31.59	31.06
Rx14	29.68	33.19	32.02	33.70	35.25	27.48	30.65	32.01
Rx15	37.78	32.74	32.19	35.67	36.35	28.57	36.57	28.62
Rx16	32.91	34.33	34.94	35.60	37.23	36.55	33.12	34.27

การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ที่ Tx9 ถึง Tx16

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx1	31.12	32.05	32.03	39.83	33.94	30.28	35.92	32.40
Rx2	35.28	28.21	29.06	36.12	34.26	32.22	32.51	33.90
Rx3	39.30	30.01	35.07	28.53	35.79	33.69	29.70	33.22
Rx4	38.24	39.77	31.65	33.59	36.14	33.77	32.48	35.30
Rx5	30.93	33.56	34.39	32.88	32.40	32.86	34.37	35.19

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx6	31.84	29.88	28.94	30.96	32.77	29.64	29.10	31.17
Rx7	37.10	30.01	33.94	29.87	32.31	31.14	32.24	34.74
Rx8	30.61	30.70	31.72	34.36	35.88	35.46	28.54	34.74
Rx9	35.50	30.62	30.84	30.79	35.34	30.90	32.04	36.52
Rx10	31.44	29.13	28.86	37.90	31.30	30.72	31.14	40.99
Rx11	31.01	29.80	30.21	30.06	35.05	32.50	31.05	30.95
Rx12	30.38	35.38	29.54	33.43	37.53	36.84	28.51	37.35
Rx13	35.80	32.26	38.06	38.44	32.66	34.56	36.25	29.68
Rx14	32.19	29.49	32.41	37.91	37.15	29.32	28.55	34.71
Rx15	30.92	33.21	34.28	30.11	39.55	27.21	28.64	26.20
Rx16	37.69	40.43	33.05	36.75	29.17	36.15	34.04	35.29

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx1	29.35	32.59	40.31	30.46	34.73	34.24	36.65	38.89
Rx2	30.77	25.21	30.33	42.00	32.89	34.15	31.19	37.92
Rx3	39.28	28.63	25.16	30.97	39.00	31.78	30.50	35.21
Rx4	30.33	34.06	29.21	31.43	43.19	36.35	32.26	35.50
Rx5	33.68	32.22	35.53	44.62	27.39	33.29	39.88	32.74
Rx6	31.48	31.21	32.57	36.01	32.62	28.43	27.97	37.29
Rx7	39.46	30.36	28.93	33.01	39.73	27.82	29.46	29.51
Rx8	38.24	33.17	32.69	35.98	30.61	37.15	30.58	28.45
Rx9	32.50	32.51	34.94	34.74	30.16	33.84	40.27	42.08

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx10	33.19	33.18	31.71	35.18	33.98	29.63	31.59	40.66
Rx11	34.39	30.11	34.26	34.09	39.08	30.33	26.86	29.95
Rx12	35.41	33.70	35.08	33.78	39.90	37.82	30.43	31.45
Rx13	35.26	39.80	36.84	38.67	32.02	32.88	37.31	44.30
Rx14	38.68	32.58	32.69	34.67	32.98	29.65	32.29	43.62
Rx15	35.34	29.87	31.76	38.96	41.46	32.05	28.69	31.93
Rx16	40.20	38.27	39.09	37.50	44.12	36.19	34.06	31.52
Rx17	36.33	36.12	38.36	36.83	36.86	41.31	41.09	35.71
Rx18	36.15	32.87	30.48	35.69	37.92	32.31	30.04	40.95
Rx19	39.41	29.88	32.76	36.50	39.17	30.41	32.72	38.35
Rx20	42.78	35.67	32.95	36.39	34.74	42.88	39.76	36.15
Rx21	38.03	37.66	39.58	39.25	36.52	40.52	37.62	35.74
Rx22	36.17	31.51	34.80	42.31	37.17	33.42	33.64	37.38
Rx23	39.11	34.96	33.79	41.34	37.41	34.13	31.32	39.29
Rx24	40.62	37.23	41.48	34.43	37.36	37.33	40.46	35.06
Rx25	35.69	41.31	42.72	44.19	41.14	39.70	36.91	41.09
Rx26	41.93	37.80	36.89	46.60	40.67	37.87	37.55	37.53
Rx27	37.59	33.30	35.19	39.87	38.99	39.07	34.44	40.06
Rx28	43.26	42.89	36.87	38.54	38.10	38.55	47.18	38.49
Rx29	38.11	40.89	36.81	40.92	41.87	43.31	39.40	41.99
Rx30	38.15	35.32	37.75	46.14	39.23	34.89	34.89	41.31
Rx31	38.60	35.91	30.41	38.74	40.38	35.29	33.52	44.38
Rx32	39.49	39.67	36.06	41.37	48.22	37.09	40.56	35.91
Rx33	44.33	43.03	35.96	40.16	37.69	45.57	39.40	41.03

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx34	38.10	33.73	35.93	40.38	42.67	33.41	36.43	39.03
Rx35	39.78	33.56	38.82	41.83	38.69	36.22	34.91	42.64
Rx36	40.49	41.27	39.83	39.55	34.93	42.49	44.91	32.36
Rx37	40.86	40.24	39.66	39.54	44.47	40.85	40.53	39.44
Rx38	41.63	32.79	31.57	41.20	39.59	36.69	36.02	40.28
Rx39	39.37	32.64	37.56	38.91	36.38	33.15	36.30	39.41
Rx40	43.18	40.41	39.09	38.24	39.80	40.36	40.17	38.50

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx1	33.11	34.16	36.37	35.47	36.45	39.88	37.46	38.83
Rx2	32.78	33.53	32.23	35.64	38.47	32.81	33.36	38.22
Rx3	37.01	31.59	33.94	35.61	37.29	31.97	33.15	41.63
Rx4	36.86	35.69	32.93	33.89	38.54	36.39	38.38	36.04
Rx5	31.67	34.94	37.25	39.90	34.97	33.99	39.76	41.86
Rx6	35.00	29.91	31.48	35.26	33.13	30.24	35.44	36.84
Rx7	37.33	30.01	27.49	31.86	35.97	33.39	29.15	35.31
Rx8	37.77	37.44	29.77	35.26	42.05	38.12	31.45	31.92
Rx9	29.89	32.83	43.45	40.40	31.14	35.43	39.41	38.56
Rx10	32.12	30.52	32.18	37.36	35.03	32.97	33.37	41.62
Rx11	40.06	30.45	29.70	32.97	39.48	32.82	31.30	32.36
Rx12	38.04	37.02	31.51	30.96	38.10	37.84	30.22	31.58
Rx13	29.69	33.53	42.40	36.05	31.28	36.91	34.85	35.04

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx14	34.75	31.49	33.37	36.55	35.00	30.41	33.42	42.89
Rx15	39.77	32.08	29.38	30.36	37.39	30.83	29.96	32.61
Rx16	33.83	38.02	30.09	32.99	33.71	38.99	30.49	28.56
Rx17	33.90	36.26	37.48	38.09	29.15	33.64	38.87	39.05
Rx18	36.39	33.06	34.29	38.77	33.02	29.36	32.88	36.07
Rx19	37.27	38.03	29.44	31.82	36.65	31.77	26.34	31.40
Rx20	35.56	40.19	33.59	34.73	37.92	38.33	30.06	29.64
Rx21	36.11	46.42	34.09	38.30	32.59	35.30	36.29	38.54
Rx22	43.62	37.36	35.62	36.19	35.49	31.15	31.94	39.08
Rx23	32.79	34.03	39.77	40.32	38.66	31.07	27.33	35.68
Rx24	38.36	37.06	46.94	38.72	35.53	36.69	34.86	30.01
Rx25	36.39	37.92	37.18	35.23	37.30	40.26	38.21	38.75
Rx26	37.67	35.44	34.28	36.48	43.01	32.22	39.12	43.45
Rx27	38.47	31.93	32.30	36.22	38.92	36.22	35.79	40.52
Rx28	38.55	39.69	37.63	35.94	38.78	39.76	39.80	31.44
Rx29	36.49	35.69	36.20	36.13	36.22	35.96	35.36	43.92
Rx30	36.85	32.89	30.82	38.23	35.66	33.94	33.99	42.24
Rx31	36.03	30.07	31.04	40.01	40.46	34.76	29.79	36.75
Rx32	36.63	38.03	39.75	34.31	35.00	39.73	36.79	39.47
Rx33	40.51	38.09	41.12	47.95	42.00	37.07	37.47	40.39
Rx34	41.08	32.87	34.78	39.93	40.67	37.79	39.08	43.07
Rx35	39.92	32.24	32.09	38.96	38.62	37.79	32.59	41.42
Rx36	43.24	39.28	43.44	37.79	45.84	40.76	38.51	42.34
Rx37	38.54	38.17	35.61	38.65	36.69	36.88	37.81	43.23

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx38	37.82	34.16	35.43	38.17	42.37	37.39	36.98	41.69
Rx39	36.90	35.13	31.52	35.87	40.97	37.64	34.78	36.61
Rx40	38.46	38.98	37.82	37.54	40.28	44.09	37.81	40.46

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx17 ถึง Tx24

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx17	Tx18	Tx19	Tx20	Tx21	Tx22	Tx23	Tx24
Rx1	37.69	41.07	37.12	40.11	39.92	41.13	44.42	42.31
Rx2	38.81	31.96	30.47	35.10	41.59	33.29	39.13	42.75
Rx3	35.22	30.79	31.65	37.09	40.26	35.83	38.18	43.42
Rx4	36.31	36.27	36.48	36.48	44.88	42.78	40.95	43.19
Rx5	38.21	40.31	43.38	35.16	37.69	42.36	40.29	45.54
Rx6	39.52	33.09	34.00	40.64	44.78	36.18	36.88	43.95
Rx7	41.85	33.24	33.76	43.12	38.36	37.81	33.79	44.47
Rx8	33.56	39.86	36.06	37.84	37.68	41.52	48.49	40.27
Rx9	34.93	39.74	41.30	41.21	35.93	45.17	37.23	39.09
Rx10	33.14	38.09	39.54	39.44	47.86	35.88	37.85	41.63
Rx11	37.56	36.21	30.42	35.21	38.34	39.59	37.77	47.47
Rx12	38.59	38.99	32.99	34.71	39.71	40.12	39.44	43.17
Rx13	29.08	35.60	35.78	40.71	35.81	35.72	43.80	43.66
Rx14	31.87	32.77	33.79	44.05	35.61	34.38	32.79	39.89
Rx15	36.67	32.22	28.75	32.89	39.19	31.67	30.39	37.25
Rx16	39.76	38.42	31.01	34.64	38.08	39.00	35.07	35.07
Rx17	29.80	33.21	42.48	34.49	35.01	42.66	41.32	42.66

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx17 ถึง Tx24

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx17	Tx18	Tx19	Tx20	Tx21	Tx22	Tx23	Tx24
Rx18	30.97	30.59	29.98	37.68	39.95	35.81	35.08	41.57
Rx19	38.18	27.96	31.02	32.33	41.14	35.03	31.92	34.81
Rx20	31.76	37.37	31.46	31.51	39.08	36.81	33.31	36.96
Rx21	31.43	37.68	42.64	39.78	31.79	34.12	44.57	37.71
Rx22	36.24	34.71	37.53	37.70	34.77	31.63	32.26	41.32
Rx23	44.06	34.68	31.08	33.22	41.62	29.97	32.04	34.21
Rx24	40.29	35.69	33.10	37.00	35.93	40.71	36.76	29.57
Rx25	34.44	33.75	41.49	43.33	30.46	33.36	39.97	38.83
Rx26	34.76	33.49	34.64	42.52	34.40	31.25	33.60	41.26
Rx27	40.36	34.69	28.69	34.85	40.91	32.32	28.62	31.43
Rx28	37.93	37.13	34.72	32.58	40.84	35.68	32.39	30.52
Rx29	37.43	44.62	35.72	39.10	35.20	35.53	39.47	41.92
Rx30	45.02	39.29	35.44	39.48	38.20	35.01	37.77	40.95
Rx31	36.06	35.58	38.09	42.73	40.87	38.65	32.55	31.94
Rx32	38.45	39.20	42.79	39.23	40.27	38.46	36.52	32.52
Rx33	36.57	35.11	37.65	39.91	38.77	43.74	40.17	39.10
Rx34	40.14	34.01	35.49	37.93	41.68	31.77	34.13	39.52
Rx35	40.89	36.84	32.74	38.28	41.09	31.39	32.13	36.84
Rx36	37.03	40.72	37.31	38.81	37.42	41.35	41.14	35.62
Rx37	38.99	39.48	41.52	40.95	38.22	38.34	37.75	42.39
Rx38	39.31	32.29	35.34	43.10	39.12	35.16	32.59	36.59
Rx39	39.13	35.33	33.59	38.31	36.59	32.19	38.76	36.95
Rx40	38.29	39.91	39.02	38.65	40.01	38.65	37.24	42.04

การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx25 ถึง Tx32

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx25	Tx26	Tx27	Tx28	Tx29	Tx30	Tx31	Tx32
Rx1	38.31	39.06	44.68	38.88	36.99	36.97	43.04	41.29
Rx2	46.29	33.14	37.09	42.79	39.70	34.73	36.55	40.85
Rx3	44.19	39.79	35.85	37.49	41.59	41.38	30.89	41.00
Rx4	41.66	47.41	42.05	39.86	42.15	42.83	45.16	36.68
Rx5	44.21	39.43	42.10	43.94	41.84	40.74	40.68	45.38
Rx6	43.93	36.64	41.26	42.87	40.87	34.96	37.33	40.68
Rx7	40.61	35.46	37.12	42.51	39.07	38.85	35.31	43.54
Rx8	42.08	42.65	45.32	36.59	40.60	36.90	42.19	39.69
Rx9	38.46	39.95	42.75	42.83	38.01	38.45	40.59	46.32
Rx10	40.28	36.74	37.76	41.29	37.25	38.02	34.59	41.16
Rx11	38.84	33.96	31.96	35.91	37.81	32.99	33.25	42.63
Rx12	38.69	39.07	39.07	41.73	44.86	39.63	39.21	36.65
Rx13	38.93	42.22	39.56	38.84	40.69	42.78	40.83	41.05
Rx14	39.47	34.92	40.99	42.01	41.74	40.66	38.64	40.41
Rx15	40.46	37.79	35.79	37.40	39.07	39.57	31.09	40.49
Rx16	38.89	40.24	40.37	37.07	39.54	41.62	39.58	36.92
Rx17	37.55	37.17	43.64	43.68	36.55	46.11	41.14	39.17
Rx18	35.47	35.89	34.59	39.87	44.16	38.24	34.07	43.78
RX19	42.09	34.00	40.37	37.66	37.27	42.56	36.79	46.53
RX20	38.49	34.99	39.53	35.14	38.49	43.98	42.58	38.59
Rx21	32.25	35.30	39.34	40.14	37.04	39.02	45.93	42.03
Rx22	33.79	33.27	36.21	46.26	37.15	39.09	38.21	41.52
Rx23	36.22	33.01	28.83	32.18	36.38	35.92	30.57	33.76
Rx24	41.26	39.74	32.37	33.33	36.86	38.88	34.49	34.29
RX25	33.46	38.43	47.68	36.88	32.63	38.41	44.92	44.88

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx25 ถึง Tx32

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx25	Tx26	Tx27	Tx28	Tx29	Tx30	Tx31	Tx32
Rx26	36.87	32.33	37.52	44.23	37.24	35.92	34.14	43.67
Rx27	37.89	33.79	33.15	34.29	39.81	33.25	34.53	36.43
Rx28	34.67	40.28	35.13	31.48	37.12	42.98	33.00	32.66
Rx29	31.01	37.53	39.93	37.02	31.91	35.18	42.05	36.86
Rx30	38.07	34.84	34.09	42.63	33.74	31.93	34.17	41.95
Rx31	44.41	34.44	33.02	32.80	38.88	30.97	30.78	34.47
Rx32	38.04	36.96	37.55	30.61	35.78	40.16	34.66	33.17
Rx33	32.78	34.68	41.64	41.57	32.33	37.09	43.74	43.37
Rx34	37.28	31.20	32.45	39.47	40.81	34.48	33.92	43.82
Rx35	39.49	31.64	30.42	35.09	46.47	32.04	31.05	33.79
Rx36	41.94	42.23	36.03	30.84	39.32	43.20	32.45	34.34
Rx37	38.71	43.31	36.52	40.29	32.92	34.66	36.73	35.72
Rx38	41.26	34.68	34.65	39.09	37.66	33.89	31.15	36.28
Rx39	36.11	33.52	35.57	44.05	36.16	30.88	35.26	38.15
Rx40	42.38	36.78	38.74	35.59	34.96	33.52	38.42	31.85

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx1	39.43	40.63	44.39	48.09	45.81	42.54	42.43	47.37
Rx2	39.64	38.95	36.56	42.39	41.67	36.09	38.50	40.29
Rx3	41.82	35.85	40.17	45.53	39.40	38.64	36.92	38.82
Rx4	45.71	44.72	41.62	41.49	40.89	46.51	39.82	44.44
Rx5	41.26	47.81	48.07	44.59	47.85	42.98	46.09	41.64

การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx6	41.58	38.58	37.24	42.84	40.30	38.56	37.88	42.44
Rx7	46.80	38.44	38.77	43.29	39.21	37.82	39.41	41.74
Rx8	40.94	41.44	48.47	37.32	39.98	41.60	39.06	44.74
Rx9	45.30	42.82	44.17	39.96	42.46	46.12	44.73	39.73
Rx10	43.00	38.69	39.41	41.69	40.35	38.89	37.87	46.23
Rx11	41.29	38.06	38.19	43.89	36.63	39.49	35.10	39.61
Rx12	44.66	41.81	40.04	41.09	38.22	42.45	38.69	37.53
Rx13	43.31	45.64	47.04	44.25	40.68	50.84	51.44	39.48
Rx14	45.77	40.16	42.97	44.16	44.64	38.73	40.97	44.88
Rx15	41.49	40.91	38.91	41.23	38.01	34.09	35.49	38.02
Rx16	41.06	40.66	41.10	38.11	41.04	41.57	32.05	43.09
Rx17	35.18	44.55	45.13	39.74	39.51	43.42	33.46	46.01
Rx18	43.67	36.15	37.38	47.06	41.86	35.12	36.62	43.26
Rx19	36.64	33.12	34.47	42.00	42.76	33.74	33.79	39.75
Rx20	35.29	38.18	42.95	35.86	36.69	40.42	42.17	38.76
Rx21	38.21	44.23	47.26	38.90	36.43	46.04	43.61	42.17
Rx22	40.84	36.02	37.95	44.05	41.11	38.79	37.36	40.57
Rx23	37.71	33.01	35.88	41.39	38.38	30.39	36.44	38.31
Rx24	36.42	38.15	36.29	39.56	36.34	37.26	35.74	35.79
Rx25	35.15	36.91	44.26	43.56	38.89	40.68	44.79	40.96
Rx26	36.29	33.41	37.13	42.28	40.64	36.16	36.63	43.99
Rx27	42.83	32.50	31.09	37.46	33.99	36.49	35.56	41.43
Rx28	37.24	41.36	34.76	35.85	36.38	35.78	40.89	38.49
Rx29	35.82	42.59	41.74	44.14	35.87	38.17	40.43	38.14

การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์การสูญเสียเชิงวิธีของสัญญาณ (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx30	39.99	37.69	33.48	41.27	37.27	36.59	37.43	37.28
Rx31	39.31	32.38	33.28	38.24	36.28	31.13	34.76	37.98
Rx32	38.13	41.99	35.81	40.24	32.65	35.78	35.57	36.15
Rx33	31.34	36.03	41.78	36.26	35.58	42.95	43.63	46.74
Rx34	34.51	30.17	33.15	41.36	41.65	39.87	32.31	39.03
Rx35	36.39	28.93	31.77	33.84	43.81	32.49	34.35	37.91
Rx36	31.68	36.96	32.72	33.24	37.00	40.96	38.04	39.09
Rx37	35.09	37.81	41.43	41.52	33.29	35.83	41.95	36.44
Rx38	39.09	36.29	34.23	38.59	38.65	28.33	35.79	38.64
Rx39	40.99	31.94	37.43	38.99	36.25	33.43	27.17	42.59
Rx40	36.16	35.72	40.10	36.38	32.23	34.83	35.83	34.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ที่ Tx1 ถึง Tx8

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx1	-35.97	-34.83	-37.80	-31.16	-35.28	-30.56	-35.35	-38.16
Rx2	-38.43	-29.12	-26.71	-31.79	-31.86	-30.97	-29.27	-39.03
Rx3	-39.31	-30.19	-35.17	-26.59	-32.30	-31.52	-34.24	-29.27
Rx4	-36.18	-38.08	-28.12	-39.49	-39.49	-41.54	-34.58	-41.18
Rx5	-37.19	-31.26	-30.87	-38.23	-33.75	-32.48	-30.95	-30.57
Rx6	-34.33	-28.59	-34.99	-39.59	-31.03	-29.68	-28.58	-34.29
Rx7	-41.11	-32.86	-34.40	-34.11	-30.40	-30.54	-30.45	-29.47
Rx8	-38.62	-37.65	-30.42	-34.73	-29.97	-39.93	-30.00	-32.56
Rx9	-33.74	-35.13	-34.72	-37.97	-31.02	-34.18	-38.16	-31.15
Rx10	-34.72	-26.61	-29.26	-33.79	-33.40	-32.48	-29.95	-31.72
Rx11	-30.79	-30.66	-36.19	-32.59	-35.24	-29.91	-35.43	-32.03
Rx12	-32.72	-34.11	-28.56	-33.34	-30.54	-32.64	-31.78	-37.41
Rx13	-35.17	-29.94	-37.78	-34.39	-32.97	-32.00	-31.59	-31.06
Rx14	-29.68	-33.19	-32.02	-33.70	-35.25	-27.48	-30.65	-32.01
Rx15	-37.78	-32.74	-32.19	-35.67	-36.35	-28.57	-36.57	-28.62
Rx16	-32.91	-34.33	-34.94	-35.60	-37.23	-36.55	-33.12	-34.27

อัตราขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่ง ที่ Tx9 ถึง Tx16

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx1	-31.12	-32.05	-32.03	-39.83	-33.94	-30.28	-35.92	-32.40
Rx2	-35.28	-28.21	-29.06	-36.12	-34.26	-32.22	-32.51	-33.90
Rx3	-39.30	-30.01	-35.07	-28.53	-35.79	-33.69	-29.70	-33.22
Rx4	-38.24	-39.77	-31.65	-33.59	-36.14	-33.77	-32.48	-35.30
Rx5	-30.93	-33.56	-34.39	-32.88	-32.40	-32.86	-34.37	-35.19

อัตราขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 16×16 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx6	-31.84	-29.88	-28.94	-30.96	-32.77	-29.64	-29.10	-31.17
Rx7	-37.10	-30.01	-33.94	-29.87	-32.31	-31.14	-32.24	-34.74
Rx8	-30.61	-30.70	-31.72	-34.36	-35.88	-35.46	-28.54	-34.74
Rx9	-35.50	-30.62	-30.84	-30.79	-35.34	-30.90	-32.04	-36.52
Rx10	-31.44	-29.13	-28.86	-37.90	-31.30	-30.72	-31.14	-40.99
Rx11	-31.01	-29.80	-30.21	-30.06	-35.05	-32.50	-31.05	-30.95
Rx12	-30.38	-35.38	-29.54	-33.43	-37.53	-36.84	-28.51	-37.35
Rx13	-35.80	-32.26	-38.06	-38.44	-32.66	-34.56	-36.25	-29.68
Rx14	-32.19	-29.49	-32.41	-37.91	-37.15	-29.32	-28.55	-34.71
Rx15	-30.92	-33.21	-34.28	-30.11	-39.55	-27.21	-28.64	-26.20
Rx16	-37.69	-40.43	-33.05	-36.75	-29.17	-36.15	-34.04	-35.29

อัตราขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx1	-29.35	-32.59	-40.31	-30.46	-34.73	-34.24	-36.65	-38.89
Rx2	-30.77	-25.21	-30.33	-42.00	-32.89	-34.15	-31.19	-37.92
Rx3	-39.28	-28.63	-25.16	-30.97	-39.00	-31.78	-30.50	-35.21
Rx4	-30.33	-34.06	-29.21	-31.43	-43.19	-36.35	-32.26	-35.50
Rx5	-33.68	-32.22	-35.53	-44.62	-27.39	-33.29	-39.88	-32.74
Rx6	-31.48	-31.21	-32.57	-36.01	-32.62	-28.43	-27.97	-37.29
Rx7	-39.46	-30.36	-28.93	-33.01	-39.73	-27.82	-29.46	-29.51
Rx8	-38.24	-33.17	-32.69	-35.98	-30.61	-37.15	-30.58	-28.45
Rx9	-32.50	-32.51	-34.94	-34.74	-30.16	-33.84	-40.27	-42.08

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx10	-33.19	-33.18	-31.71	-35.18	-33.98	-29.63	-31.59	-40.66
Rx11	-34.39	-30.11	-34.26	-34.09	-39.08	-30.33	-26.86	-29.95
Rx12	-35.41	-33.70	-35.08	-33.78	-39.90	-37.82	-30.43	-31.45
Rx13	-35.26	-39.80	-36.84	-38.67	-32.02	-32.88	-37.31	-44.30
Rx14	-38.68	-32.58	-32.69	-34.67	-32.98	-29.65	-32.29	-43.62
Rx15	-35.34	-29.87	-31.76	-38.96	-41.46	-32.05	-28.69	-31.93
Rx16	-40.20	-38.27	-39.09	-37.50	-44.12	-36.19	-34.06	-31.52
Rx17	-36.33	-36.12	-38.36	-36.83	-36.86	-41.31	-41.09	-35.71
Rx18	-36.15	-32.87	-30.48	-35.69	-37.92	-32.31	-30.04	-40.95
Rx19	-39.41	-29.88	-32.76	-36.50	-39.17	-30.41	-32.72	-38.35
Rx20	-42.78	-35.67	-32.95	-36.39	-34.74	-42.88	-39.76	-36.15
Rx21	-38.03	-37.66	-39.58	-39.25	-36.52	-40.52	-37.62	-35.74
Rx22	-36.17	-31.51	-34.80	-42.31	-37.17	-33.42	-33.64	-37.38
Rx23	-39.11	-34.96	-33.79	-41.34	-37.41	-34.13	-31.32	-39.29
Rx24	-40.62	-37.23	-41.48	-34.43	-37.36	-37.33	-40.46	-35.06
Rx25	-35.69	-41.31	-42.72	-44.19	-41.14	-39.70	-36.91	-41.09
Rx26	-41.93	-37.80	-36.89	-46.60	-40.67	-37.87	-37.55	-37.53
Rx27	-37.59	-33.30	-35.19	-39.87	-38.99	-39.07	-34.44	-40.06
Rx28	-43.26	-42.89	-36.87	-38.54	-38.10	-38.55	-47.18	-38.49
Rx29	-38.11	-40.89	-36.81	-40.92	-41.87	-43.31	-39.40	-41.99
Rx30	-38.15	-35.32	-37.75	-46.14	-39.23	-34.89	-34.89	-41.31
Rx31	-38.60	-35.91	-30.41	-38.74	-40.38	-35.29	-33.52	-44.38
Rx32	-39.49	-39.67	-36.06	-41.37	-48.22	-37.09	-40.56	-35.91
Rx33	-44.33	-43.03	-35.96	-40.16	-37.69	-45.57	-39.40	-41.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx1 ถึง Tx8 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx1	Tx2	Tx3	Tx4	Tx5	Tx6	Tx7	Tx8
Rx34	-38.10	-33.73	-35.93	-40.38	-42.67	-33.41	-36.43	-39.03
Rx35	-39.78	-33.56	-38.82	-41.83	-38.69	-36.22	-34.91	-42.64
Rx36	-40.49	-41.27	-39.83	-39.55	-34.93	-42.49	-44.91	-32.36
Rx37	-40.86	-40.24	-39.66	-39.54	-44.47	-40.85	-40.53	-39.44
Rx38	-41.63	-32.79	-31.57	-41.20	-39.59	-36.69	-36.02	-40.28
Rx39	-39.37	-32.64	-37.56	-38.91	-36.38	-33.15	-36.30	-39.41
Rx40	-43.18	-40.41	-39.09	-38.24	-39.80	-40.36	-40.17	-38.50

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx1	-33.11	-34.16	-36.37	-35.47	-36.45	-39.88	-37.46	-38.83
Rx2	-32.78	-33.53	-32.23	-35.64	-38.47	-32.81	-33.36	-38.22
Rx3	-37.01	-31.59	-33.94	-35.61	-37.29	-31.97	-33.15	-41.63
Rx4	-36.86	-35.69	-32.93	-33.89	-38.54	-36.39	-38.38	-36.04
Rx5	-31.67	-34.94	-37.25	-39.90	-34.97	-33.99	-39.76	-41.86
Rx6	-35.00	-29.91	-31.48	-35.26	-33.13	-30.24	-35.44	-36.84
Rx7	-37.33	-30.01	-27.49	-31.86	-35.97	-33.39	-29.15	-35.31
Rx8	-37.77	-37.44	-29.77	-35.26	-42.05	-38.12	-31.45	-31.92
Rx9	-29.89	-32.83	-43.45	-40.40	-31.14	-35.43	-39.41	-38.56
Rx10	-32.12	-30.52	-32.18	-37.36	-35.03	-32.97	-33.37	-41.62
Rx11	-40.06	-30.45	-29.70	-32.97	-39.48	-32.82	-31.30	-32.36
Rx12	-38.04	-37.02	-31.51	-30.96	-38.10	-37.84	-30.22	-31.58
Rx13	-29.69	-33.53	-42.40	-36.05	-31.28	-36.91	-34.85	-35.04

อัตราขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx14	-34.75	-31.49	-33.37	-36.55	-35.00	-30.41	-33.42	-42.89
Rx15	-39.77	-32.08	-29.38	-30.36	-37.39	-30.83	-29.96	-32.61
Rx16	-33.83	-38.02	-30.09	-32.99	-33.71	-38.99	-30.49	-28.56
Rx17	-33.90	-36.26	-37.48	-38.09	-29.15	-33.64	-38.87	-39.05
Rx18	-36.39	-33.06	-34.29	-38.77	-33.02	-29.36	-32.88	-36.07
Rx19	-37.27	-38.03	-29.44	-31.82	-36.65	-31.77	-26.34	-31.40
Rx20	-35.56	-40.19	-33.59	-34.73	-37.92	-38.33	-30.06	-29.64
Rx21	-36.11	-46.42	-34.09	-38.30	-32.59	-35.30	-36.29	-38.54
Rx22	-43.62	-37.36	-35.62	-36.19	-35.49	-31.15	-31.94	-39.08
Rx23	-32.79	-34.03	-39.77	-40.32	-38.66	-31.07	-27.33	-35.68
Rx24	-38.36	-37.06	-46.94	-38.72	-35.53	-36.69	-34.86	-30.01
Rx25	-36.39	-37.92	-37.18	-35.23	-37.30	-40.26	-38.21	-38.75
Rx26	-37.67	-35.44	-34.28	-36.48	-43.01	-32.22	-39.12	-43.45
Rx27	-38.47	-31.93	-32.30	-36.22	-38.92	-36.22	-35.79	-40.52
Rx28	-38.55	-39.69	-37.63	-35.94	-38.78	-39.76	-39.80	-31.44
Rx29	-36.49	-35.69	-36.20	-36.13	-36.22	-35.96	-35.36	-43.92
Rx30	-36.85	-32.89	-30.82	-38.23	-35.66	-33.94	-33.99	-42.24
Rx31	-36.03	-30.07	-31.04	-40.01	-40.46	-34.76	-29.79	-36.75
Rx32	-36.63	-38.03	-39.75	-34.31	-35.00	-39.73	-36.79	-39.47
Rx33	-40.51	-38.09	-41.12	-47.95	-42.00	-37.07	-37.47	-40.39
Rx34	-41.08	-32.87	-34.78	-39.93	-40.67	-37.79	-39.08	-43.07
Rx35	-39.92	-32.24	-32.09	-38.96	-38.62	-37.79	-32.59	-41.42
Rx36	-43.24	-39.28	-43.44	-37.79	-45.84	-40.76	-38.51	-42.34
Rx37	-38.54	-38.17	-35.61	-38.65	-36.69	-36.88	-37.81	-43.23

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx9 ถึง Tx16 (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx9	Tx10	Tx11	Tx12	Tx13	Tx14	Tx15	Tx16
Rx38	-37.82	-34.16	-35.43	-38.17	-42.37	-37.39	-36.98	-41.69
Rx39	-36.90	-35.13	-31.52	-35.87	-40.97	-37.64	-34.78	-36.61
Rx40	-38.46	-38.98	-37.82	-37.54	-40.28	-44.09	-37.81	-40.46

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx17 ถึง Tx24

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx17	Tx18	Tx19	Tx20	Tx21	Tx22	Tx23	Tx24
Rx1	-37.69	-41.07	-37.12	-40.11	-39.92	-41.13	-44.42	-42.31
Rx2	-38.81	-31.96	-30.47	-35.10	-41.59	-33.29	-39.13	-42.75
Rx3	-35.22	-30.79	-31.65	-37.09	-40.26	-35.83	-38.18	-43.42
Rx4	-36.31	-36.27	-36.48	-36.48	-44.88	-42.78	-40.95	-43.19
Rx5	-38.21	-40.31	-43.38	-35.16	-37.69	-42.36	-40.29	-45.54
Rx6	-39.52	-33.09	-34.00	-40.64	-44.78	-36.18	-36.88	-43.95
Rx7	-41.85	-33.24	-33.76	-43.12	-38.36	-37.81	-33.79	-44.47
Rx8	-33.56	-39.86	-36.06	-37.84	-37.68	-41.52	-48.49	-40.27
Rx9	-34.93	-39.74	-41.30	-41.21	-35.93	-45.17	-37.23	-39.09
Rx10	-33.14	-38.09	-39.54	-39.44	-47.86	-35.88	-37.85	-41.63
Rx11	-37.56	-36.21	-30.42	-35.21	-38.34	-39.59	-37.77	-47.47
Rx12	-38.59	-38.99	-32.99	-34.71	-39.71	-40.12	-39.44	-43.17
Rx13	-29.08	-35.60	-35.78	-40.71	-35.81	-35.72	-43.80	-43.66
Rx14	-31.87	-32.77	-33.79	-44.05	-35.61	-34.38	-32.79	-39.89
Rx15	-36.67	-32.22	-28.75	-32.89	-39.19	-31.67	-30.39	-37.25
Rx16	-39.76	-38.42	-31.01	-34.64	-38.08	-39.00	-35.07	-35.07
Rx17	-29.80	-33.21	-42.48	-34.49	-35.01	-42.66	-41.32	-42.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx17 ถึง Tx24

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx17	Tx18	Tx19	Tx20	Tx21	Tx22	Tx23	Tx24
Rx18	-30.97	-30.59	-29.98	-37.68	-39.95	-35.81	-35.08	-41.57
Rx19	-38.18	-27.96	-31.02	-32.33	-41.14	-35.03	-31.92	-34.81
Rx20	-31.76	-37.37	-31.46	-31.51	-39.08	-36.81	-33.31	-36.96
Rx21	-31.43	-37.68	-42.64	-39.78	-31.79	-34.12	-44.57	-37.71
Rx22	-36.24	-34.71	-37.53	-37.70	-34.77	-31.63	-32.26	-41.32
Rx23	-44.06	-34.68	-31.08	-33.22	-41.62	-29.97	-32.04	-34.21
Rx24	-40.29	-35.69	-33.10	-37.00	-35.93	-40.71	-36.76	-29.57
Rx25	-34.44	-33.75	-41.49	-43.33	-30.46	-33.36	-39.97	-38.83
Rx26	-34.76	-33.49	-34.64	-42.52	-34.40	-31.25	-33.60	-41.26
Rx27	-40.36	-34.69	-28.69	-34.85	-40.91	-32.32	-28.62	-31.43
Rx28	-37.93	-37.13	-34.72	-32.58	-40.84	-35.68	-32.39	-30.52
Rx29	-37.43	-44.62	-35.72	-39.10	-35.20	-35.53	-39.47	-41.92
Rx30	-45.02	-39.29	-35.44	-39.48	-38.20	-35.01	-37.77	-40.95
Rx31	-36.06	-35.58	-38.09	-42.73	-40.87	-38.65	-32.55	-31.94
Rx32	-38.45	-39.20	-42.79	-39.23	-40.27	-38.46	-36.52	-32.52
Rx33	-36.57	-35.11	-37.65	-39.91	-38.77	-43.74	-40.17	-39.10
Rx34	-40.14	-34.01	-35.49	-37.93	-41.68	-31.77	-34.13	-39.52
Rx35	-40.89	-36.84	-32.74	-38.28	-41.09	-31.39	-32.13	-36.84
Rx36	-37.03	-40.72	-37.31	-38.81	-37.42	-41.35	-41.14	-35.62
Rx37	-38.99	-39.48	-41.52	-40.95	-38.22	-38.34	-37.75	-42.39
Rx38	-39.31	-32.29	-35.34	-43.10	-39.12	-35.16	-32.59	-36.59
Rx39	-39.13	-35.33	-33.59	-38.31	-36.59	-32.19	-38.76	-36.95
Rx40	-38.29	-39.91	-39.02	-38.65	-40.01	-38.65	-37.24	-42.04

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx25 ถึง Tx32

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx25	Tx26	Tx27	Tx28	Tx29	Tx30	Tx31	Tx32
Rx1	-38.31	-39.06	-44.68	-38.88	-36.99	-36.97	-43.04	-41.29
Rx2	-46.29	-33.14	-37.09	-42.79	-39.70	-34.73	-36.55	-40.85
Rx3	-44.19	-39.79	-35.85	-37.49	-41.59	-41.38	-30.89	-41.00
Rx4	-41.66	-47.41	-42.05	-39.86	-42.15	-42.83	-45.16	-36.68
Rx5	-44.21	-39.43	-42.10	-43.94	-41.84	-40.74	-40.68	-45.38
Rx6	-43.93	-36.64	-41.26	-42.87	-40.87	-34.96	-37.33	-40.68
Rx7	-40.61	-35.46	-37.12	-42.51	-39.07	-38.85	-35.31	-43.54
Rx8	-42.08	-42.65	-45.32	-36.59	-40.60	-36.90	-42.19	-39.69
Rx9	-38.46	-39.95	-42.75	-42.83	-38.01	-38.45	-40.59	-46.32
Rx10	-40.28	-36.74	-37.76	-41.29	-37.25	-38.02	-34.59	-41.16
Rx11	-38.84	-33.96	-31.96	-35.91	-37.81	-32.99	-33.25	-42.63
Rx12	-38.69	-39.07	-39.07	-41.73	-44.86	-39.63	-39.21	-36.65
Rx13	-38.93	-42.22	-39.56	-38.84	-40.69	-42.78	-40.83	-41.05
Rx14	-39.47	-34.92	-40.99	-42.01	-41.74	-40.66	-38.64	-40.41
Rx15	-40.46	-37.79	-35.79	-37.40	-39.07	-39.57	-31.09	-40.49
Rx16	-38.89	-40.24	-40.37	-37.07	-39.54	-41.62	-39.58	-36.92
Rx17	-37.55	-37.17	-43.64	-43.68	-36.55	-46.11	-41.14	-39.17
Rx18	-35.47	-35.89	-34.59	-39.87	-44.16	-38.24	-34.07	-43.78
RX19	-42.09	-34.00	-40.37	-37.66	-37.27	-42.56	-36.79	-46.53
RX20	-38.49	-34.99	-39.53	-35.14	-38.49	-43.98	-42.58	-38.59
Rx21	-32.25	-35.30	-39.34	-40.14	-37.04	-39.02	-45.93	-42.03
Rx22	-33.79	-33.27	-36.21	-46.26	-37.15	-39.09	-38.21	-41.52
Rx23	-36.22	-33.01	-28.83	-32.18	-36.38	-35.92	-30.57	-33.76
Rx24	-41.26	-39.74	-32.37	-33.33	-36.86	-38.88	-34.49	-34.29
RX25	-33.46	-38.43	-47.68	-36.88	-32.63	-38.41	-44.92	-44.88

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx25 ถึง Tx32

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx25	Tx26	Tx27	Tx28	Tx29	Tx30	Tx31	Tx32
Rx26	-36.87	-32.33	-37.52	-44.23	-37.24	-35.92	-34.14	-43.67
Rx27	-37.89	-33.79	-33.15	-34.29	-39.81	-33.25	-34.53	-36.43
Rx28	-34.67	-40.28	-35.13	-31.48	-37.12	-42.98	-33.00	-32.66
Rx29	-31.01	-37.53	-39.93	-37.02	-31.91	-35.18	-42.05	-36.86
Rx30	-38.07	-34.84	-34.09	-42.63	-33.74	-31.93	-34.17	-41.95
Rx31	-44.41	-34.44	-33.02	-32.80	-38.88	-30.97	-30.78	-34.47
Rx32	-38.04	-36.96	-37.55	-30.61	-35.78	-40.16	-34.66	-33.17
Rx33	-32.78	-34.68	-41.64	-41.57	-32.33	-37.09	-43.74	-43.37
Rx34	-37.28	-31.20	-32.45	-39.47	-40.81	-34.48	-33.92	-43.82
Rx35	-39.49	-31.64	-30.42	-35.09	-46.47	-32.04	-31.05	-33.79
Rx36	-41.94	-42.23	-36.03	-30.84	-39.32	-43.20	-32.45	-34.34
Rx37	-38.71	-43.31	-36.52	-40.29	-32.92	-34.66	-36.73	-35.72
Rx38	-41.26	-34.68	-34.65	-39.09	-37.66	-33.89	-31.15	-36.28
Rx39	-36.11	-33.52	-35.57	-44.05	-36.16	-30.88	-35.26	-38.15
Rx40	-42.38	-36.78	-38.74	-35.59	-34.96	-33.52	-38.42	-31.85

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx1	-39.43	-40.63	-44.39	-48.09	-45.81	-42.54	-42.43	-47.37
Rx2	-39.64	-38.95	-36.56	-42.39	-41.67	-36.09	-38.50	-40.29
Rx3	-41.82	-35.85	-40.17	-45.53	-39.40	-38.64	-36.92	-38.82
Rx4	-45.71	-44.72	-41.62	-41.49	-40.89	-46.51	-39.82	-44.44
Rx5	-41.26	-47.81	-48.07	-44.59	-47.85	-42.98	-46.09	-41.64

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx6	-41.58	-38.58	-37.24	-42.84	-40.30	-38.56	-37.88	-42.44
Rx7	-46.80	-38.44	-38.77	-43.29	-39.21	-37.82	-39.41	-41.74
Rx8	-40.94	-41.44	-48.47	-37.32	-39.98	-41.60	-39.06	-44.74
Rx9	-45.30	-42.82	-44.17	-39.96	-42.46	-46.12	-44.73	-39.73
Rx10	-43.00	-38.69	-39.41	-41.69	-40.35	-38.89	-37.87	-46.23
Rx11	-41.29	-38.06	-38.19	-43.89	-36.63	-39.49	-35.10	-39.61
Rx12	-44.66	-41.81	-40.04	-41.09	-38.22	-42.45	-38.69	-37.53
Rx13	-43.31	-45.64	-47.04	-44.25	-40.68	-50.84	-51.44	-39.48
Rx14	-45.77	-40.16	-42.97	-44.16	-44.64	-38.73	-40.97	-44.88
Rx15	-41.49	-40.91	-38.91	-41.23	-38.01	-34.09	-35.49	-38.02
Rx16	-41.06	-40.66	-41.10	-38.11	-41.04	-41.57	-32.05	-43.09
Rx17	-35.18	-44.55	-45.13	-39.74	-39.51	-43.42	-33.46	-46.01
Rx18	-43.67	-36.15	-37.38	-47.06	-41.86	-35.12	-36.62	-43.26
Rx19	-36.64	-33.12	-34.47	-42.00	-42.76	-33.74	-33.79	-39.75
Rx20	-35.29	-38.18	-42.95	-35.86	-36.69	-40.42	-42.17	-38.76
Rx21	-38.21	-44.23	-47.26	-38.90	-36.43	-46.04	-43.61	-42.17
Rx22	-40.84	-36.02	-37.95	-44.05	-41.11	-38.79	-37.36	-40.57
Rx23	-37.71	-33.01	-35.88	-41.39	-38.38	-30.39	-36.44	-38.31
Rx24	-36.42	-38.15	-36.29	-39.56	-36.34	-37.26	-35.74	-35.79
Rx25	-35.15	-36.91	-44.26	-43.56	-38.89	-40.68	-44.79	-40.96
Rx26	-36.29	-33.41	-37.13	-42.28	-40.64	-36.16	-36.63	-43.99
Rx27	-42.83	-32.50	-31.09	-37.46	-33.99	-36.49	-35.56	-41.43
Rx28	-37.24	-41.36	-34.76	-35.85	-36.38	-35.78	-40.89	-38.49
Rx29	-35.82	-42.59	-41.74	-44.14	-35.87	-38.17	-40.43	-38.14

อัตราการขยายการส่งผ่านที่ด้านส่งกับด้านรับ 40×40 ตำแหน่งที่ Tx33 ถึง Tx40

(ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวิเคราะห์อัตราการขยายการส่งผ่าน (มีหน่วยเป็น dB)							
	Tx33	Tx34	Tx35	Tx36	Tx37	Tx38	Tx39	Tx40
Rx30	-39.99	-37.69	-33.48	-41.27	-37.27	-36.59	-37.43	-37.28
Rx31	-39.31	-32.38	-33.28	-38.24	-36.28	-31.13	-34.76	-37.98
Rx32	-38.13	-41.99	-35.81	-40.24	-32.65	-35.78	-35.57	-36.15
Rx33	-31.34	-36.03	-41.78	-36.26	-35.58	-42.95	-43.63	-46.74
Rx34	-34.51	-30.17	-33.15	-41.36	-41.65	-39.87	-32.31	-39.03
Rx35	-36.39	-28.93	-31.77	-33.84	-43.81	-32.49	-34.35	-37.91
Rx36	-31.68	-36.96	-32.72	-33.24	-37.00	-40.96	-38.04	-39.09
Rx37	-35.09	-37.81	-41.43	-41.52	-33.29	-35.83	-41.95	-36.44
Rx38	-39.09	-36.29	-34.23	-38.59	-38.65	-28.33	-35.79	-38.64
Rx39	-40.99	-31.94	-37.43	-38.99	-36.25	-33.43	-27.17	-42.59
Rx40	-36.16	-35.72	-40.10	-36.38	-32.23	-34.83	-35.83	-34.93