

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดียวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

นางสาวพิชญา ชัยปัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

**SINGLE ELEMENT SWITCHED-BEAM ANTENNA  
FOR WLAN**

**Pichaya Chaipanya**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2009**

# สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดียวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

---

(ผศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(ดร.พิเศษส์ ฤทธิสุนทร)

กรรมการ

---

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

---

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พินญา ชัยปัญญา : สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดี่ยวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่น  
ไร้สาย (SINGLE ELEMENT SWITCHED-BEAM ANTENNA FOR WLAN)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 139 หน้า

ปัจจุบันมีผู้ใช้งานเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) มากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเห็นได้จากการที่จุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) สำหรับเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายได้กลายเป็นส่วนประกอบที่ทุกอาคารต้องมี ดังนั้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มมากขึ้นนี้ ระบบจึงต้องมีประสิทธิภาพที่สูง วิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบคือการใช้ระบบ สายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ซึ่งระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยัง ทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ (null) หรือพูข้าง (side lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรก สอดได้ จึงทำให้ตำแหน่งที่เคยมีความแรงของสัญญาณต่ำ เช่นตามมุมของอาคาร มีความแรงของ สัญญาณมากขึ้น ส่งผลให้มีผู้ใช้งานได้ดีขึ้น โดยสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) เป็นสายอากาศเก่งประเภทหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมาก ที่ผ่านมาสายอากาศแบบ สวิตช์ลำคลื่นประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ทำให้เกิดความซับซ้อนในการสร้าง โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ต้องอาศัยการปรับเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณ ซึ่งยังทำให้เกิดความ สิ้นเปลืองในการสร้างระบบดังกล่าวอีกด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่จะ ออกแบบสายอากาศเก่งที่มีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ซับซ้อน โดยใช้สายอากาศเพียง ต้นเดี่ยวร่วมกับวงจรถออิเล็กทรอนิกส์อย่างง่ายสำหรับเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย ซึ่งจะออกแบบให้ สามารถติดตั้งไว้ที่ตัวลูกข่าย เนื่องจากการติดตั้งสายอากาศเก่งไว้ที่จุดเข้าถึงสัญญาณมีความ ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นถ้าระบบสายอากาศเก่งที่จุดเข้าถึงสัญญาณเกิดความ ผิดพลาด ความผิดพลาดนั้นจะส่งผลต่อผู้ใช้งานทุกคนในพื้นที่ที่ให้บริการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PICHAYA CHAIPANYA : SINGLE ELEMENT SWITCHED-BEAM

ANTENNA FOR WLAN. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MONTHIPPA

UTHANSAKUL, Ph.D., 139 PP.

ANTENNA MEASUREMENTS/ANTENNA CONFIGURATION PATTERNS/  
CURRENT DISTRIBUTION/MICROSTRIP ANTENNA/SHORT CIRCUIT  
CURRENTS/SWITCHES

Nowadays, utilization of Wireless Local Area Network (WLAN) systems has rapidly increased with unexpected rate as access points are installed as one of the basic infrastructure for almost every building. To support this enormous demand, smart antenna systems are considered. The smart antenna systems can eliminate interference signals by pointing nulls or sidelobes to undesired directions while maintaining maximum gain at the desired direction. As a result, signal quality is improved. The simplified type of smart antennas offering many advantages without any additional cost and complication is switched-beam antennas. They are constituted by antenna array, beamforming network and beam selector. This is considerably complex resulting in high expense. Therefore, this thesis designs a single antenna element capable of beam steering. The design aims to improve signal strength for WLAN systems.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2009

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณประพล จาระตะคุ วิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ และขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาด้านวิชาการและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา เงินอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์และการนำเสนองานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษา โดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

พิชญา ชัยปัญญา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น .....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย .....	4
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	4
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ .....	5
<b>2 ทฤษฎีการสวิตช์ลำคลื่น .....</b>	<b>6</b>
2.1 ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย.....	6

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

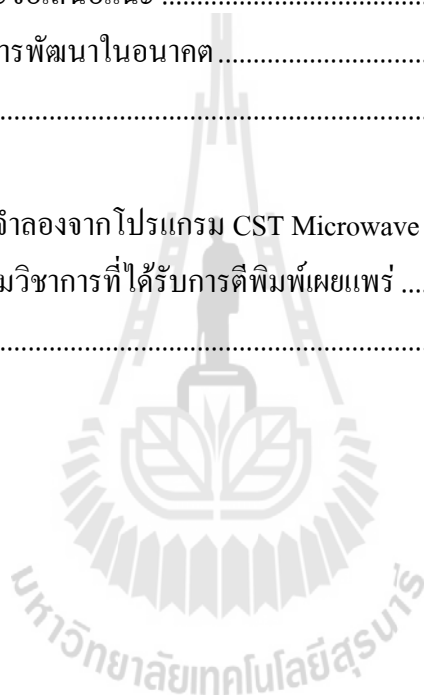
2.1.1	รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	6
2.1.2	เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย .....	8
2.1.3	มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	8
2.1.4	ข้อดีของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	10
2.1.5	ข้อเสียของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	10
2.2	ระบบสายอากาศแก่ง .....	10
2.2.1	ระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาคลิ้น .....	14
2.2.2	ระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลาคลิ้น .....	16
2.3	เทคนิคการหันลาคลิ้น .....	17
2.3.1	Butler Matrix .....	17
2.3.2	การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ .....	18
2.3.3	การปรับขนาดของสายอากาศ .....	19
2.3.4	การลัดวงจรหรือเปิดวงจร .....	19
2.4	การแมตช์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้น .....	20
2.4.1	สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด (open-circuit stub) .....	21
2.4.2	สายท่อนสั้นแบบลัดวงจร (short-circuit stub) .....	24
2.5	สรุป .....	25
3	การออกแบบสายอากาศสวิตช์ลาคลิ้นแบบต้นเดียวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย .....	27
3.1	การออกแบบสายอากาศ .....	27
3.2	การจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio .....	31
3.3	การออกแบบสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด .....	57
3.4	สรุป .....	64
4	การทดสอบและวิเคราะห์ผล .....	65
4.1	การทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	65
4.2	การทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง .....	86



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	สรุป .....	91
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	92
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	93
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	93
	รายการอ้างอิง .....	94
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการจำลองจาก โปรแกรม CST Microwave Studio .....	96
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	129
	ประวัติผู้เขียน.....	139



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าถ่วงน้ำหนักของ Butler matrix .....	18
3.1 โครงสร้างทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศแปดเหลี่ยมทั้ง 8 กรณี .....	57
4.1 ความแรงของสัญญาณ .....	87



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว .....7
2.2	การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง.....7
2.3	เครื่องหมาย Wi-Fi .....9
2.4	ระบบสายอากาศแก่ง.....11
2.5	แสดงการตกกระทบของคลื่นบนสายอากาศของระบบสายอากาศแก่ง.....12
2.6	โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น .....15
2.7	โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น .....17
2.8	ส่วนประกอบของ Butler matrix.....18
2.9	วงจรที่แสดงตัวแปรในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....22
2.10	สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด.....22
2.11	วงจรร้อยในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด.....23
2.12	วงจรสุดท้ายในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด และแบบปลายปิด .....23
2.13	สายท่อนสั้นแบบลัดวงจร .....24
2.14	วงจรร้อยในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบลัดวงจร .....24
3.1	โครงสร้างของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบแปลเหลี่ยม .....28
3.2	สายอากาศแปลเหลี่ยมที่ถูกสร้างจริง.....29
3.3	การกระจายตัวของกระแสในสายอากาศแปลเหลี่ยม .....29
3.4	ตำแหน่งการลัดวงจรของสายอากาศ.....30
3.5	ตำแหน่งของการลัดวงจรและกรณีของการสวิตซ์ลำคลื่น .....30
3.6	สายอากาศแปลเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร .....31
3.7	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปลเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร.....32
3.8	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปลเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....32

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ $\phi, \theta = 0^\circ$ .....33
3.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....33
3.11	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร .....34
3.12	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร .....34
3.13	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A .....35
3.14	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A .....36
3.15	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....36
3.16	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....37
3.17	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....37
3.18	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A .....38
3.19	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A .....38
3.20	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B .....39
3.21	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B .....40
3.22	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....40
3.23	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C .....41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C .....	42
3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	42
3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	43
3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	43
3.28 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C .....	44
3.29 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C .....	44
3.30 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D .....	45
3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D .....	46
3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	46
3.33 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E .....	47
3.34 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E .....	48
3.35 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	48
3.36 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	49
3.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.38 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E .....	50
3.39 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E.....	50
3.40 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F .....	51
3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F .....	52
3.42 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	52
3.43 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G.....	53
3.44 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G .....	54
3.45 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	54
3.46 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H.....	55
3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H.....	56
3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	56
3.49 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี A และกรณี B ที่ความถี่ 2.45 GHz .....	59
3.50 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี C และกรณี D ที่ความถี่ 2.45 GHz .....	59
3.51 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี E F G และกรณี H ที่ความถี่ 2.45 GHz .....	60
3.52 แสดงระยะ L และ l ของสายท่อนสั้น.....	64
4.1 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่ถูกสร้างจริง.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	วงจรถงการลัดวงจร โดยใช้พินไดโอด.....66
4.3	การลัดวงจรโดยใช้พินไดโอดบนสายอากาศที่สร้างจริง.....67
4.4	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมเมื่อไม่มีการลัดวงจร.....67
4.5	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมเมื่อไม่มีการลัดวงจร.....68
4.6	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D.....68
4.7	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D.....69
4.8	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H.....69
4.9	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H.....70
4.10	สายท่อนสั้นวงจรเปิดที่ใช้ร่วมกับสายอากาศแปดเหลี่ยม.....70
4.11	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้น วงจรเปิดที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D.....71
4.12	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด ที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D.....71
4.13	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้น วงจรเปิดที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H.....72
4.14	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด ที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H.....72
4.15	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....73
4.16	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 0^\circ$ .....74
4.17	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....74
4.18	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....75





## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....82
4.33	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....82
4.34	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 0^\circ$ .....83
4.35	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....83
4.36	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....84
4.37	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 0^\circ$ .....84
4.38	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....85
4.39	แผนผังและตำแหน่งการวัดสัญญาณที่ชั้น 4 อาคารวิชาการ .....86
4.40	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณ ที่สามารถรับได้.....90
4.41	ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณ ที่สามารถรับได้.....90
ก.1	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A .....97
ก.2	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A .....97
ก.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....98
ก.4	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....98

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	99
ก.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี A.....	99
ก.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A .....	100
ก.8 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B .....	101
ก.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B.....	101
ก.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	102
ก.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	102
ก.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	103
ก.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี B.....	103
ก.14 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B .....	104
ก.15 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C .....	105
ก.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C .....	105
ก.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	106
ก.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	106
ก.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

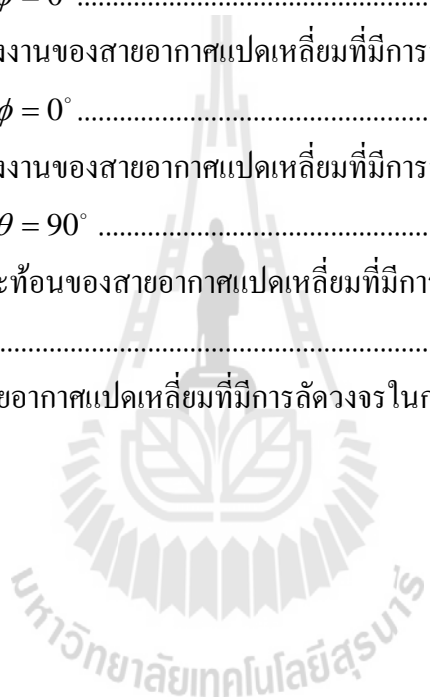
รูปที่	หน้า
ก.20 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี C .....	107
ก.21 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C .....	108
ก.22 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D .....	109
ก.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D .....	109
ก.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	110
ก.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	110
ก.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	111
ก.27 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี D .....	111
ก.28 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D .....	112
ก.29 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E .....	113
ก.30 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E .....	113
ก.31 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	114
ก.32 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	114
ก.33 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	115
ก.34 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี E .....	115

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.35	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E.....116
ก.36	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F .....117
ก.37	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F .....117
ก.38	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....118
ก.39	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....118
ก.40	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....119
ก.41	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี F .....119
ก.42	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F.....120
ก.43	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G.....121
ก.44	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G.....121
ก.45	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....122
ก.46	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....122
ก.47	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....123
ก.48	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี G.....123
ก.49	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G .....124
ก.50	สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H.....125

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.51 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H.....	125
ก.52 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	126
ก.53 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H เมื่อ $\theta, \phi = 0^\circ$ .....	126
ก.54 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H เมื่อ $\phi, \theta = 90^\circ$ .....	127
ก.55 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจร ในกรณี H.....	127
ก.56 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H .....	128



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) มากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้ว่าอาคารส่วนใหญ่ในปัจจุบันล้วนติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณ (access points) สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจนสามารถกล่าวได้ว่า จุดเข้าถึงสัญญาณสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายเริ่มกลายเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับทุกอาคาร ดังนั้นระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจึงต้องมีคุณภาพที่มากขึ้นและสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้เพียงพอวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การใช้ระบบสายอากาศเก่ง (smart antennas systems)

ระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วยสายอากาศหลาย ๆ ต้นที่นำมาจัดเรียงกันเป็นแถวลำดับทำงานร่วมกับระบบประมวลผลสัญญาณ ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์หรือพูซังไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด จึงทำให้การเกิดจุดอับสัญญาณในบางตำแหน่ง เช่นมุมของอาคาร มีความแรงของสัญญาณมากขึ้น ส่งผลให้ใช้งานได้ดีขึ้นและยังทำให้สัญญาณโดยรวมมีคุณภาพดีขึ้นอีกด้วย เนื่องจากสามารถลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดลงได้ ซึ่งระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) เป็นระบบสายอากาศเก่งประเภทหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมาก โดยที่ผ่านมาสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบด้วย สายอากาศหลาย ๆ ต้นจัดวางในรูปแบบต่าง ๆ หรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับ (antenna array) โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ซึ่งมีความซับซ้อนในการสร้างโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ต้องอาศัยการปรับเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณ ทำให้เกิดความสับสนเปลืองในการสร้างระบบดังกล่าว ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่จะออกแบบระบบสายอากาศเก่งชนิดสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ โดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวร่วมกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์อย่างง่ายสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งจะออกแบบให้สามารถติดตั้งไว้ที่ตัวลูกข่าย เนื่องจากการติดตั้ง

ระบบสายอากาศเก่งไว้ที่จุดเข้าถึงสัญญาณมีความซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นถ้าระบบสายอากาศเก่งที่จุดเข้าถึงสัญญาณเกิดความผิดพลาด ความผิดพลาดนั้นจะส่งผลต่อผู้ใช้งานทุกคนในพื้นที่ให้บริการ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า เคยมีผู้พัฒนาการสวิตช์ลำคลื่นด้วยสายอากาศเพียงคันเดียว ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Nakano, H., Eto, J., Okabe, Y., and Yamauchi, J. (2002); Chang won Jung, and Franco De Flaviis (2004) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีลักษณะเป็นก้นหอย (spiral antenna) ที่ทำจากแผงวงจรพิมพ์ โดยการสวิตช์ลำคลื่นจะกระทำผ่านการปรับความยาวของแขนแต่ละข้างของก้นหอย ซึ่งหลักการดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่ผู้ใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ เช่น การใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ตัวอย่างงานวิจัยของ Huff, G. H., Feng, J., Zhang, S., and Bernhard, J. T. (2003) เป็นสายอากาศมีลักษณะเป็นรูปก้นหอยเช่นกัน แต่สามารถสวิตช์ลำคลื่นโดยการเปิดสายวงจรหรือลัดวงจรของก้นหอยที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อต้องการสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางอื่น ก็ต้องเปิดสายวงจรหรือลัดวงจรที่ตำแหน่งใหม่ ทำให้ไม่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ในทันที อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ งานวิจัยของ Mehta, A., and Mirshekar-Syahkal, D. (2007) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีลักษณะเป็นวงรอบสี่เหลี่ยม (square loop antenna) โดยมีการสวิตช์ลำคลื่นผ่านการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวป้อนสัญญาณ ทำให้ต้องอาศัยโครงข่ายการป้อนสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง มีการแยกแยะสัญญาณในกรณีที่เกิดการป้อนและไม่เกิดการป้อนสัญญาณที่ถูกต้อง และที่สำคัญต้องมีการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในทุก ๆ ตำแหน่งที่มีการป้อนสัญญาณและไม่มีการป้อนสัญญาณ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยของ Ngamjanyaporn, P., and Krairiksh, M. (2002); Ngamjanyaporn, P., Phongcharoenpanich, C., Akkaraekthalin, P., and Krairiksh, M. (2005) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งสวิตช์ลำคลื่นโดยใช้ ไดโอดพิน (PIN diode) เพื่อควบคุมการลัดวงจร ซึ่งงานวิจัยของ Ngamjanyaporn, P., and Krairiksh, M. (2002); Ngamjanyaporn, P., Phongcharoenpanich, C., Akkaraekthalin, P., and Krairiksh, M. (2005) นี้ เป็นงานที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก และยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่สายอากาศดังกล่าวสามารถสลับลำคลื่นได้เพียงสองทิศทางที่ตั้งฉากกันเท่านั้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องการออกแบบสายอากาศคันเดียวที่มีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นได้หลากหลายทิศทาง โดยอาศัยการควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นที่ง่ายไม่ซับซ้อน เพื่อให้ได้ระบบที่มีขนาดเล็ก สามารถใช้งานได้จริงและมีต้นทุนต่ำ เหมาะกับการใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศที่มีความสามารถในการสวิตซ์ลำคลื่น โดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้
- 1.3.2 สามารถสวิตซ์ลำคลื่นโดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียว

## 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบสายอากาศหนึ่งต้นซึ่งสามารถสวิตซ์ลำคลื่นโดยการลัดวงจร
- 1.4.2 สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง และวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม
- 1.4.3 ทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมจริง

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 ออกแบบและจำลองผลสายอากาศโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
- 1.5.2 สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง และวัดแบบรูปการแผ่พลังงานเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรม
- 1.5.3 ทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสายอากาศต้นแบบ และสายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 1.5.4 วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลของสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย
  - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
  - 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศเก่ง
  - 3) ออกแบบสายอากาศที่ใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย



- 4) สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
  - 5) สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง และวัดแบบรูปการแผ่พลังงานเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม
  - 6) ทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้เครือข่ายท้องถิ่น ไร้สายทั้งสายอากาศต้นแบบ และสายอากาศแบบรอบทิศทาง
  - 7) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลของสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้
- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
  - 2) ออกแบบสายอากาศที่ใช้งานในระบบเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย และสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio
  - 3) สร้างสายอากาศตามแบบจำลอง และวัดแบบรูปการแผ่พลังงานเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม
  - 4) ทดสอบระบบในสถานการณ์จริงภายใต้เครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย
  - 5) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับผลของระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย
- ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
- 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 1) โปรแกรม CST Microwave Studio
  - 2) โปรแกรมแมทแลบ (Matlab)
  - 3) เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย (network analyzer)
- 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 1) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio
  - 2) เก็บผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน
  - 3) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบและสายอากาศแบบรอบทิศทางในสถานการณ์จริงภายใต้เครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย

#### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการทดสอบความแรงในการรับสัญญาณระหว่างสายอากาศต้นแบบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางจะถูกนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในรูปแบบของกราฟ

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้ระบบต้นแบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบต้นเดียวที่ใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้

1.7.2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย

### 1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** กล่าวถึงเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบสายอากาศเก่ง ซึ่งประกอบด้วยระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นและระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น เทคนิคการปรับลำคลื่นและการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้น (stub)

**บทที่ 3** กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบต้นเดียวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio

**บทที่ 4** กล่าวถึงผลการวัดจากห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานการโพลาไรซ์ อัตราขยาย และผลการทดสอบความแรงของสัญญาณในพื้นที่ใช้งานจริง

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผล ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการสวิตช์ล้าเคลื่อน

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบสายอากาศแก่ง ซึ่งประกอบด้วยระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ล้าเคลื่อนและระบบสายอากาศแก่งแบบปรับล้าเคลื่อน เทคนิคการปรับล้าเคลื่อนซึ่งได้จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม นอกจากนี้ยังกล่าวถึงทฤษฎีการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้นอีกด้วย

#### 2.1 ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

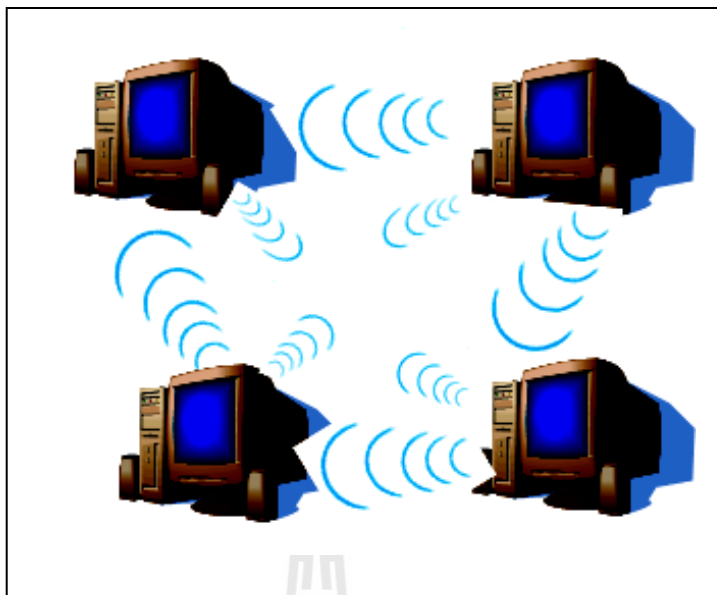
ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) เป็นระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นตัวกลางหรือช่องทางการสื่อสารระหว่างกัน ซึ่งเป็นการแทนที่ระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบมีสายระบบเดิม (Local Area Network: LAN) ที่ใช้สายในการเชื่อมต่อกัน ทำให้ไม่ต้องการเดินสายส่งสัญญาณ และยังสามารถส่งผลไปยังผู้ใช้งานให้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

##### 2.1.1 รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (peer-to-peer หรือ ad hoc mode) เป็นการเชื่อมต่อกันโดยตรงระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) เหมาะในการใช้งานเกี่ยวกับงานที่ต้องการความรวดเร็วและความง่ายในการติดตั้งเมื่อไม่มีโครงสร้างพื้นฐานรองรับในสถานที่นั้น ๆ เช่น การประชุมนอกสถานที่

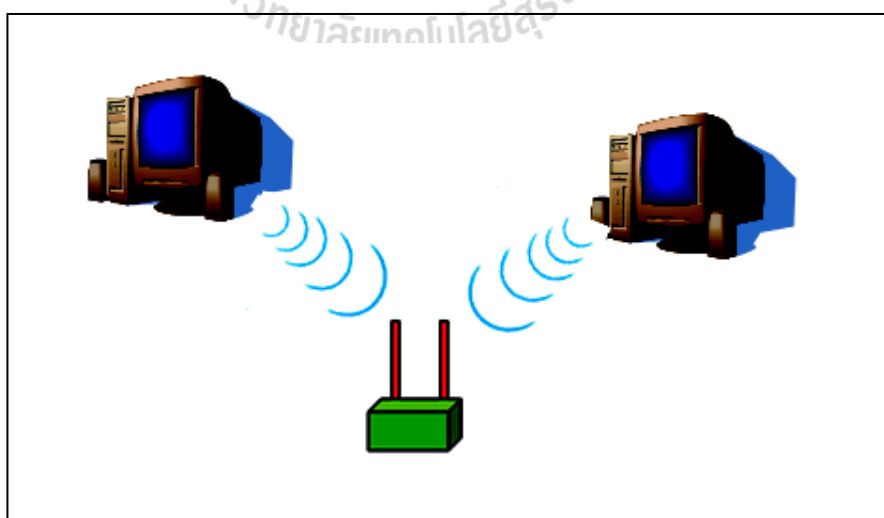
รูปที่ 2.1 เป็นการเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว ประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ทำกรติดต่อสื่อสารกันโดยไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงเครือข่าย ข้อดีคือ ติดตั้งง่าย และสะดวกต่อการบริหารจัดการ แต่การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัวมีข้อเสียในด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องจากไม่มีระบบการป้องกันในรูปแบบของบัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง (infrastructure) เป็นการเชื่อมต่อกันผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณซึ่งเป็นตัวกลางทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายไปยังเครือข่ายมีสาย โดยตัวกระจายสัญญาณหนึ่งตัวมีขีดจำกัดในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน หากมีจำนวนผู้ใช้งานมากจะมีผลทำให้ความเร็วของการสื่อสารเครือข่ายไร้สายช้าลง แต่ปัจจุบันนี้การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้างเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องมาจากจุดเด่นในด้าน



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว

ความเร็วของการสื่อสารตลอดจนความปลอดภัยในการสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง โดยในการติดต่อสื่อสารของเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะต้องผ่านจุดเชื่อมต่อสัญญาณเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ข้อดีคือ มีความปลอดภัยในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีระบบป้องกันในรูปแบบบัญชีผู้ใช้และการเข้ารหัส



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง

## 2.1.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

### 1) แบบที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุ แบ่งเป็น

Narrow Band Technology : เป็นการรับ-ส่งที่ความถี่ 902 MHz ถึง 928 MHz 2.14 MHz ถึง 2.484 MHz และ 5.725 MHz ถึง 5.850 MHz ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล ระหว่างต้นทาง กับปลายทางเพียงหนึ่งคู่เท่านั้น

Spread Spectrum Technology : เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มาก ซึ่งใช้ความถี่ ที่กว้างกว่า narrow band technology โดย spread spectrum คือ ช่วงความถี่ระหว่าง 902-928 MHz และ 2.4 – 2.484 GHz

### 2) แบบที่ใช้สัญญาณอินฟราเรดในการติดต่อ รับ-ส่งข้อมูล

ลำแสงอินฟราเรด (Infrared: IR) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่ของแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดง ที่เรามองเห็นได้ ถูกนำมาใช้เพื่อการสื่อสารระยะใกล้ จุดเด่นคือ คลื่นเดินทางเป็นแนวตรง ราคาถูก และง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้

## 2.1.3 มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

องค์กรที่กำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ (Institute of Electrical and Electronic Engineer: IEEE) ได้กำหนดมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย โดยใช้การกำหนดตัวเลข 802.11 แล้วตามด้วยตัวอักษร เช่น 802.11a 802.11b 802.11g และ 802.11n เป็นต้น ตัวอักษร ต่อท้ายจะหมายถึงกลุ่มที่กำหนดมาตรฐาน โดยในแต่ละกลุ่มจะทำการพัฒนาขีดความสามารถ ของระบบให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม

มาตรฐาน IEEE 802.11b เรียกว่า Wi-Fi หรือการสื่อสารไร้สายความเร็วสูงใช้ เทคโนโลยี (Complimentary Code Keying: CCK) ผสมกับ (Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่าน คลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า (Industrial Scientific and Medical: ISM) ซึ่งถูกจัดสรรไว้สำหรับการใช้งานในด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ โดยไม่ต้อง ขออนุญาตก่อนนำไปใช้งาน โดยอุปกรณ์ที่ใช้งานในย่านความถี่นี้ได้แก่ Bluetooth โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ทุกวันนี้จะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในนาม Wi-Fi เป็นเครื่องหมายการค้าถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม (Wireless Ethernet Compatibility Alliance: WECA) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้า ดังกล่าว หากผ่านการตรวจสอบแล้วพบว่า เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถ



รูปที่ 2.3 เครื่องหมาย Wi-Fi

นำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่น ๆ ได้จะมีเครื่องหมายดังแสดงในรูปที่ 2.3 ติดอยู่ที่อุปกรณ์ตัวนั้น ซึ่งแสดงถึงสัญลักษณ์ Wireless Fidelity: Wi-Fi หมายถึง ชุดผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่สามารถใช้ได้กับมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย (WLAN) ซึ่งอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11a ซึ่งได้ใช้เทคโนโลยี (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) โดยมีการปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นประมาณ 54 Mbps แต่จะใช้งานที่ความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะที่ใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่าน 2.4 GHz ข้อเสียของมาตรฐานนี้คือในบางประเทศยังไม่มีใบอนุญาตให้ใช้งานย่านความถี่ดังกล่าวเช่นประเทศไทย เนื่องจากย่านความถี่ 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้รัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร) ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์มาตรฐาน IEEE 802.11b อีกทั้งราคาของอุปกรณ์ค่อนข้างสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11b ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อยกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11g สนับสนุนความเร็วในช่วงเดียวกันกับ IEEE 802.11a แต่มีคุณสมบัติ backward compatibility โดยใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณแบบ OFDM อุปกรณ์ IEEE 802.11g นี้สามารถทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b ได้ ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตจึงได้ผลิตอุปกรณ์ IEEE 802.11g ให้สามารถทำงานร่วมกับ IEEE 802.11a IEEE 802.11b ส่งผลให้ปัจจุบันนี้อุปกรณ์ IEEE 802.11g ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

### 2.1.4 ข้อดีของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1) สามารถเข้าถึงบทเรียน Online ต่าง ๆ ได้ สามารถสืบค้นข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต จากจุดใดจุดหนึ่งของมหาวิทยาลัยได้ และไม่จำเป็นต้องรอเข้าใช้ห้องบริการคอมพิวเตอร์ของมหาวิทยาลัย สามารถใช้จากจุดใดก็ได้ที่สัญญาณเครือข่ายไร้สายไปถึง ช่วยให้เราสามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2) ลดค่าใช้จ่ายในการเดินสายสัญญาณให้เข้าถึงจุดบริการต่าง ๆ มากขึ้น และสามารถให้บริการในจุดบริการที่สายสัญญาณไม่สามารถเข้าถึงได้

3) สามารถเฝ้าตรวจสอบระบบและปรับเปลี่ยนแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับระบบเครือข่ายจากจุดก็ได้ ทำให้สะดวกและรวดเร็วต่อการจัดการมากขึ้น

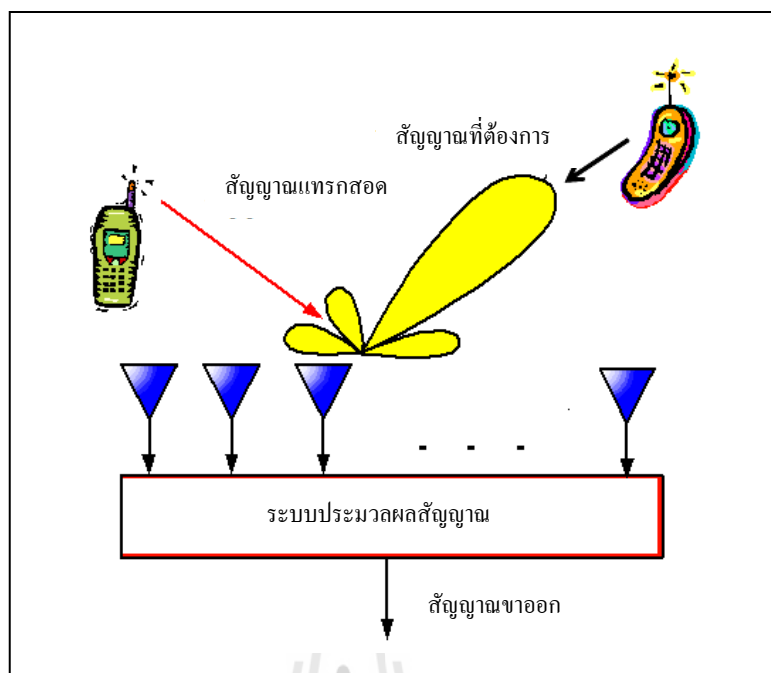
### 2.1.5 ข้อเสียของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

- 1) เกิดจุดอับสัญญาณบางจุดที่สัญญาณไร้สายเข้าไปไม่ถึง
- 2) ปัญหาทางด้านความปลอดภัยในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย
- 3) สัญญาณแทรกสอดจากคลื่นหลายวิถี และสัญญาณแทรกสอด

## 2.2 ระบบสายอากาศแก่ง

ระบบสายอากาศแก่งได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในช่วงปี พ.ศ. 2473 โดยได้พัฒนาจากเทคโนโลยีของสายอากาศแถวลำดับที่มีการปรับเฟส (phased array) ร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งเริ่มแรกมีจุดประสงค์ที่จะนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ แต่ในปัจจุบันระบบสายอากาศแก่งได้ถูกนำมาใช้ในระบบสื่อสารไร้สายอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบสายอากาศแก่งสามารถลดสัญญาณแทรกสอดและสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่มีมากได้

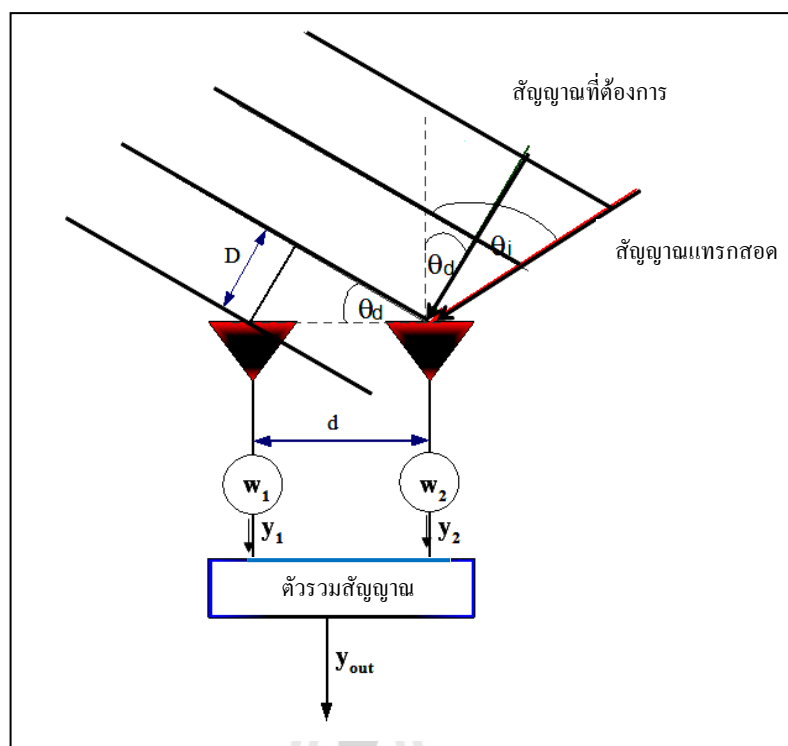
ระบบสายอากาศแก่งประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) จัดเรียงตัวในรูปแบบต่าง ๆ ทำงานร่วมกับระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ทั้งทางเวลาและทางตำแหน่ง โดยจะสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และหันจุดศูนย์หรือพูรองไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดหรือสัญญาณที่ไม่ต้องการ ดังรูปที่ 2.4 กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beam forming) ระบบสายอากาศแก่งมีกระบวนการทำงานอยู่สองกระบวนการหลัก ๆ คือ การหาทิศทางของสัญญาณและการก่อรูปลำคลื่น โดยเทคนิคการประมาณค่าของทิศทางมีอยู่หลายเทคนิค เช่น Multiple Signal Classification: MUSIC หรือ Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques: ESPRIT ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti Jr., J. C. Rappaport, T. S. (1999) หลังจากที่ได้ข้อมูลของทิศทางของสัญญาณแล้วขั้นตอนต่อไปคือการก่อรูปลำคลื่นซึ่งเป็น



รูปที่ 2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

วิธีการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยมีลำคลื่นหลักชี้ไปทางทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็หันจุดศูนย์หรือพูซังไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เองที่ส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณในระบบดีขึ้น ในส่วนของการหันลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักและจุดศูนย์ได้โดยการปรับเฟส (phase) หรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับมาได้หรือจะส่งออกผ่านสายอากาศ แลวลำดับเพื่อหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับลำคลื่นเรียกว่า การถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละตัวอาจจะมีการถ่วงน้ำหนักเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ การหันลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งสามารถอธิบายหลักการเบื้องต้นได้โดยใช้ระบบสายอากาศแลวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือ ความต่างเฟสของสัญญาณที่มาจากกระทบสายอากาศแต่ละต้น  $d$  คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ  $W_n$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่  $n$   $y_n$  คือสัญญาณขาออกของสายอากาศต้นที่  $n$   $\theta_d$  และ  $\theta_i$  คือมุมตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ จากรูปสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้





รูปที่ 2.5 แสดงการตกกระทบของคลื่นบนสายอากาศของระบบสายอากาศเก้ง

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.1)$$

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น มีค่าดังนี้

$$y_{2d} = A_d \quad (2.2)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.3)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.4)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $y_{nd}$  และ  $y_{ni}$  คือสัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่  $n$  และสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่  $n$  เมื่อผ่านตัวถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \quad (2.6)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.7)$$

แทนค่าสมการที่ (2.6) และ (2.7) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.8)$$

เราต้องการให้พจน์แรกของสมการทางขวามือ (ส่วนของสัญญาณแทรกสอด) มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดออกไป และทำให้พจน์ที่สองของสมการ (ส่วนของสัญญาณที่ต้องการ) มีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.9)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weight coefficients) ของสายอากาศทั้งสองต้นดังนี้

$$w_1 = \frac{1}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \quad (2.11)$$

$$w_1 = \frac{-e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \quad (2.12)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.11) และ (2.12) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.13)$$

นั่นหมายความว่าสัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ โดยไม่มีสัญญาณแทรกสอดปะปนอยู่เลย ขบวนการข้างต้นเป็นตัวอย่างอย่างง่ายในการถ่วงน้ำหนักของระบบสายอากาศเก่งเพื่อลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งได้ดังนี้

#### ข้อดีของระบบสายอากาศเก่ง

- 1) เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแถวลำดับ ส่งผลให้กำลังส่งของสัญญาณโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลขึ้น
- 2) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังผู้ใช้ได้โดยตรง โดยไม่ต้องส่งสัญญาณไปยังทิศทางที่ไม่มีผู้ใช้งาน จึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์
- 3) แก้ไขปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอดและคลื่นหลายวิถี (multipath) เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้

#### ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่ง

- 1) ระบบสายอากาศเก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง
- 2) สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ

ระบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched beam antennas) และระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive array antennas) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 2.2.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

สายอากาศประเภทนี้จะมีจำนวนแบบรูปลำคลื่นจำกัด และจะหันลำคลื่นได้โดยการสวิตช์ สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น

หลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ

- 1) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
- 2) ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นหนึ่งลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด
- 3) จะใช้ลำคลื่นที่เลือกไว้เมื่อผู้ใช้อยู่กับที่

4) เปลี่ยนล้าคลื่นเดิมไปยังล้าคลื่นใหม่ที่มีความแรงของสัญญาณที่ดีกว่าเมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

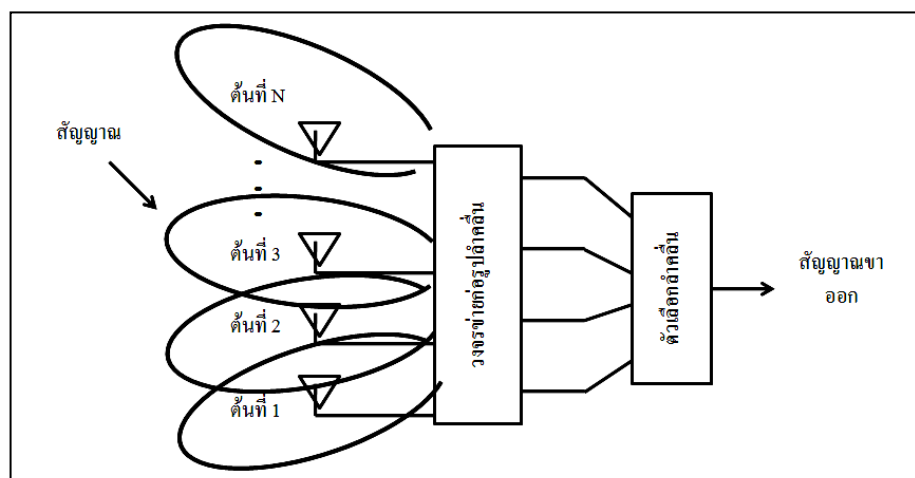
*ข้อดีของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ล้าคลื่น*

- 1) มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบสายอากาศเก่งแบบปรับล้าคลื่น
- 2) ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ล้าคลื่นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศเก่งแบบปรับล้าคลื่น ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Seungwon, C., Shim, D., and Sarkar, T. K. (1999); Peng, M., and Wang, W. (2005)

*ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ล้าคลื่น*

- 1) มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างล้าคลื่น
- 2) การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด
- 3) ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน หรือมีสัญญาณมาถึงจากหลาย ๆ ทิศทาง อาจเกิดความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างให้เห็นว่า เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศสายอากาศแต่ละต้นจะส่งค่าไปยังโครงข่ายก่อรูปล้าคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักและสร้างล้าคลื่นไปยังทิศทางที่กำหนดไว้ โดยตัวเลือกล้าคลื่นทำหน้าที่เลือกล้าคลื่นที่ให้สัญญาณแรงที่สุด ทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสวิตซ์ล้าคลื่นคือการใช้ Butler Matrix เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ล้าคลื่น

## 2.2.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

สายอากาศประเภทนี้มีจำนวนแบบรูปลำคลื่นไม่จำกัด และสามารถปรับเปลี่ยนแบบรูปได้ตลอดเวลา หลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สัญญาณจะถูกส่งมาที่ส่วนอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ โดยระบบจะทำงานแบบนี้วนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

สำหรับอัลกอริทึมแบบปรับตัว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ อัลกอริทึมปรับตัวแบบมองไม่เห็น (blind adaptive algorithm) และมอดูลัสคงที่กำลังสองที่น้อยที่สุด (least squares constant modulus) ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Agee, B. (1989); Frost, L. III (1972)

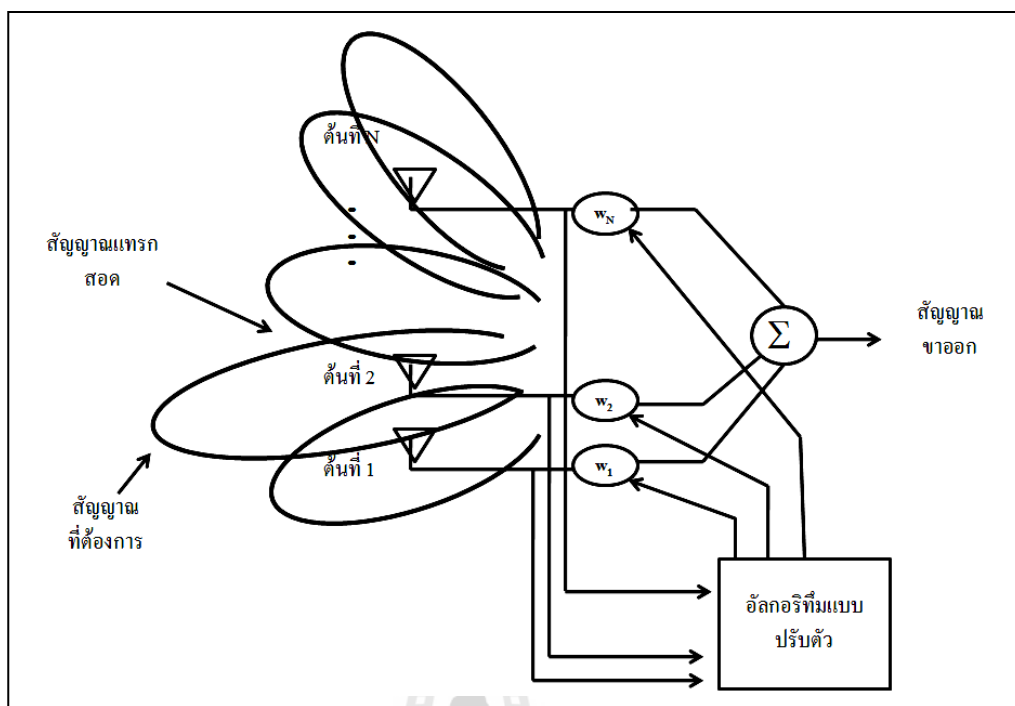
### ข้อดีของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น

1) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio: SNR) ที่ดี

- ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น
- 1) มีความซับซ้อนสูงเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น
  - 2) ต้องการสัญญาณอ้างอิงที่ดีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
  - 3) ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง

รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นจะถูกนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก จากนั้นก็จะถูกส่งไปยังตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อนำค่าที่ได้ไปคูณกับสัญญาณที่เข้ามา ทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ค่าที่ดีที่สุดแล้วจึงสร้างลำคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด

ในหัวข้อที่ 2.2.1 และ 2.2.2 ได้อธิบายหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวไปแล้ว จากสองหัวข้อดังกล่าวจะเห็นว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจและในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงเทคนิคการหันลำคลื่นของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น



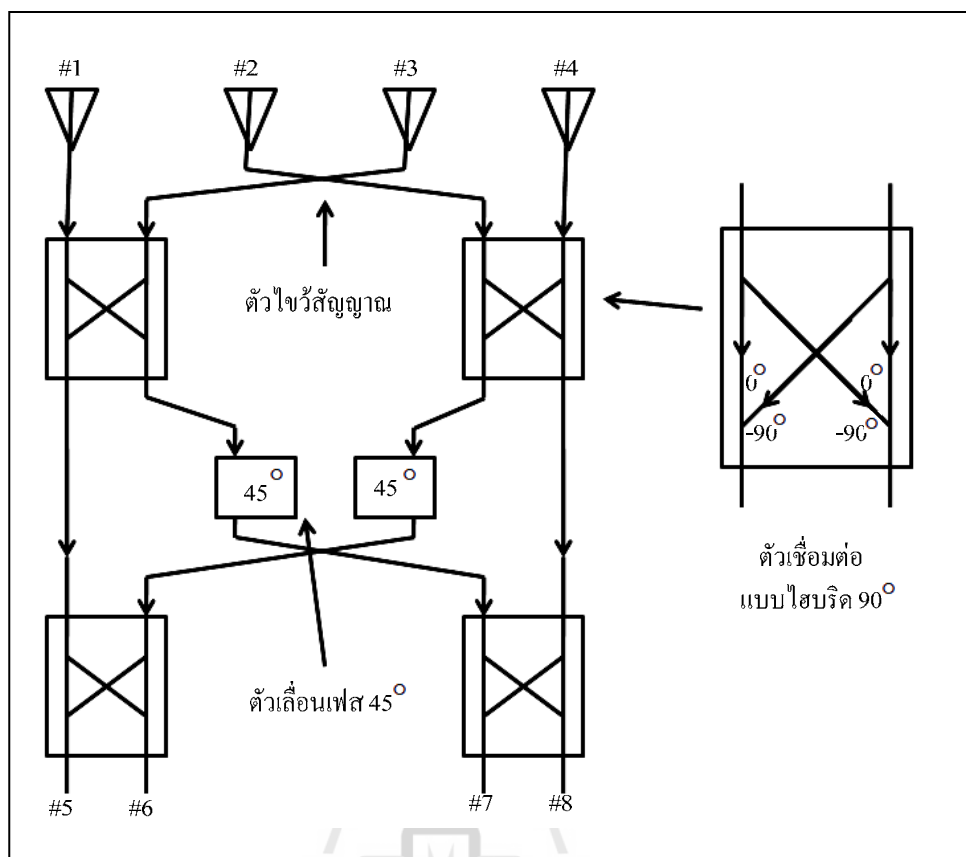
รูปที่ 2.7 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแ่งแบบปรับค่าคลื่น

### 2.3 เทคนิคการหันลำคลื่น

จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงข้อดีของระบบสายอากาศแ่งที่สามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยการหันลำคลื่นของระบบสายอากาศแ่งนั้นทำได้หลายเทคนิค ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างเทคนิคการหันลำคลื่นของระบบสายอากาศแ่งทั้งหมด 4 เทคนิคคือ Butler Matrix การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การปรับขนาดของสายอากาศและการลัดวงจรหรือเปิดวงจร

#### 2.3.1 Butler Matrix

รูปที่ 2.8 แสดงถึงส่วนประกอบของ Butler matrix ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ 4 ต้น วางเรียงกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้น ตัวไขว้สัญญาณ (cross over) ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด  $90^\circ$  ( $90^\circ$  hybrid coupler) และตัวเลื่อนเฟส  $45^\circ$  โดยหลักการทำงานของ Butler Matrix คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด  $90^\circ$  และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส  $45^\circ$  แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด  $90^\circ$  อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สร้างลำคลื่นที่มีลำคลื่นหลักหันไปที่  $138.6^\circ$   $104.5^\circ$   $75.5^\circ$  และ  $135^\circ$  ดูได้จากตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของ Butler matrix

ตารางที่ 2.1 ค่าถ่วงน้ำหนักของ Butler matrix

สายอากาศ ต้นที่	#1	#2	#3	#4	ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ความต่าง เฟส
#5	$0^\circ$	$-45^\circ$	$-90^\circ$	$-135^\circ$	$104.5^\circ$	$-45^\circ$
#6	$-90^\circ$	$45^\circ$	$-180^\circ$	$-45^\circ$	$41.4^\circ$	$135^\circ$
#7	$-45^\circ$	$-180^\circ$	$45^\circ$	$-90^\circ$	$138.6^\circ$	$-135^\circ$
#8	$-135^\circ$	$-90^\circ$	$-45^\circ$	$0^\circ$	$75.5^\circ$	$45^\circ$

### 2.3.2 การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า เคยมีผู้พัฒนาการสวิตซ์ลำคลื่นด้วยสายอากาศเพียงต้นเดียวด้วยการเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Mehta, A., and Mirshekar-Syahkal, D. (2007) โดยสายอากาศมีลักษณะเป็นวงรอบสี่เหลี่ยมหรือสายอากาศ

แบบปวง (square loop antenna) มีจุดป้อนสัญญาณในแต่ละด้านของสี่เหลี่ยมด้านละ 1 จุด ดังนั้นจะมีจุดป้อนสัญญาณทั้งหมด 4 จุด ทำให้ได้ลำคลื่นทั้งหมด 4 ทิศทางคือ  $45^\circ$   $135^\circ$   $225^\circ$  และ  $315^\circ$  แต่การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณต้องอาศัยโครงข่ายการป้อนสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง มีการแยกแยะสัญญาณในกรณีที่เกิดการป้อนและไม่เกิดการป้อนสัญญาณที่แม่นยำ และที่สำคัญต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในกรณีที่จุดป้อนสัญญาณต่างกัน ทำให้ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง

### 2.3.3 การปรับขนาดของสายอากาศ

จากงานวิจัยของ Nakano, H., Eto, J., Okabe, Y., and Yamauchi, J. (2002); Chang won Jung, and Franco De Flaviis (2004) สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้โดยการปรับขนาดของสายอากาศ โดยสายอากาศมีลักษณะเป็นรูปก้นหอย ซึ่งทิศทางของลำคลื่นจะเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนความยาวของแขนแต่ละข้างของก้นหอยก้นหอย โดยงานวิจัยนี้จะได้ลำคลื่นออกมา 2 รูปแบบ คือลำคลื่นตามแกน (axial-beam) และลำคลื่นเอียง (tilted-beam) แต่หลักการดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ เนื่องจากต้องทำการปรับความยาวแขนแต่ละข้างของก้นหอยตลอดเวลา

### 2.3.4 การลัดวงจรหรือเปิดวงจร

ในงานวิจัยของ Huff, G. H., Feng, J., Zhang, S., and Bernhard, J. T. (2003); Mehta, A., and Mirshekar-Syahkal, D. (2004) ได้ทำการสวิตช์ลำคลื่นด้วยการลัดวงจรบนสายอากาศรูปก้นหอย ซึ่งทำการลัดวงจร 2 แบบ คือลัดวงจรเพียงตำแหน่งเดียว และลัดวงจร 2 ตำแหน่งพร้อมกัน จะได้ทิศทางของลำคลื่นที่ต่างกัน

งานวิจัยของ Mehta, A., Mirshekar-Syahkal, D., and Nakano, H. (2006) เป็นสายอากาศรูปก้นหอยเช่นกัน ทำการสวิตช์ลำคลื่นด้วยการเปิดหรือปิดวงจร โดยใช้ PIN เป็นตัวควบคุมการเปิดปิดวงจร ในงานนี้มี PIN อยู่ 4 จุด ทำให้มีกรณีการเปิดปิดวงจรทั้งหมด 16 กรณี สุดท้ายแล้วจะได้ทิศทางของลำคลื่น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีทิศทางของลำคลื่นอยู่ที่  $39^\circ$  และกลุ่มที่สองมีทิศทางของลำคลื่นอยู่ที่  $5^\circ - 12^\circ$

งานวิจัยของ Ngamjanyaporn, P., and Krairiksh, M. (2002); Ngamjanyaporn, P., Phongcharoenpanich, C., Akkarackthalin, P., and Krairiksh, M. (2005) เป็นสายอากาศสี่เหลี่ยม ทำการสวิตช์ลำคลื่นด้วยการเปิดหรือปิดวงจร ตัวควบคุมการเปิดปิดวงจรคือไดโอดพิน ซึ่งอยู่ที่ขอบแต่ละด้านของสายอากาศ งานวิจัยนี้ทำการสวิตช์ได้ 2 แบบคือ แบบแรกทำการปิดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน และเปิดวงจรด้านที่เหลือ อีกแบบหนึ่งทำตรงข้ามข้าม



กับแบบแรก ทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 2 แบบ แบบแรกทิศทางของลำคลื่นหันไปที่  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  แบบที่สองทิศทางของลำคลื่นหันไปที่  $90^\circ$  และ  $270^\circ$

## 2.4 การแมตช์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้น

เนื่องจากการที่สายอากาศจะสามารถรับหรือส่งสัญญาณได้ดีก็ต่อเมื่อสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมากที่สุด ซึ่งในบางครั้งสายอากาศที่สร้างขึ้นก็จะมีอิมพีแดนซ์ที่ไม่เข้าใกล้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเลย ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นๆ ลดลงเนื่องจากเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องทำการแมตช์อิมพีแดนซ์ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมากที่สุด ซึ่งวิธีการแมตช์อิมพีแดนซ์มีอยู่หลายวิธี ในบทนี้จะยกตัวอย่างการแมตช์อิมพีแดนซ์ด้วยการใช้สายท่อนสั้น โดยการหาระยะต่าง ๆ ของสายท่อนสั้นนั้นสามารถทำได้โดยคำนวณอิมพีแดนซ์ด้านเข้าหรือใช้สมิทชาร์ต (smith chart) ก็ได้

การที่จะเกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อยที่สุดอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมากที่สุด ซึ่งปกติจะมีค่าเป็น  $50 \Omega$  ดังนั้นหากต้องการแมตช์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้นก็สามารถทำได้โดยกำหนดให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าเป็น  $50 \Omega$  จากนั้นก็จะสามารถคำนวณหาระยะต่าง ๆ ของสายท่อนสั้นได้ จากรูปที่ 2.9 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าหาได้จาก

$$Z_{input} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta L}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} \quad (2.14)$$

โดย  $Z_{input}$  คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า  $Z_0$  คืออิมพีแดนซ์ของสายส่ง (ในที่นี้สายส่งคือสายที่ใช้ทำสายท่อนสั้น)  $Z_L$  คืออิมพีแดนซ์ของโหลด (ในที่นี้โหลดคือสายอากาศ)  $\beta$  คือค่าคงตัวของเฟส (phase constant) มีค่าเท่ากับ  $2\pi/\lambda$  โดย  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน และ  $L$  คือระยะห่างจากโหลด

ทำให้เป็นสายท่อนสั้นด้วยการต่อวงจรขนานเข้าไป โดยวงจรที่ใช้ต่อจะมี 2 แบบคือวงจรเปิดทำให้ได้สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด (open-stub) และลัดวงจรทำให้ได้สายท่อนสั้นแบบลัดวงจร (short-stub) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 2.4.1 สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด (open-circuit stub)

สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดเป็นการต่อสายส่งปลายเปิดขนานกับสายส่งตัวเดิม รูปที่ 2.10 แสดงวงจรทั้งหมดของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด เมื่อนำมาพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าดูได้จากรูปที่ 2.11 จะได้

$$Z_{in1} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.15)$$

$$Z_{in2} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.16)$$

$$Z_{in2} = Z_0 \frac{1 + j \frac{Z_0}{Z_L} \tan \beta l}{\frac{Z_0}{Z_L} + j \tan \beta l} \quad (2.17)$$

$Z_L$  ในสมการที่ (2.17) เป็นวงจรเปิด ดังนั้นจึงมีค่าเป็นอนันต์ (infinity) ทำให้

$$Z_{in2} = \frac{Z_0}{j \tan \beta l} \quad (2.18)$$

$$Z_{in} = Z_{in1} // Z_{in2} \quad (2.19)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_{in1} Z_{in2}}{Z_{in1} + Z_{in2}} \quad (2.20)$$

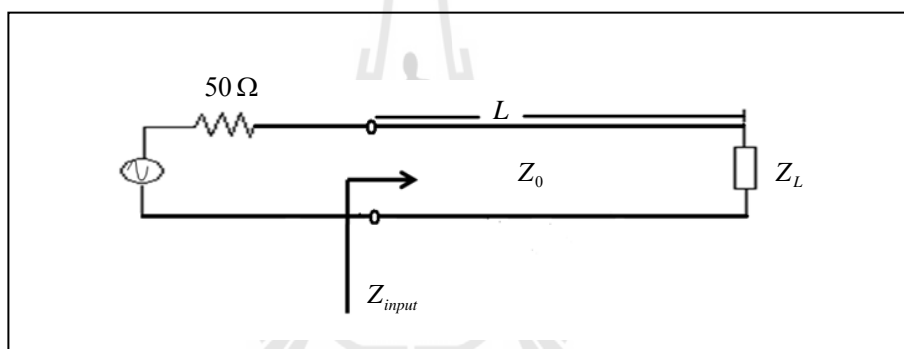
แทนสมการที่ (2.15) และ (2.18) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$Z_{in} = \frac{Z_0 Z_0 (Z_L + jZ_0 \tan \beta L)}{jZ_0 \tan \beta L - Z_L \tan \beta L \tan \beta L} \quad (2.21)$$

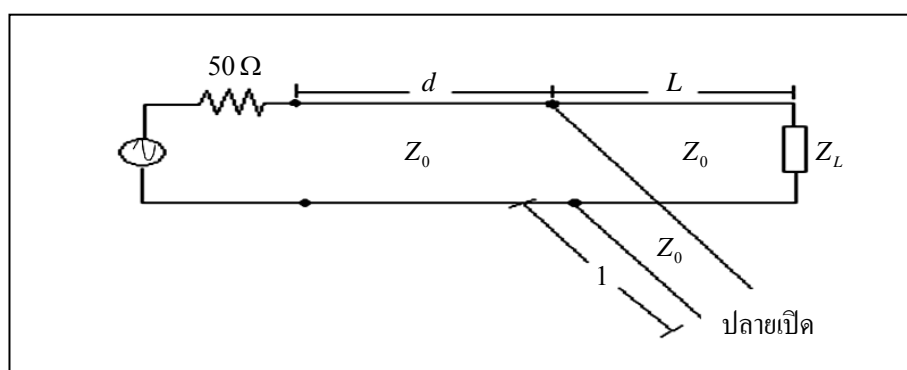
$$Z_0 \frac{jZ_L \tan \beta L - Z_0 \tan \beta L \tan \beta L + Z_0 + jZ_L \tan \beta L}{jZ_0 \tan \beta L - Z_L \tan \beta L \tan \beta L}$$

$$Z_{in} = \frac{Z_0 (Z_L + jZ_0 \tan \beta L) (jZ_0 - Z_L \tan \beta L)}{(jZ_0 - Z_L \tan \beta L) (Z_0 - Z_0 \tan \beta L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta L)} \quad (2.22)$$

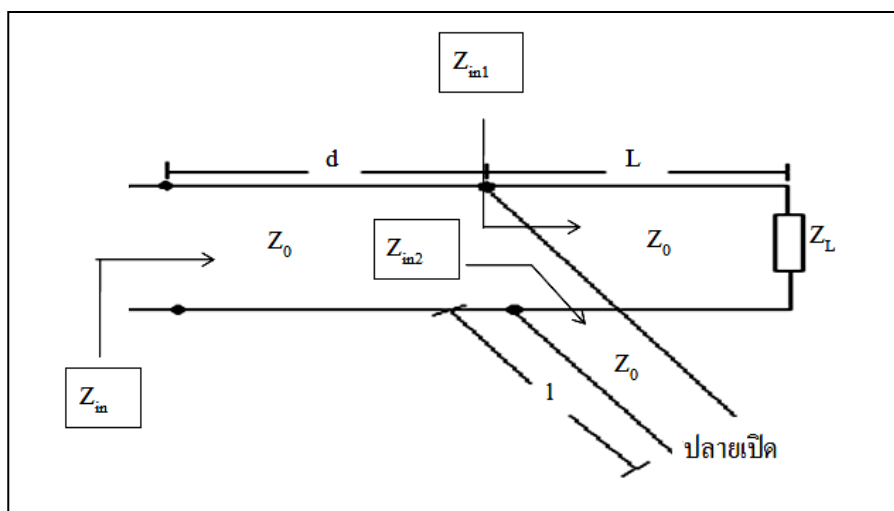
$$Z_{in} = \frac{Z_0 (Z_L + jZ_0 \tan \beta L)}{Z_0 - Z_0 \tan \beta L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta L} \quad (2.23)$$



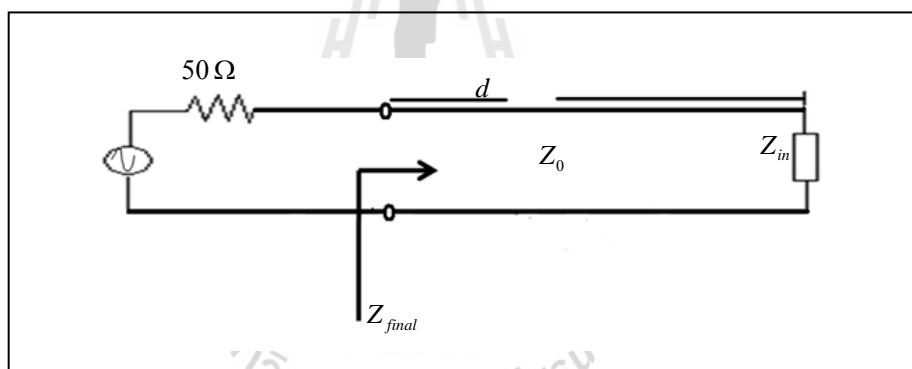
รูปที่ 2.9 วงจรที่แสดงตัวแปรในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้า



รูปที่ 2.10 สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด



รูปที่ 2.11 วงจรช่วยในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด



รูปที่ 2.12 วงจรสุดท้ายในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด และแบบปลายปิด

รูปที่ 2.12 แสดงถึงวงจรสุดท้ายในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด จากรูปนี้จะได้

$$Z_{input} = Z_0 \frac{Z_{in} + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + jZ_{in} \tan \beta d} \quad (2.24)$$

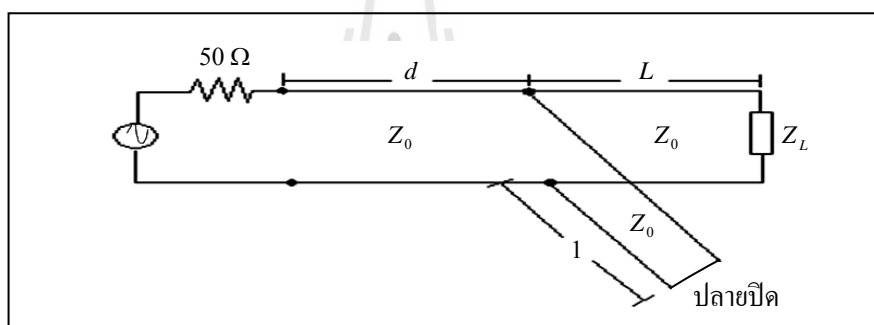
เมื่อ  $Z_{in}$  หาได้จากสมการที่ (2.23)

ดังนั้นหากต้องการให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมากที่สุด จะต้องกำหนดให้  $Z_{input}$  มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย จากนั้นจึงทำการหาความยาวต่างๆของสายท่อนสั้นได้

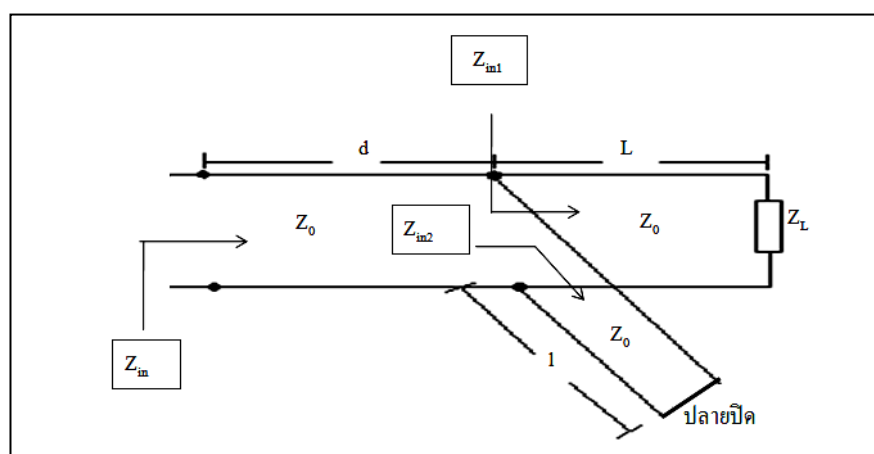
#### 2.4.2 สายท่อนสั้นแบบลัดวงจร (short-circuit stub)

สายท่อนสั้นแบบลัดวงจรเป็นการต่อสายส่งปลายปิดขนานกับสายส่งตัวเดิม รูปที่ 2.13 แสดงวงจรทั้งหมดของสายท่อนสั้นแบบลัดวงจร และรูปที่ 2.14 แสดงวงจรย่อยเพื่อนำมาพิจารณาหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ซึ่งจะได้

$$Z_{in1} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta L}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.13 สายท่อนสั้นแบบลัดวงจร



รูปที่ 2.14 วงจรย่อยในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบลัดวงจร

$$Z_{in2} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.26)$$

$Z_L$  ในสมการที่ (2.26) เป็นวงจรปิด ดังนั้นจึงมีค่าศูนย์ ทำให้

$$Z_{in2} = jZ_0 \tan \beta l \quad (2.27)$$

แทนสมการที่ (2.26) และ (2.28) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$Z_{in} = \frac{Z_0 (Z_L + jZ_0 \tan \beta L) jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} \quad (2.28)$$

$$Z_0 \left( \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta L}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} + j \tan \beta l \right)$$

$$Z_{in} = \frac{jZ_0 \tan \beta l (Z_L + jZ_0 \tan \beta L)}{Z_L + jZ_0 \tan \beta L + jZ_0 \tan \beta l - Z_L \tan \beta L \tan \beta l} \quad (2.29)$$

และสุดท้ายจะได้วงจรสุดท้ายในการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายท่อนสั้นแบบลัดวงจร เช่นเดียวกับแบบวงจรเปิด แสดงในรูปที่ 2.12 จะได้

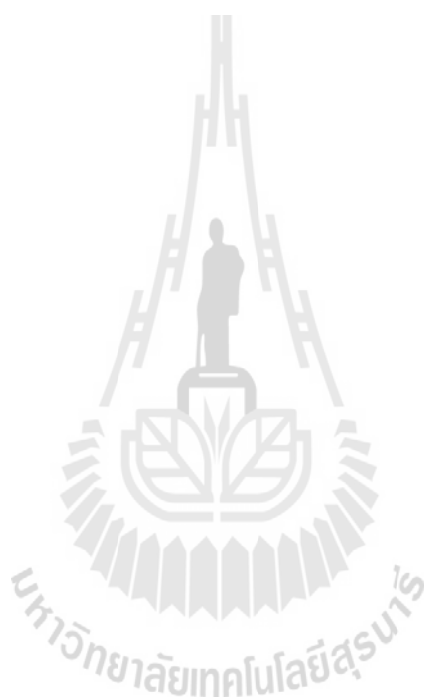
$$Z_{input} = Z_0 \frac{Z_{in} + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + jZ_{in} \tan \beta d} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $Z_{in}$  หาได้จากสมการที่ (2.29) และหาความยาวต่าง ๆ ของสายท่อนสั้นได้โดยการแทนค่า  $Z_{input}$  ให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

## 2.5 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาในบทนี้จะเห็นว่า สายอากาศแบบสวิตช์ลาคี่มีความซับซ้อนในการสร้างลาคี่และหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการสร้างและติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลาคี่ยังต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว

อีกด้วย ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ล้าคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่ถูกสนใจ และจากปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า การสวิตช์ล้าคลื่นสามารถทำได้ด้วยสายอากาศเพียงต้นเดียว เมื่อเทียบกับสายอากาศแบบแถวลำดับแล้วการใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวทำให้ระบบมีขนาดที่เล็กกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำกว่าด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศสวิตช์ล้าคลื่นแบบต้นเดียวซึ่งสามารถนำไปใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย



### บทที่ 3

## การออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดี่ยว สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดี่ยวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย โดยออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz สายอากาศที่ออกแบบแล้วจะถูกจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 3.1 การออกแบบสายอากาศ

จากที่กล่าวในบทที่ 2 สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัวและการใช้สายอากาศเพียงต้นเดี่ยว ระบบจะมีขนาดเล็กกว่าการใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำกว่าด้วย งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะออกแบบและสร้างสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดี่ยวที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าเคยมีผู้พัฒนาการสวิตช์ลำคลื่นด้วยสายอากาศเพียงต้นเดี่ยว ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.2 ถึง 2.2.4 โดยหลักการในหัวข้อที่ 2.2.2 และ 2.2.3 ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ เช่น การใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่น ไร้สาย หรือมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากเกินไป ส่วนในหัวข้อที่ 2.2.4 เป็นสายอากาศที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สวิตช์ลำคลื่นโดยใช้ ไดโอดพินควบคุมการลัดวงจร ซึ่งเป็นงานที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก และยังใช้ต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก แต่สายอากาศนี้สามารถสลับลำคลื่นได้เพียงสองทิศทางที่ตั้งฉากกันเท่านั้น

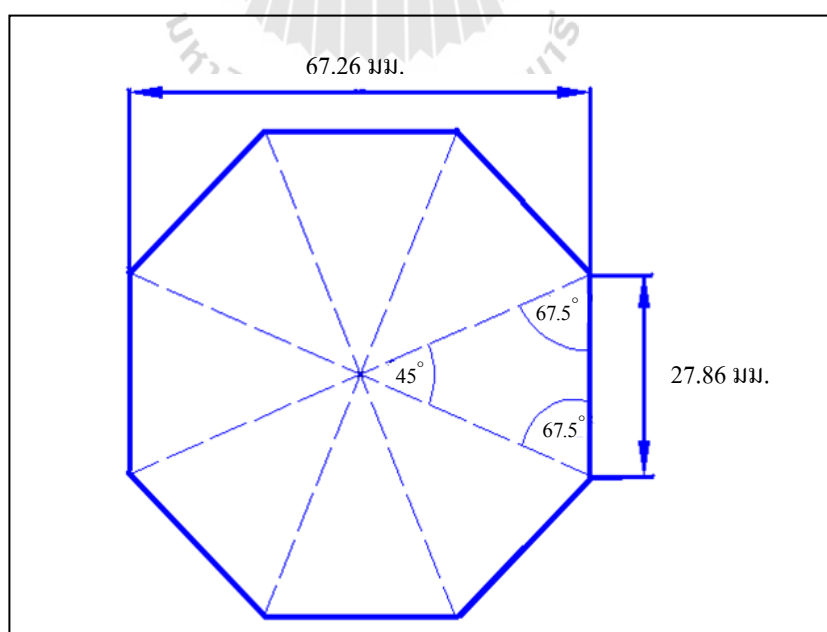
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องการออกแบบสายอากาศต้นเดี่ยวที่มีความสามารถในการสวิตช์ลำคลื่นได้หลากหลายทิศทาง โดยอาศัยการควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นที่ง่าย ระบบมีขนาดเล็กสามารถใช้งานได้จริงและมีต้นทุนต่ำ



จากงานวิจัยของ Ngamjanyaporn, P., and Krairiksh M. (2002); Ngamjanyaporn, P., Phongcharoenpanich, C., Akkaraekthalin, P., and Krairiksh, M. (2005) ออกแบบให้สายอากาศมีด้านกว้างและด้านยาวเท่ากัน คือ  $\lambda/2$  ดังนั้นสายอากาศมีพื้นที่ทั้งหมด  $\lambda^2/4$  ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบสายอากาศให้มีพื้นที่เท่ากับ  $\lambda^2/4$  เช่นกัน แต่เป็นสายอากาศรูปแปดเหลี่ยมออกแบบที่มีความถี่ 2.45 GHz ซึ่งสายอากาศรูปแปดเหลี่ยมนี้สามารถแบ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีพื้นที่เท่ากันทั้งหมด 8 ชิ้น แต่ละชิ้นสูง 33.63 มม. กว้าง 27.86 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1

สำหรับวัสดุที่ใช้ทำสายอากาศคือ แผงวงจรพิมพ์ (Printed-Circuit Board : PCB) ซึ่งเป็นแผ่นที่มีทองแดงอยู่ด้านบนและล่าง โดยมีวัสดุที่เป็นฉนวนชั้นกลาง โดยวัสดุนี้จะมีน้ำหนักเบาและค่าความนำไฟฟ้าหลายแบบ สำหรับสายอากาศในงานวิจัยนี้จะใช้แผงวงจรพิมพ์แบบเรซินสังเคราะห์ (epoxy) ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผงวงจรพิมพ์เท่ากับ 1.6 มม. ป้อนสัญญาณผ่านหัวต่อแบบ SMA ตรงกลางแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงรูปสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้นจริงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

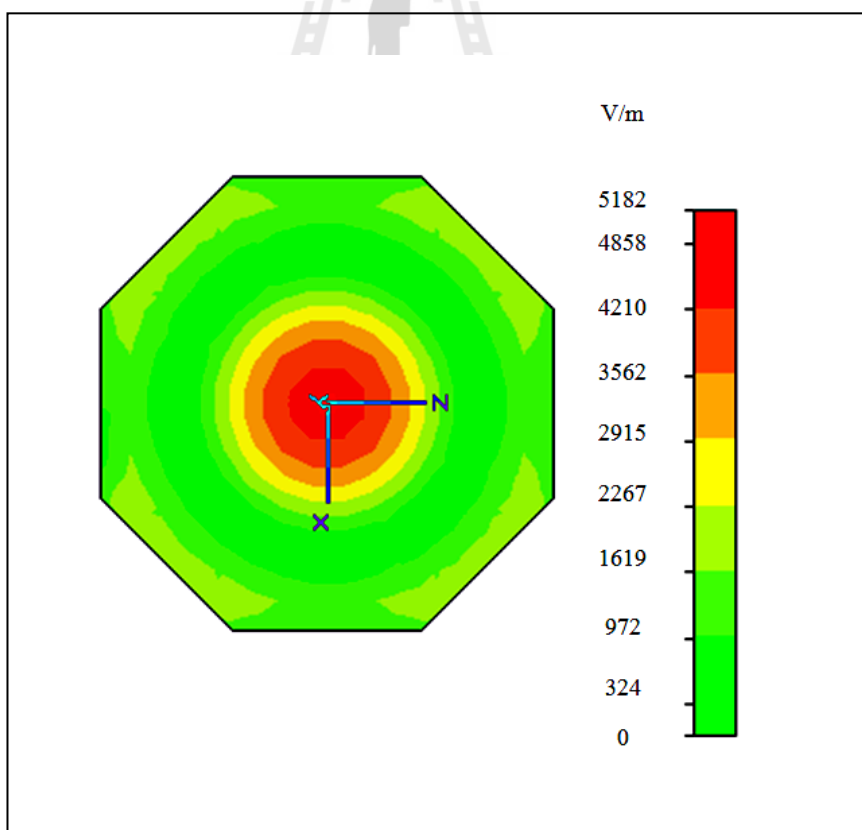
สายอากาศที่ออกแบบจะถูกนำไปจะลองผลใน โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อการกระจายตัวของกระแสในสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กระแสจะมีกระจายตัวมากที่สุดที่ตรงกลางแผ่น บริเวณจุดป้อนสัญญาณ ส่วนตรงบริเวณขอบของสายอากาศจะมีการกระจายตัวของกระแสน้อยที่สุด



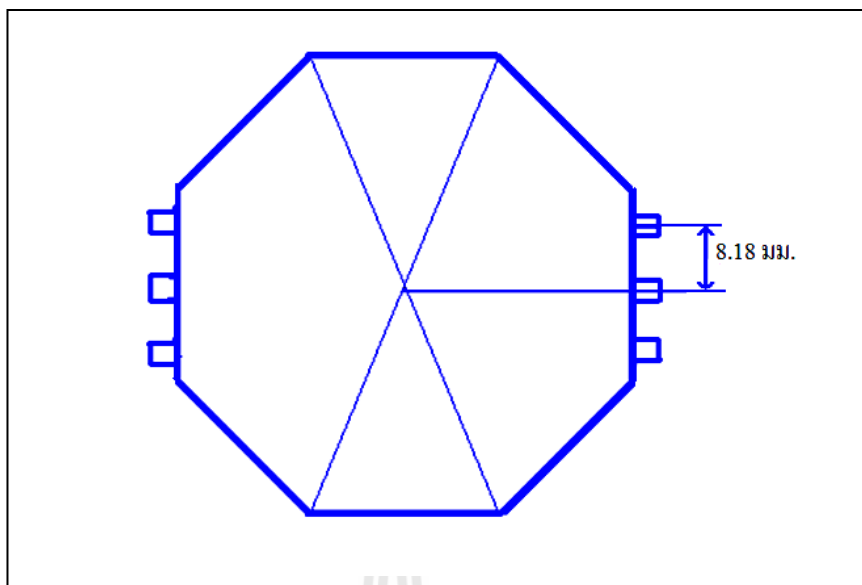
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศสวิตช์ลาคัสแบบแปดเหลี่ยม



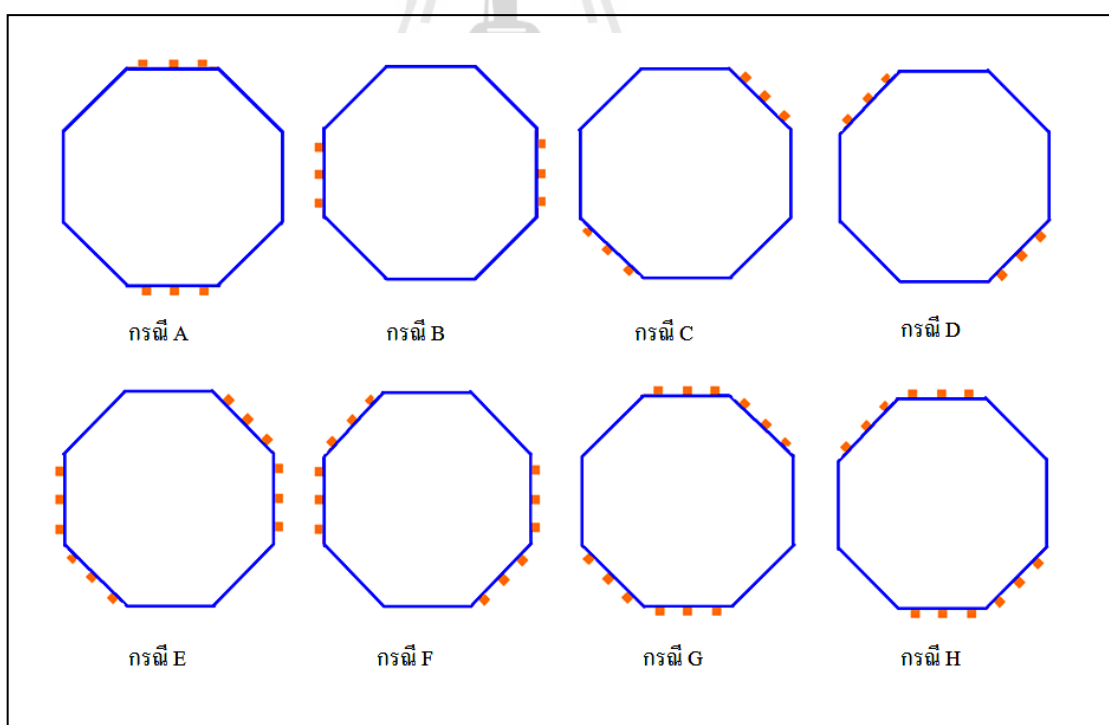
รูปที่ 3.2 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่ถูกสร้างจริง



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของกระแสในสายอากาศแปดเหลี่ยม



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการตัดวงจรรของสายอากาศ



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของการตัดวงจรรและกรณีของการสวิตซ์ลำคลื่น

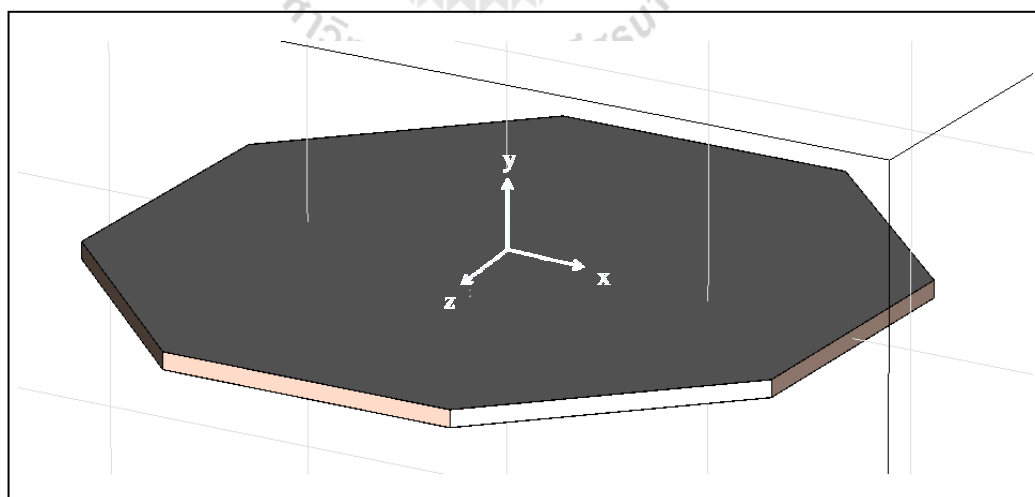
จากรูปที่ 3.3 เราจะเลือกจุดที่มีการกระจายตัวของกระแสต่ำสุดเป็นตำแหน่งในการลัดวงจร เนื่องจากการลัดวงจรที่บริเวณดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กน้อยที่สุด ในแต่ละด้านของสายอากาศจะถูกลัดวงจร 3 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 8.18 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทำการลัดวงจรทั้งหมด 8 กรณี แสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าการลัดวงจรสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบแรกจะลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศทั้งหมด 2 ด้าน โดยลัดวงจรด้านตรงข้ามกัน แบบที่สองเป็นการผสมกันของแบบแรกคือ ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศทั้งหมด 4 ด้าน ดังนั้นจึงทำให้ลัดวงจรได้ทั้งหมด 8 กรณีคือ กรณี A ถึงกรณี H นั่นเอง

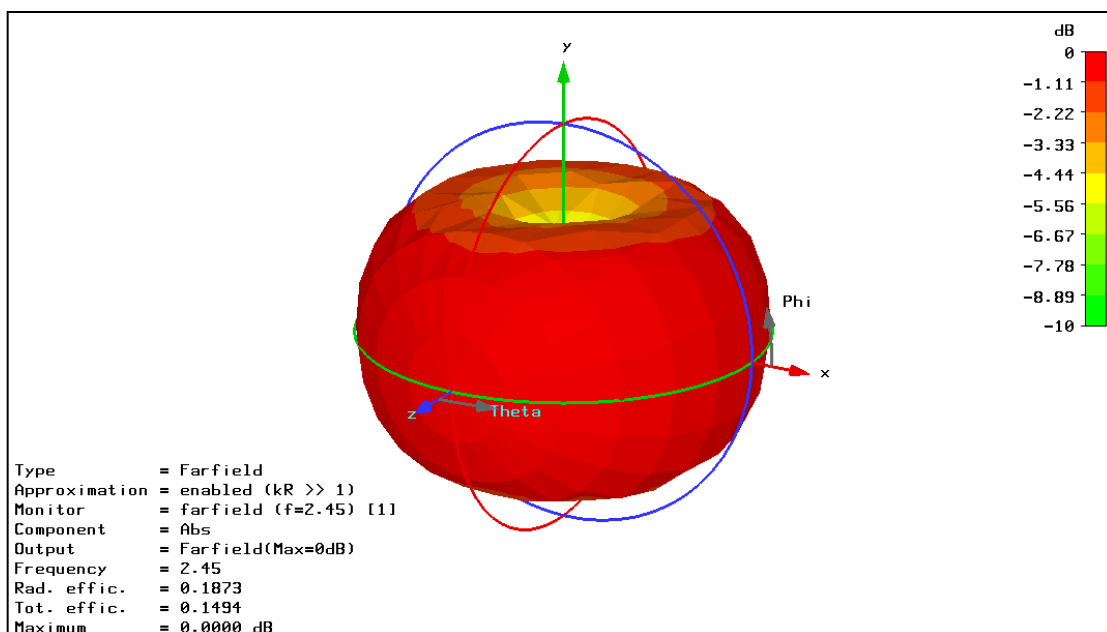
ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio โดยจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศทั้ง 8 กรณี

### 3.2 การจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio

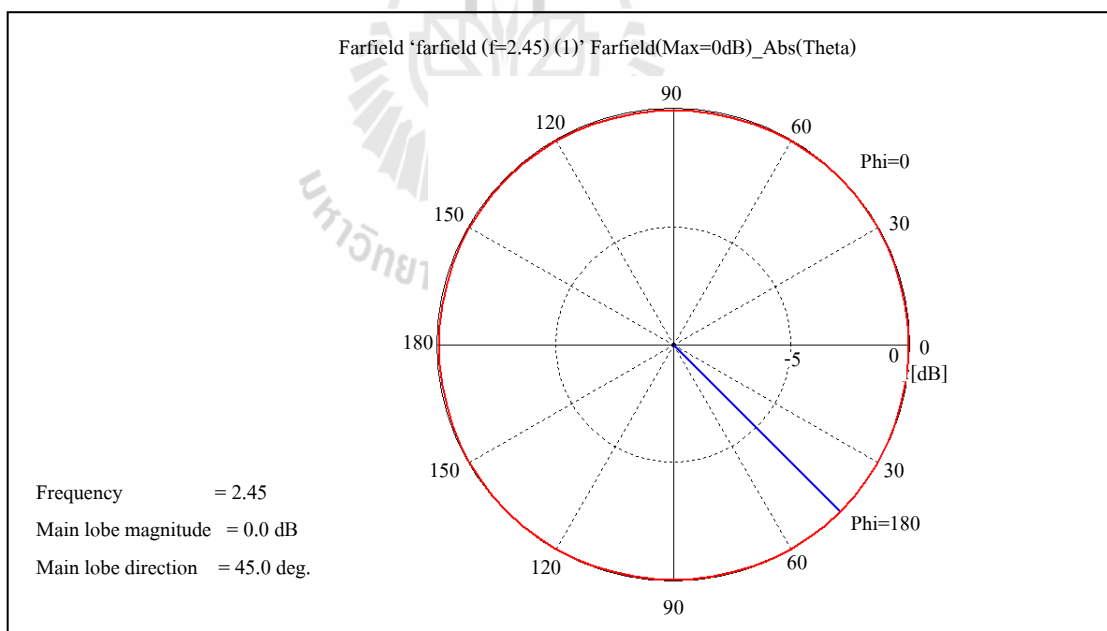
สายอากาศถูกนำไปจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ในขั้นแรกจะไม่ทำการลัดวงจร แสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อดูการกระจายตัวของกระแสซึ่งได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ แสดงในรูปที่ 3.7 ถึง 3.12 จากนั้นนำสายอากาศแต่ละกรณีไปจำลองผลในโปรแกรม ซึ่งในการลัดวงจรได้ใช้ทองแดงขนาด 5×5 มม. มีความหนาเท่ากับแผงวงจรพิมพ์ เพื่อใช้แทนไดโอดในกรณีที่มีการลัดวงจร



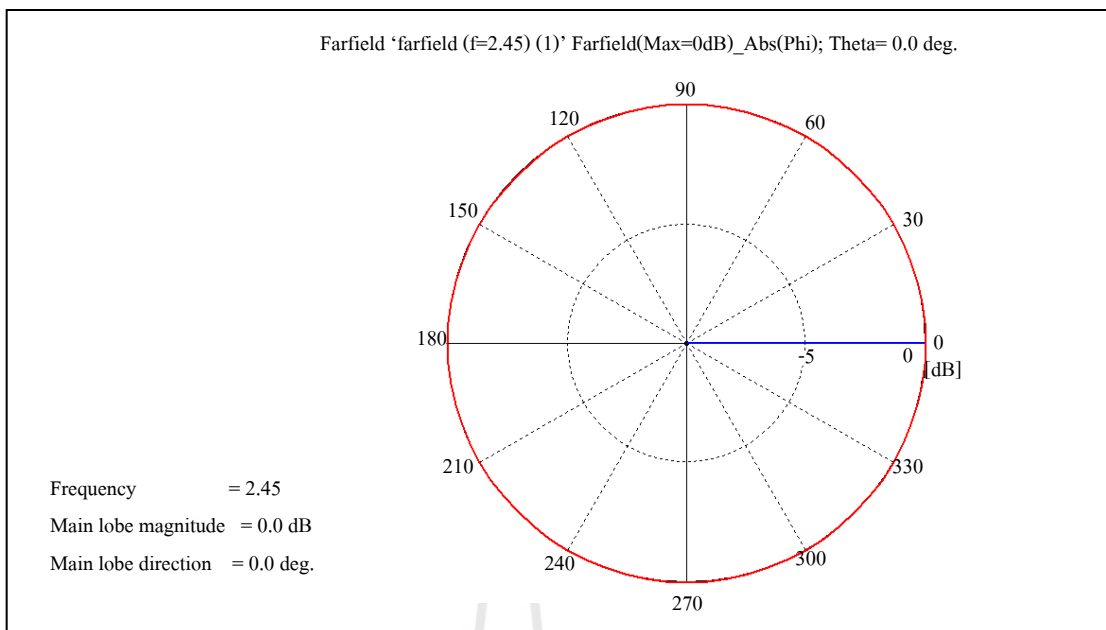
รูปที่ 3.6 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร



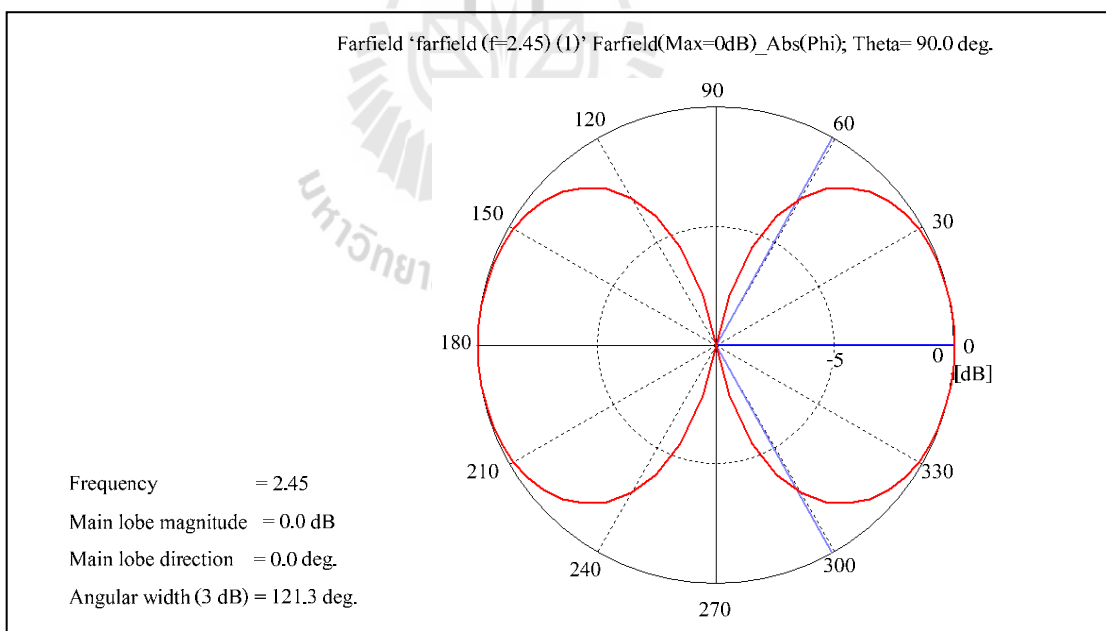
รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร



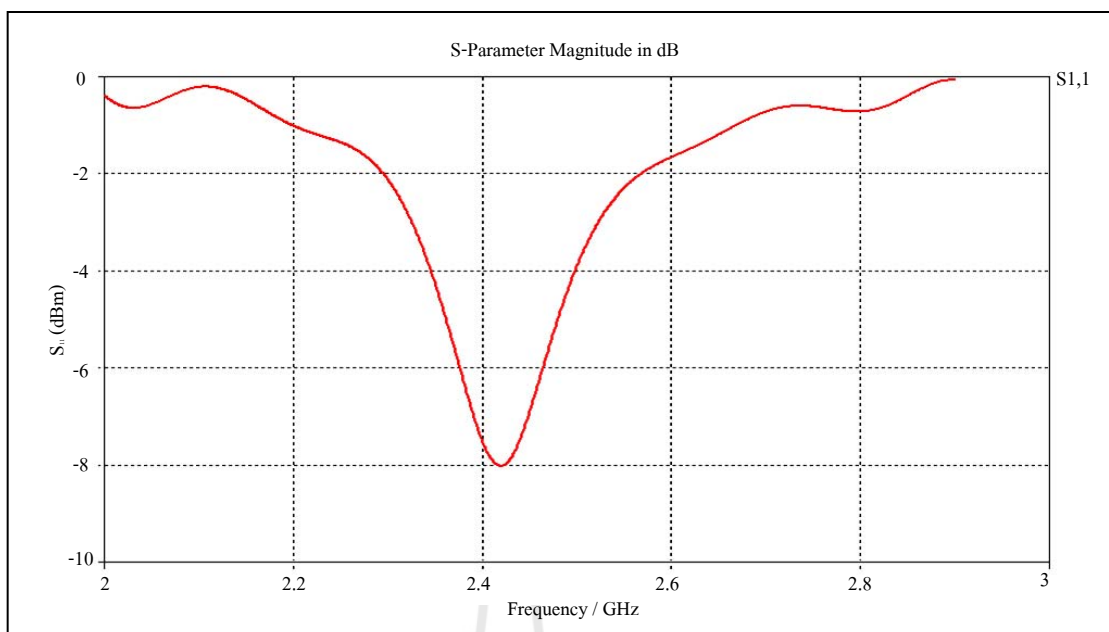
รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



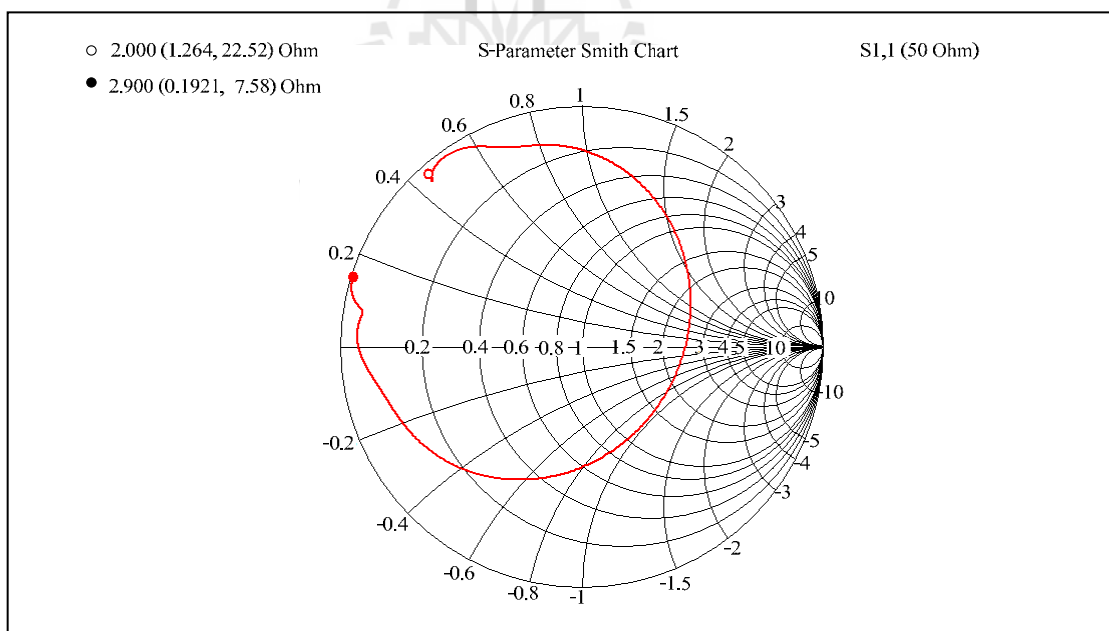
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ 3.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร

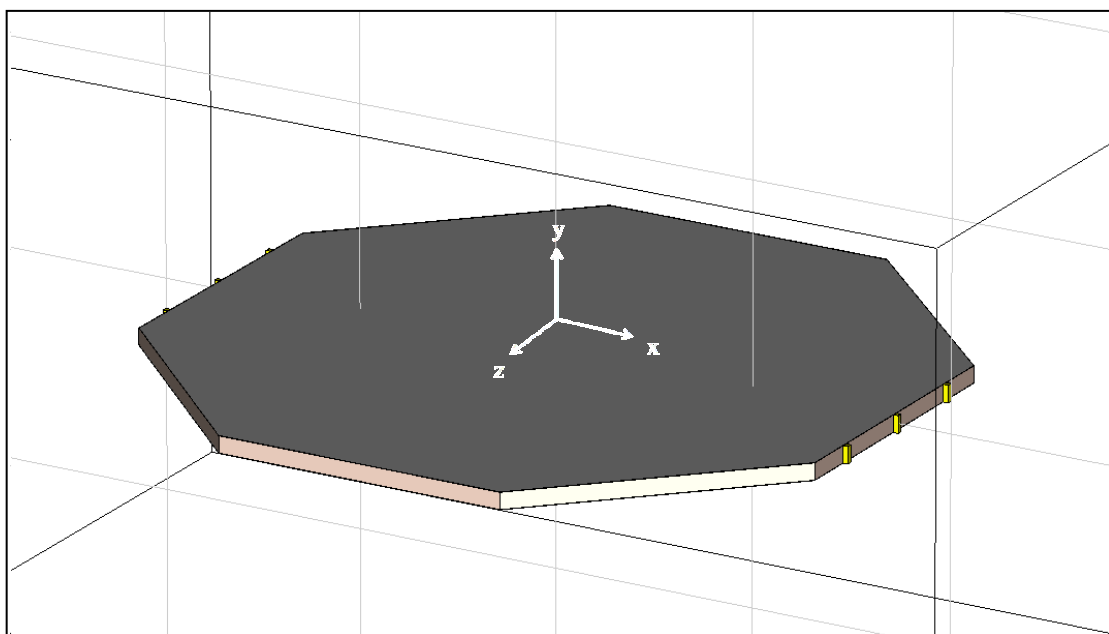


รูปที่ 3.12 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร

รูปของสายอากาศในแต่ละกรณี ผลของแบบรูปการแผ่พลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อน และอิมพีแดนซ์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.13 ถึง 3.48

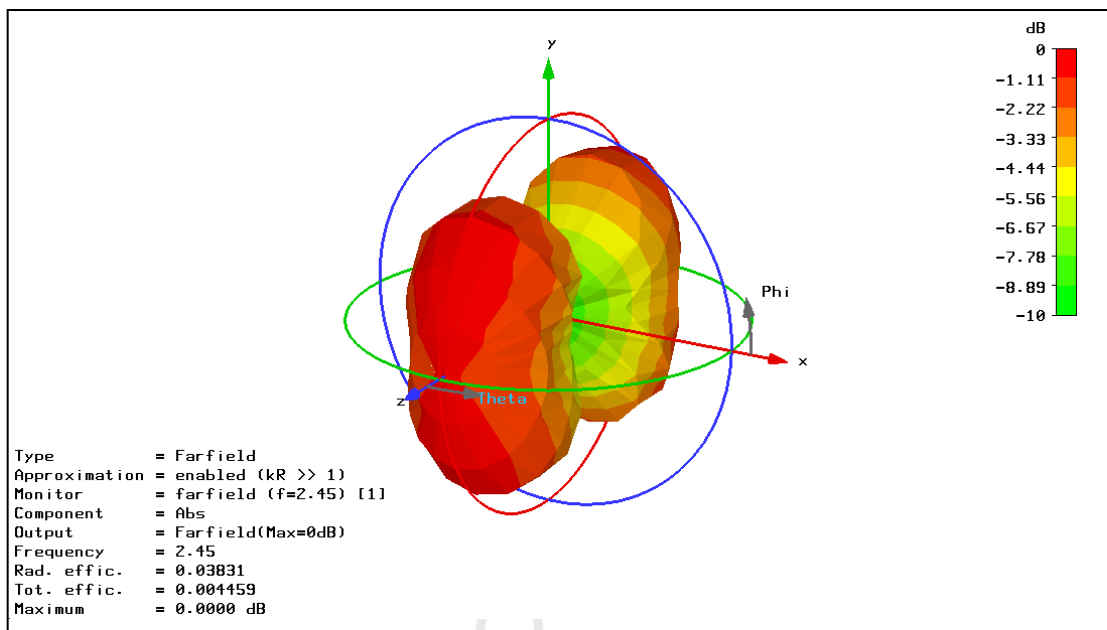
สายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจรจะมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนประมาณ -7 dB และอิมพีแดนซ์ประมาณ  $2.5 \Omega$  ที่ความถี่ 2.45 GHz

กรณี A ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.13

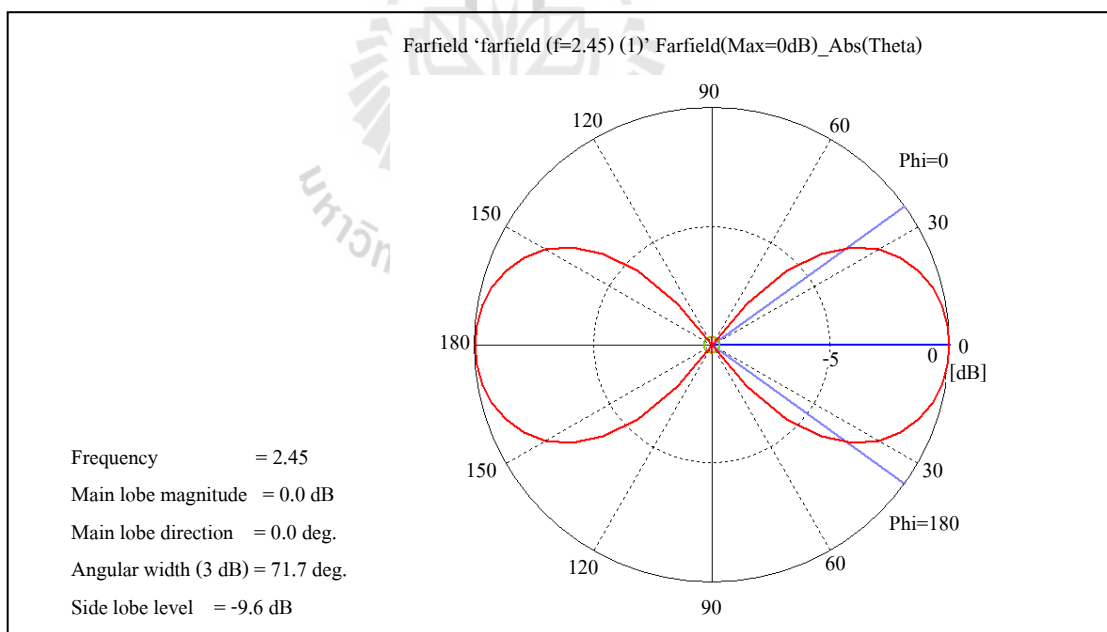


รูปที่ 3.13 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A

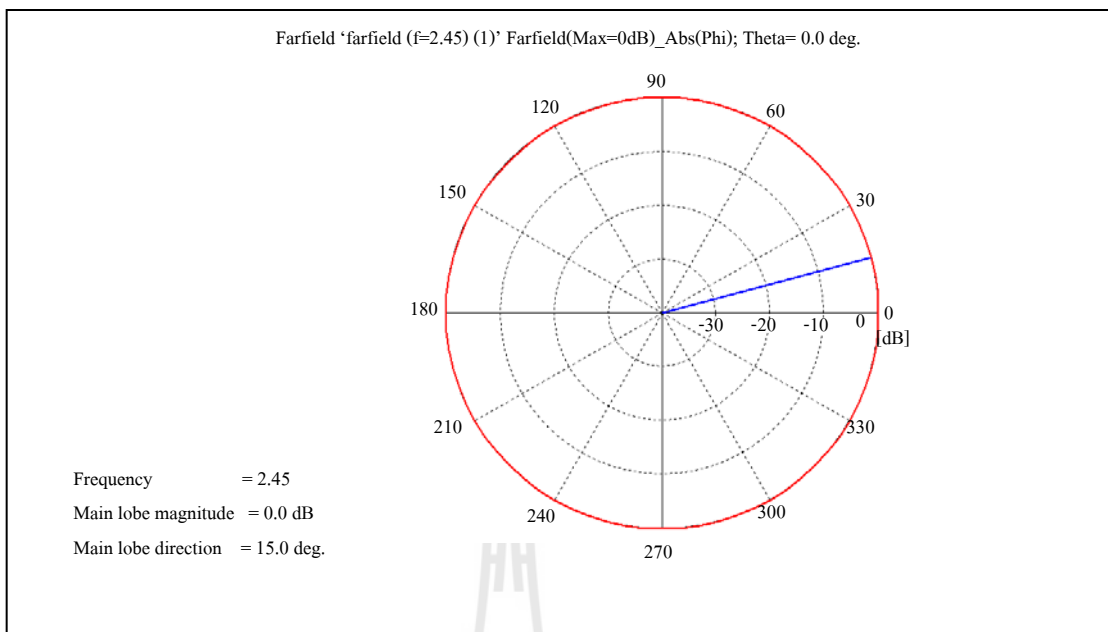




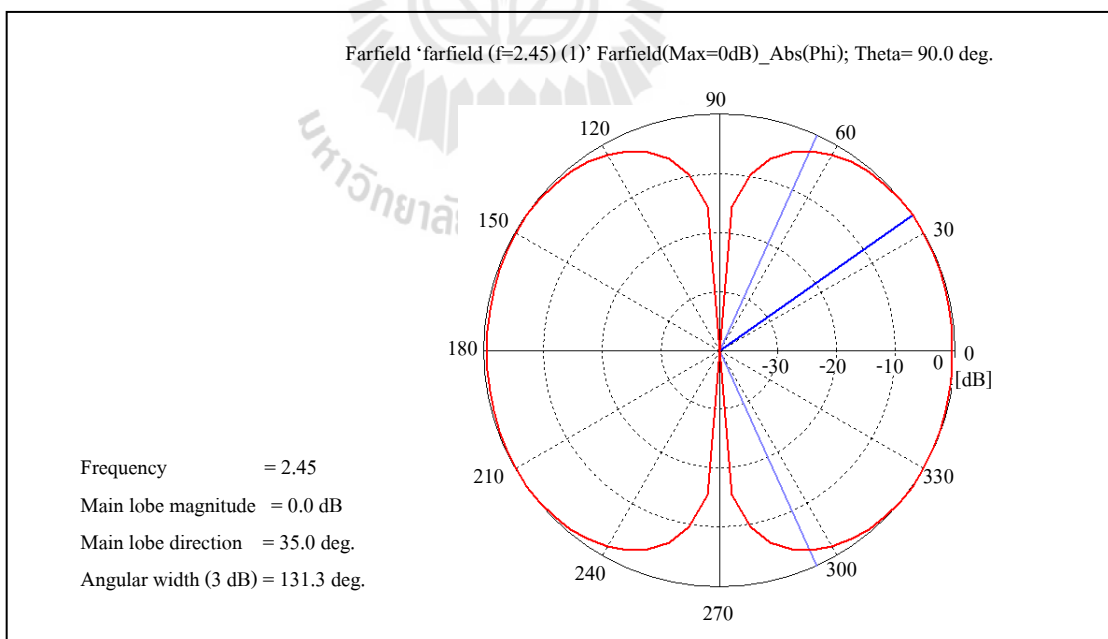
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A



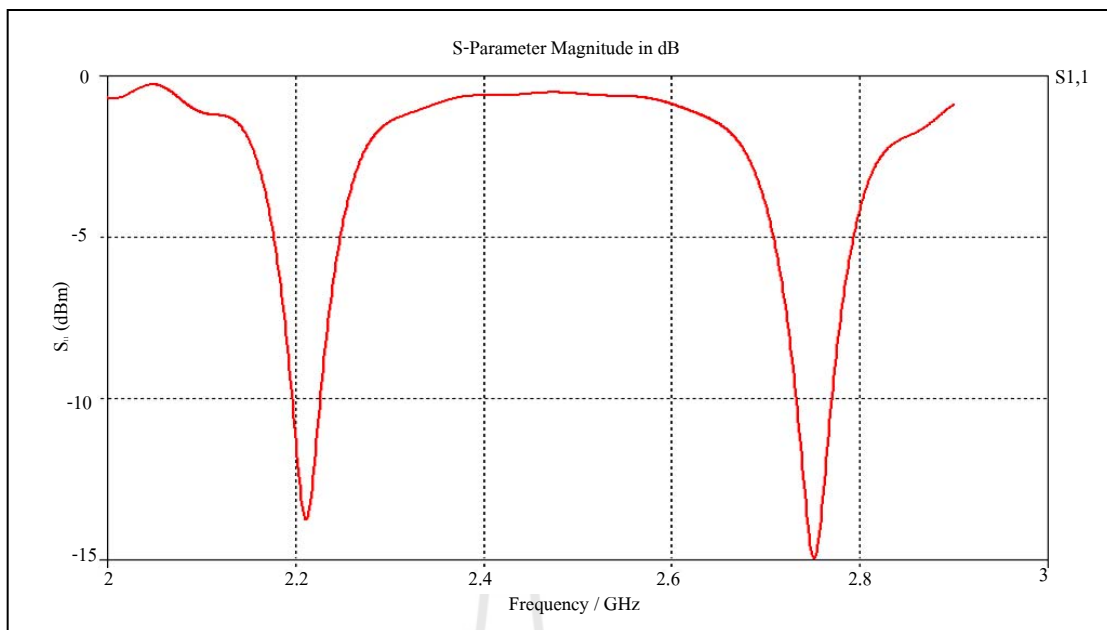
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



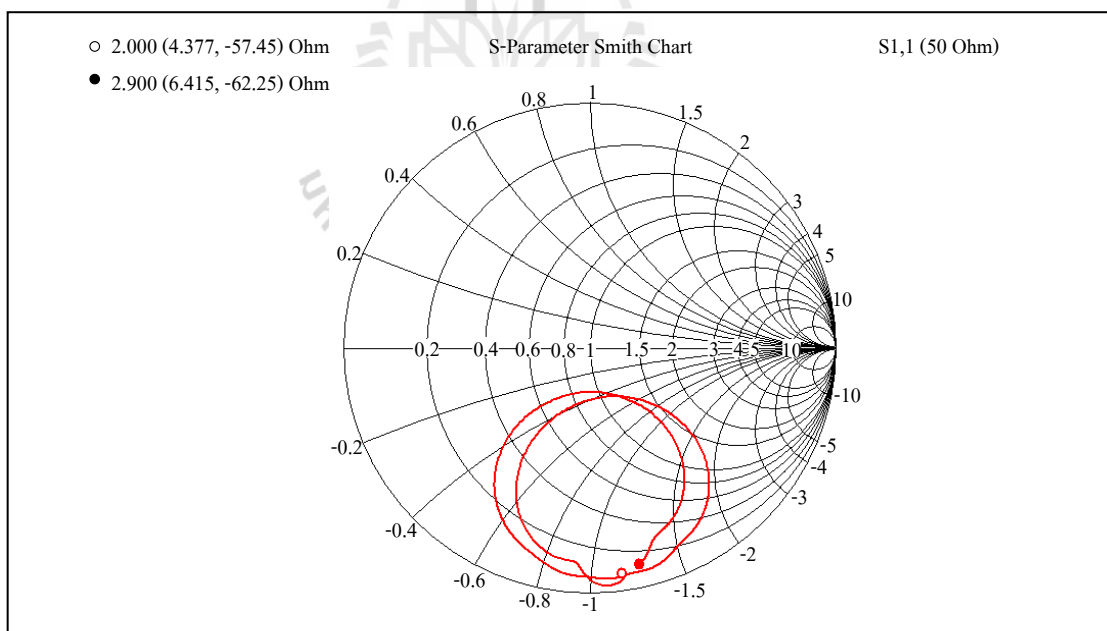
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ 3.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



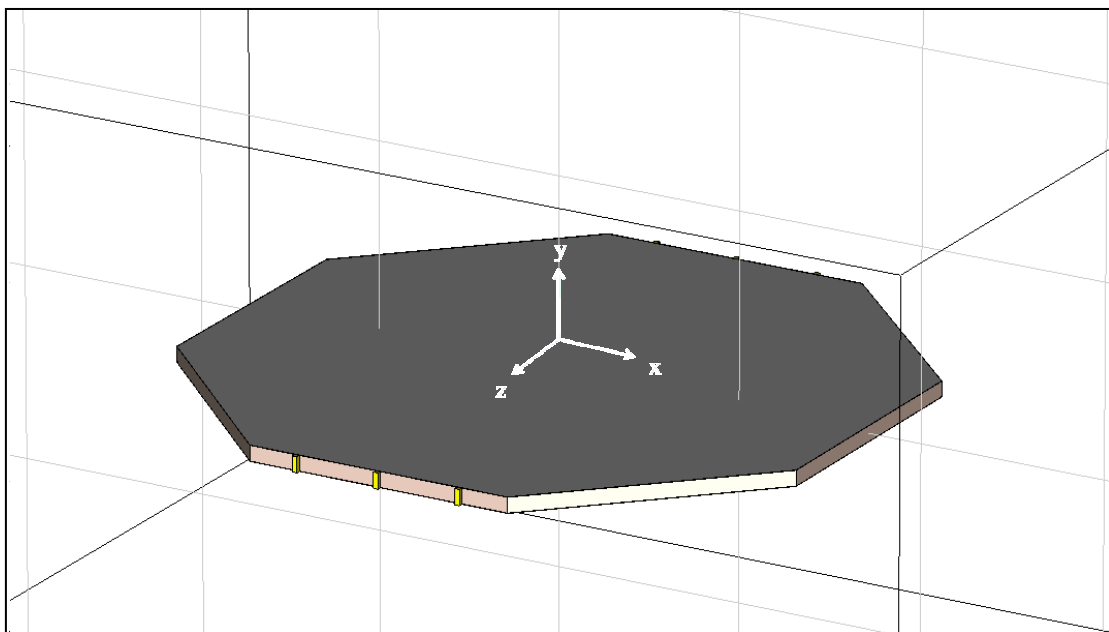
รูปที่ 3.18 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A



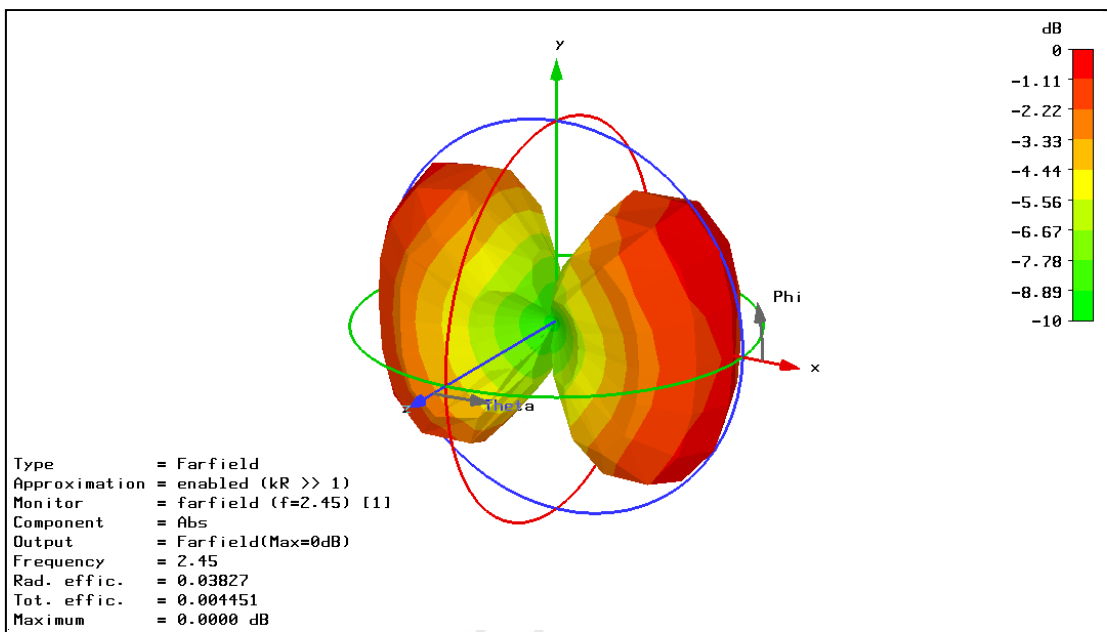
รูปที่ 3.19 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A

รูปที่ 3.13 ถึง 3.19 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A ที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี A ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสองด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $0^\circ$  และ  $180^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.15 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์แสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 ซึ่งมีค่าประมาณ  $-0.5$  dB และ  $1 - j0.4 \Omega$  ตามลำดับ ที่ความถี่  $2.45$  GHz

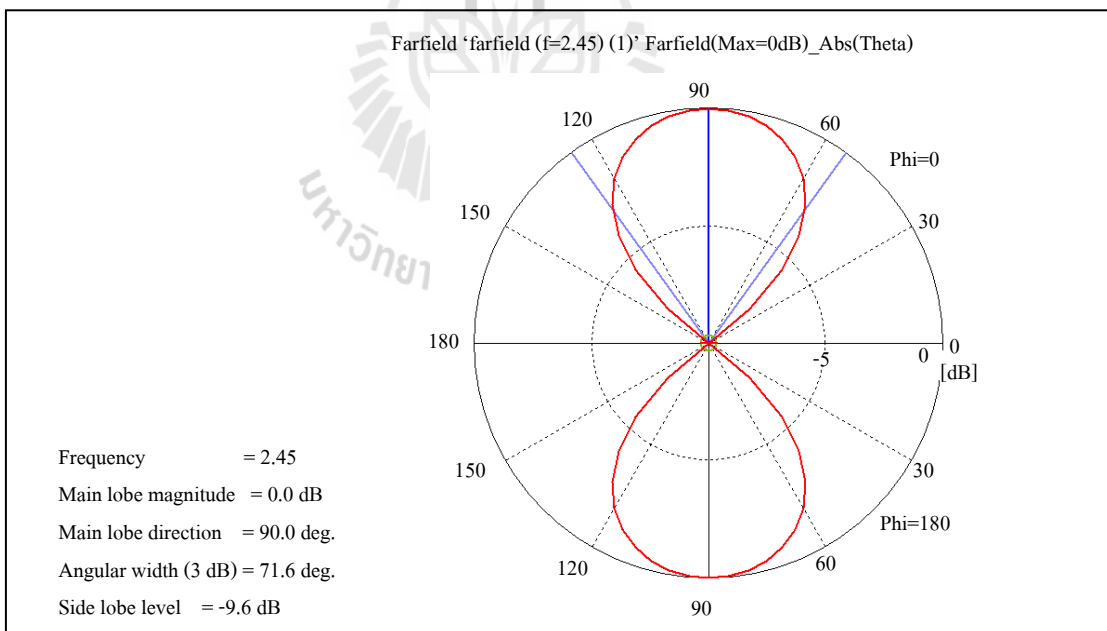
กรณี B ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B

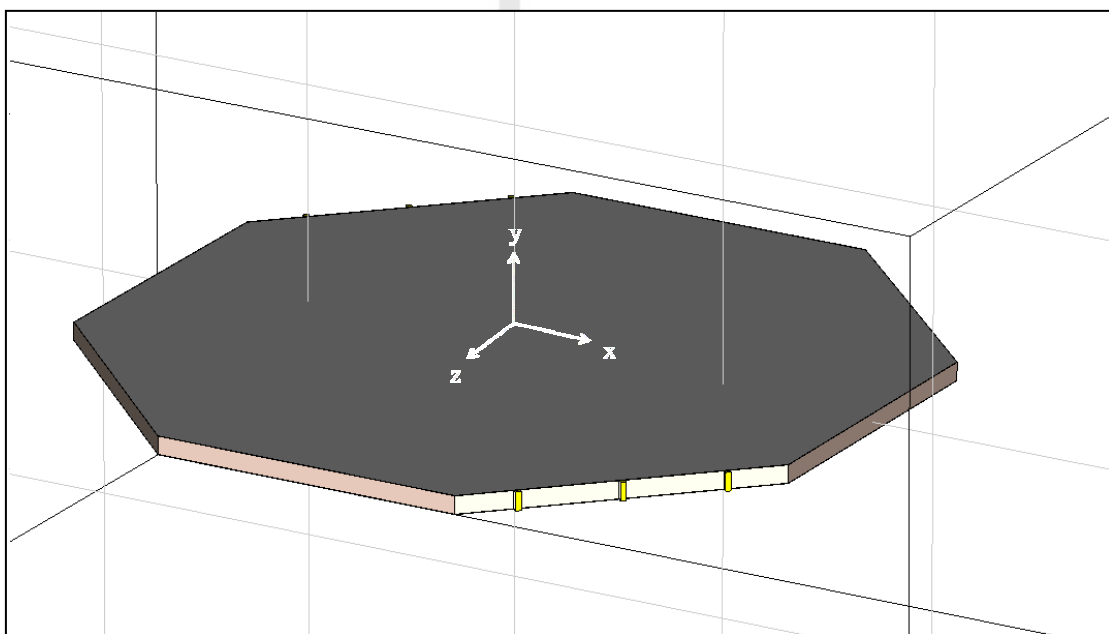


รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B

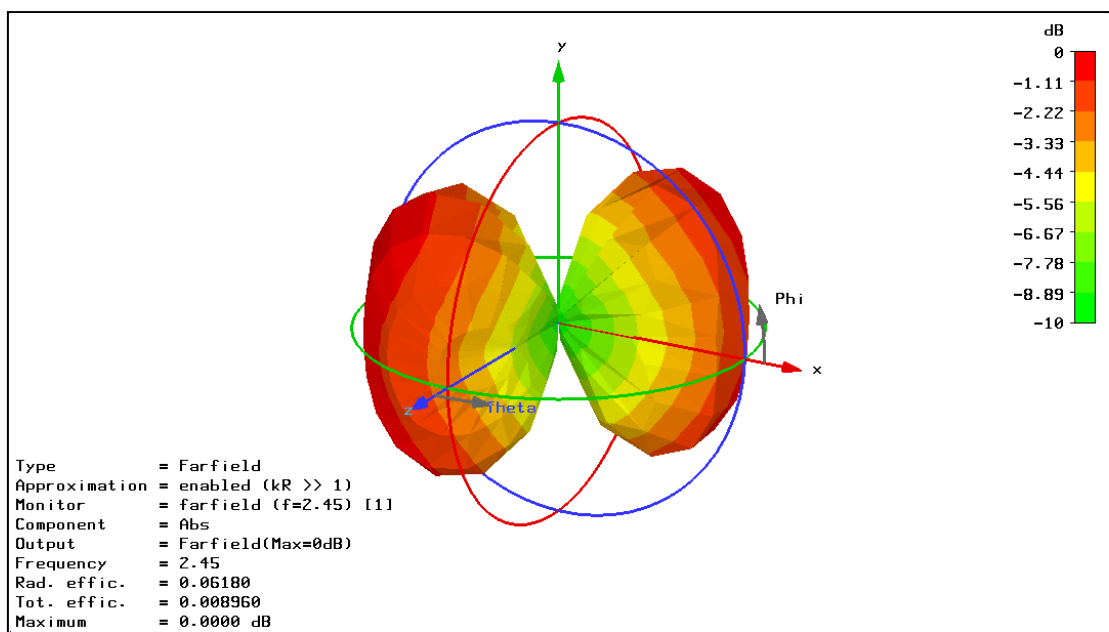


รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

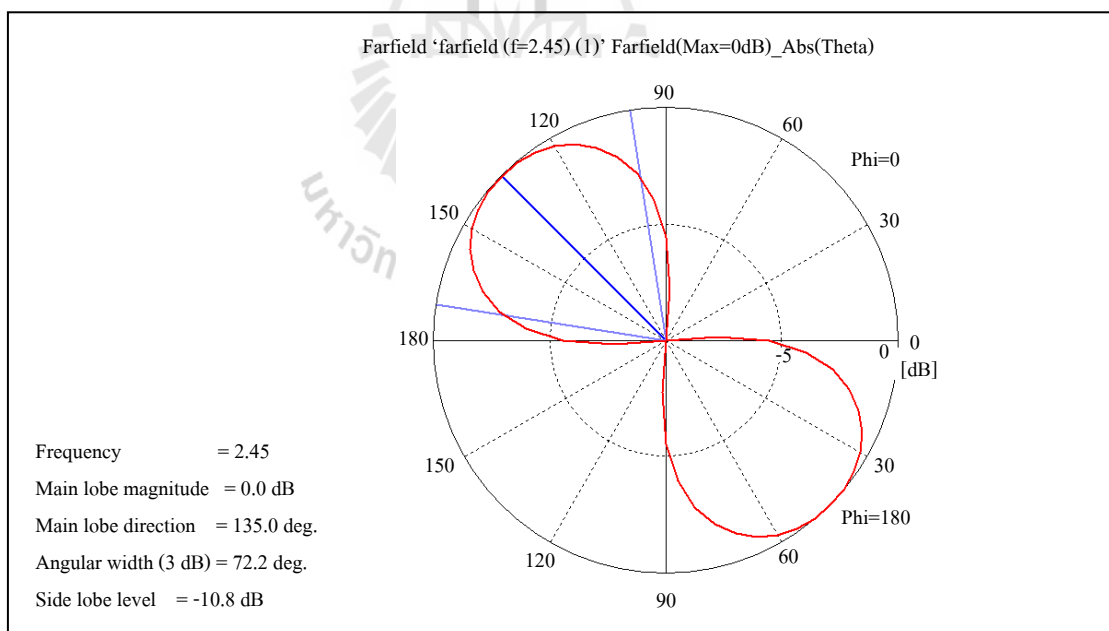
รูปที่ 3.20 ถึง 3.22 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B ที่ได้จาก โปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี B ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสองด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $90^\circ$  และ  $270^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.22 สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อ  $\phi, \theta = 0$   $\phi, \theta = 90$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A มาก ซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวกกรณี C ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.23



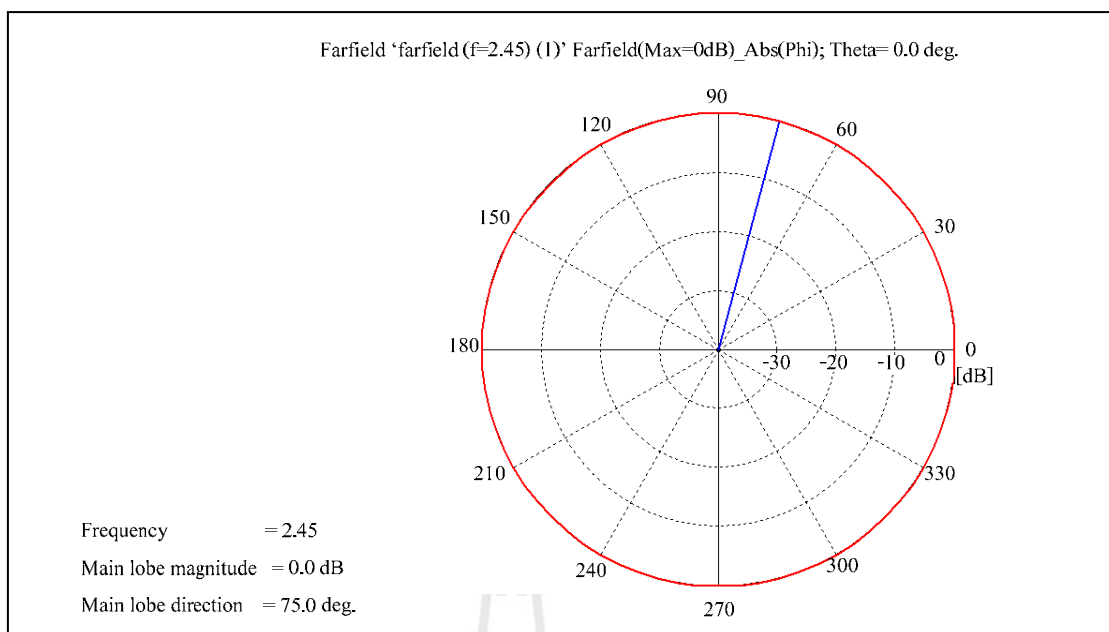
รูปที่ 3.23 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



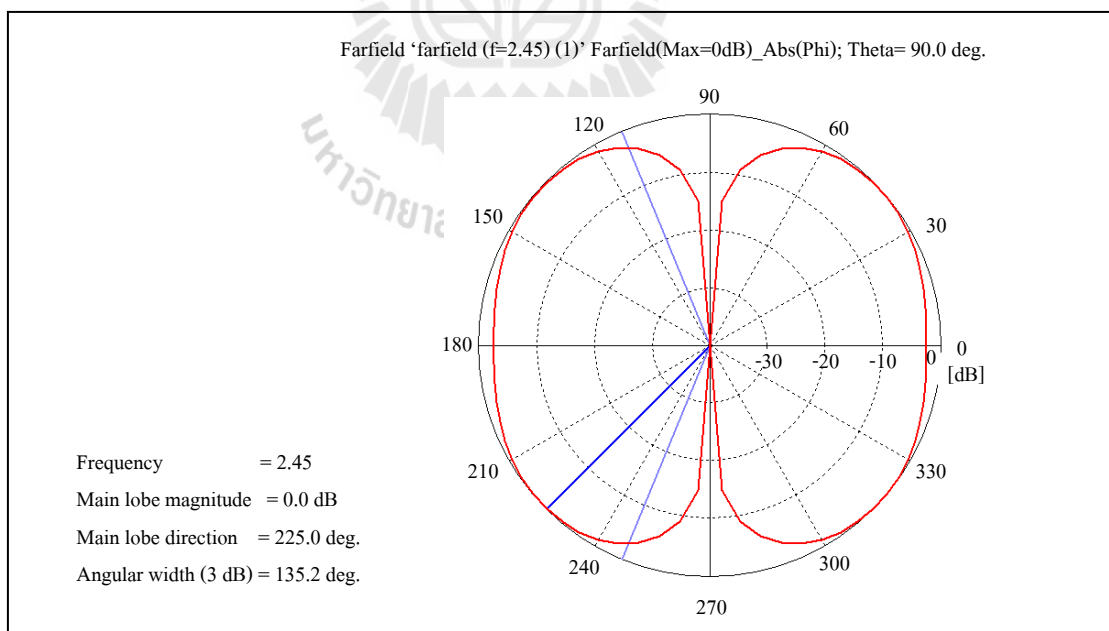
รูปที่ 3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

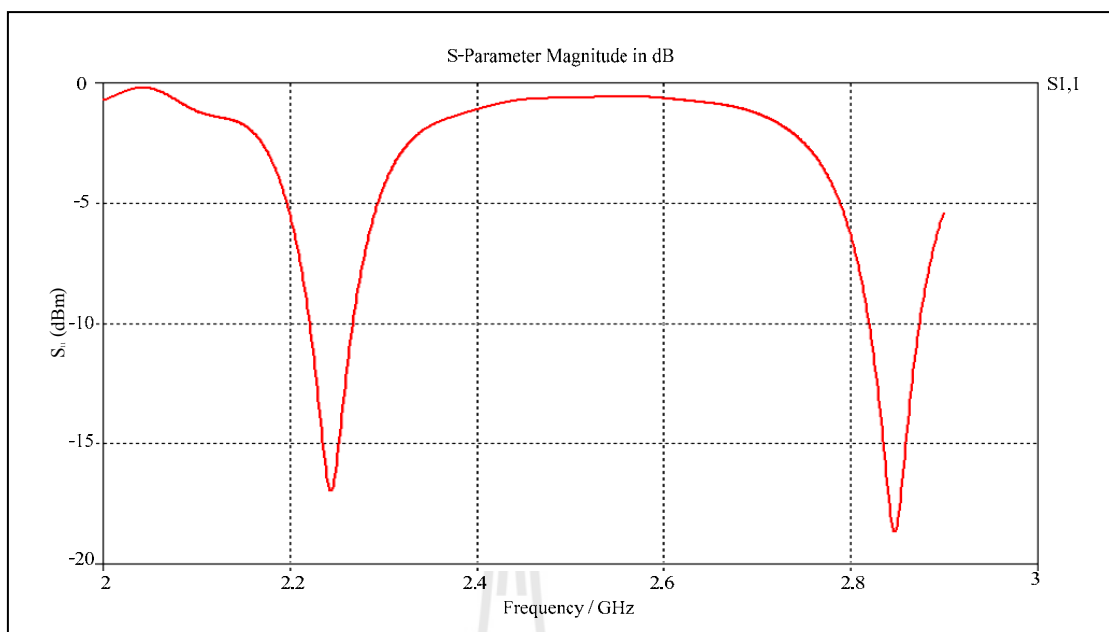


รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

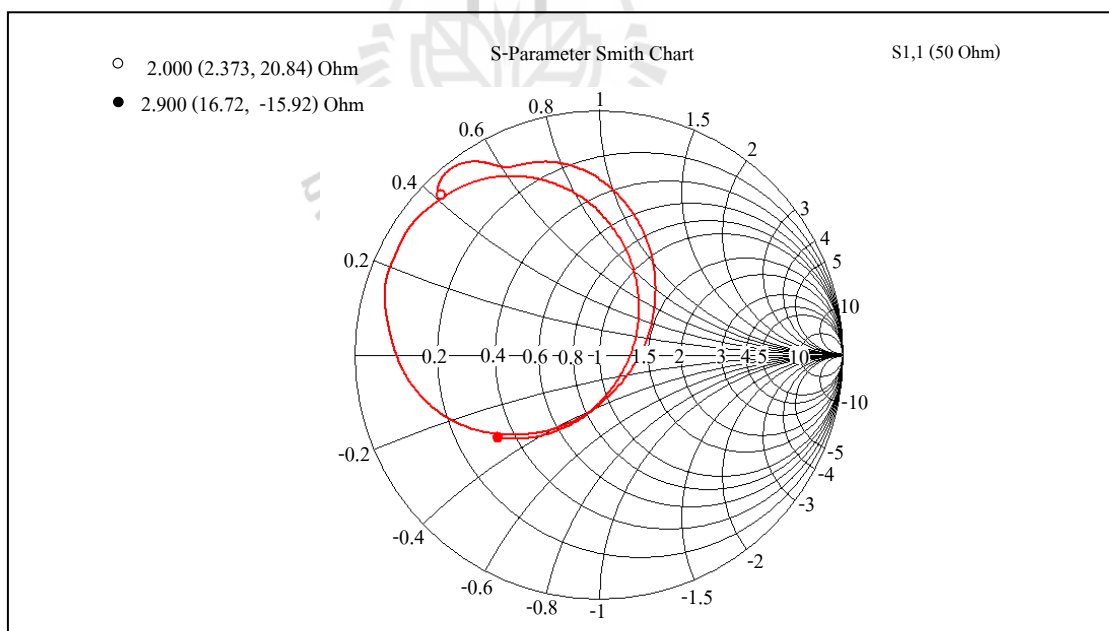


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$





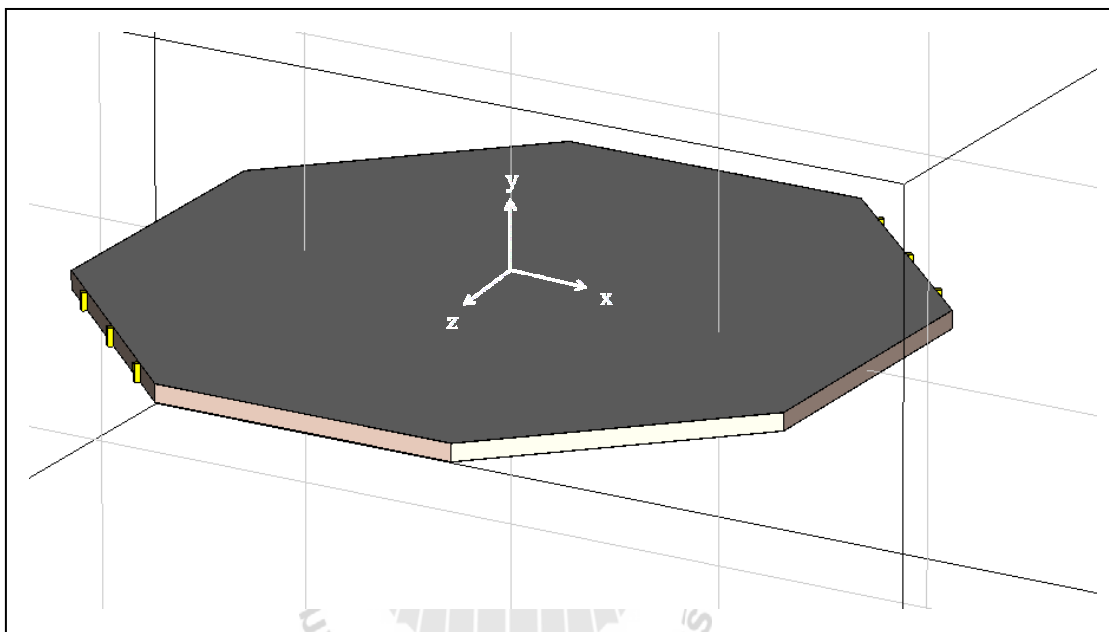
รูปที่ 3.28 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



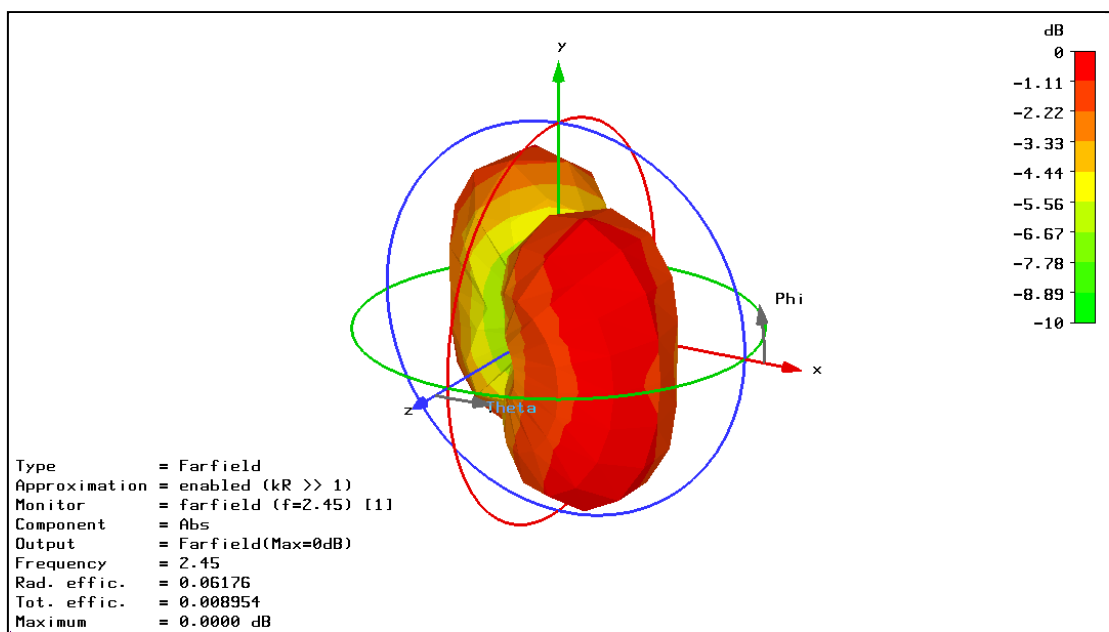
รูปที่ 3.29 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C

รูปที่ 3.23 ถึง 3.29 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C ที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี C ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสองด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $135^\circ$  และ  $315^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.25 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์แสดงในรูปที่ 3.28 และ 3.29 ซึ่งมีค่าประมาณ  $-0.5$  dB และ  $0.1 + j0.2 \Omega$  ตามลำดับ ที่ความถี่  $2.45$  GHz

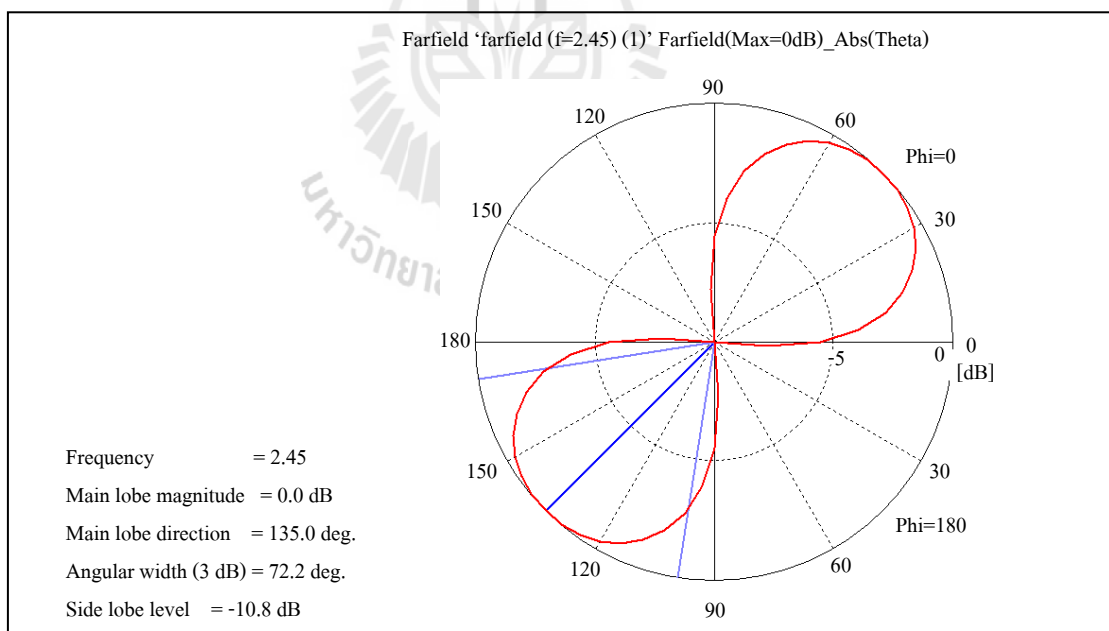
กรณี D ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D

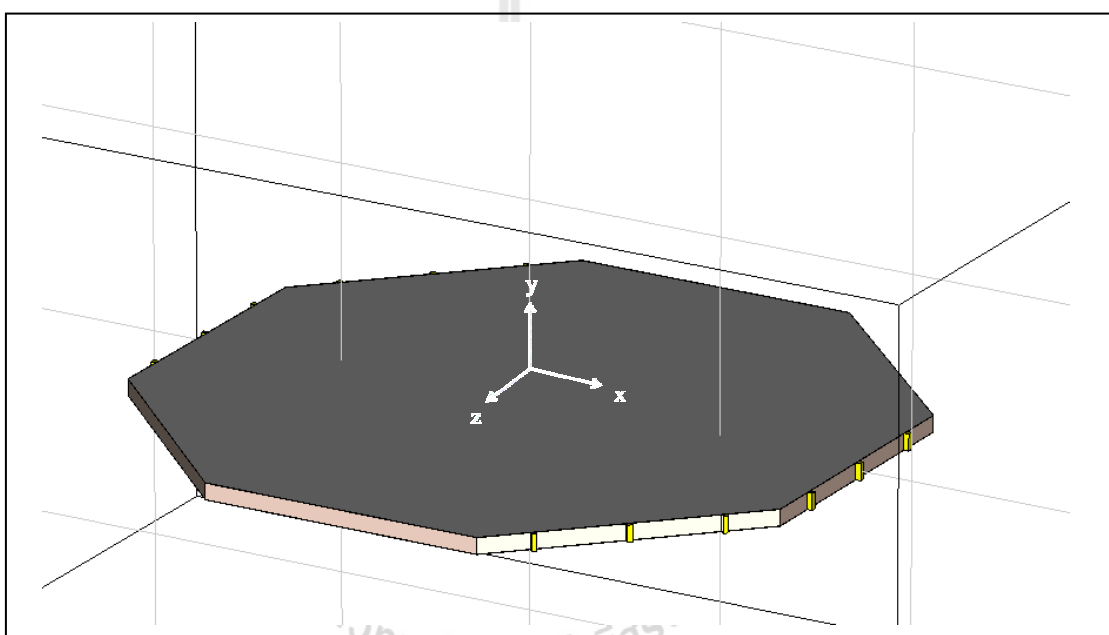


รูปที่ 3.31 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D

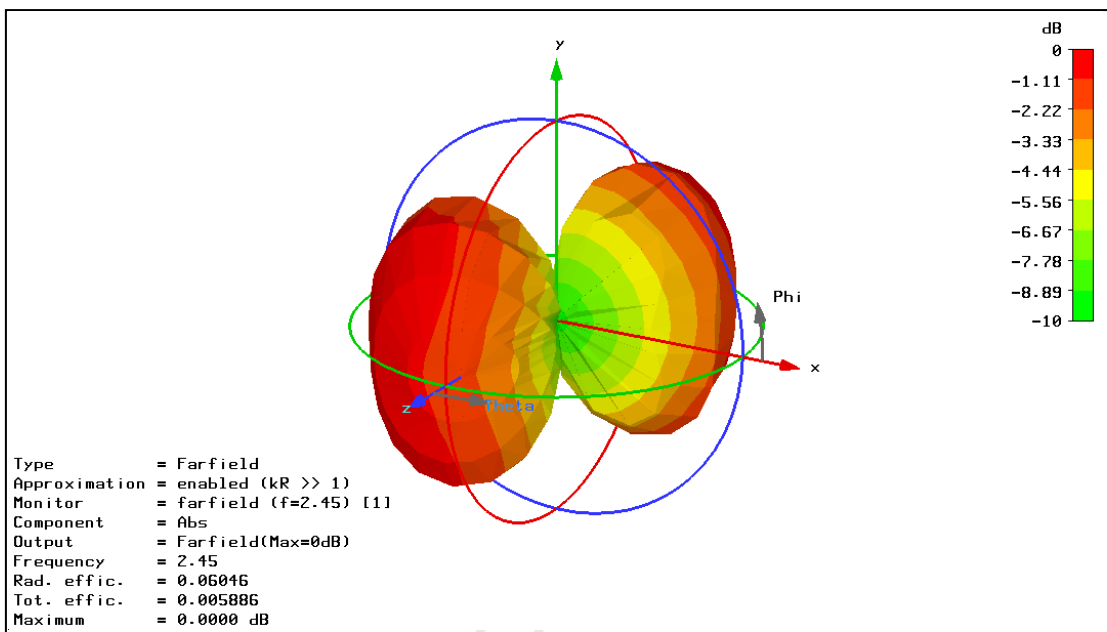


รูปที่ 3.32 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

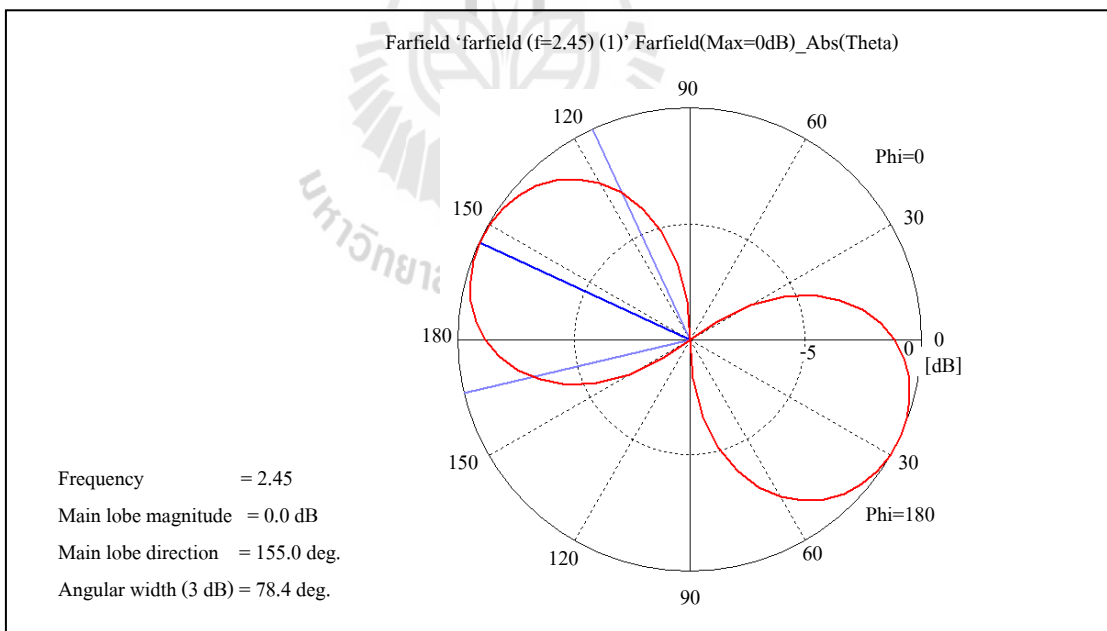
รูปที่ 3.30 ถึง 3.32 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D ที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี D ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสองด้าน แสดงในรูปที่ 3.35 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $45^\circ$  และ  $225^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.32 สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อ  $\phi, \theta = 0$   $\phi, \theta = 90$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C มาก ซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวกกรณี E ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 4 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.33



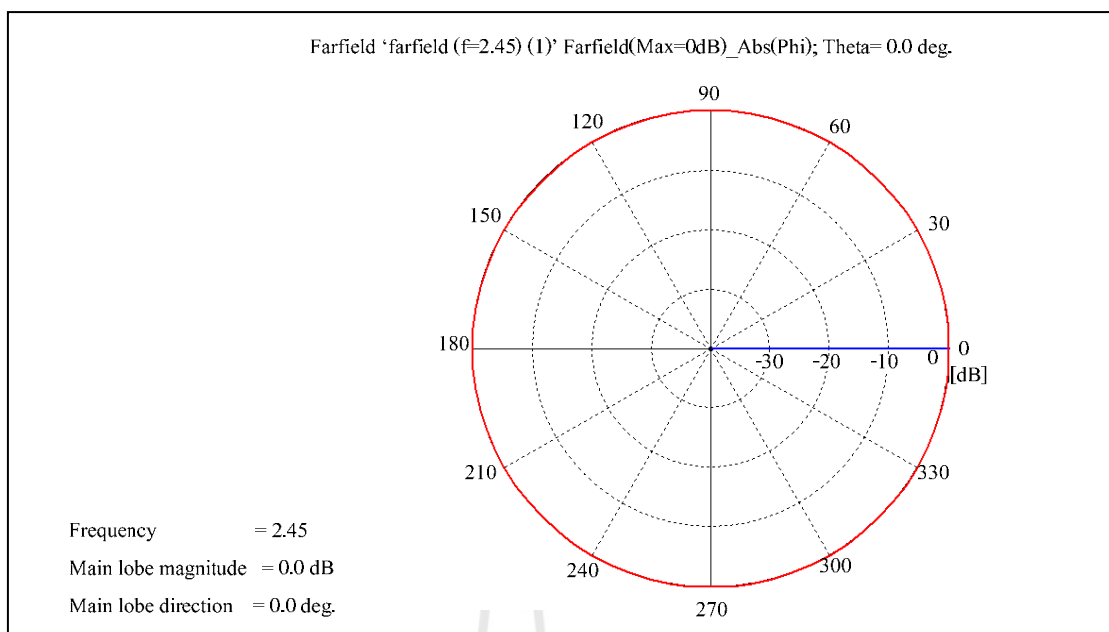
รูปที่ 3.33 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



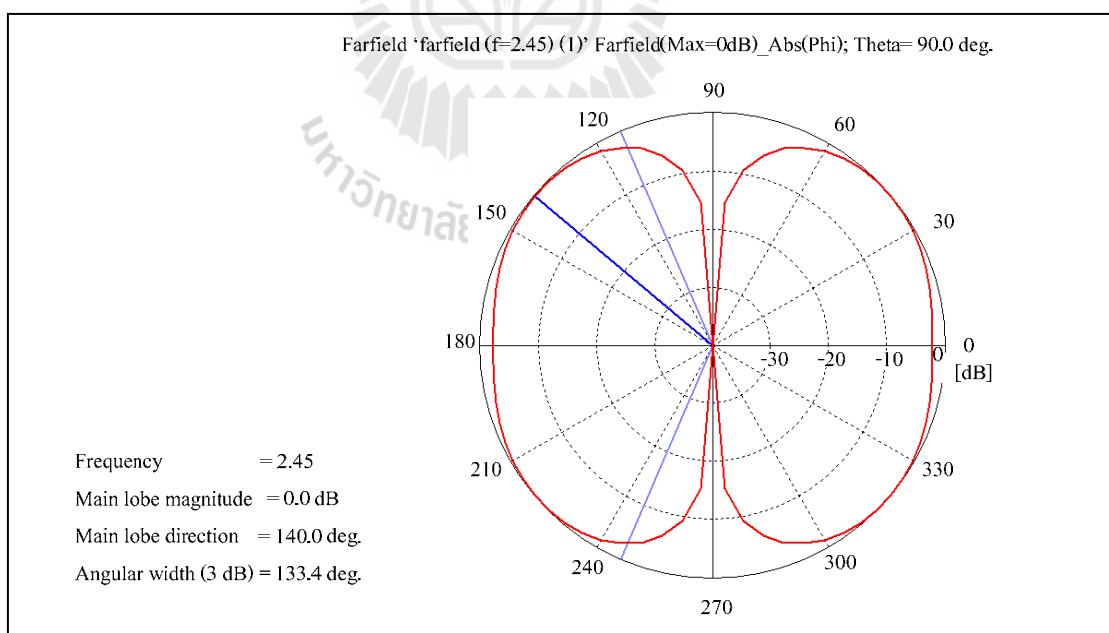
รูปที่ 3.34 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



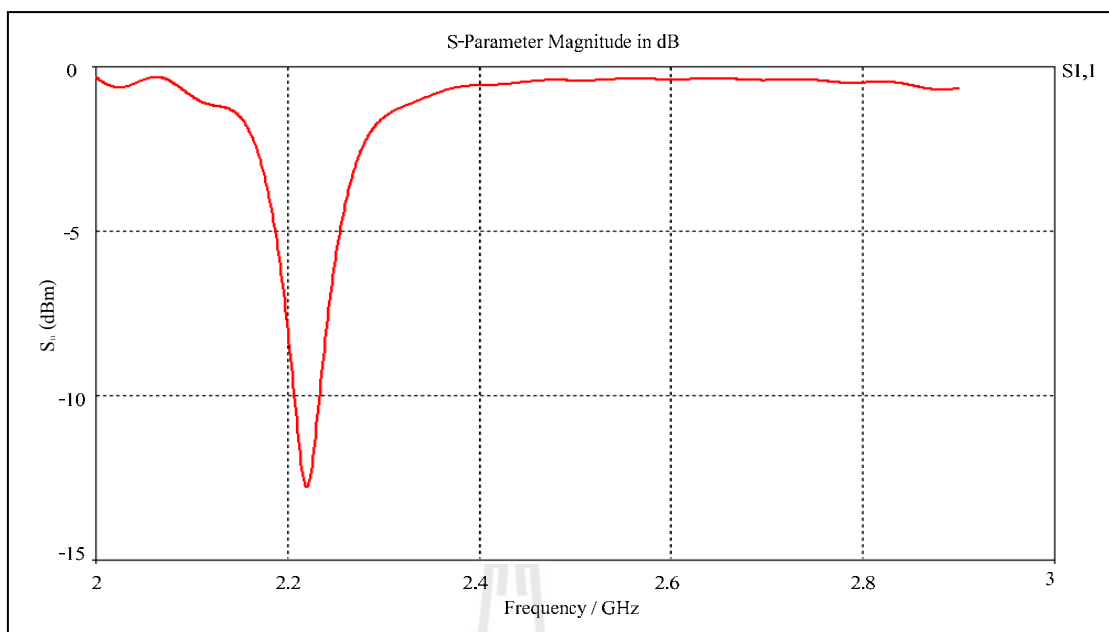
รูปที่ 3.35 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



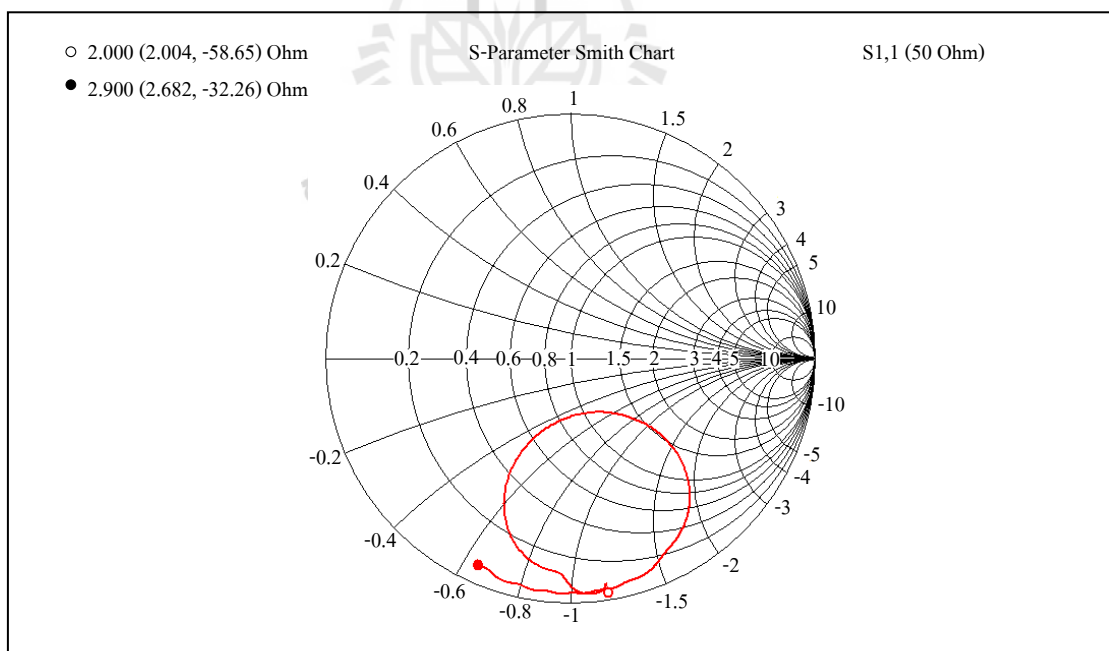
รูปที่ 3.36 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ 3.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



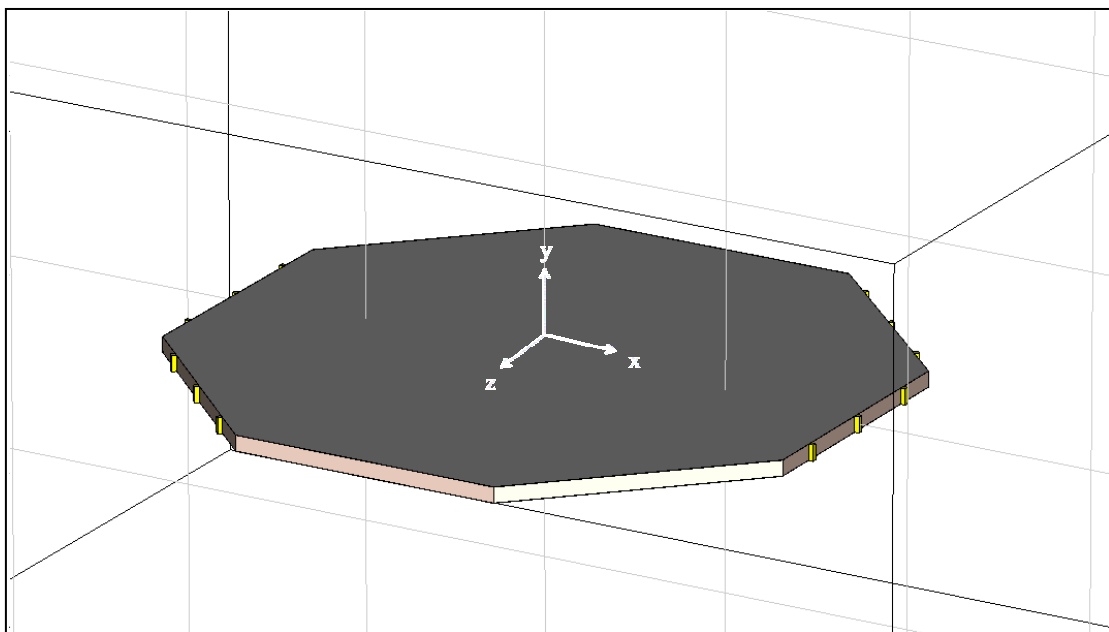
รูปที่ 3.38 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



รูปที่ 3.39 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E

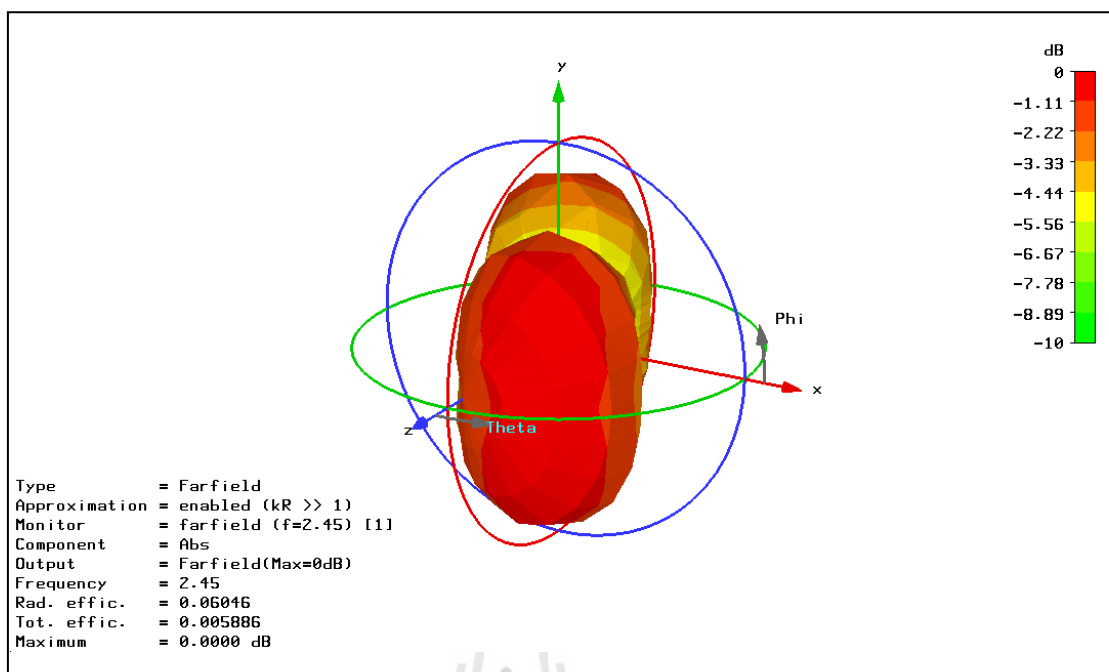
รูปที่ 3.33 ถึง 3.39 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E ที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี E ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสี่ด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $135^\circ$  และ  $335^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.35 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์แสดงในรูปที่ 3.38 และ 3.39 ซึ่งมีค่าประมาณ  $-0.5$  dB และ  $1.5 - j1.5 \Omega$  ตามลำดับ ที่ความถี่  $2.45$  GHz

กรณี F ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 4 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.40

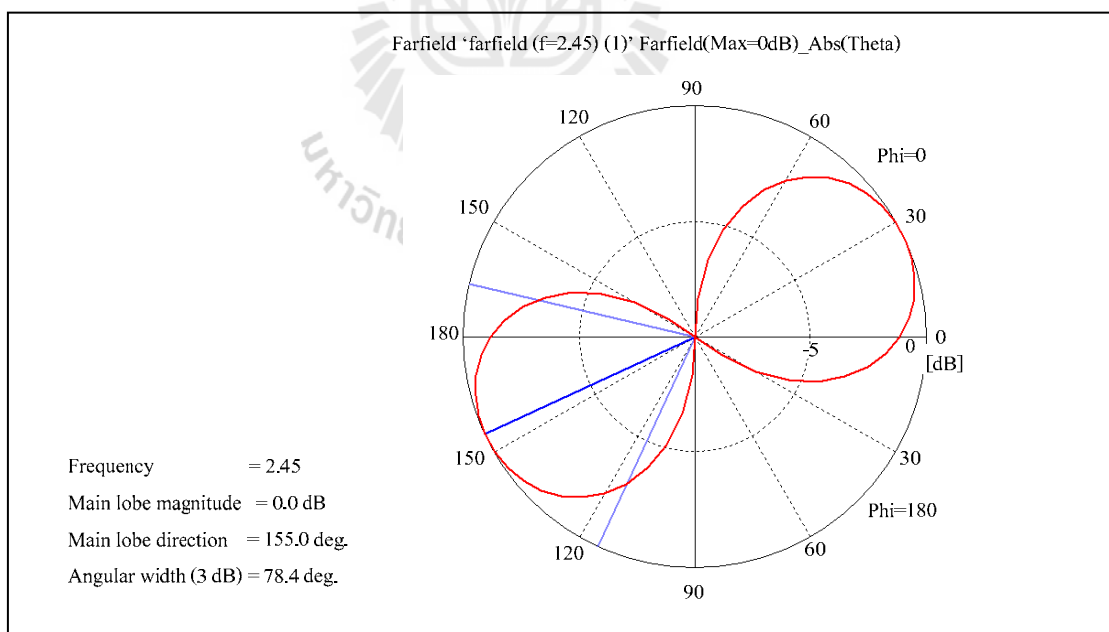


รูปที่ 3.40 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F





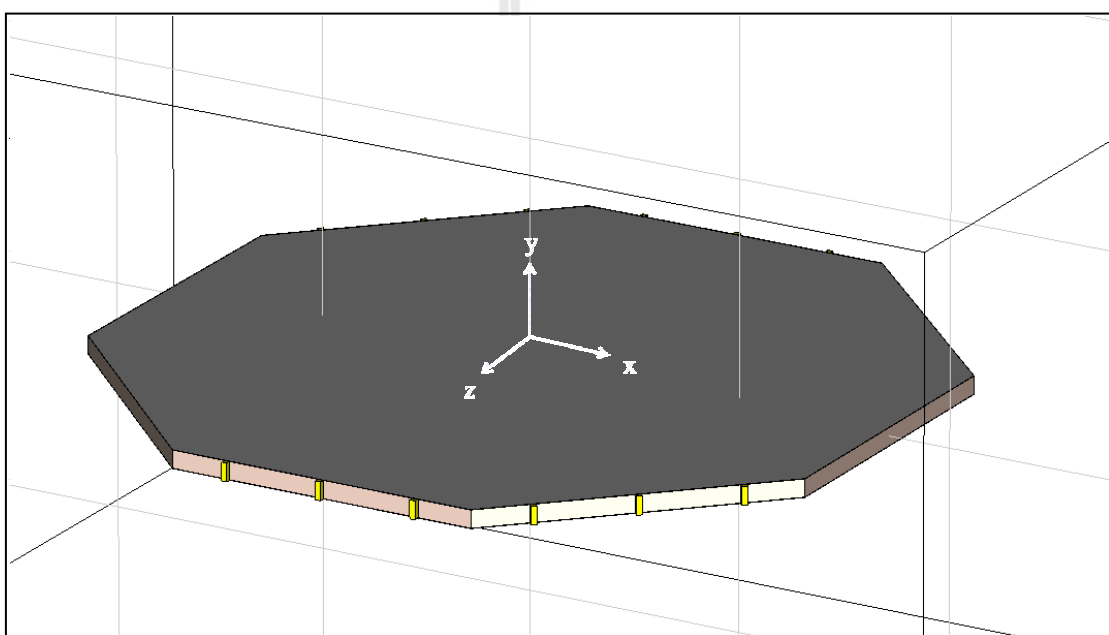
รูปที่ 3.41 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F



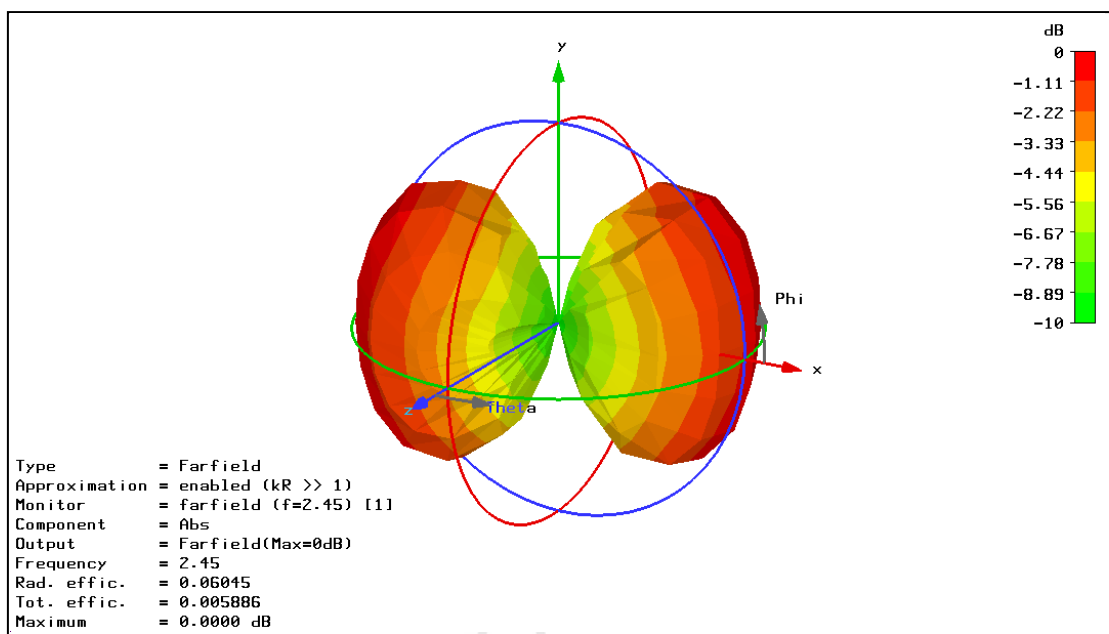
รูปที่ 3.42 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

รูปที่ 3.40 ถึง 3.42 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F ที่ได้จาก โปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี F ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสี่ด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $25^\circ$  และ  $205^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.42 สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อ  $\phi, \theta = 0$   $\phi, \theta = 90$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E มาก ซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวก

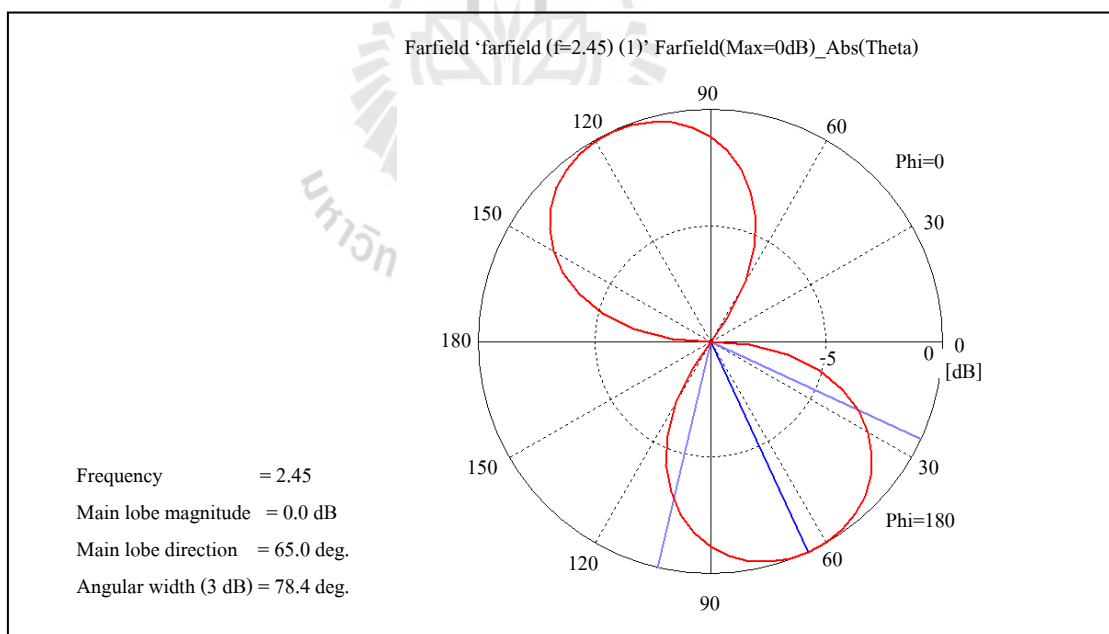
กรณี G ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 4 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G



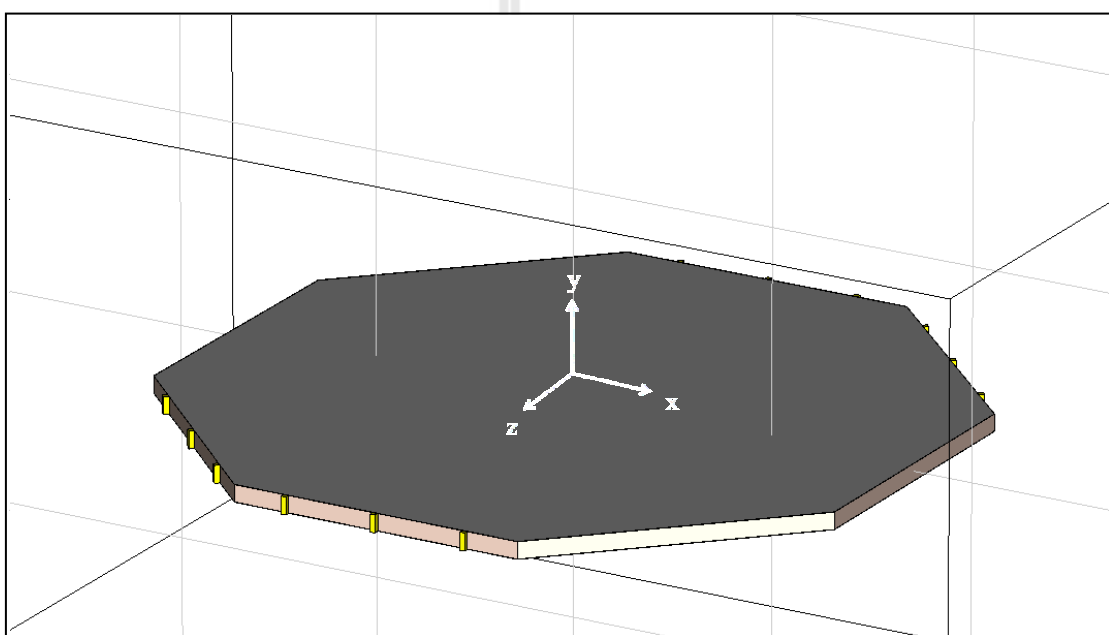
รูปที่ 3.44 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G



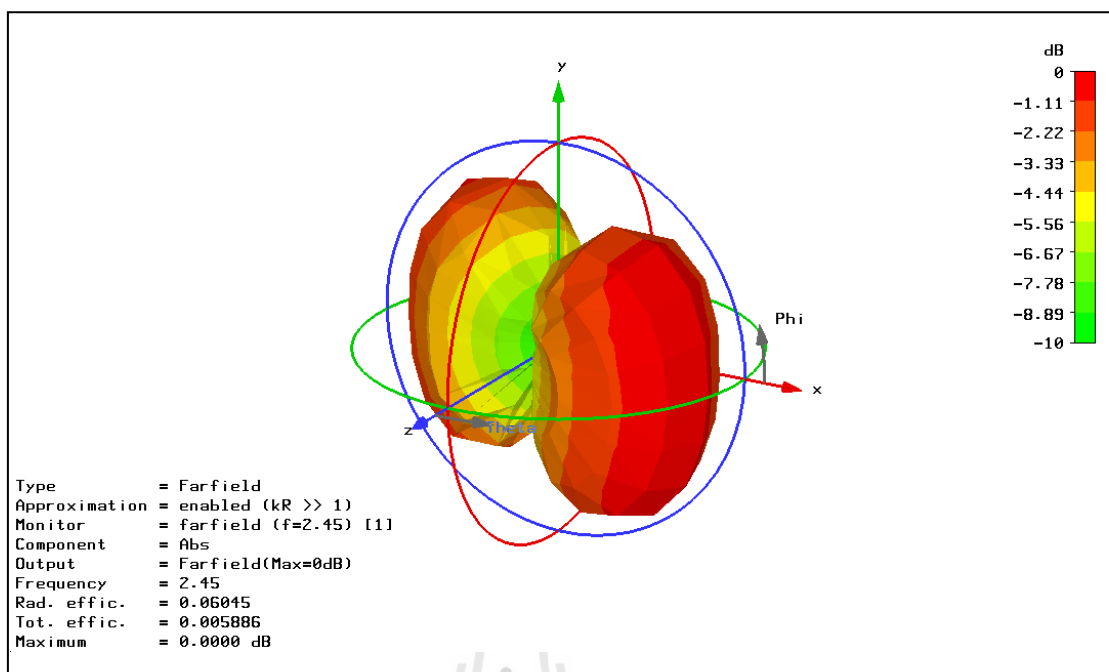
รูปที่ 3.45 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

รูปที่ 3.43 ถึง 3.45 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G ที่ได้จาก โปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี G ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสี่ด้าน แสดงในรูปที่ 3.45 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $115^\circ$  และ  $295^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.45 สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อ  $\phi, \theta = 0$   $\phi, \theta = 90$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E มาก ซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวก

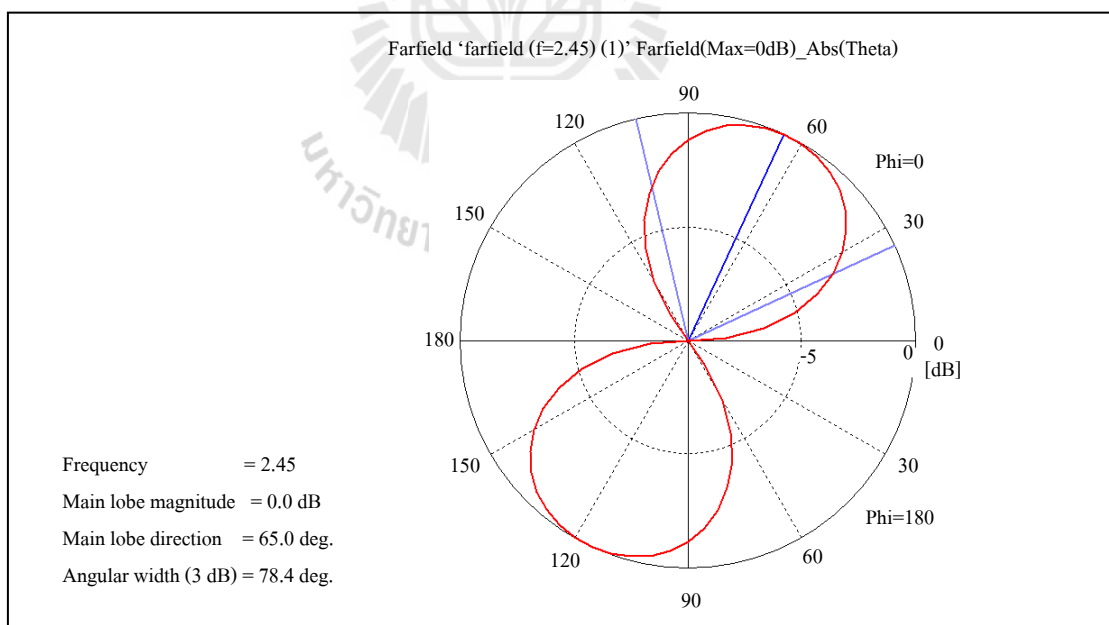
กรณี H ลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 4 ด้าน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H



รูปที่ 3.47 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H



รูปที่ 3.48 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

ตารางที่ 3.1 สรุบทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศแปดเหลี่ยมทั้ง 8 กรณี

กรณี	A	B	C	D	E	F	G	H
ทิศทางของ	$0^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$45^\circ$	$155^\circ$	$25^\circ$	$115^\circ$	$65^\circ$
ลำคลื่นหลัก	$180^\circ$	$270^\circ$	$315^\circ$	$225^\circ$	$335^\circ$	$205^\circ$	$295^\circ$	$245^\circ$

รูปที่ 3.46 ถึง 3.48 แสดงผลจากการจำลองสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H ที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio โดยสายอากาศกรณี H ถูกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศสี่ด้าน แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทิศทางของลำคลื่นหลักคือ  $65^\circ$  และ  $245^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.45 สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อ  $\phi, \theta = 0$   $\phi, \theta = 90$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E มาก ซึ่งจะแสดงผลในภาคผนวก

จากการจำลองผลของสายอากาศแปดเหลี่ยมทั้ง 8 กรณีพบว่า สายอากาศดังกล่าวสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้จริง และสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 แบบ แบบละ 2 ทิศทาง สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.1

เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน พบว่าที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มากเกินไป (มากกว่า -10 dB) ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสัญญาณน้อย นอกจากนี้ถ้ามีสัญญาณสะท้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายมาก อาจทำให้แหล่งจ่ายเกิดความเสียหายได้ และเนื่องจากการวัดสายอากาศนั้น แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.45 GHz จะพบว่ามีค่าไม่ใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  เลย นี่คือสาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยด้วย ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการออกแบบสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดเพื่อแมตซ์อิมพีแดนซ์

### 3.3 การออกแบบสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิด

ในหัวข้อที่ 2.3.1 ได้กล่าวถึงสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดไว้แล้ว โดยจากสมการที่ (2.23) และ (2.24) การคำนวณระยะต่าง ๆ ของสายท่อนสั้นนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร  $Z_0$   $Z_L$  และ  $\beta$  ซึ่งเราจะทราบค่าของ  $Z_0$  ได้จากอิมพีแดนซ์ของสายส่ง ในงานวิจัยนี้ใช้สายส่งที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  นอกจากนี้ยังหาค่า  $\beta$  ได้จาก

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.1)$$

ค่า  $Z_L$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งอยู่ในหัวข้อที่ 3.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสามารถพิจารณาได้ 3 ค่า คือ กรณี A และ B สามารถใช้อิมพีแดนซ์ค่าเดียวกันได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของทั้งสองกรณี มีค่าใกล้เคียงกัน กรณี C และ D สามารถใช้อิมพีแดนซ์ค่าเดียวกันได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และ 4 กรณีสุดท้ายคือ กรณี E F G และ H สามารถใช้อิมพีแดนซ์ค่าเดียวกันได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของทั้ง 4 กรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 ค่านี้ ดูได้จากรูปที่ 3.51 ถึง 3.53

รูปที่ 3.49 ถึง 3.51 ทำให้ทราบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปลเปลี่ยนกรณี A และกรณี B มีค่าเท่ากับ  $3.228 - j51.98 \Omega$  กรณี C และกรณี D มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $1.861 + j11.52 \Omega$  และกรณี E F G และ H มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $2.703 - j57.01 \Omega$

จากสมการที่ (2.24) ถ้า  $d$  มีค่าเท่ากับ  $n\lambda$  จะทำให้

$$Z_{input} = Z_{in} \quad (3.2)$$

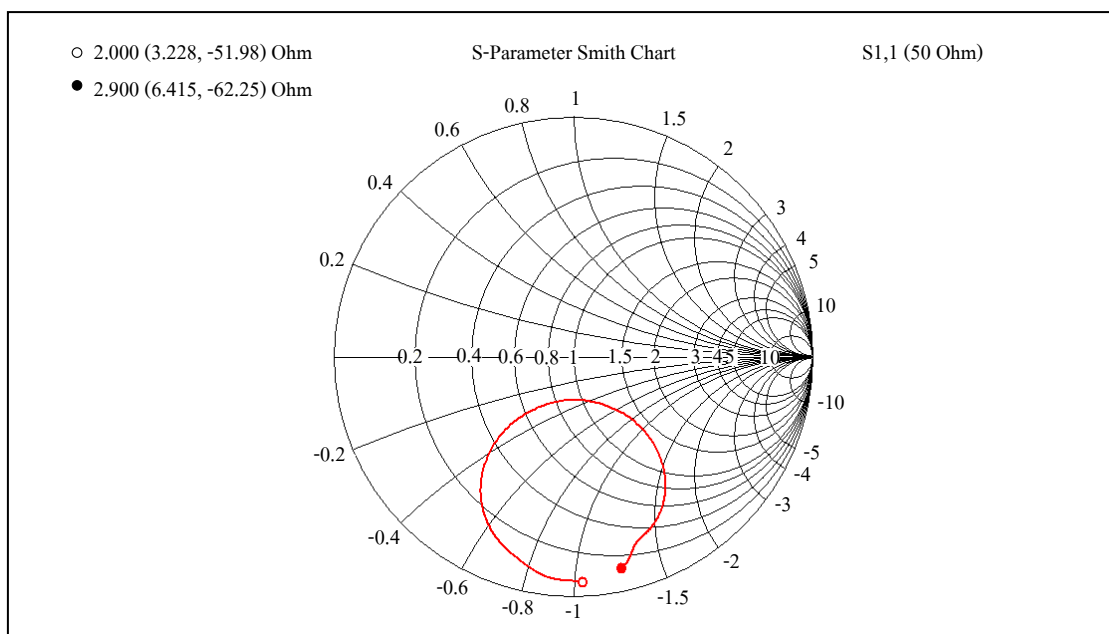
แหล่งจ่ายมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  ดังนั้น  $Z_{in} = 50 \Omega$  จากนั้นแทนค่า  $Z_{in}$  และ  $Z_0$  ลงในสมการที่ (2.23) จะได้

$$50 = \frac{50(Z_L + j50 \tan \beta L)}{50 - 50 \tan \beta L \tan \beta l + jZ_L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta l} \quad (3.3)$$

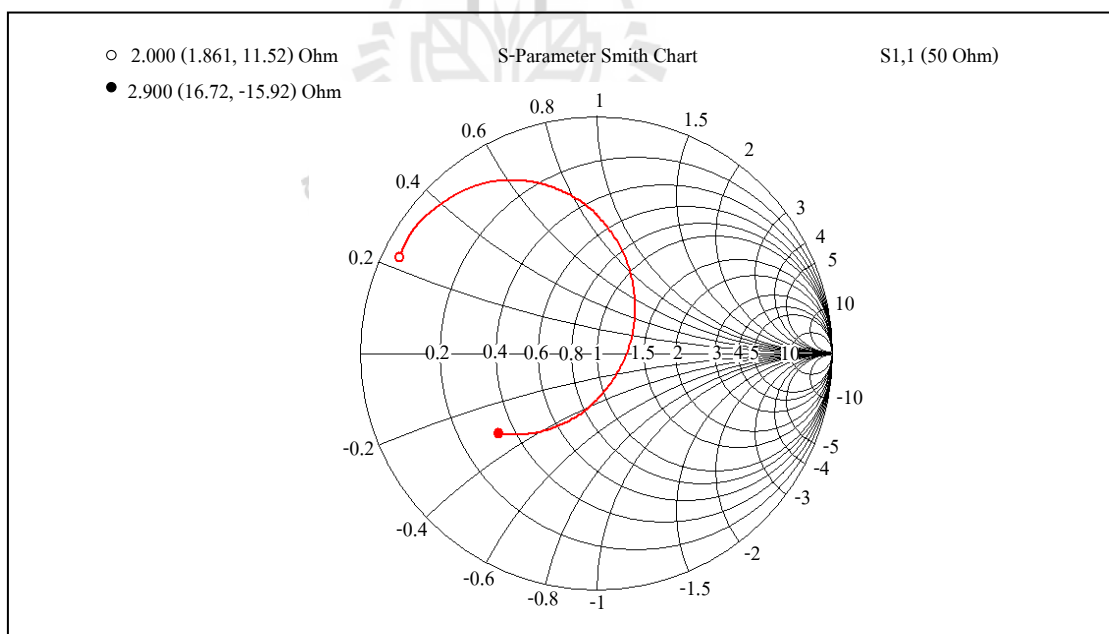
$$50 - 50 \tan \beta L \tan \beta l + jZ_L \tan \beta L + jZ_L \tan \beta l = Z_L + j50 \tan \beta L \quad (3.4)$$

$$(50 - 50 \tan \beta L \tan \beta l) + j(Z_L \tan \beta L + Z_L \tan \beta l) = Z_L + j50 \tan \beta L \quad (3.5)$$

สมการที่ (3.5) สามารถแยกได้เป็น 2 พจน์ ดังนี้

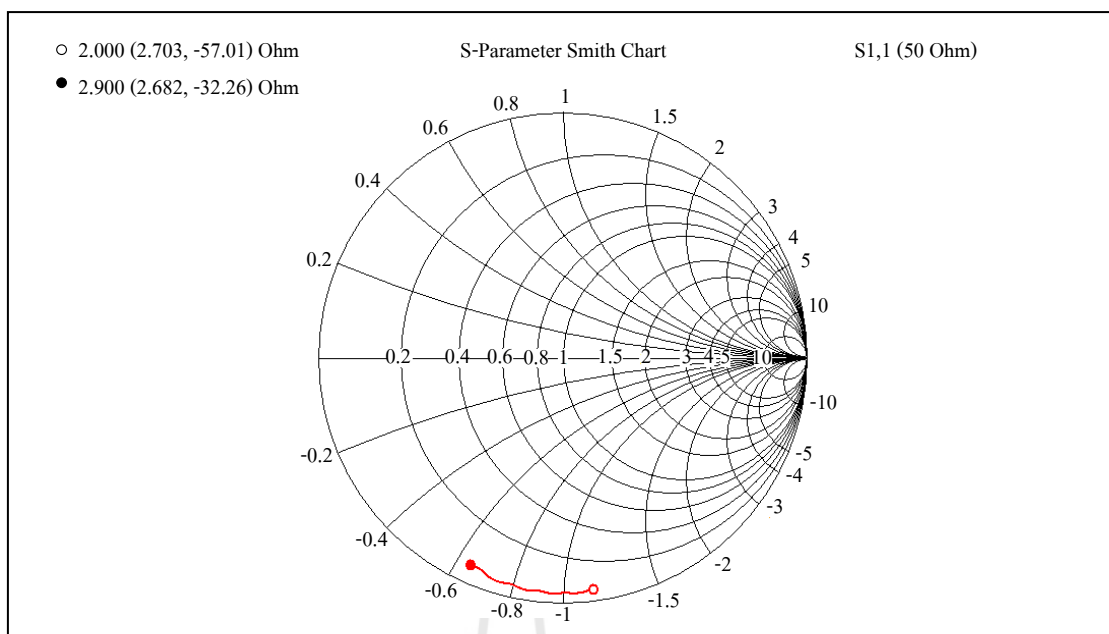


รูปที่ 3.49 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี A และกรณี B ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.50 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี C และกรณี D ที่ความถี่ 2.45 GHz





รูปที่ 3.51 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมกรณี E F G และกรณี H ที่ความถี่ 2.45 GHz

$$Z_L = 50 - 50 \tan \beta L \tan \beta l \quad (3.6)$$

$$50 \tan \beta L = Z_L \tan \beta L + Z_L \tan \beta l \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6) จะได้

$$\tan \beta l = \frac{50 - Z_L}{50 \tan \beta L} \quad (3.8)$$

นำสมการที่ (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$50 \tan \beta L = Z_L \tan \beta L + Z_L \frac{50 - Z_L}{50 \tan \beta L} \quad (3.9)$$

$$50(50 - Z_L) \tan^2 \beta L = Z_L(50 - Z_L) \quad (3.10)$$

$$Z_L = 50 \tan^2(\beta L) \quad (3.11)$$

นำค่า  $Z_L$  ที่ได้แทนค่าลงในสมการที่ (3.11) จะทราบค่า  $L$  จากนั้นนำค่า  $Z_L$  และค่า  $L$  ที่หาได้แทนลงในสมการที่ (3.8) ก็จะทราบค่า  $l$  เช่นกัน ซึ่งในกรณี A และ B หาค่า  $L$  ได้ดังนี้

$$3.228 - j51.98 = 50 \tan^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} L\right) \quad (3.12)$$

จะได้  $L = 0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3})$ ,  $-0.03 + j0.0181$  หรือ  $L = 0.0176 \angle -27.659^\circ$ ,  $0.035 \angle 148.8322^\circ$  นำ  $L$  ไปแทนค่าในสมการที่ (3.8) จะได้

$$\tan \beta l = \frac{50 - (3.228 - j51.98)}{50 \tan\left[\frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda}\right]} \quad (3.13)$$

จะได้  $l = -0.03 + j0.0181$ ,  $0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3})$  หรือ  $l = 0.035 \angle 148.8322^\circ$ ,  $0.0176 \angle -27.659^\circ$  และในกรณี C และ D หาค่า  $L$  ได้ดังนี้

$$1.861 + j11.52 = 50 \tan^2 \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (3.14)$$

จะได้  $L = (7.4524 \times 10^{-3}) + j(5.455 \times 10^{-3})$ ,  $0.0243 - j(7.3331 \times 10^{-3})$  หรือ  $L = (9.2355 \times 10^{-3}) \angle 36.2031^\circ$ ,  $0.0254 \angle -16.7868^\circ$  นำ  $L$  แทนค่าในสมการที่ (3.8) จะได้

$$\tan \beta l = \frac{50 - (1.861 + j11.52)}{50 \tan \frac{2\pi((7.4524 \times 10^{-3}) + j(5.455 \times 10^{-3}))}{\lambda}} \quad (3.15)$$

จะ ได้  $l = 0.0243 - j(7.3331 \times 10^{-3})$ ,  $(7.4524 \times 10^{-3}) + j(5.455 \times 10^{-3})$  หรือ  $l = 0.0254$   
 $\angle -16.7868^\circ$ ,  $(9.2355 \times 10^{-3}) \angle 36.2031^\circ$

ในกรณี E F G และ H หาค่า L ได้ดังนี้

$$2.703 - j57.01 = 50 \left( 1 - \frac{50 - 2.703 + j57.01}{2.703 - j57.01} \tan^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} L \right) \right) \quad (3.16)$$

จะ ได้  $L = 0.0162 - j(8.2376 \times 10^{-3})$ ,  $-0.0286 + j0.0175$  หรือ  $L = 0.0182 \angle -26.9599^\circ$ ,  
 $0.0336 \angle 148.53^\circ$  นำ L ไปแทนค่าในสมการที่ (3.8) จะได้

$$\tan \beta l = \frac{50 - 2.703 + j57.01}{2.703 - j57.01} \tan \left( \frac{2\pi(0.0162 - j(8.2376 \times 10^{-3}))}{\lambda} \right) \quad (3.17)$$

จะ ได้  $l = -0.0286 + j0.0175$ ,  $0.0162 - j(8.2376 \times 10^{-3})$  หรือ  $l = 0.0336 \angle 148.53^\circ$ ,  $0.0182$   
 $\angle -26.9599^\circ$

ดังนั้นจะสรุปความยาวของสายท่อนสั้นวงจรเปิดของแต่ละกรณีได้ดังนี้

กรณี A และ B ความยาวของ L เท่ากับ 17.6 มม. หรือ 35 มม. ความยาวของ l เท่ากับ 35 มม. หรือ 17.6 มม. กรณี C และ D ความยาวของ L เท่ากับ 9 มม. หรือ 25.4 มม. ความยาวของ l เท่ากับ 25.4 มม. หรือ 9 มม. และกรณี E F G และ H ความยาวของ L เท่ากับ 18.2 มม. หรือ 33.6 มม. ความยาวของ l เท่ากับ 33.6 มม. หรือ 18.2 มม.

ดังนั้น หากต้องการเปลี่ยนกรณีการัดวงจรเพื่อให้ค่าคลื่นหลักหันไปในทิศทางอื่นจะต้องมีการเปลี่ยนสายท่อนสั้นเสมอ ทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ เช่น การใช้งานในเรือขายท้องถิ่นไร้สาย แต่เนื่องจากความยาวของ L และ l ในแต่ละกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจะทำการคำนวณกลับเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยเลือกความยาว L และ l มา 1 ค่าจาก 3 ค่า ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  มากที่สุด โดยจะเลือกใช้ความยาว L และ l จากกรณี A และ B คือ ความยาวของ  $L = -0.03 + j0.0181$  ความยาว  $l = 0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3})$  นำไปแทนค่าในสมการที่ (2.23)

กรณี A และ B สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.16 ดังนี้

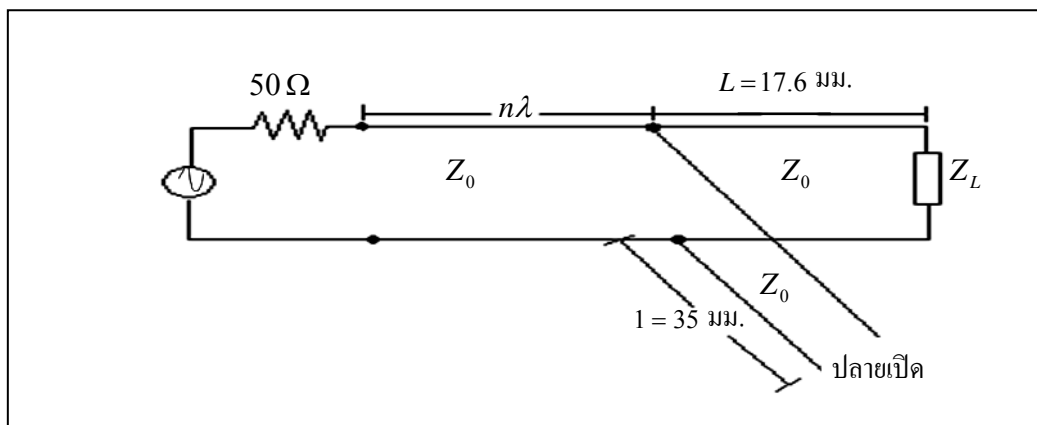
$$Z_{in} = \left[ \begin{array}{l} 50 \left( 3.228 - j51.98 + j50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \right) \\ 50 - 50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \\ + j(3.228 - j51.98) \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \\ + j(3.228 - j51.98) \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \end{array} \right] \quad (3.16)$$

ดังนั้นจะได้  $Z_{in} = 49.9262 + j0.1425$  หรือ  $Z_{in} = 49.9264 \angle 0.1635^\circ$  และในกรณี C และ D สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.17 ดังนี้

$$Z_{in} = \left[ \begin{array}{l} 50 \left( 1.861 + j11.52 + j50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \right) \\ 50 - 50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \\ + j(1.861 + j11.52) \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \\ + j(1.861 + j11.52) \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \end{array} \right] \quad (3.17)$$

ดังนั้นจะได้  $Z_{in} = -44.748 + j26.7088$  หรือ  $Z_{in} = 52.1128 \angle 149.1682^\circ$  และกรณี E F G และ H สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.18 ดังนี้

$$Z_{in} = \left[ \begin{array}{l} 50 \left( 2.703 - j57.01 + j50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \right) \\ 50 - 50 \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \\ + j(2.703 - j57.01) \tan \frac{2\pi(-0.03 + j0.0181)}{\lambda} \\ + j(2.703 - j57.01) \tan \frac{2\pi(0.0156 - j(8.1647 \times 10^{-3}))}{\lambda} \end{array} \right] \quad (3.18)$$



รูปที่ 3.52 แสดงระยะ  $L$  และ  $l$  ของสายท่อนสั้น

ดังนั้นจะได้  $Z_{in} = 47.49 - j10.0457$  หรือ  $Z_{in} = 48.5409 \angle -11.9439^\circ$

จะเห็นว่า  $Z_{in}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  ทุกกรณี ดังนั้นจึงเลือกใช้ความยาวของสายท่อนสั้นแบบกรณี A และ B คือความยาวของ  $L$  เท่ากับ  $17.6$  มม. ความยาวของ  $l$  เท่ากับ  $35$  มม. นั่นเอง ซึ่งแสดงรูปสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดและระยะต่าง ๆ ในรูปที่ 3.52

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างของสายอากาศแปดเหลี่ยมและการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ซึ่งผลที่ได้ประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบอีและเอซ สัมประสิทธิ์การสะท้อน และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้โดยการลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศในแต่ละด้าน นอกจากนี้ยังได้แสดงการคำนวณหาระยะต่าง ๆ ของสายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดเพื่อแมตซ์ให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับภาคส่งอีกด้วย

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศทั้ง 8 กรณี โดยจะทดสอบทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อน อิมพีแดนซ์ แบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยายของสายอากาศที่สร้างขึ้นจริง นอกจากนี้สายอากาศที่สร้างขึ้นจริงนี้จะถูกนำไปทดสอบในพื้นที่ที่มีการใช้งานเครือข่ายไร้สายจริงเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบของตารางและกราฟ

## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์ผล

จากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ที่กล่าวในบทที่ 3 นั้นพบว่า การลัดวงจรที่สายอากาศแปดเหลี่ยมสามารถสวิตช์ลัดคลื่นได้จริง ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างสายอากาศแปดเหลี่ยมขึ้นมาตามที่ออกแบบไว้ ลัดวงจรโดยใช้ไดโอด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ไดโอดของบริษัท PHILIPS รุ่น BAP51-03 สายอากาศทุกด้านประกอบด้วยไดโอดด้านละ 3 ตัว และตัวเก็บประจุ 100 พิโกฟารัด (pF) ด้านละ 3 ตัว เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟกระแสดังตรงจากแหล่งจ่ายกำลังงานไหลเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจนส่งผลให้เครื่องมือเกิดความเสียหาย ซึ่งสายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วจะถูกนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

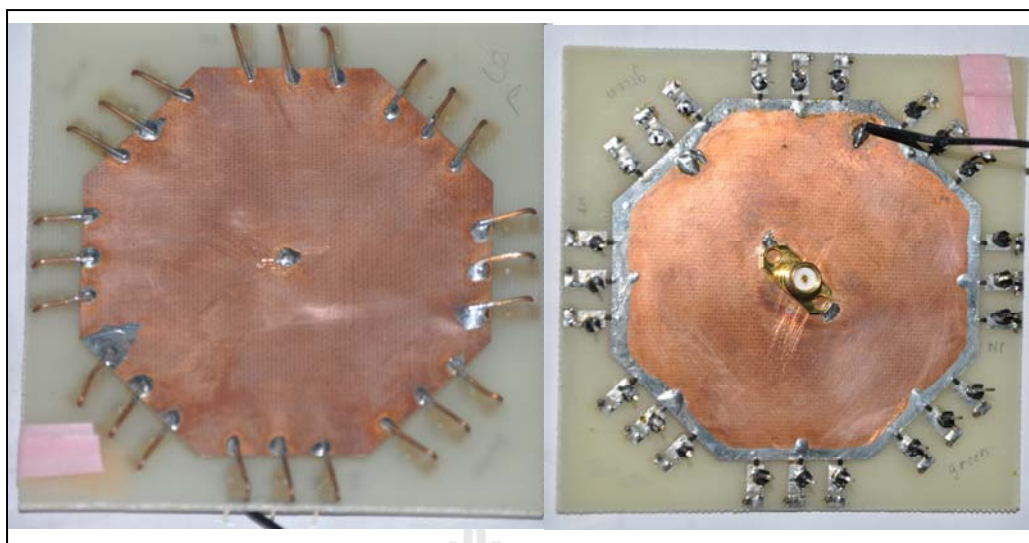
#### 4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สายอากาศที่สร้างขึ้นจริงโดยมีการต่อวงจรที่ประกอบด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุที่ทุกด้านของสายอากาศจะถูกนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยจะทำการลัดวงจรทั้งหมด 8 กรณีตามการจำลองผลที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

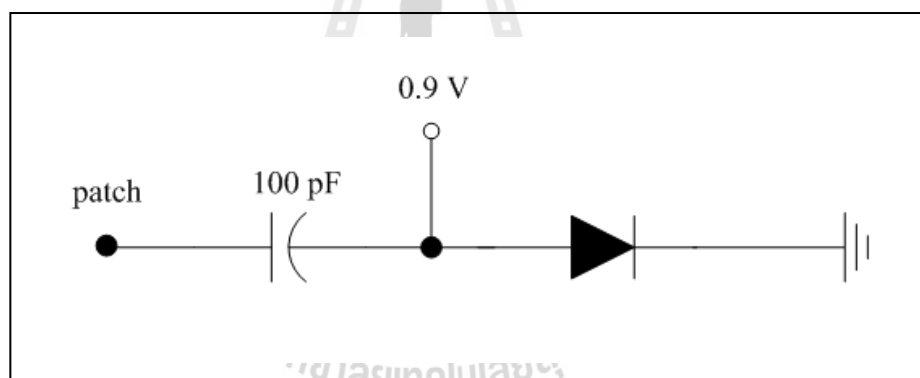
รูปที่ 4.1 แสดงรูปสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการต่อวงจรที่ประกอบด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุที่ทุกด้านของสายอากาศทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ สายอากาศนี้ถูกนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน อิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น 8722D รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ไม่มีการลัดวงจรตามลำดับ

เมื่อทำการลัดวงจรการพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 2 ด้าน นั่นคือกรณี A ถึงกรณี D และส่วนที่สองคือลัดวงจรที่ขอบของสายอากาศ 4 ด้าน นั่นคือกรณี E ถึงกรณี H นั่นเอง โดยแต่ละส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7

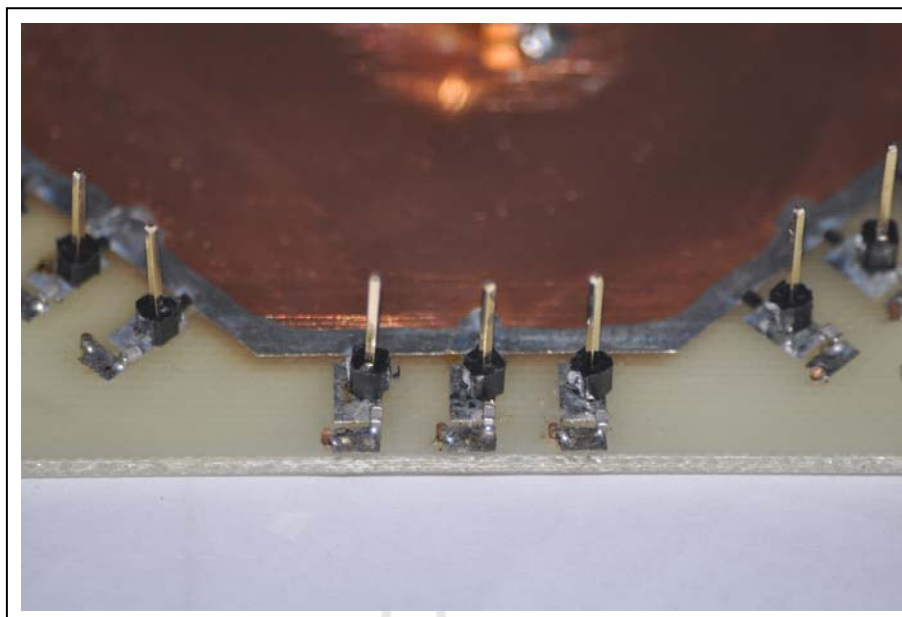
รูปที่ 4.4 และ 4.6 จะเห็นว่าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $-3.13$  dB และ  $-1.004$  dB ซึ่งถือว่ามีค่าสูง เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ  $9.198 + j3.1724 \Omega$  และ  $2.952 - j6.422 \Omega$  ซึ่งห่างจาก  $50 \Omega$  อย่างมาก ดังนั้นจึงต้องทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้สายท่อนสั้นแบบวงจรเปิดในทุกกรณีซึ่งได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3



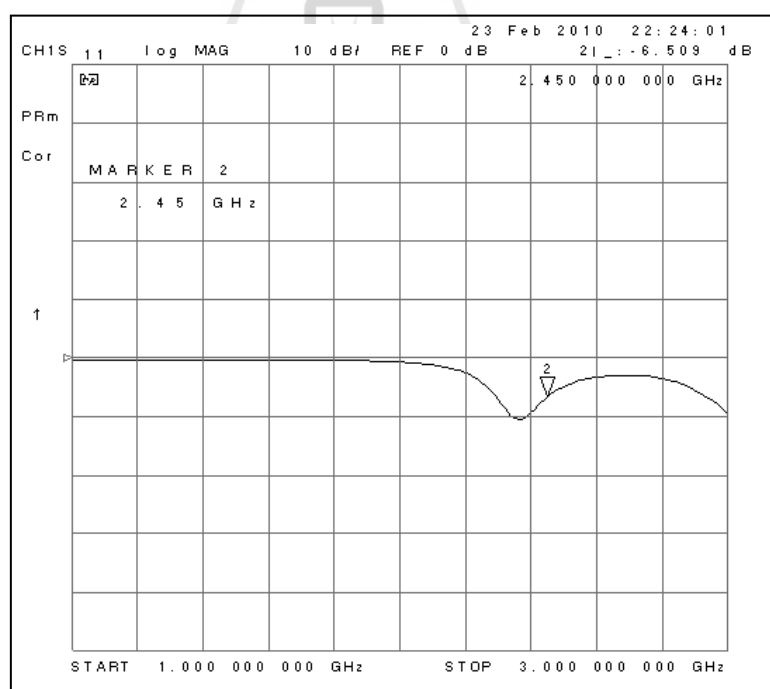
รูปที่ 4.1 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่ถูกสร้างจริง



รูปที่ 4.2 วงจรของการลัดวงจรโดยใช้พินไดโอด

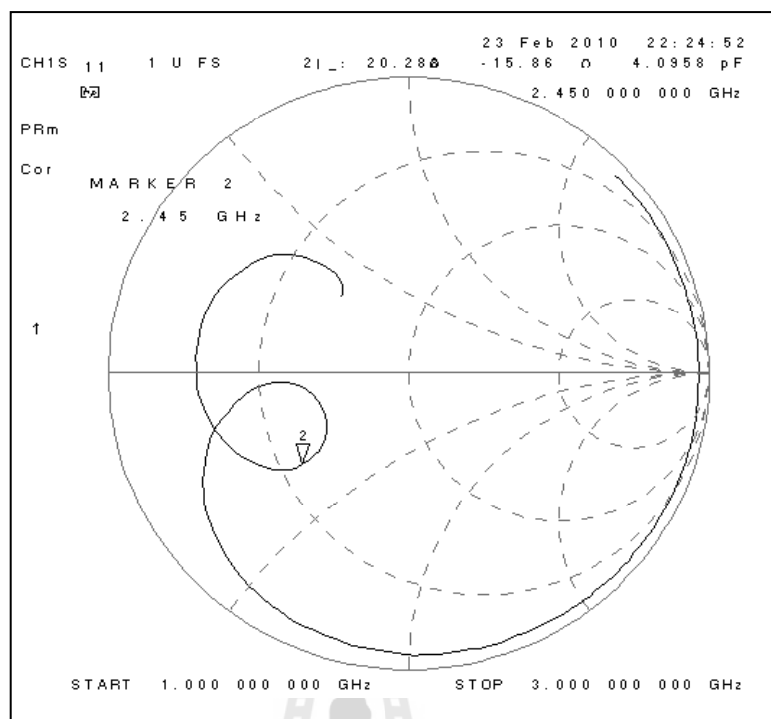


รูปที่ 4.3 การลัดวงจรโดยใช้핀ไดโอดบนสายอากาศที่สร้างจริง

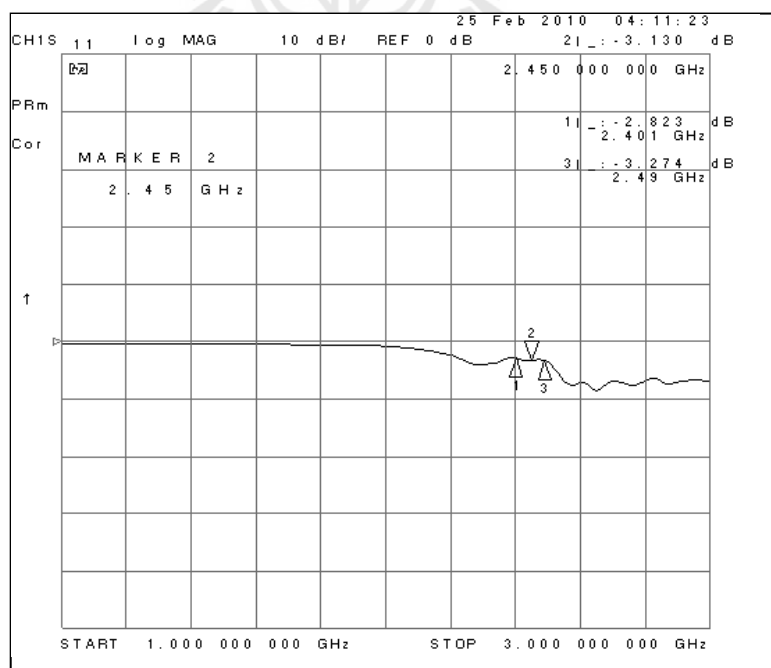


รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปรเปลี่ยนเมื่อไม่มีการลัดวงจร

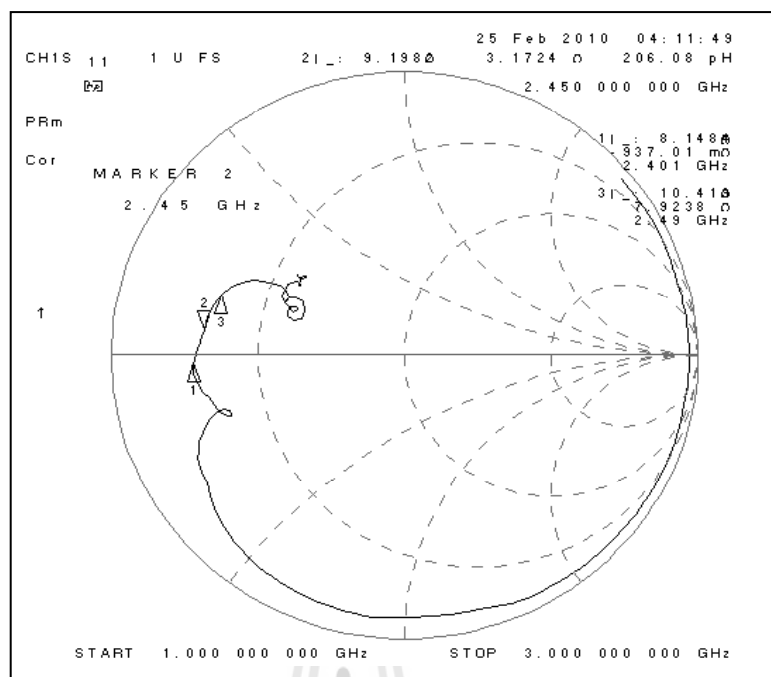




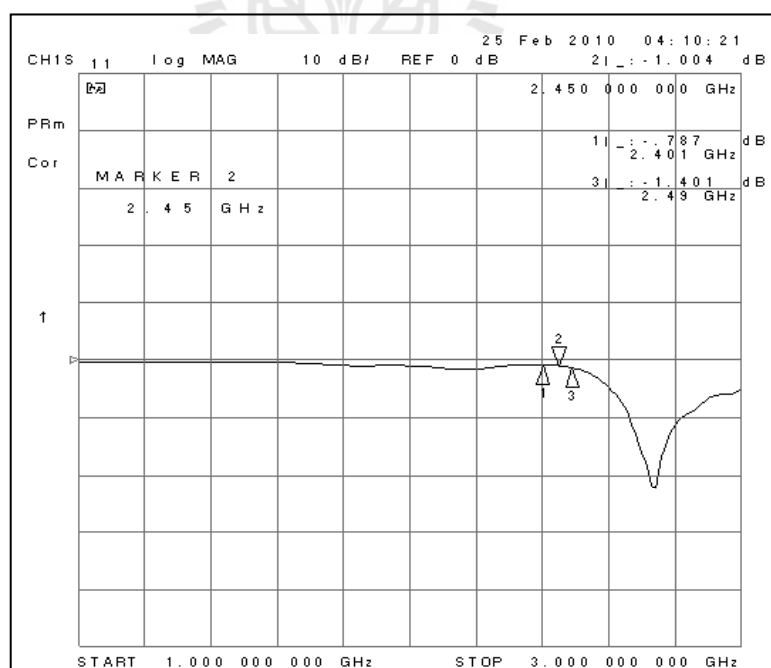
รูปที่ 4.5 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลือยเมื่อไม่มีการลัดวงจร



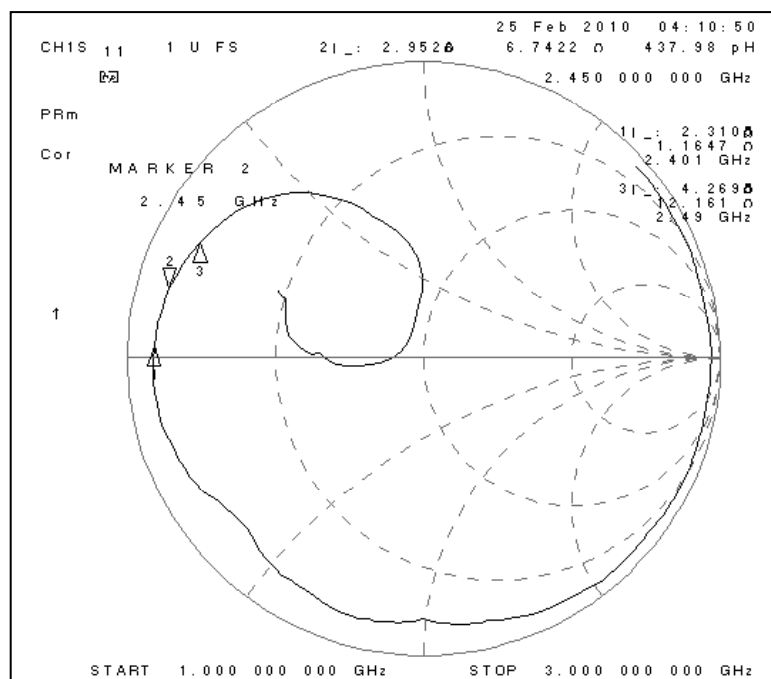
รูปที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D



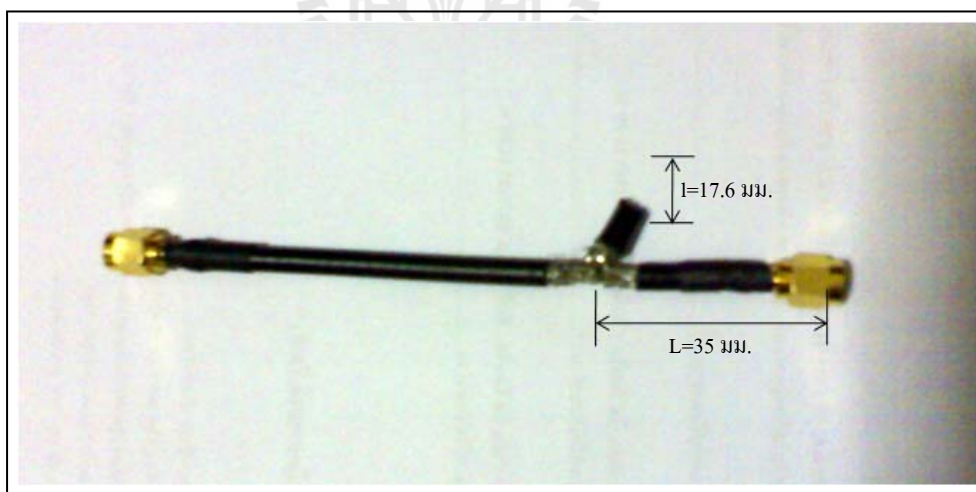
รูปที่ 4.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D



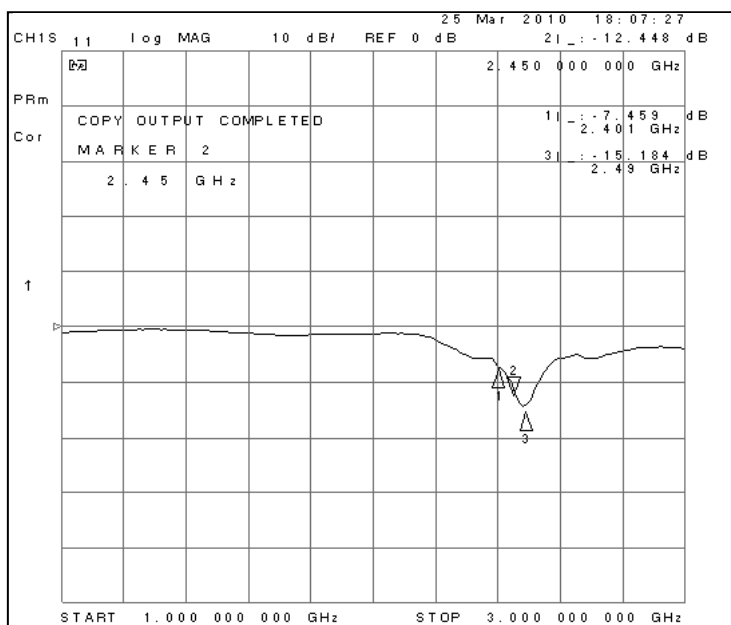
รูปที่ 4.8 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H



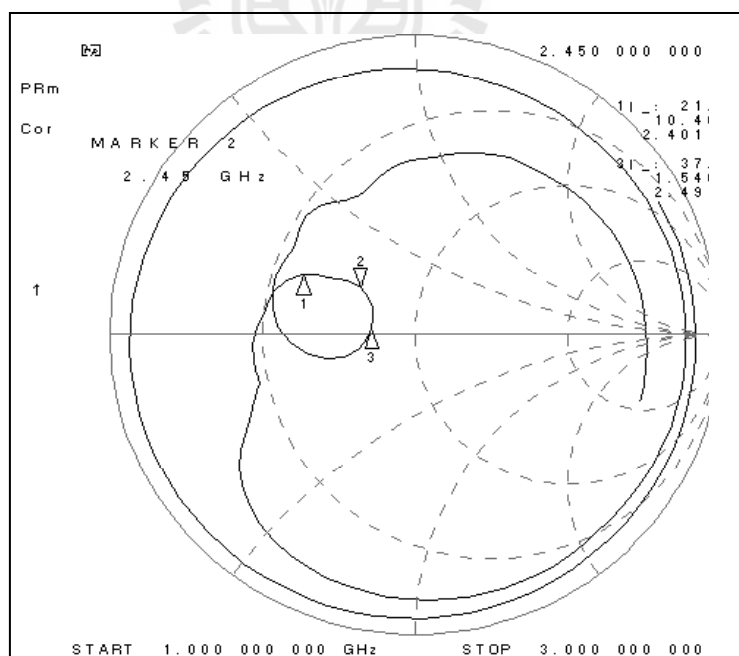
รูปที่ 4.9 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H



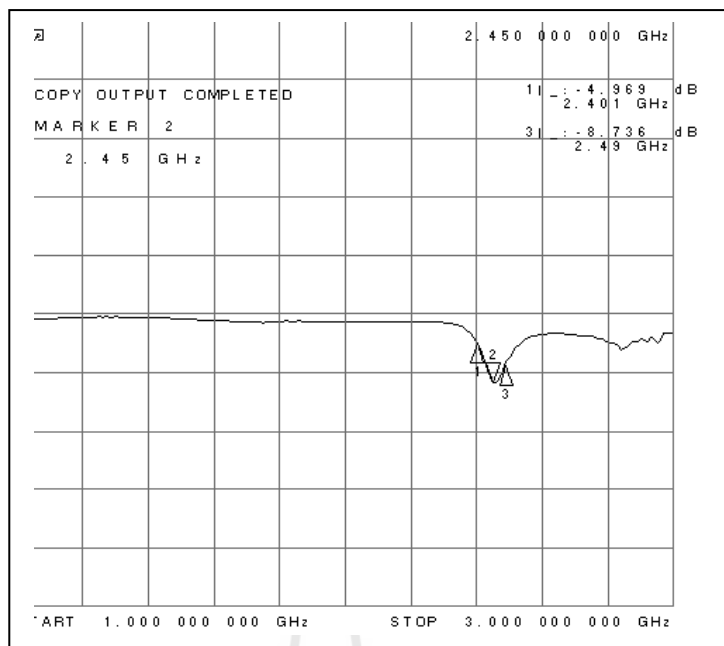
รูปที่ 4.10 สายท่อนสั้นวงจรเปิดที่ใช้ร่วมกับสายอากาศแปดเหลี่ยม



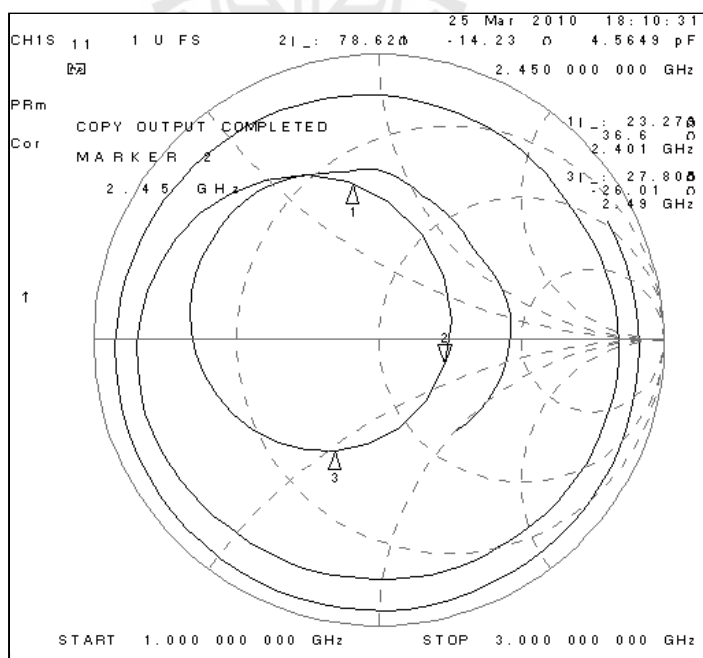
รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด  
ที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D



รูปที่ 4.12 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด  
ที่มีการลัดวงจรกรณี A ถึง D



รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด  
ที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H

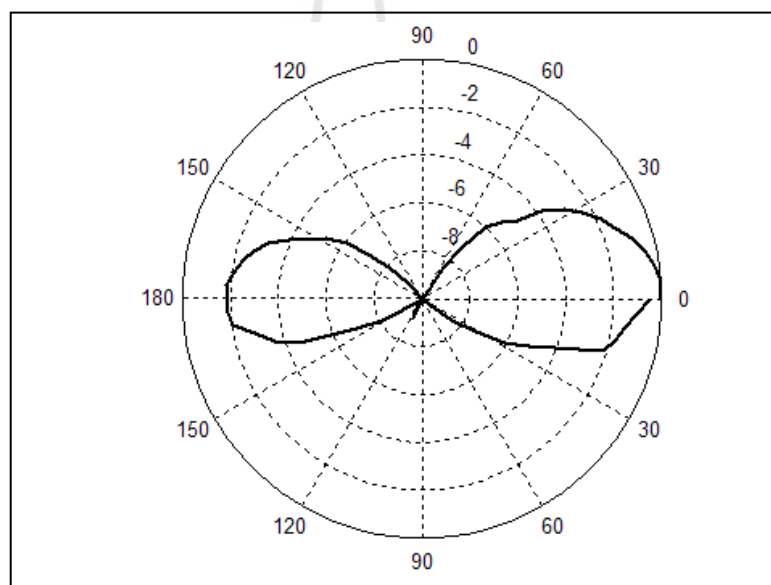


รูปที่ 4.14 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ต่อร่วมกับสายท่อนสั้นวงจรเปิด  
ที่มีการลัดวงจรกรณี E ถึง H

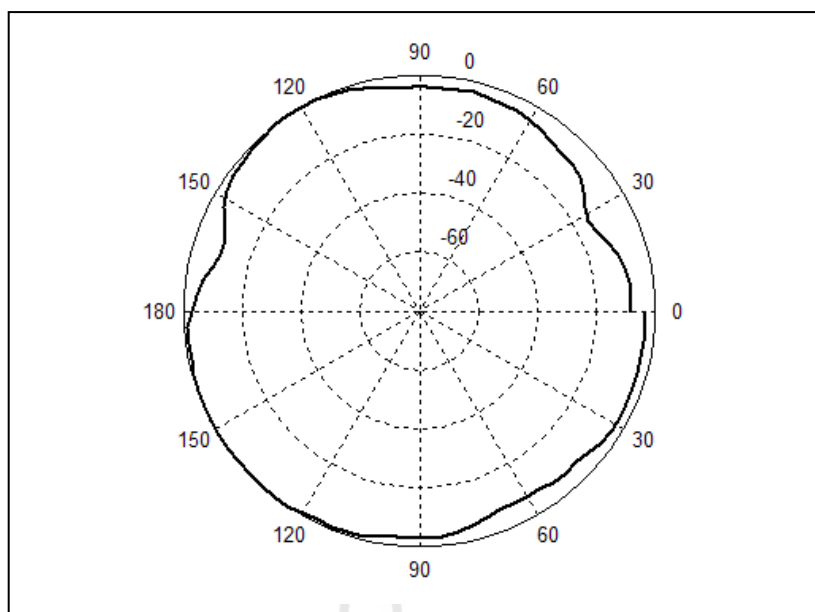
รูปที่ 4.8 เป็นสายท่อนสั้นวงจรเปิดที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 3 และเมื่อต่อสายท่อนสั้นวงจรเปิดเข้ากับสายอากาศแปดเหลี่ยมแล้วจะได้อิมพีแดนซ์เท่ากับ  $35.1565 \angle 18.2401^\circ \Omega$  ในกรณี A ถึง D และอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $79.8974 \angle -10.2593^\circ \Omega$  ในกรณี E ถึง H แสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.12 ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมีค่าน้อยลงและสามารถนำสายอากาศดังกล่าวไปใช้งานจริงได้ โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.11

สายอากาศแต่ละกรณีถูกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานภายในห้องที่ไม่มีกสะท้อนของคลื่น (anechoic chamber) โดยมีสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omnidirection antenna) เป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละกรณีดังนี้

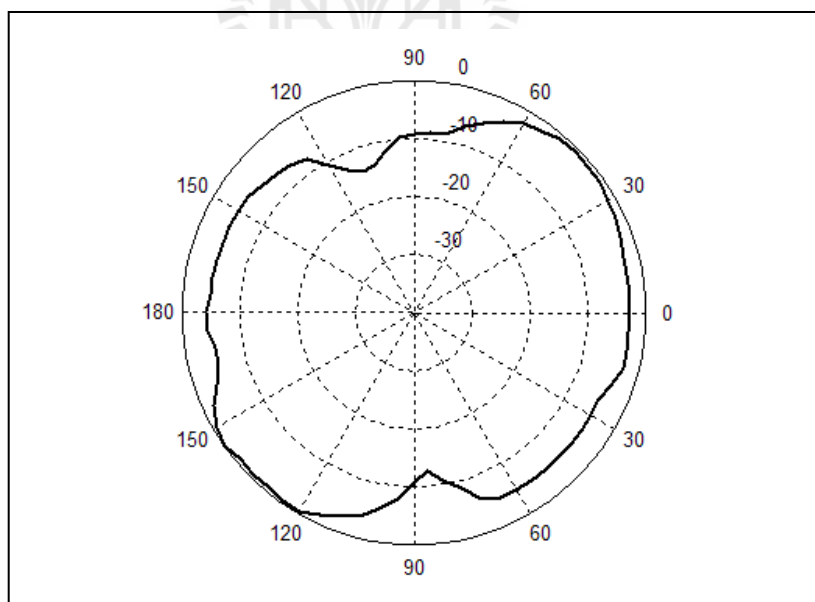
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี A



รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

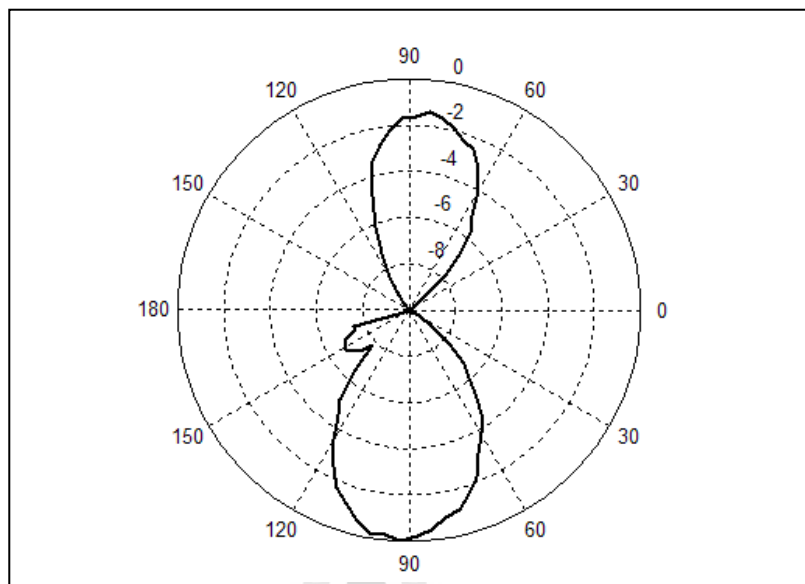


รูปที่ 4.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

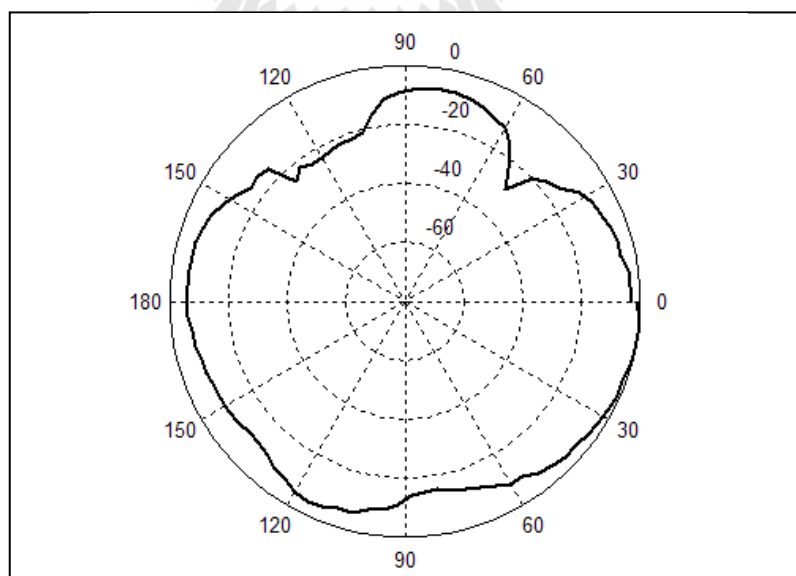


รูปที่ 4.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี B

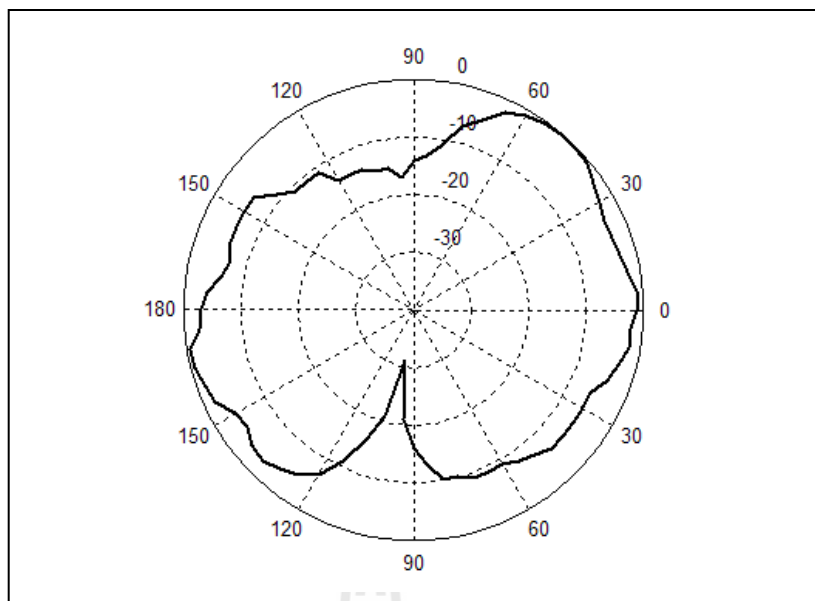


รูปที่ 4.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



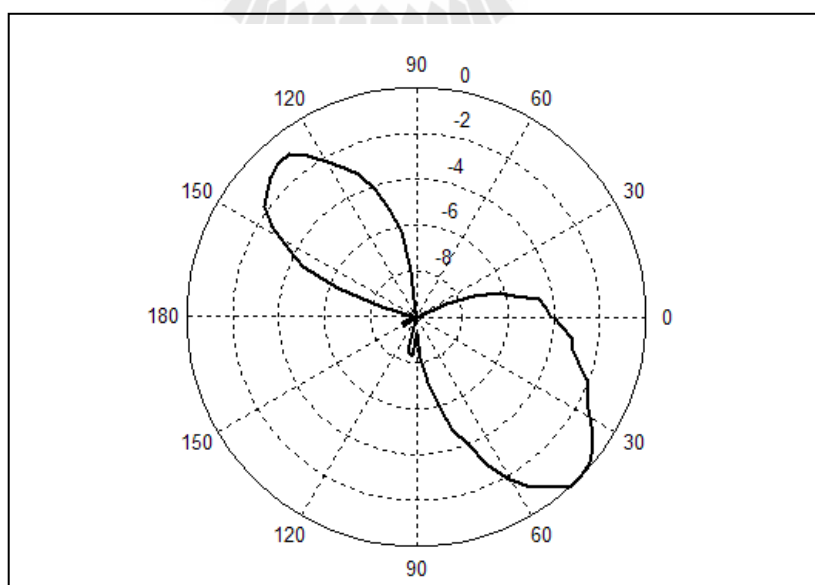
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



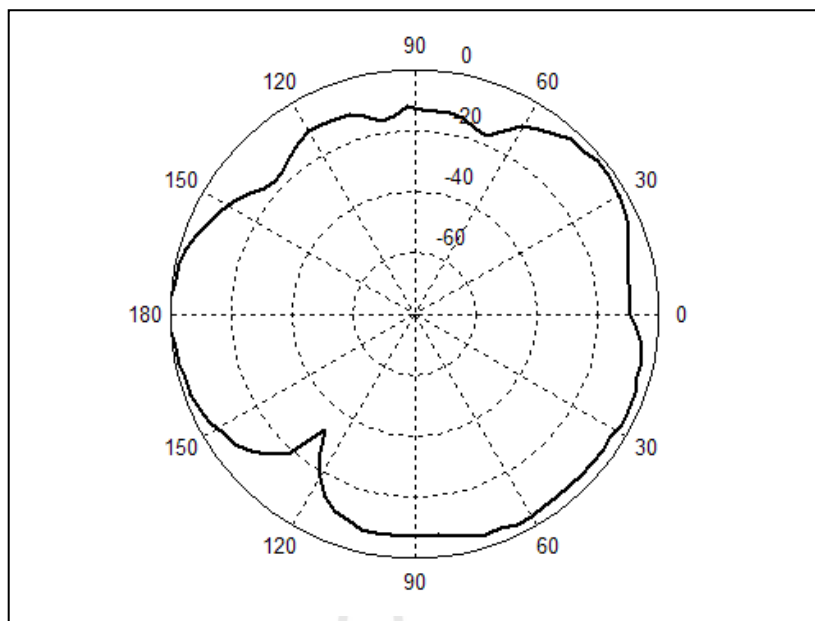


รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

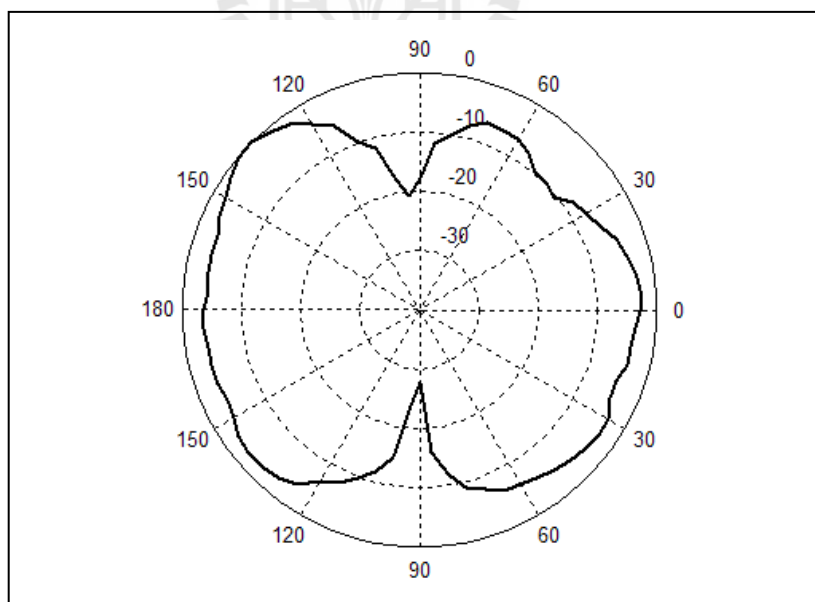
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี C



รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

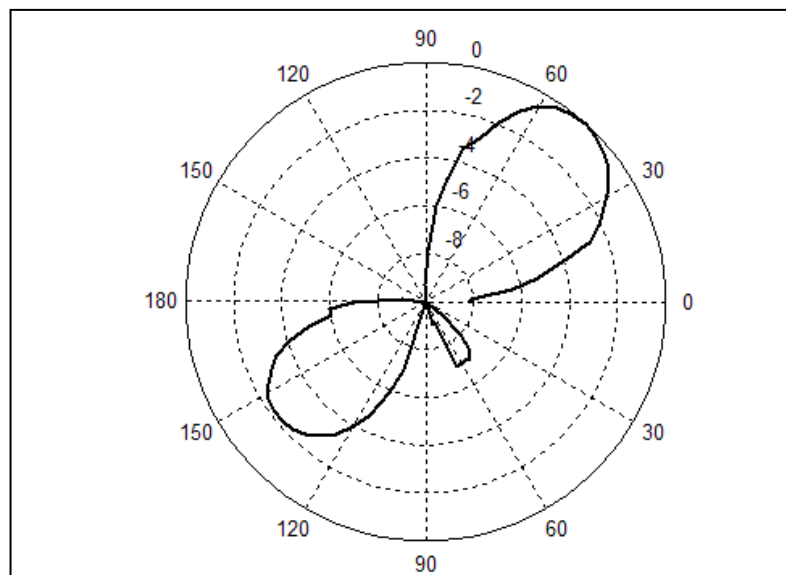


รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

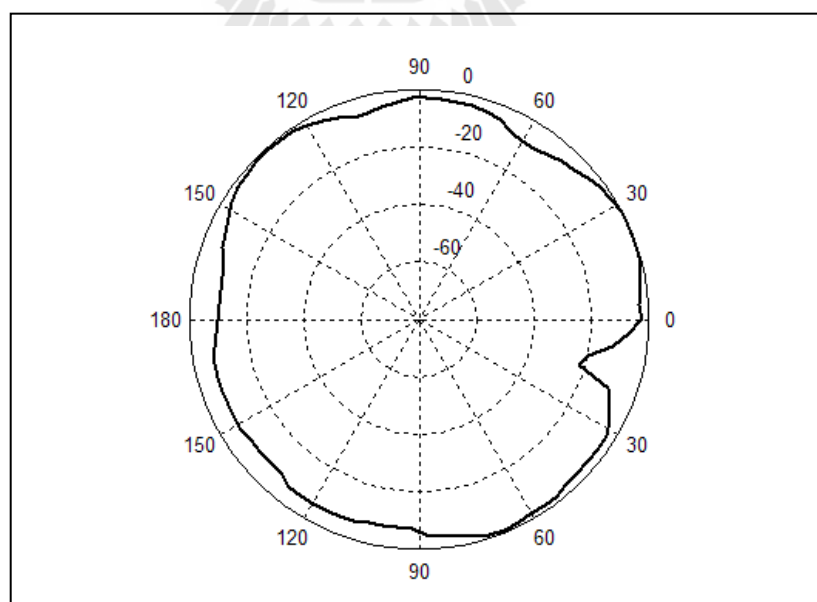


รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

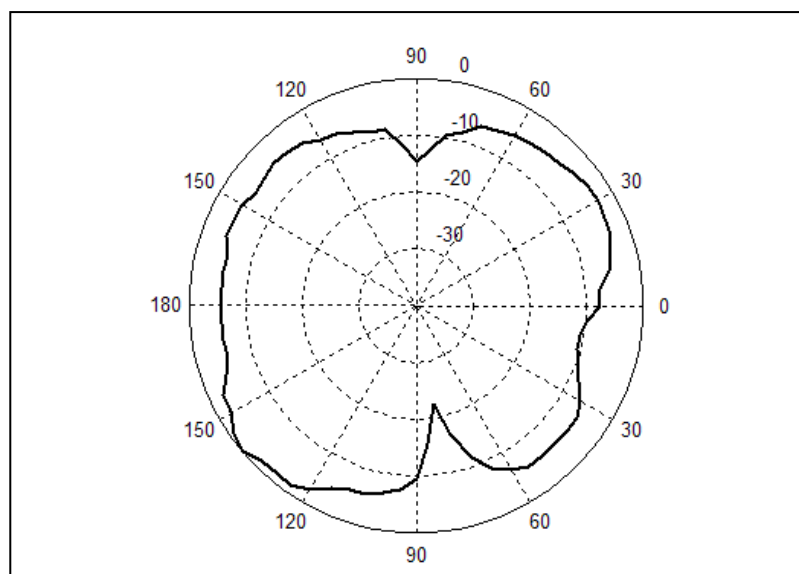
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี D



รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

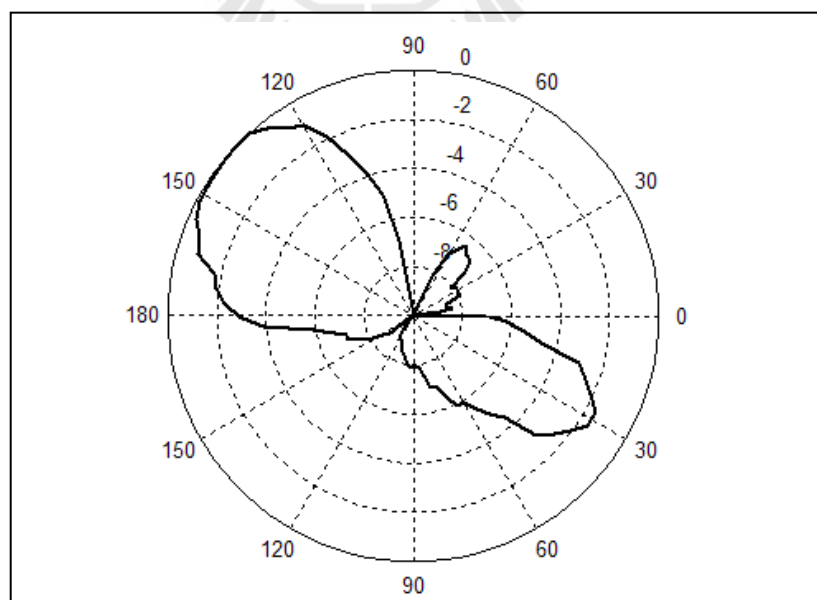


รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

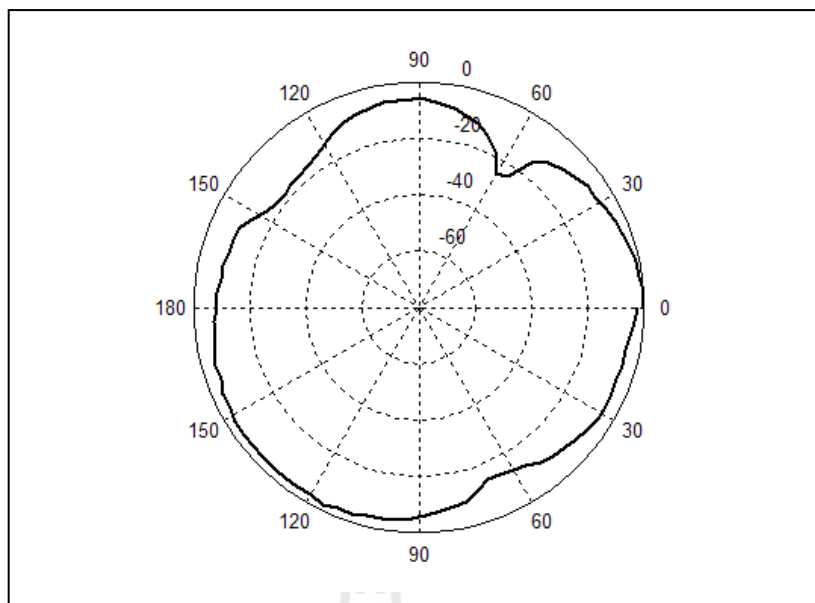


รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

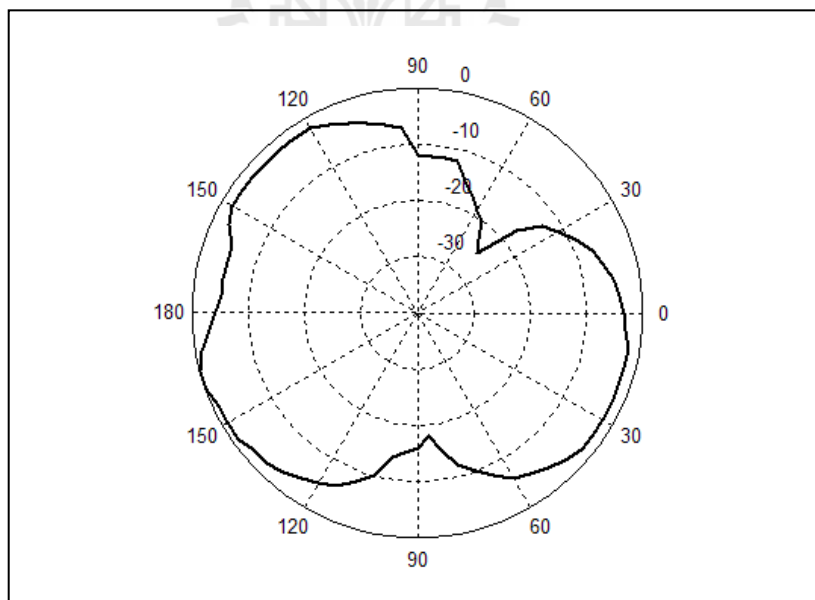
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี E



รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

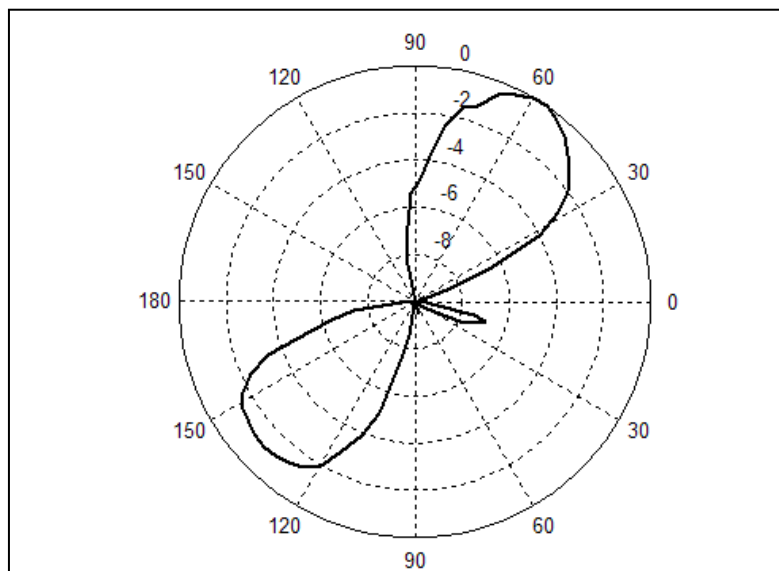


รูปที่ 4.28 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

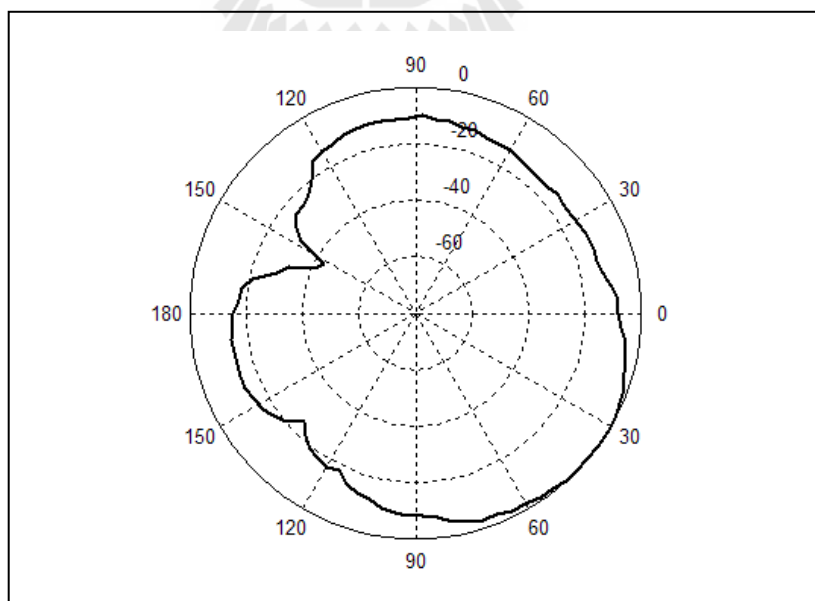


รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

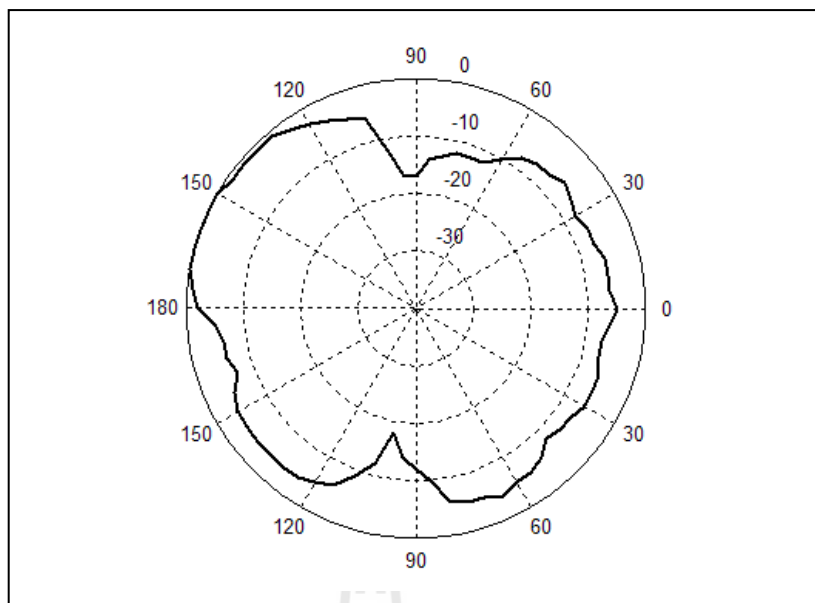
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี F



รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

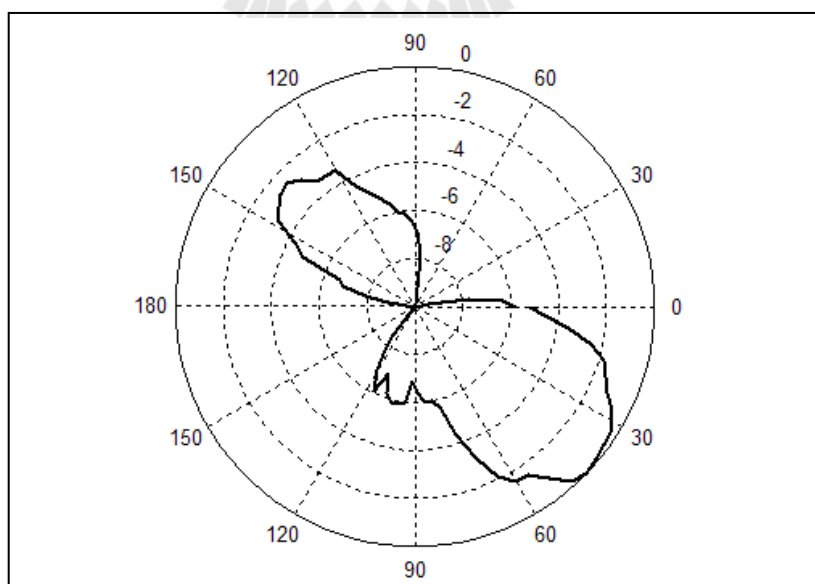


รูปที่ 4.31 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

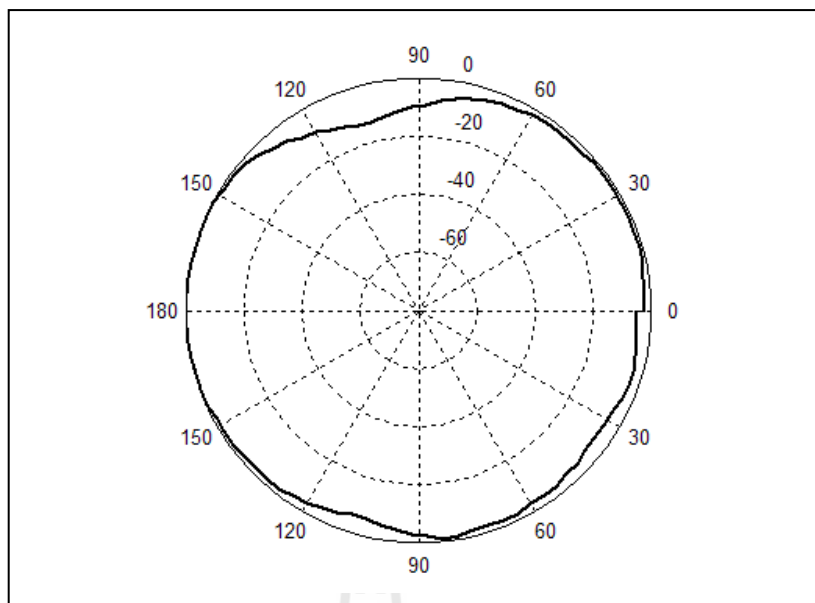


รูปที่ 4.32 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการัดวงจรในกรณี F  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

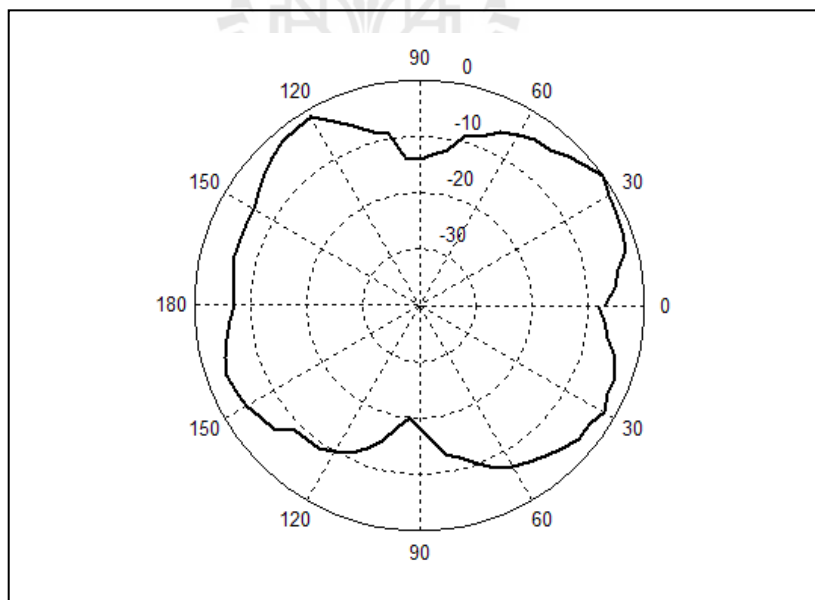
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี G



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการัดวงจรในกรณี G  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



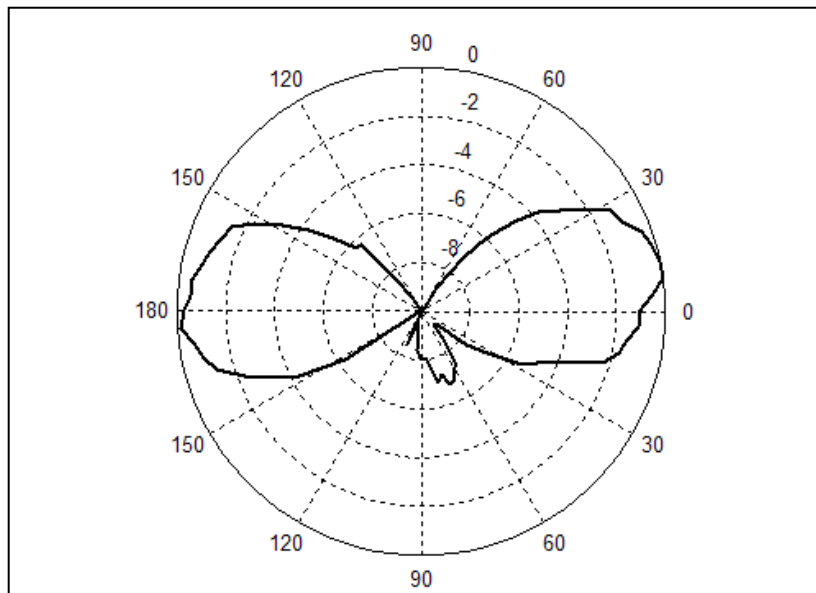
รูปที่ 4.34 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



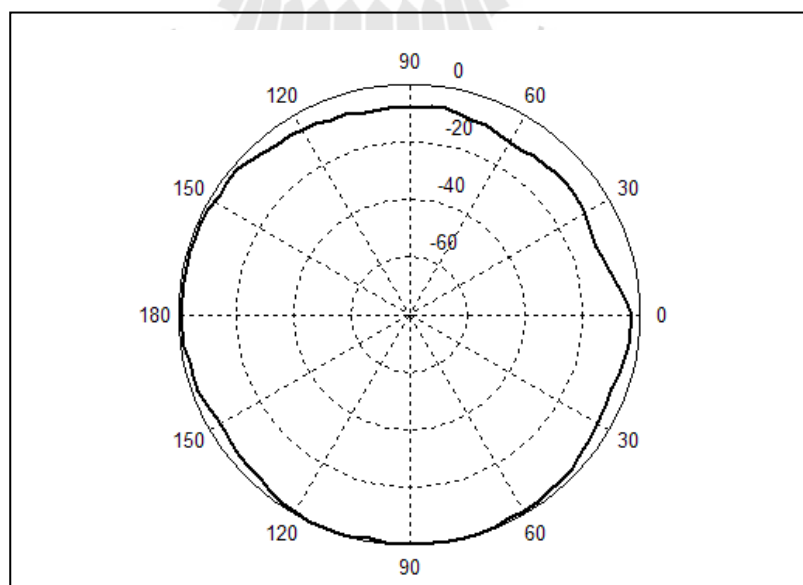
รูปที่ 4.35 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



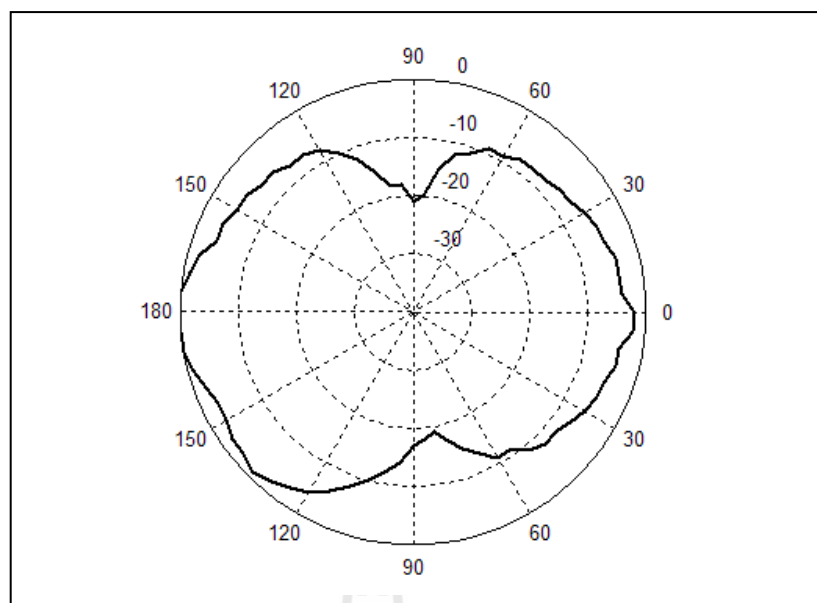
แบบรูปการแผ่พลังงานในกรณี H



รูปที่ 4.36 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



รูปที่ 4.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ 4.38 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H ที่ได้จากการวัดจริง เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

จากผลการวัดข้างต้นจะเห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$  ทั้งที่วัดได้จากสายอากาศจริงและที่ได้จากการจำลองผลใน โปรแกรม CST Microwave Studio ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 มีความสอดคล้องกัน โดยเปรียบเทียบผลจากการวัดจริงกับรูปที่ 3.15 3.22 3.25 3.32 3.35 3.42 3.45 และ 3.48 แต่แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่สร้างขึ้นในบางกรณีดูเหมือนมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าค่าคลื่นหลัก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามจากผลการวัดก็แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมนี้สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้จริง และเมื่อพิจารณาผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$  และ  $\phi, \theta = 90^\circ$  แล้ว สามารถสรุปได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบอื่นที่ได้จากสายอากาศที่สร้างขึ้นจริง และจากการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio มีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$

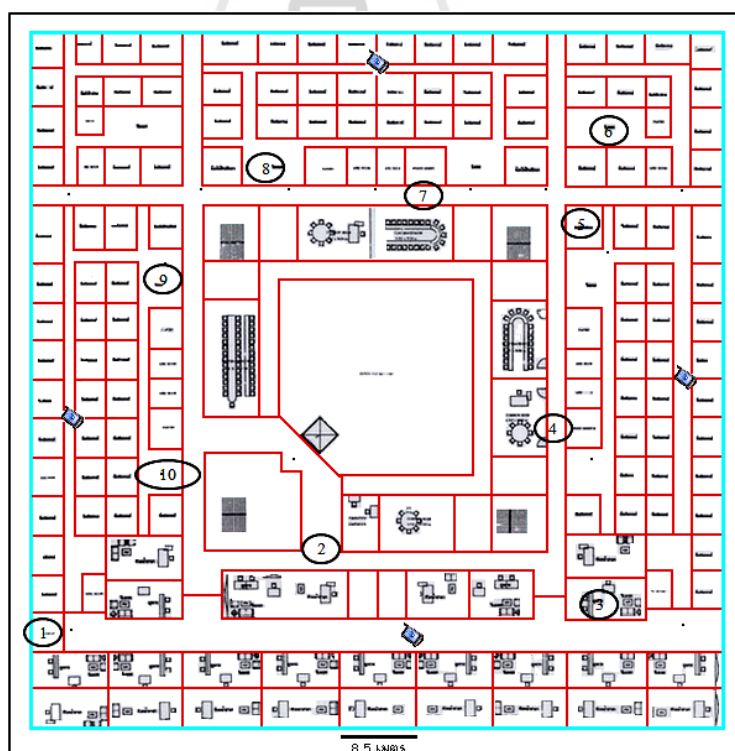
ในส่วนของอัตราขยายของสายอากาศ สายอากาศทั้งแปดกรณีได้ถูกวัดอัตราขยายเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางที่มีอัตราขยาย 5 dBi โดยสายอากาศกรณี A ถึง D มีอัตราขยายที่ใกล้เคียงกันคือ 13.3 dBi และกรณี E ถึง H มีอัตราขยายเท่ากับ 7.7 dBi จากอัตราขยายที่วัดได้นี้จะเห็นว่า สายอากาศแปดเหลี่ยมทั้งแปดกรณีมีอัตราขยายสูงกว่าสายอากาศ

แบบรอบทิศทางเนื่องจากสายอากาศดังกล่าวจะหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่นที่ไม่ต้องการ

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง โดยสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงจะถูกนำไปวัดสัญญาณในพื้นที่ใช้งานที่มีการใช้เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และนำไปเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

## 4.2 การทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริง

สายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นและสายอากาศแบบรอบทิศทางจะถูกนำไปวัดความแรงของสัญญาณ (signal strength) ที่ชั้น 4 อาคารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งจะทำให้การวัดสัญญาณทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ครั้ง โดยแสดงแผนผังและตำแหน่งที่วัดสัญญาณในรูปที่ 4.37 ความแรงของสัญญาณที่วัดได้จากการใช้สายอากาศแปรคเหลียมที่ยังไม่มีการลัดวงจร สายอากาศแปรคเหลียมที่มีการลัดวงจรทั้ง 8 กรณื และสายอากาศแบบรอบทิศทางแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.39 แผนผังและตำแหน่งการวัดสัญญาณที่ชั้น 4 อาคารวิชาการ

ตารางที่ 4.1 ความแรงของสัญญาณ

	ตำแหน่งที่ 1			ตำแหน่งที่ 2			ตำแหน่งที่ 3			ตำแหน่งที่ 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	-40	-39	-39	-68	-70	-70	-65	-66	-68	-75	-72	-74
B	-43	-39	-39	-74	-70	-68	-62	-64	-70	-76	-72	-74
C	-41	-39	-39	-74	-71	-72	-60	-63	-70	-72	-74	-72
D	-41	-40	-42	-72	-70	-69	-63	-68	-70	-77	-75	-74
E	-47	-39	-36	-67	-71	-72	-63	-71	-68	-71	-74	-74
F	-45	-38	-42	-68	-72	-70	-61	-70	-70	-74	-77	-77
G	-43	-38	-41	-70	-70	-69	-62	-69	-70	-72	-76	-74
H	-42	-44	-42	-74	-70	-71	-66	-69	-70	-74	-74	-74
ไม่ถักวงจร	-49	-46	-45	-76	-75	-77	-69	-78	-73	-77	-78	-77
แบบรอบทิศทาง	-51	-50	-52	-79	-83	-79	-70	-75	-76	-80	-79	-78

ตารางที่ 4.1 ความแรงของสัญญาณ (ต่อ)

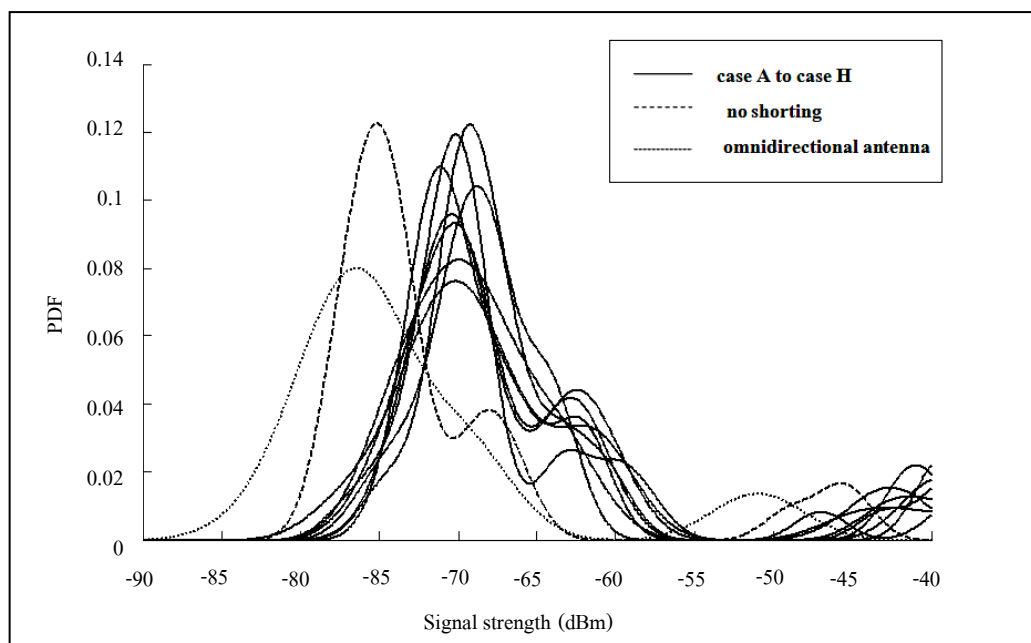
	ตำแหน่งที่ 5			ตำแหน่งที่ 6			ตำแหน่งที่ 7			ตำแหน่งที่ 8		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	-70	-68	-70	-64	-64	-66	-71	-70	-69	-68	-64	-63
B	-70	-70	-67	-61	-67	-64	-70	-68	-68	-68	-64	-60
C	-69	-70	-70	-63	-64	-60	-67	-71	-70	-70	-62	-62
D	-70	-72	-70	-63	-64	-60	-71	-70	-72	-69	-58	-60
E	-72	-68	-72	-62	-64	-66	-72	-70	-72	-70	-61	-62
F	-67	-73	-69	-62	-60	-62	-69	-72	-70	-72	-63	-61
G	-73	-72	-74	-63	-62	-64	-69	-68	-70	-70	-63	-61
H	-72	-73	-74	-64	-63	-62	-70	-70	-68	-67	-64	-64
ไม่ลัดวงจร	-76	-75	-75	-68	-66	-68	-76	-76	-75	-74	-70	-67
แบบรอบทิศทาง	-77	-79	-77	-69	-69	-71	-75	-76	-79	-76	-70	-68

ตารางที่ 4.1 ความแรงของสัญญาณ (ต่อ)

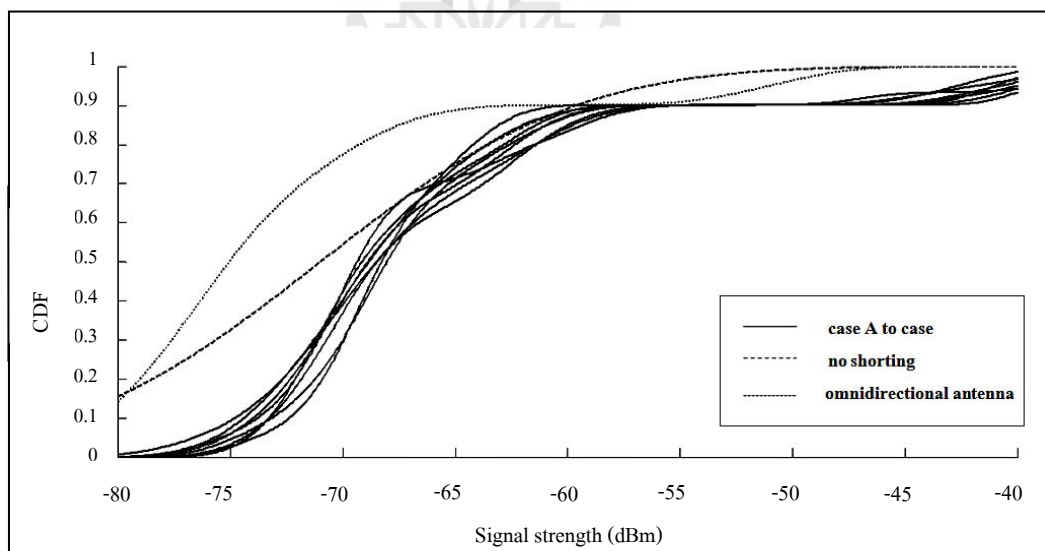
	ตำแหน่งที่ 9			ตำแหน่งที่ 10			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	
A	-70	-68	-68	-69	-70	-70	-65.60
B	-68	-70	-68	-72	-67	-70	-65.43
C	-68	-63	-69	-70	-70	-72	-65.23
D	-72	-69	-69	-71	-70	-70	-66.03
E	-70	-66	-71	-70	-72	-68	-66.03
F	-67	-66	-72	-68	-70	-72	-66.07
G	-70	-64	-72	-72	-68	-70	-65.97
H	-70	-71	-70	-68	-68	-68	-66.53
ไม่ลัดวงจร	-74	-74	-73	-75	-73	-74	-70.97
แบบรอบ ทิศทาง	-76	-75	-76	-75	-74	-74	-72.93

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า โดยส่วนใหญ่แล้วสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร จะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง และเมื่อทำการลัดวงจรสายอากาศแปดเหลี่ยม ความแรงของสัญญาณจะมากขึ้นกว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการลัดวงจร เนื่องจากสายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ ทำให้หันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังลดสัญญาณแทรกสอดลงอีกด้วย โดยความแรงของสัญญาณของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการสวิตช์ลำคลื่น โดยเฉลี่ยทั้งแปดกรณีมีค่าเท่ากับ -65.86 dB ซึ่งมีค่ามากกว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีการสวิตช์ลำคลื่นถึง 5.11 dB

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณในรูปที่ 4.38 ทำให้สามารถพิจารณาถึงความน่าจะเป็นที่สายอากาศแต่ละแบบจะมีความแรงของสัญญาณที่สามารถรับได้มากขึ้น โดยแกนนอนแสดงถึงความแรงของสัญญาณที่วัดได้ทั้งสิบตำแหน่ง และแกนตั้งแสดงถึงความน่าจะเป็นที่สายอากาศแต่ละแบบจะมีความแรงของสัญญาณที่รับได้มากขึ้น รูปนี้แสดงให้เห็นว่า สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรทั้งแปดกรณีมีความน่าจะเป็นที่จะมีความแรงของสัญญาณที่รับได้มากกว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ยังไม่ได้ลัดวงจร และสายอากาศแบบรอบทิศทางอีกด้วย



รูปที่ 4.40 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณที่สามารถรับได้



รูปที่ 4.41 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณที่สามารถรับได้

ในส่วนของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณที่สามารถรับได้ในรูปที่ 4.39 เมื่อทำการพิจารณาถึงค่าเฉลี่ยของการแจกแจงความน่าจะเป็นแล้วพบว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรทั้งแปดกรณีมีความน่าจะเป็นที่จะมีความแรงของสัญญาณที่รับได้มากกว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ยังไม่ได้ลัดวงจรและสายอากาศแบบรอบทิศทาง

### 4.3 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อน อิมพีแดนซ์ และอัตราขยายของสายอากาศที่ถูกสร้างขึ้นจริงทั้งแปดกรณี นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการวัดความแรงของสัญญาณในพื้นที่ใช้งานจริงโดยเปรียบเทียบกับสายอากาศแปดเหลี่ยมที่ไม่มีลัดวงจรและสายอากาศแบบรอบทิศทางอีกด้วย ผลการวัดทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้จริงและสามารถนำไปใช้งานในบริเวณที่มีการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้





## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื่องมาจากการใช้งานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีมากขึ้น ระบบจึงจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มมากขึ้น เทคนิคหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบได้คือการใช้ระบบสายอากาศเก่ง จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในกรณีที่ใช้สายอากาศจำนวนไม่มาก ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคัลีนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลาคัลีน ทั้งนี้ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคัลีนมีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะใช้ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคัลีนในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยนี้ยังสนใจการใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวในการสวิตช์ลาคัลีนเพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง มีขนาดเล็กลง และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ต่ำลงอีกด้วย และจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคัลีนพบว่า เคยมีผู้พัฒนาการสวิตช์ลาคัลีนด้วยสายอากาศเพียงต้นเดียวโดยสายอากาศมีรูปแบบและวิธีการสวิตช์ลาคัลีนแตกต่างกันไป ซึ่งยังมีความซับซ้อนในการสวิตช์ลาคัลีนอยู่ หรือมีทิศทางการสวิตช์ลาคัลีนที่น้อยเกินไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบสายอากาศต้นเดียวที่สามารถสวิตช์ลาคัลีนได้หลายทิศทาง มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดเล็กเหมาะกับการติดตั้งที่ตัวลูกข่ายสามารถใช้งานในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้จริงและมีค่าใช้จ่ายในการสร้างไม่สูง โดยงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio จากนั้นจึงสร้างสายอากาศสวิตช์ลาคัลีนแบบต้นเดียวตามการจำลองแบบขึ้นจริง และนำสายอากาศที่สร้างจริงไปทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อยืนยันว่าสายอากาศสามารถสวิตช์ลาคัลีนได้จริงตามการจำลองผลในโปรแกรม นอกจากนี้ยังได้นำสายอากาศที่สร้างขึ้นไปทำการทดสอบในพื้นที่ใช้งานจริงเพื่อเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณระหว่างสายอากาศดังกล่าวและสายอากาศแบบรอบทิศทางอีกด้วย

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากบทที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างลำคลื่นหลักและพูหลังยังมีความแตกต่างกันอยู่ ปัญหานี้ อาจเกิดจากการสร้างสายอากาศที่ยังไม่สมมาตรเท่าที่ควร ดังนั้นควรใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดเพียงพอในการตัดสายอากาศให้เท่ากันทุกด้าน

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

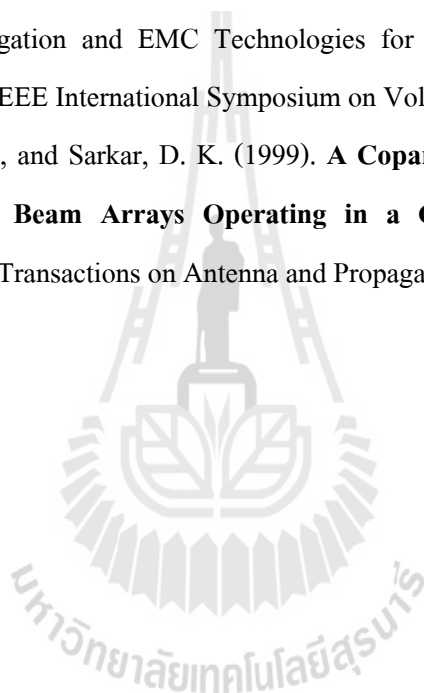
สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ทั้งหมด 8 ทิศทาง โดยใช้สายอากาศเพียงต้นเดียว แต่การสวิตช์ลำคลื่นยังต้องอาศัยคนในการควบคุม การจ่ายไฟให้กับพินไดโอดในแต่ละด้านของสายอากาศ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต จึงควรมีการออกแบบระบบควบคุมการสวิตช์ลำคลื่นที่สามารถกำหนดให้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นตามกรณีที่ต้องการได้โดยอัตโนมัติ เช่นอาจสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ผ่านแผงวงจรควบคุม เป็นต้น



## รายการอ้างอิง

- Agee, B. (1989). **Blind Separation and Capture of Communications Signals Using a Multitarget Constant Modulus Beamformer**. 1989 IEEE Military Communications Conf., Boston, MA, Oct. 1989.
- Chang won Jung, and Franco De Flaviis (2004). **Dual Circular Polarization of Tilted Beam by a Single Arm Rectangular Spiral Antenna**. IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, Vol.1, 20-25 June 2004 pp. 795-798.
- Frost, L. III (1972). **An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing**. Proc. Of the IEEE, Vol. 60, No. 8, Aug. 1972.
- Huff, G. H., Feng, J., Zhang, S., and Bernhard, J. T. (2003). **A Novel Radiation Pattern and Frequency Reconfigurable Single Turn Square Spiral Microstrip Antenna**. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 13, No. 2: 57-59.
- Liber Jr., J. C., and Rappaport, T. S (1999). **Smart Antenna for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications**. Prentice Hall PTR, NJ, 1999.
- Mehta, A., and Mirshekar-Syahkal, D (2004). **Spiral Antenna with Adaptive Radiation Pattern under Electronic Control**. Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1 pp. 843 – 846.
- Mehta, A., Mirshekar-Syahkal, D., and Nakano, H. (2006). **Beam Adaptive Single Arm Rectangular Spiral Antenna with Switches**. IEEE Proc.- Microw. Antennas Propag., Vol. 153, No. 1, Feb. 2006 (pp. 13 – 18).
- Mehta, A., and Mirshekar-Syahkal, D. (2007). **Pattern Steerable Square Loop Antenna**. IEEE Electronic Letters (IET), Vol. 43, No. 9, 26 April 2007 pp. 491-493.
- Nakano, H., Eto, J., Okabe, Y., and Yamauchi, J. (2002). **Tilted- and Axial- Beam Formation by a Single- Arm Rectangular Spiral Antenna With Compact Dielectric Substrate and Conducting Plane**. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Vol. 50, NO. 1: 17 – 23.

- Ngamjanyaporn, P., and Krairiksh, M. (2002). **Switched- Beam Single Patch Antenna**, Electronics Letters, Vol. 38, Issue 1, 3 Jan. 2002 pp. 7-8.
- Ngamjanyaporn, P., Phongcharoenpanich, C., Akkaraekthalin, P., and Krairiksh, M. (2005). **Signal-to-Interference Ratio Improvement by Using a Phased Array Antenna of Switched-Beam Elements**. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Vol. 53, NO. 5: 1819 – 1828.
- Peng, M., and Wang, W. (2005). **Comparison of Capacity between Adaptive Tracking and Switched Beam Smart Antenna Techniques in TDD- CDMA Systems**. Microwave Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. (MAPE 2005). IEEE International Symposium on Vol. 1, 8-12 Aug. 2005 pp. 135-139.
- Seungwon, C., Shim, D., and Sarkar, D. K. (1999). **A Coparison of Tracking- Beam Arrays and Swiching- Beam Arrays Operating in a CDMA Mobile Communication Channel**. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Mag., Vol. 41: 10 – 56.

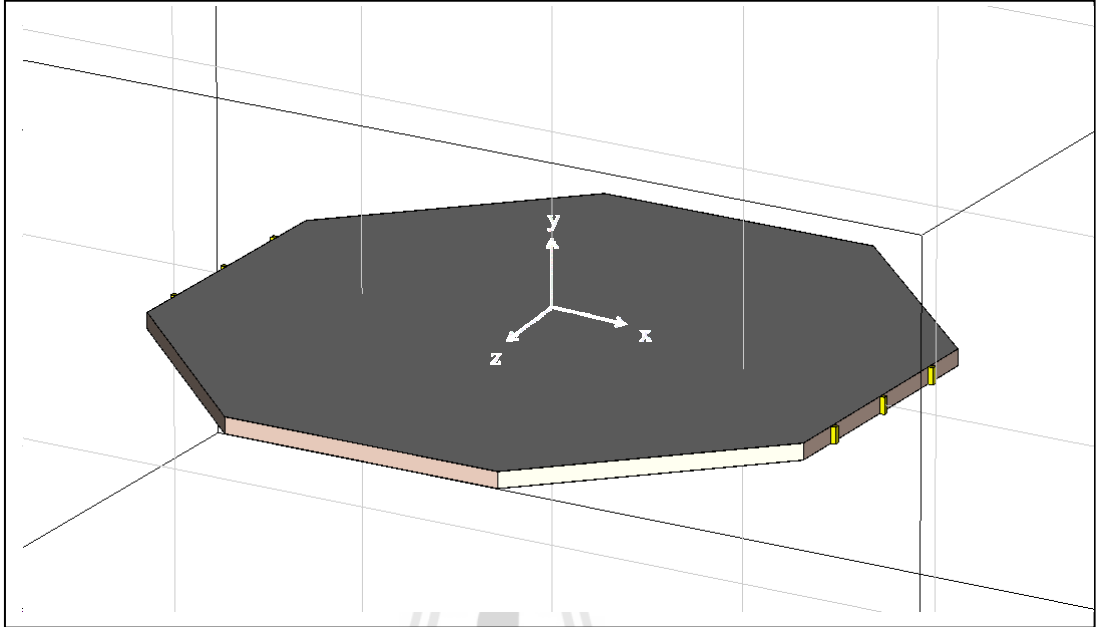


ภาคผนวก ก

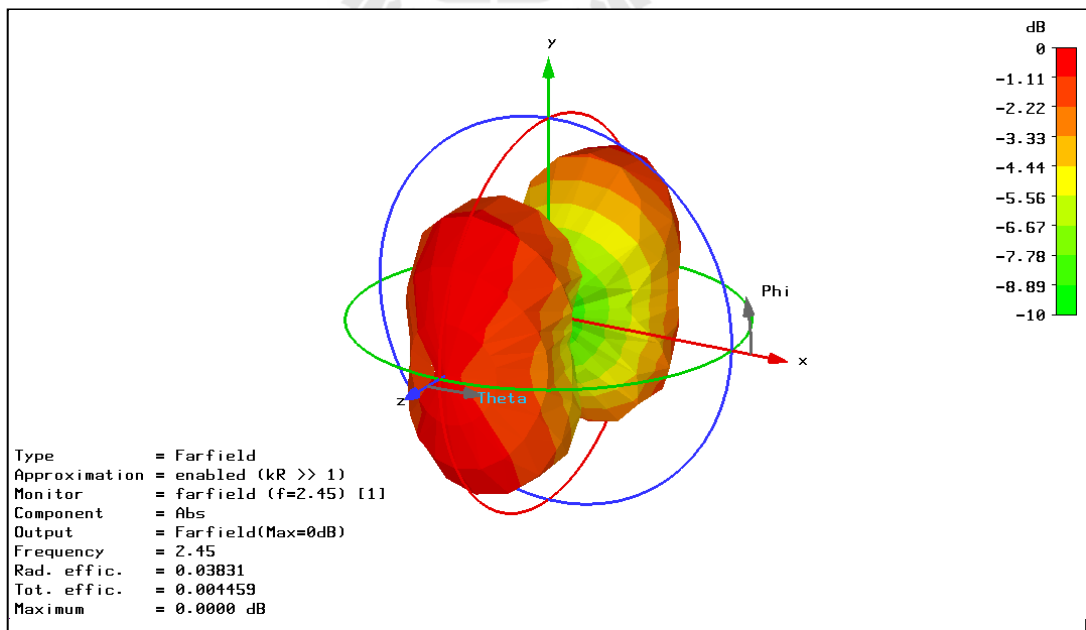
ผลการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

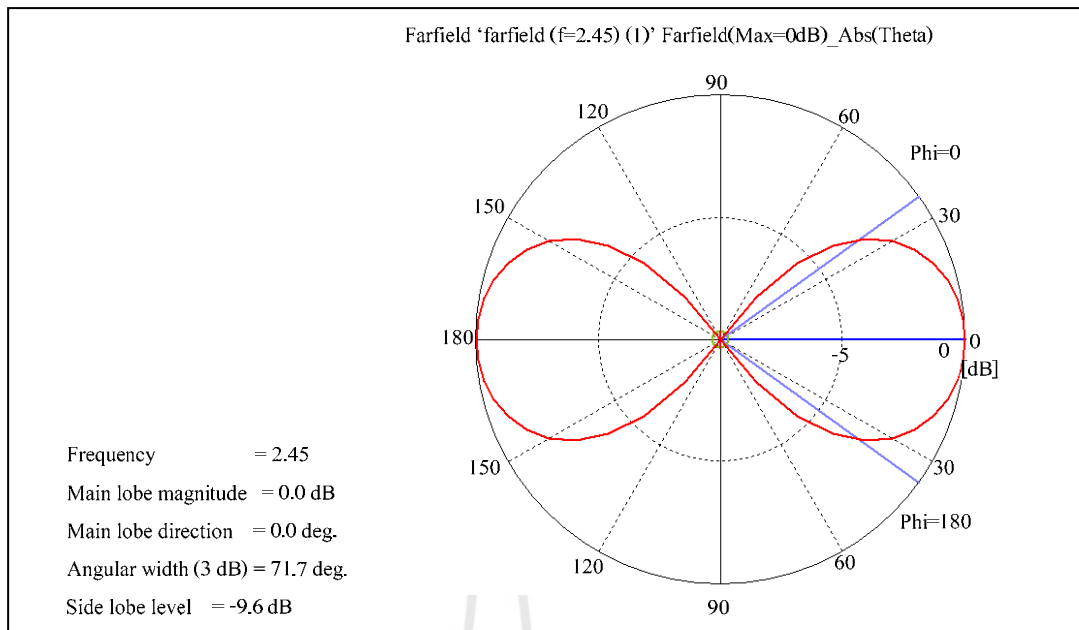
กรณี A



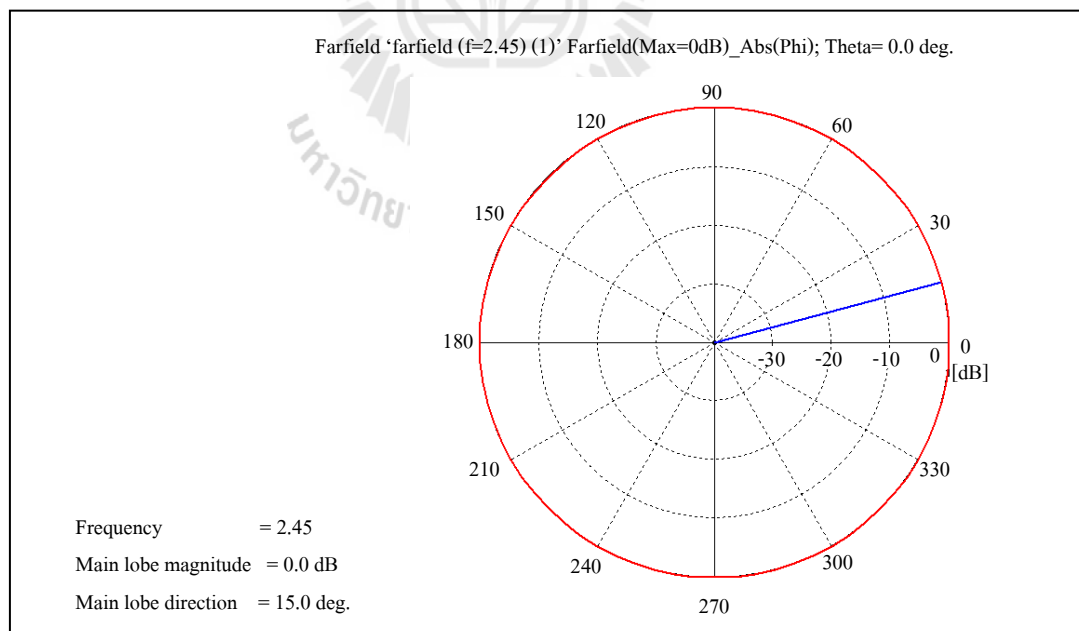
รูปที่ ก.1 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A



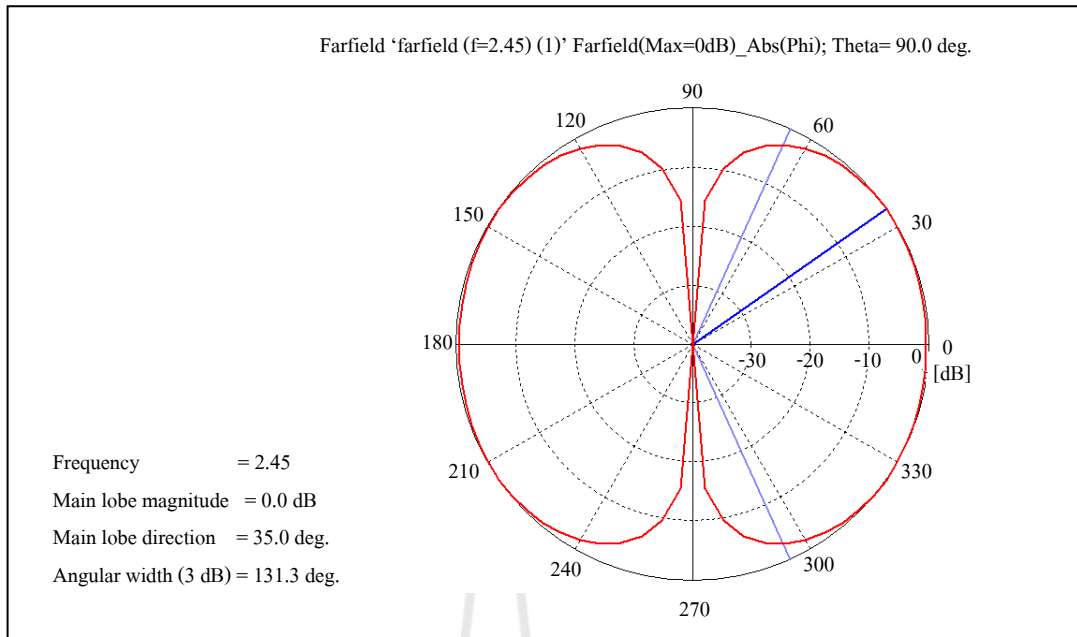
รูปที่ ก.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A



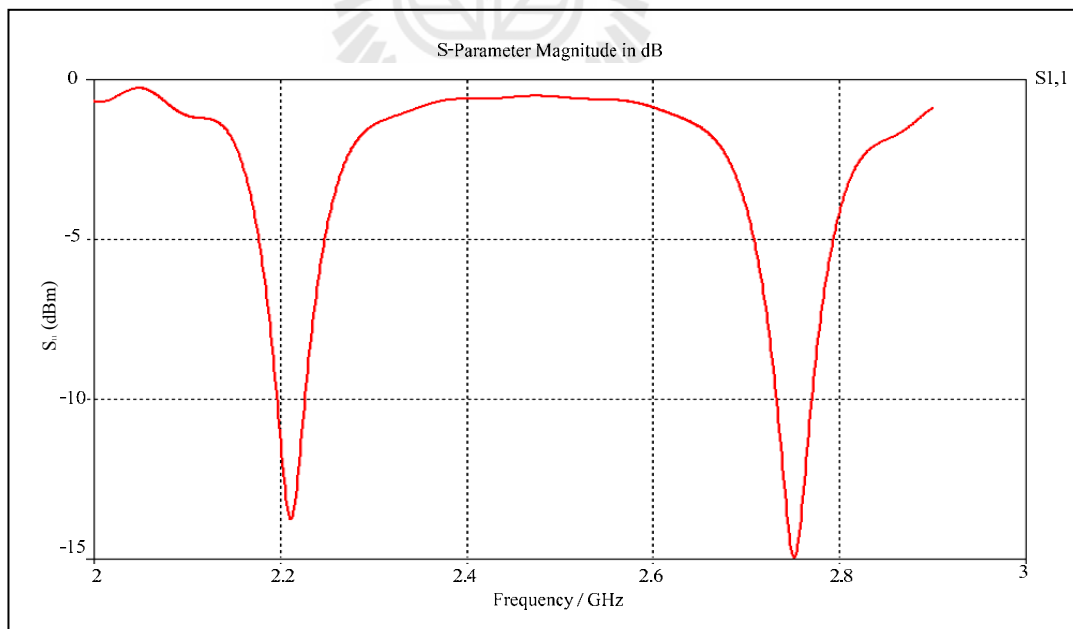
รูปที่ ก.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



รูปที่ ก.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

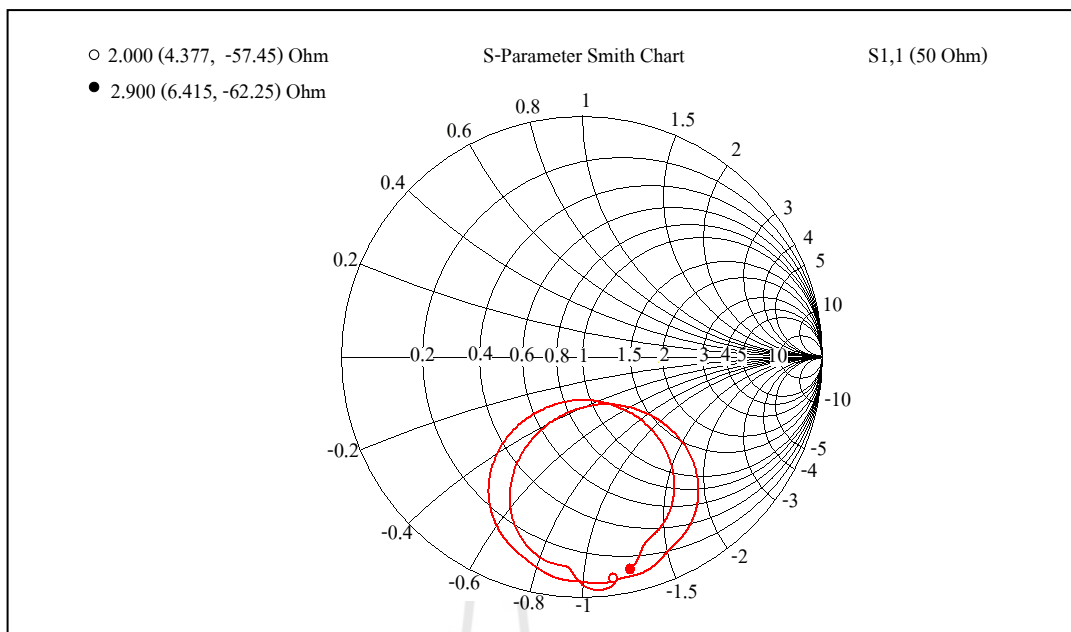


รูปที่ ก.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ ก.6 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A

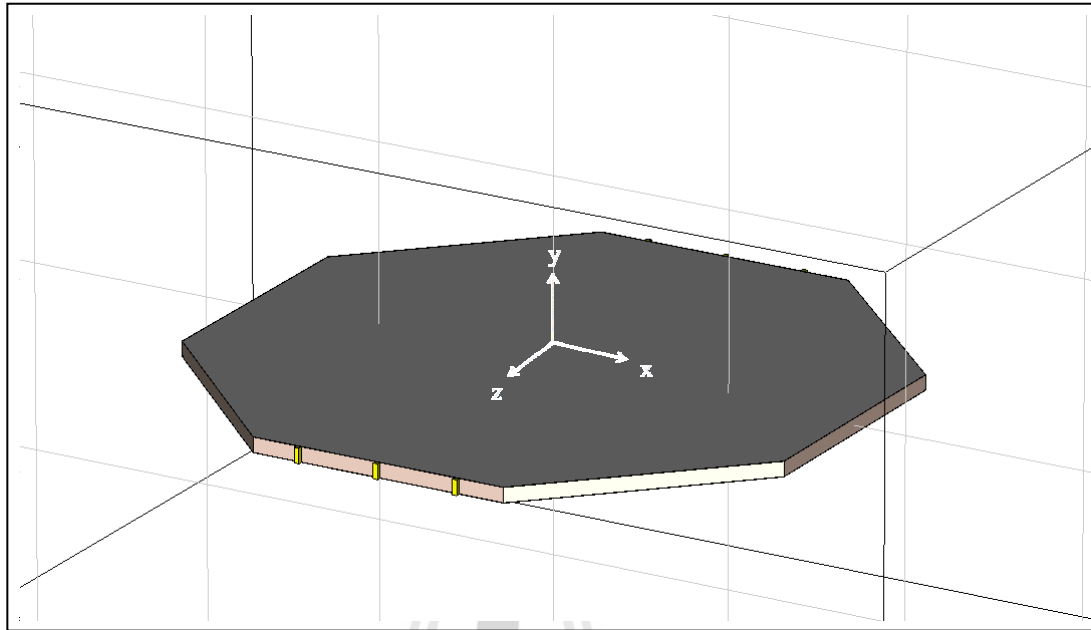




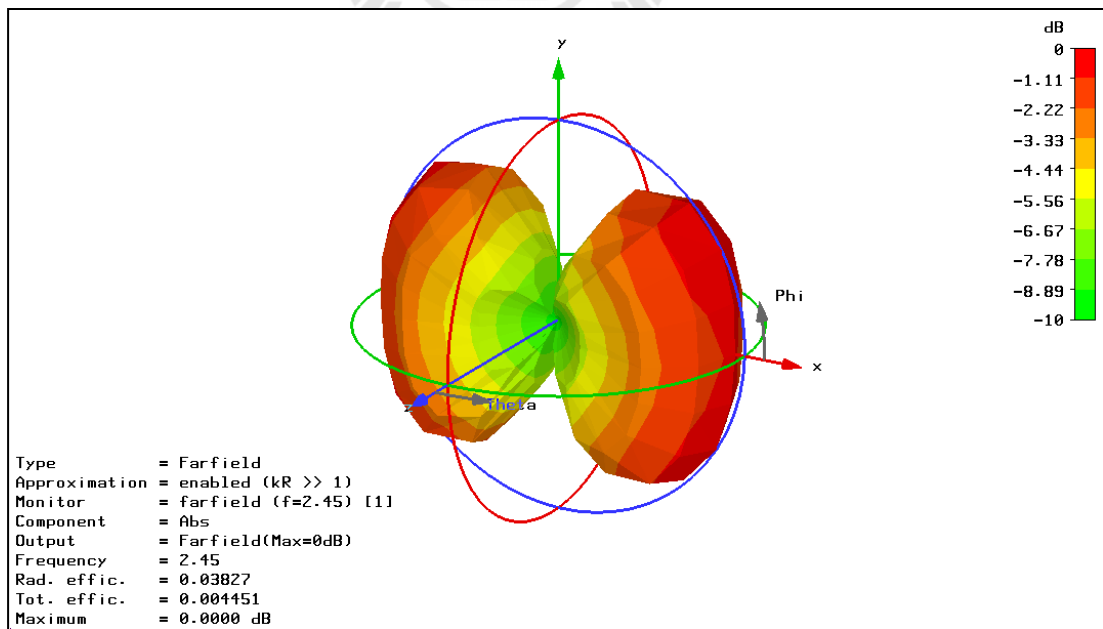
รูปที่ ก.7 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี A



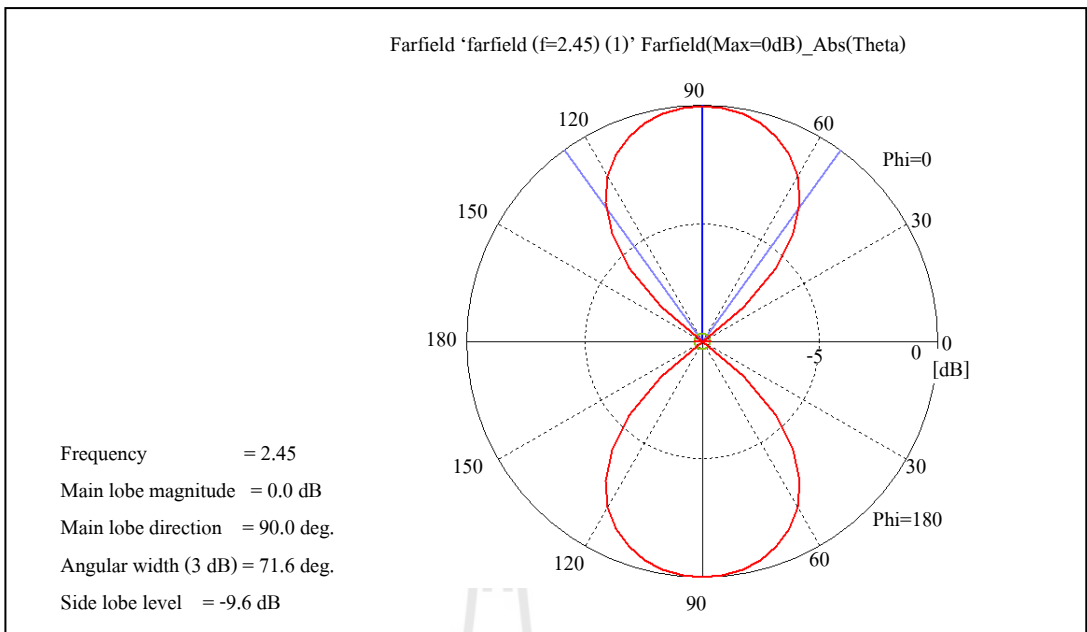
กรณี B



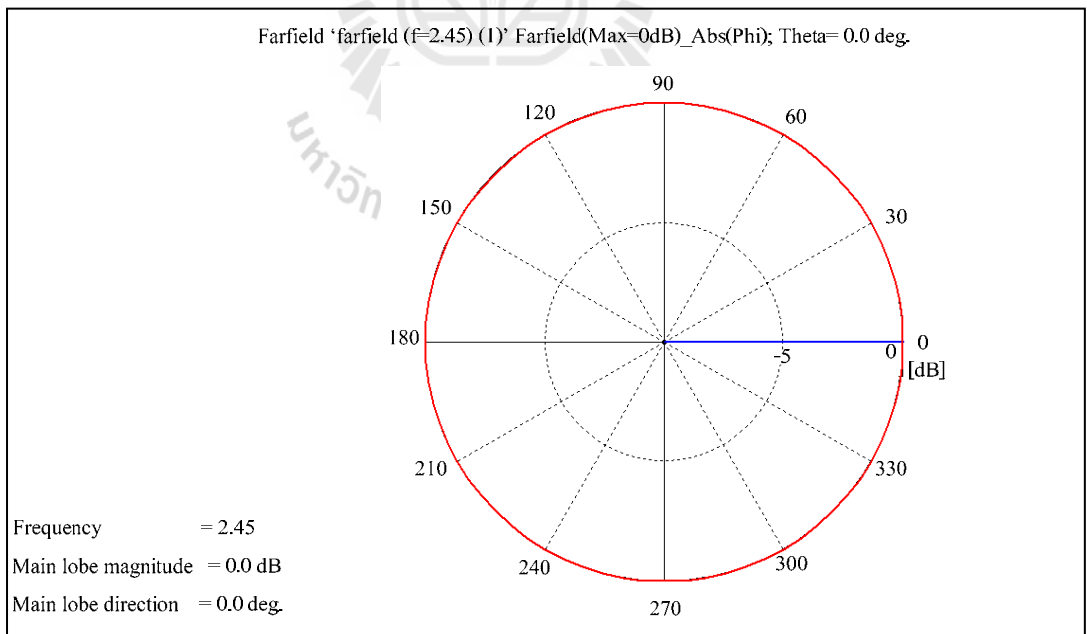
รูปที่ ก.8 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B



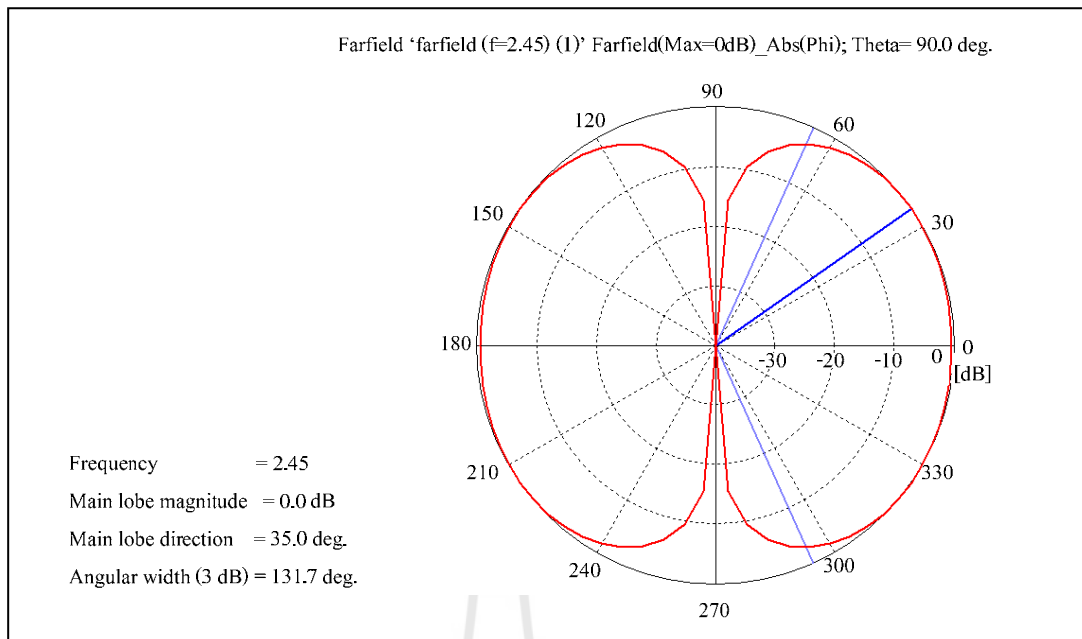
รูปที่ ก.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B



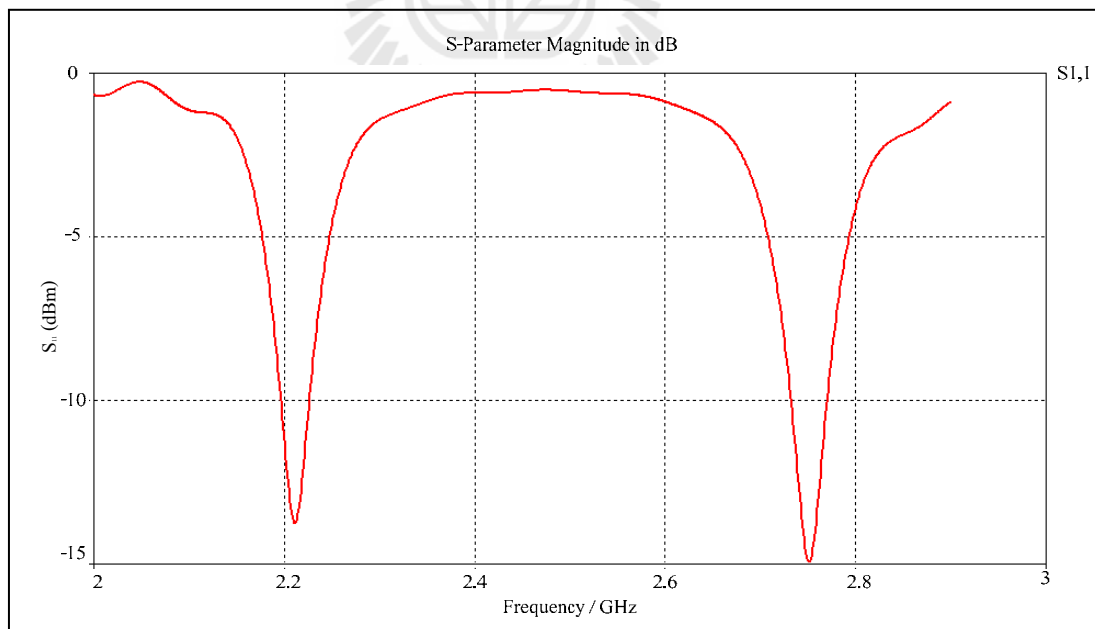
รูปที่ ก.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



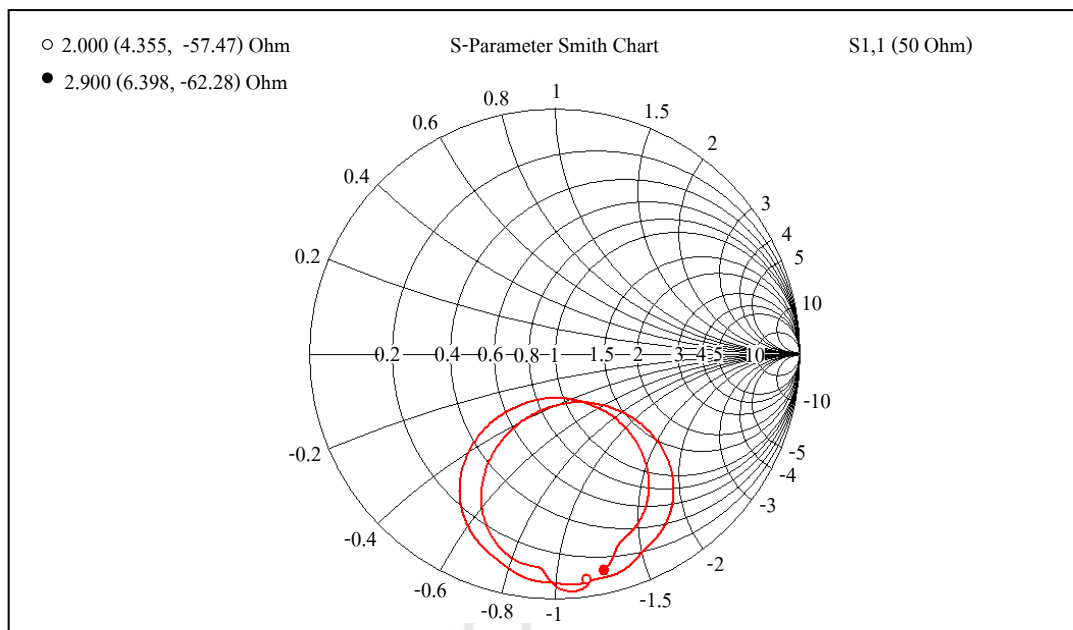
รูปที่ ก.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ ก.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



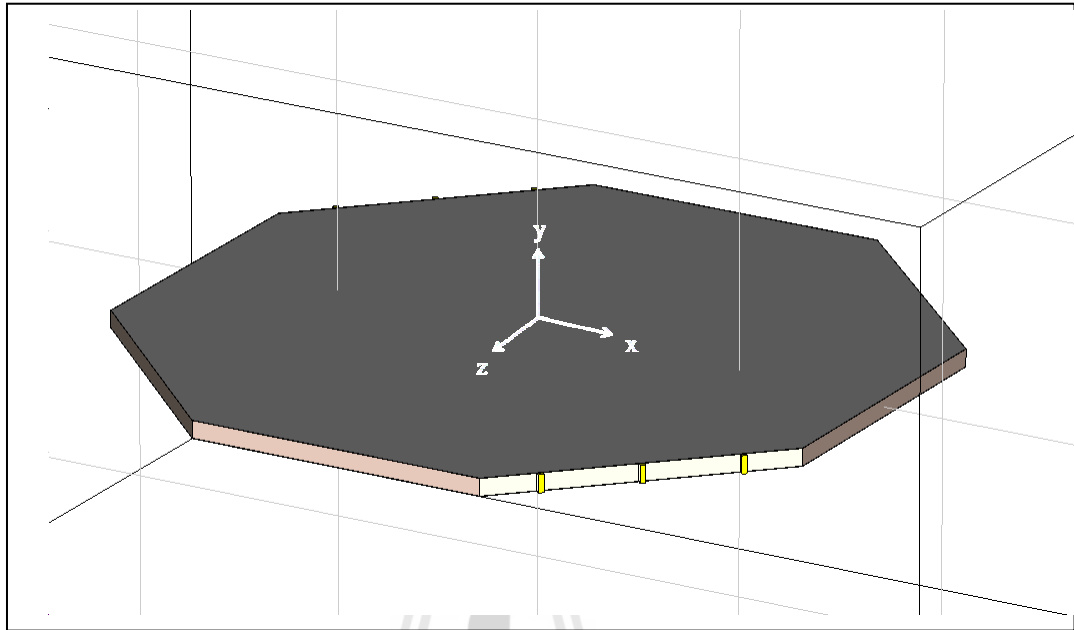
รูปที่ ก.13 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B



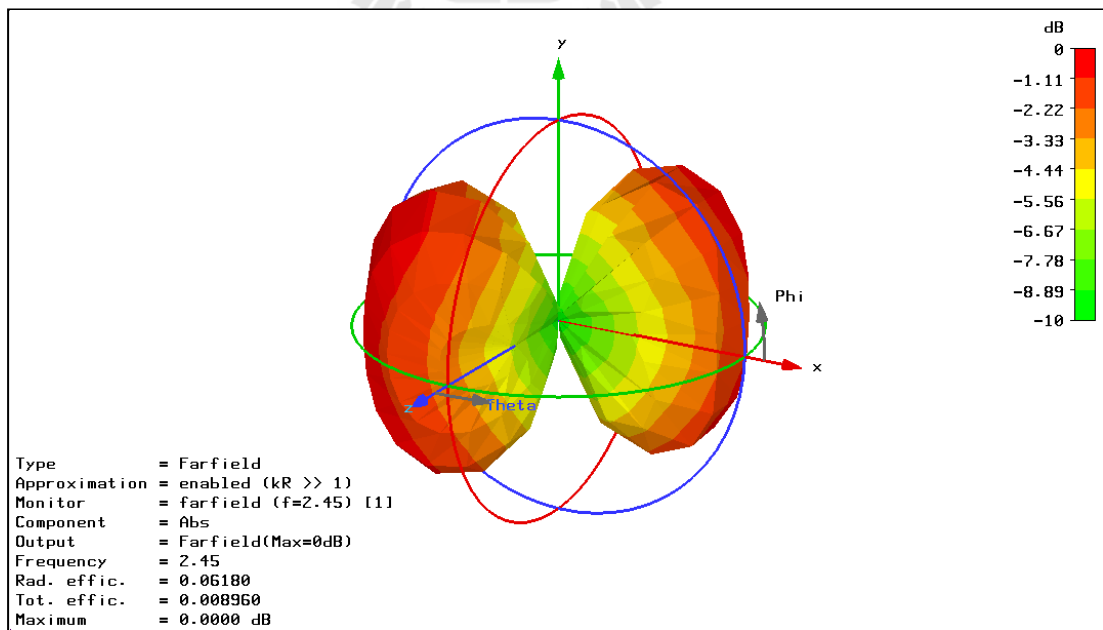
รูปที่ ก.14 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี B



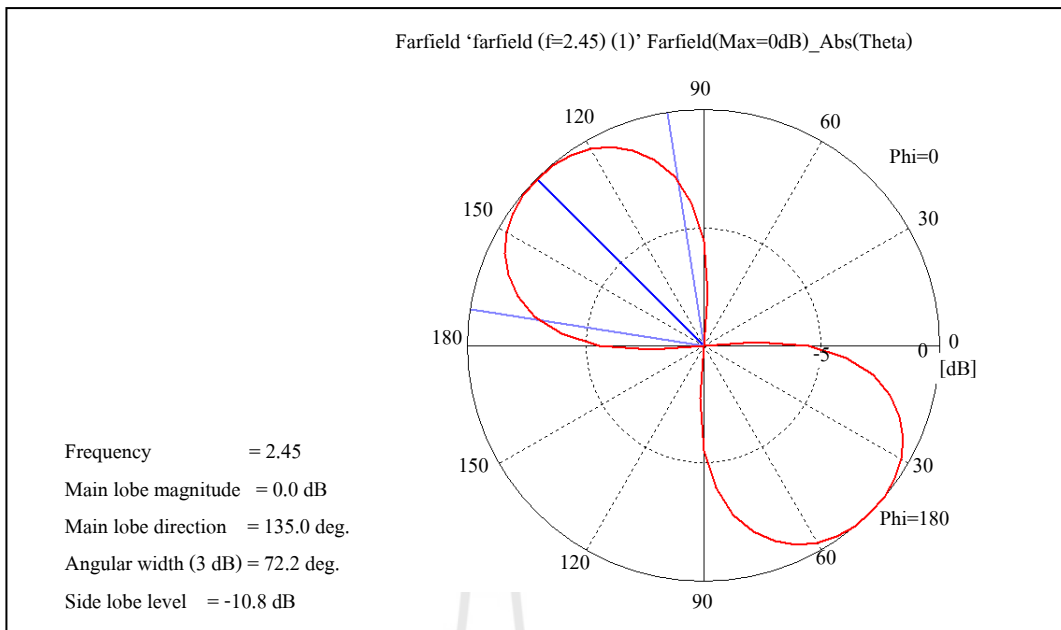
กรณี C



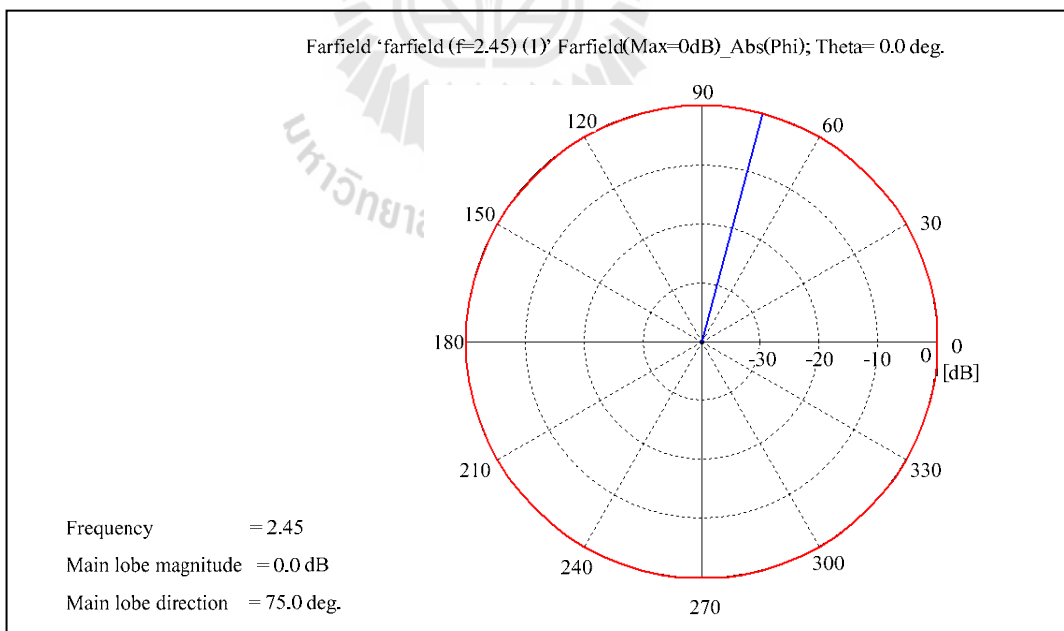
รูปที่ ก.15 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



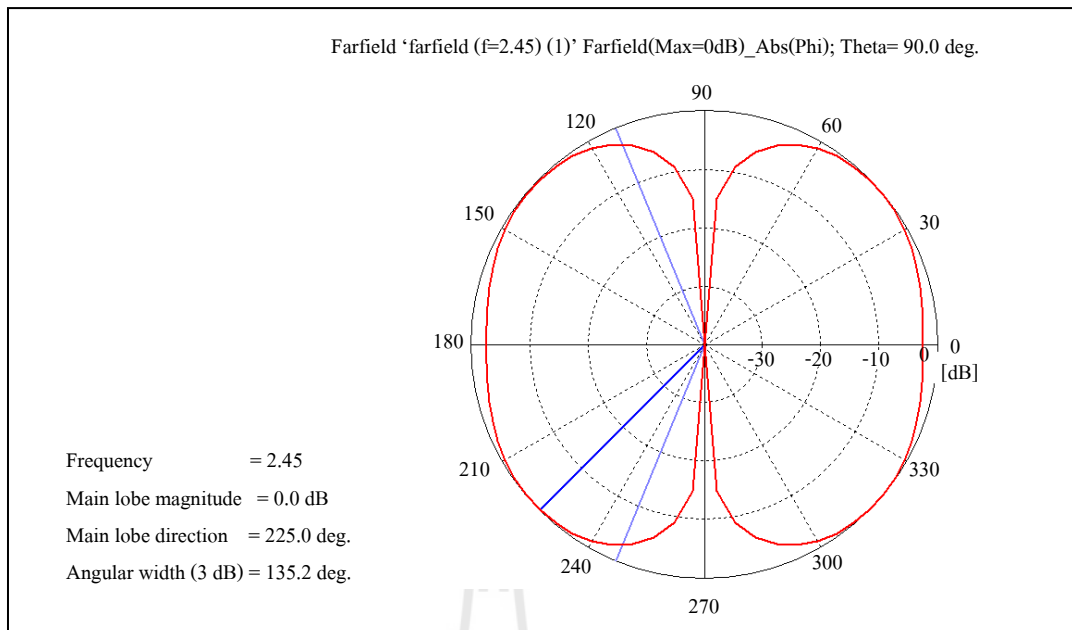
รูปที่ ก.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



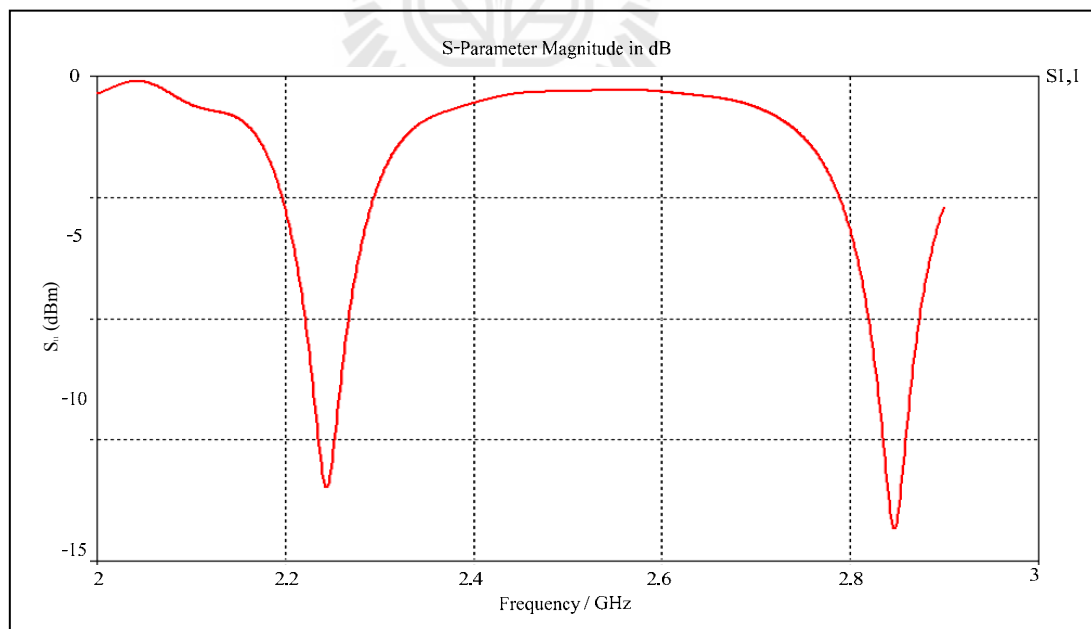
รูปที่ ก.17 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



รูปที่ ก.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

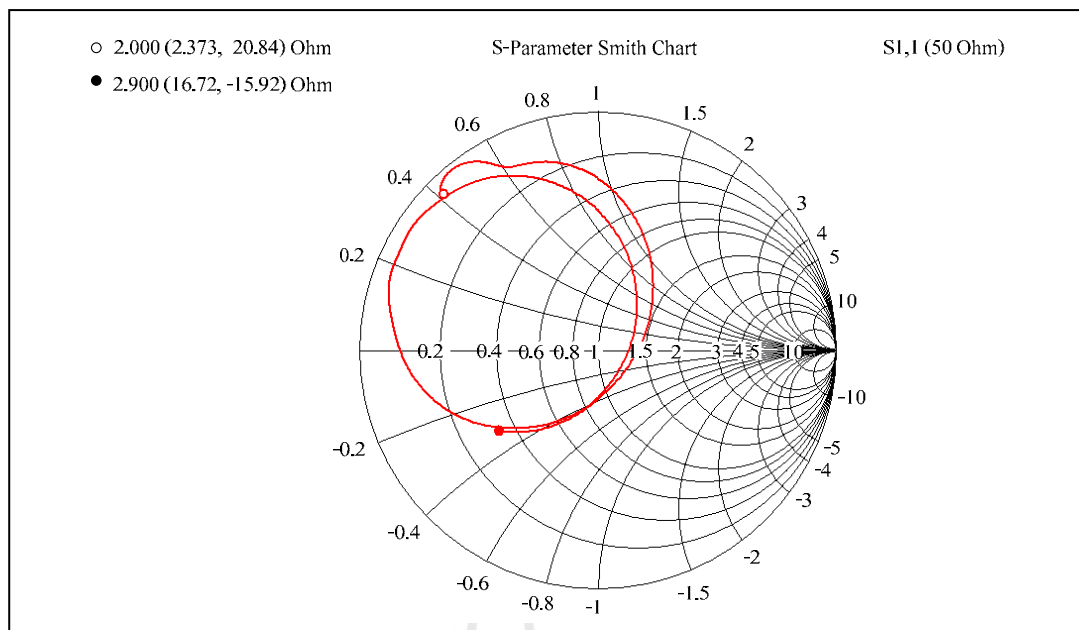


รูปที่ ก.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ ก.20 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C

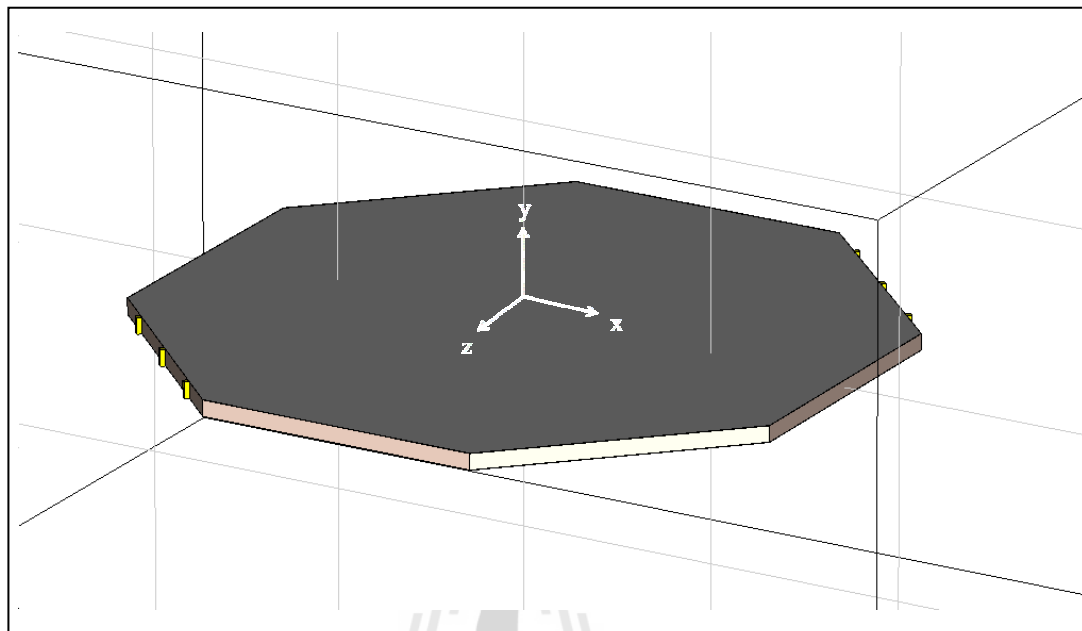




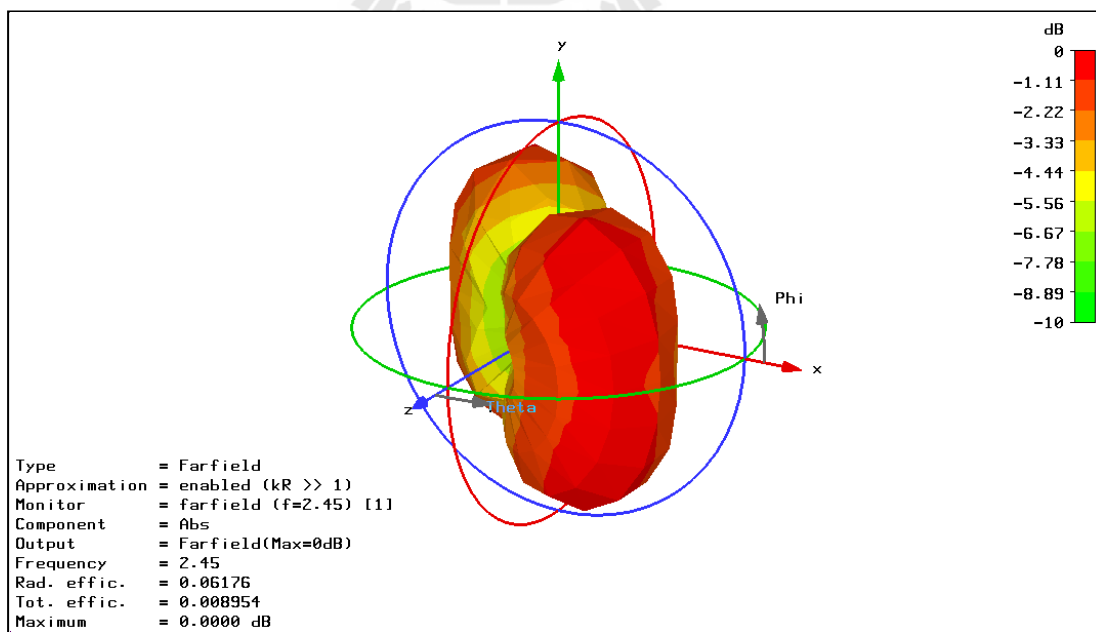
รูปที่ ก.21 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี C



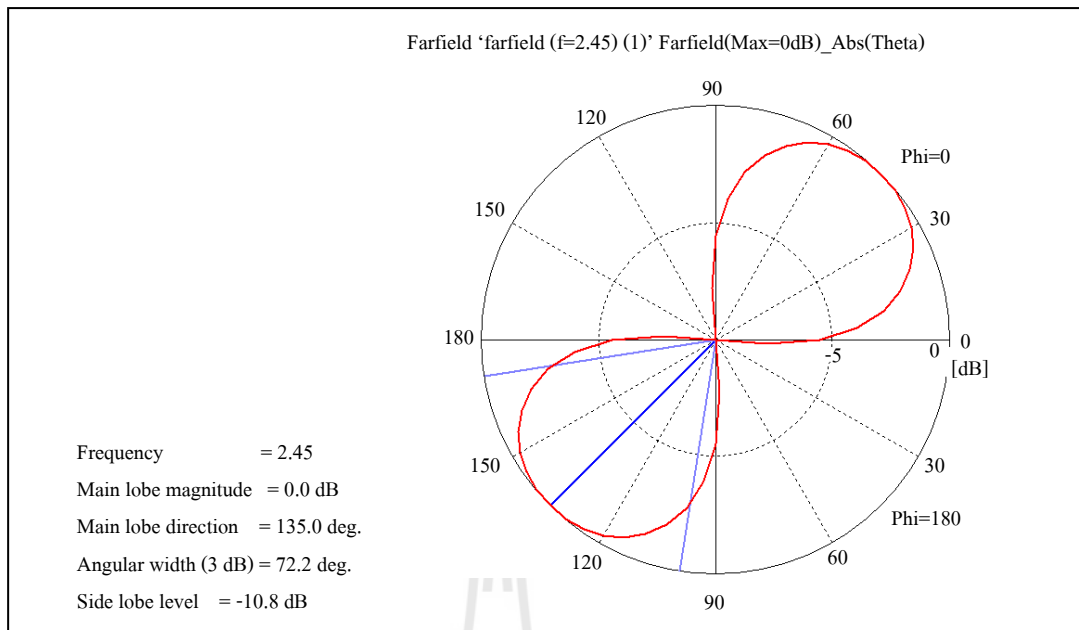
กรณี D



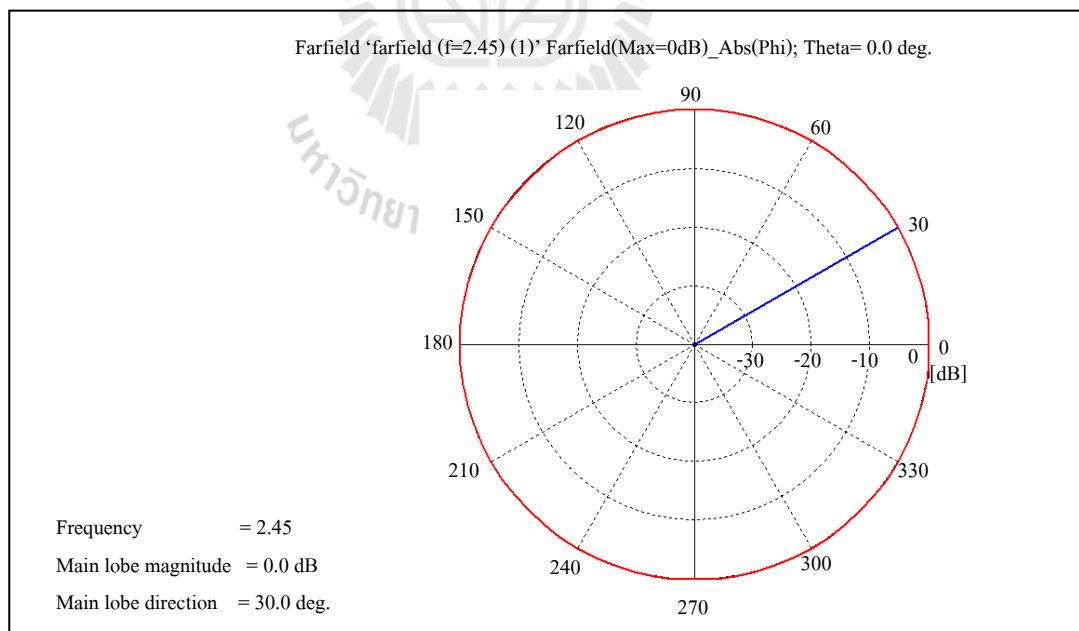
รูปที่ ก.22 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D



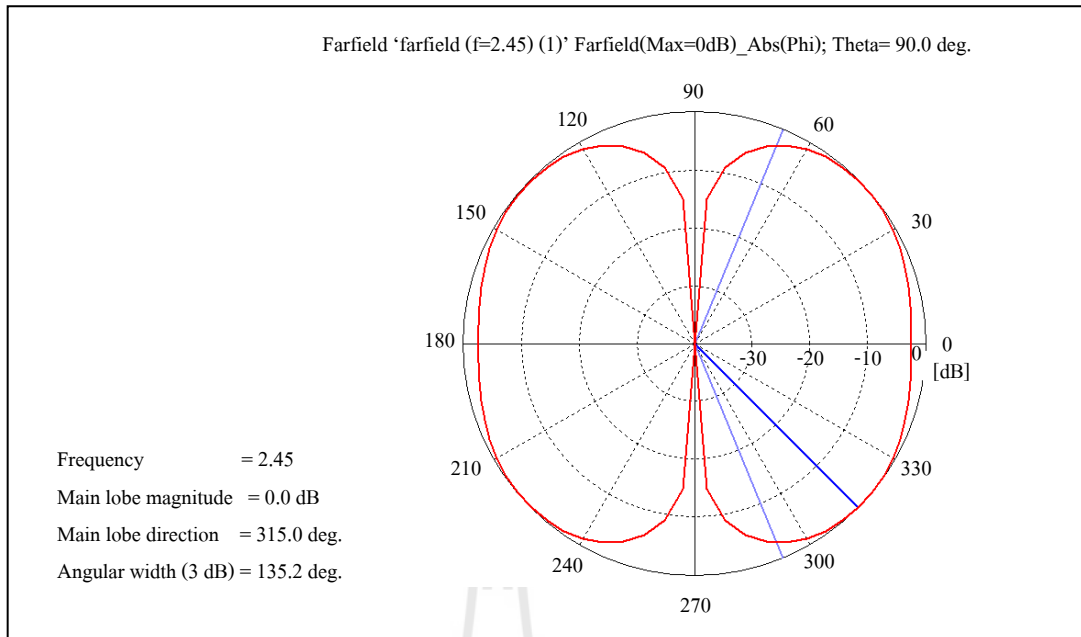
รูปที่ ก.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D



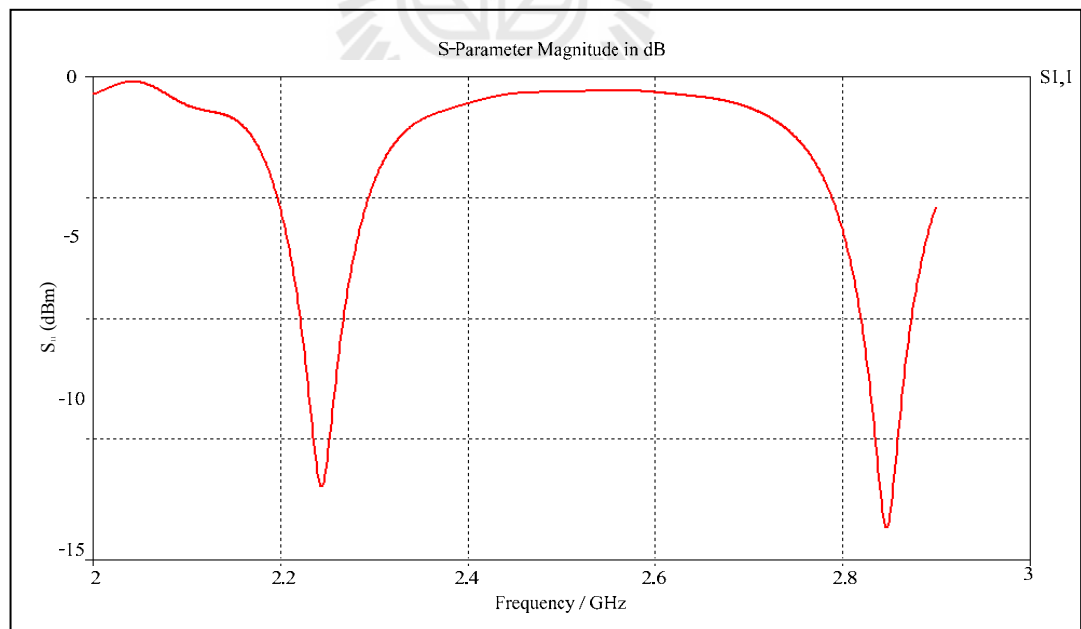
รูปที่ ก.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



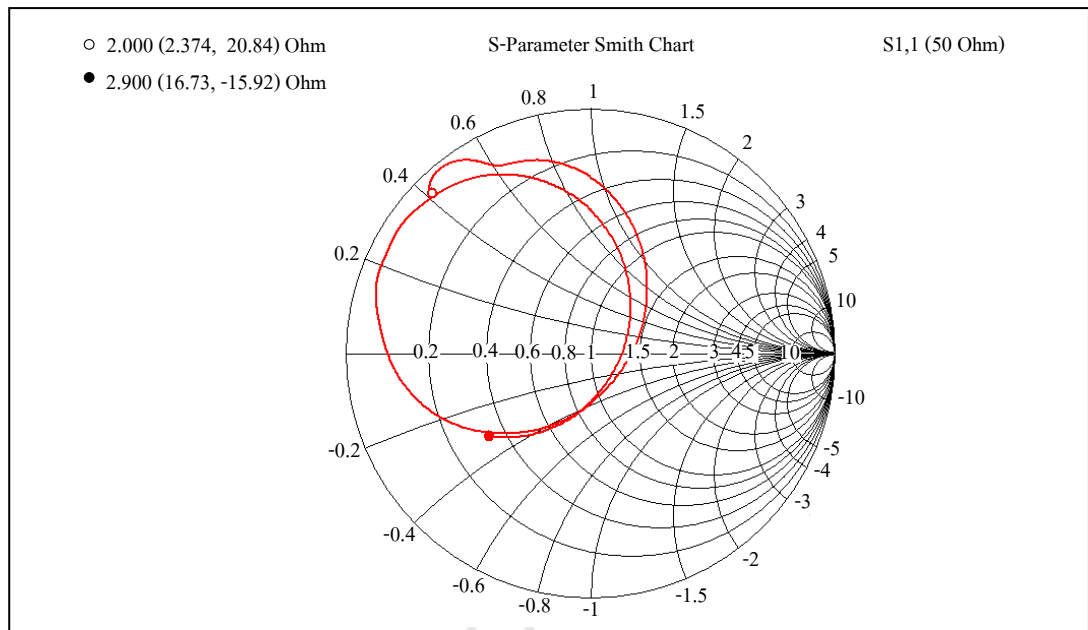
รูปที่ ก.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ ก.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



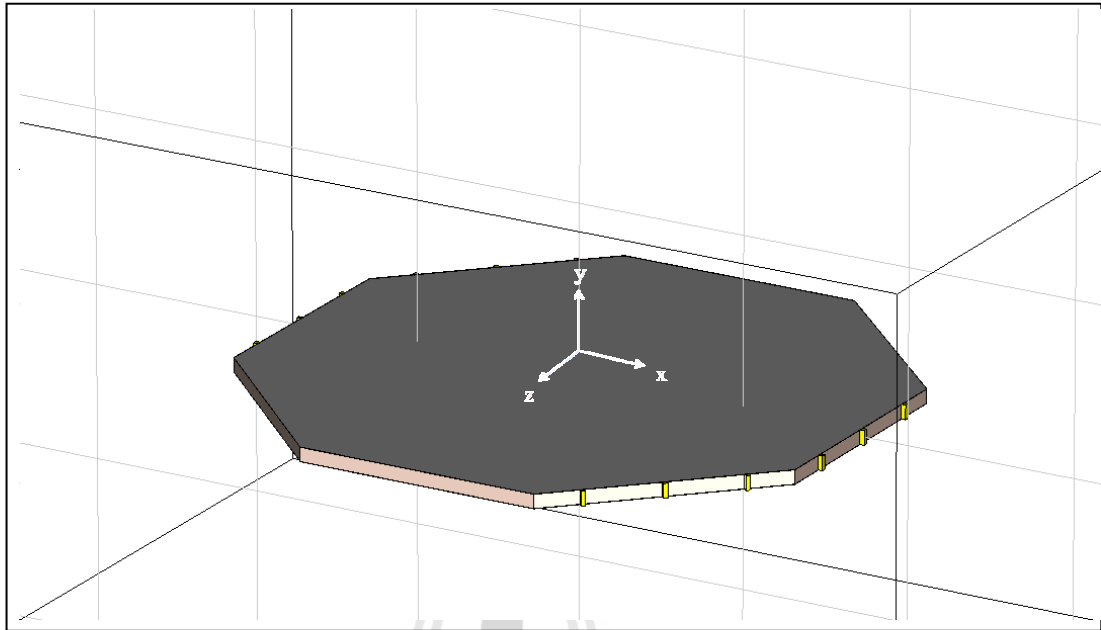
รูปที่ ก.27 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D



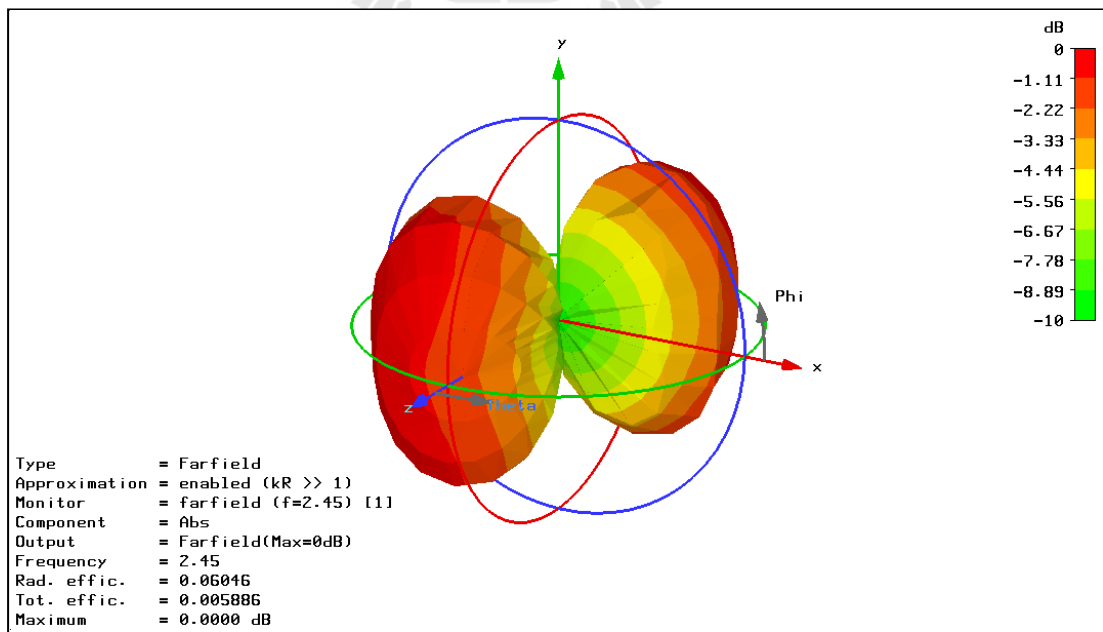
รูปที่ ก.28 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี D



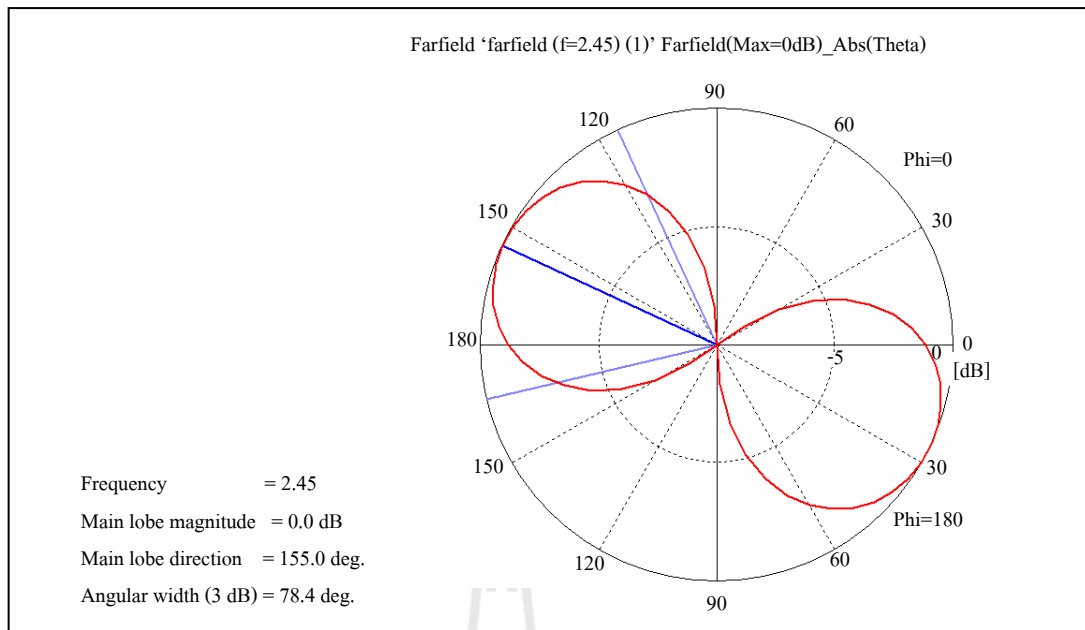
กรณี E



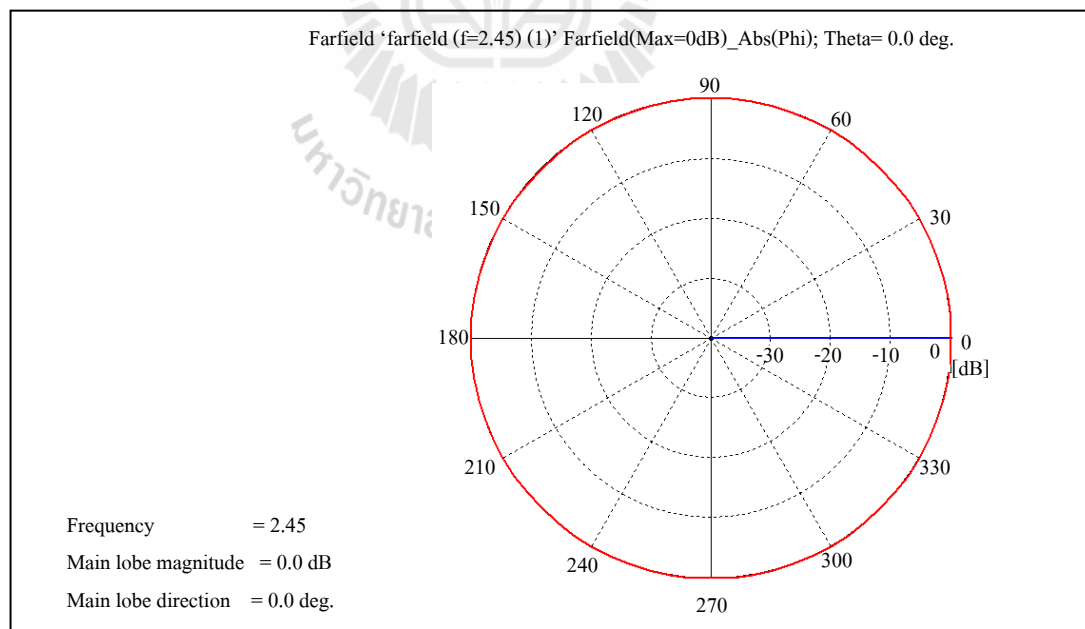
รูปที่ ก.29 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



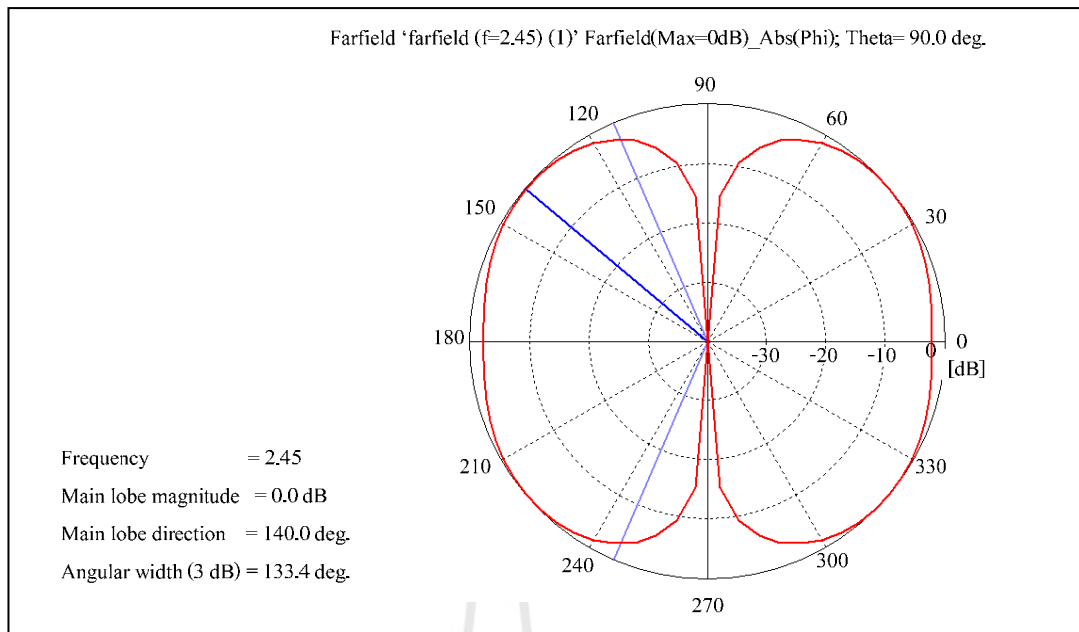
รูปที่ ก.30 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



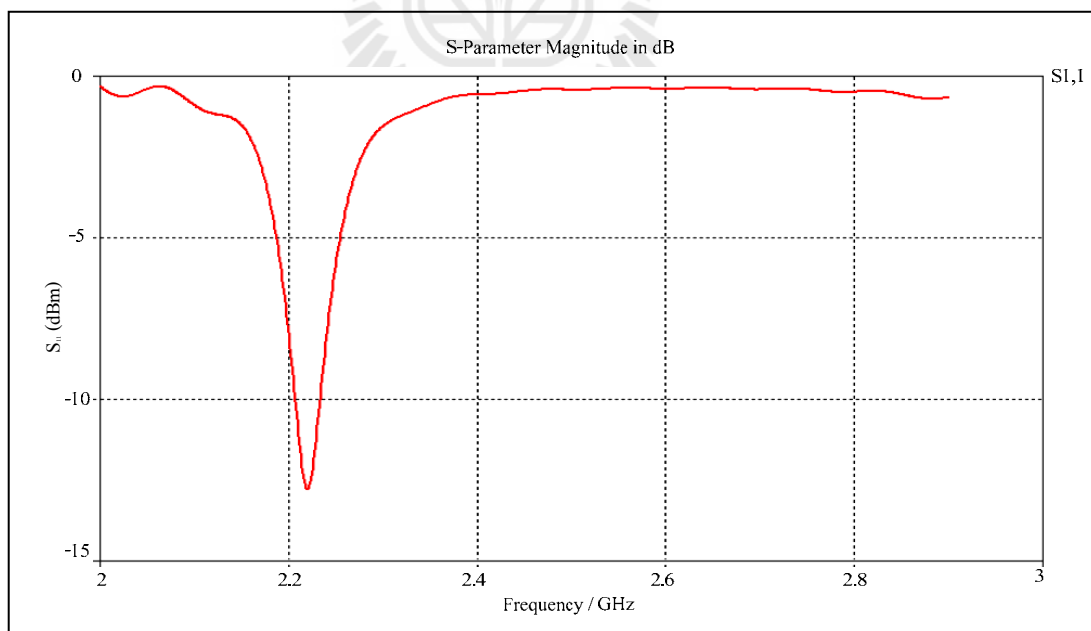
รูปที่ ก.31 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



รูปที่ ก.32 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

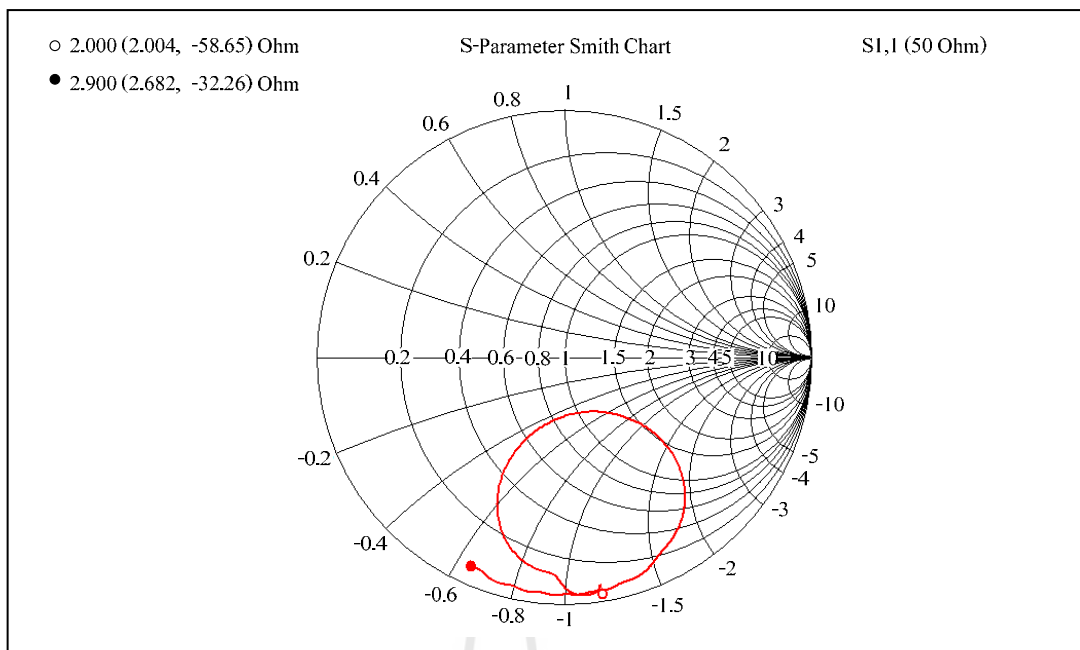


รูปที่ ก.33 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ ก.34 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E

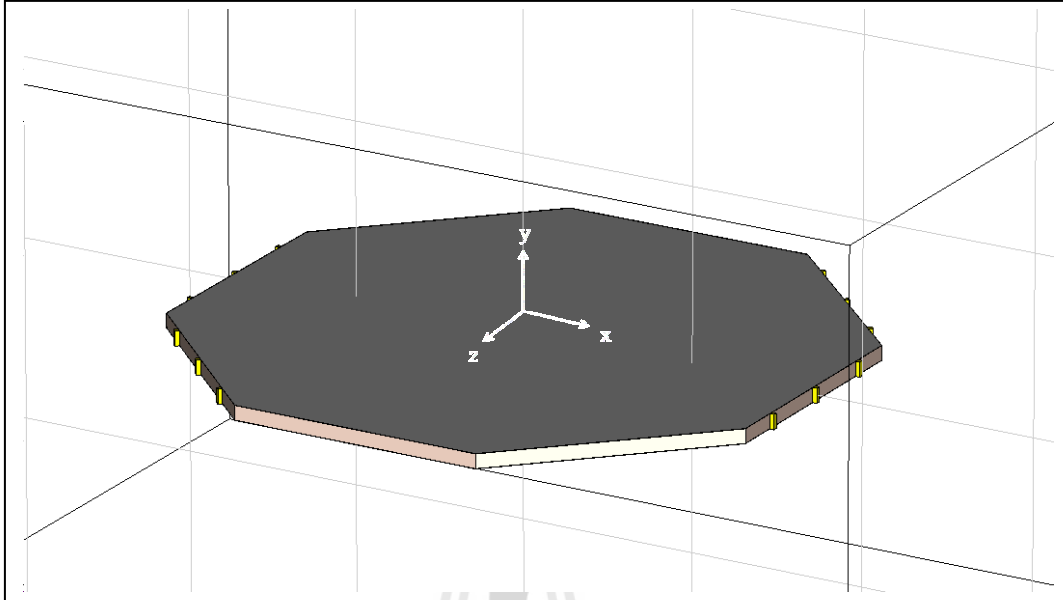




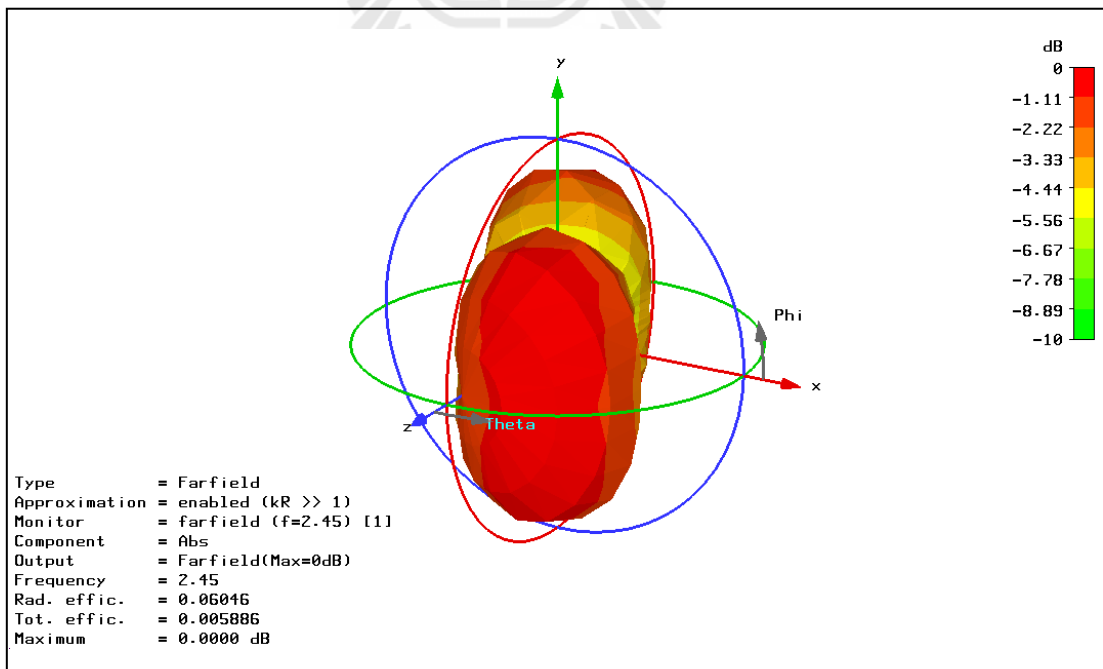
รูปที่ ก.35 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี E



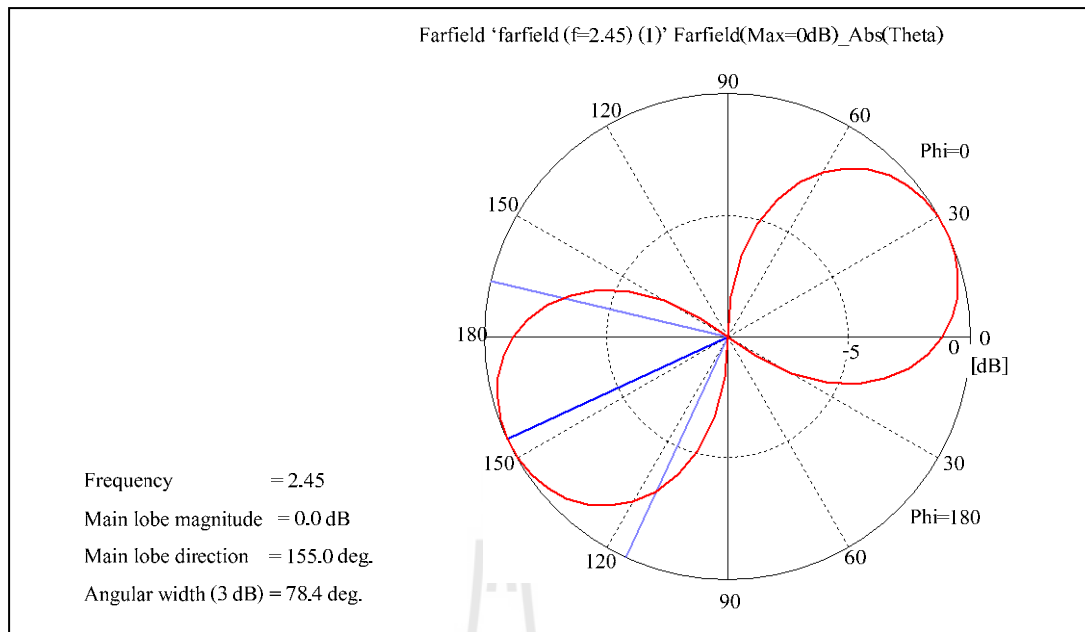
กรณี F



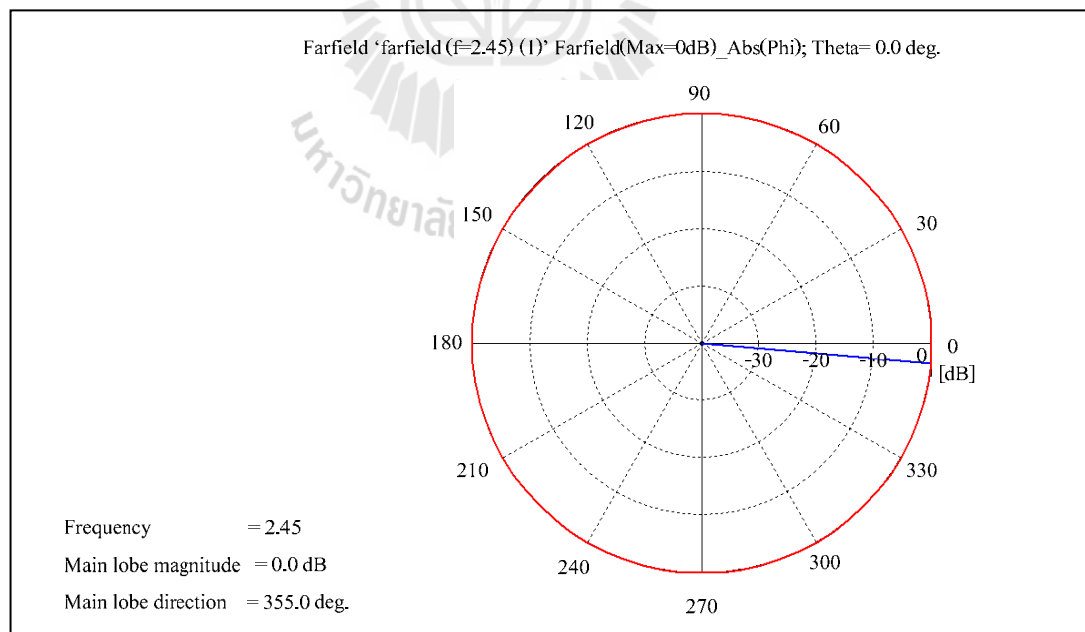
รูปที่ ก.36 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F



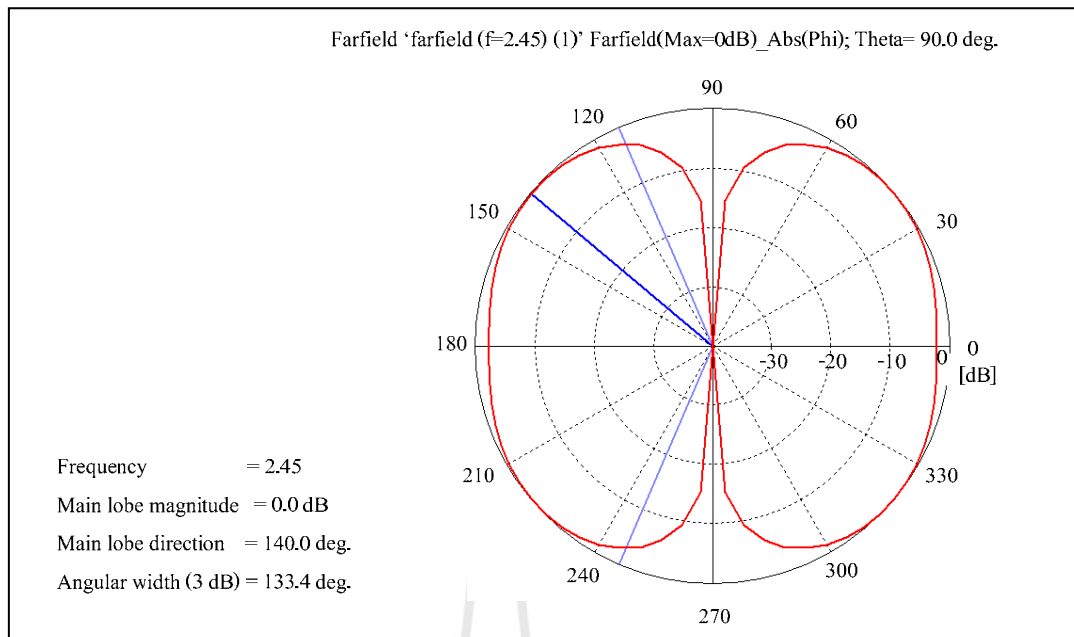
รูปที่ ก.37 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F



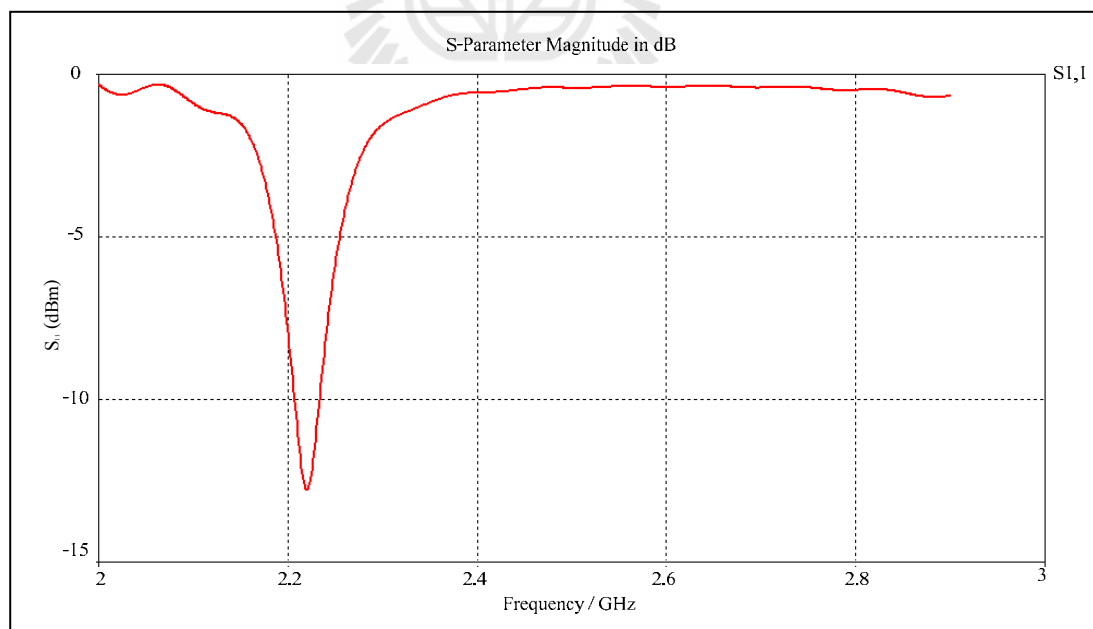
รูปที่ ก.38 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



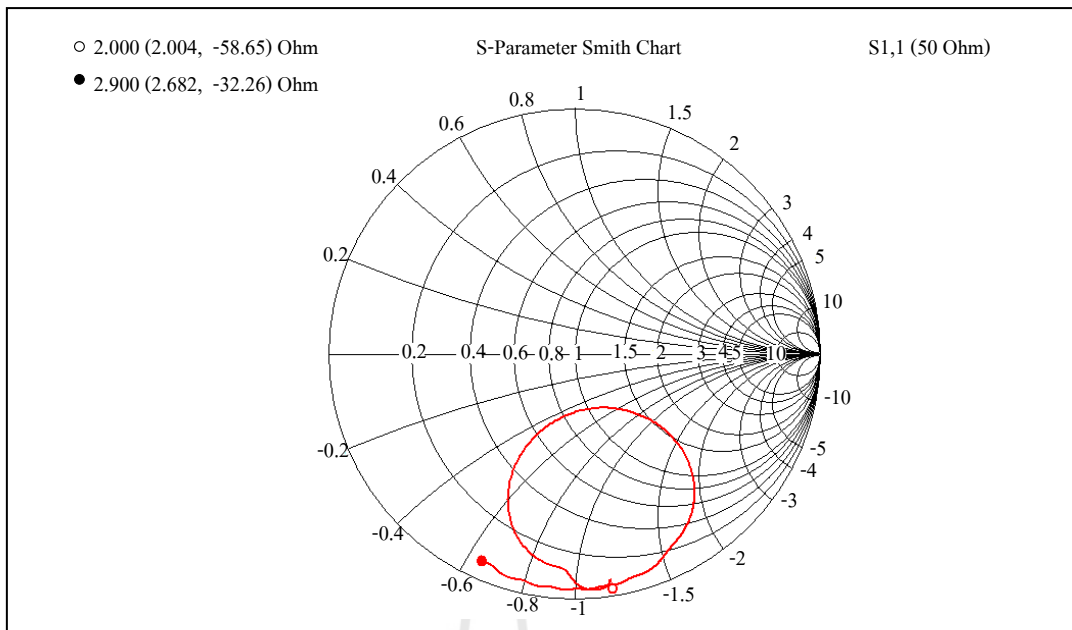
รูปที่ ก.39 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ ก.40 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$

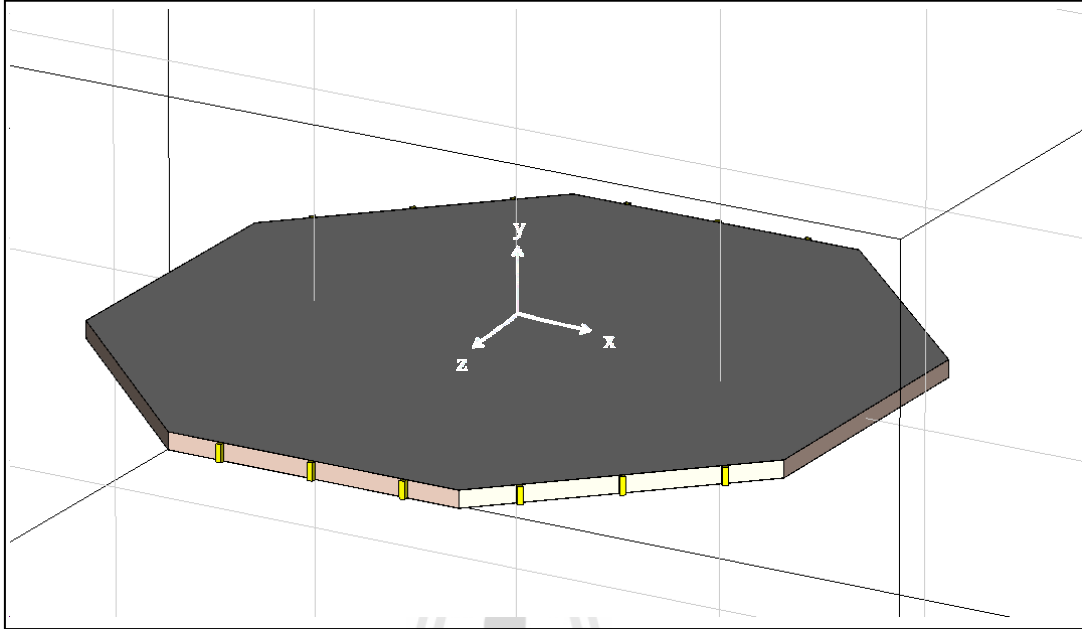


รูปที่ ก.41 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F

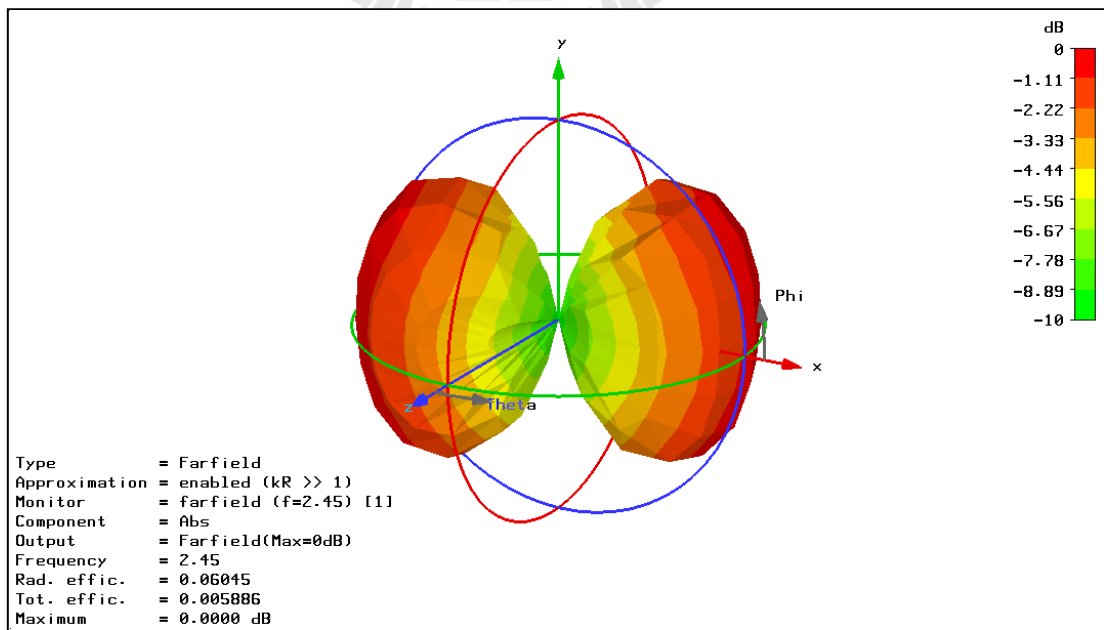


รูปที่ ก.42 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี F

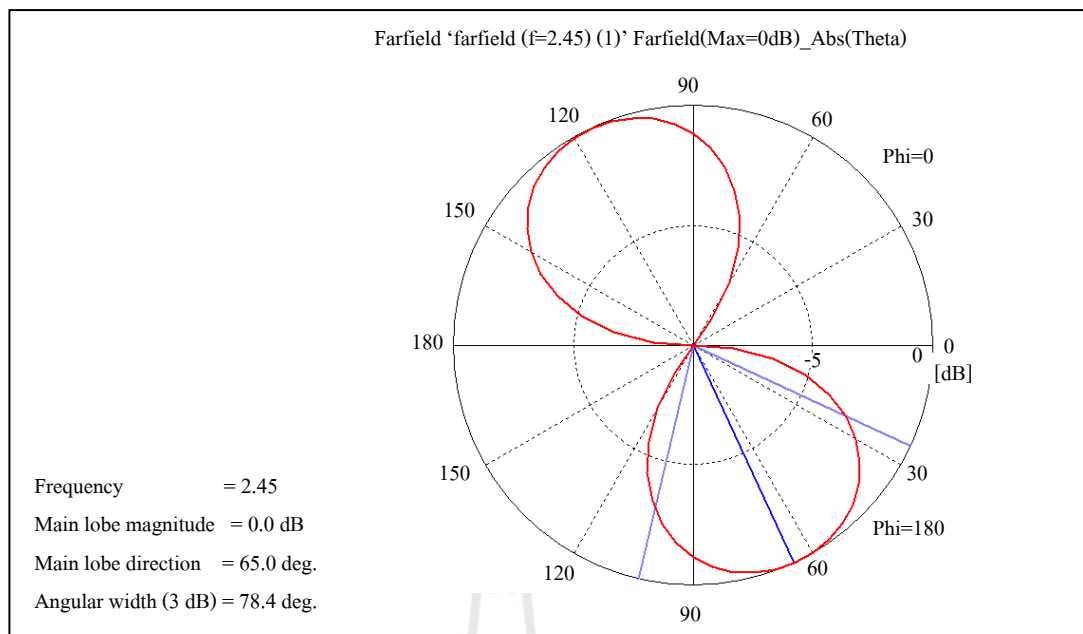
กรณี G



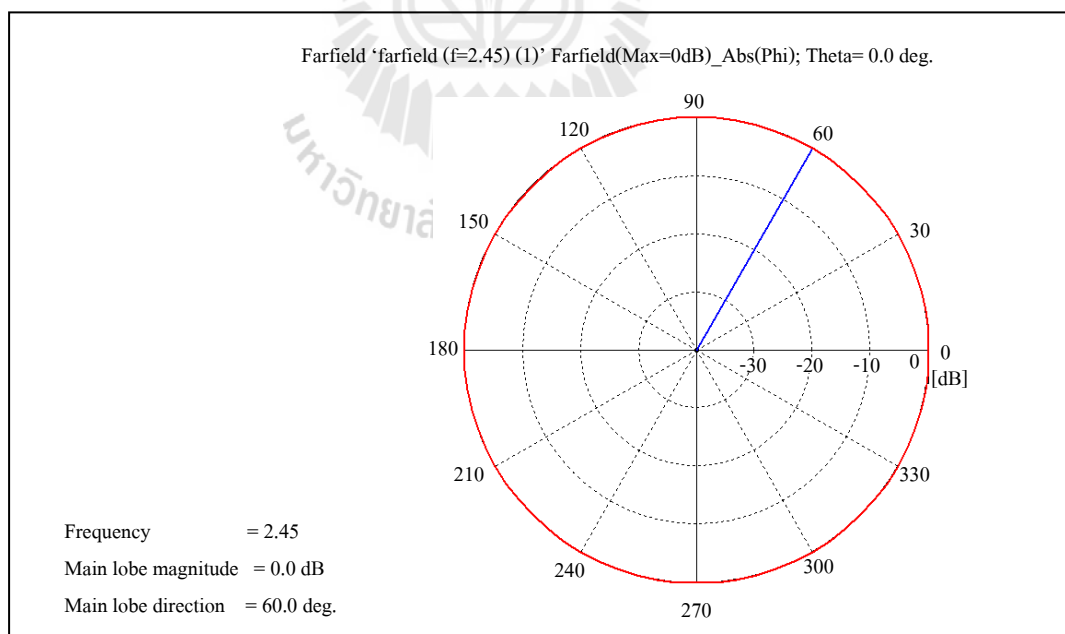
รูปที่ ก.43 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G



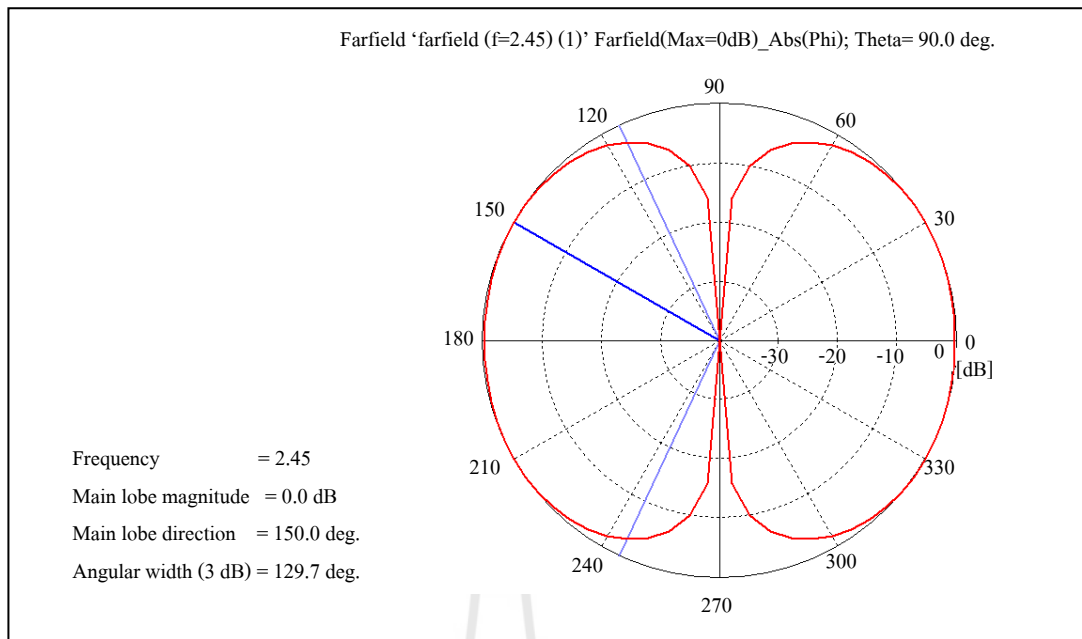
รูปที่ ก.44 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G



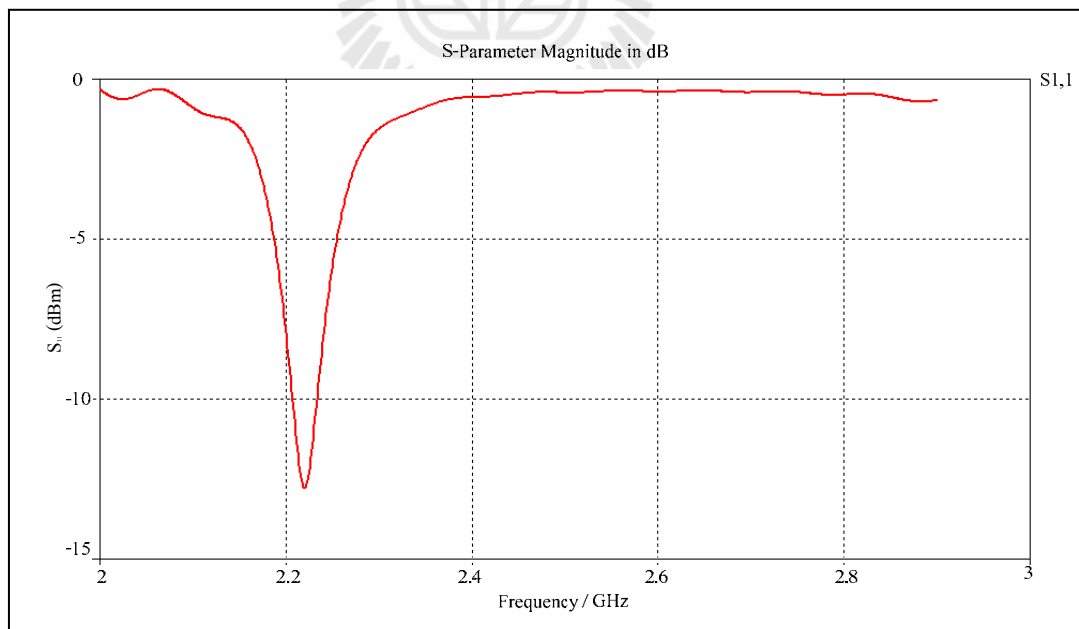
รูป ก.45 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



รูปที่ ก.46 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$

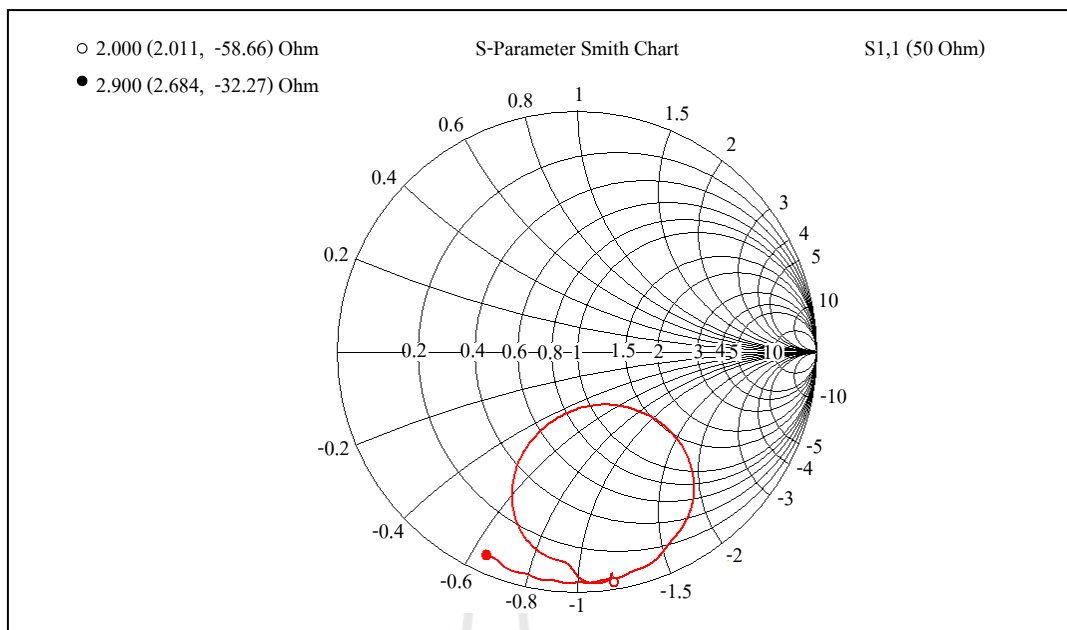


รูปที่ ก.47 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ ก.48 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G

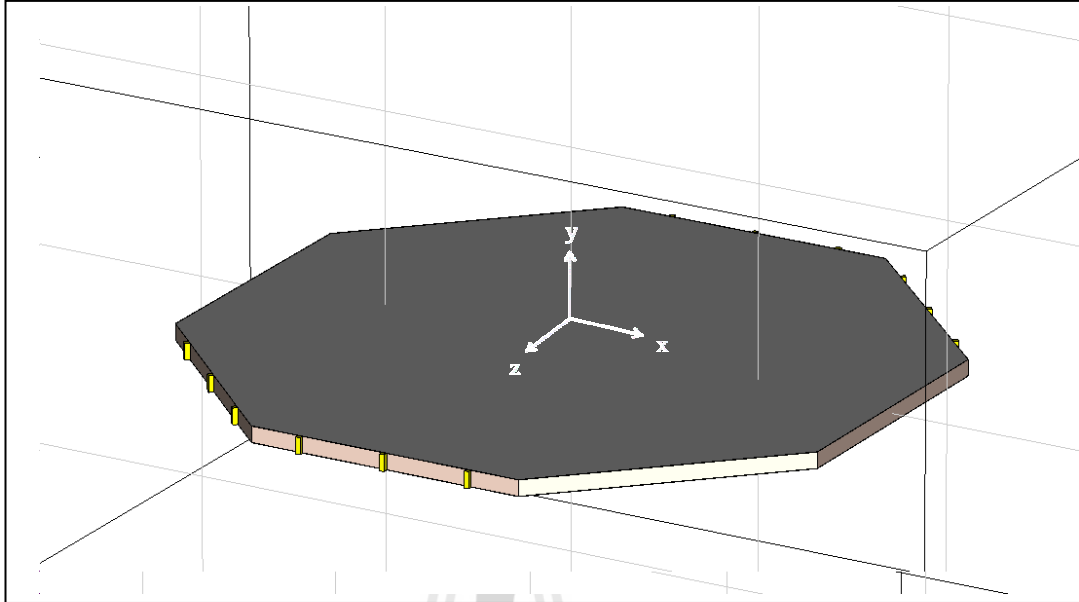




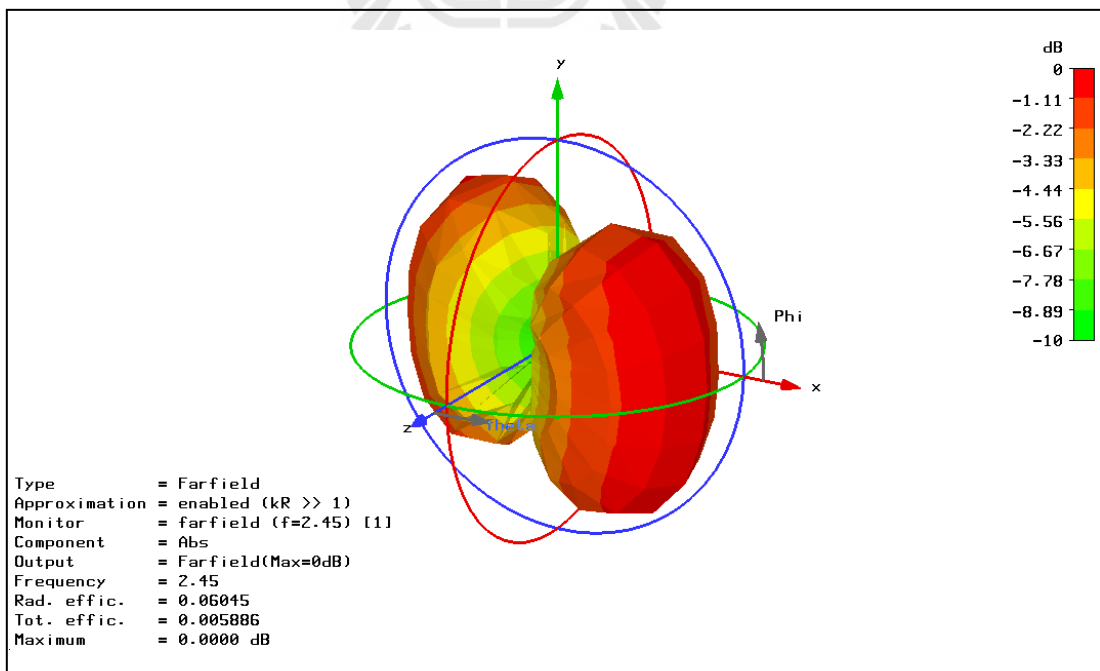
รูปที่ ก.49 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี G



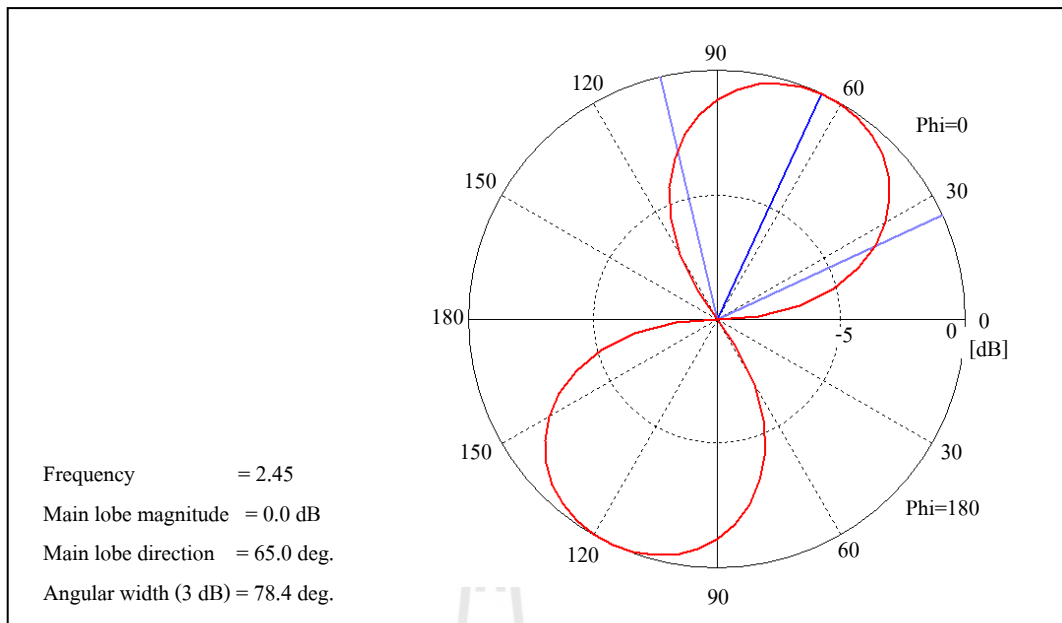
กรณี H



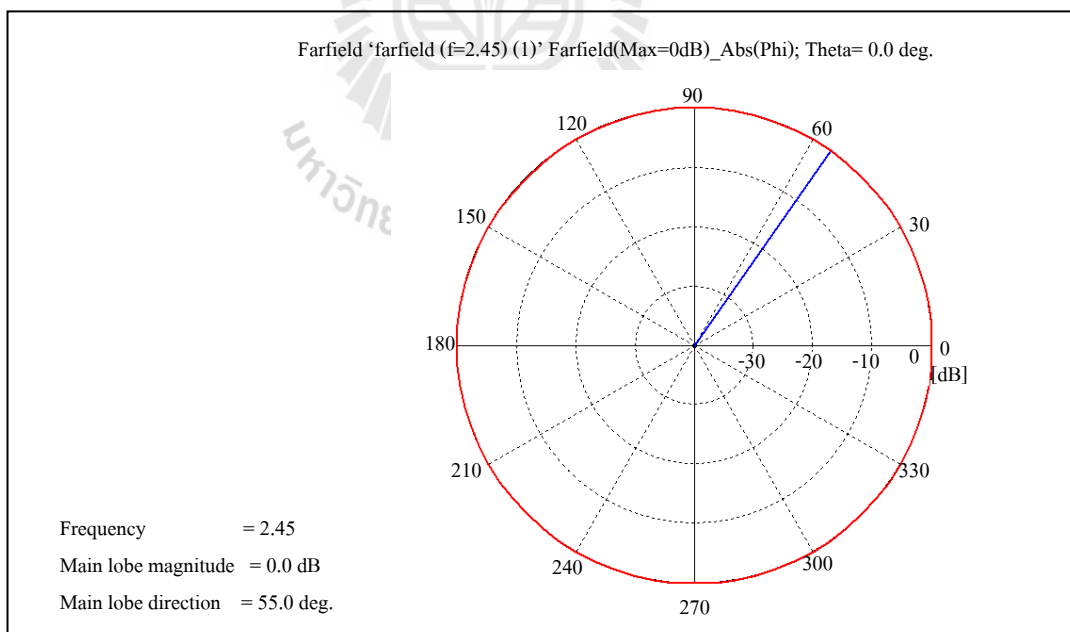
รูปที่ ก.50 สายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H



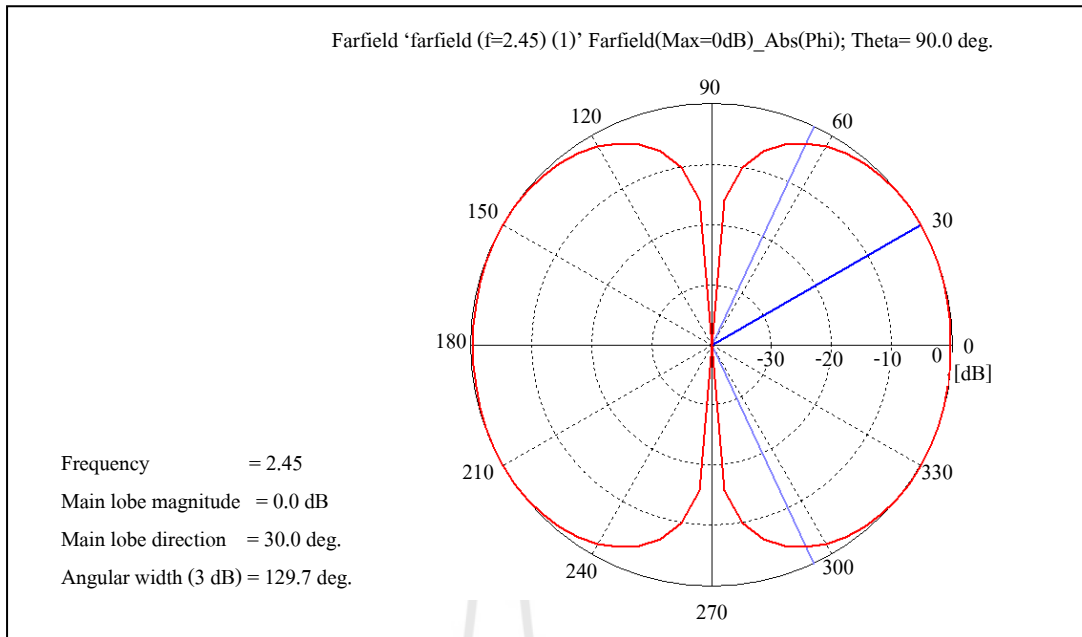
รูปที่ ก.51 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H



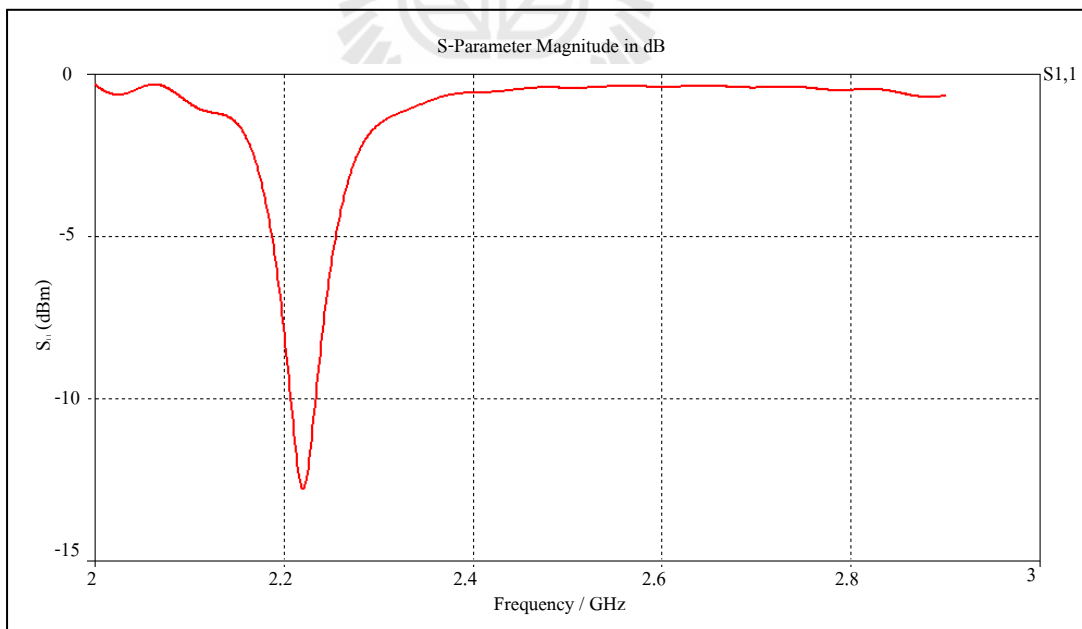
รูปที่ ก.52 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
 เมื่อ  $\theta, \phi = 0^\circ$



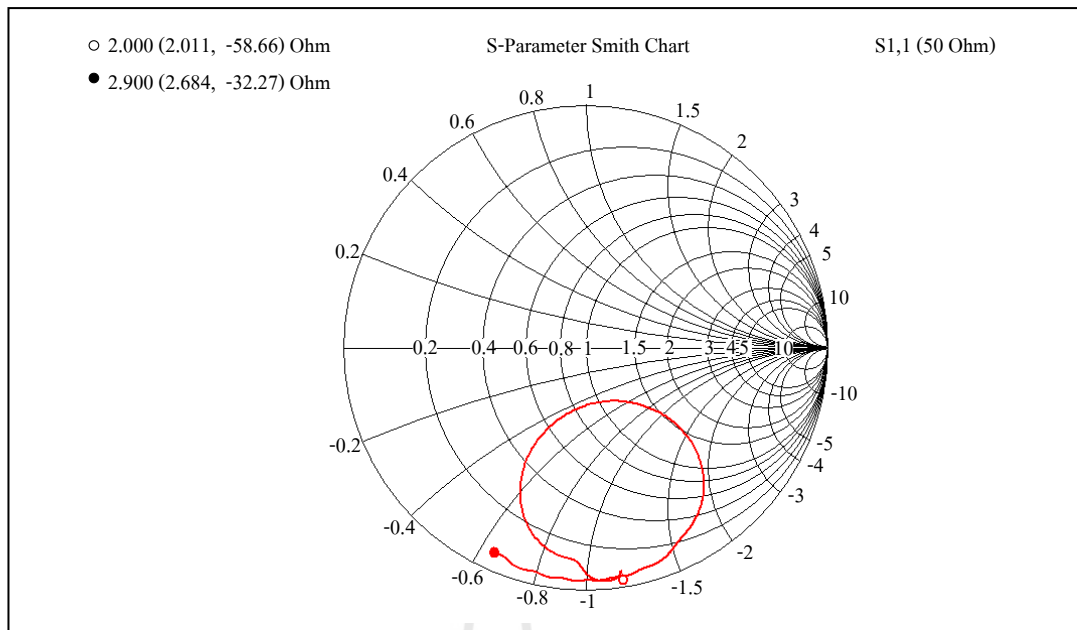
รูปที่ ก.53 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 0^\circ$



รูปที่ ก.54 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H  
 เมื่อ  $\phi, \theta = 90^\circ$



รูปที่ ก.55 สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแปดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H



รูปที่ ก.56 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปิดเหลี่ยมที่มีการลัดวงจรในกรณี H





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1) Chaipanya, P. Uthansakul, P. Wongsan, R. and Uthansakul, M. (2009). **Low Cost 2.4 GHz Switched-Beam Antenna**. 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI), Pattaya, Thailand.

2) Chaipanya, P. Uthansakul, P. Wongsan, R. and Uthansakul, M. (2009). **Enhancement of WLAN Signal Strength using Switched-Beam Single Antenna**. Asia-Pacific Microwave Conference (APMC ), Singapore.



# Low Cost 2.4 GHz Switched-Beam Antenna

P. Chaipanya, P. Uthansakul, R. Wongsan and M. Uthansakul  
 School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology,  
 Nakhonratchasima, Thailand 30000  
 E-Mail: M5140701@g.sut.ac.th, {uthansakul,rangsan,mtp}@sut.ac.th

**Abstract**-This paper reports a new design for switched-beam antenna at 2.4 GHz. This single octagonal-shape antenna is allowed to have eight different beam-patterns which can be controlled by shorted circuit at different edges. The prototype is constructed and tested to demonstrate its beam steering capability. At the end of this paper, simulation and measured results are compared to confirm performance of proposed antenna.

## I. INTRODUCTION

As the demand of wireless communication has been dramatically increased over the last two decades, wireless system operator needs an extra frequency spectrum to cope this enormous demand. Unfortunately, the available frequency spectrum is limited. One technique that is capable of increasing the wireless system capacity without additional frequency spectrum is a smart antenna technique [1]. Smart antennas are multiple element antennas accompanied by suitable signal processing algorithms either at the transmitter or receiver sides of a communication link. By pointing their beam towards a desired user and nulls or low side lobes towards interfering sources, they are capable of considerable improving the quality of signal transmission in a multi-user environment [2]. One attractive category of smart antennas is switched-beam antennas [3]. The switched-beam antennas are constituted by an antenna array, a simple beamforming network and a beam selector. The beam formations having main beam directed to designated directions are produced in beamforming network and then the beam having maximum signal strength is selected by low speed beam selector. These antenna systems are relatively popular as their implementation is not complicated and also not costly.

Recently, most of wireless access has immigrated from outdoor to indoor environment e.g., Wireless Local Area Network (WLAN). Even for mobile telephony, signal repeaters have become an infrastructure in most of building in urban area. To deal with the limited frequency spectrum and also achieve an increased quality and capacity of wireless access, the use of smart antennas is envisaged. Implementation of smart antennas at mobile terminals e.g., notebook or mobile handset is the preferable choice. This is because any failure to smart antennas installed at access point may cause undesirable damage for over all users. Thus, the matter of size for smart antennas, even for low profile switched-beam antenna, remains a limiting factor for fabricating in mobile terminals. Also, low implementation cost is required. This has gained lots of attention from researchers nowadays.

From the mentioned motivation, some examples from literatures for beam switching using single antenna element are discussed as follows. The work presented in [4], has demonstrated that we can accomplish the beam switching using a spiral antenna. The beam direction can be controlled by adjusting the spiral length. This antenna is considerably suitable for a static situation having fixed user location, not for dynamic system e.g., WLAN or mobile telephony. Also the authors of [5] have proposed a square loop antenna. The antenna has four feeding points. The radiation patterns can be steered by changing the feeding points. This is considerably not practical. The work proposed in [6] has revealed a low profile antenna which is capable of beam switching. It is a simple rectangular patch antenna fabricated using single-layer printed circuit board. Its beam can be controlled employing PIN diodes. This is considerably interesting as it is small of size and low of cost. However, it is able to switch the beam pattern for only two orthogonal cases. Therefore, this paper proposes a low profile antenna which is able to switch beam pattern for eight different directions. As its structure is very simple, manufacturing need only a few pennies.

The rest of this paper is as follows. After brief introduction, configuration and manufacturing of the proposed antenna are discussed in Section II. In order to show its real performance in beam switching, the experimental results compared with simulation results are shown in Section III. Finally, Section IV concludes the paper.

## II. ANTENNA CONFIGURATION

In this paper, we adopt the advantages of the antenna presented in [6] as its simplicity. In [6], the square patch is sized by  $\lambda^2/4$  m<sup>2</sup>. The antenna is shorted on each edge (four edges) at the position having minimum current distribution. According to that, the size of the proposed antenna in this paper is also limited by  $\lambda^2/4$  m<sup>2</sup>. To increase the degree of freedom for beam switching, all four corners are cut being octagonal shape as shown in Fig. 1. The antenna includes eight pieces of triangle having its area of  $\lambda^2/32$  m<sup>2</sup> with the height of 34.33 mm and width of 28.44 mm. Note that this antenna element is designed at 2.4 GHz.

After having completed the design, the antenna shown in Fig. 1 is fabricated using single-layer printed circuit board using FR4 with dielectric constant of 4.5 and substrate thickness of 1.6 mm. The SMA connector is attached from one



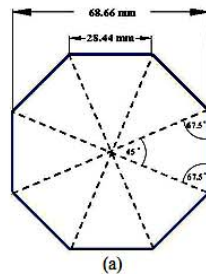


Figure 1. Configuration of octagonal shape antenna.

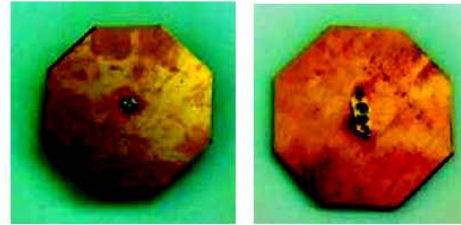


Figure 2. Photograph of fabricated antenna.

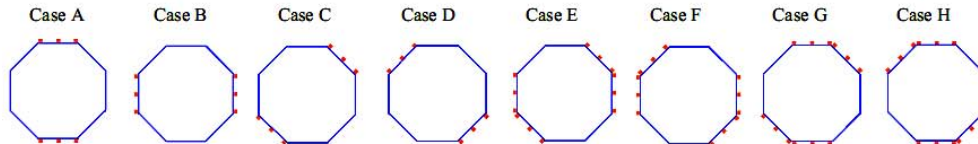


Figure 3. Eight cases of beam switching for the proposed antenna.

side through another side at the patch center. The photograph of fabricated antenna is shown in Fig. 2.

In this paper, the beam switching is controlled by shorted circuit at each edge of the patch. The choice of shorted position is due to the current distribution on the patch. The antenna has maximum distribution at the patch center while low current distribution occurs at the patch edges. There are eight cases (cases A to H) as shown in Fig. 3. For convenience, a wire is utilized to short at the given position. However, electronically shorted-circuit network for this antenna can be simply handled by PIN diode or transistor. Each shorted position shown in Fig. 3 is spaced by 12.72 mm apart. However, shorting at different positions gives rise to different antenna impedances. This is handled by single open-stub matching designed at 2.4 GHz.

Next section shows the measured radiation pattern compared with the results obtained from simulation for eight cases presented in Fig. 3.

### III. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULT

Having completed antenna fabrication, the antenna prototype is tested in anechoic chamber. Note that in this paper the beam steering capability is demonstrated through radiation patterns. In addition, the simulation results obtained from CST Microwave Studio 5 are also compared with the measured results.

Table I presents the measured radiation pattern compared with simulation ones. As we can see, the simulation results have the same trend with measured ones. The beamwidth is similar. Also, beam directions are moderately comparable. However, there are some deviations between those results in some cases. The backlobes in cases A to D are lower than their mainlobes. This may be caused by manufacturing error. However, this low cost prototype is able to confirm its beam switching capability.

### IV. CONCLUSION

This paper has demonstrated a new design for switched-beam antenna. This single octagonal patch antenna is capable of beam switching for eight different directions. Changing of beam direction can be done through shorted circuit at edges of the patch. The advantages of this antenna is that it is small of size and easily manufactured, thus low cost switched-beam antenna can be achieved.

### ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from Thailand Research Fund (TRF) and Suranaree University of Technology, Thailand.

TABLE I SIMULATED AND MEASURED RADIATION PATTERN OF THE PROPOSED ANTENNA.

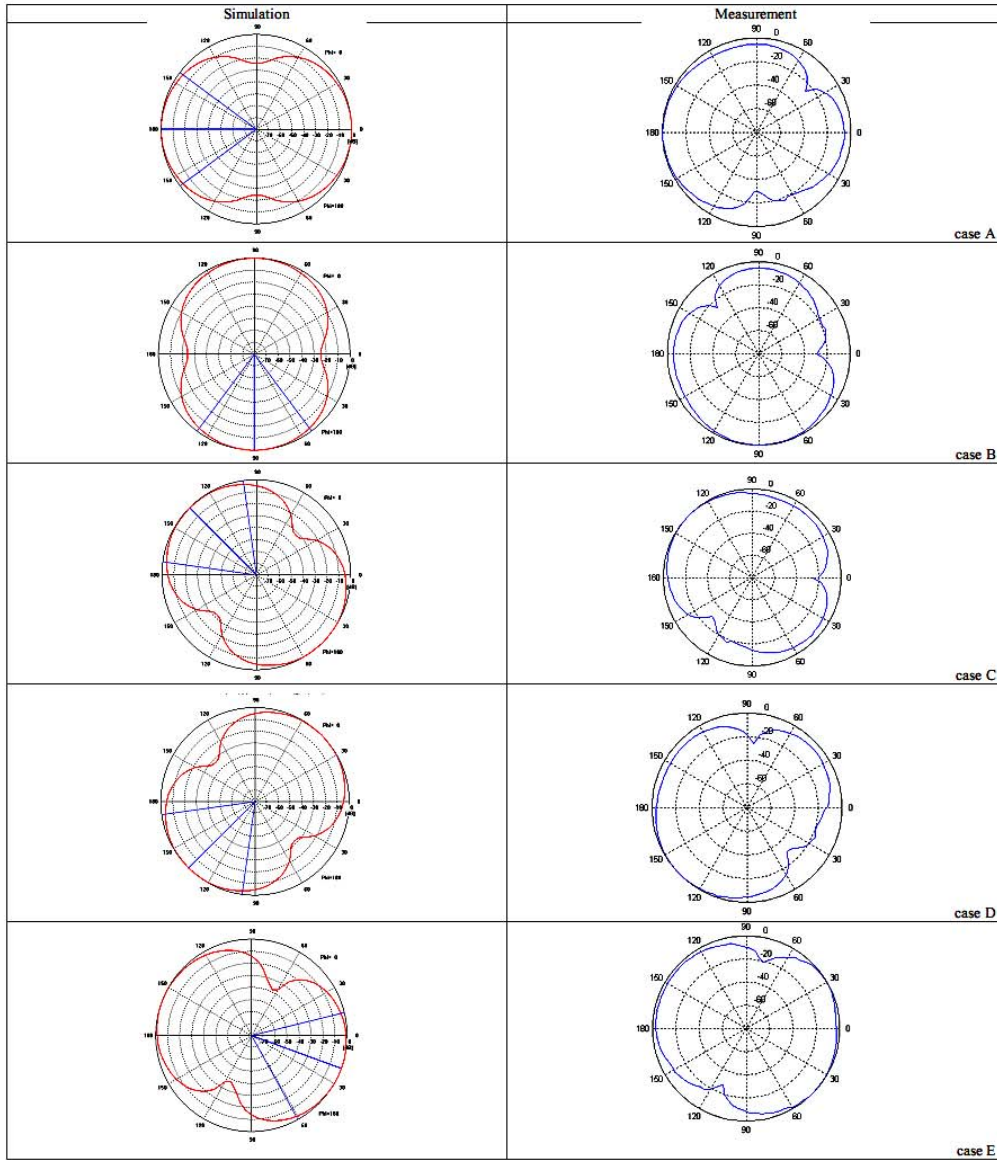
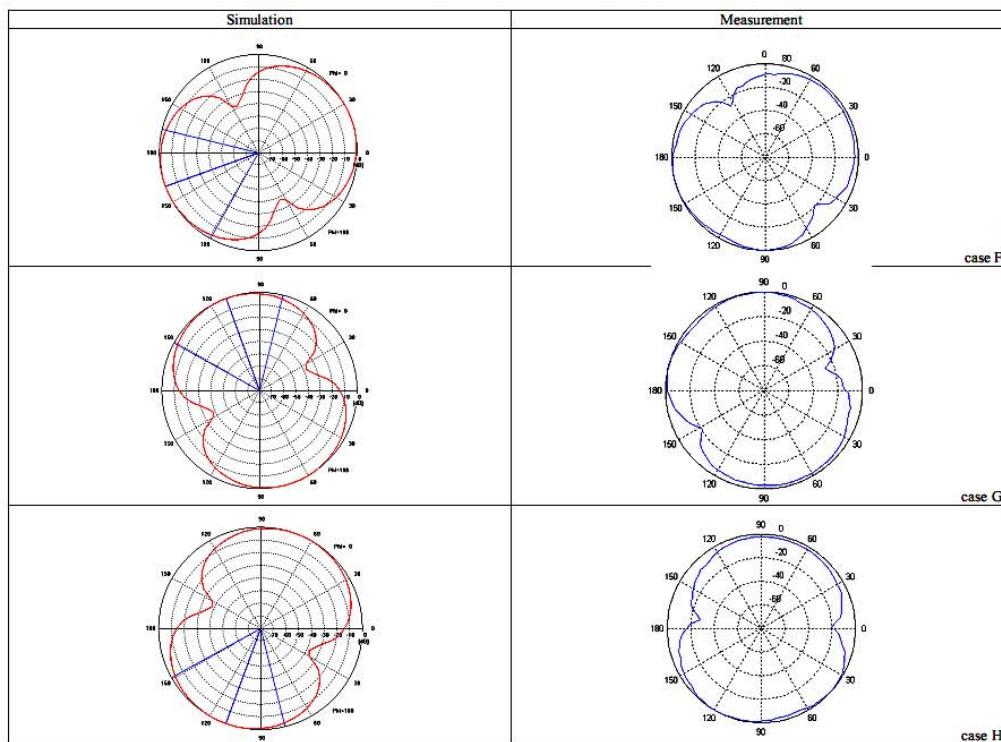


TABLE I (continued) SIMULATED AND MEASURED RADIATION PATTERN OF THE PROPOSED ANTENNA.



## REFERENCES

- [1] Alexiou, A.; Haardt, M., "Smart Antenna Technologies for Future Wireless Systems: Trends and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, Issue 9, pp. 90-97, Sept. 2004.
- [2] Joseph C. Liberti, Jr., *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] Yan Jiang and Vijay K. Bhargava, "Application of Smart Antenna Techniques in Cellular Mobile Systems," *IEEE Pacific Rim Conference on*, 20-22 Aug 1997, pp. 362-365 Vol.1.
- [4] Nakano, H.; Eto, J.; Okabe, Y.; Yamauchi, J., "Tilted- and Axial-Beam Formation by a Single-Arm Rectangular Spiral Antenna with Compact Dielectric Substrate and Conducting Plane," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, No. 1, pp. 17-24, Jan. 2002.
- [5] A. Mehta and D. Mirshekar-Syahkal, "Pattern Steerable Square Loop Antenna," *IEEE Electronic Letters (IET)*, Vol. 43, No. 9, pp. 491-493, 26 April 2007.
- [6] Ngamjanyaporn, P.; Phongcharoenpanich, C.; Akkaraekthalin, P.; Krairiksh, M., "Signal-to-Interference Ratio Improvement by Using a Phased Array Antenna of Switched-Beam Elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No.5, pp. 1819-1828, May 2005.

## Enhancement of WLAN Signal Strength using Switched-Beam Single Antenna

P. Chaipanya<sup>#1</sup>, P. Uthansakul<sup>#2</sup>, R. Wongsan<sup>#3</sup>, M. Uthansakul<sup>#4</sup>

<sup>#</sup>*School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology  
Nakhonratchasima, Thailand 30000*

<sup>1</sup>M5140701@g.sut.ac.th

<sup>2</sup>uthansakul@sut.ac.th

<sup>3</sup>rangsans@sut.ac.th

<sup>4</sup>mtp@sut.ac.th

**ABSTRACT** — This paper reports a low cost switched-beam antenna operating at 2.45 GHz. This single octagonal-shape antenna allows eight different beam-patterns which can be controlled by shorted-circuit terminations at different edges. The prototype of proposed antenna is constructed and tested to demonstrate its beam steering capability compared with simulation results. In addition, the prototype is tested under real circumstance in existing WLAN infrastructure. The measured results reveal that signal strength can be improved using the proposed antenna over omni-directional antenna utilized in these days.

**Index Terms** — Antenna measurements, antenna configuration patterns, current distribution, microstrip antennas, short circuit currents, switches.

### I. INTRODUCTION

As the demand of wireless communication has been dramatically increased over the last two decades, wireless system operator needs an extra frequency spectrum to cope this enormous demand. Unfortunately, the available frequency spectrum is limited. One technique that is capable of increasing the wireless system capacity without additional frequency spectrum is a smart antenna technique [1]. Smart antennas are multiple element antennas accompanied by suitable signal processing algorithms either at the transmitter or receiver sides of a communication link. By pointing their beam towards a desired user and nulls or low side lobes towards interfering sources, they are capable of considerable improving the quality of signal transmission in a multi-user environment [2]. One attractive category of smart antennas is switched-beam antennas [3]. The switched-beam antennas are constituted by an antenna array, a simple beamforming network and a beam selector. The beam formations having main beam directed to designated directions are produced in beamforming network and then the beam having maximum signal strength is selected by low-speed beam selector. These antenna systems are relatively popular as their implementation is not complicated and also not costly.

Recently, most of wireless access has immigrated from outdoor to indoor environment e.g., Wireless Local Area Network (WLAN). Even for mobile telephony, signal repeaters have become an infrastructure in most of building in urban area. To deal with the limited frequency spectrum and also achieve an increased quality and capacity of wireless access, the use of smart antennas is envisaged. Implementation of smart antennas at mobile terminals e.g.,

notebook or mobile handset is a preferable choice. This is because any failure to smart antennas installed at access point may cause undesirable damage for over all users. Thus, the matter of size for smart antennas, even for low profile switched-beam antenna, remains a limiting factor for fabricating in mobile terminals. Also, low implementation cost is required. This has gained lots of attention from researchers nowadays.

From the mentioned motivation, some examples from literatures for beam switching using single antenna element are discussed as follows. The work presented in [4], has demonstrated that we can accomplish the beam switching using a spiral antenna. The beam direction can be controlled by adjusting the spiral length. However, this antenna is considerably suitable for a static situation having fixed user location, not for dynamic system e.g., WLAN or mobile telephony. Also the authors of [5] have proposed a square loop antenna capable of beam switching. The antenna has four feeding points. The radiation patterns can be steered by changing the feeding points. This is considerably not practical as the feeding network is relatively complicated. The work proposed in [6] has revealed a low profile antenna which is capable of beam switching in two directions. It is a simple rectangular patch antenna fabricated using single-layer printed circuit board. Its beam can be controlled employing PIN diodes. This is considerably interesting as it is small of size and low of cost. However, it is able to switch the beam pattern for only two orthogonal cases. Therefore, this paper proposes a low profile antenna which is able to switch beam pattern for eight different directions. As its structure is very simple, manufacturing need only a few pennies. To reveal the true advantages of the proposed antenna, experiments under existing WLAN infrastructure are also undertaken.

The rest of this paper is as follows. After brief introduction, configuration and manufacturing of the proposed antenna are discussed in Section II. In this section, the simulation and experimental results are shown to confirm switching capability of the antenna. In section III, The antenna is tested in real circumstance having WLAN operation. The measured results of the proposed antenna are shown compared with the ones resulted from omni-directional antenna. Finally, Section IV concludes the paper.

## II. ANTENNA CONFIGURATION

In this paper, we adopt the advantages of the antenna presented in [6] as its simplicity. In [6], the square patch is sized by  $\lambda^2/4$  m<sup>2</sup>. According to this, the size of the proposed antenna in this paper is also limited by  $\lambda^2/4$  m<sup>2</sup>. To increase the degree of freedom for beam switching, all four corners are cut being octagonal shape as shown in Fig. 1. The antenna can be view as it includes eight pieces of triangle having its area of  $\lambda^2/32$  m<sup>2</sup>, height of 33.63 mm and width of 27.86 mm. Note that this antenna element is designed at 2.45 GHz.

After having completed the design, the antenna shown in Fig. 1 is fabricated using single-layer printed circuit board using FR4-substrate with dielectric constant of 4.5 and substrate thickness of 1.6 mm as shown in Fig. 2. The SMA connector is attached from one side through another side at the patch center. The antenna has maximum current distribution at the patch center while low current distribution occurs at the patch edges as shown in Fig. 3. Different edges are chosen to be terminated with shorted-circuit terminations to provide different radiation patterns. At each edge, three shorted position are required and the adjacent positions are apart by 8.18 mm as shown in Fig. 4. The radiation patterns can be classified into two major groups providing eight different patterns as follows.

Firstly, four edges having minimum current distributions, A and B according to Fig. 4, are chosen to be terminated with shorted-circuit terminations, namely cases A and B. The rest of four edges having low current distributions are second choice. In this case, edges C and D are terminated with shorted-circuit terminations, namely case C and D. To increase the variety of beam switching, combination between the mentioned four cases are considered. Mixing between cases B and C provides different radiation pattern, namely case E. Shorted-circuit terminated at edges B and D is name as case F. Also, combinations of cases A and C, and A and D are name as cases G and H.

Performance of the proposed switched-beam antenna in this paper relies on its radiation patterns which are obtained from simulation and measurement. The CST Microwave Studio is utilized as a tool for simulation at 2.45 GHz. To confirm the performance, the constructed prototype shown in Fig. 2 is tested in anechoic chamber at 2.45 GHz. For convenience, a wire is utilized to short at the given position. However, electronically shorted-circuit network for this antenna can be simply handled by PIN diodes or transistors. However, shorting at different positions gives rise to different antenna impedances. This can be handled by single open-stub matching designed at 2.45 GHz which is already included into the design.

Table I presents the measured radiation pattern for eight cases, A to H, compared with simulation ones. As we can see, the simulation results have a good agreement with the measured ones. The beamwidth is relatively similar. Also, beam directions are moderately comparable. The average measured- gain for eight cases is 9.12 dBi. However, the

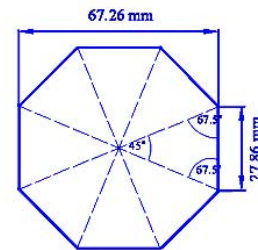


Fig. 1. Configuration of octagonal shape antenna.

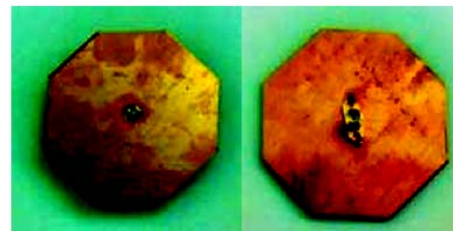


Fig. 2. Photograph of fabricated antenna.

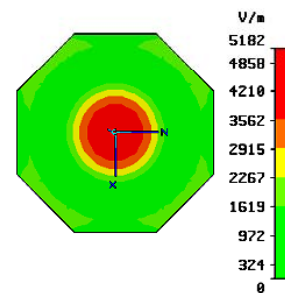


Fig. 3. Current distribution of octagonal shape antenna.

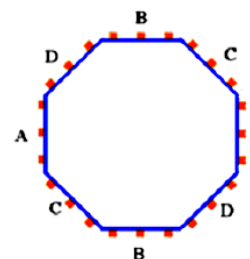
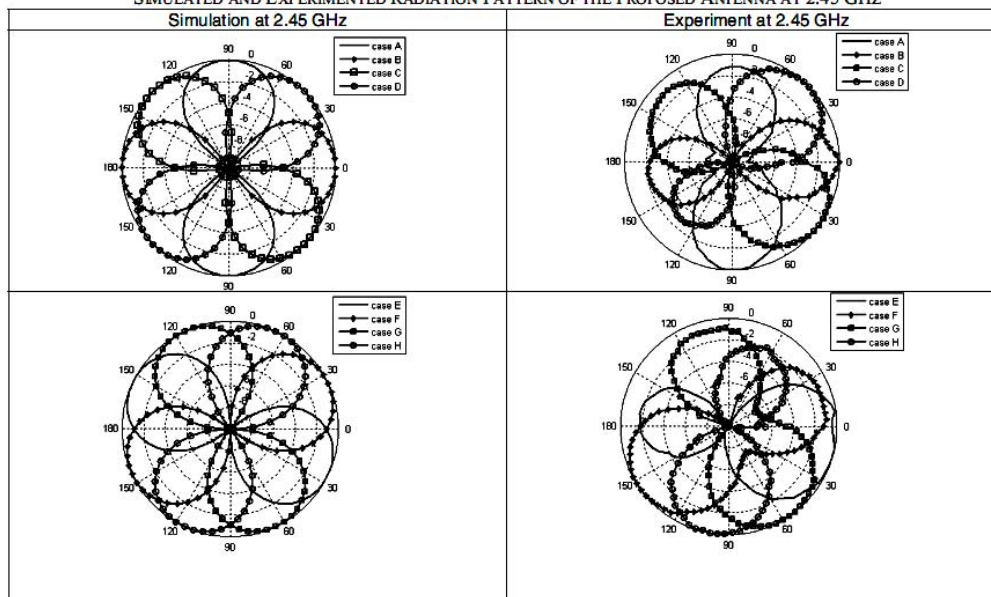


Fig. 4. Cases of beam switching for the proposed antenna.

TABLE I  
SIMULATED AND EXPERIMENTED RADIATION PATTERN OF THE PROPOSED ANTENNA AT 2.45 GHz



backlobes for some cases are slightly different. This may be caused by manufacturing error. However, this low cost prototype is able to confirm its beam switching capability.

However, the above results cannot reflect the true advantages of the proposed antenna. Therefore, the further investigation is paid to testing it in existing WLAN infrastructure. The comparison between the proposed antenna and omni-directional antenna utilized in these days is on focus. The signal strength is an indicator to show the antenna performance because signal quality and throughput can be reflected from signal strength.

### III. MEASUREMENT AND RESULTS

The constructed prototype of proposed antenna is tested under existing WLAN operation at 4<sup>th</sup> level of C-building, Suranaree University of Technology. The layout the C-building is shown in Fig. 5 whereas there are 4 access points represented by small mobile phones. The measuring points are 4 points as we can see number 1 to 4 in Fig. 5. To confirm the stability of measured signal, 3 times of measurement are undertaken at each point. The prototype is connected to WLAN module (WL-U356A) from PLANET Technology Corporation as seen in Fig. 6. The signal strength is recorded in notebook computer. The comparison between using the

proposed and omni-directional antennas is in focus. Note that 5dBi monopole antenna is used in case of omni-directional antenna. Also, the advantages of beam switching for the proposed antenna is emphasized by comparing with the one without shorted-circuit termination.

The measured signal strength for all cases mention above is shown in Table II. The value in bold and underline represents the maximum signal strength in each case. As we can see, signal strength in case of proposed antenna is always higher than the ones obtain from monopole antenna. The average value indicates that we can improve signal strength up to 14 dBm over using monopole antenna. Furthermore, by comparing cases A to H with the ones without shorted-circuit termination shown in Table II, we can confirm that the proposed method to control the beam steering improves the capability of the antenna.

### IV. CONCLUSION

This paper has reported a new design for single antenna element capable of beam switching in eight directions. This single octagonal patch antenna can control beam direction by shorted-termination at different edges. Its beam-switching capability has been confirmed through computer simulation and experiment. Also, its true advantage has been tested

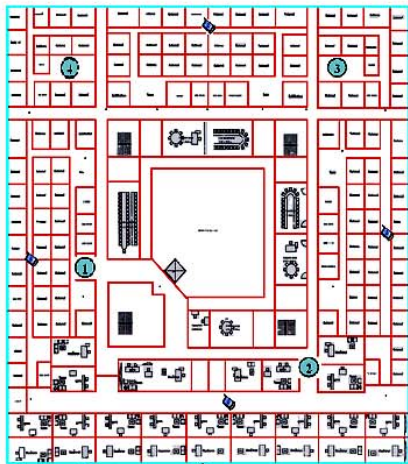


Fig. 5. Layout of 4<sup>th</sup> level at C-building.



Fig. 6. Measurement setup under existing WLAN infrastructure.

TABLE II  
RESULTS FOR SIGNAL STRENGTH (dBm)

Case	Position 1			Position 2			Position 3			Position 4			Average
	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3	
A	-70	-72	-68	-66	-69	-68	-67	-68	-71	-58	-60	-63	-66.67
B	-67	-69	-70	-69	-72	-69	-67	-67	-66	-56	-59	-62	-66.98
C	-69	-69	-70	-70	-68	-67	-65	-68	-67	-65	-62	-60	-66.67
D	-68	-70	-69	-71	-70	-70	-74	-71	-71	-65	-66	-62	-68.92
E	-67	-63	<b>-61</b>	<b>-60</b>	-63	<b>-59</b>	<b>-63</b>	<b>-60</b>	<b>-63</b>	<b>-54</b>	<b>-53</b>	-58	<b>-60.33</b>
F	-60	<b>-60</b>	<b>-61</b>	-62	<b>-59</b>	-67	-65	-64	-65	-57	-56	-60	-61.33
G	<b>-57</b>	<b>-60</b>	<b>-61</b>	-62	-60	-68	-65	-63	-64	<b>-54</b>	-60	-58	-61.00
H	-64	-65	-66	-64	-62	-67	-66	-66	-66	-56	-58	<b>-55</b>	-62.92
no shorting	<b>-74</b>	<b>-72</b>	<b>-75</b>	<b>-69</b>	<b>-75</b>	<b>-68</b>	<b>-71</b>	<b>-74</b>	<b>-74</b>	<b>-62</b>	<b>-64</b>	<b>-64</b>	<b>-70.17</b>
monopole	<b>-76</b>	<b>-75</b>	<b>-79</b>	<b>-72</b>	<b>-76</b>	<b>-77</b>	<b>-77</b>	<b>-81</b>	<b>-83</b>	<b>-68</b>	<b>-63</b>	<b>-67</b>	<b>-74.5</b>

under real circumstances. This antenna is considerably attractive as it is low of size and its structure is relatively simple, hence the manufacturing is easy and not costly.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the financial support from Thailand Research Fund (TRF)MRG-W1515E073 and Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

[1] Alexiou, A.; Haardt, M., "Smart Antenna Technologies for Future Wireless Systems: Trends and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, Issue 9, pp. 90-97, Sept. 2004.

[2] Joseph C. Liberti, Jr., *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, 1999.

[3] Yan Jiang and Vijay K.Bhargava, "Application of Smart Antenna Techniques in Cellular Mobile Systems," *IEEE Pacific Rim Conference on*, 20-22 Aug 1997, pp. 362-365 Vol.1.

[4] Nakano, H.; Eto, J.; Okabe, Y.; Yamauchi, J., "Tilted- and Axial-Beam Formation by a Single-Arm Rectangular Spiral Antenna with Compact Dielectric Substrate and Conducting Plane," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, No. 1, pp. 17-24, Jan. 2002.

[5] A.Mehta and D.Mirshakar-Syahkal, "Pattern Steerable Square Loop Antenna," *IEEE Electronic Letters (IET)*, Vol. 43, No. 9, pp. 491-493, 26 April 2007.

[6] Ngamjanyaporn, P.; Phongcharoenpanich, C.; Akkaraekthalin, P.; Krairiksh, M., "Signal-to-Interference Ratio Improvement by Using a Phased Array Antenna of Switched-Beam Elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No.5, pp. 1819-1828, May 2005.

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบต้นเดียวสำหรับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวพิชญา ชัยปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน 2528 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์ จังหวัดเชียงราย และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ระดับนานาชาติจำนวน 2 ฉบับ ดังนี้

- 1) International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology 2009 ครั้งที่ 6 (ECTI 2009) ในหัวข้อ “**Low Cost 2.4 GHz Switched-Beam Antenna**”, May 6-9, 2009, Pattaya, Thailand.
- 2) Asia-Pacific Microwave Conference 2009 (APMC 2009) ในหัวข้อ “**Enhancement of WLAN Signal Strength using Switched-Beam Single Antenna**”, December 7-10, 2009, Singapore.