สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง

DUAL-FEED SWITCHED-BEAM PATCH ANTENNA

T110301

จักรกฤช ตรรกพาณิชย์

JUKKRIT TAGAPANIJ

จพ.
จ215ส
2553
เลขหมู่.........
เลขทะเบียน 110301
วัน,เดือน,ปี -1 พ.ย. 2553

b. 12263291
i.........

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2553

KMITL 2010-EN-D-018-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL-FEED SWITCHED-BEAM PATCH ANTENNA

JUKKRIT TAGAPANIJ

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010

KMITL 2010-EN-D-018-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง
นักศึกษา	นายจักรกฤช ตรรกพาณิชย์
รหัสนักศึกษา	48060060
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง เพื่อปรับปรุงวิธีการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นที่มีอยู่เดิม โดยใช้โครงสร้างของสายอากาศที่เป็นแผ่นพิมพ์จัตุรัสตามลักษณะเดิมแต่จะมีความซับซ้อนน้อยลงเพราะใช้สวิทช์ความถี่วิทยุสำหรับการสวิทช์ลำคลื่น ในการออกแบบสายอากาศนี้ต้องวิเคราะห์ถึงตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณเนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีคุณสมบัติเช่นแบบเดิม สำหรับคุณสมบัติอิมพีแดนซ์นั้นจะปรับให้มีค่าที่เหมาะสมในระบบป้อนสัญญาณซึ่งเป็นสายส่งไมโครสตริป จากโครงสร้างใหม่นี้สามารถสร้างให้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่เพื่อใช้งานในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ ได้แก่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ โดยนำมาวางซ้อนกันบนระนาบกราวด์ ซึ่งจากการทดสอบการใช้งานแสดงให้เห็นว่าสายอากาศที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้นั้นสามารถเพิ่มค่าทรูพุตของการรับส่งสัญญาณได้ซึ่งทดสอบในสภาพการใช้งานจริง นอกจากนี้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งนี้สามารถใช้เป็นองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟส และสามารถออกแบบให้เป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ โดยสร้างสายอากาศด้วยแผ่นพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและจัดวางตำแหน่งของสายอากาศเป็นโครงสร้างใหม่ สายอากาศปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นนี้สามารถปรับลำคลื่นให้ชี้ทิศทางได้ครอบคลุมรอบมุมทิศ จึงสามารถใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาได้ ในการทดสอบการใช้งานเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามานั้นจะใช้วิธีการเปรียบเทียบกำลังงานที่รับได้จากแต่ละลำคลื่นซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ ผลการทดสอบแสดงว่าสามารถระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาได้แม่นยำ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นนี้อาจเป็นตัวเลือกสำหรับใช้ในระบบสื่อสารไร้สายสมัยใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna
Student	Mr. Jukkrit Tagapanij
Student ID.	48060060
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Prof. Dr. Monai Krairiksh

ABSTRACT

This thesis proposed a dual-feed switched-beam patch antenna by improving feeding mechanism of the conventional switched-beam patch antenna. The antenna is less complicated than the conventional one since a square patch employs an RF switch to switch radiation patterns. The positions of feeding probes are essential parameters that were analyzed to provide same radiation patterns as obtained from the conventional antenna. The impedance can be matched by adjusting the microstrip transmission line feeding system. The 2.4 GHz and 5.2 GHz switched-beam patches were stacked on a ground plane to provide a dual-band dual-feed switched-beam patch antenna for dual-band wireless LAN. The antenna was applied for access point to improve throughput of the system when testing in a real environment. The four dual-feed switched-beam patches were used as elements of phased array for installing on a mobile unit. The structure of the array can be reduced by using printed circuit board with high dielectric constant and arranging positions of each element as a new configuration. The new switched-beam phased array provided a number of radiation patterns that cover all angles in azimuth plane. It can be used for angle-of-arrival (AOA) estimation. The AOA was accurately estimated by comparing the received power of each pattern without complicated mathematical calculation. It can be a candidate antenna for modern wireless communications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ โดยมีอาจารย์ปรึกษา ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้กรุณาให้โอกาสฝึกฝนการทำวิจัยอย่างมีระเบียบแบบแผนที่ดี และรวมทั้งได้แก้ปัญหาที่มีให้ลุล่วงโดยตลอด

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมผล โกศัลวิตร์ และ ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่ได้แนะนำเทคนิคซึ่งช่วยในการวิเคราะห์เกี่ยวกับสายอากาศ

ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนในห้องปฏิบัติการทุกท่านซึ่งประกอบด้วย ดร.ดวงอาทิย์ ศรีมูล ดร.จิรัฐ เหมือนชู ดร.สุวรรณ จันทร์อินทร์ ดร. เอกรัฐ บุญภูงา คุณธัญวัฒน์ ลิมปิติ คุณธนวุฒิ ตันติโสภารักษ์ คุณภพสุข สุขสำราญ คุณรัดดา มีทา รวมถึงท่านอื่นๆที่มิกล่าวถึง ซึ่งทุกท่านได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย แนะนำสิ่งอันเป็นประโยชน์ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ โดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ได้สนับสนุนทุนส่วนหนึ่งในการศึกษา และได้สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ บิดา มารดา อา ครูอาจารย์ทุกท่าน และผู้มีจิตรเมตตาทุกท่าน

จักรกฤช ตรรกพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..II
กิตติกรรมประกาศ..III
สารบัญ...IV
สารบัญตาราง...VII
สารบัญรูป..IX
บทที่ 1 บทนำ...1
1.1 ปัญหาในระบบสื่อสารเคลื่อนที่และแนวทางแก้ปัญหา..................1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์......................................5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์...5
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.......................................6

บทที่ 2 หลักการของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง..........7
2.1 โหมดการทำงานและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์.........7
2.2 หลักการป้อนสัญญาณสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น...............19
2.2.1 การป้อนสัญญาณสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น.................19
2.2.2 ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุฐานรอง........................21
2.3 การจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง......... 22
2.3.1 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน..............................24
2.3.2 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การกระเจิง..................27
2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติ..28
2.5 สรุป...30

บทที่ 3 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่....31
3.1 หลักการทำงานสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น
ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่...............................31
3.2 การออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น
ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่...............................32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง ของแต่ละความถี่...32

3.2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง สำหรับสองย่านความถี่...35

3.3 คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง สำหรับสองย่านความถี่...42

3.4 สรุป...43

บทที่ 4 สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น.......................................44

4.1 สายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น.......................................44

4.2 ผลการเหนี่ยวนำของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในแถวลำดับ.......................................48

4.3 การจัดวางแถวลำดับของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น.......................................53

4.4 การปรับเปลี่ยนค่าต่างๆของสายอากาศแถวลำดับ.......................................57

4.4.1 ขนาดสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว (*wp*).......................................57

4.4.2 ตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว (*fp*).......................................60

4.4.3 การปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยปรับตำแหน่งสตับ (*d1*) และความยาวสตับ (*d2*)...61

4.5 แบบรูปการปรับทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการจำลอง.......................................64

4.6 ผลการทดสอบ.......................................66

4.6.1 ผลการทดสอบการสูญเสียจากการสะท้อน.......................................66

4.6.2 ผลการทดสอบอัตราขยาย.......................................68

4.7 สรุป.......................................69

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่ และสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น..........70

5.1 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่.......................................70

5.2 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ ปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น.......................................76

5.2.1 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง.......................................83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 45 องศา........................85
5.2.3 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 135 องศา........................88
5.2.4 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 180 องศา........................91
5.3 สรุป..94

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..96

บรรณานุกรม...99

ภาคผนวก..106
ภาคผนวก ก. ตารางค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นในแต่ละบริเวณ..........................106
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่...125

ประวัติผู้เขียน..135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติค่าสภาพเจาะจงทิศที่แปรตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง....................23
3.1 ขนาดของส่วนต่างๆ ของสายอากาศ....................41
4.1 ค่าการเลื่อนเฟสของแต่ละองค์ประกอบ....................46
4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเลื่อนเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น...47
4.3 คุณสมบัติของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น....................49
4.4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งได้รับผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบด้านข้าง....................51
4.4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งได้รับผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างในแนวแทยง..........52
4.5 ค่าต่างๆในโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่น....................53
5.1 ค่ากลางของค่าทรูพุต (เมกะบิตต่อวินาที)....................73
5.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน....................79
5.3.1 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 8B :A-H....................80
5.3.2 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 4B1 :ACEG....................81
5.3.3 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 4B2 :BDFH....................82
5.4.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 8 แบบรูป จาก 8B....................84
5.4.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B 84
5.4.3 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B1 85
5.4.4 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AC จาก4B1....................85
5.4.5 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B2....................85
5.4.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HBจาก 4B2.................... 85
5.5.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 8B.................... 87
5.5.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B....................87
5.5.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B 87
5.5.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จา4B1....................87
5.5.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AC จาก 4B1....................87
5.5.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AG จาก 4B1....................87
5.5.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 4B2.................... 88
5.5.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HB จาก 4 B2....................88
5.5.9 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HFจาก 4 B2....................88
5.6.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป 8B 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.6.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B....................90

5.6.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B....................90

5.6.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป AG จาก 4B1..90

5.6.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AG จาก 4B1..................90

5.6.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ CE จาก 4 B1.................90

5.6.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 4 B2..90

5.6.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HD จาก 4B2..................90

5.7.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 8B 92

5.7.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B....................92

5.7.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ ED จาก 8B....................92

5.7.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป AG จาก 4B1..92

5.7.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AE จาก จาก 4B1...........93

5.7.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ CG จาก 4B1..................93

5.7.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B2..93

5.7.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HD จาก 4B2..................93

5.7.9 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ DF จาก 4 B2..................93

5. 8 เปรียบเทียบการหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา 94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 รูปแบบสนามที่กระจายในสายอากาศแผ่นพิมพ์ 7

2.2 กระแสสมมูลที่อยู่บนด้านทั้งสี่ของสายอากาศแผ่นพิมพ์......12

2.3 การกำหนดตำแหน่งพิกัดเพื่อใช้หาการแผ่พลังงานจากช่องเปิด......14

2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า
ของสายอากาศแผ่นพิมพ์ทำงานในโหมดที่สองTM_{200}และTM_{020}......17

2.5 สายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส......18

2.6 โหมดของสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส 20

2.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของค่า K ต่างๆ ซึ่งขึ้นกับค่าคงที่ไดอิล็กตริกของวัสดุฐานรอง......22

2.8 คุณสมบัติการสูญเสียกระเจิงเมื่อใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ......23

2.9 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่บริเวณช่องแผ่พลังงานเมื่อเปลี่ยนตำแหน่ง x_f 25

2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อป้อนสัญญาณให้โพรบ 1 โดยเปลี่ยนตำแหน่ง x_f และ y_f 26

2.11 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ 27

2.12 ผลการคำนวณและทดสอบสัมประสิทธิ์การกระเจิง
เมื่อป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตร......28

2.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน 29

3.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทซ์ลำคลื่นด้วยการสวิทซ์โพรบสองย่านความถี่ 32

3.2 คุณสมบัติของสายอากาศจากการจำลองที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ 33

3.3 คุณสมบัติของสายอากาศจากการจำลองที่ความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์......34

3.4 ระบบป้อนสัญญาณของสายอากาศ......35

3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_h = 27.4 มิลลิเมตร, w_l = 52.5, 55, 57.5
และ 60 มิลลิเมตร......36

3.6 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_h = 27.4 มิลลิเมตร, w_l = 52.5, 55, 57.5
และ 60 มิลลิเมตร......37

3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_l = 55.0 มิลลิเมตร, w_h = 27.2, 27.4
และ 27.6 มิลลิเมตร 37

3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_l = 55.0 มิลลิเมตร, w_h = 27.2, 27.4
และ 27.6 มิลลิเมตร 38

3.9 ค่าอิมพีแดนซ์ d_{ll} = 2 มิลลิเมตร......40

3.10 ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อ d_{hl} =0 มิลลิเมตร......40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบ	41
3.12	ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน	42
3.13	ผลการทดสอบค่า S_{11}	42
4.1	สายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น	45
4.2	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบจากการจำลอง	45
4.3	แบบรูปการแผ่ลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้องค์ประกอบลำดับสวิทช์ เมื่อปรับค่ารัศมีของแถวลำดับ	46
4.4	สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบที่ออกแบบพร้อมกับโพรบป้อนสัญญาณผ่านสายส่งไมโครสตริปและสตัปปรับค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	48
4.5	สายอากาศที่ใช้ทดสอบผลการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบ	50
4.6	ค่าอิมพีแดนซ์จากการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบตามระยะห่างต่างๆ	50
4.7	สายอากาศแถวลำดับที่มีโครงสร้างการจัดตำแหน่งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวแบบที่นำเสนอใหม่	53
4.8	แบบรูปการแผ่พลังงานที่รัศมีต่างๆ	55
4.9	แบบรูปการแผ่พลังงานที่รัศมีต่างๆ เมื่อ $r_a = 0.3\lambda_0$	55
4.10	แบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางต่างๆ เมื่อ $r_a = 0.3\lambda_0$	56
4.11	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy* จากการปรับค่า *wp* = 14.0 ถึง 16.4 มิลลิเมตร	58
4.12	สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *wp* = 14.0 ถึง 16.4 มิลลิเมตร	59
4.13	แบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy* จากการปรับค่า *fp*= 3.5 ถึง 4.1 มิลลิเมตร	59
4.14	สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *fp*= 3.5 ถึง 4.1 มิลลิเมตร	60
4.15	ค่าอิมพีแดนซ์ *fp*= 3.9 มิลลิเมตร	60
4.16	ค่าอิมพีแดนซ์จากการปรับค่า *d2*= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร	61
4.17	สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *d2*= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร	63
4.18	คุณสมบัติแยกโดดเดี่ยว เมื่อ *d2*= 3.0 มิลลิเมตร	63
4.19	แบบรูปแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy* จากการปรับค่า *d2*= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร	63
4.20	แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ *xy* ที่สามารถชี้ทิศทางต่างๆ โดยปรับทิศทางและเฟสของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแถวลำดับที่ได้สร้างเพื่อทดสอบ	66
4.22	ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ	67
4.23	การจัดสายอากาศในการทดสอบ	68
5.1	ห้องที่ใช้ในการทดสอบค่าทรูพุต	71
5.2	ค่าทรูพุตที่วัดได้โดยใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่	72
5.3	ลำคลื่นที่เลือกใช้สำหรับหาทิศทางของคลื่นรับเข้ามา	77
5.4	การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 8B :A-H	80
5.5	การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 4B1 :ACEG	81
5.6	การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 4B2 :BDFH	82
5.7	การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรง	84
5.8	การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรง	85
5.9	การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีตัวสะท้อนคลื่นที่ 45 องศา	87
5.10	การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 45 องศา	88
5.11	การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีตัวสะท้อนคลื่นที่ 135 องศา	89
5.12	การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 135 องศา	91
5.13	การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีตัวสะท้อนคลื่นที่ 180 องศา	91
5.14	การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 180 องศา	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายปัญหาและที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ โดยปัญหานั้นจะเกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ซึ่งจำเป็นต้องแก้ไขเพื่อรองรับการใช้งานในอนาคต สำหรับการแก้ปัญหานั้นได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่ได้วางแนวทางไว้แล้วโดยการเพิ่มความสามารถของสายอากาศที่จะใช้ในอนาคต ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง ซึ่งอาจเป็นตัวเลือกเพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตามแนวทางเหล่านั้น ดังที่จะอธิบายรายละเอียดต่อไปนี้

1.1 ปัญหาในระบบสื่อสารเคลื่อนที่และแนวทางแก้ปัญหา

การสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communications) มีความคล่องตัวในการใช้งานเป็นอย่างมาก จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาจนเป็นระบบหลักอย่างหนึ่งในการสื่อสารและเป็นระบบที่ใช้สำหรับบุคคลทั่วไป ทำให้มีผู้ใช้งานเป็นจำนวนมากและจะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] ซึ่งเห็นได้ชัดในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile phone) โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (wireless land) วายแม็กซ์ (WiMAX) เป็นต้น โดยทั่วไปการสื่อสารเคลื่อนที่ระบบต่างๆ จะออกแบบให้ใช้งานในย่านความถี่ที่ได้รับจัดสรรโดยวิธีใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) กล่าวคือใช้ความถี่เดียวกันได้ในพื้นที่ให้บริการที่ห่างกันซึ่งสัญญาณความถี่เดียวกันจะไม่รบกวนกัน หากว่ามีสัญญาณความถี่เดียวกันจากพื้นที่อื่นเข้ามารบกวนจะเรียกสัญญาณนั้นว่าสัญญาณแทรกสอด (co-channel interference) ในระยะแรกที่จำนวนผู้ใช้ไม่มากนักบริเวณให้บริการจะครอบคลุมมีพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง การใช้ความถี่ซ้ำจะมีระยะห่างกันมาก แต่เมื่อมีผู้ใช้เพิ่มมากขึ้นความต้องการช่องสัญญาณสื่อสารจึงเพิ่มขึ้นตาม เพื่อตอบสนองให้มีช่องสัญญาณเพียงพอจึงต้องลดขนาดพื้นที่ให้บริการลงพร้อมกับลดระดับกำลังส่งสัญญาณเพื่อให้สามารถเพิ่มการใช้ความถี่ซ้ำได้มากขึ้นและวิธีใช้ความถี่ซ้ำโดยลดพื้นที่บริการนั้นมีแนวโน้มต้องกระทำมากขึ้น [2] แต่ในที่สุดเมื่อพื้นที่ให้บริการลดลงมากจนสัญญาณความถี่เดียวกันจากพื้นอื่นอาจเข้ามาเป็นสัญญาณแทรกสอดยังภาครับสัญญาณของอุปกรณ์สื่อสารได้ซึ่งจะเป็นปัญหาของระบบทำให้ได้รับสัญญาณที่มีค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมสัญญาณรบกวน (signal-to-interference plus noise ratio : SINR) ต่ำลงและลดค่าความจุช่องสัญญาณ (channel capacity) ในระบบได้ [3]-[4] นอกจากนี้แล้วยังมีอีกปัญหาหนึ่ง กล่าวคือการสื่อสารเคลื่อนที่นั้นจะใช้กันมากในชุมชนเมือง โดยปกติแล้วภาครับของอุปกรณ์สื่อสารจะต้องการรับสัญญาณทิศทางตรง (direct path signal) จากแหล่งส่งสัญญาณเท่านั้น แต่สัญญาณที่แผ่พลังงานออกมานั้นอาจสะท้อนวัตถุสะท้อนต่างๆ ทำให้เกิดมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณความถี่เดียวกันเพิ่มขึ้นมาอีกในระบบและกระจายไปหลายทิศทาง และสัญญาณสะท้อนนี้อาจมีทิศทางเข้ามายังภาครับของอุปกรณ์สื่อสาร โดยสัญญาณสะท้อนที่เข้ามาจากทิศทางอื่นนี้เรียกว่าสัญญาณหลายทิศทาง (multipath signal) ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะมีระยะทางที่มากกว่าสัญญาณทิศทางตรงจึงเป็นสัญญาณที่ถูกหน่วงเวลา (delay) ซึ่ให้เป็นสัญญาณที่จะลดทอนความเข้มของกำลังงานของสัญญาณจากทิศทางตรง เรียกเหตุการณ์นี้ว่าการจางหายจากสัญญาณหลายทิศทาง (multipath fading) จะทำให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) ลดลงและทำให้ความจุช่องสัญญาณในระบบลดต่ำลงได้อีกด้วย

จะเห็นว่าปัญหาเหล่านี้จะเกิดและเพิ่มมากขึ้นในการสื่อสารเคลื่อนที่ ถ้ามีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการกำหนดความสามารถของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่ 4 (4G : fourth generation) ซึ่งเป็นการรวมทุกระบบและทุกเครือข่ายของการสื่อสารเคลื่อนที่เข้าไว้ด้วยกัน หมายความว่าอุปกรณ์สื่อสารในยุคที่ 4 นี้จะต้องสามารถรองรับการทำงานของทุกระบบและเครือข่ายที่มีในปัจจุบันเข้าไว้ด้วยกัน เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบวายแม็กซ์ เป็นต้น ดังที่อธิบายใน [5] ทำให้ผู้ใช้สามารถติดต่อกับทุกระบบโดยใช้อุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่เพียงเครื่องเดียวเท่านั้นซึ่งมีความสะดวกมาก และจะมีจำนวนผู้ใช้อุปกรณ์สื่อสารนี้เพิ่มขึ้นจำนวนมาก ส่งผลให้ในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่มีการใช้งานที่หนาแน่นขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้แต่ละระบบยังต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลในการสื่อสารเคลื่อนที่ในอนาคตนั้นต้องมีค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงเพื่อให้ระบบมีความจุช่องสัญญาณที่มากพอที่จะรองรับการให้บริการต่างๆ ได้ จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าปัญหาเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) ของระบบโดยตรง กล่าวคือสัญญาณที่เข้ามาจากทิศทางต่างๆนั้น จะรับกำลังงานได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณ สายอากาศที่ใช้ในการสื่อสารเคลื่อนที่ตั้งแต่เริ่มแรกจนปัจจุบันนั้นจะรับส่งสัญญาณด้วยสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานคงที่ แต่ถ้าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้แล้ว จะสามารถคัดกรองรับแต่สัญญาณที่ต้องการและไม่รับสัญญาณแทรกสอดหรือสัญญาณจากหลายทิศทางได้ ทำให้ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่นั้นมีความจุช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นได้

เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาโดยการปรับแบบรูปการแผ่พลังงานให้เหมาะกับสัญญาณที่ต้องการรับนั้นทำได้โดยใช้สายอากาศฉลาด (smart antenna) [1]-[6] ซึ่งเป็นระบบสายอากาศที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับและส่วนประมวลผล [1], [7] สายอากาศฉลาดนั้นได้แบ่งออกเป็นสองชนิด [5]-[6] หลักด้วยกัน ชนิดที่หนึ่งคือ สายอากาศสวิทช์ลำคลื่น (switched-beam antenna) จะเป็นสายอากาศที่สามารถชี้ลำคลื่นได้หลายทิศทาง ในการรับสัญญาณนั้นจะใช้แบบรูปที่เหมาะสมที่สุดเพื่อรับสัญญาณที่ต้องการ โดยการสวิทช์ลำคลื่นหลักให้รับกำลังงานของสัญญาณที่ต้องการโดยที่ลำคลื่นนี้จะต้องรับสัญญาณแทรกสอดหรือจากสัญญาณหลายทิศทางน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดเพื่อให้ได้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดมากที่สุด ชนิดที่สองคือ สายอากาศปรับตัว (adaptive antenna) เป็นระบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับเช่นเดียวกับชนิดแรกแต่มีความสามารถมากกว่าคือแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นต้องให้ตำแหน่งสูงสุด (peak) ของลำคลื่นหลักชี้ไปยังทิศทางสัญญาณที่ต้องการขณะเดียวกันต้องให้ศูนย์ (null) เกิดขึ้นในทิศทางที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามา [8]-[9] จะเห็นว่าสายอากาศปรับตัวนั้นจะมีความสามารถมากกว่าสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่จะต้องมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นตามด้วย ซึ่งแนวคิดเกี่ยวกับสายอากาศฉลาดนั้นได้มีมานานแล้วดังที่แสดงใน [10]-[12]

สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งเพื่อให้สายอากาศฉลาดทำงานได้คือจะต้องรู้ถึงทิศทางหรือมุมของสัญญาณต่างๆ ที่รับเข้ามา (angle of arrival :AOA) หรือทิศที่สัญญาณเข้ามา (direction of arrival : DOA) [13] เพื่อที่จะใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการสวิทช์ลำคลื่นหรือปรับแบบรูปการแผ่พลังงาน การหาทิศทางของสัญญาณที่ต้องการนั้นได้มีใช้กันอยู่ก่อนแล้วในระบบการสื่อสารที่ต้องการความละเอียดสูง [14]-[15] เช่น ระบบดาวเทียม ระบบเรดาร์ ระบบวิทยุดาราศาสตร์ เป็นต้น โดยมีงานวิจัยเริ่มต้นเกี่ยวกับการหาทิศทางของสัญญาณที่ใช้การคำนวณเป็นหลัก ได้แก่ วิธี ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) [15] และวิธี MUSIC (multiple signal classification) [16] และต่อมาได้มีวิธีอื่นๆอีกมาก [17] ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการคำนวณที่ซับซ้อนทั้งสิ้น แต่เมื่อไม่นานนี้ได้มีผู้เสนอวิธีการใหม่ที่สามารถลดการคำนวณที่ซับซ้อนโดยจะเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลแทน [13]-[14], [18] เมื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณลงได้จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประมวลที่มีความสามารถสูง ทำให้ลดต้นทุนของระบบลงได้อีกด้วย

ในยุคเริ่มต้นของงานวิจัยสายอากาศฉลาดนั้นเป็นการเสนอแนวคิดและการคำนวณเป็นส่วนใหญ่ โดยในการคำนวณจะอ้างอิงให้องค์ประกอบในแถวลำดับเป็นสายอากาศไม่มีทิศทางการรับพลังงาน ดังนั้นจึงเป็นการคำนวณเฉพาะตัวประกอบแถวลำดับเพียงอย่างเดียว [8] [15]-[16] และแนวคิดเริ่มต้นได้จำกัดไว้ให้สายอากาศฉลาดนั้นเป็นสายอากาศสำหรับใช้กับสถานีฐานของระบบสื่อสารเคลื่อนที่เท่านั้น [19]-[20] เนื่องจากข้อจำกัดของระบบที่ต้องมีอุปกรณ์มากและสายอากาศต้องเป็นแถวลำดับที่มีขนาดใหญ่ แต่เพื่อให้ระบบสายอากาศเหล่านี้สามารถใช้ได้จริงจึงได้วิจัยให้มีสายอากาศจริง โดยเริ่มจากใช้สายอากาศโมโนโพลเป็นองค์ประกอบในแถวลำดับ [20]-[21] และในปัจจุบันเมื่อเทคโนโลยีการออกแบบและสร้างสายอากาศได้หลากหลายลักษณะรวมทั้งมีอุปกรณ์ซึ่งสามารถทำงานที่ความถี่สูงเป็นส่วนสนับสนุนให้สร้างสายอากาศได้ทำให้สามารถเพิ่มความสามารถของการหาทิศทางของสัญญาณได้ด้วย เช่น ใน [25] ได้ใช้สายอากาศไมโครสตริปหกตัวประกอบกันเป็นทรงกลมเพื่อรับสัญญาณจากรอบด้านสามมิติโดยสายอากาศแต่ละตัวต่อผ่านสวิทช์ความถี่วิทยุ (เข้าหนึ่งเลือกออกได้หกทาง) ซึ่งสายอากาศนี้ใช้เป็นสายอากาศหาสัญญาณที่เข้ามาใช้เป็นสายอากาศสำหรับสถานีฐานในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับ [26] ได้เสนอสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่เป็นสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อาจใช้ในวัตถุประสงค์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นตรงสี่องค์ประกอบป้อนสัญญาณด้วยโครงข่ายแมทตริกซ์บัทเลอร์ (Butler matrix network) ร่วมกับตัวเลื่อนเฟส ทำให้สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สี่ทิศทางใช้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นได้ แต่ในงาน [27] ได้เสนอสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นได้จำนวนสี่องค์ประกอบ แต่สามารถผลิตแบบรูปการแผ่พลังงานได้ 12 ลำคลื่นใช้เป็นสายอากาศปรับตัวและสามารถเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดได้ โดยแต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์ [28] ที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สองทิศทางโดยใช้ไดโอดพิน(PIN-diode)ในการสวิทช์ทิศทาง จากที่กล่าวมานี้เป็นการออกแบบสายอากาศเพื่อใช้สำหรับสถานีฐานของการสื่อสารเคลื่อนที่ ตามแนวทางการใช้งานของสายอากาศฉลาด แต่ในงานที่ [17] และ [29] ได้อธิบายถึงการสื่อสารเคลื่อนที่ใช้ระบบ MIMO (multi-input multi-output) แล้วจะสามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณได้อีก ซึ่งระบบนี้ที่ตัวลูกข่ายจะต้องมีสายอากาศมากกว่าหนึ่งตัว และระบบนี้จะเป็นระบบที่ใช้ในการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่ 4 ด้วย [30]-[31] ดังนั้นจึงเริ่มมีการวิจัยสายอากาศหลายตัวเพื่อติดตั้งบนอุปกรณ์ลูกข่าย [29]-[33] และออกแบบให้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นได้โดยใช้สายอากาศโมโนโพลเป็นองค์ประกอบในแถวลำดับ แต่ก็มีการสร้างสายอากาศที่เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์เป็นองค์ประกอบในการสวิทช์ลำคลื่นดังแสดงในงาน [34] ที่ได้ใช้โครงสร้างสายอากาศจาก [35]-[36] และสำหรับใน [37]ได้แสดงสายอากาศแถวลำดับของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่ปรับปรุงสายอากาศใน [27] ให้ซับซ้อนน้อยลงและมีขนาดเล็กพอที่จะติดตั้งบนอุปกรณ์ลูกข่ายเคลื่อนที่ได้ โดยที่ใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นสองทิศทางเป็นองค์ประกอบ จะเห็นว่าปัจจุบันนี้มีงานวิจัยพัฒนาสายอากาศสำหรับเป็นสายอากาศแถวลำดับสำหรับเป็นสายอากาศฉลาดบนอุปกรณ์เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะรองรับการสื่อสารในอนาคต

นอกจากความต้องการให้สายอากาศมีคุณสมบัติของแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมกับการใช้งานเพื่อเพิ่มค่าความจุช่องสัญญาณแล้วนั้น ในอนาคตระบบต่างๆ จะต้องใช้งานได้หลายย่านความถี่ด้วย ดังนั้นสายอากาศที่ใช้ควรสามารถใช้งานได้ครอบคลุมในย่านความถี่นั้นด้วย จึงมีการสร้างสายอากาศที่ใช้งานได้มากกว่าหนึ่งย่านความถี่เช่น [38] เป็นสายอากาศสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และ [39]-[40] เป็นสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการใช้งานอยู่สองย่านความถี่ได้แก่ ระบบ 802.11a และ 802.11b/g จะใช้งานในย่านความถี่ 5.2 และ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ จากงานวิจัยที่มีนั้นเป็นสายอากาศสองย่านความถี่สำหรับแอกเซสพอยท์ (access point) ที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานคงที่ แต่ใน [41]-[42] ได้แสดงว่าถ้าใช้สายอากาศที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแล้วจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลได้ ดังนั้นใน [43]-[44] จึงได้เสนอสายอากาศสำหรับแอกเซสพอยท์ที่สามารถทำงานได้สองความถี่และสามารถสวิทช์ลำคลื่นให้เหมาะกับการใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลได้ ซึ่งเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นสองทิศทางเช่นเดียวกับที่ใช้ใน [37] แต่ปรับปรุงให้ใช้งานได้สองย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมานั้นสายอากาศที่สามารถปรับแบบรูปการแผ่พลังงานหรือสวิทช์ลำคลื่นได้นั้นมีความสำคัญในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ จึงมีการวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น ดังเช่นใน [34] เป็นสายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นสี่ทิศทาง ปรับทิศทางโดยการเปลี่ยนพอร์ทป้อนสัญญาณของตัวเชื่อมต่อ 90 องศา [45] ได้นำเสนอสายอากาศปรับลำคลื่นที่เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์มีลักษณะไม่ซับซ้อนที่ได้อัตราขยายสูงและมีความถว้างแถบที่กว้าง ในงานที่ [46] ได้ใช้สวิทช์ MEMS (micro-electro-mechanical systems) เพื่อปรับลำคลื่นของสายอากาศแผ่นพิมพ์ทำให้ได้ลำคลื่นแบบกึ่งรูปกรวย สำหรับติดตั้งบนลูกข่ายเคลื่อนที่ งานใน [47] เสนอสายอากาศแบบขดสี่เหลี่ยมรวมกับระบบสวิทช์สามารถสวิทช์ลำคลื่นที่มีอัตราขยายเท่ากันได้สิบหกลักษณะ ซึ่งความสามารถในการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศเหล่านี้ได้ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทำงานความถี่สูงเข้ามาใช้ ซึ่งในงานที่ [28] ได้สร้างสายอากาศที่ไม่ซับซ้อนเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัสทำงานที่โหมดสอง สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สองแกน โดยการบังคับไดโอดพินจำนวนแปดตัวที่ติดตั้งที่ขอบทั้งสี่ด้านของสายอากาศ และได้ใช้สายอากาศนี้สร้างเป็นแถวลำดับวงกลมสี่องค์ประกอบเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานหลายลักษณะและใช้เป็นสายอากาศในระบบสายอากาศปรับตัวดังใน [27] จะเห็นว่าสายอากาศนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนเพื่อสวิทช์ลำคลื่น แต่ยังต้องใช้จำนวนอุปกรณ์สำหรับสวิทช์ลำคลื่นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงการป้อนสัญญาณของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่กล่าวมานี้ให้ใช้อุปกรณ์น้อยลงและลดความซับซ้อน เพื่อที่จะใช้เป็นองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสำหรับเป็นส่วนประกอบในระบบสายอากาศฉลาดและสามารถติดตั้งบนอุปกรณ์ลูกข่ายเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการสื่อสารเคลื่อนที่ในอนาคต และจากโครงสร้างที่ปรับปรุงใหม่นี้ยังสามารถต่อเติมสร้างให้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของของวิทยานิพนธ์

จากที่กล่าวมานั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะปรับปรุงสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นใน [28] ให้มีอุปกรณ์น้อยลงเพื่อสะดวกในการสร้างและการนำไปใช้งานต่อไปในการสื่อสารไร้สายที่ตัวสถานีฐานและที่อุปกรณ์ลูกข่าย โดยการป้อนสัญญาณด้วยโพรบสองตำแหน่งแต่ขณะใช้งานจะเลือกป้อนเพียงหนึ่งโพรบโดยใช้สวิทช์ความถี่วิทยุ (RF switch) เพียงหนึ่งตัว สำหรับสายอากาศหนึ่งตัว [48] และด้วยโครงสร้างที่ง่ายขึ้นนี้จึงสามารถออกแบบเป็นสายอากาศสำหรับหาทิศทางสัญญาณที่เข้ามาซึ่งจะมีขนาดเหมาะสมที่จะติดตั้งบนอุปกรณ์ลูกข่ายเคลื่อนที่ได้ และจะต่อเติมสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นนี้ให้เป็นสายอากาศทำงานสองย่านความถี่และสามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สำหรับใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้จะปรับปรุงสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นให้ใช้อุปกรณ์น้อยลงแต่มีความสามารถสวิทช์ลำคลื่นได้เช่นเดียวกับสายอากาศเดิม และได้ออกแบบปรับปรุงให้เป็นสายอากาศที่สามารถทำงานได้สองย่านความถี่เพื่อใช้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณได้ [43]-[44] และจะนำโครงสร้างใหม่นี้ออกแบบเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสใช้ในย่านความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะต้องมีขนาดที่เหมาะกับการติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ [49] โดยสายอากาศแถวลำดับนี้จะสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานที่ชี้ทิศทางได้หลายมุม เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบของสายอากาศระบุทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา โดยใช้แบบรูปการแผ่พลังงานร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดังใน [50]-[58] ซึ่งจะมีประโยชน์ในระบบสายอากาศปรับตัวเช่นใน [59]

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ โดยจะอธิบายถึงปัญหาในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในอนาคตและแนวทางสำหรับแก้ปัญหาที่ได้วางไว้ รวมทั้งกล่าวถึงงานที่นำเสนอเพื่อใช้แก้ปัญหาตามแนวทางนั้น

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เป็นหลักในการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งและแสดงตัวแปรที่มีความสำคัญของสายอากาศที่นำเสนอ

บทที่ 3 แสดงการนำสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งพัฒนาเป็นสายอากาศสองย่านความถี่ที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

บทที่ 4 แสดงการใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งเป็นส่วนประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสเพื่อเป็นสายอากาศใช้ในการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา

บทที่ 5 แสดงการประยุกต์ใช้งานสายอากาศที่พัฒนาและออกแบบจากบทที่ 3 เป็นสายอากาศแอกเซสพอยท์สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ และจากสายอากาศบทที่ 4 ใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา

บทที่ 6 สรุปวิจารณ์และเสนอข้อแนะนำสำหรับงานวิจัยนี้

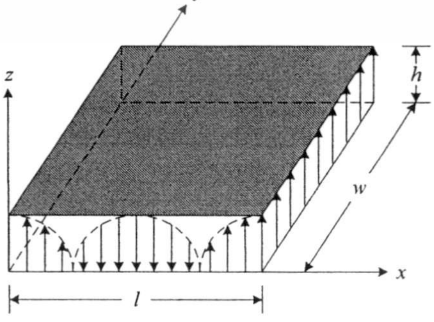
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
หลักการของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง

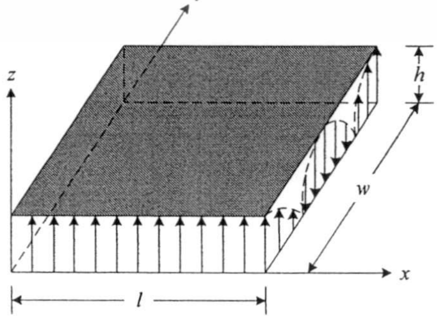
ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งซึ่งเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์หรือสายอากาศไมโครสตริป ดังนั้นจึงจะอธิบายเกี่ยวกับโหมดที่ทำงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์เพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบให้ได้สายอากาศแผ่นพิมพ์ที่มีคุณสมบัติการแผ่พลังงานแบบสองทิศทางและสามารถสวิทช์ลำคลื่นได้ จากนั้นจะออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น โดยการเลือกใช้แผ่นพิมพ์ที่วัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ ในการออกแบบสายอากาศนี้ได้ใช้โปรแกรมจำลองสายอากาศ ซึ่งจะรวมกลไกการป้อนสัญญาณของสายอากาศ เพื่อให้ได้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้งาน จากนั้นแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นที่ได้สร้างขึ้นซึ่งได้ผลสอดคล้องกับที่ออกแบบ

2.1 โหมดการทำงานและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์เพื่อนำไปใช้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น โดยมีการแผ่พลังงานเป็นสองทิศทางหรือเป็นแบบแถวลำดับเอนด์ไฟร์ (end-fire array) ซึ่งจะต้องให้สายอากาศทำงาน โหมดที่สอง [27], [61] ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนี้จะใช้แบบจำลองโพรงสี่เหลี่ยม (cavity model) อธิบายหลักการทำงานและออกแบบสายอากาศ โดยกำหนดให้สายอากาศแผ่นพิมพ์หรือไมโครสตริปวางบนระนาบ *xy* เพื่อให้เกิดแบบรูปการแผ่พลังงานสองทิศทาง การกระจายของสนามที่อยู่ภายในโพรงสี่เหลี่ยมต้องมีลักษณะดังรูปที่ 2.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 รูปแบบสนามที่กระจายในสายอากาศแผ่นพิมพ์ (ก) TM_{200} และ (ข)TM_{020}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์สามารถพิจารณาด้วยโครงสร้างโพรงสี่เหลี่ยมที่มีไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ ซึ่งมีแผ่นตัวนำเป็นผนังปิดที่ด้านบนและด้านล่าง ส่วนผนังด้านข้างทั้งสี่จะปิดกันด้วยผนังแม่เหล็ก ซึ่งจะเป็นตัวแผ่พลังงานของสายอากาศนี้ โดยที่ตัวแผ่พลังงานนี้จะอยู่ระหว่างขอบของแผ่นแผ่พลังงานและระนาบกราวด์ของโพรงสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถแสดงเป็นค่าศักย์เวคเตอร์ (vector potential) ได้ [62] เมื่อพิจารณาในโหมด TM^z ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะมีสมการคลื่นที่เขียนด้วยศักย์เวคเตอร์ A_z ดังสมการ

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \tag{2.1}$$

โดยที่ A_z อยู่ในรูปของสมการ

$$\begin{aligned} A_z &= [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] \cdot [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] \\ &\cdot [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \end{aligned} \tag{2.2}$$

เมื่อ k_x, k และ k_z เป็นค่าคงที่ของคลื่น (wave numbers) ไปตามทิศทาง x, y และ z, ตามลำดับ ค่าคงที่ของคลื่นนี้จะใช้ในการคำนวณเพื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่อยู่ในโพรงสี่เหลี่ยมที่สัมพันธ์กับศักย์เวคเตอร์ A_z จะมีสมการดังนี้

$$E_x = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial z}\right) \tag{2.3 ก}$$

$$E_y = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial y \partial z}\right) \tag{2.3 ข}$$

$$E_z = -j\frac{1}{\omega\mu\varepsilon}\left(\omega^2\mu\varepsilon + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)A_z \tag{2.3 ค}$$

$$H_x = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) \tag{2.3 ง}$$

$$H_y = -\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) \tag{2.3 จ}$$

$$H_z = 0 \tag{2.3 ฉ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตที่สนามไฟฟ้าสัมผัสผิวตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จะได้

$$E_x(0 \le x' \le l, 0 \le y' \le w, z' = 0) = E_x(0 \le x' \le l, 0 \le y' \le w, z' = h) = 0 \qquad (2.4\ ก)$$

และเงื่อนไขขอบเขตที่สนามแม่เหล็กที่ขอบของโพรงเป็นศูนย์จะได้

$$H_x(0 \le x' \le l, y' = 0, 0 \le z' \le h) = H_x(0 \le x' \le l, y' = w, 0 \le z' \le h) = 0 \qquad (2.4\ ข)$$

$$H_y(x' = 0, 0 \le y' \le w, 0 \le z' \le h) = H_y(x' = l, 0 \le y' \le w, 0 \le z' \le h) = 0 \qquad (2.4\ ค)$$

เมื่อพิกัดที่ใช้อ้างอิงสนามภายในโพรงสี่เหลี่ยมจะแทนด้วย (x', y', z')

เมื่อพิจารณาใช้เงื่อนไขขอบเขต $E_x(0 \le x' \le l, 0 \le y' \le w, z' = 0) = 0$ และ $E_x(0 \le x' \le l, 0 \le y' \le w, z' = h) = 0$ จะได้ $B_3 = 0$ และ

$$k_z = \left(\frac{p\pi}{h}\right), \quad p = 0, 1, 2, \ldots \qquad (2.5)$$

จากนั้นใช้เงื่อนไขขอบเขต $H_x(0 \le x' \le l, y' = 0, 0 \le z' \le h) = 0$ และ $H_x(0 \le x' \le l, y' = w, 0 \le z' \le h) = 0$ จะได้ $B_2 = 0$ และ

$$k_y = \left(\frac{n\pi}{w}\right), \quad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (2.6)$$

สุดท้ายใช้เงื่อนไขขอบเขต $H_y(x' = 0, 0 \le y' \le w, 0 \le z' \le h) = 0$ และ $H_y(x' = l, 0 \le y' \le w, 0 \le z' \le h) = 0$ จะได้ $B_1 = 0$ และ

$$k_x = \left(\frac{m\pi}{l}\right), \quad m = 0, 1, 2, \ldots \qquad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นศักย์เวคเตอร์ที่อยู่ภายในโพรงสี่เหลี่ยมจึงลดรูปลงเขียนได้เป็นสมการ

$$\begin{aligned} A_z &= A_1 \cos(k_x x') A_2 \cos(k_y y') A_3 \cos(k_z z') \\ &= A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \end{aligned} \tag{2.8}$$

เมื่อ A_{mnp} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละโหมดของ mnp เมื่อค่าคงที่ของคลื่น k_x, k_y และ k_z มีค่าเป็น

$$\left. \begin{aligned} k_x &= \left(\frac{m\pi}{l}\right), \quad m = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots \\ k_y &= \left(\frac{n\pi}{w}\right), \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots \\ k_x &= \left(\frac{p\pi}{h}\right), \quad p = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots \end{aligned} \right\} \; m = n = p \neq 0 \tag{2.9}$$

เมื่อ m, n และ p คือจำนวนเต็มครึ่งคาบของสนามที่เปลี่ยนแปลงในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ ดังนั้นสมการบังคับ (constraint equation) ที่ได้แทนค่าคงที่ตัวเลขคลื่น k_x, k_y และ k_z จะมีลักษณะดังสมการ

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu\varepsilon \tag{2.10}$$

จะได้ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโพรงสี่เหลี่ยมดังนี้

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \tag{2.11}$$

แทน (2.8) ลงใน (2.3 ก) – (2.3 ฉ) สามารถเขียนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโพรงสี่เหลี่ยมได้เป็น

$$E_x = -j \frac{k_x k_z}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp} \sin(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \tag{2.12 ก}$$

$$E_y = -j \frac{k_y k_z}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp} \cos(k_x x') \sin(k_y y') \cos(k_z z') \tag{2.12 ข}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z = -j\frac{(k^2 - k_z^2)}{\omega\mu\varepsilon} A_{mnp}\cos(k_x x')\cos(k_y y')\cos(k_z z') \tag{2.12 ค}$$

$$H_x = -\frac{k_y}{\mu} A_{mnp}\cos(k_x x')\sin(k_y y')\cos(k_z z') \tag{2.12 ง}$$

$$H_y = \frac{k_x}{\mu} A_{mnp}\sin(k_x x')\cos(k_y y')\cos(k_z z') \tag{2.12 จ}$$

$$H_z = 0 \tag{2.12 ฉ}$$

หลังจากได้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในโพรงสี่เหลี่ยมแล้ว ต่อไปจะพิจารณาหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูล (equivalent electric current density : $\mathbf{J_S}$) และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูล (equivalent magnetic current density : $\mathbf{M_S}$) เพื่อเป็นตัวกำเนิดการแผ่พลังงาน การแผ่สนามไฟฟ้า **E** และสนามแม่เหล็ก **H**

จากโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่พิจารณาด้วยเงื่อนไขขอบเขตมาแล้วนั้นจะมีความหนาแน่นกระแสสมมูลอยู่บนส่วนต่างๆ ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) ซึ่งสามารถหาความหนาแน่นกระแสสมมูลได้โดยใช้หลักการสนามสมมูลของ Huygen โดยเมื่อแผ่นแผ่พลังงานได้มีแบบจำลองเป็นโพรงสี่เหลี่ยมที่มีสารไดอิเล็กตริกบรรจุอยู่ ซึ่งมีผนังไฟฟ้าตัวนำสมบูรณ์ (perfect conducting electric wall) ปิดกั้นด้านบนและด้านล่าง และมีผนังสนามแม่เหล็กสมบูรณ์ (perfect conducting magnetic wall) เป็นผนังปิดกันด้านข้างทั้งสี่ด้าน สำหรับผนังด้านข้างทั้งสี่นี้จะเป็นช่องเปิดที่แผ่สนามออกไป ส่วนแผ่นแผ่พลังงานด้านบนและด้านล่างจะมีความหนาแน่นกระแสด้านบน $\mathbf{J}_t$ และด้านล่าง $\mathbf{J}_b$ ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสที่ไม่จำเป็นต้องใช้ในการพิจารณา แต่จะใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $\mathbf{J}_S$ และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก $\mathbf{M}_S$ ที่อยู่บนช่องเปิดด้านข้างทั้งสี่นั้นเป็นแหล่งแผ่สนามออกไป โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{J}_s = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_a \tag{2.13}$$

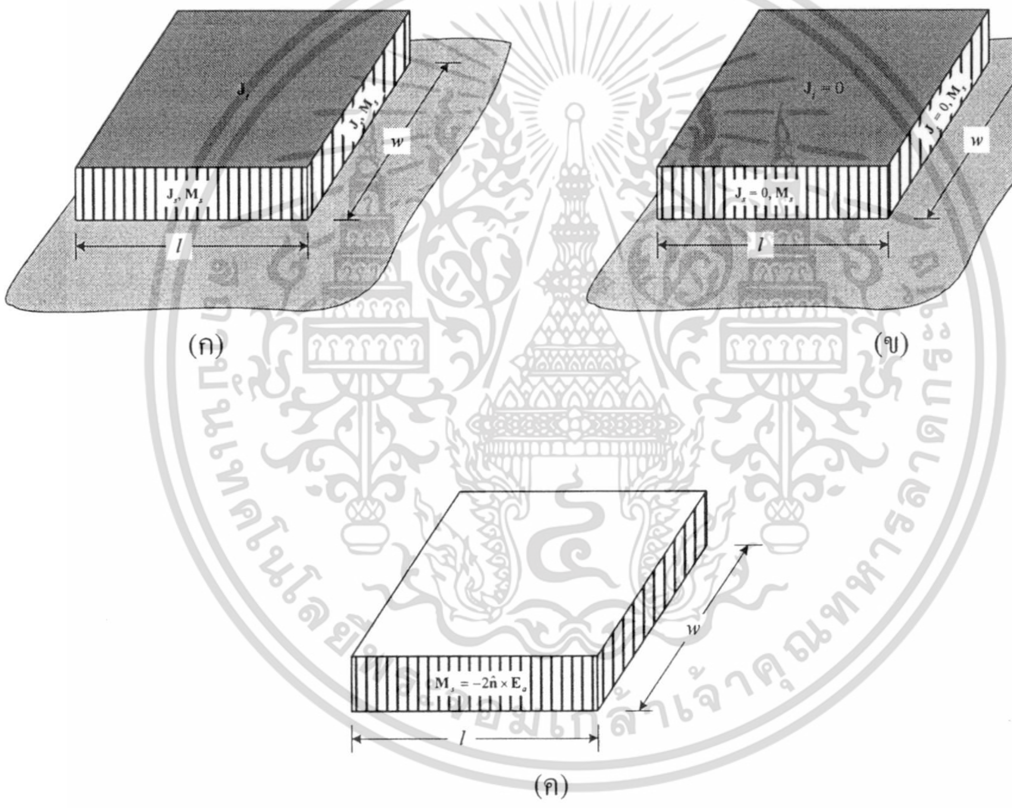
$$\mathbf{M}_s = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_a \tag{2.14}$$

เมื่อ $\mathbf{E}_a$ และ $\mathbf{H}_a$ เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ที่อยู่บนช่องเปิด โดยที่ $\hat{\mathbf{n}}$ เป็นเวคเตอร์ชี้ทิศทางของช่องเปิดแต่ละด้าน จากโครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์หรือสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งมีช่องเปิดที่แคบเมื่อพิจารณาด้วยอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของแต่ละช่อง ดังนั้นความหนาแน่นกระแสที่อยู่บนแผ่นแผ่พลังงานด้านบน $\mathbf{J}_t$ จะมีค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นกระแสบนแผ่นตัวนำด้านล่างทำให้สมมติได้ว่ามีกระแสน้อยมากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และ เช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ที่ขอบของแผ่นแผ่พลังงานจะมีค่าน้อยมากและมีค่าเป็นศูนย์ จากความสัมพันธ์ของกระแสและสนามทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูล $\mathbf{J}_S$ ที่ช่องเปิดจะมีค่าน้อยมากและมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงเหลือเฉพาะความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูล $\mathbf{M}_S$ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่รอบด้านทั้งสี่ของโพรงสี่เหลี่ยมนี้และเป็นช่องที่แผ่พลังงานซึ่งมีระนาบกราวด์อยู่ด้านล่าง ในการพิจารณากระแสต่างๆ นี้สามารถแสดงในรูปที่ 2.2(ข) ส่วนระนาบกราวด์ที่มีอยู่นั้นสามารถพิจารณาด้วยทฤษฎีภาพสะท้อน (image theory) จะทำให้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลเพิ่มเป็นสองเท่าดังแสดงที่ได้ในสมการที่ (2.15) โดยที่ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กนี้จะอยู่บนช่องเปิดทั้งสี่ด้านของโพรงสี่เหลี่ยมและอยู่ในสูญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ค)

$$\mathbf{M}_s = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_a \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.2 กระแสสมมูลที่อยู่บนด้านทั้งสี่ของสายอากาศแผ่นพิมพ์
(ก) $\mathbf{J}_S$ และ $\mathbf{M}_S$ ที่มีระนาบกราวด์ (ข) $\mathbf{J}_S = 0$ และ $\mathbf{M}_S$ ที่มีระนาบกราวด์
(ค) $\mathbf{M}_S$ ที่พิจารณาด้วยทฤษฎีภาพสะท้อน

เพื่อที่จะหาสนามที่แผ่พลังงานออกมาจากช่องเปิดแต่ละด้าน จะคำนวณสนามที่แผ่พลังงานโดยการพิจารณาจากรูปที่ 2.3 ส่วนสมการการแผ่พลังงานสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = 0 \tag{2.16 ก}$$

$$E_\theta = -j\frac{ke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\phi + \eta N_\theta) \tag{2.16 ข}$$

$$E_\phi = j\frac{ke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\theta - \eta N_\phi) \tag{2.16 ค}$$

$$H_r = 0 \tag{2.16 ง}$$

$$H_\theta = j\frac{ke^{-jkr}}{4\pi r}(N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta}) \tag{2.16 จ}$$

$$H_\phi = -j\frac{ke^{-jkr}}{4\pi r}(N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta}) \tag{2.16 ฉ}$$

เมื่อ N_θ, N_ϕ, L_θ และ L_ϕ จะหาได้จาก

$$N_\theta = \iint_S [J_x \cos\theta\cos\phi + J_y \cos\theta\sin\phi - J_z \sin\theta] e^{jkr'\cos\psi} ds' \tag{2.17 ก}$$

$$N_\phi = \iint_S [-J_x \sin\phi + J_y \cos\phi] e^{jkr'\cos\psi} ds' \tag{2.17 ข}$$

$$L_\theta = \iint_S [M_x \cos\theta\cos\phi + M_y \cos\theta\sin\phi - M_z \sin\theta] e^{jkr'\cos\psi} ds' \tag{2.17 ค}$$

$$L_\phi = \iint_S [-M_x \sin\phi + M_y \cos\phi] e^{jkr'\cos\psi} ds' \tag{2.17 ง}$$

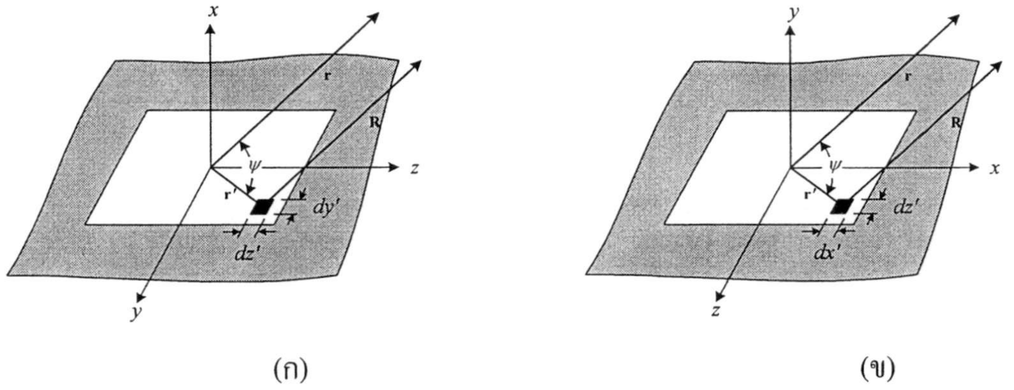
ช่องเปิดจะวางอยู่บนระนาบ yz และ xz ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) และ 2.3(ข) ตามลำดับ

สำหรับโหมด TM_{200} ที่มีการกระจายสนามดังรูปที่ 2.1(ก) จะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังสมการ

$$E_z = -j\frac{\left(\frac{2\pi}{l}\right)^2}{\omega\mu\varepsilon} A_{200} \cos\left(\frac{2\pi}{l}x'\right) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{l}x'\right) \tag{2.18}$$

$$H_y = \frac{2\pi}{\mu l} A_{200} \sin\left(\frac{2\pi}{l}x'\right) = H_0 \sin\left(\frac{2\pi}{l}x'\right) \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การกำหนดตำแหน่งพิกัดเพื่อใช้หาการแผ่พลังงานจากช่องเปิด

(ก) แผ่จากระนาบ *yz* (ข) แผ่จากระนาบ *xz*

ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดตามความเข้มสนามไฟฟ้าบนช่องเปิดที่มีความกว้าง w และมีความสูง h บนระนาบ yz ซึ่งมีเวคเตอร์ตั้งฉากหรือชี้ทิศทางของช่องเปิดเป็น $\hat{\mathbf{n}} = \hat{a}_x$ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\mathbf{M}_s = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_a = -2\hat{a}_x \times E_z\hat{a}_z = -2E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{l}x'\right)\hat{a}_y \tag{2.20}$$

เมื่อได้องค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_y จากนั้นแทนองค์ประกอบนี้ในสมการที่ (2.17ค) และ (2.17ง) จะสามารถได้องค์ประกอบ L_θ และ L_ϕ ดังนั้นจะหาองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในบริเวณสนามไกล (far-field region) ที่แผ่ออกจากช่องเปิดแต่ละช่องดังนี้

$$E_r = 0 \qquad (2.21\ ก)$$

$$E_\theta = -j\frac{2khwE_0e^{-jkr}}{4\pi r}\cos\phi\frac{\sin(Y)}{Y}\frac{\sin(Z)}{Z} \qquad (2.21\ ข)$$

$$E_\phi = j\frac{2khwE_0e^{-jkr}}{4\pi r}\cos\theta\sin\phi\frac{\sin(Y)}{Y}\frac{\sin(Z)}{Z} \qquad (2.21\ ค)$$

เมื่อ $Y = \dfrac{kw\sin\theta\sin\phi}{2}$ และ $Z = \dfrac{kh\cos\theta}{2}$

สนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปนี้จะได้จากการรวมกันของสนามจากช่องเปิดทั้งสอง ซึ่งช่องเปิดจะอยู่ห่างกันด้วยระยะ l ตามทิศทางแกน x ดังนั้นจึงพิจารณาให้เป็นสายอากาศแถวลำดับ (array) ที่มีตัวประกอบแถวลำดับ (array factor) ดังในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF_x = 2\cos\left[\frac{1}{2}(kl\cos\theta\cos\phi)\right] \tag{2.22}$$

ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแผ่นพิมพ์เขียนในรูปของสมการที่ (2.23 ก) และ (2.23 ข) ซึ่งเป็นองค์ประกอบ E_θ และ E_ϕ ตามลำดับ

$$E_\theta = -j\frac{khwE_0e^{-jkr}}{\pi r}\cos\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kw\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kw\sin\theta\sin\phi}{2}}\right]\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right] \tag{2.3 ก}$$

$$\times\cos\left[\frac{1}{2}(kl\cos\theta\cos\phi)\right]$$

$$E_\phi = j\frac{khwE_0e^{-jkr}}{\pi r}\cos\theta\sin\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kw\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kw\sin\theta\sin\phi}{2}}\right]\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right] \tag{2.23 ข}$$

$$\times\cos\left[\frac{1}{2}(kl\cos\theta\cos\phi)\right]$$

ในระนาบสนามไฟฟ้า E_ϕ =0 และองค์ประกอบ E_θ จะมีค่าเป็น

$$E_\theta = -j\frac{khwE_0e^{-jkr}}{\pi r}\cos\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right]\cos\left[\frac{1}{2}(kl\cos\theta)\right] \tag{2.24}$$

สำหรับโหมด TM_{020} ตามรูปที่ 2.1(ข) จะมีองค์ประกอบความเข้มสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กดังในสมการ

$$E_z = -j\frac{\left(\frac{2\pi}{w}\right)^2}{\omega\mu\varepsilon}A_{020}\cos\left(\frac{2\pi}{w}y'\right) = E_0\cos\left(\frac{2\pi}{w}y'\right) \tag{2.25}$$

$$H_x = -\frac{2\pi}{\mu w}A_{020}\sin\left(\frac{2\pi}{w}y'\right) = H_0\sin\left(\frac{2\pi}{w}y'\right) \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดตามความเข้มสนามไฟฟ้าบนช่องเปิดที่มีความกว้าง l และมีความสูง h บนระนาบ xz ซึ่งมีเวคเตอร์ตั้งฉากหรือชี้ทิศทางของช่องเปิดเป็น $\hat{\mathbf{n}} = \hat{a}_y$ จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\mathbf{M}_s = -2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_a = -2\hat{a}_y \times E_z \hat{a}_z = 2E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{w} y'\right)\hat{a}_x \tag{2.27}$$

และในสมการ (2.27) องค์ประกอบ L_θ และ L_ϕ สามารถหาได้จากการแทนค่าองค์ประกอบ M_x ในสมการที่ (2.17ค) และ (2.17ง) จากนั้นนำมาแทนในสมการ (2.16 ก) – (2.16 ค) และจะได้สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากช่องเปิดนี้ดังแสดงในสมการ

$$E_r = 0 \qquad \text{(2.28 ก)}$$

$$E_\theta = -j\frac{2khlE_0 e^{-jkr}}{4\pi r}\sin\phi \frac{\sin(X)}{X}\frac{\sin(Z)}{Z} \qquad \text{(2.28 ข)}$$

$$E_\phi = -j\frac{2khlE_0 e^{-jkr}}{4\pi r}\cos\theta\cos\phi \frac{\sin(X)}{X}\frac{\sin(Z)}{Z} \qquad \text{(2.28 ค)}$$

เมื่อ $X = \dfrac{kl\sin\theta\cos\phi}{2}$ และ $Z = \dfrac{kh\cos\theta}{2}$

และจากที่มีช่องเปิดสองช่องเป็นแถวลำดับกันที่มีระยะห่าง w ตามทิศทางแกน y จึงมีตัวประกอบแถวลำดับเขียนได้ดังนี้

$$AF_y = 2\cos\left[\frac{1}{2}(kw\cos\theta\sin\phi)\right] \tag{2.29}$$

ทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแผ่นพิมพ์สามารถเขียนได้เป็นสมการ (2.30 ก) และ (2.30 ข) สำหรับองค์ประกอบ E_θ และ E_ϕ ตามลำดับ

$$E_\theta = -j\frac{khwE_0 e^{-jkr}}{\pi r}\sin\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kl\sin\theta\cos\phi}{2}\right)}{\frac{kl\sin\theta\cos\phi}{2}}\right]\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right] \qquad \text{(2.30 ก)}$$

$$\times\cos\left[\frac{1}{2}(kw\cos\theta\sin\phi)\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

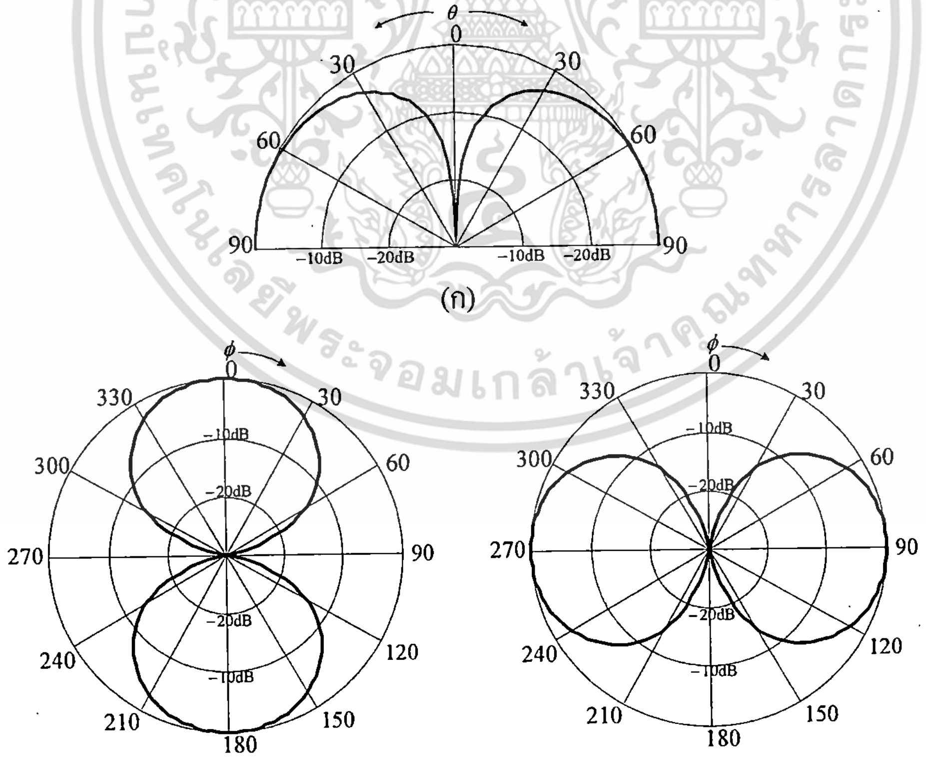
$$E_\phi = -j\frac{khwE_0 e^{-jkr}}{\pi r}\cos\theta\cos\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kl\sin\theta\cos\phi}{2}\right)}{\frac{kl\sin\theta\cos\phi}{2}}\right]\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right] \quad (2.30\ ข)$$

$$\times\cos\left[\frac{1}{2}(kw\cos\theta\sin\phi)\right]$$

ในระนาบสนามไฟฟ้า $E_\phi=0$ และองค์ประกอบ E_θ จะมีค่าเป็น

$$E_\theta = -j\frac{khwE_0 e^{-jkr}}{\pi r}\sin\phi\left[\frac{\sin\left(\frac{kh\cos\theta}{2}\right)}{\frac{kh\cos\theta}{2}}\right]\cos\left[\frac{1}{2}(kw\cos\theta)\right] \quad (2.31)$$

แบบรูปการแผ่พลังงานจากสมการในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปทำงานในโหมดที่สอง TM_{200} และ TM_{020} แสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ก) ส่วนระนาบสนามแม่เหล็กของโหมด TM_{200}และ TM_{020} แสดงได้ในรูปที่ 2.4 (ข) และ (ค) เมื่อใช้วัสดุฐานรองที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่า 1



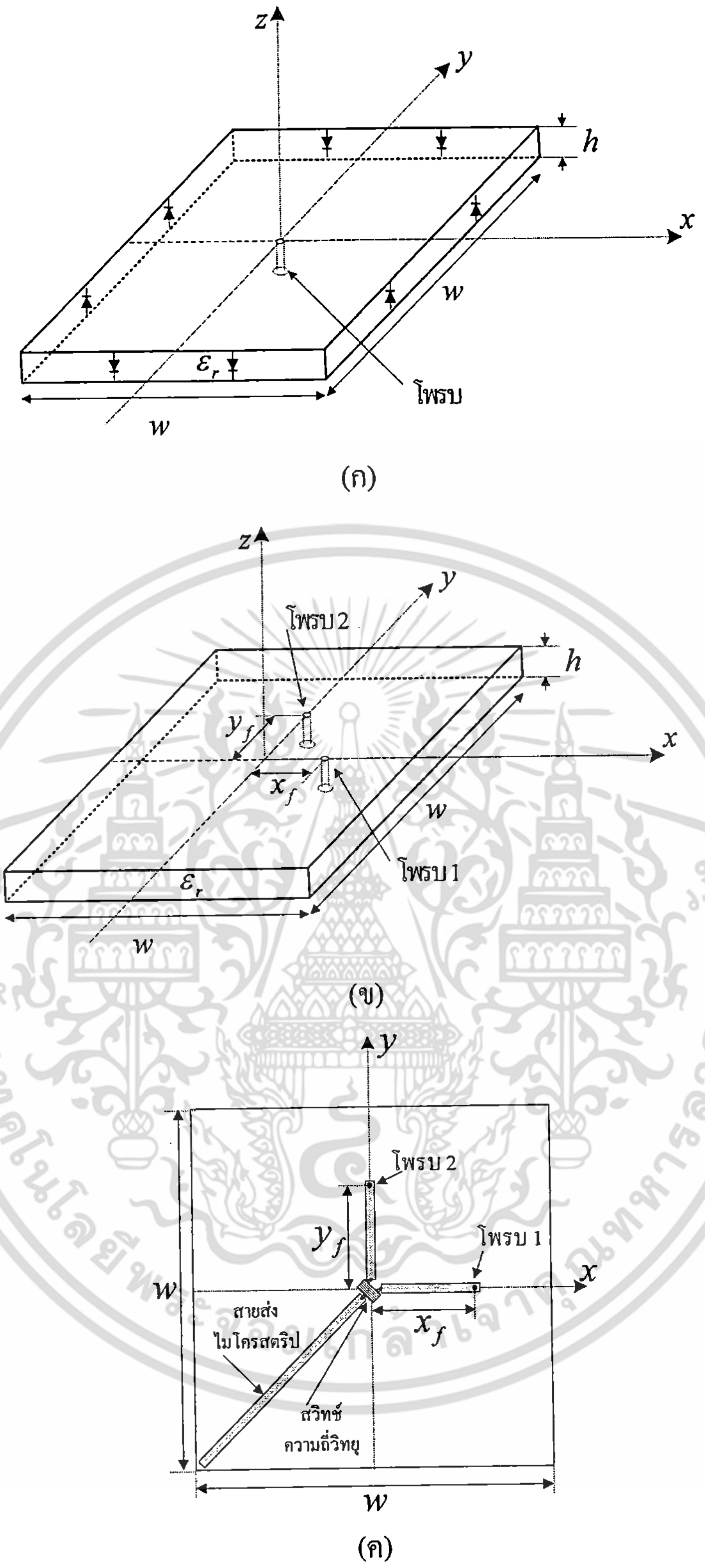
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ทำงานในโหมดที่สอง

(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า TM_{200} และ TM_{020} ϕ เท่ากับ 0° และ 90°

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก TM_{200} θ เท่ากับ 90° (ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก TM_{020} θ เท่ากับ 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

110301



รูปที่ 2.5 สายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส (ก) เลือกทิศทางการแผ่คลื่นโดยใช้การบังคับไดโอดพิน (ข) เลือกทิศทางการแผ่คลื่นโดยการเลือกตำแหน่งการป้อนโพรบ (ค) การป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศด้วยสวิทช์ความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การป้อนสัญญาณสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น

สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์ใน [10] และ [29] เป็นสายอากาศที่สร้างจากแผ่นพิมพ์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง w โดยกราวด์ของสายอากาศมีขนาดเท่ากับตัวแผ่นแผ่พลังงาน ป้อนสัญญาณด้วยโพรบอยู่ที่จุดศูนย์กลางของตัวสายอากาศ ที่ขอบแต่ละด้านจะมีไดโอดพิน (PIN-diode) อยู่ 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) ในการใช้งานจะเลือกให้สายอากาศแผ่พลังงานออกในสองทิศทางคือในแกน $\pm x$ หรือ $\pm y$ โดยการบังคับไดโอดพินให้ทำงาน บนช่องเปิดที่ไบอัสตรงจะเกิดสนามไฟฟ้ากระจายเป็นสองครึ่งลูกคลื่นที่จะหักล้างกันหมด ส่วนบนช่องเปิดที่ไบอัสย้อนกลับไดโอดพินจะมีสนามไฟฟ้ากระจายสม่ำเสมอและเป็นด้านที่แผ่พลังงานออกไป จะเห็นว่าการที่จะปรับทิศทางได้นั้นสายอากาศหนึ่งตัวจะต้องใช้ไดโอดพินจำนวน 8 ตัว และถ้านำไปใช้ในระบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีสายอากาศสี่ตัวจะต้องใช้ไดโอดพินทั้งหมด 32 ตัว ซึ่งการสร้างสายอากาศลักษณะนี้จะมีความยุ่งยากในการติดตั้งไดโอดพินและต้องมีสายไฟที่ใช้สำหรับบังคับไดโอดพินจำนวนมาก และจะทำให้มีโครงสร้างของระบบสายอากาศมีความซับซ้อน

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศอีกลักษณะหนึ่งซึ่งจะลดจำนวนอุปกรณ์ให้น้อยลงแต่ยังคงมีคุณสมบัติที่สามารถเลือกทิศทางการแผ่พลังงานได้เหมือนกับสายอากาศที่กล่าวมา สายอากาศที่นำเสนอนี้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสสร้างจากแผ่นพิมพ์เช่นเดียวกับสายอากาศข้างต้น แต่จะไม่มีไดโอดพินติดอยู่ที่ขอบของสายอากาศ แต่จะมีจุดป้อนสัญญาณสองที่คือได้แก่ โพรบ 1 และ โพรบ 2 วางอยู่ที่ตำแหน่ง x_f และ y_f ตามลำดับ ขณะใช้งานจะเลือกป้อนสัญญาณเพียงหนึ่งโพรบเท่านั้น โดยการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศนั้นจะใช้สวิทช์ความถี่วิทยุ (RF switch) เป็นตัวปรับเลือกให้โพรบ 1 หรือ โพรบ 2 ทำงาน โดยระบบป้อนสัญญาณให้สายอากาศนี้ได้แสดงดังในรูปที่ 2.5 (ค)

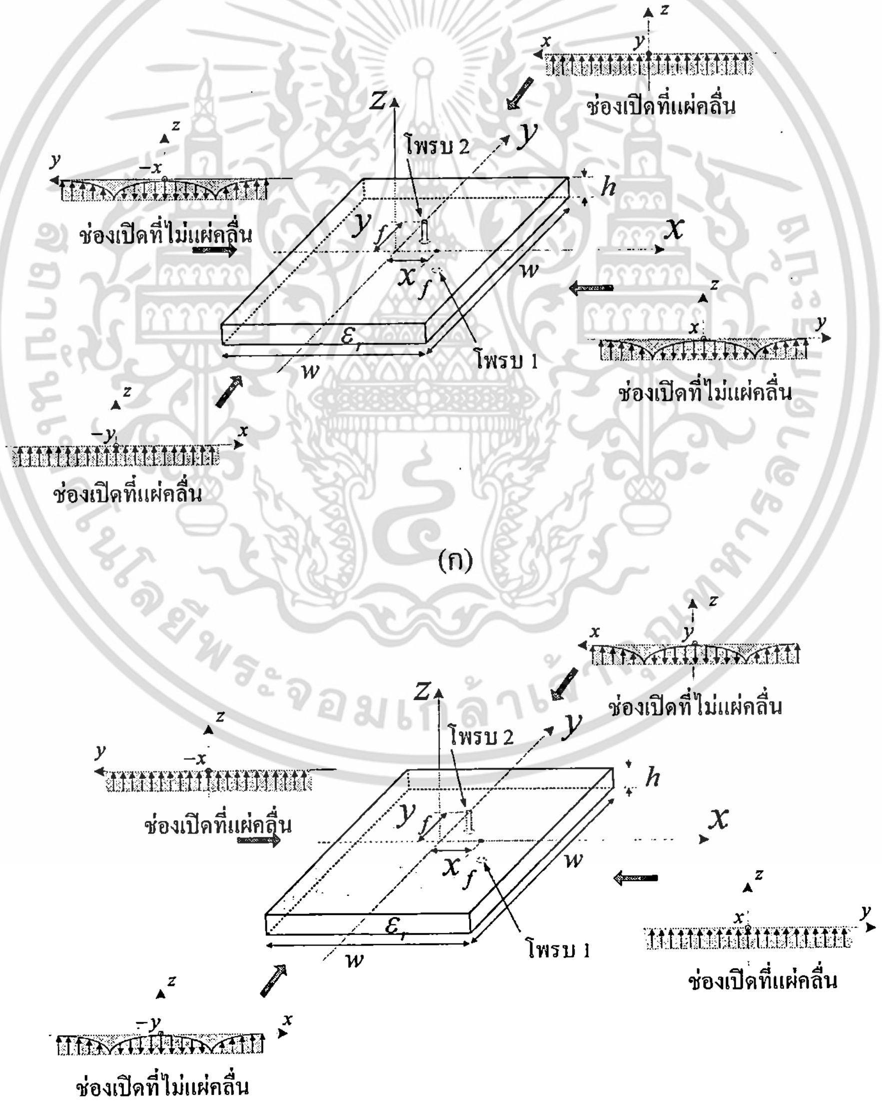
2.2.1 การป้อนสัญญาณสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น

โดยทั่วไปการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นพิมพ์สองตำแหน่งจะใช้เมื่อต้องการให้สายอากาศมีโพลาไรเซชันแบบวงกลมหรือแบบสองโพลาไรเซชัน และสายอากาศจะทำงานในโหมดพื้นฐานหรือแถวลำดับบรอดไซด์ (broadside array) [61] แต่สายอากาศที่ต้องการนี้เป็นสายอากาศปรับทิศทาง โดยจะทำงานที่โหมดสองหรือแถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์และมีโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงในแนวตั้ง

ถ้าเลือกป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 ที่ตำแหน่ง x_f ในรูปที่ 2.6 (ก) จากการพิจารณาโดยใช้แบบจำลองโพรงสี่เหลียมจะมีคลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศ $\pm y$ และเมื่อสายอากาศมีความยาว w ตามแกน y_f ยาวเท่ากับ λ_d (โดยที่ λ_d นั้นเป็นความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง) จะทำให้สนามไฟฟ้า E_z มีขนาดเท่ากันและมีเฟสเดียวกันในขณะที่ช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ $\pm x$ จะมีสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดตามความยาว x ซึ่งการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นลักษณะของโหมด TM_{020} [60] (หมายถึงสนามไฟฟ้าจะมีค่าสม่ำเสมอตามแกน x แต่สนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงสองครึ่งลูกคลื่นตามความยาวในแกน y) ตามแบบจำลองโพรงสี่เหลี่ยม ซึ่งช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ $\pm x$ จะเป็นช่องเปิดที่ไม่แผ่คลื่น เนื่องจากสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กจะหักล้างกันหมด ส่วนช่องเปิดที่ชี้ไปทางทิศ y_f จะเป็นช่องเปิดที่แผ่คลื่น โดยที่สนามไฟฟ้าของทั้งสองช่องเปิดมีเฟสที่ตรงกันแต่มีทิศทางของช่องเปิดตรงข้ามกัน ทำให้ช่องเปิดที่แผ่คลื่นทั้งสองเกิดความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_x บนทั้งสองด้าน แต่จะมีเฟสตรงข้ามกัน (ช่องเปิดทางทิศ y จะมีค่า $-M\hat{a}_x$ ช่องเปิดทางทิศ $-y$ จะมีค่า $M\hat{a}_x$) ซึ่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบนทั้งสองช่องเปิดนี้จะเป็นตัวกำเนิดการแผ่พลังงาน ดังนั้นการแผ่พลังงานของสายอากาศจะได้จากการทำแถวลำดับกันของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสองตัวที่มีเฟสตรงข้ามกันวางเรียงตามแกน y อยู่ห่างกันเป็นระยะ λ_d ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ทำให้มีการแผ่พลังงานที่ชี้ทิศทางไปในทิศทาง $\pm y$ และจะมีโพลาไรเซชันตามแนวตั้ง



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.6 โหมดของสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส

(ก) TM_{020} เมื่อป้อนสัญญาณที่โพรบ 1 (ข) TM_{200} เมื่อป้อนสัญญาณที่โพรบ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันถ้าเลือกป้อนสัญญาณที่โพรบ 2 ที่ตำแหน่ง y_f ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) จะทำให้เกิดการกระจายสนามตามโหมด TM_{200} คือช่องเปิดที่อยู่ทางด้าน $\pm y$ เป็นช่องเปิดที่ไม่แผ่พลังงาน แต่ช่องเปิดที่อยู่ทางด้าน $\pm x$ เป็นช่องเปิดที่แผ่พลังงาน ซึ่งมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_y (ช่องเปิดทางทิศ x จะมีค่า $-M\hat{a}_y$ ช่องเปิดทางทิศ $-x$ จะมีค่า $M\hat{a}_y$) เป็นตัวกำเนิดการแผ่พลังงาน จึงได้ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสองตัวที่มีเฟสตรงข้ามกันวางเรียงตามแกน x ด้วยระยะห่าง λ_d ทำให้แผ่พลังงานไปในทาง $\pm x$ และมีโพลาไรเซชันในแนวตั้งเช่นกัน

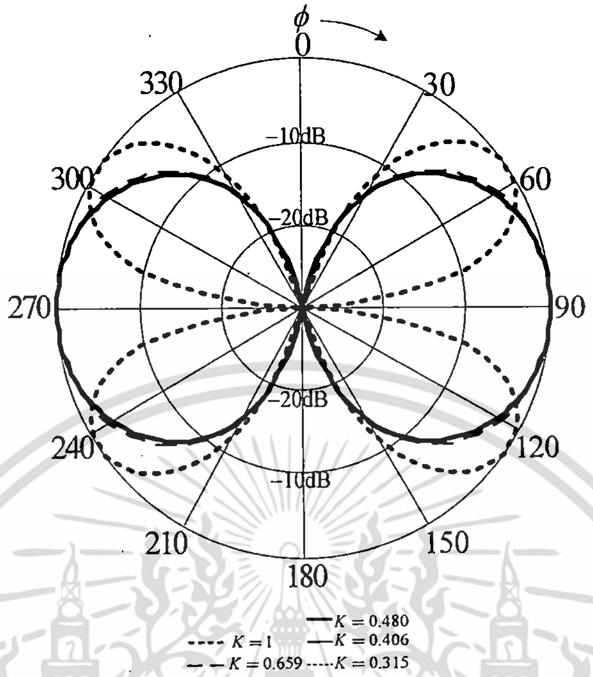
ในการใช้งานจะสามารถกำหนดทิศทางการแผ่พลังงานของสายอากาศได้โดยการเลือกป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 หรือ โพรบ 2 แต่ลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณคือ x_f และ y_f ดังนั้นในการออกแบบจะต้องพิจารณาตำแหน่งของ x_f และ y_f เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสมและสามารถเข้าคู่อิมพีแดนซ์ได้ง่าย ซึ่งจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การกระจัดกระจายโดยการคำนวณและจำลองสายอากาศ เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส

2.2.2 ผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุฐานรอง

สายอากาศที่จะออกแบบนี้เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัส ซึ่งปกติจะสร้างจากแผ่นพิมพ์ แต่เนื่องจากวัสดุฐานรองของแผ่นพิมพ์นั้นมีหลายชนิด ซึ่งแตกต่างกันด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแทนเจนท์การสูญเสีย (tan δ) ของวัสดุนั้นๆ และที่สำคัญค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นจะเป็นตัวกำหนดขนาดของสายอากาศด้วย [61] ซึ่งวัสดุฐานรองจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มากกว่าของอวกาศว่าง และเนื่องจากคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจะทำให้ความยาวคลื่นในวัสดุนั้นสั้นลงด้วย โดยค่าความยาวของคลื่นในวัสดุฐานรอง λ_d จะมีค่าประมาณได้จาก $\lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$ เมื่อ λ_0 เป็นความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ดังนั้นเพื่อให้สายอากาศแผ่นพิมพ์ทำงานในโหมดที่สอง ขนาดความกว้างของสายอากาศ w นั้นต้องมีขนาดเท่ากับ λ_d เพื่อให้เกิดสนามเปลี่ยนแปลงสองครึ่งลูกคลื่นบนช่องที่ไม่แผ่พลังงาน และค่า w นี้จะเป็นระยะห่างของความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กบนช่องแผ่พลังงานที่วางเป็นแถวลำดับดังในสมการที่ (2.22) และ (2.29) เมื่อ w เท่ากับ l เพื่อพิจารณาผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งจะมีต่อการแผ่พลังงานจากสมการที่ (2.30 ข) สายอากาศจะมีแผ่นแผ่พลังงานที่มีความกว้าง w เท่ากับความยาวคลื่นในค่าคงที่ไดอิเล็กตริก λ_d โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่จะพิจารณามีค่าเท่ากับ 1 2.32 4.4 6.15 และ 10.2 กำหนดให้ K เป็นอัตราส่วนของความกว้างของแผ่นแผ่พลังงานต่อความยาวคลื่นในอวกาศว่าง ดังนั้นจะได้ค่า K จะมีค่าเท่ากับ 1 0.659 0.480 0.406 และ 0.315 ตามลำดับ แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าถ้าวัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่า 1 จะได้และรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทาง แต่สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1 นั้นจะไม่ได้แบบรูปการแผ่พลังงานสองทิศทาง ดังนั้นสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ซึ่งจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่า 1 จะสามารถออกแบบให้เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสทำงานที่โหมด 2 ได้



รูปที่ 2.7 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อค่า K ต่างๆ ซึ่งขึ้นกับค่าคงที่ไดอิลีกตริกของวัสดุฐานรอง

2. 3 การจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง

นอกจากค่าคงที่ไดอิเล็ตริกของวัสดุฐานรองจะเป็นตัวกำหนดขนาดของสายอากาศแล้วยังมีผลต่อคุณสมบัติอื่นที่สำคัญของสายอากาศไมโครสตริปจัตุรัสด้วยคือค่าสภาพเจาะจงทิศทางและคุณสมบัติการสูญเสียการกระจัดกระจายในการป้อนสัญญาณ แต่คุณสมบัติที่กล่าวมานี้จะมีความซับซ้อนมากในการคำนวณด้วยสมการ ดังนั้นจึงใช้โปรแกรม CST สำหรับจำลองสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสตามรูปที่ 2.5 (ข) เพื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นพิมพ์และการสูญเสียต่างๆ โดยแผ่นพิมพ์จะมีความสูง h เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร และตำแหน่งป้อนสัญญาณ x_f และ y_f จะเป็นตำแหน่งซึ่งทำให้สายอากาศทำงานที่โหมดสองและมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นสองทิศทาง โดยกำหนดให้สายอากาศนี้ใช้งานสำหรับความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในตารางที่ 2.1 ได้แสดงขนาดความกว้างของแผ่นแผ่พลังงาน ตำแหน่งของโพรบที่วางห่างจากจุดกึ่งกลางของแผ่นแผ่พลังงานและแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางจากการจำลอง ซึ่งจะเห็นว่าถ้าสายอากาศสร้างด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงจะมีแผ่นแผ่พลังงานขนาดเล็กแต่จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง

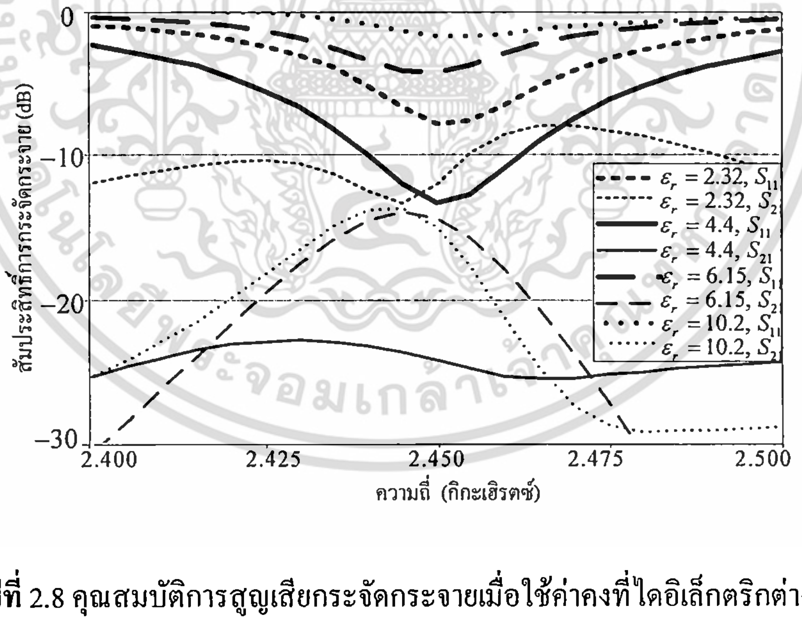
สำหรับคุณสมบัติการกระจัดกระจายสำหรับการป้อนนั้นได้แสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.32 6.15 และ 10.2 นั้นจะได้ค่าการสูญเสียการสะท้อนหรือ S_{11} ที่สูงกว่า -10 dB แต่สำหรับแผ่นพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 นั้นจะมีค่าการสูญเสียการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะท้อนที่น้อยในย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 เป็นค่าที่เหมาะสำหรับสร้างเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นต่อไป นอกจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นตัวแปรของวัสดุในการออกแบบสายอากาศแล้ว ยังมีตัวแปรทางโครงสร้างของสายอากาศด้วยนั่นคือตำแหน่งป้อนสัญญาณ x_f และ y_f ของโพรบทั้งสองซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาด้วย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่แปรตามค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

วัสดุฐานรองสูง h = 0.8 มม.	**ความถี่ 2.45 GHz (λ_0 =120 มม.)**			
ε_r	λ_d (มม)	$K=w/\lambda_d$	x_f/λ_d	ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (dBi)
2.32	80.4	0.659	0.29	4.49
4.40	58.4	0.480	0.24	5.67
6.15	49.4	0.4006	0.25	5.93
10.20	38.3	0.315	0.24	6.15



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติการสูญเสียกระจัดกระจายเมื่อใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่างๆ

ในการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งป้อนสัญญาณของสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสนั้นได้ใช้การจำลองสายอากาศตามโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) และใช้เงื่อนไขเดียวกับการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ผ่านมาโดยใช้งานสำหรับย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ FR-4 ที่มีความสูง h เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ε_r เท่ากับ 4.4 และ มีค่าแทนเจนท์การสูญเสีย $\tan\delta$ เท่ากับ 0.02 เนื่องจากต้องการให้ทำงานที่โหมดที่สอง สายอากาศจะต้องมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเท่ากับ λ_d ดังนั้นสายอากาศจะมีขนาดกว้าง w เท่ากับ 58.38 มิลลิเมตร จะเลือกป้อนสัญญาณด้วยโพรบ 1 หรือ 2 ซึ่งอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศเป็นระยะ x_f และ y_f ตามลำดับ โดยทั้งสองตำแหน่งให้อยู่บนแกน x และ y ตามลำดับ ทิศทางการแผ่พลังงานจะถูกกำหนดโดยการเลือกป้อนสัญญาณให้โพรบ 1 หรือโพรบ 2 เพียงหนึ่งโพรบ ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ

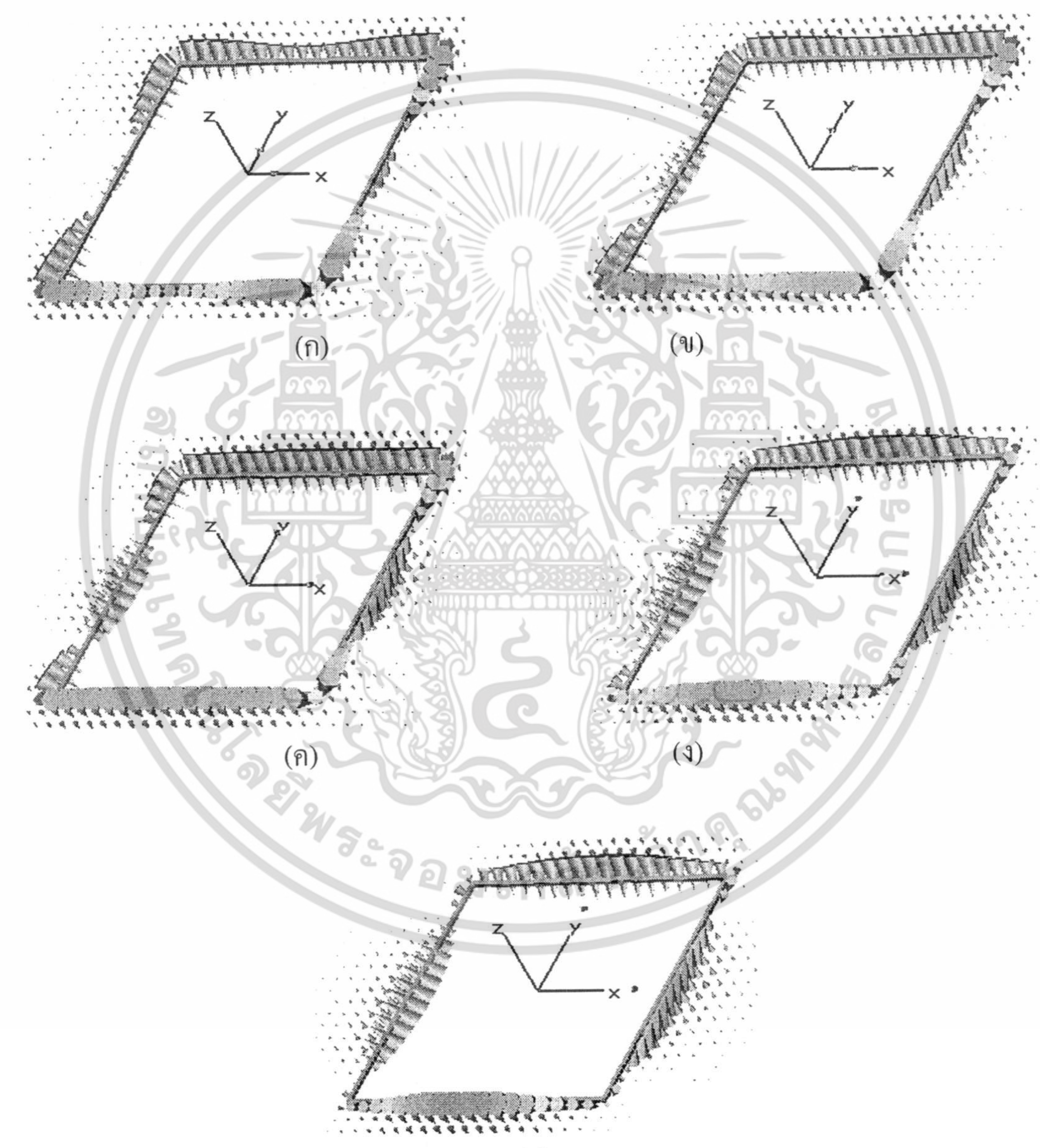
เนื่องจากสายอากาศมีลักษณะที่สมมาตร จึงจะพิจารณาเฉพาะการป้อนสัญญาณที่โพรบ 1 เพียงอย่างเดียว โดยจะเปลี่ยนตำแหน่งการป้อนสัญญาณ x_f และ y_f เพื่อจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าอิมพีแดนซ์รวมถึงสัมประสิทธิ์การกระจัดกระจาย

2.3.1 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน

เมื่อป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 ส่วนโพรบ 2 จะต่อกับความต้านทาน 50 โอห์ม หมายถึงต้องการให้มีการแผ่พลังงานในทิศทาง $\pm y$ หรือ ϕ เท่ากับ 90 และ 270 องศา ดังนั้นสายอากาศจะทำงานที่โหมด TM_{020} ซึ่งควรที่จะมีการกระจายสนามไฟฟ้าที่บริเวณช่องเปิดของสายอากาศดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 (ก) โดยตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ x_f จะเป็นตัวแปรที่กำหนดลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใต้แผ่นแผ่พลังงาน ในการจำลองได้เปลี่ยนตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 6 10 14 18 และ 22 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่บนช่องเปิดของสายอากาศ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะมีอิทธิพลต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน ผลการจำลองได้แสดงดังในรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าการกระจายสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ ขณะที่วางโพรบอยู่ที่ตำแหน่ง x_f เท่ากับ 6 มิลลิเมตร จะมีสนามไฟฟ้ากระจายดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ที่ช่องเปิด $\pm y$ นั้นมีสนามไฟฟ้ากระจายอยู่โดยมีทิศเดียวกันทั้งหมดแต่มีความเข้มสนามไฟฟ้ากระจายไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวช่อง ที่ตรงกลางของช่องเปิดมีสนามไฟฟ้าความเข้มน้อยกว่าส่วนช่องเปิด $\pm x$ นั้นมีสนามไฟฟ้ากระจายตัวแบบที่มีทิศตรงข้ามกันแต่จะเห็นว่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณตรงกลางช่องจะมีความเข้มที่น้อยกว่าดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งหมดในช่องนี้จึงไม่หักล้างกันหมด และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่ง x_f ให้อยู่ที่ 10 มิลลิเมตร ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าแสดงดังในรูปที่ 2.9(ข) จะเห็นว่าที่ช่องเปิด $\pm x$ สนามไฟฟ้าการจายแบบทิศเดียวกันแต่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนช่องเปิด $\pm y$ นั้นมีสนามไฟฟ้ากระจายแบบทิศตรงกันข้าม ความเข้มสนามไฟฟ้าตรงกลางช่องมีความเข้มเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่เพียงพอที่จะหักล้างกันได้หมด และสำหรับการวางโพรบที่ตำแหน่ง x_f ที่ 14 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางแผ่นแผ่พลังงานจะมีการกระจายสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) ซึ่งที่ช่องเปิด $\pm y$ มีสนามไฟฟ้าทิศเดียวกันและมีขนาดสม่ำเสมอตลอดความยาวช่อง และที่ช่องเปิด $\pm x$ นั้นสนามไฟฟ้ากระจายแบบมีทิศตรงข้ามกันและสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณตรงกลางมีขนาดที่มากและสามารถหักล้างกับสนามที่อยู่ด้านริมของช่องได้หมดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงสองครึ่งลูกคลื่น ซึ่งเป็นลักษณะของโหมด TM_{020} และเมื่อจำลองให้โพรบอยู่ที่ตำแหน่ง x_f เท่ากับ 18 มิลลิเมตร สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะตามรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 (ง) ที่ช่องเปิด $\pm y$ มีสนามไฟฟ้ากระจายทิศเดียวกันแต่ไม่สม่ำเสมอตรงกลางช่องจะมีสนามไฟฟ้าเข้มมากและน้อยลงที่ริมช่อง และที่ช่องเปิด $\pm x$ นั้นสนามไฟฟ้ากระจายแบบที่มีทิศตรงกันข้ามแต่หักล้างกันไม่หมด ที่กลางช่องสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มมาก และเมื่อวางโพรบที่ตำแหน่ง 22 มิลลิเมตร สนามไฟฟ้ามีลักษณะกระจายในรูปที่ 2.9 (จ) ที่ช่องเปิด $\pm y$ สนามไฟฟ้าจะมีทิศทางเดียวกันแต่ไม่สม่ำเสมอ ที่กลางช่องสนามไฟฟ้าเข้มมากที่สุดแต่ที่ริมของช่องสนามจะน้อยลงมาก และที่ช่องเปิด $\pm x$ สนามไฟฟ้ากระจายแบบมีทิศตรงข้ามกันแต่จะหักล้างกันไม่หมด เนื่องจากสนามที่ริมช่องจะมีความเข้มที่น้อยกว่าสนามไฟฟ้าตรงกลางมาก



รูปที่ 2.9 การกระจายของสนามไฟฟ้าที่บริเวณช่องแผ่พลังงานเมื่อเปลี่ยนตำแหน่ง x_f

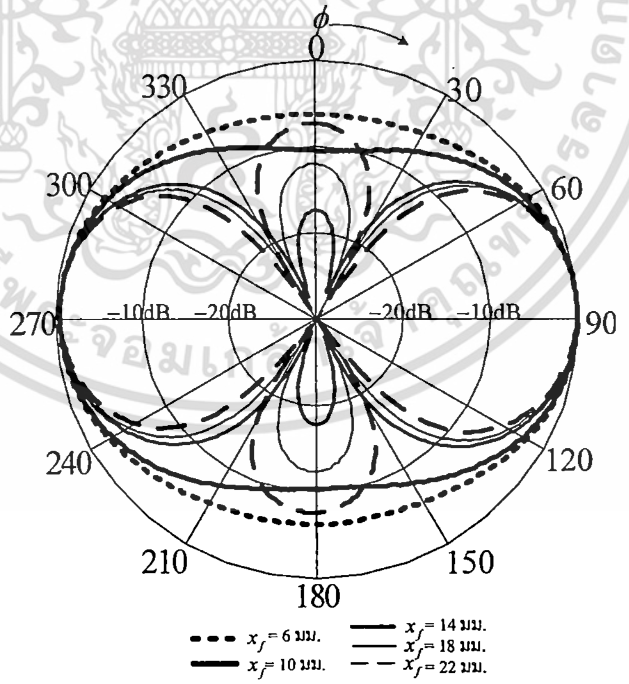
(ก) x_f เท่า 6 มิลลิเมตร (ข) x_f เท่า 10 มิลลิเมตร (ค) x_f เท่า 14 มิลลิเมตร

(ง) x_f เท่า 18 มิลลิเมตร (จ) x_f เท่า 22 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการปรับตำแหน่งของโพรบป้อนสัญญาณทำให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดของสายอากาศแผ่นพิมพ์หรือไมโครสตริปนั้นมีการกระจายที่เปลี่ยนตามตำแหน่ง และจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานด้วย ซึ่งแต่ละตำแหน่งที่วางโพรบจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกันดังแสดงผลของแบบรูปการแผ่พลังงานที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งในรูปที่ 2.10 แต่ละแบบรูปจะแผ่พลังงานที่มากที่สุดในมุม ϕ เท่ากับ 90 และ 270 องศา ตามที่ต้องการ แต่จะเห็นว่าถ้าตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น (จาก 6 ถึง 14 มิลลิเมตร) การแผ่คลื่นที่มุม ϕ เท่ากับ 0 และ 180 องศา จะลดลง และจะกลับเพิ่มขึ้นมาอีกถ้าเลื่อนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณเพิ่มขึ้น (จาก 14 ถึง 22 มิลลิเมตร) ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้วางโพรบที่ตำแหน่ง 14 มิลลิเมตร นั้นเป็นตำแหน่งที่ให้แบบรูปสองทิศทางดีที่สุด เนื่องจากตำแหน่งนี้สามารถทำให้การกระจายสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดของสายอากาศมีลักษณะเหมือนกับโหมด TM_{020} มากที่สุด ส่วนที่ตำแหน่งอื่นๆนั้นสนามไฟฟ้าที่อยู่บนช่องเปิด $\pm x$ จะหักล้างกันได้ไม่หมดจึงทำให้มีการแผ่พลังงานในทิศทาง ϕ เท่ากับ 0 และ 180 องศา

นอกจากตำแหน่งที่ป้อนจะมีความสำคัญต่อแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งได้พิจารณามาแล้วนั้น การนำไปใช้งานจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย ดังนั้นในการจำลองจึงได้พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ในหัวข้อต่อไปเพื่อจะนำไปออกแบบใช้งานต่อไป

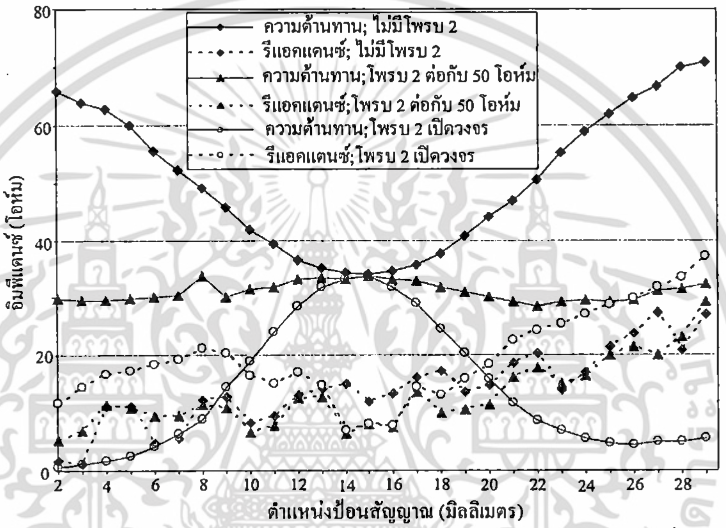


รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อป้อนสัญญาณให้โพรบ 1 โดยเปลี่ยนตำแหน่ง x_f

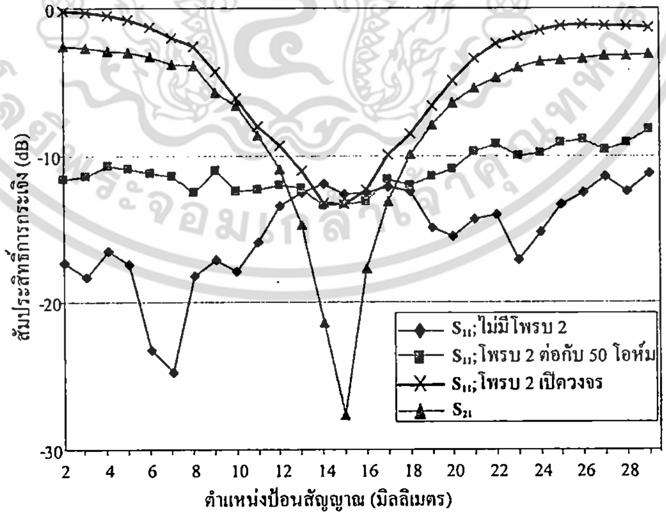
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ผลการจำลองค่าอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การกระเจิง

ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้เปลี่ยนแปลงตำแหน่งป้อนสัญญาณ x_f และ y_f ตั้งแต่ 2 ถึง 29 มิลลิเมตร เนื่องจากสายอากาศนี้มีโพรบป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง แต่ในการใช้งานจะเลือกป้อนสัญญาณเพียงโพรบเดียวเท่านั้น ซึ่งจะเลือกใช้โพรบ 1 สำหรับการจำลอง ดังนั้นจึงได้แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่โพรบ 1 แต่โพรบที่ไม่ได้ป้อนสัญญาณคือโพรบ 2 จะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของโพรบ 1 ด้วย ในการจำลองจึงได้เทียบกับในกรณีที่โพรบ 2 ได้ต่อกับค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และกรณีที่โพรบ 2 เปิดวงจรไว้ และยังได้แสดงในกรณีที่ตัวสายอากาศมีโพรบที่ป้อนสัญญาณเพียงโพรบเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ

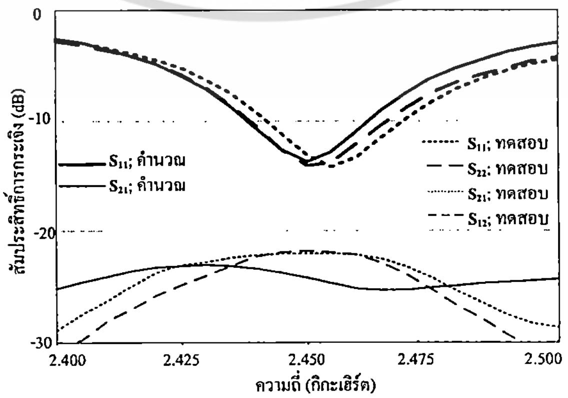
(ก) อิมพีแดนซ์ (ข) สัมประสิทธิ์การกระเจิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลในรูปที่ 2.11(ก) ค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ โดยที่จะมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณอยู่ที่ 13 ถึง 16 มิลลิเมตร ในทั้งสามกรณี แต่ที่ตำแหน่งอื่นๆ ค่าความต้านทานจะต่างกันมาก โดยแตกต่างกันมากกว่าค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งตำแหน่งที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางและอยู่ใกล้กับขอบของสายอากาศจะมีความแตกต่างกันมากที่สุด ถ้าพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน S_{21} ในรูปที่ 2.11(ข) การป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 13 ถึง 16 มิลลิเมตร S_{11} ของทั้งสามกรณีจะใกล้เคียงกันมากแต่จะต่างกันที่ตำแหน่งอื่น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจะบอกถึงผลของโพรบที่ไม่ได้ป้อนสัญญาณ สำหรับกรณีที่โพรบ 2 ต่อกับความต้านทาน 50 โอห์ม จะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่ากรณีที่โพรบ 2 เปิดวงจร จะเห็นได้ว่ากรณีที่โพรบ 2 ต่อกับความต้านทาน S_{11} มีค่าต่ำที่สุดที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตร และมี S_{21} ที่ต่ำกว่า -20 dB ถือว่ามีผลกระทบจากโพรบ 2 น้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการใช้งานและเป็นตำแหน่งที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานตามที่ต้องการด้วย

2.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติ

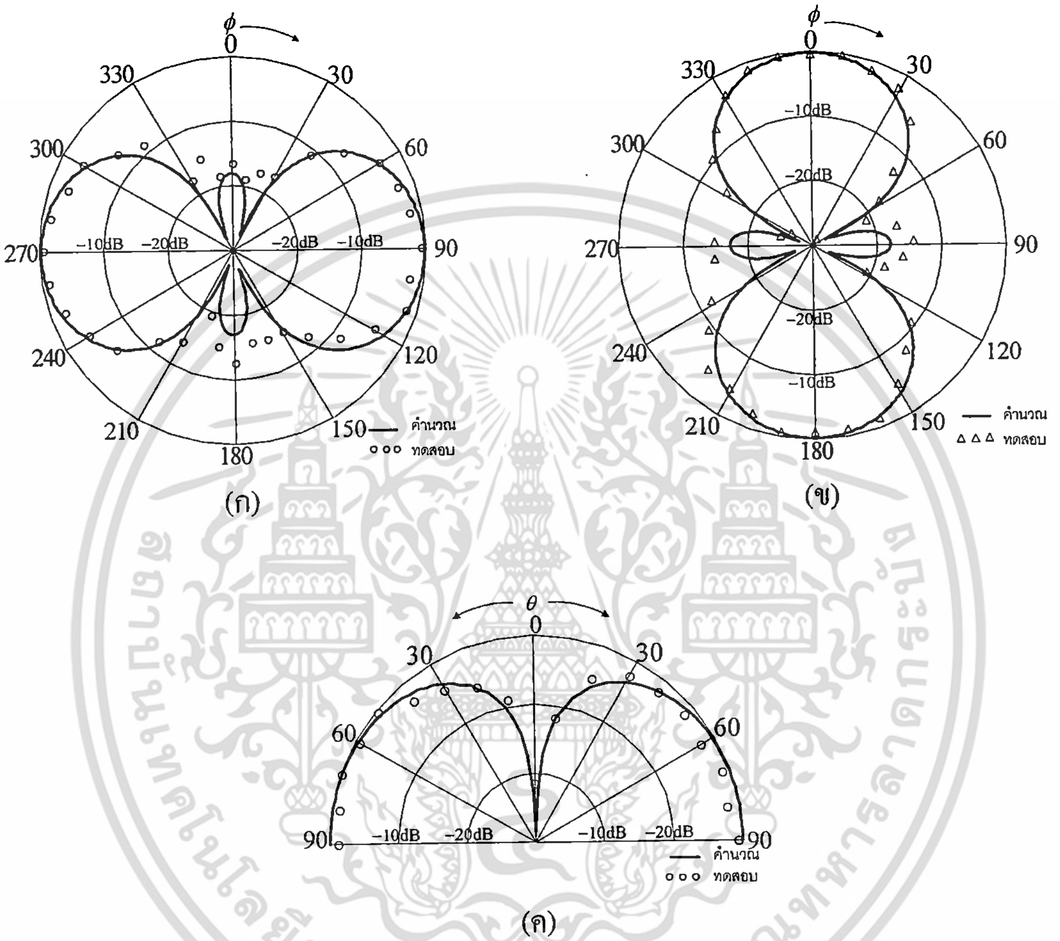
จากผลการคำนวณทำให้ได้ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้อนสัญญาณคือ โพรบ 1 ที่ x_f และโพรบ 2 ที่ y_f จะต้องห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศเท่ากับ 15 มิลลิเมตร เพื่อให้สายอากาศไมโครสตริปจัตุรัสใช้งานเป็นสายอากาศปรับทิศทางการแผ่คลื่นโดยจะใช้งานที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ในการทดสอบจึงได้สร้างสายอากาศดังรูปที่ 2.5(ข) ตามโครงสร้างในการจำลองเพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และได้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานในกรณีที่เลือกป้อนสัญญาณที่โพรบ 1 และกรณีที่เลือกป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 2 โดยโพรบที่ไม่ป้อนสัญญาณจะต่อกับความต้านทาน 50 โอห์ม ซึ่งได้ทดสอบในห้องมีการที่ป้องกันคลื่นสะท้อนและคลื่นรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 2.12 ผลการคำนวณและทดสอบสัมประสิทธิ์การกระเจิงเมื่อป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง 15 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.12 แสดงผลการคำนวณและผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การกระเจิงในช่วงความถี่ 2.4 ถึง 2.5 กิกะเฮิร์ต สำหรับผลการคำนวณเนื่องจากสายอากาศที่มีความสมมาตรกันจึงแสดงเฉพาะ S_{11} กับ S_{21} แต่สำหรับผลการทดสอบได้แสดง S_{11} S_{21} S_{12} และ S_{22} โดยที่ S_{11} กับ S_{12} และ S_{22} กับ S_{21} สำหรับการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง x_f และ y_f ตามลำดับ ผลการทดสอบที่ได้จะมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณ แต่จะเลื่อนไปทางด้านความถี่สูง



รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน
(ก) ระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 2 (ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้แสดงเทียบกับผลการคำนวณในรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) เป็นผลการทดสอบค่ากำลังงานสัมพัทธ์ในมุมระนาบ (ระนาบ xy หรือระนาบสนามแม่เหล็ก ด้วยการป้อนสัญญาณที่ตำแหน่ง x_f และ y_f ตามลำดับ และในรูปที่ 2.13 (ค) เป็นผลการทดสอบและคำนวณของกำลังงานสัมพัทธ์ของระนาบสนามไฟฟ้าในมุมที่มีการแผ่คลื่นมากที่สุดในระนาบ xy ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณเป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการใช้แบบจำลองโพรงสี่เหลี่ยมสำหรับอธิบายการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์หรือไมโครสตริปจัตุรัสที่ทำงานในโหมดสอง TM_{020} หรือ TM_{200} ซึ่งเป็นการแผ่พลังงานแบบแถวลำดับเอนด์ไฟร์ จากนั้นได้แสดงการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นพิมพ์ที่จะใช้สำหรับออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่สามารถสวิทช์ทิศทางการแผ่พลังงานได้สองทิศทาง การปรับทิศทางนั้นจะสวิทช์เลือกโพรบป้อนสัญญาณ ทำให้สามารถลดจำนวนอุปกรณ์ในการสวิทช์ลำคลื่นลงได้เมื่อเทียบกับแบบที่มีอยู่เดิม ในการออกแบบได้ใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานและสัมประสิทธิ์การกระเจิง ซึ่งออกแบบสำหรับความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ จากนั้นได้ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศได้แก่ สัมประสิทธิ์การกระเจิงและแบบรูปการแผ่พลังงาน พบว่าได้ผลที่สอดคล้องกับการออกแบบเป็นอย่างดี

ในบทต่อไปจะใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งนี้ปรับปรุงเป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายและเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสด้วยองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในระบบสายอากาศระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่

ในบทนี้จะใช้สายอากาศจากบทที่ 2 ปรับปรุงให้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่สามารถทำงานได้สองย่านความถี่สำรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE802.11b/g และ IEEE802.11a โดยใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสทำงานที่โหมดสองของแต่ละย่านความถี่ต่อรวมกัน และใช้สวิทช์ความถี่วิทยุสำหรับเลือกตำแหน่งโพรบเพื่อกำหนดทิศทางของลำคลื่น

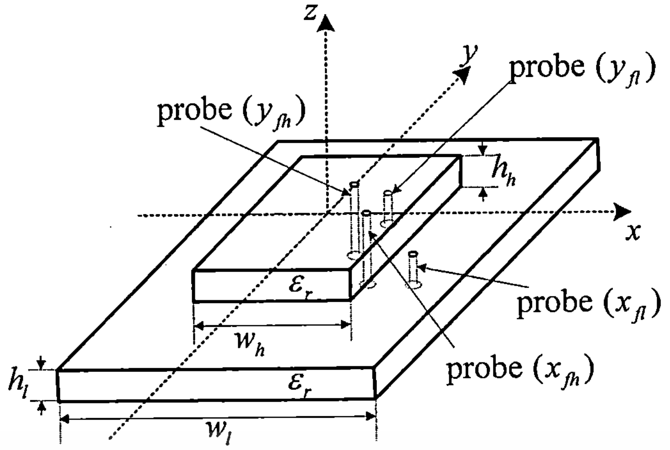
หัวข้อการนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย หลักการของสายอากาศซึ่งจะอธิบายในหัวข้อที่ 3.1 ในข้อที่ 3.2 จะออกแบบและวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์ที่นำมาต่อรวมกันเป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่ จากนั้นได้แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติสายอากาศในหัวข้อ 3.3 และหัวข้อสุดท้ายที่ 3.4 จะสรุปเนื้อหาของบทนี้

3.1 หลักการทำงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่

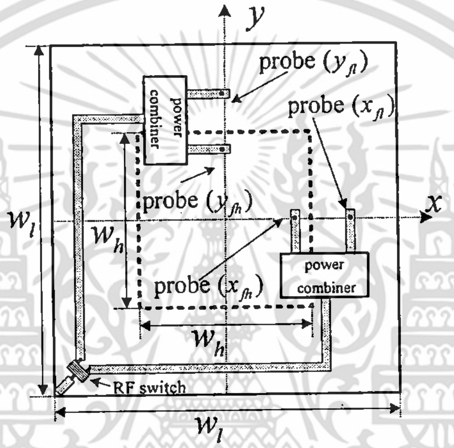
จากในบทที่ 2 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้ากำหนดให้ตัวสายอากาศวางบนระนาบ xy มีความกว้าง w มีความสูง h และมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น ε_r ป้อนสัญญาณด้วยโพรบที่ตำแหน่ง x_f หรือ y_f จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบสองทิศทางที่สวิทช์ลำคลื่นได้โดยการเลือกป้อนสัญญาณด้วยสวิทช์ความถี่วิทยุที่ติดตั้งอยู่ด้านใต้สายอากาศ โดยที่ขนาดแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศ w จะต้องมีความกว้างหนึ่งความยาวคลื่นในค่าคงที่ไดอิเล็กตริก λ_d ของแผ่นพิมพ์ เพื่อทำให้มีสนามไฟฟ้า E_z บนช่องเปิดที่ตรงข้ามกันมีเฟสตรงกัน จะได้สนามไฟฟ้าในโหมด TM_{020} หรือ TM_{200} ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการป้อนสัญญาณ

ในการปรับปรุงสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งให้เป็นสายอากาศที่สามารถทำงานได้สองความถี่นั้น ในเบื้องต้นได้มีแนวคิดในการออกแบบ [43] โดยจะใช้สายอากาศแผ่นพิมพ์สององค์ประกอบที่มีขนาดความกว้าง w_l และ w_h สำหรับความถี่ต่ำ f_l และความถี่สูง f_h ตามลำดับ โพรบป้อนสัญญาณจะอยู่ที่แกน x และ y สำหรับความถี่ต่ำและความถี่สูงที่ตำแหน่ง x_{fl}, y_{fl} และ x_{fh}, y_{fh} ตามลำดับ สายอากาศความถี่สูงจะวางอยู่เหนือสายอากาศความถี่ต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และออกแบบระบบป้อนสัญญาณซึ่งประกอบด้วยสวิทช์ความถี่วิทยุหนึ่งตัวและตัวรวมกำลังงานสองความถี่สองชุดอยู่ด้านใต้ของตัวสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น

ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสองย่านความถี่ (ก) รูปสายอากาศ (ข) ด้านใต้สายอากาศ

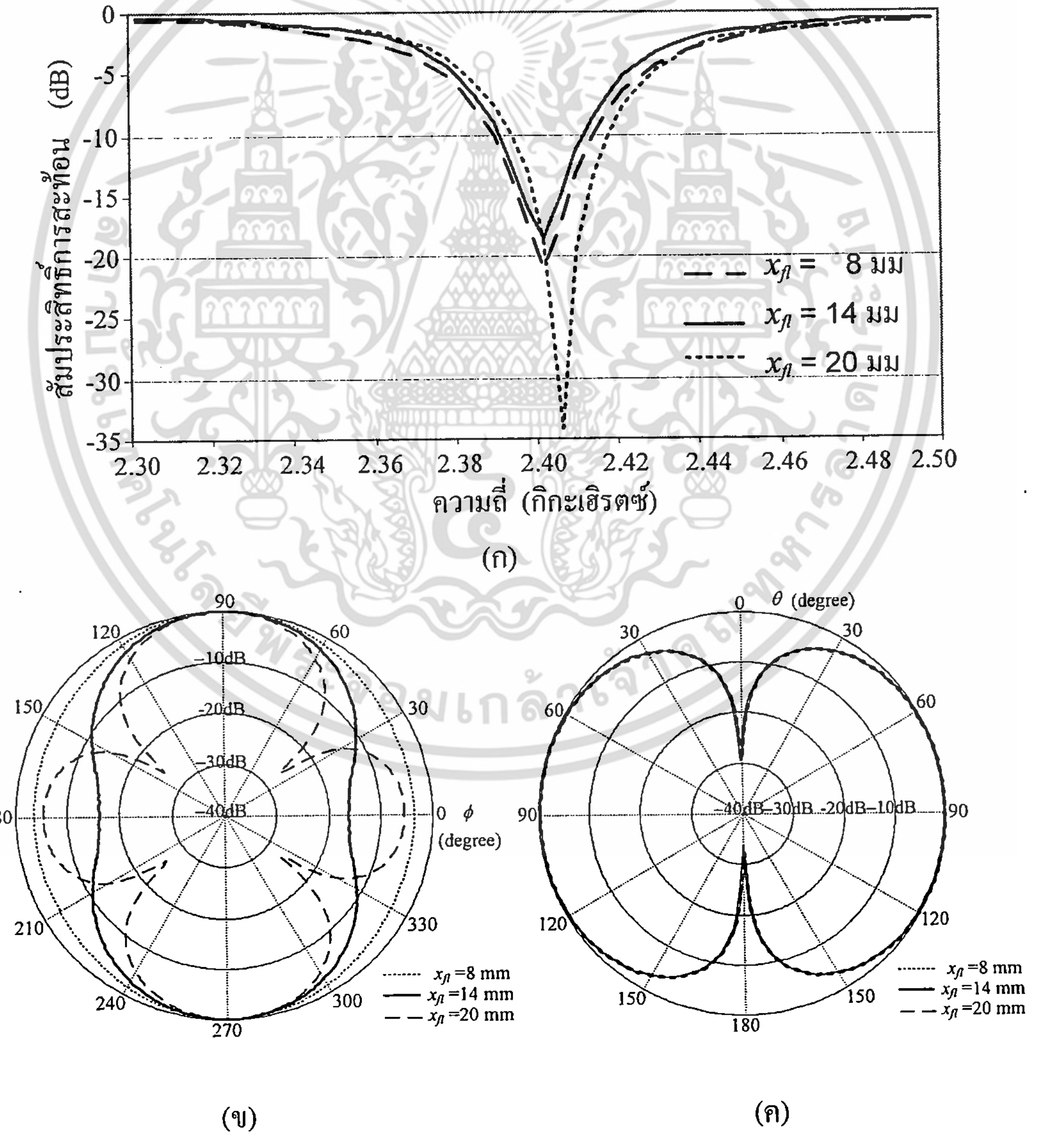
3.2 การออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่

เนื่องจากสายอากาศนี้เป็นการต่อรวมกันของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งของสายอากาศความถี่ต่ำและความถี่สูง ดังนั้นในขั้นแรกจึงต้องออกแบบให้สายอากาศทั้งสองมีคุณสมบัติที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้จากนั้นจะนำสายอากาศมาต่อรวมกัน แต่จากแนวคิดเริ่มต้นใน [43] นั้นจะต้องใช้ตัวรวมสัญญาณสองความถี่สองชุดในการป้อนสัญญาณด้วยจะทำให้โครงสร้างของสายอากาศมีอุปกรณ์มากและมีขนาดใหญ่ เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์ลงจึงได้มีแนวคิดการรวมสัญญาณอีกวิธีหนึ่งซึ่งไม่ต้องใช้ตัวรวมสัญญาณสองความถี่ ถึงแม้จะต้องออกแบบการรวมสัญญาณที่ซับซ้อนขึ้นแต่จะสามารถทำให้โครงสร้างของสายอากาศมีขนาดเล็กลงได้ดังใน [44] ซึ่งการออกแบบสายอากาศแต่ละความถี่และการต่อรวมกันจะอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้ได้รับการคุ้มครองโดยลิขสิทธิ์ ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งของแต่ละความถี่

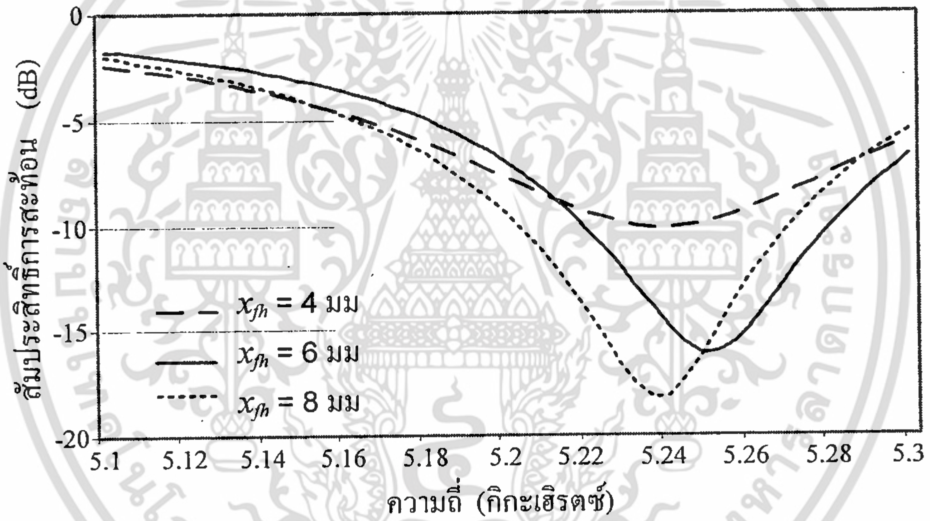
จากในบทที่สองจะสามารถสร้างสายอากาศได้จากแผ่นพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าต่างๆ แต่สำหรับสายอากาศนี้จะใช้แผ่นพิมพ์ FR-4 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็คตริกเท่ากับ 4.4 มีค่าตัวประกอบการสูญเสีย 0.02 มีความสูง h เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ในการออกแบบสายอากาศนี้จะใช้โปรแกรม CST [63] เพื่อจำลองสายอากาศให้ทำงานที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อเลือกใช้แผ่นพิมพ์ FR-4 สายอากาศแต่ละความถี่จะมีขนาด w_l และ w_h สำหรับความถี่ต่ำและความถี่สูงเท่ากับ 60 และ 27.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยระนาบกราวด์ของสายอากาศทั้งสองจะมีขนาดเท่ากับแผ่นแผ่พลังงาน คุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบสำหรับแถบความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ แสดงในรูปที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.2(ก) ได้แสดงค่า S_{11} จากการติดตั้งโพรบในช่วง $8 \leq x_{fl} \leq 20$ มิลลิเมตร เมื่อ x_{fl} อยู่ที่ 20 มิลลิเมตร จะได้ S_{11} ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ความถี่จะเลื่อน



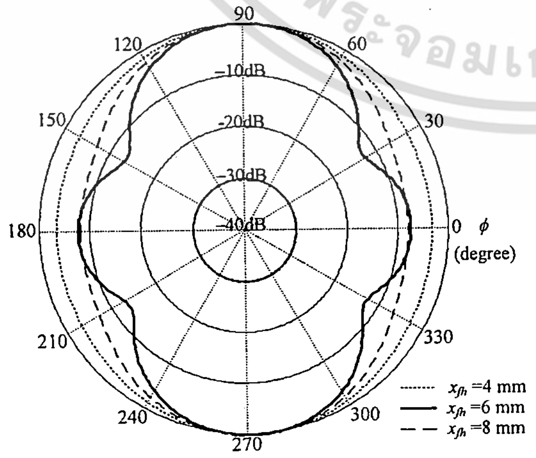
รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของสายอากาศจากการจำลองที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์
(ก) S_{11} (ข) แบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก (xy) (ค) แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้า (zy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

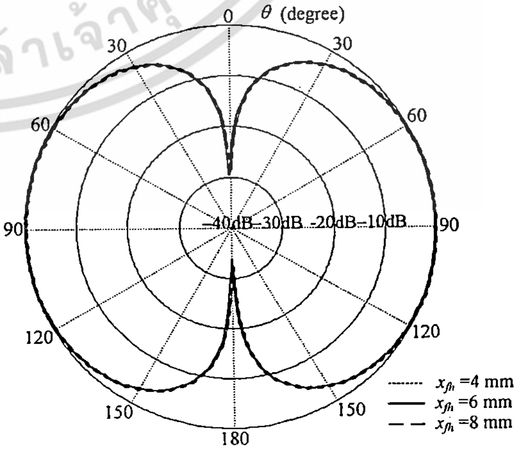
ต่ำลงเล็กน้อยเมื่อ x_{fl} เท่ากับ 8 มิลลิเมตร เมื่อสังเกตที่ S_{11} ค่าต่ำสุด รูปที่ 3.2(ข) แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็กซึ่งใน [48] ได้ระบุว่าโพรบควรอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นเท่ากับ 0.25 ของความกว้างจะทำให้ได้โหมด TM_{020} หรือ TM_{200} และจะได้แบบรูปเป็นแบบสองทิศทาง สำหรับ x_{fl} อยู่ที่ 8 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 0.13 w_l จะได้แบบรูปเป็นลักษณะเกือบเป็นวงกลมเนื่องจากเมื่อตำแหน่งของโพรบที่เข้าใกล้จุดศูนย์กลางจะมีโหมด TM_{020} และ TM_{200} พร้อมกัน ตำแหน่งที่เหมาะสมจึงมีค่าเท่ากับ 14 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ $0.23w_l$ และมีศูนย์ (null) เท่ากับ -17 dB และสำหรับโพรบที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร หรือ $0.33w_l$ จะมีลำคลื่นข้างที่มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ -5 dB เนื่องจากสนามที่หักล้างไม่หมดบนช่องที่ไม่แผ่พลังงานจึงเหลือความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กที่แผ่พลังงานออกมา ส่วนสนามไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 3.2(ค) จะไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง ดังนั้นสามารถที่จะเลือกตำแหน่งติดตั้งโพรบ x_{fl} เท่ากับ 14 มิลลิเมตร จากจุดศูนย์กลางแผ่นแผ่พลังงาน



(ก)



(ข)



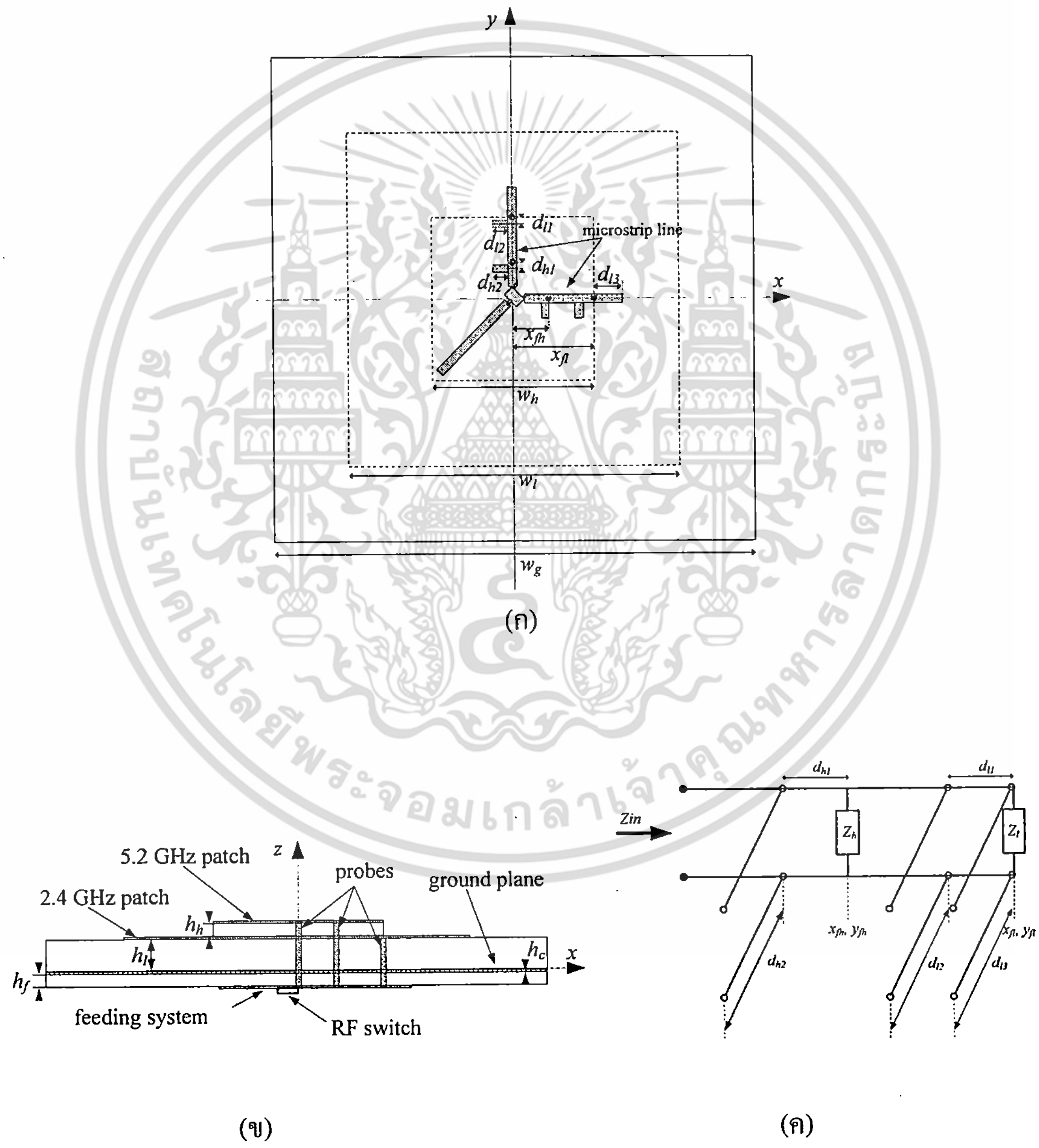
(ค)

รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของสายอากาศจากการจำลองที่ความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์

(ก) S_{11} (ข) แบบรูปในระนาบสนามแม่เหล็ก (*xy*) (ค) แบบรูปในระนาบสนามไฟฟ้า (*zy*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแผ่นพิมพ์ย่านความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ที่มีขนาด w_h เท่ากับ 27.6 มิลลิเมตร ในรูปที่ 3.3(ก) แสดงให้เห็นว่า x_{fh} อยู่ที่ตำแหน่ง 8 มิลลิเมตร จะได้ S_{11} ต่ำที่สุดและเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข) x_{fh} พบว่าโพรบควรอยู่ที่ตำแหน่ง 6 มิลลิเมตร แต่แบบรูปจะไม่ได้ศูนย์ที่ต่ำเนื่องจากขนาดของแผ่นแผ่พลังงานมีขนาดเล็กลงตามความถี่จึงทำให้ผลจากการแผ่พลังงานจากโพรบมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานด้วย ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าในรูปที่ 3.3(ค) ไม่เปลี่ยนตามตำแหน่งของโพรบ เช่นเดียวกับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์



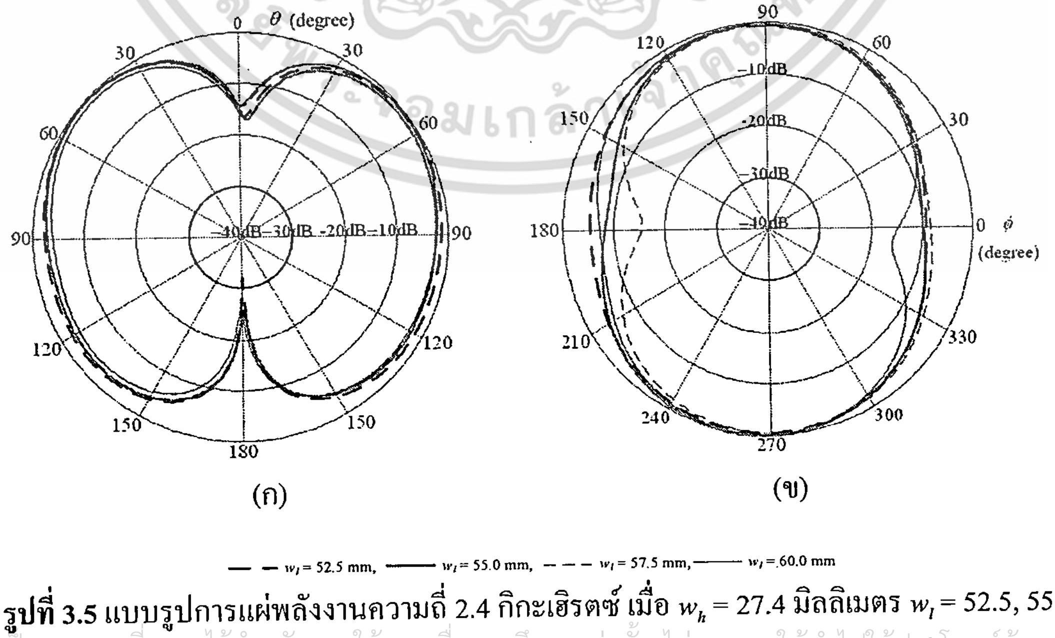
รูปที่ 3.4 ระบบป้อนสัญญาณของสายอากาศ

(ก) ด้านใต้สายอากาศ (ข) ด้านข้างสายอากาศ (ค) วงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

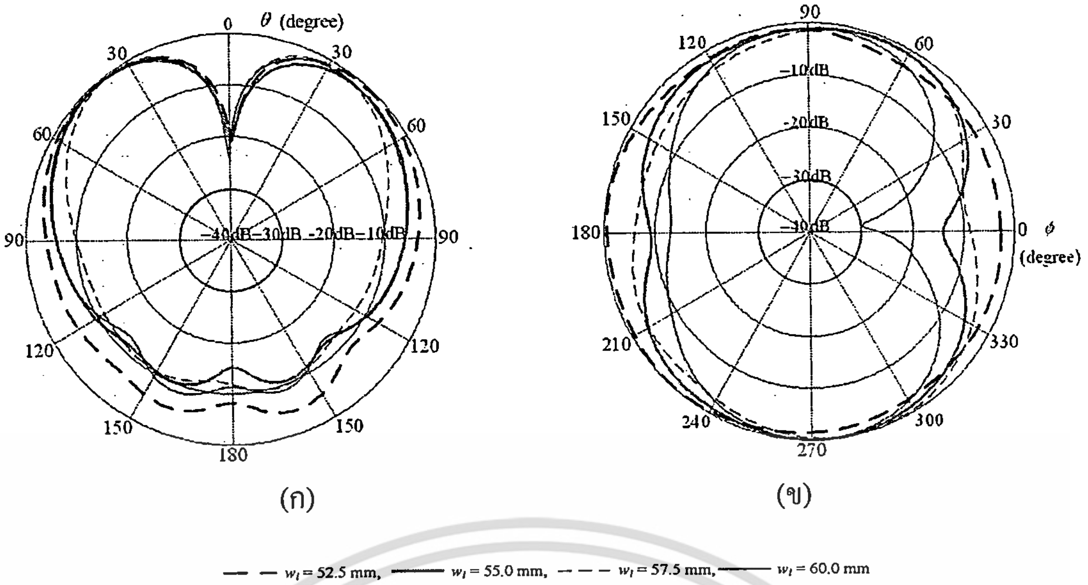
3.2.2 สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง สำหรับสองย่านความถี่

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าตำแหน่งของโพรบจะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าอิมพีแดนซ์ ในหัวข้อนี้จะนำสายอากาศทั้งสองความถี่ออกแบบรวมกันเพื่อให้เป็นสายอากาศสองย่านความถี่โดยมีระบบป้อนสัญญาณทั้งสองความถี่ด้วยสายส่งไมโครสตริปและจะใช้สตับ (stub) แบบเปิดช่วยในการเข้าคู่อิมพีแดนซ์ดังมีโครงสร้างและวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 3.4 โดยเลือกใช้แผ่นพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 มีทองแดงหนา h_c เท่ากับ 0.0035 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนของแผ่นแผ่พลังงานและระนาบกราวด์ แผ่นพิมพ์ของสายอากาศความถี่สูง 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีระนาบกราวด์ติดอยู่บนแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศความถี่ต่ำ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยที่ความสูงของแผ่นพิมพ์ความถี่สูง h_h และความถี่ต่ำ h_l จะเท่ากับ 0.8 และ 1.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะมีความกว้างของแต่ละความถี่เป็น w_h และ w_l เนื่องจากออกแบบสายอากาศนี้สำหรับติดตั้งบนเพดานห้อง ดังนั้นทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานจะถูกปรับให้ทำมุม 45 องศา กับระนาบกราวด์ทั้งสองความถี่ ซึ่งระนาบกราวด์จะมีความกว้าง w_g และติดใต้แผ่นพิมพ์ของสายอากาศความถี่ต่ำและใช้เป็นระนาบกราวด์ร่วมของสายอากาศความถี่สูงและสายอากาศความถี่ต่ำรวมทั้งระบบสายส่งป้อนสัญญาณด้วย ระบบป้อนสัญญาณจะเป็นสายส่งที่สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ที่มีความสูง h_f เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ข) โดยตำแหน่งของโพรบสำหรับความถี่ต่ำทั้งสองตัวอยู่ที่ x_{fl} และ y_{fl} สำหรับความถี่สูงอยู่ที่ x_{fh} และ y_{fh} สวิทช์ความถี่วิทยุที่ใช้เลือกตำแหน่งป้อนสัญญาณจะต่อกับโพรบ โดยผ่านสายส่งไมโครสตริบที่มีสตับแบบเปิดของความถี่ต่ำและความถี่สูงอยู่ที่ตำแหน่ง d_{ll} และ d_{hl} ตามลำดับ และมีสตับแบบเปิดที่มีความยาว d_{l3} ต่อยาวออกไปจากตำแหน่งของโพรบความถี่ต่ำ

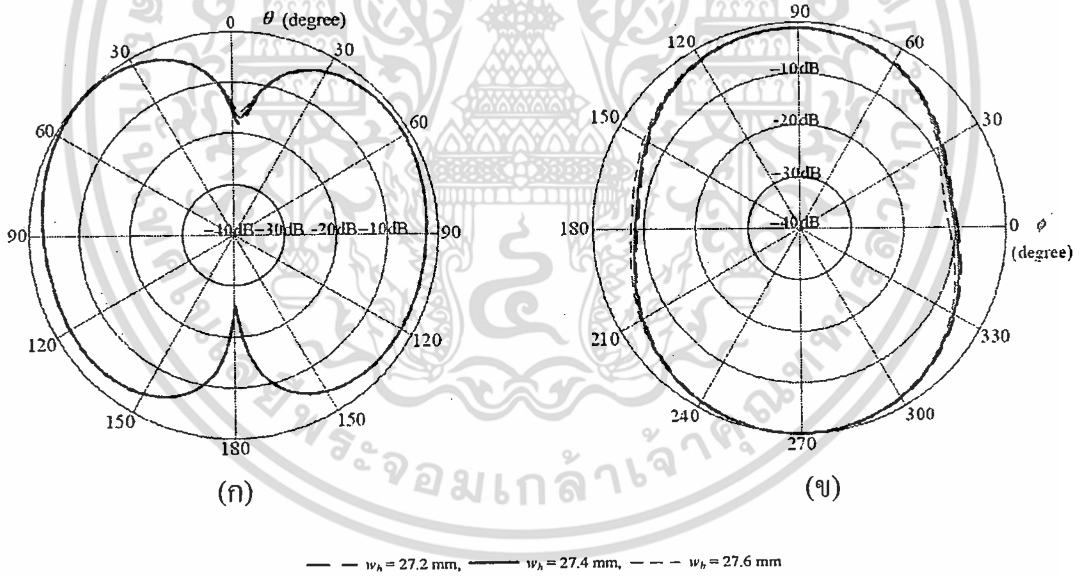


รูปที่ 3.5 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_h = 27.4 มิลลิเมตร w_l = 52.5, 55, 57.5 และ 60 มิลลิเมตร (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (*zy*) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก (*xy*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

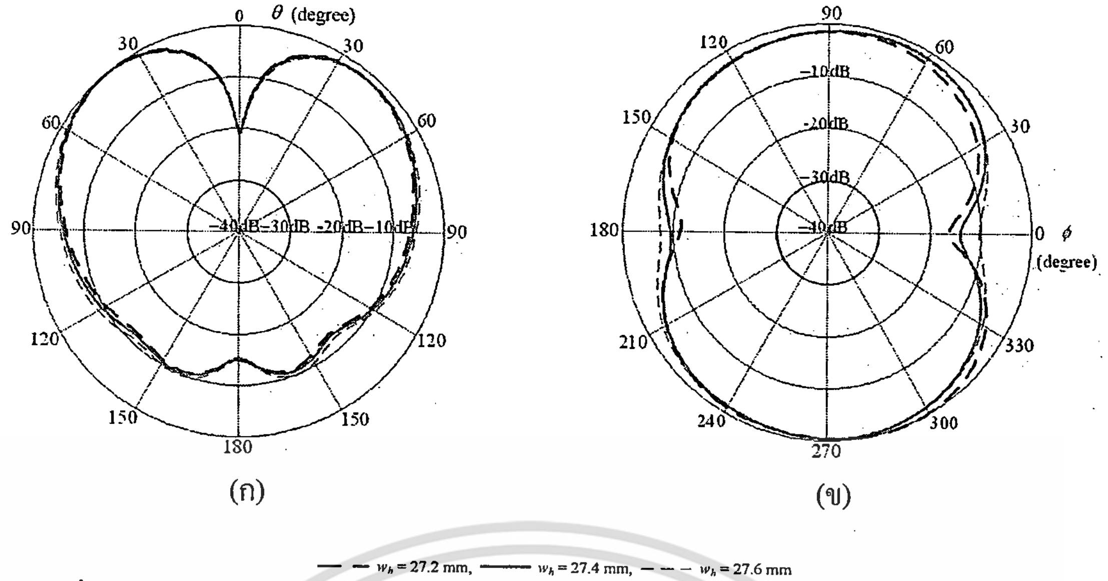


รูปที่ 3.6 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_h = 27.4 มิลลิเมตร, w_l = 52.5, 55, 57.5 และ 60 มิลลิเมตร (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (*zy*) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก (*xy*)



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_l = 55.0 มิลลิเมตร, w_h = 27.2, 27.4 และ 27.6 มิลลิเมตร (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (*zy*) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก (*xy*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แบบรูปการแผ่พลังงานความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อ w_l = 55.0 มิลลิเมตร, w_h = 27.2, 27.4 และ 27.6 มิลลิเมตร (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (*zy*) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก (*xy*)

ตามหลักการในหัวข้อที่ผ่านมาสายอากาศความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ต้องมีความกว้างหนึ่งความยาวคลื่นในค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.4 จะได้ w_l และ w_h เท่ากับ 55.0 มิลลิเมตร และ 27.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ถ้าต้องการให้ลำคลื่นหลักทำมุมกับระนาบกราวด์เป็นมุมเท่ากับ 45 องศา สายอากาศจะต้องมีระนาบกราวด์ที่มีขนาดกว้างมากกว่าขนาดของแผ่นแผ่พลังงานดังใน [44] สายอากาศความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะใช้แผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์เป็นระนาบกราวด์และสะท้อนคลื่น และระนาบกราวด์สำหรับระนาบสะท้อนคลื่นของสายอากาศความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะให้ w_g มีขนาดเป็น $1.5w_l$ หรือเท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้ลำคลื่นหลักที่ทำมุมกับระนาบกราวด์ตามต้องการได้ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่นำมาประกอบรวมกันเป็นสายอากาศทำงานสองความถี่ ในระนาบสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามมุม θ เมื่อกำหนดมุม ϕ เท่ากับ 90 องศา สำหรับระนาบสนามแม่เหล็กจะพิจารณาตามมุม ϕ เมื่อมุม θ อยู่ที่ระนาบ 45 องศา ในการพิจารณาจะกำหนดให้ x_{fl} กับ y_{fl} และ x_{fh} กับ y_{fh} อยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งส่วนสี่ของ w_l และ w_h ตามลำดับ ในรูปที่ 3.5 เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 3.5(ก) และ 3.5(ข) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการปรับความกว้าง w_l จาก 52.5 มิลลิเมตร ถึง 60 มิลลิเมตร หรือ x_{fl}/w_l มีค่าระหว่าง 0.27 ถึง 0.23 เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ 0.25 ของขนาดความกว้างและยังคงได้เป็นโหมด TM_{020} โดยที่กำหนดสายอากาศความถี่สูงให้มีความกว้าง w_h เท่ากับ 27.4 มิลลิเมตร และในการปรับ w_l นี้แบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะแสดงในรูปที่ 3.6 จากการกำหนด x_{fh}/w_h ให้คงที่แล้วปรับ w_l ทำให้ทราบว่าเมื่อ w_l เท่ากับ 55.0 มิลลิเมตร จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีศูนย์ต่ำมากสำหรับความถี่ต่ำ และสำหรับความถี่สูงจะมีศูนย์ต่ำสุดเมื่อ w_l กว้างเท่ากับ 60.0 มิลลิเมตร จากการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ซอง (envelope correlation) ตามใน [27] แบบ

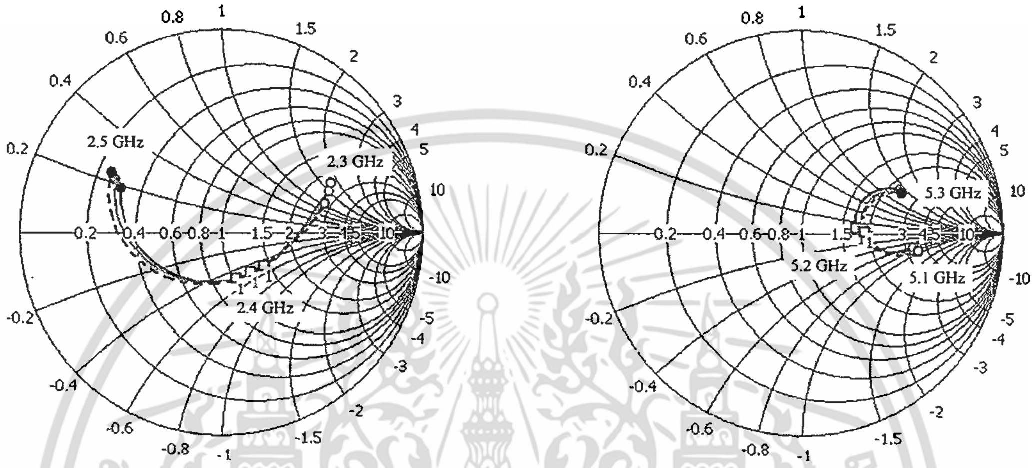
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์หรือการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปการแผ่พลังงานความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าเท่ากับ 0.056 และ 0.008 ตามลำดับ ดังนั้นจึงควรให้ขนาดของสายอากาศความถี่ต่ำมี w_l เท่ากับ 55.0 มิลลิเมตร ในการปรับค่าความกว้างของสายอากาศความถี่สูง w_h เพื่อพิจารณาผลแบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ จะเห็นว่าการเปลี่ยน w_h จะไม่มีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของความถี่ต่ำแต่จะมีผลต่อแบบรูปของความถี่สูง ซึ่งการปรับ w_h ให้มีขนาด 27.2 มิลลิเมตร 27.4 มิลลิเมตร และ 27.6 มิลลิเมตร สำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 44.3-j24.3 โอห์ม 45.1-j25.7 โอห์ม และ 44.9-j28.5 โอห์ม ตามลำดับ และ S_{11} เท่ากับ -11.7 dB -11.5 dB และ -10.7 dB ตามลำดับ ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามการเปลี่ยนค่า w_h เท่ากับ 27.2 มิลลิเมตร 27.4 มิลลิเมตร และ 27.6 มิลลิเมตร จะมีค่าเท่ากับ 73.9-j22.7 โอห์ม 69.7-j4.3 โอห์ม และ 66.9+j15.5 โอห์ม ตามลำดับ ส่วนค่า S_{11} เท่ากับ -12.6 dB, -15.6 dB และ -13.5 dB ตามลำดับ จะเห็นว่า w_h ที่เท่ากับ 27.4 มิลลิเมตร ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่สุด

ต่อมาจะพิจารณาสตับเพื่อการเข้าคู่อิมพีแดนซ์สำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยได้ปรับ d_{l3} ให้มีค่า 2.5 มิลลิเมตร 3.5 มิลลิเมตร และ 4.5 มิลลิเมตร ค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่า 54.5-j27.9 โอห์ม 45.1-j25.7 โอห์ม และ 35.4-j21.9 โอห์ม ตามลำดับ สำหรับความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่า 80.5-j23.5 โอห์ม 69.6-j4.3 โอห์ม และ 41.7-j12.5 โอห์ม ตามลำดับ และมีค่า S_{11} จากการปรับ d_{l3} ทั้งสามค่า ของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะได้ -11.6 dB -11.5 dB -10.9 dB และ -10.6 dB -15.6 dB -16.5 dB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า d_{l3} ที่เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร มีค่าเหมาะสมที่สุด จากนั้นกำหนดสตับของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ให้อยู่ที่ตำแหน่ง d_{h1} เท่ากับ 0 มิลลิเมตร และมีความยาว d_{h2} เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร โดยให้สตับความถี่ต่ำ d_{l1} อยู่ที่ตำแหน่ง 2.0 มิลลิเมตร เพื่อที่จะปรับขนาด d_{l2} ตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 มิลลิเมตร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อ d_{l2} มีความยาวมากขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ลดลงอย่างชัดเจน ขณะที่ค่ารีแอคแตนซ์จะไม่เปลี่ยน และสำหรับความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนเล็กน้อย แต่ค่ารีแอคแตนซ์จะไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นได้เปลี่ยนค่า d_{l1} มาเป็น 2.5 มิลลิเมตร จะได้ผลเช่นเดียวกัน ทำให้ทราบว่า d_{l1} จะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากสำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสตับ d_{l1} อยู่ที่ตำแหน่ง 2.0 มิลลิเมตร และมีความยาว d_{l2} เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร จะมีค่าอิมพีแดนซ์ของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 51.9+j25.3 โอห์ม และ 95.9+j5 โอห์ม ตามลำดับ จากตำแหน่งและขนาดที่ได้จะคงที่ไว้และปรับสตับของความถี่สูงและแสดงในรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าถ้าเพิ่ม d_{h2} จะมีผลให้ค่ารีแอคแตนซ์ของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ลดลง แต่การเปลี่ยน d_{h1} นั้นจะไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ สำหรับค่า d_{h2} ยาวเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ S_{11} เท่ากับ -10.5 dB และ -25.3 dB ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ และ d_{h2} เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จะทำให้ได้ S_{11} เท่ากับ -11.5 dB และ -15.7 dB สำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

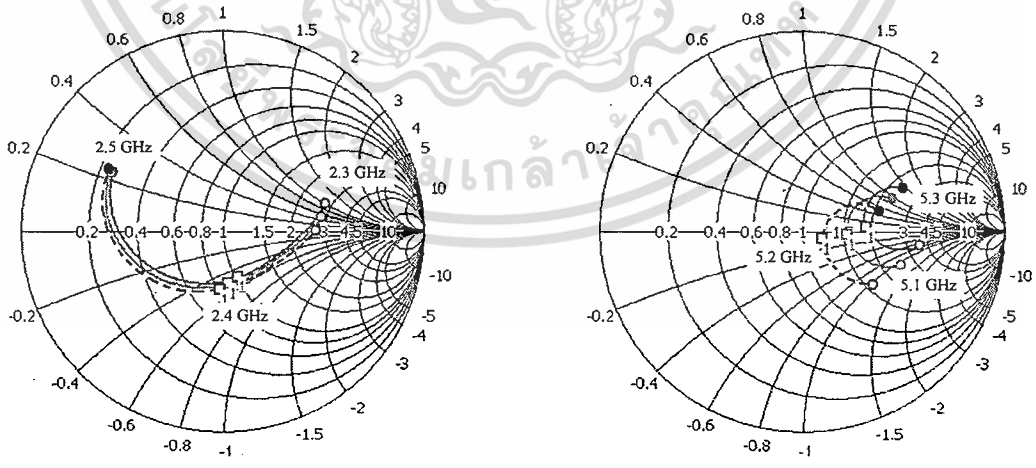
ถึงแม้ว่า S_{11} ของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อ d_{h2} เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร และ S_{11} ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่า d_{h2} มีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร เป็นค่าที่เหมาะสม ในขณะที่ d_{h1} เท่ากับ 0 มิลลิเมตร และ d_{h2} เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 45.1-j25.7 โอห์ม และ 69.7-j4.2 โอห์ม ตามลำดับ



(ก) (ข)

—— d_{l2}= 0.5 mm, —— d_{l2}= 1.5 mm, ----- d_{l2}= 2.5 mm

รูปที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์ d_{l1} = 2 มิลลิเมตร (ก) 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 5.2 กิกะเฮิรตซ์



(ก) (ข)

—— d_{h2}= 0.5 mm, —— d_{h2}= 1.5 mm, ----- d_{h2}= 2.5 mm

รูปที่ 3.10 ค่าอิมพีแดนซ์ เมื่อ d_{h1} =0 มิลลิเมตร (ก) 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 5.2 กิกะเฮิรตซ์

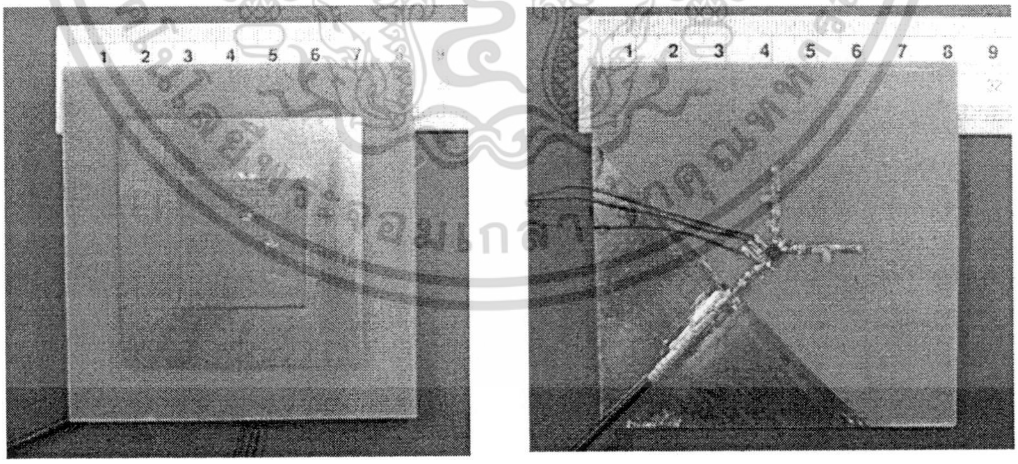
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่

สายอากาศที่เสนอนี้ได้ถูกนำมารวมกันด้วยวิธีการดังในหัวข้อที่ผ่านมาจะมีขนาดและตำแหน่งต่างๆในตารางที่ 3.1 และสายอากาศที่สร้างได้แสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งรูปที่ 3.11(ก) เป็นด้านหน้าที่มีแผ่นแผ่พลังงาน และรูปที่ 3.11(ข) เป็นระบบป้อนสัญญาณ

ตารางที่ 3.1 ขนาดของส่วนต่างๆของสายอากาศ

สัญญลักษณ์	มิลลิเมตร	สัญญลักษณ์	มิลลิเมตร
w_l	55.0	w_h	27.4
h_l	1.6	h_h	0.8
x_{fl} , y_{fl}	13.5	x_{fh} , y_{fh}	6.5
d_{l1}	2.0	d_{h1}	0
d_{l2}	2.5	d_{h2}	1.5
d_{l3}	3.5	h_f	0.8
		w_g	80.0



(ก) (ข)

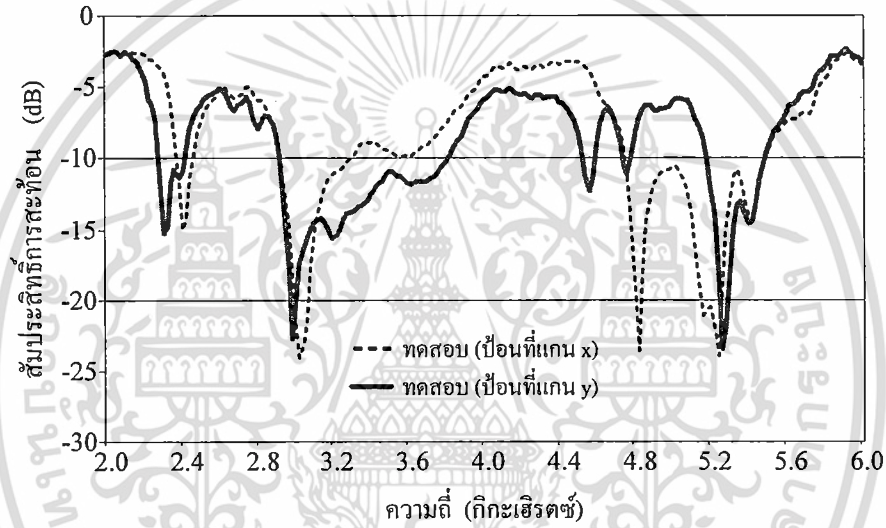
รูปที่ 3.11 รูปถ่ายสายอากาศต้นแบบ

(ก) ด้านหน้าที่แผ่พลังงาน (ข) ด้านหลังระบบป้อนสัญญาณ

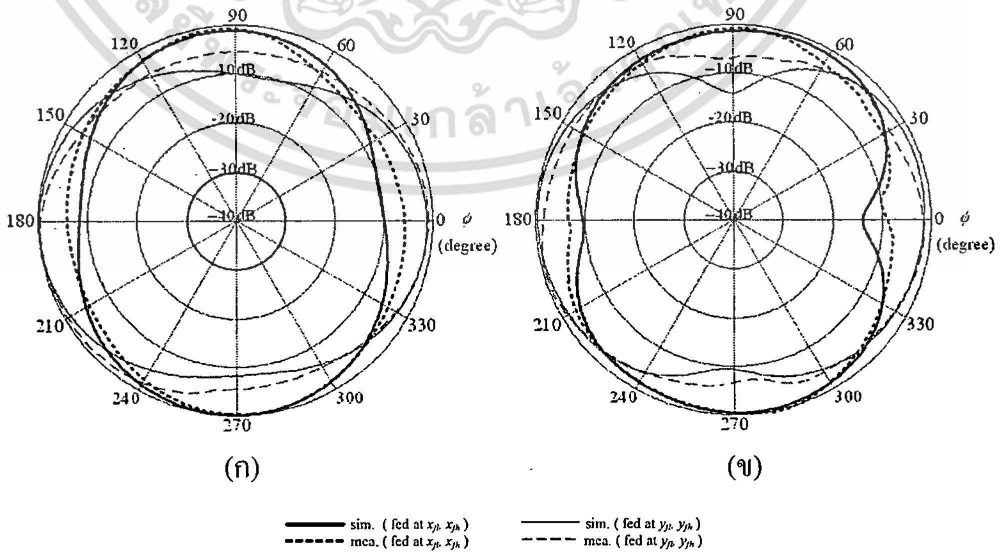
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 คุณสมบัติด้านอิมพีแดนซ์

ได้ทดสอบการป้อนสัญญาณของสายอากาศต้นแบบที่สร้างโดยแสดงเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะมีค่า S_{11} ที่ต่ำกว่า -10 dB ในช่วง 2.28-2.43 , 5.18-5.48 กิกะเฮิรตซ์ และ 2.38-2.46, 4.76-5.48 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อป้อนสัญญาณที่โพรบ x และ y ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่จะใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ นอกจากนี้จะเห็นว่า S_{11} จะมีค่าต่ำที่ความถี่ 3.0 และ 4.8 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเกิดจากโหมดที่ 3 และโหมดที่ 4 ตามลำดับในตัวสายอากาศความถี่ต่ำ โหมดที่เกิดขึ้นนี้เนื่องจากได้ออกแบบสายอากาศให้มีขนาดหนึ่งความยาวคลื่นในแผ่นพิมพ์จึงทำให้เกิดโหมดสูงของความถี่สูงกว่าขึ้นมาได้ แต่แบบรูปการแผ่พลังงานจะไม่เป็นแบบสองทิศทางซึ่งไม่ได้แสดงในที่นี้



รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11})



รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

(ก) 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ข) 5.2 กิกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 คุณสมบัติด้านการแผ่พลังงาน

ได้ทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในห้องทดสอบที่ป้องกันคลื่นสะท้อนและสนามรบกวนจากภายนอกได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 3.13 เส้นทึบและเส้นประเป็นผลจากการจำลองและผลจากการทดสอบตามลำดับ แบบรูปที่ได้จะสอดคล้องกันทั้งของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ดังในรูปที่ 3.13(ก) และรูปที่ 3.13(ข) ตามลำดับ จะมีบางส่วนที่ไม่ตรงกันเนื่องจากมีส่วนของสายนำสัญญาณที่ใช้ในระบบที่ไม่ได้รวมอยู่ในการจำลอง จากสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในงานวิจัยที่ [27] ซึ่งมีศูนย์สูงกว่า -10 dB และมีสหสัมพันธ์ซองเท่ากับ 0.06 สำหรับสายอากาศที่นำเสนอนี้ทำงานสองย่านความถี่สายอากาศ อีกความถี่หนึ่งจะเป็นส่วนที่รบกวนการแผ่พลังงานของสายอากาศอีกความถี่หนึ่ง ซึ่งจะมีค่าสหสัมพันธ์ซองของสายอากาศที่มีศูนย์ -5 dB เท่ากับ 0.24 และ 0.16 ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ แต่ยังมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้คือ 0.49 ดังที่แสดงใน [44] สายอากาศนี้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ส่วนสวิทช์ความถี่วิทยุจะมีการสูญเสียเท่ากับ 1.0 dB และ 1.5 dB สำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ อัตราขยายของสายอากาศที่ได้คือ 2.7 dBi และ 2.4 dBi สำหรับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นเดิมจะมีอัตราขยายเท่ากับ 6.2 dBi แต่ทำงานที่ย่านความถี่ 1.9 กิกะเฮิรตซ์ [27] และสร้างด้วยแผ่นพิมพ์ FR-4 เช่นเดียวกัน นอกจากการสูญเสียที่ความถี่ 1.9 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่าน้อยกว่าที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ แล้วศูนย์ของสายอากาศยังมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศที่นำเสนอนี้จึงมีค่าต่ำกว่า

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสองย่านความถี่ โดยการใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นของแต่ละความถี่ประกอบกันเป็นสายอากาศที่ทำงานสำหรับย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งแต่ละตัวเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสมีความกว้างหนึ่งความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก สายอากาศความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะติดตั้งอยู่บนสายอากาศความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยที่สายอากาศความถี่ต่ำจะมีระนาบกราวด์จัตุรัสที่มีขนาด $1.5\lambda_d$ (ของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์) ระบบป้อนสัญญาณประกอบด้วยสตับสองตำแหน่งสำหรับความถี่ต่ำ ส่วนความถี่สูงใช้สตับหนึ่งตำแหน่ง การทดสอบสายอากาศต้นแบบได้ S_{11} เท่ากับ -15 dB และ-20 dB สำหรับความถี่ต่ำและสูงตามลำดับ แบบรูปการแผ่พลังงานของทั้งสองความถี่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สองทิศทาง สายอากาศนี้จะใช้สำหรับแอกเซสพอยท์ของระบบโครงข่ายไร้สายสองย่านความถี่ซึ่งจะแสดงการประยุกต์ใช้งานสายอากาศนี้บทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น

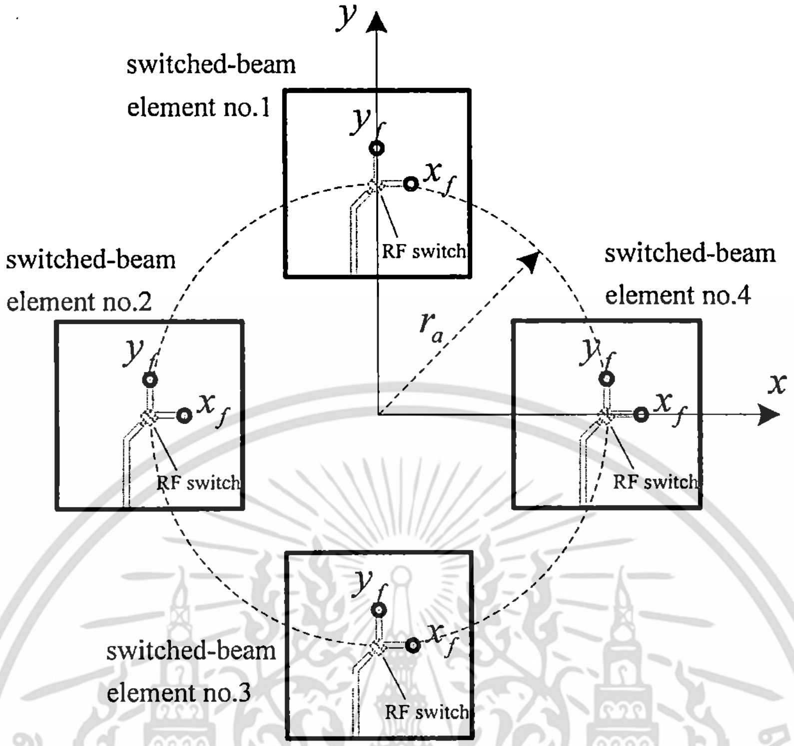
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์คลื่น ซึ่งแต่ละองค์ประกอบนั้นเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างดังเสนอในบทที่ 2 แต่จะออกแบบใช้งานสำหรับความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับทิศทางลำคลื่นใช้งานบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ การปรับทิศทางลำคลื่นนั้นทำได้โดยการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบและการเลื่อนเฟสของแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากการออกแบบนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับ จึงต้องพิจารณาถึงผลของการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบด้วย ซึ่งจะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับจึงต้องออกแบบในขณะที่สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นนั้นเป็นองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับขณะใช้งานเพื่อที่จะรวมผลของการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียงไว้ด้วย จากนั้นได้นำเสนอการจัดโครงสร้างของแถวลำดับอีกลักษณะหนึ่งซึ่งจะสะดวกในการปรับตัวแปรในโครงสร้างสายอากาศและใช้ขนาดพื้นที่รวมของสายอากาศน้อยลง เมื่อออกแบบสายอากาศได้แล้วจึงสร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นได้แก่สัมประสิทธิ์การสะท้อนเพื่อที่นำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

4.1 สายอากาศแถวลำดับที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น

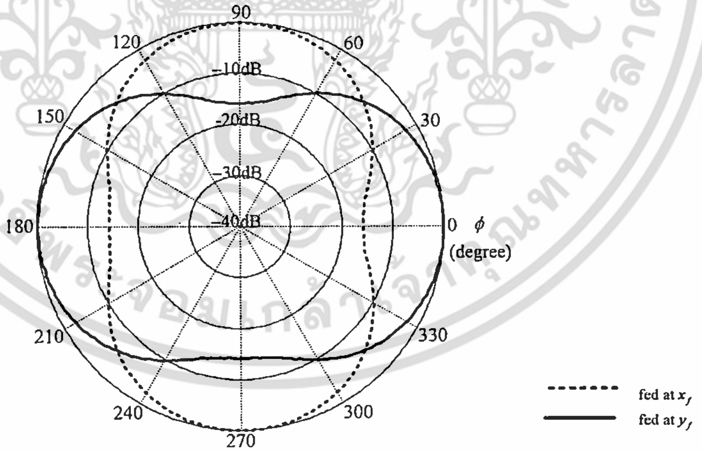
ในหัวข้อนี้จะนำสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในบทที่ 2 ออกแบบแป็นสายอากาศปรับทิศทางโดยการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบร่วมกับการเลื่อนเฟสที่ป้อนของแต่ละองค์ประกอบ โครงสร้างการจัดวางของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบในแถวลำดับนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับในงานวิจัย [27], [49] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการจัดวางในลักษณะแถวลำดับแบบวงกลม โดยการจัดวางจะอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางของแต่ละองค์ประกอบสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นองค์ประกอบที่ 1, 2, 3 และ 4 วางอยู่ที่มุม 90, 180, 270 และ 360 องศาตามลำดับ บนระนาบ xy และวางแต่ละองค์ประกอบห่างจากจุดศูนย์กลางแถวลำดับวงกลมหรือรัศมีของแถวลำดับกำหนดเป็น r_a ซึ่งในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับนี้จะต้องพิจารณารัศมีของแถวลำดับเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศเพื่อใช้สำหรับย่านความถี่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ จะจำลองสายอากาศโดยใช้โปรแกรมช่วยคำนวณและวิเคราะห์ ซึ่งสายอากาศจะสร้างจากแผ่นพิมพ์ที่วัสดุฐานรองมีความสูงเท่ากับ 1.58 มิลลิเมตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10.0 และมีแทนเจนท์การสูญเสีย (tan δ) เท่ากับ 0.0035 จากหลักการในบทที่ 2 สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบจะมีขนาดความกว้างเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.5 มิลลิเมตร และมีตำแหน่งป้อนสัญญาณหรือโพรบ x_f และ y_f ห่างจากศูนย์กลางของแผ่นแผ่พลังงานเท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 สายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น



รูปที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบจากการจำลอง

ในการพิจารณารัศมีที่จะวางสายอากาสวิทช์ลำคลื่นในแถวลำดับวงกลม เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถชี้ทิศทางโดยมีลำคลื่นหลังและลำคลื่นข้างที่ต่ำ ดังนั้นจึงได้ปรับขนาดรัศมีของแถวลำดับโดยการจำลองเพื่อให้ได้รัศมีที่เหมาะสม ขนาดรัศมีที่พิจารณามีสามค่าด้วยกันได้แก่ $0.3\lambda_0$ $0.4\lambda_0$ และ $0.5\lambda_0$ และในการพิจารณาได้กำหนดให้ลำคลื่นหลักชี้ไปยังมุม θ เท่ากับ45 และมุม ϕ เท่ากับ 45 องศา โดยสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นประกอบที่ 1, 2, 3 และ 4 จะ

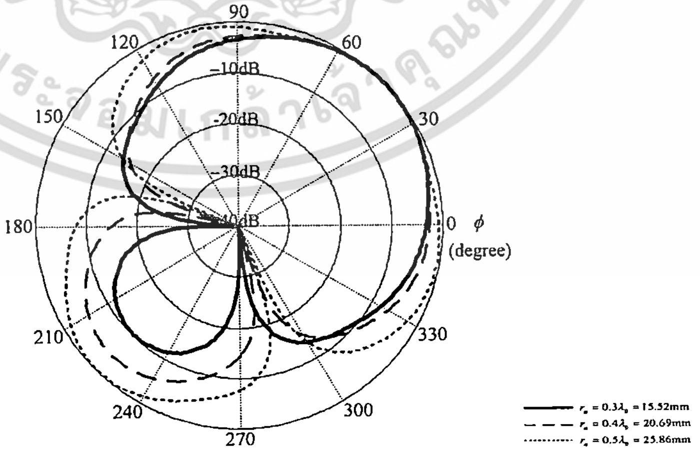
เอกสารนี้มีไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิทช์ลำคลื่นให้อยู่ในแนวแกน y, y, x และ x ตามลำดับ และมีค่าการเลื่อนเฟสที่ของแต่ละองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการเลื่อนเฟสของแต่ละองค์ประกอบ

r_a	องค์ประกอบที่ 1	องค์ประกอบที่ 2	องค์ประกอบที่ 3	องค์ประกอบที่ 4
$0.3\lambda_0$	-54°	54°	54°	-54°
$0.4\lambda_0$	-72°	72°	72°	-72°
$0.5\lambda_0$	-90°	90°	90°	-90°

แบบรูปการแผพลังงานจากการจำลองเพื่อพิจารณารัศมีของแถวลำดับได้แสดงในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ารัศมีที่กำหนดทั้งสามค่าสามารถชี้ทิศทางลำคลื่นหลักไปที่มุม θ เท่ากับ45 และมุม ϕ เท่ากับ 45 องศา แต่ค่ารัศมีของแถวลำดับที่เหมาะสมนั้นต้องมีลำคลื่นข้างและลำคลื่นหลังที่ต่ำ ซึ่งจากแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปที่ 4.3 นั้นแสดงให้เห็นว่ารัศมีแถวลำดับเท่ากับ $0.3\lambda_0$ จะมีการแผ่พลังงานที่มีลำคลื่นหลังต่ำที่สุดคือ -10 dB และมีความกว้างลำคลื่นของลำคลื่นหลักที่แคบที่สุด ส่วนรัศมี $0.4\lambda_0$ และ $0.5\lambda_0$ นั้นจะมีลำคลื่นหลังที่สูงและลำคลื่นหลักที่กว้าง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อรัศมีของแถวลำดับที่มีขนาดมากขึ้นจะทำให้ลำคลื่นหลังสูงและลำคลื่นหลักที่กว้างมากขึ้น สำหรับขนาดของรัศมีที่มีค่าน้อยกว่า $0.3\lambda_0$ ไม่ได้พิจารณานั้นเนื่องจากโครงสร้างจริงจะไม่สามารถสร้างเป็นแถวลำดับได้เพราะแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบจะทับซ้อนกัน เพราะฉะนั้นรัศมีของแถวลำดับวงกลมที่เหมาะสมในการสร้างเป็นสายอากาศปรับทิศทางเลื่อนเฟสด้วยองค์ประกอบที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นจะมีขนาดเท่ากับ $0.3\lambda_0$

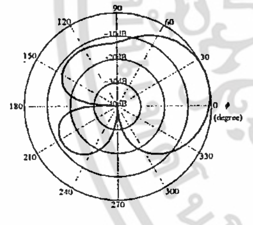
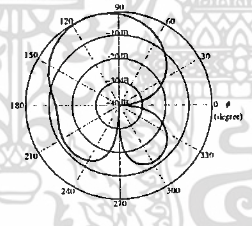
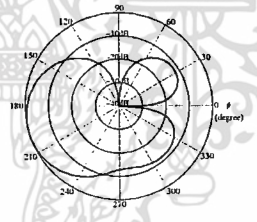
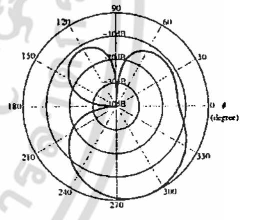
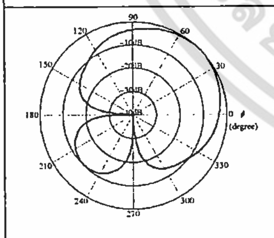
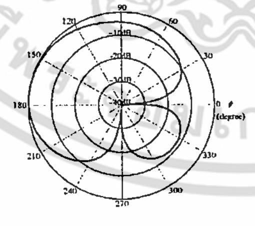
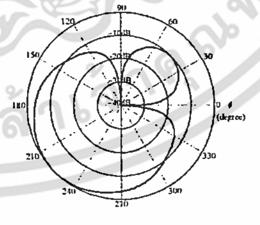
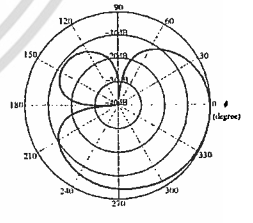
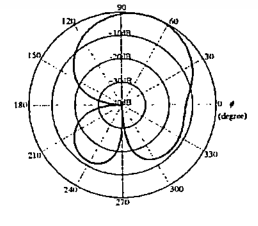
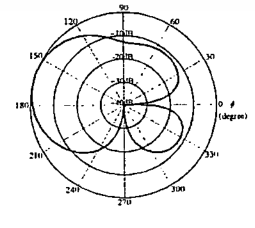
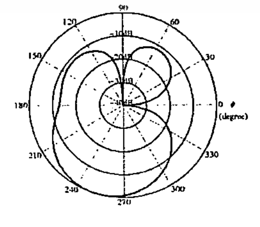
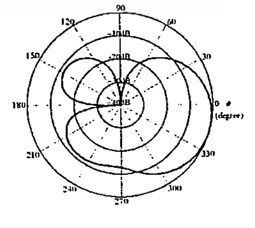


รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่ลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้องค์ประกอบลำดับสวิทช์เมื่อปรับค่ารัศมีของแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับปรับทิศทางเลื่อนเฟสด้วยองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นนี้จะต้องสามารถชี้ทิศทางได้รอบตัวตามมุม ϕ โดยการเลื่อนเฟส (เพียงหนึ่งบิต เฟสบวกหรือลบ) ที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบร่วมกับการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ เมื่อปรับค่าการเลื่อนเฟสและลำคลื่นของแต่ละองค์ประกอบจะสามารถได้แบบรูปการแผ่พลังงาน 12 แบบรูป ที่ชี้ทิศทางได้ครอบคลุมในมุมระนาบดังแสดงในตารางที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้นี้ได้จากการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานเท่านั้นแต่ไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญอื่นๆ ซึ่งในการสร้างสายอากาศให้ใช้งานได้จะต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย และเนื่องจากสายอากาศที่สร้างนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะได้รับผลการเหนี่ยนนำมาจากองค์ประกอบข้างเคียงด้วย ซึ่งจะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละตัว ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงผลของการเหนี่ยวนำจึงได้พิจาณาค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานจากการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบในหัวข้อต่อไป

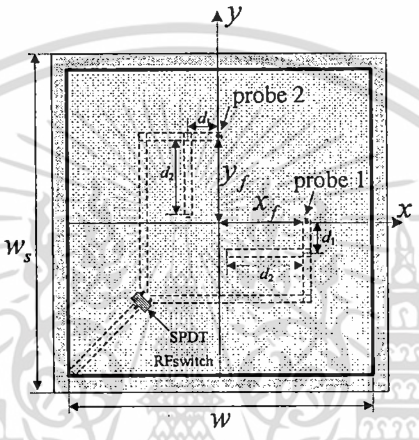
ตารางที่ 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเลื่อนเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น

ค่าการเลื่อนเฟส			
-54°, 54°, 54°, and -54°	-54°, -54°, 54°, and 54°	54°, -54°, -54°, and 54°	54°, 54°, -54°, and -54°
 xxxx	 yyyy	 xxxx	 yyyy
 yyxx	 yxyx	 yyxx	 yxyx
 yyyy	 yxxx	 yyyy	 yxxx

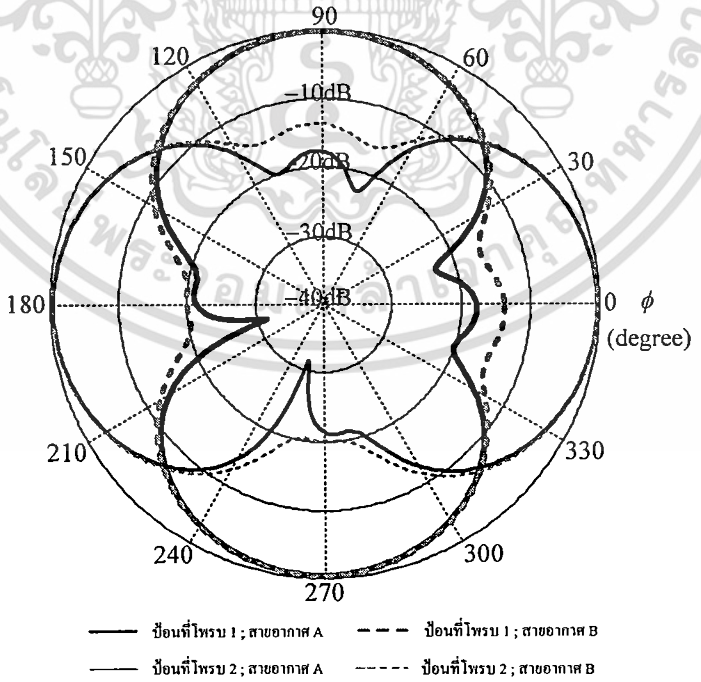
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของการเหนี่ยวนำของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในแถวลำดับ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นพร้อมกับค่าอิมพีแดนซ์และผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียง [64] โดยเริ่มจากสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานและมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมในการใช้งานซึ่งจะมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับที่จะสร้างขึ้นโดยมีการป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ซึ่งส่งสัญญาณผ่านสายส่งไมโครสตริปและมีสตับสายส่งไมโครสตริปเป็นตัวปรับค่าอิมพีแดนซ์ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบที่ออกแบบพร้อมกับโพรบป้อนสัญญาณผ่านสายส่งไมโครสตริปและสตับปรับค่าอิมพีแดนซ์ (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

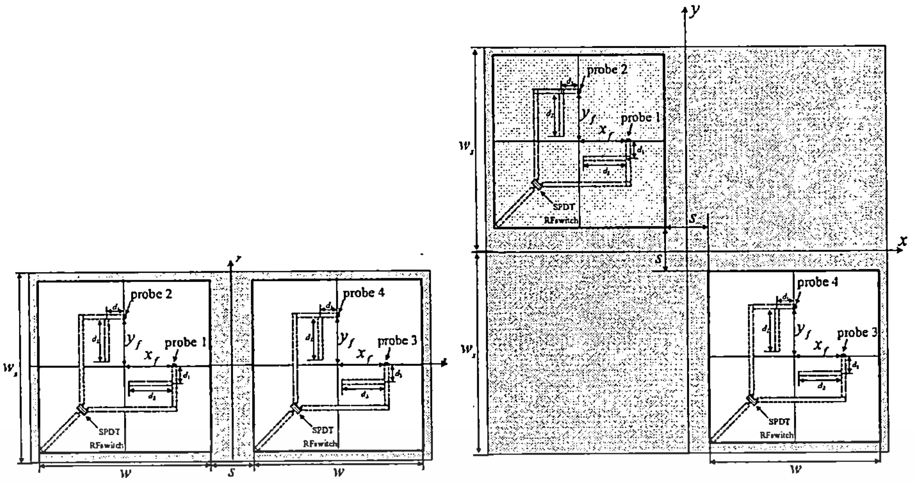
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น

สายอากาศ	สตับ (มิลลิเมตร)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	S_{11}, S_{22} (dB)	S_{21} ,S_{12} (dB)	D_0(dBi)
A	d_1=0.9, d_2=3	43.9 – j18.9	-16.2	-17	5.15
B	d_1=0.6, d_2=3.4	50.9 - j1.7	-26.67	-13.4	4.9

จากรูปที่ 4.4 (ก) เป็นรูปสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่จำลองโดยใช้โปรแกรม CST สำหรับย่านความถี่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ที่วัสดุฐานรองมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10 แผ่นพิมพ์ที่ใช้สร้างสายอากาศและระบบป้อนสัญญาณจะมีความสูงเท่ากับ 1.58 และ 0.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขนาดความกว้างของแผ่นแผ่พลังงานจะมีความกว้าง w เท่ากับ 15.8 มิลลิเมตร ป้อนสัญญาณด้วยโพรบซึ่งผ่านสายส่งไมโครสตริปและมีสตับสายส่งไมโครสตริปช่วยปรับค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งสร้างบนแผ่นพิมพ์ด้านล่าง สายส่งไมโครสตริปให้มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม แบบรูปการแผ่พลังงานและค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งสตับ d_1 และความยาวสตับ d_2 ในการปรับ d_1 และ d_2 ได้แบบรูปและค่าอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 4.4 (ข) และตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติการแผ่พลังงาน คุณสมบัติอิมพีแดนซ์ที่ได้รับผลการเหนี่ยวนำระหว่างโพรบ พบว่าสายอากาศ B จะมีค่าการสูญเสียสะท้อน S_{11} และ S_{22} ที่ต่ำมากและมีค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์ม เมื่อพิจารณารวมกับแบบรูปที่ต้องการเพื่อได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงและการแผ่พลังงานในทิศทางอื่นที่ต่ำ รวมทั้งต้องให้มีการเหนี่ยวนำระหว่างโพรบ S_{21} และ S_{12} มีค่าที่ต่ำ จะเห็นว่าถึงแม้สายอากาศ A จะมีการสูญเสียย้อนกลับที่สูงกว่าสายอากาศ B ก็ตาม ซึ่งมีค่าเท่ากับ -16 dB ถือว่าไม่สูงมากและสามารถทำงานได้และยังมีค่าการเหนี่ยวนำระหว่างโพรบที่ต่ำกว่าและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่า ดังนั้นในการพิจารณาผลการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับเลื่อนเฟสนั้นจะใช้สายอากาศที่มีโครงสร้างของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น A เป็นองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับ

การพิจารณาผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียงนั้น จะแบ่งส่วนในการพิจารณาจากการจัดวางสายอากาศตามโครงสร้างแถวลำดับในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีองค์ประกอบข้างเคียงสองลักษณะได้แก่องค์ประกอบด้านข้างต่อด้านข้าง (side-by-side) และองค์ประกอบด้านขนานในแนวแทยง (parallel-in-echelon) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และรูปที่ 4.5 (ข) ตามลำดับ ตัวแปรในการปรับค่าเพื่อพิจารณานั้นคือช่วงห่างระหว่างขอบแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ (S) ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 25.2 มิลลิเมตร ตามโครงสร้างแถวลำดับในรูปที่ 4.1 แต่แบบด้านข้างต่อด้านข้างจะเริ่มต้นที่ 3.2 มิลลิเมตรเนื่องจากแผ่นแผ่พลังงานทั้งสององค์ประกอบไม่สามารถชิดติดกันได้

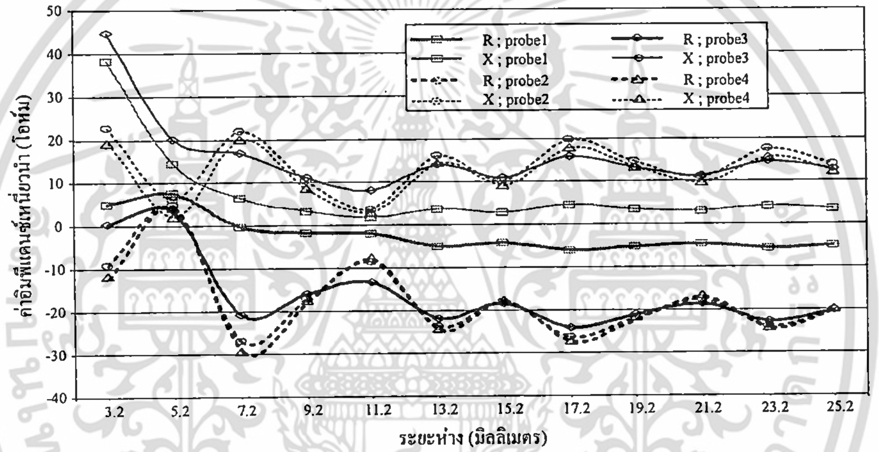
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



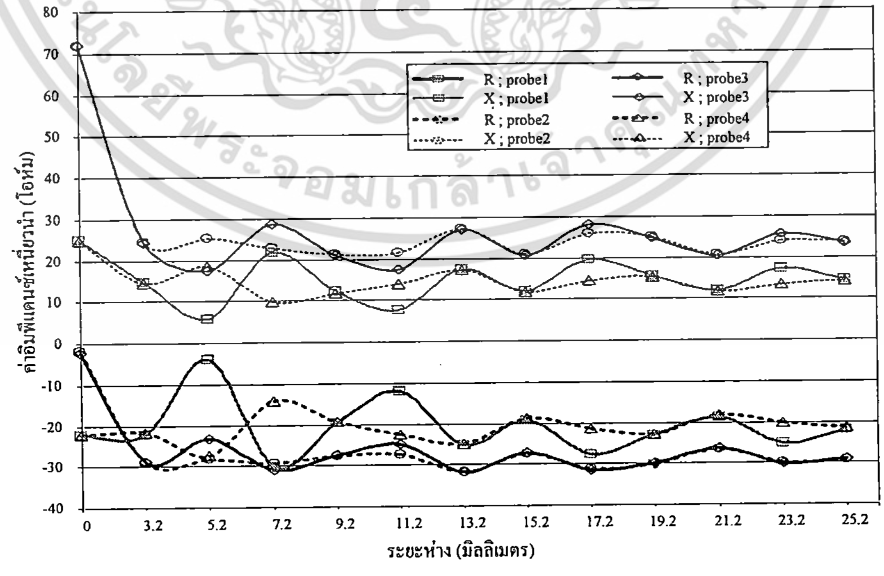
(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 สายอากาศที่ใช้ทดสอบผลการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบ

(ก) ด้านข้างต่อด้านข้าง (ข) ด้านขนานในแนวแทยง



(ก)



(ข)

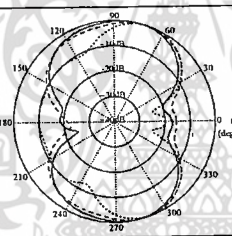
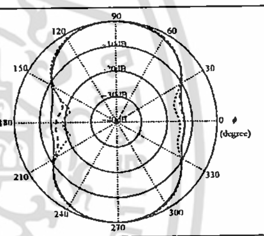
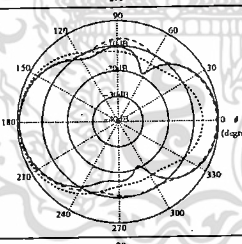
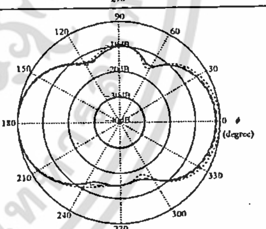
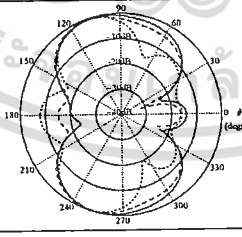
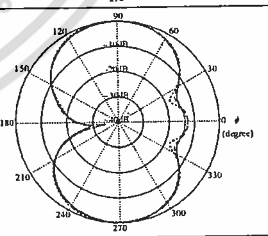
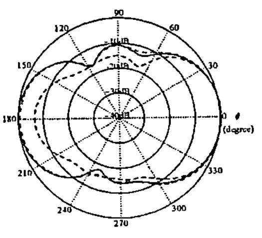
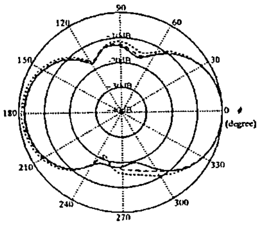
รูปที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์จากการเหนี่ยวนำระหว่างองค์ประกอบตามระยะห่างต่างๆ

(ก) จากองค์ประกอบด้านข้างต่อด้านข้าง (ข) จากองค์ประกอบด้านขนานในแนวแทยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ใช้ในเชิงพาณิชย์หรือในทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

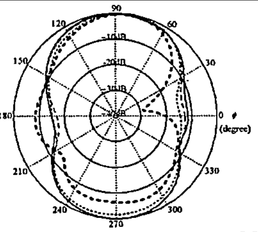
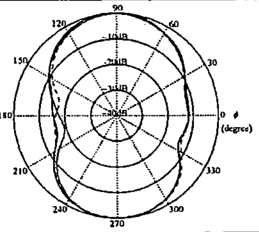
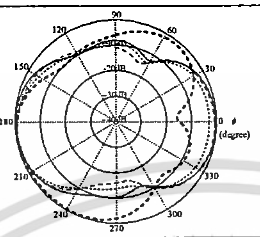
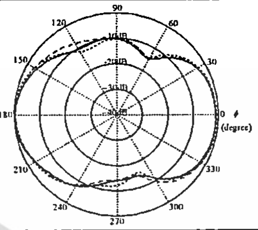
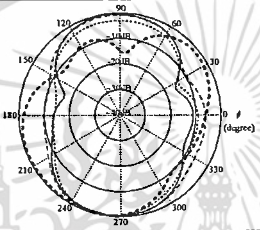
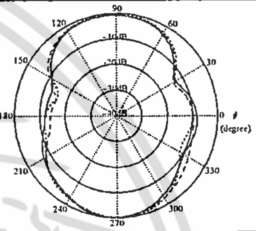
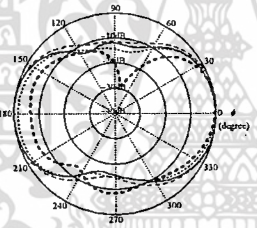
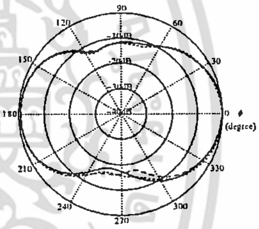
เมื่อเปลี่ยนช่วงห่าง S ค่าอิมพิแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงไป โดยการป้อนสัญญาณให้โพรบที่ต้องการพิจารณา ส่วนอีก 3 โพรบที่เหลือนั้นจะต่อกับตัวต้านทาน 50 โอห์ม ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ปรากฏยังโพรบที่ป้อนสัญญาณนั้นจะเทียบกับ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ A หรือสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่างไปนั้นเป็นผลจากการที่มีองค์ประกอบข้างเคียงเกิดการเหนี่ยวนำ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่างไปจากเดิมในแบบที่เป็นองค์ประกอบด้านข้างต่อด้านข้างและแบบองค์ประกอบขนานในแนวแทยงได้แสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ รูปที่ 4.6 (ข) ตามลำดับ จากทั้งสองกรณีค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะเห็นว่าเมื่อแผ่นแผ่พลังงานอยู่ใกล้กันจะทำให้อิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปมากเนื่องจากเกิดการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียงมาก และเมื่อช่วงห่างระหว่างแผ่นแผ่พลังงานมากขึ้นการเหนี่ยวนำจะลดลง แต่ละโพรบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปไม่เหมือนกันทั้งนี้เนื่องจากแต่ละโพรบนั้นไม่สมมาตรกันทั้งหมด

ตารางที่ 4.4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งได้รับผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบด้านข้าง

ป้อนสัญญาณ	ด้านข้างต่อด้านข้าง	
โพรบ1		
โพรบ2		
โพรบ3		
โพรบ4		
ระยะห่าง (มิลลิเมตร)	------- 3.2, ---- 7.2, —— 11.2,	------- 15.2, ----19.2, ——23.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งได้รับผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างในแนวแทยง

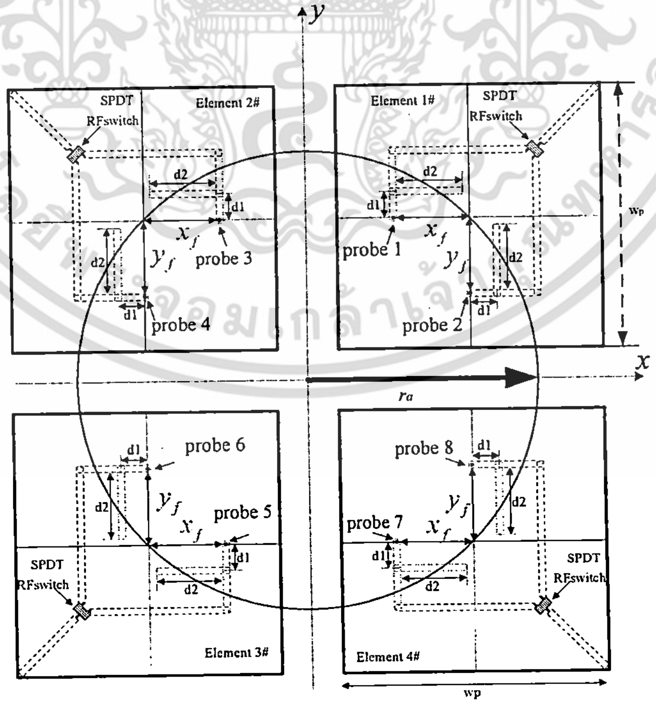
ป้อนสัญญาณ	ด้านขนานในแนวแทยง	
โพรบ1		
โพรบ2		
โพรบ3		
โพรบ4		
ระยะห่าง (มิลลิเมตร)	---- 0, ------- 3.2, ---- 7.2, —— 11.2,	------- 15.2, ----19.2, —— 23.2

ในการพิจารณาผลการเหนี่ยนำจากองค์ประกอบข้างเคียงนี้แสดงให้เห็นว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่จะใช้เป็นองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับนั้นแต่ละโพรบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่างไปจากสายอากาศหนึ่งองค์ประกอบ และจากโครงสร้างที่ตำแหน่งของโพรบที่ไม่สมมาตรกันจะทำให้อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่นเลื่อนเฟสที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นจะต้องพิจารณาและปรับค่าอิมพีแดนซ์ด้วยสตับสายส่งไมโครสตริปหลายค่า และนอกจากจะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์แล้วผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียงนี้จะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยดังที่แสดงในตารางที่ 4.4.1 และ 4.4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การจัดวางแถวลำดับของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น

จากการออกแบบสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่นที่กล่าวมานั้น ได้จัดวางแถวลำดับสายอากาศที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นในลักษณะแถวลำดับวงกลม (circular array) บนระนาบ xy โดยอ้างอิงสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบที่จุดศูนย์กลางของแผ่นแผ่พลังงานสายอากาศทุกตัวถูกวางไว้ห่างจากศูนย์กลางแถวลำดับหรือรัศมีแถวลำดับเท่ากับ r_a สายอากาศตัวที่ 1 2 3 และ 4 วางอยู่ที่มุม 0 90 180 และ 270 องศา ตามลำดับ จะสามารถปรับลำคลื่นให้ชี้ไปที่มุมต่างๆ 16 ทิศทาง โดยการปรับทิศการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวร่วมกับการป้อนสัญญาณที่มีความต่างเฟสหนึ่งบิต (+ หรือ -) เนื่องจากความต้องการให้สายอากาศมีขนาดเล็กรวมทั้งรัศมีแถวลำดับเท่ากับ $0.3\lambda_0$ นั้นทำให้ขอบของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวใกล้กันมากจนถึงติดกันซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติแยกโดดเดี่ยว (isolation) ของการป้อนกำลังงานที่แต่ละโพรบ และที่สำคัญตำแหน่งติดตั้งโพรบจะอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตรกันทั้งหมดเป็นผลให้อิมพีแดนซ์แต่ละโพรบต่างกันไป จึงมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องปรับให้เข้าใกล้ 50 โอห์ม หลายค่าดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งได้แสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ที่โพรบป้อนสัญญาณของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรทางโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่นทั้งหมด ได้แก่ 1.ระยะห่างระหว่างสายอากาศ 2.ขนาดแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละตัว 3. ตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณ 4. ตำแหน่งสตับ 5.ความยาวของสตับ ตัวแปรเหล่านี้นอกจากมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์แล้วยังมีผลกับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละตัวด้วย



รูปที่ 4.7 สายอากาศแถวลำดับที่มีโครงสร้างการจัดตำแหน่งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวแบบที่นำเสนอใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทนี้จะเสนอวิธีจัดวางแถวลำดับที่ทำให้โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะที่สมมาตรกันทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4.7 เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละโพรบป้อนสัญญาณเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งต่างจากการจัดแถวลำดับดังที่กล่าวมาตรงที่สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นตัวที่ 1 2 3 และ 4 จะวางอยู่ที่มุม 45 135 225 และ 315 องศา ตามลำดับ จากการวางในลักษณะนี้ขนาดโดยรวมของแถวลำดับจะมีขนาดเล็กลงจากเดิม 20 เปอร์เซ็นต์ และตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณจะสมมาตรกันทั้งหมดดังนั้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของโพรบป้อนสัญญาณเป็นค่าเดียวกันหมดทั้ง 8 ตำแหน่ง ทำให้สะดวกในการปรับค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

ในการจัดตำแหน่งของสายอากาศใหม่นี้ต้องพิจารณาถึงผลที่ต้องการคือได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถกวาดลำคลื่นหลักได้โดยที่แต่ละแบบรูปจะต้องมีลำคลื่นข้างและหลังที่ต่ำ ในเบื้องต้นจะหาค่ารัศมีที่เหมาะสมจากนั้นปรับหาค่าเฟสที่จะให้ลำคลื่นหลักกวาดไปในทิศทางอื่นๆ ในการหาค่าเหล่านี้สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{total}(\theta,\phi) = \sum_{n=1}^{4} e^{j(kr_a \sin(\theta_0)\cos(\phi_0-\phi_n)+\alpha_n)} E(\theta,\phi) \tag{4.1}$$

เมื่อ

$$E_n(\theta,\phi) = E_x(\theta,\phi) = \cos(\phi)\frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\cos(\theta)\right)}{\frac{kh}{2}\cos(\theta)}\cos\left[\frac{1}{2}\left(kw_p\cos(\theta)\right)\right]$$

หรือ

$$E_n(\theta,\phi) = E_y(\theta,\phi) = \sin(\phi)\frac{\sin\left(\frac{kh}{2}\cos(\theta)\right)}{\frac{kh}{2}\cos(\theta)}\cos\left[\frac{1}{2}\left(kw_p\cos(\theta)\right)\right]$$

$\alpha_n = kr_a \sin(\theta_0)\cos(\phi_0 - \phi_n)$

r_a: รัศมีแถวลำดับ

θ_0: ทิศที่ลำคลื่นหลัก

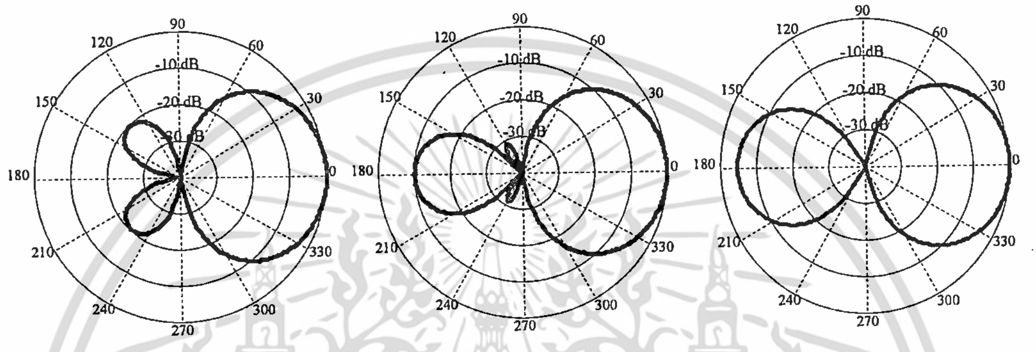
ϕ_n: ตำแหน่งวางสายอากาศ

α_n : มุมเฟสที่ป้อนกระแส

ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น โดยใช้สมการที่ (4.2) ซึ่งต้องกำหนดรัศมี r_a (จากจุดกำเนิดถึงจุดกึ่งกลางของสายอากาศแต่ละตัว) กำหนดมุมทิศทางของลำคลื่นหลัก ϕ_0 โดยกำหนดให้มีการรับคลื่นในมุมยก θ_0= 45 องศา จากนั้นคำนวณหาค่าเฟสที่จะป้อนให้กับสายอากาศแต่ละตัว (α_n) และต้องกำหนดทิศทางของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว $E(\theta,\phi)$

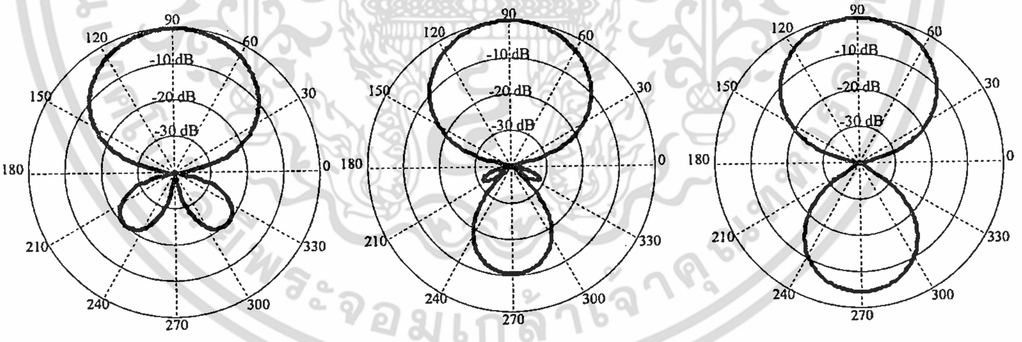
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่กำหนด รัศมี $r_a = 0.25\lambda_0$ ต้องการลำคลื่นหลักที่มุม $\theta_0 = 45$ และ $\phi_0 = 0$ องศา จะได้ $\alpha_n =$ -45, 45, 45 และ-45 องศา และให้สายอากาศทุกตัวมีทิศทางในแกน x, x, x และ x และเมื่อเพิ่มรัศมีให้ $r_a = 0.3\lambda_0$ จะได้ α_n = -54, 54, 54 และ -54 องศา และถ้าให้รัศมี $r_a = 0.35\lambda_0$ จะได้ α_n = -63, 63, 63 และ -63 องศา จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.8 เป็นแบบรูปในระนาบที่มุม $\theta_0 = 45$ จะเห็นว่าเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นจะได้แบบรูปที่มีลำคลื่นหลังหรือลำคลื่นข้างหลังสูงขึ้น เมื่อรัศมี r_a มากกว่า $0.3\lambda_0$ ลำคลื่นหลังจะสูงกว่า 10 dB



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานที่รัศมีต่างๆ (ก) $r_a = 0.25\lambda_0$ (ข) $r_a = 0.3\lambda_0$ (ค) $r_a = 0.35\lambda_0$



(ก) (ข) (ค)

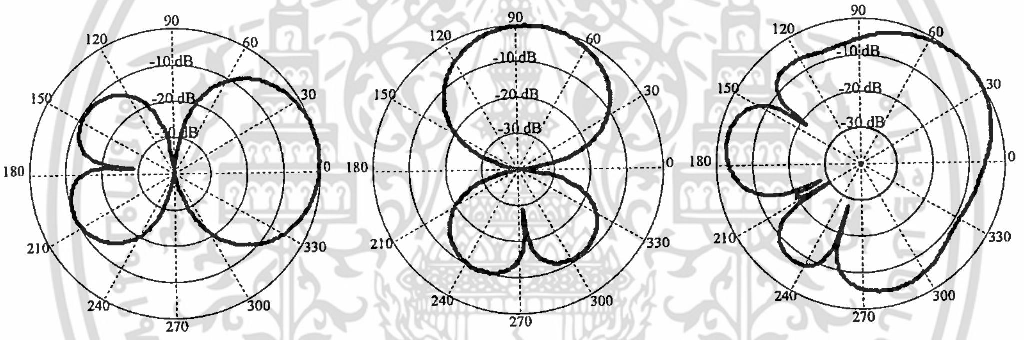
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานที่รัศมีต่างๆ (ก) $r_a = 0.25\lambda_0$ (ข) $r_a = 0.3\lambda_0$ (ค) $r_a = 0.35\lambda_0$

ถ้าต้องการให้ลำคลื่นหลักอยู่ที่ $\theta_0 = 45$ และ $\phi_0 = 90$ องศา วางสายอากาศรัศมี $r_a = 0.25\lambda_0$ จะได้ α_n = -45, -45, 45 และ 45 องศา และให้สายอากาศทุกตัวมีทิศทางในแกน y, y, y และ y และเมื่อเพิ่มรัศมีให้ $r_a = 0.3\lambda_0$ จะได้ α_n = -54, -54, 54 และ 54 องศา และถ้าให้ $r_a = 0.35\lambda_0$ จะได้ α_n = -63, -63, 63 และ 63 องศา จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นจะได้แบบรูปที่มีลำคลื่นหลังสูงขึ้นเช่นเดียวกับกรณีแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าสามารถปรับทิศทางของแบบรูปได้โดยการปรับทิศทางของสายอากาศแต่ละตัว และการปรับเฟสของสายอากาศแต่ละตัว(ซึ่งแต่ละตัวจะอาศัยการปรับเฟสให้เป็น + หรือ -) ถ้ารัศมีที่ต่างกันจะต้องใช้เฟสที่ต่างกันไปแต่ลักษณะของทิศทางสายอากาศและเฟสจะเป็นแบบเดียวกัน ถ้าต้องการลำคลื่นหลักที่ ϕ_0 = 180 หรือ 270 องศา ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันโดยการปรับทิศทางของสายอากาศและเฟสที่ป้อน

เมื่อต้องการให้แบบรูปมีลำคลื่นหลักในทิศทางอื่นสามารถกำหนดได้โดย ป้อนเฟสให้เป็นลักษณะอื่น เช่นในกรณีรัศมี $r_a = 0.3\lambda_0$ สายอากาศแต่ละตัวแผ่พลังงานในแกน x, x, x และ x แต่ถ้าป้อน α_n = -54, 54, 54 และ 54 องศา จะได้แบบรูปมีลำคลื่นหลักชี้ไปที่มุม ϕ_0= 15 องศา และในกรณีรัศมี $r_a = 0.3\lambda_0$ สายอากาศแต่ละตัวแผ่พลังงานในแกน y, y, y และ y แต่ถ้าป้อน α_n = -54, -54, 54 และ -54 องศา จะได้แบบรูปที่มีลำคลื่นหลักชี้ไปที่มุม ϕ_0= 75 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.10



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางต่างๆ
เมื่อ $r_a = 0.3\lambda_0$ (ก) ϕ_0 = 15 (ข) ϕ_0 = 75 (ค) ϕ_0 = 45

แต่เมื่อต้องการให้ลำคลื่นหลักอยู่ที่มุม θ_0= 45 และ ϕ_0 = 45 องศา จะต้องให้สายอากาศแต่ละตัวมีเฟส α_n = -54, 54, 54 และ 54 องศา แต่ต้องให้สายอากาศแต่ละตัวมีทิศทางเป็น x, y, y และ x ตามลำดับ จะได้แบบรูปที่มีลำคลื่นหลักไปที่ 45 องศา แต่จะมีลำคลื่นหลังที่สูงมาก แต่สามารถนำใช้ร่วมในการปรับหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบรูปการรับสัญญาณของแบบรูปอื่นๆ

ในการคำนวณหาค่าเฟสและทิศของสายอากาศแต่ละตัวนี้เป็นการคำนวณเฉพาะแบบรูปการแผ่พลังงานเท่านั้น แต่ต้องคำนึงถึงผลจากการเหนี่ยวนำกันระหว่างสายอากาศแต่ละตัว ซึ่งจะมีผลให้ค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานต่างออกไปจากที่คำนวณมา ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงกับสายอากาศที่จะสร้างนั้นจะต้องออกแบบสายอากาศที่ได้รวมผลของการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำนั้นเข้าไว้ด้วย ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม CST ช่วยออกแบบโครงสร้างของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นนี้

4.4 การปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ของสายอากาศแถวลำดับ

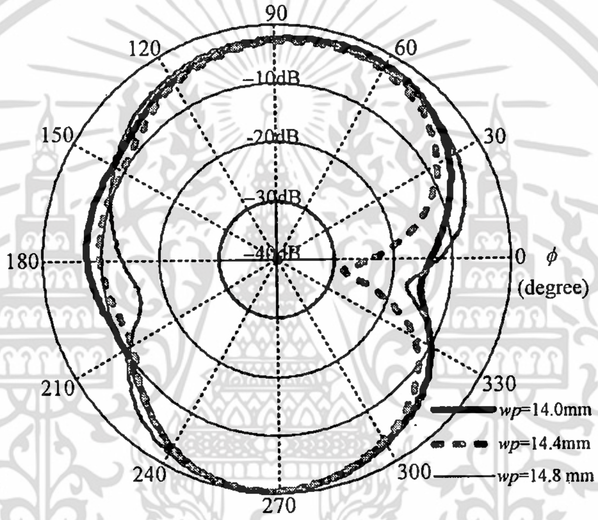
การศึกษาสายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นจะพิจารณาในสภาพที่สายอากาศทุกตัวทำงานร่วมกันและจะรวมผลของส่วนที่ป้อนสัญญาณที่เป็นสายส่งไมโครสตริปซึ่งอยู่ด้านหลังของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม CST ช่วยในการวิเคราะห์หาค่ามิติต่างๆ ที่เหมาะสม ซึ่งผลจากการคำนวณได้รวมผลการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศแต่ละตัว ดังนั้นผลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับสายอากาศที่จะสร้าง จะเริ่มจากการหาขนาด (*wp*) ของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น ซึ่งเป็นสายอากาศไมโครสตริปจัตุรัสทำงานโหมดสอง จากนั้นหาตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณ (*fp*) ที่ทำให้เกิดแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นสองทิศทาง และมีลำคลื่นข้างต่ำกว่า -10 dB ซึ่งต้องมีอิมพีแดนซ์ใกล้ 50 โอห์ม และจะอ้างอิงที่ตำแหน่งป้อนสัญญาณที่ต่อกับสวิทช์ความถี่วิทยุ แต่ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่ได้ตามต้องการ จะสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยการเพิ่มสตับที่สายส่งไมโครสตริปในส่วนของการป้อนสัญญาณ ในบทนี้จะกำหนดให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ และต้องการให้สายอากาศมีขนาดเล็กจึงต้องสร้างด้วยแผ่นพิมพ์ CEr10 ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10.0 มีความสูง *h* เท่ากับ 1.58 มิลลิเมตร มีรายละเอียดอธิบายได้ดังนี้

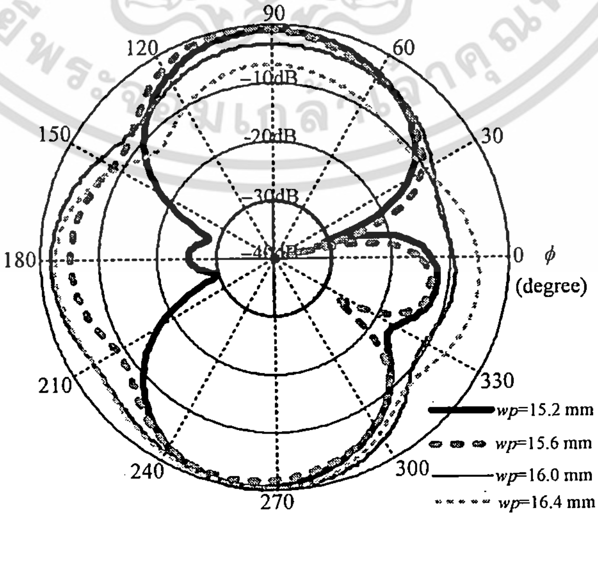
4.4.1 การปรับขนาดสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว (*wp*)

การประมาณขนาดของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวจะเริ่มที่ขนาดของแผ่นแผ่พลังงานของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งต้องเป็นสายอากาศทำงานที่โหมด TM_{020} หรือ TM_{200} ดังนั้นสายอากาศจะต้องมีขนาดประมาณเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นในค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ในงานนี้ได้ใช้ค่าเท่ากับ 10.0 ต้องการสายอากาศทำงานที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ขนาดของสายอากาศจะมีค่า *wp* เท่ากับ 16.2 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากเป็นสายอากาศไมโครสตริป การออกแบบจะต้องรวมผลของฟริงกิง (fringing) ที่ทำให้ขนาดของสายอากาศต้องมีขนาดเล็กลง เพื่อให้ได้แบบรูปตามต้องการ แต่จะมีขนาดเท่าใดนั้นจะพิจารณาได้โดยการปรับขนาดของแผ่นแผ่พลังงาน *wp* ตั้งแต่ 14.0 ถึง 16.4 มิลลิเมตร และในการปรับขนาดของสายอากาศนั้นจะต้องกำหนดตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณ *fp* ทั้งแกน *x* และ *y* ให้เหมาะสมกับขนาดที่เปลี่ยนด้วยดังแสดงในหัวข้อที่ 2.3 ได้กำหนดว่า *fp* ควรอยู่ที่ตำแหน่ง 0.25*wp* จากศูนย์กลางของสายอากาศ และการเริ่มต้นนี้จะยังไม่มีตัวสตับดังนั้น *d2* หรือความยาวสตับตามโครงสร้างรูปที่ 4.7 จะมีค่าเท่ากับ 0 ผลจากการปรับขนาดของสายอากาศได้แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน S_{11} ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

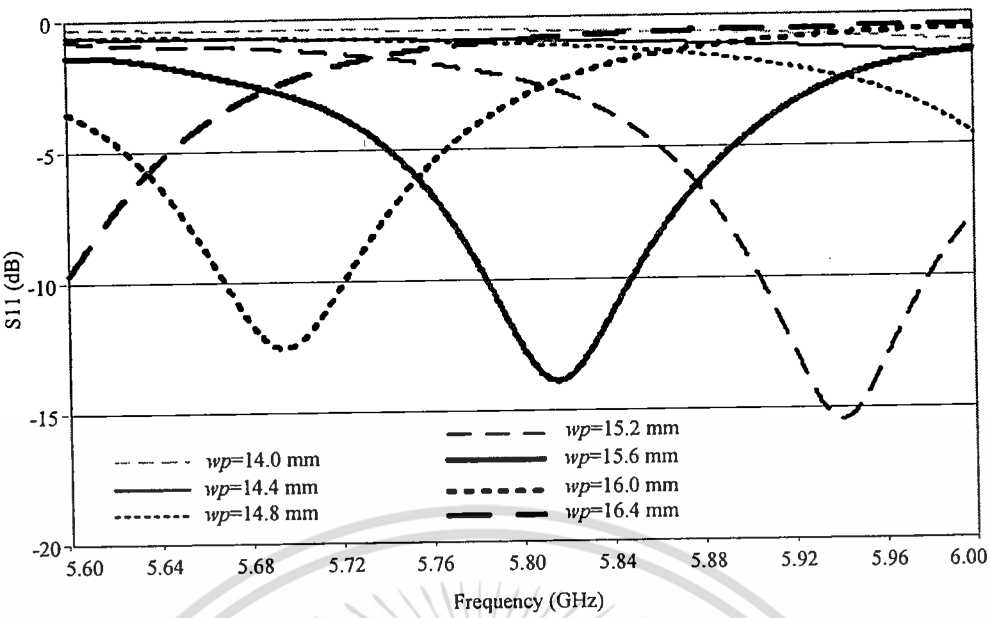
รูปที่ 4.11 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานที่เปลี่ยนตามขนาดสายอากาศ แบบรูปจะมีลักษณะตามต้องการเมื่อ *wp* เท่ากับ 15.2 มิลลิเมตร ซึ่ง *fp* จะเท่ากับ 4.8 มิลลิเมตร แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยังไม่เหมาะกับการใช้งาน สำหรับ *wp* ขนาดอื่นๆ นั้นมีแบบรูปที่ไม่เหมาะสมทั้งลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานและยังมีลำคลื่นข้างที่สูง ถึงแม้ว่า *wp* เท่ากับ 15.6 มิลลิเมตร จะมีค่า S_{11} ที่ดีแต่แบบรูปการแผ่พลังงานนั้นเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการ แบบรูปการแผ่พลังงานและค่า S_{11} ยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกโดยปรับตำแหน่งโพรบป้อนพลังงาน ซึ่งในขั้นต่อไปจะปรับ *fp* เพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะโดยจะยึดค่า *wp* เท่ากับ 15.2 มิลลิเมตร เนื่องจากมีแบบรูปตามที่ต้องการแล้ว



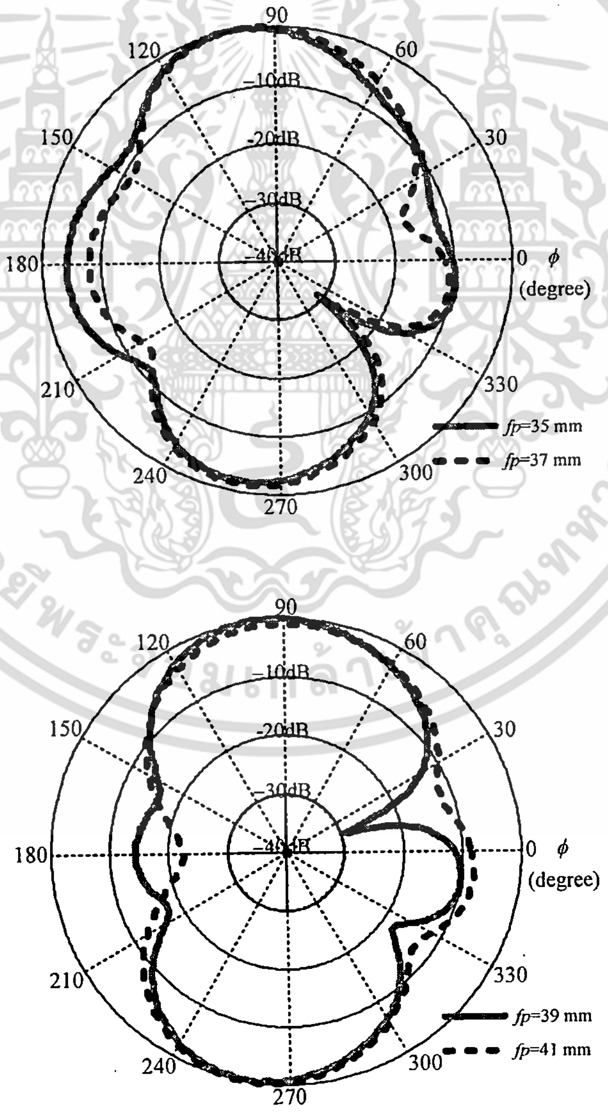


รูปที่ 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy*
จากการปรับค่า *wp* = 14.0 ถึง 16.4 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *wp* = 14.0 ถึง 16.4 มิลลิเมตร

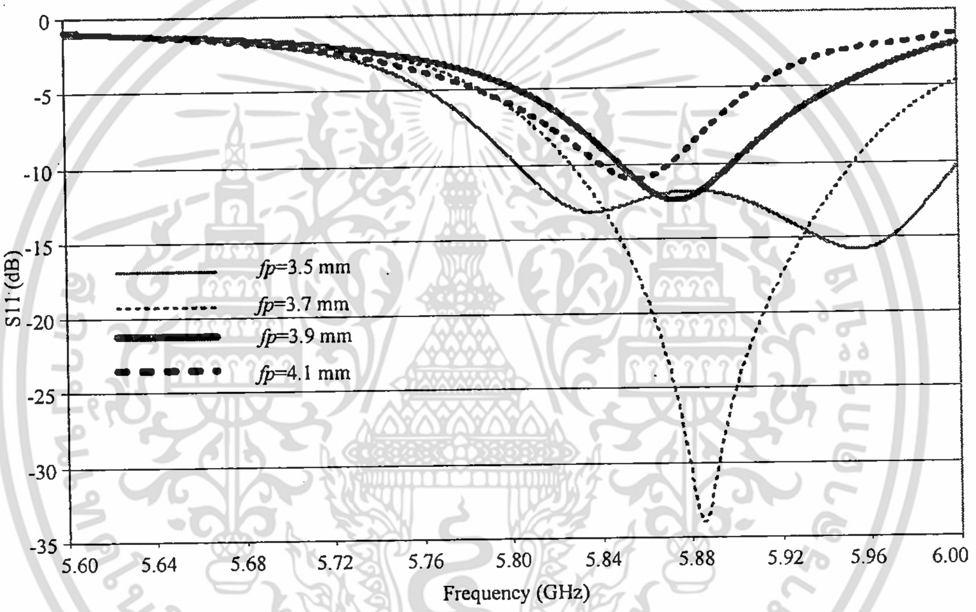


รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy* จากการปรับค่า *fp*= 3.5 ถึง 4.1 มิลลิเมตร

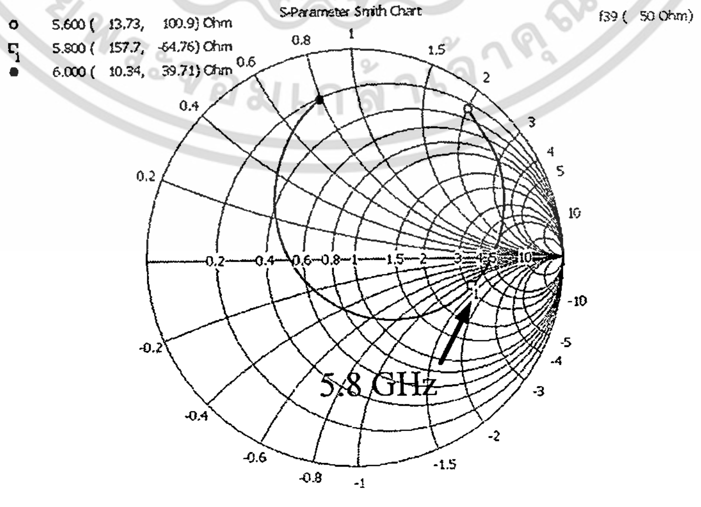
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การปรับตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว (*fp*)

การปรับตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณที่ห่างจากศูนย์กลางของสายอากาศนั้นจะปรับในช่วงระยะ 0.23*wp* <*fp*< 0.27*wp* ซึ่งมีค่า 3.5<*fp*<4.1 มิลลิเมตร ได้แบบรูปการแผ่พลังงานและสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ แบบรูปจะเปลี่ยนไปจากเดิมมากเมื่อ *fp* น้อยกว่าและมากกว่า 3.9 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงว่า *fp* ที่เหมาะควรมีค่าใกล้กับ 3.9 สำหรับค่า S_{11} มีการเปลี่ยนแปลงมากเช่นกันแต่ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องใช้การปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยเพิ่มสตับที่สายส่ง ในการใช้สตับช่วยการปรับค่า S_{11} ต้องพิจารณาปรับจากค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะใช้สำหรับอ้างอิงในการปรับจะมีค่าเท่ากับ 157 – j64 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อ ยึดตำแหน่ง *fp* เท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร เนื่องจากได้แบบรูปที่เหมาะสมแล้ว



รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *fp*= 3.5 ถึง 4.1 มิลลิเมตร

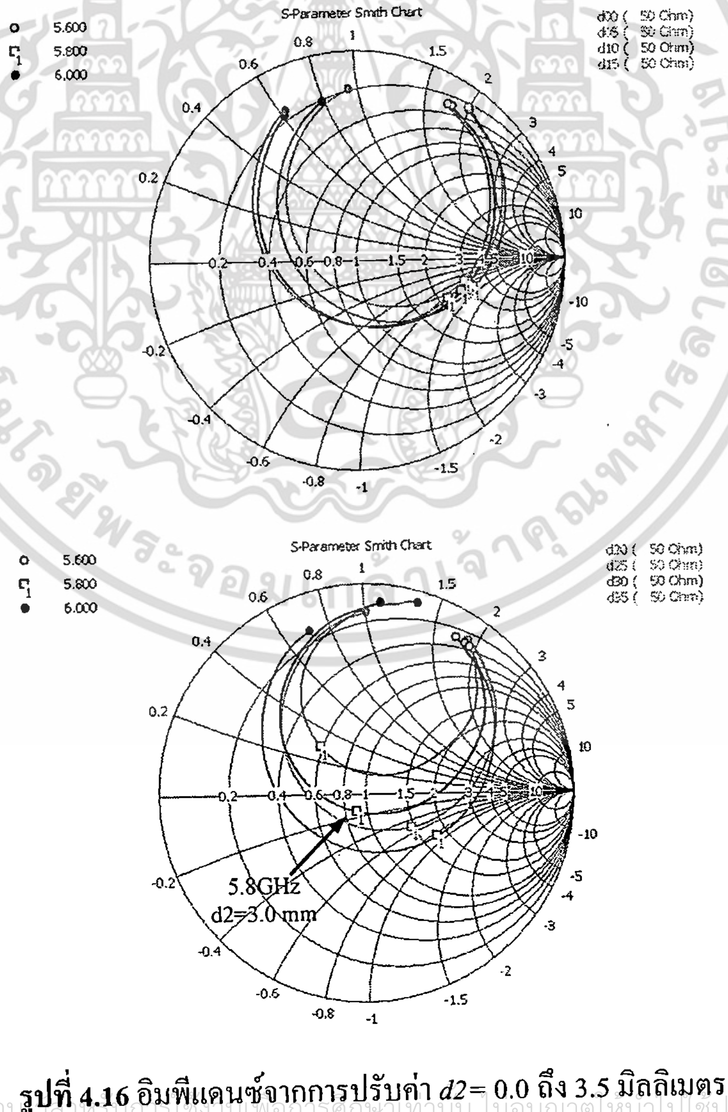


รูปที่ 4.15 อิมพีแดนซ์ *fp*= 3.9 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 การปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยปรับตำแหน่งสตับ (*d1*) และความยาวสตับ (*d2*)

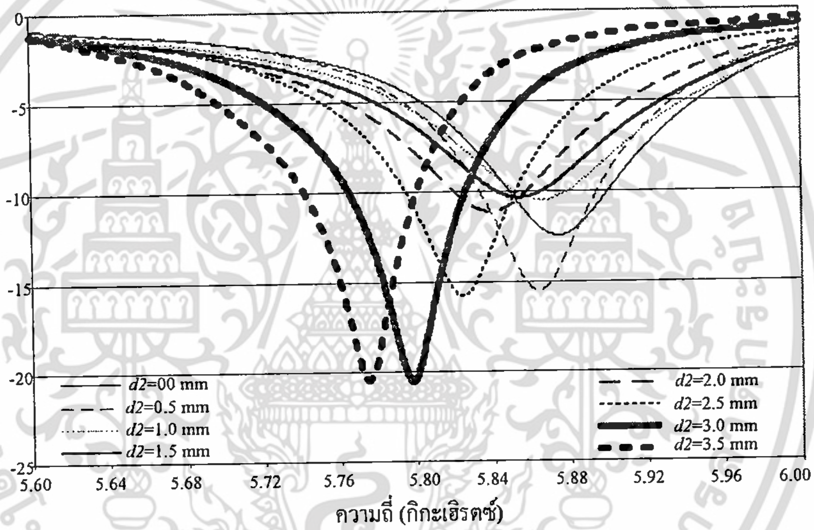
การปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัวนั้นสามารถปรับโดยตำแหน่งของสตับและขนาดของ สตับที่เพิ่มต่อเข้ากับสายส่งไมโครสตริปดังในรูปที่ 4.7 สำหรับในระบบนี้ใช้อิมพีแดนซ์ของระบบ z_0 เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งสายส่งไมโครสตริปนี้สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10.0 เช่นเดียวกับตัวสายอากาศแต่มีความหนา *hf* เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ดังนั้นสายส่งไมโครสตริปจะมีความกว้าง *wl* เท่ากับ 0.38 มิลลิเมตร และสตับที่เพิ่มเข้ามาจะใช้ความกว้างเท่ากัน การปรับค่าอิมพีแดนซ์ทำได้โดยการปรับค่า *d1* และ *d2* เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์ม มากที่สุดแต่ยังคงได้แบบรูปการแผ่พลังงานตามที่ต้องการ ในการปรับจะเริ่มต้นที่ตำแหน่งโพรบ *d1* เท่ากับ 0 ก่อนแล้วปรับความยาวสตับให้ยาวออกไปจนถึงเท่าที่จะเป็นไปได้ หากยังไม่สามารถได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ ก็จะเปลี่ยนตำแหน่งของสตับ *d1* ให้ห่างออกไป สำหรับในงานวิจัยนี้ สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ได้ตามที่ต้องการโดย *d1* อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับโพรบและเพิ่มค่า *d2* ดังแสดงผลการปรับเพิ่มในรูปที่ 4.16 ที่สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เข้าใกล้ 50 โอห์มได้



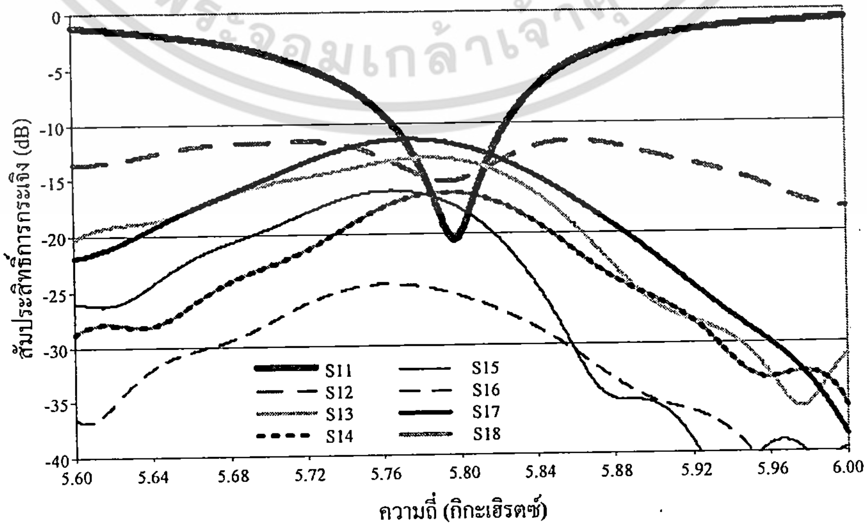
รูปที่ 4.16 อิมพีแดนซ์จากการปรับค่า *d2*= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า *d2* ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตรจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 45 – j8 โอห์ม และจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเท่ากับ -21 dB ที่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์และมีช่วงความถี่ 70 เมกะเฮิรตซ์ ที่มีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB นอกจากนี้ในรูปที่ 4.18 ได้แสดงคุณสมบัติแยกโดดเดี่ยวจากโพรบอื่นๆ เมื่อพิจารณที่โพรบ 1 ถึงแม้ว่าโพรบ 2 จะอยู่ใกล้กับโพรบ 1 มากที่สุดเพราะอยู่บนสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นตัวเดียวกัน แต่ S_{12} ไม่ได้มีค่ามากที่สุด แต่กลับเป็น S_{17} มีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีทิศการแผ่พลังงานทางเดียวกันเมื่อป้อนสัญญาณให้กับโพรบ 1 และ 7 แต่ทุกค่า S_{12} ถึง S_{18} จะมีคุณสมบัติแยกโดดเดี่ยว ที่ต่ำกว่า -10 dB ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานจากการปรับตำแหน่งสตับนั้นได้แสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานจะเปลี่ยนไม่มากนักถ้าอิมพีแดนซ์ไม่เข้าใกล้ 50 โอห์ม แต่เมื่อ *d2* ใกล้กับ 3.0 มิลลิเมตร จะทำให้แบบรูปเปลี่ยนแปลงลักษณะมากขึ้น

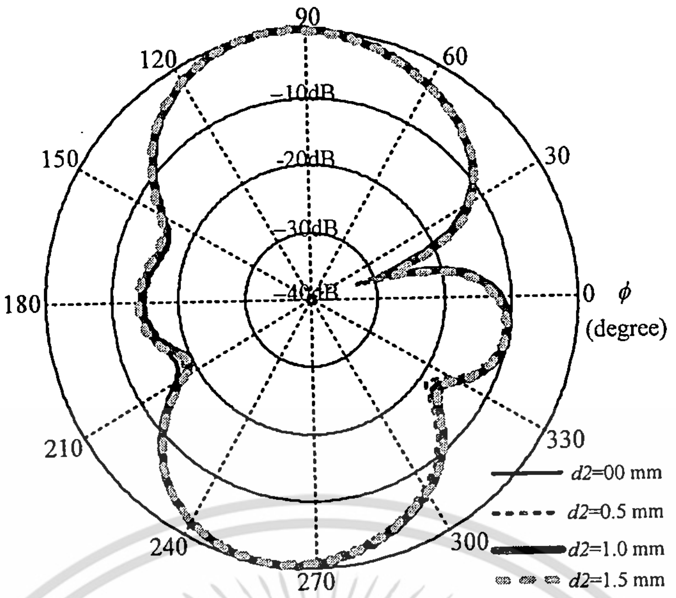


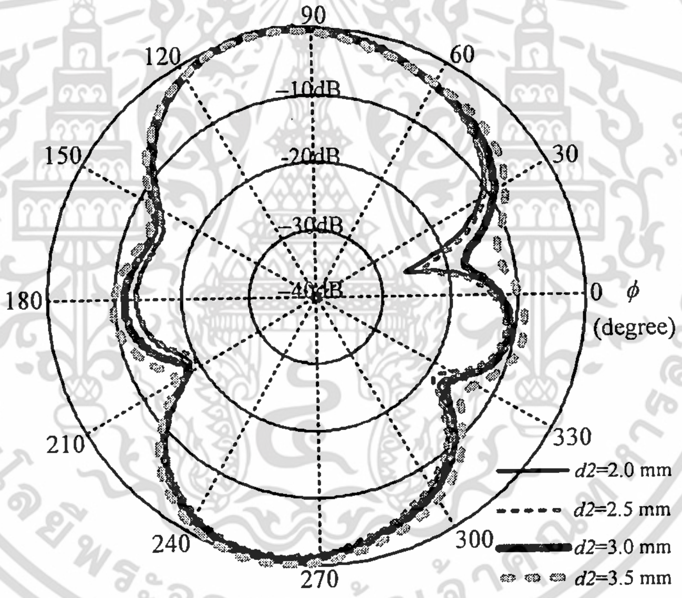
รูปที่ 4.17 สัมประสิทธิ์การสะท้อน จากการปรับค่า *d2*= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 คุณสมบัติแยกโดดเดี่ยว เมื่อ *d2*= 3.0 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.19 แบบรูปแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าระนาบ *xy* จากการปรับค่า $d2$= 0.0 ถึง 3.5 มิลลิเมตร

จากการศึกษาสายอากาศแถวลำดับของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมและสายอากาศแต่ละตัวมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นสองทิศทางที่มีลำคลื่นข้างต่ำ สามารถสรุปค่าตัวแปรต่างๆ ได้ในตารางที่ 4.5 ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถสร้างเป็นสายอากาศปรับลำคลื่นได้ สำหรับการปรับค่าเฟสและทิศทางของสายอากาศแต่ละตัวนั้นได้แสดงในหัวข้อต่อไป ซึ่งจะใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการคำนวณและปรับค่าในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาและแบบรูปการแผ่พลังงานให้เหมาะสมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

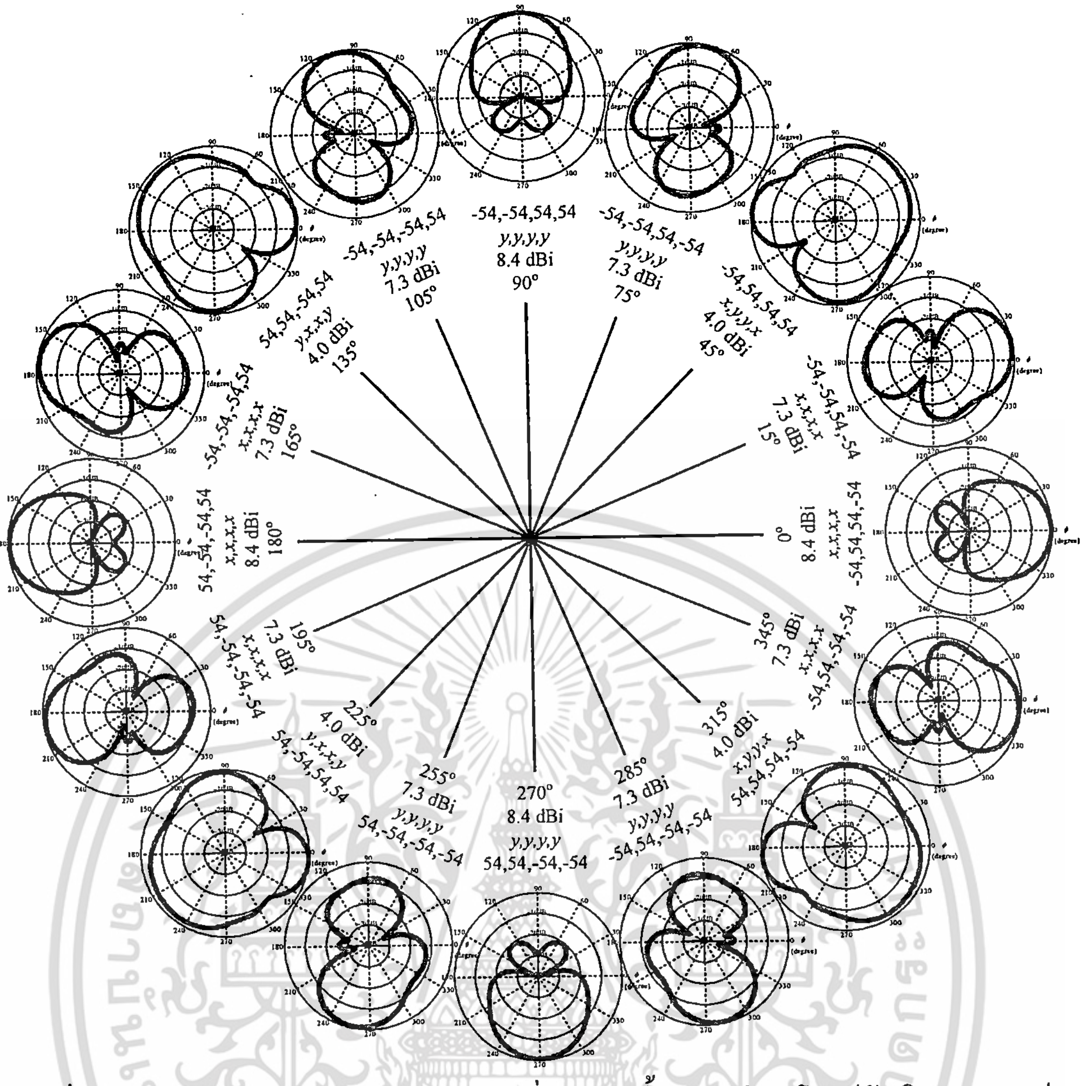
ตารางที่ 4.5 ค่าต่างๆ ในโครงสร้างสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่น

สัญญลักษณ์	หมายถึง	มีค่า
ε_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	10.0
$\tan\delta$	การสูญเสียในวัสดุฐานรอง	0.0035
W	ความกว้างของวัสดุฐานรองและระนาบกราวด์ (มิลลิเมตร)	50.6
H	ความสูงแผ่นวงจรของสายอากาศ (มิลลิเมตร)	1.58
hf	ความสูงแผ่นวงจรของระบบสายส่งไมโครสตริป (มิลลิเมตร)	0.8
wp	ขนาดสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น (มิลลิเมตร)	15.4
wl	ความกว้างสายส่งไมโครสตริป (มิลลิเมตร)	0.38
fp	ตำแหน่งโพรบป้อนสัญญาณ (มิลลิเมตร)	3.9
$d1$	ตำแหน่งสตับ (มิลลิเมตร)	0
$d2$	ความยาวสตับ (มิลลิเมตร)	3.0

4.5 แบบรูปการปรับทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการจำลอง

จากการคำนวณหาค่าเฟสและทิศทางของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว ได้นำค่าเหล่านั้นมาป้อนให้กับสายอากาศแถวลำดับสวิทช์ลำคลื่นที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจะได้แบบรูปทั้งหมด 16 ลักษณะที่มีลำคลื่นหลักครอบคลุมรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.20 แบบรูปที่ได้นั้นจะต่างไปบ้างเมื่อเทียบกับแบบรูปจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.3 เนื่องจากเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้รวมผลการเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศแต่ละตัวแล้ว และในตารางจะเห็นว่ามีแบบรูปเพิ่มขึ้นมาอีก 4 ทิศทางเมื่อเทียบกับใน [27] ซึ่งการที่มีลักษณะของแบบรูปที่มากขึ้นนั้นคาดว่าจะสามารถใช้ในการระบุทิศทางของสัญญาณ (Angle of Arrival : AoA) ที่เข้ามาได้ รูปที่ 4.20 ได้แสดงค่าอัตราขยายจากการจำลองสายอากาศของแต่ละแบบรูป เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับปรับระดับของสัญญาณที่เข้ามาให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบ *xy* ที่สามารถชี้ทิศทางต่างๆ โดยปรับทิศทางและเฟสของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละตัว

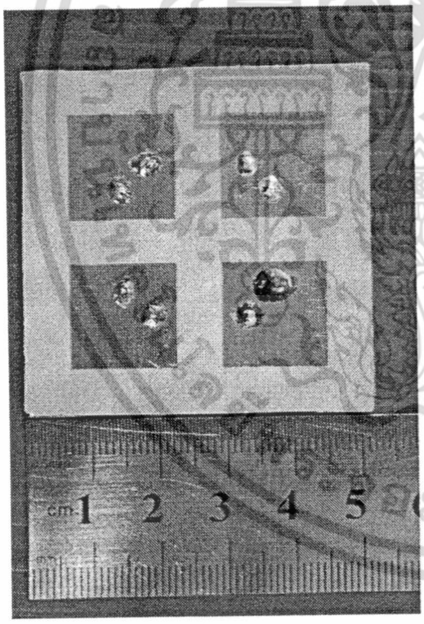
สำหรับแบบรูปที่ต้องการให้ชี้ในทิศทาง 45, 135, 225 และ 315 องศานั้น จะเห็นว่ามีลำคลื่นหลังหรือลำคลื่นข้างที่สูงมากหรือสูงกว่าซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลของทิศทางที่ไม่ถูกต้อง แต่สามารถแก้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่เข้ามานั้นกับแบบรูปที่มีลักษณะที่สอดคลองกันในทิศทางอื่น ซึ่งในการประมวลผลต้องมีการเพิ่มส่วนการวิเคราะห์นี้เข้าไว้ด้วย โดยการเก็บค่าความเข้มพลังงานที่รับได้จากการกวาดทิศของแบบรูปทั้ง 16 ทิศทาง และเปรียบเทียบระดับความเข้มพลังงานที่รับได้ ถ้าในทิศทางใดที่มีความเข้มพลังงานมากที่สุดถือว่าเป็นทิศของสัญญาณที่ต้องการ แต่ถ้าสัญญาณมีความเข้มพลังงานมาจากแบบรูปทิศทาง 45, 135, 225 และ 315 องศา เมื่อมองจากแบบรูปแล้วจะเห็นว่าสัญญาณอาจไม่ได้มาในทิศทางนั้นจริงเนื่องจากมีลำคลื่นข้างที่สูงมาก เช่น ถ้าค่าความเข้มพลังงานที่รับได้มากที่สุดอยู่ที่แบบรูปในทิศ 45 องศา แต่เมื่อพิจารณาแบบรูปด้วย จะเห็นว่าสัญญาณที่รับได้นั้นอาจมาจากลำคลื่นข้างที่มุม 180 หรือ 270 ได้ด้วย ดังนั้นต้องพิจารณาเทียบกับความเข้มพลังงานที่รับได้จากแบบรูปที่ชี้ทิศ 180 และ 270 องศาด้วย ถ้าความเข้มพลังงานจากทั้งสองทิศที่นำมาเทียบมีค่าต่ำหรือไม่มีสัญญาณแสดงว่าทิศทางที่สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

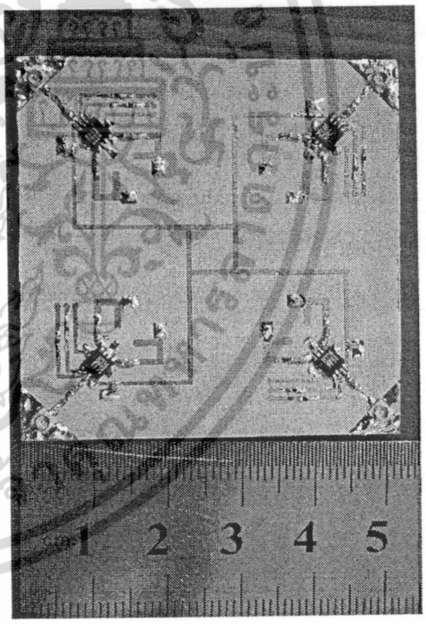
มานั้นมาจากทิศ 45 องศาจริง และสำหรับความเข้มพลังงานที่มีค่าสูงสุดที่มุม 135, 225 และ 215 องศา จะสามารถใช้การพิจารณาทำนองเดียวกัน และสัญญาณที่เข้ามาในทิศทางอื่นแต่มีความเข้มพลังงานรองลงมาจะถือว่าเป็นสัญญาณแทรกสอดของระบบซึ่งต้องการกำจัดออกด้วยกระบวนการประมวลผลของสายอากาศปรับตัวได้

4.6 ผลการทดสอบ

จากการออกแบบสายอากาศโดยการจำลองด้วยโปรแกรม CST ทำให้ได้มิติที่เหมาะสม จึงได้สร้างสายอากาศตามที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งได้ต่อกับสวิทช์ความถี่วิทยุเพื่อใช้เลือกโพรบสำหรับสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแต่ละตัว และสำหรับในบทนี้จะทดสอบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสวิทช์ลำคลื่น โดยทดสอบการสูญเสียจากการสะท้อนของแต่ละโพรบของสายอากาศซึ่งต่อผ่านสวิทช์ความถี่วิทยุสำหรับ และจะทดสอบอัตราขยายของสายอากาศที่ต่อรวมเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสเพื่อใช้เป็นสายอากาศหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นจะแสดงในการประยุกต์ใช้งานซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป



ด้านบน



ด้านล่าง

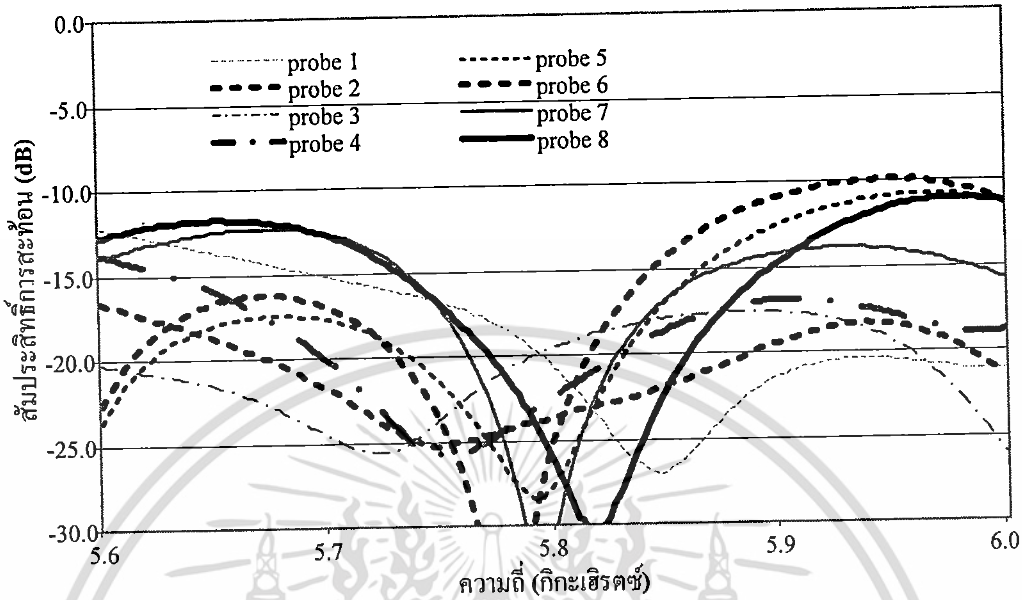
รูปที่ 4.21 สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแถวลำดับที่ได้สร้างเพื่อทดสอบ

4.6.1 ผลการทดสอบการสูญเสียจากการสะท้อน

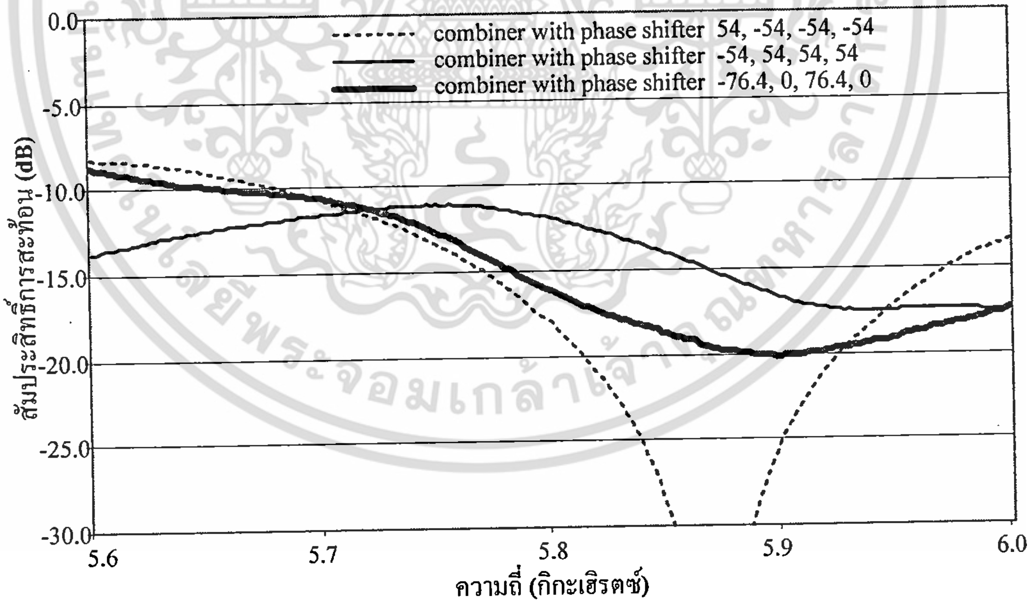
การทดสอบการสูญเสียจากการสะท้อนของสายอากาศนั้นได้ทดสอบขณะมีสวิทช์ความถี่วิทยุต่อรวมอยู่ด้วยแล้ว ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4.22(ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละโพรบจะมีค่าการสูญเสียจากการสะท้อนต่ำกว่า -15 dB ในย่านความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ และเมื่อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นผ่านตัวเลื่อนเฟสสำหรับเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสจะได้การสูญเสียย้อนกลับดังที่แสดงในรูปที่ 4.22(ข)



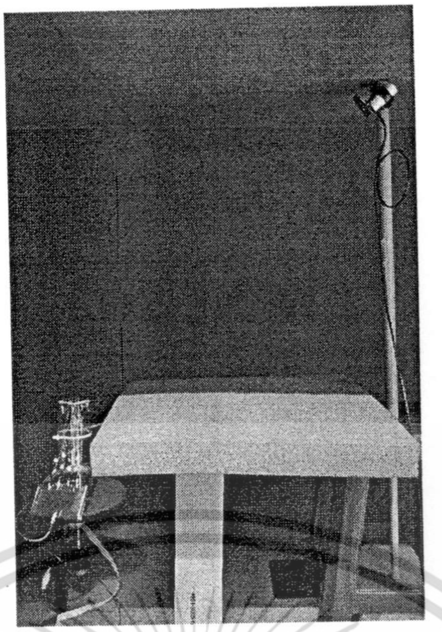
(ก)



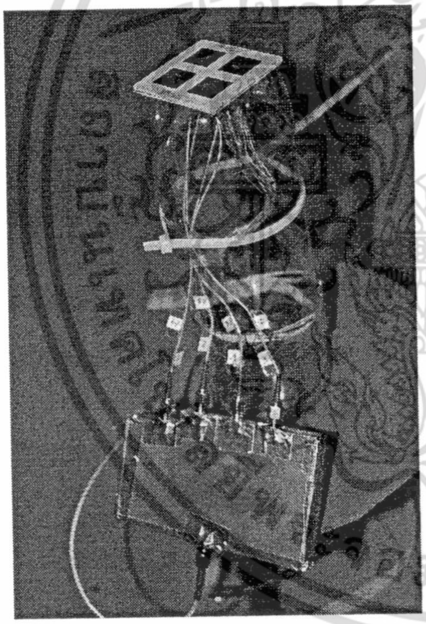
(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบการสูญเสียย้อนกลับ (ก) เมื่อป้อนสัญญาณแต่ละโพรบ (ข) วงจรรวมสัญญาณและตัวเลื่อนเฟส

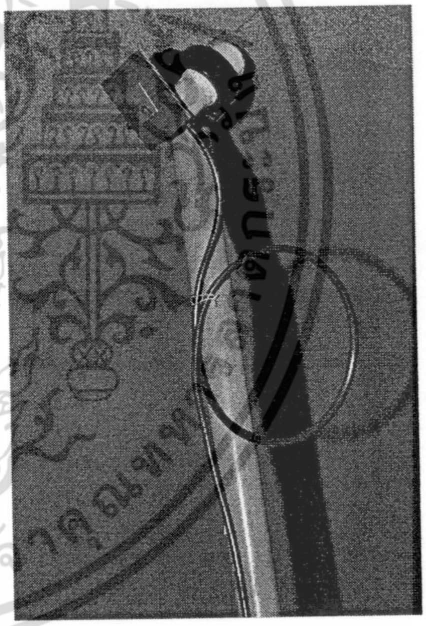
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.23 (ก) การจัดสายอากาศในการทดสอบ (ข) สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นต่อกับวงจรรวมและตัวเลื่อนเฟส (ค) สายอากาศไมโครสตริปที่ใช้ส่งกำลังงาน

4.6.2 ผลการทดสอบอัตราขยาย

ในรูปที่ 4.23 ได้แสดงการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นในห้องไร้การสะท้อน โดยการทดสอบได้ใช้สายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศอ้างอิง ซึ่งได้ส่งกำลังงานใช้กับสายอากาศไมโครสตริปและรับกำลังด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศไมโครสตริปจะได้กำลังงาน -36.4 dBm และเมื่อใช้สายอากาศสวิทช์ปรับเฟสที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นรับกำลังงานจะสามารถรับได้ -50.3 dBm จะเห็นว่ารับกำลังงานได้น้อยลงมากเนื่องจากมีการสูญเสียในอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งจากการทดสอบสายนำสัญญาณ (IPEX to SMA) จะมีการสูญเสียเท่ากับ 2 dB และมีการสูญเสียในสวิทช์ความถี่วิทยุ 10 dB ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสวิทช์ลำคลื่นนั้นจะคำนวณได้เท่ากับ 4.4 dBi [(-50.3dBm) - (-36.4dBm) - (-12dB) + 6.3dBi = 4.4 dBi]

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้ออกแบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นสามารถปรับทิศทางของลำคลื่นหลักให้ชี้ทิศทางได้รอบตัวในมุม ϕ เพื่อใช้เป็นสายอากาศนี้ในการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา สำหรับใช้งานในย่านความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ โดยทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเลื่อนเฟสที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบและการสวิทช์ทิศทางของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบ ในเบื้องต้นการจัดวางสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแต่ละองค์ประกอบได้วางที่มุม 90, 180, 270 และ 0 องศาเช่นเดียวกับการจัดวางในงานที่มีอยู่เดิม และได้รัศมีแถวลำดับที่เหมาะสมเท่ากับ $0.3\lambda_0$ แต่ยังไม่ได้พิจารณาถึงคุณสมบัติอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้รับผลการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียง ซึ่งเมื่อพิจารณาการเหนี่ยนนำโดยใช้การจำลองที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างที่จะสร้างจริงนั้นปรากฏว่าจะเกิดการเหนี่ยวนำจากองค์ประกอบข้างเคียงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงานเปลี่ยนแปลงไป หากจะปรับค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปให้เหมาะสมนั้นสามารถใช้สตับสายส่งไมโครสตริปได้ แต่เนื่องจากการจัดวางด้วยโครงสร้างลักษณะนี้จะมีตัวแปรในการปรับสตับหลายค่า ดังนั้นจึงได้จัดโครงสร้างของแถวลำดับสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นในอีกลักษณะหนึ่ง โดยให้แต่ละองค์ประกอบวางอยู่ที่ตำแหน่ง 45, 135, 225 และ 315 องศาตามลำดับ การวางลักษณะนี้จะมีโครงสร้างการป้อนสัญญาณที่สมมาตรกันหรือเหมือนกันทุกตำแหน่ง ซึ่งช่วยให้สะดวกในการปรับตัวแปรของสตับ และใช้พื้นที่รวมของตัวแผ่พลังงานน้อยลงด้วย จากการออกแบบใหม่นี้จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางที่เปลี่ยนไปจากของโครงสร้างเดิม แต่ยังคงสามารถชี้ทิศทางรอบทิศได้ โดยการปรับเปลี่ยนเฟสของแต่ละองค์และการสวิทช์ลำคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ สายอากาศแถวลำดับปรับทิศทางเลื่อนเฟสด้วยองค์ประกอบที่สวิทช์ลำคลื่นนี้จะใช้เป็นสายอากาศปรับทิศทางสำหรับการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับมาซึ่งได้แสดงการประยุกต์ใช้งานนี้ในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่ และสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น

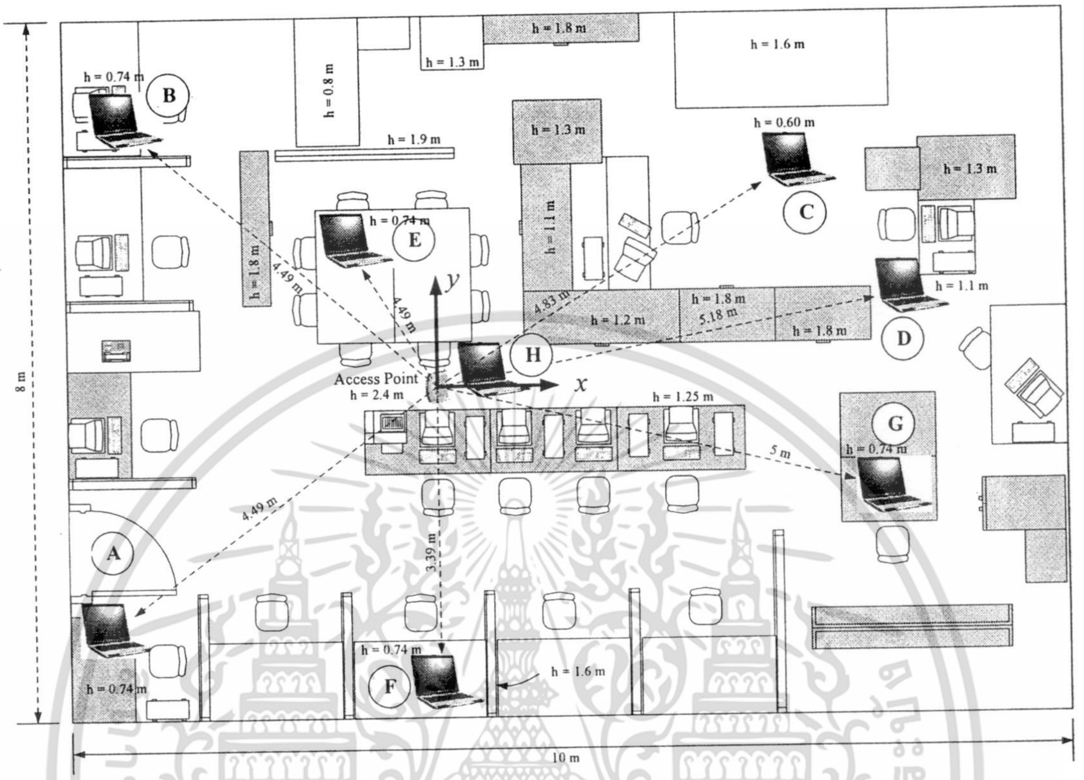
ในบทนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งที่ได้ต่อเติมให้เป็นสายอากาศสองย่านความถี่จากบทที่ 3 เพื่อใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ซึ่งจะแสดงการทดสอบใช้งานในหัวข้อที่ 5.1 และเมื่อใช้เป็นองค์ประกอบในสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ออกแบบในบทที่ 4 จะใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบุทิศทางของสัญญาณเข้ามาซึ่งจะแสดงในหัวข้อที่ 5.2

5.1 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่น ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่

จาการสร้างสายอากาศสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง ในหัวข้อนี้จะประยุกต์ใช้งานสายอากาศนี้โดยทดสอบการรับส่งสัญญาณของโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีขนาดกว้าง 8 เมตร ยาว 10 เมตร และสูง 2.4 เมตร ซึ่งภายในห้องนี้มีสิ่งแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 5.1 [44] เนื่องจากสายอากาศนี้ได้ออกแบบและสร้างให้เป็นสายอากาศสำหรับติดตั้งที่แอกเซสพอยท์สองย่านความถี่ในระบบ IEEE802.11 a และ b/g จึงได้ติดตั้งสายอากาศกับแอกเซสพอยท์ไว้บนเพดานตรงกึ่งกลางห้อง ในการทดสอบสายอากาศจะพิจารณาที่คุณภาพของสัญญาณที่รับส่งโดยใช้ค่าทรูพุต (throughput) เป็นตัวอ้างอิง โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอุปกรณ์รับส่งโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายทั้งสองย่านความถี่และใช้โปรแกรมสำหรับทดสอบค่าทรูพุต โดยจะเปลี่ยนตำแหน่งการรับสัญญาณเพื่อทดสอบ 8 ตำแหน่งด้วยกันดังได้แสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งภายในห้องนี้มีสิ่งแวดล้อมที่วางอยู่ตามการใช้งานปกติ ที่ประกอบด้วยโต๊ะ ตู้เหล็กและอื่นๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณและจะมีการจางหายหลายทิศทางเกิดขึ้นด้วย โดยที่ตำแหน่ง A C, E, F และ G จะมีสัญญาณที่เข้ามาแบบ Rician channels เนื่องจากมีสัญญาณที่เข้ามาโดยตรงและมีสัญญาณที่สะท้อนจากสิ่งสะท้อนคลื่นอื่นๆ เป็นสัญญาณจากหลายทิศทางเข้ามาด้วย ส่วนตำแหน่ง B และ D จะมีสัญญาณเข้ามาแบบ Rayleigh channels เนื่องจากที่บริเวณนี้จะมีสิ่งกีดขวางสัญญาณทางตรงคือตู้เหล็กที่คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้นจึงไม่มีสัญญาณเข้ามาจากทางตรง แต่จะมีเฉพาะสัญญาณที่สะท้อนจากสิ่งสะท้อนคลื่นเข้ามาแทน สายอากาศสวิทช์ลำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

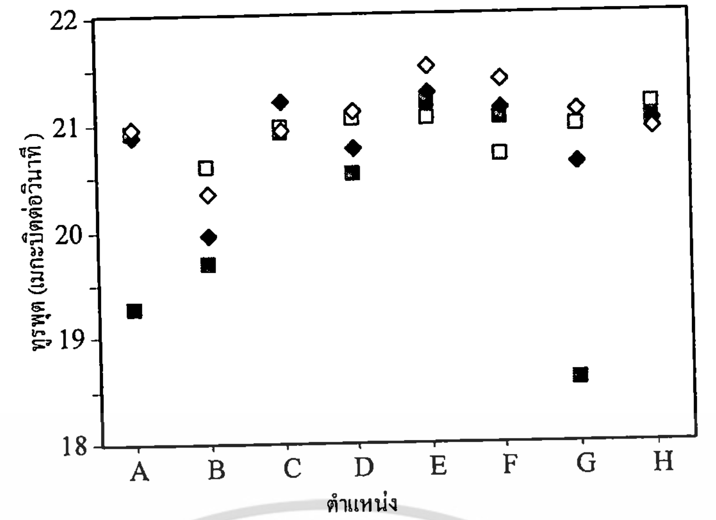
ป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสองย่านความถี่นั้นจะวางไว้สองลักษณะคือแบบขนานกับแกน x และแกน y (เป็นทิศทางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) และแบบทำมุม 45 องศากับแกน x และแกน y (เป็นทิศทางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ)



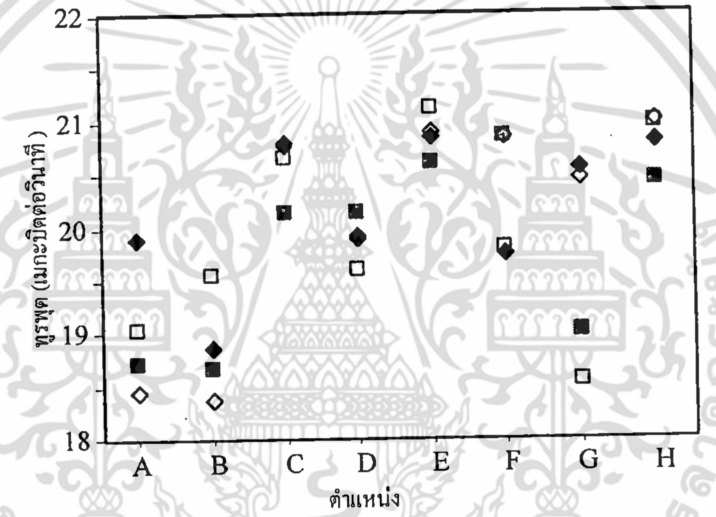
รูปที่ 5.1 ห้องที่ใช้ในการทดสอบค่าทรูพุต

ผลการทดสอบค่าทรูพุตของด้วยการใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองความถี่นั้นได้แสดงในรูปที่ 5.2 สำหรับกรณี IEEE802.11b/g ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) สามารถพิจารณาได้ดังนี้ ที่ตำแหน่ง A C E และ F เป็นตำแหน่งที่สัญญาณสามารถส่งได้โดยตรงไม่ถูกบดบังจากสิ่งแวดล้อมทำให้ทิศทางลำคลื่นของสายอากาศที่เหมาะสมเป็นทิศทางที่ 4 3 4 และ 4 ตามลำดับ สำหรับที่ตำแหน่ง B ควรจะใช้ทิศทางที่ 4 แต่จากผลการทดสอบทิศทางที่ 2 จะเหมาะสมกว่าเนื่องจากมีตู้เหล็กสูงได้บดบังสัญญาณทางตรงที่มาจากแอกเซสพอยท์ถึงตำแหน่งนี้ แต่สัญญาณที่รับได้นั้นจะเป็นสัญญาณจากทิศทางที่ 2 ซึ่งได้กระเจิงมาถึงแล้วมีสัญญาณที่ดีกว่าการกระเจิงของทิศทางที่ 4 และจะเกิดลักษณะเดียวกันที่ตำแหน่ง D ที่มีตู้เหล็กสูงบดบังทิศทางที่ 2 ซึ่งถ้าใช้ทิศทางที่ 4 จะได้ค่าทรูพุตที่สูงกว่า แต่สำหรับที่ตำแหน่ง G จะเห็นว่าไม่มีสิ่งบดบังสัญญาณตรงจากแอกเซสพอยท์แต่ว่าด้านหลังนั้นมีชั้นโลหะที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นจากทิศทางที่ 4 ทำให้ได้ผลที่ดีกว่าทิศทางที่ 3 ส่วนที่ตำแหน่ง H ซึ่งอยู่ใกล้แอกเซสพอยท์มากที่สุดและไม่มีสิ่งบดบังลำคลื่นจากทิศทางที่ 2 และ 4 จะได้ค่าทรูพุตเท่ากัน ค่าทรูพุตมากที่สุดของแต่ละตำแหน่งจะมีค่าในช่วง 20.6 ถึง 21.5 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 21.1 เมกะบิตต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 ทรูพุตที่วัดได้โดยใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง สองย่านความถี่ (ก) ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ข) ความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์

สำหรับผลการทดสอบค่าทรูพุตของ IEEE802.11a ที่ความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2(ข) ที่ตำแหน่ง B, C และ H ได้ผลการทดสอบเช่นเดียวกับลักษณะของกรณีความถี่ต่ำ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะใช้ทิศทางที่ 2 3 และ 2 ตามลำดับ ในกรณีอื่นที่ใช้ทิศทางไม่เหมือนกับความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ นั้นเนื่องจากคลื่นแต่ละความถี่จะมีการเจิงของสัญญาณภายในห้องไม่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามถ้าใช้ทิศทางเหมือนกับกรณีความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง A, B, E, F และ G ซึ่งมีค่าทรูพุตเท่ากับ 20.9, 20.5, 21.1, 20.0 และ 20.6 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ ค่าทรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พุตสูงสุดในแต่ละตำแหน่งจะอยู่ในช่วง 19.5 ถึง 21.1 เมกะบิตต่อวินาที คิดเป็นค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 20.5 เมกะบิตต่อวินาที

ถ้าใช้ทิศทางที่ 4 จะมีตำแหน่งที่ได้ค่าทรูพุตสูงสุดของความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ คือ 21.0, 20.6, 21.2, 21.1, 21.5, 21.4, 21.1 และ 21.1 เมกะบิตต่อวินาที ที่ตำแหน่ง A ถึง H ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.0 เมกะบิตต่อวินาที และทรูพุตของความถี่ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ จะมีค่า 19.9, 19.5, 20.8, 20.1, 21.1, 20.9, 20.5 และ 21.0 เมกะบิตต่อวินาที ที่ตำแหน่ง A ถึง H ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.40 เมกะบิตต่อวินาที

จากการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศระหว่างแบบทิศทางที่ 1 กับทิศทางที่ 2 และระหว่างแบบทิศทางที่ 3 กับทิศทางที่ 4 ในระบบ IEEE802.11b/g และ IEEE802.11a สามารถคำนวณและแสดงค่ากลางของค่าทรูพุตได้ในตารางที่ 5.1 ทำให้เห็นว่าค่าทรูพุตของระบบ IEEE802.11b/g จะได้ค่าที่สูงกว่าของ IEEE802.11a ในทุกทิศทาง เมื่อพิจารณาทั้งสองระบบสายอากาศที่สวิทช์เป็นทิศทางที่ 3 และ 4 จะได้ค่าทรูพุตที่มากกว่าสวิทช์เป็นทิศทางที่ 1 และ 2 เมื่อเทียบกันทั้งคู่ คิดเป็นค่ากลางของค่าทรูพุตของทั้งสองระบบของการสวิทช์เป็นทิศทางที่ 1, 2, 3 และ 4 จะเท่ากับ 20.04, 20.40, 20.51 และ 20.56 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ จากเหตุผลนี้ควรวางสายอากาศในลักษณะที่จะสวิทช์เป็นทิศทางที่ 3 และ 4 จึงจะเหมาะกับสภาแวดล้อมเช่นนี้

ตารางที่ 5.1 ค่ากลางของค่าทรูพุต (เมกะบิตต่อวินาที)

ความถี่	ทิศทางที่ 1	ทิศทางที่ 2	ทิศทางที่ 3	ทิศทางที่ 4
2.4 กิกะเฮิรตซ์ (IEEE 802.11g)	20.27	20.91	20.84	21.03
5.2 กิกะเฮิรตซ์ (IEEE 802.11a)	19.82	19.90	20.17	20.08
ค่าเฉลี่ยของทั้งสองความถี่	20.04	20.40	20.51	20.56

จากการทดสอบนี้ซึ่งได้ใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสองย่านความถี่สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ ทดสอบในสภาพแวดล้อมของห้องที่มีวัตถุขวางกันและสะท้อนคลื่น ที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าทรูพุตที่ต่างกันออกไป ขึ้นกับการเลือกใช้ลำคลื่นของสายอากาศ และการที่ใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นนี้สามารถเพิ่มค่าทรูพตุได้โดยการสวิทช์ลำคลื่นให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งถ้าสายอากาศไม่มีความสามารถในการสวิทช์ลำคลื่นแล้วจะเห็นว่าในบางตำแหน่งจะมีค่าทรูพุตที่ต่ำทำให้ไม่สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง A ของย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ นั้นจะเห็นว่าทรูพุตในกรณีที่ใช้ทิศทางที่ 3 และทิศทางที่ 4 ไม่สอดคล้องกับลักษณะของลำคลื่น ซึ่งถ้าใช้ทิศทางที่ 4 นั้นจะได้ค่าทรูพุตมากกว่าใช้ทิศทางที่ 3 อยู่เล็กน้อย สาเหตุอาจเกิดจากภายในห้องที่ทดสอบนั้นมีสิ่งสะท้อนคลื่นที่เห็นได้ชัดเจนคือโต๊ะโลหะและตู้โลหะซึ่งสามารถทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณเข้ามาได้ สำหรับที่ตำแหน่ง A อาจสันนิษฐานได้ว่า สัญญาณสะท้อนนั้นมีปัจจัยจาก ตู้โลหะสูง 1.8 เมตร และโต๊ะโลหะสูง 0.74 เมตร ที่อยู่ด้านใต้แอกเซสพอยท์ คลื่นที่แผ่ออกไปถึงยังมุมของตู้โลหะจะเกิดการกระเจิงได้และจะมีคลื่นที่กระเจิงมายังตำแหน่ง A ได้ และคลื่นที่แผ่ไปยังขอบของโต๊ะโลหะก็สามารถทำให้เกิดการกระเจิงและสะท้อนมายังตำแหน่ง A ได้อีก ซึ่งการกระเจิงที่มุมและขอบโลหะนั้นมีการอธิบายใน [62] สัญญาณที่สะท้อนเข้ามานี้จะเป็นสัญญาณที่เข้ามาแล้วมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณตรง จะทำให้สัญญาณรวมที่รับได้นั้นมีระดับสัญญาณลดลงได้ เมื่อพิจารณาเส้นทางของคลื่นสะท้อนทั้งสองจะเห็นว่าคลื่นที่สะท้อนจากโต๊ะโลหะนั้นจะมีระยะทางที่ใกล้กว่าคลื่นที่สะท้อนจากตู้โลหะ ระดับสัญญาณของคลื่นสะท้อนจากโต๊ะโลหะนั้นจะมีผลกับสัญญาณที่รับได้มากกว่า ดังนั้นเมื่อให้สายอากาศแผ่คลื่นด้วยทิศทางที่ 3 ซึ่งกำลังงานส่วนมากจะอยู่ในทิศทางเดียวกับโต๊ะโลหะ จึงทำให้เกิดคลื่นสะท้อนที่มีขนาดสัญญาณสูงจนอาจสามารถลดทอนระดับสัญญาณรวมลงได้จึงทำให้ค่าทรูพุตน้อยกว่าเมื่อใช้ลำคลื่นทิศทางที่ 4

สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่ จะมีข้อจำกัดอยู่สองประการที่สำคัญคือ ประการแรกจากผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนในบทที่สามจะเห็นว่าย่านความถี่ต่ำมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่น้อยกว่า -10 dB จะอยู่ในช่วงความถี่ 2.38 ถึง 2.43 กิกะเฮิรตซ์ และค่าต่ำที่สุดเพียง -15 dB ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นต้องใช้ได้ครอบคลุม ตั้งแต่ 2.40 ถึง 2.45 กิกะเฮิรตซ์ สำหรับย่านความถี่สูงผลการทดสอบจะมีค่าน้อยกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ 5.18 ถึง 5.48 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งในการใช้งานควรจะสามารถครอบคลุมได้ในช่วง 5.18 ถึง 5.70 กิกะเฮิรตซ์ สาเหตุที่มีช่วงความถี่ที่แคบนั้นเนื่องจากสายอากาศนี้เป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์แบบพื้นฐานซึ่งมีคุณสมบัติแถบความถี่ที่แคบ การเพิ่มแถบความถี่ให้ใช้งานสำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์โดยทั่วไปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี [65]-[68] ได้แก่ การเลือกใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแผ่นพิมพ์และความหนาของแผ่นพิมพ์ การปรับรูปแบบของแผ่นแผ่พลังงาน การเจาะรองที่แผ่นแผ่พลังงาน การเพิ่มองค์ประกอบปรสิต การป้อนสัญญาณในรูปแบบอื่นๆ และการเพิ่มส่วนปรับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดป้อน เป็นต้น สำหรับสายอากาศในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับแบบรูปการแผ่พลังงานจึงได้เลือกใช้สตับเป็นตัวปรับค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะไม่มีผลกับโหมดการทำงานของสายอากาศเพื่อให้ได้แบบรูปตามที่ต้องการ ดังนั้นในการเพิ่มช่วงความถี่สำหรับสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่ หากต้องการเพิ่มความกว้างแถบความถี่ให้ใช้งานได้ครอบคลุมนั้นอาจสามารถใช้วิธีการอื่นๆ แต่จะต้องพิจารณาถึงแบบรูปการแผ่พลังงานด้วย สำหรับข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของสายอากาศนี้คือ ไม่สามารถใช้กับการรับส่งกำลังงานสูงได้ เนื่องจากสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นทั้งในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และบทที่ 4 ประกอบด้วยแผ่นแผ่พลังงานและลายวงจรสายส่งไมโครสตริป ซึ่งทั้งสองส่วนสร้างจากแผ่นพิมพ์ดังนั้นการรองรับกำลังงานจึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแผ่นพิมพ์ โดยที่แผ่นพิมพ์ประกอบด้วยสองส่วนหลักด้วยกันคือ วัสดุฐานรองที่เป็นฉนวนซึ่งกระแสจะไม่ไหลผ่านโดยส่วนมากจะสามารถทนกำลังงานได้มากในเชิงศักดาไฟฟ้า [69] แต่อีกส่วนหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดสำคัญต่อกำลังงานคือลายทองแดง เนื่องจากทองแดงที่อยู่บนแผ่นพิมพ์นั้นบางมากและยังต้องออกแบบเป็นไมโครสตริปให้มีขนาดที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งานซึ่งต้องมีความกว้างที่น้อยส่งผลให้มีพื้นที่หน้าตัดน้อยลงตามไปด้วย จึงทำให้มีความต้านทานกระแสไฟฟ้า และความต้านทานนี้เป็นส่วนสร้างความร้อนขึ้นโดยที่ความร้อนนั้นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหล หากความร้อนมีอุณหภูมิที่สูงมากจะทำให้วงจรเสียหายได้ ดังนั้นของจำกัดทางกำลังงานที่สำคัญของลายวงจรนั้นคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน สำหรับการพิจารณากระแสที่เหมาะสมนั้นสามารถอ้างอิงจาก IPC-2221 เป็นมาตรฐานการออกแบบแผ่นพิมพ์ทั่วไปในเชิงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [70] ซึ่งได้กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด I (แอมแปร์) ที่ไหลผ่านลายวงจรทองแดงจะเท่ากับ $I = k\Delta T^{0.44} A^{0.725}$ โดยที่ k เป็นค่าคงที่ในกรณีที่ลายวงจรอยู่ด้านนอก (สัมผัสกับอากาศ) จะมีค่าเท่ากับ 0.048, ΔT เป็นค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหล ถ้าอุณหภูมิแวดล้อมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และเพื่อป้องกันไม่ให้ลายวงวงจรรวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหายจึงกำหนดให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดต้องไม่เกิน 75 องศาเซลเซียส ดังนั้น ΔT จะเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส, สำหรับ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลายวงจร (ตารางมิล: mil^2) ซึ่งในงานวิจัยนี้ลายวงจรมีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.34 ตารางมิล เมื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ลายวงจรรองรับได้จะเท่ากับ 0.77 แอมแปร์ เมื่อคิดเป็นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะได้เท่ากับ 0.55 แอมแปร์ และจากที่ออกแบบให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นจะเห็นว่าข้อจำกัดทางกำลังงานจากแผ่นพิมพ์นั้นอยู่ที่ระบบป้อนสัญญาณซึ่งเป็นสายส่งไมโครสตริปจะสามารถรองรับกำลังงานเฉลี่ยได้ไม่เกินประมาณ 15 วัตต์ แต่ข้อจำกัดการรองรับกำลังงานน้อยที่สุดนั้นอยู่ที่สวิทช์ความถี่วิทยุซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ใช้สำหรับสวิทช์สัญญาณเพื่อป้อนให้กับโพรบ โดยทั่วไปจะไม่สามารถรองรับกำลังงานได้สูงมาก สำหรับสายอากาศที่สร้างนี้ได้ใช้สวิทช์ความถี่วิทยุที่รับกำลังงานได้ไม่เกิน 1 วัตต์ ดังนั้นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่และสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นจะรองรับกำลังงานสูงสุดได้ไม่เกิน 1 วัตต์

และจากสาเหตุที่สายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสำหรับสองย่านความถี่นี้ยังไม่สามารถครอบคลุมย่านความได้ทั้งหมด ในการทดสอบค่าทรูพุตนั้นไม่ได้เปรียบเทียบการใช้งานกับสายอากาศอื่นๆ ที่ไม่สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นได้หรือสายอากาศรอบตัว แต่ในงานวิจัยอื่น [71]-[72] ได้แสดงว่าการใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นหรือสายอากาศฉลาดในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสามารถปรับปรุงการรับส่งข้อมูลหรือค่าทรูพุตในระบบให้ดีขึ้นได้เมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศที่ไม่สามารถปรับลำคลื่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาโดยใช้สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น

ในหัวข้อนี้จะแสดงการทดสอบการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นซึ่งมีหลักการทำงานและลักษณะดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 เพื่อใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา โดยใช้วิธีการหาทิศทางที่รับเข้ามาตามในงานวิจัย [18], [53]-[58] ซึ่งได้ใช้สายอากาศที่สามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สี่แบบรูปในมุมระนาบ ลักษณะของแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสี่จากการสวิทช์ลำคลื่นจะเก็บเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์หาทิศทางของสัญญาณ เมื่อใช้สายอากาศนี้รับสัญญาณ โดยสวิทช์แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสี่แบบรูป กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจะใช้ในการพิจารณาหาสัญญาณที่รับเข้ามา โดยใช้อัตราส่วนกำลังงานของแบบรูปที่รับได้มากที่สุดและกำลังงานของแบบรูปที่รับได้รองลงมานำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสี่และจะได้ทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาได้ จะเห็นว่าการหาทิศทางของสัญญาณด้วยวิธีนี้จะต้องเตรียมข้อมูลจากแบบรูปการแผ่พลังงานทุกแบบรูปจากการสวิทช์ลำคลื่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องเตรียมแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นนี้เพื่อใช้ทดสอบการหาทิศทางด้วยการเปรียบเทียบข้อมูล ซึ่งการเตรียมข้อมูลและการพิจารณาข้อมูลเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่รับนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

การเตรียมข้อมูล

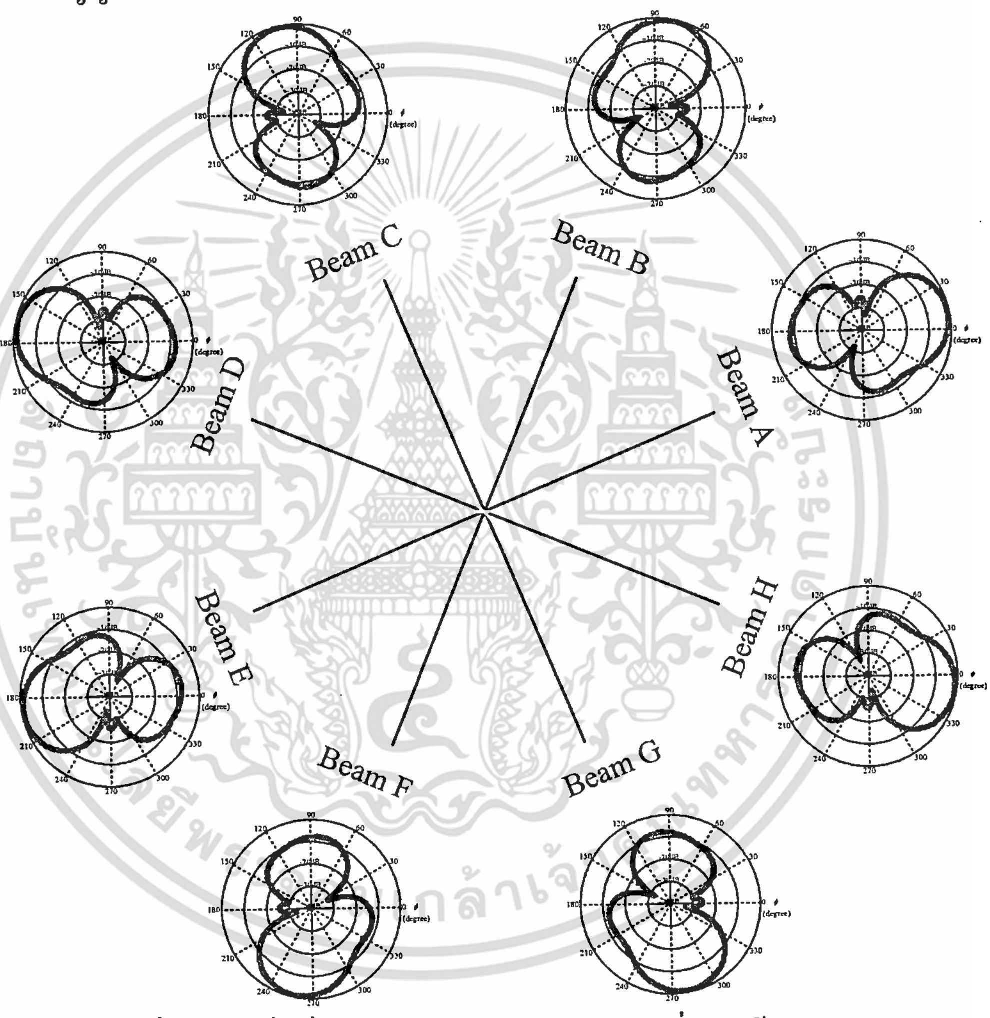
- เลือกและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานจากปรับเฟสและสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น
- นำแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ทั้งหมดวาดบนกราฟเดียวกัน
- แบ่งบริเวณของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ซ้อนทับกัน โดยแต่ละบริเวณจะเป็นบริเวณที่มีการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานมากที่สุดสองแบบรูป
- หาค่าอัตราส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงานในแต่ละมุม ซึ่งเป็นอัตราส่วนการรับกำลังงานที่มากที่สุดต่อด้วยการรับกำลังงานที่รองลงมาในมุมที่ตรงกันของแต่ละบริเวณ อัตราส่วนทั้งหมดนี้ใช้เป็นข้อมูลในการหาทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามา

การพิจารณาหาทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามา

- เก็บค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้จากการปรับเฟสและสวิทช์ของทุกแบบรูปการแผ่พลังงาน
- หาแบบรูปการแผ่พลังงานที่รับสัญญาณได้มากที่สุดเรียกเป็นแบบรูปหลัก
  (สมมุติเป็นแบบรูป A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หาแบบรูปการแผ่พลังงานที่รับสัญญาณได้มากรองลงมาจากแบบรูปหลัก เรียกเป็นแบบรูปรอง (สมมุติเป็นแบบรูป B)
- เมื่อได้แบบรูปหลักและแบบรูปรองจะหาบริเวณที่สัญญาณเข้ามาคือบริเวณ AB
- หาค่าอัตราส่วนรับกำลังงาน ซึ่งจะเป็นค่าอัตราส่วนของกำลังงานรับจากแบบรูปหลักต่อด้วยกำลังงานที่รับจากแบบรูปรอง และนำค่าอัตราส่วนรับกำลังงานนี้เทียบกับอัตราส่วนของแบบรูปในบริเวณที่สัญญาณเข้ามา (อัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AB ตามที่สมมุติ) มุมใดมีค่าของอัตราส่วนของแบบรูปใกล้เคียงมากที่สุดกับอัตราส่วนรับกำลังงาน มุมนั้นจะถือว่าเป็นมุมที่รับสัญญาณเข้ามา



รูปที่ 5.3 ลำคลื่นที่เลือกใช้สำหรับหาทิศทางของคลื่นรับเข้ามา

สำหรับการทดสอบการประยุกต์ใช้งานเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่รับได้นั้นจะเลือกใช้แบบรูปการแผ่พลังงานจำนวน 8 แบบรูป ซึ่งเพียงพอที่จะครอบคลุมทุกบริเวณในมุมระนาบ และแต่ละแบบรูปได้กำหนดชื่อปีนแบบรูป A, B, C, D, E, F, G และ H ที่จะรับกำลังงานสูงสุดที่มุม 15, 75, 105, 165, 195, 255, 285 และ 345 องศา ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3 จากนั้นจึงทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นทั้ง 8 แบบรูป ซึ่งได้ทดสอบในห้องไร้การสะท้อนคลื่น ทดสอบแบบรูปในมุมระนาบให้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่มุมยกเท่ากับ 45 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 4.23 (ก) และผลการทดสอบได้แสดงในตารางที่ 5.2 โดยแต่ละแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นจะมีลักษณะที่สอดคล้องกับผลการจำลอง กล่าวคือสามารถชี้ทิศทางได้ในมุมที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง ซึ่งในการนำไปใช้หาทิศทางนั้นจะใช้ลำคลื่นหลักเป็นส่วนที่สำคัญ สำหรับส่วนอื่นๆนั้นจะมีความสำคัญน้อยหากมีการรับกำลังงานที่ต่ำ

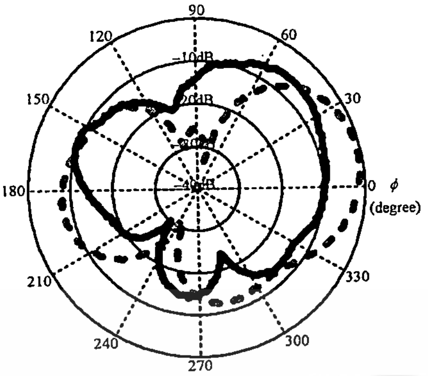
การทดสอบนี้จะคำนึงถึงความสามารถในการระบุทิศทางโดยใช้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่ใช้องค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความสามารถในการระบุทิศทางของสัญญาณนั้นจะขึ้นกับจำนวณของแบบรูปการแผ่พลังงานด้วย ดังนั้นจึงได้จัดกลุ่มของแบบรูปเพื่อการทดสอบออกแป็นสามกลุ่มด้วยกันคือ กลุ่มที่หนึ่งใช้ 8 แบบรูปทั้งหมดคือ A B C D E F G H เรียกเป็น 8B กลุ่มที่สองจะใช้ 4 แบบรูป คือ A C E G เรียกเป็น 4B1 และกลุ่มที่สามจะใช้ 4 แบบรูปคือ B D F H เรียกเป็น 4B2

ในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาได้แบ่งบริเวณครอบคลุมการรับสัญญาณที่เข้ามาของทั้งสามกลุ่มแบบรูปดังได้แสดงในรูปที่ 5.4 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ ในรูปที่ 5.4 (ก) เป็นการแบ่งบริเวณของ 8B จากการจำลองซึ่งจะสามารถแบ่งบริเวณทั้งหมดได้ 16 บริเวณด้วยกัน แต่แบบรูปการแผ่พลังงานจากการทดสอบนั้นพบว่าสามารถแบ่งได้ 17 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) แต่ละบริเวณจะครอบคลุมในมุมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3.1 ในรูปที่ 5.5 (ก) เป็นการแบ่งบริเวณของ 4B1 จากการจำลองซึ่งจะสามารถแบ่งบริเวณทั้งหมดได้ 8 บริเวณด้วยกัน แต่แบบรูปการแผ่พลังงานจากการทดสอบนั้นพบว่าสามารถแบ่งได้ 15 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ข) แต่ละบริเวณจะครอบคลุมในมุมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3.2 และในรูปที่ 5.6 (ก) เป็นการแบ่งบริเวณของ 4B2 จากการจำลองซึ่งจะสามารถแบ่งบริเวณทั้งหมดได้ 8 บริเวณด้วยกัน แต่แบบรูปการแผ่พลังงานจากการทดสอบนั้นพบว่าสามารถแบ่งได้ 13 บริเวณ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ข) แต่ละบริเวณจะครอบคลุมในมุมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.3.3 จากการแบ่งบริเวณครอบคลุมของทั้งสามกลุ่มแบบรูปการแผ่พลังงานจะเห็นว่าผลจากการทดสอบนั้นเมื่อแบ่งบริเวณครอบคลุมแล้วจะได้บริเวณมากกว่าการจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานจากการทดสอบนั้นในบางแบบรูปจะมีลำคลื่นหลักที่เบี่ยงเบนไปมากจึงทำให้เกิดบริเวณที่ทับซ้อนกันมากขึ้น และสำหรับ 4B1 และ 4B2 ที่ใช้ 4 แบบรูปนั้น จะมีจำนวนบริเวณเพิ่มกว่าการจำลองอยู่มาก เพราะนอกจากลำคลื่นหลักที่เบี่ยงเบนออกไปแล้ว ยังมีลำคลื่นรองที่สูงในบางช่วง ทำให้เกิดบริเวณที่ทับซ้อนของแบบรูปมากขึ้น แต่เป็นบริเวณที่ใช้แบบรูปที่ซ้ำกับบริเวณอื่น ในกลุ่ม 4B1 จะมีบริเวณที่ 2 และ 14 จะใช้แบบรูป AG บริเวณ 3 และ 5 จะใช้แบบรูป CA และบริเวณ 4 และ 6 จะใช้แบบรูป CE สำหรับ กลุ่ม 4B2 จะมีบริเวณ 2 และ 4 จะใช้แบบรูป BD บริเวณ 3 และ 11 จะใช้แบบรูป BH และบริเวณ 7 และ 9 จะใช้แบบรูป FD ซึ่งผลการทดสอบจะชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการระบุทิศทางของการใช้จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานดังที่จะแสดงต่อไป

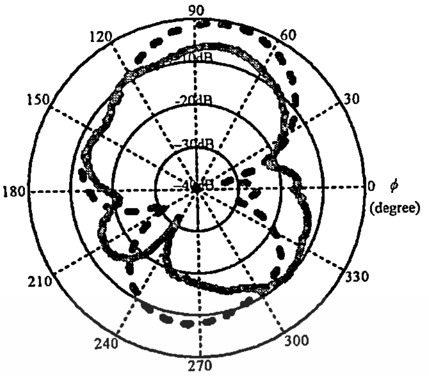
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน

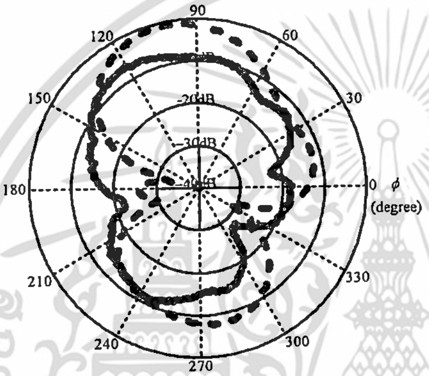
แบบรูป A



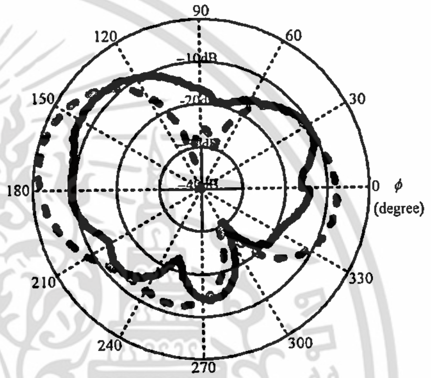
แบบรูป B



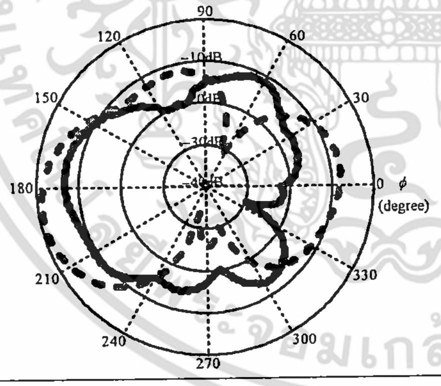
แบบรูป C



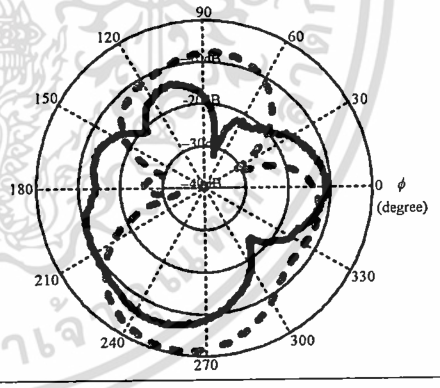
แบบรูป D



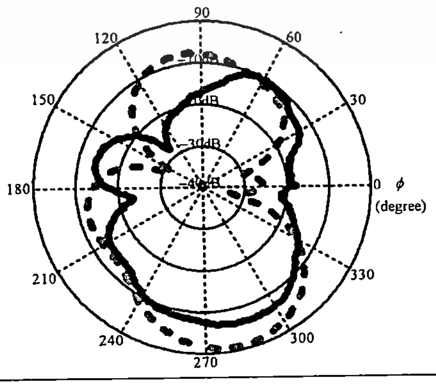
แบบรูป E



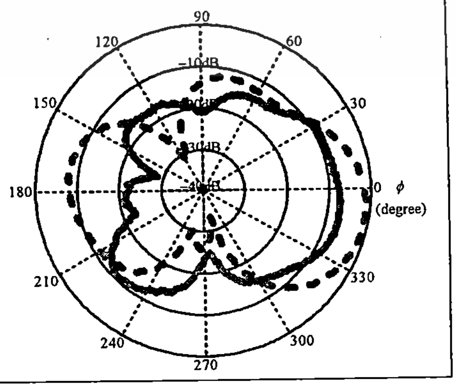
แบบรูป F



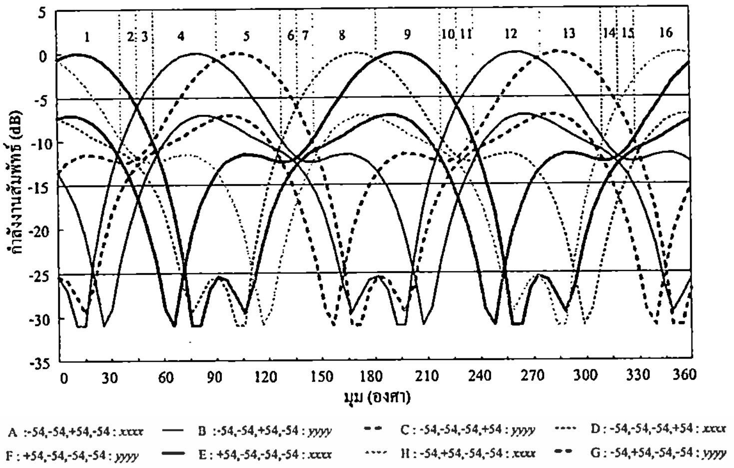
แบบรูป G



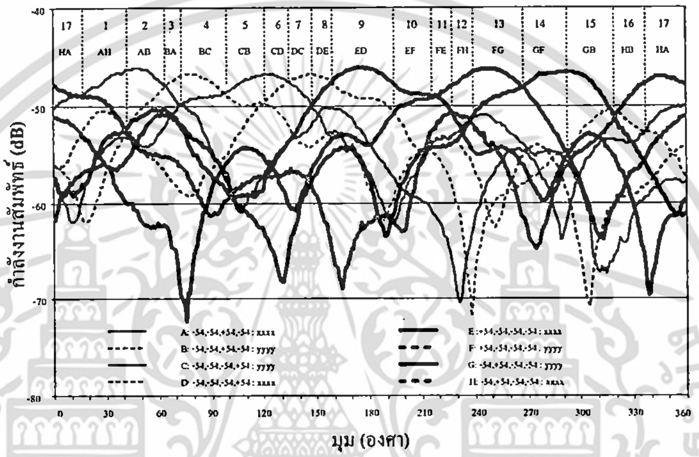
แบบรูป H



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

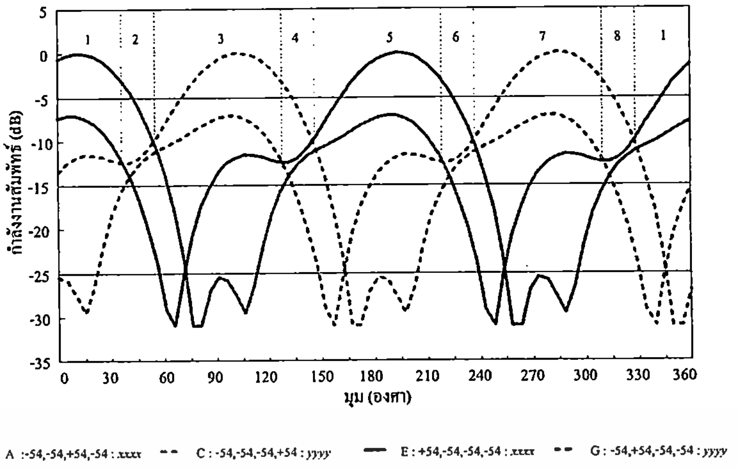
รูปที่ 5.4 การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 8B:A-H

(ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดสอบ

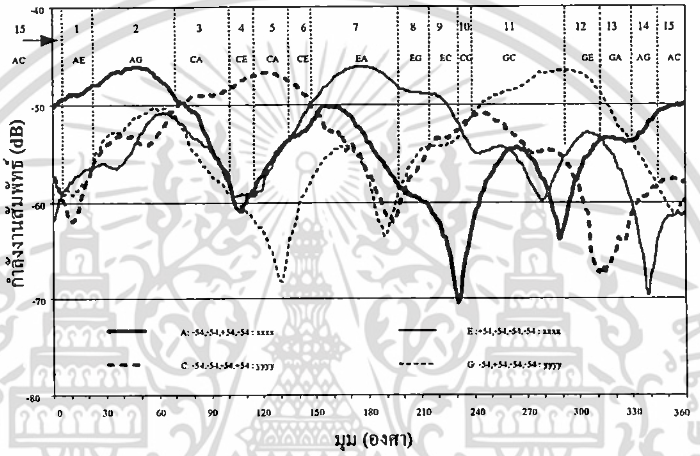
ตารางที่ 5.3.1 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 8B :A-H

บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)	บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)
1 (AH)	18 ถึง 40	9 (ED)	159 ถึง 192
2 (AB)	41ถึง 63	10 (EF)	193 ถึง 215
3 (BA)	64 ถึง 73	11 (FE)	216 ถึง226
4 (BC)	73 ถึง97	12 (FH)	227 ถึง237
5 (CB)	98 ถึง121	13 (FG)	238 ถึง268
6 (CD)	122 ถึง 133	14 (GF)	269 ถึง291
7 (DC)	134 ถึง146	15 (GB)	292 ถึง318
8 (DE)	147 ถึง158	16 (HB)	319 ถึง337
		17 (HA)	338 ถึง17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

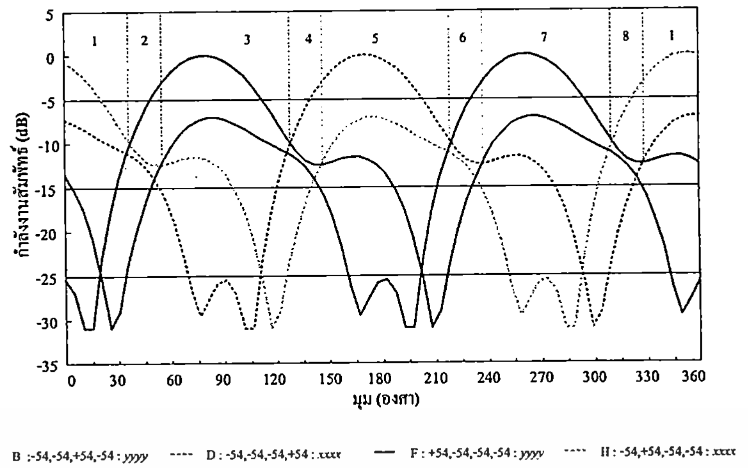
รูปที่ 5.5 การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 4B1:ACEG

(ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดสอบ

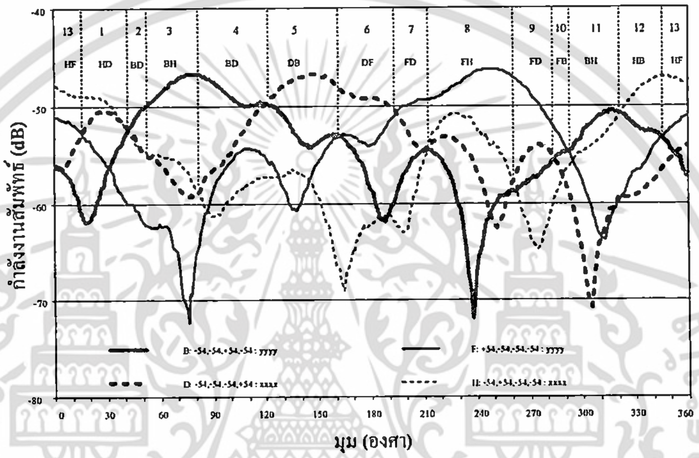
ตารางที่ 5.3.2 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 4B1:ACEG

บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)	บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)
1 (AE)	5 ถึง 21	9 (EC)	217 ถึง231
2 (AG)	22 ถึง 72	10 (CG)	232 ถึง237
3 (CA)	73 ถึง 101	11 (GC)	238 ถึง 292
4 (CE)	102 ถึง115	12 (GE)	293 ถึง 312
5 (CA)	116 ถึง 133	13 (GA)	313 ถึง 329
6 (CE)	134 ถึง147	14 (AG)	330 ถึง 345
7 (EA)	148 ถึง199	15 (AC)	346 ถึง 4
8 (EG)	200 ถึง 216		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 การแบ่งบริเวณครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้แบบรูป 4B2 :BDFH

(ก) ผลการจำลอง (ข) ผลการทดสอบ

ตารางที่ 5.3.3 บริเวณครอบคลุมทิศทางมุมระนาบจากการทดสอบ โดยใช้แบบรูป 4B2 :BDFH

บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)	บริเวณ	ครอบคลุมมุม ϕ (องศา)
1 (HD)	16 ถึง 41	7 (FD)	194 ถึง 211
2 (BD)	42 ถึง 48	8 (FH)	212 ถึง 260
3 (BH)	49 ถึง 81	9 (FD)	261 ถึง 283
4 (BD)	82 ถึง 119	10 (FB)	284 ถึง 291
5 (DB)	120 ถึง160	11 (BH)	292 ถึง 320
6 (DF)	161 ถึง 193	12 (HB)	321 ถึง 345
		13 (HF)	346 ถึง 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานนี้ได้เก็บผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานทุกหนึ่งองศาจาก 0 ถึง 359 องศา ดังนั้นในการเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ในการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาจะมีจำนวน 360 มุม รอบระนาบมุมทิศ อัตราส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงานที่รับกำลังงานได้มากที่สุดต่อแบบรูปที่รับกำลังงานได้รองลงมาของแต่ละมุมของในแต่ละช่วง เช่นถ้าใช้ 8B ในช่วงบริเวณที่ 1 หรือบริเวณที่แบบรูปการแผ่พลังงาน A รับกำลังงานได้มากที่สุดและแบบรูปการแผ่พลังงาน B รับกำลังงานได้รองลงมา เพื่อความสะดวกจึงเรียกเป็นเบริเวณ AB อัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละมุมในช่วงบริเวณ 18 ถึง 40 องศา มีจำนวน 22 มุม ที่ได้จากอัตราส่วนกำลังงานที่จากแบบรูปการแผ่พลังงาน A ต่อด้วยกำลังงานที่รับจากแบบรูปการแผ่พลังงาน B ซึ่งค่าอัตราส่วนแบบรูปการรับกำลังงานในช่วง AB และอัตราส่วนในบริเวณอื่นๆ อีก 16 บริเวณได้แสดงใน ภาคผนวก ก.1 และจะใช้เป็นข้อมูลในการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาต่อไป และสำหรับการหาทิศด้วย 4B1 และ 4B2 จะใช้ข้อมูลอัตราส่วนในภาคผนวก ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ

เมื่อได้ข้อมูลอัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในแต่ละบริเวณของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นแล้วนั้น ก็สามารถนำสายอากาศนี้ใช้ทดสอบเพื่อหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาได้ โดยทดสอบการรับสัญญาณในห้องไร้การสะท้อนเช่นเดียวกับการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งได้จัดวางให้สายอากาศไมโครสตริปตัวส่งแผ่กำลังงานมากที่สุดมาในทิศทาง 0 องศาและมีมุมยกเท่ากับ45 องศา ของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่น จากนั้นปรับเฟสและสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศเพื่อรับกำลังงานด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 8 แบบรูป และในการทดสอบได้เพิ่มการทดสอบเพื่อหาสัญญาณที่เข้ามาจากทิศทางอื่นด้วย โดยติดตั้งแผ่นสะท้อนคลื่นที่เป็นโลหะทองแดงขนาด 110×45 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตัวสะท้อนให้เข้ามาจากทิศทาง 45, 135 และ 180 องศา ดังนั้นในการทดสอบการระบุทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามานั้นไปแบ่งเป็น 4 กรณีด้วยกันคือ ซึ่งทุกกรณีจะมีสัญญาณจากสายอากาศตัวส่งเป็นสัญญาณจากทิศทางตรง (direct wave) ที่มุม 0 องศา ในกรณีแรกจะมีเฉพาะสัญญาณทิศทางตรงเท่านั้น ส่วนกรณีที่สอง สาม และสี่ จะใช้แผ่นสะท้อนคลื่นทำให้มีสัญญาณสะท้อน (reflected wave) มาจากทิศทาง 45, 135 และ 180 องศา ตามลำดับ การระบุสัญญาณนั้นจะใช้กลุ่มของแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสามคือ 8B, 4B1 และ 4B2 ผลการทดสอบในแต่ละกรณีแสดงได้ดังต่อไปนี้

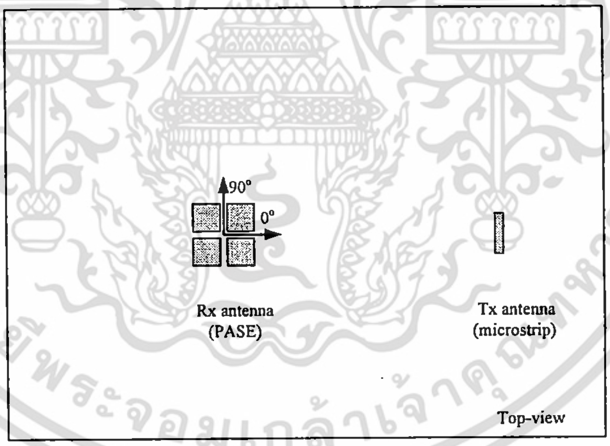
5.2.1 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง

ได้จัดวางการทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงตามรูปที่ 5.7 ที่แสดงมุมมองจากด้านบน เมื่อใช้แบบรูป 8B กำลังงานที่รับของแต่ละแบบรูปนั้นได้แสดงดังในตารางที่ 5.4.1 จากนั้นพิจารณามุมที่รับสัญญาณเข้ามาโดยจะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงาน H จะรับกำลังงานได้มากที่สุดจึงเป็นแบบรูปหลัก และแบบรูปการแผ่พลังงาน A เป็นแบบรูปที่รับกำลังงานได้มากรองลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาจึงเป็นแบบรูปรอง ดังนั้นจึงบอกว่าได้สัญญาณที่รับเข้ามาจะอยู่ในบริเวณ HA จากนั้นหาค่าอัตราส่วนกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงาน H ต่อกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงาน A จะมีค่าเท่ากับ 1.23 dB จากนั้นหามุมที่สัญญาณเข้ามาโดยเทียบค่า 1.23 กับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จากภาคผนวก ก.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนที่ใกล้เคียงมากที่สุดนั้นเท่ากับ 1.13 ดังในตารางที่ 5.4.2 ดังนั้นสัญญาณที่รับเข้ามาโดยใช้กลุ่มแบบรูปการแผ่พลังงาน 8B นั้นระบุได้ว่าสัญญาณทิศทางตรงที่รับได้นั้นเข้ามาที่มุม 6 องศา เมื่อใช้แบบรูปการแผ่พลังงาน 4B1 จากตารางที่ 5.4.3 จะพบว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นอยู่ในบริเวณ AC อัตราส่วนกำลังงานที่รับได้เท่ากับ 0.08 dB เมื่อเทียบอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AC ในภาคผนวก ก.3 ดังตารางที่ 5.4.4 พบว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นอยู่ที่ -13 องศา และถ้าใช้แบบรูปการแผ่พลังงาน 4B2 จากตารางที่ 5.4.5 จะพบว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นอยู่ในบริเวณ HB อัตราส่วนกำลังงานที่รับได้เท่ากับ 3.66 dB เมื่อเทียบอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HB ในภาคผนวก ก.3 ดังตารางที่ 5.4.6 พบว่าสัญญาณที่เข้ามานั้นอยู่ที่ -30 องศา

ในรูปที่ 5.8 ได้แสดงการระบุทิศของสัญญาณที่รับได้ของการใช้ทั้งสามกลุ่มแบบรูปการแผ่พลังงาน ในกรณีที่มีเฉพาะสัญญาณทิศทางตรง 0 องศา ผลการระบุสัญญาณที่รับเข้ามานั้น จากการใช้ 8B จะได้มุมที่ใกล้เคียงมากที่สุด



รูปที่ 5.7 การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรง

ตารางที่ 5.4.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 8B

แบบรูป	A	B	C	D	E	F	G	H
รับกำลังงานได้(dBm)	- 52.38	-54.81	-53.26	-55.71	-60.05	-64.02	-53.53	-51.15

ตารางที่ 5.4.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B

มุม (องศา)	338	…	4	5	6	7	…	17
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HA	5.04	…	1.63	1.44	1.13	0.95	…	0.03

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4.3 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B1

แบบรูป	A	C	E	G
รับกำลังงานได้(dBm)	- 52.38	-53.26	-60.05	-53.53

ตารางที่ 5.4.4 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AC จาก4B1

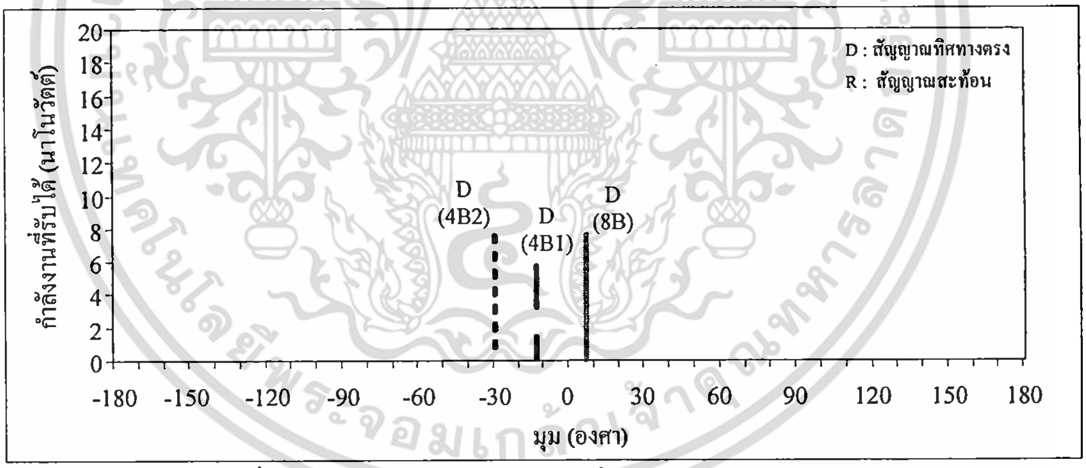
มุม (องศา)	-14	-13	-12	-13	...	4
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ AC	7.33	7.15	7.22	7.18	...	9.66

ตารางที่ 5.4.5 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B2

แบบรูป	B	D	F	H
รับกำลังงานได้(dBm)	-54.81	-55.71	-64.02	-51.15

ตารางที่ 5.4.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HBจาก 4B2

มุม (องศา)	-39	...	-31	-30	-29	...	-155
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HB	0.17	...	3.27	3.73	3.97	...	6.44



รูปที่ 5.8 การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรง

5.2.2 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 45 องศา

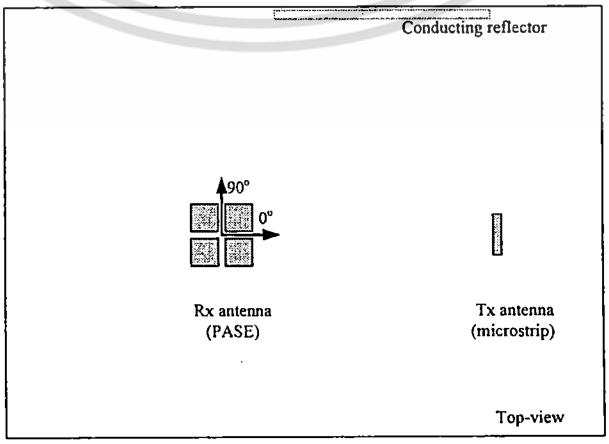
ต่อมาได้ใช้วิธีการนี้ประยุกต์ต่อเพื่อหาทิศทางที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสัญญาณจากทิศทางอื่นที่เกิดจากวัตถุสะท้อนสัญญาณ โดยได้ติดตั้งแผ่นโลหะสะท้อนคลื่นเพื่อให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและเข้ามาในทิศทางประมาณ 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ในการหาทิศทางที่เข้ามานั้นจะเก็บกำลังงานจากการรับด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 8 เช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา แต่ในการพิจารณาทิศทางที่เข้ามานั้นจะพิจารณาสองครั้ง โดยครั้งแรกจะหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาจากทิศทางตรงซึ่งจะต้องมีกำลังงานที่รับได้มากที่สุดจากสองแบบรูปการแผ่พลังงาน และในครั้งที่สองจะพิจารณาทิศทางของสัญญาณที่มาจากการสะท้อน ซึ่งจะใช้กำลังงานจากลำคลื่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับได้มากรองลงมาจากสองแบบรูปที่ใช้หาสัญญาณทิศทางตรงไปแล้ว การรับกำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปได้แสดงในตารางที่ 5.5.1 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงาน H เป็นแบบรูปหลัก และแบบรูปการแผ่พลังงาน A เป็นแบบรูปรอง แต่กำลังงานที่รับได้นั้นสังเกตุว่าจะมากกว่าในกรณีที่ไม่มีแผ่นสะท้อนกำลังงาน และที่สำคัญจะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงาน B จะสามารถรับกำลังงานได้มากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีแผ่นสะท้อนคลื่น การพิจารณาสัญญาณที่เข้ามานั้นเริ่มจากหาทิศของสัญญาณที่มาจากทางตรงเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา ค่าอัตราส่วนการรับกำลังงานเท่ากับ 0.12 และอยู่ในบริเวณ HA เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณนี้ดังในตารางที่ 5.5.2 ข้อมูลในภาคผนวก ก.1 พบว่าสัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ที่มุม 16 องศา และเนื่องจากที่แบบรูปการแผ่พลังงาน B รับกำลังงานได้มากขึ้นนั้นแสดงว่ามีสัญญาณที่เข้ามาในบริเวณนี้ด้วย เมื่อพิจารณาแล้วจะมีสัญญาณที่รองลงมาเพื่อจะใช้หาสัญญาณสะท้อนคือกำลังงานจากแบบรูป C ซึ่งบอกว่าได้ว่ามีสัญญาณที่เข้ามาในบริเวณ BC ดังนั้นหาอัตราส่วนกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการแผ่พลังงาน B ต่อ ด้วยกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการแผ่พลังงาน C จะมีค่าเท่ากับ 3.02 และเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ BC ดังในตารางที่ 5.5.3 พบว่าจะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากแผ่นสะท้อนคลื่นในทิศทางมุม 74 องศา

และเมื่อใช้แบบรูป 4B1 หาทิศทาง จะได้กำลังงานดังในตารางที่ 5.5.4 สัญญาณที่รับเข้ามาทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ AC เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.2 แสดงในตารางที่ 5.5.5 พบว่าสัญญาณทิศทางตรงนั้นเข้ามาทางมุม -13 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะถูกบังคับให้ใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป G และ E ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในบริเวณ GE และเมื่อเทียบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 5.5.6 แล้วพบว่าสัญญาณสะท้อนมาจากมุม -52 องศา

ถ้าใช้แบบรูป 4B2 หาทิศทาง จะได้กำลังงานดังในตารางที่ 5.5.7 สัญญาณที่รับเข้ามาทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ BH เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.3 แสดงในตารางที่ 5.5.8 พบว่าสัญญาณทิศทางตรงนั้นเข้ามาทางมุม -36 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะถูกบังคับให้ใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป F และ D ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในบริเวณ FD และเมื่อเทียบอัตราส่วนดังเสดงในตารางที่ 5.5.9 แล้วพบว่าสัญญาณสะท้อนมาจากมุม -90 องศา



รูปที่ 5.9 การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีแผ่นสะท้อนคลื่นที่ 45 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.10 ได้แสดงผลการระบุทิศทางในกรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรงและสะท้อนจาก 45 องศา สัญญาณทิศทางตรงจากแบบรูป 4B1 จะใกล้เคียงมากที่สุด ส่วนแบบรูป 8B จะผิดพลาดมากกว่า 4B1 อยู่ 3 องศา สำหรับสัญญาณสะท้อนนั้นแบบรูป 8B จะใกล้เคียงมากที่สุด ส่วนการใช้ 4 แบบรูปนั้น จะผิดพลาดมากซึ่งทิศที่ระบุได้นั้น จะอยู่ในบริเวณตรงข้ามกับทิศทางมีแผ่นสะท้อนวางอยู่

ตารางที่ 5.5.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 8B

แบบรูป	A	B	C	D	E	F	G	H
รับกำลังงานได้(dBm)	- 48.04	-49.35	-52.37	-58.61	-58.74	-52.36	-53.72	-47.92

ตารางที่ 5.5.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B

มุม (องศา)	338	...	14	15	16	17
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HA	5.04	...	0.49	0.28	0.02	0.03

ตารางที่ 5.5.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ BC จาก 8B

มุม (องศา)	74	75	76	...	97
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ BC	2.97	2.85	2.85	...	0.17

ตารางที่ 5.5.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B1

แบบรูป	A	C	E	G
รับกำลังงานได้(dBm)	- 48.04	-52.37	-58.74	-53.72

ตารางที่ 5.5.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AC จาก 4B1

มุม (องศา)	-68	-13	-12	-11	...	4
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ AC	7.33	7.15	7.22	7.18	...	9.66

ตารางที่ 5.5.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ GE จาก 4B1

มุม (องศา)	-67	...	-53	-52	-51	...	-48
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ GE	3.31	...	5.24	5.10	4.93	...	4.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 4B2

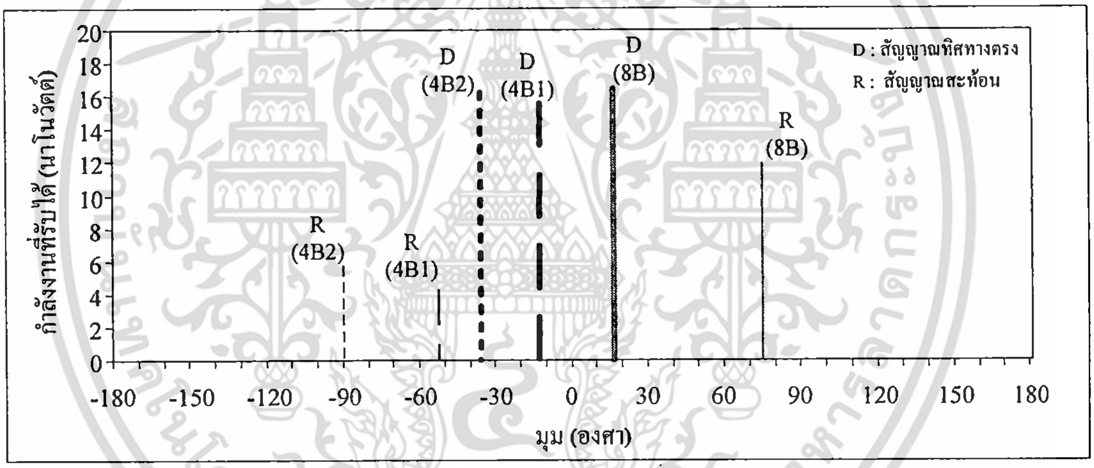
แบบรูป	B	D	F	H
รับกำลังงานได้(dBm)	-49.35	-58.61	-52.36	-47.92

ตารางที่ 5.5.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HB จาก 4B2

มุม (องศา)	-39	-38	-37	-36	...	-15
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HB	0.17	0.52	0.95	1.31	...	6.44

ตารางที่ 5.5.9 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ FD จาก 4 B2

มุม (องศา)	-99	...	-91	-90	-89	...	-77
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ FD	10.49	...	6.6	5.92	5.63	...	3.46



รูปที่ 5.10 การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 45 องศา

5.2.3 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 135 องศา

เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นโลหะสะท้อนคลื่นเพื่อให้เกิดการสะท้อนกำลังงานมาจากทิศทาง 135 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.11 การรับกำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปได้แสดงในตารางที่ 5.6.1 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงาน H เป็นแบบรูปหลัก และแบบรูปการแผ่พลังงาน A เป็นแบบรูปรอง สัญญาณที่เข้ามาจากทิศทางตรงสามารถหาได้เช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา ค่าอัตราส่วนการรับกำลังงานเท่ากับ 0.85 และอยู่ในบริเวณ HA เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณนี้ดังในตารางที่ 5.6.2 ข้อมูลในภาคผนวก ก.1 พบว่าสัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ที่มุม 7 องศา และสัญญาณที่รองลงมาที่จะใช้หาสัญญาณสะท้อนคือกำลังงานจากแบบรูป D และ C ซึ่งบอกว่าได้ว่ามีสัญญาณที่เข้ามาในบริเวณ DC ดังนั้นหาอัตราส่วนกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการการแผ่

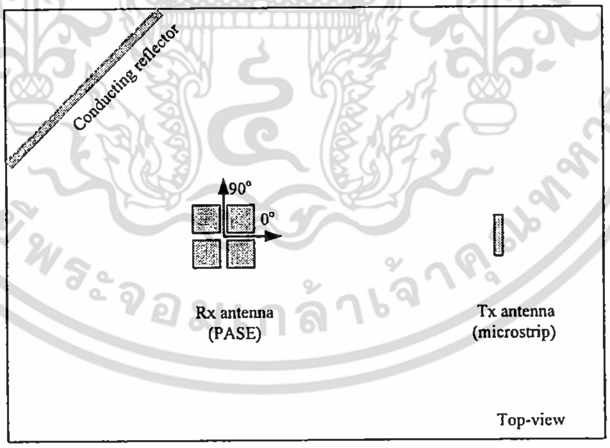
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงาน D ต่อด้วยกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการแผ่พลังงาน C จะมีค่าเท่ากับ 1.71 และเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ DC ดังในตารางที่ 5.6.3 พบว่าจะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากแผ่นสะท้อนคลื่นในทิศทางมุม 141 องศา

ถ้าใช้แบบรูป 4B1หาทิศทาง จะได้กำลังงานดังในตารางที่ 5.6.4 สัญญาณที่รับเข้ามาทิศทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ AG เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.2 แสดงในตารางที่ 5.6.5 พบว่าสัญญาณทิศทางตรงนั้นเข้ามาทางมุม -28 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะถูกบังคับให้ใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป C และ E ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในบริเวณ CE และเมื่อเทียบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 5.6.6 แล้วพบว่าสัญญาณสะท้อนมาจากมุม 147 องศา

ถ้าใช้แบบรูป 4B2 หาทิศทาง จะได้กำลังงานดังในตารางที่ 5.6.7 สัญญาณที่รับเข้ามาทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ HD เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.3 แสดงในตารางที่ 5.6.8 พบว่าสัญญาณทิศทางตรงนั้นเข้ามาทางมุม 30 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะถูกบังคับให้ใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป B และ F สัญญาณที่รับจากแบบรูป B จะมากกว่าแบบรูป F แต่ในการแบ่งบริเวณของ 4B2 นั้นไม่มีบริเวณ BF ดังนั้นในกรณีนี้จึงไม่สามารถระบุทิศทางได้ของสัญญาณสะท้อนได้

สรุปผลการระบุทิศทางในกรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรงและสะท้อนจาก 135 องศา ได้แสดงรูปที่ 5.12 แบบรูป 8B นั้นสามารถระบุได้ใกล้เคียงที่สุดทั้งสองสัญญาณ ส่วนแบบรูป 4B2 นั้นจะไม่สามารถระบุสัญญาณสะท้อนได้



รูปที่ 5.11 การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีแผ่นสะท้อนคลื่นที่ 135 องศา

ตารางที่ 5.6.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป 8B

แบบรูป	A	B	C	D	E	F	G	H
รับกำลังงานได้(dBm)	- 48.92	-49.83	-50.97	-49.26	-51.03	-52.57	-50.38	-48.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B

มุม (องศา)	338	…	6	7	8	…	17
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HA	5.04	…	1.13	0.95	0.65	….	0.03

ตารางที่ 5.6.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ DC จาก 8B

มุม (องศา)	134	…	140	141	142	…	147
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ DC	0.09	…	1.35	1.67	1.76	…	3.24

ตารางที่ 5.6.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป AG จาก 4B1

แบบรูป	A	C	E	G
รับกำลังงานได้(dBm)	- 48.92	-50.97	-51.03	-50.38

ตารางที่ 5.6.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AG จาก 4B1

มุม (องศา)	22	23	24	…	72	-30	-29	-28	…	-45
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณAG	8.10	7.73	6.88	…	2.44	0.34	0.83	1.25	…	8.03

ตารางที่ 5.6.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ CE จาก 4 B1

มุม (องศา)	102	103	104	…	115		134	…	146	147
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ CE	11.17	11.31	11.45	…	12.3		6.09	…	0.72	0

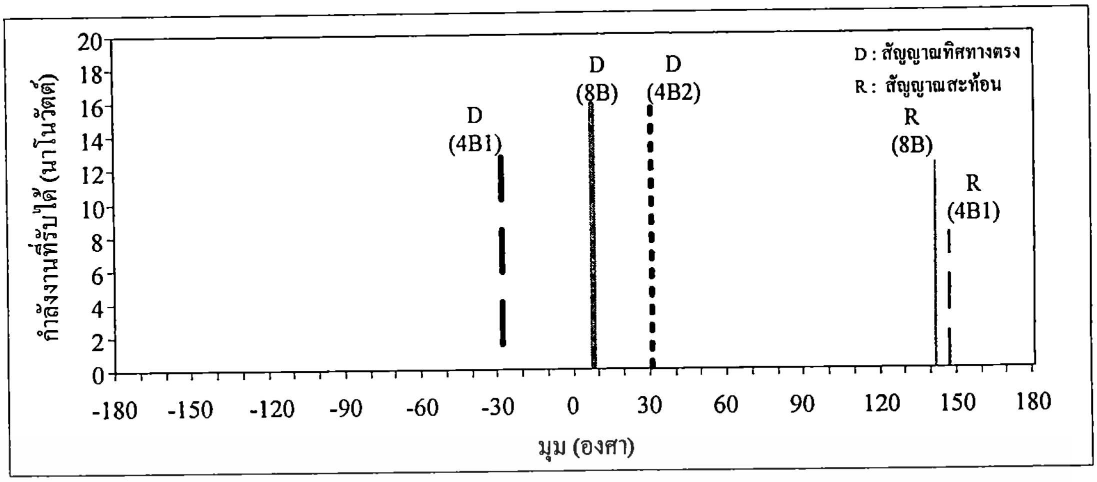
ตารางที่ 5.6.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 4B2

แบบรูป	B	D	F	H
รับกำลังงานได้ (dBm)	-49.83	-49.26	-52.57	-48.07

ตารางที่ 5.6.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HD จาก 4B2

มุม (องศา)	16	…	29	30	31	…	41
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HD	3.91	…	1.35	1.18	1.07	…	0.00

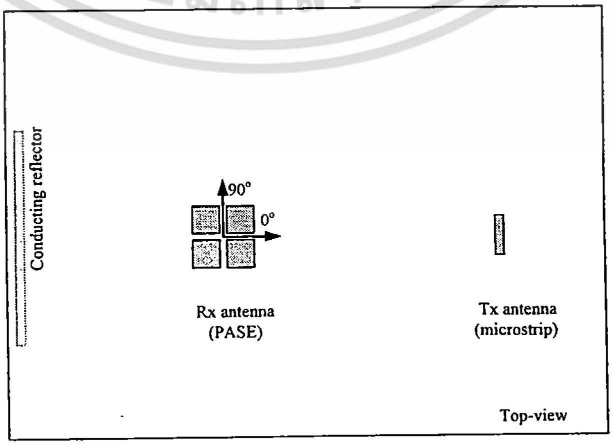
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 135 องศา

5.2.4 กรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรง และสะท้อนมาจาก 180 องศา

และในกรณีสุดท้ายในการทดสอบ โดยเปลี่ยนตำแหน่งแผ่นสะท้อนคลื่นเพื่อให้เกิดการสะท้อนกำลังงานมาจากทิศทาง 180 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.13 การรับกำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปได้แสดงในตารางที่ 5.7.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน H จะเป็นแบบรูปหลักและแบบรูปการแผ่พลังงาน A เป็นแบบรูปรอง สัญญาณที่เข้ามาจากทิศของสัญญาณจากทางตรงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ผ่านมา ค่าอัตราส่วนการรับกำลังงานเท่ากับ 1.02 และอยู่ในบริเวณ HA เมื่อเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณนี้ดังในตารางที่ 5.7.2 ข้อมูลในภาคผนวก ก.1 พบว่าสัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ที่มุม 7 องศา ส่วนสัญญาณรองที่จะใช้หาสัญญาณสะท้อนจะเป็นกำลังงานจากแบบรูป E และ D ดังนั้นมีสัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในบริเวณ ED และอัตราส่วนกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการแผ่พลังงาน E ต่อด้วยกำลังงานที่รับได้ของแบบรูปการการแผ่พลังงาน D เท่ากับ 1.99 และเทียบกับอัตราส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ ED ดังในตารางที่ 5.7.3 พบว่าจะมีสัญญาณที่สะท้อนมาจากแผ่นสะท้อนคลื่นในทิศทางมุม 165 องศา



รูปที่ 5.13 การทดสอบรับสัญญาณจากทิศทางตรงและมีแผ่นสะท้อนคลื่นที่ 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากใช้แบบรูป 4B1 หาทิศทาง จะใช้ค่ากำลังงานดังในตารางที่ 5.7.4 สัญญาณที่รับเข้ามาทิศทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ AE เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.2 แสดงในตารางที่ 5.7.5 บอกว่าสัญญาณทิศทางตรงนั้นมาในมุม 17 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะถูกบังคับให้ใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป C และ G ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในบริเวณ CG และเมื่อเทียบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 5.7.6 จะระบุว่าสัญญาณสะท้อนนั้นมาจากมุม -127 องศา

และเมื่อใช้แบบรูป 4B2 หาทิศทาง จะได้กำลังงานดังในตารางที่ 5.7.7 สัญญาณที่รับเข้ามาทางตรงนั้นอยู่ในบริเวณ HD เมื่อเทียบอัตราส่วนจากในภาคผนวก ก.3 แสดงในตารางที่ 5.7.8 ระบุได้ว่าสัญญาณทิศทางตรงเข้ามาทางมุม 16 องศา ส่วนสัญญาณสะท้อนนั้นจะใช้อีกสองค่ากำลังงานที่เหลือคือจากแบบรูป F และ B ดังนั้นจะอยู่ในบริเวณ FB และเมื่อเทียบอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 5.7.8 ระบุได้ว่าสัญญาณสะท้อนนั้นมาจากมุม -76 องศา

ในรูปที่ 5.14 ได้แสดงผลการระบุทิศทางในกรณีที่มีสัญญาณทิศทางตรงและสะท้อนจาก 180 องศาแบบรูป 8B นั้นสามารถระบุได้ใกล้เคียงที่สุด ส่วนแบบรูป 4B2 นั้นจะระบุค่าได้ผิดพลาดมากที่สุดเมื่อใช้หาสัญญาณสะท้อน และสัญญาณสะท้อนที่ระบุได้จากการใช้ 4 แบบรูปนั้นจะอยู่ตรงข้ามกับการระบุด้วย 8 ลำคลื่น

ตารางที่ 5.7.1 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูปจาก 8B

แบบรูป	A	B	C	D	E	F	G	H
รับกำลังงานได้(dBm)	- 49.49	-58.09	-54.98	-53.47	-51.48	-53.48	-56.35	-48.47

ตารางที่ 5.7.2 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HA จาก 8B

มุม (องศา)	338	…	6	7	8	…	17
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HA	5.04	…	1.13	0.95	0.65	….	0.03

ตารางที่ 5.7.3 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ ED จาก 8B

มุม (องศา)	159	…	164	165	166	…	192
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ ED	0.11	…	1.57	2.02	2.14	…	275

ตารางที่ 5.7.4 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป AG จาก 4B1

แบบรูป	A	C	E	G
รับกำลังงานได้ (dBm)	- 49.49	-54.98	-51.48	-56.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7.5 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ AE จาก จาก 4B1

มุม (องศา)	5	...	16	17	18	...	21
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ AE	9.49	...	8.29	7.94	7.96	...	8.31

ตารางที่ 5.7.6 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ CG จาก 4B1

มุม (องศา)	-128	-127	-12.6	...	-1.23
อัตราส่วนแบบรูป ในบริเวณ CG	0.58	0.64	0.52	...	0.14

ตารางที่ 5.7.7 กำลังงานที่รับได้จากแต่ละแบบรูป จาก 4B2

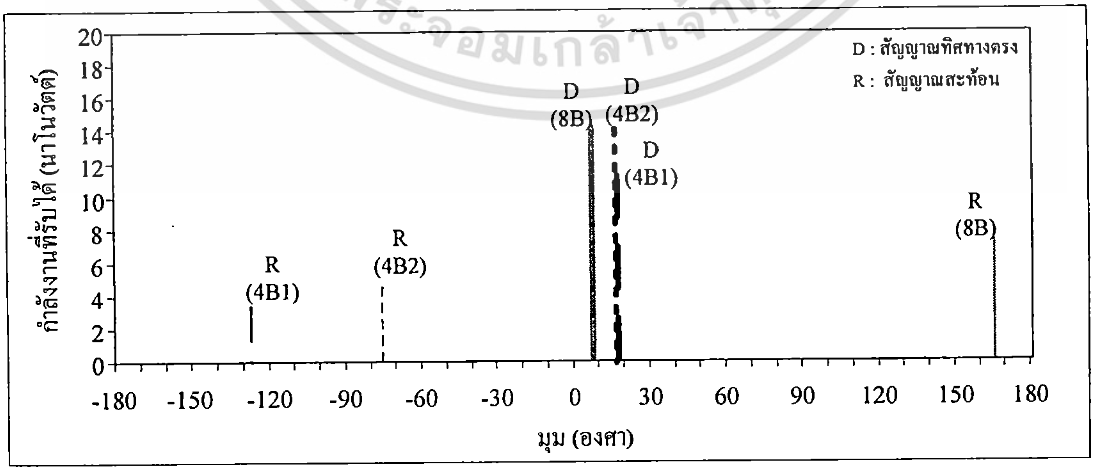
แบบรูป	B	D	F	H
รับกำลังงานได้ (dBm)	-58.09	-53.47	-53.48	-48.47

ตารางที่ 5.7.8 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ HD จาก 4B2

มุม (องศา)	16	17	18	...	41
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ HD	3.91	3.57	3.27	...	0.00

ตารางที่ 5.7.9 อัตราส่วนการรับกำลังงานของแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณ FB จาก 4 B2

มุม (องศา)	-76	-75	-74	...	-68
อัตราส่วนแบบรูปในบริเวณ FB	3.09	2.53	2.15	...	0.21



รูปที่ 5.14 การระบุทิศทางสัญญาณที่รับเข้ามาจากทิศทางตรงและสะท้อนทาง 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5. 8 เปรียบเทียบการหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามา

กรณี	ทิศทางที่เข้ามา		ใช้ 4 แบบรูป ACEG: 4B1		ใช้ 4 แบบรูป BDFH : 4B2		ใช้ 8 แบบรูปA-H:8B	
	ทางตรง (องศา)	สะท้อน (องศา)	ทางตรง :ผิดพลาด (องศา)	สะท้อน : ผิดพลาด (องศา)	ทางตรง : ผิดพลาด (องศา)	สะท้อน : ผิดพลาด (องศา)	ทางตรง :ผิดพลาด (องศา)	สะท้อน : ผิดพลาด (องศา)
1	0	-	-13 : 13	-	-30 : 30	-	6 : 6	-
2	0	45	-13 : 13	-52 : 97	-36 : 36	-90 : 136	16 : 16	74 : 29
3	0	135	-28 : 28	147 : 12	30 : 30	-- : --	7 : 7	141 : 6
4	0	180	17 : 17	-127 : 53	16 : 16	-76 : 104	7 : 7	165 : 15
ค่าเฉลี่ยผิดพลาดการระบุทิศทาง (องศา)			17.8	54	28	80	9	16.7

จากการทดสอบการระบุทิศทางของสัญญาที่รับเข้ามาโดยใช้กลุ่มของแบบรูปการแผ่พลังงาน 8B ที่ใช้แบบรูปทั้งหมด 8 แบบรูป (A-H) 4B1 และ 4B2 ที่ใช้เพียง 4 แบบรูป (ACEG) และ (BDFH) ตาลำดับ เพื่อรับสัญญาณที่เป็นสัญญาณทางตรงและเมื่อมีสัญญาณสะท้อนเข้ามาเพิ่มด้วยทั้งสามกรณีซึ่งได้สรุปการระบุทิศทางและค่าที่ผิดพลาดไปจากที่คาดไว้ดังแสดงในตารางที่ 5.8 จะเห็นว่าถ้าใช้แบบรูป 8B จะระบุทิศทางที่สัญญาณรับเข้ามามีค่าเฉลี่ยผิดพลาดน้อยที่สุด ส่วน 4B2 นั้นมีความผิดพลาดมากที่สุดทั้งการระบุสัญญาณทิศทางตรงและสัญญาณสะท้อน

เมื่อพิจารณาถึงจำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานและจำนวนบริเวณครอบคลุมด้วยจะเห็นว่าบริเวณครอบคลุมของ 8B แบ่งบริเวณได้ 17 บริเวณ ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่ชัดเจนกว่าการใช้ 4B1 และ 4B2 ถึงแม้ว่าการแบ่งบริเวณจากการทดสอบที่ใช้ 4 แบบรูป นั้นจะได้บริเวณที่มากกว่าการจำลองอยู่มากเกือบเท่ากับจำนวนบริเวณของ 8B แต่เป็นบริเวณที่ซ้ำกัน และเป็นผลทำให้การระบุทิศทางผิดพลาดไปได้ ส่วนจำนวนของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใช้ในการระบุทิศทางนั้นยิ่งเห็นได้ชัดว่าถ้าใช้จำนวนแบบรูปการแผ่พลังงานมากจะสามารถระบุทิศทางได้ใกล้เคียงกว่าที่ใช้จำนวนน้อย และยังสามารถหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาจากทิศทางอื่นนอกจากทิศทางที่สัญญาณแรงที่สุดได้ด้วย ซึ่งการระบุทิศทางสัญญาณสะท้อนนั้น ถ้าใช้ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานจะเห็นว่ามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่สูงมาก เพราะจำนวนแบบรูปจะไม่เพียงพอสำหรับการหาทิศทางของสัญญาณที่สอง

5.3 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งซึ่งมีรายละเอียดและหลักการทำงานดังที่อธิบายในบทที่สอง ในกรณีแรกได้ออกแบบเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นด้วยการสวิทช์โพรบสองย่านความถี่ ซึ่งสามารถสวิทช์ลำคลื่นได้สองแกนและสามารถทำงานได้ในสองย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE802.11b/g และ IEEE802.11a ย่านความถี่ 2.4 และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ ได้ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศดังที่แสดงในบทที่ 3 ในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานได้ใช้สายอากาศนี้กับแอกเซสพอยท์เพื่อรับส่งสัญญาณของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายสองย่านความถี่ตามที่ออกแบบ โดยทดสอบค่าทรูพุตของทั้งสองย่านความถี่ในห้องปฏิบัติการที่มีอุปกรณ์ต่างๆ วางอยู่ตามการใช้งานปกติ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นด้วยการสวิทช์โพรบสองย่านความถี่นี้สามารถเพิ่มค่าทรูพุตในระบบได้เมื่อสวิทช์ลำคลื่นให้มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่เหมาะกับแต่ละตำแหน่งเมื่อใช้แต่ละความถี่

ส่วนกรณีที่สองได้ใช้สายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งเป็นองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสดังที่แสดงการออกแบบในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับระบุตำแหน่งสัญญาณที่รับเข้ามา โดยได้สวิทช์ลำคลื่นสายอากาศให้ได้ 8 แบบรูป โดยสายอากาศนี้ทำงานในย่านความถี่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ในการหาทิศทางนั้นได้เตรียมข้อมูลของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไว้ก่อน และเมื่อใช้หาทิศทางจะปรับเฟสและสวิทช์ลำคลื่นทั้ง 8 แบบรูปเพื่อรับกำลังงานที่เข้ามา จากนั้นนำค่ากำลังงานที่รับได้ทั้ง 8 แบบรูปนั้นมาวิเคราะห์ร่วมกับอัตราส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ครอบคลุมในบริเวณต่างๆ เพื่อระบุทิศทางของสัญญาณที่รับได้ ในการทดสอบได้จัดกลุ่มแบบรูปที่จะใช้หาทิศทางเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ใช้ทั้งหมด 8 แบบรูป และอีกสองกลุ่มใช้เพียง 4 แบบรูป ที่ไม่ซ้ำกัน จากการทดสอบหาทิศทางของสัญญาณรับที่เข้ามาจากทิศทางตรงและจากการสะท้อน แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้แบบรูปที่มีจำนวนมากกว่าจะสามารถระบุทิศทางได้ใกล้เคียงมากกว่าและจะสามารถหาทิศทางสัญญาณที่สองซึ่งมีขนาดกำลังงานน้อยกว่าได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากปัญหาในการสื่อสารเคลื่อนที่ซึ่งได้คาดการไว้ว่าจะมีจำนวนผู้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและระบบจะมีการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น ส่งผลให้ในระบบต้องการความจุช่องสัญญาณมากขึ้น ความจุช่องสัญญาณนั้นแปรผันกับค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ดังนั้นถ้าการรับสัญญาณของอุปกรณ์สื่อสารในระบบสามารถเพิ่มค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดได้แล้วนั้นจะทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในระบบนั้นเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานของการสื่อสารเคลื่อนที่โดยเฉพาะที่สายอากาศตัวรับ ดังนั้นจึงมีแนวทางที่จะแก้ปัญหาเพื่อรองรับความต้องการของระบบในอนาคตคือการใช้สายอากาศฉลาด ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับร่วมกับการประมวลผลสัญญาณ เพื่อสวิทช์หรือปรับแบบรูปการแผ่พลังงานให้รับสัญญาณที่ต้องการและกันสัญญาณแทรกสอดออก แต่สิ่งสำคัญในการทำงานของสายอากาศฉลาดนั้นคือต้องรู้ถึงทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาเพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับแบบรูปให้เหมาะสม ปัจจุบันแนวคิดสำหรับสายอากาศฉลาดนอกจากจะใช้ที่สถานีฐานแล้วนั้นยังต้องใช้ที่ตัวอุปกรณ์ลูกข่ายเคลื่อนที่อีกด้วย จึงได้มีการเสนอสายอากาศชนิดต่างๆ เพื่อใช้เป็นสายอากาศแถวลำดับสำหรับหาทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและเป็นสายอากาศปรับลำคลื่นเพื่อติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ลูกข่าย ซึ่งสายอากาศควรที่จะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนแต่สามารถผลิตแบบรูปการแผ่พลังงานได้จำนวนมากเพื่อใช้เป็นสายอากาศระบุทิศทางของสายอากาศฉลาด ดังนั้นจึงได้มีการเสนอสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นใช้เป็นองค์ประกอบสำหรับสายอากาศปรับตัว ซึ่งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นนี้ช่วยให้ผลิตลำคลื่นได้จำนวนมาก แต่ถ้าต้องการนำสายอากาศนี้ติดตั้งบนอุปกรณ์เคลื่อนที่แล้วนั้นจะต้องปรับปรุงให้ซับซ้อนน้อยลงและมีขนาดเล็กลงด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์จัตุรัสเช่นเดียวกับสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นที่มีอยู่เดิม แต่จะไม่ใช้ไดโอดพินเป็นอุปกรณ์สวิทช์ลำคลื่นซึ่งจะต้องใช้เป็นจำนวน 8 ตัวสำหรับปรับลำคลื่นสองทิศทาง โดยได้ใช้วิธีการเลือกตำแหน่งของโพรบป้อนสัญญาณ ซึ่งจะใช้โพรบป้อนสัญญาณสองโพรบ และเลือกป้อนสัญญาณให้โพรบด้วยสวิทช์ความถี่วิทยุ 1 ตัว จะเห็นว่าสามารถลดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิทช์ลำคลื่นลงได้มาก โดยหลักการทำงานและออกแบบสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่ง รวมทั้งได้สร้างและทดสอบ ดังในบทที่ 2 ในการวิเคราะห์นั้นได้แสดงถึงผลของค่าไดอิเล็กตริกที่จะเป็นตัวแปรในการกำหนดขนาดของสายอากาศ และตัวแปรทางโครงสร้างที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือตำแหน่งที่ป้อนสัญญาณ โดยในการวิเคราะห์นั้นได้ใช้โปรแกรม CST สำหรับจำลองสายอากาศ จากนั้นได้สร้างสายอากาศที่เหมาะสมและทดสอบซึ่ง

เอกสารนี้... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสามารถเป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นเช่นเดียวกับแบบที่มีอยู่เดิม ซึ่งสามารถไปนำออกแบบใช้งานในลักษณะเดียวกันแต่ลดจำนวนอุปกรณ์ลงได้มาก และยังสามารถออกแบบประยุกต์เป็นลักษณะอื่นได้อีกด้วย

จากการกำหนดระบบสื่อสารไร้สายในอนาคตที่จะต้องรวมระบบเครือข่ายต่างๆเข้าด้วยกัน ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ควรที่จะใช้งานได้หลายความถี่ และถ้าสายอากาศสามารถปรับทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานได้ด้วยแล้วนั้นจะช่วยให้การรับส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ด้วย ดังนั้นจึงได้ออกแบบสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นด้วยการสวิทช์โพรบสองย่านความถี่ โดยใช้โครงสร้างของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งมาปรับปรุง ซึ่งประกอบด้วยแผ่นพิมพ์ของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นความถี่ต่ำและแผ่นพิมพ์ของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นความถี่สูง โดยทั้งสองมีขนาดต่างกันแต่สามารถนำมาประกอบรวมกันและใช้สวิทช์ความถี่วิทยุร่วมกันเพียงหนึ่งตัวแต่ต้องใช้สตับสายส่งไมโครสตริปช่วยในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของทั้งสองความที่ให้เหมาะสม ทำให้สามารถใช้งานได้ในสองย่านความถี่สำหรับระบบโครงข่ายไร้สาย IEEE802.11 b/g และ IEEE802.11 a ความถี่ 2.4 และ 5.2 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ และแสดงการประยุกต์ใช้งานโดยการทดสอบสายอากาศเพื่อรับสัญญาณของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย ได้วิเคราะห์ค่าทรูพุตของทั้งสองย่านความถี่ในห้องปฏิบัติการที่มีการใช้งานซึ่งมีอุปการณ์ต่างๆ วางอยู่ตามการใช้งาน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสองย่านความถี่นี้สามารถปรับปรุงค่าทรูพุตในระบบได้เมื่อสวิทช์ลำคลื่นให้มีลำคลื่นที่เหมาะกับแต่ละตำแหน่งเมื่อใช้แต่ละความถี่ ดังนั้นสายอากาศแผ่นพิมพ์สวิทช์ลำคลื่นด้วยการสวิทช์โพรบสองย่านความถี่ที่มีโครงสร้างเป็นสายอากาศแผ่นพิมพ์นี้อาจสามารถใช้เป็นสายอากาศในแอกเซสพอยท์เพื่อช่วยเพิ่มค่าทรูพุตของระบบแต่ต้องเพิ่มระบบการควบคุมการสวิทช์ลำคลื่นของสายอากาศเพื่อให้สายอากาศสวิทช์ใช้ลำคลื่นที่เหมาะสมได้เอง

จากนั้นได้นำสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งนำมาเป็นองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับปรับเฟส ซึ่งได้ออกแบบให้มีการจัดวางตำแหน่งของสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นอีกลักษณะหนึ่งเพื่อให้เหมาะสมและสะดวกในการป้อนสัญญาณ และยังทำให้สามารถลดขนาดพื้นที่ของโครงสร้างลงได้ เนื่องจากการจัดโครงสร้างตำแหน่งในแถวลำดับใหม่นี้จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานต่างจากเดิมแต่ยังคงสามารถชี้ทิศทางครอบคลุมในทิศทางมุมระนาบได้ เนื่องจากต้องการให้สายอากาศมีขนาดเล็กเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ จึงได้สร้างด้วยแผ่นพิมพ์ที่มีวัสดุฐานรองซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10 สำหรับใช้งานที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ในการสวิทช์ลำคลื่นจะใช้สวิทช์ความถี่วิทยุจำนวนสี่ตัวเท่ากับจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ หากว่าเป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสสวิทช์ลำคลื่นด้วยไดโอดพินของเดิมนั้นจะต้องใช้ไดโอดพินจำนวน 32 ตัว ดังนั้นจะเห็นว่าสามารถลดจำนวนอุปกรณ์ลงได้มาก ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นนั้นมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาได้แก่ ขนาดของสายอากาศซึ่งมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน และได้ใช้สตับสายส่งไมโครสตริปช่วยปรับอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม เมื่อสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบมาแล้วจึงได้ทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งสามรถเป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นได้ แต่สายอากาศจะมีความสูญเสียมาก ซึ่งมีค่าการสูญเสียในสวิทช์ความถี่วิทยุ จากนั้นได้ใช้สายอากาศนี้ประยุกต์เป็นสายอากาศหาทิศทางของสัญญาณที่รับเข้ามาดังในบทที่ 5 ซึ่งได้เตรียมข้อมูลของแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อใช้ในการหาทิศทางจำนวน 8 และ 4 แบบรูป และทดสอบการหาทิศทางในห้องไร้การสะท้อน ซึ่งสามารถระบุทิศทางของสัญญาณได้ และจากการทดสอบถ้าใช้แบบรูปจำนวน 8 แบบรูปจะสามารถระบุทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาได้ดีกว่าที่ใช้จำนวนแบบรูปน้อยกว่า

จะเห็นว่าสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นแบบป้อนสัญญาณสองตำแหน่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นสองย่านความถี่และใช้เป็นสายอากาศแถวลำดับปรับเฟสที่มีองค์ประกอบสวิทช์ลำคลื่นสำหรับระบุทิศทางของสัญญาณที่รับได้ แต่สายอากาศที่สร้างทั้งสองนี้ทำงานที่ความถี่ค่อนข้างสูงจะมีการสูญเสียในส่วนของสวิทช์ความถี่วิทยุซึ่งหากจะนำไปใช้งานหรือวิจัยต่อไปนั้นควรปรับปรุงในส่วนของสวิทช์ความถี่วิทยุนี้ หรือสามารถเลือกใช้ความถี่วิทยุที่จะการสูญเสียน้อยลงซึ่งจะมีในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] G. V. Tsoulos, **"Smart Antennas for Mobile Communication Systems: Benefits and Challenges,"** Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 84-94, Apr. 1999.

[2] M. C. Wells, **"Adaptive Antennas for Frequency Reuse in Every Cell of a GSM Network,"** IEE Colloquium on Mobile Communications Towards the Year 2000, pp.11/1- 11/6, 1994.

[3] J. H. Winters, **"Smart Antennas for Wireless Systems,"** IEEE Personal Communications, Vol. 5, No. 1, pp.23-27, Feb. 1998.

[4] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. Salazar-Palma and R.J.Bonneau, **Smart Antenna**, John Wiley and Sons, 2003.

[5] S. Frattasi, H. Fathi, H. P. Fitzek and R. Ramjee, **"Defining 4G Technology from the User's Perspective,"** IEEE Network, pp. 35-41, Jan./Feb. 2006.

[6] R. Menolascio, M. Pizarroso, F. Galliano, and B. Salas, **"Planning a Third Generation Mobile Network with Adaptive Antennas,"** IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 1, pp. 648-652, May 1999.

[7] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, **Smart Antennas for Wireless Communication IS-95 and Third Generation CDMA Applications**, Prentice Hall PTR, 1999.

[8] M. Chryssomallis, **"Smart Antennas,"** IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 42, No. 3, pp. 129-136, Jun. 2000.

[9] J. M. Samhan, R. M. Shubair and M. A. Al-Qutayri, **"Design and Implementation of an Adaptive Smart Antenna System,"** Innovations in Information Technology 2006, pp. 1–4, 2006.

[10] A. F. Gangi, **"The Active Adaptive Antenna Array System,"** IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 11, No. 4, pp. 405-414, 1963.

[11] J. D. Rickman, **"Result from a Four-Element Adaptive Antenna Experiment,"** IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems., Vol. AES-17, No. 1, pp 1819-1828, Jan. 1981.

[12] J. E. Hudson, **"Fast Signal Acquisition by an Adaptive Antenna Moving in a Multipath field,"** IEE Proceedings H, Vol. 134, No. 2, pp 174-180, Apr. 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Y. Ozaki, J. Ozawa, E. Taillefer, J. Cheng and Y. Watanabe, **"Direction-of-arrival estimation using adjacent pattern power ratio with switched beam antenna,"** Proc. of Pacific Rim Conference on IEEE Communications, Computers and Signal Processing, pp. 453-458, Aug. 2009.

[14] F. Athley, **"Threshold Region Performance of Maximum Likelihood Direction of Arrival Estimators,"** IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 53, No. 4, pp. 1359-1373, Apr. 2005.

[15] R. Roy and T.Krailath, **"ESPRIT-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques,"** IEEE Trans Acoust., Speech, Signal Process., Vol. ASSP-37, pp. 984-995, 1989.

[16] R. O. Schmidt, **"Multiple emitter location and signal parameter estimation,"** IEEE IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 34, No. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.

[17] K. A. Gotsis, K.Siakavara and J. N. Sahalos, **"On the direction of arrival (DOA) estimation for a switched-beam antenna system using neural networks,"** IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 57, No. 5, pp. 1399-1411, May 2009.

[18] M. R. Kamarudin, Y. I. Nechayev and P. S. Hall, **"Onbody diversity and angle-of-arrival measurement using a pattern switching antenna,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 57, No. 4, pp. 964-971, Apr. 2009.

[19] R. Arott, S. Pommekanit, C. Taylor, and H. Chaloupka, **"Advanced base station technology,"** IEEE communication Magazine, pp. 96-102, Feb.1988.

[20] S. L. Preston, D. V. Thiel, T. A. Smith, S. G. O'Keefe and J. W. Lu, **"Base-Station Tracking in Mobile Communications Using a Switched Parasitic Antenna Array,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 46, No. 6, pp.841-844, Jun. 1998.

[21] N. L. Scott, M. O. Leonard-Taylor and R. G. Vaughan, **"Diversity Gain from a Single-Port Adaptive Antenna Using Switched Parasitic Elements Illustrated with a Wire and Monopole Prototype,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 47, No. 6, pp. 1066-1999, Jun. 1999.

[22] E. Taillefer, A Hirata and T. Ohira, **"Direction-of-Arrival Estimation Using Radiation Power Pattern With an ESPAR Antenna,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 2, pp. 678-684, Feb. 2005.

[23] S. A. Mitilineos, and C. N. Capsalis, **"A new, low-cost, switched beam and fully**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

adaptive antenna array for 2.4GHz ISM applications," IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 55, No. 9, pp. 2502-2508, Sep. 2007.

[24] E. Taillefer, W. Nomura, J. Cheng, M. Taromaru, Y. Watanabe, and T. Ohira, **"Enhanced Reactance-Domain ESPRIT Algorithm Employing Multiple Beams and Translational-Invariance Soft Selection for Direction-of-Arrival Estimation in the Full Azimuth,,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 56, No. 8, pp. 2514-2526, Aug. 2008.

[25] G. Giorgetti, A. Cidronali, S. K. S. Gupta and G. Manes, **"Single-anchor indoor localization using a switched-beam antenna,"** IEEE Communication Letters, Vol. 13, No.1, pp. 58-60, Jan. 2009.

[26] C. Tseng, C. Chen and T. Chu, **"A Low-Cost 60-GHz Switched-Beam Patch Antenna Array With Butler Matrix Network,"** IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, Vol. 7, pp. 432-435, 2008.

[27] P. Ngamjanyaporn, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin, and M. Krairiksh, **"Signal-to-Inference Ratio Improvement by Using a Ahased Array Antenna of Switched-Beam Elements,"** IEEE Trans. Antennas and Propaation., Vol. 53, No. 5, pp. 1819-1828, May 2005.

[28] P. Ngamjanyaporn and M. Krairiksh, **"Switched-beam Single Patch Antenna,"** Electron. Lett., Vol. 38, No. 1, pp.7-8, Jan. 2002.

[29] F. Harrysson, J. Medbo, A. F. Molisch, A. J. Johansson and F. Tufvesson, **"Efficient Experimental Evaluation of a MIMO Handset with User Influence,"** IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 2, pp. 853-863, Feb. 2010.

[30] M. J. Spencer, **"Smart Antennas in Handset for Improving 3G Performance,"** Proc. of International Conference on 3G Mobile Comm. Tech., pp. 53-57, Jun. 2003.

[31] A. Hirata, S. Mitsuzono and T.Shiozawa, **"Feasibility Study of Adaptive Nulling on Handset for 4G Mobile Communications,"** IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 3, pp. 120-122, 2004.

[32] K. Ogawa, A. Yamamoyo and J. Takada, **"Multipath Performance of Handset Adaptive Array Antennas in the Vicinity of a Human Operator,"** IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 53, No.8, pp. 2422-2436, Aug. 2005.

[33] T. Ohira, and K. Gyoda, **"Hand-Held Microwave Direction-of-Arrival Finder Based on Varactor-Tuned Analog Aerial beamforming,"** Proceeding of Asia-Pacific

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Microwave Conference 2001, Vol. 2, pp. 585 – 588, 2001.

[34] N. Kuga and H. Arai, **"A Four Beam-Switched Planar Array Antenna for Mobile Terminals,"** Proc. of 1995 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, pp. 1450-1454, 1995.

[35] N. Kuga and H. Arai, **"A Flat Four-beam Switched Antenna,"** Proc. of 1994 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 624-627, 1994.

[36] N. Kuga and H. Arai, **"A Flat Four-Beam Switched Array Antenna,"** IEEE Trans. Antenna Propagat., Vol. 44, No. 9, pp. 1227-1230, 1996.

[37] M.Krairiksh, "**A Handset Adaptive Antenna Using Phased-Array of Switched-Beam Elements,**" Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 407-412, Sep. 2009.

[38] M. Sanad and N. Hassan, **"A Compact Dual-Band Microstrip Antenna for Portable GPS/Cellular Phones,"** Proc. of 1999 Antenna and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 116-119, 1999.

[39] C.W. Jung and F.D. Flaviis, **"A Dual-Band Antenna for WLAN Applications by Double Rectangular Patch with 4-Bridges,"** Proc. of IEEE 2004 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 4, pp. 4280-4283, 2004.

[40] N. Behdad and K. Sarabanbi, **"A Compact Dual-/Multi-Band Wireless LAN Antenna,"** Proc. of IEEE 2005 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 2B, pp. 527-530, 2005.

[41] F. Babich, and M. Comisso, **"Throughput and Delay Analysis of 802.11-Based Wireless Networks Using Smart and Directional Antennas,"** IEEE Trans. Communications, Vol. 57, No. 5, pp. 1413-1423, May 2009

[42] A. Cidronali, S. Maddio, G. Giorgetti, and G. Manes, **"Analysis and Performance of a Smart Antenna for 2.45-GHz Single-Anchor Indoor Positioning,"** IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. 58, No. 1, pp. 21-31, Jan. 2010.

[43] J. Tagapanij, S. Chatasuk, P. Arpattong, S. Janin and M. Krairiksh, **"A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna,"** Proc. of 2007 International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 382-385, 2007.

[44] J. Tagapanij, P. Sooksumrarn, T. Tantisopharak,S. Janin and M. Krairiksh, **"A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna for WLAN Application,"** IEICE Trans. Communications, Vol. E91-B, No. 6, pp. 1791-1800, Jun. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[45] X. Lan, **"A Novel Low-cost Switched-beam Microstrip Smart Antenna,"** Proc. of 2002 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 477-480, 2002.

[46] W. Wu, B.Z. Wang and S. Sun, **"Switched-beam Microsrtip Patch Antenna,"** Proc. of 2004 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 858-861, 2004.

[47] A. Mehta, D.M. Syahkal and H. Nakano, **"A Switched Beam Single Arm Spiral Antenna with Hybrid Switch Network,"** Proc. of 2005 Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1, pp. 589-592, 2005.

[48] J. Tagapanij, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, **"A Dual Feed Switched-Beam Patch Antenna for a Phased Array of Switched-Beam Elements,"** Proc. of 2006 Asia-Pacific Microwave Conf., Vol. 3, pp. 2102-2105, Dec 2006.

[49] J. Tagapanij, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin, and M. Krairiksh, **"Phased Array of Switched-Beam Elements for Handset Adaptive Antenna,"** Proc. of 2007 Radio and Wireless Symp., pp. 137-140, Jan. 2007.

[50] J. Tagapanij and M. Krairiksh, **"A Phased Array of Switched-Beam Elements for Angle-of-Arrival Measurement,"** Proc. of 2009 International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 117-120, Oct. 2009.

[51] G. Giorgetti, S. Maddio, A. Cidronali, S. K. S. Gupta and G. Manes, **"Switched Beam Antenna Design Principles for Angle of Arrival Estimation,"** Proc. of the 2nd European Wireless Technology Conference, pp. 5-8, Rome, Sep. 2009.

[52] P.S. Hall, **"Diversity in On-Body Communications Channels,"** IEEE International Workshop on Antenna Technology, pp. 5-8, 2008.

[53] M. R. Kamarudin and P. S. Hall, **"Switched Pattern Antenna Diversity in the On-Body Environment,"** EuCAP2006, pp. 1-4, 6-10, Nov. 2006.

[54] M. R. Kamarudin, Y. I. Nechayev and P. S. Hall **"Angle of Arrival Estimation of On-Boby Channels,"** EuCAP 2007, pp. 1-5, 11-16, Nov. 2007.

[55] P. S.Hall1, Y. Hao, V. I. Nechayev, A. Alomain, C. C. Constantinou,C. Parini, M. R. Kamarudin, T. Z. Salim, D. T. M. Heel, R. Dubrovka, A. S. Owadall, W. Song, A. Serra. P. Nepa, M. Gal1o and M. Bozzetti, **"Antennas and Propagation for On-Body Communication Systems,"** IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 3, pp. 41-58, Jun. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[56] M. R. Kamarudin, P. S. Hall, F. Colombel and M. Himdi, **"CPW-Fed Disc-Loaded Monopole Array Antenna with Integrated PIN Diode Switches,"** IEEE International Workshop on Antenna Technology, pp. 396-399, 21-33 Mar. 2007.

[57] M. R Kamarudin, Y. I. Nechayev and P. S. Hall, **"Antennas for On-Body Communication Systems,"** IEEE International Workshop on Antenna Technology 2005, pp. 11-20, 2005.

[58] M.R. Kamarudin, Y. I. Nechayev and P. S. Hall, **"Performance of Antennas in the On-Body Environment,"** IEEE Antennas and Propagation society International symposium 2005, Vol. 3A, pp. 475-478, 3-8 Jul. 2005.

[59] A. Boonpooga, P. Sirisuk, M. Chongcheawchamnan, S. Patisang, and M. Krairiksh, **"Hardware-Assisted Initialization for Constant Modulus Algorithm Adaptive Antenna,"** IET Microw. Antennas Propag., Vol. 2, No. 4, pp. 303-311, Jun . 2008.

[60] C. A. Balanis, **Antenna Theory Analysis and Design.** 2 ed. New York: John Wiley & Son, 1997.

[61] G. Kumar and K.P. Ray, **Broadband Microstrip Antennas**, Artech House, 2003.

[62] C. A. Balanis, **Advance Engineering Electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons,1997.

[63] CST Microwave Studio 2006.

[64] J. Tagapanij, and M. Krairiksh, **"Practical Consideration of Dual-feed Switch-Beam Patch Antenna in a Phased Array Antenna Design,"** Proc. of 2007 Asia-Pacific Microwave Conf., Vol. 3, pp. 1- 4, Dec. 2007.

[65] Z. N. Chen and M. Y. W. Chia, **Broadband Planar Antenna Design and Application,** John Wiley & Sons Ltd., 2006.

[66] J. Lu, **"Broadband Dual-Frequency Operation of Circular Patch Antennas and Arrays With a Pair of L-Shaped Slots,"** IEEE Trans. Antennas Propag.,, Vol. 51, No. 5, May 2003.

[67] B. Ooi, S. Qin and M Leong, **"Novel Design of Broad-Band Stacked Patch Antenna,"** IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 50, No. 10, Oct. 2002.

[68] N. Herscovici, **"A Wide-Band Single-Layer Patch Antenna,"** IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 46, No. 4, Apr. 1998.

[69] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl and P. Bhartia, **Microstrip Lines and Slotlines**, Artech House, Inc., 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[70] **IPC-2221 : Generic Standard on Printed Broad Design**, Association Connecting Electronics Industries, 1998.

[71] A. T. Alastalo and M. Kahola, "**Smart-Antenna Operation for Indoor Wireless Local-Area Networks Using OFDM**," IEEE Trans. on Wireless Comm., Vol. 2, No. 2, Mar. 2003.

[72] S. Chu , H. Lin and D. Lin, "**Performance Enhancement by Using Switch-Beam Smart Antenna in 802.11a WLAN System**," IEEE/ACES International Conf. on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก1.

ตารางค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นในแต่ละบริเวณ สำหรับการหาทิศทางของคลื่นที่รับเข้ามา กรณีหาทิศด้วยรูปการแผ่พลังงาน 8 ลำคลื่น

8B (A-H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ AH

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
18	0.07
19	0.33
20	0.32
21	0.4
22	0.65
23	0.73
24	0.79
25	0.91
26	1.03
27	1.17
28	1.5
29	1.77
30	2.25
31	2.53
32	2.87
33	3.24
34	3.4
35	3.81
36	4.13
37	4.36
38	4.68
39	5.15

บริเวณ AB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
40	6.21
41	6.09
42	5.78
43	5.47
44	5.2
45	4.99
46	4.72
47	4.51
48	4.25
49	4.03
50	3.74
51	3.59
52	3.55
53	3.29
54	3.01
55	2.76
56	2.36
57	1.95
58	1.57
59	1.33
60	1.08
61	0.73
62	0.26
63	0.12

บริเวณ BA

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
64	0.22
65	0.56
66	1.1
67	1.35
68	1.88
69	2.29
70	2.66
71	2.97
72	2.92
73	3.1

บริเวณ BC

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
74	2.97
75	2.85
76	2.85
77	2.78
78	2.64
79	2.67
80	2.55
81	2.53
82	2.48
83	2.37
84	2.25
85	2.31
86	2.02
87	2.04
88	1.82
89	1.61
90	1.68
91	1.45
92	1.31
93	1.12
94	1.07
95	0.8
96	0.47
97	0.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ CB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
98	0.04
99	0.35
100	0.49
101	0.85
102	1.08
103	1.25
104	1.49
105	1.79
106	2.02
107	2.25
108	2.28
109	2.44
110	2.56
111	2.43
112	2.53
113	2.59
114	2.67
115	2.57
116	2.66
117	2.5
118	2.71
119	2.81
120	2.85
121	3.01

บริเวณ CD

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
122	2.57
123	2.38
124	2.18
125	1.83
126	1.6
127	1.51
128	1.2
129	0.9
130	0.83
131	0.63
132	0.37
133	0.11

บริเวณ DC

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
134	0.09
135	0.31
136	0.62
137	0.76
138	0.83
139	1.02
140	1.35
141	1.53
142	1.67
143	2.21
144	2.29
145	2.5
146	2.73
147	3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ DE

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
148	2.94
149	2.57
150	2.36
151	2.07
152	1.78
153	1.6
154	1.39
155	1.07
156	0.77
157	0.46
158	0.16

บริเวณ ED

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
159	0.11
160	0.7
161	1.13
162	1.34
163	1.51
164	1.81
165	2.02
166	2.14
167	2.34
168	2.41
169	2.67
170	2.85
171	2.89
172	2.99
173	3.17
174	3.04
175	3.18
176	3.06
177	3.1
178	3.08
179	3.13
180	3.09
181	2.92
182	2.9

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
183	2.85
184	2.92
185	2.8
186	2.73
187	2.73
188	2.76
189	2.75
190	2.77
191	2.77
192	2.75

บริเวณ EF

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
193	3
194	2.53
195	2.08
196	1.88
197	1.53
198	1.3
199	1.2
200	1.09
201	1.04
202	0.94
203	0.72
204	0.71
205	0.57
206	0.38
207	0.34
208	0.21
209	0.28
210	0.17
211	0.16
212	0.11
213	0.09
214	0.05
215	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ FE

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
216	0.14
217	0.14
218	0.3
219	0.62
220	0.73
221	1.04
222	1.3
223	1.67
224	2.06
225	2.43
226	2.74

บริเวณ FH

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
227	2.79
228	2.88
229	2.98
230	3.28
231	3.55
232	3.78
233	3.96
234	4.06
235	4.13
236	4.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ FG

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)	มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
237	5.06	261	1.65
238	4.9	262	1.6
239	4.66	263	1.34
240	4.57	264	1.12
241	4.47	265	0.98
242	4.31	266	0.64
243	4.22	267	0.31
244	4.03	268	0.03
245	3.85		
246	3.85		
247	3.78		
248	3.45		
249	3.43		
250	3.39		
251	3.17		
252	3.13		
253	2.97		
254	2.95		
255	2.67		
256	2.53		
257	2.25		
258	2.25		
259	1.95		
260	1.86		

บริเวณ GF

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
269	0.38
270	0.71
271	1.1
272	1.45
273	1.77
274	2.22
275	2.59
276	2.94
277	3.4
278	3.48
279	3.94
280	4.22
281	4.57
282	4.89
283	5.1
284	5.38
285	5.71
286	6
287	6.47
288	6.76
289	7.07
290	7.38

บริเวณ GB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
291	7.86
292	7.83
293	7.83
294	7.69
295	7.27
296	7.08
297	6.72
298	6.51
299	6.09
300	5.58
301	5.38
302	5.1
303	4.87
304	4.41
305	4.09
306	3.95
307	3.44
308	3.16
309	2.71
310	2.37
311	2.04
312	1.55
313	1.3
314	1.05
315	0.53
316	0.21
317	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ HB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
318	0.81
319	0.51
320	0.24
321	0.17
322	0.53
323	0.95
324	1.31
325	1.74
326	2.05
327	2.5
328	2.83
329	3.27
330	3.73
331	3.97
332	4.27
333	4.61
334	4.82
335	4.96
336	5.08
337	5.14

บริเวณ HA

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
338	5.04
339	4.78
340	4.67
341	4.6
342	4.52
343	4.29
344	4.15
345	4.06
346	3.94
347	3.9
348	3.71
349	3.59
350	3.47
351	3.41
352	3.22
353	3.29
354	3.04
355	2.86
356	2.83
357	2.82
358	2.61
359	2.5

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
0	2.63
1	2.25
2	2.04
3	1.69
4	1.63
5	1.44
6	1.13
7	0.95
8	0.65
9	0.65
10	0.56
11	0.35
12	0.49
13	0.49
14	0.28
15	0.24
16	0.02
17	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก2.

ตารางค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นในแต่ละบริเวณ
สำหรับการหาทิศทางของคลื่นที่รับเข้ามา
กรณีหาทิศด้วยรูปการแผ่พลังงาน 4 ลำคลื่น
4B1 : ACEG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ AE

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
5	9.49
6	9.26
7	9.19
8	9.23
9	8.93
10	8.95
11	8.77
12	8.22
13	8.13
14	8.27
15	8.17
16	8.29
17	7.94
18	7.96
19	8.18
20	8.05
21	8.31

บริเวณ AG

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
22	8.1
23	7.73
24	6.88
25	6.83
26	6.51
27	6.23
28	6.16
29	6.15
30	6.21
31	6.05
32	6.21
33	6.16
34	6.09
35	6
36	6.21
37	6.18
38	6.04
39	5.97
40	6.07
41	5.91
42	6.01
43	5.57
44	5.22
45	5.27
46	5.18
47	5.27
48	5.11
49	4.92
50	4.71
51	4.64
52	4.6
53	4.43
54	4.15
62	2.6
63	2.6
64	2.57
65	2.56

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
66	2.2
67	2.21
68	2.06
69	1.84
70	1.88
71	1.97
72	2.44

330	0.34
331	0.83
332	1.25
333	1.69
334	2.37
335	2.78
336	3.36
337	3.86
338	4.28
339	4.88
340	5.43
341	6.1
342	6.38
343	7.18
344	7.56
345	8.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ CA

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
73	0.12
74	0.32
75	0.65
76	0.72
77	1.07
78	1.28
79	1.58
80	1.51
81	1.86
82	2.05
83	2.48
84	2.79
85	3.36
86	3.74
87	4.24
88	4.69
89	5.23
90	5.6
91	5.83
92	6.33
93	6.49
94	6.98
95	7.24
96	7.66
97	7.87
98	8.13
99	8.55
100	9.74
101	10.16

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
116	11.1
117	10.74
118	10.51
119	10.41
120	10.08
121	9.91
122	9.61
123	9.35
124	9.11
125	8.74
126	8.33
127	8.05
128	7.8
129	7.45
130	7.13
131	6.86
132	6.6
133	6.34

บริเวณ CE

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
102	11.17
103	11.31
104	11.45
105	11.37
106	11.55
107	11.56
108	11.69
109	11.9
110	11.91
111	11.88
112	12.05
113	12.12
114	12.38
115	12.3

134	6.09
135	5.86
136	5.48
137	4.91
138	4.66
139	4.28
140	3.64
141	3.25
142	2.74
143	1.83
144	1.65
145	1.28
146	0.72
147	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ EA

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
148	1.91
149	2
150	1.79
151	1.71
152	1.76
153	1.78
154	1.83
155	1.99
156	2.18
157	2.49
158	2.54
159	2.62
160	3.02
161	3.19
162	3.45
163	3.45
164	3.73
165	3.96
166	4.08
167	4.34
168	4.78
169	4.78
170	5.03
171	5.31
172	5.75
173	6.12
174	6.28
175	6.39
176	6.6
177	6.9
178	7.14
179	7.59
180	7.74
181	7.97
182	8.25
183	8.41
184	8.66
185	8.89
186	8.86
187	9.04
188	9.05
189	9.33
190	9.25
191	9.42
192	9.63
193	9.66
194	9.73
195	9.9
196	9.9
197	10.13
198	10.11
199	10.3

บริเวณ EG

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
200	8.98
201	8.69
202	7.98
203	7.57
204	7.36
205	7.03
206	6.72
207	6.43
208	6.17
209	5.88
210	5.69
211	5.66
212	5.57
213	5.48
214	5.41
215	5.49
216	5.25

บริเวณ EC

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
217	4.6
218	4.46
219	4.26
220	4.15
221	4.01
222	3.68
223	3.5
224	3.38
225	3.17
226	2.64
227	2.26
228	1.94
229	1.43
230	0.82
231	0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ CG

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
232	0.58
233	0.64
234	0.52
235	0.51
236	0.14
237	0.14

บริเวณ GC

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
238	0.02
239	0.33
240	0.39
241	0.49
242	0.63
243	0.76
244	1
245	1.21
246	1.21
247	1.32
248	1.81
249	1.89
250	2.07
251	2.45
252	2.62
253	2.67
254	2.78
255	3.13
256	3.32
257	3.43
258	3.79
259	4.17
260	4.14
261	4.46
262	4.59
263	4.72
264	5.03
265	5.32
266	5.45
267	5.85
268	6.02
269	6.54
270	6.68
271	7.05
272	7.35
273	7.67
274	7.96

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
275	7.89
276	8.01
277	8.14
278	8.01
279	7.92
280	7.76
281	7.87
282	7.92
283	8.01
284	7.99
285	8.01
286	8.15
287	8.31
288	8.33
289	8.69
290	8.82
291	8.96
292	9.26

บริเวณ GE

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
293	8.33
294	8.16
295	7.83
296	7.65
297	7.24
298	6.87
299	6.62
300	6.55
301	6.33
302	5.95
303	5.91
304	5.59
305	5.49
306	5.47
307	5.24
308	5.1
309	4.93
310	4.86
311	4.65
312	4.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ GA

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
313	4.31
314	3.96
315	3.61
316	3.27
317	2.94
318	2.50
319	2.31
320	2.03
321	1.69
322	1.33
323	1.21
324	0.84
325	0.77
326	0.84
327	0.56
328	0.26
329	0.01

บริเวณ AC

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
346	7.33
347	7.15
348	7.22
349	7.18
350	7.25
351	7.43
352	7.5
353	7.38
354	7.52
355	7.66
356	7.69
357	7.81
358	7.97
359	7.84
1	7.9
2	7.97
3	9.12
4	9.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก3.

ตารางค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นในแต่ละบริเวณ
สำหรับการหาทิศทางของคลื่นที่รับเข้ามา
กรณีหาทิศด้วยรูปการแผ่พลังงาน 4 ลำคลื่น

4B2 : BDFH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ HD

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
16	3.91
17	3.57
18	3.27
19	2.97
20	2.67
21	2.43
22	2.34
23	2.11
24	1.97
25	1.73
26	1.69
27	1.60
28	1.48
29	1.35
30	1.18
31	1.07
32	0.82
33	0.77
34	0.61
35	0.55
36	0.61
37	0.49
38	0.24
39	0.23
40	0.14
41	0.00

บริเวณ BD

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)	มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
42	0.45	111	1.59
43	0.97	112	1.39
44	1.52	113	1.25
45	2.08	114	1.02
46	2.72	115	0.88
47	3.23	116	0.74
48	3.65	117	0.65
		118	0.35
82	11.95	119	0.2
83	11.32		
84	10.82		
85	10.6		
86	10.07		
87	9.8		
88	9.6		
89	9.2		
90	9.16		
91	8.72		
92	8.48		
93	8.17		
94	8.1		
95	7.73		
96	7.04		
97	6.85		
98	6.46		
99	5.97		
100	5.53		
101	4.93		
102	4.49		
103	4.17		
104	3.68		
105	3.45		
106	2.94		
107	2.64		
108	2.46		
109	2.02		
110	1.88		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ BH

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)	มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
49	3.98	292	1.38
50	4.37	293	1.13
51	4.43	294	1.21
52	4.79	295	1.3
53	4.98	296	1.3
54	5.07	297	1.22
55	5.19	298	1.36
56	5.54	299	1.55
57	5.73	300	2.02
58	5.86	301	2.01
59	6.09	302	1.95
60	6.2	303	2.1
61	6.57	304	2.14
62	6.78	305	2.16
63	6.9	306	2.08
64	7.07	307	2.2
65	7.32	308	2.19
66	7.62	309	2.22
67	7.74	310	2.1
68	8.06	311	1.91
69	8.26	312	2.03
70	8.47	313	1.94
71	8.93	314	1.62
72	9.09	315	1.63
73	9.25	316	1.3
74	9.71	317	1.1
75	9.87	318	0.81
76	10.22	319	0.51
77	10.61	320	0.24
78	10.88		
79	11.33		
80	11.59		
81	12.02		

บริเวณ DB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)		มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
120	0.02		157	5.45
121	0.23		158	5.31
122	0.47		159	5.13
123	0.67		160	4.87
124	0.94			
125	1.39			
126	1.59			
127	1.92			
128	2.23			
129	2.69			
130	2.9			
131	3.27			
132	3.7			
133	4.05			
134	4.51			
135	4.86			
136	5.28			
137	5.6			
138	5.88			
139	6.27			
140	6.51			
141	6.71			
142	6.91			
143	7.03			
144	7.22			
145	7.18			
146	7.27			
147	7.15			
148	6.97			
149	6.78			
150	6.6			
151	6.41			
152	6.2			
153	6.11			
154	6.07			
155	5.79			
156	5.61			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ DF

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
161	4.68
162	4.49
163	4.25
164	4.02
165	3.97
166	4
167	3.86
168	3.89
169	3.84
170	3.82
171	3.8
172	3.91
173	4.13
174	4.19
175	4.19
176	4.28
177	4.31
178	4.47
179	4.51
180	4.28
181	4.33
182	4.19
183	3.92
184	3.63
185	3.36
186	2.96
187	2.53
188	2.25
189	1.73
190	1.28
191	0.9
192	0.46
193	0.16

บริเวณ FD

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
194	0.42
195	0.82
196	1.23
197	1.6
198	2.07
199	2.42
200	2.8
201	3.31
202	3.57
203	4.05
204	4.3
205	4.77
206	5.12
207	5.3
208	5.5
209	5.53
210	5.48
211	5.27
261	10.49
262	10.01
263	9.37
264	8.88
265	8.38
266	7.79
267	7.35
268	6.78
269	6.6
270	5.92
271	5.63
272	5.25
273	4.9
274	4.67
275	4.33
276	4.26
277	4.01
278	3.88

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
281	3.35
282	3.53
283	3.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ FH

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
212	4.83
213	4.33
214	3.67
215	3.51
216	3.36
217	3.15
218	2.76
219	2.67
220	2.85
221	2.71
222	2.56
223	2.53
224	2.64
225	2.71
226	2.74
227	2.79
228	2.88
229	2.98
230	3.28
231	3.55
232	3.78
233	3.96
234	4.06
235	4.13
236	4.43
237	4.9
238	5.18
239	5.48
240	5.98
241	6.03
242	6.58
243	6.62
244	6.9
245	6.58
246	7.55
247	7.75
248	8.01

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
249	7.51
250	7.73
251	7.96
252	7.92
253	8.48
254	8.77
255	9.08
256	9.19
257	9.49
258	9.82
259	10.22
260	10.5

บริเวณ FB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
284	3.09
285	2.53
286	2.15
287	1.8
288	1.34
289	0.99
290	0.73
291	0.21

บริเวณ HB

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
321	0.17
322	0.53
323	0.95
324	1.31
325	1.74
326	2.05
327	2.5
328	2.83
329	3.27
330	3.73
331	3.97
332	4.27
333	4.61
334	4.82
335	4.96
336	5.08
337	5.14
338	5.26
339	5.35
340	5.51
341	5.72
342	5.92
343	6.06
344	6.23
345	6.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณ HF

มุม (องศา)	อัตราส่วน (dB)
346	6.11
347	5.81
348	5.6
349	5.2
350	5.12
351	4.99
352	4.73
353	4.61
354	4.27
355	4.06
356	3.71
357	3.65
358	3.49
359	3.38
1	3.23
2	3.13
3	3.04
4	3.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. **J. Tagapanij**, C. Phongcharoenpanich, **P. Akkaraekthalin** and M. Krairiksh, **"A Dual Feed Switched-Beam Patch Antenna for a Phased Array of Switched-Beam Elements,"** Proc. of 2006 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, Vol.3, pp.2102-2105, 2006.
2. **J. Tagapanij**, C. Phongcharoenpanich, P. Akkaraekthalin, and M. Krairiksh, **"Phased Array of Switched-Beam Elements for Handset Adaptive Antenna,"** Proc. of 2007 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 137-140, Jan. 2007.
3. **J. Tagapanij**, and M. Krairiksh, **"Practical Consideration of Dual-Feed Switch-Beam Patch Antenna in a Phased Array Antenna Design,"** Proc. of 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Vol.3, pp.1- 4, Dec. 2007.
4. **J. Tagapanij**, S. Chatasuk, P. Arpattong, S. Janin and M. Krairiksh, **"A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna,"** Proc. of 2007 International Symposium Antenna and Propagation, pp.382-385, 2007.
5. **J. Tagapanij**, P. Sooksumrarn, T. Tantisopharak,S. Janin and M. Krairiksh, **"A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna for WLAN Application,"** IEICE Trans. Commun., Vol. E91-B, No. 6, pp. 1791-1800, June 2008.
6. **J. Tajapanij** and M. Krairiksh, **"Phased Array of Switched-Beam Elements for Angle-of-Arrival Measurement,"** Proc. of 2009 International Symposium on Antenna and Propagation, pp.117-120, Oct. 2009.
7. M. Krairiksh and **J. Tagapanij**, **"Phased Array of Switched-Beam Element for Enhanced Performance of Estimation of Angle of Arrival,"** Submitted to IEEE Transactions on Antennas and Propagation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E91–B, NO.6 JUNE 2008

PAPER *Special Section on 2007 International Symposium on Antennas and Propagation*

A Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna for WLAN Application

Jukkrit TAGAPANIJ[†a)], Pobsook SOOKSUMRARN[†], Tanawut TANTISOPHARAK[†], Suwan JANIN[†], *Nonmembers, and* Monai KRAIRIKSH[†], *Member*

SUMMARY Due to the demand of dual-band modern wireless communications, this paper presents a dual-band patch antenna for IEEE802.11 a and g wireless local area network (WLAN) system. The antenna has bidirectional patterns that can be switched by an RF switch to select the feeding probe positions. The 2.4 GHz and 5.2 GHz patches are stacked on a ground plane and are matched to the RF switch by open stubs. Analysis and design are illustrated and throughput improvement is demonstrated in an indoor environment.

key words: dual-band antenna, dual-feed patch antenna, switched-beam patch antenna, WLAN

1. Introduction

In modern wireless communication systems, performance of the system is seriously degraded by multipath fading and co-channel interference. The multipath fading is caused by the different path lengths with different arriving angles that arise from the transmitted signal impinging on objects in the environment, while the co-channel interference is experienced as the undesired signal with co-channel frequency from the access points or user terminals. To reduce these problems, the switched-beam antenna is one of the effective approaches. It provides moderate performance with simple system. Therefore, many researches were conducted to develop switched-beam antennas. Kuga and Arai proposed a four-beam switched array antenna by using the 90° hybrid couplers and switching input terminals of hybrid couplers to carry out the beam switching [1]–[3]. Yaklich, et al. developed a four-notch switched-beam antenna that has low profile with increased bandwidth [4]. Lan presented a low cost, low profile microstrip patch antenna with switched-beam radiation pattern with high gain and relatively wide bandwidth [5]. Wu, et al. [6] utilized MEMS switches for beam steering of a microstrip patch antenna. It provides quasi-conical beams for mounting on a mobile terminal. Mehta, et al. [7] proposed a single-arm rectangular spiral antenna with a hybrid switch network. Sixteen possible switching beams are obtained with uniform gain. Tamaki, et al. [8] proposed a low-profile switched-beam antenna with single feeding structure. Two-beam switching characteristics were demonstrated by the antenna with two coupling ports and RF switch. A switched-beam patch antenna was designed based on a higher mode square patch. Beam-switching was accomplished by turning on and off PIN diodes embedded on the patch edges [9]. It can improve diversity gain in wireless communications and was used as elements of a circular array to provide a large number of patterns [10]. The antenna in [9] utilized eight PIN diodes embedded on each edge of the antenna resulting in difficult in fabrication and expensive. Tagapanij, et al. proposed the attractive antenna that used an RF switch to select the feeding probe instead of embedded PIN diodes [11]. Nevertheless, the antennas in [9] and [11] have narrow band characteristics. According to modern wireless communications require dual-band, triple-band and wide-band operations, the development of antennas to serve the above requirements is important. Dual-band antennas have been widely developed [12]–[14] but they have fixed antenna patterns.

This paper extends the work in [15] that proposed a dual-band patch antenna that the radiation pattern can be switched. It is a stacked-patch antenna that operates in a higher mode and has bidirectional patterns. The stacked-patch is analyzed and appropriately combined to provide dual-band characteristics. The feeding probe can be selected by using an RF switch to change the radiation pattern.

The outline of the paper is as follow. A principle of the proposed antenna is described in Sect. 2. Then, characteristics of an isolated patch and integrated patches are analyzed in Sect. 3. The dual-band dual-feed switched-beam patch antenna is characterized in Sect. 4. The paper is concluded in Sect. 5.

2. Principle of a Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna

A dual-feed switched-beam patch antenna is a square patch with length of each side is w. The patch height is h with dielectric constant of the substrate ε_r. The patch is located on xy plane and is fed by a probe located either at $(x_f, 0, 0)$ or $(0, y_f, 0)$. The pattern can be switched by a single pole double throw (SPDT) switch located on the bottom side of the antenna. The antenna width along the x and y axes are one wavelength in dielectric substrate (λ_d). Therefore, electric fields E_z on the apertures are in phase. The electric field distribution is either the TM_{020} or TM_{200} mode depending on the feeing probe position [11].

Manuscript received October 29, 2007.
Manuscript revised January 22, 2008.

[†]The authors are with the Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
a) E-mail: jukkrit@mut.ac.th

DOI: 10.1093/ietcom/e91–b.6.1791

Copyright © 2008 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

When two antennas are designed to operate at two frequencies, i.e., low frequency f_l and high frequency f_h, the corresponding antenna widths are w_l and w_h, respectively. The feeding probe positions on x and y axes of the low and high frequencies are x_{fl}, y_{fl} and x_{fh}, y_{fh}, respectively. The high frequency antenna is stacked on the low frequency one as shown in Fig. 1(a). The feeding network consisting of a SPDT RF switch and two dual-band power combiners are mounted on the other side of the antenna, beneath a ground plane, see Fig. 1(b). The RF switch is used for switching the beam directions while the power combiners are used for combining powers from the two antennas.

Comparing with the disc-loaded monopole antenna [16] which its height is about the width of the disc, the proposed antenna in this paper is a low profile antenna. Its height equals thickness of substrate of the two antennas and the feeding system. When dielectric constant is of around 4, the patch width is around half wavelength in free space. The patch width is wider than the disc diameter but height is significantly reduced. Nevertheless, the important feature of this antenna is its beam switching capability while the disc-loaded monopole antenna provides a fixed beam omnidirectional pattern.

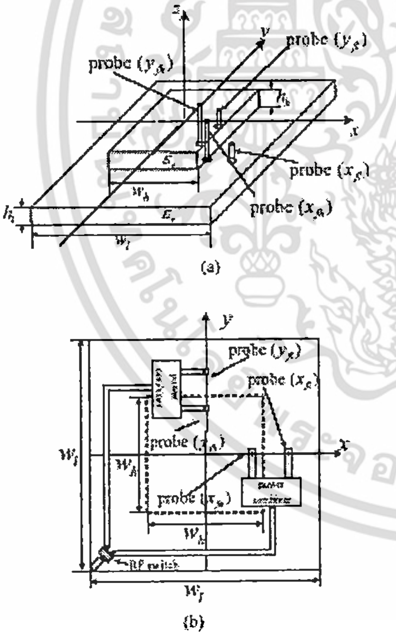


Fig. 1 Geometry of a dual-band dual-feed switched-beam patch antenna. (a) Perspective view, (b) Bottom view.

3. Analysis of a Dual-Band Dual-Feed Switched-Beam Patch Antenna

3.1 Isolated Patch Antenna

The antenna can be fabricated on different substrate with different dielectric constant, height h and width w. This subsection shows analysis of an isolated antenna fabricated on an FR-4 PCB. The ε_r and loss tangent are 4.4 and 0.02, respectively. h is fixed at 0.8 mm. Analysis of the antennas, by using CST electromagnetic simulator [17], that will be operated in the 2.4 GHz band and 5.2 GHz band are illustrated. The antenna width w_l and w_h for the 2.4 and 5.2 GHz bands are 60 mm and 27.6 mm, respectively. Ground plane width of each isolated patch is equal to the width of each patch. Characteristics of the antenna operating at 2.4 GHz band are shown in Fig. 2. Figure 2(a) shows effect of x_{fl} on input impedance when 8 mm $\leq x_{fl} \leq$ 20 mm. It is obvious that x_{fl} equals 20 mm provides the lowest S_{11} but frequency is slightly shifted. When x_{fl} equals 8 mm, it provides the lowest S_{11} at 2.4 GHz. H-plane patterns (xy plane) are shown in Fig. 2(b). It was suggested in [18] that the antenna operating at TM_{020} or TM_{200} mode should be fed by a probe located at around 0.25 of the patch width from the center. The patterns in Fig. 2(b) with x_{fl} of 8 mm ($0.13w_l$) is almost a circular shape (with null of −3 dB) due to the probe is close to the center and excites the patch in both TM_{020} and TM_{200} modes. The suitable pattern is obtained when x_{fl} is 14 mm ($0.23w_l$) and has null of −17 dB. On the other hand, the patch fed at x_{fl} of 20 mm ($0.33w_l$) has sidelobe level of −5 dB due to field distributions in the non-radiating apertures of the patch are not symmetrical and result in non-zero magnetic

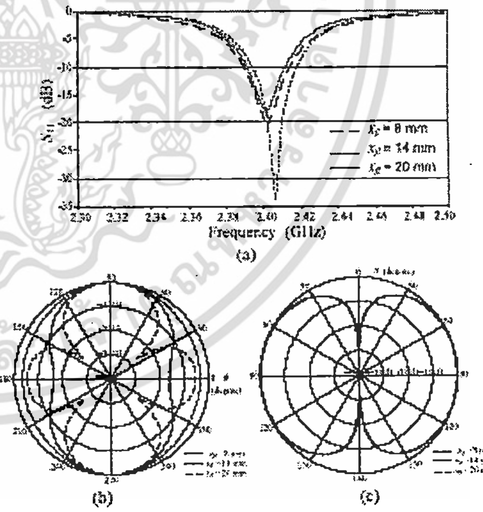


Fig. 2 Simulated characteristics of the antenna operating at 2.4 GHz. (a) S_{11}, (b) H-plane pattern (xy), (c) E-plane pattern (zy).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

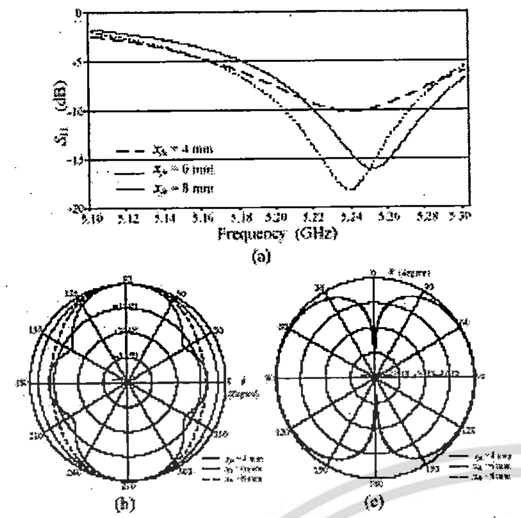


Fig. 3 Simulated characteristics of the antenna operating at 5.2 GHz. (a) S_{11}, (b) H-plane pattern (xy), (c) E-plane pattern(zy).

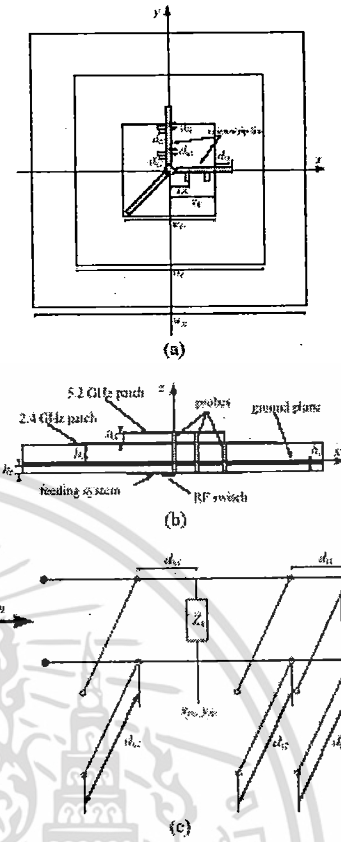


Fig. 4 Antenna feeding system. (a) Bottom view, (b) Side view, (c) Equivalent circuit.

currents. It is obvious that the feeding position does not affect to the E-plane pattern (zy plane) as shown in Fig. 2(c). It can be pointed out that the antenna is designed with w_l equals 60 mm, x_{fl} equals 14 mm and y_{fl} equals 14 mm.

Figure 3 shows S_{11} and radiation pattern of the antenna operating at 5.2 GHz band when w_h equals 27.6 mm. It is shown in Fig. 3(a) that x_{fh} equals 8 mm provides the lowest S_{11}. However, the satisfactory feed is obtained when x_{fh} equals 6 mm in Fig. 3(b) while x_{fh} has no effect on E-plane pattern as illustrated in Fig. 3(c). The patterns in Fig. 3(b) do not have deep null since the patch width is smaller than that of the one in Fig. 2(b). According to the total pattern is the summation of the pattern of the patch and the feeding probe, the contribution from the probe has pronounced effect when the patch is small.

3.2 Integrated Patch Antenna

Since patch width and feeding position have significant effects on radiation pattern and impedance, they must be appropriately designed with simple structure. We decided to use open stubs to match the antenna at 2.4 GHz and 5.2 GHz. Figures 4(a), 4(b) and 4(c) show the feeding system and an equivalent circuit of the antenna. In order to provide low cost antenna, an FR-4 substrate with dielectric constant of 4.4 is used. The copper thickness h_c which is the thickness of the ground plane is 0.0035 mm. The high frequency patch operating at 5.2 GHz is mounted on the low frequency patch operating at 2.4 GHz. The former and the latter substrate height h_h and h_l are 0.8 and 1.6 mm, respectively. The corresponding widths are w_h and w_l, respectively. The proposed antenna will be installed on a ceiling and radiates bidirectional patterns with main beam tilted down to cover the space beneath the antenna. In order to obtain radiation patterns at both frequencies that cover θ equals 45°, a ground plane with width w_g is installed directly beneath the low frequency patch. It is used as a common ground plane of both the low frequency patch and the feeding system. The substrate height h_f, shown in Fig. 4(b), is 0.8 mm. The feeding probe of the low frequency patch is at either x_{fl} or y_{fl} while that of the high frequency one is at either x_{fh} or y_{fh}. The RF switch is connected to the antenna through a microstrip transmission line with double stub and single stub for low and high frequencies positioned at d_{l1} and d_{h1}, respectively. The stubs provide a simple design with simple fabrication process. The open stub of length d_{l3} is positioned at the low frequency feeding probe.

According to the principle in Sect. 2, the antenna widths for the 2.4 GHz and 5.2 GHz are one wavelength in dielectric constant of 4.4. Hence, w_l and w_h are 55.0 mm and 27.4 mm, respectively. In addition, to obtain patterns that cover θ equals 45°, the patches should have ground plane with width larger than their width [18]. The patch operating at 5.2 GHz has the patch operating at 2.4 GHz be-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

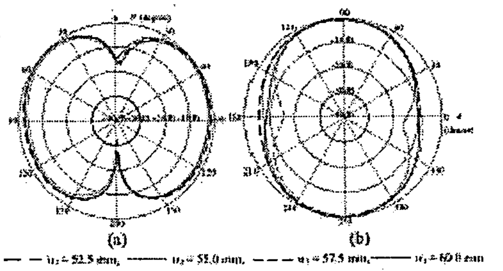


Fig. 5 Radiation patterns at 2.4 GHz when w_h = 27.4 mm, w_l = 52.5, 55, 57.5 and 60 mm. (a) E-plane (zy), (b) H-plane(xy).

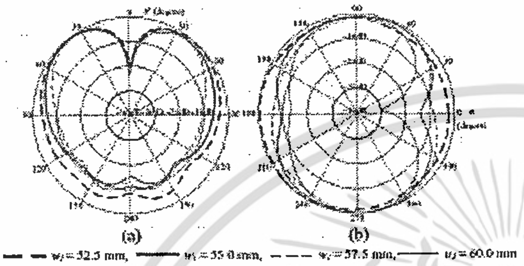


Fig. 6 Radiation patterns at 5.2 GHz when w_h = 27.4 mm, w_l = 52.5, 55, 57.5 and 60 mm. (a) E-plane (zy), (b) H-plane (xy).

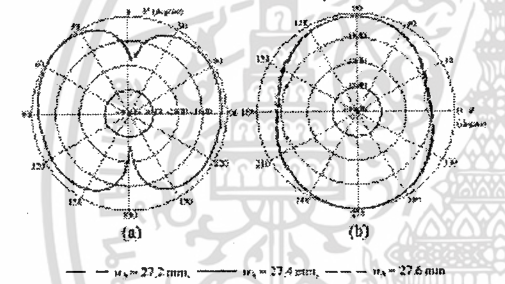


Fig. 7 Radiation patterns at 2.4 GHz when w_l = 55.0 mm, w_h = 27.2, 27.4 and 27.6 mm. (a) E-plane (zy), (b) H-plane (xy).

haves as its ground plane. The ground plane width w_g equals 1.5 w_l can provide the satisfactory patterns. Hence, w_g is equal to 80 mm. Let us first consider radiation pattern from this integrated antenna. The E-plane is considered when θ is varied with fixed ϕ of 90°. The H-plane is considered when ϕ is varied with fixed value of 45° for θ. In this investigation, x_{fl} and y_{fl} are one quarter of w_l from origin while x_{fh} and y_{fh} are on quarter of w_h. Figures 5(a) and 5(b) show E-plane and H-plane patterns of the antenna operating at 2.4 GHz. It should be noted that varying w_l from 52.5 mm to 60 mm results in x_{fl}/w_l between 0.27 and 0.23. It is close to 0.25 and still excites the TM_{020} mode. As w_h is fixed at 27.4 mm, w_l is varied from 52.5 mm to 60 mm. Figure 6 shows E-plane and H-plane patterns of the antenna operating at 5.2 GHz with the same condition of the previous one. The ratio of x_{fh}/w_h is fixed while w_l is varied. Note that w_l equals 55.0 mm has the deepest null in the pattern. It is due to the contribution of the patterns of patches with widths of w_l and w_h. The mode in the patch of w_h remains being TM_{020} while the larger the w_l the more contribution to the high frequency pattern and the total pattern. By calculating envelope correlation [9], it provides the lowest value at 2.4 GHz and 5.2 GHz are 0.056 and 0.008, respectively. We fixed w_l of 55.0 mm and consider effect of w_h on radiation patterns at 2.4 GHz and 5.2 GHz in Fig. 7 and Fig. 8. Impedances and S_{11} of the antenna were simulated when w_h equals 27.2 mm, 27.4 mm and 27.6 mm. At 2.4 GHz, the corresponding impedances are 44.3 − j24.3 Ω, 45.1 − j25.7 Ω and 44.9 − j28.5 Ω, respectively. S_{11} at 2.4 GHz of these impedances are −11.7 dB, −11.5 dB and −10.7 dB, respectively. When the frequency of 5.2 GHz is considered, impedances when w_h equals 27.2 mm, 27.4 mm and 27.6 mm are 73.9 − j22.7 Ω, 69.7 − j4.3 Ω and 66.9 + j15.5 Ω, respectively. The corresponding S_{11} are −12.6 dB, −15.6 dB and −13.5 dB, respectively. The patterns are not significantly different but w_h equals 27.4 mm provides good impedance matching.

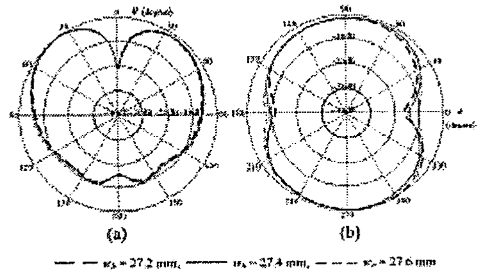


Fig. 8 Radiation patterns at 5.2 GHz when w_l = 55.0 mm, w_h = 27.2, 27.4 and 27.6 mm. (a) E-plane (zy), (b) H-plane (xy).

Let us consider a double stub for matching the low frequency antenna at 2.4 GHz. d_{l3} was varied from 2.5 mm to 3.5 mm and 4.5 mm. Corresponding impedances of the antenna at 2.4 GHz are 54.5−j27.9 Ω, 45.1−j25.7 Ω and 35.4−j21.9 Ω, respectively. Those at 5.2 GHz are 80.5 − j23.5 Ω, 69.6 − j4.3 Ω and 41.7 − j12.5 Ω, respectively. It was found that S_{11} of these three lengths of d_{l3} at 2.4 GHz and 5.2 GHz are −11.6 dB, −11.5 dB, −10.9 dB and −10.6 dB, −15.6 dB, −16.5 dB, respectively. Hence, d_{l3} equals 3.5 mm is suitable. The stub for the high frequency antenna at 5.2 GHz is fixed at d_{h1} equals 0 mm and has length d_{h2} of 0.5 mm, the low frequency stub length is fixed at d_{l1} equals 2.0 mm and d_{l2} is varied from 0.5 mm to 2.5 mm. Figure 9 shows that as d_{l2} is increased, resistance at 2.4 GHz markedly decreases while reactance is not changed. On the other hand, resistance at 5.2 GHz slightly decreases with almost unchanged in reactance. We have changed d_{l1} to 2.5 mm and found the similar results. It should be noted that d_{l1} has less effect on antenna impedance at 2.4 GHz. With d_{l1} equals 2.0 mm and d_{l2} equals 2.5 mm, input impedance at 2.4 GHz and 5.2 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tanawut Tantisopharak was born in Bangkok, Thailand. He received the B.Eng. degree from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2005. He is currently working toward the M.Eng. degree at the same institute. His main research interest is in adaptive antenna.

Suwan Janin was born in Chiangmai, Thailand. He received the B.IT. and M.Eng. degree in telecommunications from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 2002 and 2004, respectively. He is currently working toward the D.Eng. degree at the same institute. Mr. Janin received an award from Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) Ph.D. Program, Thailand Research Fund, for 2004 to 2007. Now, Mr. Janin is currently an Assistant Researcher at National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) in Thailand's science park. His research deeply interests are in antenna design for wireless communications, beam scanning antenna system, microwave imaging and microwave for agricultural applications.

Monai Krairiksh was born in Bangkok, Thailand. He received the B.Eng., M.Eng., and D.Eng. degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 1981, 1984, and 1994, respectively. In 1981, he joined the KMITL and is presently a Professor in the Department of Telecommunication Engineering and serves as the leader of the Wireless Communication Laboratory, at the Research Center for Communications and Information Technology. His main research interests are in antennas for mobile communications, and microwave for industrial applications. Dr. Krairiksh is a Member of the Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology Association (ECTI), Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายจักรกฤช ตรรกพาณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2541 และระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2545 และได้เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี 2546

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้